

KÖKLÜCE H.E.S. ENERJİ GİRİŞ YAPISI TEKERLEKLI KAPAĞI KALDIRMA DÜZENİNE GELEN YÜKLERİN DENEYSSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Tuna BALKAN ve Ömer G. BİLİR
ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü
ANKARA

Fuat TINIŞ
Işık Makina İmalat ve Pazarlama A.Ş.
ANKARA

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Köklüce H.E.S. Enerji Giriş Yapısı Tekerlekli Kapağının dengesiz şartlar altında kaldırılması ve indirilmesi sırasında kaldırma düzenine etki eden yüklerin belirlenmesi, teorik verilerle karşılaştırılması ve uygun kapak by-pass açıklığının belirlenmesi ile kapak arkasında kalan cebri borunun (kapak-kelebek vana arası) dolum süresinin hesaplanmasıdır.

Bu amaçla, gerçek sistemde kapak kaldırma düzenine bir yük ölçer bağlanarak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

1. GİRİŞ

Köklüce H.E.S. Yeşilirmak üzerinde kurulu Almus Barajı kuyruk suyundaki rezervuardan beslenen iki hidroelektrik santralden biridir. 583.5 x 10⁶ kW-saat gücünde olan bu H.E.S. Yeşilirmak'tan aldığı suyu enerji üretiminden sonra Kelkit Çayına boşaltmaktadır.

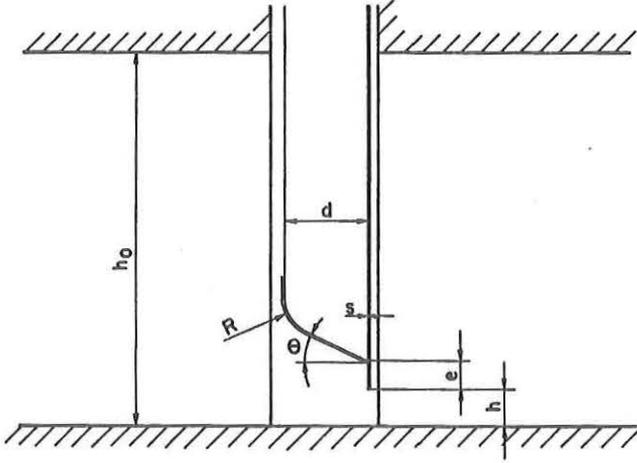
H.E.S. Enerji Giriş Yapısı Tekerlekli Kapağın dengesiz şartlar altında kaldırılması ve indirilmesi sırasında kaldırma düzenine etki eden kuvvetlerin, ilk kez gerçek çalışma şartları altında ve gerçek ölçülerdeki bir kapak üzerinde, deneyle belirlenmesine çalışılmıştır. 10.35 m su yükü altında çalışan bu kapağın, sızdırmazlık genişliği 3900 mm, sızdırmazlık yüksekliği 5000 mm olup, kapak rulmanlı 10 tekerlek üzerinde aşağı yukarı hareket etmektedir. Türbinler ile su alma yapısı kapağı arasında 8800 m cebri boru bulunmakta olup düşü 440 metredir. Dengesiz şartlarda doldurulacak hacim ise kapak ile tehlike kelebek vanası arasında bulunan 6860 m cebri boru bölümüdür.

2. TEORİ

2.1 Hidrodinamik Çekme Kuvveti

Akışa karşı kapatılan ya da dengesiz şartlarda açılan su alma yapısı kapakları, kapak ağırlığı, tekerlek sürtünmesi, conta sürtünmesi, hidrostatik yük vb. yüklerin yanı sıra, su akışının yarattığı hidrodinamik yüklerin de etkisi altındadır.

