

# İlisu Barajı ve HES Projesi Dolusavak Havalandırıcısının Performans Değerlendirmesi

M. Cihan AYDIN, Cesur KAPLAN

Bitlis Eren Üniversitesi  
Mühendislik-Mimarlık Fak.  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
mcaydin@gmail.com

## Öz

İlisu barajı, kurulu gücü 1200 MW ve karşıdan alımlı 6 adet radyal kapaklı geniş bir dolusavağı olan büyük bir HES projesidir. Dolusavak genişliği 120 m ve kapak boyutları genişlikleri 15.0x16.0 m'dir. Boşaltım kapasitesi 14799 m<sup>3</sup>/s'tür. Türkiye'de kavitasyon riskine karşı "silika dumanlı" mineral katkılı beton ilk defa bu barajın dolusavağında kullanılmıştır. Ayrıca yine kavitasyon hasarından korunmak için dolusavak havalandırıcıları da yerleştirilmiştir. Bu bildiride, Ilisu Barajı dolusavak havalandırıcıların revize tasarımının performansı ve akım karakteristikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD=CFD) yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Ilisu Barajı dolusavağının 3B sayısal modeli hazırlanmış ve ANYSYS-Fluent programı kullanılarak kavitasyon riski oluşturabilecek debi değeri için sayısal analizi yapılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** HAD, Dolusavak, Fluent, Solidworks, Nümerik analiz, Kavitasyon.

## Giriş

Baraj dolusavaklarında, çok yüksek su hızları ve dolusavak şut kanallarının üzerindeki düzensizliklerin oluşturduğu kavitasyon nedeniyle beton yüzeyinde geniş çaplı hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarlar zaman içinde dolusavağı kullanılmaz hale getirebilmektedir. Kavitasyon ile ilgili ilk ciddi çaba 1935'te Madden Barajı (Panama) üzerindeki hasarın rapor edilmesiyle başlamıştır (Kells ve Smith, 1991). Genel manada, kavitasyon hasarlarının akım hızının 12-15 m/s değerleri arasında başlayabileceği, 30-40 m/s gibi daha büyük akım hızlarında ise dolusavak yüzeyini kavitasyon hasarından korumak için havalandırıcıların kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Dolusavak şut kanallarındaki havalandırıcı özellikleri ile ilgili birçok çalışma yapmıştır. Pfister ve Hager (2010), 20-30 m/s den fazla akım hızlarında dolusavaklardaki kavitasyon hasarını incelemişlerdir. Chanson (1989) farklı dayanımlardaki beton yüzeylerde yürüttüğü deneylerle, kavitasyon başlangıcı ile ilgili detaylar sunmuştur. Russel ve Sheehan (1974), kavitasyon hasarını önlemek için gerekli hava konsantrasyonunu belirlemeye çalışmışlardır. Pinto vd. (1982) boyutsuz hava giriş oranı ile ilgili ilk yaklaşımı sunmuştur. Wood vd. (1983) dolusavak yüzeyinde gelişen sınır tabakası ve serbest yüzey havalandırması üzerinde çalışmalar yapmıştır. Kökpınar ve Gögüş (2002) havalandırıcılar için genel amaçlı ampirik bir bağıntı elde etmiş ve ayrıca fiziksel model verileriyle ile bazı prototip verilerini karşılaştırmak suretiyle deney ölçek etkilerini giderecek bazı bağıntılar elde etmişlerdir.

Nie (2001) yapay olarak pürüzlendirilmiş yüzeylerle kavite hasarını önleme konusunda çalışmıştır. Kavite hasarının belirgin şekilde gözlemlendiği Keban Barajı dolusavağında şut kanalı üzerindeki inşaat derzlerinin mansaplarında ve sıçratma eşiği profiline mansabında hasarlar olmuştur (Abbasoğlu ve Okay, 1992). Rutschmann ve Hager (1990) çalışmalarında, akım parametreleri ve havalandırıcı geometrisi gibi tüm parametrelerin direkt olarak hava girişi üzerindeki etkilerinin dikkate alındığı “Direkt Yaklaşım” ve hava girişinin dolaylı olarak, jet uzunluğuna bağlı incelendiği “Dolaylı Yaklaşım” olmak üzere iki yaklaşım sunmuştur. Aydın (2006) alttan alışı havalandırıcıların performansını üç boyutlu sayısal modellerle belirlemeye çalışmış ve uğraştırıcı matematik modeller kurmak yerine, CFD=HAD yazılımlarının kullanılmasının çok daha uygun olabileceğini belirtmiştir. Öztürk vd. (2005), Ilisu Barajındaki benzer fakat özellikle geniş dolusavaklar için daha etkin ve kullanışlı bir havalandırıcı modeli önermişlerdir.

