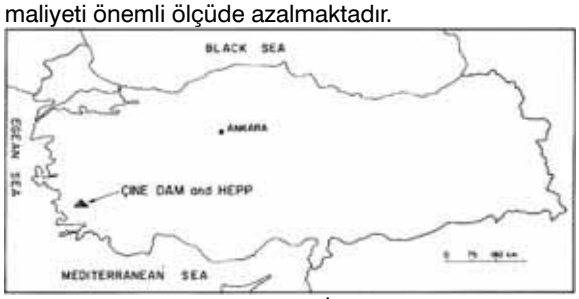
ÇİNE BARAJI BASAMAKLI DOLUSAVAĞI MODELİ HİDROLİĞİ

Yakup DARAMA (*)

1. GİRİŞ

Türkiye'nin güneybatı kesiminde Aydın İli sınırları içinde ve Menderes Nehrinin ana kolunu oluşturan Çine Irmağı üzerinde inşaatı devam eden Çine Barajı 1462 km² lik bir havzayı drene etmektedir (Şekil 1). Aydın şehrinin 16 km güneyinde inşaatı devam eden bu baraj sulama suyu, taşkın koruma, yılda 118 GWh hidroelektrik enerji üretmek amacıyla planlanmış ve yapılmaktadır. Son on yıllık sürede silindirle sıkıştırılmış beton barajların (Roller Compacted Concrete) inşaatındaki teknolojik gelişmelerden ve bu tip barajların dolgu barajlara göre daha avantajlı olmasından dolayı, planlama aşamasında kil çekirdekli kaya dolgu olarak tasarlanan Çine Barajı ve HES'in silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) olarak inşaa edilmesine karar verilmiştir. SSB tipi barajların dolgu barajlara göre avantajlarına ek olarak DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarında bu konuda yapılan çalışmalardan (Kaş, 1999; Darama, 2001) ve literatürdeki bazı diğer çalışmalarda (Chanson 1994a; Christodoulon 1993; Rajaratnam 1990; Sorensen 1985) elde edilen bilgilere göre SSB tipi basamaklı dolusavaktan akan suyun enerjisinde meydana gelen sönümlenme konvensiyonel dolusavaktakine oranla oldukça fazladır. Dolusavak üzerinde akan akımın enerjisindeki bu sönümlenme, dolusavağın mansabına yapılacak olan enerji kırıcı havuzun boyutlarının küçülmesine de oldukça etkili olmakta ve bu durumda da barajın ve enerji kırıcı yapısının inşaat süresi ve maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır.



Şekil 1 - Çine Barajı ve HES İnşaat Sahasının Yeri.

(*) Dr., DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara

Yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı gövde üzerindeki basamaklı dolusavakta ve gövdenin her iki yanında tasarlanan basamaklı yan kanallarda çeşitli debilerin deşarjı sırasında hidrolik açıdan oluşabilecek olumsuzları belirleyebilmek için fiziksel model yapılarak bu model üzerinde deneysel çalışmalar yapılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarında Çine Barajının 1/60 ve 1/30 ölçekli iki fiziksel modeli inşaa edilmiş ve deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Çine Barajının basamaklı dolusavak deşarj kanalı ve enerji kırıcı havuzunda akımın hidroliğini etkileyen önemli fiziksel parametreleri fiziksel modeller yardımıyla belirlemektir. Bu amacı gerçekleştirmek içinde ölçekleri birbirinden farklı iki fiziksel model yapılmıştır.

2. PROJE KARAKTERİSTİKLERİ

Çine Barajı drenaj alanının bazı hidrolojik özellikleri ve barajın fiziksel özellikleri Tablo 1 de özetlenmiştir.

Tablo 1 - Çine Barajı Projesinin Bazı Ana Özellikleri

Drenaj Alanı	1462 km²
Yıllık Ortalama Yağış	633 mm
10 Yıllık Tekerrür Süreli Taşkın	460 m³/s
100 Yıllık Tekerrür Süreli Taşkın	690 m³/s
Maksimum Feyezan (PMF)	3578 m³/s
Ötelenmiş Maksimum Feyezan	2570 m³/s
Kret seviyesindeki depolama hacmi	350 x 106 m³
Kret Seviyesinde Göl Yüzey Alanı	9.34 km²
Baraj Gövdesi Tipi	Ağırlık -SSB
Talvegden İtibaren Baraj Yüksekliği	130 m
Kret Uzunluğu	300 m
Kret Genişliği	150 m
Dolusavak Tipi	Basamaklı Dolusavak
Dolusavak Kapasitesi	2578 m³/s

3. MODEL

Çine Barajı basamaklı dolusavağındaki akımın hidroliğini çalışmak için 1/60 ve 1/30 ölçekli iki ayrı fiziksel model inşa edilmiştir. 1/60 ölçekli ilk modelde orijinal proje durumundaki dolusavak ve yan kanallardaki, ve enerji kırıcı havuzdaki genel akım koşulları gözlemlenmiş ve çalışılmıştır. (Foto 1). 1/30 ölçekli ikinci modelde dolusavak ve enerji kırıcı havuzun birim genişliği alınarak, 1/60 ölçekli model çalışmalarında belirlenemeyen ve dolusavak basamakları üzerindeki, enerji kırıcı havuza girişteki ve enerji kırıcı havuz içindeki akım koşullarının detaylı olarak belirlenmesi için yapılmıştır.