Hidrodinamik yükün büyüklüğü, su seviyesi, kapak geometrisi ve akış şartlarının fonksiyonudur [1-3]. Kapak geometrisinde hidrodinamik yüke etki eden belli başlı boyutlar, kapak kalınlığı, d , kapak alt uzantı boyu, e , kapak altında su akışını belirleyen açı, θ , alt dönüş yarıçapı, r , ve kapak yüzey sacı kalınlığı, s olarak tanımlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kapak Geometrisi

Kapağın serbest akışa karşı açılıp kapatılması, ya da türbin debisinin belirlediği bir akışa karşı kapatılması ise akış şartları olarak hidrodinamik yükü etkileyen faktörlerdir.

Hidrodinamik yükün belirlenebilmesi teorik olarak mümkün olmamakla beraber, yaklaşık bir büyüklüğün tahmin edilebilmesi için literatürde bir takım çalışmalar yapılmış ve aşağıdaki ampirik denklem geliştirilmiştir [1].

$$F_d = K_d A_b \gamma H \quad (1)$$

Burada;

- F_d : Hidrodinamik yük [t],
- K_d : Hidrodinamik yük katsayısı,
- A_b : Kapak kesit alanı [m^2],
- γ : Suyun özgül ağırlığı [t/m^3],
- H : Toplam su yükü [m]

olarak tanımlanmıştır.

Deneyi yapılan kapak geometrisi, hidrodinamik yük şartlarını iyileştirmek için tasarılmamıştır. Bu nedenle, bazı geometrik parametreler, literatürde verilen değerlerin içine girmektedir. En yakın değerler için bulunan K_d katsayısı ile hesaplanan tahmini hidrodinamik yük değerleri ve kapak kaldırma kuvvetleri Çizelge 1 de gösterilmiştir. Şekil 2 de ise toplam kaldırma kuvvetlerinin kapak açıklığına göre değişimi gösterilmiştir [1].

Çizelge 1. Kapak Açıklığına Göre Teorik Yükler [kg]

Kapak Aç.[m]	Kapak Ağır.	Teker Sürtün.	Conta Sürtün.	Su Kal. Kuvveti	Hidrostat. Yük	Hidrokin. Yük	Toplam Yük
0	8600	1267	5132	-1095	634	0	14538
0.1	8600	1242	3842	-1095	0	856	13445
0.2	8600	1216	3746	-1095	0	2569	15036
0.3	8600	1191	3652	-1095	0	3768	16116
0.4	8600	1166	3558	-1095	0	5995	18224
0.5	8600	1140	3465	-1095	0	7193	19303
0.6	8600	1115	3373	-1095	0	9249	21242
0.7	8600	1090	3281	-1095	0	11133	23009
0.72	8600	1085	3263	-1095	0	12845	24698
0.8	8600	1064	3190	-1095	0	13359	25118
0.9	8600	1039	3100	-1095	0	15414	27058
1.00	8600	1014	3010	-1095	0	16699	28228
1.25	8600	950	2789	-1095	0	19354	30598
1.50	8600	887	2573	-1095	0	20895	31860
1.75	8600	824	2360	-1095	0	21837	32526
2.00	8600	760	2153	-1095	0	22265	32683
2.25	8600	697	1949	-1095	0	21752	31903
2.50	8600	634	1750	-1095	0	20553	30442
2.75	8600	570	1555	-1095	0	19182	28812
3.00	8600	507	1365	-1095	0	17984	27361
3.25	8600	444	1179	-1095	0	15757	24885
3.50	8600	380	998	-1095	0	13445	22328
3.75	8600	317	820	-1095	0	10276	18918
4.00	8600	253	648	-1095	0	6851	15257
4.25	8600	190	479	-1095	0	4282	12456
4.50	8600	127	315	-1095	0	3083	11030
4.75	8600	63	155	-1095	0	343	8066
4.80	8600	0	0	-1095	0	0	7505

