

KAOTİK SİSTEMLERİN ADAPTİF KONTROLÜ

MEHMET GÜZEL

HAZİRAN 2025

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAOTİK SİSTEMLERİN ADAPTİF KONTROLÜ

MEHMET GÜZEL

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
ELEKTRİK ELEKTRONİK ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

HAZİRAN 2025

DİYARBAKIR

KAOTİK SİSTEMLERİN ADAPTİF KONTROLÜ

Mehmet GÜZEL tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Elektrik Elektronik Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM
Danışman, **Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Doç. Dr. Yurdağül BENTEŞEN YAKUT (*)
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM (**)
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. Emrullah ACAR
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Batman Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 18 / 06 /2025

(*) Jüri Başkanı.

(**) Tez Danışmanı.



Eşim ve Çocuklarıma...

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Mehmet GÜZEL

İmza:

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde bilgisi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, desteğini ve rehberliğini esirgemeyen, bana mühendisliği ve bilimi sevdiren, çok kıymetli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM' a minnettarlığımı ifade etmek isterim. Tez çalışmamın fikir aşamasından başlayarak matematiksel modelleme süreci, simülasyonların gerçekleştirilmesi, elde edilen verilerin analiz edilip yorumlanması ve tez taslağının revize edilmesine kadar her aşamada verdikleri destek ve gösterdikleri sabırdan dolayı ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Tezimin daha nitelikli hale gelmesine katkı sağlayan yapıcı eleştiri ve önerileriyle destek olan jüri üyelerine de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MALZEME VE YÖNTEM	13
3.1 Dinamik Sistemler.....	13
3.1.1 Lineer sistemler	14
3.1.2 Nonlineer sistemler	14
3.2 Kaos Bilimi ve Kaotik Sistemler	16
3.2.1 Lorenz kaotik sistemi.....	18
3.2.1.1 Lorenz kaotik sisteminin zaman serisi grafikleri.....	20
3.2.1.2 Lorenz kaotik sisteminin faz uzay grafikleri	22
3.2.2 Chua kaotik sistemi	24
3.2.2.1 Chua kaotik sisteminin zaman serileri	25
3.2.2.2 Chua kaotik sistemini faz uzay grafikleri	27
3.2.3 Rössler kaotik sistemi.....	29
3.2.3.1 Rössler kaotik sisteminin zaman serisi grafikleri	30
3.2.3.2 Rössler kaotik sisteminin faz uzay grafikleri.....	32
3.2.4 Chen kaotik sistemi	34
3.2.4.1 Chen kaotik sisteminin zaman serisi grafikleri	35
3.2.4.2 Chen sisteminin faz uzay grafikleri	37

3.3 Kontrol.....	39
3.3.1 Adaptif kontrol.....	39
3.3.1.1 Basit bir adaptif kontrolör tasarımı	40
3.3.2 Kaos kontrol.....	41
3.4 Python Programlama	42
3.4.1 Python'ın tarihçesi	43
3.4.2 Python'ın özellikleri.....	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1 Kaotik Sistemlerde Adaptif Kontrol	46
4.1.1 Lorenz kaotik sisteminin adaptif kontrolü.....	46
4.1.2 Chua kaotik sisteminin adaptif kontrolü	48
4.1.3 Rössler kaotik sisteminin adaptif kontrolü	49
4.1.4 Chen kaotik sisteminin adaptif kontrolü	51
4.1.5 Dört farklı kaotik sistemde adaptif kontrol karşılaştırma tablosu	53
4.2 Tartışma	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
5.1 Sonuçlar.....	61
5.2 Öneriler.....	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Lorenz kaotik sisteminin Matlab-Simulink modeli	19
Şekil 3.2 Lorenz kaotik sisteminin x zaman serisi grafiği	20
Şekil 3.3 Lorenz kaotik sisteminin y zaman serisi grafiği	20
Şekil 3.4 Lorenz kaotik sisteminin z zaman serisi grafiği	21
Şekil 3.4 Lorenz kaotik sisteminin x-y-z zaman serileri grafiği	21
Şekil 3.5 Lorenz kaotik sisteminin x-y faz uzayı grafiği	21
Şekil 3.6 Lorenz kaotik sisteminin x-z faz uzayı grafiği	22
Şekil 3.7 Lorenz kaotik sisteminin y-z faz uzayı grafiği	22
Şekil 3.8 Lorenz kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı grafiği	23
Şekil 3.9 Chua kaotik devresinin Matlab-Simulink modeli.....	24
Şekil 3.10 Chua kaotik sisteminin x zaman serisi grafiği	25
Şekil 3.11 Chua kaotik sisteminin y zaman serisi grafiği	25
Şekil 3.12 Chua kaotik sisteminin z zaman serisi grafiği	26
Şekil 3.12 Chua kaotik sisteminin x-y-z zaman serileri grafiği	26
Şekil 3.13 Chua kaotik sisteminin x-y faz uzayı grafiği	26
Şekil 3.14 Chua kaotik sisteminin x-z faz uzayı grafiği	27
Şekil 3.15 Chua kaotik sisteminin y-z faz uzayı grafiği	27
Şekil 3.16 Chua kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı grafiği	28
Şekil 3.17 Rössler kaotik sisteminin Matlab-Simulink Modeli	29
Şekil 3.18 Rössler kaotik sisteminin x zaman serisi grafiği.....	29
Şekil 3.19 Rössler kaotik sisteminin y zaman serisi grafiği.....	30
Şekil 3.20 Rössler kaotik sisteminin z zaman serisi grafiği.....	30
Şekil 3.20 Rössler kaotik sisteminin x-y-z zaman serileri grafiği	30
Şekil 3.21 Rössler kaotik sisteminin x-y faz uzayı grafiği	31
Şekil 3.22 Rössler kaotik sisteminin x-z faz uzayı grafiği.....	31
Şekil 3.23 Rössler kaotik sisteminin y-z faz uzayı grafiği.....	32
Şekil 3.24 Rössler kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı grafiği	32
Şekil 3.25 Chen kaotik sisteminin Matlab-Simulink modeli	33
Şekil 3.26 Chen kaotik sisteminde x zaman serisi grafiği	34
Şekil 3.27 Chen kaotik sisteminde y zaman serisi grafiği	34
Şekil 3.28 Chen kaotik sisteminde z zaman serisi grafiği.....	35

Şekil 3.28 Chen kaotik sisteminde x-y-z zaman serileri grafiği	35
Şekil 3.29 Chen kaotik sisteminin x-y faz uzayı grafiği	35
Şekil.3.30 Chen kaotik sisteminin x-z faz uzayı grafiği	36
Şekil.3.31 Chen kaotik sisteminin y-z faz uzayı grafiği	36
Şekil 3.32 Chen kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı grafiği	37
Şekil 4.1 Lorenz kaotik sisteminde adaptif kontrol	45
Şekil 4.2 Chua sisteminde adaptif kontrol	46
Şekil 4.3 Rössler kaotik sisteminde adaptif kontrol.....	48
Şekil 4.4 Chen kaotik sisteminde adaptif kontrol	49



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Dört farklı kaotik sistemde adaptif kontrol karşılaştırma tablosu.....	53
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge

Açıklama

$\dot{x}, \dot{y}$ ve $\dot{z}$

x, y ve z 'nin türevleri

σ, ρ ve β

Kaotik Sistem Katsayıları, Parametreler

x, y ve z

Durum Değişkenleri

x_0, y_0 ve z_0

Başlangıç Koşullar

m_0, m_1

Doğrusal Olmayan Parametreler

a, b ve c

Sistem Parametreleri

$e(t)$

Zaman t 'deki Hata Sinyali

γ

Öğrenme Ortamı

$\theta(t)$

Zaman Parametresi Vektörü

μ_x, μ_y, μ_z

Kontrol Sinyalleri

Kısaltma

Açıklama

OGY

Ott, Grebogi ve Yorke

3B

Üç Boyutlu

L1, L2, L3

Lyapunov Üstelleri

DKY

Kaplan Yorke Boyutu

HL-RF

Hasofer-Lind ve Rackwitz-Fiessler Yöntemi

AKY

Adaptif Kontrol Yöntemi

LST

Lyapunov Kararlılık Teorisi

PD

Oransal Türev

BRL

Bristol Robotik Laboratuvarı

DOF

Robot Kolunun Dört Serbestlik Derecesi

RPP

Rezonans Parametrik Pertürbasyon

MFAC

Modelsiz Adaptif Kontrol

IoT

Nesnelerin İnterneti

ÖZET

KAOTİK SİSTEMLERİN ADAPTİF KONTOLÜ

GÜZEL, Mehmet

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM

Haziran 2025, 79 sayfa

Kaotik sistemlerin kontrolüne yönelik çalışmalar gün geçtikçe daha fazla önem kazanmakta olup, bu alan literatürde yeni araştırma yönelimleri ve katkılarla zenginleşmektedir. Kontrol çeşitlerinden ise adaptif (uyarlanır) kontrol güncelliğini korumakta ve farklı alanlara uygulanma ihtiyacı bulunmaktadır. Başlangıç aşamasında, kaotik dinamikler sergileyen doğrusal olmayan sistemlerin belirli parametreleri üzerinde düzenlemeler yapılarak sistemin kaotik doğası bastırılmış, ardından bu yeni yapı doğrultusunda kontrol sistemi tasarlanmıştır. Kaotik yapıya sahip sistemlerin kontrol edilmesi, genellikle sistemin belirlenen bir denge durumuna yönlendirilerek o noktada istikrar kazanmasının sağlanmasıyla ilişkilidir. Kararsız davranışlara sahip dinamik sistemlerin denge noktasına ulaştırılıp kararlı hale getirilmesinde adaptif kontrol yöntemleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, sistemin parametrelerini dinamik olarak değiştirerek kaotik davranışın bastırılmasına dayanır. Bu çalışmada, kaotik dinamiklerin kontrol edilebilirliği analiz edilmiş ve bu sistemlerin daha kararlı hale getirilmesi için adaptif kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Adaptif kontrol çalışmalarının simülasyonları Python yazılım diliyle kodlanarak gerçekleştirilen denemeler neticesinde yöntemin etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaos, Kaotik Sistemler, Adaptif Kontrol

ABSTRACT

ADAPTIVE CONTROL OF CHAOTIC SYSTEMS

GÜZEL, Mehmet

Master of Science in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Muhittin BAYRAM

June 2025, 79 pages

Studies on the control of chaotic systems are gaining more importance day by day and this field is enriched with new research directions and contributions in the literature. Among the types of control, adaptive control remains up-to-date and needs to be applied to different fields. In the initial phase, the chaotic nature of the system is suppressed by adjusting certain parameters of nonlinear systems exhibiting chaotic dynamics, and then the control system is designed according to this new structure. Controlling systems with chaotic behavior is usually associated with steering the system to a determined equilibrium state and stabilizing it at that point. Adaptive control methods play an important role in bringing dynamic systems with unstable behavior to the equilibrium point and making them stable. This method is based on suppressing chaotic behavior by dynamically changing the parameters of the system. In this study, the controllability of chaotic dynamics is analyzed and adaptive control methods are developed to make these systems more stable. The simulations of the adaptive control studies are coded with Python software language and as a result of the experiments, it is observed that the method is effective.