Foto 1 - 1/60 ölçekli Çine Barajı Basamaklı Dolusavak Modelinin Genel Görünüşü.

3.1. Model Ölçeği ve Benzeşim Bağıntıları

Yapılması planlanan hidrolik yapıların model çalışmalarından elde edilen bilgiler tasarımcılara çok yararlıdır. Bu çalışmalar akımın gözlemlenmesine ve akım derinliği, hız dağılımı, enerji kayıpları ve hidrolik yapıların çeşitli bölümlerini etkileyen dinamik veya statik basınç gibi parametrelerin sayısal büyüklükleri ile ilgili verilerin elde edilmesine olanak sağlar. Model çalışmasında doğru veri elde etmek için modelle prototip arasındaki dinamik benzeşim sağlanmalıdır. Bu benzeşim, modelle prototip arasında tam bir geometrik benzeşimin sağlanmasını ve dolusavak ve enerji kırıcı havuz gibi yapılarda Froude sayılarının modelde ve prototipte aynı olmasını gerektirir. Bu koşul dinamik benzeşimin sağlanmasında oldukça iyi bir yaklaşımdır. Bu nedenle, hem Froude benzeşimi hem de laboratvuar olanakları göz önünde bulundurularak Çine Barajının model ölçeği, model ve prototip arasındaki geometrik benzeşimin oluşturulmasıyla belirlenmiştir. Uzunluk, hız, debi, zaman ve yüzey pürüzlülüğü ölçekleri Froude kanunu ve geometrik benzeşimin sağlanması için 1/30 ve 1/60 ölçekler için hesaplanmış ve Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2 - Modelle Prototip Arasındaki Benzeşim İlişkileri ve Ölçek Oranları

Fiziksel Parametre	Birim	Benzeşim bağıntısı	Ölçek	
Uzunluk – l	m	$\lambda_l = l_p/l_m$	30	60
Hız – u	m/s	$\lambda_u = u_p/u_m = (\lambda_l)^{1/2}$	5.477	7.746
Debi – Q	m^3/s	$\lambda_Q = Q_p/Q_m = (\lambda_l)^{5/2}$	4929.50	27885.48
Zaman – t	s	$\lambda_t = t_p/t_m = (\lambda_l)^{1/2}$	5.477	7.746
Pürüzlülük – n	$s/m^{1/3}$	$\lambda_n = n_p/n_m = (\lambda_l)^{1/6}$	1.763	1.979