2.2 Kapak Arkasında Kalan Cebri Borunun Dolum Süresi

Teorik olarak, kapak arkasında kalan cebri borunun dolum süresi

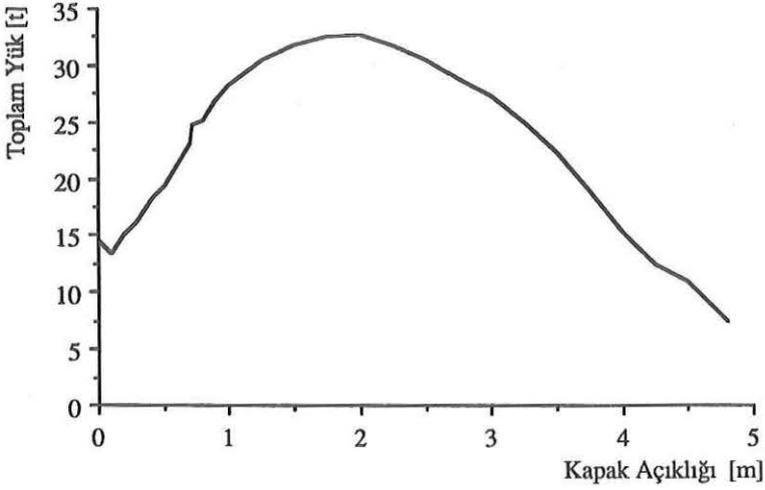
$$t = V / Q \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Burada;

- t : Dolum süresi [s],
- V : Cebri boru hacmi [m³],
- Q : Debi [m³/s]

olarak tanımlanmış olup debi ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Şekil 3).

$$Q = C_d \sqrt{2gH} h B \quad (3)$$



Şekil 2. Teorik Kaldırma Yükünün Kapak Açıklığına Göre Değişimi

Burada;

- C_d : Boşaltım katsayısı,
- B : Temiz kapak açıklığı [m],
- h : Kapak yüksekliği [m]
- g : Yerçekimi ivmesi

olarak tanımlanmıştır.

Teorik olarak, kapağın belli bir yüksekliğe açılmaya kadar geçen süre içinde cebri boruya dolan suyun hacmi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

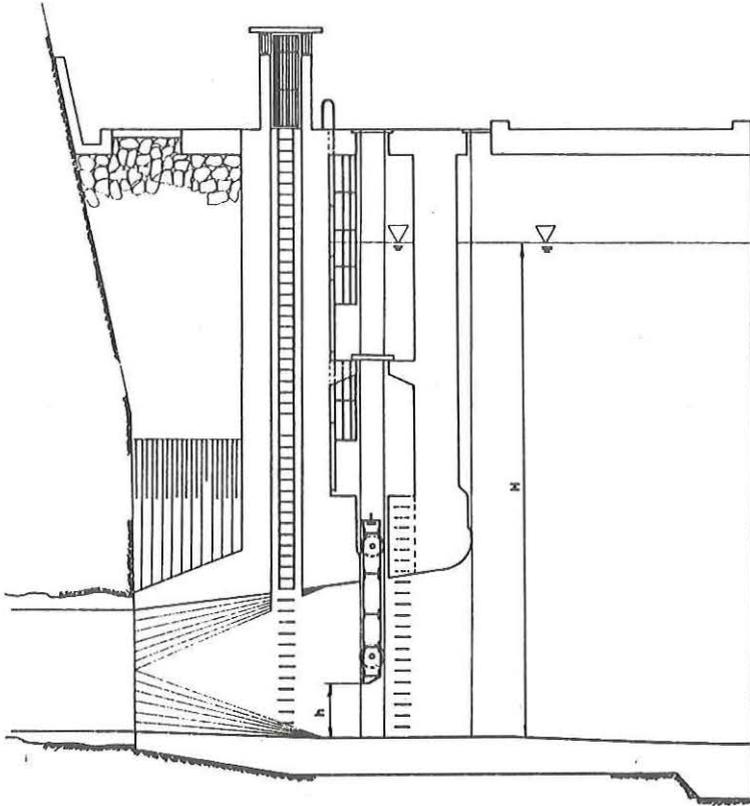
$$V = C_d \int_0^t \int_0^t \left(B\dot{x}\sqrt{2gH-g\dot{x}t} - \frac{B\dot{x}^2 gt}{2\sqrt{2gH-g\dot{x}t}} \right) dt^2 \quad (4)$$

$$V = \frac{2BC_d}{15\dot{x}} \left[8H^2\sqrt{2gH} - \left(8H^2 + 2\dot{x}tH - 3\dot{x}^2 t^2 \right) \sqrt{2gH-g\dot{x}t} \right] \quad (5)$$

