

T Kaotik Sisteminin Geri Besleme ile Kontrolü

Selçuk EMİROĞLU^{1*}, Yılmaz UYAROĞLU¹

ÖZET: Bu çalışmada, T sisteminin kaotik davranışı Lyapunov üstelleri, Kaplan-Yorke boyutu ve denge noktaları analiz edilerek gösterilmiştir. Daha sonra belirli parametreler altında kaotik davranış gösteren T sisteminin doğrusal geri beslemeli kontrol yardımıyla kontrolü araştırılmıştır. Denge noktaları etrafında kontrol edilen sistemin kararlılığını sağlamak için Routh-Hurwitz kriteri kullanılmıştır. T kaotik sistemini tek durum değişkeni geri besleme ile kontrol etmek için geri besleme katsayısı hesaplanmış daha sonra iki ve üç durum geri besleme ile sistemin kontrolü için aynı işlemler tekrarlanmıştır. Routh-Hurwitz kriteri kullanılarak geri besleme katsayıları hesaplanarak tasarlanan kontrolör T kaotik sistemine eklenmiştir. Kontrollü sistemde geri besleme katsayısı değişiminin sistemin kontrolünü nasıl etkilediği faz portreleri ile gösterilmiştir. Doğrusal geri beslemeli kontrolörün tasarlanması ve uygulanması oldukça basittir. Kontrolör basit yapıya sahip olduğundan donanımsal olarak maliyeti düşüktür ve pratik olarak gerçekleştirilmesi kolaydır. Geri beslemeli kontrolün uygulanmasıyla kontrollü sistemin sıfır ve diğer denge noktalarına yakınsadığı bilgisayar benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: T sistemi, kaos kontrolü, geri beslemeli kontrol, Routh-Hurwitz Metodu.

Feedback Control of the T Chaotic System

ABSTRACT: In this study, the chaotic behavior of the T system is shown by analyzing Lyapunov exponents, Kaplan-Yorke dimension and equilibrium points. Also, the chaos control of T system showing chaotic behavior under certain parameters is investigated via linear feedback control. Routh-Hurwitz criterion is used to provide the condition of stability of the controlled system around the equilibrium points. The feedback gain is calculated to control the T chaotic system with single state feedback, then the same calculations repeated for the control of the system with two and three state feedback. The controller designed by calculating the feedback coefficients using the Routh-Hurwitz criterion is added to the T chaotic system. It is shown by phase portraits how the change of the feedback gains affects the control of the system. The design and implementation of the controller is quite simple. Due to the simple structure of the controller, the controller hardware is low and realized conveniently. Simulation results show that the controlled system with the application of feedback control converges to zero and other equilibrium points.

Keywords: Chaotic T system, chaos control, feedback control, Routh-Hurwitz Method.

¹ Selçuk EMİROĞLU (Orcid ID: 0000-0001-7319-8861), Yılmaz UYAROĞLU (Orcid ID: 0000-0001-5897-6274), Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Selçuk EMİROĞLU, e-mail: selcukemiroglu@sakarya.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 21/01/2020

Kabul tarihi / Accepted: 25/03/2020

GİRİŞ

Kaotik sistemler başlangıç şartlarına ve sistem parametrelerine hassas bağıllık gösteren, önceden tahmin edilemeyen karmaşık sistemler olarak tanımlanabilir. Başlangıç şartlarına ve sistem parametrelerine hassas bağımlılığı kaotik davranışın önemli bir karakteristiğidir (Uyaroğlu, 2006). 1963 yılında Lorenz atmosferik aktarım üzerinde çalışırken ilk üç boyutlu kaotik çakeri bulmuştur (Lorenz, 1963). Lorenz' den sonra kaos çok ilgi çeken bir araştırma konusu haline gelmiş. Rössler (Rössler, 1976), Chen (Chen, 1990), Lü (Liu, 2004) ve birçok yeni 3 boyutlu (Gholamin, 2017, Joshi, 2019) kaotik sistemler ile 4 boyutlu (Singh, 2018) ve çeşitli boyutlarda (Sabaghian, 2020, Hu, 2018, Singh, 2018) hiper kaotik sistemler ortaya çıkmıştır.

Kaos kavramının tanımlanması ve kaotik sistemlerin özelliklerinin belirtilmesiyle literatürde kaos konusu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Kaos, güvenli haberleşme (Kocamaz, 2018), doğrusal olmayan devreler (Chithra, 2017) ve güç elektroniği (Emiroglu, 2017) gibi birçok alanda bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Bunlardan ilgi çeken diğer bir konu olarak, kaosun ve kaotik davranışın olumsuz olarak algılandığı ve bu tür davranışların görülmemesi istenen sistem yapılarında kaos kontrol çalışmalarıdır (Murali, 1995).

Kaos kontrolünde ana amaç kaotik osilasyonları tamamen ortadan kaldırmak veya düzenli duruma-osilasyonlara indirgemektir. İlk olarak Ott, Grebogi ve Yorke kaotik sistemlerin kontrolü için Ott-Grebogi-Yorke (OGY) metodu olarak adlandırılan bir kontrol metodu bularak kaotik sistemlerin kontrol edilebileceğini göstermişlerdir (Ott, 1990). OGY kontrol metodu ile birlikte kaos kontrolü üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Daha sonra bilim insanları tarafından kaos kontrol ve kaotik sistemlerin kontrolü için uyarlamalı kontrol (Jian, 2016), kayma kipli kontrol (Nazzal, 2007), pasif kontrol (Kocamaz, 2017), geri beslemeli kontrol (Yassen, 2005), doğrusal kontrol (Fu, 2020, Ullah, 2020) gibi birçok kontrol yöntemi çeşitli kaotik sistemlere uygulanmıştır. Bu kontrol metotları çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmış ve böylece kaotik sistemlerin kontrolü son yıllarda daha fazla ilgi görmeye başlamıştır (Zhang, 2009).

