

## Çatalan Hidroelektrik Santralında Teorik ve Deneysel Su Darbesi Analizi

M. Salih KIRKGÖZ\*

Bülent SELEK\*\*

Zeliha SELEK\*\*\*

### ÖZ

Su darbesini idare eden süreklilik ve hareket denklemleri değişken zaman aralıklı karakteristikler yöntemi ile çözülmüştür. Sayısal model Çatalan Hidroelektrik Santrali basınçlı borusuna uygulanmış ve borunun mansap ucunda hesaplanan basınç yüksekliğinin zamana göre değişimleri Francis türbininin test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Boru hattında, memba sınır şartı için sabit seviyeli hazne, ve mansap sınır şartı olarak da türbin karakteristikleri kullanılmıştır. Ayrıca yaklaşık bir uygulama olarak türbin ayar kanatlarının bir vana gibi çalıştığı varsayımı sınır şartı olarak alınarak basınç değişimleri hesaplanmıştır. Her iki tür mansap sınır şartına göre elde edilen bulguların test sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

### ABSTRACT

#### Theoretical and Experimental Water Hammer Analysis at Çatalan Hydroelectric Power Plant

The governing equations of water hammer, continuity and equation of motion, are solved using the variable-grid method of characteristics. The numerical scheme is applied to the penstock of the Çatalan Hydroelectric Plant and the computed transient pressure head histories at the end of the pipeline are compared with the test results of the Francis turbine. For the upstream boundary condition of the penstock a constant head reservoir is considered and the turbine characteristics are used for the downstream boundary condition. In addition, as an approximate application, by setting the boundary condition of assuming that turbine wicket gates operate like a downstream control valve, the pressure variations are computed. Findings based on both of the downstream boundary conditions are found to agree well with the test results.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 05.02.2002 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2003 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - skirkgoz@cukurova.edu.tr

\*\* DSİ 6. Bölge Müdürlüğü, Adana - buselek@yahoo.com

\*\*\* Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana - bursel@cukurova.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Bir hidroelektrik santralde türbine su ileten basınçlı boruda debinin kısa sürede değişmesi "su darbesi" olarak bilinen yüksek basınçların doğmasına sebep olur. Su darbesi basınçları boru hattı sonundaki akım kontrol vanası veya türbin kanatlarının kumandalarından kaynaklanmaktadır.

Su darbesini idare eden sadeleştirilmiş süreklilik ve hareket denklemlerinin "karakteristikler yöntemi" ile sayısal çözümü son yıllarda yaygın olarak yapılmaktadır. Karakteristikler ağında "sabit zaman aralığı" kullanılması uygulama kolaylığı bakımından tercih edilmekle birlikte değişen parametrelere sahip seri bağlı borulardaki uygulamalarda bu basit hesap yaklaşımının iyileştirilmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda, yere veya zamana göre interpolasyon tekniklerinin kullanılması [1, 2] ya da basınç dalgası hızının düzeltilmesi [3] gibi iyileştirici önlemlere başvurulmuştur.

Chaudhry ve Hussaini [4], su darbesi diferansiyel denklemlerinin sayısal çözümünde ikinci mertebeden açık sonlu farklar yönteminin tanıtmışlar ve bu yöntemin çözüm hassasiyetini artırdığını ifade etmişlerdir. Karney ve Ghidaoui [5], sürtünme etkilerini ihmal ederek yer ve zamana göre interpolasyon ile basınç dalgası hızının düzeltilmesini de içeren bir hibrid sayısal hesap tekniği geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, değişen parametrelere sahip seri bağlı bir boru hattında su darbesinin analizi için temel denklemlerin "değişken aralıklı karakteristikler yöntemi" ile çözümü Çatalan Barajı Hidroelektrik Santrali (HES) basınçlı borusuna uygulanmıştır. Boru hattında, mansap sınır şartı olarak türbin karakteristiklerinin kullanımı yanında türbin ayar kanatlarının bir vana gibi çalıştığı kabul edilmiş ve her iki sınır şartına göre boru mansap ucunda hesaplanan basınç değişimleri Francis türbininin test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. TEMEL DENKLEMLER VE ÇÖZÜMÜ

### 2.1. Temel Denklemler

Bir değişken akım türü olan su darbesi olayını idare eden temel denklemler süreklilik ve hareket denklemleridir:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + V \sin \theta + \frac{C^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda V |V|}{2D} = 0 \quad (2)$$

(1) ve (2) denklemlerinde,  $H(x,t)$  piyezometre yüksekliği,  $V(x,t)$  ortalama akım hızı,  $C$  basınç dalgası hızı,  $D$  boru çapı,  $\theta$  borunun eğim açısı (burada pozitif  $\partial z/\partial x = \sin \theta$ ,  $z$  yersel yükseklik),  $\lambda$  Darcy-Weisbach sürtünme faktörü,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $x$  boru boyunca mabadan uzaklık ve  $t$  zamanı ifade etmektedir.

## 2.2. Değişken Zaman Aralıklı Karakteristikler Yöntemi ile Çözüm

(1) ve (2) eşitlikleri doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerdir ve karakteristikler yöntemi ile sayısal çözümleri yapılabilmektedir [6, 7, 8]. Karakteristikler yöntemi ile (1) ve (2) eşitlikleri karakteristik denklemler olarak bilinen aşağıdaki iki çift adi diferansiyel denklemlere dönüştürülür.

