



# Tekil Olmayan Tanımlayıcı Sistemler İçin Kontrol Tasarımı

## *Control Design for Nonsingular Descriptor Systems*

Yusuf Altun

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Düzce, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, tekil olmayan descriptor (tanımlayıcı) belirsiz sistemler için kestirim yapılabilir yada sensörle ölçülebilir bozucuları bastırmak için aynı anda statik ileri beslemeli ve geri beslemeli kontrol tasarımı önerilmektedir. Geri beslemeli ve ileri beslemeli kontrol, doğrusal zamanla değişmeyen belirsiz sistemler için bozucuları bastırmak ve etkisini ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Kontrol dizaynı, doğrusal matris eşitsizlikleri yardımıyla  $H_\infty$  kontrol teorisine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Robot kolu gibi çoğu mekanik sistemler tekil olmayan belirsiz descriptor sistemler şeklinde modellenir. Bu yüzden bu çalışmada tekil olmayan belirsiz sistemler ele alınmıştır. Önerilen tasarımın başarımı simülasyon örnekleriyle desteklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Belirsiz sistemler, Descriptor (tanımlayıcı) sistemler, Durum geri besleme, İleri beslemeli kontrol

### Abstract

This study presents the design static feedback and feedforward control for eliminating of the external disturbances which are observable or measurable from any sensors. The feedback and feedforward controller design are developed to eliminate the effects of disturbances for the linear time invariant uncertain systems. The design is attained via  $H_\infty$  control theory and linear matrix inequality. Most of mechanical systems such as robot arm are nonsingular descriptor systems. Thus, nonsingular descriptor systems are discussed. The success of the design is presented in simulation examples.

**Keywords:** Uncertain systems, Descriptor systems, State feedback, Feedforward control

## 1. Giriş

İleri beslemeli kontrol tasarımları, ölçülebilen harici bozucuları bastırmada literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda ileri beslemeli kontrol çoğunlukla geri beslemeli kontrol ile birlikte kullanılmaktadır (Peng vd. 2013, Méndez-Acosta vd. 2005, Graichen vd. 2007, Jin vd. 2011, Babazadeh ve Karimi 2013). Çünkü kontrol sistemin kararlılığı geri beslemeli tasarımla sağlanır. Kararlılık sağlanmadan ileri beslemeli tasarım yapılamaz. Ayrıca, ileri beslemeli kontrolün herhangi bir sistemin kararlılığına herhangi bir etkisi yoktur. Literatüre bakıldığında bu tasarımlarda iki yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımın birincisi, (Adam ve Marchetti 2004)'te olduğu gibi her iki tasarımın eş zamanlı olarak tasarlanmasıdır. İkincisinde ise, (Altun ve Gulez 2014, Altun vd. 2013)'teki gibi öncelikle belirli bir sistem performansı elde etmek için ve kararlılığı sağlamak

için geri beslemeli kontrol tasarlanır, daha sonra ileri beslemeli kontrol ile bozucuların etkileri minimize edilmeye yada kontrol sistem başarımı artırılmaya çalışılır. İleri beslemeli kontrol, bozucuları bastırmak ve referans takibini güçlendirmek için makine, kimya ve proses mühendisliğindeki birçok uygulamalarda (Méndez-Acosta vd. 2005, Peng vd. 2013, Guzmán vd. 2015, Rodríguez vd. 2016, Na vd. 2011, Delghavi ve Yazdani 2011, Zhang vd. 2012, Ismail vd. 2011) kullanılmaktadır. Mesela, (Rodríguez vd. 2016)'daki çalışmada tek giriş-tek çıkış proses sistemler için genel bir yapı sunulmuştur. Literatürde, ileri beslemeli kontrolcü dizaynları farklı perspektiflerle doğrusal zamanla değişmeyen (DZD), doğrusal parametre değişimli (DPD) sistemlerin kontrolü için sunulmuştur. Literatür çalışmalarına bakıldığında,  $H_\infty$  teoriye dayalı yapılan ileri beslemeli kontrol çalışması az bulunmaktadır. Örneğin; (Peng vd. 2013)'te dinamik yapıda  $H_\infty$  ileri beslemeli kontrol, sistem tersini alma işlemiyle birlikte yapılmıştır. (Altun ve Gulez 2014)'te, DPD sistemlerin dinamik kontrol dizaynı sunulmuştur. (Altun vd. 2013)'te, geri beslemeli kontrolü de içeren DPD sistemlerin statik

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: altunyusuf@hotmail.com

ileri beslemeli kontrolü yapılmıştır. (Alma vd. 2012)'de, aktif titreşim kontrol sistemindeki bozucuları minimize etmek için düşürülmüş dereceden  $H_\infty$  ileri beslemeli düzenleyici uygulanmıştır. (Zhang vd. 2012, John vd. 2010, Wu ve Zou 2007)'de, sistemin tersini almaya dayalı ileri ve geri beslemeli kontrol dizaynı gerçekleştirilmiştir.

