

ÖNGÖRÜCÜ KONTROL MODELİ İLE SULAMA KANALLARINDA AKIMIN REGÜLASYONU

Ömer Faruk DURDU¹

ÖZET

Bu çalışmada açık kanallarda akışı regüle etmek için öngörücü kontrol modeline dayalı bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Kanallardaki akışı ifade eden doğrusal olmayan kısmi türevsel denklemler doğrusal model haline getirilmiştir. Öngörücü kontrolde bu doğrusal model kullanarak su seviyesindeki sapmaların ve kontrol hareketindeki dalgalanmaların en aza indirgenmesi hedeflenmiş ve bunu başarmak içinde gelecekteki kontrol hareketleri referans alınmıştır. Öngörücü kontrol probleminde amaç fonksiyonu olarak doğrusal karesel fonksiyon kullanılmıştır. Geliştirilen öngörücü kontrol modelinin performans değerlendirmesi için 7 kapaklı ve 6 havuzlu bir açık kanal örneği ele alınarak bu modelin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyondan elde edilen sonuçların geçerliliğini ispatlamak için bu örnek kanala doğrusal karesel regülatör ve doğrusal Gaussian teknikleride uygulanmıştır. Her üç kontrol modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve önemli bir farkın olmadığı görülmüştür. Uygulanmasının kolay olması, fazladan bir durum kestiricisine gerek duymaması ve suyun mabadan mansap kısmına ulaşmasındaki gecikme zamanını çok iyi kontrol etmesi nedeniyle öngörücü kontrol tekniği diğer kontrol tekniklerine bir alternatif model olarak kabul edilmiştir.

Anahtar kelimeler: açık kanallarda akış, öngörücü kontrol modeli, otomatik kontrol pamuk

Regulation of flow in irrigation canals via model predictive control

ABSTRACT

In this study, a model predictive controller is developed for regulation of flow in open-channels. The equations of open-channel flow were linearized using a finite-difference approximation of the original nonlinear partial differential equations. This linear model was used to design a model predictive control for minimizing deviations in flow depth and changing in gate openings. To accomplish this, future control actions in the system was taken into account. As an objective function, a linear quadratic function was used. An example problem with 7 gates and 6 pools was simulated for evaluation purposes. To verify the results, also linear quadratic regulator and linear quadratic Gaussian controller was designed and simulated with the same example canal. The results from linear quadratic models were compared to the results from model predictive control. There was no significant differences between the results of the models. Model predictive control can be an alternative to the other control techniques because it is easy to apply to open-channels, it does not need an estimator, and it can handle delay-times in open-channels.

Keywords: open-channel flow, model predictive control, automatic control

GİRİŞ

Otomatik kontrol kompleks yapıya sahip su dağıtım ağlarını modernize eden ve bu ağların işletim verimliliğini artıran bir sistemdir. Sulama sistemleri ve şehir

şebekeleri gibi su dağıtım ağları su kullanıcılarına yeterli miktarda suyu yeterli zamanda ulaştırma özelliğine sahip olmalıdır. Bunu başarmak için dağıtım sistemine uygun bir kontrol tekniğinin seçilmesi

¹ Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Aydın

gerekmektedir. Kontrol sistemlerinin açık kanallarda kullanılması suyun daha iyi dağıtımını ve idaresini sağladığı gibi dağıtım sisteminde meydana gelecek kayıpları da minimize edebilecek şekilde modernize eder. Yeterli suyun doğru zamanda çiftçiye ulaştırılması tarım ürünlerinde kuşkusuz çeşitliliği ve üretimi arttıracaktır. Bu nedenle besleme-destekli işletim sistemine sahip açık kanallarda su kullanıcılarına istedikleri miktarda ve zamanda su sağlamak mümkün olmayabilir. Fakat isteğe-bağlı işletim sisteminde su kullanıcıları gerekli suyu yeterli miktarda ve doğru zamanda elde edebilirler. Yerel yönetimlerin su dağıtım şebekeleri bu işletim sistemine uygun olarak çalışır. Su kullanıcıları açısından esnek ve yüksek performanslı bir metot olmasına rağmen, isteğe-bağlı işletim sistemi su taleplerinde önceden belli olmayan değişimlerden dolayı idaresi ve kontrolü çok zor olan bir işletim sistemidir. İsteğe-bağlı işletim sisteminde önceden bilinmeyen taleplerin karşılanması için iki farklı metot uygulanmaktadır: 1) havuzun (iki kapak arasında kalan kısım) mansap kısmında sabit-seviye kontrolü 2) havuzda sabit-hacim kontrolü. Bu çalışmada kullanılan kontrol tekniklerinde sabit-seviye metodu kullanılmıştır. Lateral kanalın havuzun mansap kısmındaki kapağa yakın olması durumunda sabit-seviye kontrolü iyi bir performans gösterir ve lateralın kapağından geçen debi bir orfis eşitliği ile bulunur. İsteğe-bağlı kanal işletim sistemlerinde kontrol sistemleri tasarlanırken su talebinde önceden bilinen veya bilinmeyen değişikliklerin sistem değişkenleri (debi ve su seviyesi yükseltisi) üzerine olan etkisi hesaplanmalı ve geribesleme döngüsünde kullanılmalıdır. Son yirmi yılda, açık kanallardaki düzensizliklerin (talep değişimi, dışarıdan akım vs.) sistem değişkenlerinde oluşturduğu sapmalar ve kapak hareketi (aşağıya veya yukarıya) arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak anlatan çeşitli kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Corrigan *vd.* (1982) ve Balogun (1985) açık kanallarda akış regülasyonu için optimal kontrol teorisini uygulamışlardır. Reddy (1995, 1996,

2004a, 2004b) kanaldaki durum değişkenlerinin kestirilmesi için Kalman kestiricisi kullanmış ve bunu doğrusal karesel kontrol metodu ile beraber kullanmıştır. Liu *vd.* (1995) ve Reddy (1999) çok-havuzlu kanallara doğrusal karesel Gaussian tekniği uygulamış ve durum değişkenlerini bir kestirici tarafından tahmin etmişlerdir. Durdu (2003, 2004c) açık kanalların önceden bilinmeyen su taleplerine karşı daha esnek ve dayanıklı (robust) davranabileceği bir kontrol algoritması geliştirmiştir. Yukarıda açıklanan algoritmalarda genellikle doğrusal karesel regülatör veya doğrusal karesel Gaussian metotları kullanılmıştır. Doğrusal karesel regülatör büyük çaplı kanallar için uygun olmayıp pahalı bir kontrol sistemidir. Bu kontrol tekniğinde tüm durum değişkenlerinin (akış debisi ve su seviyesi yükseltisi) kanal boyunca ölçüldüğü varsayılmaktadır. Büyük çaplı su dağıtım kanallarında bu tip bir uygulama mümkün değildir. Bu nedenle bir kestirici (filtre) kullanılarak durum değişkenleri tahmin edilmiş ve doğrusal karesel Gaussian metot geliştirilmiştir. Kestiricinin (filtrenin) tasarımı ve hesaplamaların uzun zaman alacağı düşünüldüğü zaman kestiriciye ihtiyaç duymayan ve hesaplama işlemlerinde tasarruf sağlayan bir diğer kontrol tekniği öngörücü kontrol metodu kullanılmıştır. Daha önemlisi öngörücü kontrol tekniği, açık sulama kanalları ile özdeşleşmiş olan suyun mabdan mansaba ulaşımında gecikme problemini kolay çözüme özelliğine sahiptir. Sulama kanallarında bir havuz içerisindeki kapağın pozisyonunun değişmesi diğer havuzlardaki su seviyesini etkilediğinden bu sistemler bağlanmış bir yapıya sahiptir. Öngörücü kontrol metodunda havuzlar arasındaki bu bağlaşım otomatik olarak çıktı tahmininde göz önüne alınır. Malaterre ve Rodellar (1997) kanallarda akış kontrolü için geliştirdikleri öngörücü modelde yine durum değişkenlerinin tahmini için bir kestirici kullanmışlardır ve buda hesaplamada zaman kazanımını önlemiştir. Wahlin (2004) açık kanalların kontrolü için bir öngörücü model geliştirmiş fakat bu çalışmasını diğer kontrol

teknikleri ile karşılaştırarak geçerliliğini kanıtlayamamıştır. Açık kanalların genel bir özelliği olan mambadan mansaba suyun gecikmesi özelliği öngörücü kontrol tekniği ile çok rahat kontrol edilebilir. Bu çalışmanın amacı açık kanallarda akış regülasyonunda uygulaması daha kolay olan ve hesaplardan zaman kazandıran öngörücü kontrol metodunu uygulamak ve elde edilen sonuçları diğer kontrol teknikleri (doğrusal karesel ve doğrusal Gaussian) karşılaştırıp öngörücü metodun bu tekniklere bir alternatif olabileceğini göstermektir.