İlerleyen karakteristikler için ( $K^+$ ) :

$$\frac{dH}{dt} + \frac{C}{g} \frac{dV}{dt} - V \sin \theta + \frac{C\lambda}{2gD} V|V| = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + C \quad (4)$$

Gerileyen karakteristikler için ( $K^-$ ) :

$$\frac{dH}{dt} - \frac{C}{g} \frac{dV}{dt} - V \sin \theta - \frac{C\lambda}{2gD} V|V| = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - C \quad (6)$$

Borunun memba ve mansap sınır şartları ve  $x$ ,  $t$ ,  $H$ ,  $V$ 'nin bilinen başlangıç değerleri ile (3)-(6) denklemleri kullanılarak, sonlu farklar yaklaşımına dayalı olarak  $x$ ,  $t$  düzleminde bir karakteristikler ağı oluşturulabilir.

Bu çalışmada, karakteristikler ağının oluşturulmasında "değişken zaman aralıklı ağ" yaklaşımı esas alınmıştır. Karakteristik denklemler önce tek-tip boru hattı için yazılmış, ve değişen parametrelere sahip seri bağlı borulara interpolasyonla uyarlanmıştır.

Değişken zaman aralıklı ağ yaklaşımı ile Şekil 1a'da görülen tek-tip bir boru hattında (3)-(6) karakteristik denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir,

İlerleyen karakteristik eğri üzerindeki  $i-1$  ve  $P$  noktaları arasında:

$$H_p - H_{i-1} + \frac{C}{g} (V_p - V_{i-1}) - (t_p - t_{i-1}) \left( V_{i-1} \sin \theta_{i-1} - \frac{\lambda C}{2gD} V_{i-1} |V_{i-1}| \right) = 0 \quad (7)$$

$$x_p - x_{i-1} = (t_p - t_{i-1}) (V + C)_{i-1} \quad (8)$$

Gerileyen karakteristik eğri üzerindeki  $i+1$  ve  $P$  noktaları arasında:

$$H_p - H_{i+1} - \frac{C}{g} (V_p - V_{i+1}) - (t_p - t_{i+1}) \left( V_{i+1} \sin \theta_{i+1} + \frac{\lambda C}{2gD} V_{i+1} |V_{i+1}| \right) = 0 \quad (9)$$

$$x_p - x_{i+1} = (t_p - t_{i+1}) (V - C)_{i+1} \quad (10)$$

Buna göre boru hattının uçları dışında iç kısımlardaki bir  $P$  kesişme noktasında  $x_p$ ,  $t_p$ ,  $H_p$ , ve  $V_p$  bilinmeyenleri (7)-(10) denklemlerinin çözümünden bulunabilir. Boru hattının mansap ve

membra uçlarındaki benzer hesaplar, mansap ucunda (7), (8) denklemleri ve mansap sınır şartı; memba ucunda (9), (10) denklemleri ve memba sınır şartı kullanılarak gerçekleştirilir. Seri bağlı bir boru hattının birleşim yerleri dışındaki kesitlerde karakteristik denklemler yukarıda açıklandığı şekilde uygulanabilir. Ancak, boru birleşim yerlerindeki hesaplar için özel bir uygulamaya ihtiyaç vardır. Bu amaçla, boru birleşim yerlerinde zamana göre interpolasyonu esas alarak geliştirilen özel algoritma aşağıda açıklanmıştır.

Şekil 1b'de görülen seri bağlı boru hattının bir ( $x_p=x_R$ ) birleşim yerindeki karakteristikler ağına ait zaman çizgisi,  $i$ ,  $N$  noktasından gelen  $K^+$  karakteristik eğrisi ile  $P$  noktasında,  $i+1$ ,  $2$  noktasından gelen  $K^-$  karakteristik eğrisi ile  $R$  noktasında kesiştiği düşünülürse  $t_p$  ve  $t_R$  zamanları (8) ve (10) denklemleri ile hesaplanabilir:

$$t_p = t_{i,N} + \frac{x_p - x_{i,N}}{(V + C)_{i,N}} \quad , \quad t_R = t_{i+1,2} + \frac{x_R - x_{i+1,2}}{(V - C)_{i+1,2}}$$

Diğer taraftan  $i$ ,  $N$  ve  $P$ , ve  $i+1$ ,  $2$  ve  $R$  noktaları arasındaki karakteristik denklemler için (7) ve (9) denklemleri aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$H_{P_{i,N+1}} - H_{i,N} + \frac{C_i}{g} (V_{P_{i,N+1}} - V_{i,N}) - (t_p - t_{i,N}) \left( V_{i,N} \sin \theta_{i,N} - \frac{\lambda_i C_i}{2gD_i} V_{i,N} |V_{i,N}| \right) = 0 \quad (11)$$

