

# Yukarı Kaleköy Barajı ve HES Dolusavak Hidrolik Model Deneyleri

**Mustafa Göğüş, A. Burcu-Altan Sakarya, Mete Köken,**

**Ali Ersin Dinçer, Cüneyt Yavuz, Emre Haspolat**

ODTÜ İnşaat Müh. Böl. Hidromekanik Lab.

Tel: (312) 210 54 99

E-Posta: mgogus@metu.edu.tr

## Öz

Murat nehri üzerinde yapılmakta olan Yukarı Kaleköy Barajı ve HES'in dolusavak yapısına ait hidrolik model çalışmaları ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidromekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Dolusavak yapısı girişinde ve üzerindeki akım şartlarının incelenmesi amacı ile yapılmış olan bu model çalışması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. 1/70 ölçekli imal edilen orijinal model, ortak ayırma duvarına sahip fakat boykesitleri farklılık gösteren bitişik iki dolusavak deşarj kanalından oluşmaktadır. Bu model üzerinde gerekli olan çalışmalar tamamlandıktan sonra, deşarj kanalları arasındaki ayırma duvarı kaldırılmış ve kanalların boykesitleride aynı kotlara alınarak yapı tek deşarj kanallı olarak revize edilmiştir. Her iki durumda da model üzerinde, verilen akım şartlarında yapı üzerindeki su derinlikleri ve basınç değerleri ölçülmüş ve mevcut havalandırıcıların yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Yapı üzerindeki akımın yeterli derecede havalandırılabilmesi ve kavitasyon riskinin oluşmaması için gerekli olan havalandırıcıların boyutları belirlenmiştir. Bu çalışmada model üzerinde yapılan deneyler, elde edilen ölçümler, bunlarla ilgili veriler, eski ve yeni havalandırıcıların akım şartları üzerindeki etkileri sunulmuştur.

**Anahtar sözcükler:** Dolusavak modelleri, Dolusavak havalandırıcıları, Hidrolik deneyler, Kaviteasyon.

## Giriş

Bu çalışma, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ile Kalehan Kale Enerji Üretim A.Ş. (KALEHAN) arasında imzalanan ve 2013.03.03.2.00.63 numaralı proje anlaşması kapsamında yapılan Yukarı Kaleköy Barajı ve Hidroelektrik Santrali dolusavağının model testlerini içermektedir. Model çalışmalarının tamamı ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidromekanik Laboratuvarında TEMELSU A.Ş. tarafından gerçekleştirilen tasarımlar esas alınarak yapılmıştır (Göğüş ve diğ., 2014). Elektrik enerjisi üretmek amacı ile yapılmakta olan Yukarı Kaleköy Barajı ve HES, Bingöl ili sınırları içerisinde Murat nehri üzerinde yer almaktadır. Kurulu gücü 450 MW olan bu projede 3+1 Francis türbini bulunmaktadır. 4 adet radyal kapağı olan dolusavak barajın sol sahilinde yer almaktadır. Dolusavağın 1237,55 m rezervuar su kotunda geçirmesi beklenen muhtemel maksimum feyezan debisi  $Q_{PMF} = 8476,4 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir.

Bu çalışma kapsamında deneyler iki farklı model üzerinde yapılmıştır. Model-I, dolusavağın orijinal tasarımına göre yapılmış olup, savak yapısından sonra dolusavağın boşaltım kanalı birbirinden bağımsız iki ayrı kanal şeklinde ortak bir ayırma duvarı ile

farklı eğimlerde mansaba kadar uzanmaktadır. Model-II'de ise, KALEHAN'ın isteği üzerine, dolusavak boşaltım kanalları arasındaki ayırma duvarı kaldırılmış ve düşük kottaki kanal yükseltılarak diğeri ile aynı kota getirilmiştir. Bu durumda dolusavak yapısının boşaltım kanal sayısı bir olmuştur.

## Model Çalışmaları

### Model Çalışmalarının Amacı

KALEHAN tarafından model çalışmaları kapsamında yapılması istenilen araştırmalardan bazıları şunlardır (TEMELSU, 2013).

- Dolusavak yaklaşım kanalında ve yan duvarları etrafında, dolusavak yapısı üzerinde ve ayakları etrafında akım şartları.
- Dolusavak boşaltım kanallarında akım şartları, yüzey dalgaları ve yan duvar yüksekliklerinin yeterliliği.
- Boşaltım kanalları üzerinde yer alacak olan havalandırıcıların şekil ve yerleri.

### Model Ölçeği ve Yapımı

Laboratuvarın debi kapasitesi ve yer imkanları göz önüne alınarak yapılacak olan modelin ölçeği Froude benzeşim kuralına göre 1/70 olarak belirlenmiştir. Rezervuarın büyük bir bölümü, dolusavak yapısı ve boşaltım kanalları ve sıçratma eşiğinin mansap kısmında nehrin yeterli bir bölümü model inşasına dahil edilmiştir. Modele verilen suyun debisi, su alma borusu üzerine yerleştirilmiş olan akustik bir debi metre ile, akım derinlikleri limnometrelerle ve basınç yükseklikleri piezometre tüpleri ile ölçülmüştür.