Ilisu Barajı dolusavağında Türkiye’de ilk defa kaviteyi önlemek için silica (silis) dumanlı mineral katkı maddesi şut kanalı üst döşeme betonlarında (çimentonun % 15 oranında ) kullanılmıştır. Şut kanalında alınan beton numunelerinde 28 günlük basınç mukavemetinin 50 Mpa’a çıktığı durumlar oluşmuştur. Fakat bu durum şut kanalında çatlak oluşumunu arttırmıştır (Gündüz vd. 2013). Ayrıca dolusavak şut kanalında kavite indeksi 0.25’den yüksek olmasına rağmen (teorikte 0.25’den büyükse havalandırıcı gerekmemektedir) 75 m arayla 5 adet havalandırıcı tasarımda kabul edilmiştir. Havalandırıcılar şut kanalı dış duvarlarından kanala bağlanmaktadır. Orta duvarlarda havalandırma bacası bulunmamaktadır. Ilisu Barajı dolusavağının ilk model deneyleri 1982 yılında yapılmıştır. İlk model deneyde 8 radyal kapak tasarlanmıştır. Ancak daha sonra yapılan tasarımda 6 radyal kapak uygun bulunmuş fakat tekrardan model deneyi yapılmamıştır.

Bu bildiriye Ilisu Barajı yeni tasarlanmış dolusavak havalandırıcısının, kaviteyi üretebilecek bir akım durumundaki havalandırıcı performansı sayısal analiz yöntemiyle belirlenmeye çalışılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

### **Ilisu Barajı Karakteristikleri**

Ilisu Barajı ve HES Projesi elektrik amaçlı olup 1200 MW kurulu gücüyle Türkiye’deki hidroelektrik üretiminde 4. büyük baraj olacaktır. Dolgu hacmi olarak Atatürk Barajından sonra Türkiye’de 2. büyük barajdır. Önyüzü beton kaya dolgu (ÖBKD) baraj tipinde dolgu hacmi ve gövde kret uzunluğu bakımından dünyada 1.sıradadır. Ilisu Barajının tamamlanması ile yıllık 400 milyon dolarlık kazanç sağlanması beklenmektedir.

#### **Baraj Ana Gövdesi**

Gövde Tipi	: Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu
Gövde Hacmi	: 23 762 850 m <sup>3</sup>
Rezervuar Hacmi	: 10 410 hm <sup>3</sup>
Kret Kotu	: 530.00 m
Aktif Hacmi	: 7 660 hm <sup>3</sup>
Kret Uzunluğu	: 2 327 m
Talveg Kotu	: 400.00
Max. Su Kotu	: 526.82
Gövde yüksekliği (Talvegden)	: 130.00 m
Normal işlet. su kotu	: 525.0 m
Kret uzunluğu	: 2375 m

Temelden Yüksekliği	:131 m
<b>Santral</b>	
Santral Binası Boyutları	: 180 m x 47 m x 56 m
Ünite Debisi	: 198,4 m <sup>3</sup> /s
Ünite Kapasitesi	: 200 MW
Ünite Sayısı	: 6 Adet
Toplam Kurulu Güç	: 1200 MW
Yıllık Ort. Enerji Üretimi	: 4,120 GWh

#### **Dolusavak:**

Tipi	: Karşıdan Alışlı, Kontrollü
Genişliği	: 120 m
Uzunluğu	: 495 m
Kapak Sayısı ve Tipi	: 6 adet, Radyal
Kapak Boyutları	: 16 m x 15.88 m
Deşarj Kapasitesi	: 14 799 m <sup>3</sup> /s
Şut Uzunluğu	: 432.7 m
Düşü Havuzu Boyutu	: 70 m x 124 m
Dolusavak yapısı eşik yapısı, şut kanalı, sıçratma eşiği-apron, düşü havuzu ve boşaltım kanalı olmak üzere 5 kısımdan oluşmaktadır.	

### **Yöntem**

Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) akımın bünye denklemlerini bilgisayar yardımıyla çözen bir yöntemdir. Birden çok fazdan oluşan akımlarda akımların sayısal çözümlemesinde sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler gibi yöntemler kullanılır. Sayısal Modelleme temelleri, Taylor'un bir nokta etrafında fonksiyon için yaptığı seri açılımına dayanır. Sonsuza giden seri açılımında fonksiyonun değerini hesaplamak için kullanılacak terim sayısı, elde dilecek sayısal çözüm denkleminin hassasiyet derecesini gösterir. Sayısal akışkanlar dinamiği çözümlemesinde kullanılan süreklilik denklemi ve doğrusal olmayan yüksek dereceden Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) diferansiyel denklemleri Taylor seri açılımı ile sayısallaştırılır. Sayısallaştırılan süreklilik denklemi ve RANS denklemi, akım geometrisini kapsayan ağda bulunan hücrelerin her biri için çözülür. Ardışık olan tekrarlanan çözüm, akım alanındaki kütle ve kuvvetler denklemini sağlar. Genel olarak bir akımı çözmek için süreklilik denklemi, momentum denklemi ve yardımcı denklemlerin aynı anda çözümü gerekmektedir. 2-boyutlu bir akım için denklem sistemi indirgenerek çözülebilir. Ancak akım 3-boyutlu ve türbülans olduğu durumlarda denklem sistemini kapatan bir türbülans modeli sisteme eklenir. Ayrıca eğer akım açık kanal akımı şeklindeyse, su yüzeyinin yerini belirlemek için sisteme yüzey belirleme denklemi katmak gerekecektir. Eğer akım içinde dağılan bir başka madde varsa konsantrasyon denklemleri ile çözülür. Tüm bunlar göz önüne alındığında sayısal olarak modellenmek istenen akımın şartlarına göre yeni çözüm denklem sistemi ortaya koyup bu denklemlerin her biri ayrı ayrı sayısallaştırıp çözümlenerek sonuca ulaşılabilir. (Dündar, 2009)

