IJPAS ISSN: 2149-0910 | INTERNATIONAL JOURNAL PURE AND APPLIED SCIENCES

Vol. 11(1); 219-239 (2025)
DOI:10.29132/ijpas.1703454

Araştırma Makalesi

Kaotik Sistemlerin Kontrolü için Bir Kullanıcı Grafik Arabirim Tasarımı

Usame Elhüseyyan [1], Mustafa Türk [2,*] ve Vedat Çelik [3]

Gönderim: 21.05.2025
Kabul: 12.06.2025

[1]Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye; 222113117@firat.edu.tr
[2,3]Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye; [2]mturk@firat.edu.tr, [3]celik@firat.edu.tr
* Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışmada, farklı özelliğe ve dinamiğe sahip 21 kaotik sistemin, klasik PID, Doğrudan Geri Beslemeli Kontrol, Pasif Kontrol ve Kayan Kipli Kontrol gibi 4 farklı kontrol yöntemi ile her bir sistemin kontrolü sağlanmıştır. Bu çalışmada, MATLAB/SIMULINK ve Grafik Kullanıcı Ara Birim araç kutusu ile bir kullanıcı ara birimi tasarlanmış ve 84 farklı uygulama gerçekleştirilerek uygulanan kontrol yöntemine göre oturma zamanı, kalıcı durum hatası, maksimum aşma gibi sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak seçilen kaotik sisteme en iyi performansa sahip kontrol yönteminin bulunması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablolar yardımı ile incelenebilmesi için ayrıntılı veriler içerecek şekilde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: kaos; kaos kontrol; kullanıcı grafik arabirimi; MATLAB

Research Article

A Graphical User Interface Design for the Control of Chaotic Systems

Abstract: In this study, the control of 21 chaotic systems with different characteristics and dynamics was achieved using five different control methods: classical PID, Direct Feedback Control, Passive Control ve Sliding Mode Control. A graphical user interface was designed using MATLAB/SIMULINK and the Graphical User Interface Toolbox. Through 84 different applications, performance metrics such as settling time, steady-state error, and maximum overshoot were compared based on the applied control method, aiming to determine the control technique that delivers the best performance for the selected chaotic system. The results were presented with detailed data in tables for thorough analysis.

Keywords: chaos; chaos control; graphic user interface; MATLAB

1. Giriş

Kaos, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde gözlemlenen temel özelliklerinden biri olarak, deterministik olmalarına rağmen öngörülemezlik ve karmaşıklık taşıyan bir fenomendir. Kaotik sistemler, pozitif Lyapunov üstelleri ile karakterize edilen başlangıç koşullarına aşırı duyarlılık, aperiyodiklik ve ergodiklik gibi özellikleri nedeniyle mühendislik, biyoloji ve ekonomi gibi farklı disiplinlerde yoğun şekilde incelenmektedir [1-3]. Tarihsel olarak kaotik davranış, özellikle mühendislik, elektronik, iletişim sistemlerinde kaotikliğin kontrol edilmesi önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Başka bir deyişle yaklaşık 20. yüzyılın sonlarına kadar dinamik sistemlerde istenmeyen bir durum olarak kabul edilmiş ve o davranışı bastırmak amacıyla parametre ayarlama tekniğine başvurarak kontrolü gerçekleştirilmiştir [4]. Kaotik osilasyonlar elektrik devrelerinde istenmeyen titreşimlere yol açarken, biyolojik sistemlerde düzensiz kalp atışlarına veya tedarik zincirlerinde tahmin edilemez dalgalanmalara neden olabilir. Ancak veri şifreleme, haberleşme ve biyomedikal mühendisliği gibi alanlarında 1990'lardan sonra hızlı gelişimi kaotik sinyallerin kullanım potansiyeli ortaya çıkarmıştır [5-12], bu da kaos kontrolün önemli bir araştırma alan haline getirmiştir. Ott, Grebogi ve Yorke (OGY) tarafından 1990'de önerilen parametrik pertürbasyon temelli kontrol yöntemi kaos kontrolünde bir dönüm noktası olarak sayılmaktadır. OGY yöntemi, kaotik sistemlerde bulunan hassas duyarlılığı kullanarak küçük parametre ayarlamalarıyla hedef periyodik orbitlere stabilize edilebileceğini teorik ve deneysel olarak kanıtlamıştır [4]. OGY yöntemini takiben, kaotik sistemlerin kontrolü sadece periyodik orbitlerle sınırlı kalmayıp, sabit denge noktalarının stabilizasyonu için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir [13-18].

Güncel literatürde, kaotik sistemlerin kontrol çalışmaları çoğunlukla tek bir kontrol yöntemi veya tek bir sistem tipi üzerinde gözlemlenmektedir. Bu durum, kontrol yöntemlerinin performansını sistemin derecesi, boyutu veya çekici yapısı gibi faktörlerin etkilendiğine dair sistematik bir karşılaştırma eksikliğine yol açmaktadır. Literatürde tek bir çalışma kapsamında bu kadar fazla sisteme ve kontrol stratejisine yer verilmiş bir çalışma bulunmamakla birlikte genel olarak kontrol simülasyonlarının çoğu komut satırı tabanlı araçlarla gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışma, literatürdeki bu boşlukları doldurmaya yönelik kullanıcı dostu bir grafik arayüz (GUI), MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı dinamiklere sahip 21 kaotik sistemin (tek çekici, çoklu çekici, dört boyutlu, otonom ve non-otonom yapılar dahil) sabit denge noktalarının stabilizasyon kontrolü üzerine kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Bu sistemler, dört farklı kontrol yöntemi (pasif kontrol, doğrudan geri besleme, klasik PID, Kayan kipli kontrol) ile kontrol edilmiş ve performansları aşma, oturma zamanı, kalıcı durum hatası ve RMS hatası gibi kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda her bir kontrol yöntemin farklı sistem yapılarına göre avantajları ve dezavantajları sunulmuştur. Ayrıca, bu çalışma kullanıcıların parametre optimizasyonu ve sonuç görselleştirme süreçlerini azaltmaya yönelik genişletilebilir.

Bu çalışmada, Bölüm 2'de kullanılan kaotik sistemlerin matematiksel modelleri ve onların temel kavramları tanıtılmıştır ve ardından bu sistemlerin kontrolüne yönelik uygulanacak kontrol yöntemlerinin teorik temelleri açıklanmıştır. Bölüm 3'te GUI mimarisi ve simülasyon altyapısı detaylandırılmıştır. Son olarak Bölüm 4'te deneysel sonuçlar ve performans analizi sunulmuştur ve gelecekte yapılabilecek ek geliştirilmeler hakkında öneriler sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kaotik Sistemler

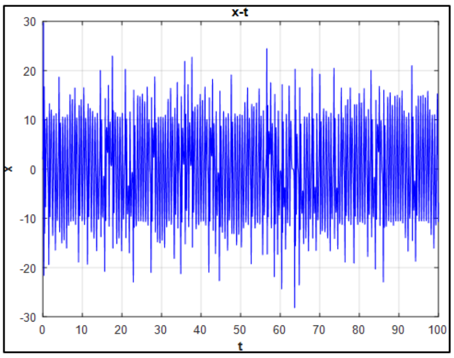
Bu çalışmada, Otonom, otonom olmayan, yüksek dereceli ve çoklu çekerli kaotik 21 farklı sistem seçilmiştir. Genel olarak literatürde yoğun olarak kullanılan Chua, Lorenz, Duffing, Lorenz-Stenflo, Lü, Chen, Rossler ve çoklu çeker oluşturan Four-wings gibi bilinen sistemler tercih edilmiştir [5-9]. Bu bölümde, modellemesi gerçekleştirilen her bir kaotik sınıfa ait sistemlerden bir tanesine temel özelliklerinden bahsedilmiştir.