### Model-I Üzerinde Yapılan Deneyler (Orijinal Tasarım)

Orijinal tasarıma göre yapılan Model-I'in, muhtemel maksimum feyezan debisi olan  $Q_{PMF} = 8476,4 \text{ m}^3/\text{s}$ 'yi rahatlıkla geçirdiği görüldükten sonra, model elemanları üzerindeki akım şartlarını incelemek üzere gerekli deneyler  $Q_{PMF} = 8476,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{1000} = 4362 \text{ m}^3/\text{s}$  ve  $Q_{100} = 3256 \text{ m}^3/\text{s}$  debiler için tekrarlanmıştır.

Kapakların hepsi açıkken, yukarıda belirtilen üç farklı debide deneyler yapılmış ve akım şartlarının yaklaşım kanalında, dolusavak girişinde ayaklar etrafında ve dolusavak gövdesi üzerinde oldukça düzgün olduğu ve boşaltım kanalları boyunca önemli derecede yüzey dalgalarının oluşmadığı gözlenmiştir. Bu bölgelerde akımların hidrolik açıdan oldukça iyi olduğu ve dolayısıyla model üzerinde herhangi yapısal bir değişikliğe gerek olmadığı anlaşılmıştır.

Her bir boşaltım kanalında akım derinlikleri sağ ve sol duvarlar ile kanal merkezleri boyunca ölçülmüş ve mevcut duvar yüksekliklerinin iki bölge dışında yeterli olduğu tespit edilmiştir. Boşaltım kanallarının mansaba doğru daralma özelliklerinden dolayı duvar boylarınca su derinliklerinin kanal merkez çizgilerine nazaran daha fazla olmasından dolayı Kanal-I (sol) ve Kanal-II'de (sağ) iki bölgede  $Q_{PMF} = 8476,4 \text{ m}^3/\text{s}$ 'de suyun zaman zaman duvar yüksekliklerini aştığı belirlenmiş fakat bunların genel olarak bir problem yaratmayacağı kanaati oluşmuştur.

Test edilen debilerin hepsinde de akımlar sıçratma eşiklerinden jet halinde ayrılmakta ve havada kısmen çarpışarak mansapta nehir üzerinde uygun yerlere düşmektedir. Akımların jet boyları, teorik hesaplamalarla elde edilen değerlere oldukça yakındır.

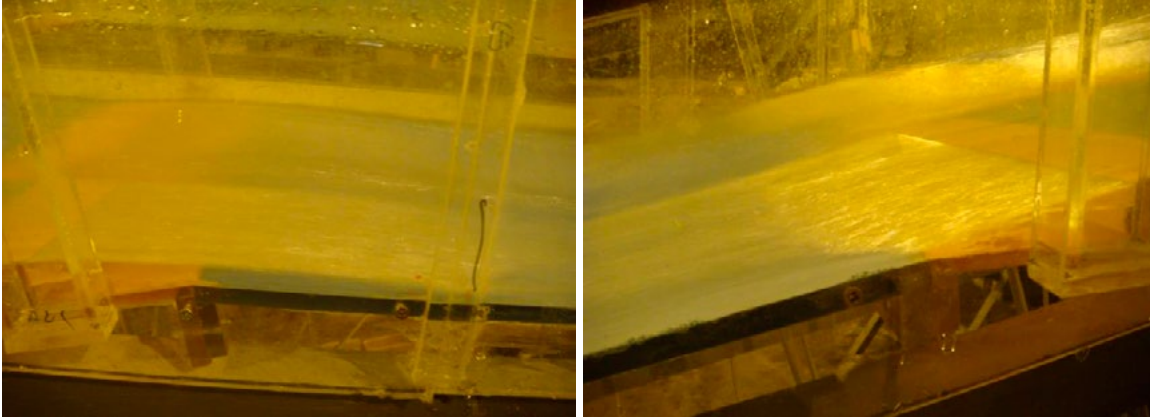
### Havalandırıcılar Üzerinde Akım Şartları

Kanal-I ve -II'de orijinal tasarıma göre yer alan dörder adet havalandırıcı üzerindeki akım şartları  $Q_{PMF}$ ,  $Q_{1000}$  ve  $Q_{100}$  debilerinde gözlenmiş ve havalandırıcılar üzerindeki

ortalama akım jet boyları ölçülmüştür (Şekil 1-2). Her iki kanalda da test edilen her bir debide akımın jet boyu, akım doğrultusunda mansaba doğru ilerledikçe artmaktadır. Kanal-I ve -II'de 1 numaralı havalandırıcılarda  $Q_{PMF}$  gözlenen en küçük akım jet boyları sırasıyla 7,70 m ve 5,60 m olarak ölçülmüştür. Kanal-I ve -II'de 1. ve 2. havalandırıcılar akımı tam olarak havalandıramamaktadırlar.



Şekil 1. Kanal-I ve -II'de havalandırıcıların görünümü ( $Q=Q_{1000}$ ).



Şekil 2. Kanal-I ve II'de 1. havalandırıcının yandan görünüşü ( $Q=Q_{1000}$ ).

### **Dolusavak Yapısı Boyunca Basınç Ölçümleri**

Basınç ölçümleri model üzerinde her bir kanalın simetri eksenini boyunca yerleştirilmiş olan toplam 69 noktada (Kanal-I'de 35 ve Kanal-II'de 34 noktada)  $Q_{PMF}$ ,  $Q_{1000}$  ve  $Q_{100}$  değerleri için ölçülmüştür. Kanal-I'de ölçülen minimum basınç yükseklikleri;  $Q=Q_{PMF}$ 'de -0,42 m,  $Q=Q_{1000}$ 'de -0,98 m ve  $Q=Q_{100}$ 'de -0,56 m'dir. Bu noktaların hepsi de, mevcut havalandırıcıların mansap kısmında ve akımların jet boyları içerisinde olup, betonun limit çekme değeri olan -4,0 m'den küçüktür. Kanal-II'de atmosfer altı basınç ölçülmemiştir.