Burada;

- \dot{x} : Kapak kalkma hızı [m/s]

olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. Kapağın Baraj Yapısında Konumu

Deney sırasında, kapak bir kaç defa değişik kotlara kaldırılıp indirilerek belli açıklıklarda belli süreler tutulacaktır. Deney verileri ve yukarıdaki eşitlikler kullanılarak cebri boruya dolan suyun hacmi boşaltım katsayısının (C_d) fonksiyonu olarak bulunacaktır.

Kapak ile kelebek vana arasında kalan cebri boru hacmi 56572 m^3 olduğundan, sabit varsayılan boşaltım katsayısı, C_d belirlenecektir.

3. DENEY DÜZENEGİ

Kapağın kaldırılması ve indirilmesi sırasında kaldırma düzenine etki eden kuvvetin ölçülmesi için kullanılan yük ölçerin (load cell) tasarımı ve imalatı ODTÜ Makina Mühendisliği, Malzeme Test Laboratuvarında yapılmıştır. Maksimum kapasitesi 10 ton olacak şekilde tasarılan yük ölçer için Çizelge 2 de akma ve çekme mukavemetleri verilen otomat çeliği kullanılmıştır.

Çizelge 2. Yük Ölçer Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Akma Mukavemeti	: 400 MPa
Çekme Mukavemeti	: 500 MPa
Şertlik	: 140 HRB

Yük ölçer üzerine iki adet eksenel ve iki adet yanal yönde olmak üzere dört adet MM-EA-13-125BB-120 tipi elektriksel birim uzama geyçleri yapıştırılarak geyçler tam Wheatstone köprüsü olacak şekilde bağlanmıştır. Wheatstone köprüsünün uçları bir kablo vasıtasıyla Philips PR 9303 yükselticisine bağlanmış ve yükseltici çıkışından alınan sinyaller bir kablo ile Atomic marka çiziciye, zamana karşı yük grafiği çizdirmek üzere gönderilmiştir. Yükseltici çıkışı da aynı zamanda sayısal göstergeli bir voltmetre vasıtasıyla izlenmiştir. Laboratuvarında bu deney düzeneği kullanılarak yük ölçerin kalibrasyonu 10 tona kadar yapılmış ve grafik çizicisinin yük kısmını gösteren ekseninin tamamı 10 ton olacak şekilde yükseltici ve çizicinin ayarları yapılmıştır. Bu kalibrasyon işlemi çeşitli aralıklarla laboratuvarında tekrar edilerek deney düzeneğinin kararlılığının değişmediği tesbit edilmiştir.