Literatüre bakıldığında, descriptor belirsiz sistemler için çalışmalar önem arz etmektedir (Bara 2011, Masubuchi vd. 1997, Osorio-Gordillo vd. 2015). Özellikle de belirsizlik içeriyorsa rasyonel belirsizlikler sistemin tasarımını oldukça zorlu kılmaktadır. (Bara 2011)'de ayrık zamanlı descriptor DPD sistemler için durum geri beslemeli kontrol tasarımı yapılmıştır. (Masubuchi vd. 1997)'de, DZD descriptor sistemler için  $H_\infty$  gözlemleyici tasarımı yapılmıştır. Literatürde, tekil olmayan belirsiz DZD descriptor sistemler için statik ileri ve geri beslemeli kontrol tasarımı bulunmamaktadır. Bu çalışmada ise, DZD sistemler için statik durum geri beslemeli ve ileri beslemeli kontrol tasarımı önerilmektedir. Sistemin belirli bir kontrol performansına sahip olarak kararlılığını garanti etmek için geri beslemeli kontrol ile harici bozucuların sistem çıkışın etkisini elimine etmeye yönelik ileri beslemeli kontrol tasarlanmaktadır. Bu bozucuların çevrimiçi olarak ölçülebilir yada kestirim yapılabilir olduğu varsayılmaktadır. Söz konusu tasarım,  $H_\infty$  tabanlı kontrol teorisine dayalıdır ve doğrusal matris eşitsizlikleri kullanılmıştır.

## 2. Gereç ve Yöntem

Eşitlik (1)'deki sistem doğrusal zamanla değişmeyen descriptor sistem olarak bilinir. Burada;  $r$  zamanla değişen parametreyi,  $u(t) \in R^{n_u}$  kontrol işaretlerini,  $x(t) \in R^{n_x}$  durum değişkenlerini,  $z(t) \in R^{n_z}$  çıkış işaretlerini,  $y(t) \in R^{n_y}$  ölçülen çıkış işaretlerini  $\omega(t) \in R^{n_\omega}$  bozucu sinyalleri göstermektedir.

$$\begin{aligned} E(r)\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1\omega(t) + B_2u(t) \\ z(t) &= Cx(t) + D_1\omega(t) + D_2u(t) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de tanımlanan sistemde  $E(r)$  matrisi yaygın olarak singüler (tekil) matris olarak düşünülmekte, buna göre tasarım yapılmaktadır. Bu çalışmada ise singüler olmayan matris olduğu düşünülerek iki serbestlik dereceli kontrol tasarımı yapılmıştır. Genellikle robot kolu gibi mekanik sistemlerde Eşitlik (1)'deki  $E(r)$  matrisi singüler olmayan matris olduğundan, tersi alınabilir matristir ancak belirsiz bir parametreye bağlıdır.

Çoğu mekanik sistemlerde genellikle bu matris tekil olmadığından tersi alınabilir.  $E(r)$  matrisi affine tip

gösterimde ( $E(r)=E_0+rE_1$ ) olduğunda tersi alınarak  $\dot{x}$  ifadesinin yalnız bırakılması rasyonel yapıya dönüşeceğinden tasarımı güçleştirmektedir. Bu yüzden parametreye bağlı bir matrisin tersinin alınması güç bir işlemdir. Ayrıca matris eşitsizliği içerisinde rasyonel parametreye bağlı bir matrisini tersinin alınması zorlayıcı bir durumdur. Bu çalışmada, tersi alınmadan tasarımın gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Önerilen kontrol sisteminin blok şeması Şekil 1'de verilmektedir. Burada;  $K_{ff}$  ileri beslemeli kontrolörü,  $K_{fb}$  geri beslemeli kontrolörü,  $u_{ff}$  ileri yolda üretilen işareti,  $u_{fb}$  geri yolda üretilen işareti ve  $u$  ise sisteme uygulanan toplam kontrolör işaretini göstermektedir.  $K_{ff}$  ve  $K_{fb}$  kontrolörleri statik kontrolörlerdir ve doğrusal matris eşitsizlikleri ile  $H_\infty$  kontrol teori kullanılarak eş zamanlı olarak tasarımları yapılmıştır.

