



Klasik ve alttan alıŖlı dolusavak havalandırıcı performanslarının sayısal modelle incelenmesi

Investigation of clasical and bottom-inlet spillway aerator performances by numerical model

Mehmet Cihan Aydın^{1,*} , Muhammed ReŖid Özdemir² 

^{1,2} Bitlis Eren Üniversitesi, İnŖaat Mühendisliđi Bölümü, 13100, Bitlis Türkiye

Özet

Barajların hidrolik açıdan en önemli elamanı olan dolusavaklar baraj tipine ve geçireceği debilere göre birçok farklı tipte tasarlanmaktadır. Dolusavaklar tasarlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri de kavitasyon önleyici havalandırıcılardır. Bu çalışmada dolusavaklarda beton yüzeyinde oluşan kavitasyon hasarı ve dolusavak havalandırıcılarının kavitasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla seçilen bir dolusavağı modelinin üç boyutlu sayısal modeli hazırlanıp farklı Froude sayılarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiđi (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı bir havakandırıcı tipi olan alttan alıŖlı havalandırıcı modele yerleştirilerek orijinal havalandırıcılara benzer şekilde HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve her iki havalandırıcının da kavitasyon hasarından yeterince korunduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrıca literatürdeki farklı tip ve yöntemlerle elde edilen havalandırıcı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dolusavak, Flow 3D, Havalandırıcı, Kavitasyon, Sayısal analiz, HAD

1 GiriŖ

Barajlar başta enerji üretimi, içme ve sulama suyu temini, taşkın kontrolü gibi çeŖitli amaçlarla ve farklı tiplerde (Beton ağrılık, dolgu, kemer, SSB gibi) inşa edilirler. Hangi amaç ve tipte inşa edilirse edilsin barajların en önemli elemanlarından biri dolusavaklardır. Bu önemli su yapılarının tasarlanması ve iŖletilmesi büyük bir mühendislik hizmeti gerektirir. Özellikle yüksek düşölü ve yüksek debili dolusavakların tasarımında iki türlü oyulma/aşınma problemi vardır. Bunlardan biri, yüksek enerjiden dolayı dolusavak mansabındaki yerel oyulmalar, diğeri ise yüksek hızlara maruz dolusavak yüzeylerinde meydana gelen kavitasyon hasarlarıdır. İlk bahsedilen hasarlar, çeŖitli enerji kırıcı elemanlar sayesinde önlenmeye çalışılır. Kavitasyon hasarından korunmanın ise çeŖitli yolları bulunmakla birlikte en etkili yöntem doğal havalandırıcı aygıtlar yerleŖtirmektir. Kavitasyon, teorik olarak, sıvı içindeki basıncın buhar basıncı altına düşmesi sonucu akım içinde gaz kabarcıklarının oluşması olayına denir. Kavitasyon olayının

Abstract

The spillways, which are the most important hydraulic elements of the dams, are designed in many different types according to the dam type and flow rates. One of the most important issues to be considered when designing spillways is the design of the aerators. In this study, the cavitation damage on the concrete surface of spillways and the effects of aerators on the cavitation wer investigated. For this purpose, a three-dimensional numerical model of a selected spillway model was prepared and Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes were performed in different Froude numbers. Later, a different type of aerator called as the bottom-inlet aerator was placed in the model and CFD analyzes were performed similar to the original aerators. The results obtained from the CFD analysis were compared with each other and it was concluded that both aerators were sufficiently protected from cavitation damage. The results obtained were also compared with the aerator results obtained with different types and methods in the literature.

Keywords: Spillway, Flow 3D, Aerator, Cavitation, Numerical analysis, CFD

mühendislikteki önemi ise, sistemler içinde yüksek hızlı akım sonucu oluşan kavitasyon kabarcıklarının yüksek basınç bölgelerine rastladığında tekrar sıvı faza geçmeleri sırasında oluşturduğu patlamalardan kaynaklı yüzey aşınmalarıdır. Literatürde genel görüş, akım hızlarının 20-30 m/s arasında kavitasyon oluşabileceği kabul edilmektedir [1-3]. Havalandırıcılar, dolusavak Ŗut kanalları üzerindeki yüksek hızlı su jeti altında yapay olarak oluşturulan boşluk içinde meydana gelen atmosfer altı basınçlar sayesinde, dışarıdan hava emmek suretiyle çalışıp kavitasyon önleme etkili olurlar. Gerekli hava konsantrasyonu havalandırıcının boyutları ve tasarımıyla ilgilidir

Son yirmi yıl içerisinde dolusavak ve havalandırıcılar için yapılan bazı çalışmaların özeti sıralanmıştır; Nie [4], yüzeyleri kavitasyon hasarından korumak için yapay olarak pürüzlendirilmiş yüzeyler üzerinde çalışmıştır. Kökpınar ve Göğüş [5], havalandırıcılar üzerinde kapsamlı bir deneysel çalışma yürüterek havalandırıcı tasarımında kullanılabilecek faydalı bazı bağıntı ve kriterler belirlemiŖlerdir. Boes ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mcaydin@gmail.com (M. C. Aydın)

GeliŖ / Recieved: 02.02.2021 Kabul / Accepted: 29.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