4. DENEY

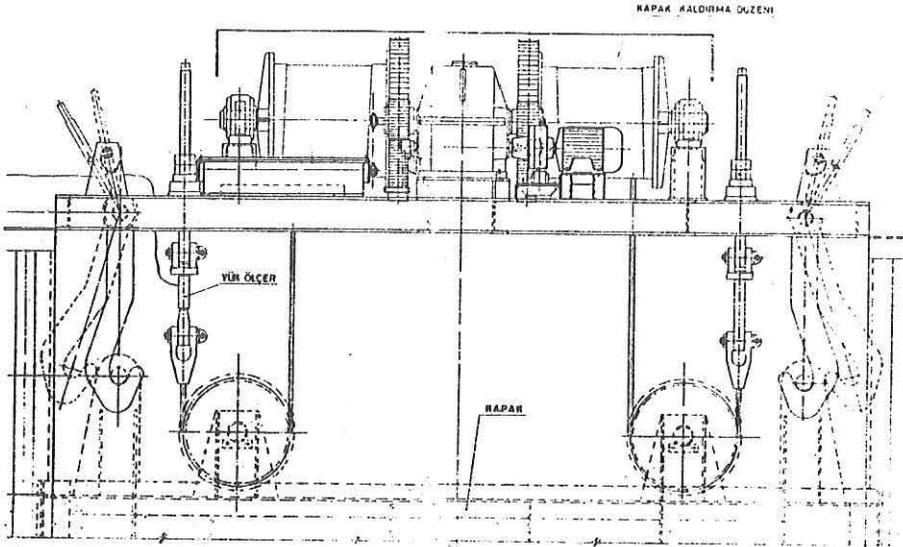
Köklüce H.E.S. enerji girişinde bulunan kapak askıya alınarak yük ölçer, kaldırma düzeneğinde bulunan halat ile halatı şaseye bağlayan mil arasına özel olarak yapılan adaptörler vasıtasıyla bağlanmıştır. Daha sonra deney düzeneği aynı şekilde kurulmuş ve kaldırma düzeneğine bağlı olan yük ölçerin kablosu yükselticinin girişine takılmıştır (Şekil 4). Kapak askıda olduğundan yük ölçerden gelen yük sinyalinin yükseltici ekranında ve çizicide sıfır olduğu tesbit edilmiştir. Bu işlemden sonra kapak askıdan alınarak normal çalışma düzenine getirilmiş ve halata gelen yük (kapak ağırlığının 1/4 ü) 2150 kg olarak grafik çizicisinden okunmuştur. Buna göre kapağın 8600 kg olduğu anlaşılmıştır.

Gece yarısı kapak tamamen kapatılarak kapak ile kelebek vana arasında bulunan 6860 m cebri boru içerisindeki su türbinin çalışması ile boşaltılmış ve kelebek vana kapatılarak türbin durdurulmuştur. Ertesi sabah, kapak, kaldırma düzeneğinde bulunan motorlar çalıştırılarak 0.373 m/d bir hızla yukarıya doğru kaldırılmaya başlanmış ve aynı anda halata gelen 1/4 yük zamana karşı çizdirilmiştir (Şekil 5). Bu arada, her 15 saniyede kapak yüksekliği ve buna karşılık gelen yükselticinin yarattığı gerilim mV olarak kaydedilmiştir.

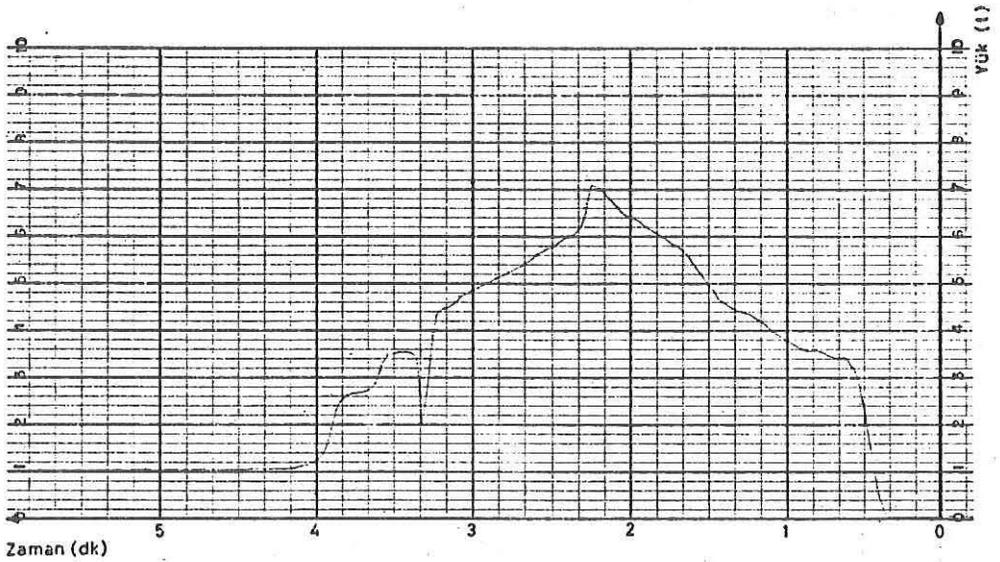
Kaldırma düzeneğinde bulunan elemanlar için (dişli, halat, motor, vb.) kritik toplam yük 30 ton hesaplandığından, halata gelen yük 7200 kg (toplam $4 \cdot 7200 = 28800$ kg) olarak okunduğunda kaldırma işlemi derhal durdurularak kapak indirilmeye başlanmış ve daha sonra tamamen kapatılmıştır. Kapağın kaydedilen maksimum yükte, 71.5 cm yukarıya kalktığı anlaşılmıştır. Deney ikinci kez aynı şekilde tekrarlanmış, bu kez yükselticiden çıkan gerilim mV ve geçen zaman kapağın kalkma mesafesine göre her 10 cm de bir alınmıştır. Maksimum yük 7600 kg (toplam 30400 kg) olduğunda derhal inişe geçilmiş ve kapak tekrar tamamen kapatılmıştır.