Hava-su gibi iki fazlı akımları modellemek için Ansys-Fluent yazılımının çok fazlı akım modellerinden faydalanılmıştır. Ansys-Fluent'te çok fazlı akımlar genelde, birincil faz sürekli ortam akışkanı, diğeri ise bu akışkan içine dağılmış olan ikincil faz olarak tanımlanır. Atmosfere serbest yüzeyli akımlar için bu durum, sürekli ortam akışkanı hava, ikincil faz ise su olarak alınabilir. Çok fazlı akımlarda sonlu eleman ağlarıyla

bölünmüş her bir hücre iki akışkanın belirli hacim oranlarıyla işgal edilir. 'q' akışkanın hacim oranı için üç durum söz konusudur.

- $\alpha_q=0$  ise k akışkanın hücresi boş,
- $\alpha_q=1$  ise k akışkanı hücreyi tamamen doldurmuş,
- $0 < \alpha_q < 1$  ise hücre iki akışkanın ara yüzeyini içerir.

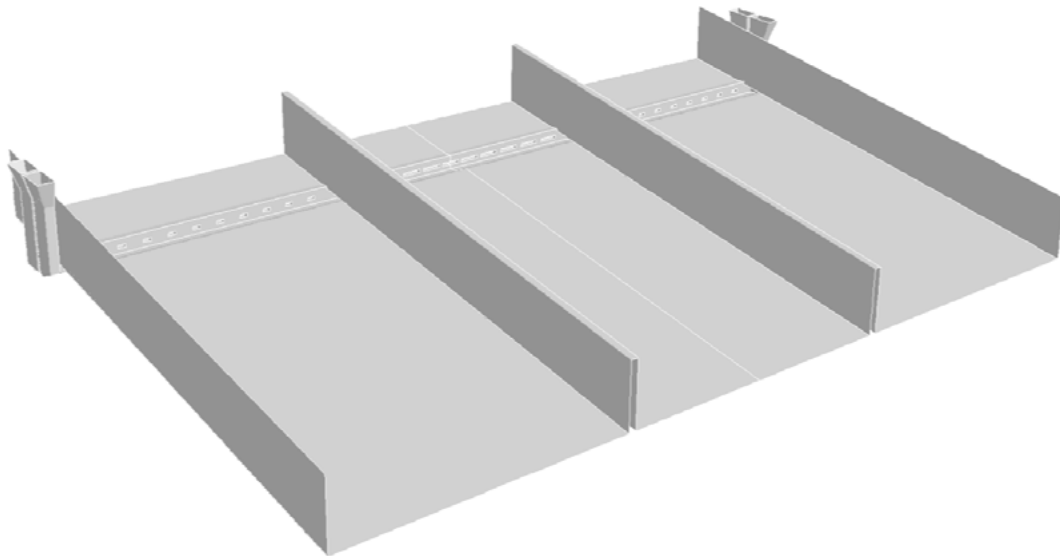
Bu bildiride ASYS-Fluent yazılımı yardımıyla Akışkan Hacimleri Oranı (Volume of Fluid, VOF) metodu kullanılarak dolu savak ve havalandırıcı akımı modellenmiştir. Bu yöntem daha önce birçok çalışmada kullanılmıştır. VOF metodu her bir faz için aşağıdaki momentum denklemini çözer.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P_s}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (1)$$