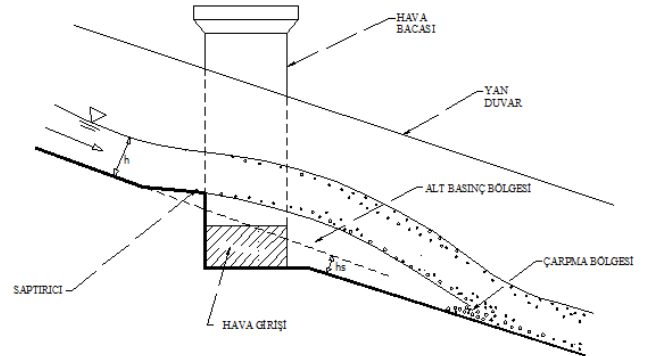
doi: 10.28948/ngumuh.873077

Hager [6], Aydın [7] ve Öztürk ve ark. [8], geniş dolusavaklarda Ilısu Barajına benzer olan “Alttan Alışlı Havalandırma” sistemini önermişlerdir. Hesaplamalarında HAD kullanarak deneysel çalışmalarla havalandırma performansını incelemişlerdir. Daha sonra Aydın [9] deneysel bir çalışmaya dayalı olarak alttan alışlı dolusavak havalandırıcıdan elde edilen sonuçları geleneksel havalandırıcı tipleri için literatürde verilen ampirik bağıntılarla karşılaştırmış ve alttan alışlı havalandırıcıların çok daha iyi havalandırma performansı sağladığını ortaya koymuştur. Chen et al. [10], girdaplı düşüyle tasarlanan bir şaft tünelinin özelliklerini laboratuvar ortamında incelemişlerdir. L şeklinde olan kanal ile birleştirilen şaft yapısında birkaç noktadan ölçümler yapmıştır. Hidrolik yapılarda kavitasyon riskinin de göz alınması gerektiğini belirtilen makalede, teorik analize göre deşarj arttığında kavitasyon riskinin de artacağı bilindiğinden şaftlarda bu riski azaltmak için havalandırıcıların önemi vurgulanmış ve uygulamalarda dikkate alınması önerilmiştir. Zhang et al. [11], hidroelektrik santrallerde yüksek basınçlı akımların sebep olduğu kavitasyon hasarlarının havalandırıcılar yardımıyla ekonomik olarak çözülebileceğini belirtmişlerdir. Sayısal modelleme yardımıyla, realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli, akışkan hacimleri (VOF) ve hava karışım (mixture) modellerini kullanılarak karmaşık bir akımı analiz etmişlerdir. Elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Pfister ve Chanson [12], çalışmalarında; iki fazlı (su-hava) akımların deneysel çalışmalarında ölçek etkilerine dikkat edilmesi gerektiğini, bilinen faktörlere ilave olarak yeni bazı faktörler elde etmeyi amaçlamışlardır. Çift fazlı akım deneylerinde model ve prototip Froude, Weber ve Reynold sayılarının aynı olması gerektiği fakat bunun ancak tam (prototip) boyuttaki çalışmalarda mümkün olabileceği, ölçek etkilerinin doğru belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğu, kabarcık boyutu ve türbülans ölçekleri gibi bazı parametrelerin büyük ölçekli laboratuvar modellerinde bile ölçek etkilerinden etkilenebileceği belirtmişlerdir. Kamel ve Abdulhameed [13], Ogee tepeli dolusavaklar üzerinde, basınç ve enerji dağılımını belirlemek için 1/50 ölçekli fiziksel model üzerinde çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlar, dolusavağın konumunun enerji değişiminde etkisi olmadığını göstermiştir. Marquez et al. [14], kademeli dolusavaklarda yüksek debilerde kavitasyon meydana geleceğini belirterek, kavitasyondan korunmak için akımda serbest jet oluşumuna izin veren bazı havalandırıcı elemanlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında farklı akım koşullarında jet uzunluklarının değiştiğini ve jetin çarpma noktasının membasında basınçların sifira yakın olduğunu belirtmişlerdir. Daneshfaraz et al. [15], yapay bloklarla pürüzlendirilmiş bir Ogee-profil dolusavağı üzerindeki enerji sönümlemesi ve jet uzunluğunu HAD kullanarak incelemişlerdir. Diğer bazı araştırmacılar gibi bu araştırmacılar da serbest yüzeyli akım koşullarını simüle edebilmek için Akışkan Hacmi (VOF) yöntemi ve türbülans modeli olarak da RNG $k-\epsilon$ modeli kullanmıştır. Sayısal simülasyondan elde edilen sonuçlar tatmin edici bulunmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1. Havalandırıcı tasarımı

Klasik olarak bir dolusavak havalandırıcısı, şüt kanalı üzerine enine yerleştirilen bir oluk, bir sıçratma rampa ve/veya eşiği ile su jeti altındaki boşluğu atmosfere açan havalandırma bacalardan meydana gelir. Dolusavak şüt kanallarının maruz kaldığı yüksek hızdaki akım rampa ve/veya eşik sayesinde tabandan ayrılarak su napı altında bir boşluk oluşturulur. Atmosferaltı basınca maruz bu boşluğa tabandaki oluk ve havalandırma bacaları sayesinde hava sağlanır. Basınç farkı sayesinde giren bol miktardaki hava akıma karışarak havalandırıcı mansabındaki beton yüzeyi kavitasyona karşı korur. Bu havalandırma mekanizması dışında tabandan yükselen su jetinin alt ve üst naplarında hava sürüklenmesi nedeniyle de hava girişi sağlanır. Chanson [16], farklı tipteki havalandırıcıların özellikleri incelenmiş ve genelde yukarıda bahsedilen bu tip havalandırıcıların en iyi tasarım olduğunu belirtmiştir. Klasik tip bir havalandırıcının elemanları Şekil 1’de gösterilmiştir. Ayrıca farklı tip dolusavak havalandırıcıların tasarımıyla ilgili detaylar Volkart ve Chervet [17], Volkart ve Rutschmann [2], Aydın [7], Kells ve Smith [18], Rutschmann ve Hager [19], Cassidy ve Elder [20] gibi araştırmacıların çalışmalarında verilmektedir.