2.1.1. Otonom Sistemler: Chen Kaotik Sistemi

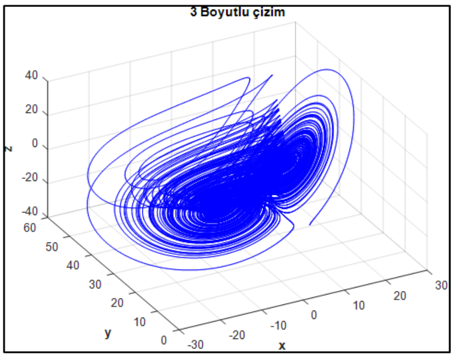
Otonom kaotik sistemler, dış kuvvetleri olmayan ve kendi dinamiklerinde bağımsız değişken içermeyen kaotik sistemlerdir. Buna örnek olarak Van der Pol, Chen, Chua, Lorenz, Lu, Rossler, T Koatik Sistem ve Dynamo disc sistemleri verilebilir. Bunlardan biri olan Chen sistemin matematiksel modeli Denklem (2.1)'de verilmektedir [5].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y-x) \\ \dot{y} &= (c-a)x + cy - xz \\ \dot{z} &= -bz + xy \end{aligned} \tag{2.1}$$

Denklem (2.1) ile gösterilen Chen kaotik sistemi bu paremetreler altında $a = 35, b = 3, c = 28$ Şekil 1'de gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfra eşitleyerek, denge noktaları $E_1 = (0,0,0), E_2 = (-7.9373, -7.9373, 21)$ ve $E_3 = (7.9373, 7.9373, 21)$ olarak bulunur.



(a)



(b)

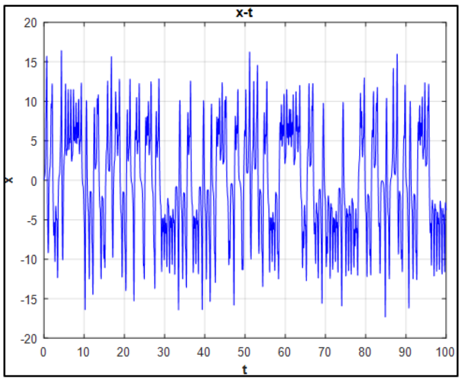
Şekil 1. Chen kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.1.2. Otonom Olmayan Sistemler:Zorlanmış Lorenz Kaotik Sistemi

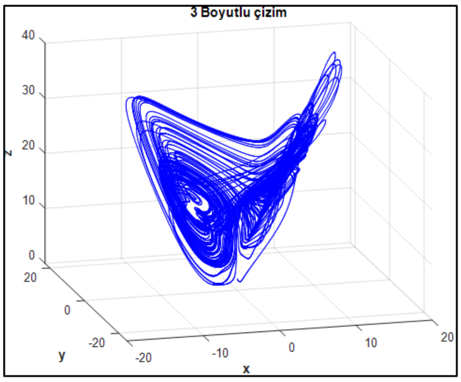
Otonom olmayan kaotik sistemler, açıkça zaman değikenine bağlı sistemler olup otonom sistemlere kıyasla daha karmaşık ve öngörülmez sistemlerdir. Buna örnek olarak otonom olmayan Chua, Değişken parametreli Van der Pol, Duffing, Zorlanmış Lorenz kaotik sistemleri verilebilir. Bu bağlamda matematiksel olarak Zorlanmış Lorenz kaotik sistemin modeli Denklem (2.2)'de verilmektedir [10].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y-x) \\ \dot{y} &= -xz + r(1+\epsilon\cos(wt))x - y \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \tag{2.2}$$

Denklem (2.2) ile gösterilen Zorlanmış Lorenz kaotik sistemi, $\sigma = 10, r = 20, \epsilon = 0.5, w = 19.2,\ b = 8/3$ paremetreleri altında Şekil 2'de gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfra eşitleyerek, denge noktaları $E_1 = (0,0,0), E_2 = (-7.1181, -7.1181, 19)$ ve $E_3 = (7.1181, 7.1181, 19)$ olarak bulunur.



(a)



(b)

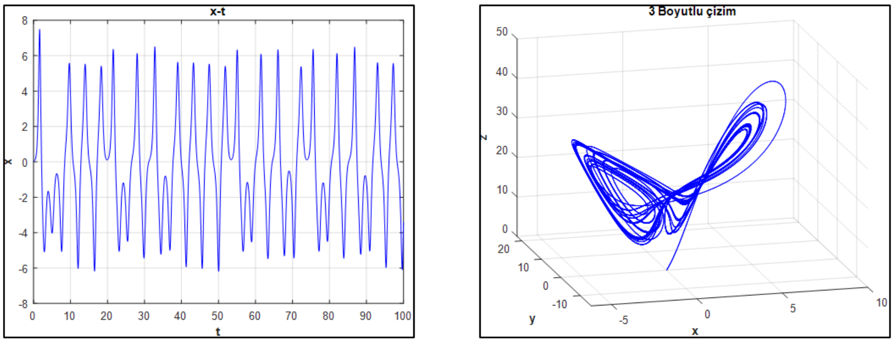
Şekil 2. Zorlanmış Lorenz kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.1.3. Yüksek Dereceli Kaotik Sistemler: Lorenz Stenflo Kaotik Sistemi

Dördüncü mertebeden kaotik sistemler, mertebesi daha düşük kaotik sistemlere kıyasla daha zengin bir davranış sergiler. Bu sistemler, faz uzayları daha karmaşık olup hiperkaos ve çoklu çekiciler gibi dinamik özellikler oluşturulmaktadır. Bu sistemler, birden fazla Lyapunov üsteline sahip olduklarından dolayı yüksek derecede öngörülmez olur ve bu sayede güvenli iletişim, şifreleme alanlarında çalışmaları yoğunlaşmaktadır [5]. Buna örnek olarak Dört Boyutlu Hiperkaotik Sistem, Dört Çekicili, Dört Kanatlı, Hiperkaotik Chen, Lorenz Stenflo kaotik sistemler verilebilir. Bunlardan biri olan Lorenz Stenflo kaotik sistemin matematiksel modeli Denklem (2.3)'te verilmektedir [10].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y-x) + dw \\ \dot{y} &= cx - xz - y \\ \dot{z} &= xy - bz \\ \dot{w} &= -x - aw \end{aligned} \tag{2.3}$$

Denklem (2.3) ile gösterilen Lorenz Stenflo kaotik sistemi, $a = 1,\ b = 0.7,\ c = 26, d = 1.5$ paremetreleri altında Şekil 3'te gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfra eşitlenerek, denge noktaları $E_1(0,0,0,0), E_2(2.5652, 6.4129, 23.5, -2.5652)$ ve $E_3(-2.5652, -6.4129, 23.5, 2.5652)$ olarak bulunmaktadır.



(a) (b)

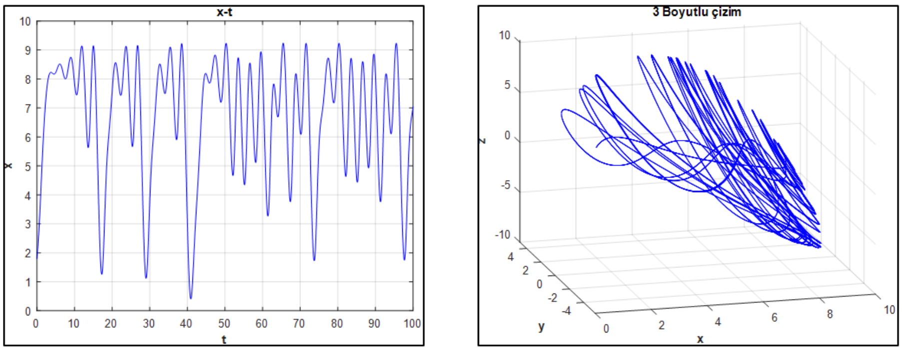
Şekil 3. Lorenz Stenflo kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.1.4. Tekli ve Çoklu Çekicili Kaotik Sistemler

Kaotik sistemler farklı bağlamlarda incelenebilen ve denge noktaları ile dinamik yapılarına göre farklı çekici türleri sergileyebilir. Bu sistemler genellikle tekli çekicili veya çoklu çekicili olarak sınıflandırılmaktadır. Tekli çekicili sistemler, yörüngeler belirli bir çekiciye yönelirken, çoklu çekicili sistemlerde başlangıç koşullarına bağlı farklı çekicilere ulaşılabilir. Bu bağlamda, tekli çekicili kaotik sistemlere örnek olarak New Jerk, Proposed Jerk ve 3 Boyutlu Jerk sistemler verilebilirken, Çoklu çekici sistemler kapsamında ise, üç farklı çekiciye sahip bir sistem ve bir boyutlu Çoklu Çekici sistemler verilebilir. Bu bağlamda matematiksel olarak 3 Boyutlu Jerk kaotik sistemin modeli Denklem (2.4)'te verilmiştir [12].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= ax - by - z + cxy - p(x^2 + y^2) \end{aligned} \tag{2.4}$$