Fu ve arkadaşları, uygulanması ve donanımsal gerçekleştirilmesi basit olan bir doğrusal kontrolör tasarlamışlardır (Fu, 2020). Bu doğrusal kontrolör ile kaotik sistem asimptotik olarak denge noktasına ayrıca farklı istenilen durumlara yakınsadığı veya takip ettiği gösterilmiştir (Fu, 2020). Ullah ve arkadaşları da kesirli dereceli doğrusal olmayan dinamik süspansiyon sisteminde oluşan kaotik titreşimleri önlemek için durum geri beslemeli kontrolör tasarlamışlardır. Tasarlanan kontrolörün süspansiyon sistemindeki kaotik titreşimleri azaltıp yok ettiği benzetimler ile gösterilmiştir (Ullah, 2020). Hiper kaotik Rabinovich sistemi için doğrusal geri beslemeli, kayan kipli ve pasif kontrol tabanlı kontrolörler tasarlanmış ve kontrolörlerin performansları karşılaştırılmıştır (Kocamaz, 2017). Yassen yeni geliştirdiği 3 boyutlu kaotik sistemin kontrolü ve senkronizasyonu için doğrusal geri beslemeli kontrol uygulamıştır. Tasarlanan farklı doğrusal geri beslemeli kontrolörler ile sistemde oluşan kaosun kontrol edildiği gösterilmiştir (Yassen, 2005). Belirli şartlar altında kaotik davranan kalıcı mıknatıslı senkron motora uyarlamalı kontrol uygulanmıştır. Uyarlamalı kontrol sayesinde bazı sistem belirsizlikleri olmasına rağmen sistemde meydana gelen kaos kontrol edilmiştir (Jian, 2016). Nazzal iki farklı kaotik sistemdeki kaotik osilasyonları yok etmek için kayan kipli kontrolör tasarlamıştır (Nazzal, 2007).

Tigan 2005 yılında yeni bir üç boyutlu kaotik sistem geliştirdi (Tigan, 2005). Daha sonra Tigan tarafından bu sistemin analizi yapılarak T sistemi olarak adlandırıldı (Tigan, 2008). Bu çalışmada T kaotik sistemi geri beslemeli kontrol kullanılarak sistemdeki kaos kontrol edilmiştir. Geri beslemeli kontrolörler Rooth-Hurwitz kriteri kullanılarak tasarlanmıştır. Sistem analizi bölümünde, T kaotik

sisteminin dinamik davranışı Lyapunov üstelleri, Kaplan-Yorke boyutu, zaman serileri ve faz portreleri ile gösterilmiştir. Kontrol bölümünde tasarlanması ve uygulanması basit olan çeşitli geri beslemeli kontrolörler tasarlanmıştır. Kontrolörlerin sisteme uygulanmasıyla kaotik davranan sistemin sıfır ve diğer denge noktalarına yakınsadığı benzetimler ile gösterilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

T kaotik sisteminin modellenmesi

T kaotik sistemi (1) aşağıdaki denklem takımıyla tanımlanmaktadır (Tigan, 2005):

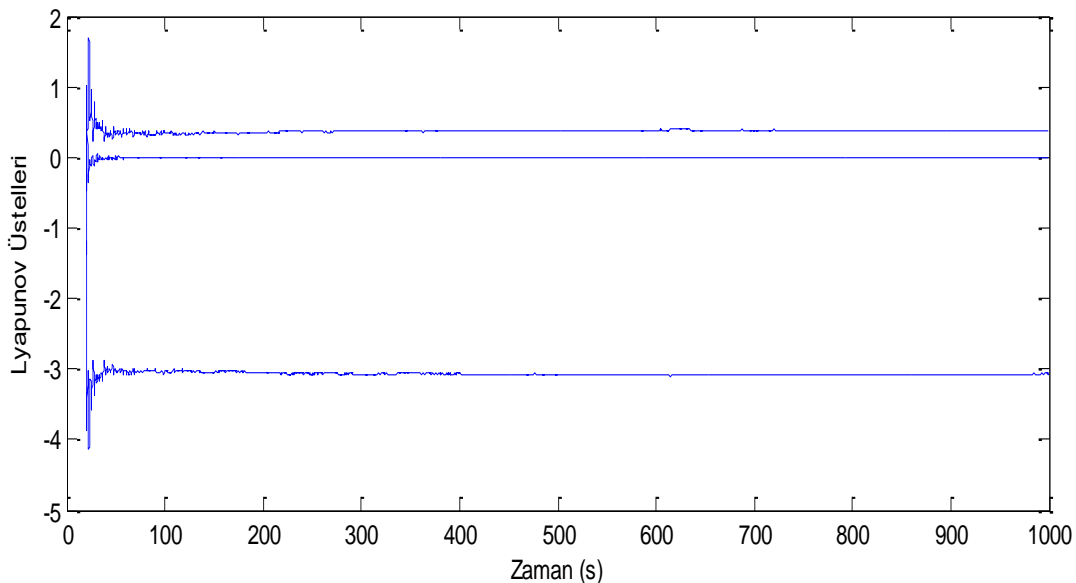
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = (c - a)x_1 - ax_1x_3 \\ \dot{x}_3 = -bx_3 + x_1x_2 \end{cases} \quad (1)$$

Burada a , b , c sistem parametreleri ve x_1 , x_2 , x_3 durum değişkenleridir. Denklemlerden görüldüğü gibi bu kaotik sistem, çarpım terimleriyle nonlinearliği sağlayan 3. dereceden bir sistemdir. Sistemin denge noktalarını hesaplırsak,

$$\begin{cases} a(x_2 - x_1) = 0 \\ (c - a)x_1 - ax_1x_3 = 0 \\ -bx_3 + x_1x_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

denge noktaları $Q_1(0, 0, 0)$, $Q_2(\sqrt{\frac{b(c-a)}{a}}, \sqrt{\frac{b(c-a)}{a}}, \frac{(c-a)}{a})$ ve $Q_3(-\sqrt{\frac{b(c-a)}{a}}, -\sqrt{\frac{b(c-a)}{a}}, \frac{(c-a)}{a})$ olarak bulunur. Parametreler $a=2.1$, $b=0.6$, $c=30$ olduğunda denge noktaları $Q_1(0, 0, 0)$, $Q_2(2.8234, 2.8234, 13.2857)$ ve $Q_3(-2.8234, -2.8234, 13.2857)$ olarak hesaplanır.