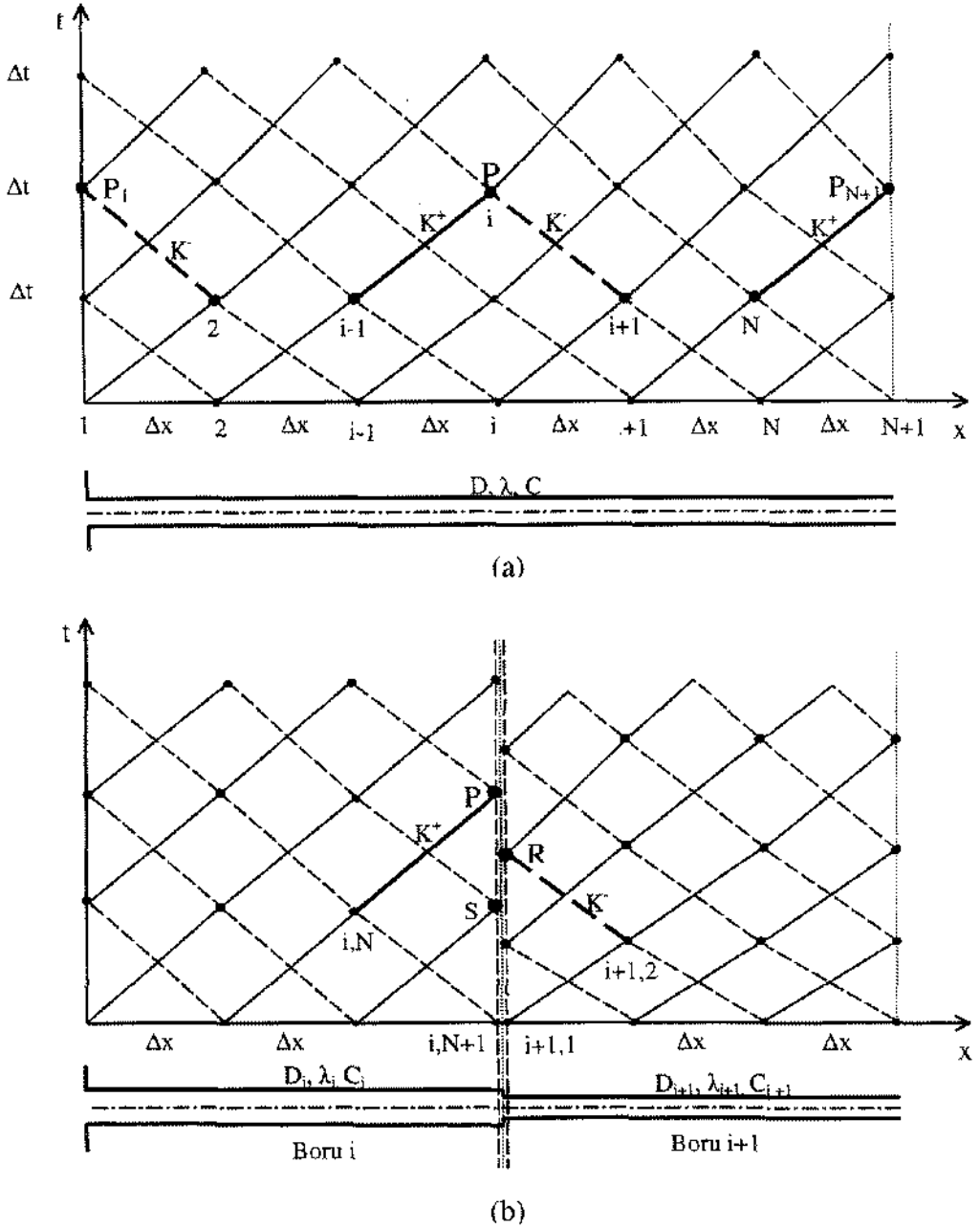
$$H_{R_{i+1,1}} - H_{i+1,2} - \frac{C_{i+1}}{g} (V_{R_{i+1,1}} - V_{i+1,2}) - (t_R - t_{i+1,2}) \left( V_{i+1,2} \sin \theta_{i+1,2} + \frac{\lambda_{i+1} C_{i+1}}{2gD_{i+1}} V_{i+1,2} |V_{i+1,2}| \right) = 0 \quad (12)$$

(11) ve (12) eşitlikleri  $H_{P_{i,N+1}}$ ,  $V_{P_{i,N+1}}$ ,  $H_{R_{i+1,1}}$ , ve  $V_{R_{i+1,1}}$  bilinmeyenlerini içermektedir. Bu dört bilinmeyen için iki eşitliğe daha ihtiyaç vardır ve bu eşitlikler  $R$  noktasındaki  $H$  ve  $V$  için aynı zaman çizgisinde bulunan  $P$  ve  $S$  noktalarındaki değerlerin interpolasyonundan elde edilebilir, yani:

$$H_{R_{i+1,1}} = H_{S_{i,N+1}} + \left( H_{P_{i,N+1}} - H_{S_{i,N+1}} \right) \frac{t_R - t_S}{t_p - t_S} \quad (13)$$

$$V_{R_{i+1,1}} = V_{S_{i+1,1}} + \left( V_{P_{i+1,1}} - V_{S_{i+1,1}} \right) \frac{t_R - t_S}{t_p - t_S} \quad (14)$$

Boru birleşim yerinde  $i$  ve  $i+1$  boruları arasındaki süreklilik denklemlerinden  $V_{S_{i+1,1}} = V_{S_{i,N+1}} A_i / A_{i+1}$  ve  $V_{P_{i+1,1}} = V_{P_{i,N+1}} A_i / A_{i+1}$  değerleri (14) ifadesinde kullanılarak (11)-(14) eşitliklerinden Şekil 1b'deki  $P$  ve  $R$  noktalarında  $H_{P_{i,N+1}}$ ,  $V_{P_{i,N+1}}$ ,  $H_{R_{i+1,1}}$ , ve  $V_{R_{i+1,1}}$  değişkenleri bir hesap adımı itibarıyla bulunabilir.



Şekil 1 Değişken zaman aralıklı karakteristikler ağı (a) Tek-tip boru hattı için, (b) Seri bağlı boru birleşiminde interpolasyon

### 3. BORU HATTI İÇİN SINIR ŞARTLARI

#### 3.1. Memba Sınır Şartı

Şekil 1a'daki boru hattının I nolu memba ucunda,  $i+1=2$  ve  $P_1$  noktaları arasındaki (9) denklemi  $H_{P_1}$  ve  $V_{P_1}$  bilinmeyenleri arasında bir bağıntı oluşturmaktadır. Diğer taraftan boru hattının memba ucundaki hazne veya denge bacasındaki su seviyesinin çok kısa süreli su darbesi sürecinde değişmediği varsayımı ile boru memba ucundaki piyezometre yüksekliği ikinci bir eşitlik olarak kullanılabilir:

$$H_{P_1} = H_{\text{haz}} - (K+1) \frac{V_R^2}{2g} \quad (15)$$

(15) ifadesinde  $H_{\text{haz}}$  hazne seviyesi, ve  $K$  boru girişindeki yerel kayıp katsayısıdır.