Deney sonuçlarından kapağın 20 cm lik bir açıklıkta tutulması durumunda sisteme fazla bir yük ile titreşim getirmeyeceği tesbit edilmiştir. Bunun üzerine kapak 20 cm yüksekliğe kaldırılarak bu durumda cebri borunun dolması sağlanmıştır. Cebri borunun tamamen dolmasından sonra yükün düştüğü görülmüştür. Daha sonra kaldırma düzeneği çalıştırılarak kapağın tamamen açılmasına başlanmıştır. Kapağın yukarı kalkması sırasında suyun kaldırma kuvvetinden dolayı halata gelen yükün 1850 kg (toplam olarak $4 \cdot 1850 = 7400$ kg) olduğu

bulunmuştur.



Şekil 4. Yük Ölçerin Kapak Kaldırma Düzenine Bağlanması



Şekil 5. Halata Gelen Yükün Zamana Göre Değişimi

5. TARTISMA

İlk kapak kaldırma deneyinin yük-zaman grafiğinden (Şekil 5) anlaşılacağı gibi kapağın açılmasıyla halata gelen yükün hızla arttığı gözlenmiştir. Kapak kaldırma yüksekliği 71.5 cm ye çıktığında halata gelen yükün 7200 kg (toplam yük $4 \cdot 7200 = 28800$ kg) olduğu tesbit edilmiştir. Kapağın toplam ağırlığı 8600 kg olduğuna göre kapağın 20200 kg büyüklüğünde bir kuvvetle aşağı çekildiği anlaşılmıştır. Kapağa bu açıklıkta gelen kuvvetlerin, motorun, dişlilerin ve halatın güvenilir olduğu durumda hesaplanan kritik değere çok yakın olması ve titreşimlerin artması nedeniyle kapak daha fazla kaldırılmamıştır.

Kapak 71.5 cm kaldırıldığı zaman halat başına gelen yük 7200 kg olarak ölçülmüş, aynı yükseklik için yük teorik olarak 6175 kg hesaplanmıştır. Aradaki fark, teorik hesaplarda kullanılan test verileri ile mevcut sistem arasındaki değişiklikten ve hesaplamalar için alınan sürtünme katsayılarının gerçek değerlerden değişik olmasından kaynaklanmaktadır. Zira, deneyden önce kapak üzerindeki bazı tekerleklerin rahat dönmediği gözlenmiştir. Kapağın kapatılması sırasında yaklaşık 31 cm yükseklikte kapağın bir an için sıkıştığını yük-zaman grafiği göstermiştir. Bu sırada halat yükünde çok ani bir düşüş görülmüştür. Daha sonra yükün artması kapağın aşağıya doğru hareket ettiğini göstermiştir. Kapak tamamen kapatıldığında yük ölçer üzerinde 1000 kg yük kaldığı gözlenmiştir. Yük ölçerine bağlı olan halatın tam dikey durumda olmamasından dolayı yük ölçere yanal bir kuvvetin gelmesi buna sebep olmuştur. Yük ölçerin tasarımında bütün hesaplar kuvvetin eksenel yönde geleceği varsayılarak yapılmış ve yük ölçere eğme yönünde (yanal yönde) bir kuvvet etki etmeyeceği düşünülmüştür. Daha sonra yapılan incelemede 10 m uzunluğunda olan kapak kaldırma halatının yük ölçere eksenel yönde yaklaşık 1.5° bir açı farkıyla gelmesi halinde (kapak açıklığı 71.5 cm de) yük ölçer malzemesinin akma sınırını geçmiş olduğunu göstermiştir. Bu yüzden, yük boşaltıldığında yükseltici ve grafik çizici sıfıra dönmemiştir.