Lyapunov üstelleri sistemin kaotik olup olmadığını gösteren bir analiz yöntemidir. Hesaplanan Lyapunov üstellerinden en az bir tanesi pozitif ise o sistem kaotik sistem olarak adlandırılır (Greiner, 2010). Ayrıca sistemin kaotik davranışını incelemek için Lyapunov boyutu veya Kaplan-Yorke boyutu olarak da adlandırılan ölçüm kullanılır.



Şekil 1. T kaotik sisteminin Lyapunov Üstelleri

Parametreler $a=2.1$, $b=0.6$, $c=30$ seçilerek, sistemin Lyapunov üstelleri Şekil 1’ de görüldüğü gibi $\lambda_1=0.36>0$, $\lambda_2=0$ ve $\lambda_3=-3.06<0$ olarak hesaplanır. Sistemin Lyapunov üstellerinden birincisi pozitif ikincisi sıfır ve diğeri negatif olmakla beraber Lyapunov üstellerinin toplamı negatif olduğundan sistem kaotik davranır. Ayrıca sistemin kaotik olması için Kaplan-Yorke boyutunun 2 ile 3 arasında olması beklenmektedir (Sprott, 2003). T sisteminin Kaplan-Yorke boyutunun 2,1176 olarak hesaplanmasıyla kaotik davranış sergilediği söylenir.

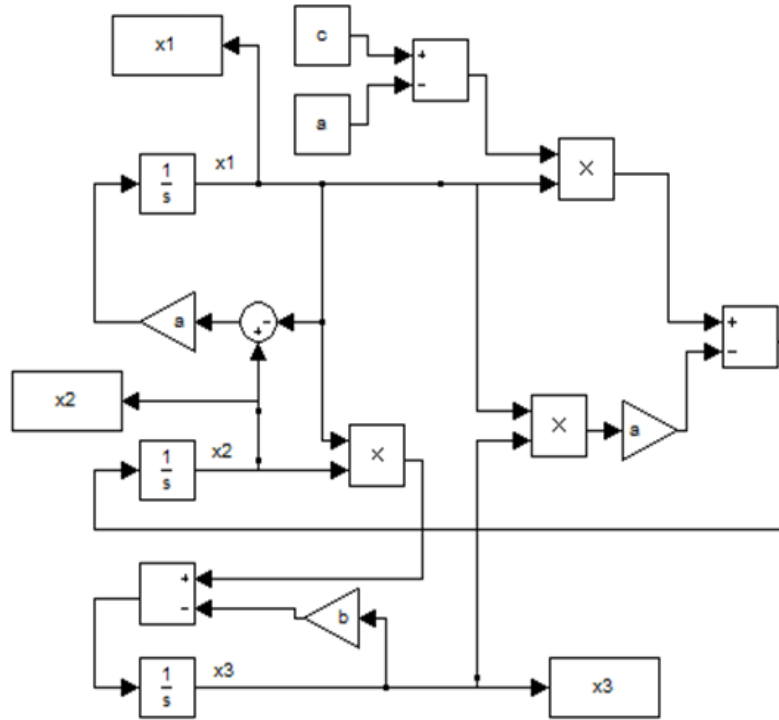
$$D_{KY} = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} = 2 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{|\lambda_3|} = 2 + \frac{0,36 + 0}{|-3,06|} = 2,1176$$

Liouville teoremine göre kaotik sistemlerde $\nabla V < 0$ olmalıdır (Shivamoggi, 2014). T sisteminde

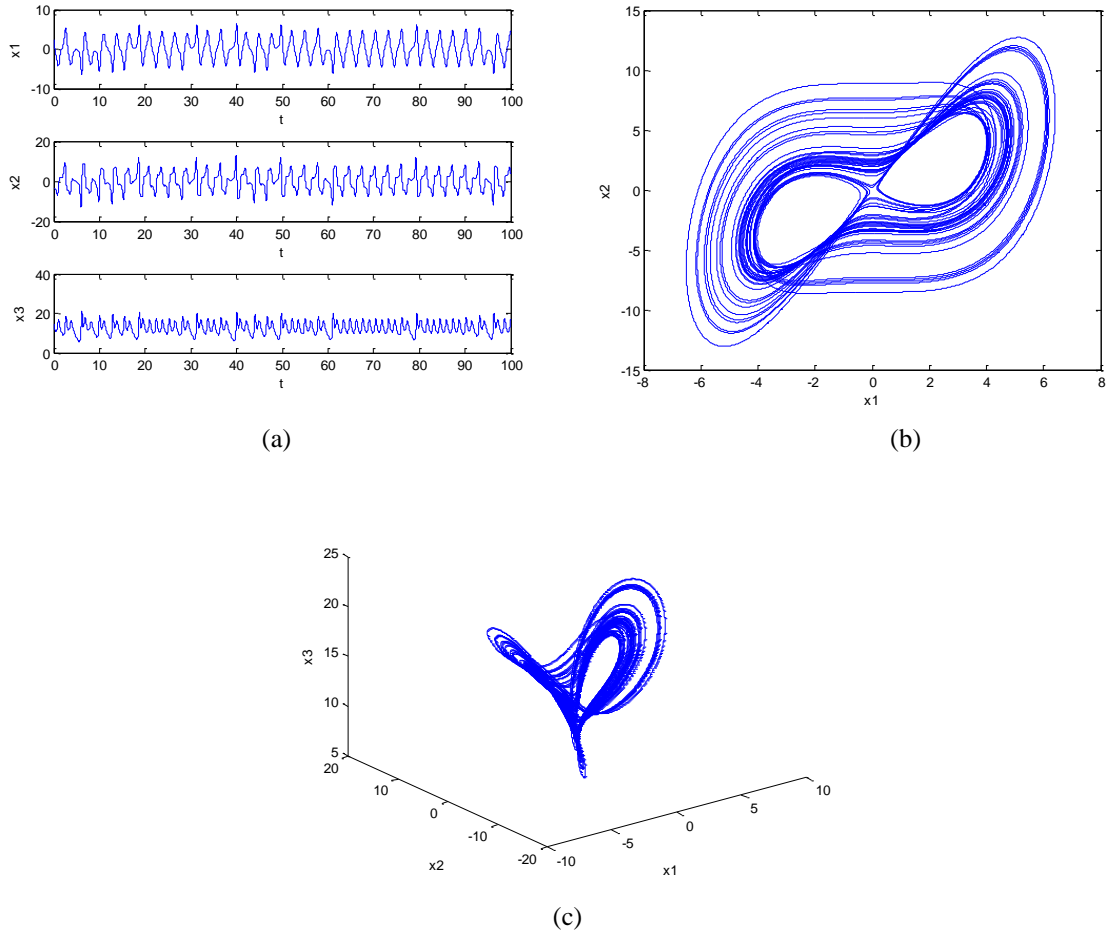
$$\nabla V = \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} = -a - b = -2,7 < 0$$