$H_\infty$  kontrol tasarımında yaygın olarak kullanılan ve literatürde sınırlı reel teoremi olarak bilinen Teorem 1 yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Eşitlik (2),  $\omega(t)$ 'den  $z(t)$ 'ye zamanla değişmeyen bir sistemin durum uzay modelini vermektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B\omega(t) \\ z(t) &= Cx(t) + D\omega(t) \end{aligned} \quad (2)$$

**Teorem 1** (Boyd vd. 1994): Eşitlik (2)'deki sistemin kararlı transfer matrisini  $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$  temsil etsin. Gerek ve yeter  $\gamma^2 I - D_{cl}^T D_{cl} > 0$  koşuluyla,  $\|G(s)\|_\infty < \gamma$  sağlanır ve aşağıda yer alan durumlar eşdeğerdir.

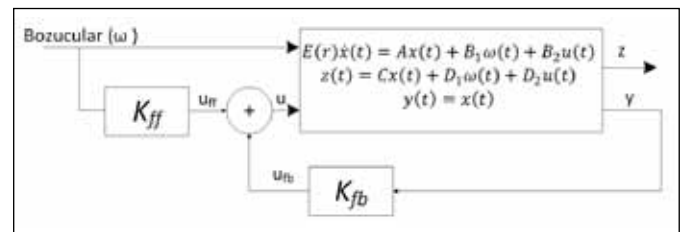
a. Eğer  $P \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  pozitif simetrik matris mevcutsa, aşağıda yer alan eşitsizlik sağlanır.

$$A^T P + PA + (B^T P + D^T C)^T (\gamma^2 I - D^T D)^{-1} (B^T P + D^T C) + C^T C < 0$$

b. Eğer pozitif simetrik matris  $P \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  varsa (3)'teki matris eşitsizliği sağlanır.

$$\begin{bmatrix} PA + A^T P + C^T C & PB + C^T D \\ D^T C + B^T P & D^T D - \gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (3)$$

c. Eğer pozitif simetrik matris  $P \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  varsa (4)'teki matris eşitsizliği sağlanır.



Şekil 1. İki serbestlik dereceli kontrol sistemi.

$$\begin{bmatrix} PA + A^T P & PB & C^T \\ B^T P & -\gamma I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (4)$$

İspat: (Boyd vd. 1994)'e bakınız.

### 3. Kontrol Tasarımı

Bu bölümde, kontrol tasarımı anlatılmaktadır. Aynı anda ileri yolda ve geri yolda kontrolör tasarımı için önerilen teorem sunulmaktadır. Teorem 1'e dayanarak literatürde yaygın olarak kullanılmakta olan statik durum geri beslemeli kontrol tasarımı için Teorem 2'de bulunan matris eşitsizliği kullanılır.

**Teorem 2:** (5)'te  $P$  simetrik pozitif matris ve  $R$  matrisi varsa, (1)'deki sistemi kararlı yapan durum geri beslemeli statik kontrol  $u(t) = Kx(t)$  vardır.

Böylesi bir durumda kontrolör matrisi  $K = RP^{-1}$ den elde edilir.

$$\begin{bmatrix} AP + PA^T + B_2 R + R^T B_2^T & B_1 & PC^T + R^T D_2^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_1^T \\ CP + D_2 R & D_1 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

İspat: (Boyd vd. 1994)'e bakınız.

Teorem 2, (1)'deki sistemde bulunan bozucuları bastırma işlemini,  $z(t)$  çıkışında  $\omega(t)$  bozucularını optimize etmek için tasarlanabilir. Ancak, bilinmeyen bozucuların etkisi dikkate alınarak geri beslemeli tasarım yapılabilir. Ayrıca bu teorem descriptor sistemler için uygun değildir. Bu çalışmada ise, anlık olarak ölçülen bozuculara göre anlık kontrolör işareti üretilerek bozucuların etkisi en aza düşürülür. Buna ek olarak, hem geri beslemeli kontrolör tasarlanmakta hem de bozucuları en aza indirgeyen ileri beslemeli kontrolör aynı anda tasarlanmaktadır. Söz konusu problem için önerilen tasarım Teorem 3'te gösterilmektedir.

**Teorem 3:** (6)'daki matris eşitsizliğinde  $X$  pozitif simetrik matris ve matris  $Q$  varsa, (1)'deki sistemi kararlı yapan durum geri beslemeli statik kontrolör  $u_{fb}(t) = K_{fb}x(t)$  ve ileri beslemeli statik kontrolör  $u_{ff}(t) = K_{ff}\omega(t)$  vardır.