Keywords: Chaos, Chaotic Systems, Adaptive Control

1. GİRİŞ

Kaotik sistemlerin kontrolüne yönelik çalışmalar giderek önem kazanmakta ve literatürde yeni açılımlar sunmaktadır. Kontrol çeşitlerinden ise adaptif (uyarlanır) kontrol güncelliğini korumakta ve farklı alanlara uygulanma ihtiyacı bulunmaktadır. Kaosun ilk keşfiyle birlikte bu tür dinamikler olumsuz bir özellik olarak görülmüş ve başlangıçta kaotik davranış sergileyen doğrusal olmayan sistemlerin parametreleri değiştirilerek kararlı bir yapı elde edilmiş, kontrol tasarımı bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Ancak zamanla, kaotik sinyallerin dikkat çekici özelliklerinden yararlanarak olumlu amaçlara yönelik çeşitli çalışmalar da geliştirilmiştir. Kaotik sistemlerin kontrolü, denge noktasında kararlılığı sağlama amacını güder. Bu amaçla OGY (Ott, Grebogi, Yorke) kontrolü, doğrusal ve doğrusal olmayan geri besleme, zaman gecikmeli geri besleme, kayma kipli, adaptif ve pasif kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Başlangıçta, kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına hassasiyetleri nedeniyle kontrol edilemez oldukları düşünülse de Ott, Grebogi ve Yorke (1990) kapalı döngü metodu ile bu engeli aşarak OGY kaos kontrol yöntemini ortaya koymuşlardır.

Kaos kontrolünde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri, basitliği ve etkinliği nedeniyle doğrusal geri-beslemeli kontroldür. Bu yöntem, Lorenz, Rössler, Duffing ve Liu gibi kaotik sistemlerde başarıyla uygulanmıştır. Sistemin (x, y, z) durum değerleri, katsayılarla geri beslenerek kararsız periyodik salınımlar sıfıra yaklaştırılır. Ayrıca, Lyapunov kararlılık teoremi kullanılarak kaotik sistemler farklı denge noktalarında stabilize edilebilir. Doğrusal olmayan geri-beslemeli kontrol ise, lineer olmayan sinyallerin durum değişkenlerine eklenmesiyle kaotik sistemlerin kontrolünü sağlayarak çok sayıda kaotik sistemde kullanılmıştır. Lyapunov kararlılık teoremi, dinamik sistemlerin kararlılığını inceleyen bir matematiksel yöntemdir ve özellikle diferansiyel denklemlerle tanımlanan sistemlerin zaman içindeki davranışlarını analiz etmek için kullanılır. Bu teorem, bir sistemin denge noktasına olan yakınlığında zamanla ne olacağını belirlemeye yardımcı olur. Pyragas (1992) tarafından geliştirilen zaman gecikmeli geri besleme kontrolü, dinamik sistemlerdeki kararsız yörüngeleri dengelemek için kullanılan sade ve etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, kontrol sinyali, sistemin mevcut durumu ile geçmişteki durumu arasındaki farkla hesaplanır. Kayma kipli kontrol, Emelyanov (1967) tarafından ikinci dereceden sistemlerde faz uzayında özel bir doğru tanımlanarak,

başlangıç koşullarından bağımsız olarak sistemin durumlarının bu doğruya yönlendirilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntemin yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiş ve üzerine daha fazla çalışma yapılmıştır. Adaptif kontrol, kaotik sistemlerin davranışlarını ortadan kaldırmak için sistem parametrelerini değiştirmeye odaklanır. Parametre değişimlerinin sistemin asimptotik davranışı üzerindeki etkisi, çatallaşma diyagramları kullanılarak analiz edilebilir. Bu diyagramlar, sistemin hangi parametre değerlerinde kaotik bölgeye geçtiğini veya dallanma gerçekleştirdiğini gösterir. Kararlı sabitleştirilmiş noktalar, periyot-1 veya daha yüksek periyotlu yörüngeler elde etmek için uygun parametre değerleri belirlenebilir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatür taraması yapılarak 1997'den başlayıp 2025 yılına kadar kaotik sistemlerin kontrolü ile ilgili yapılan bazı çalışmalar hakkında özetler verilmiştir. Üçüncü bölümde dinamik sistemler tanımlanmış ve dinamik sistemlerin alt dalı olan lineer dinamik sistemler ile nonlineer (doğrusal olmayan) dinamik sistemlere değinilmiştir. Kaos bilimi ve kaotik sistemler açıklanarak kaotik sistemlerden Lorenz, Chua, Rössler ve Chen'in tanımları yapılmıştır. Bu kaotik sistemlerden her birinin Matlab-Simülink modelleri gösterilmiş ve Python programlama dili kullanılarak zaman serileri ve faz uzaylarının grafiksel modelleri oluşturulmuştur. Kaotik sistemlerin x, y ve z zaman serileri anlatılarak x-y, x-z ve y-z faz uzaylarının grafiksel modelleri yine Python yazılım dili kullanılarak simüle edilmiştir. Adaptif kontrol tanımı yapılmadan önce kontrolün ne olduğu tanımlanıp adaptif kontrol için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Kaos kontrol tanımından sonra Python programlama dilinin tarihçesi ve özellikleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, kaotik sistemlerde adaptif kontrol tanımlanmış ve sırasıyla Lorenz, Chua, Rössler ve Chen kaotik sistemlerinde adaptif kontrol uygulamaları gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca her bir kaotik sistemin matematiksel modeli de belirtilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, çalışmamızı teşkil edecek literatür taraması kronolojik bir şekilde ele alınacaktır.

Zeng ve Sing çalışmalarında; Lorenz sistemi gibi kaotik dinamiklere sahip sistemlerin, sistem parametrelerinde belirsizlik mevcut olsa bile kontrol altına alınabilmesini amaçlamaktadır. Lorenz sistemi, az sayıda diferansiyel denklemle oldukça karmaşık ve öngörülemez davranışlar sergileyen bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, söz konusu sistemin kontrolü hem teorik hem de uygulamalı alanlarda önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Zeng ve Sing, bu zorluğun üstesinden gelebilmek adına Lyapunov kararlılık teorisine dayalı bir adaptif kontrol yaklaşımı geliştirmiştir. Önerdikleri yöntem, sistemin üç temel parametresinden yalnızca biri olan Rayleigh sayısının (ρ) tahmin edilmesiyle kaotik davranışın bastırılabilceğini göstermektedir. Bu kontrol yapısında, x_2 denklemi üzerine bir kontrol girdisi (u) eklenmiş ve böylece sistemin durumu istenilen bir referans noktaya yönlendirilmişlerdir. Önemli bir katkı olarak, σ ve β gibi diğer sistem parametrelerinin bilinmesine gerek duyulmadan sadece ρ için tahmin yapılması yeterli görmüşlerdir. Bu sadeleştirilmiş yaklaşım, sistemin pratik uygulamalarda karşılaşılabileceği parametre belirsizlikleri karşısında avantaj sağlamaktadır (Zeng, 1997).

Ramaswamy ve arkadaşları çalışmalarında kaotik dinamik sistemlerin belirli bir hedef davranışa yönlendirilmesini sağlayan yeni bir adaptif kontrol algoritması sunmuşlardır. Klasik adaptif kontrol yöntemlerinin genellikle sistemleri periyodik ya da sabit noktalara yönlendirme amacıyla geliştirildiğini belirtmektedir. Ramaswamy ve arkadaşlarının çalışmalarında ise tam tersi bir yaklaşımla sistemin daha kaotik veya karışık bir duruma yönlendirilmesini amaçlamışlardır. Bu yöntemle literatürde "anti-kontrol" da denmektedir. Sundukları adaptif kontrol yaklaşımı, sistemin Lyapunov üstel katsayısı gibi bir hedef özelliğe ulaşması için sistem parametresinin dinamik olarak güncellenmesine dayanır. Yani, kontrol, belirli bir kaotiklik düzeyine ulaşmak üzere Lyapunov üstelini hedef olarak belirler. Bu hem süresiz hem de sürekli sistemlerde uygulanabilen, oldukça esnek ve sistemin detaylı model bilgisine ihtiyaç duymayan bir yöntemdir. Kontrol parametresi, hataya göre uyarlanır ve zamanla istenilen hedef davranışı oluşturur. Yöntem, çok boyutlu ve çok parametrelili sistemlerde de uygulanabilir olup, özellikle deneysel uygulamalarda sistemin bir

"kara kutu" gibi görülmesi gereken durumlar için büyük potansiyel taşımaktadır (Ramaswamy, Sinha ve Gupte, 1998).

Hua ve Guan çalışmalarında, kaotik sistemlerin kontrolü için adaptif bir yöntem geliştirmeyi amaçlayarak kaotik sistemleri kararsız sabit noktalara yönlendirebilen bir adaptif kontrolör önermişlerdir. Bu kontrolör, yalnızca sabit noktaların ve kaotik sistemlerin boyutlarının bilinmesi gerektiğini vurgulamakta ve kesin matematiksel modellere ihtiyaç duymadan çalışabilmektedir. Genel bir kaotik sistem formülü verilerek, önerilen adaptif geribildirim kontrolörü tanımlanmıştır. Simülasyonlar, Lorenz, Lu, Chen ve Arneodo sistemleri gibi farklı kaotik sistemler üzerinde gerçekleştirilmiş ve kontrolörün geçerliliği test edilmiştir. Sonuçlar, kontrolörün sistemleri sabit noktalara yönlendirmede etkili olduğunu göstermektedir. Geliştirilen adaptif kontrol yöntemi, kaotik sistemlerin kontrolü için basit ve uygulanabilir bir çözüm sunmakta; kesin matematiksel modellere ihtiyaç duymadan çalışabilmesi, pratik uygulamalar için önemli bir avantaj sağlamaktadır (Hua ve Guan, 2004).

Hua ve arkadaşlarının kaotik sistemlerin kontrolü üzerine yaptığı çalışma, adaptif kontrol yöntemlerinin etkinliğini vurgulamak açısından önemli bir kaynak teşkil etmektedir. Yazarlar, kaotik sistemlerin karmaşık doğasını göz önünde bulundurarak, nonlinear fonksiyonların Lipschitz koşulunu (Lipschitz koşulu bir fonksiyonun çok hızlı değişmediğini garanti altına alan bir matematiksel koşuldur) sağlamak zorunda olmadığını ve bilinmeyen kazançlarla sınırlı bir polinomla ifade edilebileceğini belirtmektedir. Bu yaklaşım, sistemin tam olarak bilinmediği durumlarda bile etkili bir kontrol sağlama potansiyeli sunmaktadır. Önerilen adaptif kontrolör, kapalı döngü sistemini asimptotik olarak kararlı hale getirirken, belirli rahatsızlıklara karşı dayanıklılık göstermektedir. Yapılan simülasyonlar, birleştirilmiş kaotik sistemler ve Arneodo kaotik sistemi üzerinde gerçekleştirilmiş ve kontrol yönteminin geçerliliği ve etkinliği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, çalışmalarında, kaotik sistemlerin kontrolü için yenilikçi bir adaptif kontrol yöntemi önererek, sistem dinamiklerinin stabilize edilmesine yönelik önemli katkılarda bulunmuşlardır (Hua, Guan ve Shi, 2005).