MATEMATİKSEL MODELLEME

Açık kanalların işletiminde su kullanıcılarına yeterli miktarda suyun verilebilmesi için lateral kanallardaki su seviyesinin istenilen hedefte olmasına dikkat edilmeli ve ana kanal içerisindeki kapaklarında açılıp kapanması laterallerdeki su seviyesine göre olmalıdır. Laterallerde istenilen derinliği sağlayabilmek için ana kanal içerisindeki su seviyesinin hedeflenen değerde olmasına özen gösterilmelidir. Bu durum bir süreç kontrol problemi olarak tanımlanıp gerçek zamanlı geribeslemeli kontrol tekniği ile çözülebilir. Bu çalışmada kullanılan yatışkan olmayan akış eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = gS_0 - gS_f - g \frac{\partial x}{\partial y} \quad (2)$$

bu eşitliklerde Q = debi m^3/s ; A = ıslak alan, m^2 ; q_l = lateral akım, m^2/s ; y = su derinliği, m ; t = zaman, s ; x = kanalın uzunluğu, m ; g = yerçekimi ivmesi, m^2/s ; S_0 = kanal taban eğimi (m/m); n = Manning pürüzlülük katsayısı ($s/m^{1/3}$); ve S_f = enerji çizgisi eğimidir, m/m . Eşitlik (1) de ifade edilen lateral flow q_l aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir (Reddy 1996):

$$q_l = \frac{\sum_{n=1}^{O_{i,j}} q_{i,n}}{s} \quad (3)$$

bu eşitlikte $s = \Delta x$, eğer ileri-yönde-fark tekniği veya geri-yönde fark tekniği kullanılıyorsa; $s = 2\Delta x$, eğer merkezi-fark tekniği kullanılıyorsa; Δx = boğum mesafesi, m ; $q_{i,n}$ = havuz i lateral n 'de debi, m^3/s ; ve $O_{i,j}$ = havuz i boğum j 'de lateral sayısıdır. Eşitlik (1) ve (2)'ye sonlu-farklar tekniği uygulanarak bir çift adi türevsel denklem edilmiş ve herhangi bir örnekleme aralığı k için sistemin durum-değişkeni eşitliği çıktı (output) eşitliği ile birlikte aşağıdaki şekilde yazılmıştır:

$$\delta x(k+1) = \Phi \delta x(k) + \Gamma \delta u(k) + \Psi \delta q(k) \quad (4)$$

$$\delta y(k) = H \delta x(k) \quad (5)$$

yukarıdaki eşitliklerde $\Phi = (A_L)^{-1} * A_R$, $\Gamma = (A_L)^{-1} * B$, ve $\Psi = (A_L)^{-1} * C$, $\delta y(k) = r \times l$ çıktı vektörü (ölçülmüş değişkenler), $H = r \times l$ çıktı matrisi, ve $r =$ çıktı sayısı.

Doğrusal Karesel Gaussian Regülatör

Doğrusal karesel Gaussian metodu esnek ve dayanıklı bir kontrol sisteminin tasarımında önemli bir tekniktir. Kontrol sistemine (doğrusal karesel kontrol) durum-değişken kestiricisi entegre ederek elde edilen kullanışlı ve ekonomik bir kontrol tekniğidir. Doğrusal karesel kontrol tekniği bir optimizasyon problemi olup maliyet fonksiyonu J 'nin minimize edilmesini amaçlamaktadır. Maliyet fonksiyonu şöyle tanımlanabilir:

$$J = \sum_{i=1}^{K_\infty} [\delta x^T(k) Q_{x,x} \delta x(k) + \delta u^T(k) R_{u,u} \delta u(k)] \quad (6)$$

bu optimizasyon işlemi gerçekleştirilirken aşağıdaki kısıtlama eşitliğinde göz önüne almak gerekir:

$$-\delta x(k+1) + \Phi \delta x(k) + \Gamma \delta u(k) = 0 \quad k=0, \dots, K_\infty \quad (7)$$

bu eşitlikte K_∞ = yatışkan durum kontrolünde kullanılan örnekleme aralığı sayısını; $Q_{x_{kl}}$ = durum maliyet ağırlık matrisini; ve R_{mxm} = kontrol maliyet ağırlık matrisini ifade eder. Q_x ve R matrisleri simetrik olup genellikle köşegen matris olarak seçilirler ve köşegen elementlerin tümü pozitif veya sıfır olmasına dikkat edilir. Eşitlik (6)'deki ilk terim durum değişkenlerinin ortalama işletim şartından sapması durumunda ceza fonksiyonunu temsil eder. İkinci ifade ise kontrolün maliyetini ifade etmektedir. Eşitlik (6) ve (7) bir kısıtlanmış-minimizasyon problemi olup Lagrange çarpanı kullanılarak çözülebilir. Bu çözüm neticesinde bir çift bağlanmış fark denklemi elde edilir fakat bu denklemler geri yönde özyineleme ile çözülmelidir. Optimal yatışkan durumda, kanaldaki kapak açıklığında meydana gelen değişiklikler aşağıdaki eşitlikle bulunabilir:

$$\delta u(k) = -K\delta x(k) \quad (8)$$

bu eşitlik kontrol yasası olarak adlandırılır ve eşitlikteki K aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$K = [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \quad (9)$$

Eşitlik (9)'de S Ricatti eşitliğinin çözülmesi ile elde edilir.

$$\Phi^T S \Phi - \Phi^T S \Gamma [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi + Q_x = S \quad (10)$$

burada $R = R^T > 0$ ve $Q_x = Q_x^T = H^T H \geq 0$ olarak ifade edilir. Kontrol yasası eşitliği (8) başlangıçtaki denge koşullarından sapmış bir sistemi, dengeyi bozacak herhangi bir dış etki (örneğin su talebinden meydana gelen değişiklik) yok ise, denge konumuna tekrar getirebilir. Doğrusal karesel teknik tasarlandıktan sonra bir kestirici ile kombine edilerek doğrusal karesel Gaussian kontrol oluşturulur. Bu çalışmada kontrol sisteminde kullanılan kestirici (filtre) Kalman filtresidir. Daha öncede ifade edildiği gibi doğrusal karesel metot tüm kanal boyunca bütün boğumlarda durum-değişkenlerinin (akım miktarı ve akım derinliği) var olduğunu kabul etmektedir. Fakat tüm boğumlarda durum-

değişkenlerinin ölçülmesi mümkün olmadığından durum - değişkenlerinin ölçülmesi gerekmektedir ve bu da maliyeti artıracaktır. Bu nedenle her havuzda bir veya iki ölçüm yaparak akım derinliğini ve akım miktarını belirlemek ve daha sonra bir kestirici yardımı ile diğer durum - değişkenlerini tahmin etmek çok daha ekonomik olacaktır. Genellikle kanal kontrol sistemleri tasarımında her havuzun memba ve mansap kısımlarındaki akım derinliği ölçülür. Durum-değişkenleri ile ölçülen (çıktı) değişkenler arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\delta y(k) = H\delta x(k) + \eta(k) \quad (11)$$

burada $\eta(k)$ ölçüm esnasında meydana gelen hataları temsil eder. Yatışkan-durum şartlarında Kalman kestiricisinin sisteme girmesi ile birlikte sistem durum denklemi aşağıdaki gibi olacaktır