Böylesi bir durumda kontrolör matrisleri (7)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} E(r)XA^T + AXE^T(r) + B_1 QE^T(r) + E(r)Q^T B_1^T - E(r)\dot{X}E^T(r) & B_1 + B_2 K_r & E(r)XC^T + E(r)Q^T D_1^T \\ K_r^T B_1^T + B_1^T & -\gamma I & D_1^T + K_r^T D_1^T \\ D_1 QE^T(r) + CXE^T(r) & D_1 K_r + D_1 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$K_{fb} = QX^{-1}$$

$$K_{ff} = K_F \quad (7)$$

İspat: Şekil 1'deki gösterilen kontrol işareti (8)'deki gibi elde edilir.

$$u = K_{fb}\omega + K_{ff}x \quad (8)$$

Eşitlik (8)'deki kontrolör (1)'de yerine yazılırsa, (9)'daki gibi kapalı çevrim ifadesi ve (10)'daki gibi durum uzay matrisleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^{-1}(r)A + E^{-1}(r)B_2 K_{fb} & E^{-1}(r)B_1 + E^{-1}(r)B_2 K_{ff} \\ C + D_2 K_{fb} & D_1 + D_2 K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_{cl} = E^{-1}(r)A + E^{-1}(r)B_2 K_{fb}$$

$$B_{cl} = E^{-1}(r)B_1 + E^{-1}(r)B_2 K_{ff}$$

$$C_{cl} = C + D_2 K_{fb}$$

$$D_{cl} = D_1 + D_2 K_{ff}$$

(10)

(10)'da elde edilen kapalı döngü matrisleri (5)'te  $A, B, C$  ve  $D$  matrislerinin yerine  $A_{cl}, B_{cl}, C_{cl}$  ve  $D_{cl}$  yazılırsa, (11)'deki matris eşitsizliği elde edilir.

$$\begin{bmatrix} A_{cl}^T E^{-1}(r)P + K_{fb}^T B_{cl}^T E^{-1}(r)P + PE^{-1}(r)A + PE^{-1}(r)B_2 K_{fb} & PE^{-1}(r)B_1 + PE^{-1}(r)B_2 K_{ff} & C_{cl}^T + K_{fb}^T D_{cl}^T \\ B_{cl}^T E^{-1}(r)P + K_{fb}^T B_{cl}^T E^{-1}(r)P & -\gamma I & D_{cl}^T + K_{fb}^T D_{cl}^T \\ C_{cl} + D_2 K_{fb} & D_1 + D_2 K_{ff} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

Ancak elde edilen eşitsizlik doğrusal olmayan matris eşitsizliğidir. Doğrusal matris eşitsizliği elde edebilmek için (11)'deki ifadeyi sırasıyla (12)'deki matris ve transpozü ile sağdan ve soldan çarpıldığında (13)'teki tanımlamalar ışığında (6) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} E(r)P^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$X = P^{-1}$$

$$Q = K_{fb} X$$

$$K_F = K_{ff}$$

(13)

Elde edilen tasarım DPD sistemler için de kullanılabilir fakat belirsiz matris çarpımları içereceğinden (Altun ve Gulez 2014)'te kullanılan yaklaşım kullanılabilir. Görüldüğü üzere  $E(r)$  matrisinin tersi alınmadan kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

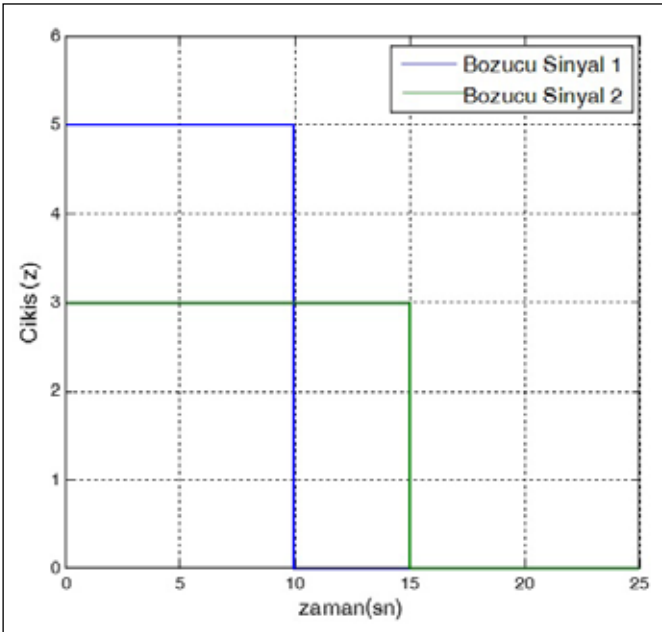
### 4. Simülasyon Sonuçları

Bu çalışmada tasarlanan kontrolör belirsiz descriptor bir sistem örneği üzerinde uygulanmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalar için Yalmip ve Sedumi kullanılmıştır.

