

# Model Ayrıştırma Tabanlı Bir Oran Kontrol Yapısı

## A Model Decomposition Based Ratio Control Structure

Osman Çakıoğlu<sup>1</sup>, Müjde Güzelkaya<sup>2</sup>, İbrahim Eksin<sup>3</sup>

Kontrol Mühendisliği Bölümü Elektrik-Elektronik  
Fakültesi İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak,  
İstanbul

<sup>1</sup>[osman22cakiroglu@gmail.com](mailto:osman22cakiroglu@gmail.com), <sup>2</sup>[guzelkaya@itu.edu.tr](mailto:guzelkaya@itu.edu.tr), <sup>3</sup>[eksin@itu.edu.tr](mailto:eksin@itu.edu.tr)

### Özetçe

Bu çalışmada endüstriyel oran kontrol uygulamaları için yeni ve etkin bir yöntem ortaya konulmaktadır. Önerilen yöntem daha önce yüksek mertebeli sistemlerin ve kaskad sistemlerin kontrolü için önerdiğimiz "Model Ayrıştırma Temelli Kontrolör Tasarımı" yöntemi temel almaktadır. Bu yöntemde var olan sanal çevrim yapısına sanal çevrim bozucuları eklenerek yeni bir oran kontrol yapısı elde edilmiştir. Önerilen yeni oran kontrol yapısı ile sistem bozucuları karşısında istenen oranı koruma başarımı artırılmıştır. Ayrıca bu yapı, diğer yöntemlerin aksine, sadece birinci veya ikinci mertebeden sistem modelleri için değil, üç ve daha yüksek mertebeden sistem modelleri için de uygundur. Önerilen yöntem literatürde var olan oran kontrol yapıları ile benzetimler üzerinden karşılaştırılmış ve üstünlüğü gösterilmiştir.

### Abstract

This study introduces a new and effective method for industrial ratio control applications. The proposed method is based on the "Model Decoupling-Based Controller Design" approach that we previously suggested for the control of high-order systems and cascade systems. In this method, virtual disturbance compensators are added to the existing virtual loop structure to obtain a new ratio control structure. With the proposed ratio control structure, the performance of maintaining the desired ratio against system disturbances has been enhanced. Moreover, unlike other methods, this structure is suitable not only for first or second-order system models but also for third-order and higher-order system models. The proposed method is compared with existing ratio control structures in the literature through simulations, demonstrating its superiority.

### 1. Giriş

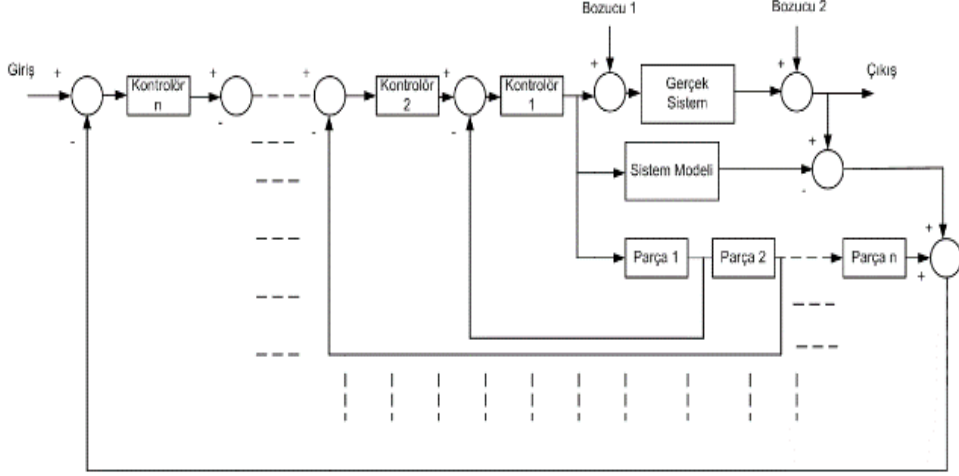
Kontrol sistemleri günümüzde normal yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Teknolojinin neredeyse her yerinde kullanılan kontrol çevrimleri, özellikle kimyasal süreçler gibi karmaşık ve iç içe yapılarda da kendisini göstermektedir. Bu karmaşık ve iç içe geçmiş süreçlerin kontrollerinde sadece bir çıkışın veya çevrimin kontrolü değil, diğer sistemlerle beraber oluşturulan yapıların kontrol

edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu duruma yakıt/hava oranı kontrolü veya kimyasal malzemelerin karışım oranının sabit tutulması örnek gösterilebilir. Bu tür kontrol problemlerinde değişkenlerden herhangi birine bir bozucu etkisi veya parametre değişimi olduğunda veya kontrol işaretleri değiştiğinde de aynı oranın korunması istenmektedir.