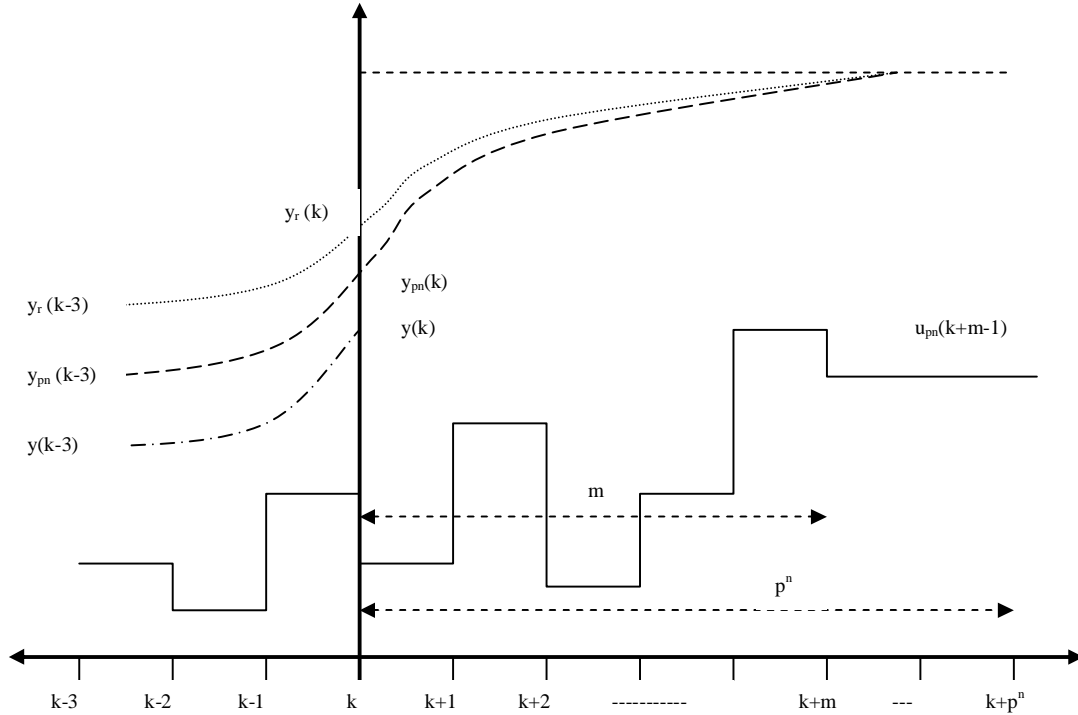
$$\delta x(k+1) = \Phi\delta x(k) + \Gamma\delta u(k) + I[\delta y(k) + H\delta x(k)] \quad (12)$$

Öngörücü Kontrol Tekniği

Yukarıda açıklanan doğrusal karesel tekniğin tasarımı için tüm durum-değişken verilerinin önceden biliniyor olması gerekliliği ve doğrusal karesel Gaussian tekniğinde ekstra olarak Kalman kestiricisine ihtiyaç duyulması bu tekniklere alternatif bir model aranmasına neden olmuştur. Öngörücü kontrol tekniğinin diğer tekniklere göre avantajları şöyle sıralanabilir: a) çok-değişkenli bir sisteme çabuk adapte uyum göstermesi; b) kontrol sistemi içerisinde oluşacak kısıtlamaları göz önüne alabilmesi; c) sistem içerisindeki bilinen düzensizlikleri yönlendirebilir ve kontrol edebilir olmasıdır. Öngörücü teknikte Eşitlik (4) ve (11) çeşitli çözüm teknikleri ile öngörücü modele uygun bir denkleme dönüştürülür. Öngörücü model durum vektörü $\delta x(k)$ 'dan bağımsız bir modeldir. Bu yüzden öngörücü modelde durum-değişkenlerinin tahmin edilmesi için herhangi bir kestiriciye ihtiyaç duyulmamaktadır. Buda

öngörücü modelin açık kanallarda uygulanmasında kolaylık sağladığı gibi hesaplamadan da zaman tasarrufu sağlamaktadır. Bu teknikte de diğer tekniklerde olduğu gibi sistem durum eşitlikleri (4,11) kullanılmıştır. Bu modelde uygulanan optimizasyon, sistem tarafından gösterilen tepkinin tahmin edilen değerler ile istenilen değerler arasındaki farkın minimize edilmesini amaçlar. Bu modelin tasarımında ilk olarak bir referans tepki gezingesi $y_r(k+1)$ belirlenir. Referans zingeye sistemin hedeflediği veya ulaşmak istediği zingeye olarak kabul edilir. Kontrol modeli gelecekteki örnekleme zamanı için sistemin tepkisi (çıkıtısını) y_{k+1} 'i tahmin eder. Diğer bir deyişle o anki örnekleme zamanı içerisinde gelecekteki örnekleme zamanının çıktı değişkenlerinin ($\delta y_{k+1}, \delta y_{k+2} \dots \delta y_{k+l}$) tahmin edilmesidir. Bu tahmin (öngörü) yapılırken bir önceki örnekleme zamanındaki kontrol girdileri ($\delta u_{k+1}, \delta u_{k+2} \dots \delta u_{k+l}$) kullanılır.

İçinde bulunulan örnekleme zamanından gelecekteki örnekleme zamanına kadar olan mesafe öngörü horizonu (p^n) olarak adlandırılır (Şekil 1). Kontrol horizonu m öngörü horizonundan az veya eşit olmalıdır. Optimizasyon işleminde kullanılan amaç fonksiyonu öngörücü (tahmin) horizonunda su seviyesi yükseltisindeki hataların ve kontrol hareketlerinin bir kombinasyonunun gelecekteki örnekleme zamanı içerisindeki kontrol hareketlerini düzenleyerek minimize etme işlemidir. Bu optimizasyon işleminde sistem içerisinde kontrol uygulaması sırasında oluşacak kısıtlamalarında göz önüne alınması gerekir. Bu teknikte kullanılan amaç fonksiyonu doğrusal karesel amaç fonksiyonunun bir benzeri olup aşağıdaki gibidir:



Şekil 1. Öngörücü kontrol stratejisi.

$$J_k = (\delta y_{k+1} - \delta y_{k+1})^T Q_w (\delta y_{k+1} - v_{k+1}) + \delta u_k^T R_w \delta u_k \quad (13)$$

bu eşitlikte δy_{k+1} referans tepki gezinmesi; δy_{k+1} gelecek örnekleme zamanında tahmin edilmiş çıktılar; δu_k gelecek örnekleme zamanında kontrol girdisinde sapmalar olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\delta y_{k+1} = [y_{k+1}^T \ y_{k+2}^T \ \dots \ y_{k+l}^T]^T \in \mathfrak{R}^{lr} \quad (14)$$

$$\delta y_{k+1} = [y_{k+1}^T \ y_{k+2}^T \ \dots \ y_{k+l}^T]^T \in \mathfrak{R}^{lr} \quad (15)$$

$$\delta u_k = [\delta u_k^T \ \delta u_{k+1}^T \ \dots \ \delta u_{k+l-1}^T]^T \in \mathfrak{R}^{lm} \quad (16)$$

