



TÜBİTAK

MARMARA BİLİMSEL VE ENDÜSTRİYEL ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ

YÖNEYLEM ARAŞTIRMASI BÖLÜMÜ

626/627: 519.8
S 489 S

TÜBİTAK
BİLİMSEL VE TEKNİK
ARAŞTIRMA KURUMU
KÜTÜPHANESİ

SU KAYNAKLARI PLANLAMASINDA
SİSTEM OPTİMİZASYONU

Doç. Dr. Mahmut SERT

Eylül 1987

Proje Kod No : 0130078201

GEBZE - KOCAELİ

MBEAE MATBAASI - GEBZE

61 / 53

MFN 974

TÜBİTAK

MARMARA BİLİMSEL VE ENDÜSTRİYEL ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ

YÖNEYLEM ARAŞTIRMASI BÖLÜMÜ

TÜRKİYE
BİLİMSEL VE TEKNİK
ARAŞTIRMA GİRİŞİMİ
KÜTÜPHANESİ

626/627 : 519.8

5489 s

SU KAYNAKLARI PLANLAMASINDA
SİSTEM OPTİMİZASYONU

Doç. Dr. Mahmut SERT

Eylül 1987

Proje Kod No : 0130078201

5489

59881

65.012.2:628.1/.3(047.3)=943.5

SER
1987

Sert, Mahmut

Su kaynakları planlamasında sistem optimizasyonu/Mahmut Sert.-Gebze:MBEAE Matbaası, 1987.

19s.; 30cm.

Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü.Yöneylem Araştırması Bölümü.

Proje Kod No: 0130078201.

Konu:1)Su kaynakları 2)Planlama 3)Sistem modellemesi
4)Optimizasyon 5)Benzetim

SYSTEM OPTIMIZATION IN WATER RESOURCES PLANNING

SUMMARY

Water resources planning is a multi-dimensional and complicated process. Environmental protection, social factors and compatibility with the general economical planning must be observed while optimal solutions are searched for various purposes such as hydroelectric energy production, irrigation and flood protection.

It is shown that, in the long range planning of multi-reservoir and multiple purpose systems, optimization and simulation techniques may be used in combination to obtain solutions which take into account the stochastic nature of the hydrological events and produce optimal benefits under certain risks. This approach has been generalised within the framework of the optimization and simulation models, for any possible configuration in terms of the river tributaries, flow gauging stations and the number, type and placing of the reservoirs.

A similar approach may be used in short range planning and real-time operation of the system for a more detailed optimization of the expected benefits and for the examination and control of the critical events, like floods, where the risks must be reduced to a minimum.

SU KAYNAKLARI PLANLAMASINDA SISTEM OPTİMİZASYONU

ÖZET

Su kaynakları plânlaması, çok boyutlu ve karmaşık bir süreçtir. Plânlama süreci içinde hidroelektrik enerji üretimi, sulama, taşkından koruma gibi değişik amaçlara yönelik optimal çözümler aranırken, çevre sorunları, sosyal faktörler ve genel ekonomik plânlama ile uyum da gözönünde tutulacaktır.

Bu çalışmada, çok barajlı ve çok maksatlı sistemlerin uzun süreli plânlamasında optimizasyon ve benzetim tekniklerinin birlikte kullanılması ile, hidrolojik olayların rassal (stokastik) özelliğini dikkate alan ve belirli riskler altında optimal faydayı sağlayan çözümlere ulaşılabileceği gösterilmektedir. Bu yaklaşım, optimizasyon ve benzetim modelleri çerçevesinde, akarsu kolları, akım gözlem istasyonları ve barajların sayısı, tipi, konumları açısından öngörülebilecek herhangi bir konfigürasyon için genelleştirilebilir.

Diğer taraftan, benzer bir yaklaşımın, gerek beklenen faydaların daha ayrıntılı bir şekilde optimizasyonu, gerekse taşkınlar gibi risklerin minimuma indirilmesi gereken kritik olayların incelenmesi ve kontrolü açılarından, kısa süreli plânlama ve gerçek zaman işletmede de uygulanabileceği vurgulanmaktadır.

SU KAYNAKLARI PLANLAMASINDA SİSTEM OPTİMİZASYONU

1. GİRİŞ

Su kaynakları planlaması, ülke ekonomisi ve öngörülen hayat standartları ile bütünleşmiş, çok boyutlu ve karmaşık bir süreçtir. Konunun boyutlarının belirginleşmesi için, su kaynakları planlamasının etkileşime girmesi ve planlama sürecinde gözönünde tutulması beklenen faaliyet alanlarından bazıları; enerji üretimi, tarım, balıkçılık, ağaçlandırma, taşkından koruma, erozyon kontrolü, içme ve sanayi suyu temini, şehircilik, nüfus dağılımı ve bölgesel planlama, rekreasyon, doğanın ve ekolojik denge- nin korunması, ulaştırma ve nehir taşımacılığı, çevre kirliliğinin kontrolü, kamulaştırma ve diğer hukuksal alanlar, ekonomi, maliye, politika ve yönetim olarak sıralanabilir. Planlamacı, bu perspektif içinde ve çoğunlukla birbiriyle çelişen amaçlar arasında, topluma en fazla yarar sağlayacağı varsayılan dengeyi kurmaya çalışacaktır.

Su kaynakları planlama sürecinin karmaşıklığı, çok boyutlu ve çok amaçlı olma niteliklerinin yanısıra, bir ölçüde de, makro ve mikro düzeyde planlama sorunlarının birbirlerinden kolayca ayrılamayacak derecede kaynaşmış olarak bir arada bulunmalarından ileri gelmektedir. Bu süreç içinde, bir taraftan sürekli değişen toplumsal, ekonomik, finansal v.s. "konjektürel" şartlar altında stratejik karar oluşturmaya yönelik faaliyetler yer alırken, diğer taraftan da en ince teknik ayrıntıları kapsayan planlama çalışmalarının paralel yürütülmesi ve bunlar arasındaki etkileşim çerçevesinde en yararlı çözümlere ulaşılması beklenmektedir.