Denklem (2.4) ile gösterilen 3 Boyutlu Jerk kaotik sistemi, bu paremetreler $a = 7.5, b = 4, c = 0.03, p = 0.9$ altında Şekil 4'te gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfra eşitleyerek, denge noktaları $E_1(0,0,0)$ ve $E_2(8.3333,0,0)$ olarak bulunmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4. Üç boyutlu Jerk kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.2. Kaos Kontrol Yöntemleri

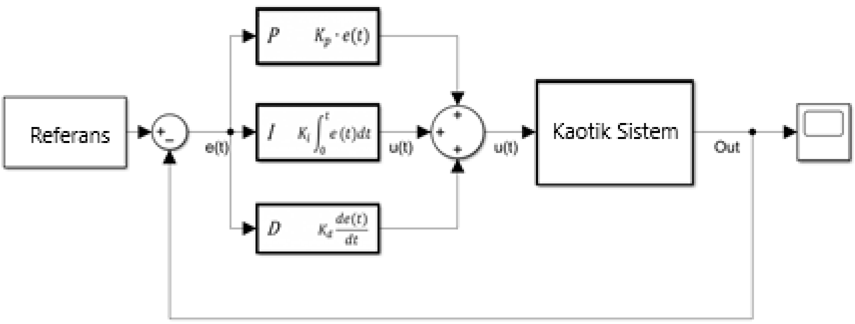
Kaotik sistemler karmaşıklık derecesi belirlemesinde yardım eden yöntemlerden biri Lyapunov üstelidir. Farklı Lyapunov üstel derecesi olan kaotik sistemlere PID, doğrudan geri besleme kontrol, pasif kontrol, genişletilmiş durum gözlemcisi tabanlı kontrol ve kayma kipli kontrol yöntemlerin tanıtımı yapılmıştır.

2.2.1. Klasik PID Kontrolü

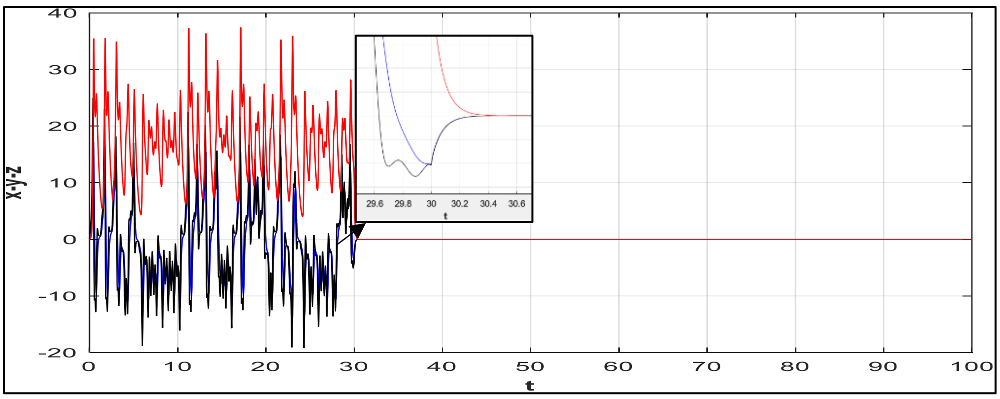
PID kontrol yöntemi, k_p, k_i ve k_d kontrol parametre ayarı yaparak hatanın sırasıyla oransal, integral ve türevsel olarak Denklem (2.5)'de gösterildiği gibi kontrol sinyali üretir [12].

$$u(t)) = K_P e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2.5}$$

Zorlanmış Lorenz kaotik sistemi üzerinde PID kontrol yönteminin uygulamasına ait Simulink modeli, Şekil 5'de gösterilmiştir. Kontrol sinyali $t = 30sn$'de aktifleştirilmiş kontrol sonucu elde edilen sistem davranışı Şekil 6'da verilmiş ve bu şekillerden elde edilen kontrol sonuçları da ileriki kısımlarda ve [19]'da ayrıntılı olarak irdelenmiştir.



Şekil 5. PID Kontrol Modeli



Şekil 6. Zorlanmış Lorenz kaotik sisteminin PID kontrol sonucu

2.2.2. Doğrudan Geribeslemeli Kontrol

Doğrudan geribesleme kontrolü, basit yapısından dolayı diğer kontrol yöntemlere kıyasen daha kolay tasarlanabilir olup çok tercih kazanan bir yöntemdir [14]. Genel itibarı ile doğrudan geribesleme kontrolün asıl çalışma prensipi mevcut çıkış sinyalinden, hedeflenen referans değeri çıkartılıp bir kazanç sabitine çarptıktan sonra sisteme eklenmesile gerçekleşmektedir. Ancak, doğrudan geribesleme kontrolü sistemin jacobian matrisi üzerine tasarlanır ve lokal kararlılığı sağlayan doğrusal kontrol yasaları üzerine kurulmaktadır [14]. Bu yöntem ayrıntılı bir şekilde Denklem (2.1) ile verilen Chen kaotik sistem üzerinde anlatılmıştır. Chen kaotik sisteme kontrol sinyali $u_1 = -k_1(x-\bar{x}), u_2 = -k_2(y-\bar{y}), u_3 = -k_3(z-\bar{z})$ ekleyerek Denklem (2.6)'de gösterilen forma dönüşmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y-x) - k_1(x-\bar{x}) \\ \dot{y} &= (c-a)x + cy - xz - k_2(y-\bar{y}) \\ \dot{z} &= -bz + xy - k_3(z-\bar{z}) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Denklem (2.6)'da bulunan kontrol kazançları, $k_1 = k_2 = k_3 = k$ kabul edilerek sistemin Jacobi matrisi Denklem (2.7)'te gösterildiği gibi bulunur.

$$J = \begin{bmatrix} -k-35 & 35 & 0 \\ -\bar{z}-7 & 28-k & -\bar{x} \\ \bar{y} & \bar{x} & -k-3 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Denklem (2.7)'deki $(\bar{x},\bar{y},\bar{z})$, denge noktaları temsil etmektedir. Denge noktası $E_1 = (0,0,0)$ olarak seçilmiş olup ve jacopi matresi Denklem (2.8)'te gösterilmiştir.

$$J_{E_1} = \begin{bmatrix} -k-35 & 35 & 0 \\ -7 & 28-k & 0 \\ 0 & 0 & -k-3 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Bu doğrultuda, bu eşitliği $|I\lambda - J_{E_1}| = 0$ sağlayarak Denklem (2.9) ile ifade edilen karakteristik denkleme ulaşılılır**.**

$$\lambda^3 + 10\lambda^2 + 3k\lambda^2 - 714\,\lambda + 3k^2\lambda + 20k\lambda + k^3 + 10k^2 - 714k - 2205 \tag{2.9}$$

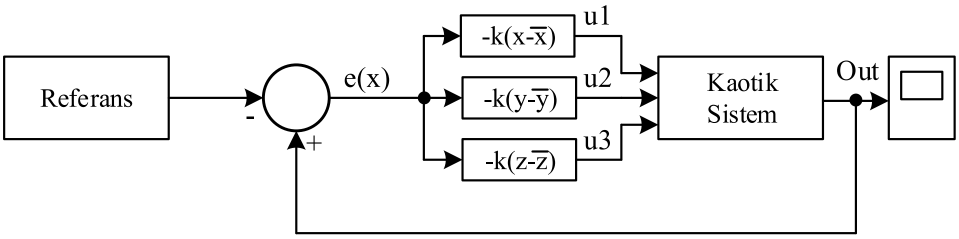
Ardından, Denklem (2.9)'i bu formata $\lambda^3 + C_1\lambda^2 + C_2\lambda + C_3$ dönüştürerek Denklem (2.10) bulunur.

$$\lambda^3 + (3k+10)\lambda^2 + (-714 + 3k^2 + 20k)\lambda + k^3 + 10k^2 - 714k - 2205 \tag{2.10}$$