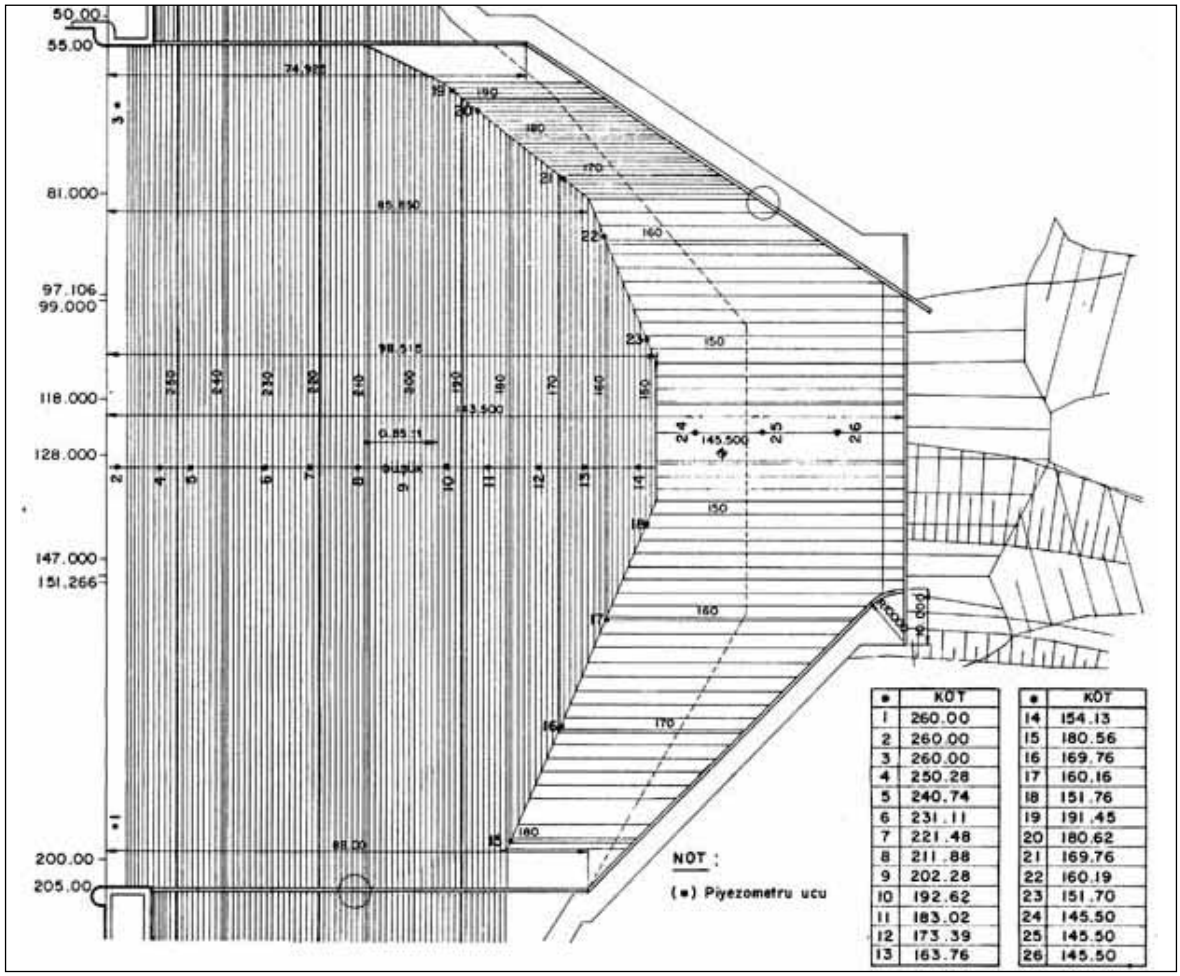
3.2. Model Çalışmaları

Yukarıda belirtildiği gibi, Çine Barajı basamaklı dolusavağı deneysel çalışmaları 1/60 ölçekli ve birim genişlikteki 1/30 ölçekli modeller kullanılarak yapılmıştır. 1/60 ölçekli ilk model dolusavakta, enerji kırıcı havuzda ve kuyruksuyu kanalındaki genel akım koşullarının çalışılması ve gerektiği takdirde yapıya etkiyebilecek kararsız hidrodinamik koşulları oluşturabilecek olumsuz akım koşullarını önlemek için yapının çeşitli bölümlerinde yapılması gerekli geometrik değişimi belirlemek için kullanılmıştır. Bu modeldeki çalışmaların tamamlanmasından sonra 1/30 ölçekli birim genişlikteki model inşaa edilerek dolusavakta akım rejimine etki eden fiziksel parametrelerin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır.

3.2.1. Orijinal Proje Durumunda 1/60 Ölçekli Modelde Yapılan Çalışmalar

Orijinal proje durumunda yapılan çalışmalar kret kesiminde, basamaklı dolusavakta, enerji kırıcı havuzda ve kuyruksuyu kanalında 5-10000 yıllık tekerrür süreli taşkınların oluşması sırasında meydana gelen akım koşullarını kapsamaktadır. Bu nedenle kret bölümünden başlayarak dolusavak basamaklarında, yan kanalarda ve enerji kırıcı havuzda meydana gelebilecek dinamik basınçlar ölçülerek değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, kuyruksuyu kanalındaki akım hızları ve akım derinlikleri, basamakların meydana getirdiği toplam enerji kaybının hesaplanması için ölçülmüştür. Basınçlar, kret boyunca, basamaklar üzerine ve enerji kırıcı havuz tabanına monte edilen toplam 26 adet piezometreden (Şekil 2) ölçülerek değerlendirilmiş ve Tablo 3'te verilmiştir. Bu tabloda verilen basınç değerleri çeşitli taşkın debilerinde oluşabilecek ortalama basınç değerleridir. Bu tablodan da görüldüğü gibi dolusavağın çalışması durumunda kavitasyona sebep olabilecek herhangi bir kritik negatif değer oluşmamıştır.

Model ölçeğinin yetersiz olmasından dolayı basamaklar üzerinde hava konsantrasyonunun, basamaklar arasında dönüşen vorteks hızının ve dolusavakdaki hava su karışımı akım hızının belirlenmesinin mümkün olmamasına rağmen basamaklardan dolayı dolusavak üzerinde toplam enerji kaybı modelde (nihai proje durumunda) ölçülen parametreler yardımıyla hesaplanabilmiştir. Ek olarak, dolusavakdaki havalanmanın başlangıç noktası belirlenmiş ve dolusavak ve yan kanallardaki genel akım koşulları gözlenmiştir.