Hidrolojik olaylarda görülen rassal (stokastik) özellikle birlikte, su kaynakları kullanımını düzenleyen tesislerin uzun süreler işletmede kalması ve yüksek maliyetleri, bu tesislerin belirli riskler altında optimal faydaları sağlayacak şekilde uzun süreli planlamasına büyük ağırlık kazandırmaktadır. Diğer taraftan, kısa süreli etkilerin gözönüne alınması, gerek beklenen faydaların daha ayrıntılı bir şekilde optimizasyonu, gerekse taşkınlar gibi risklerin minimuma indirilmesi gereken kritik olay-

ların incelenmesi bakımından önem taşımaktadır. Taşkınlar, meydana geliş aralıkları (tekerrür aralıkları) açısından uzun süreli, fakat meydana geldikleri sırada da kısa süreli olarak ele alınması gereken olaylardır. Dolayısıyla bu çerçevede, uzun ve kısa süreli planlamaların bütünleştirilmesi de büyük önem kazanmaktadır.

Burada sunulan çalışmada, su kaynakları planlamasında sistem optimizasyonunun esasları irdelenerek, modern sistem analizi yöntemleri ile çok barajlı ve çok maksatlı sistemlerin uzun süreli planlamasında genel amaçlı sistem optimizasyonu için geliştirilen bazı yaklaşımlar, ve, kısa süreli planlama ve gerçek zaman işletmede sistem optimizasyonu uygulamaları üzerinde durulacaktır.

2. SU KAYNAKLARI PLANLAMASINDA SİSTEM OPTİMİZASYONUNUN ESASLARI

Su kaynakları planlaması, istenilen amaçlar doğrultusunda ve öngörülen kriterler çerçevesinde su kaynaklarının en verimli kullanımını sağlayacak faaliyetlerin tümünü kapsayacaktır. Toplum ve ekonomiyi çok yakından ilgilendiren böyle bir konuda bugüne kadar pek çok çalışma ve yayın yapılmıştır. Bunlardan bazıları konuya uygulama ağırlıklı yaklaşırken (1,2,3), bazıları ise analiz tekniklerine ağırlık verilmiştir, (4). Ayrıca, su kaynakları planlama sürecinin çeşitli yönlerini ilgilendiren birçok çalışma ve ülkemizdeki su kaynakları planlama yaklaşımını ayrıntılı olarak anlatan yayınlar mevcuttur, (5). Bu çalışmada, su kaynakları planlama süreci genel bir çerçevede irdelenirken, konunun daha çok sistem optimizasyonu ile ilgili kısımları üzerinde durulacaktır.

Planlama, mevcut şartlarda ve mevcut bilgilerle, içinde bulunulan zamandan ileriye yönelik olarak tahmin yeteneği geliştirilen bir zaman ölçeği içinde, belirli amaçların sağlanması için geçerli sayılan bazı kriterler altında en uygun çözümleri arayacaktır. Şüphesiz, belirli şartlara bağlı olarak ulaşılan bir çözümün, mutlak anlamda ve her şart altında optimal olma niteliği taşıması sözkonusu değildir. Planlama, değişen ekonomik, toplumsal, politik ve diğer faktörlerden kolayca etkilenebilecek ve belirli şartlar altında optimal olduğu kabul edilen çözümler, zaman içinde bu niteliğini kaybedebilecektir. Burada, planlama sürecinin

süreklilik arzeden bir niteliğe sahip olması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu çerçevede planlama, dinamik ve yaşayan bir süreç olmakta, geçen zaman dilimleri içinde, değişen şartlar ve ileriye yönelik yeni tahminlerle, planlamanın sürekli olarak yenilenmesi gerekmektedir.

Diğer taraftan, planlamacının teknik olarak planlama süreci kapsamına alabileceği faktörler ve kriterler de sınırlı bir düzeyde kalmak durumundadır. Çok boyutlu, karmaşık ve bazan matematiksel ifadesi pratik olarak imkansız faktörlerin tümünün, çözümlerin üretileceği model çalışmalarında dikkate alınabilmesi çoğu zaman mümkün olmayabilir. Dolayısıyla teknik düzeyde planlama ile, belirli sayıda çözüm seçenekleri (içerdikleri varsayımlarla birlikte), karar vericiye sunulmakta ve teknik planlama sürecinde dikkate alınamayan bazı faktörlerin (sosyo-ekonomik, politik, finansal, çevresel v.s.) gözönünde tutulması sorumluluğu da diğer karar organlarına bırakılmış veya onlarla paylaşılmış olmaktadır. Böylece, geniş kapsamda planlama, çeşitli disiplinlerde teknik personel ile idari ve politik karar organlarının birlikte rol aldıkları bir süreç olarak görülmelidir.

Su kaynakları planlamasında özellikle önem taşıyan diğer bir nokta da, optimal çözümlere ulaşılabilmesi için sistem konfigürasyonu, boyutlandırılması ve işletilmesinin genellikle birlikte ele alınması zorunluluğudur. Ayrıca, sistem içindeki bazı tesislerin inşaat sürecinin uzunluğu ve finansal sebeplere bağlı olarak, planlanan sistemin son aşamasına ulaşılması oldukça uzun bir zaman alabilmektedir. Dolayısıyla, planlanan sistem bütünüyle ortaya çıkıncaya kadar geçecek süre içindeki ara kademe-lerin de planlama süreci içinde mütalaa edilmesi ve en büyük toplam yararı sağlayacak uygulama planının belirlenmesi gereklidir. Bu durumda, su kaynakları planlama süreci içinde, genel olarak sistem boyutlandırılması, işletilmesi ve uygulama (inşa) bütünlüğü dikkate alınacaktır. Konfigürasyonu belirli bir sistemin optimizasyonunu hedef alan "statik" modeller planlama amacıyla kullanıldığında, uygulamanın zaman içindeki değişik aşamalarına karşılık olan veriler, amaçlar ve kriterlerle birçok kereler çalıştırılarak "dinamik" bir işlev gerçekleştirmiş olacaklardır. Diğer taraftan, sistemin zaman içindeki optimal geliştirilmesini hedef alan

"dinamik" modeller de zaman içinde değişen veriler ve kriterlerle planlama süreci boyunca defalarca çalıştırılarak planlamanın yenilenmesi sağlanacaktır.