olarak hesaplanır.

T çekicisinin Şekil 2’ de verilen Matlab-Simulink modeli kullanılarak x_1 , x_2 , x_3 zaman serileri ve x_1 , x_2 , x_3 düzlemi faz portreleri Şekil 3’ teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. T sisteminin Matlab-Simulink modeli



Şekil 3. T sisteminin (a) Zaman serileri (b) $x_1 - x_2$ faz uzayı (c) x_1, x_2, x_3 faz uzayı

T sisteminin geri besleme ile kontrolü

Kontrollü sistem (3) aşağıdaki gibi verilmiştir. Aşağıdaki sistemde bir durum değişkeni belli bir katsayı ile çarpılarak diğer durum değişkenin denklemine eklenmiştir.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2.1(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = 27.9x_1 - 2.1x_1x_3 - kx_1 \\ \dot{x}_3 = -0.6x_3 + x_1x_2 \end{cases} \quad (3)$$

Burada k geri besleme katsayısıdır. Sistemin sıfır denge noktasında doğrusallaştırılmış jacobian matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$J = \begin{pmatrix} -2.1 & 2.1 & 0 \\ 27.9 - k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.6 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Buradan karakteristik denklem aşağıdaki gibi hesaplanır.

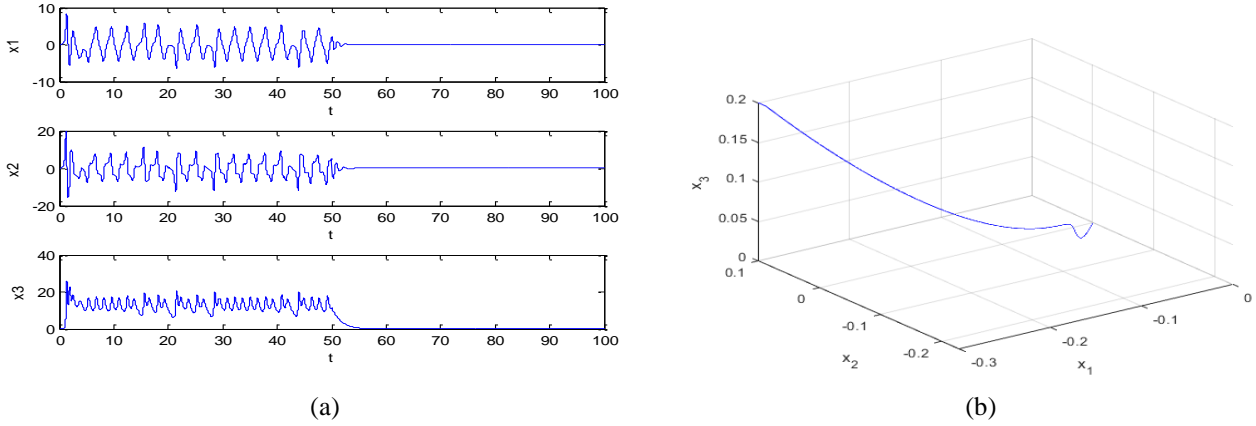
$$\lambda^3 + c_1\lambda^2 + c_2\lambda + c_3 = 0$$

Kontrollü sistemin kararlılığı Routh-Hurwitz kriterine göre sağlanmıştır. Karakteristik denklemde $c_1 > 0, c_2 > 0, c_3 > 0$ ve $c_1c_2 - c_3 > 0$ şartı sağlandığında tüm öz değerler negatif olur. c_1, c_2, c_3 karakteristik denklemin katsayılarıdır. Sıfır denge noktasında kontrolsüz sistemin özdeğerleri -8.7761,

6.6761 ve -0.6 olarak hesaplanmıştır. Sistem pozitif öz değere sahip olduğundan kontrolsüz sistem sıfır denge noktasında kararsızdır. Kontrollü sistemin karakteristik denkleminde

$$c_1 = 2.7, c_2 = 2.1k - 57.33, c_3 = 1.26k - 35.154$$

olarak hesaplanır. $k > 27.9$ olduğu zaman $c_1 > 0, c_2 > 0, c_3 > 0$ ve $c_1c_2 - c_3 > 0$ tüm katsayıların pozitif olduğu görülür. $k > 27.9$ olduğu zaman sıfır denge noktasındaki çözüm asimptotik karardır. Routh-Hurwitz teoremine göre sistem (3) $Q_1(0, 0, 0)$ denge noktasına yakınsar. $k=28$ seçildiğinde sistemin sıfır denge noktasına yakınsadığı Şekil 4' te görülmektedir.