●	KOT	●	KOT
1	260.00	14	154.13
2	260.00	15	180.56
3	260.00	16	169.76
4	250.28	17	160.16
5	240.74	18	151.76
6	231.11	19	191.45
7	221.48	20	180.62
8	211.88	21	169.76
9	202.28	22	160.19
10	192.62	23	151.70
11	183.02	24	145.50
12	173.39	25	145.50
13	163.76	26	145.50

Şekil 2 - Çine Barajının Orijinal Proje Durumundaki Planı

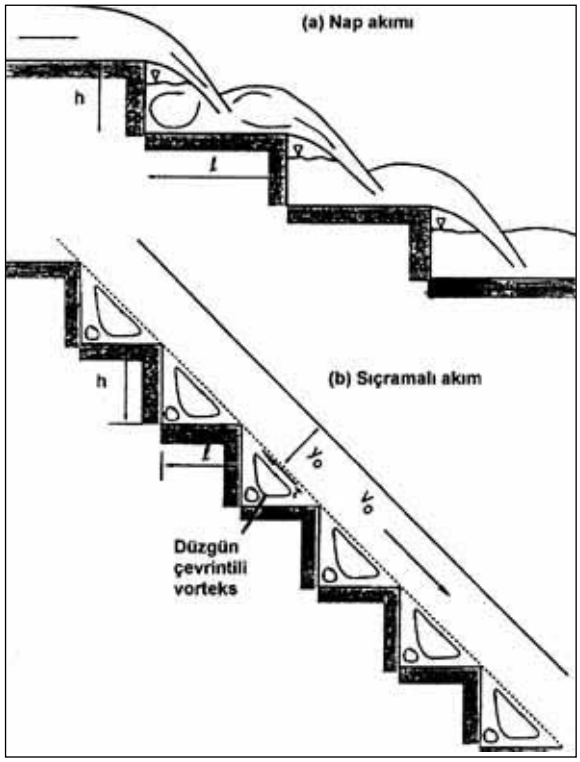
Tablo 3 - Ortalama Dinamik Basınçlar

Piezo No	Ortalama Dinamik Basınç (mss)					
	Q=100 (m³/s)	Q=300 (m³/s)	Q=500 (m³/s)	Q=1000 (m³/s)	Q=2000 (m³/s)	Q=2570 (m³/s)
1	0.54	0.84	1.08	1.14	1.14	0.78
2	0.54	0.84	1.08	1.14	1.14	0.78
3	0.54	0.84	1.08	1.14	1.14	0.78
4	0.84	1.56	2.22	1.02	1.80	2.16
5	0.90	1.80	2.10	3.00	4.38	4.26
6	-1.17	1.29	2.32	3.15	3.87	4.59
7	0.78	0.90	1.02	1.32	2.10	2.64
8	-0.18	0.90	0.90	1.98	2.94	3.36
9	-2.88	-2.88	-2.16	0.84	1.14	1.14
10	0.72	0.96	1.02	0.60	0.96	0.96
11	0.84	1.08	1.38	1.74	1.74	2.22
12	3.58	3.87	4.03	3.42	5.56	6.58
13	0.90	1.02	0.96	0.80	0.90	0.90
14	0.81	0.93	2.31	4.77	5.13	6.75
15	0.42	0.42	0.66	1.38	3.76	5.58
16	1.16	0.66	1.02	1.92	5.40	7.74
17	1.20	1.26	2.16	4.20	9.84	12.96
18	1.92	3.30	5.10	7.68	11.94	15.06
19	1.35	2.25	5.19	9.09	11.61	13.06
20	1.50	3.60	6.36	11.36	16.68	18.24
21	1.14	14.46	2.46	5.64	13.56	16.14
22	7.29	10.51	2.43	6.15	11.55	13.17
23	1.02	4.38	4.98	8.16	11.76	14.40
24	6.38	9.32	11.18	14.00	12.92	12.38
25	6.38	9.32	11.18	14.00	14.78	13.40
26	6.38	9.32	11.18	14.00	14.84	15.44

Literatürde verilen çalışmalara (Rajaratnam, 1990; Chanson 1994a; ve Chanson 1994b) dayanarak modeldeki deneysel çalışmalardan da belirlendiği gibi SSB tipi basamaklı dolusavaklarda iki tip akım rejimi oluşabilir. Bu akım rejimleri nap (nappe) ve sıçramalı (skimming) akım rejimleridir (Şekil 3). Nap rejimi, debinin ve kanalın taban eğiminin düşük olduğu durumlarda oluşur ve Şekil 3a'da görüldüğü gibi su bir basamaktan diğerine akarken hidrolik sıçrama oluşarak basamaklar üzerinde enerji kaybına neden olur. Debi ve kanal tabanı eğimi yükseldikçe akımın rejimi nap rejiminden sıçramalı akım rejimine değişir. Bu rejimde, basamaklar arasında akımla aynı yönde çevrinti vorteksi oluşur ve bu vorteksin kararlı ve sürekli olması durumunda akım basamak uçlarının ve bu vortekslerin oluşturduğu izafi bir sınır tabakası üzerinden akar. Bu durum tam gelişmiş sıçramalı akım koşul kriterini oluşturur ve Chanson (2000)'un ampirik bağıntısıyla tanımlanabilir.

$$\frac{(d_c)_{onset}}{h} = 1.1 - 0.4\frac{h}{l} \qquad (1)$$

Burada, d_c kritik akım derinliğini, h basamak yüksekliğin, l basamak genişliğini, ve $(d_c)_{onset}/h$ ise akım koşulunu tanımlar.