Su kaynaklarını düzenleyen sistemlerin optimizasyonu için kullanılan teknikleri genel olarak ampirik veya heuristik yaklaşımlar, benzetim yöntemleri ve matematiksel programlama yöntemleri olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu yöntemlerin her biri tek baraj ve tek maksatlı bir sistem için uygulanabileceği gibi, çok barajlı ve çok maksatlı sistemler için de uygulanabilir. Ampirik veya heuristik yaklaşımlardan kesin optimal çözümler elde edilememekle beraber, bazı durumlar için yılların deneyim birikimi ile oldukça güvenilir çözümlere az bir külfetle ulaşılabilmektedir. Diğer taraftan, özellikle çok barajlı sistemlerin planlaması için matematiksel programlama ve benzetim yöntemleri son yıllarda önemli ilerlemeler getirmiştir. Bu alanda optimal sonuçlar elde etmek için etkin olarak kullanılan başlıca programlama yöntemleri, dinamik programlama (6,7,8,9) ve doğrusal programlama (10,11,12) olmuştur. Fakat, hidroelektrik enerji üretim fonksiyonu doğrusal olmadığından, dinamik programlamanın bu alanda daha fazla ağırlık taşıdığı söylenebilir. Benzetim yönteminde ise, sistemin parametrelerinde yapılan değişikliklerle deneysel olarak en iyi çözüm aranmaktadır. En iyi çözümün elde edileceği her zaman garanti edilemez. Fakat, benzetim yöntemi, matematiksel programlamaya dayanan optimizasyon yöntemleri ile birlikte kullanıldığı zaman çok yararlı olabilmektedir (13,14,15). Böylece, sistemin deterministik yapıda bir optimizasyon modelinden elde edilen sonuçlar, sistemin bir benzetim modelinde türetilen akım serileri ile birlikte kullanılarak, akım serilerinin stokastik özelliğinden kaynaklanan riskler belirlenebilmektedir.

Burada sunulan çalışmada, çok barajlı bir sistemin uzun süreli optimal planlaması için dinamik programlama ve benzetim yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım öngörülmektedir. Uzun süreli planlamada, sistemin ekonomik ömrü boyunca elde edilecek faydanın optimal olması amaçlanmakta ve dolayısıyla en küçük zaman birimi olarak genellikle aylık dönemlerle çalışılmaktadır. Bu durumda, sistemin bazı kısa süreli özelliklerinin incelenmesi mümkün değildir. Burada, benzer bir sistem optimizasyonu yaklaşımı ile fakat daha kısa süreli işletme gözönüne alı-

arak, taşkın kontrolu ve düşük akımların takviyesi amaçlarına yönelik bir yaklaşım sunulmaktadır. Daha sonra, kısa ve uzun süreli optimizasyon sonuçlarının bütünleştirilmesi mümkün olabilecektir. Bu formülasyon, aynı zamanda sistemin bilgisayarlar aracılığıyla doğrudan kontrol ile gerçek zaman (real-time) işletilmesi için de bir temel teşkil edecektir.

3. ÇOK BARAJLI VE ÇOK MAKSATLI SİSTEMLERİN UZUN SÜRELİ PLANLAMASINDA GENEL AMAÇLI SİSTEM OPTİMİZASYONU

Bir seri hidroelektrik tesisten oluşan bir sistemin, birbirini takip eden benzer alt-sistemlerden oluştuğu düşünülebilir. Her alt-sistemde, genel olarak

- akış için bir düzenleme aracı (baraj veya regülatör haznesi)
- bir enerji üretim merkezi (hidro-elektrik santral-HES), ve,
- düzenleme aracı ile enerji üretim merkezi arasındaki taşıma aracı (cebri boru ve/veya taşıma tüneli)

bulunmaktadır. Çeşitli seçenekler, yukarıdaki genel tanımlamanın özel halleri olarak ele alınabilir. Mesela bir alt-sistemde basınçlı taşıma tüneli olmadığı zaman, tünel uzunluğu sifıra eşitlenir, veya biriktirmesiz bir tesis için su seviyeleri her zaman aralığı için sabit olarak alınır, (16). Böylece bu yaklaşımın, optimizasyon ve benzetim modelleri çerçevesinde, akarsu kolları, akım gözlem istasyonları ve barajların sayısı, tipi ve konumları açısından öngörülebilecek herhangi bir konfigürasyon için geliştirilebileceği de gösterilmektedir (17).

Çok barajlı sistemlerin uzun süreli optimal planlama yaklaşımında, sistemin verilen boyutları için, dinamik programlama optimizasyon modeli ile, kurak dönem akımları kullanılarak sistem içindeki barajların minimum işletme eğrileri (minimum su seviyeleri) güvenilir gücü enbüyükleyecek şekilde belirlenmektedir. Yine dinamik programlama ile aylık ortalama akımlar kullanılarak, üretilen toplam enerjiyi enbüyükleyecek (ve aynı zamanda eniyilenmiş güvenilir gücü sağlayacak) şekilde sistemin normal (optimal) su seviyeleri bulunmaktadır. Böylece, sistem için güvenilir enerji ve toplam enerji optimizasyonları yapılmakta ve bunlara karşılık

olan işletme politikaları belirlenmiş olmaktadır. Daha sonra bu politikalar sistemin bir benzetim modelinde türetilen akım serileri ile birlikte kullanılarak sistemin ekonomik ömrü boyunca elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bundan sonra, sistemin boyutları (baraj yükseklikleri, kurulu güçler, eğer varsa tünel çapları) uygun bir örnekleme ile değiştirilerek yukarıdaki süreç tekrarlanırsa, sistemin değişik boyutlarına karşılık toplam enerji faydalarını içeren bir matris elde edilebilecek ve fayda - maliyet analizleri için gerekli veri sağlanabilecektir.