Yau ve Chen çalışmalarında, Lorenz kaotik sisteminin kontrolüne yönelik olarak, dış bozucuların ve kontrol girdisindeki doygunluk sınırlarının etkilerini dikkate alan bir adaptif kayma modlu kontrol yöntemi önermişlerdir. Kaotik sistemlerin karakteristik

özelliği olan başlangıç koşullarına karşı yüksek hassasiyet nedeniyle, bu tür sistemlerin kararlı hale getirilmesi klasik kontrol yaklaşımlarıyla oldukça güçtür. Bu nedenle, sistemin asimptotik kararlılığını sağlamak ve kontrol sinyallerinin fiziksel sınırlarını gözetmek amacıyla, giriş doygunluğunu modelleyen bir fonksiyonu tanımlanmışlardır. Önerilen yöntem, belirli bir kayma yüzeyi tanımlayarak sistemin hata dinamiklerini bu yüzeye göre yönlendirmeyi amaçlamakta ve adaptif bir kazanç yapısıyla kontrol yasasını güncellemektedir. Yöntemin kararlılığı Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak ispatlanmıştır. Gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar, önerilen kayma kipli kontrol yönteminin giriş doygunluğu ve dış bozucular altında bile Lorenz sistemini başarılı biçimde denge noktasına yönlendirdiğini doğrulamıştır. Elde edilen sonuçlar, giriş sınırlamalarının dikkate alındığı senaryolarda dahi kaotik sistemler üzerinde yüksek performanslı kontrol sağlanabileceğini göstermektedir (Yau ve Chen, 2007).

Kobravi ve Erfanian çalışmalarında, önerdikleri yöntem, kayma modlu kontrol, adaptif kontrol ve bulanık mantık sistemlerinin birleşimini içermektedir. Bu kontrol paradigması, hareket denklemlerinin bilinmediği kaotik sistemlerde uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Geliştirilen kontrol stratejisi, dış gürültü bozulmalarına ve sistem parametrelerindeki değişikliklere karşı dayanıklıdır ve kaotik yörüngeleri istenen periyodik yörüngelere veya herhangi bir istenen kaotik harekete dönüştürebilmektedir. Simülasyon sonuçları, Duffing denklemi ve Lorenz sistemi gibi tipik yüksek dereceli kaotik sistemlerin kontrolü üzerinde gerçekleştirilen uygulamaların etkinliğini göstermektedir. Çalışma, kayma modlu kontrolünün sağladığı sağlamlığın yanı sıra, adaptif kontrol ile birleşerek yüksek frekanslı kontrol geçişlerinden kaynaklanan "çarpma" sorununu azaltmayı hedeflemektedir. Her bir durum değişkeni için bağımsız adaptif kontrolörler tasarlanmış ve bu kontrolörlerin, kaotik hareketleri istenen hareketlere dönüştürme konusundaki başarısı hızlı bir yakınsama ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen kontrol yöntemi, kaotik sistemlerin kontrolünde etkili ve pratik bir çözüm sunmakta ve sistem dinamiklerinin tam olarak bilinmediği durumlarda bile uygulanabilirlik göstermektedir (Kobravi ve Erfanian, 2009).

Xiaobing ve arkadaşları, belirsiz parametrelere sahip yeni bir üç boyutlu kaotik sistemin kontrolü için yeni bir basit uyarlanabilir kontrolör önerdiler. Pasif bir

sistemin özelliğinin incelenmesiyle, yeni belirsiz kaotik üç boyutlu sistemin düzgün durum geri beslemesi yoluyla pasif bir sisteme eşdeğer olabileceği ilgili gerekli koşul önerilmiştir. Bu yeni belirsiz üç boyutlu kaotik sistem tarafından dönüştürülen yeni sistemin, kontrolör ve parametre tahmini güncelleme yasasının uygun şekilde tasarlanması koşuluyla, kontrolsüz sisteminin her denge noktasında küresel olarak asimptotik biçimde stabilize edilebileceği bulunmuştur. Ayrıca, simülasyon sonuçları önerilen kaos kontrol yönteminin bu yeni üç boyutlu kaotik sistemde çok etkili ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Xiaobing, Jinfu ve Murong, 2009).

Goharrizi ve arkadaşları, zamanla değişen parametrelere sahip kaotik sistemlerin kontrolü için, Lyapunov üstel katsayılarına dayalı gözlemci tabanlı bir adaptif kontrol yöntemi önermektedir. Çalışmada, sistemin maksimum Lyapunov üstel katsayısının çevrimiçi (on-line) olarak hesaplanıp hedeflenen değerlere atanması için bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca, durum değişkenlerinin doğrudan ölçülemediği durumlar için, tahmini durum bilgisine dayanarak çalışan bir doğrusal olmayan gözlemci tasarlanmıştır. Kontrolör tasarımı, sistemin Lyapunov üstel katsayılarının negatif olacak şekilde ayarlanması hedeflenmiş ve bu sayede sistemin kaotik davranışının bastırılması sağlanmıştır. Ayrıca, Henon haritası üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar, parametre değişimlerine rağmen önerilen metodun kaotik davranışı başarıyla kontrol edebildiğini ve sistemin istenen kararlı duruma yönlendirilebildiğini göstermiştir (Goharrizi ve Sedigh, 2011).

Nik ve arkadaşları, kaotik Pehlivan-Uyaroğlu sistemi olarak adlandırılan üç boyutlu ikinci dereceden sürekli otonom kaotik bir sistem için kaosun amaçlı olarak kontrol edilmesi problemi incelenmiştir. Kaotik sistem, üç denge noktasına sahiptir ve daha da ilginç, denge noktaları tek katlı çekici oluşturabilen altın oran değerlerine sahiptir. Bu sistemin kararsız denge noktalarını stabilize etmek için bir optimal kontrol tasarımı geliştirilmiştir. Ayrıca, bilinmeyen parametrelere sahip Pehlivan-Uyaroğlu sistemini bir geri besleme kontrol yaklaşımı ve tek bir kontrolör aracılığıyla kontrol etmek için Lyapunov kararlılığını önerdiler. Önerilen kontrol stratejilerinin etkinliğini göstermek için sayısal simülasyonlar başarılı sonuçlar vermiştir (Nik, He ve Talebian, 2014).

Vaidyanathan ve Volos çalışmalarında dört kuadratik doğrusal olmayanlığa sahip yedi terimli yeni bir üç boyutlu kaotik sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem, denge noktası bulunmayan bir yapıdadır ve bu nedenle gizli kaotik çekiciler sergilemektedir. Makalede, bilinmeyen parametrelere sahip bu yeni konservatif kaotik sistemin global olarak stabilize edilmesi için bir adaptif kontrolör tasarlanmış ve benzer sistemlerin global kaos senkronizasyonu için de bir adaptif kontrol yasası geliştirilmiştir. MATLAB simülasyonları, önerilen sistemin faz portrelerini ve adaptif kontrol sonuçlarını görselleştirmek için kullanılmıştır. Çalışma, gizli çekicilere sahip sistemlerin incelenmesinin hem pratik hem de teorik önem taşıdığına dikkat çekmektedir. Ayrıca, adaptif kontrol yasaları kullanılarak sistem parametrelerinin bilinmediği durumlarda stabilizasyon sağlanabileceği ve senkronizasyonun elde edilebileceği gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar, sistemin kararlılığını ve senkronizasyonunu sağlamak için Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, kaos literatürüne değerli bir katkı sunmakta ve adaptif kontrol yöntemleri ile kaotik sistemlerin kontrol edilebilirliğini ortaya koymaktadır (Vaidyanathan ve Volos, 2015).

Roudak ve arkadaşları, yapısal güvenilirlik analizinde Hasofer-Lind ve Rackwitz-Fiessler (HL-RF) yöntemi, güvenilirlik indeksinin hesaplanması için popüler bir iteratif yöntem önermişlerdir. Bununla birlikte, bir problemin doğrusal olmayanlığı arttığında, yöntem sayısal kararsızlıkla karşılaşabilir. Kaos kontrolü, HL-RF'nin kararsızlığının üstesinden gelmek için kullanılabilir, ancak hesaplama sürecini uzatır. HL-RF'nin sayısal istikrarsızlığı kaos kontrol kavramları ile ortadan kaldırılacak, ancak algoritmanın göreceli verimliliğini korumaya ve çok sayıda iterasyondan kaçınmaya odaklanılacaktır. Önerilen algoritmanın doğruluğu ve etkinliği çeşitli doğrusal olmayan sayısal örneklerle göstermişlerdir (Roudak, Shayanfar ve Karamloo, 2018).

Eastman ve arkadaşları, bir kuantum sisteminin sürekli izlenmesi, kuantum rejiminden klasik rejime geçişin yakınında kaotik dinamiklerin ortaya çıkmasını güçlü bir şekilde etkilediği sonucuna varmışlardır. Tahrikli-sönümlü kuantum Duffing osilatöründeki kaos derecesini kontrol etmek için uyarlanabilir ölçüm tekniklerini kullanan bir geri besleme kontrol şemasını geliştirmişlerdir. Bu kontrol tamamen sistem üzerindeki ölçüm geri hareketine dayanır, bu da onu benzersiz bir

kuantum kontrolü yapar. Uyarlanabilir ölçüm tekniklerinin sistemdeki kaosun başlangıcını kontrol edebildiğini ve kuantum-klasik sınırı kuantum rejimine daha da ittiğini gösterdiler (Eastman vd., 2019).

Hajipour ve Tavakoli, temel olarak, kaos kontrolü ve senkronizasyonu da dahil olmak üzere, belirsiz yeni bir 3B yaygın olmayan kesirli mertebeden finansal sistemin dinamik davranış analizine odaklanmaktadır. Bu sistem için denge noktalarının ve faz diyagramlarının kararlılık koşulları sağlanmıştır. En büyük Lyapunov üsteli kriteri benimsenerek, sistemin 215'in en düşük kesirli mertebesinde kaosa yol açtığı bulunmuştur. Daha sonra, bilinmeyen parametrelere sahip kaotik kesirli finansal modeli küresel olarak stabilize etmek ve senkronize etmek için uyarlanabilir bir kontrol tekniği geliştirmişlerdir. Sunulan uyarlanabilir kontrolörün etkinliğini göstermek için sayısal simülasyonlar kullanılmıştır (Hajipour ve Tavakoli, 2019).

Khan ve Prasad, uyarlamalı kontrol teorisinin, bilinmeyen parametrelere sahip kaotik sistemlerin senkronizasyonunu sağlamak için nasıl kullanılabileceğini araştırmaktadır. Lyapunov kararlılık teorisine dayanarak geliştirilen uyarlamalı kontrol yasaları hem birbirine özdeş hem de farklı yapıya sahip kaotik sistemlerin senkronizasyonunu gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, Pan ve Chen sistemleri örnek olarak ele alınmış ve bu sistemlerin parametreleri bilinmiyorken uyarlamalı kontrol mekanizması ile senkronize edilemeyeceği test edilmiştir. Sayısal simülasyonlar, önerilen uyarlamalı kontrol yönteminin etkili bir şekilde çalıştığını ve kaotik sistemlerin zamanla senkronize olmasını sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, uyarlamalı kontrolün kaotik sistemlerde güvenilir senkronizasyon sağlamada önemli bir araç olduğunu ortaya koymakta ve gelecekte daha karmaşık sistemlerde uygulanabilirliği konusunda yeni perspektifler sunmaktadır (Khan ve Prasad, 2020).

