

## Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerin Bilgisayar Destekli Ön Tasarımı

Emir ALİMOĞLU\*  
Zafer BOZKUŞ\*\*  
A. Melih YANMAZ\*\*\*

### ÖZ

Nehir tipi hidroelektrik santraller, bir depolama olmaksızın nehirde emniyetli olarak çevrilebilecek akım miktarına göre enerji üretirler. Bu çalışmada nehir tipi santrallerin hidrolik tasarımı için geliştirilen MINI-HPD isimli bir bilgisayar programı tanıtılmıştır. C# programlama dilinde yazılan bu program Windows işletim sistemi altında çalışmaktadır. Bu program, yandan su alışı dolu gövdeli regülatör elemanlarının, iletim kanalının, yükleme havuzunun ve cebri borunun hidrolik tasarımlarını gerçekleştirmektedir. Program ayrıca optimum işletme debisi, optimum kurulu güç ve optimum cebri boru çapı seçimiyle ilgili hesapları da yapabilmektedir. Kullanımı kolay olan bu program vasıtasıyla bir tasarım mühendisinin değişik senaryolar ve ilgili parametrelerin kombinasyonları altında bir dizi analizi hızlı bir şekilde yapabildiği planlanmıştır. Programın kullanımı bir örnekle sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidroelektrik enerji, nehir tipi santral, bilgisayar destekli tasarım.

### ABSTRACT

#### Computer Assisted Preliminary Design of Run-Of-River Plants

Run-of-river type hydroelectric power plants generate electrical energy by using a certain portion of the available flow in the river. In this study a computer program called MINI-HPD is developed to perform the hydraulic design of run-of-river plants. This program, which runs under the Windows operating system, is developed in C# programming language. MINI-HPD is capable of performing hydraulic design of structural components of diversion weir with lateral intake, overflow spillway, canal, forebay and penstock. In addition, it can determine the optimum design discharge, optimum installed capacity, and optimum penstock diameter for this type of plants. It is desired to have quick successive runs under various scenarios and combinations of relevant parameters. An application is presented to illustrate the use of the program.

**Keywords:** Hydroelectrical energy, run-of-river plant, computer aided design.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 17.07.2013 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - alimoglu@metu.edu.tr  
\*\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - bozkus@metu.edu.tr  
\*\*\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - myanz@metu.edu.tr

## **1. GİRİŞ**

Yenilenebilir ve sürdürülebilir nitelikte olması nedeniyle hidroelektrik enerji üretimi önemini artırarak sürdürmektedir. Konuya ülkemiz genelinde bakıldığında zaman içinde ülkemizdeki dağlık arazinin fazla olması nedeniyle yüksek düşümlerin bulunması ve bunun yanı sıra akış rejiminin düzenli olduğu akarsuların kullanılmasıyla hidroelektrik potansiyelin önemli boyutlarda olduğu görülmektedir. Ülkemiz hidroelektrik potansiyelinin tespiti konusunda Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü ve özel sektör tarafından yapılmış bazı çalışmalar mevcuttur. Son yıllarda nehir tipi santrallere yapılan yatırımlar devlet tarafından teşvik edilip desteklenmektedir. 4628 sayılı kanun kapsamında 1200'ün üstünde lisans dağıtılmış ve bunların 200 kadarı işletmeye alınmış olup, 200 kadarı ise inşa halindedir [1].

Hidroelektrik santrallerin tasarımları yersel geoteknik koşullar, yapısal ve hidrolik esaslı kısıtlamalar nedeniyle karmaşıktır. Arzu edilen yapısal emniyeti sağlayabilmek adına oluşan koşullara göre hidrolik tasarım değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca her projenin kendi yersel koşullarına özgü çevresel ve sosyo-ekonomik şartlara göre proje elemanlarının tasarımlarında bazı değişiklikler olabilir. Tasarım mühendisi bu koşulları optimum şartlarda sağlayan çözümü bulmakla yükümlüdür. Bu nedenle, çeşitli seçeneklerin denenmesi tüm elemanlarda sağlanması gerekli kısıtlamalar da düşünüldüğünde oldukça zaman alan bir süreçtir. Bu çalışmanın amacı, zaman kaybı faktörünü azaltacak şekilde hesapların hızlıca yapılarak, farklı seçeneklerin birbiri ardına rahatlıkla sıranabileceği bir yazılım geliştirmektir. Literatürde hidroelektrik santrallerin çeşitli yapısal elemanlarının tasarımı için geliştirilen programlar olmakla birlikte tüm proje elemanlarını belli bir sırayla yapan bir yazılıma rastlanmamıştır. Bu nedenle tek program kullanarak gerekli tasarımların yapılmasıyla zaman kaybı da önlenecektir. Geliştirilen MINI-HPD programı kolay kullanımı ve görsel katkısı nedeniyle veri girişini de rahatlıkla yapabilmekte; gerekli grafiklerin sunumuna olanak sağlamakta ve çıktı dosyasıyla tasarım değerlerini ülkemizde kabul edilen kriterlere uygun olarak hesaplayabilmektedir. Program yapı elemanlarının tasarımını ardışık olarak gerçekleştirdiği için elemanlar arasındaki hidrolik etkileşim de izlenebilmektedir. Bu makalede geliştirilen programın tanıtımından önce ülkemizde kabul görmüş hidrolik tasarım esasları kısaca gözden geçirilmektedir. Daha sonra programla ilgili bilgi ve bir uygulama örneği sunulmakta ve konu irdelenmektedir.

## **2. NEHİR TİPİ SANTRALLERİN HİDROLİK TASARIM ESASLARI**

Bu bölümde tasarım parametrelerinin bulunması ve tasarım esasları ülkemiz uygulamaları çerçevesinde anlatılmaktadır. Bu bağlamda optimum işletme debisi, cebri boru çapı ve kurulu güç seçimi ile yükleme havuzu, iletim kanalı ve yandan alımlı regülatörlerin tasarım esasları gözden geçirilmektedir.

### **2.1. Optimum İşletme Debisinin Bulunması**

Nehir tipi santrallerde depolama söz konusu olmadığından akımların debi süreklilik eğrisine gereksinim duyulmaktadır. Bu eğrinin değişik akım rejimlerini de dahil edecek kadar güvenilir olması için en az 30 yıllık akım verisinin kullanılması önerilmektedir [2]. Ayrıca regülatör tasarımı için yüksek dönüş aralıklı akım pik debilerinin bulunması gerekmektedir. Ülkemiz uygulamalarında regülatör dolusavak tasarımı için 100 yıl dönüş

aralıklı pik debinin ( $Q_{100}$ ), enerji kırıcı havuzların performanslarının tetkik edilmesi için de ayrıca 5 ile 50 yıl arasında değişen dönüş aralıklı pik debi değerlerinin ( $Q_5, Q_{10}, Q_{25}, Q_{50}$ ) kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla programın çalıştırılmasından önce yıllık akım serisinin frekans analizi yapılmalı ve proje sahasındaki akımları temsil eden uygun dağılım fonksiyonu ve bahsedilen debi değerleri bulunmalıdır.