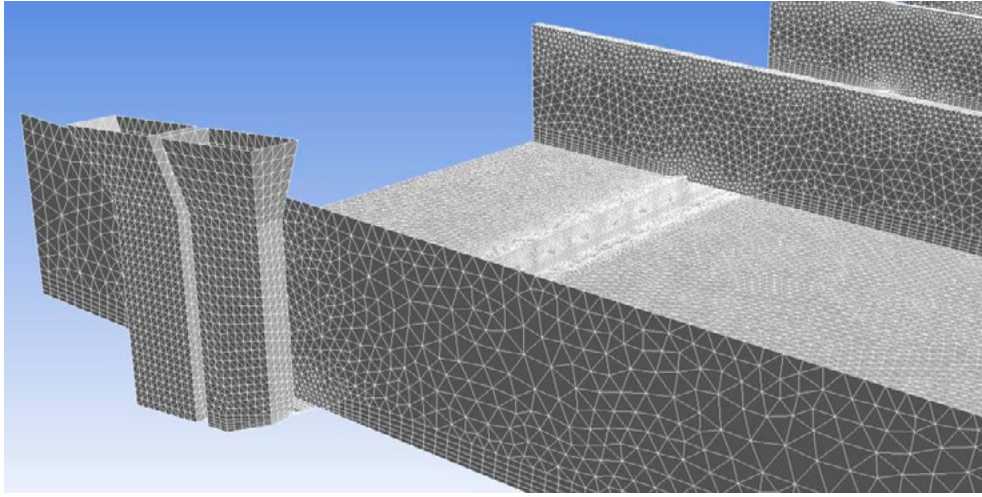
Bu denklemde;  $\rho$ : akışkan yoğunluğu,  $u$ : hız vektörü,  $\mu$ : dinamik viskozite,  $P_s$ : basınç,  $F$ : kütle kuvvetleri;  $\dot{m}_{qp}$  ve  $\dot{m}_{pq}$ : sırasıyla  $q$ 'den  $p$ 'ye ve  $p$ 'den  $q$ 'ye faz geçişi,  $\alpha_q$ :  $q$  fazının bir hücredeki hacim oranı ( $0 \leq \alpha_q \leq 1$ )'dir,  $S_{\alpha_q}$  terimi varsayılan olarak sıfır alınır. (ANSYS-FLUENT, 2012).

Yüksek hızlı dolusavak akımlarında türbülans etkisi dikkate alınmak zorundadır. Seçilecek türbülans modelin çözüm üzerine önemli etkisi vardır. Daha önce yapılan araştırmalar HAD çözümlerinde k- $\epsilon$  ve Reynolds Gerilmeleri Modeli (RSM) uygun sonuç verdiği fakat RSM'nin çözdüğü 7 denklem nedeniyle çok fazla işlem zamanı ve zorluğu nedeniyle birçok problemin çözümünde k- $\epsilon$  modelin tercih edildiği belirtilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada da standart k- $\epsilon$  türbülans model kullanılmıştır.

Sayısal analiz için toplam 120 m genişliğinde ve üç gözden oluşan Iısu Barajı dolusavağının bir havalandırıcısını içeren 75 m'lik uzunluğundaki kısmı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Hazırlanan üç boyutlu sayısal model Workbench programıyla 1.781.717 karma ağ elemana bölünmüştür. Çözümlerin yakınsaması ve doğruluğu için hava giriş olayının cereyan ettiği hava giriş kanalları ve bunların yüzeylerine yakın bölgelerde daha sık ağ seçilmiştir. Ağ kalitesi olarak minimum ortogonal kalite %5, maksimum şekil oranı ise (Max. Aspect Ratio) 55.7 olarak verilmiştir. Sayısal modelin 3B görüntüsü Şekil 1'de, çözüm ağının bir görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1 Iısu Barajı dolusavağının sayısal modelinin 3B görünüşü.



Şekil 2 Havalandırıcı ve dolusavak sayısal modelinin çözüm ağının görünüşü.

### Sonuçlar ve Tartışma

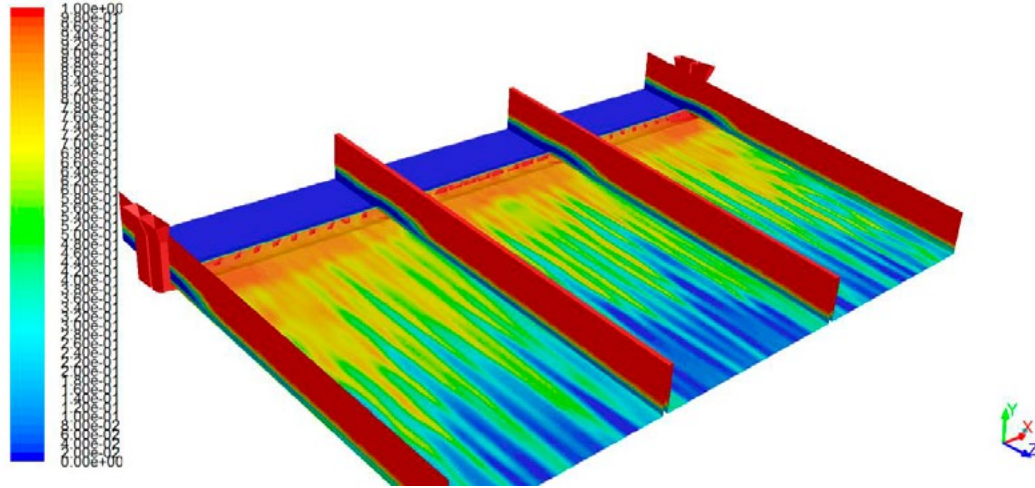
Örnek bir çözüm olarak dolusavaktan geçecek  $4320 \text{ m}^3/\text{s}$  lik debi dikkate alınarak, ortalama hız  $v=18 \text{ m/s}$ , su derinliği  $h=2\text{m}$  dolayısıyla Froude sayısı  $Fr=4.06$  için sayısal analiz yapılmıştır. Çözümlerin yakınsaması için yeterince uzun zamana bağlı çözüm yapılmış ve hata kalıntı terimleri  $10^{-3}$ 'ün altına düşünceye kadar yakınsamalar kontrol edilmiştir. Giriş kısmında da belirtildiği gibi akım hızlarının  $12-15 \text{ m/s}$ 'de kavitasyon olayının başlayabileceği dikkate alındığında verilen  $18 \text{ m/s}$ 'lik bir akım hızı için kavitasyon riski olacaktır. Havalandırıcı performansları genelde hava debisinin su debisine oranı olarak ifade edilen hava giriş oranı ( $\beta$ ) ve buna bağlı elde edilebilen ortalama hava konsantrasyonu ( $C_o$ ) ile belirlenir. Bu parametreler (2) ve (3) denklemlerinde sırasıyla verilmiştir.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (2)$$