Öngörülen dinamik programlama optimizasyon modelinde, kesikli zaman değişkeni olarak gözönüne alınan dönemler "aşamalar" s (stages), belirli bir dönemde sistem içindeki barajların su seviyeleri de "durumlar" s (states) oluşturmaktadır. Buna göre, sistemin süreklilik veya su dengesi denklemleri, modelin aşama dönüşüm denklemleri (stage transformation equations) olup, bir seri baraj için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$S_{i,t+1} = S_{it} + F_{it} + Q_{i-1,t} + R_{i-1,t} - Q_{it} - R_{it} - B_{it} \quad (1)$$

($i=1, \dots, n$: Baraj ve tesis sayısı)

($t=1, \dots, m$: Dönemler-aylık-)

Burada,

$S_{it}, S_{i,t-1}$: i -barajında t ve $(t-1)$ dönemlerinde depolanmış su miktarları

F_{it} : i -barajının havzasına t döneminde gelen akım

$Q_{it}, Q_{i-1,t}$: i ve $(i-1)$ barajlarından t döneminde enerji üretimi için bırakılan debiler

$R_{it}, R_{i-1,t}$: i ve $(i-1)$ barajlarında t döneminde dolusavaktan bırakılan debiler

B_{it} : i -barajından t döneminde oluşan buharlaşma kaybı

olarak tanımlanmaktadır. Yukarıdaki şekliyle süreklilik denklemleri bir seri baraj için yazılmış olmakla birlikte, aynı yaklaşım su dengesi ilişkileri dikkate alınarak ifade edilmek kaydıyla, akarsu kollarının ve bunların üzerindeki barajların herhangi bir konfigürasyonu için de geçerli

olacaktır. Böylece daha genel bir ifade ile, bir akarsu kolu üzerindeki herhangi bir i -barajı, aynı kol üzerinde mabadaki $(i-1)$ barajından ve i -ile $(i-1)$ barajları arasına dökülen j -adet yan kol üzerindeki k_j ile tanımlanan son barajlardan su aldığına göre, süreklilik bağıntısı

$$S_{i,t+1} = S_{it} + F_{it} + (Q_{i-1,t} + \sum_j Q_{k_j,t}) + (R_{i-1,t} + \sum_j R_{k_j,t}) - Q_{it} - R_{it} - B_{it} \quad (2)$$

$$(i=1, \dots, n)$$

$$(t=1, \dots, m)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, havzadaki bütün barajlar genel olarak i -ile kodlandırılırken, sadece yan kollar üzerindeki son barajlar yerel olarak k_j ile kodlandırılmış olup,

j : i ve $(i-1)$ barajı arasındaki yan kol sayısı ($j=1,2,\dots$),

k_j : j -yan kolu üzerindeki son baraj (ayrıca bir i -koduna da sahip),

olarak tanımlanmıştır.

Sistem kapasitelerinin aşılmaması kısıtları çerçevesinde, sistemde yer alan barajlarda depolanan su miktarlarının, baraj maksimum ve minimum hacimleri ile sınırlanmış olduğu belirlenecektir:

$$S_{imin} \leq S_{it} \leq S_{imax} \quad (3)$$

Burada,

S_{imin}, S_{imax} : i -barajının minimum ve maksimum hacimleridir.

Hydroelektrik enerji üretimi için barajlardan bırakılacak debiler de HES kurulu gücü ve/veya tünel veya kanal kapasitesine bağlı olarak sınırlanabilir :

$$0 \leq Q_{it} \leq Q_{imax} \quad (i=1, \dots, n) \quad (t=1, \dots, m) \quad (4)$$

Benzer şekilde, dolusavaktan bırakılacak debiler de sınırlanabilir :

$$0 \leq R_{it} \leq R_{imax} \quad (i=1, \dots, n) \quad (t=1, \dots, m) \quad (5)$$

Burada,

$Q_{i\max}$: i-barajından enerji üretimi için bırakılacak maksimum debi

$R_{i\max}$: i-barajından dolusavaktan bırakılacak maksimum debi

olarak tanımlanmıştır. Burada $R_{0,t} = Q_{0,t} = 0$ olduğu ve $R_{it} > 0$ halinin sadece kapasite kısıtları zorlandığı zaman geçerli olacağı not edilebilir.

Diğer taraftan, barajlardan enerji üretimi amacıyla ve buna ilave olarak dolusavaktan bırakılan toplam debi için alt ve üst sınırlar belirlenmektedir :

$$W_{it} \leq (Q_{it} + R_{it}) \leq W_{i\max} \quad (i=1, \dots, n) \quad (t=1, \dots, m) \quad (6)$$

Burada,

W_{it} : i-barajından t-döneminde nehir yatağına bırakılması gereken minimum debi, (sulama, kirlilik kontrolü, ulaşım gibi maksatlar için),

$W_{i\max}$: i-barajından nehir yatağına bırakılabilecek maksimum toplam debi (taşkın kontrolü için emniyetli debi),

olarak tanımlanmaktadır.

Enerji üretimi, dönem içinde elde edilen ortalama güç ile eş anlamlı olup

$$P_{it} = k_i \cdot Q_{it} \cdot h_{it} ; k_i \approx \text{sabit} (\approx 8.0, \text{SI birimleri}) \quad (7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada h_{it} dönem içindeki ortalama su yüksekliği olup

$$h_{it} = h \left(\frac{S_{it} + S_{i,t+1}}{2} \right) \quad (8)$$

şeklinde (ortalama su miktarının bir fonksiyonu olarak) tanımlanmaktadır. Cebri boru veya taşıma tünelineki sürtünme kayıpları dikkate alınarak,

$$h_{it} = h_{it}^* - (h_f)_{it} \quad (8.1)$$

$$= h_{it}^* - d_i \cdot Q_{it}^2 \cdot l_i \quad (8.2)$$

yazılabilir. Burada,

- h_{it}^* : Tüneldeki sürtünme kaybı düşünülmeden önce i-barajında t-dönemindeki ortalama düşü
- $(h_f)_{it}$: i-barajında t-döneminde sürtünmeden dolayı yükseklik kaybı
- d_i : i-barajında tünel çapı ve sürtünme özelliklerine bağlı bir katsayı
- l_i : i-barajında taşıma tüneli uzunluğu

olarak tanımlanmaktadır. Diğer taraftan, barajdaki h_{it} yüksekliğine karşılık olan buharlaşma yüzeyinden meydana gelecek dönemsel net buharlaşma hacmi de dikkate alınarak, barajda depolanmış ortalama su miktarı ve buna karşılık olan ortalama dönemsel yükseklik (h_{it}), bir iterasyon işlemi sonucunda elde edilecektir.