Optimum işletme debisinin bulunması için çeşitli seçeneklerin net faydaları hesaplanmalı ve maksimum net faydayı veren seçenekteki debi seçilmelidir. Bu bağlamda, debi-süreklilik eğrisi üzerindeki debiler için cebri boru ve kurulu güç maliyetleri hesaplanmalı; çalışılan debi için yıllık enerji üretim miktarı hesaplanarak enerji faydası bulunmalı ve dolayısıyla net fayda elde edilmelidir. Hesaplama adımları aşağıda sunulmaktadır:

a) Güç ve enerji üretimi hesaplanabilmesi için öncelikle yaklaşık bir cebri boru çapı seçilmelidir. Bu işlem için aşağıdaki hız bağıntısı kullanılabilir [3]:

$$V = 0.125\sqrt{2gH_g} \quad (1)$$

Burada V m/s cinsinden cebri borudaki ortalama hız, g yerçekimi ivmesi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) ve  $H_g$  m cinsinden brüt düşüdüdür. Cebri borularda maksimum hızın 5 m/s mertebesinde olması önerilmektedir [3]. Bu değer makuldür. Zira daha fazla hızlar cebri boru çeperinde hem yüksek kayma gerilmesine hem de su darbesi esnasında aşırı basınç yüklemelerine neden olmaktadır. Denklem (1)'den elde edilen hız, çalışılan her debi (Q) için süreklilik bağıntısı yardımıyla çap (D) hesaplanmasına olanak sağlamaktadır:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} \quad (2)$$

b) Hesaplanan cebri boru çapları için su darbesi göz önünde tutularak emniyetli cebri boru et kalınlığı hesaplanmaktadır.

c) Debi-süreklilik eğrisi, güç-debi bağıntısı kullanılarak güç-süreklilik eğrisine dönüştürülmektedir.

d) Her seçenek için baz enerji, ikincil enerji ve toplam enerji hesaplanmaktadır. Bu bağlamda, debi-süreklilik eğrisi eşit  $\Delta t$  zaman dilimlerine bölünmektedir. Her zaman dilimindeki eşdeğer debi ( $Q_{eq}$ ) zaman dilimindeki başlangıç ve sonuç debileri farkının zaman dilimini temsil eden zaman yüzdesiyle çarpımıyla bulunmaktadır. Böylece herhangi bir zaman dilimindeki yıllık marjinal enerji  $8760\gamma H_n Q_{eq} e$  ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada 8760 yıllık saat sayısı, e santralin toplam verimi,  $\gamma$  suyun özgül ağırlığı ve  $H_n$  net düşüdüdür.

e) Bu adımda cebri boru ve kurulu güç maliyetleri hesaplanmaktadır. Dairesel en-kesitli bir cebri borunun ağırlığı (G) şu ifadeden bulunmaktadır:

$$G = \pi\gamma_p DLt \quad (3)$$

Burada  $\gamma_p$  cebri boru malzemesinin özgül ağırlığı, D cebri boru çapı, L cebri boru uzunluğu ve t cebri boru et kalınlığıdır. Cebri boru ve santral kurulu gücünün yıllık maliyetleri ( $C_p$  ve  $C_{ic}$ ) sırasıyla

$$C_p = C_{pu} * CRF * G \quad (4)$$

$$C_{ic} = C_{iuc} * P_p * CRF \quad (5)$$

ifadelerinden bulunmaktadır. Burada  $C_{pu}$  cebri boru birim maliyeti,  $C_{iuc}$  kurulu güç birim maliyeti, CRF kapitali kurtarma faktörü ve  $P_p$  santral kurulu gücü olup, jeneratörün üretebileceği maximum güç Denklem (6) ile verilmektedir.

$$P_p = \gamma Q H_n e \quad (6)$$

f) Toplam maliyet cebri boru ve kurulu güç maliyetlerinin toplamı olarak bulunmaktadır. Baz ve ikincil enerji faydaları da üretilen bu enerjilerin birim satış fiyatlarıyla çarpımından bulunmaktadır. Böylece çalışılan her debi için net fayda hesaplanmaktadır. En fazla net faydayı veren seçenekteki debi işletme debisi ( $Q_d$ ) olarak seçilmektedir.

## **2.2. Optimum Cebri Boru Çapının Bulunması**

Program bu aşamada su darbesine karşı emniyetli et kalınlığı hesaplanan ve işletme debisini geçiren optimum cebri boru çapını bulmaktadır. Cebri boru et kalınlığı (t) boru malzemesinin çekme mukavemeti ( $\sigma_t$ ), çapı (D) ve işletme basınçlarına bağlıdır. Su darbesi gelişiminde cebri boru iç basınçlarında aşırı yükselme olabilmektedir. Bu nedenle ilgili et kalınlığı hesaplanırken su darbesi nedeniyle yük artımı  $\Delta H$  göz önüne alınmaktadır. Böylece t değeri şu bağıntıdan bulunmaktadır [4]:

$$t = \frac{\gamma(\Delta H + H_s)D}{2\sigma_t} \quad (7)$$

Burada  $H_s$  su darbesi öncesindeki sistem yüküdür. Boru malzemesi deformasyonlara karşı koyabilecek dirençte olmalıdır. Amerikan Makine Mühendisleri Birliği (ASME) kriterlerine göre minimum boru et kalınlığı mm cinsinden boru çapının m cinsinden 2.5 katı artı 1.2 mm olarak alınmalıdır [5]. Su darbesi teorisi ve yük artımı ile ilgili detaylı bilgi ve formüllere [4] numaralı kaynaktan ulaşılabilir. Cebri boru malzemesi olarak genellikle çelik kullanılmaktadır. Bu nedenle korozyona karşı korumanın artırılması amacıyla et kalınlığı 2 mm daha artırılabilir. Tesisin enerji üretimindeki kayıp değişik cebri boru çapları için hesaplanmaktadır. Bu değerlere karşı gelen enerji kayıp maliyetleri ise enerji kayıplarının enerji üretimi birim fiyatlarıyla çarpımından hesaplanmaktadır. Her bir cebri boru çapı için toplam maliyet, cebri boru maliyeti ve enerji kayıp maliyetinin toplamından bulunmaktadır. Toplam maliyeti en düşük yapan cebri boru çapı ise optimum çap olarak seçilmektedir.