Şekil 3 - Nap Akımı ve Sıçramalı Akım Rejiminin Sistematik Tanımı

Çine Barajı için, h=1.2 m ve l=1.02 m değerlerinin (1) bağıntısında yerine konmasıyla sıçramalı akım kriteri aşağıdaki bağıntıyla tanımlanabilir.

$$\frac{(d_c)_{onset}}{h} = 0.63 \qquad (2)$$

Chanson (2000) (1) bağıntısının belirsizliğini ±30% olarak tanımlamıştır. Eğer $(d_c)_{onset}/h$ değerleri bu bant aralığında bulunuyorsa, akım nap akımı ile sıçramalı akım arasındaki geçiş rejiminde bulunmaktadır. Bu durumda Çine barajı için nap akım rejimi,

$$\frac{(d_c)_{onset}}{h} = 0.44 \qquad (3)$$

ve sıçramalı akım rejimi ise

$$\frac{(d_c)_{onset}}{h} = 0.82 \qquad (4)$$

Bu kriterlere göre eğer $d_c<0.53$ Çine Barajı dolusavağındaki akım nap akımı rejiminde ve $d_c>0.98$, ise akım sıçramalı akım rejiminde, ve eğer $0.53\leq d_c\leq 0.92$ ise akım geçiş (transition) akımı rejimindedir. Bu kritere göre Çine Barajı dolusavak debisinin 170 m^3/s den düşük olması durumunda akım nap akımı rejiminde ve 450 m^3/s den büyük olması durumunda sıçramalı akım rejiminde 170 m^3/s ile 450 m^3/s arasında ise geçiş akımı rejimindedir. Bu kriter 1/60 ölçekli modelde nap akımı ile sıçramalı akım arasındaki sınırın tanımlanmasının oldukça zor olmasından dolayı yeterli doğrulukta tanımlanamamıştır. 1/60 ölçekli modelde yapılan gözlemler ve ölçümlere göre nap akımında havalanmanın başlangıcı kret ekseninin 5 m mansabında başlamaktadır. Bu nokta sıçramalı akımın başlangıcında kret ekseninin 10 m mansabına, debi $Q_{100}=690$ m^3/s iken kret ekseninin 15 m mansabına, ve $Q_{max}=2570$ m^3/s için ise kret ekseninden 39 m mansaba ötelenmiştir.

Çine Barajı dolusavağının her iki tarafına ötelenmiş feyezan debisinin bir bölümünü dolusavak birim debisini sabit tutacak şekilde dar vadi tabanında bulunan enerji kırıcı havuza yönlendirmesi için basamaklı yan kanallar yerleştirilmiştir. Şekil 2'de verilen dolusavak planında da görüldüğü gibi 260 m kotundaki dolusavağın başlangıcındaki genişliği 150 m dir. Bu genişlik sol sahilde kotun 210 m olduğu yere kadar sabit olarak devam etmekte ve bu kotta vadinin topografyasından dolayı azalmak zorundadır. Eğer dolusavak genişliği vadinin topografik yapısına göre bu kottan itibaren azaltılsaydı, feyezan durumundaki birim debi bu kottan itibaren basamaklı dolusavaklar için önerilen üst limit değerini üzerinde olacaktı. Bu nedenle, basamaklı dolusavaklar için önerilen debi kriterine uygunluk sağlamak için dolusavak genişliğini sabit tutmak gereklidir. Bu koşul ancak dolusavak birim debisini sabit tutacak kapasitede ve formda yan savaklarla mümkündür. Benzer şekilde sağ sahilde de 180 m kotunda vadi daralmaya başlamaktadır ve yukarıda açıklanan nedenle sağ sahilde de 180 m kotundan başlayan bir yan savak tasarlanmıştır. Bu noktalar orijinal proje durumunda düşünülmüş ve yan deşarj kanalları söz konusu kotlardan itibaren ana dolusavak kanalına bitişik olarak tasarlanmıştır. Düşünce aşamasında bu tasarımın çalışacağı varsayılsa bile, deneysel çalışmalar bu yan kanalların hidrolik açıdan tasarımlarının doğru olarak yapılmadığını göstermiştir. Deneylerde, dolusavak debisinin 500 m^3/s den büyük olması durumunda yan kanallardaki akım koşullarının oldukça bozuk olduğu görülmüştür (Foto 2).