$$C_o = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (3)$$

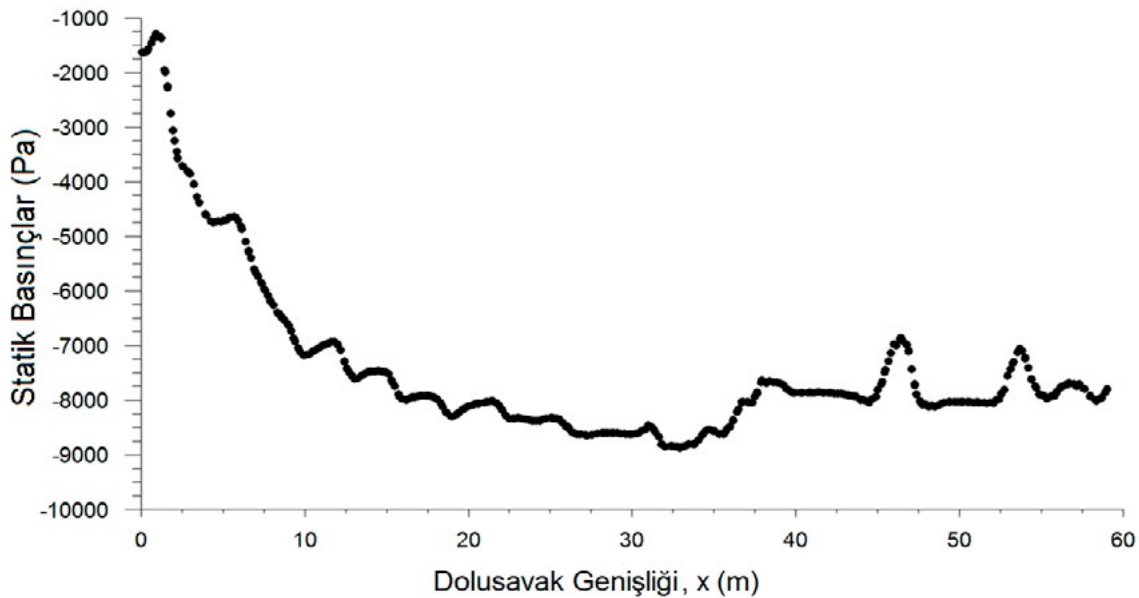
Akımın  $Fr=4.06$  değeri için su debisi  $4320 \text{ m}^3/\text{s}$ , havalandırıcı tarafından sağlanan toplam hava debisi ise  $209 \text{ m}^3/\text{s}$  olarak elde edilmiş ve buna göre hava giriş oranı yaklaşık  $\beta=0.05$  ve buna bağlı olarak  $C_o= \% 4.8$  olarak hesaplanmıştır. Russel ve Sheehan (1974) malzeme testleri üzerine yaptığı çalışmada kavitasyon hasarını önlemek için  $\%5$  hava girişi sağlamanın yeterli olacağını belirtmiş, fakat konuyla ilgili çalışmaların çoğunda kavitasyon hasarından korunmak için yaklaşık olarak  $\% 6-8$  arasında hava konsantrasyonu gerektiği belirtilmektedir (Aydın 2005). Buna göre elde edilen hava konsantrasyonu alt sınır değere yakın elde edilmektedir. Özellikle Ilısu Barajı gibi geniş dolu savaklarda giren havanın dolu savak genişliği boyunca dağılımı da önemlidir. Şekil 3'de görüldüğü gibi havalandırıcı tasarımı iki adet bacadan oluşmaktadır. Birinci, mansaptaki baca sıçratma rampası tarafından oluşan jet altı boşluk ve tabana yerleştirilen oluk tarafından oluşturulan boşluğu beslemektedir. İkincisi, yani membadaki baca ise taban altına yerleştirilen ve genişlik boyunca belli aralıklarda oluğu besleyen hava kanallarını beslemektedir. Bu ikinci hava tertibatı özellikle kenardan beslenemeyen orta kesimlerin beslenmesi için etkili bir yöntem olarak gözükmektedir. Bu havalandırma tertibatları sayesinde Şekil 3'de görüldüğü gibi hava tüm genişlik boyunca tabana yayılmaktadır. Ancak oluk arkalarına yerleştirilmiş hava kanallarından çıkan hızlı hava nedeniyle bu hava kanallarının karşılığındaki

yerlerde daha fazla hava konsantrasyonu gözlenmiştir. Ancak bu durum sayısal çözümlerden de kaynaklanıyor olabilir.