Literatürde bu problemin çözümü için klasik statik çözümler olduğu gibi dinamik çözümler de mevcuttur [1]. Klasik oran kontrol yapıları "Doğrudan Yaklaşım" ve "Dolaylı Yaklaşım" oran kontrol yapıları olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan yaklaşım oran kontrol yapısında sadece ikinci sistem ise kontrol edilir ve iki sistemin çıkışları birbiri ile oranlanıp, istenen oran ile karşılaştırılıp bir kontrolör vasıtası ile ikinci sistemin kontrol işareti değiştirilerek oran sabit tutulmaya çalışılır [2]. Dolaylı yaklaşımda ise sistem çıkışları ölçüldükten ve istenen oran ile çarpıldıktan sonra birinci sistem referans ve ikinci sistem kontrol edilecek değişken olmak üzere oluşan hata kontrolöre aktarılır [2]. Klasik çözümler geçici hal cevaplarında yeteri kadar iyi bir performans veremezken, dinamik yöntemler geçici hal durumlarındaki oran kontrolünde daha etkindir. Dinamik oran kontrol yapıları, Oran Merkezi (OM)[2], Çapraz Sınırlamalı (ÇS) [3], Harmanlama Merkezi (HM) [1,4,5] ve Dinamik Harmanlama Merkezi (DHM) [6,7] oran kontrol yapıları olarak farklı biçimlerde. Günümüzde Programlanabilir Lojik Kontrolörler (Programmable Logic Controller/PLC) ve ayrı kontrol sistemlerinde kolay uygulanması sebebiyle OM yöntemi endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. OM yöntemleri ise seri OM kontrol yapıları ve paralel OM kontrol yapıları olarak sınıflandırılır.

Oran kontrol yapısı süreç kontrolünde sıklıkla kullanılan bir yapı olduğu için alt seviyede sistemler için tasarlanan kontrolör yapıları ölü zaman etkili sistemler için tasarlanır. Ölü zaman etkili sistemler için ise literatürde Smith öngörücüsü tabanlı çalışmalar mevcuttur. [8,9,11]

Önerilen oran kontrol yönteminde, daha önce, yüksek mertebeli sistemlerin ve kaskad sistemlerin kontrolü için Smith öngörücülü kontrol yöntemlerine[8,9,10] alternatif olarak önerilen "Model Ayrıştırma Temelli Kontrolör Tasarımı" [6,7] yönteminin iç yapısına "Sanal Çevrim Bozucuları" eklenerek yeni bir yapı önerilmiştir. Böylece, sistem modellerine istenen orana uygun şekilde bir kontrolör tasarlanmasının ardından sanal çevrimler ile birlikte sistemlerin aynı hatalardan etkilenmelerini sağlayan bir yapı



Şekil 1: Model Ayrıştırma Tabanlı Kontrol Yapısı

kurulmuştur. Önerilen yeni oran kontrol yapısı ile sistem bozucuları karşısında istenen oranı koruma başarımı artırılmıştır. Ayrıca bu yapının, diğer yöntemlerin aksine, sadece birinci veya ikinci mertebeden sistem modelleri için değil, üç ve daha yüksek mertebeden sistem modelleri için de uygulanabilir olması, önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermektedir.

Bildiri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde kısaca oran kontrol yapısından söz edilmektedir. Üçüncü bölümde önerilen oran kontrol yöntemi açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde diğer oran kontrol yapıları ile kıyaslamalı benzetimler yapılarak yöntemin etkinliği tartışılacaktır. Son bölüm sonuç ve ileriye yönelik çalışmalara ayrılmıştır.

## 2. Model Ayrıştırma Tabanlı Kontrol Yapısı

Model Ayrıştırma Temelli Kontrol Yapısı (MATKY) [7] yönteminde, sistem modelinin mertebesi kadar sanal çevrim oluşturularak, çok çevrimli bir kontrol yapısı sunulmaktadır [9]. Yöntemde sistem mertebesi kadar çevrim bulunmasına rağmen ayarlanması gereken sadece bir parametresi bulunmaktadır. MATKY gerçek sistemin modelinin sistem mertebesi (n) kadar birinci mertebeden sistem parçalarına ayrılıp, her biri için farklı kontrolör tasarlamaya dayanmaktadır. Model ayrıştırma işlemi sonucunda en iç sanal çevrimde elde edilen model parçasının transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir

$$G_{1m}(s) = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s+1} \quad (2.1)$$

Bu çevrim için tasarlanacak olan kontrolör ise kutup - sıfır götürme yöntemi kullanılarak

$$C_1(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s+1}{s} \quad (2.2)$$

şeklinde bulunur. Bu kontrolörün kazancı olan  $K_{c1}$  parametresi ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{\gamma \lambda_n K_{1m}} \quad (2.3)$$