#### 3.2. Mansap Sınır Şartı

Şekil 1a'daki boru hattının  $N+1$  nolu mansap ucunda,  $i-1=N$  ve  $P_{N+1}$  noktaları arasındaki (7) denklemi  $H_{P_{N+1}}$  ve  $V_{P_{N+1}}$  bilinmeyenleri arasında bir bağıntı oluşturmaktadır. Bu bilinmeyenler için ikinci denklem mansap kontrol vanası veya türbinin akım karakteristiklerinden elde edilebilir [9]. Bu çalışmada, mansap sınır şartının belirlenmesinde aşağıda açıklanan iki duruma göre uygulama yapılmıştır: (a) Türbin karakteristiklerinin doğrudan kullanılması ile, (b) Francis türbini ayar kanatlarının kontrol vanası gibi çalıştığı kabulü ile.

##### (a) Türbin Karakteristiklerinin Doğrudan Kullanılması

Basıncılı borudaki akım debisinin Francis türbininin ayar kanatları ile kontrol edilmesi halinde akım debisi ( $Q$ ); net düşü ( $H_n$ ), türbinin dönme hızı ( $n$ ), ve kanatların açıklığına ( $\varphi$ ) bağlıdır. Düzenli akım şartlarında, bu parametreler arasındaki ilişkiyi ifade eden türbin karakteristiklerinin değişken akım şartlarında da geçerli olduğu kabul edilebilir [8]. Buna göre Francis türbininin karakteristikleri gözönüne alınırsa mansap sınır şartı

$$Q = V_{P_{N+1}} A = f(H_n, n, \varphi) \quad (16)$$

olarak tanımlanabilir. (16) ifadesinde

$$H_n = H_{P_{N+1}} + \frac{V_{P_{N+1}}^2}{2g} - H_{ks}$$

şeklinde olup  $H_{ks}$  santralda kuyruk suyu seviyesidir.

##### (b) Francis Türbininin Kontrol Vanası Gibi Çalıştığı Kabulü

Bu çalışmada, türbin karakteristiklerinin kullanımı yanında türbin ayar kanatlarının mansap sınır şartı bakımından bir vana gibi rol üstlendiği kabul edilerek su darbesinin hesabında yaklaşık fakat basit bir yaklaşım önerilmektedir. Buna göre düzenli akım durumunda vana benzeşimi ile türbinden geçen debi:

$$Q_0 = AV_0 = C_{d0}A_{v0} [2g(H_0 - H_{ks})]^{1/2} \quad (17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, A mansap ucundaki boru kesit alanı,  $V_0$  düzenli akımda aynı kesitteki akım hızı,  $A_{v0}$  vananın (yani türbinin) başlangıç kesit alanı,  $C_{d0}$  ve  $H_0$  sırasıyla düzenli akım halinde debi katsayısı ve boru mansap ucundaki piyezometre yüksekliğidir. Değişken akım durumunda herhangi bir andaki debinin (17) eşitliğine benzer şekilde tanımlanabileceği kabul edilirse

$$Q = AV_{PN+1} = C_d A_v [2g(H_{PN+1} - H_{ks})]^{1/2} \quad (18)$$

yazılabilir. (17) ve (18) eşitlikleri taraf tarafa bölünürse mansap sınır şartı olarak  $H_{PN+1}$  ve  $V_{PN+1}$  bilinmeyenleri arasında ikinci eşitlik elde edilir:

$$\frac{V_{PN+1}}{V_0} = \frac{C_d A_v}{C_{d0} A_{v0}} \left( \frac{H_{PN+1} - H_{ks}}{H_0 - H_{ks}} \right)^{1/2} = \tau \left( \frac{H_{PN+1} - H_{ks}}{H_0 - H_{ks}} \right)^{1/2} \quad (19)$$

(19) eşitliğindeki  $\tau = C_d A_v / C_{d0} A_{v0}$  "etkin vana açıklık oranı" olarak tanımlanmaktadır. Debi katsayısı  $C_d$ 'nin "vana açıklık oranı"  $A_v / A_{v0}$  ile değişmesi beklenmekle birlikte, literatürde bu konuda yeterli bilgi bulunmamaktadır. Brunone ve Morelli [10], sürgülü vana için yaptıkları deneylerde,  $\tau$ 'nin zamanla değişiminin  $A_v / A_{v0}$  ile benzer olduğunu göstermişlerdir. Dolayısıyla, bu çalışmadaki hesaplarda yaklaşık olarak  $\tau = A_v / A_{v0}$  alınmıştır.

#### 4. ÇATALAN HİDROELEKTRİK SANTRALI

1997 yılında işletmeye açılmış olan Seyhan nehri üzerindeki Çatalan Barajı ve HES'nda her biri 56,3 MW kurulu gücünde üç adet Francis türbini mevcuttur.