Dolusavaktan deşarj olan debinin sahip olduğu kinetik enerjinin kalan bölümünün sönümlenmesi için inşa edilen enerji kırıcı havuzun kapasitesinin yetersiz



Foto 2 - Orijinal Proje Durumunda Q=2250 m^3/s de Yan Kanallarda, Enerji Kırıcı Havuzda ve Kuyruksuyu Kanalındaki Akım Koşulları

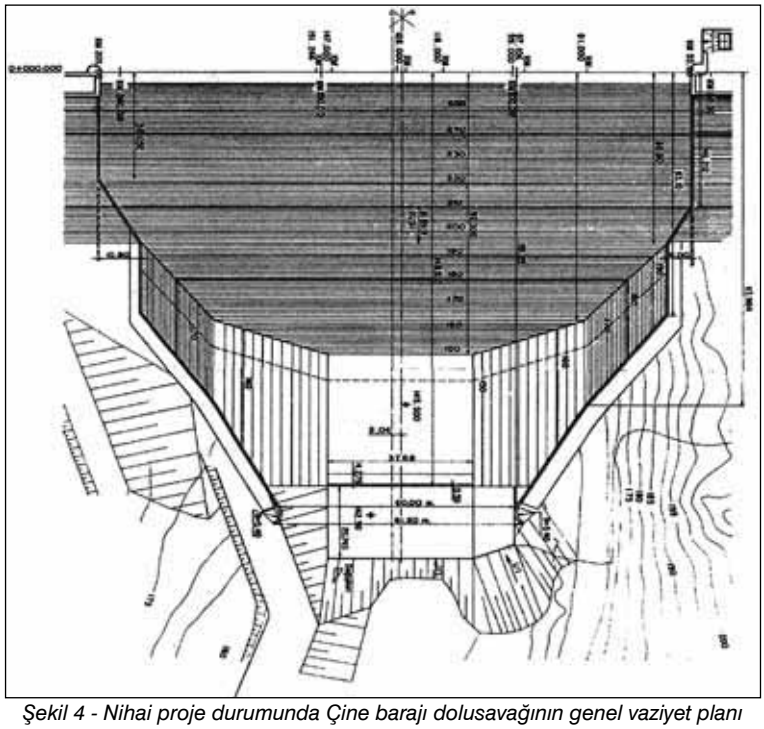
olmasından dolayı bu enerjiyi sönümleyemediği tespit edilmiştir. Bu durumda dolusavak debisi 2000 m³/s ile 2570 m³/s değerleri arasındayken, enerji kırıcı havuz çıkışındaki akım hızlarının da 7 m/s ile 9 m/s arasında değiştiği belirlenmiştir. Ek olarak, dolusavak ekseni ile enerji kırıcı havuz ekseni farklı olduğu için enerji kırıcı havuzda simetrik olmayan akım koşulları oluşmuş ve bu aksi simetrik akım koşulları dolusavak çıkışındaki yüksek hıza sahip akımı kuyruk suyu kanalının dış kurbuna yönlendirdiği tespit edilmiştir. Bu durum sol sahilde yüksek oranda şev erozyonuna neden olabileceği için ve barajın stabilitesi açısından olumsuz koşullar oluşturabilirdi (Foto 2).

3.2.2. Nihai Proje Durumundaki Çalışmalar

Orijinal proje durumunda yan kanalların ve enerji kırıcı havuzun simetrik olmayışından dolayı meydana gelen ve hidrolik açıdan uygun olmayan karmaşık akım koşullarının meydana getirebileceği olumsuzlukları büyük oranda ortadan kaldırmak için modelde yapısal değişimler yapılmıştır. Bu değişimler Şekil 4'te de görüldüğü gibi membadan mansaba doğru yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi dolusavağın her iki tarafında bulunan yan kanalların geometrik formları ve pozisyonları simetrik olacak şekilde yeniden tasarlanarak kanallardaki düzensiz akım koşullarının giderilişitir. Ayrıca yan kanallardaki ve dolusavakdaki son üç basamakların enerji sönümlenmesine hiçbir katkısı olmadığı tespit edilmiş ve kaldırılmıştır. Bu değişimler enerji kırıcı havuzun eksenini dolusavak eksenine oldukça fazla oranda yaklaştırmış ve aynı zamanda da havuzu büyütmüştür (Şekil 4 ve Foto 3). Bu yapısal değişimlerden sonra debinin 100 m³/s ile 2570 m³/s değerleri aralığında deneyler tekrarlanmış ve orijinal projede dolusavak yan kanallarında, enerji kırıcı havuzda ve kuyruk suyu kanalında görülen düzensiz akım koşulları büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. (Foto 4).