Modelde, amaç fonksiyonu, iki kriterli olarak ele alınmaktadır :

1. Gözlenmiş kritik periyod ("kurak dönem") akımları ile güvenilir gücün enbüyüklenmesi,

$$\text{Max.}(\min. \sum_{i=1}^n P_{it}) \quad (9)$$

$t=1, \dots, m$

2. Aylık ortalama akımlarla toplam enerjinin enbüyüklenmesi (ve yukarıda elde edilen enbüyüklenmiş güvenilir gücün sağlanması),

$$\text{Max} \sum_{t=1}^m \{ (\sum_{i=1}^n P_{it}) - P_G \} \cdot p_S + P_G \cdot p_G \quad m=12 \quad (10)$$

ve

$$\sum_{i=1}^n P_{it} \geq P_G \quad (11)$$

Burada, P_G =eniyilenmiş güvenilir güç, p_G =güvenilir enerji birim fiyatı ve p_S =sekonder enerji birim fiyatıdır. P_G daha önceden belirlenmiş olduğundan, toplam enerjinin enbüyüklenmesi, sekonder enerjinin büyüklmesi ile eş anlamlı olmaktadır. Dolayısıyla kullanılan birim fiyatlarının sonuç üzerinde bir etkisi yoktur, sadece toplam enerji faydasının değerini belirlemek için kullanılmaktadır.

Sistemin kurulu güç kısıtları, hidroelektrik santrallerin kurulu güçleri P_i ile tanımlanarak,

$$P_{it} \leq P_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (t=1, \dots, m) \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylece, sistemin toplam kurulu gücü P_N için de

$$P_N = \sum_{i=1}^n P_i \geq \sum_{i=1}^n P_{it} \quad (t=1, \dots, m) \quad (13)$$

kısıtı tanımlanmış olmaktadır.

Geliştirilen sistem yaklaşımının, değişik maksatlı veya çok maksatlı sistemler için kullanılması, amaç fonksiyonunda gereken değişikliklerin yapılması koşuluyla geçerli olacaktır. Bu durumda, sulama, kirlilik kontrolü gibi maksatlar için öngörülen su bırakma kısıtları kaldırılarak, söz konusu maksatlara karşılık olan faydalar amaç fonksiyonunda yer alacaktır. Veya değişik sistem seçeneklerinin incelenmesi sırasında, sulama, kirlilik kontrolü, ulaşım ve taşkın kontrolü gayeleri için konulacak su bırakma kısıtları, sistem boyutları ve kurulu güç kısıtları gibi parametrik değişkenler olarak çalışmaya dahil edilecek ve elde edilecek faydalarla bunlara karşılık olan maliyetler sistemin fayda-maliyet analizleri çerçevesinde değerlendirilecektir.

Sistemin analizi için belirlenen esaslar çerçevesinde kurulan benzetim modelinde, daha önce dinamik programlama optimizasyon modelinden elde edilen optimal işletme politikaları kullanılmaktadır. Model, sistemin ekonomik ömrü olarak kabul edilen 50 yıllık (600 ay) süreler için türetilen N değişik akım serisi ve her akım serisi için güvenilir gücün değişik parametrik değerleri ile çalıştırılmaktadır. Böylece, güvenilir gücün her parametrik değeri için işletme süresi $N \times 50$ yıl olmakta ve sistemin ekonomik ömrü boyunca güvenilir gücün değişik parametrik değerlerinde elde edilen güvenilir güç acığı ve toplam enerjinin istatistiksel analizi yapılabilmektedir. Aylık akım serilerinin türetilmesi için Thomas-Fiering modeli (18,19) kullanılmakta ve değişik akım gözlem istasyonları arasında çapraz ilişki (cross correlation) sağlanmaktadır.

Fayda-maliyet analizleri için sistem boyutlarının da (baraj yükseklikleri, tünel çapları, kurulu güçler) uygun bir örnekleme ile parametrik olarak değiştirilerek dinamik programlama modelinden elde edilecek yeni işletme politikalarının tekrar benzetim modelinde denenmesi öngörülebilir.

4. KISA SÜRELİ PLANLAMA VE GERÇEK ZAMAN İŞLETMEDE SİSTEM OPTİMİZASYONU

Kısa süreli planlamada, sistemin, mevcut kayıt ve kriterlere göre belirlenecek kritik bir olayı (taşkın durumları, kuraklık periyodları gibi) optimal bir şekilde kontrol etmesi öngörülmekte, aynı zamanda da sistemden beklenen optimal faydadan olabilecek kayıpların en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır. Burada, bu temel fikir doğrultusunda ve akarsu üzerindeki tesislerin (barajlar, biriktirmesiz tesisler ve HES'ler) tamamının uzun süreli optimal planlamada olduğu gibi bir tek sistem olarak görüldüğü bir yaklaşım önerilecektir.

Konu, optimal taşkın kontrolü çerçevesinde ele alındığında, sisteme giren bir taşkın hidrografının, taşkın pik değerini akarsu yatağı için emniyetli debinin altında tutacak şekilde, sistem tarafından ötelenmesi ve aynı zamanda sistemden beklenen optimal faydanın (enerji üretimi v.s.) sağlanması söz konusu olacaktır. Taşkın hidrografı sisteme, akarsu debisinin (10^6 m^3), zamanla (saat veya gün) değişimi şeklinde veri olarak girilecektir. Bu durumda, diğer ara (barajlar arasındaki) havzalardan beklenen akımlar da (ara havza hidrografı) taşkın hidrografı ile birlikte veri olarak girilecektir. Eğer sistemi oluşturan barajlar arasındaki havzalar oldukça büyükse (veya büyük debili akarsu kolları mevcutsa) sisteme giriş için seçilen taşkın hidrografından farklı bir ara havza hidrografı, sistemin taşkın kontrolü işlevini yerine getirmesi açısından daha kritik bir durum arz edebilir. Bu durumda, giriş akımı taşkın hidrografında olduğu gibi, ara havzalar için seçilen taşkın hidrografının da gözönünde bulundurulması ile sistem için belirli bir tekerrür aralığında en kritik taşkın durumunu belirlemek gerekir. Diğer taraftan, taşkın kontrolü için elde edilen kısa süreli optimal işletme politikalarının, sistemin uzun süreli işletme politikaları ile bütünleştirilmesi açısından, yılın taşkın olması muhtemel değişik ayları için farklı taşkın hidrografı kul-

lanılabılır. Buradan elde edilen baraj kritik su seviyelerinin sistemin uzun süreli aylık optimal işletme politikaları ile birlikte gözönünde tutulması gerekecektir. Bu durum, özellikle tekerrür aralığı kısa olan (ve aylık ortalama akımlar çerçevesinde taşkın özelliği taşımayan) debiler için, taşkın kontrolundan daha çok, olağan kısa süreli optimal işletme açısından önem taşımaktadır. Tekerrür aralığı çok büyük taşkınlar ise, sistemin taşkın kontrolü amaçlı boyutlandırılmasında önem taşıyacaklardır.