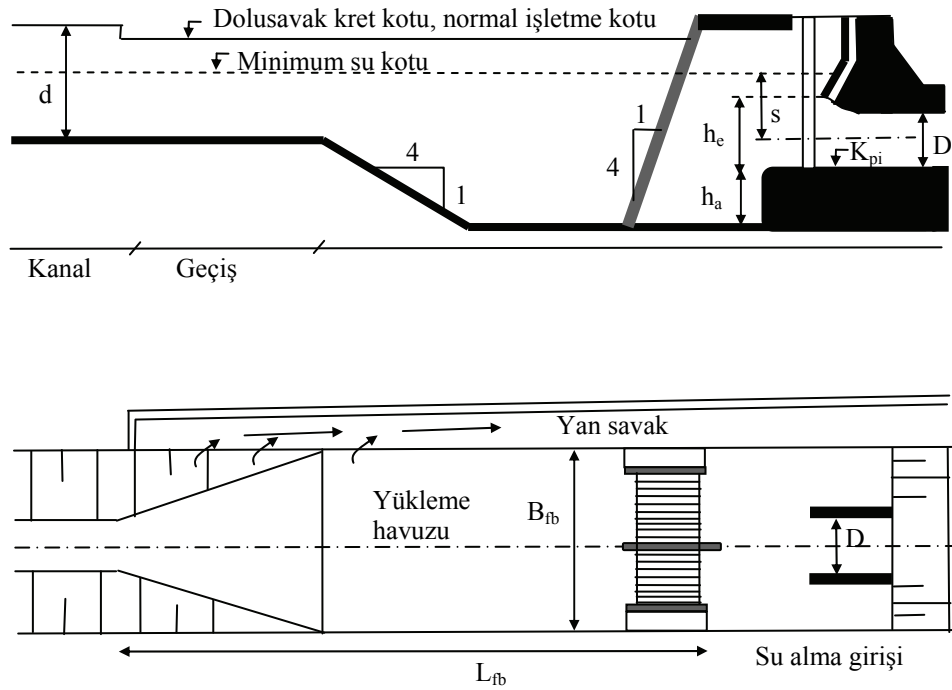
### 2.3. Yükleme Havuzu ve Kanal Tasarımı

Tipik bir yükleme havuzu plan ve kesit görünümü Şekil 1’de gösterilmektedir. Program, trapez en-kesitli iletim kanalını en uygun hidrolik kesit kriterine göre boyutlandırmaktadır. İletim kanalının boyutlandırılmasını takiben kanalda optimum işletme debisine karşı gelen akım derinliği bulunmaktadır. Yersel kayıplar ihmal edilerek kanaldaki su kotunun yükleme havuzundaki su kotuyla çakıştığı kabul edilip işlemlere devam edilmektedir. Yükleme havuzunda minimum işletme kotunda bile cebri boruya hava girişini ve dolayısıyla çevrinti oluşumunu engelleyecek şekilde yeterli batıklık sağlanmalıdır. Böylece türbinlerde olası kavitasyon da önlenmiş olmaktadır. Şekil 1’de  $s$  ile gösterilen ve cebri boru aksından itibaren ölçülen minimum batıklık değeri Knauss (1987) ifadesinden şöyle bulunmaktadır [6]:

$$s = (D \text{ veya } 1.5D) \quad F_r \leq 0.25 \text{ için} \quad (8)$$

$$s = D(0.5 + 2F_r) \quad F_r > 0.25 \text{ için} \quad (9)$$

Burada  $F_r$  cebri boru çapı kullanılarak hesaplanan Froude sayısıdır.



Şekil 1. Yükleme havuzu kesit ve plan görünümü

Ülkemiz pratiğinde yükleme havuzundaki minimum su seviyesi debinin  $0.75Q_d$  değerine eşit olduğu zamanki akım derinliğinin Manning denkleminden bulunmasıyla elde edilmektedir [3]. Başka bir deyişle iletim kanalında  $0.75Q_d$  değerinden daha düşük debilerin geçirilmesi tabanda rüsubat birikimi ve otlama problemleri yaratacağından pürüzlülük katsayısını artıracak ve debiyi azaltacaktır. Yersel şartlara ve santral konumuna bağlı olarak cebri boru alt kotunun belli olduğu kabul edilirse cebri boru aksından itibaren s değerinin eklenmesiyle minimum işletme seviyesi elde edilir. İletim kanalı taban kotu ise minimum işletme kotundan  $0.75Q_d$  değerine karşı gelen kanaldaki akım derinliğinin çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Cebri boru girişinde akım koşullarını düzeltmek amacıyla bir geçiş bölgesi yaratılmaktadır. Bu geçiş bölgesinin hemen mansabındaki  $h_e$  yüksekliği (Bkz. Şekil 1) şu ifadeden bulunmaktadır:

$$h_e = \frac{\pi D^2}{4bC_c} \quad (10)$$

Burada b su alma girişinin genişliği,  $C_c$  ise büzülme katsayısıdır. Ön tasarımda bu katsayı 0.6 olarak alınabilir [3]. Su alma girişinin genişliği cebri boru çapına eşit olduğu için (10) numaralı denklemde tek bilinmeyen  $h_e$  doğrudan hesaplanabilir. Cebri boru güzergahında negatif basınca maruz kalabilecek bölgede borunun burkulmasını önlemek için bir havalandırma borusu kullanılmalıdır. Borunun içe çökmesine neden olabilecek negatif basınç ( $P_c$ ) GPa cinsinden şu ifade ile hesaplanmaktadır [5]:

$$P_c = 882500 \left( \frac{t}{D} \right)^3 \quad (11)$$

Burada t ve D mm cinsinden sırasıyla cebri borunun et kalınlığı ve çapıdır. Havalandırma borusu çapı ( $D_A$ ) ise cm cinsinden Denklem (12) ve (13) vasıtasıyla bulunabilir [5]:

$$D_A = 7.47 \sqrt{\frac{Q_d}{\sqrt{P_c}}} \quad P_c \leq 0.49 \text{ için} \quad (12)$$

$$D_A = 8.94 \sqrt{Q_d} \quad P_c > 0.49 \text{ için} \quad (13)$$

Bu denklemlerde  $P_c$  GPa,  $Q_d$  ise  $m^3/s$  cinsinden kullanılmaktadır. Şekil 1'den görüleceği gibi su alma girişinin önünde yükleme havuzu tabanında çökmesi olası rüsubatın cebri boruya girmemesi için bir eşik oluşturulmaktadır. Eşik yüksekliği  $\Delta_a$  için en az  $0.3h_e$  değerinin alınması önerilmektedir [7]. İletim kanalında ve yükleme havuzunda rastlanabilen yüzen cisimlerin cebri boruya girişini engellemek için bir ızgara sistemi oluşturulmaktadır. Bu sistemin genişliği ( $B_{tr}$ ) şöyle bulunmaktadır:

$$B_{tr} = \frac{Q_d}{V_a(\Delta_a + s + 0.5h_e)} \quad (14)$$

Burada  $Q_d$  toplam işletme debisi,  $V_a$  ise mertebesinin 0.6 – 0.9 m/s olması arzu edilen ızgara önündeki ortalama yaklaşım akım hızıdır. Yükleme havuzu genişliği ( $B_{fb}$ ) için  $B_{tr}$  uzunluğunun iki yanında en az  $\Delta_a$  değeri kadar bir genişlik oluşturulması önerilmektedir [7]. Geniş yükleme havuzlarında yaklaşım akımının daha rahat olması amacıyla su alma girişi bir ayırma duvarıyla bölünebilir. Böylece,  $t_{fp}$  ayırma duvarı kalınlığı olmak üzere, yükleme havuzu genişliği  $B_{tr} + t_{pf} + 2\Delta_a$  olmaktadır. Programda yükleme havuzu hacmi  $V_{fb}$  bir girdi değişkenidir. Pratikte bu değer  $m^3$  cinsinden  $90Q_d$  olarak alınabilir [3]. Burada  $Q_d$   $m^3/s$  cinsinden kullanılmalıdır. Yükleme havuzu uzunluğu ( $L_{fb}$ ) ise (15) numaralı denklemden bulunabilir:

$$L_{fb} = \frac{V_{fb}}{B_{fb}h_{fb}} \quad (15)$$

Burada  $h_{fb}$  yükleme havuzundaki minimum ve maksimum işletme kotları arasındaki farktır. Ön yaklaşım olarak  $L_{fb}/B_{fb}$  oranının 2.5 ve 3.0 değerleri arasında olması istenmektedir [3]. Ancak kesin tasarımda yersel koşulların elverdiği boyutlar da göz önüne alınmaktadır. Yan savak kret kotu, yükleme havuzundaki işletme seviyesine su yüzeyindeki salınımları da göz önüne almak için 10 cm eklenmek suretiyle bulunmaktadır. Bu çalışmada, yan savak yükü daha emniyetli tarafta kalınarak enerji veya momentum korunumu prensiplerine dayanan ardışık hidrolik hesaplar yerine önden alıslı savak formülü kullanılarak hesaplanmaktadır [8]. Yan savak kret uzunluğu, yükleme havuzu boyuna eşit alınarak, (15) numaralı denklem ve savak akım denklemi kullanılarak savak yükü ve yükleme havuzu uzunluğu ardışık çözümlenerek bulunmuştur.

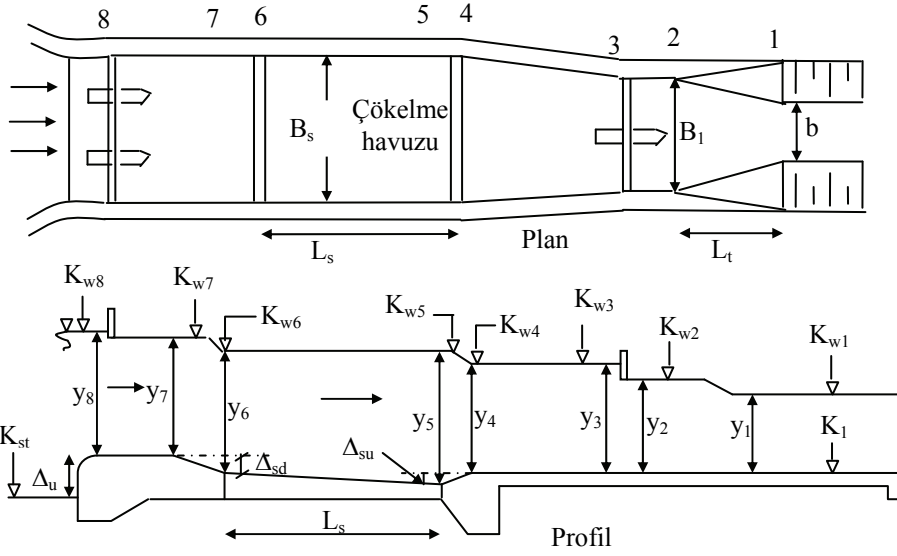
#### 2.4. Dolu Gövdeli Regülatör Tasarımı

Program, regülatör tasarımını başlatabilmek için iletim kanalı sonundaki akım derinliğini girdi olarak kullanmaktadır. Bu değer nasıl bulunduğu daha önce yükleme havuzu tasarımında anlatılmıştır. İletim kanalında akım nehir rejiminde olduğundan bu kesitten başlayarak memba yönünde kesitler arasında ardışık olarak enerji bağıntısı yazılarak su kotları hesaplanmaktadır. Böylece dolusavak önündeki su kotu ve dolayısıyla dolusavak kret kotu bulunmaktadır. Bu hesaplamalar Şekil 2’de gösterilen 9 adet en-kesitte ardışık olarak yapılmaktadır. Bu makalede sadece iletim hattının en önemli elemanlarından biri olan çökeltim havuzu tasarımıyla ilgili bilgi sunulmaktadır. Diğer kesitler arasındaki hidrolik hesaplarla ilgili detaylı bilgi için [9] numaralı kaynağa başvurulması önerilmektedir.

Santrale temiz su iletilmesi için çökeltim havuzunun istenilen performansı verecek şekilde boyutlandırılması önemlidir. Çökeltim havuzu sonunda bir eşik oluşturularak havuzda biriken rüsubatın iletim kanalına girmesi önlenir. Çökeltim havuzunda askıdaki maddelerin çökmesine olanak sağlayacak düzeyde düşük akım hızlarının oluşması esastır. Çökeltim havuzunda tutulacak malzemenin dane çapı santraldaki yüke göre değişmektedir. Zira yük çok fazla ise çökeltim havuzunda tutulamayıp cebri borudan geçebilecek dane çapının çok küçük olması gerekmektedir. Çökeltim havuzunda tutulması planlanan sınır dane çapı ( $D_m$ ) ile bu çaptaki danenin sürüklenmeye direnç gösterecek maksimum hız ( $V_{max}$ ) arasındaki ilişki Camp tarafından şöyle verilmiştir [10]:

$$V_{\max} = a\sqrt{D_m} \quad (16)$$

Burada a dane çapına göre değişen bir katsayı olup,  $D_m \geq 1$  mm için 36,  $0.1 \text{ mm} < D_m < 1$  mm için 44 ve  $D_m \leq 0.1$  mm için 51 değerlerini almaktadır [10]. Eşik yüksekliği 0.5 – 1.0 m arasında seçilerek (5) numaralı kesitteki akım derinliği bulunur.



Şekil 2. Su alma prizi plan ve kesiti

Çökeltim havuzu sonundaki ortalama akım hızının  $V_{\max}$  değerinden küçük olması gerekmektedir. Bu kriter sağlanamazsa çökeltim havuzu genişliği veya eşik yüksekliği artırılabilir. Dikdörtgen en-kesitli çökeltim havuzu uzunluğu ( $L_s$ ) şöyle bulunur:

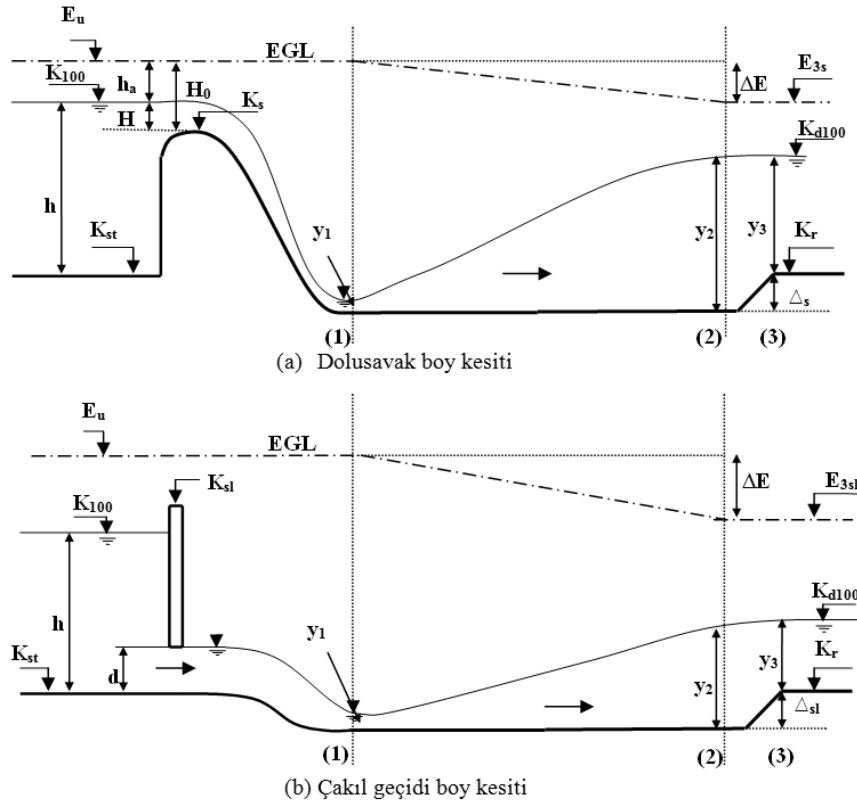
$$L_s = \frac{Q_d}{W_f B_s} \quad (17)$$

Burada  $Q_d$  işletme debisi,  $B_s$  çökeltim havuzu genişliği,  $W_f$  ise dane çökeltme hızıdır.  $D_m$  çapındaki danenin çökeltme hızı hesaplandıktan sonra Denklem (17) kullanılarak çökeltim havuzu uzunluğu hesaplanmaktadır. Çökeltme hızı durgun su koşulları için hesaplandığından havuzdaki akımı da göz önüne alarak hesaplanan  $L_s$  değerinin biraz daha artırılması uygun olacaktır. Şekil 2'de sunulan kesitler arasındaki enerji bağıntıları kullanılarak priz önündeki su kotu hesaplanır. Su yüzeyindeki dalgalanmalar da göz önüne alınarak bu kota 10 cm eklenerek dolosavak kret kotu hesaplanır. Priz girişindeki eşik yüksekliğinin ( $\Delta_u$ ) 0.5 - 1.0 m arasında olup olmadığı kontrol edilir [11].



## 2.5. Dolusavak, Çakıl Geçidi ve Enerji Kırıcı Havuzunun Tasarımı

Ülkemiz uygulamalarında regülatör tasarımında 100 yıl dönüş aralıklı pik debinin kısmen dolusavaktan kısmen de çakıl geçidinden aktararak mansaba bırakılacağı kabul edilmektedir ( $Q_{100}=Q_{sl} + Q_s$ ) [11]. Burada  $Q_{sl}$  çakıl geçidinden,  $Q_s$  ise dolusavaktan geçen debidir [9]. Çakıl geçidi için yersel şartlara ve akarsu katı madde rejimine göre makul boyutlar seçilerek dolusavak net kret genişliği hesaplanır. Membadaki su kotuna uygun değerler atanarak yukarıda sunulan süreklilik eşitliğini sağlayan memba su kotu ardışık değerler sınanarak bulunur. Böylece en-kesit özellikleri belli olan dolusavak membaında tasarım debisi durumundaki enerji seviyesi de hesaplanmaktadır. Dolusavak üzerinden geçen akımla çakıl geçidinden bırakılan farklı debilerdeki akımların dolusavak topuğunda farklı akım koşulları yaratacağı açıktır. Bu nedenle dolusavak ve çakıl geçidi topuğundaki hesaplar ayrı ayrı yapılmalıdır. Enerji kırıcı havuzu mansabında bulunan rırap kesiti sonundaki tasarım akım derinliği su yüzü profili hesapları yapan uygun bir yazılımdan bulunabilir. Böylece mansap kesitinde en-kesit boyunca iki farklı enerji seviyesi oluşacaktır: dolusavak devamındaki mansap enerji seviyesi ( $E_{3s}$ ) ve çakıl geçidi devamındaki mansap enerji seviyesi ( $E_{3sl}$ ) (Bkz. Şekil 3). Bu durumda enerji kırıcı havuzda hidrolik sıçramayı gerçekleştirmek için gerekli olan taban kazı değerleri dolusavak ( $\Delta_s$ ) ve çakıl geçidi ( $\Delta_{sl}$ ) mansapları için ayrı ayrı hesaplanır (Bkz. Şekil 3).

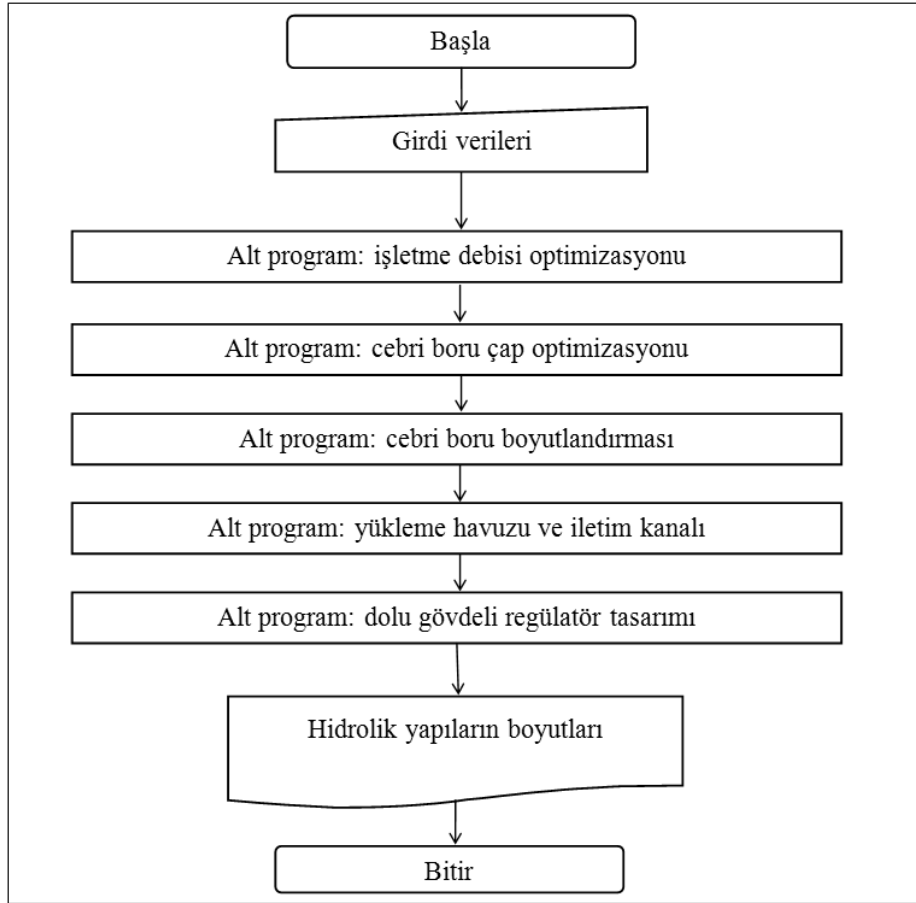


Şekil 3. Dolusavak ve çakıl geçidi boy kesitleri (Yanmaz, 2013)

Kazı derinliklerinin birbirine yakın olması halinde daha derin kazı miktarı seçilerek yekpare bir enerji kırıcı havuz tasarımına gidilir. Bu durum, ekonomik nedenlerden ötürü, araya bir ayırma duvarı konularak inşa edilecek iki farklı havuzdan daha fazla tercih edilmektedir. Hidrolik sıçramanın uzunluğu değişik akım koşullarına göre farklılık göstereceği için anılan hesaplar ayrıca diğer dönüş aralıklı akımlar için de tekrarlanır ve en uzun ve en derin havuz seçeneği kabul edilir.