Şekil 1. Klasik tip bir havalandırıcının elemanları [7]

2.2. Kullanılan havalandırıcı modelleri

Bu çalışmada klasik bir model olarak Alparslan II Barajı dolusavağı seçilmiştir. Alparslan II barajı mansabında Muş Ovası yer almaktadır. Bu çerçevede, Murat Nehrine mansaplanan Karasu Nehrinin taşkınlarından Muş Ovası'nı korumak için Alparslan II barajı rezervuarında taşkın kontrol hacmi ayrılmıştır. Talvegden yüksekliği 99 m olan barajın asıl amaçları enerji üretimi, sulama, taşkından korumak olarak tasarlanmıştır. Projenin sonunda yıllık 780 Gwh/yıl elektrik enerji üretimi amaçlanmaktadır. Barajın dolusavağı sol sahile yerleştirilmiş olup barajın gövdesi asfalt çekirdekli kum-çakıl-kaya dolgu olarak yapılmıştır. Barajın dolusavak karakteristikleri Tablo 1’de verilmiştir.

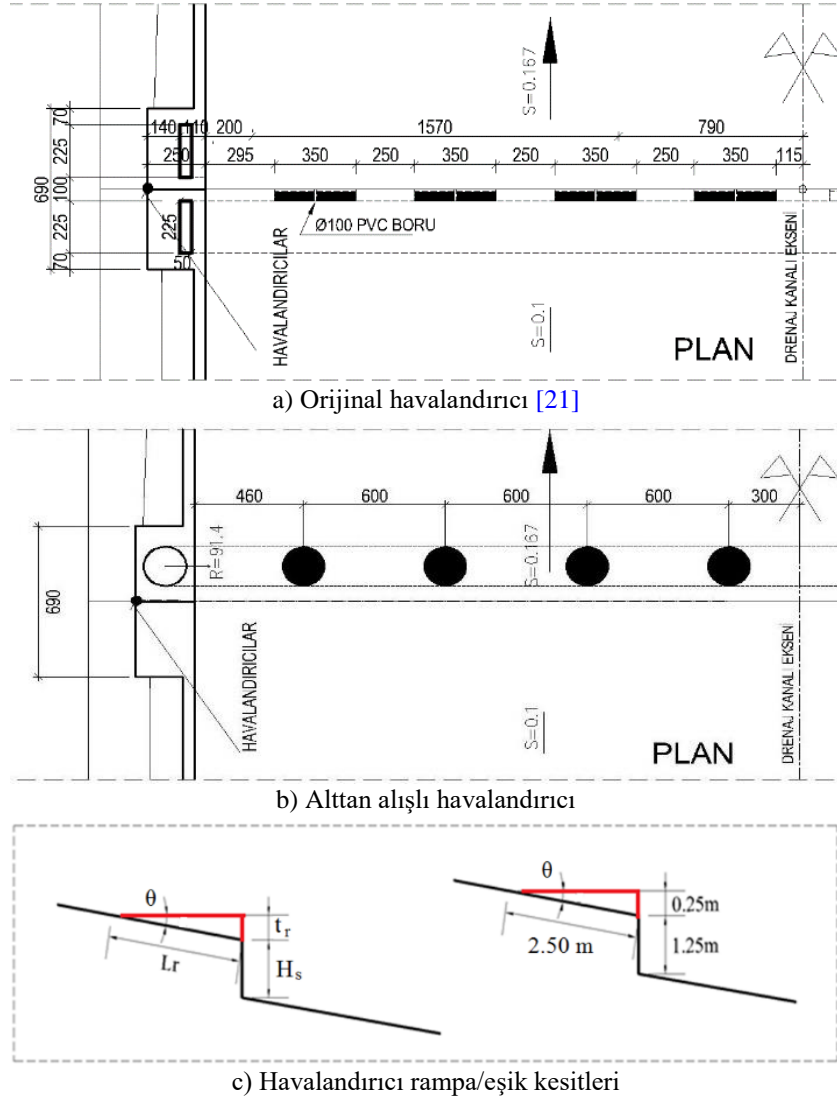
Başlangıçta genişliği 71 m olan dolusavağın membaya doğru genişliği 19.80 m azalarak 51.20 m’ye düşmektedir. Şüt kanalının uzunluğu 539 m’dir. Şüt yapısının sonunda enerji kırıcı bir havuz yerleştirilmiştir.

Tablo 1. Alpaslan II Barajı dolusavağının özellikleri [21]

Dolusavak pik debisi	6 705.80 m ³ /s
Tipi	Radyal Kapaklı
Kapak adedi	5
Kapak Genişlik x Yüksekliği	11.00 x 13.00
Dolusavak toplam brüt genişliği	71.00 m
Dolusavak toplam net genişliği	55.00 m
Dolusavak yaklaşım kanalı kotu	1 350.00 m
Dolusavak eşik kotu	1 355.50 m

Alparslan II Barajı dolusavağı havalandırıcıları ve mevcut havalandırıcıya alternatif olarak Aydın [7] tarafından önerilen alttan alışı havalandırıcıların Şekil 2’de verilen planlara göre sayısal modelleri hazırlanıp HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Orijinal havalandırıcı şut kanalı boyunca yerleştirilen bir ana galeri, bu galeriye ve jet altı boşluğa açılan iki taraflı toplamda dört adet bacadan oluşmaktadır. Şut kanalı üzerindeki akım ana galeri ile oluşturulan bir eşik