Sistemin, akarsu yatağında meydana gelebilecek düşük akımların takviyesi için kullanılması durumunda da, taşkın kontrolü için uygulanan yaklaşımın tersi sözkonusudur. Diğer bir ifade ile, sistemin, kuraklık süreleri boyunca nehir yatağındaki akımı belirli bir minimum değer üzerinde tutacak şekilde takviye etmesi beklenenecek, aynı zamanda da sistem faydasının optimal olması sağlanacaktır. Dolayısıyla, düşük akımların takviyesi konusu, optimal taşkın kontrolü formülasyonuna çok benzer bir yöntemle ele alınabilecektir.

Burada, uzun süreli optimal planlama için öngörülen dinamik programlama optimizasyon modelinin sistemi tanımlayan (1)-(8) nolu ifadeleri geçerliliğini koruyacaktır (Sadece, kullanılan zaman aralığı saat veya gün olarak seçilecektir). Amaç fonksiyonu ise, düşünülen planlama kriterleri çerçevesinde yeniden belirlenecektir.

Amaç fonksiyonu, ilk adımda, kritik taşkın durumu için sistemin çıkış debisinin (nehir yatağına bırakılan sistem tarafından ötelenmiş taşkın debisi) işletme süresi içindeki maksimum değerinin enküçüklenmesi şeklinde seçilecektir. Kritik taşkın durumunun, en son barajdan nehir yatağına bırakılan çıkış debisi için sözkonusu olduğu kabul edilirse ($i=n$), bu durumda amaç fonksiyonu

$$\text{Min} \left[\text{Max}_{t=1, \dots, m} (Q_{nt} + R_{nt}) \right] \quad (14)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, barajlardaki başlangıç su seviyeleri, taşkın durumunun sözkonusu olduğu ay için öngörülen normal su seviyeleri olarak alınacaktır. Eğer taşkın debisi çok yüksek ise, (6) nolu eşitsizliğin belirlediği

$$(Q_{nt} + R_{nt}) \leq W_{n\max}, \quad t=1, \dots, m \quad (15)$$

kısıtını da sağlayan bir çözüm elde edilemeyebilir. Böyle bir durumda (3) nolu eşitsizlikte verilen barajların maksimum depolama kapasitesi kısıtları, barajların başlangıç su seviyelerini yeniden belirlemek (ve gerekiyorsa, başlangıç su seviyelerini minimum hacımlara kadar düşürebilmek) amacıyla, $(S_{i\text{nor}} - S_{i\text{min}})$ kadar artırılarak, üst sınırı farazi olan,

$$S_{i\text{min}} \leq S_{it} \leq S_{i\text{max}} + (S_{i\text{nor}} - S_{i\text{min}}) \quad \begin{matrix} i=1, \dots, n \\ t=1, \dots, m \end{matrix} \quad (16)$$

kısıtlarıyla yeniden çözüm aranacaktır (Burada $S_{i\text{nor}}$, öngörülen işletme süresi içinde i-barajının normal su seviyesi olup, uzun süreli optimizasyon çözümünden elde edildiği kabul edilmektedir). Bu durumda elde edilen çözüm (15) nolu ifadedeki kısıtı da sağlıyorsa, sistemin taşkını emniyetli bir şekilde öteleyebileceği belirlenmiş olmaktadır. Bu çözüm için, (16) nolu ifadeye göre baraj maksimum hacimlerinin üzerinde gereken ilave hacimler "zahiri" başlangıç su seviyeleri olarak alınan normal su seviyelerinden düşülerek, çözümü sağlayan gerçek başlangıç su seviyeleri de elde edilmiş olur. Eğer (15) nolu kısıtı sağlayan bir çözüm elde edilemiyorsa, bu kısıtın serbest bırakılmasıyla bir çözüm elde edilebilir. Bu çözümde taşkın zararını minimuma indirgeyen

$$W_{n\max}^* = \text{Min} [\text{Max}_{t=1, \dots, m} (Q_{nt} + R_{nt})] \quad (17)$$

değeri elde edilmekte ve (15) nolu kısıt serbest bırakıldığından,

$$(Q_{nt} + R_{nt}) \leq W_{n\max}^* \quad t=1, \dots, m \quad (18)$$

ifadesi ikame edilmiş olmaktadır. Bu durumda, yukarıdaki çözüm irdeleme-leri gözönünde tutularak (15) veya (18) nolu ifadelerdeki kısıtlar ve buna göre belirlenen başlangıç su seviyeleri kullanılarak üretilen toplam enerjiyi maksimum yapacak bir çözüm elde edilecektir. Burada, amaç fonksiyonu

$$\text{Max} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n P_{it} \quad ; \quad \left(\sum_{i=1}^n P_{it} \geq P_G, \quad t=1, \dots, m \right) \quad (19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu yaklaşım çerçevesinde, muhtemel taşkın durumları için sistem tarafından optimal taşkın kontrolü sağlamakla birlikte, aynı zamanda da kısa süreli optimal işletme politikaları sistemden elde edilecek faydayı en büyükleyecek şekilde belirlenmektedir.