### 3. MINI-HPD YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu kısma kadar anlatılan tasarımların ve işletme parametrelerinin bulunması için C# programlama dilinde kullanımı kolay ve uygulayıcıyı yönlendirici bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, Microsoft Windows işletim sistemi altında çalışmaktadır. Program öncelikle ana girdilerin tanımlandığı bir pencere ile açılmaktadır. Programın akış şeması Şekil 4'te sunulmaktadır. Programda gerekli girdi değişkenleri ve işlemler sonucunda bulunan çıktı parametreleri Çizelge 1'de verilmektedir.



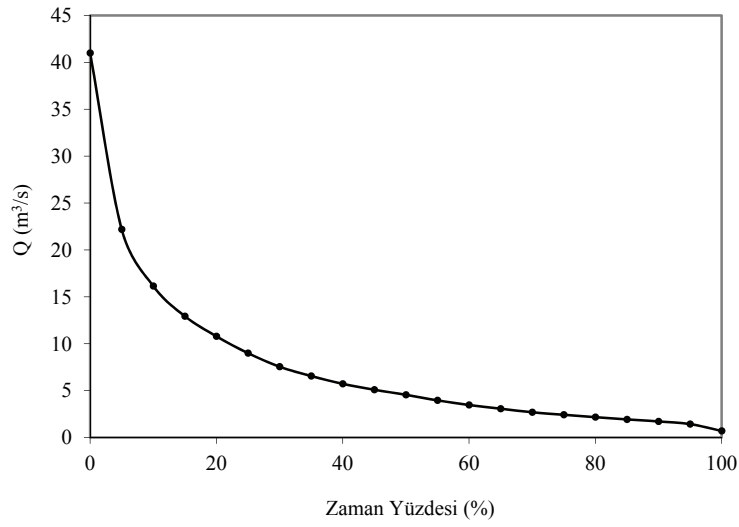
*Şekil 4. MINI HPD Programının akış şeması*

Çizelge 1. Yazılımın girdi ve çıktı parametreleri

| Alt program                               | Veri cinsi | Veri   |
|---|------------|--|
| Optimum işletme debisi ve cebri boru çapı | Girdi      | Debi-süreklilik eğrisi,<br>Brüt yük,<br>Birim fiyatlarla ilgili veri<br>Türbin, jeneratör ve transformatör verimleri,<br>Cebri boru uzunluğu ve sürtünme faktörü,<br>Cebri boru malzeme özellikleri,<br>Türbin kapanma süresi                    |
|   | Çıktı      | Tasarım debisi, net yük, cebri boru çapı,<br>Santral optimum kurulu gücü ve yıllık enerji üretim miktarları  |
| Cebri boru tasarımı                       | Girdi      | Dalga yayılma hızı, su darbesinde artan yük, brüt yük,<br>Havalandırma borusunun çapı  |
|   | Çıktı      | Cebri boru et kalınlığı  |
| Yükleme havuzu ve iltim kanalı tasarımı   | Girdi      | Cebri boru alt kotu,<br>Gerekli yüklem havuzu hacmi,<br>İletim kanalı taban ve yanal eğimleri, pürüzlülük katsayısı  |
|   | Çıktı      | Yüklem havuzu boyutları ve havuzdaki su kotları,<br>Yüklem havuzu sonundaki ızgara kesitinin genişliği,<br>Yan savak ve yüklem havuzu kret yükseklikleri,<br>Yüklem havuzu alt kotu ve eşik yüksekliği,<br>İletim kanalı boyutları ve su kotları |
| Regülatör tasarımı                        | Girdi      | İletim kanalı uzunluğu,<br>Su alma prizi boyunca kullanılan ayırma ayaklarının özellikleri,<br>Maksimum çökecek dane çapı, $D_{max}$ ,<br>Su alma prizi önündeki ızgaraların özellikleri,<br>Su alma prizi önündeki talveg kotu, $K_{st}$ .      |
|   | Çıktı      | Her bir su alma prizi için su kotu,<br>Her bir su alma prizinin kabaca boyutları,<br>Dolusavak kret kotu, $K_s$  |
| Enerji kırıcı tasarımı                    | Girdi      | Taşkın debileri,<br>Anroşman bölgesi su seviyeleri ve yatak kotu,<br>Dolusavak kret kotu ve uzunluğu,<br>Çakıl geçiti sayısı ve boyutları,<br>Dolusavak üstündeki köprü geometrisi detayları   |
|   | Çıktı      | Dolusavak üzerinden ve çakıl geçitlerinden geçen debiler,<br>Her bir taşkın debisi için memba su yüzü kotu,<br>Enerji kırıcının tipi ve boyutları  |

#### 4. UYGULAMA

Bu uygulamada MINI-HPD kullanılarak bir nehir santrali elemanlarının tasarımı gerçekleştirilecektir. Yapısal elemanların bazı özellikleri ile girdi verisi hakkında bilgi aşağıda sunulmaktadır. Bu uygulamada kullanılan girdi verisi ülkemizde özel sektör tarafından gerçekleştirilen bir tasarıma aittir. Programın sonucunda elde edilen çıktı değerleri ayrıca sunulmaktadır. Regülatör bölgesini temsil edecek debi-süreklilik eğrisi Şekil 5'te sunulmaktadır. Ayrıca frekans analizi uygulanarak bulunan değişik dönüş aralıklı akımların pik debileri ile bu debilere karşı gelen mansap su kotları Çizelge 2'de girdi olarak verilmektedir.

