

## Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme

Mücahit OPAN\*

### ÖZ

Bu çalışmada, çok amaçlı ve çok barajlı bir su kaynakları sistemi tanımlanmıştır. Sistem üzerine enerji üretimi amaçlı uzun süreli, taşkın kontrolü amaçlı kısa süreli ve hem taşkın kontrolü hem de enerji üretimi amaçlı gerçek zamanlı optimal işletme modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde, ardışık yaklaşımlı dinamik programlama (DPSA) optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Uzun ve kısa süreli optimal işletme modelleri ile elde edilen optimal seviyeler, gerçek zamanlı optimal işletme modelinde kılavuz seviyeler olarak kullanılacaktır. Gerçek zamanlı optimal işletmede, amaç fonksiyonu olası taşkın durumunda hem taşkından oluşabilecek zararları en aza indirmek hem de optimal enerji üretimini sağlamak üzerinedir. Gerçek zamanlı ve kısa süreli optimal işletmeler esnasında, barajdan bırakılan akımların diğer barajın aksına taşınması için kinematik dalga yaklaşımı kullanılmıştır. Modeller, Ceyhan Havzası'nda bulunan çok barajlı bir su kaynakları sistemine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, taşkın kontrolü ile enerji üretimi bakımından değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gerçek zamanlı optimal işletme, uzun ve kısa süreli optimal işletme, taşkın kontrolü, enerji üretimi, ardışık yaklaşımlı dinamik programlama.

### ABSTRACT

#### Real-Time Optimal Operation of Multiple Reservoirs System

In this study, a water resources system with multi-objectives and multiple reservoirs is described. Optimal operation models of long term with energy production objective, short term with flood control objective and real-time with both flood control and energy production objectives are developed for the system. In the developed models, optimization technique of the dynamic programming with successive approximations (DPSA) is used. Optimal operation models obtained from long and short terms are used as guide levels in real-time optimal operation model. The objective function in the real-time optimization in probable flood cases, is about both minimization of flood damage and providing optimal energy production. In real-time and short term optimal operations, kinematic wave approach is used for carrying the inflows released from one reservoir to the other reservoir. The models are applied to a water resource system with multi-reservoirs existing in the

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 12.02.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2011 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - opanmucahit@yahoo.com

Ceyhan Basın. The results obtained are evaluated in terms of flood control and energy production.

**Keywords:** Real-time optimal operation, long and short term optimal operation, flood control, energy production, dynamic programming with successive approximations.

## 1. GİRİŞ

Gerçek zamanlı optimal işletme, uzun ve kısa süreli planlama için yapılan optimal işletmelerden elde edilen optimal seviyelere, barajlara havzalarından gelebilecek akımından türetilen tahmini akımlara, barajlardan bırakılan akımların akarsu yatağında ötelenerek diğer barajlara taşınmasına bağlı olarak yapılmaktadır [1]. Gerçek-zamanlı optimal kontrol modellerinde, günlük (ya da en az saatlik) zaman artışlarındaki kısa zamanlı ufuklar gözetilerek, uzun ve kısa süreli kılavuz eğrileri üzerinden çözüm üretilmektedir [2].

Çok baraj sistemlerin gerçek zamanlı kontrolünde tahmin yeteneğinin önemini sınanan çalışmalar yapılmıştır [3, 4 ve 5]. Iowa'da Des Moines havzasında bulunan çok barajlı sistemde günlük optimal taşkın kontrolü işletmeleri için ayrık-zamanlı LOG (Ayrık zamanlı doğrusal quadratik gaussian kontrolü) modeli uygulanmıştır [6]. Aylık zaman artışlarında karmaşık baraj sistemleri için bu yaklaşım genişletilmiş ve Venezuela'nın Caroni Havzası'ndaki iki barajlı sisteme uygulanmıştır [7]. Çok barajlı sistemlerde sınırlamasız optimal çözümün gerçekleşmesi için kabul edilebilir bir şekilde basitleştirmeler yapılarak heuristik bir prosedür önerilmiştir [7]. Çok barajlı sistemler için eşdeğerliğe dayalı metodların doğruluğunun LOG modeli ile ilişkilendirildiği kabuller üzerine çalışmaların gittikçe önemsizleştiği üzerine dikkatler çekilmiştir [8]. Sistem durum ve bırakım (karar) değişkenleri üzerine etki eden kısıtların dahil edilmesine izin veren ELOG (Genişletilmiş LOG) algoritması önerilmiştir [9]. Gürcistan'da, Savannah akarsuyu üzerinde üç barajlı hidroelektrik baraj sistemine ELOG uygulanmıştır [10]. Gürcistan'da, Lanier-Allatoona - Carters sistemindeki hidro-güç planlaması için ELOG uygulanmış ve optimal planlanmasına ve türbin birimlerinin yüklenmesine dahil edilmiştir [11]. Baraj sistemleri için gerçek-zamanlı optimal kontrol modeline tam dinamik, düzensiz akış ötelemesine göre doğrusallaştırılmış St Venant denklemlerini açık bir şekilde dahil edilmiştir [12]. Tam dinamik, düzensiz bir akış öteleme modeli olan optimal kontrol teori algoritmasının başarıma çözümünün iteratif bir şekilde güncelleştirildiği durum denklemlerindeki öteleme katsayılarını kullanarak St Venant denklemlerine göre türevlerin hesaplanmasındaki zorluklardan kaçınılmıştır [13]. Kore'de Han Akarsuyu Havzası'nda optimal gerçek-zamanlı taşkın kontrol işletmeleri için öteleme katsayısı metodu uygulanmıştır [14]. Gerçek-zamanlı hidrolojik ve enerji amaçlı tahmin üretme modellerine ek olarak denetimsel kontrol ve veri kazanç sistemleri ile bağlantısı kullanılarak gerçek-zamanlı baraj kontrolü için karar verme sistemlerine optimizasyon modellerinin nasıl birleştirilebileceği gösterilmiştir [15].

Ardışık yaklaşıtmalı dinamik programlama (DPSA) optimizasyon tekniği bir akarsu üzerindeki bir seri hidroelektrik tesisin optimal boyutlandırma ve işletmesi çalışmasında kullanılmış olup [16] bu teknik Sakarya Havzası'nın enerji üretimini maksimize etmek için benzetim yöntemleri ile birlikte ele alınmıştır [17]. DPSA Korea'da, Han Havzası'nda, gerçek-zamanlı taşkın kontrol işletmeleri için uygulanmıştır [14]. DPSA, Lower Colorado Nehir Baraj Sistemi'nde saatlik optimal hidro-güç birimlerinin planlanmasına yardımcı

olması amacıyla uygulanmıştır [18]. DPSA ve artırımlı dinamik programlama (IDP) tekniklerinin çözüme yakınsama açısından ayrık dinamik programlama (DDP) ile bazı durumlarda eşdeğer olduğunu üzerine çalışmalara yapılmıştır [19]. Tek barajda ardışık olarak sabit bırakım politikalarıyla DPSA' yı stokastik duruma genişletme üzerine çalışılmıştır [20].

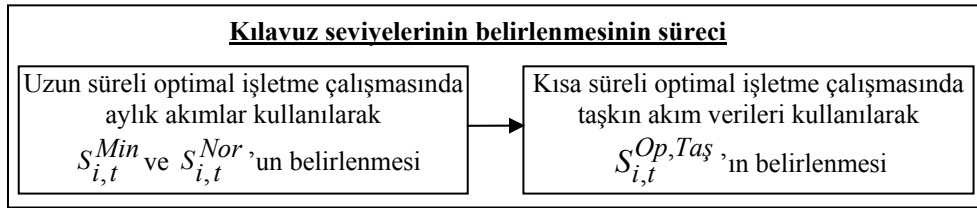
Barajlardan bırakılan akımların diğer baraja ötelenerek taşınması işleminde kinematik dalga yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, St. Venant denklemlerinde ivme ve basınç terimleri ihmal edildiğinden, dalga hareketi, süreklilik denklemi ile tanımlanmaktadır. Akarsu yatağındaki hidrografın tahmin edilmesi kinematik dalga yaklaşımı ile ilişkilendirilmiştir [21]. Yağış-akış arasındaki geçen süreç için kinematik dalga yaklaşımı kullanılmıştır [22, 23 ve 24]. Kinematik dalga yaklaşımını kullanarak akımın taşınması üzerine çalışılmıştır [25]. Kinematik dalga denklemleri kullanarak su yüzeyindeki dalga hareketinin ilerleyişinin tahmini üzerine araştırmalar yapılmıştır [26].