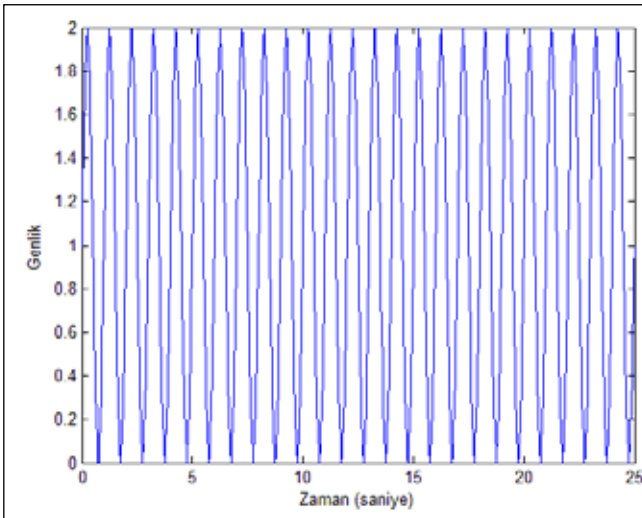
(14)'teki belirsiz doğrusal zamanla değişmeyen örnek bir sistem ele alınmıştır. Burada zamanla değişen  $r$  parametresi değişim aralıkları  $0 \leq r(t) \leq 0.3$  ve  $-0.1 \leq \dot{r}(t) \leq 0.1$  şeklindedir. Sisteme uygulanan bozucu işaretler ise Şekil 2 ve Şekil 3'teki gibidir.

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} 0.3-r & -0.2 \\ 0.5 & 0.8 \end{bmatrix}}_E \dot{x} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0.7 \\ 0.5 & -1 \end{bmatrix}}_A x + \underbrace{\begin{bmatrix} -0.1 & 0.5 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}}_{B_1} \omega + \underbrace{\begin{bmatrix} -3.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}}_{B_2} u \\ z &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}}_C x + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3.1 & 4.4 \end{bmatrix}}_{D_1} \omega + \underbrace{\begin{bmatrix} -0.01 & 0.1 \\ 0.04 & 0.1 \end{bmatrix}}_{D_2} u \end{aligned}$$

(14)



Şekil 2. Uygulanan bozucu sinyaller 1.



Şekil 3. Uygulanan bozucu sinyaller 2.

(14)'teki sistem için Teorem 3'le önerilen kontrolörlerin kazanç matrisleri hesaplandığında Tablo 1 elde edilmiştir. Burada görüldüğü üzere, elde edilen matris eşitsizliği ile parametrik belirsiz içeren (14)'teki sistem için eş zamanlı olarak hem geri hem de ileri beslemeli kontrolör matrisleri elde edilmiştir. Bu teorem yardımıyla bir adet matris eşitsizliği ile her iki kontrolörler elde edilebilmektedir.

Sistemin simülasyon blok şeması Şekil 4'te sunulmuştur. Yapılan simülasyon sonucunda, Şekil 2'deki uygulanan bozucu sinyaller için Şekil 5'te elde edilen çıkış işaretleri görülmektedir. Şekil 3'teki bozucu sinyaller için ise elde edilen çıkış işaretleri Şekil 6'da görülmektedir.

Öncelikle Tablo 1'de elde edilen kontrolörlerden sadece geri beslemeli kontrolör uygulanmış ve daha sonra her ikisi birden uygulanmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi, Şekil 2 ve Şekil 3'teki uygulanan bozucular için elde edilen sonuca göre tek başına geri beslemeli kontrolör bozucularla yeterince başa edememişken, her iki kontrolör uygulandığında bozucuların etkileri neredeyse tamamen elimine edilmiştir. Şekil 5'te çıkış değerleri  $[-6 \times 10^{-4} \ 6 \times 10^{-4}]$  gibi bir aralıkta değişirken Şekil 6'da da benzer şekilde yaklaşık  $[-3 \times 10^{-4} \ 3 \times 10^{-4}]$  gibi değer aralığında değişmektedir. Böylece bozucuların çıkışa olan etkisi neredeyse tamamen sıfırlanmıştır. İleri beslemesiz duruma göre oldukça başarılı sonuç elde edilmiştir.