Şekil 4. $k=28$ ve (a) Kontrolör 50.sn' de aktif iken kontrollü sistemin zaman serileri (b) Kontrollü sistemin faz portresi

İkinci durum ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2.1(x_2 - x_1) - kx_2 \\ \dot{x}_2 = 27.9x_1 - 2.1x_1x_3 \\ \dot{x}_3 = -0.6x_3 + x_1x_2 \end{cases} \quad (5)$$

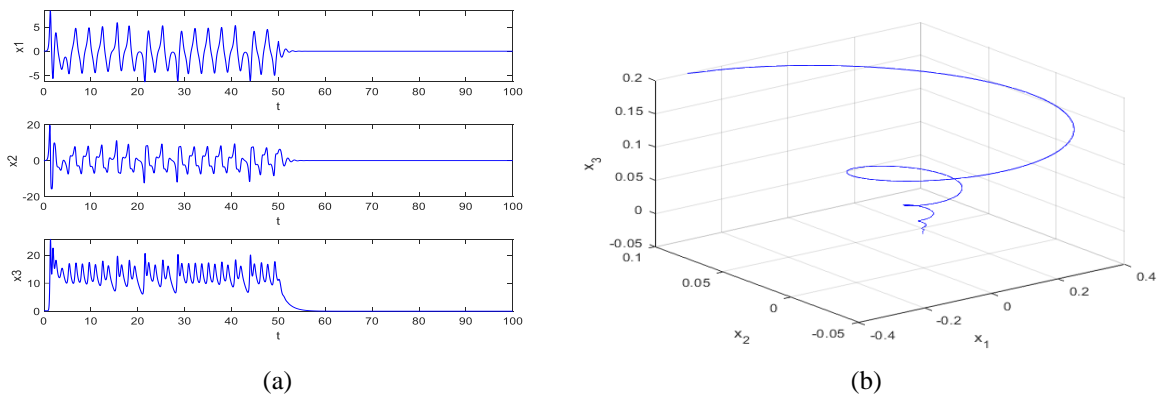
Bu durumda sistemin jacobian matrisi aşağıdaki elde edilir.

$$J = \begin{pmatrix} -2.1 & 2.1 - k & 0 \\ 27.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Burada,

$$c_1 = 2.7, c_2 = 27.9k - 57.33, c_3 = 16.74k - 35.154$$

olarak hesaplanır. $k > 2.1$ olduğu zaman $c_1 > 0, c_2 > 0, c_3 > 0$ ve $c_1c_2 - c_3 > 0$ tüm katsayıların pozitif olduğu görülür. Routh-Hurwitz teoremine göre $k=3$ seçtiğimizde sistem (5) Şekil 5' te görüldüğü gibi $Q_1(0, 0, 0)$ denge noktasına yakınsar.



Şekil 5. $k=3$ ve (a) Kontrolör 50.sn' de aktif iken kontrollü sistemin zaman serileri (b) Kontrollü sistemin faz portresi

İki durum geri besleme değişkeni kullanıldığı durum aşağıda verilmiştir.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2.1(x_2 - x_1) - kx_1 \\ \dot{x}_2 = 27.9x_1 - 2.1x_1x_3 - kx_2 \\ \dot{x}_3 = -0.6x_3 + x_1x_2 \end{cases} \quad (7)$$

Sistemin jacobian matrisi (8)'de elde edilmiştir.

$$J = \begin{pmatrix} -2.1 - k & 2.1 & 0 \\ 27.9 & -k & 0 \\ 0 & 0 & -0.6 \end{pmatrix} \quad (8)$$

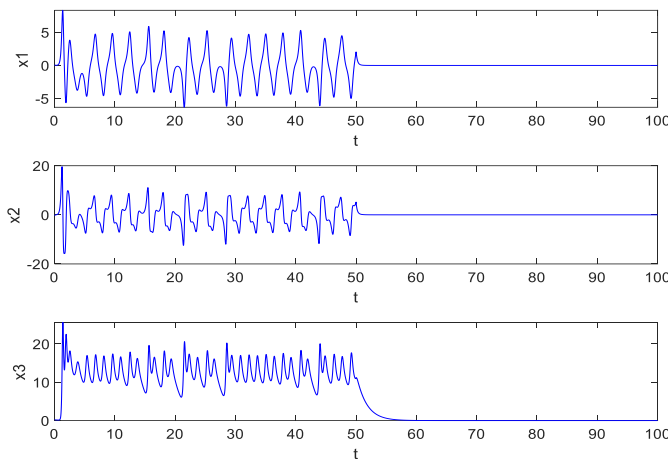
Buradan karakteristik denklem aşağıdaki gibi bulunur.

$$\lambda^3 + c_1\lambda^2 + c_2\lambda + c_3 = 0$$

Burada,

$c_1 = 2k + 2.7$, $c_2 = k^2 + 3.3k - 57.33$, $c_3 = 0.6k^2 + 1.26k - 35.154$ olarak hesaplanır.

$k > 6.677$ olduğu zaman $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $c_3 > 0$ ve $c_1c_2 - c_3 > 0$ tüm katsayıların pozitif olduğu görülür. Routh-Hurwitz teoremine göre $k=7$ durumunda sistem (7) $Q_1(0,0,0)$ denge noktasına yakınsadığı Şekil 6' dan görülmektedir.



Şekil 6. $k=7$ ve kontrolör 50.sn' de aktif iken kontrollü sistemin zaman serileri

Diğer bir durum olarak ise üç durum geri besleme değişkeni kullanıldığı durum aşağıda verilmiştir.