Bu çalışmada, çok amaçlı (taşkın kontrolü ve enerji üretimi gibi) ve çok barajlı bir su kaynakları sistemi tanımlanmıştır. Sistem üzerine enerji üretimi amaçlı uzun süreli optimal işletme modeli, taşkın kontrolü amaçlı kısa süreli optimal işletme modeli ve hem taşkın kontrolü ve hem de enerji üretimi amaçlı gerçek zamanlı optimal işletme modeli kurulmuştur. Kurulan modellerde optimizasyon tekniği olarak ardışık yaklaşımlı dinamik programlama kullanılmıştır. Bu teknik kullanılarak her bir durum değişkeni değeri teker teker değişken olarak alınıp geriye kalan diğer durum değişkeni değerleri sabit olarak atanmakta ve her bir durum için amaç fonksiyonu gerçekleştirilmeye çalışılmakta ve elde edilen en iyi çözümler saklanmakta, daha sonra bu en iyi çözümler arasından en iyisi seçilerek optimizasyon süreci sona erdirilmektedir. Uzun süreli optimal işletmede, iki aşamaya sahip amaç fonksiyonunun birinci aşamasında, güvenilir güç değeri maksimize edilip minimum işletme seviyeleri belirlenmekte ve ikinci aşamasında ise, toplam enerji maksimize edilip normal işletme seviyeleri hesaplanmaktadır. Kısa süreli optimal işletmede, üç aşamaya sahip amaç fonksiyonunda barajdan bırakılan akımlar mansapta taşkın emniyeti debi kısıdına ve ilave taşkın kontrol hacmine bağlı olarak minimize edilip optimal taşkın kontrol seviyeleri belirlenmektedir. Uzun ve kısa süreli optimal işletme modelleri ile elde edilen bu optimal seviyeler, gerçek zamanlı optimal işletme modelinde kılavuz seviyeler olarak kullanılacaktır. Gerçek zamanlı işletme optimizasyonunda, amaç fonksiyonu olası taşkın durumunda hem taşkından oluşabilecek zararları en aza indirmek hem de optimal enerji üretimini sağlamak üzerinedir. Gerçek zamanlı optimal işletme sürecinde, havzadan gelen akımlardan tahmini akımların türetilmesi, başlangıç ve diğer işletme seviyelerinin belirlenmesi, bu işletme seviyelerinin ve türetilen tahmini akımlar kullanılarak enerji üretim ve taşkın kontrol amaçlı optimal bırakım değerlerinin elde edilmesi, buradan maksimum enerji üretimi değerini veren optimal bırakım değeri seçilerek bir sonraki zaman diliminde işletme seviyelerinin hesaplanması ve barajlardan bırakılan akımın diğer baraj aksına akarsu yatağında ötelenerek taşınması için kinematik dalga yaklaşımının kullanılması yer almaktadır. Kurulan modeller, Ceyhan Havzası'nda Ceyhan Nehri ana kolu üzerinde bulunan çok barajlı bir su kaynakları sistemine uygulanmıştır. Bu su kaynakları sisteminde bulunan barajlardan, Menzelet ve Kılavuzlu Barajları, sulama ve enerji üretimi amaçlı; Sır ve Berke Barajları enerji üretimi amaçlı; Aslantaş barajı ise sulama, enerji üretimi ve taşkından koruma olarak planlanmışlardır.



### 3. GERÇEK ZAMANLI OPTİMAL İŞLETME İÇİN KILAVUZ SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

Enerji üretimi ve taşkın kontrolü amaçlı gerçek zamanlı optimal işletme modelinde kullanılacak kılavuz seviyeleri, uzun süreli optimal işletme neticesinde elde edilen normal ve minimum işletme seviyeleri ile kısa süreli optimal işletme neticesinde elde edilen optimal taşkın kontrol seviyeleri şeklindedir. Şekil 2' de, gerçek zamanlı optimal işletme için kılavuz seviyelerin belirlenmesinin süreci gösterilmektedir.



Şekil 2. Gerçek zamanlı optimal işletme için kılavuz seviyelerinin belirlenmesinin süreci

Bu seviyelerden aylık normal ve minimum işletme seviyeleri, uzun süreli optimal işletme sonucu elde edilebilmektedir. Uzun süreli optimal işletmede, amaç fonksiyonu iki aşamalı olup, birinci aşamasında, aylık kuraklık akımları kullanılarak güvenilir güç maksimize edilmekte ve aylık minimum işletme seviyeleri ( $S_{i,t}^{Min}$ ) elde edilmektedir. Amaç fonksiyonu,

$$Maks(\text{Min} \sum_{i=1}^M P_{i,t}) \quad (3)$$

şeklindedir. Buradan sistemin  $t$ -zamanı için elde edilen toplam güç değerleri arasında minimum olanı, maksimize edilen güvenilir güç değeri olarak atanmaktadır. Amaç fonksiyonun ikinci aşamasında ise, maksimize edilen güvenilir güç, aynı modelde kısıt olarak kullanılıp, aylık ortalama akımlar ile toplam enerji maksimize edilmekte ve aylık normal işletme seviyeleri ( $S_{i,t}^{Nor}$ ) belirlenmektedir. Amaç fonksiyonu olarak

$$Maks \sum_{t=1}^{KM} \left[ \sum_{i=1}^M (P_{i,t} - P_G) \cdot p_S + P_G \cdot p_G \right] \quad (4)$$

kullanılmaktadır. Burada,  $P_G$ : Sistemin maksimize edilen güvenilir gücünü,  $p_G$ : Güvenilir enerji birim fiyatını ve  $p_S$ : Sekonder enerji birim fiyatını göstermektedir. Yapısal denklemler olarak her bir baraj ve dönem için su dengesi ilişkisi, Denklem 1' de

### Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme

ifade edilmektedir. Sistemdeki kısıtlar ise, sisteme ait her bir barajdaki depolanan su miktarı

$$S_i^{Min} \leq S_{i,t} \leq S_i^{Maks} \quad (5)$$

arasında olmakta ve burada,  $S_i^{Min}$  : Barajda depolanan minimum su miktarını,  $S_i^{Maks}$  : Barajda depolanan maksimum su miktarını göstermektedir. Barajdan bırakılacak akımlar enerji üretim kapasitesine ve dolu savak kapasitesine bağlı olarak sınırlanabilir. Buna göre, barajdan bırakılan akımlar,

$$0 \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{Maks} \quad (6)$$

$$0 \leq R_{i,t} \leq R_i^{Maks} \quad (7)$$

olmaktadır. Burada,  $Q_i^{Maks}$  : Barajdan enerji üretimi için bırakılabilecek maksimum su miktarını,  $R_i^{Maks}$  : Barajdaki dolu savaktan bırakılabilecek maksimum su miktarını göstermektedir.

Her bir barajda enerji üretimi için bırakılan akımdan elde edilen güç hidroelektrik santral kurulu gücünü aşmaması gerekmektedir. Yani,  $t$ -zamanda barajdan elde edilen ortalama güç,

$$P_{i,t} = k_i \cdot Q_{i,t} \cdot h_{i,t} \quad (8)$$

olup, bu değer

$$P_{i,t} \leq P_{k_i} \quad (9)$$

olmalıdır. Burada,  $P_{k_i}$  : Baraj için kurulu güç,  $k_i$  : Enerji üretim katsayısı ve  $h_{i,t}$  : Barajda ortalama net düşüdüdür. Barajlardaki ortalama su yüksekliği,

$$h_{i,t}^* = h \left( \frac{S_{i,t} + S_{i,t+1}}{2} \right) \quad (10)$$

şeklinde (ortalama depolanmış su miktarının bir fonksiyonu olarak) elde edilmektedir. Cebri boru veya taşıma tünelineki sürtünme kayıpları dikkate alındığında,

$$h_{i,t} = h_{i,t}^* - (h_f)_{i,t} \quad (11)$$

$$h_{i,t} = h_{i,t}^* - dk_i \cdot Q_{i,t}^2 \cdot l_i \quad (12)$$

yazılmaktadır. Burada,  $h_{i,t}^*$ : Tüneldeki sürtünme kaybı düşünülmeden önce barajdaki ortalama su yüksekliği,  $(h_f)_{i,t}$ : Barajda sürtünmeden dolayı yük kaybı,  $dk_i$ : Barajdaki tünel çapına ve sürtünme özelliklerine bağlı bir katsayı ve  $l_i$ : Barajda taşıma tüneli uzunluğu olarak tanımlanmaktadır. Burada, barajdaki  $h_{i,t}$  yüksekliğine karşılık gelen depolama yüzey alanı belirlenip, bu değer  $t$ -zamandaki buharlaşma yüksekliği ile çarpılarak buharlaşma miktarı belirlenmektedir.

Kılavuz seviyelerinden optimal taşkın kontrol seviyesi, kısa süreli optimal işletme sonucu belirlenmektedir. Barajlara havzasından gelen taşkın hidrografi akım verileri ile, mansapta taşkın emniyeti debi kısıdı ve ilave taşkın kontrol hacmi kullanılması durumuna göre barajdan bırakılan akımlar minimize edilmeye çalışılmaktadır. Kullanılan ilave taşkın kontrol hacimleri, işletme sonucu elde edilen işletme seviyelerinden düşülerek taşkın kontrol seviyeleri ( $S_{i,t,f}^{Taş}$ ) belirlenmektedir. Herhangi bir baraj için elde edilen bu taşkın kontrol seviyelerinden minimum olanı optimal taşkın kontrol seviyesi ( $S_{i,t}^{Op,Taş}$ ) olarak seçilmektedir. Amaç fonksiyonu,

$$Min[Maks(Q_{i,t,f} + R_{i,t,f})] \quad (13)$$

şeklinde olup üç aşamaya sahiptir. Amaç fonksiyonun birinci aşamasında havzadan gelen akımlar normal işletme seviyeleri ile karşılanmakta ve barajlardan bırakılan akımlar minimize edilmeye çalışılırken, mansaptaki taşkın emniyeti debi kısıdının aşılmaması gerekmektedir. Bu aşamada çözüm gerçekleşmiyorsa, ikinci aşamaya geçilmektedir. İkinci aşamada, ilave taşkın kontrol hacmi kullanılarak barajlardan bırakılan akımlar minimize edilmeye çalışılmakta ve mansaptaki debi kısıdının aşılmaması gerekmektedir. Bu çözüm de gerçekleşmiyorsa, üçüncü aşamaya geçilmektedir. Üçüncü aşamada, ilave taşkın kontrol hacmi kullanılarak barajlardan bırakılan akımlar minimize edilmeye çalışılmakta ve mansaptaki debi kısıdı serbest bırakılarak işletme yapılmaktadır.