Burada  $K_{1m}$ ,  $G_{1m}(s)$  transfer fonksiyonunun kazancı olup,  $\gamma$  ise tasarım parametresidir. İlk çevrime ilişkin kapalı çevrim transfer fonksiyonu,

$$T_{1s}(s) = \frac{1}{\lambda_1 s+1} \quad (2.4)$$

olan bir sistem modeli elde edilir. Bu modelde  $\lambda_1$  ilk iç çevrim için istenen zaman sabiti olup,

$$\lambda_1 = \gamma_1 * \lambda_n \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir.  $\lambda_n$  terimi, elde edilecek en son kapalı çevrim yapısının transfer fonksiyonunun zaman sabitini temsil etmektedir. İkinci adımda ise ayrıştırma sonucu elde edilen ikinci model parçası

$$G_{2m}(s) = \frac{K_{2m}}{T_{2m}s+1} \quad (2.6)$$

ve ilk adımda hesaplanan kapalı çevrim transfer fonksiyonu kullanılarak tasarıma devam edilir.

İkinci iç çevrim için uygun kontrolör yine kutup- sıfır götürülmesi yöntemi kullanılarak

$$C_2(s) = \frac{T_{2m}s+1}{s} \quad (2.7)$$

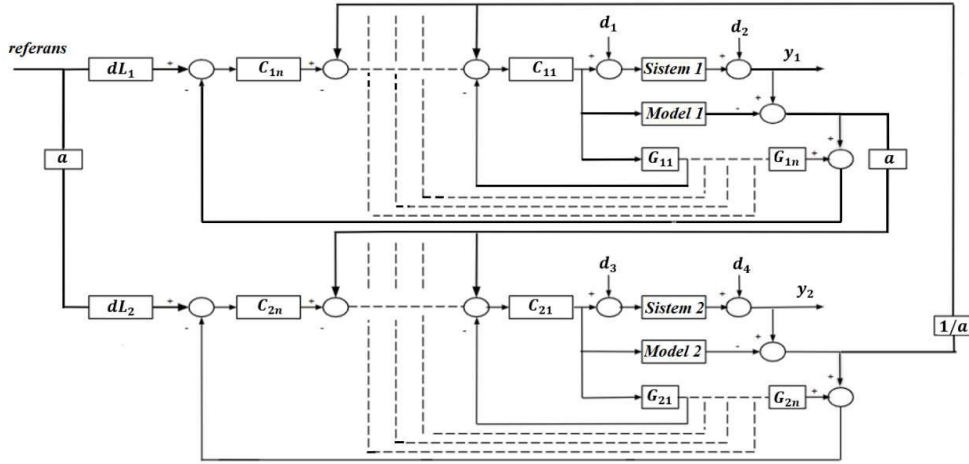
şeklinde seçilir. Bu kontrolörün kazancı ise

$$K_{c2} = \frac{1}{4 \gamma \lambda_n K_{2m}} \quad (2.8)$$

şeklinde hesaplanır. Bu denklemden  $K_{2m}$  modelin kazanç katsayısıdır.  $\gamma$  tasarım parametresidir. Uygulanan kutup sıfır götürülmesi sonucu iç çevrime ilişkin kapalı çevrim transfer fonksiyonu

$$\frac{1}{\frac{\lambda_1}{K_{2m} K_{c2}} s^2 + \frac{1}{K_{2m} K_{c2}} s + 1} \quad (2.13)$$

olarak bulunur. Bu ikinci mertebeden sisteme ilişkin transfer fonksiyonunun aşırı bir şekilde tasarlanması öngörülerek bu transfer fonksiyonu



Şekil2: Önerilen Oran Kontrol Yapısı

$$K_{cn} = \frac{1}{2^{n-1} \lambda * K_{im} * \frac{0.25}{\gamma^{n-3}}} \quad (2.12)$$

$$T_2(s) = \frac{1}{\lambda_2 s + 1} \quad (2.14)$$

Şeklinde.

Burada zaman sabiti

$$\lambda_2 = 2 \gamma \lambda_n \quad (2.9)$$

şeklinde. İkinci sanal iç çevrimin kapalı çevrim transfer fonksiyonu, birinci mertebeden bir transfer fonksiyonu ile temsil edildiğinden, üçüncü sanal çevrime ilişkin tasarımı, ikinci sanal iç çevrimin tasarımına benzer bir şekilde yapılabilir. Üçüncü sanal iç çevrim için, ikinci çevrime ait birinci mertebeden temsil edilen transfer fonksiyonu ve üçüncü çevrime ait birinci mertebeden ayrıştırılmış model parçası birlikte ele alınarak sıfır kutup götürmeli bir kontrolör transfer fonksiyonu ikinci mertebeden elde edilir. Bu ikinci mertebeden sistem transfer fonksiyonu da birinci mertebe bir transfer fonksiyonu ile temsil edilerek tasarıma n. adıma kadar benzer şekilde devam edilebilir.