(basamak) ve ana galeri üzerine yerleştirilmiş bir rampa (saptırıcı) ile şut yüzeyinden saptırılmaktadır. Böylece ikincil bacaların beslediği jet altı havalandırma boşluğu oluşturularak yanlardan jet altına hava girişi sağlanması amaçlanmıştır. Ana havalandırma bacaları dikdörtgen kesitli olup yan duvarlar içine düşey bir şekilde konumlandırılmıştır. Ana havalandırma galerisinin içerisinde su birikmesini önlemek amacıyla şut kanalı genişliği boyunca belirli aralıklarda Ø100’lük drenaj boruları yerleştirilmiştir. Ana galeri ile su jeti altındaki havalandırma boşluğu arasındaki bağlantı belli aralıklarda yerleştirilen dikdörtgen kesitli havalandırıcı kanallarıyla sağlanmıştır. Orijinal havalandırıcı tasarımı yerine kullanılacak olan Alttan alışı havalandırıcı modelinde bir saptırıcı (rampa), ve bu saptırıcının hemen mansabında şut tabanı üzerinde kanal genişliği boyunca belirli aralıklarla aynı çaptaki dairesel kesitler ve bu kesitleri besleyecek ana galeri yerleştirilmiştir. Aydın [7] tarafından verilen modelden farklı olarak rampa ile birlikte orijinal projedekine benzer bir eşik kullanılmıştır.



Şekil 2. Havalandırıcı modellerin plan detayları

2.3. Sayısal model

Bu çalışmada akışkanlar konusunda ve birçok mühendislik alanlarında tercih edilen Flow 3D sayısal analiz programı kullanılmıştır. Flow 3D, laminer ve türbülanslı, tek ve çok fazlı karmaşık akımların hareketini, akışkanın lineer olmayan temel bünye denklemleri ve literatürdeki bazı ampirik yaklaşımlarla birlikte çözerek simüle eden ileri düzey bir HAD paket programıdır. Özellikle serbest yüzeyli akışların simülasyonunda kullanılan Flow-3D üç boyutlu süreklilik ve hareket (RANS) denklemlerinden oluşan diferansiyel denklem sistemini sonlu hacimler yöntemiyle çözer. Oluşturulan katı modellerin nap yüzeyinden giren hava miktarını belirlemek için Flow 3D'de Hava Giriş Modeli (*Air Entrainment Model*) kullanılmıştır. Hava Giriş Modeli, türbülans ve akış durumundan dolayı sıvı içerisindeki yaklaşık hava miktarını belirlemede yardımcı olur. Bu modelin dolusavak akış modellerinde metal dökümündeki gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Temel fikir, türbülanslı girdapların, havayı hapseden ve sıvının gövdesine geri taşıyan serbest bir yüzeyin üzerine küçük sıvı elementleri yerleştirilmesidir. Hava sürüklenme oranı türbülans dengesi ve yüzey gerilimine bağlıdır [22].

$$\frac{\partial V}{\partial t} = C_{air} \cdot A_s \left[2 \cdot \left(\frac{pk - pg_n L_t - 2\sigma / L_t}{p} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

- V = sürüklenen hava hacmi (m^3)
- C_{air} = hava sürükleyen yüzey alanı kısmı, $0 < C_{air} < 1$; başlangıç olarak 0.5 kullanılır
- A_s = sıvının yüzey alanı (m^2)
- ρ = Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
- k = türbülans kinetik enerji (m^2/s^2)
- L_t = türbülans uzunluk ölçeği (m)
- g_n = serbest yüzeyde yerçekimi (m/s^2)
- σ = yüzey gerilim katsayısı (N/m)

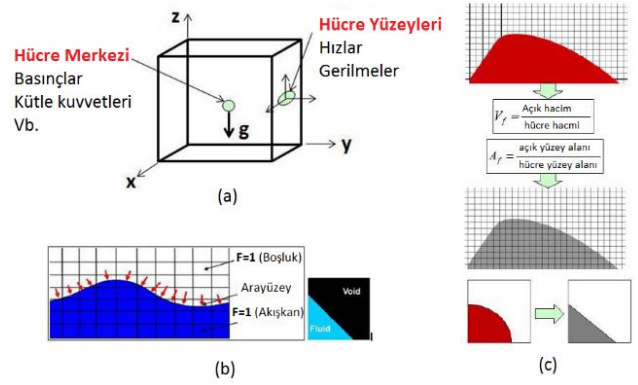
Hava sürüklenme modeli kurumu için gerekli detaylara (skalar model, sürüklenme akısı modeli) karar verildikten sonra başlangıç ve sınır koşulları için türbülans parametrelere seçilmelidir. Türbülans parametreleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir [22].

$$k = 3/2(U*I)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L_T} \quad (3)$$

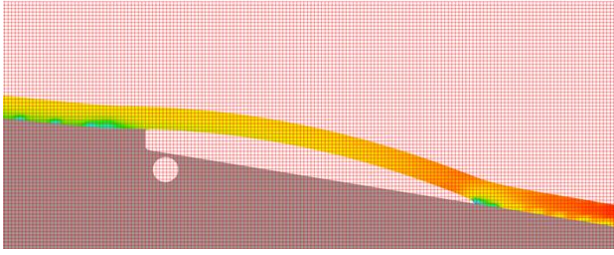
- ε = türbülans dağılım oranı (m^2/s^3)
- U = Ortalama makroskopik hız (m/s)
- I = Türbülans yoğunluğu (düşük türbülans için % 1-5, yüksek türbülans için % 5-20 olup genellikle %5 seçilir).
- C_V = Türbülans modeli katsayısı (tipik olarak 0.09)
- L_T = Türbülanslı uzunluk ölçeği; en büyük çalkantılı girdapların boyutunu açıklar.