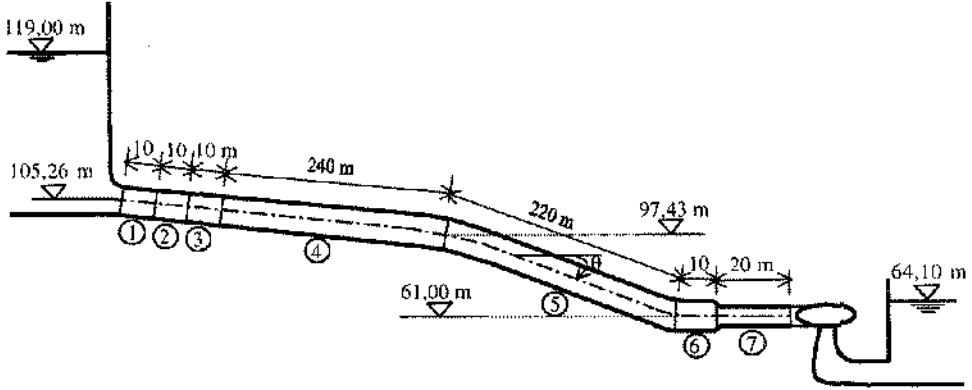
##### 4.1. Basınçlı Boru ve Türbin Karakteristikleri

Türbin üniteleri birbirinden bağımsız olarak Şekil 2 ve Çizelge 1'de görülen özelliklerde ve toplam uzunluğu 520 m olan seri bağlı basınçlı borularla baraj haznesine bağlıdır. Çizelge 1'in son kolonunda elastik teoriye göre hesaplanmış basınç dalgası hızları verilmiştir.

Santraldaki Francis türbinlerinin karakteristikleri, yani birim debinin,  $Q_{11} = Q / (D_r^3 H_n^{1/2})$  ( $D_r$ , çark çapı), farklı kanat açıklıklarında ( $\varphi$ ) birim hızı,  $n_{11} = n D_r / H_n^{1/2}$  ( $H_n$  net düşü), göre değişimi Şekil 3'de verilmiştir.

Şekil 4'de Francis türbinine ait ayar kanatları şematik olarak görülmektedir. Bir  $\varphi$  açıklığında iki kanat arasındaki minimum mesafe olan B,  $[\varphi_0, 0]$  için  $[B_0, 0]$  arasında değişmektedir. Buna göre, herhangi bir  $\varphi$  kanat açıklığındaki  $B/B_0$  oranı vana için öngörülen alan açıklık oranı  $A_v / A_{v0}$  değerine eşit olmaktadır.  $B_0$  ve  $A_{v0}$  sırasıyla düzenli akım durumunda kanatlar arasındaki toplam mesafe ve kesit alanıdır. Çatalan HES'nda kullanılan Francis türbinleri için hesaplanan  $A_v / A_{vm}$  oranının  $\varphi$  ile değişimi Şekil 5'deki eğri ile ifade edilmiştir.  $A_{vm}$  işletme koşullarındaki maksimum kanat açıklık alanını göstermektedir.

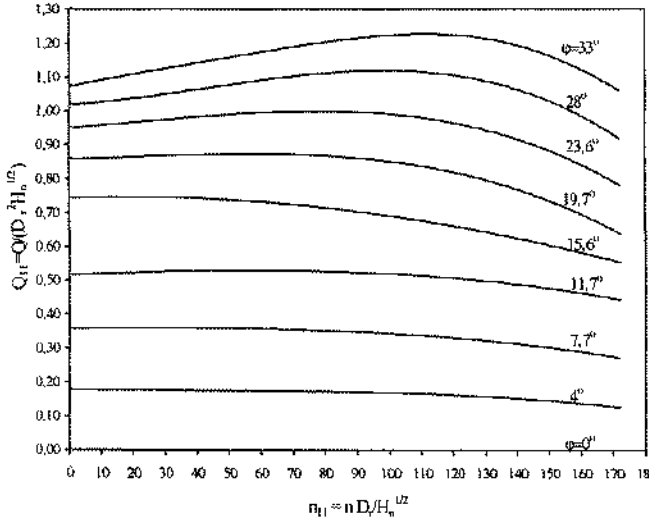
Çatalan Hidroelektrik Santralında Teorik ve Deneysel Su Darbesi Analizi



Şekil 2 Çatalan HES basınçlı boru şematik boykesiti

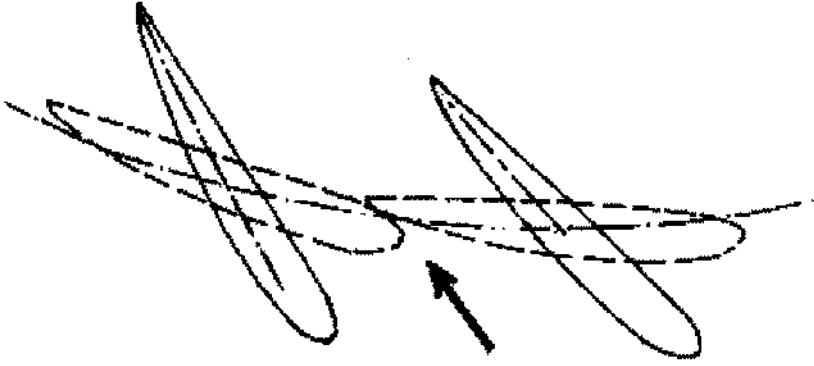
Çizelge 1 Çatalan HES'nda basınçlı boru özellikleri

Boru No	Çap D(m)	Uzunluk (m)	Eğim Açısı $-\theta$ (°)	Et Kalınlığı (mm)	Dalga Hızı C (m/s)
1	5,5	10	1,66	26	823
2	5,5	10	1,66	24	800
3	5,5	10	1,66	30	864
4	5,5	240	1,66	24	800
5	5,5	220	9,53	26	823
6	5,5	10	0	26	823
7	4,5	20	0	30	921