### **Kavitasyon Analizleri**

Test edilen her bir debi için ölçülen ortalama basınç değerleri kullanılarak kavitasyon indeksi,  $\sigma$ , hesaplanmıştır.

$$\sigma = (P_0 - P_v) / (\frac{1}{2} \rho V^2) \quad (1)$$

Burada  $P_0$  ölçüm noktasındaki mutlak basıncı ( $P_0=P_a+P_g$ ;  $P_a$ =atmosfer basıncı ve  $P_g$ =ölçülen basınç),  $P_v$ =suyun buharlaşma basıncını,  $\rho$ =suyun yoğunluğunu ve  $V$ =basınç ölçüm noktasında akımın hızını göstermektedir. Kanal-I ve -II için kaviteasyon indeksleri, TEMELSU (2013) tarafından kullanılan  $P_a =9,03 \text{ t/m}^2$  ve  $P_v = 0,233 \text{ t/m}^2$  değerleri kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 1 ve 2). Basınç ölçüm noktalarının büyük bir kısmında  $\sigma$ 'nın değeri kaviteasyon için kritik değer olan 0,2'nin üzerindedir (Falvey, 1990). Kanal-I'de 0,2'den küçük elde edilen  $\sigma$  değerleri;  $Q=Q_{PMF}$ 'de 25 numaralı noktada 0,163 ve  $Q=Q_{1000}$ 'de 26 numaralı noktada 0,185'dir. Her iki noktada da akımın hızları 30 m/s'nin üzerindedir. Kanal-II'de 0,2'den küçük elde edilen  $\sigma$  değerleri;  $Q=Q_{PMF}$ 'de 31 ve 32 numaralı noktalarda 0,177 ve 0,174 ve  $Q=Q_{1000}$ 'de 23 numaralı noktada 0,174'dür. Bu noktalarda ölçülen ortalama akım hızları 30 m/s'nin üzerindedir.

## Havalandırıcıların Performans Analizleri

### Hava Debisi ve Hızlarının Hesaplanması

Havalandırıcıların performanslarının analizi için bunlardan geçen hava debilerinin ve hızlarının hesaplanması gerekir. Hava debisinin su debisine oranı,  $Q_a/Q$ , boyutsuz havalanma katsayısı olup  $\beta$  ile gösterilmekte ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır (Kokpinar ve Gogus, 2002).

$$\beta = 0,0189(L_{jet}/d)^{0,83} [(\sum A_a/A_w) (H \tan\Theta)]^{0,24} \quad (2)$$

Burada  $L_{jet}$  havalandırıcı üzerinde oluşan su jetinin uzunluğu,  $d$  akım derinliği,  $\tan\Theta$  kanal eğimi,  $A_a$  hava bacasının kesit alanı ve  $A_w$  havalandırıcının memba kısmında akımın alanıdır ( $A_w=b \times d$ ,  $b$ =kanal genişliği). Yukarıda verilen  $\beta$ 'nin ifadesi laboratuvar datalarından elde edilmiş olup ölçek etkisini içermemektedir.  $\beta_p$  ölçek etkisini de içeren  $\beta$ 'nin prototip çalışmalara uygulanabilecek ifadesidir.

$$\beta_p = Q_a/Q = 5,194 \beta^{1,15} \quad (3)$$

Hava bacasından geçen havanın hızı süreklilik denkleminde elde edilir.

$$V_a = Q_a / A_a \quad (4)$$

Literatürde hava hızlarının 100 m/s'den fazla olmaması önerilmektedir (Falvey, 1990). Modelde kullanılan hava bacalarının prototip değerleri göz önüne alınarak iki adet hava bacası olan her bir havalandırıcı için test edilen debi değerlerinde;  $A_a =2 \times 1,0 \times 2,5 = 5 \text{ m}^2$  ve ölçülen akım jet boyları için,  $\beta$ ,  $\beta_p$  ve hava hızları hesaplanarak Kanal-I ve -II için bulunmuştur. Hesaplanan  $V_a$  değerleri 100 m/s'den küçük oldukları için hava bacalarının kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmaya gerek duyulmamıştır.

### Ortalama Hava Konsantrasyonlarının Hesabı

Dolusavak boşaltım kanallarında havalandırıcılardan sonra akım üç bölge halinde incelenir. Birinci bölge akım saptırıcısının mansap ucundan (akım jetinin havalandığı kesit;  $x=0$ ) başlar ve jetin boşaltım kanalına tekrar temas ettiği noktada sona erer ( $0 \leq x/L_{jet} \leq 1$ ). İkinci bölge ise akım jetinin boşaltım kanalına tekrar temas ettiği nokta ile boşaltım kanalı üzerinde  $x=3L_{jet}$  noktası arasındaki bölgedir. Son bölge ise "uzak-bölge" olarak adlandırılır ve  $x/L_{jet} \geq 3$  şartını sağlayan bölgedir. Pfister ve Hager (2010) akımdaki ortalama hava konsantrasyonunun hesabı için aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir.