Şekil 3 Dolu savak tabanındaki hava-su faz dağılımları.

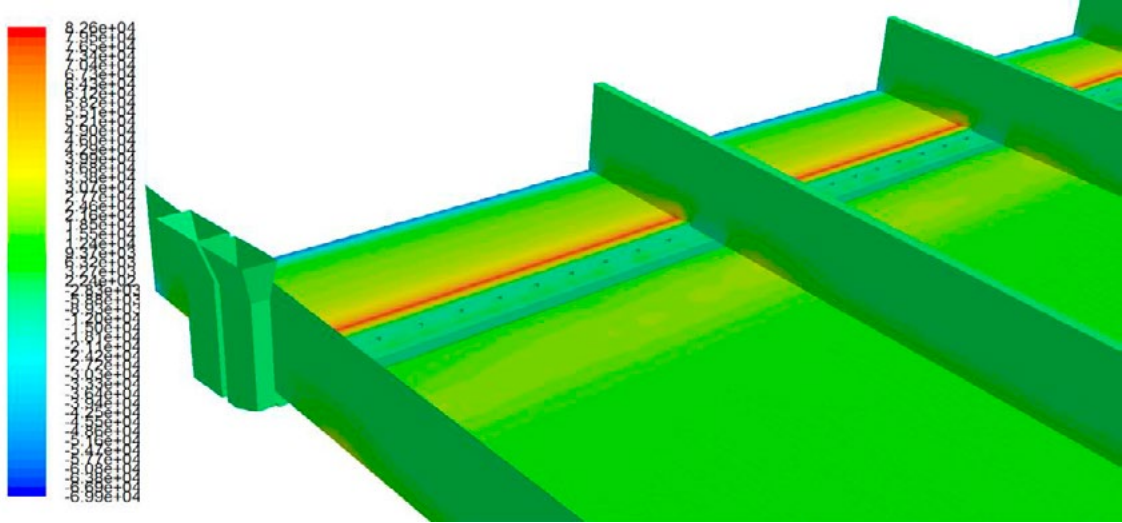
Hava girişinin kaban genişliği boyunca dağılımını anlamak için jet altındaki bir çizgi boyunca basınç dağılımı Şekil 4.'de elde edilmiştir. Şekilde havalandırıcı üzerinde sıçrayan sun jeti altındaki dolusavak genişliği boyunca statik basınç değişimi verilmiştir. Grafikte  $x=0$  havalandırıcı baca girişini,  $x=60$  m ise dolusavağın tam ortasını temsil etmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi hava girişine yakın bölgelerde statik basınç düşüşleri daha az ortalara doğru ise daha fazladır. Bu da ortalara doğru hava girişinin azaldığını ifade eder. Genişliğin  $x=40$ m den sonra dolusavağın ikinci (orta) gözü başlamaktadır. Buradan itibaren basınç farklarının azaldığı yani hava girişinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi orta gözdeki hava kanallarının daha geniş tasarlanmış olmasıdır ki bu iyi bir durumdur. Böylece dolusavağın ortalarına kadar yeterli hava girişi sağlanması amaçlanmıştır. Ancak yeni bir fikir olarak; eğer dolusavak boyunca kenarlardan ortaya doğru hava giriş kesitleri düzenli olarak artırılmış olsaydı daha düzgün bir basınç dağılımı ve dolayısıyla daha üniform bir hava karışımı elde edilebilirdi.



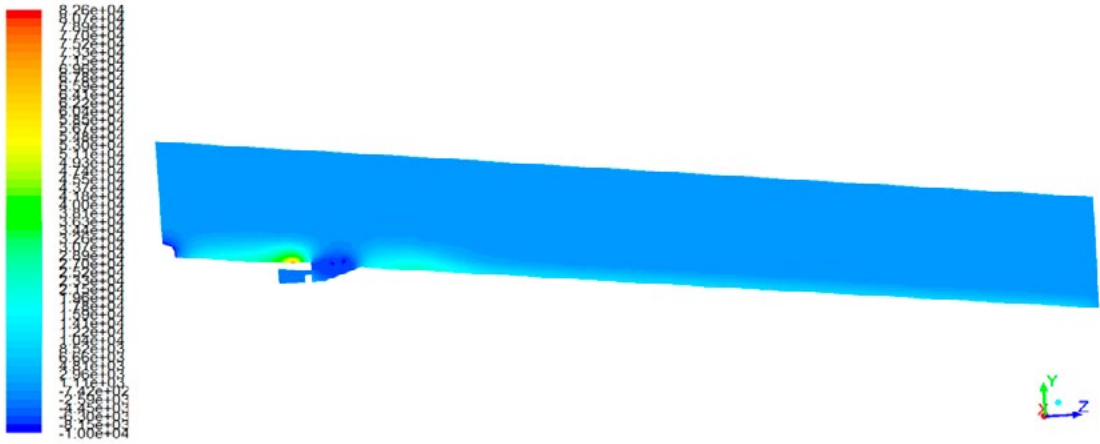
Şekil 4 Havalandırıcı jet altındaki savak genişliği boyunca rölatif statik basınç değişimi