Foto 3 - Nihai proje durumunda modelin üstten görünüşü


Şekil 4 - Nihai proje durumunda Çine barajı dolusavağının genel vaziyet planı

Revize edilmiş modelde debinin 100 m³/s ile 2570 m³/s aralığında yapılan deneylerde dinamik basınçlar 26 adet piezometreden ölçülmüştür. Ölçülen basınç değerlerinin değerlendirilmesinden sonra varılan sonuca göre nihai proje durumunda ölçülen basınçlarla orijinal proje durumunda ölçülen basınçlar arasında hissedilir derece farklar olmadığı tespit edilmiş ve dolusavağın çalışması sırasında oluşacak negatif basıncın değerinin yapıya herhangi bir kavitasyon riski oluşturmayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Enerji kırıcı havuzun çıkışında ve kuyruksuyu kanalında üç ayrı kesitte Q=690 m³/s, 1500 m³/s ve 2570 m³/d debi değerlerinde akım hızları ölçülmüştür. Ölçülen bu akım hızlarının büyüklüğü orijinal proje durumundaki hızlara göre biraz daha düşük olduğu buna karşın tüm en kesitte çok daha uniform olduğu ve akımın dış kurba yönlenmediği tespit edilmiştir.

Çine Barajı basamaklı dolusavağın da sönümlenen toplam enerji Q_{max}=2570 m³/s debi değeri için hesaplanmıştır. Bunun için dolusavak kretindeki kritik



Foto 4 - Q_{max}=2570 m³/s debide dolusavak, enerji kırıcı havuz, kuyruk suyu kanalındaki koşulları

akım derinliği ölçülmüş, sıçramalı akım rejiminde dolusavağın enerji kırıcı havuzla birleşim yerinde hidrolik sıçramadan önceki akım derinliği ve kuyruksuyu kanalındaki akım derinlikleri ölçülmüştür. İlk olarak, kret kesimindeki spesifik enerji hesaplanmış, ve daha sonra enerji kırıcı havuz tarafından sönümlenen enerji ile kuyruksuyu kanalının hemen başlangıcındaki spesifik enerji hesaplanmıştır. Son olarak, kret kesimindeki spesifik enerji ile enerji kırıcı havuzda sönümlenen enerji ve kuyruksuyu kanalının başlangıcındaki spesifik enerji arasındaki fark basamaklar tarafından sönümlenen enerjiyi verir.

$$\Delta E_s = E_{S_1} - \left(E_{S_3} + \Delta E_{SB}\right) \quad (5)$$

Burada ΔE_S basamaklı dolusavakta sönümlenen toplam enerji, E_{S1} kretteki spesifik enerji, E_{S3} kuyruksuyu kanalındaki spesifik enerji, ve ΔE_{SB} de enerji kırıcı havuzda hidrolik sıçrama sırasında meydana gelen enerji kaybıdır. ΔE_{SB} enerji kaybı Chow (1959) tarafından hidrolik sıçrama sırasındaki eşlenik derinliklerden aşağıda verilen bağıntıyla hesaplanabilir.

$$\Delta E_{SB} = \frac{(y_3 - y_2)^3}{4y_3y_2} \quad (6)$$

Burada y_2 hidrolik sıçramadan hemen önceki akım derinliğidir. y_3 derinliğinin ortalama değeri modelde Q_{max}=2570 m³/s değeri için ölçülmüştür. y_2 ise y_3 ün eşlenik derinliği olarak aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplanabilir (Chow, 1959),

$$\frac{y_2}{y_3} = \frac{1}{2}\sqrt{1+8Fr_3^2} - 1 \quad (7)$$

Hesaplanan y_2 derinliğini ve ölçülen y_3 değerini (6) denkleminde yerine konmasıyla , E_{SB} değeri 20.4 m olarak hesaplanmıştır. Kuyruksuyu kanalının memba kesimindeki spesifik enerji, E_{S3} değeri 167.03 m olarak ve kret kesimindeki spesifik enerji ise E_{S1}=268.4 m olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin 5 denkleminde yerine konmasıyla ΔE_S = 80.97 m bulunur.

3.2.3. 1/30 Ölçekli Model Çalışmaları

Dolusavak basamakları üstündeki akım ile ilgili detaylı hidrolik gözlemleri yapabilmek amacıyla dolusavağın ve enerji kırıcı havuzun 1/30 ölçekli birim genişlikte modeli yapılmıştır. Laboratuvar şartları sınırlaması içinde bu ölçekte yapılan modelde hidrolik sıçramadan önce dolusavaktaki sıçramalı akımın derinliği 1/60 ölçekli modeldekine oranla daha doğru olarak belirlenebilecek ve dolayısıyla basamaklar tarafından sönümlenen enerji bu ölçekli modelden elde edilen verilerle daha doğru olarak belirlenebilecektir. 1/30 ölçekli modelde yapılan deneyler dolusavak debisinin 0-150 m³/s arasında durumda akımın nap akımı rejiminde, 150-350 m³/s arasında geçiş rejiminde ve Q>350 m³/s olduğu zamanda sıçramalı akım rejiminde olduğunu göstermiştir. Bu analizle Chanson (2000) tarafından $(d_c)_{conset}/h$ parametresi için verilen kriterin bu vaka için yeterli doğrulukta olduğunu göstermiştir. Tablo 4 akım rejimini ve dolusavakta havalanmanın başlangıç noktasını vermektedir. Bu tablodan da görüldüğü gibi Çine Barajı için yapılan 1/30 ölçekli modelde ve 1/60 ölçekli modelde ölçülen havalanmanın başlangıç noktasını veren uzunluklar (L_I) birbirinden çok fazla farklılık göstermemektedir.