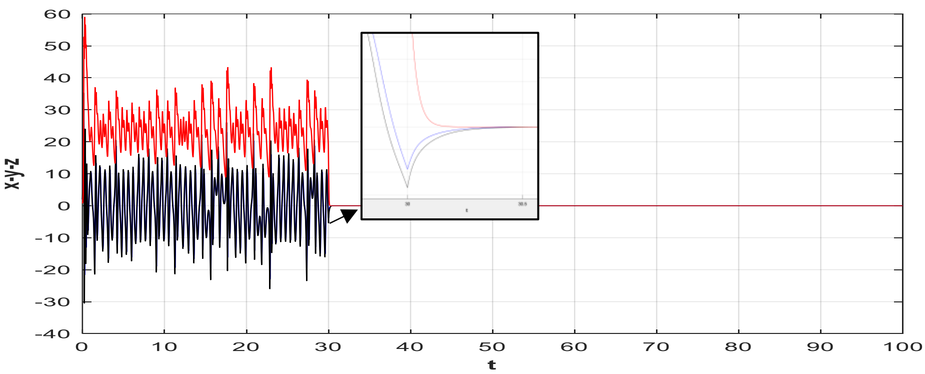
Denklem (2.10)'da kazanç sabiti k, Denklem (2.11)'de gösterilen Routh–Hurwitz kriterin iki şartı sağlayacak şekilde seçildiğinde sistemin özdeğerleri negatif bölgede olur ve başka bir deyişle sistem kararlı hale gelir. Bu analiz E_1denge noktası için yapılmış ve kontrol kazancı $k > 24$ olacağını belirtilmiştir. Sistemin diğer denge noktaları E_2, E_3 için aynı analizi yaparak ve her biri için uygun k kazancı belirledikten sonra, tüm durumları kapsayabilen en uygun k seçilir.Bu durumda da $k = 34$ olarak ayarlanmıştır.

$$C_1 > 0, C_2 > 0, C_3 > 0 \qquad (2.11)$$
$$C_1 C_2 > C_3$$

Chen kaotik sistemi üzerinde Doğrudan Geribesleme kontrol yönteminin uygulamasına ait Simulink modeli, Şekil 7'de gösterilmiştir. Kontrol sinyali $t = 30sn$'de aktifleştirilmiş olup sonucu Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Doğrudan geribeslemeli kontrol modeli



Şekil 8. Chen kaotik sistemin doğrudan geribesleme kontrol sonucu

2.2.3. Pasif Kontrol

Pasif kontrol yönteminde kontrol edilecek sistemin iç dinamikleri kullanılarak gerekli kontrol sağlanır. Bu kontrol yöntemi Lyapunov ve geri beslemeyi esas olarak almaktadır [15-16]. Genel olarak kontrol edilecek sistem Denklem (2.12) ile gösterilen forma getirilerek kontrol sağlanır.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \qquad (2.12)$$
$$y = h(x)$$

Burada durum değişkeni $x \in R^n$,giriş sinyalı $u \in R^n$ ve çıkış sinyali $y \in R^m$ olup sistemin $f(x)$ ve $g(x)$ fonksiyonları düzgün vektor alanları olarak tanımlanmakta olup, $h(x)$ pürüzsüz bir haritalama fonksiyondur [8-9]. Minimum fazlık kriteri sağlandığında pasiflik şartları uygun bir kontrol sinyali seçerek sağlanır [10]. Denklem (2.13) ile tanımlanan kontrol sinyali pasiflik şartlarını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

$$u = a(z,y)^{-1}\left[-b^T(z,y) - \frac{\partial}{\partial z} W(z)p(z,y) - ky + v\right] \tag{2.13}$$

Pasiflik kriteri **:** Aşağıdaki iki koşula sağlayan bir sistem pasif bir sistemdir:

$f(x)$ ve $g(x)$ var olup düzgün vektor alanları olmalı, $h(x)$ pürüzsüz fonksiyon haritalama olmalıdır[10].

Denklem (2.14) ile ilişkin olarak, tüm $t \geq 0$ için $b \geq 0$ ve $\rho \geq 0$ gerçek değerleri bulunmalıdır.

$$\int_0^t u^T(\tau)y(\tau)d\tau \leq b + \rho\int_0^t y^T(\tau)y(\tau)d\tau \tag{2.14}$$

Pasif kontrol yöntemi Denklem (2.3)'te belirlenen Lorenz Stenflo kaotik sistem üzerinde uygulanarak kontrol yöntemi verilmiştir. Yöntemin ilk adımlarında kontrol sinyalinin hangi durum değişkenine ekleneceğini belirlemek için $y = x_1$ olarak varsayılır ve geri kalan durum değişkenleri $z = \phi(x)$ şeklinde yazılarak, durum değişkenleri $z_1 = x_2,\ z_2 = x_3,\ z_3 = x_4$ olarak belirlenerek sistem Denklem (2.15) ile gösterilen matematiksel forma dönüştürülür.

$$\begin{aligned} \dot{z_1} &= cy - yz_2 - z_1 \\ \dot{z_2} &= yz_1 - bz_2 \\ \dot{z_3} &= -y - az_3 \\ \dot{y} &= a(z_1 - y) + dz_3 + u \end{aligned} \tag{2.15}$$

Denklem (2.15)'i, Denklem (2.16) ile kıyaslayarak kontrolsüz kısmın dinamikleri $f_0(z)$ Denklem (2.17), çıkış değişkenlerin etkisi $p(z,y)$ Denklem (2.18), $b(z,y)$ ve $a(z,y)$ sırasıyla Denklem (2.19) ve Denklem (2.20)'te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= f_0(z) + p(z,y)y \\ \dot{y} &= b(z,y) + a(z,y)u \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$f_0(z) = \begin{bmatrix} -z_1 \\ -bz_2 \\ -az_3 \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$p(z,y) = \begin{bmatrix} c - z_2 \\ z_1 \\ -1 \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

$$b(z,y) = a(z_1 - y) + dz_3 \tag{2.19}$$

$$a(z,y) = 1 \tag{2.20}$$

Sistemin sıfır dinamiğinin Lyapunov anlamında kararlılığı test etmek için, z değişkeninin enerjisini temsil eden pozitif tanımlı fonksiyon Denklem (2.21)'de tanımlanmıştır.

$$W(z) \;= 1/2({z_1}^2 + {z_2}^2 + {z_3}^2) \tag{2.21}$$

$W(z)$'in türevi ise, Denklem (2.22)'de gösterildiği gibi $\dot{W(z)} < 0$ sonucuna varılmıştır ve bu sayede, kontrolsüz kısmın dinamikleri $f_0(z)$, çıkış $y = 0$ tutulduğunda, başlangıç koşullarına bakılmaksızın iç dinamiklerin asimptotik olarak denge noktasına yakınsadığını belirlenir.

$$\dot{w} = \frac{dW(z)}{dt} = \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) = [z_1 \quad z_2 \quad z_3] \begin{bmatrix} -z_1 \\ -bz_2 \\ -az_3 \end{bmatrix} = -\left({z_1}^2 + b{z_2}^2 + a{z_3}^2\right) \leq 0 \tag{2.22}$$

Pasiflik kriterinin ikinci şartını sağlamak için Denklem (2.21)'i içeren ve pozitif tanımlı genel depolama fonksiyonu Denklem (2.23)'te tanımlanmaktadır.

$$V(z,y) \;=\; W(z) + 1/2y^2 \tag{2.23}$$

Denklem (2.23)'un türev alma işlemleri Denklem (2.24)-(2.26) ile verilmiştir.

$$\begin{gathered} \frac{d}{dt}V(z,y) = \frac{\partial W(z)}{\partial z}\,\dot{z} + y\dot{y} \\ \frac{d}{dt}V(z,y) = \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) + \frac{\partial W(z)}{\partial z} p(z,y)y + yb(z,y) + ya(z,y)u \end{gathered} \tag{2.24}$$

$\partial W(z)/\partial z\, f_0(z) \leq 0$ olduğundan Denklem (2.24), Denklem (2.25) ile yeniden düzenlenmiştir.

$$\frac{d}{dt}V(z,y) \leq \frac{\partial W(z)}{\partial z}\, p(z,y)y + yb(z,y) + ya(z,y)u \tag{2.25}$$