Yapısal denklemler, her bir  $i$ -barajında  $t$ -ayı  $f$ -saati için yazılabilecek su dengesi ilişkisi, Denklem 2'de verildiği gibidir. Kullanılacak kısıtlar, kapasite kısıtları olarak karşımıza çıkmaktadır. Amaç fonksiyonun birinci aşamasında, oluşan taşkın kontrol seviyeleri

$$S_i^{Min} \leq S_{i,t,f}^{Taş} \leq S_i^{Maks} \quad (14)$$

arasında olmalıdır.  $S_{i,t,f}^{Taş}$  değerlerinden en küçük olanı, söz konusu ay için optimal taşkın kontrol seviyesi ( $S_{i,t}^{Op,Taş}$ ) olarak alınmaktadır. Amaç fonksiyonunun ikinci ve üçüncü

### Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme

aşamasında, ilave taşkın kontrol hacmi kullanıldığında maksimum işletme seviyesi yerine her bir baraj için, artırılmış maksimum işletme seviyesi tanımlanmaktadır. Buna göre artırılmış maksimum işletme seviyesi,

$$S_i^{Maks*} = S_i^{Maks} + (S_{i,t}^{Nor} - S_i^{Min}) \quad (15)$$

şeklindedir. Burada, işletme seviyeleri,

$$S_i^{Min} \leq S_{i,t,f}^G \leq S_i^{Maks*} \quad (16)$$

arasında oluşacaktır. Bu şekilde elde edilen işletme seviyelerinden ( $S_{i,t,f}^G$ ) ilave taşkın kontrol hacimleri ( $S_{i,t}^{Nor} - S_i^{Min}$ ) düşülerek taşkın kontrol seviyeleri ( $S_{i,t,f}^{Taş}$ ) bulunmaktadır. Buna göre, taşkın kontrol seviyeleri,

$$S_{i,t,f}^{Taş} = S_{i,t,f}^G - (S_{i,t}^{Nor} - S_i^{Min}) \quad (17)$$

şeklinde elde edilmektedir.  $S_{i,t,f}^{Taş}$  değerlerinden minimum olanı, söz konusu ay için optimal taşkın kontrol seviyesi ( $S_{i,t}^{Op,Taş}$ ) olarak alınmaktadır.

Barajlardan bırakılan akımların mansaptaki taşkın emniyeti debi kısıdını aşmaması gerekmektedir. Yani, bu kısıt,

$$(Q_{i,t,f} + R_{i,t,f}) \leq W_i^{Maks} \quad (18)$$

şeklindedir. Burada,  $W_i^{Maks}$ : Barajdan akarsu yatağına bırakılabilecek taşkın kontrolü için maksimum su miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu kısıdın serbest bırakılması durumunda, oluşan yeni kısıt

$$W_i^{Maks*} = \text{Min}[Maks(Q_{i,t,f} + R_{i,t,f})] \quad (19)$$

şeklinde belirlenmelidir. Buna göre, taşkın emniyeti için bırakılacak debi kısıdı,

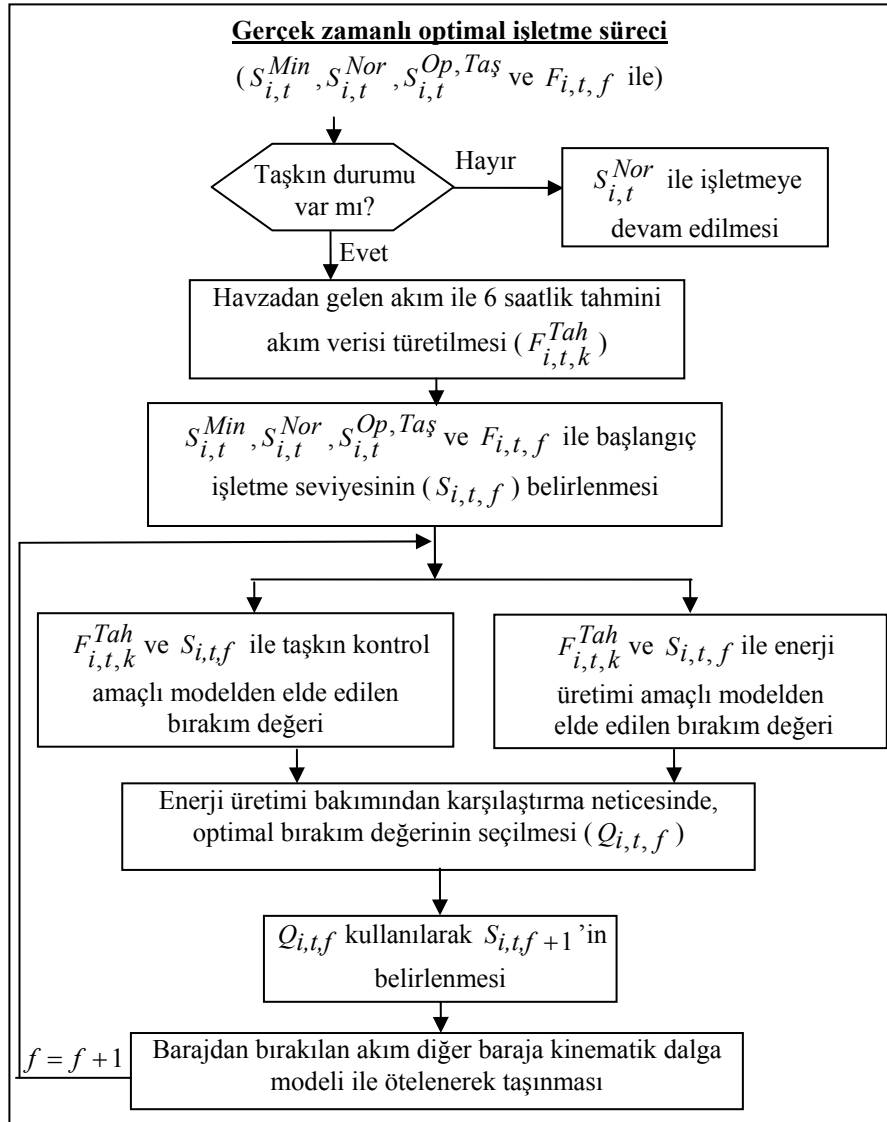
$$(Q_{i,t,f} + R_{i,t,f}) \leq W_i^{Maks*} \quad (20)$$

ile tanımlanmaktadır.



#### 4. GERÇEK ZAMANLI OPTİMAL İŞLETME MODELİ

Gerçek zamanlı optimal işletme için optimizasyon modeli, taşkın kontrolü ve enerji üretimi amaçlı olarak düzenlenmiştir. Gerçek zamanlı optimal işletme optimizasyonu, uzun ve kısa süreli planlama için işletme optimizasyonlarına, havzadan gelebilecek akımın tahmin edilmesine, barajlardan bırakılan akımların diğer barajlara taşınmasına bağlı olarak yapılmaktadır. Şekil 3' de, gerçek zamanlı optimal işletme süreci gösterilmektedir.



Şekil 3. Gerçek zamanlı optimal işletme süreci

## Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme

Gerçek zamanlı optimal işletme optimizasyonuna girilen veriler:

1. Aylık normal işletme seviyeleri ( $S_{i,t}^{Nor}$ ) ve aylık minimum işletme seviyeleri ( $S_{i,t}^{Min}$ )
2. Optimal taşkın kontrol seviyeleri ( $S_{i,t}^{Op,Taş}$ )
3. Barajlara havzasından gelebileceği öngörülen taşkın verilerinin bulunduğu akım hidrografları ( $F_{i,t,f}$ )
4. Barajlar arası için akım öteleme verileri ve denklemleri

şeklinde verilmektedir. Bu veriler kullanılarak, gerçek zamanlı optimal işletme için süreç, aşağıdaki verildiği gibi gerçekleştirilmektedir:

### 1. Taşkın oluşma ihtimalinin belirlenmesi:

Barajlara havzasından gelebilecek akımların taşkın ihtimali oluşturma durumu, havzadan gelen akım verileri ile tasarım amaçlı taşkın hidrografının verileri ilişkilendirilerek seviye düzeltme faktörü elde edilmektedir. Seviye düzeltme faktörünün taşkın oluşması durumu için öngörülen değeri aşması üzerine, gerçek zamanlı optimal işletmeye geçilmesine karar verilmektedir. Taşkın ihtimali oluşmaması durumunda normal işletme seviyelerinde işletmeye devam edilmektedir.

### 2. Havzadan gelen akım verilerinden tahmini akımların türetilmesi:

Havzadan gelen akım verilerinden tahmini akımlar türetilmesi için, her bir akım değeri için doğrusal bir ilişki geliştirilerek 6 adet saatlik tahmini akım verisi ( $F_{i,t,k}^{Tah}$ ) türetilmektedir. Burada,  $k = 1,2,..6$  saat olarak zamanı göstermektedir.