Khan ve Chaudhary, kaotik kimyasal reaktör sistemlerinde adaptif kontrol yöntemleriyle mikro ölçekte kaosun yönetilebilirliğini araştırmaktadır. Çalışma, adaptif kontrol metodunu kullanarak kaotik sistemlerde anti-senkronizasyon stratejisi geliştirmekte ve bu stratejiyi Lyapunov kararlılık teorisi ile analiz etmektedir. Belirsiz parametrelere sahip sistemlerde, uygun kontrol fonksiyonları ve parametre

güncelleme kuralları tasarlanarak asimptotik kararlılık sağlanmaktadır. Kimyasal reaktör sistemleri, başlangıç koşullarına olan yüksek duyarlılıkları nedeniyle kaotik davranış sergileyebilir ve bu da süreçlerin tahmin edilebilirliğini zorlaştırmaktadır, Bu nedenle iki özdeş üç boyutlu kaotik kimyasal reaktör sisteminde adaptif anti-senkronizasyon mekanizması geliştirilmiş ve bu mekanizma Lyapunov yöntemi ile test edilmiştir. MATLAB ortamında yapılan sayısal simülasyonlar, önerilen kontrol mekanizmasının etkili bir şekilde kaotik davranışları stabilize edebildiğini ve sistemin güvenli bir şekilde yönetilmesine olanak sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, adaptif kontrol yönteminin kaos yönetiminde başarılı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır ve gelecekte daha karmaşık sistemlerde uygulanabilirliği tartışılmaktadır (Khan ve Chaudhary, 2022).

Khan, insan-humanoid robot etkileşimi ve iş birliğinde güvenliği artırmayı amaçlayan adaptif bir kaos kontrol yöntemini ele almaktadır. Humanoid robot kolları, görevlerini yerine getirirken ani arızalar yaşayabilir ve bu durum, insanlarla fiziksel etkileşim sırasında ciddi güvenlik riskleri doğurabilir. Çalışmada, dört serbestlik derecesine sahip bir robot kolu modellenmiş ve kayma kipli kontrol yöntemi ile desteklenen adaptif bir kaos kontrol mekanizması geliştirilmiştir. Geleneksel kayma kipli kontrol metodunun hata toleransı yüksek olmasına rağmen, tek başına aktüatör hatalarını tam olarak gideremediği gösterilmiştir. Bu nedenle, enerji dağıtıcı bir adaptif kontrol ögesi sisteme entegre edilerek, arıza durumlarında robot kolunun hareket takibini sürdürebilmesi sağlanmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin, aktüatör arızalarının neden olduğu kaotik hareketleri başarılı bir şekilde stabilize ettiğini ve sistemin güvenli görev tamamlamasını mümkün kıldığını ortaya koymaktadır. Çalışma, özellikle çok eklemlili humanoid robotlarda görev tamamlama güvenliğini artırmak ve insan-robot etkileşimini daha güvenli hale getirmek adına önemli katkılar sunmaktadır (Khan, 2023).

Roldán ve arkadaşları, efendi-köle konfigürasyonundaki iki özdeş Nwachioma kaotik sistemin senkronizasyon kontrol problemini çözen adaptif bir kontrolör tasarımı sunmuşlardır. Kapalı döngü kararlılığı Lyapunov benzeri bir analiz ile garanti edilmektedir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini ve performansını doğrulamak amacıyla, sayısal simülasyon düzeyinde bir aktif kontrol algoritması ile bir karşılaştırma geliştirilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, adaptif kontrollü kapalı

döngüdeki master-slave Nwachioma kaotik sistemi şimdi iki kişisel bilgisayar ve iki düşük maliyetli Arduino UNOboard kullanılarak deneysel olarak test etmişlerdir. Deneysel sonuçlar sadece adaptif kontrolün iyi performansını değil aynı zamanda Arduino UNO kartlarının deneysel kurulum için mükemmel bir seçenek olduğunu da göstermişleridir (Roldán ve Caballero, 2023).

Li ve arkadaşları, doğrusal olmayan dinamik davranışlar sergileyen akım modlu Boost çevirici sisteminin kaotik hareketini bastırmak amacıyla, matematiksel modele ihtiyaç duymayan model serbest uyarlamalı bir kaos kontrol yöntemi (MFACC) önermektedir. Geleneksel kaos kontrol yaklaşımlarının çoğu sistemin kesin matematiksel modeline dayansa da bu yaklaşım yalnızca sistemin giriş/çıkış (I/O) verilerini kullanarak kontrolör tasarımı yapmaktadır. Çalışmada, rezonans parametrelili pertürbasyon (RPP) yöntemi ile MFAC yaklaşımı birleştirilerek, sistemin kontrol edilebilir bir parametresine küçük genlikli bir bozulma uygulanmakta ve bu sayede sistemin kaotik davranışı kararlı periyodik bir yörüngeye yönlendirilmektedir. MATLAB benzetimleriyle desteklenen çalışmada, önerilen kontrol yapısının yalnızca kaotik hareketi bastırmakla kalmayıp aynı zamanda sistemin istenilen periyot-1 ve periyot-2 yörüngelerine hızlıca yönlendirebildiği gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçları, kontrolör parametrelerinin seçiminin kontrol performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, farklı parametre kombinasyonlarının kontrol üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, önerdikleri yöntem hem uygulama kolaylığı hem de model bağımsız yapısıyla mühendislikte kaotik sistemlerin kontrolü için etkili ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu yöntemin zeki optimizasyon algoritmalarıyla birleştirilerek kontrol performansının daha da artırılması hedeflenmektedir (Li, Jiang ve Wei, 2024).

Eshaghi ve arkadaşları, Lorenz–Haken denklemlerinden türetilmiş yeni bir fraksiyonel lazer kaotik sistemini tanıtmaktadır. Sistemin karmaşık dinamiklerini, kaos, kararlılık, kontrol ve kaos senkronizasyonu bağlamında incelemişlerdir. Fraksiyonel lazer kaotik sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini faz portreleri, zaman tarihleri ve bifurkasyon diyagramları gibi sayısal yöntemlerle ortaya koymaktadır. Ayrıca, sistemin kaotik davranışlarını Lyapunov üstelleri, tüm parametreler ve durum değişkenleri boyunca bifurkasyon diyagramları ile

göstermişleridir. Geri besleme kontrol prosedürü aracılığıyla sistemin kaotik titreşimlerini ortadan kaldırmak için gerekli koşulları sunmakta ve çift fraksiyonel lazer kaotik sistemler için bir senkronizasyon mekanizması geliştirmişlerdir. Fraksiyonel türev derecesinin, sistemin düzensiz ve kaotik davranışlarını azaltmada önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmalarında fraksiyonel hesaplama teorisinin temellerine değinerek başlamışlardır. Ardından, Maxwell–Bloch denklemlerinden türetilen Lorenz–Haken tipi çok modlu denklemler ile lazer sisteminin dinamiklerini tanımlamışlardır. Fraksiyonel lazer kaotik sistemin denklemleri, sistemin kararlılık noktalarının analizi ile birlikte sunulmakta ve kaotik davranışların sayısal yöntemlerle gösterilmesi sağlanmaktadır. Geri besleme kontrol yönteminin uygulanması ile sistemin kaotik davranışlarının ortadan kaldırılması ve belirli bir denge noktasına stabilizasyonu sağlanmaktadır. Ayrıca, fraksiyonel türev derecesinin azaltılması ile sistemin kararlılığının artırılabilceği gösterilmektedir (Eshaghi, Kadkhoda ve Inc, 2024).

Kobiolka ve arkadaşları, parametre uyumsuzluğuna sahip kaotik Hindmarsh–Rose (HR) nöron modelleri arasında azaltılmış mertebeli senkronizasyon sağlamak için iki farklı yaklaşım sunmaktadır. İlk olarak, Lyapunov tabanlı aktif geri besleme kontrol yöntemiyle, beş boyutlu bir kaotik HR nöron sisteminin dört boyutlu bir HR sisteminin projeksiyonu ile senkronizasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci yaklaşımda ise, makine öğrenmesi temelli bir yöntem kullanılarak, rezervuar hesaplama (RC) teknikleri yardımıyla veri odaklı bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Her iki yöntemin de etkinliği sayısal simülasyonlarla doğrulanmış; özellikle makine öğrenmesi tabanlı yöntem, sistem dinamiklerinin doğrudan ölçülemediği durumlarda bile başarılı senkronizasyon sağlamıştır. Çalışmalarında hem dinamik sistemler yaklaşımı hem de makine öğrenmesi yaklaşımıyla kaotik sinir ağlarının kontrolü ve senkronizasyonu konusunda önemli katkılar sunmaktadır (Kobiolka, Habermann ve Yamakou, 2025).

Ding ve arkadaşları, kaotik sistemlerin dış bozucular ve model belirsizlikleri altında senkronizasyonu için yeni bir norm tabanlı uyarlanabilir kontrol yöntemi önermektedir. Hızlı ve önceden tanımlı sürede kararlılık sağlayan yeni bir kayma kipli kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem, kayma yüzeyi üzerindeki titreşim etkisini azaltmak amacıyla sağlam bir yapı sunmakta ve Lyapunov temelli

analizle sistemin belirli bir sürede kararlı hale gelmesini garanti etmektedir. Ayrıca, sistem parametrelerindeki belirsizlikleri ve dış bozucuları çevrim içi olarak tahmin edebilen norm tabanlı bir uyarlanabilir kazanç yapısı oluşturulmuştur. Chen sistemi ve çok kanatlı Lu kaotik sistemleri üzerinde gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar, önerilen yöntemin üstün hızda yakınsama, yüksek hassasiyet ve güçlü bozucu reddetme kabiliyeti sağladığını göstermektedir. Ayrıca, deneysel uygulamalar, yönteminin gerçek dünya kaotik sistemlerinde de etkin bir şekilde çalıştığını ortaya koymuştur. Çalışma, hızlı ve kararlı kaotik sistem senkronizasyonu için güçlü ve pratik bir çözüm sunmakta ve mühendislik uygulamaları için önemli katkılar sağlamaktadır (Ding, Qian ve Zeng, 2025).

Yukarıda literatür taraması kronolojik olarak sıralanmıştır. Bu çalışmada ise kaotik sistemlerin kontrol edilebilirliği üzerinde çalışılmış ve bu sistemlerin daha kararlı hale getirilmesi için uyarlanırlar kontrol yöntemleri geliştirilmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılacak temel kavramlar arasında yer alan dinamik sistemler, nonlinear dinamik sistemler (doğrusal olmayan), kaos bilimi, kaotik sistemler, adaptif (uyarlanır) kontrol ve Python yazılım dili kavramları üzerinde durulacaktır.