Amaç fonksiyonundaki ilk ifade su seviyesi yükseltisinin istenilen düzeyde tutulması için düzenlenmiştir. İkinci ifade ise kapakların açılıp kapanmasını en aza indirmek için tasarlanmıştır. Eşitlik (13)'de Q_w su seviyesindeki hatalardan dolayı maliyet ağırlık matrisi ve R_w kontrol hareketlerinden gelen maliyet ağırlık matrisi olup aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$Q_w = \begin{bmatrix} Q_{w_k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q_{w_{k+1}} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & Q_{w_{k+l-1}} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{lr \times lr} \quad (17)$$

$$R_w = \begin{bmatrix} R_{w_k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{w_{k+1}} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & R_{w_{k+l-1}} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{lm \times lm} \quad (18)$$

yukarıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi ağırlık matrisleri Q_w ve R_w zamanın bir fonksiyonu olarak değişime uğrayan matrislerdir. Öngörücü kontrol tekniği tasarlanırken amaç fonksiyonu J_k 'yi kanal içerisindeki

kapakların açılıp kapanmasında oluşacak sapma $\Delta \delta u_k$ 'yi en aza indirgeyerek belli kısıtlamalar dahilinde aşağıdaki şekilde minimize etmek gerekir:

$$\min_{\Delta \delta u_k} J_k \quad (19)$$

bu minimizasyon işleminde kullanılan doğrusal kısıtlamalarda şöyle sıralanabilir:

$$\min_{\delta u_k} \leq \delta u_k \leq \max_{\delta u_k} \quad (\text{kapak açıklığı genişliği}) \quad (20)$$

$$\min_{\Delta \delta u_k} \leq \Delta \delta u_k \leq \max_{\Delta \delta u_k} \quad (\text{kapak açıklığındaki sapma}) \quad (21)$$

$$\min_{\delta y_{k+1}} \leq \delta y_{k+1} \leq \max_{\delta y_{k+1}} \quad (\text{çıktı veya ölçülen değişkenler}) \quad (22)$$

Bu kısıtlamalar bir eşdeğer doğrusal eşitsizlik şeklinde şöyle ifade edilir:

$$\Omega \Delta \delta u_k \leq b_k \quad (23)$$

burada Ω sabit bir matrisi temsil ederken,

$$\Omega = \begin{bmatrix} S \\ -S \\ I_{lr} \\ -I_{lr} \\ F \\ -F \end{bmatrix} \quad (24)$$

b_k ise yukarıda belirtilen kısıtlamalara bağlı bir vektörü ifade eder:

$$b_k = \begin{bmatrix} u_k^{\max} - cu_{k-1} \\ -u_k^{\min} + cu_{k-1} \\ \Delta \delta u_k^{\max} \\ -\Delta \delta u_k^{\min} \\ \delta y_{k+1}^{\max} - p_k \\ -y_{k+1}^{\min} - p_k \end{bmatrix} \quad (25)$$

Yukarıda belirtilen minimizasyon işleminin çözülebilmesi için öncelikle bir sonraki

zaman horizonunda çıktı değişkenlerinin y_{k+1} tahmin edilmesi gerekir:

$$\delta y_{k+1} = p_k^n + F\Delta \delta u_k \quad (26)$$

Eşitlik (26)'de F altüçgenel matris olup bilinen durum uzayı matrisinin bir fonksiyonudur. Ayrıca kontrol girdisi ile kontrol girdisinde meydana gelen sapma

arasında bir ilişkinin de formüle edilmesi gerekir:

$$\delta u_k = S\Delta \delta u_k + cu_{k-1} \quad (27)$$

bu eşitlikte S ve c aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$S = \begin{bmatrix} I_r & 0_r & 0_r & \dots & 0_r \\ I_r & I_r & 0_r & \dots & 0_r \\ I_r & I_r & I_r & \dots & 0_r \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ I_r & I_r & I_r & \dots & I_r \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{lm \times lm} \quad (28)$$

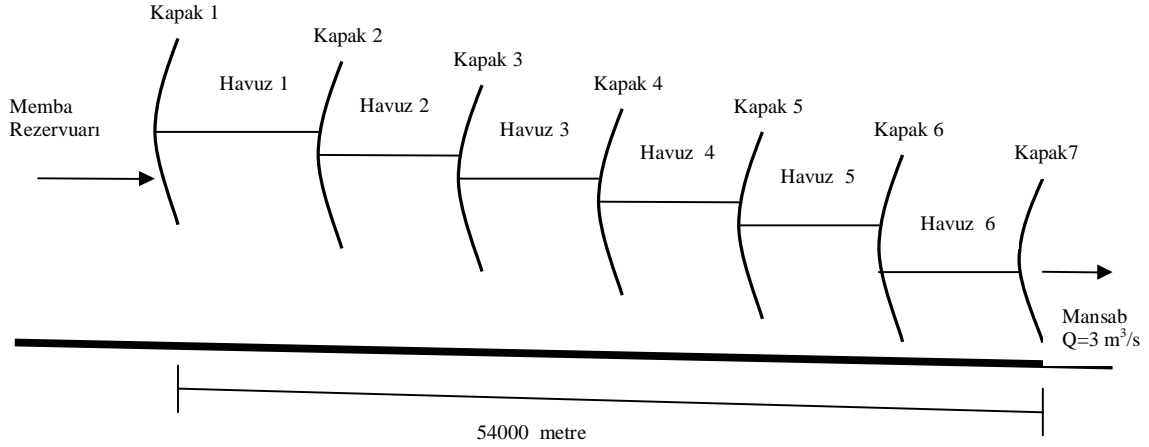
$$c = \begin{bmatrix} I_r \\ I_r \\ \cdot \\ \cdot \\ I_r \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{lm \times lm} \quad (29)$$

yukarıdaki eşitlikte I_r , birim matris olup $r \times r$ büyüklüğündedir ve O_r , de $r \times r$ boyutunda sıfır matrisidir

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada geliştirilen öngörücü kontrol algoritmasının performansı ve

kararlılığının test edilebilmesi için 7 kapaklı ve 6 havuzlu bir sulama kanalı örnek olarak seçilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Örnek kanalın boyutları.

Kanalın memba kısmında istenilen akım oranı $3 \text{ m}^3/\text{s}$ dir. Kanalın memba ve mansap kısmındaki rezervuarların sabit seviyeli rezervuarlar olduğu kabul edilmiştir. Taylor serisi ve Tablo 1' deki veriler kullanılarak bir çift doğrusal denklem elde edilmiştir. Bu doğrusal denklemler çıkartılırken laterallerin her havuzun mansap kısmında yer aldığı varsayılmıştır. Ayrıca sistemde kullanılan son kapak (kapak7) başlangıçtaki yatışkan durum değerinde kaldığı kabul edilmiştir. Çizelge 1'deki veriler ilk önce yatışkan durum değerleri

olan başlangıçtaki kapak açıklığı ve Φ, I, H matrislerinin değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken örnekleme zaman aralığı olarak 30 saniye düşünülmüştür. Yatışkan durum değerlerinin hesaplanmasından sonra kontrol algoritması doğrusal karesel regülatörü tasarlamaya başlamıştır. Bu regülatör tekniği kanal üzerindeki tüm boğumlarda durum-değişkenlerinin mevcut olduğunu varsayar. Bu çalışmada tüm kontrol teknikleri sabit-seviye kontrol yaklaşımına göre tasarlanmıştır.