Denklem (2.13) ile gösterilen kontrol sinyali, Denklem (2.25)'deki yerine yerleştirilerek Denklem (2.26) oluşur.

$$\frac{d}{dt}V(z,y) \leq -ky^2 + vy \tag{2.26}$$

Denklem (2.26), Denklem (2.27) forma getirilir, ardından $V(z_0, y_0) = \rho$ ve $V(z,y) > 0$ doğrultusunda Denklem (2.28) ile pasiflik kriterin ikinci şartı sağlanır.

$$V(z,y) - V(z_0, y_0) \leq \int_0^t v(\tau)y(\tau)d\tau - \int_0^t ky(\tau)^2 d\tau \tag{2.27}$$

$$\int_0^t v(\tau)y(\tau)d\tau + \rho \ \geq \int_0^t ky(\tau)^2 d\tau + V(z,y) \geq \int_0^t ky(\tau)^2 d\tau \tag{2.28}$$

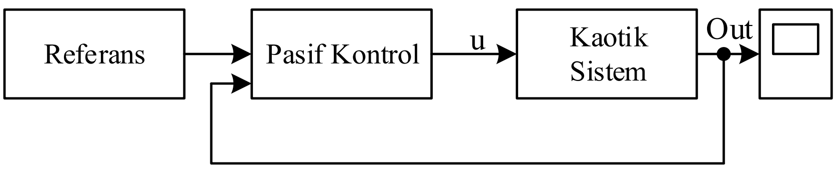
Veriler sonucunda kontrol sinyali Denklem (2.29) ve Denklem (2.30) ile verilmiştir. Kontrol sinyali Denklem (2.3)'e eklenip dinamikleri sıfra eşitlenerek değeri Denklem (2.31)'de verilmiştir.

$$u = -(a+c)z_1 + (a-k)y - (d+1)z_3 + v \tag{2.29}$$

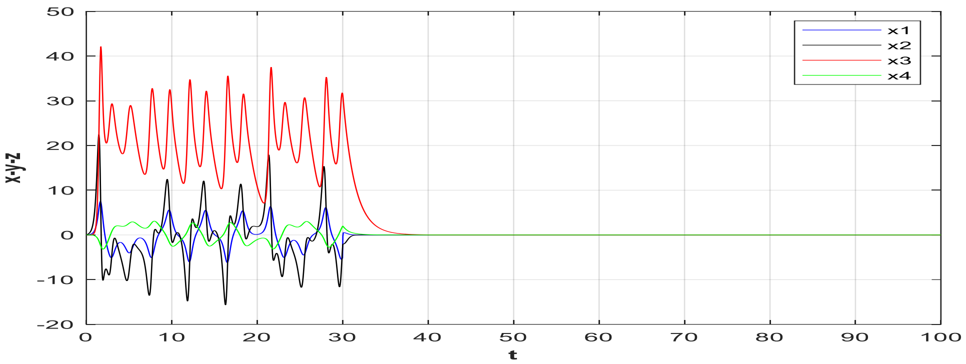
$$u = -(a+c)x_2 + (a-k)x_1 - (d+1)x_4 + v \tag{2.30}$$

$$\mathrm{v} = \alpha x_1^* + \mathrm{c}x_2^* + \mathrm{x}_4^* \tag{2.31}$$

Pasif kontrol Simulink modeli ve t=30s anında devreye alınan kontrolörün sonucu sırasıyla Şekil 9'da ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Pasif Kontrol Modeli



Şekil 10. Lorenz Stenflo kaotik sistemin pasif kontrol sonucu

2.2.4. Kayan Kipli Kontrol

Kayan Kipli Kontrol (KKK), doğrusal olmayan sistemlerde kullanılan kontrol yöntemlerinden öne çıkan ve oldukça etkin bir yöntem olarak bilinmektedir [17-18]. KKK yöntemi adını oluşturduğu kayma yüzeyinden almaktadır. KKK yönteminde oluşturulan kayma yüzeylerinin özelliklerine göre sınıflandırılmakta olup, bu çalışmada doğrusal kayma yüzeyi kullanılmıştır. KKK yöntemi, sistemin hareketini oluşturulan kayma yüzeyine çeker ve bu yüzeyin üzerinde kalmasını sağlar böylelikle sistem istenilen denge noktasına yönlendirilir.

$$\begin{gathered}\dot{x} = y + u_1 \\ \dot{y} = z + u_2 \\ \dot{z} = ax - by - z + cxy - p(x^2 + y^2) + u_3\end{gathered} \tag{2.32}$$

Sistemin denge noktası (x_d, y_d, z_d) olarak tanımlandığında, hata değişkenleri $e_1 = x - x_d, e_2 = y - y_d$ ve $e_3 = z - z_d$ olur ve $y_d = z_d, ax_d - px_d^2 = 0$ doğrultusunda, sistemin hata dinamiği Denklem (2.33) ile gösterilir.

$$\begin{gathered}\dot{e_1} = e_2 + y_d + u_1 \\ \dot{e_2} = e_3 + z_d + u_2 \\ \dot{e_3} = -pe_1^2 - pe_2^2 + ce_1e_2 + e_1(a + 2px_d + cy_d) + e_2(-b - 2py_d + cx_d) - e_3 + u_3\end{gathered} \tag{2.33}$$

Denklem (2.33)'ün doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenleri, sırasıyla Denklem (2.34) ve Denklem (2.35) ile gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 + y_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 + z_d \\ (a + 2px_d + cy_d) & (-b - 2py_d + cx_d) & -1 \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

$$\eta(e_1, e_2, e_3) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -pe_1^2 - pe_2^2 + ce_1e_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Kontrol sinyali $u = [u_1, u_2, u_3]^T$, doğrusal olmayan terimleri yok edecek şekilde tasarlanıp Denklem (2.36)'de gösterilmiştir.

$$u = -\eta(e_1, e_2, e_3) + Bv \quad (2.36)$$

Oluşturulacak kayma yüzeyi $s = Ce = 0$ olarak tanımlanır ve sistemin bu yüzeyin üzerinde kalması için $\dot{s} = 0$ koşulun sağlanması gerekmektedir. Bunu takiben $\dot{s} = C\dot{e}$ Denklem (2.37)'de gösterildiği gibi bulunmuştur.

$$\dot{s} = C(Ae + \eta(e_1, e_2, e_3) + u) = 0 \quad (2.37)$$

Bu doğrultuda, u kontrol sinyali Denklem (2.37)'e eklenerek Denklem (2.38) ve eşdeğer kontrolü temsil eden Denklem (2.39) bulunur.

$$\dot{s} = C(Ae + Bv) = 0 \quad (2.38)$$

$$v = -(CB)^{-1}CAe \quad (2.39)$$

Sistemin kapalı çevrim dinamiğini temsil eden Denklem (2.40)'ın B matrisi ve PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) yöntemiyle elde edilen C matrisi, özdeğerler negatif olacak şekilde $B = [1\ 1\ 1]^T$, $C_1 = [\ 812.3034\ 564.3370 - 278.2805\ ]$ ve $C_2 = [-994.2287\ 908.4396\ 77.0270]$ sırasıyla E_1 ve E_2 için tasarlanmıştır. Elde edilen özdeğerler de sırasıyla $eig_1 = \{-11.6899\ 0 - 4.08\}$, $eig_2 = \{-104.058\ 0 - 14.3699\}$ elde edilir [11].

$$\dot{e} = [I - B(CB)^{-1}C]Ae \quad (2.40)$$

Böylelikle sistem kayma yüzeyinin üzerinde kalmasını sağlayan eşdeğer kontrol sinyaline ulaşılmış olup sistemin kayma yüzeyine ulaşmaya sağlayan anahtarlama kontrolü Denklem (2.41) ile tanımlanan Lyapunov fonksiyonun kararlılığına bağlıdır.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (2.41)$$

Burada V pozitif tanımlı bir fonksiyon olup türevi ise Denklem (2.42)'deki koşulu sağlandığında sistem kararlı ve yakınsama davranışı tanımlar.