3.1. Dinamik Sistemler

Sistem kavramı, belirli bir amacı veya işlevi gerçekleştirmek üzere bir araya gelen bileşenlerin ya da elemanların toplamıdır. Sistem içindeki bileşenler karşılıklı etkileşim içindedir. Bileşenler arasında belirli bir bağlantı veya ilişki ağı bulunur. Karmaşık sistemlerin analiz edilebilmesi ve gelecekteki davranışlarının öngörülebilmesi için matematiksel olarak modellenmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu modeller, gerçek sistemin davranışını sadeleştirilmiş bir biçimde temsil eden araçlardır (Ogata, 2010).

Dinamik sistemler, zamana bağlı olarak durum değişkenleri değişen ve belirli matematiksel kurallar doğrultusunda evrimleşen sistemlerdir. Bu sistemler, başlangıç koşullarına bağlı olarak zaman içinde durum değişkenlerinin nasıl evrildiğini analiz eder. Dinamik sistemlerin en belirgin özelliği, zaman içinde değişen davranışlarıdır. Dinamik sistemlerin durumunu durum değişkenleri belirler. Durum değişkenleri sistemin anlık durumu ve geleceği hakkında bilgi verir. Bir dinamik sistem, sistemin başlangıç durumunu ve zaman içerisindeki değişimini belirleyen dinamik kuralları içeren iki temel bileşenden oluşur. Dinamik sistemler genellikle diferansiyel denklemler veya fark denklemleri ile modellenir. Bir diferansiyel denklemin çözümü, denklemini sağlayan uygun bir fonksiyonun bulunmasıyla elde edilir ve başlangıç koşulları dikkate alınarak sistemin hareket ettiği yörünge belirlenebilir. Genel olarak, sistemin kapalı formdaki çözümünde başlangıç koşullarında yapılan küçük değişikliklerin yörüngede de benzer büyüklükte değişiklikler oluşturması beklenir. Ancak kaotik sistemlerde, başlangıç koşulları arasındaki çok küçük farklar dahi uzun vadede oldukça farklı yörüngelere yol açabilir (Strogatz, 2015).

Dinamik sistemler lineer sistemler ve nonlinear sistemler olmak üzere ikiye ayrılır.

3.1.1 Lineer sistemler

Lineer sistemler, matematiksel olarak lineer (doğrusal) diferansiyel veya fark denklemleri ile tanımlanan sistemlerdir. Bu tür sistemlerde, sistemin çıktısı, girdilerin lineer kombinasyonu şeklindedir. Yani, bir sistemdeki iki farklı girdinin toplamının tepkisi, bu girdilere ayrı ayrı uygulanan tepkilerin toplamına eşittir. Lineer sistemler, birden fazla girdi ve çıktı olmasına rağmen, bu lineerlik özelliği sayesinde analiz edilmesi ve çözülmesi görece daha kolaydır. Elektrik devrelerinde lineer sistemlere; direnç, kapasitör ve indüktör gibi elemanlarla oluşturulan devreler örnek verilebilir (Ogata, 2010).

3.1.2 Nonlinear sistemler

Nonlinear dinamik sistemler, lineer olmayan denklemlerle tanımlanan ve girdilerle çıktılar arasında doğrusal bir ilişki bulunmayan sistemlerdir. Bu sistemler, daha karmaşık davranışlar sergiler ve analiz edilmesi, lineer sistemlere göre daha zordur. Nonlinear sistemler, doğada ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak bulunur. Nonlinear sistemler, bazı durumlarda kaotik davranışlar gösterebilir. Küçük başlangıç koşullarındaki değişiklikler, büyük ve öngörülemeyen sonuçlara yol açabilir. Nonlinear sistemlerin çözümü genellikle analitik yollarla yapılmaz; bu yüzden numerik yöntemler, simülasyonlar veya yaklaşık çözüm teknikleri kullanılarak analiz edilir (Strogatz, 2015).

Bu sistemlerde girdilerle çıktılar arasındaki ilişki doğrusal değildir, yani sistemin tepkisi, girişlerin toplamına veya ölçeklenmesine bağlı olarak lineer bir şekilde değişmez. Nonlinear sistemler, doğada ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak bulunur ve bu sistemler genellikle karmaşık ve beklenmedik davranışlar sergiler (Strogatz, 2015).

Dinamik sistemler, zaman içinde belirli kurallar doğrultusunda değişim gösteren yapılardır. Bu sistemler genellikle, başlangıç koşulları ve bu koşullara bağlı olarak sistemin zaman içerisindeki gelişimini tanımlayan dinamik denklemlerle ifade edilir. Diferansiyel denklemler aracılığıyla modellenen bu tür sistemlerde, uygun başlangıç koşulları verilerek sistemin izleyeceği yörünge belirlenebilir. Doğrusal sistemlerde, giriş ve çıkışlar arasında orantılı bir ilişki bulunur; ancak doğrusal olmayan sistemlerde böyle bir orantıdan söz edilemez. Klasik bilim anlayışında doğrusal

modellerden sapmalar genellikle hata ya da gürültü olarak değerlendirilse de güncel çalışmalar bu sapmaların sistemin doğası hakkında önemli ipuçları barındırabileceğini göstermektedir. Özellikle kaotik sistemlerde, başlangıç koşullarındaki son derece küçük farklılıklar bile uzun vadede oldukça farklı yörüngelere neden olabilir. Bu durum, kaotik sistemlerin yüksek hassasiyetini ve öngörülemezliğini ortaya koymaktadır. Son yıllarda işlem kapasitesi güçlü bilgisayarların çoğalması ve teknolojideki ilerlemeler sayesinde, araştırmacılar nonlinear sistemlerde (doğrusal olmayan) sistemlerdeki karmaşık dinamikleri simülasyonlar aracılığıyla daha kolay bir şekilde inceleyip analiz etme fırsatını bulmuşlardır (Khalil, 2015).

Kaos teorisi ve nonlinear sistemler, birbirleriyle yakından ilişkilidir ve kaos teorisi genellikle nonlinear dinamik sistemlerin bir alt dalı olarak kabul edilir. Ancak, aralarındaki ilişki karmaşıktır ve kaos teorisi, nonlinear sistemlerin belirli bir özelliklerini ve davranışlarını inceleyen daha spesifik bir alan olarak ortaya çıkar. Kaos teorisi, küçük başlangıç farklılıklarının zamanla büyük ölçekli davranış değişikliklerine yol açtığı dinamik sistemleri analiz eden bir disiplindir. Bu teori, küçük değişikliklerin bile sistemin uzun vadeli davranışında büyük ve öngörülemez değişikliklere yol açabileceğini gösterir. Kaos teorisi, deterministik sistemlerin (yani, başlangıç koşulları bilindiğinde gelecekteki davranışlarının tamamen belirlenebilir olduğu düşünülen sistemler) bile son derece karmaşık ve düzensiz davranışlar sergileyebileceğini ortaya koyar (Alligood, Sauer ve Yorke, 1996).

Nonlinear sistemlerde, başlangıç koşullarına duyarlılık, kaos teorisinin temel bir özelliğidir. Bu, küçük farkların zamanla büyük sapmalara yol açabileceği anlamına gelir. Bu özellik "kelebek etkisi" olarak da bilinir. Kaos teorisi, deterministik sistemlerin (nonlinear olsa da) öngörülemez ve düzensiz davranışlar sergileyebileceğini gösterir. Nonlinear sistemlerde bu tür kaotik davranışlar yaygındır. Nonlinear dinamik sistemler, kaotik rejimlerde fraktal yapılar ve garip çekiciler gibi karmaşık geometrik yapılar sergiler. Bu yapılar, sistemin uzun vadeli davranışını belirler ve kaos teorisinin önemli bir parçasıdır. Nonlinear sistemler, hem düzenli (periodik) hem de düzensiz (aperiodik) davranışlar gösterebilir. Kaos teorisi, bu davranışların nasıl ortaya çıktığını ve sistemin parametrelerindeki küçük değişikliklerle nasıl kaotik hale gelebileceğini açıklar (Hilborn, 2000).

3.2 Kaos Bilimi ve Kaotik Sistemler

Kaos Bilimi; başlangıç koşullarına son derece hassas bağlı olan, düzensizliğin içinden düzen oluşturan ve geleceği öngörülemeyen sistemleri inceleyen bilim dalıdır. Kaos bir sistemin zaman içinde nasıl değiştiğini, nasıl karmaşıklaştığını, kendi içindeki düzende nasıl dağılım gösterdiğini inceler. Matematik ve fen bilimleriyle başlayıp, mühendislik, sosyal bilimler, kuantum fiziği ve astrofizik gibi alanlarda gelişimi devam etmektedir (Gleick, 1987).

Kaotik sistemler; fraktal geometrilere sahip kendini tekrarlayan, kendi içinde düzen oluşturan karmaşık sistemlerdir. Kaotik sistemlerin gelecekteki davranışlarını doğru bir şekilde tahmin edebilmek için başlangıç koşullarının son derece hassas bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir. Günlük yaşamda karşılaşılabileceğimiz bazı kaotik sistemlere; hava durumu, borsa ve diğer finansal piyasalar, okyanus akıntıları, nüfus dinamikleri, ekonomik değişimler, kalp atışları gibi örnekler verilebilir (Gleick, 1987).

Kaos teorisi, elektrik şebekelerinin ve güç sistemlerinin stabilitesini artırmada, ani güç dalgalanmalarını ve sistem çökmelerini önlemede, elektronik devrelerin çıkışlarını senkronize etmede, ileri seviye elektronik cihazların geliştirilmesinde, yüksek performanslı elektrik devrelerinin geliştirilmesinde, bilgi ve iletişim teknolojileri alanında güvenliğin artırılmasında, enerji sistemlerinin kesintisiz çalışmasında, piyasa karmaşıklığını anlamada ve modellemede, büyük veri analizinde, beyin dalgalarının incelenmesi için biyomedikal sinyallerin analizinde ve pek çok alanda uygulama bularak önemli faydalar sağlamaktadır. Bu durum bilimsel ve mühendislik alanlarında yeni keşiflere ve inovasyonlara kapı aralamaktadır. Kaos teorisinin, gelecekte beynin karmaşık işlevlerini modellemede önemli bir araç olarak kullanılacağı ön görülmektedir. Çünkü beyin, evrimin ve yaşam süreci boyunca çevresel etkileşimlerin etkisiyle şekillenen, karmaşık ve fraktal bir yapıya sahiptir. Öğrenme, hatırlama ve fikir yürütme gibi üst düzey bilişsel süreçlerin kaotik dinamiklerle modellenmesi, beyin işlevlerinin daha iyi anlaşılmasını ve nörobilim alanında yeni keşiflerin yapılmasını sağlayabilir. Bu bakış açısı, kaos teorisi ve fraktal yapıların biyolojik sistemlerdeki karmaşıklık ve öngörülemezliği anlamada ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Al-Hussein, 2021).