Tablo 4 - Çine Barajı 1/30 Ölçekli Birim Genişlikte Dolusavak Modelinde Ölçülen Havalanmanın Başlangıç Noktaları (L_I)

Dolusavak debisi Q (m³/s)	Akım rejimi	Havalanmanın başlangıç noktasının kret eksenine mesafesi, L_I, (m)
<150	Nap akımı	6.3
150	Nap akımı	6.3
150<Q<350	Geçiş akımı	10.78
450	Sıçramalı akım	12.39
690	Sıçramalı akım	15.19
1500	Sıçramalı akım	22.19
2570	Sıçramalı akım	36.89

Bu model aynı zamanda da Q_{100}=690 m³/s, Q=1500 m³/s ve Q_{max}=2570 m³/s dolusavak debi değerleri için basamaklar tarafında sönümlenen toplam enerji miktarının hesaplanması için gerekli olan akım derinliklerinin ve akım hızlarının ölçülmesinde de kullanılmış ve sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5'de de görüldüğü gibi dolusavak debisi azaldığı zaman basamaklar tarafından sönümlenen enerji

Tablo 5 - Çine Barajı Dolusavak Basamakları Tarafından Sönümlenen Toplam Enerji

Debi Q (m^3/s)	Eşlenik derinlik (m)		Spesifik Enerji, E_{S1} (m)	Spesifik Enerji E_{S3} (m)	Enerji kırıcı havuz tarafından sönümlenen Enerji, ΔE_{SB} (m)	Dolusavak tarafından sönümlenen Enerji, ΔE_{SB} (m)	Dolusavakta Enerji kaybı %
	y_2	y_3					
690	1.1	10.6	261.9	156.1	17.8	88.04	33.6
1500	1.6	13.6	263.3	159.14	19.8	84.36	32
2570	2.0	15.7	264.7	162.4	20.5	81.8	31

oranı artmaktadır. Dolusavak debisinin azalmasıyla kritik derinlik ve akım değerleri de azalmakta ve bunun sonucunda havalanmanın başlangıç noktası kret eksenine yaklaşmakta ve akıma daha fazla hava girerek hem enerji sönümlenmesini artırmakta hem de dolusavakta oluşabilecek herhangi bir kavitasyon riskini azaltmaktadır. Bu sonuçlar aynı zamanda da Stephenson (1991) ve Chanson (1994a) un verdiği sonuçlarla da uygunluk göstermektedir

4. SONUÇLAR

1/60 ve 1/30 ölçekli iki ayrı model yapılarak Çine Barajı basamaklı dolusavağı hidroliği çalışılmıştır. Modeller üzerinde yapılan deneylerde elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Model çalışmalarında herhangi bir kritik negatif basınç belirlenmemiştir.
2. Model çalışmaları sonucu revize edilen proje akım koşullarını oldukça olumlu yönde geliştirmiştir.
3. Chanson (2000)'un akım rejimi limitleri için tanımladığı kriter bu çalışmayla da doğrulanmıştır.
4. Havalanmanın başlangıç noktası ile ilgili 1/30 ve 1/60 ölçekli modellerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumluluk göstermektedirler.
5. Dolusavak debisi azaldıkça basamaklar tarafından sönümlenen enerji oranı artmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Chanson, H., 1994a, Hydraulic Design of Stepped Channels, Weirs and Spillways, Pergamon, First Edition, Elsevier Science Inc., 1994a
2. Chanson, H.," Hydraulics of Skimming Flows Over Stepped Channels and Spillways", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 32, No. 3, pp. 445-460, 1994b
3. Chanson, H., "A Review of Accidents and Failures of stepped spillways and weirs", Water and Maritime Engineering, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, IAHR, Vol. 142, Issue: 4, pp. 177-188, December 2000.
4. Chow, Wen Te, 1959, Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., U.S.A.
5. Christodoulon, C. C., "Energy Dissipation on Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 5, pp. 644-650, May 1993
6. Darama, Y., "Çine Barajı Basamaklı Dolusavağı Hidrolik Model Çalışmaları", Nihai Rapor, DSI Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Hidrolik Model Laboratuvarı Yayınları, Yayın No: HI-942, Ankara, Nisan 2001.
7. Rajaratnam, N., "Skimming Flow in Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 587-591, April 1990.
8. Sorensen, M. R., "Model Investigation", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1461-1472, December 1985.
9. Stephenson, D. "Energy Dissipation Down Stepped Spillways", Water Power & Dam Construction, pp. 27-30, September 1991.