Flow-3D, açık kanal akımları gibi iki faz arasındaki (hava-su arayüzü) serbest yüzeyi tanımlamak için modifiye edilmiş akışkan hacmi (TruVOF) yöntemini kullanmaktadır (Şekil 3). Eğer hücre tamamen akışkanla dolu ise hacim oranı $F=1$, boş ise $F=0$ ve akışkan arayüzü içeriyorsa (kısmen dolu ise) $0 < F < 1$ değerlerini alır. TruVOF ile serbest yüzeyin takibi üç aşamadan oluşur; ilkin serbest yüzeyin yeri tespit edilir, fazlar arası (veya boşluk-akışkan arası) keskin bir arayüzey belirlenir ve son olarak bu arayüzeye sınır şartları uygulanır. Bu şekilde arayüzey üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmış olur [22].

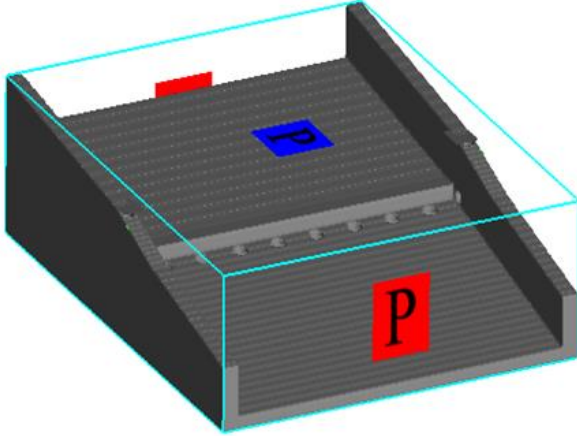


Şekil 3. Flow-3D sayısal model konseptleri [22]: a) Hücre sistemi, b) Akışkan yüzey (TruVOF) konsepti, c) FAVOR yöntemi Havalandırıcı modellerin plan detayları

Sayısal modellerinin ağ yapısı, 0.25 metrelik 'conform' meş kullanarak oluşturulmuştur. Sayısal modelde FAVOR tekniği kullanıldığından seçilen ağ yapısının model geometrisinin çözünürlüğü üzerinde etkisi olacaktır. Bunun için havalandırıcı geometrisini hassas algılayabilecek bir ağ yağı seçilmiştir (Şekil 4a). FAVOR özelliği kullanılarak oluşturulan modellerin sınır koşulları ile birlikte görüntüsü Şekil 4b'de verilmiştir. Sınır koşulları olarak modelin memba yüzü, farklı akım koşullarını giriş olarak tanımlayabilmesi için "velocity inlet", mansab ve üst yüzey "pressure inlet" diğer yüzeyler ise "symmetry" (katı yüzeyleri zaten duvar olarak göreceği için) olarak tanımlanmıştır. Sayısal modellerde dolusavağın uzunluğu 70 m genişliği 55 m yüksekliği 5 m olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan her iki modelde de yaklaşık 4.4 milyon adet yapısal 3D küpik eleman kullanılmıştır. Giriş sınır şartında farklı savaklama debilere karşılık gelen farklı akım derinlikleri ve hızları ve dolayısıyla farklı Froude sayıları tanımlanarak herbir akım durumu için HAD analizleri yürütülmüştür. Havalandırma bacalarının girişlerine yerleştirilen ölçüm akış yüzeyleri (*Flux surface*) sayesinde havalandırıcılar tatafindan akıma sağlanan hava miktarı belirlenmiştir. Böylece sayısal analiz sonuçlarından elde edilen veriler sayesinde her iki havalandırıcı tipinin havalandırma performansları ve su yüzü profilleri gibi hidrolik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.



a) Ağ yapısı



b) Sınır koşulları

Şekil 4. Sayısal modelin ağ yapısı ve sınır koşulları

3 Bulgular ve tartışma

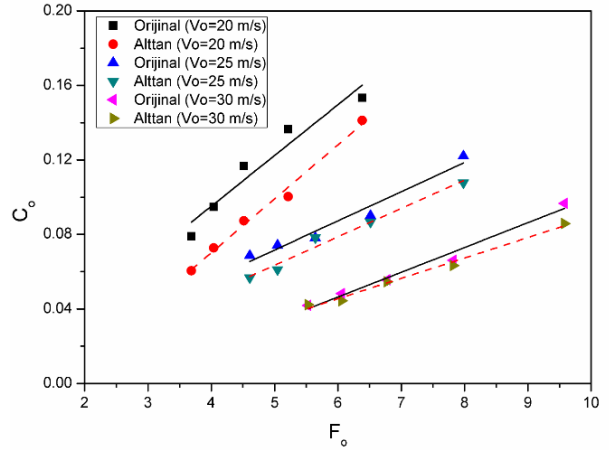
Dolusavak uygulama projesindeki [21] orijinal havalandırıcı tasarımına göre hazırlanmış sayısal modellerin analizleri yürütülmüştür. Farklı debilerde farklı akım koşulları elde etmek için $h = 1.00, 1.50, 2.00, 2.50$ ve 3.00 m 5 farklı akım derinliği için kavıtasyon riski oluşturan 20, 25 ve 30 m/s olmak üzere 3 farklı giriş hızı seçilmiştir (V_o). Böylece $F_o = 3.69 - 9.58$ aralığında 15 farklı memba Froude sayısı için analizler yapılmıştır. Flow-3D'de nap yüzeyinden giren hava miktarlarını belirleyebilmek için Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model) kullanılmıştır. Oluşturulan her iki havalandırma durumu için hazırlanmış HAD analizi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Havalandırıcı modellerin HAD sonuçları