Kaos tabanlı şifreleme, iletişim güvenliği için güçlü bir yöntem olarak kullanılır. Kaotik sinyallerin karmaşıklığı ve öngörülemezliği, veri (görüntü, ses, data) transferi sırasında verilerin güvenliğini sağlar, yetkisiz kişilerin veriyi çözmesini oldukça zorlaştırır. Gönderilen verinin kaotik sinyal üzerine bindirilmesi, veriyi şifreler ve sadece doğru anahtara sahip olanlar tarafından çözülebilir. Bu teknik, veri iletişimi sürecinde kaotik bir sinyalin üzerine bilginin bindirilmesiyle çalışır. Askeri ve diplomatik iletişimde yüksek güvenlikli veri transferi için kullanılır.

Kaos teorisi, yıldızların ve gezegenlerin yörüngelerindeki küçük değişikliklerin uzun vadede büyük etkiler yaratabileceğini gösterir. Uydular ve kuyruklu yıldızlar gibi Güneş Sistemi'ndeki objelerin hareketleri de kaotik olabilir. Kaos teorisi, bu objelerin yörüngelerindeki öngörülemez değişimleri anlamamıza yardımcı olur.

Kaos teorisi genellikle yanlış anlaşılır. Kaos, rastgeleliğin tam tersi olarak, belirli matematiksel kurallara ve denklemlere göre işleyen, şans unsuru içermeyen deterministik bir sistemdir. Bu tür sistemler, başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklere son derece duyarlıdır. Bu yüksek duyarlılık, sistemin davranışlarının zamanla büyük ölçüde değişmesine neden olabilir ve bu da kaotik sistemi öngörülemez gibi gösterir.

Kaos, rastgele faktörler içermeyen, tamamen deterministik kurallara dayalı bir süreçtir. Geçmişten geleceğe kadar olan sistem davranışları, olasılık yerine belirli kurallar tarafından yönlendirilir. Ancak deterministik ve olasılıksal sistemler arasındaki ayrım, bazı rastgele görünen süreçlerin altında yatan henüz keşfedilmemiş kurallar nedeniyle zaman zaman belirsizlik gösterebilir. Başlangıç koşullarına hassas bağımlılık, kaosun belirgin özelliklerinden biri olup, literatürde 'kelebek etkisi' olarak bilinir. Bu durum, başlangıç koşullarındaki çok küçük bir değişliğin, zaman içinde büyük ve öngörülemez sonuçlara yol açabileceğini ifade eder (Lorenz, 1963).

Bu çalışmada analiz edilen kaotik sistemler aşağıda gösterilmiştir;

- 1-Lorenz Kaotik Sistemi
- 2-Chua Kaotik Sistemi
- 3-Rössler Kaotik Sistemi
- 4-Chen Kaotik Sistemi

3.2.1 Lorenz kaotik sistemi

Lorenz (1963), Amerikalı bir matematikçi ve meteorologdur. Modern kaos teorisinin kurucusudur ve bu alanda önemli katkılarda bulunmuştur. Lorenz, küçük başlangıç farklılıklarından büyük ve öngörülemez sonuçların ortaya çıkabileceğini açıklayarak kaos teorisinin temelini atmıştır.

Lorenz 1963, yılında atmosferdeki akışkanların ısı yayılımını simüle ederken, başlangıç koşullarına yüksek derecede duyarlılık gösteren ve kaotik davranış sergileyen ilk doğrusal olmayan denklemleri ortaya koymuştur. Bu sistem, kaos teorisi alanındaki hem teorik hem de deneysel çalışmalara önemli bir temel oluşturmuştur.

Lorenz, başlangıçta on iki, daha sonra ise yalnızca üç değişkenle yaptığı simülasyonlar sonucunda, başlangıç koşullarına bağlı olarak sürekli değişen ve asla tam olarak aynı koşulları tekrarlamayan bir dizi oluşturmayı başarmıştır. Bu, kaosun ortaya çıkmasını sağlayan bir süreçti. Lorenz'in bilgisayarı, belirli parametrelerle başlayarak aynı hesapları tekrar etse de her defasında farklı sonuçlar üretmiş ve bu durum, 'aperiyodiklik' yani düzenli döngülerin yokluğu olarak tanımlanmıştır. Lorenz, bu farklı sonuçların her birinde belirli desenlerin sürekli olarak ortaya çıktığını fark etmiştir. Bu gözlem, kaotik sistemlerin genel bir özelliğidir ve doğal dünyada benzer desenlerin farklı zaman dilimlerinde yeniden ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Gleick'e göre, rastlantısal gibi görünen karmaşık davranışların altında dahi belirli bir düzenin izleri bulunabilir (Gleick, 1987).

Zamanla, kaotik sistemlerin her zaman kararsız olmadıkları ve bazı durumlarda belirsizlik içeren bir süre boyunca devam edebildikleri görüşü daha geniş kabul görmüştür. Bu tür sistemlerin belirgin özelliği, geniş bir frekans spektrumuna yayılmış periyodik olmayan salınımlar üretmesidir. Bu salınımlar, gürültüye benzer şekilde başlangıç koşullarına hassas bir şekilde bağlıdır ve tahmin edilmesi zor özelliklere sahiptir. Bu doğrultuda, kaotik sistemlerin sahip olduğu deterministik ancak öngörülemez yapılarının, güvenli iletişim uygulamalarında kullanılabileceği anlaşılmıştır. Özellikle Lorenz tabanlı kaotik osilatörler temel alınarak, bilgi gizleme ve veri şifreleme amacıyla çeşitli kriptografik sistemler tasarlanmış ve bu sistemlerin güvenlik açısından yüksek potansiyel sunduğu görülmüştür.

Lorenz kaotik sistemi aşağıdaki denklem takımı (3.1), (3.2) ve (3.3) ile gösterilir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \quad (3.1)$$

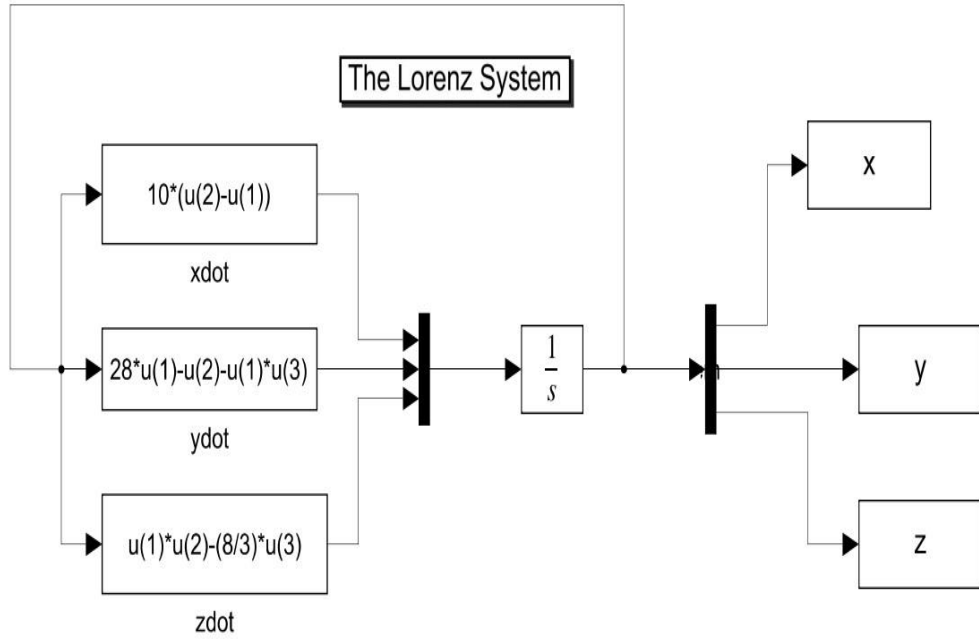
$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \quad (3.2)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = xy - \beta z \quad (3.3)$$

x, y ve z durum değişkenleridir.

$\sigma=10$, $\rho=28$ ve $\beta=8/3$ parametreleri için kaotik çözümler elde edilmiştir.

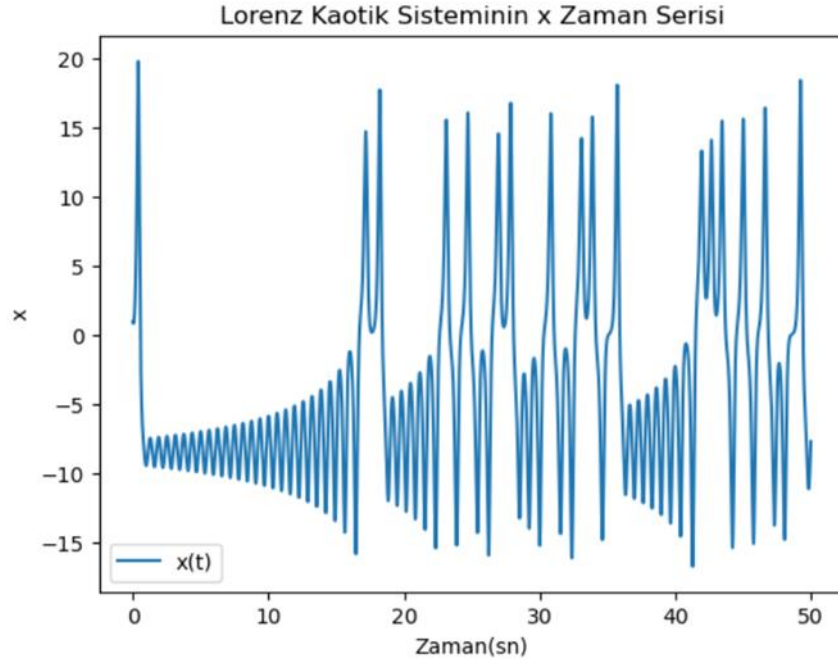
Başlangıç şartları: $x_0=0.0$, $y_0=-0.1$ ve $z_0=9.0$, seçilerek elde edilen Matlab-Simulink modeli Şekil 3.1’de verilmiştir.