Düşük akımların takviyesi için de, yukarıdakine benzer bir yaklaşım uygulanabilir. Bu çerçevede, amaç fonksiyonu olarak, kritik düşük akım durumu için sistemin çıkış debisinin en küçük değerinin enbüyüklenmesi seçilecektir. Dolayısıyla, (14) nolu ifade yerine

$$\text{Max} \left[\text{Min}_{t=1, \dots, m} (Q_{nt} + R_{nt}) \right] \quad (20)$$

ifadesi kullanılacaktır. Buradan elde edilecek ilk çözüm sonucundaki irdemelere göre, barajlardaki su seviyeleri için (16) nolu kısıt yerine

$$S_{i\min} - (S_{i\max} - S_{i\text{nor}}) \leq S_{it} \leq S_{i\max}, \quad \begin{matrix} i=1, \dots, n \\ t=1, \dots, m \end{matrix} \quad (21)$$

yazılarak barajlardaki başlangıç su seviyeleri (gerektiğinde maksimum hacme kadar yükseltilebilecek şekilde) yeniden belirlenecektir. Eğer bu durumda da (6) nolu eşitsizliğin belirlediği

$$W_{nt} \leq (Q_{nt} + R_{nt}), \quad t=1, \dots, m \quad (22)$$

kısıtı sağlanamıyorsa, optimal çözümden elde edilen

$$W_{nt}^* = \text{Max} \left[\text{Min}_{t=1, \dots, m} (Q_{nt} + R_{nt}) \right] \quad (23)$$

değeri (22) nolu ifadede ikame edilerek, (19) nolu ifade ile birlikte, düşük akım takviyesini optimal olarak sağlayan ve aynı zamanda enerji faydasını enbüyükleyen optimal işletme politikaları için çözüm elde edilir.

Sistemin uzun süreli optimal işletme politikaları ile, belirli dönemler için elde edilen optimal taşkın kontrolü ve düşük akımların takviyesine yönelik kısa süreli optimal işletme politikaları bütünleştirilerek, gerçek optimale daha yakın ve kritik durumlarda daha geçerli olabilecek

işletme kuralları belirlenebilecektir. Bu yaklaşımın daha ileri bir aşamada uygulanmasıyla, sistemin bilgisayarlar aracılığıyla doğrudan kontrol ile gerçek zaman işletilmesi için bir temel oluşturulacağı öngörülebilmektedir. Bir taraftan uzun süreli optimal işletme kuralları gözetilirken, diğer taraftan da kısa süreli optimizasyon uygulamasının mevcut en son hidrolojik ve meteorolojik verilere göre sık sık yenilenen tahminlerle tekrarlanması, gerçek zaman işletmeye yaklaşan bir durum olacaktır.

Gerçek zaman işletme için çeşitli yaklaşımlar (20,21,22,23,24) kullanılmakla birlikte, bunun en iyi şekilde yapılabilmesi için hidrolojik ve meteorolojik verilerin (yağış-yüzeysel akış-yeraltı suyu ve hava sıcaklığı, nemlilik oranı gibi) ve bunlar arasındaki ilişkilerin sağlıklı bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu takdirde, sistemin belirli bir andaki optimal işletme politikası, yapılan sürekli ölçümler aracılığıyla (mevcut kayıtlardan da yararlanarak) gelecek kısa bir süre için elde edilen en iyi tahminlere dayalı verilerle belirlenir. Fakat, bu politikanın mevcut zamana ait ilk adımı uygulanır. Daha sonraki zaman aralığına geçildiğinde, elde edilen son verilerle aynı işlem tekrarlanacaktır. Böylece, doğrudan kontrol ile gerçek zaman işletme durumunda en ayrıntılı optimizasyon yapılabilmekte ve sistemin mevcut ve beklenen şartlara en uygun işletilmesi sağlanmış olmaktadır.

Bu çerçevede, oldukça kısa zaman aralıkları ile hidrolojik ve meteorolojik verilerin elde edilebilmesi ve ileriye yönelik tahmin yeteneklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun için de, ölçümü yapılan fiziksel büyüklüklerle, hidrolojik ve meteorolojik verileri ilişkilendiren modellerin kullanılması gereği ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar, elde edilen tahminlerin güvenilirliği ile gerçek zaman işletme süresi (operation horizon) arasında yakın bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, gerek yapılan ölçümler ve gerekse kullanılan modeller açısından, bu tahminlerin güvenilirliğinin artırılması önem taşımaktadır. Uydulardan elde edilen bilgilerin, yeryüzünde yapılan bazı ölçümlerle birlikte kullanılmasının, bu yönde önemli katkıları olacağı beklenebilir.

Gerçek zaman işletme, bir akarsu havzasının optimal işletilmesinde olduğu gibi, ülke çapında zaman içinde değişen enerji taleplerini optimal olarak karşılamak üzere, birçok akarsu havzasının ve elektrik üreten termik santrallerin ve diğer tesislerin birlikte işletilmesi ve bir merkezden kontrolü için de kullanılabilir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada tanımlandığı şekilde kurulan genel amaçlı bir havza planlaması sistemi çerçevesinde, akarsu kolları, akım gözlem istasyonları ve barajların sayısı, tipi, konumları açısından öngörülebilecek herhangi bir konfigürasyon için değişik sistem seçeneklerinin incelenmesi, sadece verilerin değiştirilmesi ile mümkün olacaktır. Bu yaklaşım, sistemin tümü için uygulanabileceği gibi, zaman içinde değişebilecek çeşitli aşamaların değerlendirilmesi ve optimal politikaların belirlenmesi için de kullanılabilir.

Çok barajlı sistemlerin uzun süreli planlanması, sistemin ekonomik ömrü boyunca elde edilecek faydanın optimal olmasını amaçlamaktadır. Dolayısıyla sistemin optimal olarak boyutlandırılması ile uzun süreli optimal işletme politikalarının ve bunlara karşılık olan risklerin belirlenmesi, bir bütün olarak uzun süreli planlama çerçevesinde ele alınmaktadır.