Model No	h (m)	B (m)	V_o (m/s)	F_o	Q_a (m ³ /s) (orijinal)	Q_a (m ³ /s) (alttan)	B (orijinal)	B (alttan)	C_o (orijinal)	C_o (alttan)
1	1.00	55.00	20.00	6.39	199.22	180.89	0.18	0.16	0.14	0.15
2	1.00	55.00	25.00	7.98	191.23	166.09	0.14	0.12	0.11	0.12
3	1.00	55.00	30.00	9.58	176.59	154.78	0.11	0.09	0.09	0.10
4	1.50	55.00	20.00	5.21	260.69	183.90	0.16	0.11	0.10	0.14
5	1.50	55.00	25.00	6.52	204.40	195.56	0.10	0.09	0.09	0.09
6	1.50	55.00	30.00	7.82	175.20	167.43	0.07	0.07	0.06	0.07
7	2.00	55.00	20.00	4.52	290.47	210.40	0.13	0.10	0.09	0.12
8	2.00	55.00	25.00	5.64	233.06	233.57	0.08	0.08	0.08	0.08
9	2.00	55.00	30.00	6.77	194.29	190.28	0.06	0.06	0.05	0.06
10	2.50	55.00	20.00	4.04	288.13	215.80	0.10	0.08	0.07	0.09
11	2.50	55.00	25.00	5.05	275.37	223.58	0.08	0.07	0.06	0.07
12	2.50	55.00	30.00	6.06	208.76	191.33	0.05	0.05	0.04	0.05
13	3.00	55.00	20.00	3.69	282.95	212.58	0.09	0.06	0.06	0.08
14	3.00	55.00	25.00	4.61	304.12	248.10	0.07	0.06	0.06	0.07
15	3.00	55.00	30.00	5.53	216.23	218.23	0.04	0.04	0.04	0.04

Sayısal modellerden, havalandırıcı ve serbest nap yüzeylerinden sağlanan hava miktarı okunarak hava giriş oranı (β) ve ortalama hava konsantrasyonu (C_o) hesaplanmıştır. Bu değerlerin daha iyi yorumlanabilmesi için Şekil 5'deki grafik çizdirilmiştir.

Şekil 5'deki grafikte, her iki tip havalandırıcı tipinin havalandırma performanslarının, ortalama hava konsantrasyonları farklı akım hızları için Fr sayısı ile değişimleri verilmiştir. Yüksek hızlarda ($V_o = 30$ m/s gibi) iki havalandırıcı performansı arasında pek bir fark gözlemlenmezken, düşük hızlarda orijinal tasarımın havalandırma performansının belirgin şekilde üstün olduğu görülmektedir. Bu farklar ortalama olarak $V_o = 30$ m/s için %5, $V_o = 25$ m/s için %10, $V_o = 20$ m/s için %20, genel ortalamada ise %12 civarındadır. İki baca ve kanal boyunca iki farklı galeri/oluk ile beslenmesi orijinal havalandırıcının havalandırma performansının üstün yüksek olmasının başlıca sebebi sayılabilir. Proje firması [21] tarafından hem yandan hem de eşik altındaki galerilerden sağlanan hava sayesinde iyi bir havalandırma sağlanmıştır. Sadece şut altındaki havalandırma galerileri sayesinde havalandırma sağlayan alttan alıslı havalandırıcı ise düşük hızlar dışında yakın bir havalandırma sağlamaktadır. Bu havalandırıcının avantajının kanal boyunca üniform hava sağlaması ve özellikle düşük Froude sayılarında iyi performans göstermesidir [7].



Şekil 5. Orijinal ve alttan alıslı havalandırıcı sonuçlarının karşılaştırılması (Ortalama hava konsantrasyonu ile)

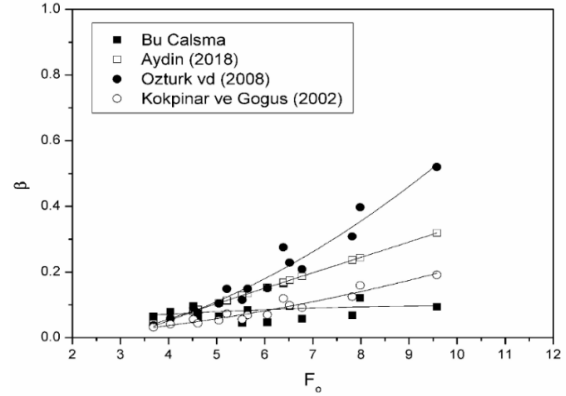
Dolusavak havalandırıcıların hava giriş oranlarıyla ilgili daha önce yapılmış bazı çalışmalardan elde edilmiş bağıntılar Tablo 3’de verilmiştir. Kökpınar ve Göğüş [5] yaptığı kapsamlı deneysel çalışma sonucu hava giriş katsayısını boyutsuz serbest jet uzunluğu, boyutsuz hava giriş oranı ve şut eğimine bağlı olarak veren Denklem (4)’ü önermişlerdir. Verilen bu denklem model deneyleri sonucu elde edilmiş olup ölçek etkileri içermektedir. Öztürk ve ark. [8] Alttan alıslı havalandırıcılar için Froude sayısı yanında boyutsuz havalandırıcı ve saptırıcı geometrisini de içeren bir bağıntı elde etmişlerdir (Denklem 5). Pfister ve Hager [23] hava giriş katsayısını Froude sayısı ve saptırıcı eğimine bağlı olarak veren amprik bir bağıntı elde etmişlerdir (Denklem 6). Aydın [9], Öztürk ve ark. [8]’in çalışmasına benzer olarak iki fazlı HAD analizi sonucu, hava giriş oranının memba Froude sayısı ile doğrusal değiştiğini veren bir bağıntı vermişlerdir (Denklem 7). Bu denklemde $F_o > 2.8$ için verilmiş olup bu değerin altında hava girişini olmadığı kabul edilmiştir.