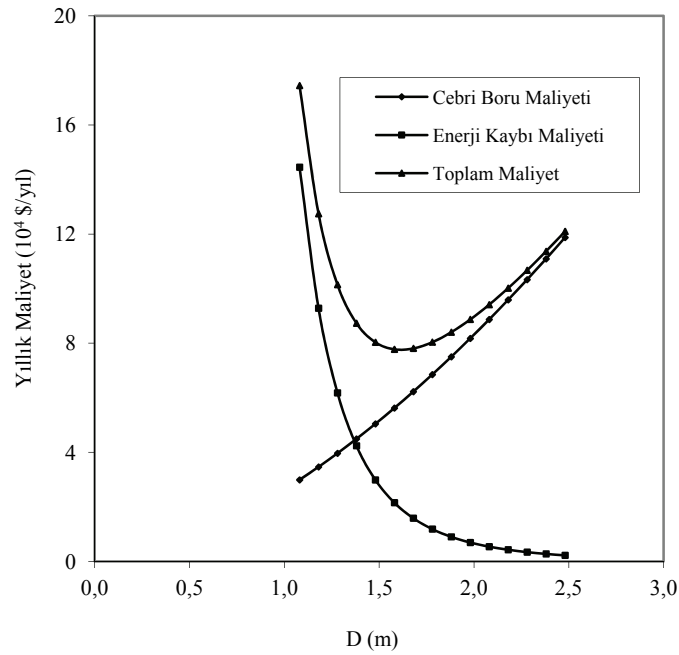


Şekil 5. Debi süreklilik eğrisi

Çizelge 2. Değişik dönüş aralıklarındaki pik debiler ve mansap su kotları

| Dönüş aralıklı pik debi | Debi değeri<br>(m <sup>3</sup> /s) | K <sub>d</sub><br>(m) |
|-------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Q <sub>5</sub>          | 113.6                              | 589.49                |
| Q <sub>10</sub>         | 139.7                              | 589.85                |
| Q <sub>25</sub>         | 175.7                              | 590.32                |
| Q <sub>50</sub>         | 205.2                              | 590.68                |
| Q <sub>100</sub>        | 237.4                              | 591.06                |

Uzunluğu 254 m, sürtünme faktörü 0.012 olan tek bir cebri boru bir branşmanla iki parça halinde iki adet Francis türbine bağlanmaktadır. Cebri borunun elastisite modülü 206 GPa ve müsaade edilebilir çekme gerilmesi 400 MPa değerindedir. Cebri borunun birim maliyeti 7.52 \$/kg, türbin kapanma süresi 5 s ve yükleme havuzu sonundan başlayan cebri boru alt kotu 581.25 m'dir. Regülatör ile yükleme havuzu arasına inşa edilecek olan 17.214 km uzunluktaki ve 1D:1.5Y yanal eğimlerinde bir kaplamalı kanal iletim sistemi olarak kullanılacaktır. Taban eğimi 0.0003 olan iletim kanalının Manning pürüzlülük katsayısı 0.016 olarak alınmıştır. Sol sahilde konuşlanacak bir prizle santrale su alınması planlanmaktadır. Su alma prizinin 3 ve 8 numaralı kesitlerinde genişliği 0.5 m olan bir ayak vasıtasıyla ikişer adet giyotin kapak kullanılacaktır. Çökeltim havuzunda çapı 0.2 mm'den daha büyük malzemenin çökmesi istenmektedir. Su alma yapısı girişindeki ızgaraların kalınlığı 1.5 cm, aralıkları ise 10 cm olarak alınmıştır. Boyutları 4.5 m (en) ve 2 m (yükseklik) olan bir adet çakıl geçidi kullanılacaktır. Dolusavak kret uzunluğu 60 m dir. Riprap kesitindeki taban seviyesi 587.00 m, su alma yapısı girişindeki talveg kotu 589.40 m dir. Santralin brüt yükü 78 m dir. Santraldeki iki adet Francis türbinin verimi %94, jeneratör verimi %97, transformatör verimi ise %98 dir. Baz ve ikincil enerjilerin birim fiyatları 0.08 \$/kWh, santral kurulu güç birim fiyatı ise 1,200,000 \$/MW tr. Bu çalışmada tesis ömrü 30 yıl, faiz değeri %10 alınarak, kapitali kurtarma faktörü 0.11 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6. Optimum cebri boru çapının bulunması

MINI-HPD yazılımıyla elde edilen bazı sonuçlar Şekil 6'da sunulmaktadır. Bu uygulamada optimum işletme debisi  $10.79 \text{ m}^3/\text{s}$  olarak bulunmuştur. Bu değer, debi-süreklilik eğrisinde zamanın %20 değerine karşı gelmektedir. Bu değer, nehir tipi santrallerin tasarım debileri için önerilen %20-%30 aralığında kaldığı için makuldür [2]. Optimum kurulu güç ve optimum cebri boru çapı sırasıyla 7.18 MW ve 1.7 m olarak bulunmuştur (Bkz. Şekil 6). Böylece cebri borudaki ortalama hız  $4.75 \text{ m/s}$  olarak hesaplanmış ve pratikte kabul edilen  $5 \text{ m/s}$  hız sınırının altında kalmıştır. Tasarım sonuçları ilgili kriterleri sağlamıştır. Çıktı sonuçları ise Çizelge 3'te verilmektedir.

*Çizelge 3. Tasarım çıktıları*

| Parametre                         | Birim                 | Çıktı değeri |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Optimum işletme debisi            | $\text{m}^3/\text{s}$ | 10.79        |
| Optimum cebri boru çapı, D        | m                     | 1.70         |
| Dolusavak kret kotu               | m                     | 593.24       |
| $Q_{100}$ debisinde memba su kotu | m                     | 594.44       |
| Su alma yapısı taban kotu         | m                     | 590.55       |
| Çökeltim havuzu uzunluğu          | m                     | 33.76        |
| Çökeltim havuzu genişliği         | m                     | 16.18        |
| Çökeltim havuzundaki hız          | $\text{m/s}$          | 0.20         |
| Yükleme havuzu genişliği          | m                     | 18.10        |
| Yükleme havuzu uzunluğu           | m                     | 52.80        |
| Yükleme havuzu min. su seviyesi   | m                     | 586.90       |
| Yükleme havuzu normal su seviyesi | m                     | 587.66       |
| Yükleme havuzu maks. su seviyesi  | m                     | 587.98       |
| Yükleme havuzu duvarı kret kotu   | m                     | 588.08       |
| Cebri boru et kalınlığı           | mm                    | 8.00         |
| Kurulu güç                        | MW                    | 7.18         |
| Baz enerji                        | GWh/yıl               | 8.34         |
| İkincil enerji                    | GWh/yıl               | 22.97        |
| Toplam enerji                     | GWh/yıl               | 31.31        |
| Enerji kırıcı uzunluğu            | m                     | 31.00        |
| Enerji kırıcı tipi                | USBR                  | Tip IV       |

## 5. SONUÇLAR

Bu makalede nehir tipi santrallerin hidrolik tasarımı için geliştirilen MINI-HPD isimli yazılım tanıtılmıştır. Bu yazılım, optimum işletme debisi, optimum kurulu güç ve cebri boru çapını bularak tasarıma başlamaktadır. Daha sonra tesisin yapısal elemanları olan yükleme havuzu, iletim kanalı, dolusavak, çakıl geçidi ve enerji kırıcı havuzun tasarımları yapılmaktadır. Tesis yeri yersel ve jeolojik gereksinimlere göre belirlenmiş olduğundan program çalıştırılmadan önce yersel veri girdi olarak programa tanımlanmaktadır. Kullanımı kolay ve kullanıcıyı yönlendirici özellikteki bu programla nehir tipi santrallerin hidrolik tasarımları için ülkemizde kullanılan kriterlere uygun ve etkileşimli hesaplar yapılabilmekte ve kullanıcıya zaman kazandırmaktadır. Program bir uygulama örneğiyle tanıtılmıştır.