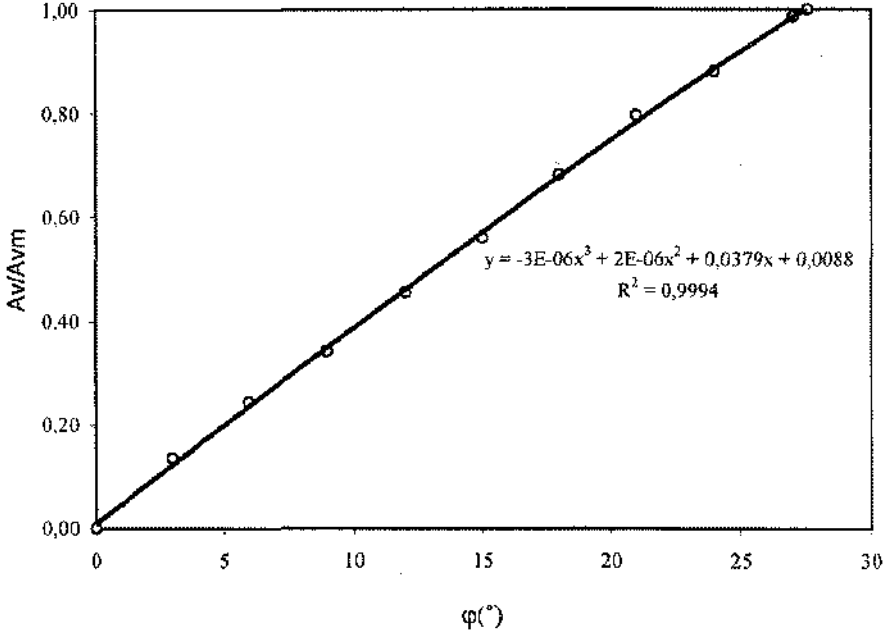


Şekil 3 Francis türbini karakteristikleri





Şekil 4 Francis türbini ayar kanatları



Şekil 5 Çatalan HES Francis türbininde alan açıklık oranının ( $A_v/A_{vm}$ ) kanat açıklığı( $\varphi$ ) ile değişimi

#### 4.2. Prototip Testler

Çatalan HES'nda türbinlerin montajından sonra üretici firma (Preussag Noell GmbH, Geneva) tarafından 3 nolu ünite de yapılan testlerden ikisi Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2 Francis türbininde prototip testler

Test No	Tarih	Test tipi
1	19 Ağustos 1997	Yük atımı
2	20 Ağustos 1997	Hızlı durma (mekanik arıza)

Türbin ve basınçlı boru sınır şartları ile ilgili test sırasında tespit edilen bazı değerler aşağıda verilmiştir:

Türbin gücü	: $P = 52,8$ MW
Türbinin dönme hızı	: $n = 166,7$ dd
Türbin çapı	: $D_r = 3,87$ m
Başlangıç kanat açıklığı	: $\varphi_0 = 22,5^\circ$
Düzenli akım debisi	: $Q_0 = 106$ m <sup>3</sup> /s
Hazne seviyesi	: $H_{\text{haz}} = 119,00$ m
Boru mansap ucunda basınç yüksekliği	: $p/\gamma = 54,40$ m
Basınçlı boru mansap ucu eksen kotu	: $z = 61,00$ m
Kuyruk suyu seviyesi	: $H_{\text{ts}} = 64,10$ m
Türbin net düşüşü	: $H_n = 53,60$ m

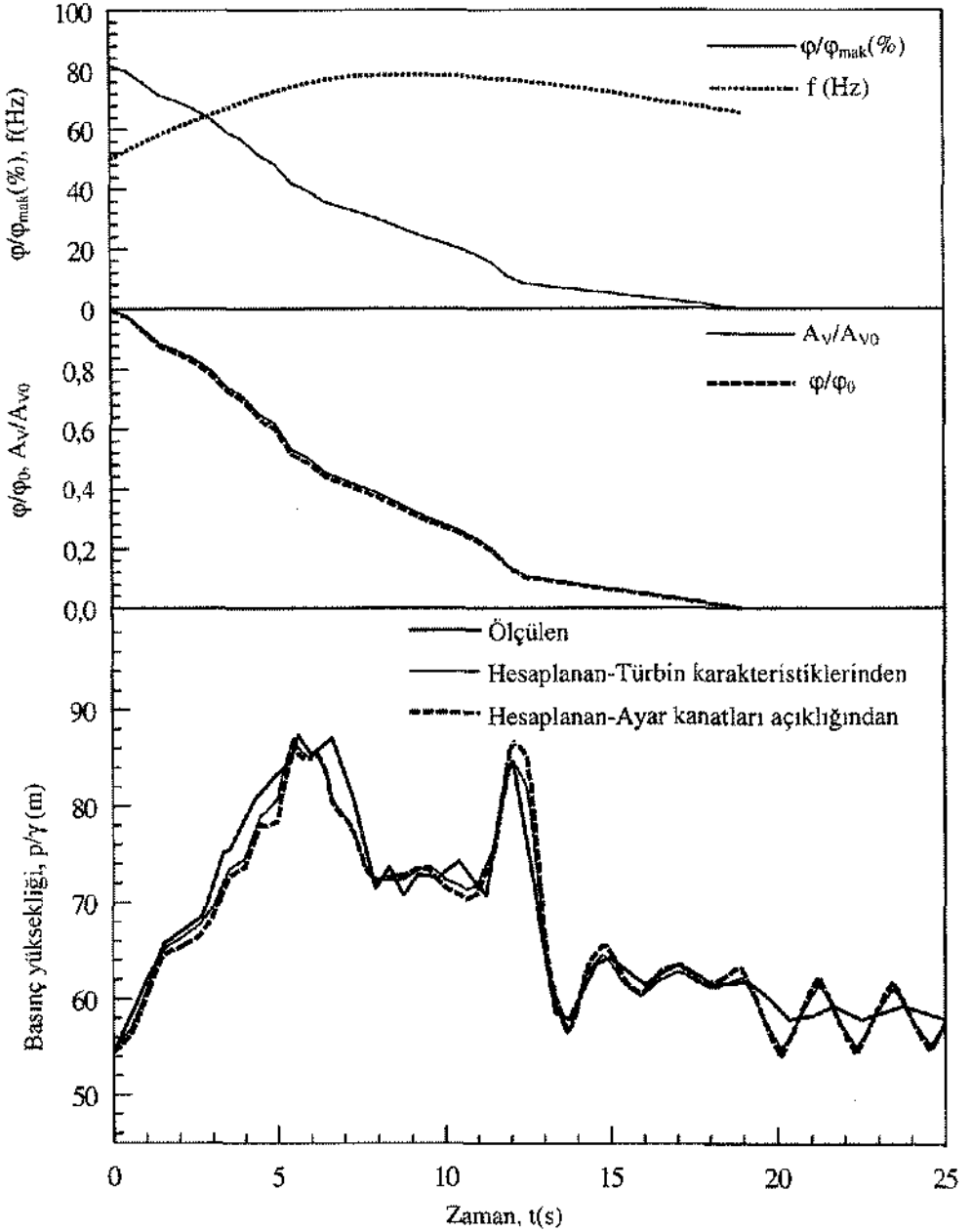
Prototip testlerde, diğer bazı değerler yanında kanat açıklığı ( $\varphi$ ), elektrik akımının frekansı ( $f$ ), ve basınçlı borunun mansap ucundaki basınç yüksekliği ( $p/\gamma$ )'nin zamansal değişimleri kaydedilmiştir. Frekans  $f$ (Hz) ile türbin hızı  $n$ (dd) arasında  $n=60f/p$  ilişkisi mevcuttur. Jeneratördeki çift kutup sayısı  $p=18$  dir. Testlerde, ayar kanatlarının başlangıç açıklığı  $\varphi_0=22,5^\circ$  olup, bu değer maksimum işletme açıklığının ( $\varphi_{\text{mak}}$ ) %82'sine karşı gelmektedir.