Çizelge 1. Başlangıç verileri

parametreler	havuz 1	havuz 2	havuz 3	havuz 4	havuz 5	havuz 6
havuz uzunluğu (m)	9000	9000	9000	9000	9000	9000
Genişlik (m)	5	5	5	5	5	5
taban eğimi	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
şev eğimi	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
başlangıç lateral akım (m ³ /s)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
ilk akım derinliği, m	4	3.2	2.86	2.5	2.12	1.81
parametreler	kapak 1	kapak 2	kapak 3	kapak 4	kapak 5	kapak 6
kapak genişliği (m)	5	5	5	5	5	5
kapak akım katsayısı	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
kapağın ilk açıklığı (m)	1.13	1.37	1.16	0.97	0.85	0.63
sistemde düzensizlikler (m ³ /s)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Geribesleme döngüsü içinde doğrusal karesel teknik kanala uygulanarak sistemin kontrol metoduna tepki simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Geribesleme kazanç matrisi hesaplanırken kontrol maliyet ağırlık matrisi R 'nin boyutu 6 diğer bir deyişle kanaldaki kapak sayısı boyutunda seçilmiştir ve 100 değerine eşitlenmiştir. Durum maliyet ağırlık matrisi Q_x bir birim matrisi olup boyutu 85 olarak ayarlanmıştır ve bu rakamda oluşturulan sistemin boyutundan gelmektedir. Çünkü örnek kanal 49 boğuma bölündüğünden her bir boğum için bir çift doğrusal denklem elde edilmiştir. O halde sistemin boyutlarının 98 olması gerekirdi. Fakat sistem içerisinde 7 kapak ve 6 lateral olduğundan ve bu boğumlarda bir tek orfis eşitliği kullanıldığından sistemin boyutları 85 olarak hesaplanmıştır. Durum ve kontrol maliyet ağırlık matrisleri simetrik kesin artı matrisleridir, yani R ve Q_x 'nin özdeğerleri pozitif gerçek sayılardır. Q_x ve R matrislerinin hangi değerlerinin sistem üzerinde istenilen etkiyi yaratacağı önceden kestirilemez. Eğer bu matrisleri seçmek için herhangi bir çözüm yolu önerilmemişse o zaman deneme ve yanılma yolu ile bu matrisler bulunabilir. Bu nedenle ilk önce Q_x ve R matrisleri birim matris olarak seçilmiştir. Riccati eşitliğinde istenilen pozitif çözümün garantilenmesi için Q_x ve R matrislerinin pozitif kesin veya yarı-kesin matrisler ve sistemin kontrol edilebilir

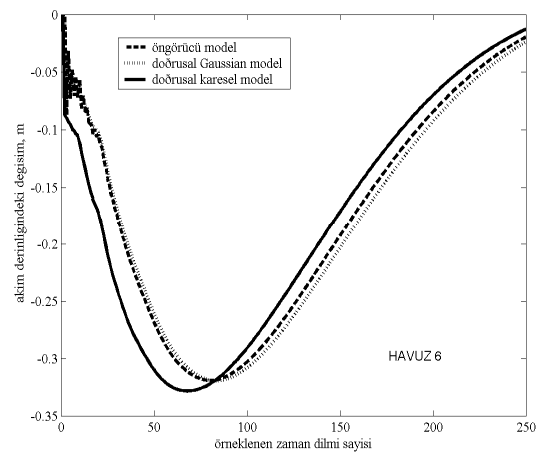
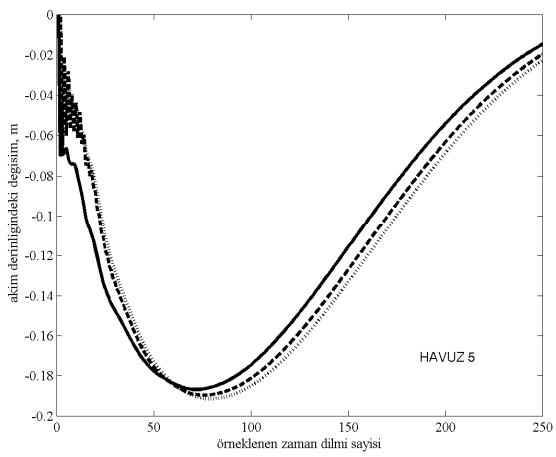
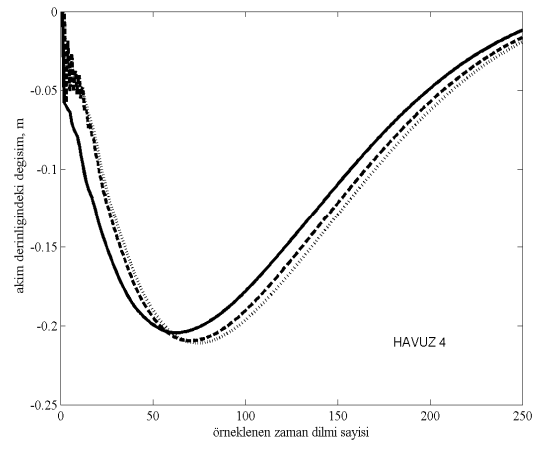
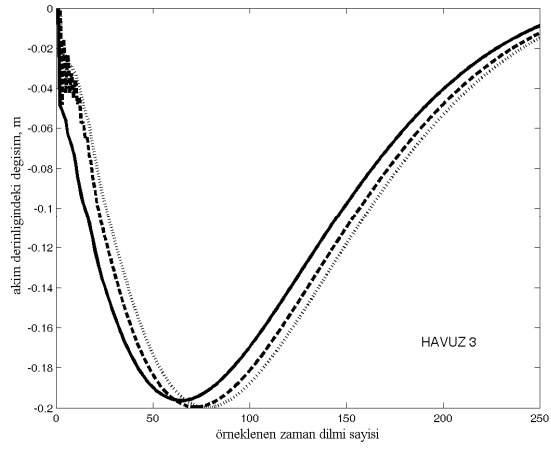
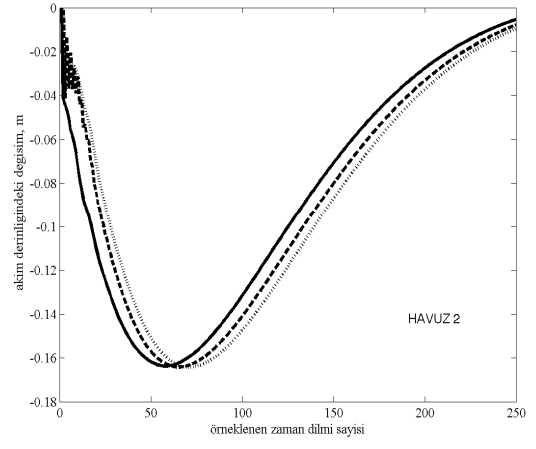
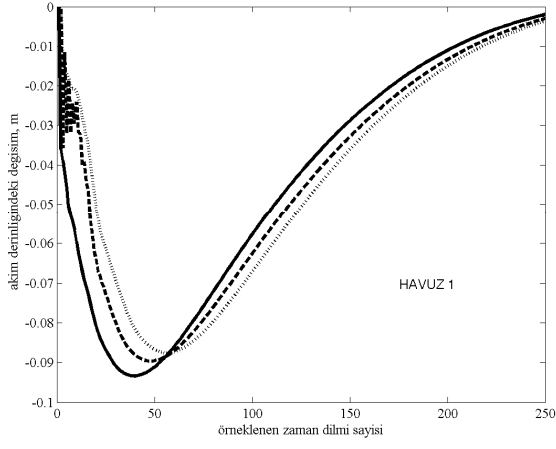
olması gerekir. Doğrusal karesel kontrol metodolojisinde gerek durum-değişkenleri gerekse kontrol girdileri amaç fonksiyonu üzerinde aynı öneme sahiptir. Bir diğer anlatımla durum-değişkenlerindeki sapmayı en aza indirmeye önemli olduğu gibi kontrol girdilerindeki değişimleri de sifıra yaklaştırmak o derece önemlidir. Q_x ve R matrislerinin sisteme uygun olarak seçilmesi ile birlikte geribesleme kazanç matrisi K hesaplanabilir. K 'nin hesaplanmasıyla sistemde meydana gelecek düzensizliklerde (su talebindeki değişim) göz önüne alınarak doğrusal karesel regülatörün simülasyonu yapılır. Yukarıda da ifade edildiği gibi doğrusal karesel metot tek başına çok pahalı bir sistem olup bu metodun tasarımı için bütün durum-değişkenlerinin ölçülmesi de mümkün değildir. Bu nedenle bir durum kestiricisinin tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan kestirici tipi Kalman kestiricisidir. Kalman kestiricisinin tasarımında optimal doğrusal regülatör tarafından üretilen kontrol girdisi $\delta u(k)$, ölçülmüş akım derinliği $\delta y(k)$, laterallerden gelen düzensizlik $\delta q(k)$, ve ölçüm düzensizliği $\eta(k)$ kullanılmıştır. Kestirici tasarlanırken laterallerden çekilen su verilerinde eksiklik olduğu düşünüldüğü varsayılarak sistemde rast gele düzensizlikler (talep oranında değişim) olduğu varsayılmış ve buda varyans düzeyinde ifade edilmiştir. Bu düzensizliklerin varyansı Q_{esti} , şu değerleri