Bu yöntemde, kontrolörler PI olarak tasarlanırken sisteme eklenen sıfır sistem modelindeki kutbu yok etmek için kullanılır. Biraz daha genel bir yaklaşım ile kontrolörü

$$C_i(s) = G_{im}^{-1} * K_{im} * \frac{K_{ci}}{s} \quad (2.10)$$

şeklinde formüle edebiliriz. Burada bulunan  $K_{im}$  terimi, modelin çarpmaya göre tersinde paydaya geçerek sadeleşecektir, ancak kontrolörün kazancını belirleyen terim olan  $K_{ci}$ 'nin içerisinde varlığını sürdürmektedir. Bu durumda sistemin parçalanmış modelinin sadece kazanç olduğu veya iki tane sanal kutbu veya sıfırı olduğu durumlara göre de bir genelleme yapılabilir. Bu özellikten yararlanarak, 3 ve üzeri mertebeden sistemlere kontrolör tasarlanabileceği gibi, 1 ve 2. mertebeden sistemlere de kontrolör tasarlanma olanağı sağlanmaktadır. Bu şekilde hesaplamalar n. mertebeye kadar ilerletildiğinde  $i = 2, \dots, n - 1$  olmak üzere her bir sanal çevrim için kontrolör katsayıları

$$K_{ci} = \frac{1}{2^{i-1} \gamma * \lambda * K_{im}} \quad (2.11)$$

Şeklinde hesaplanır.

$\gamma$  parametresinin seçimi, sanal çevrim sayısına bağlıdır. Kontrolör kazanç parametreleri incelendiğinde ikinci çevrimden sonra gelen kontrolör katsayılarının aralarındaki oranın son kontrolör katsayısına kadar yarı yarıya oranlandığı, son kontrolörün bir öncekine oranının ise sistemin kapalı çevrim cevabına olan etkisinin önemli olduğu görünür. Bu oranın 2.5 olması tavsiye edilir. Bu durumda

$$\gamma = \frac{1}{2^{n-2} * 2.5} \quad (2.15)$$

olur.

### 3. Önerilen Oran Kontrol Yapısı

Bu bölümde MATKY kullanılarak bir oran kontrol yapısı önerilecektir. Bu yapıya ilişkin gösterim Şekil2 de yer almaktadır. Bu şekilde yer alan  $d_1, d_2$  işaretleri sırasıyla birinci sistemin giriş ve çıkış bozucuları,  $d_3, d_4$  işaretleri ise sırasıyla ikinci sistemin giriş ve çıkış bozucularıdır. MATKY ile kontrolör tasarlanırken seçilmesi gereken parametre sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonunun zaman sabiti parametresi olan  $\lambda'$  dir. Oran kontrolünde bulunan birinci ve ikinci çevrimlerdeki sistemler için aynı  $\lambda$  parametresi seçilerek, sistemlerin ölü zaman dinamiği haricindeki kapalı çevrim dinamikleri aynı seçilmiştir. Bu sayede kontrolörlerin kazanç değerleri iki çevrim içinde aynı hesaplanmaktadır.

Şekil2 de görülen  $dL1$  ve  $dL2$  blokları referanstan sonra eklenen ölü zaman eşitleme bloklarıdır, takip oranının sabit kalması amacıyla ölü zamanı düşük olan sistemin referansının önüne büyük olanla farkı kadar bir ekleme yapılmaktadır. Ölü zamanı yüksek olan çevrime ise ekleme yapılmamaktadır. Bu ekleme tablo 1 de bulunabilir.

Tablo1: Ölü Zaman Eşitleme Blokları

Ölü zaman eşitleme blokları	L1>L2 durumunda parametre eşdeğeri	L2>L1 durumunda parametre eşdeğeri
dL1	1	$e^{-(L2-L1)s}$
dL2	$e^{-(L1-L2)s}$	1

Çıkışlar arasındaki oranın tekrardan istenen seviyede tutulabilmesi için bozucuların bastırılacağı kadar bir süre geçmesi gerekecektir. Bozucu bastırılma süresi boyunca iki sistemin de istenen oranı koruyabilmesi için birbirlerinden haberdar olmaları gerekmektedir.

MATKY yapısında kontrol işareti hem gerçek sisteme hem de sistem modeline uygulanarak, ölçülen çıkış ile hesaplanan çıkış arasındaki fark işareti oluşturulur. Matematiksel olarak bu fark işaretinin içerisinde sisteme etkiyen bozucular ve model hataları yer almaktadır. Bu fark işareti oran bozulduğu durumda sistemler arasındaki farkı da temsil edecektir. Eğer bu fark işareti diğer sisteme bir şekilde eklenebilirse, bu şekilde bozucu bastırma durumunda da sistemler birbirlerini istenen oranda takip edebilecektir. Bu soruna çözüm olarak sistemlerin elde edilen fark işaretlerinin korunmak istenen oran olan "a" katı kadar şekilde diğer sistemin sanal çevrimlerine bozucu olarak eklenmesi ile sistemlerin birbiri ile "haberleşmesi" önerilmiştir. Bu şekilde bir sistem bozucu bastırırken oluşan fark, diğer sisteme sanal bozucu olarak eklenecek ve diğer sistem de çıkışında sanki bir bozucu etkisi varmış gibi davranacaktır. Bu bozucu sistemler arasında "a" oranı ile katlanarak ekleneceği için, bozucular sebebiyle, eklenecek olan farklar da oranı koruyacak şekilde eklenmiş olacaktır. Bu yeni oran kontrol yapısı "Model Ayırıştırma Temelli Oran Kontrol Yapısı" (MATOKY) olarak adlandırılabilir.