$3 \leq x \leq L_{jet}/9$  için

$$C_a = C_{a(3L_{jet})} + 0,02(x/L_{jet} - 3) \sin(\Theta - 30) \quad (5)$$

ve

$$C_{a(3L_{jet})} = 0,008 (L_{jet}/d) + C_{ai} \quad (6)$$

Burada  $C_{ai} = 0,1$ ,  $5 \leq L_{jet} / d \leq 40$  ve  $x$  jetin saptırıcı üzerinden havalandığı noktadan ( $x=0$ ) itibaren boşaltım kanalı üzerinde ölçülen mesafedir.

Kanal-I ve -II'de, test edilen debilerde  $C_{a(3L_{jet})}$  ve  $C_a$  değerleri hesaplanmıştır. Kanal-I'de  $C_{a(3L_{jet})}$  ve  $C_a$  değerleri sırasıyla 0,1098 ve 0,0945'den, Kanal-II'de ise  $C_{a(3L_{jet})}$  değerleri 0,1075'den,  $C_a$  ise 0,0774'ten büyüktür. Literatürde kavitasyon hasarının olmaması için kabul edilen değer  $C_a > 0,08$ 'dir (Falvey, 1990). Her iki kanalda da havalandırıcılar arasındaki kesitlerde  $C_a$  değerleri 0,0774'den küçük olmadığı için, test edilen debilerin tümü için her iki kanalda da kavitasyon riskinin olmadığı söylenebilir.

Tablo 1. Kanal-I için kavitasyon indeksleri ( $Q=Q_{PMF}$ )

Ölçüm Noktası	Dolusavak kretinden mesafe (m)	Hız, V (m/s)	Ölçülen Basınc, $P_g$ ( $t/m^2$ )	Kavitasyon İndeksi, $\sigma$
1	0,65	12,36	1,12	1,275
2	7,40	15,44	1,05	0,810
3	13,35	18,02	1,33	0,612
4	18,75	19,66	5,32	0,717
5	23,77	19,66	12,67	1,090
6	29,50	19,66	17,22	1,321
7	45,14	20,59	16,59	1,175
8	53,72	22,47	6,16	0,581
9	66,33	23,02	4,69	0,499
10	73,32	19,57	2,73	0,590
11	85,55	22,24	2,87	0,463
12	97,94	22,62	2,94	0,450
13	104,85	24,26	4,34	0,438
14	113,77	26,57	3,01	0,328
15	123,23	23,64	6,30	0,530
16(A <sub>1</sub> ) <sup>*</sup>	129,03	22,69	6,16	0,570
17	139,97	24,56	10,29	0,621
18	154,85	25,12	5,53	0,446
19	169,51	26,93	7,28	0,435
20 (A <sub>2</sub> )	175,64	<b>29,23</b>	6,79	0,358
21	186,64	28,06	-0,07	<b>0,217</b>
22	201,50	<b>32,87</b>	4,20	<b>0,236</b>
23	216,57	<b>33,19</b>	7,00	0,281
24 (A <sub>3</sub> )	222,37	<b>33,81</b>	7,21	0,275
25	233,40	<b>32,37</b>	-0,07	<b>0,163</b>
26	247,94	<b>35,62</b>	6,09	0,230
27	263,07	<b>29,67</b>	6,02	0,330
28 (A <sub>4</sub> )	269,21	<b>30,27</b>	7,00	0,338
29	280,21	26,43	-0,42	<b>0,235</b>
30	294,41	27,19	6,79	0,414
31	309,07	28,00	5,25	0,351
32	327,58	29,70	11,06	0,442
33	337,83	36,00	-	-
34	346,69	36,68	14,56	0,341

\*A<sub>i</sub>, i=1-4, havalandırıcılar

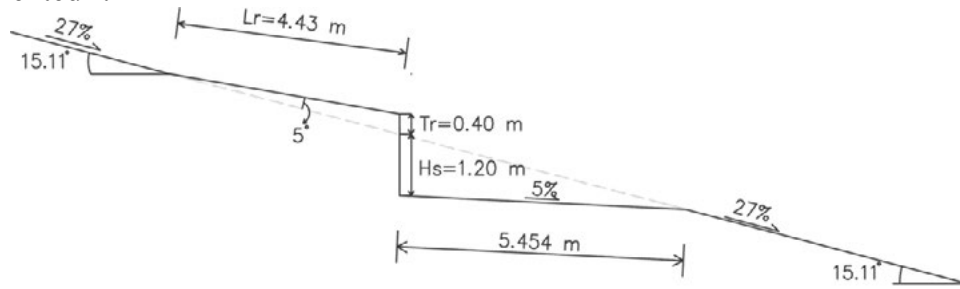
Tablo 2. Kanal-II için kavitasyon indeksleri ( $Q=Q_{PMF}$ )