Deney şartlarında, yük ölçere gelen eğme momenti ise şu şekilde hesaplanmıştır.

$$M_b = F_t (\sin \theta) r \quad (6)$$

Burada,

M_b : Eğme momenti,

F_t : Eksenel yük,

r : Moment kolu,

θ : Halatın düşeyle yaptığı açı

olarak tanımlanmıştır. Bu durumda, eğme momentinin yarattığı gerilme ise

$$\sigma_b = M_b / Z \quad (7)$$

olup; burada

σ_b : Eğme momentinin yarattığı gerilme,

Z : Kesit modülü

olarak tanımlanmıştır. Yük ölçerin kesiti kare olduğuna göre

$$Z = \frac{1}{6} a^3 \quad (8)$$

olup

a : Yük ölçerin kare kesitinin bir kenarı
olarak tanımlanmıştır. Kullanılan yük ölçer için,

$$a = 16 \text{ [mm]}$$

olduğuna göre

$$Z = 682.7 \text{ [mm}^3\text{]}$$

olup, deney şartlarında,

$$F_t = 7200 \text{ [kg]}$$

$$\theta = 1.5^\circ$$

$$r = 200 \text{ [mm]}$$

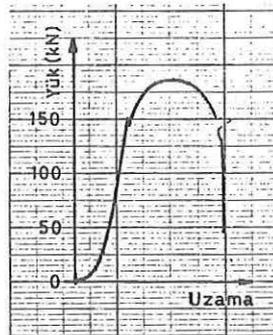
olarak tesbit edilmiştir. Bu şartlar altında, eğme momentinin yarattığı gerilme ise

$$\sigma_b = 552 \text{ [MPa]}$$

olarak hesaplanmıştır. Yük ölçer malzemesi akma sınırının kesin olarak belirlenmesi için yapılan çekme deneyi sonucunda, akma sınırı

$$\sigma_y = 400 \text{ [MPa]}$$

olarak belirlendiğine göre, eğmeden dolayı birim uzama geyçleri üzerinde yaklaşık 1000 kg eksenel yüke karşı gelen birim uzama kalmıştır. Şekil 6 da malzemenin akma sınırını belirlemek amacıyla yapılan deneyin sonucu görülmektedir.



Şekil 6. Yük Ölçer Malzemesi Çekme Deneyi Grafiği

Diğer taraftan, yük ölçer üzerinde kalan 1000 kg yükün sebeplerinin incelenmesi sırasında, halat tarafından gelebilecek burulma etkilerinin belirlenmesi için de bir dizi deney yapılmış ve teorik olarak halatın açılmasından dolayı meydana gelebilecek dönme momentleri uygulandığında yük ölçer tarafından herhangi bir değer kaydedilmemiştir. Bu sonuç, dönme

momentlerinin, çalışma değerleri içerisinde, eksenal yönde herhangi bir etki yaratmadığını göstermektedir. Halatın eksenal yükten dolayı yarattığı dönme momenti ise şu şekilde hesaplanmıştır.

$$T = K d_h F_t \quad (9)$$

Burada,

- T : Halatın uyguladığı dönme momenti,
- K : Katsayı,
- d_h : Halat çapı,
- F_t : Halata gelen eksenal yük

olarak tanımlanmıştır. Kapak kaldırma düzeneğinde kullanılan halat için,

$$K = 0.08064$$

$$d_h = 0.022 \text{ [m]}$$

olup

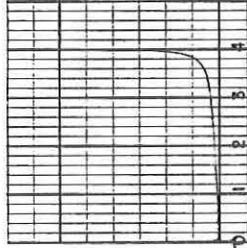
$$F_t = 7200 \text{ [kg]}$$

alınırsa, dönme momenti

$$T = 12.8 \text{ [kg-m]}$$

olarak hesaplanmıştır.