$$\dot{V} = s.\dot{s} < 0 \quad (2.42)$$

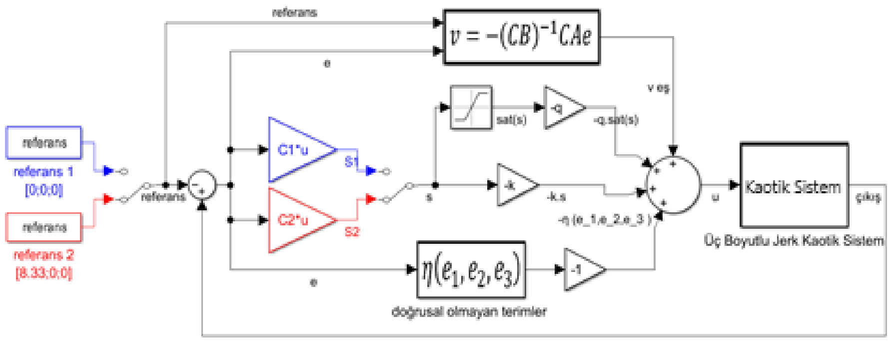
$\dot{s} = C\dot{e}$ denklemi kararlılığını koruyarak üstel hızda yakınsayacağını garanti etmek için Denklem (2.29), Denklem (2.43) ile yeniden tasarlanmıştır.

$$C(Ae + Bv) = -Ks - qsign(s) \tag{2.43}$$

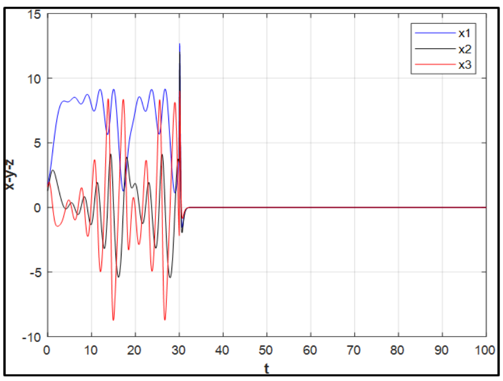
Bu takiben genel bir kontrol sinyali Denklem (2.44)'de verilmiştir.

$$v(t) = -CB^{-1}[CAe \ + Ks + qsign(s)] \tag{2.44}$$

Şekil 11'de gösterilen Simulink modelinde $sign$ fonksiyonun oluşturduğu titreşmeleri azaltmak için sat fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca, $t = 30sn$'de devreye alınan kontrolörün sonucu ve sistem davranışı Şekil 12'de verilmiştir.



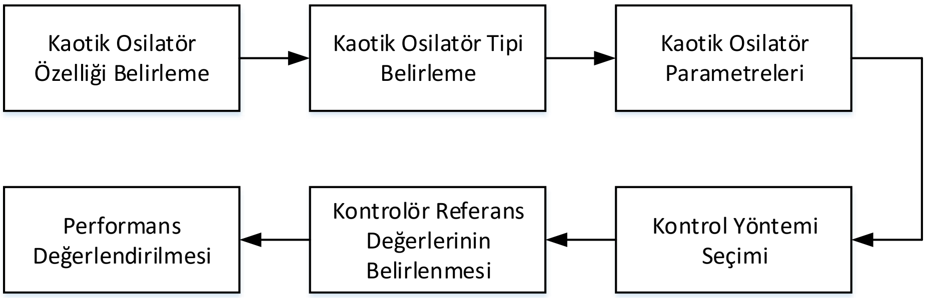
Şekil 11. Kayan Kipli Kontrol modeli



Şekil 12. Üç boyutlu Jerk kaotik sistemin Kayma Kipli Kontrol sonucu

3. Yöntem

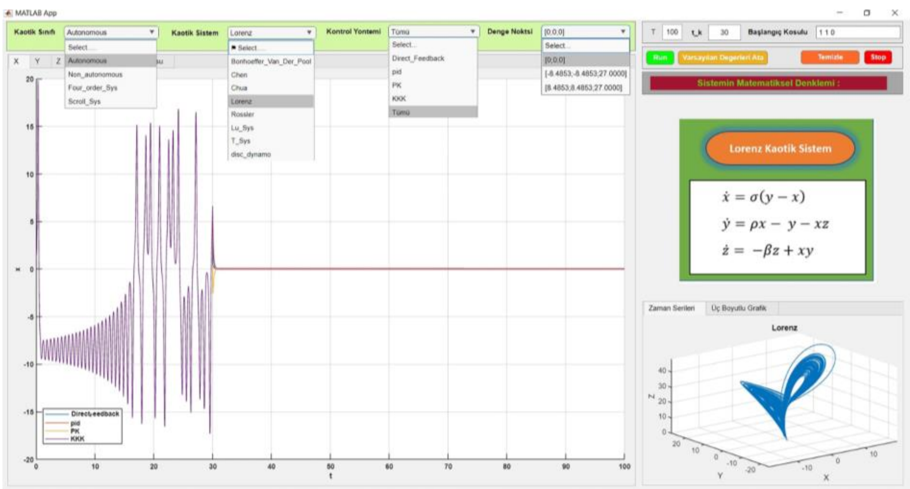
Bu çalışmada, bahsi geçen kaotik sistemlerin kontrolü için farklı kontrol yöntemlerinin uygulanmasına ve bu yöntemlerin performanslarının karşılaştırılmasına olanak sağlayan bir arayüz gerçekleştirilmiştir. MATLAB App Designer kullanarak gerçekleştirilen bu kullanıcı arayüzü, kontrol yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmek için kullanıcı dostu bir ortam sunmaktadır. Geliştirilen arayüze ait blok diyagramı ve sistemin çalışma mantığı Şekil 13'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Arayüze ait çalışma mantığı.

- Kaotik Osilatör Özelliği Belirleme : Ana kaotik sınıfın seçilmesini sağlar.
- Kaotik Osilatör Tipi Belirleme : Belirlenen kaotik sınıfa ait spesifik bir sistem seçilmesine olanak tanır.
- Kaotik Osilatör Parametreleri: Seçilen osilatöre ait başlangıç şartlarının belirlenmesi.
- Kontrol Yöntemi : ilgili sistem üzerine uygulanacak kontrol yönteminin belirlenmesini sağlar. Ayrıca, farklı kontrol yöntemlerinini karşılaştırmak amacıyla "Tümü" seceneği kullanarak gerçekleşir.
- Kontrolör Referans Değerlerinin Belirlenmesi : Seçilen referans değerlerin ulaşılması için kontrolör parametrelerinin belirlenmesi.

Gerçekleştirilen arayüze ait MATLAB ekran görüntüsü ise Şekil 14'de verildiği gibidir.



Şekil 14. Gerçeklenen arayüzün görünümü.

Simülasyon sonuçları ise, kontrol edilen sistemin durum değişkenlerinin grafiklerini görselleştirmek amacıyla bir tap grupu içerisinde x ,y, z, w olmak üzere eksenler yerleştirilmiştir. Ayrıca farklı bir sekmede, sistem üzerine uygulanan kontrolün performans kriter değerlerini içeren bir tablo bulunmakta olup Şekil 15'de görseli verilmiştir. Arayüzün sol alt köşesinde ise, sırasıyla seçilen sistemin matematiksel denklemlerini içeren bir görsel ile kontrolsüz sistemin zaman serilerinin ve faz portrelerinin görselleri yer almaktadır.

Kontrol Edilen Sistem	Kontrol Yöntemi	Aşma (x)	Aşma (y)	Aşma (z)	Yerleşme Süresi (x)	Yerleşme Süresi (y)	Yerleşme Süresi (z)	RMS Hatası (x)	RMS Hata
Lorenz	Direct_Feedback	0	0	0	0.6440	0.7390	0.3570	0.1549	
Lorenz	pid	0	0	0.4957	0.8230	0.8790	7.9770	0.1947	
Lorenz	PK	2.5351	0	0	0.7120	0.8430	2.4990	0.1161	
Lorenz	KKK	0	0	0	0.6680	1.0110	1.2710	0.0385	

Şekil 15. Arayüz tablo görseli.

Genel olarak arayüzün tasarımı dinamik yapıda yapılmıştır örneğin (Kaotik sınıfı seçimine bağlı, kaotik system drupdown bileşenleri ayarlanır). Aynı şekilde kaotik sınıfı ile denge noktası çalışmaktadır. Böylelikle, kullancının hataya düşmesini önlenilmiş olup kaotik sistemin ve kontrol yöntemin seçimi yaparak istenilen kaotik sistemin kontrolü inceleyebilecektir. Arayüzün arka planında ise seçime bağlı olarak 84 tane Simulink modeli bulunmakta ve seçilen parametrelere/kaotik osilatöre/kontrol yöntemine göre bir tanesi çalışmaktadır. Karşılaştırma amaçlı kontrol yöntemi 'tümü' olarak seçildiğinde bir döngü ile sırasıyla seçilen sisteme ait Simulink moduleri çalışacak şekilde ayarlanmıştır.