Ölçüm Noktası	Dolusavak kretinden mesafe (m)	Hız, V (m/s)	Ölçülen Basınc, $P_g$ ( $t/m^2$ )	Kavitasyon İndeksi, $\sigma$
1	0,00	11,09	0,84	1,538
2	6,30	14,41	0,14	0,844
3	12,46	17,30	1,19	0,655
4	18,00	18,80	4,97	0,764
5	23,08	18,80	12,67	1,191
6	28,71	18,80	17,50	1,459
7	53,50	19,30	16,73	1,345
8	67,16	18,44	7,28	0,928
9	73,45	20,66	5,04	0,636
10	90,97	21,16	4,83	0,597
11	108,82	20,55	5,32	0,656
12	121,02	20,91	1,61	0,467
13	132,65	20,20	3,08	0,571
14	136,55	20,32	0,49	0,441
15	146,39	20,61	3,85	0,584
16	158,21	22,08	6,23	0,605
17 (A <sub>1</sub> ) <sup>*</sup>	163,80	24,90	5,04	0,438
18	175,49	23,94	6,65	0,529
19	185,95	27,37	5,04	0,362
20	199,73	<b>29,84</b>	4,83	0,300
21 (A <sub>2</sub> )	210,80	<b>30,39</b>	6,09	0,316
22	222,34	<b>33,19</b>	6,86	0,279
23	238,89	<b>34,13</b>	4,62	0,226
24	252,07	<b>32,60</b>	7,84	0,307
25 (A <sub>3</sub> )	257,53	24,69	7,35	0,520
26	269,02	22,91	9,10	0,669
27	282,20	19,87	4,27	0,649
28	294,36	24,02	7,49	0,554
29 (A <sub>4</sub> )	300,02	<b>28,11</b>	5,32	0,350
30	309,77	<b>32,03</b>	7,49	0,312
31	329,03	<b>40,42</b>	5,95	<b>0,177</b>
32	343,56	<b>41,64</b>	6,58	<b>0,174</b>
33	357,07	<b>40,00</b>	13,58	0,274
34	370,93	<b>32,56</b>	34,44	0,800
35	379,44	<b>31,53</b>	14,35	0,457

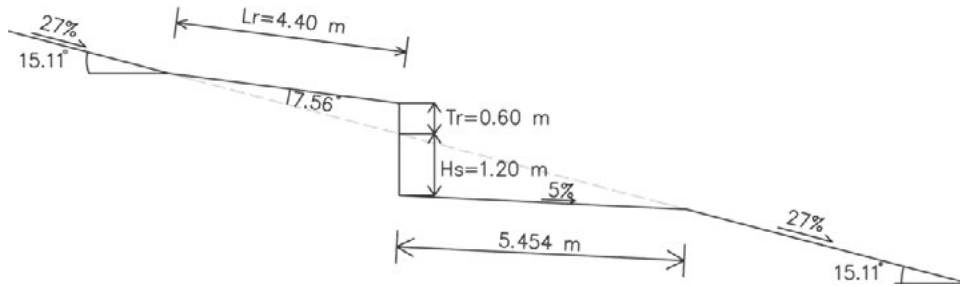
## Model-I Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Orijinal tasarıma göre yapılan Model-I'de gerekli deneylerin tamamlanmasından sonra, deney sonuçları TEMELSU'nun yetkilileri ile irdelenmiş ve neticede; dolusavak

yaklaşım kanalında ve yan duvarlarında, dolusavak gövdesinde ve ayaklarının şekil ve boyutları üzerinde herhangi bir değişiklik yapmaya gerek olmadığı kanaati oluşmuştur. Kanal-I ve -II üzerinde bulunan birinci ve ikinci havalandırıcılar akımı yeteri kadar havalandıramamakta ve dolayısıyla bunların üzerinde oluşan akım jetlerinin boyları oldukça kısadır. Bu istenmeyen durumun ortadan kaldırılması için her iki kanalda da akım saptırıcılarının yüksekliklerinin 0,20 m kadar daha yükseltilmesinin yararlı olacağı düşünülmüş ve bu nedenle orijinal tasarımda 0,40 m olarak tasarlanan saptırıcı yüksekliklerinin mevcut saptırıcı uzunluklarını değiştirmeden 0,60 m olması kararlaştırılmıştır. Şekil 3 ve 4 saptırıcıların orijinal ve yeni tasarımdaki boyutlarını göstermektedir.



Şekil 3. Orijinal tasarımdaki havalandırıcıların boyutları



Şekil 4. Yeni tasarımdaki havalandırıcıların boyutları

## Model-I (Yeni Tasarım) Üzerinde Yapılan Deneyler

Model-I (Orijinal tasarım) üzerinde yapılan deneylerin tamamı,  $Q_{PMF}$ ,  $Q_{1000}$  ve  $Q_{100}$  debileri için yeni tasarıma göre düzenlenen Model-I üzerinde tekrarlanmış ve aşağıdaki bölümlerde kısaca özetlenmiştir.

Dolusavağın; yaklaşım kanalında, yan duvarlarında ve ayaklarında ve dolusavak yapısı ile kanallardaki birinci havalandırıcılar arasında herhangi bir değişiklik yapılmadığı için, belirtilen bölgelerde gözlenen akım şartları önceki deney sonuçlarına göre bir farklılık göstermemiştir. Değiştirilen akım saptırıcıların yüksekliklerinden dolayı, her iki boşaltım kanalında da akım derinlikleri ve basınçlarda orijinal tasarım durumuna göre değişiklikler gözlenmiştir. Yapılan gözlemlerden, her iki boşaltım kanalında da akım derinlikleri ve yüzey dalgalanmaları açısından istenmeyen herhangi bir durumun mevcut olmadığı anlaşılmıştır. Sıçratma eşiklerinden çıkan su jetlerinin uzunlukları önceki durumda elde edilen değerlerle uyumludur.