### Semboller

|           |   |
|-----------|---|
| $a$       | = dane çapına bağlı katsayı;                                |
| $B$       | = iletim kanalı taban genişliği;                            |
| $B_{fb}$  | = yükleme havuzu genişliği;                                 |
| $B_{tr}$  | = yükleme havuzu sonundaki su alma ızgaralarının genişliği; |
| $B_s$     | = çökeltim havuzu genişliği;                                |
| $C_c$     | = büzülme katsayısı;  |
| $C_{ic}$  | = kurulu güç maliyeti;                                      |
| $C_{icu}$ | = kurulu güç birim fiyatı;                                  |
| $C_{pu}$  | = cebri boru birim fiyatı;                                  |
| $CRF$     | = kapital kurtarma faktörü;                                 |
| $D$       | = cebri boru çapı;  |
| $D_A$     | = havalandırma borusu çapı;                                 |
| $D_{max}$ | = çökeltim havuzunda tutulması arzu edilen dane sınır çapı; |
| $E_{3s}$  | = dolusavak mansabındaki enerji seviyesi;                   |
| $E_{3sl}$ | = çakıl geçidi mansabındaki enerji seviyesi;                |
| $E_u$     | = regülatör membaındaki enerji seviyesi;                    |
| $e$       | = verim;  |
| $F_r$     | = Froude sayısı;  |
| $g$       | = yerçekimi ivmesi;   |
| $G$       | = cebri boru ağırlığı;                                      |
| $H_g$     | = brüt yük;   |
| $H_n$     | = net yük;  |

*Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerin Bilgisayar Destekli Ön Tasarımı*

|            |  |
|------------|--|
| $H_s$      | = santralde su darbesi öncesindeki yük;                                |
| $h$        | = dolusavak membaındaki akım derinliği;                                |
| $h_a$      | = dolusavak membaındaki yaklaşım hızı yükü;                            |
| $h_{fb}$   | = yükleme havuzunda maksimum ve minimum su seviyeleri arasındaki fark; |
| $h_e$      | = su alma yapısındaki ilgili büyüklük;                                 |
| $K_{cd}$   | = iletim kanalı çıkışındaki taban kotu;                                |
| $K_d$      | = riprap kesitindeki su kotu;  |
| $K_{100}$  | = $Q_{100}$ debisinde memba su kotu;                                   |
| $K_{d100}$ | = $Q_{100}$ debisinde riprap kesitinde su kotu;                        |
| $K_{pi}$   | = cebri boru alt kotu;   |
| $K_r$      | = riprap kesitindeki taban üst kotu;                                   |
| $K_s$      | = dolusavak kret kotu;   |
| $K_{sf}$   | = yükleme havuzundaki yan savağın kret kotu;                           |
| $K_{st}$   | = su alma prizi girişindeki talveg kotu;                               |
| $L_{fb}$   | = yükleme havuzunun uzunluğu;  |
| $ME$       | = marjinal enerji;   |
| $P_p$      | = santral gücü;  |
| $Q$        | = debi;  |
| $Q_d$      | = tasarım debisi;  |
| $Q_5$      | = 5 yıl dönüş aralıklı taşkın pik debisi;                              |
| $Q_{10}$   | = 10 yıl dönüş aralıklı taşkın pik debisi;                             |
| $Q_{25}$   | = 25 yıl dönüş aralıklı taşkın pik debisi;                             |
| $Q_{50}$   | = 50 yıl dönüş aralıklı taşkın pik debisi;                             |
| $Q_{100}$  | = 100 yıl dönüş aralıklı taşkın pik debisi;                            |
| $Q_{eq}$   | = eşdeğer debi;  |
| $s$        | = minimum batıklık derinliği;  |
| $t$        | = cebri boru et kalınlığı;   |
| $V$        | = hız;   |
| $V_{max}$  | = çökme havuzunda sürüklenmeye direnç gösterecek maksimum hız;         |
| $V_{fb}$   | = yükleme havuzu hacmi;  |
| $V_a$      | = yükleme havuzu sonundaki ızgara önündeki hız;                        |
| $W_f$      | = çökme hızı;  |
| $\Delta_a$ | = yükleme havuzundaki eşik yüksekliği;                                 |



|               |   |
|---------------|---|
| $\Delta_s$    | = dolusavak mansabında gerekli eşik yüksekliği;     |
| $\Delta_{sl}$ | = çakıl geçidi mansabında gerekli eşik yüksekliği;  |
| $\Delta_{sd}$ | = çökeltim havuzu girişindeki eşik yüksekliği;      |
| $\Delta_{su}$ | = çökeltim havuzu sonundaki eşik yüksekliği;        |
| $\Delta_u$    | = su alma prizi girişindeki eşik yüksekliği;        |
| $\Delta E$    | = hidrolik sıçramadaki enerji kaybı;                |
| $\Delta t$    | = debi-süreklilik eğrisindeki zaman aralığı;        |
| $\Delta Q$    | = $\Delta t$ zaman aralığındaki debi farkı;         |
| $\Delta H$    | = su darbesinde yük artımı;                         |
| $\sigma_t$    | = cebri borunun müsaade edilebilir çekme gerilmesi. |

#### Kaynaklar

- [1] DSİ Internet sitesi, [www.dsi.gov.tr](http://www.dsi.gov.tr).
- [2] Mays, L.W. (2001). *Water Resources Engineering*, John Wiley and Sons, New York.
- [3] Yıldız, K., (1992). *Hydropower Plants: Calculation Guidelines and Design*, Ankara, Publications of Turkish State Hydraulic Works (in Turkish).
- [4] Wylie, E.B., Streeter, V.L., and Suo L., (1993). *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, NJ 07458.
- [5] ESHA, (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, Publication of the European Small Hydropower Association.
- [6] Knauss, J., (1987). *Swirling Flow Problems at Intakes*, AIHR Hydraulic Structure Design Manual, Rotterdam, Netherlands.
- [7] USBR (1977). *Engineering Monograph No 3: Welded Steel Penstocks*, Revised Edition, Washington: Water Resources Technical Publication.
- [8] USBR (1987). *Design of Small Dams*, Third Edition, Washington: Water Resources Technical Publication.
- [9] Yanmaz, A.M., (2013). *Applied Water Resources Engineering*, Dördüncü Baskı, METU Press, Ankara.
- [10] Camp, T.R., (1946). "Sedimentation and the Design of Settling Tanks", *Transactions ASCE*, Vol. 3, No. 2285, pp. 895-936.
- [11] Sungur, T., (1988). *Hidrolik Yapılar-Cilt 2: Regülatörler*, DSİ Yayınları, Ankara,.