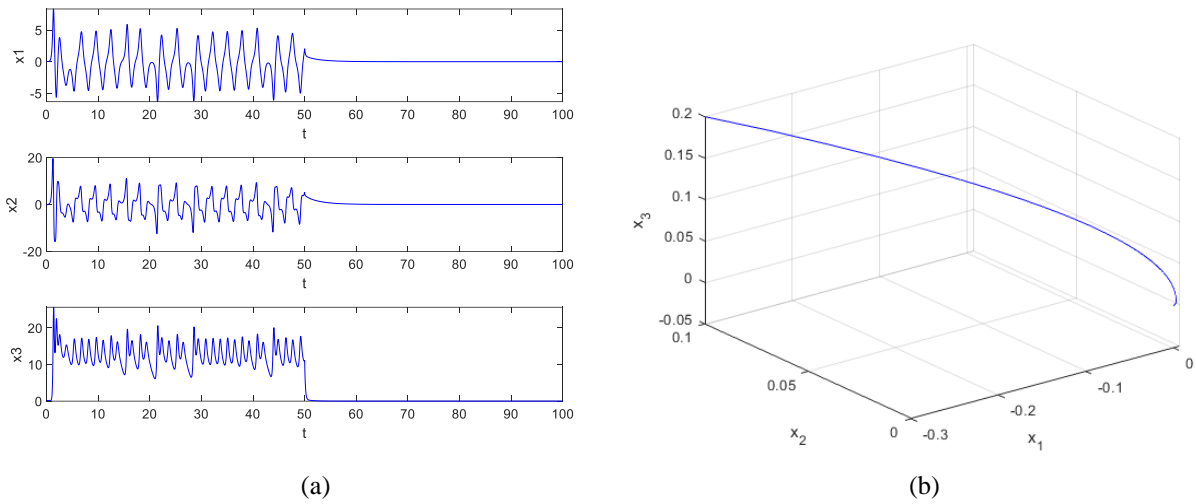
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2.1(x_2 - x_1) - kx_1 \\ \dot{x}_2 = 27.9x_1 - 2.1x_1x_3 - kx_2 \\ \dot{x}_3 = -0.6x_3 + x_1x_2 - kx_3 \end{cases} \quad (9)$$

Sistemin jacobian matrisi,

$$J = \begin{pmatrix} -2.1 - k & 2.1 & 0 \\ 27.9 & -k & 0 \\ 0 & 0 & -0.6 - k \end{pmatrix} \quad (10)$$

olur. Burada,

$c_1 = 3k + 2.7$, $c_2 = 3k^2 + 5.4k - 57.33$ ve $c_3 = k^3 + 2.7k^2 - 57.33k - 35.154$ olarak hesaplanır. $k > 6.677$ olduğu zaman $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $c_3 > 0$ ve $c_1c_2 - c_3 > 0$ tüm katsayıların pozitif olduğu görülür. Routh-Hurwitz teoremine göre sistem (9) $Q_1(0,0,0)$ denge noktasına yakınsar. $k=7$ seçildiğinde sistemin sıfır denge noktasına yakınsadığı Şekil 7' den görülmektedir.



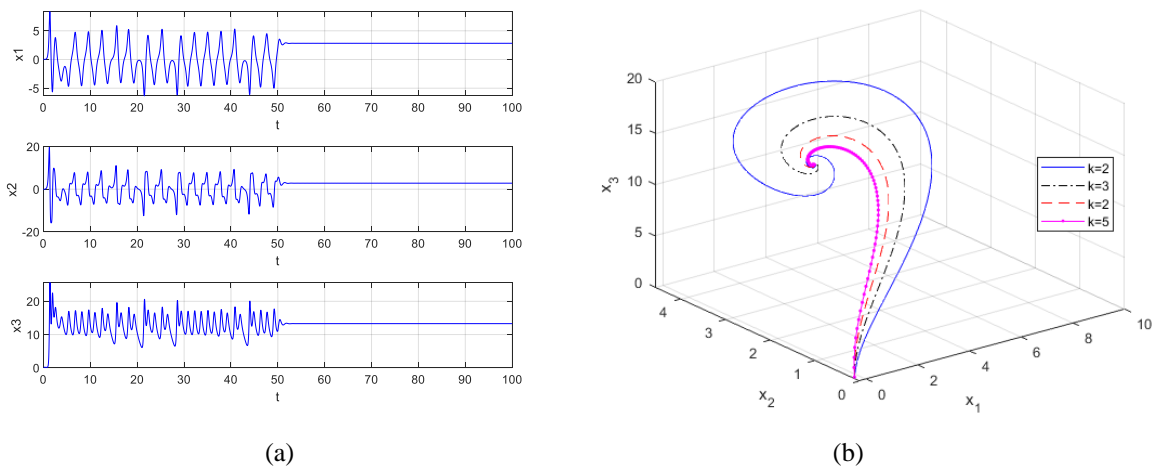
Şekil 7. $k=7$ ve (a) Kontrolör 50.sn' de aktif iken kontrollü sistemin zaman serileri (b) Kontrollü sistemin faz portresi

Diğer denge noktalarında Q_2 ve Q_3 etrafında kontrol etmek için üç durum geri besleme değişkeni kullanıldığı durum aşağıda verilmiştir.