### Havalandırıcılar Üzerinde Akım Şartları

Test edilen üç farklı debide Kanal-I ve II'de havalandırıcılar üzerinde oluşan akımın jet boyları ölçülmüş ve bunların orijinal havalandırıcılarla yapılan deneylerden elde edilen değerlerden oldukça büyük oldukları görülmüştür.  $Q=Q_{PMF}$  için Kanal-I ve -II'de gözlemlenen en küçük jet boyları sırasıyla 14,70 m ve 11,90 m'dir. Şekil 5, Kanal-I ve -

II'de 1. ve 2. havalandırıcılar üzerindeki akım şartlarını göstermektedir. Yapılan ölçüm ve gözlemlerden sonra yeni tasarıma göre düzenlenen Model-I'de akımın, her iki boşaltım kanalında da oldukça iyi bir şekilde havalandırıldığı söylenebilir.



Şekil 5. Kanal-I ve II'nin 1. ve 2. havalandırıcılarının yandan görünüşü ( $Q=Q_{PMF}$ )

### **Basınç Ölçümleri**

Dolusavak yapısı boyunca yapılan basınç ölçümlerinden elde edilen en düşük basınç değerleri  $Q=Q_{PMF}$  için; Kanal-I'de -0,42 m ve Kanal-II'de -0,07 m'dir. Basınç ölçüm noktalarının hepsinde akımların havalanması oldukça iyidir.

### **Kavitasyon Analizi**

Yeni modelin dataları kullanılarak kavitasyon indeksi,  $\sigma$  test edilen üç farklı debi değerleri için hesaplanmıştır. Yeni model için bulunan  $\sigma$  değerleri, orijinal modelden elde edilen  $\sigma$  değerlerinden oldukça yüksektir. Kanal-I'de  $Q=Q_{PMF}$  için bulunan en düşük kavitasyon indeksi 31 numaralı noktada  $\sigma = 0,189$ 'dur. Kanal II'de ise en küçük kavitasyon indeksi  $Q=Q_{100}$  için 31 numaralı noktada  $\sigma = 0,177$  olarak bulunmuştur.

Hesaplanan en küçük  $\sigma$  değerleri 0,2 değerinden fazla küçük olmadıklarından ve bunlar hesaplanırken kanalların en kesitlerindeki en küçük su derinlikleri, ki bunlar çoğunlukla orta eksen boyunca oluşmaktadırlar, kullanıldığından dolayı kanal en kesitleri boyunca ortalama  $\sigma$  değerleri hesaplanmış olan değerlerden büyük olacaktır.

### **Havalandırıcıların Performans Analizleri**

Akım saptırıcıları üzerinde oluşan jet boylarının ölçülen değerleri kullanılarak, her bir kanaldaki havalandırıcı için  $\beta$ ,  $\beta_p$  ve hava hızları hesaplanmış ve sadece tek bir debide ( $Q=Q_{1000}$ ) iki havalandırıcı hariç (Kanal-I ve -II'de sırasıyla 3. ve 4. havalandırıcılar) hava hızlarının hepsinin 100 m/s'den küçük oldukları görülmüştür.

### **Ortalama Hava Konsantrasyonlarının Hesabı**

Önceden yapıldığı gibi, Kanal-I ve -II için test edilen debilerde  $C_{a(3Ljet)}$  ve  $C_a$  değerleri hesaplanmış ve ortalama hava konsantrasyon değerleri Kanal-I'de 0,12 nin Kanal-II'de ise 0,11'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. Her iki kanalda da  $C_a$  değerleri 0,08'den büyük olduğu için kanallarda kavitasyon riskinin olmadığı söylenebilir.

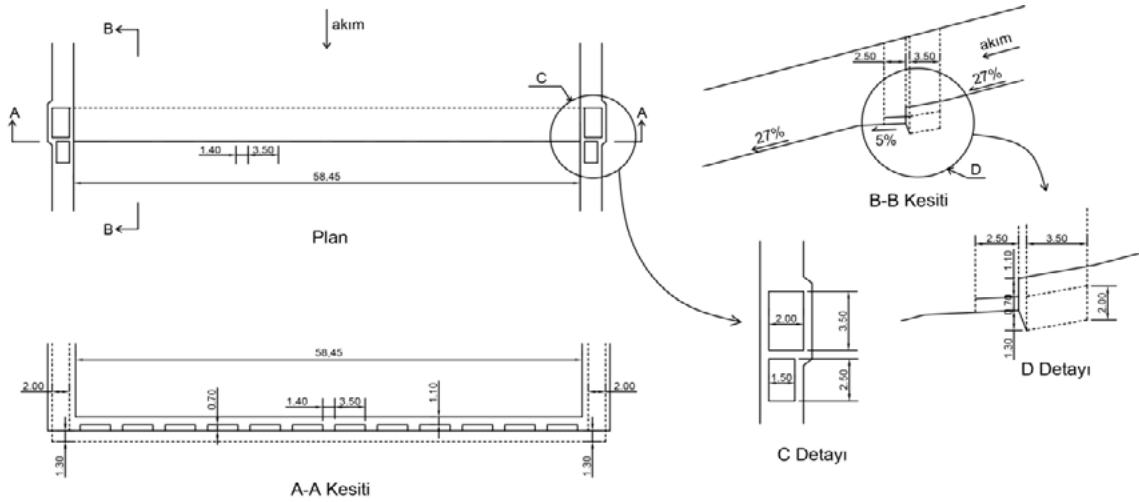
## **Model-II Üzerinde Yapılan Deneyler**

Orijinal tasarımda yer alan Kanal-I'in zemin şartlarının uygunluğunun belirlenmesinden sonra, KALEHAN'ın önerisi ile yeni tasarımda Kanal-I yükselttilerek Kanal-II'nin

kotuna çıkartılmış ve kanallar arasındaki ayırma duvarı da kaldırılarak boşaltım kanal sayısı bire düşürülmüştür. Bu öneri kapsamında Model-I üzerinde gerekli değişiklikler yapılmış ve yeni model Model-II olarak isimlendirilmiştir.