içerir: $w_1 = 1^2$, $w_2 = 1.3^2$, $w_3 = 0.7^2$, $w_4 = 1.4^2$, $w_5 = 1.3^2$, ve $w_6 = 1.2^2$. Su talebini belirten gerçek zaman serileri kestirici tasarımında kullanılmayıp sadece zaman serileri verilerinin varyansı göz önüne alınmıştır. Açık kanallarda akım derinliğinin hesaplanmasında genellikle algılayıcılar kullanıldığından genellikle hata varyansları çok düşük olur. Kestirici için gerekli olan ölçüm hatalarının varyansı (RC) 0.0003'e eşit bir değer olarak kullanılmış ve bir birim matrisi olarak boyutlandırılmıştır. Kalman kestiricisi tasarlandıktan sonra doğrusal karesel regülatör ile kombine edilerek doğrusal karesel Gaussian regülatör elde edilmiştir. Verilen başlangıç değerleri ve sistem içerisindeki düzensizliklerde göz önüne alınarak doğrusal karesel Gaussian tekniği kanala uygulanmış, 250 zaman dilimi yani 7500 saniyelik bir süre için simülasyonu yapılmıştır. Doğrusal karesel ve doğrusal Gaussian tekniklerin tasarlanmasının ardından bu çalışmanın ana muhtevasını oluşturan öngörücü model altyordamı mevcut algoritmaya eklenmiştir. Bu altyordamda optimizasyon modeli tasarlanırken doğrusal karesel teknikle kullandığımız amaç fonksiyonunun bir benzeri kullanılmıştır. Öngörücü modelde öngörü horizonu p^n sistemin bütün dinamiğini kapsayacak şekilde uzun zaman dilimi olarak seçilmiştir. Kontrol horizonu m 'inde öngörü horizonuna eşit veya daha az bir zaman dilimini kapsamasına dikkat edilmiştir. Kontrol horizonunun kısa olması sistemin daha kararlı bir yapıya sahip olmasına olanak sağlar. Bu nedenle başlangıçta kontrol horizonunun öngörü horizonunun yarısı kadar olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi suyun memba rezervuarından mansap rezervuarına ulaşması yaklaşık 60 dakikayı almaktadır. Bu nedenle öngörü horizonunun 250 zaman dilimi olması ($\Delta t = 30$ s) diğer bir deyişle 125 dakika olması ile sistemin bütün dinamiğini kapsadığı düşünülmektedir. Bu nedenle kontrol horizonu m 'de öngörü horizonunun yarısı olduğu düşünülürse 125 zaman dilimi olarak kabul edilir. Amaç fonksiyonundaki maliyet

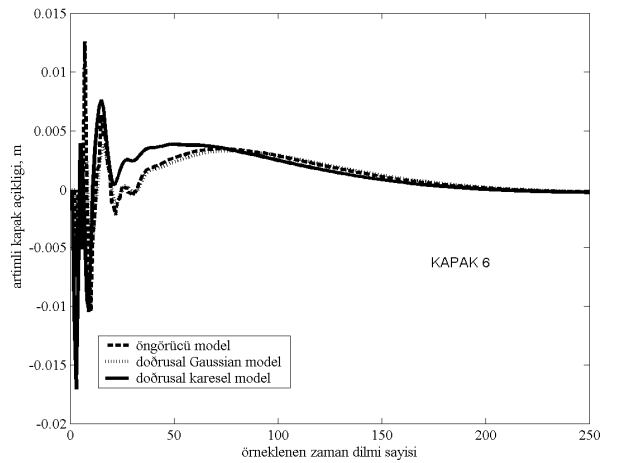
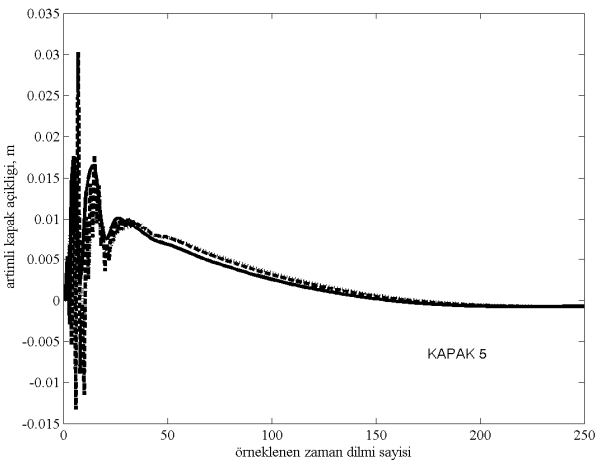
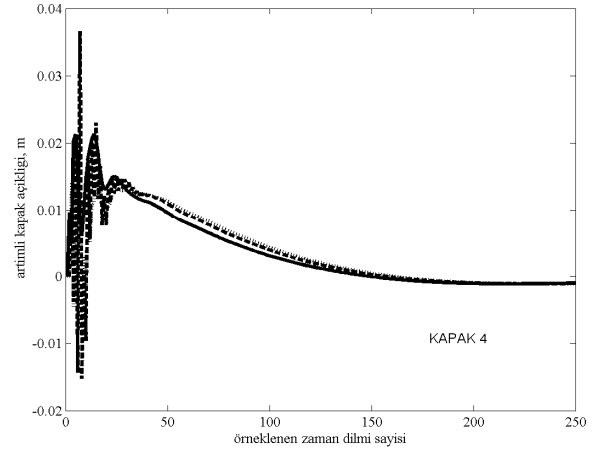
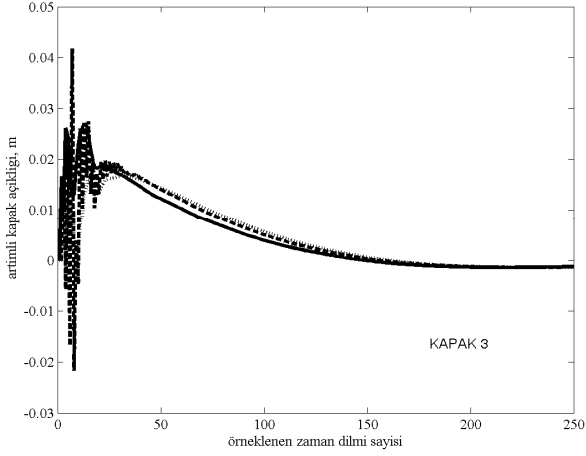
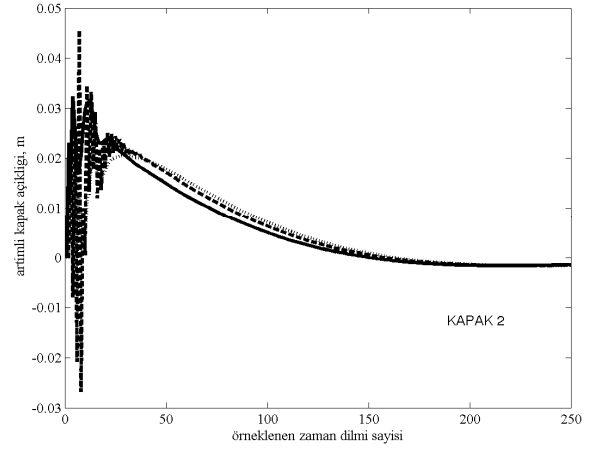
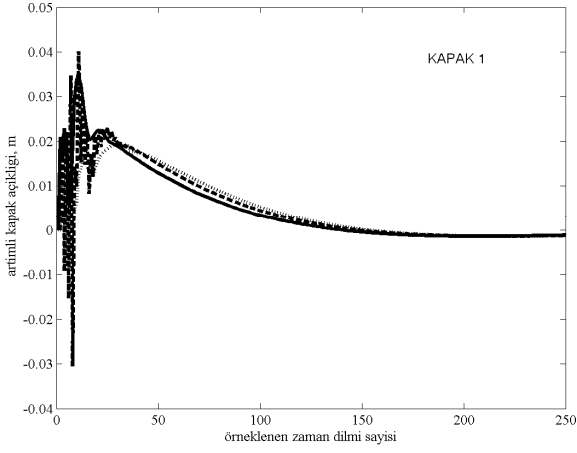
ağırlık matrisleri Q_w ve R_w deneme ve yanılma metodunun kullanılması ile belirlenemeye çalışılmıştır. Q_w ve R_w matrislerini oluşturan değerler minimize edilen su seviyesi hataları ve kapaktaki sapmalar arasında bir karşılaştırma (trade-off) oluşturur. Q_w ve R_w matrislerinin bağıl boyutları tasarımda önemli olduğu için Q_w matrisi bir birim matrisi olan I matrisine eşitlenirken R_w matrisinde su seviyesindeki doğruluk ve kapak hareketindeki miktar arasında bir bağıl karşılaştırmayı ifade edecek şekilde ayarlanmıştır. Q_w 'nin I birim matrisine eşit olması bütün havuzlarda su seviyesinde meydana gelen sapmaların aynı ceza ağırlığına sahip olması anlamına gelmektedir. Maliyet ağırlık matrisi R_w havuzların bağıl kapasitesine göre değişmektedir. Diğer bir anlatımla kontrol hareketlerinin sistem kararlılığı üzerine olan etkisi düşük kapasitesi olan havuzlarda daha fazla, yüksek kapasitesi olan havuzlarda daha azdır. R_w matrisinin ilk elementi R_1 ilk kapaktaki kontrol hareket cezasını temsil eder ve deneme yanılma yolu ile bulunur. Diğer değerlerde kapaktan geçen akım miktarına göre değişmektedir. Ağırlık matrislerinin boyutlandırılmasından sonra öngörücü model altyordamı da diğer kontrol altyordamları ile birlikte simüle edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Varılan sonuçlar karşılaştırılarak ve analiz edilerek öngörücü modelin diğer modeller göre avantajlı yönleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kontrol modellerinin analizine sistemin kararlılığı göz önüne alınıp değerlendirilmesiyle başlanmıştır. Geribesleme matrisinin bütün özdeğerlerinin pozitif ve birden az olduğu tespit edilmiştir. Sistem kontrol edilebilir ve sistemin tepkileri gözlemlenebilir niteliktedir. Kontrol girdi matrisinin I , çıkarılmasında, her havuzun memba ve mansap kısmındaki kapakların sistemin kontrol dinamiğini etkileyebileceği göz önüne alınmıştır. Kanalın son havuzunda mansap kısmındaki kapağın orijinal yatışkan durum değerinde sabit kaldığı ve kanalın ilk havuzunda memba kısmındaki kapağın sistemin denge durumunu sağladığı varsayılmıştır. Uygulanan optimizasyon