Tablo 3. Hava giriş katsayısı ile ilgili literatürdeki bazı bağıntılar

$\beta_m = 0.0189 \left(\frac{L_j}{h} \right)^{0.83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) (1 + \tan \alpha) \right]^{0.24}$	Kökpınar ve Göğüş [5] Denklem (4)
$\beta_c = 0.14 (F_o - 2.8) \left(\frac{D^2}{Lh} \right)^{0.20} \left(\frac{t_r}{h} \right)^{0.35}$	Öztürk ve ark. [8] Denklem (5)
$\beta = 0.0028 F_o^2 [1 + F_o \times \tan \theta] - 0.1$	Pfister ve Hager [18] Denlem (6)
$\beta = 0.047 (F_o - 2.80)$	Aydın [9] Denklem (7)

Tablo 3’de verilen denklemlerdeki, F_o memba Froude sayısını, L_j havalandırıcı serbest jet uzunluğunu (saptırıcı ucundan jetin taba birleştiği çarpma noktasına olan mesafe, m), h memba akım derinliğini (m), D alttan alıslı havalandırıcıların tabana yerleştirilen hava deliklerinin çapını (m), L alttan alışı havalandırıcı deliklerinin ara mesafesini (m), α dolusavak şut kanalı eğim açısını, θ ise havalandırıcı saptırıcı (rampa) açısını, A_a ve A_w sırasıyla hava bacası giriş ve akım kesitlerini ifade etmektedir. Öztürk ve ark. [8] ile Aydın [9], verdiği denklemleri $2.80 \leq F_o \leq 10.00$, $0.17 \leq \tan \alpha \leq 0.57$, $0.04 \leq t_r/h \leq 0.50$, $0.032 \leq D^2/Lh \leq 0.539$ aralıkları için önermiştir. Bu araştırmacılar saptırıcı açısını $\theta=5.71^\circ$ alırken bu çalışmada $\theta=5.71^\circ$ olarak alınmıştır. Bu çalışmadaki havalandırıcının verilen literatürdekilerden diğer bir farkı ise rampa ile birlikte bir eşik kullanılmış olmasıdır.

Diğer formüllerden elde edilen değerler Şekil 8’de verilen grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiklerde görüleceği üzere küçük Froude sayılarında sonuçlar arasında önemli farklar gözükmezken büyük Froude sayılarında aralarındaki farklar büyümektedir.



Şekil 8. Hava giriş katsayılarının literatürle karşılaştırılması

Anlaşılabileceği üzere problemin zorluğu ve yüksek hız ve türbülanslı hava-su akımı karmaşıklığı nedeniyle özellikle akımın enerjisinin yüksek olduğu yüksek Froude sayılarında yöntemler farklı sonuçlar verebilmektedir. Bunun muhtemel sebebi sayısal modellerde kullanılan “Air Entrainment” çözüm tekniğidir. Yukarıda da belirtildiği gibi bu modelde, türbülans ve akış durumundan dolayı sıvı içerisindeki yaklaşık hava miktarını belirlemeye çalışılır. Yöntemdeki ana fikir, türbülanslı girdapların, havayı hapseden ve sıvının gövdesine geri taşıyan serbest bir yüzeyin üzerine küçük sıvı elementleri yerleştirilmesidir. Hava sürüklenme oranı türbülans dengesi ve yüzey gerilimine bağlıdır [22]. Yöntem tek fazlı akım modeli üzerinden çalışır ve dolayısıyla aslında hava fazını ve dolayısıyla gerçek bir karışımı hesaplamaz. Hava fazını içermediğinden boşluk hacimlerinde hava hız ve basınçlarını hesaplayamayacaktır. Yani özellikle yüksek akım hızlarında meydana gelen jet altı basınçları ve dolayısıyla basınç farkından meydana gelecek hava girişlerini hissetmeyecektir. Diğer bir deyişle bu yöntemde jet altı boşluğun tam havalandığı kabul edilir (ki deneysel çalışmalarda da tam havalandırılmış jet altı akım koşulları sağlanır) ve jet altı basınçların etkisi ihmal edilmiş olur. Bu nedenle Kökpınar ve Göğüş [5] deneysel çalışma sonuçlarına yakın sonuç veririrken altbasınçların etkili olduğu diğer modellerden küçük sonuçlar vermiştir. Şunu belirtmek gerekir ki Şekil 8’de verilen sonuçların her biri farklı yöntem ve havalandırıcı tipleri için elde edilmiştir. Bununla birlikte elde edilen hava giriş oranları özellikle kavitezyon riskinin yüksek olduğu yüksek akım hızlarında diğer yöntemlerden nispeten daha düşük sonuç değerleri verdiği için tasarımı için daha güvenli olacağı söylenebilir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada hava giriş modeliyle HAD analiziyle yardımıyla, seçilen bir havalandırıcının orijinal tasarımı ile alternatif olarak kullanılan alttan alıslı havalandırıcılar üzerinde serbest akım durumlarında karşılaştırılmaları yapılmıştır. Oluşturulan sayısal görüntülerin akımın fiziksel olarak gerçekleştiği görülmüştür. Her iki havalandırıcıda da akım yüksekliği sabit tutulup hız artılığında serbest jet uzunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Her iki havalandırıcı

dada değme noktalarında hızlarda düşüş olduğu ve dinamik basınçlarda artış olduğu gözlemlenmiştir.