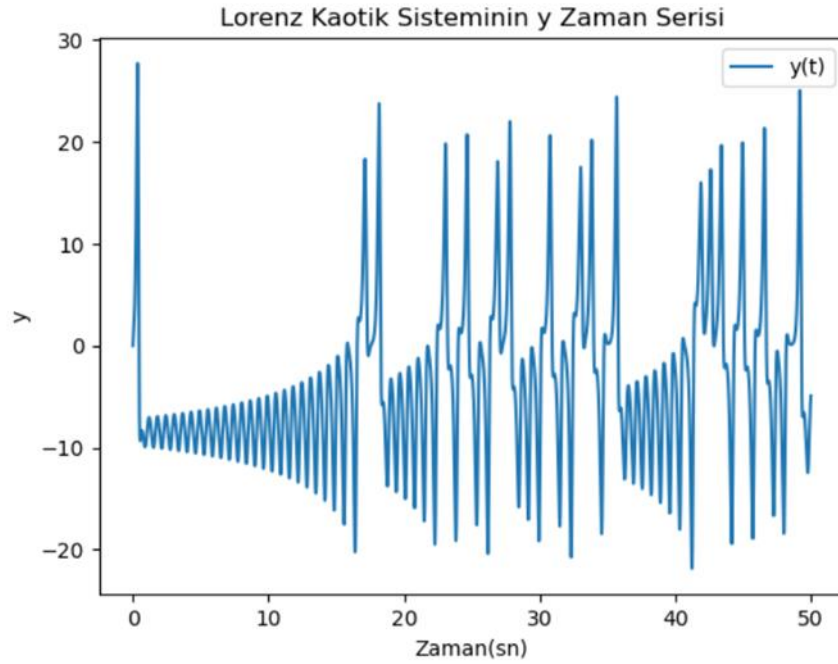
Şekil 3.1 Lorenz kaotik sisteminin Matlab-Simulink modeli

3.2.1.1 Lorenz kaotik sisteminin zaman serileri grafikleri

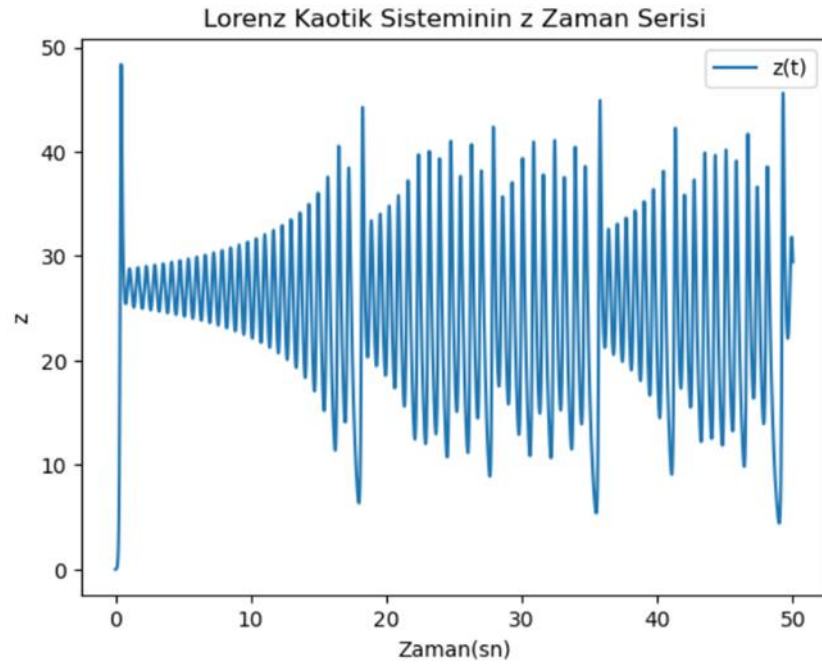
Aşağıdaki Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de Lorenz Kaotik Sisteminin x, y ve z zaman serisi grafikleri gösterilmiştir.



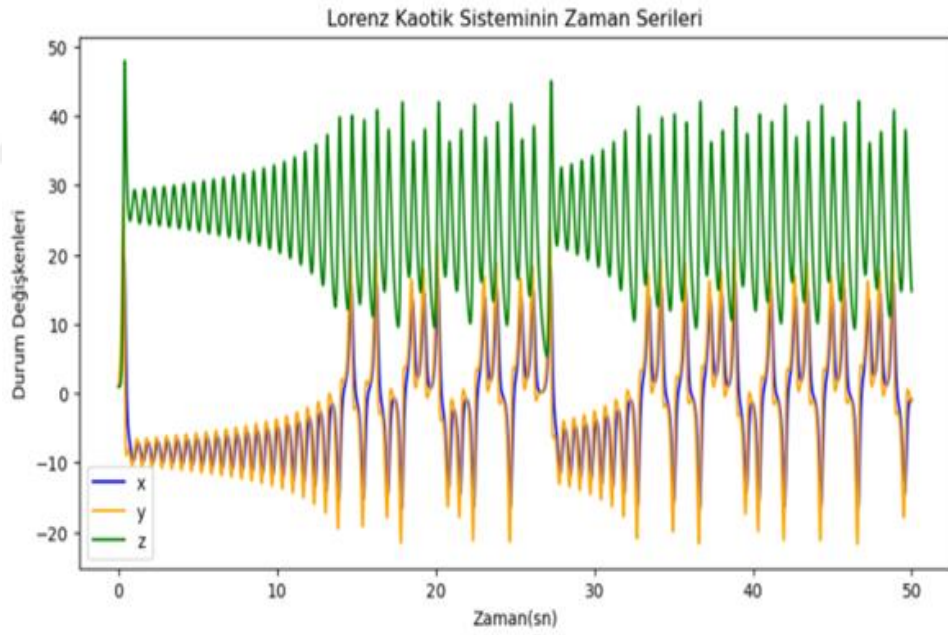
Şekil 3.2 Lorenz kaotik sisteminin x zaman serisi



Şekil 3.3 Lorenz kaotik sisteminin y zaman serisi



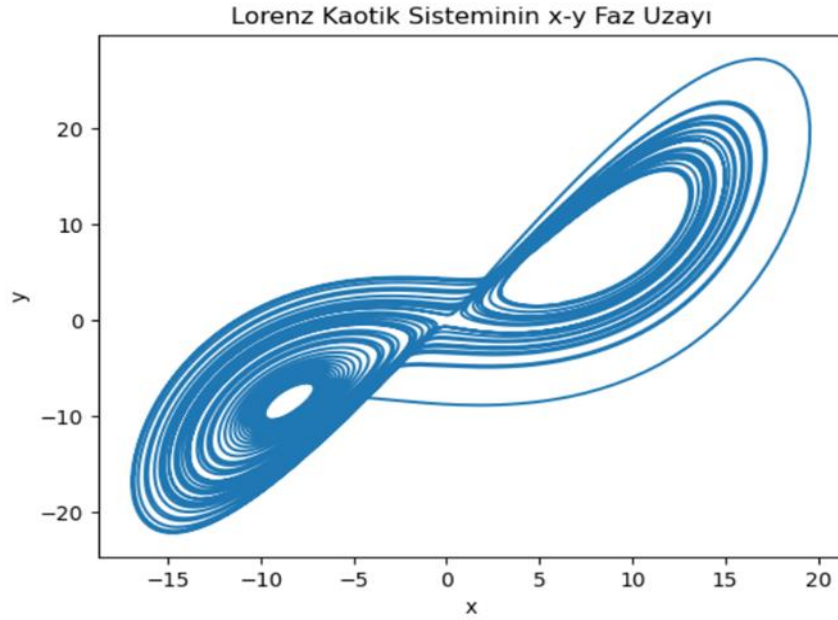
Şekil 3.4 Lorenz kaotik sisteminin z zaman serisi



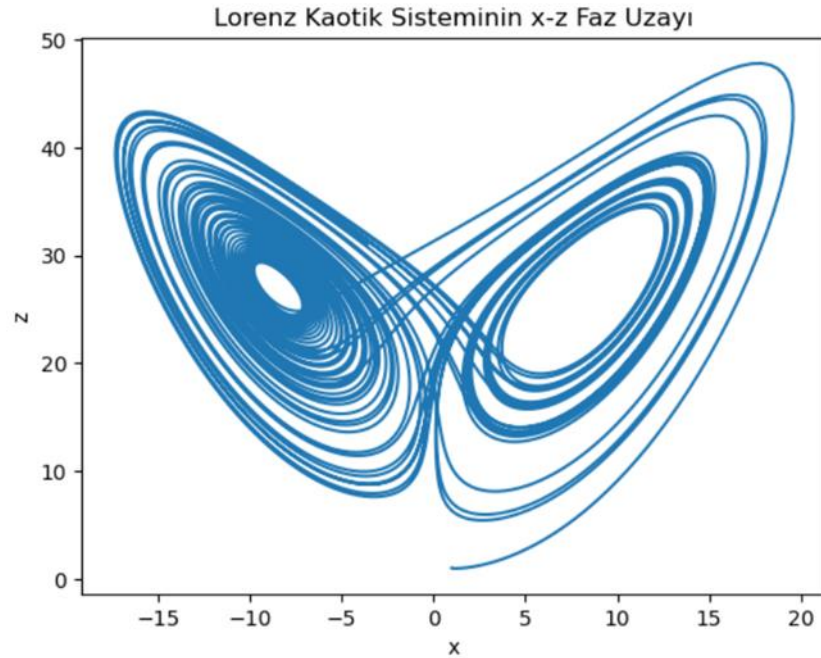
Şekil 3.5 Lorenz kaotik sisteminin x-y-z zaman serileri

3.2.1.2 Lorenz sisteminin faz uzayı grafikleri

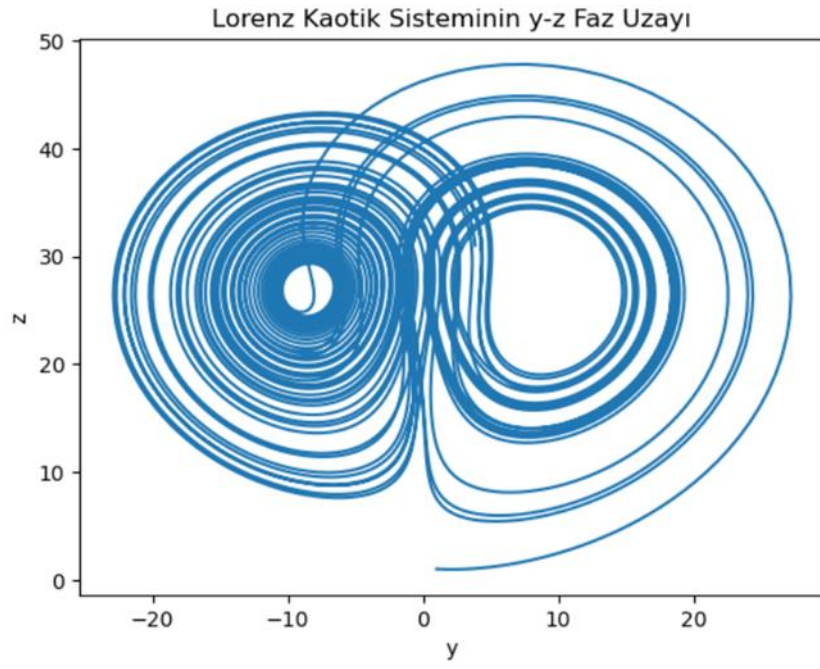
Aşağıdaki Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de Lorenz Kaotik Sisteminin iki boyutlu faz uzay grafikleri, Şekil 3.9 ise üç boyutlu faz uzayı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Lorenz kaotik sisteminin x-y faz uzayı