#### 4. Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde, önerilen yöntem literatürde ye alan iki dinamik oran kontrol yöntemiyle karşılaştırılacaktır. Karşılaştırma kriterinin oran olduğu dikkate alınarak aşağıdaki ölçüt önerilmesi uygun olacaktır.

$$J = \int \left| y_1(t) - \frac{y_2(t)}{a} \right| dt \quad (4.1)$$

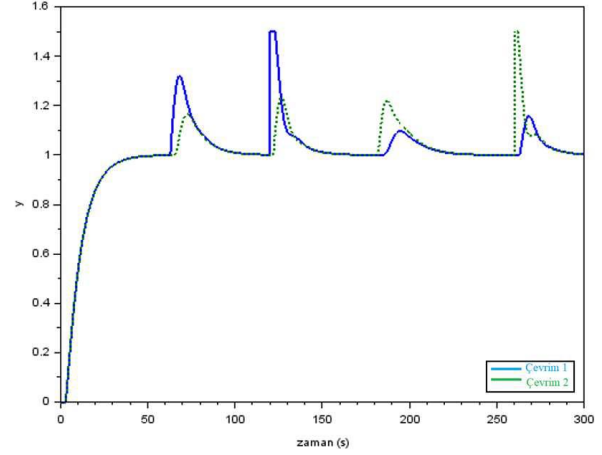
##### 4.1. Farklı Oran Kontrol Yapıları ile Karşılaştırma

Önerilen MATOKY yönteminin BDOKY [5] ve ÇBOKY [6] yöntemleri ile karşılaştırılabilmesi için aşağıda verilen birinci mertebeden ölü zamanlı sistem modelleri seçilmiştir.

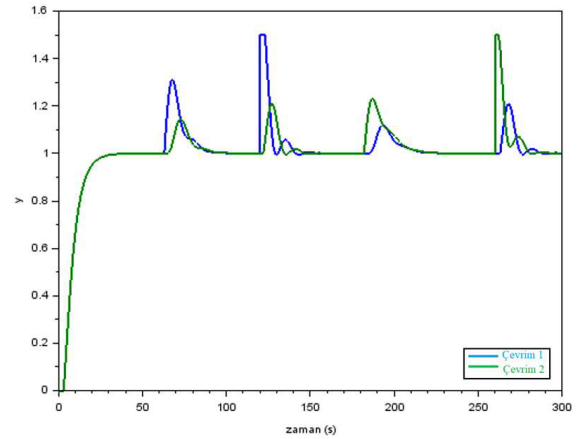
$$P_1(s) = \frac{1}{4s+1} e^{-3s} \quad (4.2)$$

$$P_2(s) = \frac{1}{6s+1} e^{-2s} \quad (4.3)$$

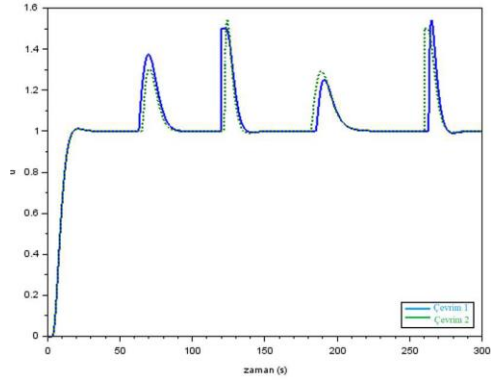
Bu sistemlere bağlı olarak ÇBOKY [6] çalışmasındaki  $\beta_1$  parametresi 0.5 olarak ve istenen zaman sabiti  $\lambda$  ise 3 s olarak seçilmiştir. BDOKY [5] çalışmasındaki kontrolör kazancı  $K_c$  değeri ise 0.11 olarak hesaplanmıştır. Sistemlere birim basamak referans işareti verilmiş, Şekil 2 de yer alan  $d_1, d_2, d_3, d_4$  bozucuları 60, 120, 180 ve 260'ıncı saniyelerde 0.5 genlikli basamak bozucular olarak uygulanmıştır. Önerilen MATOKY kullanılarak tasarlanan yapıda ise iki sistemin de  $C_1, C_2, C_3$  kontrolör katsayıları  $K_{c1} = 5, K_{c2} = 1.25, K_{c2} = 0.5$  olarak belirlenmiştir.