Her iki tip havalandırıcı tipinin havalandırma performansları hava giriş oranları ve ortalama hava konsantrasyonları farklı akım hızları için Fr sayısı ile değişimleri karşılaştırılmış, yüksek hızlarda önemli bir fark gözükmezken, düşük hızlarda orijinal tasarımın havalandırma performansının ortalamada %12 daha iyi olduğu görülmüştür. Sadece şut altındaki havalandırma galerileri sayesinde havalandırma sağlayan alttan alıslı havalandırıcı düşük hızlar dışında orijinal havalandırıcıya yakın havalandırma sağlarken, klasik (rampa-çelik-oluk) ve alttan havalandırıcının birlikte kullanıldığı hibrit bir tip olan orijinal havalandırıcı yüksek hızlarda iki yönlü havalandırma sayesinde daha iyi bir havalandırma performansı sağlamıştır. Yandan havalandırma özellikle yüksek Froude sayılarında akıma daha fazla hava sağlarken alttan havalandırma ise düşük Froude sayılarında ve kanal genişliği boyunca iyi bir havalandırma sağlamaktadır. Sayısal model boykesitlerinden her iki modelde hava karışımının benzer olduğu kaviteasyon hasarı meydana getirmeyecek kadar yeterli olduğu saptanmıştır.

Bu çalışma ışığında, dolusavaklar tasarlanırken kaviteasyon hasarını önlemek için havalandırıcıların önemi bir kez daha gösterilmiştir. Havalandırıcı tasarlanırken havalandırıcının tipi de önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan orijinal ve alttan alıslı havalandırıcı tiplerinin kaviteasyon hasarından korunmak için gayet iyi çalıştığı gösterilmiştir. Elde edilen havalandırma performansları ve kaviteasyon indeksleri göstermiştir ki, incelenen model için orijinal havalandırıcı tasarımı daha güvenli olmakla birlikte her iki havalandırıcı tipi de kaviteasyon önlemede etki olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Özdemir [24]'in yüksek lisans tezinden türetilmiştir. Çalışmaya desteklerinden dolayı Hidrodizayn, ENERGO-PRO ve DSİ 17. Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] H. Chanson, Study of air demand on spillway aerator. *Journal of Fluid Engineering*, 112 (3), 343-350, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2909410>.
- [2] P. Volkart, P. Rutschmann, Aerators on spillways in Air Entrainment in Free Surface Flows. Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 85-114, 1991.
- [3] N. L. De S. Pinto, Cavitation and aeration, in *Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*. Edited by R.B. Jansen, Kluwer Academic Publishers, 620-634, 1988.
- [4] M. X. Nie, Cavitation prevention with roughened surface. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (10), 878-880, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:10\(878\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:10(878)).
- [5] M. A. Kökpınar and M. Göğüş, High-speed jet flows over spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29 (6), 885-898, 2002. <https://doi.org/10.1139/102-088>.
- [6] M. B. Boes and W. H. Hager, Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (9), 661-670, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661)).
- [7] M. C. Aydın, Altan alıslı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2005.
- [8] M. C. Aydın and M. Öztürk, Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at the spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering (ISI)*, 36 (5), 826-836, 2008. <https://doi.org/10.1139/L09-017>.
- [9] M. C. Aydın, Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24 (3), 330-336, 2018. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1381576>.
- [10] H. Y. Chen, W. L. Xu, J. Deng, Z. P. Niu, S. J. Liu and W. Wang, Theoretical and experimental studies of hydraulic characteristics of discharge tunnel with vortex drop. *Journal of Hydrodynamics*, 22 (4), 582-589, 2010. DOI: 10.1016/S1001-6058(09)60091-3.
- [11] J. M. Zhang, J. G. Chen, W. L. Xu, Y. R. Wang and G. J. Li, Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 23 (1), 71-80, 2011. DOI: 10.1016/S1001-6058(10)60090-X.
- [12] M. Pfister and H. Chanson, Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics*, 26 (2), 291-298, 2014. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60032-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60032-9).
- [13] A. Kamel and I. Abdulhameed, Study the Effect of Spillway Locations on the Hydraulic Properties of Spillway. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 31 (5), 90-106, 2016.
- [14] C. K. Novakoski and R. F. Hampe, E. Conterato, M. G. Marques and E. D. Teixeira, Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. *Brazilian Journal of Water Resources*, 22 (42), 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0117160035>.
- [15] R. Daneshfaraz, A. Ghaderi, A. Akhtari, and S. Di Francesco, On the effect of block roughness in ogee spillways with flip buckets. *Fluids*, 5 (4), 182, 2020. <https://doi.org/10.3390/fluids5040182>.
- [16] H. Chanson, Flow downstream of aerator-aerator spacing, *Journal of Hydraulic Research*, 27(4), 519-536, 1989. <https://doi.org/10.1080/00221688909499127>.
- [17] P. Volkart and A. Chervet, Air slots for flow aeration-determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway, *Mitteilungen der*

- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologia und Glaziologie, No. 66, Zürich, Switzerland, 1983.
- [18] J. A. Kells and C. D. Smith, Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(3), 358-377, 1991. <https://doi.org/10.1139/191-047>.
- [19] P. Rutschmann and W. H. Hager, Design and performance of spillway chute aerators, *International Water Power and Dam Construction*, 42(1), 36-42, 1990.
- [20] J. Cassidy and R. Elder, Spillways of high dams, in *Developments in Hydraulic Engineering 2*, Edited by P. Novak, Applied Science Publishers Ltd. Essex, UK, 153-173, 1984.
- [21] Hidrodizayn, Alparslan II Barajı ve HES Projesi Dolusavak Hidrolik Hesap Raporu. ENERGO-PRO, Murat Nehri Enerji Üretim A.Ş., 2018.
- [22] Flow Science, FLOW-3D User Manual. Theory Guide, 2016.
- [23] M. Pfister and W. H. Hager, Chute aerators II: Hydraulic design, *J. Hydraul. Eng.* 136, 360-367, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000201](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000201).
- [24] M. R. Özdemir, Dolusavak Havalandırıcılarının Sayısal Modelle İncelenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 74s, 2021.