Diğer taraftan, grafik çizici tarafından kaydedilen eğrilerde, ani değişikliklerde bazı hatalar gözlenmiştir. Bunun sebebi ise, grafik çizicinin mekanik olması ve cevap zamanı uzun birinci mertebeden bir sistem olmasıdır. Bu hataları belirleyebilmek amacıyla grafik çiziciye bir basamak girdi uygulanmış, ve cevabı ise Şekil 7 de gösterilmiştir.



Şekil 7. Grafik Çizicinin Basamak Girdi Cevabı

Şekil 7 den de anlaşılacağı gibi cevabın nihai değere ulaşması vakit almaktadır. Bu ise yükselme zamanının (rise time) uzun olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, cevabın nihai değerinin %90 a çok kısa bir zamanda ulaştığı anlaşılmakta, dolayısıyla grafik çiziciden meydana gelebilecek en fazla hata 200 kg olmaktadır.

Boşaltım katsayısının belirlenmesi için yapılan hesaplarda deney sırasında cebri boruya dolan su miktarı (4) numaralı eşitlik kullanılarak

$$V = 85360 C_d [m^3]$$

olarak hesaplanmıştır. Buna göre,

$$C_d = 56572 / 85360 = 0.66$$

olarak bulunmuştur.

Literatürde, benzer kapak türleri için, %10 kapak açıklığında boşaltım katsayısı 0.72 olarak verilmekte olduğundan [4], yukarıda %4 açıklık için hesaplanan boşaltım katsayısının bu açıklıklarda oldukça düşük alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Hesaplanan bu boşaltım katsayısı değeri kullanılarak, 20 cm by-pass açıklığında cebri borunun dolun süresi (2) numaralı eşitlik kullanılarak

$$t = 7950 [s]$$

olarak (2.2 saat) hesaplandığından zaman rölesinin bu değere göre ayarlanması gerektiği belirtilmiştir.

6. SONUC

Köklüce H.E.S. Enerji Giriş Yapısı Tekerlekli Kapağı dengersiz şartlar altında 71.5 cm kaldırılmış ve indirilmiştir.

71.5 cm de kapak kaldırma düzenine gelen toplam yük 30400 kg olarak ölçülmüş ve bu yükün kapak ve kaldırma düzeni açısından emniyetli sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca, kapağın dengersiz şartlarda da tam olarak kapandığı gözlenmiştir.

Yükler ve titreşim açısından by-pass için 20 cm kapak açıklığı uygun bulunmuştur. Bu kapak açıklığında boşaltım katsayısının 0.66 olduğu tesbit edilmiştir.

Teorik sonuçlarla deney verileri karşılaştırıldığında ortaya çıkan farkın teorik hesaplarda kullanılan katsayılar ile deneyi yapılan sistem arasındaki farktan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

7. KAYNAKÇA

1. SAGAR, B.T. ve TULLIS, C.P., "Downpull on Vertical Lift Gates", Water Power and Dam Construction, Aralık, 1979.
2. NAUDASCHER, H. ve KOBUS, H.E., "Hydrodynamic Analysis for High-Head Leaf Gates", Journal of The Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E., Mayıs, 1964.
3. ELGER, R.A. ve GARRISON, J.M., "Form-Induced Hydraulic Forces on Three-Leaf Intake Gates", Journal of The Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E., Mayıs, 1964.
4. Hydraulic Design Criteria - Control Gates Discharge Coefficients, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Sheet 320, Vicksburg, Miss., Ekim, 1961.