4. Sonuç ve Tartışma

Genel olarak çeşitli kaotik sistemler üzerine çeşitli kontrol yöntemleri uygulamasında GUI tarafından üretilen kontrol değerlendirme sonuçları belirlenmiş olan performans kriterlerine göre değerlendirilebilir. Burada sadece otonom sistemler için elde edilen sonuçlar Tablo 1 yardımı ile irdelenmiş ve tüm elde edilen performans tabloları ile birlikte gerçeklenen arayüze ait kodlar [19]'da verilmiştir. Tablo 1'e örnek olarak Doğrudan Geribesleme Kontrol yöntemi için, aşma ve RMS hatasını en düşük değer ve kararlılık için ideal olarak bulunmuştur. PID ise, yerleşme süresi ve kalıcı durum hatası açısından öne çıkar, ayrıca hızlı ve hassas kontrol sağlamaktadır. Pasif kontrol yöntemi basit yapısı, düşük maliyeti ve enerji verimliliği nedenleriyle yüksek olmayan denge noktalarında stabilazisyon gereken uygulamalarda tercih edilebilir. Ancak genel performans açısından daha zayıftır bulunmuştur. Kayma kipli kontrol ise, performans değerlendirmesinde farklıllık göstermekte olup özel durumlarda tercih edilebilir.

Tablo 1. Otonom Kaotik sistemler kontrol performans kriterleri (x)

Sistem	Kontrol Yöntemi	Aşma(x)	Yerleşme Süresi(x)	RMS Hatası(x)	KD Hatası (x)
Bonhoeffer Van Der Pool (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	**0**	0.809	0.0671	**0**
	PID	0.0031	**0.173**	**0.0306**	0.003
	PK	0.5276	7.8	0.0761	**0**
	KKK	1.0598	3.904	0.5537	**0**
Chen (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	**0**	0.462	0.077	**0**
	PID	$2.34\ 10^{-4}$	0.231	0.1489	$2.33\ 10^{-4}$
	PK	**0**	**0.138**	0.0568	**0**
	KKK	**0**	1.345	**0.046**	**0**
Chen (-7.9373, -7.9373,21)	Doğrudan Geribesleme	1.398%	0.175	0.0511	**0**
	PID	**0%**	**0.154**	**0.0198**	0.0077
	PK	0.3901%	0.351	0.0599	**0**
	KKK	18.4261%	3.379	0.1256	**0**
Chen (7.9373, 7.9373,21)	Doğrudan Geribesleme	0.2301%	**0.146**	0.1831	**0**
	PID	**0.1031%**	0.254	0.278	0.0082
	PK	0.5284%	0.464	**0.1734**	**0**
	KKK	16.6636%	1.862	0.3082	0.0003
Chua (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	**0**	0.45	0.0477	**0**
	PID	0.0028	0.464	0.0454	0.0027
	PK	0.3471	2.409	0.0717	**0**
	KKK	0.0014	**0.446**	**0.0329**	**0**
Chua (1.5,0,-1.5)	Doğrudan Geribesleme	0.0285%	0.491	0.007	**0**
	PID	**0%**	0.245	0.0055	0.0191
	PK	**0%**	3.12	0.137	**0**
	KKK	**0%**	**0.161**	**0.0052**	**0**
Chua (-1.5,0,1.5)	Doğrudan Geribesleme	1.2287%	**0.333**	0.0901	**0**
	PID	1.6897%	0.526	**0.0853**	0.0245
	PK	78.47%	3.469	0.1484	**0**
	KKK	**0%**	1.905	0.2291	**0**
Lorenz (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	**0**	**0.644**	0.1549	**0**
	PID	**0**	0.823	0.1947	0.0814
	PK	2.5351	0.712	0.1161	**0**
	KKK	**0**	0.668	**0.0385**	**0**
Lorenz (-8.4853,-8.4853,27)	Doğrudan Geribesleme	**0.2097%**	**0.242**	0.3015	**0**
	PID	1.0023%	0.888	0.4576	0.0813
	PK	47.2735%	2.762	**0.2574**	**0**

	KKK	153.639%	1.401	0.489	**0**
Lorenz (8.4853,8.4853, 27)	Doğrudan Geribesleme	3.1975%	**0.262**	**0.0259**	**0**
	PID	**3.0113%**	0.588	0.0686	0.2441
	PK	7.6234%	2.17	0.1208	**0**
	KKK	5.5125%	1.243	0.0495	**0**
Rossler (0.0070,-0.0351 ,0.0351)	Doğrudan Geribesleme	0.007	**0.09**	**0.0247**	**0**
	PID	**0.0066**	0.317	0.0441	0.0146
	PK	1.9896	34.092	0.6436	**0**
	KKK	0.007	10.058	0.1034	**0**
Rossler (5.6930,- 28.4649	Doğrudan Geribesleme	**0%**	**0.104**	**0.045**	**0**
	PID	9.6638%	56.573	0.1055	0.4368
	PK	117.5511%	42.046	3.5509	0.0001
	KKK	84.1864%	3.032	0.6134	**0**
Lu_Sys (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	**0**	0.517	0.164	**0**
	PID	**0**	0.523	0.228	0.0029
	PK	**0**	**0.195**	**0.1559**	**0**
	KKK	**0**	0.275	0.1933	**0**
Lu_Sys (8.0697,8.0697 ,22.2)	Doğrudan Geribesleme	$8.10\ 10^{-4}$%	0.169	0.0288	**0**
	PID	**0%**	0.379	0.0372	0.0973
	PK	$2.49\ 10^{-6}$%	**0.116**	**0.0285**	**0**
	KKK	$1.77\ 10^{-4}$%	1.565	0.1781	**0**
Lu_Sys (-8.0697, - 8.0697 ,22.2)	Doğrudan Geribesleme	0.1448%	**0.169**	**0.2751**	**0**
	PID	1.1661%	0.564	0.4189	0.0916
	PK	0.1142%	0.196	0.283	**0**
	KKK	**0%**	1.229	0.6694	**0**
T_Sys (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	**0**	7.479	0.0343	$3.21\ 10^{-11}$
	PID	0.0003	**0.12**	**0.0025**	$2.73\ 10^{-4}$
	PK	**0**	0.917	0.0082	**0**
	KKK	0.8388	1.427	0.0357	**0**
T_Sys (-2.8234 ,- 2.8234	Doğrudan Geribesleme	0.9062%	0.65	0.0775	**0**
	PID	**0.0905%**	**0.348**	**0.0576**	0.0026
	PK	0.1676%	2.036	0.1543	**0**
	KKK	1.9009%	1.834	0.122	**0**
T_Sys (2.8234 ,2.8234 ,13.2857)	Doğrudan Geribesleme	0.5359%	0.52	0.1008	**0**
	PID	**0.1099%**	**0.354**	**0.0626**	0.0031
	PK	0.1774%	2.074	0.1707	**0**
	KKK	15.0872%	1.552	0.1016	**0**
Dis c	Doğrudan Geribesleme	**0%**	**0.083**	0.0161	$2.00\ 10^{-15}$

	PID	0.1002%	0.296	0.0281	1.00 10^{-3}
	PK	56.8002%	4.621	0.0458	**0**
	KKK	23.9138%	0.135	**0.0076**	**0**
Disc Dy-namo	Doğrudan Geribesleme	**0%**	**0.071**	0.0084	**2.00 10^{-15}**
	PID	0.1002%	0.248	0.0145	1.00 10^{-3}
	PK	28.1911%	3.947	0.0277	5.33 10^{-15}
	KKK	8.6057%	0.228	**0.0068**	4.00 10^{-15}

Otonom kaotik sistemlerin kontrol performans değerlendirmesi doğrultusunda, Doğrudan Geribesleme Kontrol yöntemi için, aşma ve RMS hatasını en düşük değer ve kararlılık için ideal olarak bulunmuştur. PID ise, yerleşme süresi ve kalıcı durum hatası açısından öne çıkar, ayrıca hızlı ve hassas kontrol sağlamaktadır. Pasif kontrol yöntemi basit yapısı, düşük maliyeti ve enerji verimliliği nedenleriyle yüksek olmayan denge noktalarında stabilazisyon gereken uygulamalarda tercih edilebilir. Ancak genel performans açısından daha zayıftır bulunmuştur. Kayma kipli kontrol ise, performans değerlendirmesinde farklıllık göstermekte olup özel durumlarda tercih edilebilir.