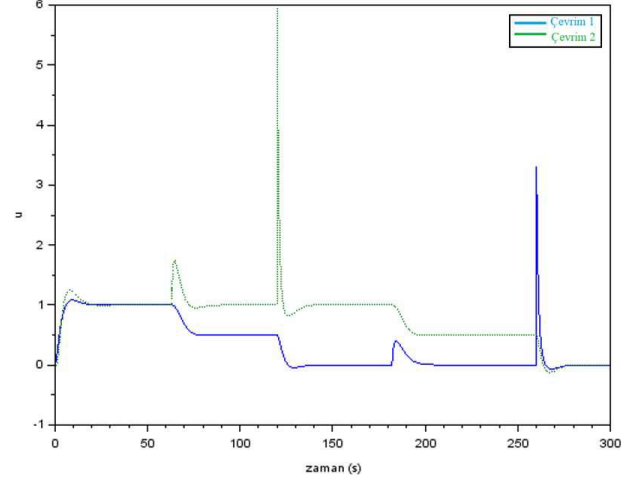
Şekil3: ÇBOKY için çıkış eğrileri



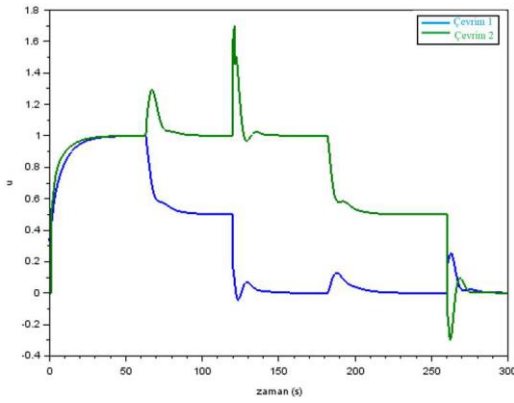
Şekil4: BDOKY için çıkış eğrileri



Şekil5: Önerilen kontrol yapısı çıkış eğrileri



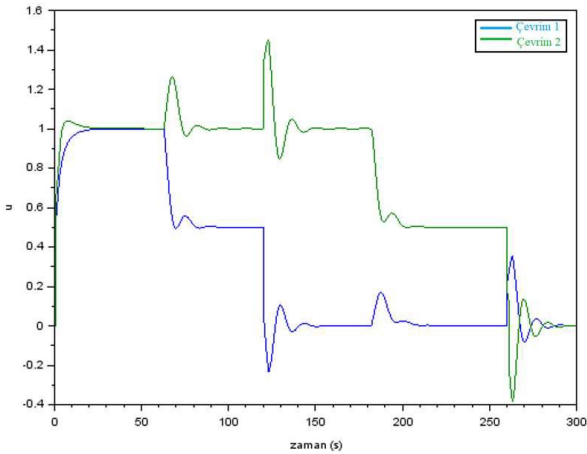
Şekil8: Önerilen kontrol yapısı kontrol işaretleri



Şekil6: ÇBOKY kontrol işaretleri

Tablo2: Oran kontrol yapılarının ideal durumda karşılaştırılması

Yöntem	ref+dist	ref	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
MATOKY	669.23	0.23	149.99	167.73	107.32	244.33
ÇBOKY	837.86	0.09	176.46	242.4	176.4	242.42
BDOKY	989.43	0.15	188.74	322.33	156.02	321.95