## 5. HESAP BULGULARI İLE TEST SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

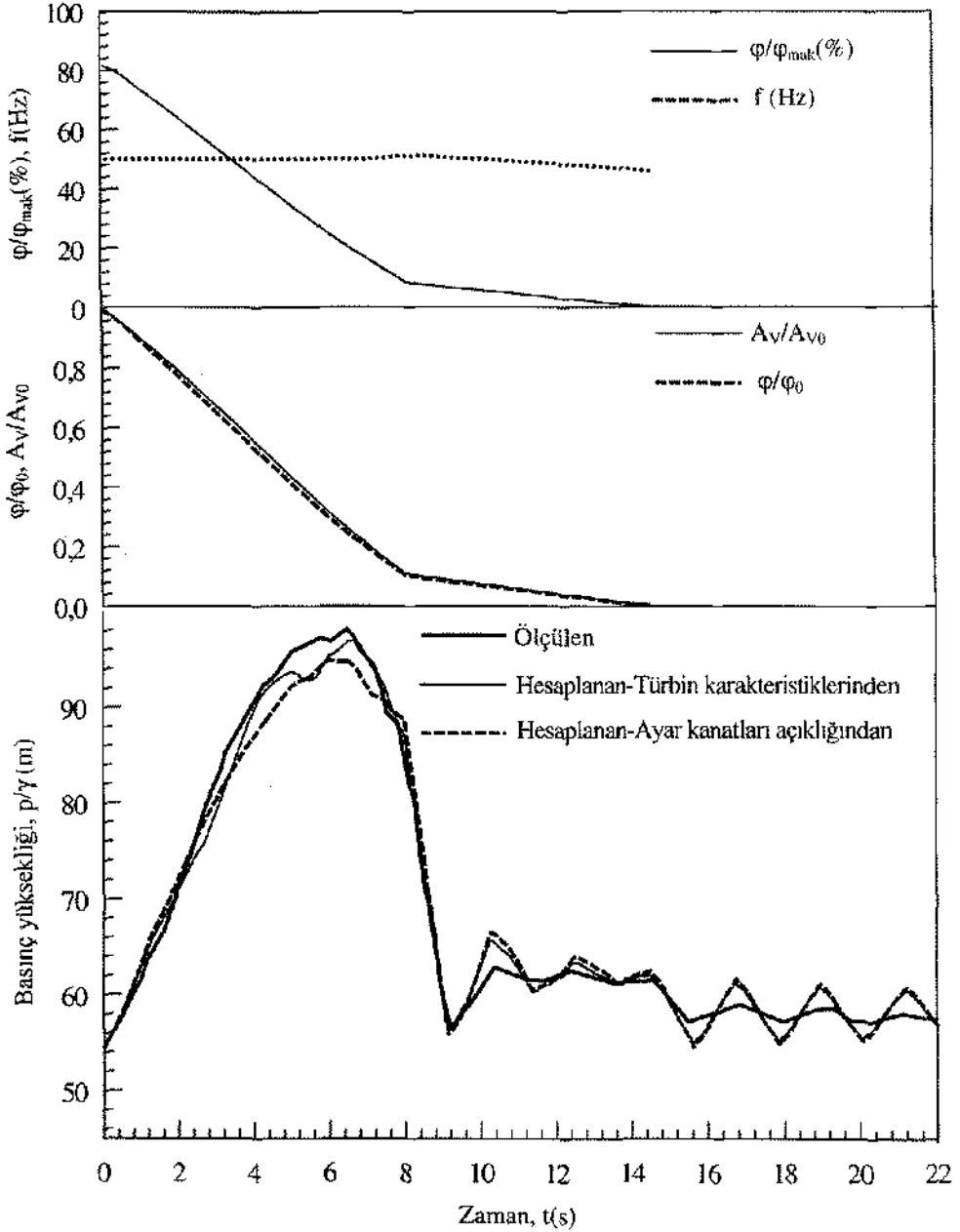
Yukarıda açıklanan sayısal modele dayalı geliştirilen bilgisayar programı ile basınçlı borunun mansap ucunda hesaplanan darbe basıncı değişimleri test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hesaplarda memba sınır şartı olarak (15) eşitliği, mansap sınır şartı olarak (16) eşitliği (yani Şekil 3'deki türbin karakteristikleri), ve (19) eşitliği kullanılmıştır. (19) eşitliğinin kullanılması sırasında Şekil 5'den yararlanılarak türbin ayar kanatlarının açıklığı ( $\varphi$ ) alan açıklık oranına ( $A_v/A_{v0}$ ) dönüştürülmüştür.