Model-I'in Kanal-II'sinde yeni tasarıma göre düzenlenmiş olan 4 adet havalandırıcı, Model-II üzerinde boşaltım kanalı eni boyunca uzatılarak yeni modelin havalandırıcıları elde edilmiştir. Ancak bu yeni modelde boşaltım kanalının enleri havalandırıcıların buldukları kesitlerde Model-I'e göre hemen hemen iki misli artmıştır. Mevcut havalandırıcılarda sol ve sağ boşaltım kanalı yan duvarları boyunca bulunan iki adet havalandırma bacasının, kanal enkesitleri boyunca, özellikle kesitlerin orta bölgelerinde, akımı yeteri kadar havalandırmayacaklarının tespit edilmesinden sonra, akım saptırıcılarının alt kısımlarına kanal en kesitleri boyunca ilave havalandırma tünellerinin yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sol ve sağ kanal duvarları üzerinde iki adet ilave havalandırma bacası yer alacak olan bu havalandırma tünelleri üzerine şaşırtmalı olarak farklı sayılarda havalandırma pencereleri açılmıştır. Şekil 6 Model-II'nin 1. havalandırıcısının plan ve kesitini göstermektedir.

Model-I'de yapılan deneylerin hepsi Model-II'de de yine aynı debilerde;  $Q_{PMF}$ ,  $Q_{1000}$  ve  $Q_{100}$  için kapakların tamamen açık olması durumlarında tekrarlanmıştır. Bu deneyler kapsamında; akım derinlikleri, basınç yükseklikleri, kavitasyon indeksleri ve ortalama hava konsantrasyonları hesaplanmıştır.



Şekil 6. 1. havalandırıcısının plan ve kesitleri.

### Dolusavak Gövdesi ile Sıçratma Eşikleri Arasında Akım Şartları

Su yüzü kotları ve akım derinlikleri, boşaltım kanalının sağ ve sol duvarları ve kanalın simetri eksenini boyunca ölçülmüştür. Yapılan gözlemlerden ve elde edilen verilerden, boşaltım kanalındaki akım şartlarının ve oluşan su yüzeyi dalgalarının kabul edilebilir olduğu kanaati oluşmuştur.  $Q=Q_{PMF}$  durumunda dolusavak kretinden yaklaşık olarak 280-290 m mansapta tespit edilen zaman zaman akımın sağ duvar üzerinden taşma durumunun bir sorun yaratmayacağı ve dolayısıyla mevcut duvar yüksekliklerinin yeterli olduğu kabul edilmiştir. Dolusavak sıçratma eşiğinden çıkan akım jet boylarının TEMELSU (2013) tarafından verilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

### Havalandırıcılar Üzerinde Akım Şartları

Havalandırıcılardaki akım şartları,  $Q_{PMF}$ ,  $Q_{1000}$  ve  $Q_{100}$  debileri için gözlenmiş ve akım saptırıcılar üzerindeki jet boyları ölçülmüştür. Tespit edilen en küçük akım jet boyu  $Q=Q_{PMF}$  için 1. havalandırıcıda 15,40 m'dir. Ölçülen akım jet boylarından ve gözlenen akım şartlarından, havalandırıcıların akımı yeteri kadar havalandırdıkları söylenebilir.



## Dolusavak Boyunca Basınç Ölçümleri

Dolusavak boşaltım kanalının simetri eksenini boyunca yerleştirilmiş olan 26 adet ölçüm noktasında, test edilen her bir debi için akımın basınçları ölçülmüştür. Elde edilen en küçük basınç değerleri;  $Q=Q_{PMF}$  için 22 numaralı noktada -1,47 m,  $Q=Q_{1000}$  için 22 ve 25 numaralı noktalarda -1,30 m ve  $Q=Q_{100}$  için 22 numaralı noktada -0,77 m'dir. Belirtilen bu noktaların hepsinde de akımlar çok iyi bir şekilde havalandırıldıkları için, bu noktalarda kavitasyon riskinin olmayacağı söylenebilir.

## Kavitasyon Analizleri

Kavitasyon indeksi,  $\sigma$ 'nın hesaplanmasında, ölçüm kesitlerinde ölçülen ortalama basınç ve minimum su derinlikleri kullanılmıştır (Tablo 3). Bu şekilde bulunan  $\sigma$  değerleri, o kesite ait bulunabilecek en küçük değerlerdir. Test edilen akım debisine göre hesaplanan en küçük  $\sigma$  değerleri aşağıda özetlenmiştir.

- $Q=Q_{PMF}$  için 22 numaralı noktada  $\sigma=0,10$ 'dur. Bu nokta 4 numaralı havalandırıcı üzerinde oluşan akım jet boyu içerisinde olup tamamen havalandırılmaktadır.
- $Q=Q_{1000}$  için 23 numaralı noktada  $\sigma = 0,10$ .