### 3. Taşkın durumu için başlangıç işletme seviyesinin belirlenmesi:

Her bir baraj için türetilen tahmini akım verisinin ilk değeri, barajlara havzadan gelen akım verilerinin ilk değeri ile ilişkilendirilerek, ( $k = 1$ . saat için)

$$\alpha_{i,t}^{Ger} = \frac{F_{i,t,1}^{Tah}}{F_{i,t,1}} \quad (21)$$

gerçek seviye düzeltme katsayısı bulunmaktadır. Daha sonra, türetilen diğer tahmini akım verileri ile,

$$\alpha_{i,t,k}^{Tah} = \frac{F_{i,t,k}^{Tah}}{F_{i,t,f}}, (k = 2,3,..,6 \text{ saat}) \quad (22)$$

tahmini seviye düzeltme katsayıları elde edilmektedir. Buradan, tahmini seviye düzeltme katsayılarının aritmetik ortalaması alınarak, ortalama tahmini seviye düzeltme katsayısı aşağıda gibi bulunmaktadır.

$$\alpha_{i,t}^{Tah,Ort} = \frac{\sum_{k=1}^5 \alpha_{i,t,k}^{Tah}}{5} \quad (23)$$

Daha sonra, gerçek seviye düzeltme katsayısı ile ortalama tahmini seviye düzeltme katsayısının aritmetik ortalaması alınarak,

$$\alpha_{i,t}^d = \frac{\alpha_{i,t}^{Ger} + \alpha_{i,t}^{Tah,Ort}}{2} \quad (24)$$

seviye düzeltme faktörü bulunmaktadır. Aylık normal işletme seviyesi ( $S_{i,t}^{Nor}$ ) ile optimal taşkın kontrol seviyesi ( $S_{i,t}^{Op,Taş}$ ) arasındaki fark belirlendikten sonra, bu farkın değeri ile seviye düzeltme faktörü çarpılarak, başlangıç için

$$S_{i,t}^d = (S_{i,t}^{Nor} - S_{i,t}^{Op,Taş}) \cdot \alpha_{i,t}^d \quad (25)$$

seviye düzeltme miktarı bulunmaktadır. Elde edilen seviye düzeltme miktarı ( $S_{i,t}^d$ ), aylık normal işletme seviyesinden düşülerek, başlangıç ( $f = 1$ . saat) işletme seviyesi

$$S_{i,t,1} = S_{i,t}^{Nor} - S_{i,t}^d \quad (26)$$

şeklinde elde edilmektedir. Başlangıç işletme seviyesi her bir baraj için elde edildikten sonra, diğer işletme seviyelerini belirlemek için takip edilecek süreç, aşağıda gibi devam etmektedir.

#### 4. Optimal bırakım değerlerinin belirlenmesi:

İşletme seviyesi ( $S_{i,t,f}$ ) ve türetilen tahmini akım değerleri ( $F_{i,t,k}^{Tah}$ ), hem taşkın kontrol hem de enerji üretimi amaçlı kısa süreli işletme optimizasyonu modellerinde kullanılarak elde edilen optimal bırakım değerlerinin belirlenmektedir.

#### 5. Bırakım değerlerinin karşılaştırılması ve optimal bırakım değerinin belirlenmesi:

Elde edilen bırakım değerlerinin enerji üretimi bakımından karşılaştırılmakta ve maksimum enerji üretimi veren optimal bırakım değeri ( $Q_{i,t,f}$ ) olarak seçilmektedir.

**6. İşletme seviyesinin belirlenmesi:**

Seçilen optimal bırakım değeri ( $Q_{i,t,f}$ ) ile işletme seviyesi ( $S_{i,t,f}$ ) kullanılarak bir sonraki zaman dilimi için işletme seviyesi ( $S_{i,t,f+1}$ ) belirlenmektedir. Bunun için ilk olarak dolu savaktan bırakılan akım miktarı,

$$R_{i,t,f} = 0 \quad (27)$$

olarak ele alınmakta ve bir sonraki zaman dilimi için işletme seviyesi,

$$S_{i,t,f+1} = S_{i,t,f} + F_{i,t,f} - Q_{i,t,f} \quad (28)$$

elde edilmektedir. Elde edilen işletme seviyesi, maksimum işletme seviyesinden büyükse, sırasıyla, dolu savaktan bırakılacak akım miktarı ve işletme seviyesi,

$$R_{i,t,f} = S_{i,t,f+1} - S_i^{Maks} \quad (29)$$

$$S_{i,t,f+1} = S_i^{Maks} \quad (30)$$

şeklinde yeniden belirlenmektedir.

**7. Havzadan gelen akımların üzerine ötelenen akımların ilave edilmesi:**

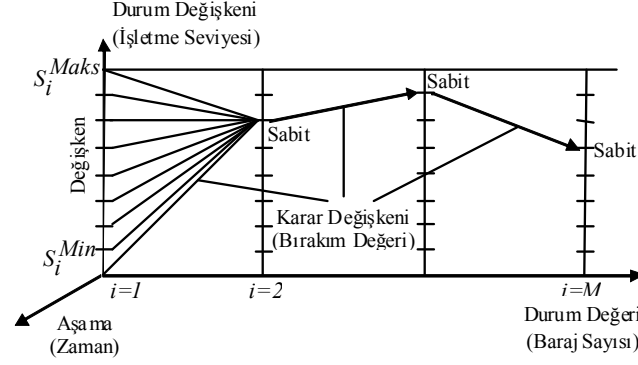
Seçilen optimal bırakım değeri, diğer baraja akarsu yatağında kinematik dalga modeli ile ötelenerek taşınmakta ve diğer barajda havzadan gelen akım değerleri üzerine ilave edilmektedir.

**8. Bir sonraki zaman dilimine geçilerek süreç sona erene kadar devam edilmesi:**

Bir sonraki zaman adımına geçilerek 6 saatlik akım tahmini yapılmakta ve yukarıda verilen 4.maddeden itibaren işletme süreci, işletme zamanı sona erene kadar devam ettirilmektedir.

**5. ARDIŞIK YAKLAŞTIRMALI DİNAMİK PROGRAMLAMA (DPSA)**

Ardışık yaklaşırmalı dinamik programlama optimizasyon tekniği kullanmanın amacı, çok karar değişkenli bir dinamik programlama (DP) problemini, her birinde tek bir karar değişkeni olan DP ait problemlere ayırtırmak ve böylece karar değişkenlerini teker teker ele alarak ana problemi çözmektir.



Şekil 4. Ardışık yaklaşırmalı dinamik programlama (DPSA)'da herhangi bir aşamasındaki durum değeri ve durum-karar değişkeninin şematik gösterimi

Şekil 4'de, DPSA' da herhangi bir aşamasındaki durum değeri ve durum-karar değişkeninin şematik gösterimi gösterilmiştir. Burada, ilk önce bir başlangıç çözümü (işletme politikası) belirlenerek durum ve karar değişkenleri için olurlu olan ilk değerler saptanır. Daha sonra durum değerine ait durum değişkenlerinden bir tanesi seçilerek, diğer durum değerlerindeki durum değişkenlerinin öngörülen aşamadaki değerleri sabit tutulup tek durum değişkenli bir dinamik programlama problemi çözülmektedir. Böylece, bu problemin çözümü, karar değişkenlerinin ve seçilmiş olan durum değişkeninin değerlerini değiştirecek ve başlangıç çözümüne göre amaç fonksiyonunun değerinin arttığı yeni bir çözüm vermektedir. Daha sonra, bir başka durum değişkeni seçilerek yukarıdaki yöntem tekrarlanacaktır. Her durum değeri en az bir kere ele alınmaktadır. Herhangi bir durum değeri ele alındığında çözümlerde seçilen durum ve karar değişkenlerinde bir değişme olmayana kadar bu işlemlere devam edilmekte ve bu şart sağlandığında da durularak diğer durum değerine geçilmektedir. Metodun adı da en iyi çözüme adım adım ve her adımda amaç fonksiyonunun değerinin arttırılarak yaklaşılmasından gelmektedir.

Bu metodun avantajı, n-boyutlu bir dinamik programlama problemini bir dizi tek boyutlu probleme indirgeyerek, hem hesaplama zamanını hem de bilgisayar bellek gereksinimlerini azaltmaktır. Çok barajlı ve çok amaçlı baraj işletmesinde uygulanan DP yöntemlerinin kullanıldığı bilgisayar belleği ve zamanı n-ye bağlı olarak üssel y-doğrusal bir artış göstermektedir. En iyi çözümün bulunabilmesi için başlangıç çözümünün dikkatli seçilmesi ve birden fazla başlangıç çözümü denenerek sonuçların karşılaştırılması gerekebilir.

DP' da üç değişken tipi vardır. Bunlar:

1. Sistemin davranışını olduğu gibi tanımlayan ve sistemin herhangi bir andaki durumunu gösteren durum değişkenleri, (Sistemde barajın işletme seviyesidir.)
2. Seçilen bir amaca göre sistemin kontrol edilebilir girdileri hakkında karar vermeyi sağlayan karar değişkenleri, (Sistemde barajdan enerji üretimi için bırakılan ve dolu savaktan savaklanan su miktarlarıdır.)

3. Bu kararların verildikleri aralıkları belirleyen aşama değişkenleri, (Sistemde saat veya ay olarak işletme zamanını göstermektedir.)

şeklinde dir. Bu girdilerin bazı kısıtlara bağlı olarak aldıkları değer takımına politika denmektedir. Bu politikanın sistemin çıktıları üzerine etkisini belirleyen ölçüt ise, amaç fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

## 6. GERÇEK ZAMANLI VE KISA SÜRELİ OPTİMAL İŞLETMEDE KİNEMATİK DALGA YAKLAŞIMININ KULLANILIŞI

Gerçek zamanlı ve kısa süreli optimal işletme sürecinde, barajlardan bırakılan akımlar, bir hidrograf şeklinde bırakılmaktadır. Hidrografın maksimum değeri, dolu savak ve enerji üretimi için bırakılabilecek maksimum toplam su miktarı  $(Q_i^{Maks} + R_i^{Maks})$  değerini aşamaz. Barajdan bırakılan akımın hidrografının maksimum değeri, akarsu yatağında ötelenerek diğer barajın aksına farklı bir değerde ulaşmaktadır. Bu ulaşma değerini ve ulaşma zamanını belirlemek için kinematik dalga yaklaşımı kullanılmıştır. Kinematik dalga yaklaşımında, St. Venant denklemlerinde ivme ve basınç terimleri ihmal edildiğinden, barajlardan bırakılan akımların oluşturduğu dalga hareketi, süreklilik denklemi ile tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım kullanılarak barajlardan bırakılan akımların diğer baraja ulaşma değerini ve ulaşma zamanını gösteren eğriler oluşturulmuştur. Bu eğriler kullanılarak ulaşma değeri ve ulaşma zamanı denklemleri elde edilmiştir. Bu denklem ile barajdan bırakılan akımların diğer baraja ulaşma değeri ve ulaşma zamanı belirlenmekte ve barajın havzasından gelen akımlar üzerine ulaşma zamanı gözetilerek ilave edilmektedir.