Şekil 5’de dolusavak tabanında oluşan statik basınç dağılımları görülmektedir. havalandırıcı rampasında su jetinin çarpması sonucu bu kısımda basınçlar aşırı artmakta, havalandırıcı mansabında hava oluğu içerisinde ise rölatif basınçlar sıfırın altına düşmektedir. Buradaki basınç seviyesinin düşmesi havalandırıcılardan doğal hava emilmesini ve akıma karışmasını sağlar. Hava oluğunun mansabındaki yüksek basınç bölgesi ise su jetinin tekrar dolusavak tabanıyla birleştiği bölgeyi yani çarpma bölgesini temsil eder. Şekil 6’da ise simetri kesiti olan orta duvarda statik basınç profili görülmektedir. Rampanın hemen başındaki ve su jetinin çarpma noktasındaki yüksek basınç bölgeleri açık bir şekilde görünmektedir.

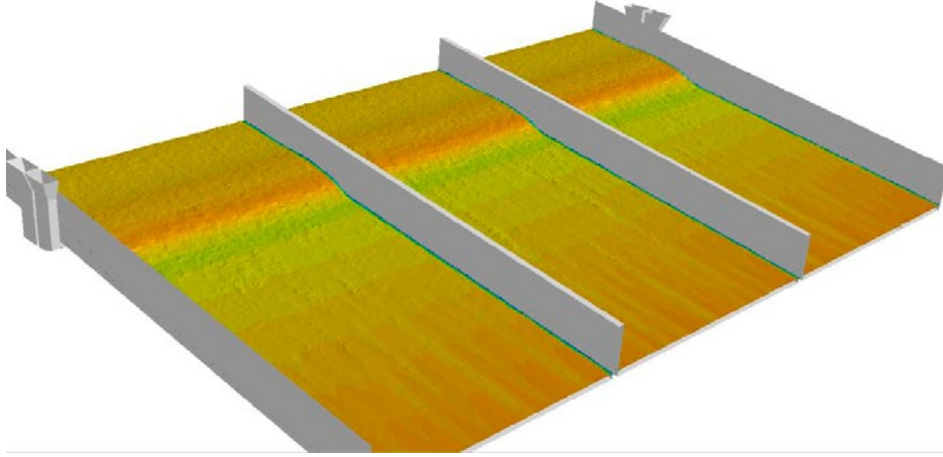


Şekil 5 Dolu savak tabanındaki basınç kontürleri (Pa) ( $V=18\text{m/s}$ ,  $h=2.0\text{m}$ ,  $Fr=4.06$ ).



Şekil 6 Simetri kesitindeki statik basınçlar.

Şekil 7’de havalandırıcı üzerinde ve dolusavak üzerinde oluşan serbest yüzeyli akımı durumu gösterilmektedir. Bu şekilde su jetinin havalandırıcı üzerinde yükseldiği ve daha sonra tabana birleşerek akımın hava karışımı olarak dolusavak şut kanalı boyunca devam ettiği görülmektedir. Bu sonuçların gerçek akımla benzeşmesi simülasyonun fiziksel olarak gerçekleştiği anlamına da gelebilir.



Şekil 7 Su yüzeyindeki hız kontörleri.