Kısa süreli optimal planlamada ise, bir taraftan daha ayrıntılı bir işletme optimizasyonu yapılırken, diğer taraftan da sistemin optimal taşkın kontrolü ve düşük akımların takviyesine yönelik boyutlandırılmasında etken olacak sonuçlar elde edilmektedir. Belirli bir amaca yönelik olarak elde edilen kısa dönem işletme politikasının en önemli noktasının, sistem içindeki barajların başlangıç su seviyelerinin tespiti olduğu söylenebilir. Zira, istenilen amacın ne ölçüde gerçekleştirilebileceğini (mesela bir taşkın dalgasının ne ölçüde sönmünebileceğini) belirleyen en önemli faktör bu olmaktadır. Bu durumda, uzun süreli optimal işletme politikasıyla belirlenen barajların aylık ortalama normal su seviyelerinin, belirli tekerrür aralıklarındaki taşkınlar ve kuraklık periyodları gibi kritik olaylar için kısa süreli optimizasyondan elde edilen başlangıç su seviyeleriyle birlikte gözönünde tutulmaları gerekecektir. Böyle-

ce, eldeki en son hidrolojik ve meteorolojik verilere göre sık aralıklarla yenilenecek tahminlerle barajlardaki su seviyeleri, mevcut ve muhtemel durumlara en uygun şekilde optimal olarak belirlenebilecektir. Bu yaklaşım, esas itibariyle gerçek zaman optimal işletmeye çok yakın bir uygulama olacaktır.

Burada sunulan kısa süreli sistem optimizasyonu yaklaşımında, barajlardan (dolusavak veya dipsavaklardan) bırakılan debinin kapaklar vasıtasıyla kontrol edilebildiği varsayılmıştır. Bunun geçerli olmadığı durumlarda, bırakılan debinin barajdaki su miktarının bir fonksiyonu olarak tanımlanması gerekir. Ayrıca, taşkın zararının, taşkın debisinin pik değeri ile ölçüldüğü varsayılmıştır. Genel olarak taşkın zararı, pik debinin yanı sıra, yıl içindeki zamana, akım hızına, su baskının süresine ve derinliğine, ve taşınan çamur ve sürüntü maddelerinin miktar ve niteliğine de bağlı olmaktadır. Burada en önemli faktör pik debi olmakla birlikte, istenildiği takdirde diğer faktörlerin de belirli ölçülerde analize dahil edilmeleri mümkün ve yararlı olabilir.

KAYNAKLAR

1. Major D.C., Lenton, R.L. "Applied Water Resource Systems Planning", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1979.
2. Saha, S.K., Barrow, C.J. (Eds.) "River Basin Planning: Theory and Practice", John Wiley Sons, Chichester-England, 1981.
3. Yaron D., Tapiero, C.S. (Eds.) "Operations Research in Agriculture and Water Resources", North Holland Pub.Comp., Amsterdam, 1980.
4. Loucks, D.P., Stedinger, J.R., Haith, D.A. "Water Resource Systems Planning and Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
5. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün muhtelif yayınları; özellikle: DSI-Etüd ve Plan Dairesi Başkanlığı, "Su ve Toprak Kaynakları Geliştirme Projeleri Planlama Semineri", DSI Matbaası, Ankara, 1986.
6. Fults, D.M., Hancock L.F. "Optimum Operations Model for Shasta-Trinity System", J.Hyd.Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Vol.98, pp.1497-1514. September 1972.

7. Jacoby, H.D., Loucks D.P. "Combined Use of Optimization and Simulation Models in River Planning", Water Resources Research, Vol. 8, No. 6, pp.1401-1414, December 1972.
8. Trott, W.J., Yeh W.W-G. "Optimization of Multiple Reservoir Systems" J.Hyd. Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Vol.99, HY10, pp.1865-1884, October 1973.
9. Askew, A.J. "Chance Constrained Dynamic Programming of Water Resource Systems", Water Resources Research, Vol. 10, No. 5, pp.1099-1106, December 1974.
10. Parikh, S. C. "Linear Dynamic Decomposition Programming of Optimal Long Range Operation of a Multiple Multi-Purpose Reservoir System", The International Conference on Operational Research, Boston, 1966.
11. Revelle, C., Joeres E., Kirby W. "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design:1.Development of the Stochastic Model", Water Resources Research, Vol. 5, No. 4, pp.767-777, August 1969.
13. Dorfman, R. "Formal Models in the Design of Water Resource Systems", Water Resources Research, Vol.1, No. 3, pp.329-336, 1965.
14. Venson, D.E.Moseley J.C. "Simulation/Optimization Techniques for Multi-Basin Water Resource Planning", Water Resources Bulletin, Vol.6, No.5, pp.725-736, 1970.
15. Sigvaldson, O.T. "A Simulation Model for Operating a Multipurpose Multi-reservoir System", Water Resources Research, Vol.12, No.2, pp.263-278, April 1976.
16. Sert, M. "Optimal Hydroelectric Energy Production From a Series of Power Plants", Application of Systems Analysis to Water Resources Management Workshop, Istanbul Technical University, 30 May-3 June 1983.
17. Sert, M. "Havza Planlamasında Genel Amaçlı Sistem Yaklaşımı", DSİ Su ve Toprak Kaynakları Planlama Semineri, Çağrılı Bildiri, Adana, 31 Mart - 4 Nisan 1986.
18. Thomas, H.A., Fiering M.B. "Mathematical Synthesis of Streamflow sequences for the Analysis of River Basins by Simulation, Chap. 12,

- Design of Water Resource Systems", A.Maass, M.Hufschmidt, R.Dorfman, H.Thomas, S.Marglin and F.Fair, Harward University Press, Cambridge, Massachusetts, 1962.
19. Fiering M.B. "Multivariate Techniques for Synthetic Hydrology", J.Hydraulics Div., Proc. Am. Civil Engrs., Vol.90, HY5, pp.43-60, 1964.
 20. Windsor, J.S, "Optimization Model for the Operation of Flood Control Systems", Water Resources Research, Vol.9, No.5, pp.1219-1225, October 1973.
 21. Becker, L., Yeh, W.W.G. "Optimization of Real Time Operation of a Multiple-Reservoir System", Water Resources Research, Vol.10, No.6, pp.1107-1112, December 1974.
 22. Yeh, W.W.G., Becker.L., Chu, W.S. "Real-Time Hourly Reservoir Operation", J.Water Resources Planning and Management Div.Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Vol.105 No.WR2, pp.187-202, September 1974.
 23. Houck, M.H. "Real-Time Reservoir Operations by Mathematical Programming" Water Resources Research, Vol.18, No.5, pp.1345-1351, October 1982.
 24. Can, E.K., Houck, M.H. "Real-Time Reservoir Operations by Goal Programming", J.Water Resources Planning and Management Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs. Vol.110, No.3, pp.297-309, July 1984.