Kavitasyon indeksinin 0,2'den küçük olduğu ölçüm noktalarının büyük bir kısmı, havalandırıcılar üzerindeki akım jet boyları içerisinde yer almaktadırlar ve bu noktalar oldukça iyi bir şekilde havalandırılmaktadırlar. Akım derinliklerinin  $\sigma$  üzerindeki etkisini tespit etmek için yeni  $\sigma$  değerleri ölçüm kesitinin simetri eksenindeki akım derinlikleri ve yine aynı kesitte ortalama akım derinlik değerleri kullanılarak bulunmuş ve akım derinliği arttıkça  $\sigma$  değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 3. Kavitasyon indeksleri ( $Q=Q_{PMF}$ )

Ölçüm No	Dolusavak kretinden mesafe (m)	Hız, V (m/s)	Ölçülen basınç, $P_g$ ( $t/m^2$ )	Kavitasyon indeksi, $\sigma$
1	75,44	21,28	5,53	0,62
2	85,94	20,38	4,48	0,63
3	99,94	21,48	3,15	0,51
4	110,78	23,70	2,38	0,39
5	124,25	26,46	3,78	0,35
6	134,24	35,62	3,29	0,19
7	147,42	33,27	6,30	0,27
8	158,44	33,89	6,23	0,26
9 ( $A_1$ ) <sup>*</sup>	163,81	31,45	5,25	0,28
10	176,45	29,76	0,35	0,20
11	187,22	28,24	6,93	0,39
12	200,70	29,62	8,19	0,38
13 ( $A_2$ ) <sup>*</sup>	210,80	32,31	6,86	0,29
14	221,44	29,79	-0,70	0,18
15	236,87	35,25	7,70	0,26
16	250,48	36,06	8,26	0,26
17 ( $A_3$ ) <sup>*</sup>	257,53	43,13	8,61	0,18
18	268,11	34,52	-0,28	0,14
19	279,51	41,08	2,59	0,13
20	290,14	41,88	6,37	0,17
21 ( $A_4$ ) <sup>*</sup>	299,82	43,01	5,81	0,15
22	313,39	37,47	-1,47	0,10
23	334,74	39,05	6,93	0,20
24	361,33	38,46	23,17	0,42
25	368,43	34,45	31,43	0,67
26	379,54	37,48	16,10	0,35

## Havalandırıcıların Performans Analizleri

Havalandırıcıların üzerlerinde ölçülen akım jet boyları göz önüne alınarak her bir havalandırıcı için  $\beta$ ,  $\beta_p$  ve hava hızları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan havalandırıcı alanları  $2 \times (1.50 \times 2.50) + 2 \times (2.00 \times 3.50) = 21,50 \text{ m}^2$  olarak alınmıştır. Havalandırıcılardaki hava hızları,  $V_a$ , test edilen her akım debisi için 100 m/s'den küçüktür. Model-II için hesaplanan  $C_{a(3Ljet)}$  ve  $C_a$  değerlerinin tümü 0,1271 ( $>0,08$ )'den büyük olup, dolusavak boşaltım kanalı boyunca kavitasyon riskinin olmadığı söylenebilir.

## Sonuç ve Öneriler

- Dolusavak yaklaşım kanalının yan duvarlarının uzunlukları ve şekilleri, akımın dolusavak yapısına oldukça üniform ve sakin bir şekilde yaklaşmasını temin ettikleri için yeterlidir.
- Test edilen her debide; dolusavak kapaklarının debi kapasitelerinin hemen hemen aynı olduğu ve dolusavak ayakları etrafındaki akım şartlarının hidrolik açıdan oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.
- Sadece  $Q_{PMF}=8476,4 \text{ m}^3/\text{s}$ 'de dolusavak kreteninden 280-290 m mansapta dolusavak boşaltım kanalının sağ duvarı üzerinde zaman zaman su taşmaları olmaktadır.  $Q_{PMF}$ 'den küçük debilerde duvarların üzerinden su taşması olmamaktadır.
- Dolusavak boşaltım kanalı boyunca, sıçratma eşiğinde ve mansabında akım şartları hidrolik açıdan oldukça iyidir.
- Akım saptırıcı yükseklikleri 0,20 m artırılmış olan havalandırıcılara ilave olarak yapılan havalandırma tünelleri sayesinde test edilen her debide akım, boşaltım kanalı boyunca iyi bir şekilde havalanmaktadır.
- Hava bacalarındaki hava akım hızları 100 m/s'den küçüktür.
- Dolusavak boşaltım kanalında  $Q_{PMF}$  için hesaplanan en düşük ortalama hava konsantrasyonu 0,1271'dir.

## Kaynaklar

Falvey, H. (1990), Cavitation in Chutes and Spillways, USBUR Monograph, No:42.

Göğüş, M. ve diğ. (2014), Yukarı Kaleköy Dam and Hydroelectric Power Plant Spillway Hydraulic Model Studies, Final Report, May 2014, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Hydromechanics Laboratory, Project No: 2013.03.03.2.00.63.

Kokpınar, M. A. and Gogus, M. (2002), High-speed jet flows over spillway aerators. Canadian Journal of Civil Engineers. 29: 885-898.

Pfister, M. and Hager, W. H. (2010), Chute Aerators II: Hydraulic Design. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol.136, No.6, 360-367.

TEMELSU (2013), Upper Kaleköy Dam and Hydroelectric Power Plant Hydraulic Calculations, Ankara.