Otonom olmayan kaotik sistemler kontrol performans değerlendirmesi için elde edilen veriler doğrultusunda, Doğrudan Geribesleme aşma ve kalıcı hata yönünden kontroller arasında idal bir performans sunmaktadır. PID kontrolü ise, yerleşme süresi ve kalıcı hata açısından tercih edilebilir bir performas vermektedir. Pasif kontrol ve kayma kipli kontrol yöntemleri aşma ve yerleşme süresi bakımından uygun çıkmamıştır. Ayrıca bazı sistemlerde iyi çalışsalar bile genellikle genel olarak diğer yöntemlere göre daha zayıf performans göstermektedirler.

Çok boyutlu kaotik sistemlerin kontrol performans değerlendirmesi bulunan sonuç değerlere göre, Doğrudan Geribesleme öne çıkmakta olup özellikle aşma, kalıcı hata ve RMS hata değerleri açısından en iyi sonuç vermektedir. PID kontrolü, yerleşme süresi açısından öne çıkarken, kalıcı hata ve aşma değerleri bazen yüksek bulunmuştur. Bu nedenle, hızlı cevap gerektiren uygulamalarda PID, daha hassas kontrol gerektiren uygulamalarda Doğrudan Geribesleme tercih edilmelidir. Pasif kontrol yöntemi basit yapısı, düşük maliyeti ve enerji verimliliği nedenleriyle yüksek olmayan denge noktalarında stabilazisyon gereken uygulamalarda daha etkili bulunmuştur. KKK Kontrol yöntemi belirli eksenlerde kısmen başarlı bulunmuştur., ancak genelde denge noktasının işaretine ve eksene bağlı olarak tutarsızlığı ispat edilmiştir, bu nedenle bazı durumlar haric, kontrolör arasında son mertebede yer almaktadır.

Tekli ve Çoklu Çekerli kaotik sistemler kontrol performans değerlendirmesi için elde edilen veriler doğrultusunda, PID kontrol yöntemi düşük aşma ve hızlı yerleşme yönünden öne çıkmaktadır..

Gelecekte yapılacak çalışmalar için şu öneriler sunulabilir:

- Hibrit kontrol yöntemleri: PID ve KKK gibi yöntemlerin güçlü yönlerini birleştiren algoritmalar geliştirilebilir.
- Yüksek mertebe Kayma Kipli Kontrol: Titremeyi azaltmak için süper-büküm (super-twisting) algoritmaları kullanılabilir.

- Mutlak aşma metriğinin standartlaştırılması: Küçük denge noktalarında daha gerçekçi değerlendirme için bu metriğin kullanılması önerilir.
- Gerçek zamanlı uygulamalar: Hızlı yerleşme süresi gereken sistemlerde kontrol yöntemlerinin gerçek zamanlı performansı test edilmelidir.
- Verileri genişleterek her performas kriteri için, optimizasyon tabanlı parameter ayarlanması sağlanabilir.

Sonuç olarak, kaotik sistemlerde kontrol yöntemi seçimi, sistemin dinamik özelliklerini ve hedeflenen kriterleri (aşma toleransı, hız, hassasiyet) dikkate alarak yapılmalıdır. Bu çalışma, mühendislerin uygulamalarda sistemin gereksinimlerine uygun yöntemi seçmelerine yardımcı olacak çıkarımlar sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu yöntemlerin özelleştirilmiş uygulamalarını ve hibrit stratejileri destekleyebilir.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder. Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Usame ELHÜSEYYAN'ın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder

Kaynaklar

[1] N. Wang, C. Li, H. Bao, M. Chen and B. Bao, "Generating Multi-Scroll Chua's Attractors via Simplified Piecewise-Linear Chua's Diode," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 66, No. 12, pp. 4767-4779, 2019, doi:10.1109/TCSI.2019.2933365.
[2] J. Gleick, Chaos: Making a New Science. New York, NY, USA: Penguin, 2008.
[3] G. Chen and S. Dong, "From Chaos to Order: Perspectives, Methodologies, and Applications". Singapore: World Scientific, 1998.
[4] E. Ott, C. Grebogi, and J. A. Yorke, "Controlling chaos", Phys. Rev. Lett., Vol. 64, No. 11, pp. 1196–1199, Mar. 1990, doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1196.
[5] G. Chen, T. Ueta, "Yet another chaotic attractor", Int J Bifur Chaos Vol.9, No.7,pp.1465-1466, 1999, doi:10.1142/S0218127499001024.
[6] Q. Lai, B. Norouzi, F. Liu, "Dynamic analysis, circuit realization, control design and image encryption application of an extended Lü system with coexisting attractors, Chaos, Solitons & Fractals,Vol. 114, pp. 230-245, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.07.011.
[7] Xiong, L., Qi, L., Teng, S. "A simplest Lorenz-like chaotic circuit and its applications in secure communication and weak signal detection". Eur. Phys. J. Spec. Top. Vol.230, pp.1933–1944, 2021,

doi: Eur. Phys. J. Spec. Top. (2021) 230:1933–1944 https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00177-y.

[8] J. Hou and S. Ma, "Chaos Control in a Class of Fractional-order Stochastic Lorenz System," 2012 Fifth International Workshop on Chaos-fractals Theories and Applications, Dalian, China, pp. 241-244, 2012, doi: 10.1109/IWCFTA.2012.58.

[9] H. Nijmeijer and H. Berghuis, "On Lyapunov control of the Duffing equation," IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 42, no. 8, pp. 473–477, Aug. 1995, doi: 10.1109/81.404059.

[10] R. Saravanan, O. Narayan, K. Banerjee, J. K. Bhattacharjee, "Chaos in periodically forced Lorenz System", Physical Review A, Vol.31, pp.520-522, 1984, doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.520.

[11] Z. Cangtao, C.H. Lai, M.Y. Yu, "Chaos, bifurcation and periodic orbits of the Lorenz–Stenflo system", Phys Scr, Vol.55, pp. 394-402, 1997, doi: 10.1088/0031-8949/55/4/003.

[12] S. Yan, J. Wang, L Li, "Analysis of a new three-dimensional jerk chaotic system with transient chaos and its adaptive backstepping synchronous control", Integration, Vol. 98, 102210, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102210.

[13] R.P. Borase, D.K. Maghade, "A review of PID control, tuning methods and applications". Int. J. Dynam. Control, Vol. 9, pp.818–827, 2021, doi:10.1007/s40435-020-00665-4.

[14] C. Novara, L. Fagiano, M. Milanese, "Direct feedback control design for nonlinear systems", Automatica, Vol.49, No.4, pp. 849-860, 2013, doi:https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.002.

[15] D. Qi, G. Zhao and S. Yunzhong, "Passive control of Chen chaotic system," Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788), Vol.2, pp. 1284-1286, China, 2004, doi:10.1109/WCICA.2004.1340844.

[16] L. Caina and C. Baotong, "Passive Control of Uncertain Linear Systems with Time-Varying Delay in States," 2006 Chinese Control Conference, Harbin, China, 2006, pp. 16-20,

[17] J. M. Nazzal, A. N. Natsheh, "Chaos control using sliding-mode theory", Chaos, Solitons & Fractals, Vol.33, No. 2, pp.695-702, 2007, doi:10.1016/j.chaos.2006.01.071.

[18] R. K. Moghaddam; M. Rabbani, "Back-Stepping Sliding-Mode Control," in Methods of Developing Sliding Mode Controllers: Design and Matlab Simulation , IEEE, pp.123-149, 2025.

[19] Kaynak Dosyalar, https://drive.google.com/file/d/1jw8Jqq73CoCobUflzSd7ta7kMrk-cOyQo/view?usp=sharing (Erişim Tarihi: 21.05.2025)