### Sonuç ve Öneriler

1. Dolu savak döşeme betonlarında ilk defa silika katkıli beton kullanılmıştır. Ancak silika katkıli betonun kullanılmasının yeterli olmadığı yapılan örnekte görülmüştür. Bazı önemli barajlarda dolu savak ve benzeri yapılarda silika dumanı kullanılarak aşınma, erozyon ve kaviteasyon etkileri gibi hasarların oluşması büyük ölçüde önlenerek uzun ömürlü su yapıları inşa edilebilmektedir. Silika oranı çimento yüzdesinin % 15 kullanılması sonucu çatlaklar gözlenmiştir. Dolayısıyla silika oranı çimentonun %10'unu geçmemelidir. Dolusavak döşemelerinin tamamında pahalı bir malzeme olan silis katkısı kullanılmıştır. Fakat betonunun tamamında silis katkıli beton kullanılmaktansa sadece üst yüzeydeki 20 cm gibi bir kalınlıkta kullanması yeterli ve daha ekonomik bir çözüm olurdu.
2. Ilisu Barajı dolu savağının ortalama akım hızı 18 m/s, su derinliği  $h=2$  m ve  $Fr=4.06$  için akım ve havalandırma durumu 3B sayısal modelle incelenmiştir. Çözüm metodu olarak hacim oranları (VOF) metodu ve  $k-\epsilon$  türbülans model kullanılmıştır.
3. Sayısal analiz sonuçlarından akıma karışan hava konsantrasyonu %4.8 olarak elde edilmiştir. Bu değer literatürde kaviteasyon hasarını önlemek için verilen gerekli minimum ortalama hava konsantrasyonunun biraz altındadır.
4. Oldukça geniş olarak tasarlanmış dolusavak şut kanalının orta bölgelerinin havalandırılması için düşünülmüş ek hava bacası ve kanallarının orta açıklığa hava sağlamada başarılı olduğu görülmüş ve tüm şut kanalı genişliği boyunca havanın dolusavak tabanına dağıtıldığı görülmüştür.
5. CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modellemesiyle aynı ölçekle çalışıldığından ölçek etkileri beklenmeyecektir. Ayrıca ekonomiklik, zaman, esneklik, ve kolaylık açısından, HAD analizleri fiziksel model deneylerine göre daha avantajlıdır. Ancak yine de fiziksel modellerle birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir.
6. Farklı Froude sayılarında sayısal analizlerin yapılarak çıkan çözümlerin sonuçları mümkünse deneysel ve hatta prototip sonuçlarla karşılaştırılmalıdır. Bazı deneysel veya prototip sonuçlarıyla kalibre edilmiş sayısal yöntemlerle deneylere göre daha fazla ve detaylı sonuçlar alınabilir. Ancak özellikle küçük ölçekli deneylerde önemli ölçek etkileri beklenmelidir.
7. Ülkemizde yeterli düzeyde havalandırıcılar konusunda araştırma yapılmadığı, bu konuda yeterli kriter geliştirilmediği ve yapılan tasarımların genelde bilimsel bir



tabanının olmadan kaba yaklaşımlarla yapıldığı görülmektedir. Bu konuda yapılan deneysel çalışmaların zorlukları ve ölçek etkileri nedeniyle havalandırıcı tasarımlarında fiziksel modeller, diğer hidrolik problemler kadar etkili olamayabilir. Bu nedenle doğruluğu test edilmiş sayısal yöntemlerin havalandırıcı tasarımında kullanımı faydalı olabilmektedir.

- 1) Ilısu Barajının önceki tasarımında fiziksel model çalışması yapılmasına rağmen yeni tasarımının fiziksel model deneyleri yapılmamış ve uygunluğu tam olarak kontrol edilmemiştir. Ayrı bir çalışmada bu barajın havalandırıcılarının, mevcut sonuçlarla kalibre edilmiş sayısal model çalışmasıyla detaylı olarak incelenmesi düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- Abbasoğlu, C. and Okay G. (1992) The remedial structures on the spillways of Keban dam, *Water Power and Dam Construction*, Dec., s22-27.
- Aydın, M.C. (2005) Alttan Alışlı Dolusavak Havalandırıcıların CFD Analizi. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Chanson, H. (1989) Flow downstream of aerator spacing, *Journal of Hydraulic Research*, 27, No.4, 519-536.
- Dündar, O. (2009) Dolusavak akımlarının Modellemesinde Sayısal Hesaplama Yönteminin Güvenli Kullanımı, ANKARA
- Gündüz, İ., Caferoğlu Ö., Yenimol S., (2013) Silis Dumanlı Beton Uygulaması. 43. Devlet Su İşleri Yayınları, MARDİN
- Kells, J.A., Smith, C.D., (1991) Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18, No.3, 358-377.
- Kökpınar, M.A. ve Göğüş M. (2002) High-speed jet flows over spillway aerators, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Dec.29, No.6, 885-898.
- Nie, M.X. (2001) Cavitation prevention with roughened surface, *Journal of Hydraulic Engineering*, Dec.29, No.6, 885-898.
- Ozturk, M., Aydın M.C., Aydın S. (2005) Damage Limitation - A New Spillway Aerator, *Water Power and Dam Construction*, 60(5), 36-40, 2008.
- Pfister M., Hager W.H. (2010) Chutu Aerators I: Transport Characterictis, *Journals of Hydraulic Engineering*. ASCE. 136:352-359.
- Pinto, N.L. De S., Neidert, S.H. and Ota JJ. (1982) Aeration at high velocity flows. *Water Power and Dam Construction*, 34, No.2, 34-38, 34, No.3, 42-44
- Russel, S.O., Sheenan G.J. (1974) Effect of entrained air on caevitation damage, *Canadian Journal of Civil engineering*, Vol.1, 97-107.
- Rutschmann P, Hager W.H. (1990) Air entrainment by spillway aerators, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116, No.6, 765-782.
- Wood, I.R, Ackers P, Loveless J, (1983) General method for critical point on spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109, No.2, 308-312