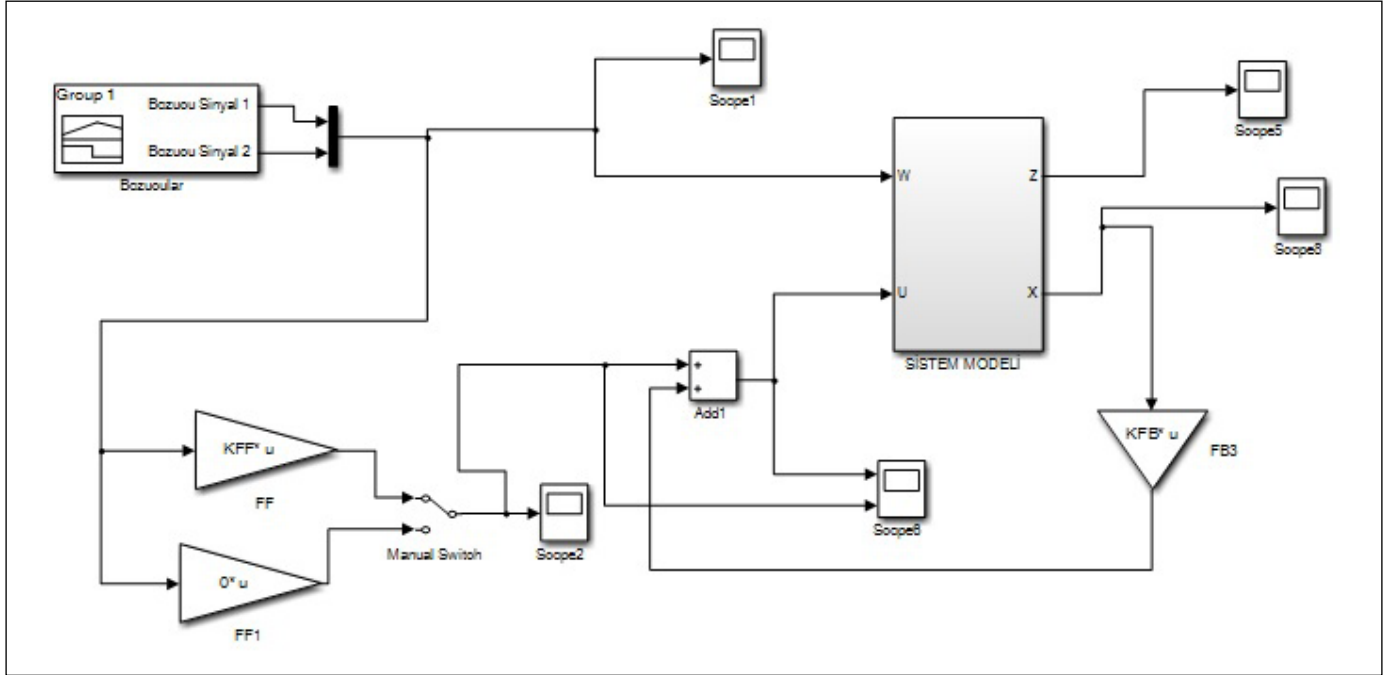
Tablo 1. Kontrol kazançları.

Kontrol kazançları	$K_{fb} = \begin{bmatrix} 5.99 & -9.99 \\ -2.39 & -1 \end{bmatrix}, K_{ff} = \begin{bmatrix} -41.99 & -47.99 \\ -14.2 & -24.8 \end{bmatrix}$
--------------------	--