Kinematik dalga yaklaşımı için kurulan matematiksel modelde,  $ii = 1,2,3,..(M - 1)$  olarak barajlar arası numara olarak gösterildiğinde,  $(Q + R)_{ii}^B$ : Barajdan akarsu yatağına bırakılan akım miktarı;  $T_{ii}^{Öngr}$ : Akarsudaki akım miktarı için öngörülen ulaşma zamanı,  $F_{ii}^{Ort}$ : Akarsu yatağındaki ortalama akım miktarı,  $F_{i,t,f}$ : Barajının havzasından gelen akım miktarı,  $L_{ii}$ : Akarsu yatağının uzunluğu,  $J_{ii}^0$ : Akarsu yatağının eğimi,  $n_{ii}$ : Akarsu yatağındaki tabandaki sürtünme katsayısı,  $b_{ii}, h_{ii}$ : Akarsu yatağındaki ortalama kesit özellikleri (dikdörtgen kesitli),  $P_{ii}$ : Akarsudaki ortalama kesit özelliklerine göre ıslak çevre, ve  $\beta_{ii}$ : Kinematik dalga yaklaşımı için akım parametresi gibi veriler modele girilmektedir.

Barajdan bırakılan akımların akarsu yatağında ötelenerek taşınması ve diğer barajda havzadan gelen akım üzerine ilave edilmesi süreci aşağıda verilmektedir.

1. Belirli bir zaman aralığı  $(\Delta t_{(Q + R)_{ii}^B})$  ve konum aralığı  $(\Delta x_{ii})$  seçilmektedir.
2. Kinematik dalga yaklaşımında  $\alpha_{ii}$  akım parametresi bulunmaktadır. Burada, bu akım parametresi,

$$\alpha_{ii} = \left( \frac{n_{ii} \cdot P_{ii}^{2/3}}{(J_{ii}^o)^{1/2}} \right)^{\beta_{ii}} \quad (31)$$

elde edilmektedir.

3. Bu  $\alpha_{ii}$  ve  $\beta_{ii}$  akım parametreleri kullanılarak, dalga hızı hesaplanmaktadır. Dalga hızı,

$$c_{k_{ii}} = \left( \frac{1}{\alpha_{ii} \cdot \beta_{ii} \cdot (Q + R)_{ii}^B} \right)^{\beta_{ii} - 1} \quad (32)$$

şeklinde bulunmaktadır.

4. Dalga hızı, konum aralığına bölünerek, dalganın seyahat zamanı,  $\Delta t_{c_{k_{ii}}}$  belirlenmektedir. Yani,  $\Delta x_{ii}$  aralığındaki dalganın seyahat zamanı,

$$\Delta t_{c_{k_{ii}}} = \Delta x_{ii} / c_{k_{ii}} \quad (33)$$

hesaplanmaktadır.

5. Başlangıçta öngörülen zaman aralığı ( $\Delta t_{(Q+R)_{ii}^B}$ ) ile dalganın seyahat zamanı ( $\Delta t_{c_{k_{ii}}}$ ) karşılaştırılmakta ve küçük olan zaman değeri seçilmektedir. Seçilen zaman aralığı ( $\Delta t_{ii}$ ) ile gösterilmektedir.

6. Akarsu uzunluğu ( $L_{ii}$ ),  $\Delta x_{ii}$ 'e ve akım miktarı için öngörülen zaman ( $T_{ii}^{\text{Öngr}}$ ),  $\Delta t_{ii}$ 'ye bölünerek aralık sayıları elde edilmektedir. Yani, sırasıyla, zaman aralık sayısı ( $M_{t_{ii}}$ ) ve konum aralık sayısı ( $N_{x_{ii}}$ ),

$$M_{t_{ii}} = T_{ii}^{\text{Öngr}} / \Delta t_{ii} \quad (34)$$

$$N_x = L_{ii} / (\Delta x_{ii} + 1) \quad (35)$$

şeklinde elde edilmektedir.

7. Her bir zaman ve konumdaki düğüm noktalarındaki akım değerleri aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$(Q+R)_{ii+1}^{B,j+1} = \frac{\left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q+R)_{ii}^{B,j+1} + \alpha_{ii} \beta_{ii} (Q+R)_{ii+1}^{B,j} \left( \frac{(Q+R)_{ii+1}^{B,j} + (Q+R)_{ii}^{B,j+1}}{2} \right)^{\beta_{ii}-1} \right]}{\left[ \frac{\Delta t_{ii}}{\Delta x_{ii}} + \alpha_{ii} \beta_{ii} \left( \frac{(Q+R)_{ii+1}^{B,j} + (Q+R)_{ii}^{B,j+1}}{2} \right)^{\beta_{ii}-1} \right]} \quad (36)$$

8. Bu işlemler, her bir bırakılan akım değeri için yapılarak, diğer baraja ulaşma değeri  $(Q+R)_{ii}^{B,Ulaş}$  ve ulaşma zamanı  $(T_{ii}^{Ulaş})$ , öngörülen zaman  $(T_{ii}^{Öngr})$  için elde edilen sonuçlar incelenerek belirlenmektedir. Barajdan bırakılan değerler maksimum olarak bırakılan akım miktarını (dolu savak kapasitesi+enerji üretim kapasitesi) geçmeyecek şekilde bırakılmaktadır.

9. Bu belirlenen değerler kullanılarak, barajlar arasında, bırakılan akım için ulaşma zamanı ve ulaşma değeri eğrileri ve denklemleri elde edilmektedir.

10. Bu eğriler veya denklemler kullanılarak, herhangi bir bırakım değerinin diğer baraja ulaşma zamanı ve ulaşma değeri kolaylıkla belirlenebilmektedir.

11. Bu şekilde diğer baraja ulaşan akımlar, burada baraj havzasından gelen akımlar üzerine ilave edilmektedir. Burada, diğer barajda havzadan gelen akım,

$$F_{i,t,f} = F_{i,t,f} + (Q+R)_{ii}^{B,Ulaş} \quad (37)$$

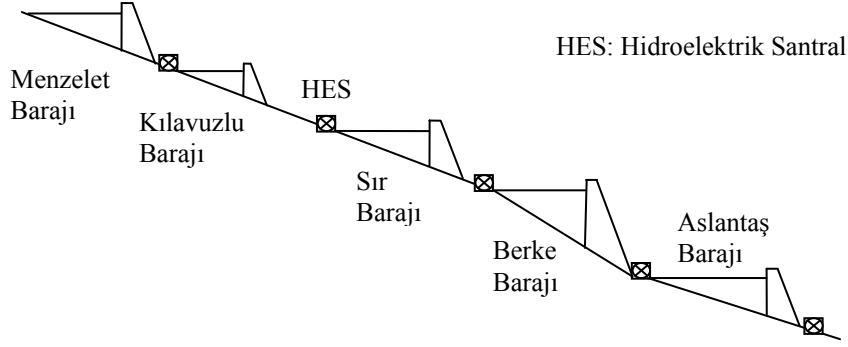
şeklinde dinamik olarak değişmektedir.

## 7. OPTİMİZASYON MODELLERİ İÇİN UYGULAMA

Ceyhan havzasında Ceyhan nehri ana kolu üzerinde ardışık şekilde bulunan çok barajlı bir su kaynakları sistemi uygulama amaçlı olarak seçilmiştir. Şekil 5'te, seçilen çok barajlı bir su kaynakları sisteminin şematik görünüşü verilmektedir. Bu sisteme ait barajlardan Menzelet ve Kılavuzlu Barajları, enerji ve sulama amaçlı; Sır ve Berke Barajları enerji amaçlı; Aslantaş Barajı ise enerji, sulama ve taşkından koruma amaçlı olarak planlanmışlardır. Tablo 1' de bu barajlara ait teknik özellikler verilmiştir. Tablo 2' de, barajlardaki hacim yükseklik ilişkileri verilmiştir. Burada,  $h$ : Su yüksekliğini ve  $S$ : Depolanan su hacmini göstermektedir. Tablo 3' de, kinematik dalga yaklaşımında kullanılmak üzere barajlar arası akarsu kesitinin ve yatağının özellikleri verilmiştir. Burada,  $L$ : Barajlar arası akarsuyun uzunluğunu,  $H$ : Barajlar arası kot farkını,  $J_o$ : Akarsudaki hidrolik eğimi,  $n$ : Tabandaki Manning sürtünme katsayısını,  $b$  ve  $h$ : Kesit büyüklüğü parametrelerini,  $A$ : Kesit alanını,  $P$ : Islak çevreyi,  $R$ : Hidrolik yarıçapı ve  $F^{Ort}$ : Ortalama debiyi ifade etmektedir. Şekil 6' da barajlara kritik dönemde havzasından gelen aylık kuraklık akımlar; Şekil 7' de barajlara havzasından gelen aylık ortalama akımlar ve



Şekil 8’ de barajlara taşkın olması beklenen Şubat ayında havzasından gelen akımlar gösterilmektedir.