modellerinin performans değerlendirilmesi kanaldaki su seviyesi yükseltisindeki sapma ve kapakların açılıp kapanmasındaki değişim göz önüne alınmıştır. Şekil 3 her üç kontrol tekniğinde havuzlarda su seviyelerindeki sapmalar ve kapaklardaki değişimleri göstermektedir. Öngörücü modelin uygulanması sonucunda elde edilen akım derinliğindeki sapmalar doğrusal karesel veya doğrusal Gaussian modellerden elde edilen sapmalar ile karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi birinci havuzda su seviyesinde ilk 1500 saniye civarında hızlı bir düşüş olduğu gözlenmiştir fakat sonradan memba rezervuarından suyun bırakılması ile su seviyesi yükselmeye başlamış ve 7500 saniyede su seviyesinde bir denge oluşmaya başlamıştır. Modellerin performansı açısından incelendiğinde her üç modelinde birbirine çok yakın değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Doğrusal karesel modelde su seviyesindeki değişim ilk 1200 saniyede -0.094 m olmuştur. Buradaki negatif işaret havuzdaki su seviyesinin düştüğünü ifade eder. Havuza mambadan su gelmesiyle birlikte tekrar su seviyesi yükselip denge durumu almıştır. Bu çalışmada daha öncede belirtildiği gibi, doğrusal karesel model dayanıklı ve performansı yüksek olduğundan hedef model konumundadır. Diğer modellerden elde edilen değerlerin bu modelin değerlerine yakın olmasına özen gösterilir. Öngörücü ve doğrusal Gaussian modelde ilk 1500 saniyede yaklaşık -0.088 m'ye yakın miktarda akım derinliğinde bir sapma olmuştur ve sisteme suyun bırakılması ile denge durumuna gelmiştir. Her ne kadar doğrusal Gaussian model ile öngörücü modelde sapma değerleri birbirine yakında olsa öngörücü modelin sonuçları hedef modele yani doğrusal karesel metoda yakındır. İkinci havuzda su seviyesindeki sapmalar daha yüksektir. Bunun nedeni mansap kısmından gelen talebi karşılamak

için kapağın açılması ve akım oranının artırılmasıdır. Her üç teknik de 1700 saniyeye kadar havuzdaki su seviyesinde bir düşüş yaşanmakta fakat sonra ikinci havuza suyun ulaşması ile birlikte su seviyesi denge durumuna gelmektedir. Üçüncü, dördüncü ve beşinci havuzlar içinde aynı durum söz konusu olup ilk önce su seviyesinde bir düşüş gözlenmiş sonra tekrar bu havuzlarda denge durumu sağlanmıştır. Altıncı havuzda büyük bir oranda su seviyesinde düşüş söz konusudur. İlk 2500 saniyede her üç teknikte de su seviyesindeki sapma -0.33 metreye kadar varmıştır. Bu havuzdaki bu derece düşüş sulama kanallarında mambadan bırakılan suyun mansap kısmına ulaşmasındaki gecikmeden kaynaklanır. Su son havuza ulaştığında tekrar su seviyesi yükselerek denge durumuna gelir. Şekil 3'deki tüm havuzlardaki eğrilerin incelenmesi halinde genelde öngörücü model eğrilerinin hedef modele daha yakın olduğu ve bunun manasında bu modelin doğrusal modele göre kanal kontrolünde daha dayanıklı ve kararlı olduğu söylenebilir. Fakat her üç modelde de ve özellikle öngörücü ve doğrusal Gaussian modeller arasında fazla bir farkın olmadığı söylenebilir. Şekil 4'de her üç teknik için artırımlı kapak açıklığı gösterilmiştir. Öngörücü modelde kapak açıklığındaki sapmalar doğrusal karesel ve doğrusal Gaussian modellerle karşılaştırılmıştır. Bütün kapaklarda simülasyonun ilk dilimlerinde yüksek oranlarda dalgalanmalar söz konusudur. Genel olarak her üç model arasında herhangi bir önemli farklılık söz konusu olmasa da öngörücü model hedef modele daha yakın durmaktadır. Yaklaşık 5000 saniyeden sonra her üç modelde kapak açıklığındaki sapmalar yatay duruma gelmiştir ve denge durumunu almıştır. Fakat ilk 1200 saniyede kapak açıklığında büyük oranda sapmalar söz konusudur.