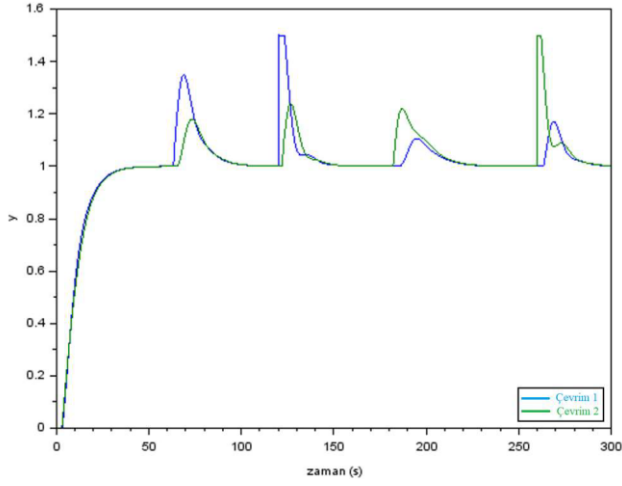


Şekil7: BDOKY kontrol işaretleri

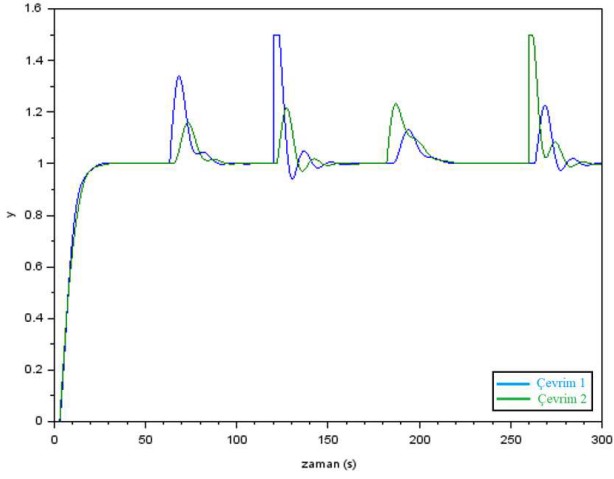
Yapılan benzetim sonucunda bozucu durumlarında önerilen yöntemin etkin bir şekilde oranı sabit tutabildiğini görebiliriz. Tablo2 de verilen değerler grafiklere göre daha açıklayıcı olup, önerilen yöntemin etkinliğini ortaya koymaktadır. Şekil3, şekil4 ve şekil5 incelendiğinde önerilen yöntemde oran 1 olacak şekilde iki sistem birbirini daha yakından takip etmiştir. Kontrol işaretlerine bakıldığında ise önerilen kontrol yapısında kontrol işaretleri bir miktar daha fazla olmasına rağmen, önemli olan sistem çıkışlarının oranını sabit tutmak olduğu için sistem oranı sabit kalması garantilenerek kontrol işareti düşürülebilir. Tablo2 de verilen nümerik değerlere bakıldığında ise referans takibi için değer olarak önerilen MATOKY daha yüksek bir ceza puanı almış olsa da, hem bu değerlerin mertebeleri 0.2 seviyelerinde olup, hem de bozucu etkimesi durumunda karşılaştırıldığı tüm yöntemlere üstünlük sağlamıştır. Özellikle sistemlerin çıkış bozucuları için önerilen yöntemin etkinliği hem grafiklerde hem de nümerik anlamda gözlenebilir.

#### 4.2. Parametre değişimlerinin sistemlere etkisi için benzetim çalışması

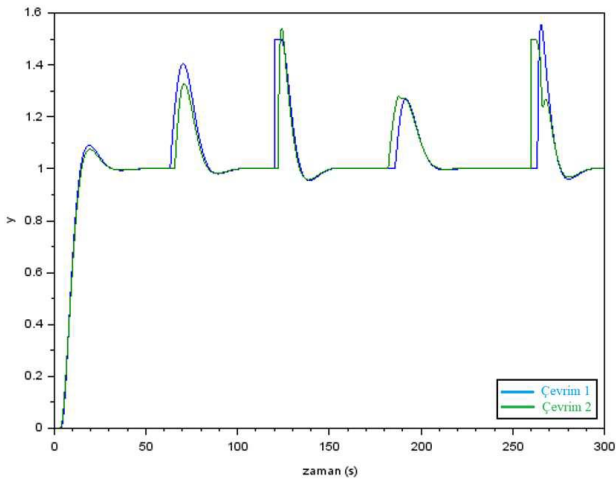
İlk olarak sadece birinci çevrimdeki sistemin parametrelerinin %10 eksik olarak tahmin edildiği, ikinci sistemin ise ideal olarak modellendiği durum değerlendirilmiştir.