Şekil 5. Ceyhan Havzası'nda Ceyhan Nehri ana kolu üzerinde bulunan çok amaçlı ve çok barajlı bir su kaynakları sisteminin şematik görünüşü

Tablo 1. Barajlara ait teknik özellikler

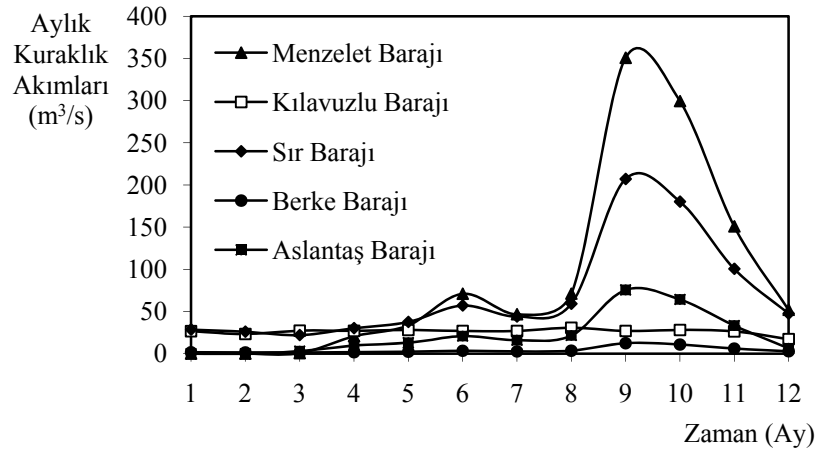
Barajlar	Menzelet	Kılavuzlu	Sır	Berke	Aslantaş
Yağış Alanı (km <sup>2</sup> )	8340	8486	12950	13222	14874
Kurulu Güç (MW)	124	54	273	510	138
Baraj Yüksekliği (m)	150.5	56	120	201	95
Maksimum İşletme Seviyesi (m)	609.4	485.5	440	345	159
Minimum işletme seviyesi (m)	560.2	483.5	418.8	288.8	130
Maksimum Hacim (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1950	74	1117.94	427	1990
Minimum Hacim (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	533.6	69	451.3	119	530
Kuyruksuyu kotu (m)	485.5	440	345	159	84
Dolu Savak Kapasitesi (m <sup>3</sup> /s)	6112	6112	7460	2000	10700
Enerji Üretimi Kapasitesi (m <sup>3</sup> /s)	130.8	148.4	114.25	300	270

Tablo 2. Barajlarda hacim yükseklik ilişkisi ( $h=a.S^b$ ,  $h$  (m),  $S$  (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>))

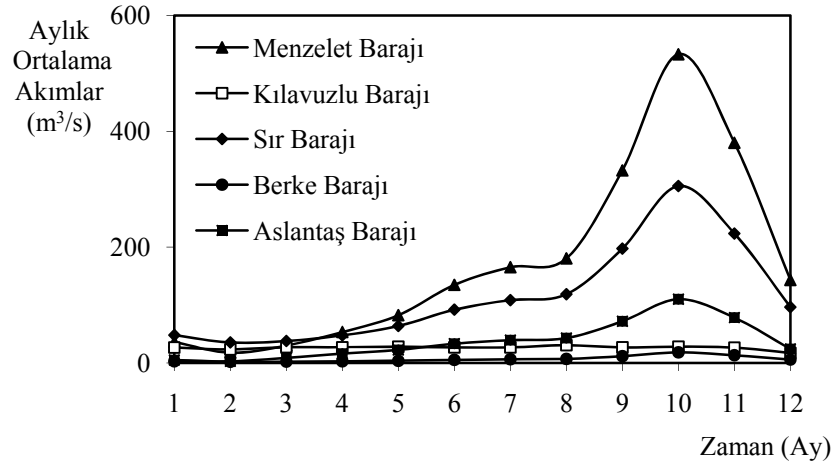
Barajlar	Menzelet	Kılavuzlu	Sır	Berke	Aslantaş
a	15.494	9.4261	28.264	42.036	3.8336
b	0.2998	0.4092	0.2067	0.2581	0.3947

Tablo 3. Barajlar arası akarsu kesitinin ve yatağının özellikleri

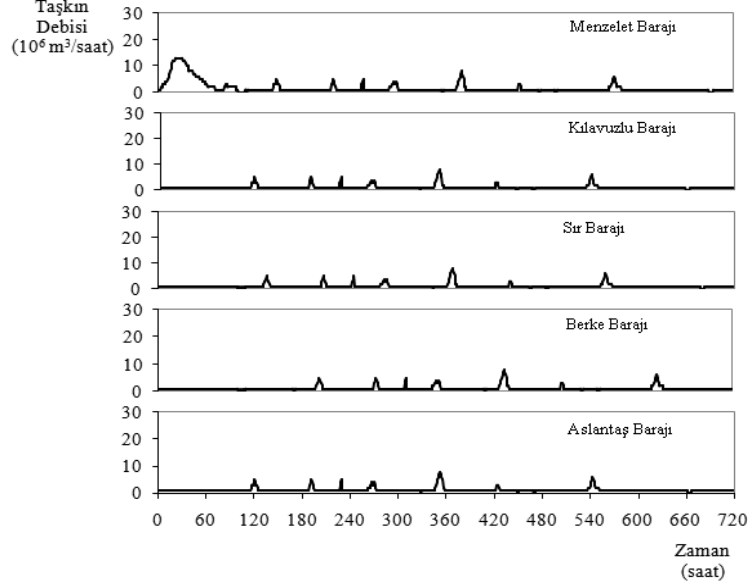
Barajlar arası	L (m)	H (m)	S	n	h (m)	b (m)	A (m <sup>2</sup> )	P (m)	R (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Menz.-Kılavuzlu	6820	123.9	0.0182	0.025	1.5	30	45	33	1.36	298
Kılavuzlu-Sır	35610	45.5	0.0013	0.025	2.5	48	120	53	2.26	295
Sır-Berke	4340	95	0.0219	0.025	1.4	30	42	32.8	1.28	293
Berke-Aslantaş	45610	186	0.0041	0.025	2	40	80	44	1.82	304



Şekil 6 Barajlara kritik dönemde havzasından gelen aylık kuraklık akımlar [5]



Şekil 7. Barajlara havzasından gelen aylık ortalama akımlar [5]



Şekil 8. Barajlara taşkın olması beklenen Şubat ayında havzasından gelen akımlar

## 8. ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Gerçek zamanlı optimal işletme sonucunda elde edilen optimal işletme seviyeleri Şekil 9’da verildiği gibidir. Burada, en büyük depolama hacmine sahip barajların havzalarından gelen akımları depolamak için işletme seviyelerinde büyük değişimler yaptıkları görülmektedir. Barajların bu şekilde davranarak optimizasyon sürecini kontrol ettiği ve yönettiği söylenebilir. Ayrıca elde edilen işletme seviyelerine bakıldığında, her birinin optimal taşkın kontrol seviyeleri ile aylık normal işletme seviyeleri arasında bulunduğu görülmektedir. Elde edilen seviyelerin bu optimal seviyeler arasında olması optimizasyon modelinin amacını gerçekleştirdiği anlamına gelmektedir. İşletme sonucunda barajlardaki işletme seviyesinin bir sonraki ayda normal işletme seviyesine ulaştığı görülmüştür. Böylece diğer aylarda uzun süreli işletme için öngörülen normal işletme seviyelerinden uzaklaşmamaktadır.

Gerçek zamanlı ve kısa süreli optimal işletmeler neticesinde barajlardan bırakılan akımlar barajların havzasından gelen akımlar üzerine ilave edilmektedir. Şekil 10’ da gerçek zamanlı optimal işletme neticesinde barajların havzasından gelen akımlar gösterilmektedir. Bu veriler ile Şekil 8’ de verilen verilerin aynı değerlerde olduğu görülmektedir. Barajdan bırakılan akımların havzadan gelen akımların üzerine ilave edildiği halde, havzadan gelen akım değerlerinde herhangi bir değişiklik olmadığı anlaşılmaktadır. Buradan, barajların havzadan gelen akımları depoladığı ve mansapta taşkın debi kısıdını aşmayacak şekilde bıraktığı sonucu çıkarılabilir.

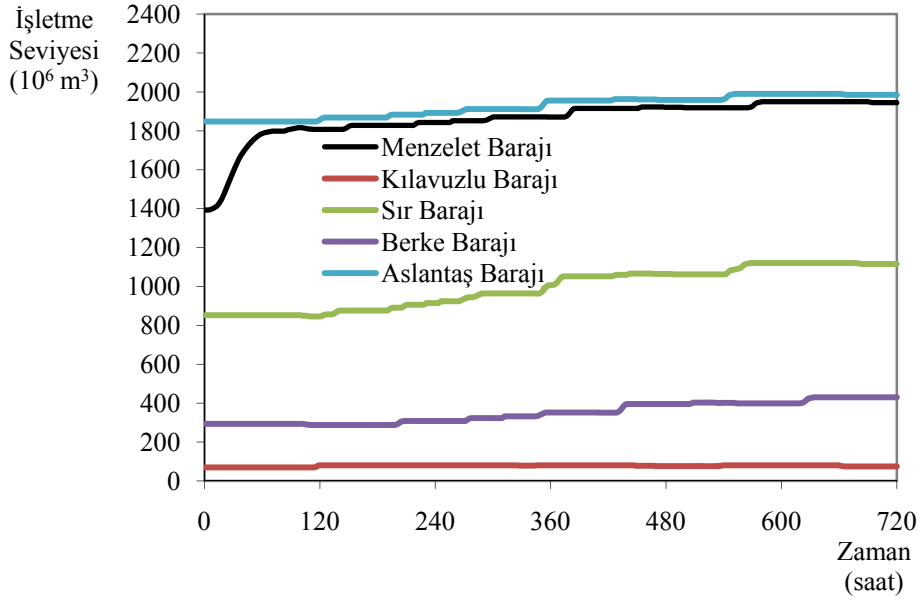
Tablo 4’ de aylık minimum ve normal işletme seviyeleri ile birlikte 100 yıl tekerrür aralıklı (tasarım amaçlı) olası taşkın durumunda taşkın kontrolü amaçlı kısa süreli optimal

### Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme

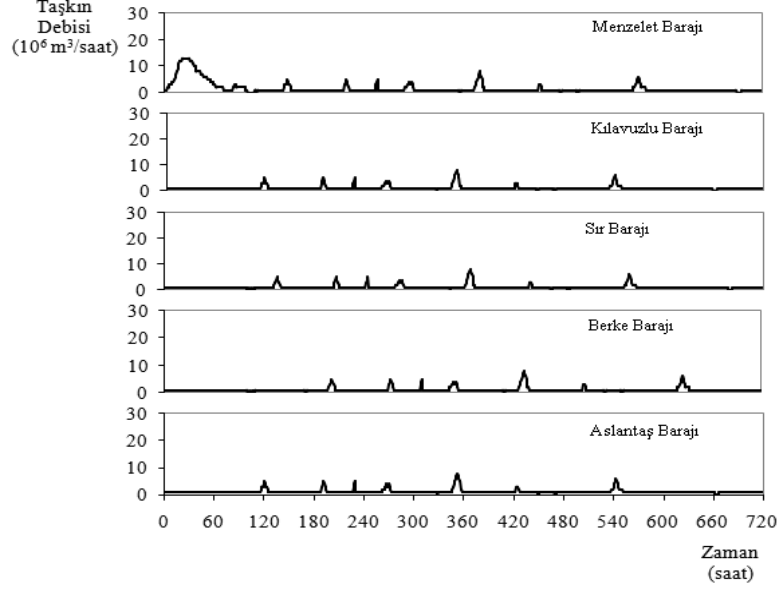
işletmeden elde edilen optimal taşkın kontrol seviyeleri verilmektedir. Enerji üretimi amaçlı uzun süreli optimal işletme sonucunda sistemin güvenilir güç değeri 163,970 MW ve Şubat ayı için sistemin ortalama güç değeri 738,120 MW olarak elde edilmişlerdir. Şekil 8’ de, barajlara taşkın olması beklenen Şubat ayında havzasından gelen akım verileri gösterilmektedir. Tablo 4’ de, Şekil 8’ de ve sistemin güvenilir gücü için verilen veriler, taşkın kontrolü ve enerji üretimi amaçlı gerçek zamanlı optimal işletme modelinde kullanılarak Şubat ayı için gerçek zamanlı optimal işletme seviyeleri elde edilmektedir.

Tablo 4. Barajlarda Şubat ayı için elde edilen optimal işletme seviyeleri (Kılavuz seviyeler)

Barajlar	Menzelet	Kılavuzlu	Sır	Berke	Aslantaş
$S_{i,t}^{Min}$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	1160	70	940	430	1930
$S_{i,t}^{Nor}$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	1670	80	1120	430	1990
$S_{i,t}^{Op,Taş}$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	752	70	705	120	530
$S_i^{Min}$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	530	70	450	120	530
$S_i^{Maks}$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	1950	80	1120	430	1990

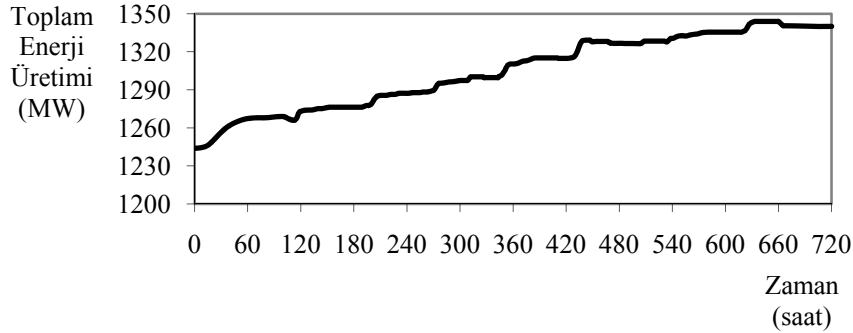


Şekil 9. Gerçek zamanlı optimal işletme sonucu barajlarda Şubat ayı için oluşan işletme seviyeleri



Şekil 10. Gerçek zamanlı optimal işletme sonucu barajlara havzalarından Şubat ayı için gelen akımlar

Gerçek zamanlı optimal işletmede Şubat ayı için kılavuz seviyeleri belirlenirken, uzun süreli optimal işletme sonucu elde edilen ortalama güç değeri 738,120 MW' dir. Şekil 11'de gerçek zamanlı optimal işletme neticesinde elde edilen sistemin toplam enerji üretimi değerleri verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen ortalama güç değeri 1304,850 MW' dir. Burada, gerçek zamanlı optimal işletme sonucu elde edilen güç değeri, uzun süreli optimal işletme sonucu üretilen güç değerinden daha büyüktür. Bu büyüklük, gerçek zamanlı optimal işletmede taşkın kontrolü yapılırken aynı zamanda enerji üretimi yapılmaya çalışılması sonucu oluşmaktadır.

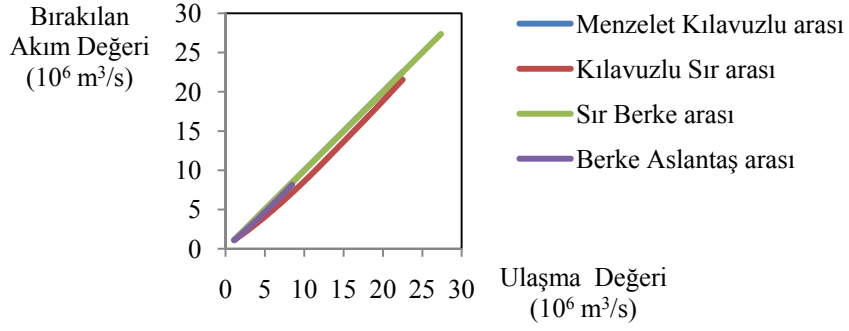


Şekil 11. Gerçek zamanlı optimal işletme sonucu elde edilen sistemin toplam enerji üretimi değerleri

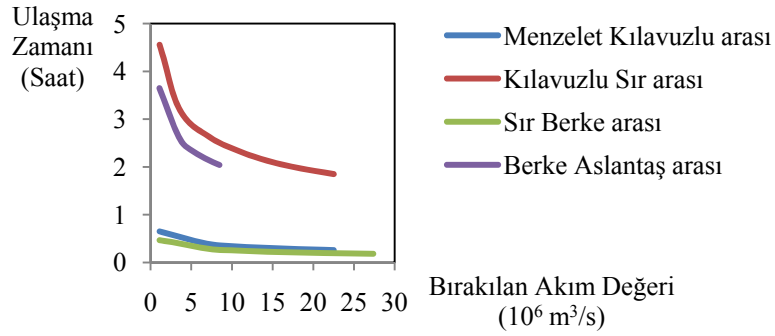
### Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme

Gerçek zamanlı ve kısa süreli optimal işletme sürecinde, kinematik dalga yaklaşımı kullanılarak barajdan bırakılan akım değerinin diğer baraja ulaşma değeri ve ulaşma zamanını gösteren grafikler, Şekil 12' de ve Şekil 13'de gösterildiği gibidir. Bu grafikler incelendiğinde;

- Barajlar arası mesafe ne kadar artarsa barajdan bırakılan akım değeri, diğer baraja o kadar azalarak ulaştığı,
- Barajlar arası mesafe çok küçük ise, barajdan bırakılan akım, diğer baraja değişmeden ulaştığı,
- Barajdan bırakılan akım değeri büyüdüğü zaman ulaşma zamanının küçüldüğü,
- Barajlar arası mesafe arttıkça ulaşma zamanı artmakta, azaldıkça azalmakta olduğu görülmektedir



Şekil 12. Barajdan bırakılan akımın diğer baraja ulaşma değerinin eğrisi



Şekil 13. Barajdan bırakılan akımın diğer baraja ulaşma zamanının eğrisi

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ceyhan Havzası'nda Ceyhan Nehri ana kolu üzerinde çok barajlı bir su kaynakları sistemi için taşkın kontrolü ve enerji üretimi amaçlı olarak gerçek zamanlı optimal işletme modeli geliştirilmiştir. Bu model ile yapılan işletme sonucu Şekil 7' de elde edilen optimal işletme seviyelerine bakıldığında, en büyük depolama hacmine sahip barajların işletme seviyelerinde büyük değişimler yaparak optimizasyon sürecini kontrol ettiği ve yönettiği görülmektedir. Ayrıca, işletme seviyeleri, amaç fonksiyonunu öngördüğü şekilde, optimal taşkın kontrol seviyeleri ile aylık normal işletme seviyeleri arasında bulunmaktadır. İşletme sonucunda barajlardaki işletme seviyesinin bir sonraki ayda normal işletme seviyesine ulaştığı görülmüştür. Böylece diğer aylarda uzun süreli işletme için öngörülen normal işletme seviyelerinden uzaklaşmamaktadır.

Gerçek zamanlı optimal işletme sonucu Şubat ayı için elde edilen sistemin ortalama güç değeri, uzun süreli optimal işletme sonucu üretilen sistemin ortalama güç değerinden daha büyüktür. Bu büyüklük, gerçek zamanlı optimal işletmede taşkın kontrolü yapılırken aynı zamanda enerji üretimi yapılmaya çalışılması sonucu oluşmuştur. Şekil 8' de gerçek zamanlı optimal işletme neticesinde barajların havzasından gelen akımlar incelendiğinde, barajdan bırakılan akımların havzadan gelen akımların üzerine ilave edildiği halde, havzadan gelen akım değerlerinde herhangi bir değişiklik olmadığı, barajların havzadan gelen akımları depoladığı ve mansapta taşkın debi kısıdını aşmayacak şekilde akımları bıraktığı sonucu çıkarılabilir.