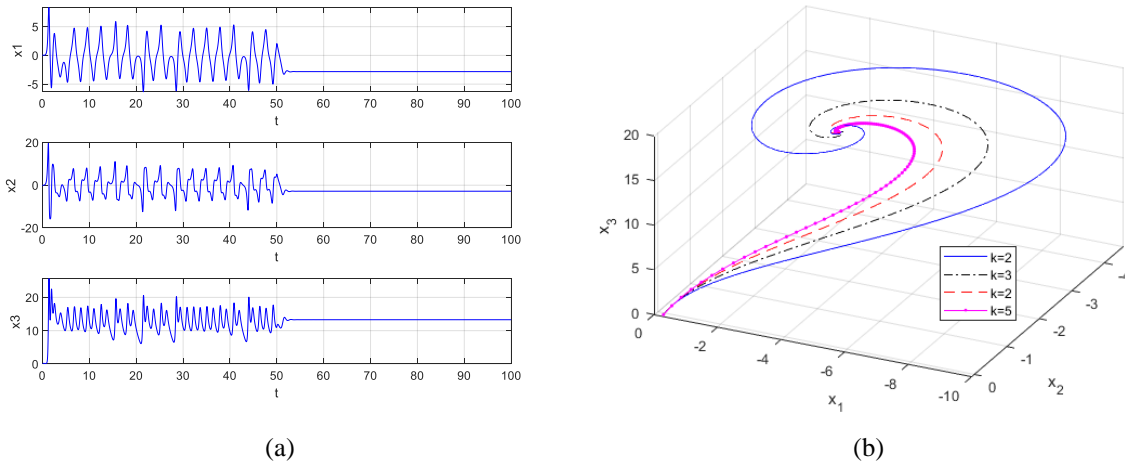
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2.1(x_2 - x_1) - k(x_1 - \bar{x}_1) \\ \dot{x}_2 = 27.9x_1 - 2.1x_1x_3 - k(x_2 - \bar{x}_2) \\ \dot{x}_3 = -0.6x_3 + x_1x_2 - k(x_3 - \bar{x}_3) \end{cases} \quad (11)$$

Burada, $Q = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)$ sistemin denge noktasıdır, sistem $Q_2(2.8234, 2.8234, 13.2857)$ ve $Q_3(-2.8234, -2.8234, 13.2857)$ denge noktalarında doğrusallaştırıldığında özdeğerler -3.4294 , $0.3647 + 4.5132i$ ve $0.3647 - 4.5132i$ olarak hesaplanmaktadır. Karakteristik denklemin katsayıları $c_1 = 3k + 2.7$, $c_2 = 3k^2 + 5.4k + 18$ ve $c_3 = k^3 + 5.4k^2 + 18k + 70.3$ olarak bulunur.

$k > 0.37$ olduğu zaman $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $c_3 > 0$ ve $c_1c_2 - c_3 > 0$ tüm katsayıların pozitif olduğu görülür. Routh-Hurwitz teoremine göre sistem (11) ayrı ayrı Q_2 ve Q_3 denge noktalarına yakınsar. Şekil 8 ve Şekil 9' dan görüldüğü gibi $k=1$ seçildiğinde sistemin ayrı ayrı $Q_2(2.8234, 2.8234, 13.2857)$ ve $Q_3(-2.8234, -2.8234, 13.2857)$ denge noktalarına yakınsadıkları görülmektedir. Ayrıca k geri besleme katsayısı artırıldıkça daha kısa sürede yakınsadığı Şekil 8 ve Şekil 9' dan görülmektedir.



Şekil 8. (a) Kontrolör 50.sn' de aktif iken kontrollü sistemin zaman serileri ($k=1$) (b) Kontrollü sistemin faz portresi



Şekil 9. (a) Kontrolör 50.sn' de aktif iken kontrollü sistemin zaman serileri ($k=1$) (b) Kontrollü sistemin faz portresi