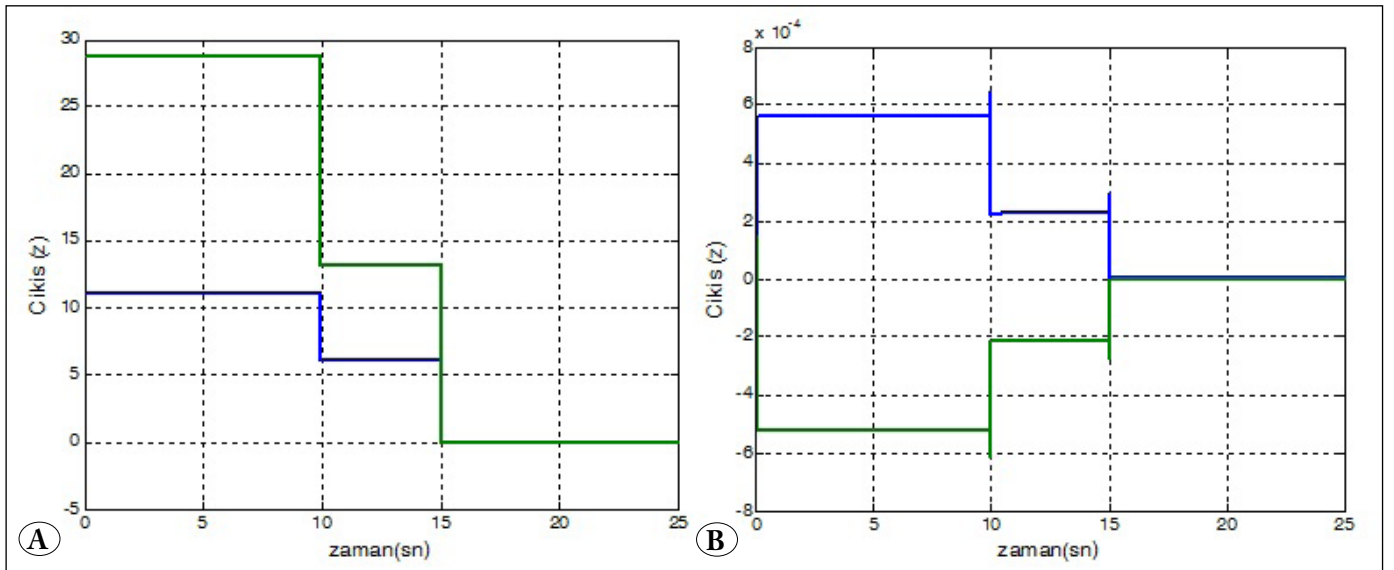
## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada descriptor belirsiz sistemler için gürbüz statik geri beslemeli kontrolör ve ileri beslemeli kontrolör/filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. İleri yoldaki tasarım hem filtre olarak hem de referans izleme probleminde kontrol olarak kullanılabilir. Uygulanan örnek sistemin simülasyon sonucunda çıkışı etkileyen bozulmalara karşı önerilen kontrolörlerin performansı incelenmiş olup, bozucuların

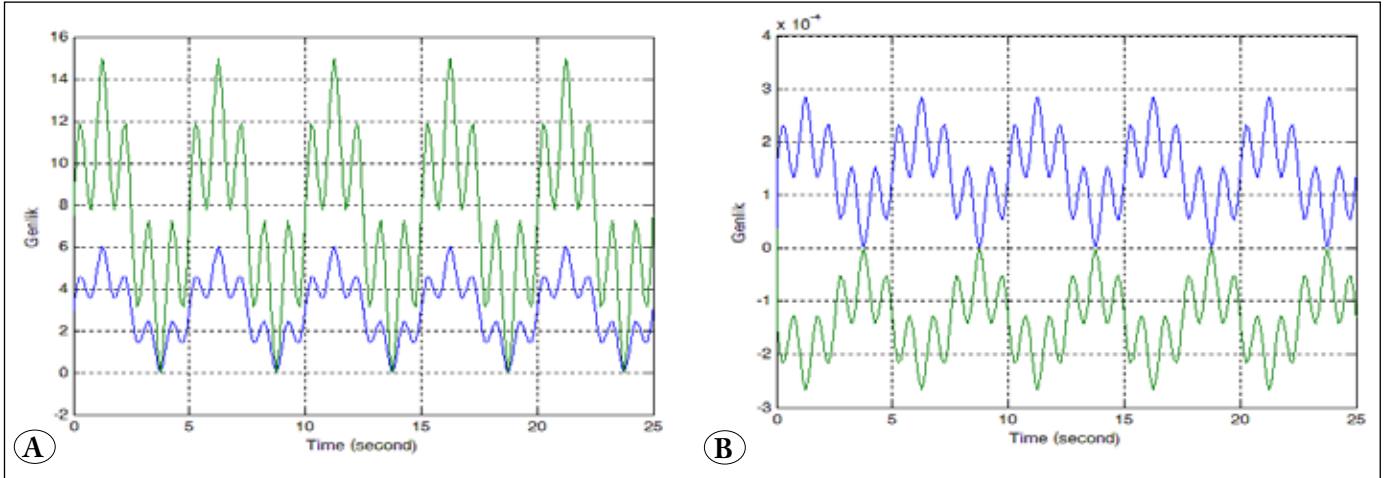
sistem çıkışına etkisi elimine edilmiştir. Önerilen tasarım sayesinde belirsizlik içeren descriptor sistemler için  $H_\infty$  kontrol teoriye dayalı bir matris eşitsizliği ile eş zamanlı iki kontrolör tasarlanabilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma descriptor sistemlere yönelik bozucuları bastırmak için literatürde olmayan bir yaklaşımla alternatif bir tasarım sunmaktadır.



Şekil 4. Simülasyon blok şeması.



Şekil 5. Bozucu 1 için Teorem 3'e göre sistem çıktıları A) ileri beslemesiz B) ileri beslemeli.