Hesaplarda, basınçlı boru girişinde  $K=0,05$  alınmış ve düzenli akım şartları için bulunan  $\lambda=0,025$  değeri değişken akım durumunda da geçerli kabul edilmiştir.  $t=0$  başlangıç durumundaki hesap aralıkları  $\Delta x=10$  m alınmıştır.

Çizelge 2'de verilen "yük atımı" ve "hızlı durma" testleri için boru hattının mansap ucunda hesaplanan ve ölçülen basınç yüksekliklerinin zamana göre değişimleri Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Testlerde kapanma süreleri sırasıyla  $t_k=19,0$  s ve  $14,5$  s dir. Şekil 6 ve 7'de ayrıca kapanma sürecinde ölçülen kanat açıklık yüzdesi ( $\varphi/\varphi_{\text{mak}}$ ) ve akım frekansı ( $f$ ) ile açıklık oranı ( $\varphi/\varphi_0$ ) ve hesaplanan alan açıklık oranı ( $A_v/A_{v0}$ ) değişimleri de görülmektedir. Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi her iki mansap sınır şartına göre teorik olarak hesaplanan basınç yüksekliği değişimleri kapanma süresi içerisinde ölçülen değerlerle büyük ölçüde uyumludur. Özellikle, mansap sınır şartı olarak türbin alanını kullanan yaklaşık sayılabilecek hesap tarzının da ölçümler ile kıyaslanabilecek nitelikte başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 6 Yük atımı halinde hesaplanan ve ölçülen basınç yüksekliklerinin zamana göre değişimi ( $t_k=19,0$  s)



Şekil 7 Hızlı durma halinde hesaplanan ve ölçülen basınç yüksekliklerinin zamana göre değişimi ( $t_k=14,5$  s)

## 6. SONUÇLAR

Su darbesini idare eden süreklilik ve hareket denklemleri karakteristikler yöntemi ve değişken zaman aralığı yaklaşımı ile çözülmüş, ve sayısal model Çatalan HES basınçlı borusunda darbe basıncının hesabına uygulanmıştır. Borunun mansap ucunda hesaplanan basınç yüksekliği değişimleri prototip test sonuçları ile karşılaştırılmış, teorik ve deneysel bulguların büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Boru hattında, mansap sınır şartı olarak türbin ayar kanatlarının bir vana gibi çalıştığı kabulü ile yapılan hesaplar, türbin karakteristiklerinin sınır şartı olarak kullanılması ile elde edilen bulgulara ve ölçüm sonuçlarına yakın sonuçlar vermiştir. Çalışmanın bulgularına dayanarak bir basınçlı boru sonundaki Francis türbini kanatları ile debinin kontrol edilmesi durumunda ortaya çıkacak darbe basınçlarının hesabında, basit bir yaklaşımla vana kumandası benzeşiminin de uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

## SEMBOLLER

- A : Boru kesit alanı  
B : Ayar kanatları arasındaki en kısa mesafe  
C : Basınç dalgasının hızı  
 $C_d$  : Debi katsayısı  
D : Boru çapı  
f : Akım frekansı  
H : Piyezometre yüksekliği  
 $H_n$  : Türbin için net düşü  
K : Boru girişinde yerel kayıp katsayısı  
n : Türbin çarkının dönme hızı  
p : Basınç  
Q : Debi  
t : Zaman  
 $t_k$  : Türbin kapanma süresi  
V : Boruda akım hızı  
x : Boru eksenini boyunca mabdan uzaklık  
 $\theta$  : Borunun eğim açısı  
 $\lambda$  : Darcy-Weisbach sürtünme faktörü  
 $\varphi$  : Ayar kanatları açıklığı

## Kaynaklar

- [1] Wiggert, D.C., Sundquist, M.J., Fixed-grid characteristics for pipeline transients, J. Hydr. Div., ASCE, 103(12), 1403-1416, 1977.
- [2] Sibetheros, I.A., Holley, E.R., Branski, J.M., Spline interpolations for water hammer analysis, J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(10), 1332-1350, 1991.
- [3] Ghidaoui, M.S., Karney, B.W., Equivalent differential equations in fixed grid characteristics method, J. Hydr. Engrg., ASCE, 120(10), 1159-1175, 1994.
- [4] Chaudhry, M.H., Hussaini, M.Y., Second-order accurate explicit finite difference schemes for waterhammer analysis, J. Fluid Engrg., ASME, 107(4), 523-529, 1985.

- [5] Karney, B.W., Ghidaoui, M.S., Flexible discretization algorithm for fixed-grid MOC in pipelines, *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 123(11), 1004-1011, 1997.
- [6] Streeter, V.L., Wylie, E.B., *Fluid Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 1975.
- [7] Wylie, E.B. and Streeter, V.L., *Fluid Transients*, FEB Press, Michigan, 1984.
- [8] Chaudhry, M.H., *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold, New York, N.Y., 1987.
- [9] Parmakian, J., *Waterhammer Analysis*, Dover, New York, N.Y., 1963.
- [10] Brunone, B., Morelli, L., Automatic control valve-induced transients in operative pipe system, *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(5), 534-542, 1999.