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada T kaotik sisteminin kontrolü için geri beslemeli kontrol uygulanmıştır. Tüm bilgisayar benzetimlerinde parametreler $a=2.1$, $b=0.6$, $c=30$ ve başlangıç noktaları $x_1(0)=0.1$, $x_2(0)=-0.3$, $x_3(0)=0.2$ seçilmiştir. Kontrolörler 50. sn' den sonra sisteme uygulanmıştır. Faz portreleri elde edilirken ise kontrolörler benzetimin başında sisteme eklenmiştir. Sistemin kontrolü için Routh-Hurwitz kararlılık kriteri kullanılarak sırasıyla bir, iki ve üç durum geri beslemeli kontrolör tasarlanmış ve sisteme eklenmiştir. İlk olarak eşitlik (3)'teki \dot{x}_2 denklemine x_1 durum değişkeni geri besleme yapılarak kontrolör tasarlanmış ve $k>27.9$ olduğunda sistemin $(0, 0, 0)$ denge noktasında asimptotik kararlı olduğu Routh-Hurwitz kriteri ile gösterilmiştir. İkinci durum ise eşitlik (3)'teki \dot{x}_1 durum denkleminde x_2 durum değişkeni $-k$ katsayısı ile çarpılarak eklenmiştir. Bu durumda $k>2.1$ olduğunda sistemin $Q_1(0, 0, 0)$ denge noktasında kararlı olduğu görülmüştür. Diğer bir strateji ise iki durum geri beslemeli kontrolör kullandığımızda, sistemin denge noktasında kararlı olabilmesi için $k>6.677$ olması gerektiği, üç durumlu geri besleme kullandığımızda ise $k>6.677$ olması gerektiği hesaplanmıştır. Bu durumda kaotik sistem sadece $Q_1(0, 0, 0)$ sıfır denge noktasında değil diğer $Q_2(2.8234, 2.8234, 13.2857)$ ve $Q_3(-2.8234, -2.8234, 13.2857)$ denge noktalarında doğrusallaştırılıp geri besleme katsayıları hesaplanıp kontrol edilmiştir. Q_2 ve Q_3 denge noktaları etrafında geri besleme ile kontrol etmek için Routh-Hurwitz kriterine göre $k>0.37$ olması gerektiği gösterilmiştir. Ayrıca k geri besleme katsayısı arttıkça yakınsama zamanının azaldığı benzetimler ile Şekil 8(b) ve 9(b)'de gösterilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak T sisteminin kaotik davranışı Lyapunov üstelleri, faz portreleri, zaman serileri, Kaplan-Yorke boyutu ve denge noktaları elde edilerek gösterilmiştir. Daha sonra T kaotik sisteminde oluşan kaosun kontrolü doğrusal geri beslemeli kontrol ile gerçekleştirilmiştir. Kontrollü sistemin denge noktaları etrafındaki asimptotik kararlılığı Routh-Hurwitz kriteri ile sağlanmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarına göre; T kaotik sisteminin kontrolü Routh-Hurwitz kararlılık kriteri yardımıyla bir, iki ve üç durum değişkeni kullanılarak tasarlanan geri beslemeli kontrolör ile sistemin kontrolü sağlanarak denge noktalarına yakınsadığı benzetimler ile gösterilmiştir. k geri besleme katsayısı artırıldıkça sistemin daha kısa sürede denge noktasına yakınsayarak yerleşme zamanının azaldığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Chen G, Ueta T, 1999. Yet another chaotic attractor. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 9 (7): 1465-1466.
- Chithra, A., Raja Mohamed, I., 2017. Synchronization and chaotic communication in nonlinear circuits with nonlinear coupling. *Journal of Computational Electronics*, 16(3), 833–844.
- Emiroglu, S., Uyaroglu, Y., 2017. Time Delay Feedback Control based Chaos Stabilization in Current Mode Controlled DC Drive System, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(10), pp. 100-103.
- Fu, S., Liu, Y., Ma, H. Du, Y., 2020. Control chaos to different stable states for a piecewise linear circuit system by a simple linear control, *Chaos, Solitons and Fractals*, 130, 109431.
- Gholamin, P., Refahi Sheikhan, A. H., 2017. A new three-dimensional chaotic system: Dynamical properties and simulation, *Chinese Journal of Physics*, 55(4), pp. 1300-1309.
- Greiner, W., 2010. Lyapunov Exponents and Chaos, *Classical Mechanics*, pp.503-516.
- Hu, Z., Chan C-K., 2018. A 7-D Hyperchaotic System-Based Encryption Scheme for Secure Fast-OFDM-PON, *Journal of Lightwave Technology*, 36(16), pp. 3373-3381.
- Jian H, Yang Q, Hui L, 2016. Adaptive robust nonlinear feedback control of chaos in PMSM system with modeling uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 40 (19):8265-8275.
- Joshi, M., Ranjan, A., 2019, New simple chaotic and hyperchaotic system with an unstable node, *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, 108, pp. 1-9.
- Kocamaz UE, Uyaroglu Y, Kizmaz H, 2017. Controlling hyperchaotic Rabinovich system with single state controllers: Comparison of linear feedback, sliding mode, and passive control methods. *Optik*, 130: 159-167.
- Kocamaz, UE; Cicek, S; Uyaroglu, Y., 2018. Secure Communication with Chaos and Electronic Circuit Design Using Passivity-Based Synchronization, 27(4), 1850057.
- Liu, CX, Tao L Ling L, Kai L, 2004. A new chaotic attractor. *Chaos, Solitons and Fractals*, 22 (5): 1031–1038.
- Lorenz, EN, 1963. Deterministic non-periodic flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20: 130–141.
- Murali K, Lakshmanan M, Chua LO, 1995. Controlling and Synchronization of Chaos in the Simplest Dissipative Nonautonomous Circuit. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 5 (2): 563-571.
- Nazzal JM, Natsheh AN, 2007. Chaos control using sliding-mode theory. *Chaos, Solitons and Fractals*, 33 (2): 695-702.
- Ott E, Grebogi C, York JA, 1990. Controlling chaos. *Physical Review Letters*, 64 (11): 1196-1199.
- Rössler OE, 1976, An equation for continuous chaos, *Physical Review Letters A*, 57 (5): 397–398.
- Sabaghian, A., Balochian S., Yaghoobi, M., 2020. Synchronisation of 6D hyper-chaotic system with unknown parameters in the presence of disturbance and parametric uncertainty with unknown bounds, *Connection Science*, pp.1-22.
- Shivamoggi, B.K., 2014. Chaos in Dissipative Systems. In: *Nonlinear Dynamics and Chaotic Phenomena: An Introduction*. Fluid Mechanics and Its Applications, vol 103. Springer, Dordrecht, pp. 189.
- Singh, J.P., Roy, B. K., 2018. Five new 4-D autonomous conservative chaotic systems with various type of non-hyperbolic and lines of equilibria, *Chaos, Solitons and Fractals*, 114, pp.81-91.
- Singh, J.P., Rajagopal, K., Roy, B. K., 2018. A new 5D hyperchaotic system with stable equilibrium point, transient chaotic behaviour and its fractional-order form, *Pramana*, 91 (33), pp.1-10.
- Sprott, J.C., 2003. *Chaos and time series-analysis*, Oxford: Oxford University Press.
- Tigan Gh, 2005. Analysis of a dynamical system derived from the Lorenz system. *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara*, 50 (64): 61-72.
- Tigan Gh, 2008. Analysis of a 3D chaotic system. *Chaos Soliton and Fractals*, 36 (5): 1315-1319.
- Ullah, M. Z., Mallawi, F., Baleanu D, Alshomrani, A. S., 2020. A new fractional study on the chaotic vibration and state-feedback control of a nonlinear suspension system, *Chaos, Solitons and Fractals*, 132, 109530.
- Uyaroglu Y, 2006. Kaotik Lorenz Sisteminin Yarı-Ayna Yapısı. *Journal of İstanbul Kültür University*, 3: 141-146.
- Yassen MT, 2005. Controlling chaos and synchronization for new chaotic system using linear feedback control. *Chaos, Solitons and Fractals*, 26 (3): 913–920.
- Zhang, H., Liu, D., Wang, Z., 2009. *Controlling Chaos: Suppression, Synchronization and Chaotification*, Springer-Verlag, London.