Şekil 6. Bozucu 2 için Teorem 3'e göre sistem çıkışları; A) ileri beslemesiz, B) ileri beslemeli.

## 6. Kaynaklar

- Adam, E.J., Marchetti, J.L. 2004. Designing and Tuning Robust Feedforward Controllers. *Comput. Chem. Eng.*, 28: 1899–1911.
- Alma, M., J.J. Martinez, Landau ID., Buche, G. 2012. Design and Tuning of Reduced Order  $H_\infty$  Feedforward Compensators for Active Vibration Control. *IEEE T. Contr. Syst. T.*, 20: 554–561.
- Altun, Y., Gulez, K. 2014. Linear Parameter Varying Feedforward Control Synthesis Using Parameter-Dependent Lyapunov Function. *Nonlinear Dynam.*, 78: 2293–2307.
- Altun, Y., Gulez K., Mumcu, TV. 2013. Static LPV Feedforward Controller Synthesis for Linear Parameter Varying Systems. *2013 9th Asian Control Conference (ASCC)*.
- Babazadeh, M., Karimi, H. 2013. A Robust Two-Degree-of-Freedom Control Strategy for an Islanded Microgrid. *IEEE T. Power Deliver.*, 28: 1339–1347.
- Bara, G.I. 2011. Dilated LMI Conditions for Time-Varying Polytopic Descriptor Systems: The Discrete-Time Case. *Int. J. Control*, 84: 1010–1023.
- Boyd, S.P., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan, V. 1994. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, SIAM.
- Delghavi, MB., Yazdani, A. 2011. An Adaptive Feedforward Compensation for Stability Enhancement in Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids. *IEEE T. Power Deliver.*, 26: 1764–1773.
- Graichen, K., Treuer M., Zeitz, M. 2007. Swing-up of the Double Pendulum on a Cart by Feedforward and Feedback Control with Experimental Validation. *Automatica*, 43: 63–71.
- Guzmán, J.L., Häggglund, T., Veronesi, M., Visioli, A. 2015. Performance Indices for Feedforward Control. *J. Process Contr.*, 26: 26–34.
- Ismail, H., Ishak, N., Tajjudin, M., Hezri, M., Rahiman, F., Adnan, R., Rahiman, MHF. 2011. Feedforward Control for High Precision Linear Servo System. *2011 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, 1: 119–123.
- Jin, N., Wang X., Gao H., Liu, J. 2011. Sliding Mode Based Speed Regulating of PMSM MTPA Control System for Electrical Vehicles. *2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*, 2:987–992.
- John, S.W., Alici G., Cook, CD. 2010. Inversion-Based Feedforward Control of Polypyrrole Trilayer Bender Actuators. *IEEE-ASME T. Mech.*, 15: 149–156.
- Masubuchi, I., Kamitane Y., Ohara, A., Suda, N. 1997.  $H_\infty$  Control for Descriptor Systems: A Matrix Inequalities Approach. *Automatica*, 33: 669–673.
- Méndez-Acosta, HO., Campos-Delgado, DU., Femat, R., González-Alvarez, V. 2005. A Robust Feedforward/feedback Control for an Anaerobic Digester. *Comput. Chem. Eng.*, 29: 1613–1623.
- Na, W., Johnson, KE., Wright, AD. 2011. LIDAR-Based FX-RLS Feedforward Control for Wind Turbine Load Mitigation. *2011 American Control Conference (ACC)*, pp. 1910–1915.
- Osorio-Gordillo, GL., Darouach, M., Astorga-Zaragoza, CM. 2015.  $H_\infty$  Dynamical Observers Design for Linear Descriptor Systems. Application to State and Unknown Input Estimation. *Eur. J. Control*, 26: 35–43.
- Peng, C., Zhang, Z., Zou, J., Li K., Zhang, J. 2013. Internal Model Based Robust Inversion Feedforward and Feedback 2DOF Control for LPV System with Disturbance. *Journal Process Contr.*, 23: 1415–1425.
- Rodríguez, C., Normey-Rico J.E., Guzmán, J.L., Berenguel, M. 2016. On the Filtered Smith Predictor with Feedforward Compensation. *Journal Process Contr.*, 41: 35–46.
- Wu, Y., Zou, Q. 2007. Robust-Inversion-Based 2DOF-Control Design for Output Tracking: Piezoelectric Actuator Example. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2451–2457.
- Zhang, J., Xu, H., Zou, Q., Peng, C. 2012. Inversion-Based Robust Feedforward-feedback Two-Degree-of-Freedom Control Approach for Multi-Input Multi-Output Systems with Uncertainty. *IET Control Theory A.*, 6: 2279–2291.