Gerçek zamanlı ve kısa süreli optimal işletme sürecinde kullanılan kinematik dalga yaklaşımı ile elde edilen Şekil 12'deki ve Şekil 13'deki grafiklere bakıldığında, barajlar arası mesafe ne kadar artarsa barajdan bırakılan akımın değeri diğer baraja o kadar azalarak ulaştığı, barajlar arası mesafe çok küçük ise barajdan bırakılan akımın diğer baraja değişmeden ulaştığı, barajdan bırakılan akımın değeri büyüdüğü zaman ulaşma zamanının küçüldüğü ve barajlar arası mesafe artıkça ulaşma zamanı arttığı ve azaldıkça azalmakta olduğu görülmektedir.

İleriki çalışmalarda, kuraklık kontrolü amacı mevcut gerçek zamanlı optimal işletme modeli içine katılabilir. Optimizasyon modeline karşılık olarak bir simülasyon modeli üretilip elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca, deterministik olarak yapılan gerçek zamanlı optimizasyon çalışmaları için yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi heuristik kabuller ile modelleme yapılabilir.

### Semboller

$X_{i,t}$	: Giren akımı,
$Y_{i,t}$	: Çıkan akımı,
$S_{i,t}$	: Depolanan su miktarı
$F_{i,t}$	: Havzadan gelen akım miktarı
$Q_{i,t}$	: Enerji üretimi için bırakılan akım miktarı

*Çok Barajlı Sistemde Gerçek Zamanlı Optimal İşletme*

$R_{i,t}$	: Dolu savaktan bırakılan akım miktarı
$L_{i,t}$	: Buharlaştırma ve diğer kayıplar
$S_i^{Min}$	: Depolanan minimum su miktarını
$S_i^{Maks}$	: Depolanan maksimum su miktarını
$Q_i^{Maks}$	: Enerji üretimi için bırakılabilecek maksimum su miktarını
$R_i^{Maks}$	: Dolu savaktan bırakılabilecek maksimum su miktarını
$W_{i,t}$	: Akarsu yatağına bırakılması gereken kuraklık ve kirlilik kontrolü için minimum su miktarı
$W_i^{Maks}$	: Akarsu yatağına bırakılabilecek taşkın kontrolü için maksimum su miktarı
$h_{i,t}^*$	: Tüneldeki sürtünme kaybı düşünülmeden önce ortalama su yüksekliği
$(h_f)_{i,t}$	: Sürtünmeden dolayı yük kaybı
$dk_i$	: Tünel çapına ve sürtünme özelliklerine bağlı bir katsayı
$l_i$	: Taşıma tüneli uzunluğu
$S_{i,t}^{Nor}$	: Aylık normal işletme seviyesi
$S_{i,t}^{Min}$	: Aylık minimum işletme seviyesi
$S_{i,t}^{Op,Taş}$	: Optimal taşkın kontrol seviyesi
$\alpha_i^{Ger}$	: Baraja ait gerçek seviye düzeltme katsayısı
$\alpha_i^{Tah}$	: Baraja ait tahmini seviye düzeltme katsayısı
$\alpha_{i,Ort}^{Tah}$	: Baraja ait ortalama tahmini düzeltme katsayısı
$F_{i,k}^{Tah}$	: Baraja havzasından gelen tahmini akım miktarı
$\alpha_i^d$	: Baraja ait seviye düzeltme faktörü
$S_i^d$	: Baraja ait seviye düzeltme miktarı



$F^{Ort}$	: Akarsu yatağındaki ortalama debi
$A$	: Akarsu yatağında ortalama kesit alanı
$H$	: Barajlar arası kot farkı
$L$	: Akarsu uzunluğu
$b, h$	: Akarsu kesit büyüklüğü parametreleri
$P$	: Akarsu yatağında ortalama ıslak çevre
$R$	: Hidrolik yarıçap
$n$	: Manning katsayısı, (Akarsu yatağı sürtünme katsayısı)
$J_o$	: Akarsu yatağında taban eğimi
$\alpha, \beta$	: Kinematik dalga yaklaşımında kullanılan akım parametreleri
$\Delta x_{ii}$	: Akarsudaki konum aralığı
$\Delta t_{ii}$	: Akarsudaki zaman aralığı
$(Q + R)_{ii}^B$	: Barajdan akarsu yatağına bırakılan akım miktarı
$\Delta t_{(Q + R)_{ii}^B}$	: Barajdan akarsu yatağına bırakılan akım için seçilen zaman aralığı
$c_{k_{ii}}$	: Akarsudaki dalganın hızı
$\Delta t_{c_{k_{ii}}}$	: Akarsudaki dalganın seyahat zamanı
$T_{ii}^{Öngr}$	: Akarsudaki akım miktarı için öngörülen ulaşma zamanı
$M_{t_{ii}}$	: Akarsudaki zaman aralığı sayısı
$N_{x_{ii}}$	: Akarsudaki konum aralığı sayısı
$(Q + R)_{ii}^{B,Ulaş}$	: Barajdan akarsuya bırakılan akımın diğer baraja ulaşma değeri
$T_{ii}^{Ulaş}$	: Barajdan akarsuya bırakılan akımın diğer baraja ulaşma zamanı

**Alt indis**

$i$	: Baraj numarası
$ii$	: Akarsu numarası
$t$	: Ay olarak zaman
$f, k$	: Saat olarak zaman

### **Teşekkür**

Mahmut Sert 1 Mayıs 2007 tarihinde vefat etmiştir. Bu tarihe kadar bu çalışmanın ortaya çıkartılması ve geliştirilmesi üzerine çok büyük katkılarda bulunmuştur. O olmadan bu çalışma asla yapılmazdı. Katkılarından dolayı kendisine çok teşekkür ederim.

### **Kaynaklar**

- [1] Opan M., Çok barajlı sistemlerde çok amaçlı optimal işletme, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2007.
- [2] Labadie J. W. Optimal operation of multi-reservoir system: State-of-the-art review, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130-2, 93-111, 2004.
- [3] Georgakakos A., The value of stream flow forecasting in reservoir operations, *Water Resources Bulletin*, 25-4, 789-800, 1989.
- [4] Labadie J., Lazaro R. and Morrow D., Worth of short-term rainfall forecasting for combined sewer overflow control, *Water Resources Research*, 17-6,1594-1604, 1981.
- [5] Mishalani N. and Palmer N., Forecast uncertainty in water supply reservoir operation, *Water Resources Bulletin*, 24-6, 1237-1245, 1988.
- [6] Wasimi S., and Kitanidis P., Real-time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control, *Water Resources Research*, 19-6, 1511-1522, 1983.
- [7] McLaughlin D. and Velasco H., Real-time control of a system of large hydropower reservoirs, *Water Resources Research*, 26-4, 623-635, 1990.
- [8] Philbrick C. and Kitanidis P., Limitations of deterministic optimization applied to reservoir operations, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125-3, 135-142, 1999.
- [9] Georgakakos A. And Marks D., A new method for the real time operation of reservoir systems, *Water Resources Research*, 23-7,1376-1390, 1987.
- [10] Georgakakos A., Extended linear quadratic gaussian control: Further extensions, *Water Resources Research*, 25-2,191-201, 1989.
- [11] Georgakakos A., Yao H. and Yu Y., Control model for hydro-electric energy-value optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123-1,30-38, 1997.
- [12] Unver O. and Mays L., Model for real-time optimal flood control operation of a reservoir system, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 4, 21-46, 1990.
- [13] Labadie J., Optimal use of in-system storage for real-time urban storm water control, *Urban Storm water Drainage: Proc., U.S.-Italy Bilateral Seminar*, Cao et al., eds., Water Resources Publications, Highlands Ranch, Calif., 1993.

- [14] Shim K.-C., Fontane D. and Labadie J., Spatial decision support system for integrated river basin flood control, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128-3, 190-201, 2002.
- [15] Howard C., Optimal integrated scheduling of reservoirs and generating units, *Leading Edge Technology: Hydro- Vision Conf.*, Phoenix, Ariz. Oper., 1994.
- [16] Sert M., Kızıltan G., Dalgıç A. İ., Karadeniz M., Ünal A. U. ve Uşkay S., Bir akarsu üzerindeki bir seri hidroelektrik tesisin optimal boyutlandırma ve işletilmesi, *Munzur Suyu Projesi Uygulaması, TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Yöneylem Araştırması Bölümü, Gebze-Kocaeli*, 1982.
- [17] Sert M., Öcal M., Oktay N. ve Ertuğrul M., Sakarya Havzası optimal enerji üretimi projesi, *TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Yöneylem Araştırması Bölümü, Gebze-Kocaeli*, 1983.
- [18] Yi J., Labadie J. and Stitt S., Dynamic optimal unit commitment and loading in hydropower systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129-5, 388-398, 2003.
- [19] Sen S. and Yakowitz S., A quasi-Newton differential dynamic programming algorithm for discrete-time optimal control, *Automatica*, 23-6, 749-752, 1987.
- [20] Sherkat V., Campo R., Moslehi K. and Lo E., Stochastic long-term hydro-thermal optimization for multireservoir systems, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Pas.-104-8, 2040-2050, 1985.
- [21] Brakensiek D. L., A simulated watershed flow system for hydrograph prediction: a kinematic application, *Proceedings, International Hydrology Symposium, Fort Collins, Colo.*, vol.1, pp.3.1-3.7, 1967.
- [22] Eagleson P. S., *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [23] Overton D. E. and Meadows M. E., *Stream water modeling*, Academic Press, New York, 1976.
- [24] Stephenson D. and Meadows M. E., *Kinematic hydrology and modeling*, *Developments in Water Science*. 26, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [25] Overton D. E., Route or convolute?, *Water Resources Research*, vol.4, no.1, pp.43-52, 1970.
- [26] Overton D. E., Estimation of surface water lag time from the kinematic wave equations, *Water Resources Bulletin*, vol.7, no.3, pp.428-440, 1971.