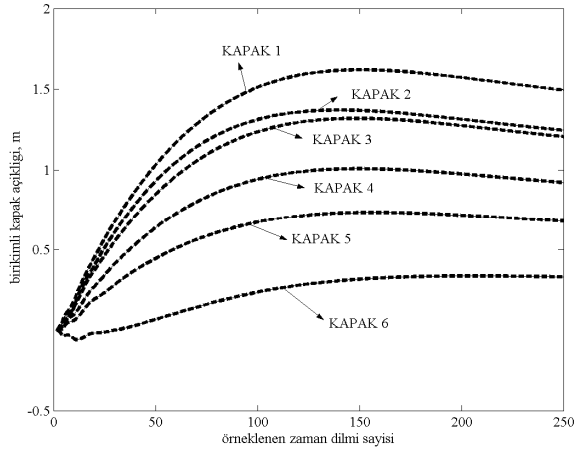


Şekil 3. Havuzlarda akım derinliğinde meydana gelen sapmalar.



Şekil 4. Kapak açıklıklarında meydana gelen sapmalar.

Şekil 5 tüm kapaklardaki açıklıklarda meydana gelen sapmaların toplamını göstermektedir. Görüldüğü gibi ikinci kapak mansap kısmındaki su seviyesini istenilen düzeyde tutabilmek için ve ilk havuzdan gelen suyu mansap kısmına ulaştırmak için en çok hareket eden kapaktır. Kapak1 de havuz ikiden gelen talepleri karşılamak ve rezervuardan su almak için kapak açıklığında sapmalar olmuştur. Kapak6 da en az oranda sapma söz konusudur buda mansap kısmına gerekli suyu ulaştırmak için memba kısmından gelen suyu devamlı olarak açık bir şekilde en son havuza ulaştırmaktır. Her üç modelde de birikimli kapak açıklığı arasında önemli



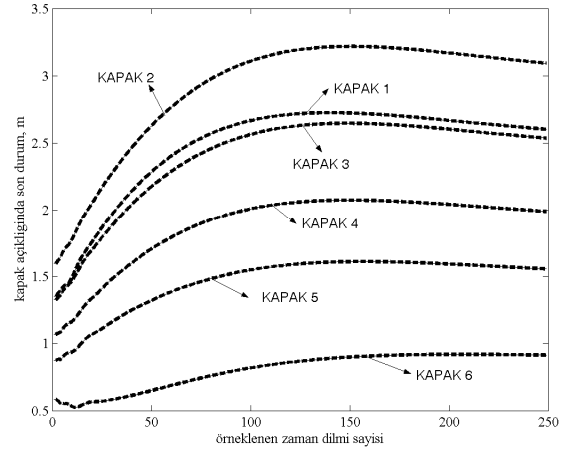
Şekil 5. Birikimli kapak açıklıkları.

Varılan sonuçlar göstermiştir ki öngörücü model doğrusal karesel ve doğrusal Gaussian metotlarına yakın sonuçlar vermiştir. Çok-değişkenli bir sisteme çabuk uyum gösteriyor olması, kontrol sistemi içerisinde oluşacak kısıtlamaları göz önüne alabilmesi, sistem içerisindeki bilinen düzensizlikleri yönlendirebilir ve kontrol edebilir olması, ve

KAYNAKLAR

Balogun, O.S., 1985. Design of Real-time Feedback Control for Canal Systems using Linear Quadratic Regulator Theory, Ph.D dissertation, Department of Mechanical

bir farkın olmadığı görülmüştür. Simülasyon sonucunda yani 7500 saniye sonucunda kapak2 1.5 m, kapak1 1.21 m, kapak3 1.2 m, kapak4 0.9 m, kapak5 0.5 m ve kapak6 0.28 m civarında açılmıştır. Şekil 6 kapakların en son aldıkları açıklığı göstermektedir. Yine kapak2 açıklığı en yüksek olan kapak durumundadır. 7500 saniye sonunda kapak2 3.1 m, kapak1 2.51 m, kapak3 2.50 m, kapak4 2 m kapak5 1.5 m ve kapak6 0.9 m civarında açılmışlardır. Şekillerde de görüldüğü gibi öngörücü metot açık kanallara uygulanabilen ve uygulandığı takdirde yüksek performans gösteren bir kontrol metodudur.



Şekil 6. Kapak açıklıklarında son durum.

membadan mansaba suyun gecikmesi probleminin üstesinden gelebilmesi öngörücü kontrol modelinin açık kanallarda uygulanabilir olduğunu göstermiş ve doğrusal Gaussian ve doğrusal karesel tekniklerine bir alternatif oluşturmuştur.

Engineering, University of California at Davis, USA.

Corriga, G., Sana, S., Usai, G., 1982. Sub-optimal Level Control of Open-channels, Proc. Int. ASME Conf., ASME, New York, N.Y. 67-72.

Durdu, O.F., 2003, Robust Control of Irrigation Canals, Ph.D. dissertation,

- Colorado State University, Civil Engineering Department, Fort Collins, CO, USA.
- Durdu, O.F., 2004a. Optimal Control of Irrigation Canals using Recurrent Dynamic Neural Networks (RDNN), Proceedings of the ASCE EWRI 2004 World Water & Environmental Resources Congress, June 27-July 1, 2004, Salt Lake City, UT: ASCE, CD-rom, 14 pp.
- Durdu, O.F., 2004b. Regulation of Irrigation Canals using a Two-Stage Linear Quadratic Reliable Control, Turkish J. Eng. Eng. Sci, 28, 111-120.
- Durdu, O.F., 2004c. Estimation of State Variables for Controlled Irrigation Canals via a Singular Value Based Kalman Filter, Fresenius Environmental Bulletin, 13(11).
- Kwakernaak, H., Sivan, R., 1972. Linear Optimal Control Systems, Wiley, New York, 1972.
- Liu, F., Berlamont, J., Feyen, J., 1995. Downstream Control of Multireach Canal Systems, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 121(2), 179-190.
- Malaterre, P.O., 1997. Multivariable Predictive Control of Irrigation Canals. Design and Evaluation on an a 2-pool Model, International Workshop on Regulation of Irrigation Canals, 230-238, Morocco, 1997.
- Malaterre, P.O., Rodellar, J., 1997. Multivariable Predictive Control of Irrigation Canals. Design and Evaluation on a 2-pool Model. International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24.
- Reddy, J.M., 1990. Local Optimal Control of Irrigation Canals, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 116, 616-631.
- Reddy, J.M., Dia, A., Oussou, A., 1992. Design of Control Algorithm for Operation of Irrigation Canals, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 118, 852-867.
- Reddy, J.M., 1995. Kalman Filtering in the Control of Irrigation Canals, Int. J. Appl. Math. Modeling, 19(4), 201-209.
- Reddy, J.M., 1999. Simulation of Feedback Controlled Irrigation Canals, Proceedings USCID Workshop, Modernization of Irrigation Water Delivery Systems, 605-617.
- Reddy, J.M., Jacquot, R.G., 1999. Stochastic Optimal and Suboptimal Control of Irrigation Canals, J. of Water Resources Pln. and Mgt., 125, 369-378.
- Seatzu, C., 2000. Design of Decentralized Constant-volume Controllers for Open-channels by Solving a Least Squares Problem, International Journal of Systems Science, Vol. 31, N. 6, pp. 759-770.
- Seatzu, C., Usai, G., 2002. A Decentralized Volume Variations Observer for Open-channels, Applied Mathematical Modelling, Vol 26, No. 10, pp. 35-61.
- Tewari, A., 2002. Modern Control Design with Matlab and Simulink, Wiley, New York.
- Wahlin, B.T., 2004. Performance of Model Predictive Control on ASCE test Canal 2, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(3), pp. 227-238.
- Geliş Tarihi:01.01.2008*
Kabul Tarihi:10.07.2008

Copyright of *Journal of Adnan Menderes University, Agricultural Faculty* is the property of *Adnan Menderes University* and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.