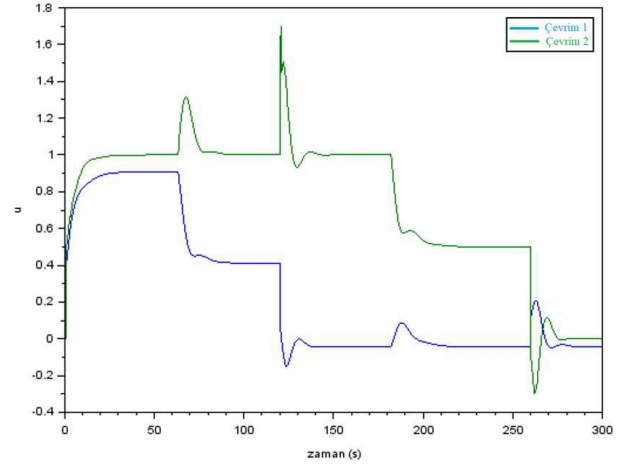
Şekil9: ÇBOKY çıkış işaretleri



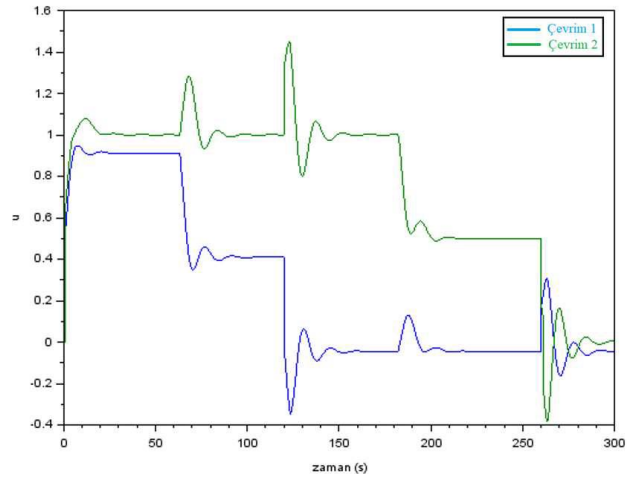
Şekil10: BDOKY çıkış işaretleri



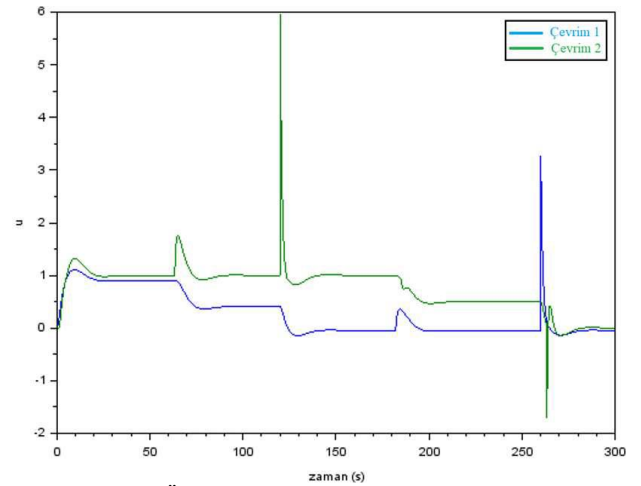
Şekil11: Önerilen kontrol yapısı çıkış işaretleri



Şekil12: ÇBOKY kontrol işaretleri



Şekil13: BDOKY kontrol işaretleri



Şekil14: Önerilen kontrol yapısı kontrol işaretleri

Tablo3: Birinci sistem % 10 eksik parametre tahmini için başarımlar kriteri



Yöntem	ref+dist	ref	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
MATOKY	751.09	43.13	153.82	159.20	110.91	283.88
ÇBOKY	949.17	46.78	193.74	269.90	176.19	262.03
BDOKY	1185.43	51.28	226.13	374.90	168.32	363.09

Parametrelerin yanlış tahmin edildiği veya zamanla değiştiği durumlarda kontrolör parametreleri değişmediği için çıkışların geçici cevaplarında istenildiği gibi davranmaması beklenen bir durumdur. Bu durumda ideal durumda görülen hatalardan daha yüksek hatalar çıkacaktır.

Tablo3' te gösterilen değerler ideal durumdan daha yüksek çıkmıştır ancak önerilen kontrol yapısının diğerlerinden daha etkin olduğunu ortaya koymaktadır.

## 5. Sonuç

Bu çalışmadan oran kontrol yapıları için model ayrıştırma tabanlı bir kontrol yapısı önerilmiştir. Önerilen yapı düşük mertebeden

yüksek mertebeden sistem modelleri ile birlikte çalıştırılabilir iken aynı zamanda az parametre hesabı ile her iki sistemin de çıkış oranlarını başarılı bir şekilde sabit tutabilmektedir.

Benzetim sonuçlarında yer alan Tablo2 ve Tablo3 incelendiğinde önerilen yöntemin karşılaştırıldığı yöntemlere kıyasla daha etkin olduğu görülmektedir.

## Kaynakça

- [1] T. Hagglund, "The Blend station - a new ratio control structure," Control Engineering Practice, vol. 9, pp. 1215-1220, 2001.
- [2] V. G. Gomes, "Controlling fired heaters," Chem. Eng., vol. 63, 1985.
- [3] A. Visioli, "Design and tuning of a ratio controller," Control Engineering.
- [4] A. Visioli, "A new ratio control architecture," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 44, pp. 4617-4624, 2005.
- [5] E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin, and O. A. Tekin, "Cross-coupled ratio control structure," Instrumentation Science and Technology, vol. 35, pp. 523-536, 2007.
- [6] O. Çakıroğlu, M. Güzelkaya, and İ. Eksin, "Improved cascade controller design methodology based on outer - loop decomposition," Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2014. DOI: 10.1177/01423312145362.
- [7] O. Çakıroğlu, M. Güzelkaya, and İ. Eksin, "Yüksek Mertebeden Sistemler İçin Ayrıştırma Temelli Bir Kontrol Yöntemi," TOK2014.
- [8] D. G. Padhan and S. Majhi, "Enhanced Cascade Control for a Class of Integrating Processes with Time Delay," Indian Institute of Technology Guwahati, India, 2012.

- [9] S. Uma, M. Chidambaram, A. S. Rao, and C. K. Yoo, "Enhanced control of integrating cascade processes with time delays using modified smith predictor," Chemical Engineering Science, vol. 65, pp. 1065-1075, 2010.
- [10] Y. S. Sun, C. Xu, and H. Yu, "Research of Adjusted Smith Predictor Based on Immune Feedback," Shanghai University of Electric Power, China, 2010.
- [11] L. Raja and A. Ali, "Enhanced tuning of Smith predictor based series cascaded control structure for integrating processes," ISA Transactions, vol. 114, no. 5, December 2020. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.12.045.