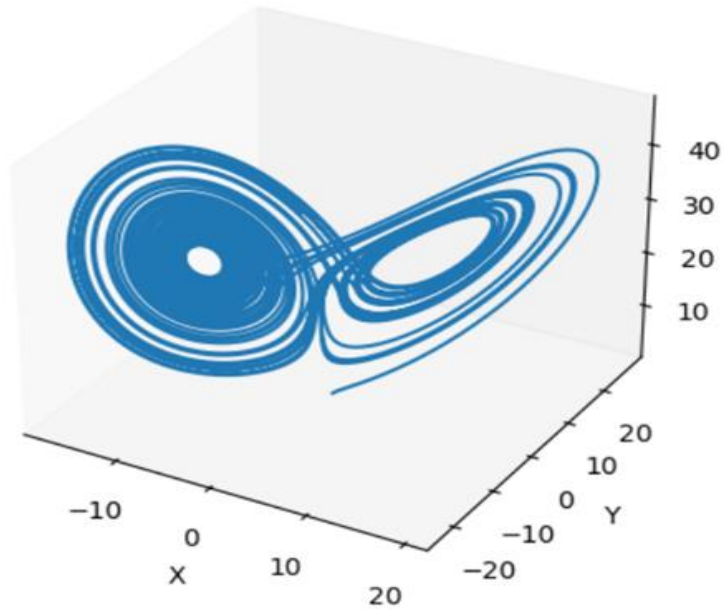


Şekil 3.7 Lorenz kaotik sisteminin x-z faz uzayı



Şekil 3.8 Lorenz kaotik sisteminin y-z faz uzayı

Lorenz Kaotik Sisteminin x-y-z Faz Uzayı



Şekil 3.9 Lorenz kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı

3.2.2 Chua kaotik sistemi

Elektronik devrelerde kaotik davranış üzerine ilk sistematik çalışmalar Leon Chua tarafından yapılmış, bu amaçla kaosu basit biçimde gözlemlemeyi sağlayan ve kendi adıyla anılan Chua devresi tasarlanmıştır. Üçüncü mertebeden otonom bir yapı olan bu devre, kaos ve çatallanma gibi dinamik davranışların gözlemlenebilmesi açısından karakteristik bir örnek teşkil etmektedir. Son yıllarda, farklı yapılarla birçok Chua devresi gerçekleştirilmiş ve çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Chua devresi, özellikle senkronizasyon temelli yaklaşımlarla güvenli haberleşme sistemlerinde ve pratik kaotik sistemlerin modellenmesinde önemli bir araştırma konusu olmuştur. Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilen modelleme çalışmaları, farklı giriş parametrelerine bağlı olarak çeşitli sonuçlar üretmiştir. Bu modellemelerden elde edilen dinamik sistem çıktıları, güvenli ve gizli iletişimde ihtiyaç duyulan kaotik taşıyıcı sinyallerin elde edilmesine imkân tanımaktadır (Chua, 1983).

Chua kaotik sistemi aşağıdaki denklem takımı (3.4), (3.5) ve (3.6) ile gösterilir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \alpha(y - x - f(x)) \quad (3.4)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = x - y + z \quad (3.5)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = -\beta y \quad (3.6)$$

x, y, z durum değişkenleridir.

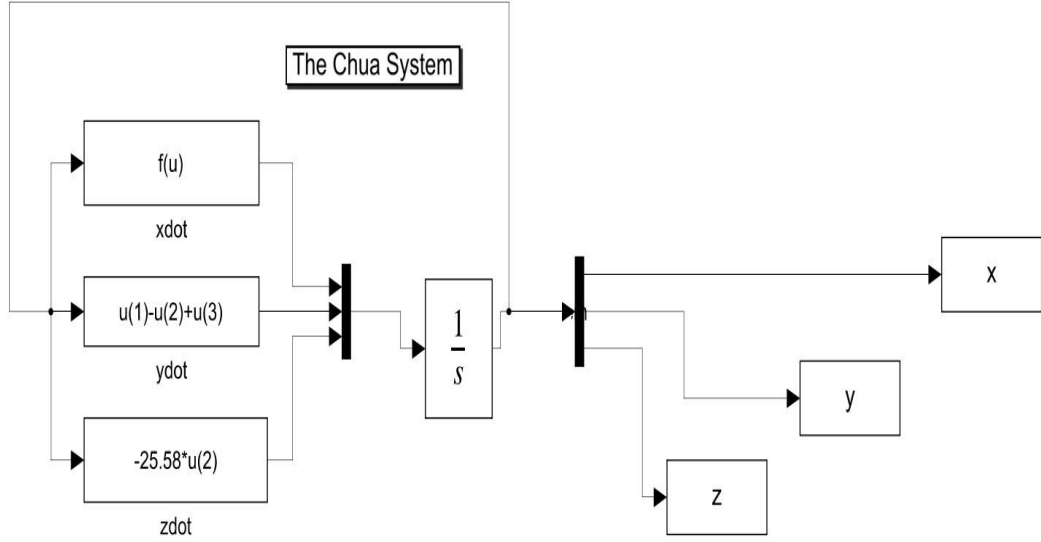
α ve β sistemin parametreleridir.

$f(x)$; Chua'nın doğrusal olmayan geri besleme fonksiyonudur. Genellikle parçalı doğrusal bir fonksiyonudur.

$$f(x) = m_1 x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x+1| - |x-1|) \quad (3.7)$$

m_0, m_1 ; Chua'nın doğrusal olmayan elemanın parametreleridir.

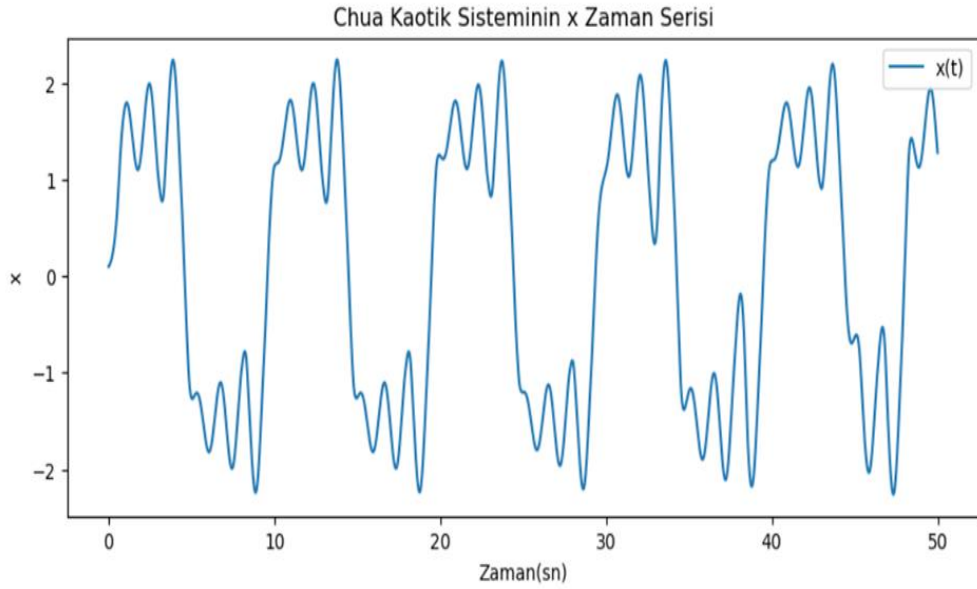
Başlangıç şartları: $x_0=5.0$, $y_0=5.0$ ve $z_0=5.0$, seçilerek elde edilen Matlab-Simulink modeli Şekil 3.10'da verilmiştir.



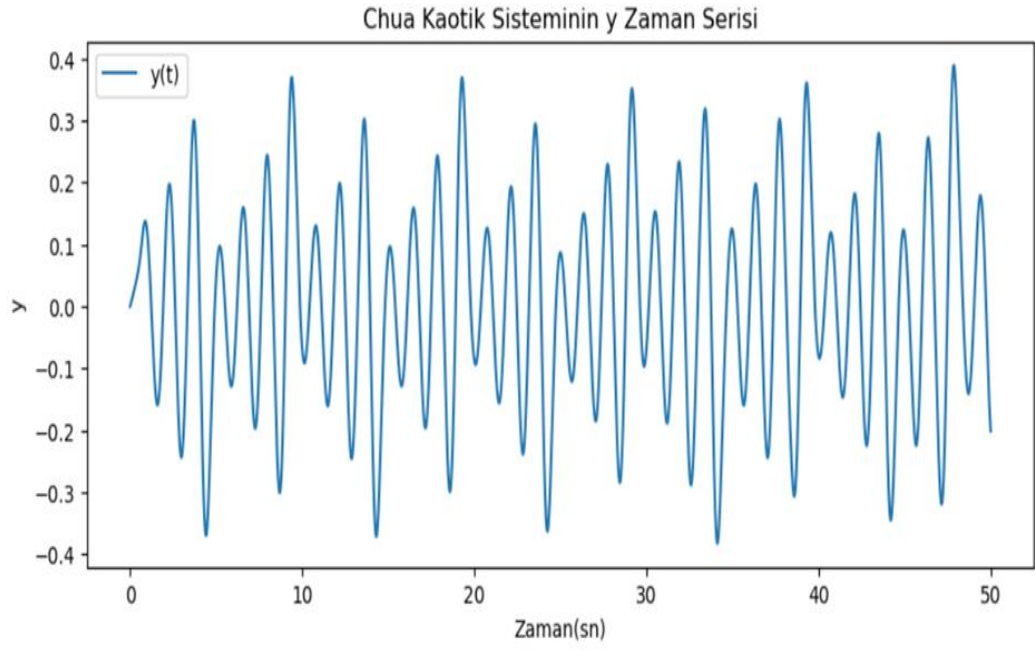
Şekil 3.10 Chua Devresinin Matlab- Simülink Modeli

3.2.2.1 Chua kaotik sisteminin zaman serileri

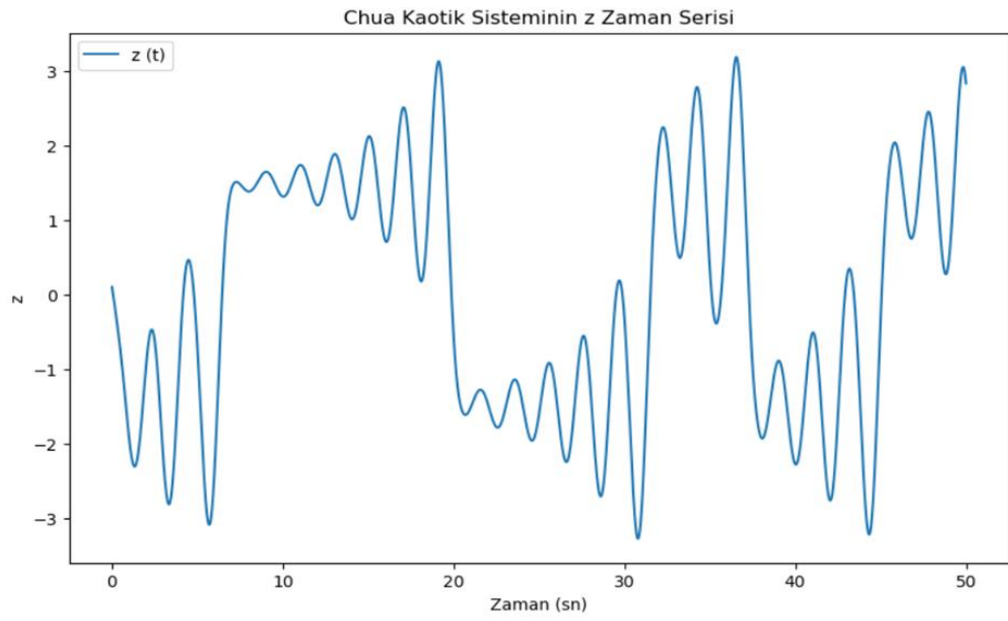
Aşağıdaki Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te Chua Kaotik Sisteminin x, y ve z zaman serisi grafikleri gösterilmiştir.



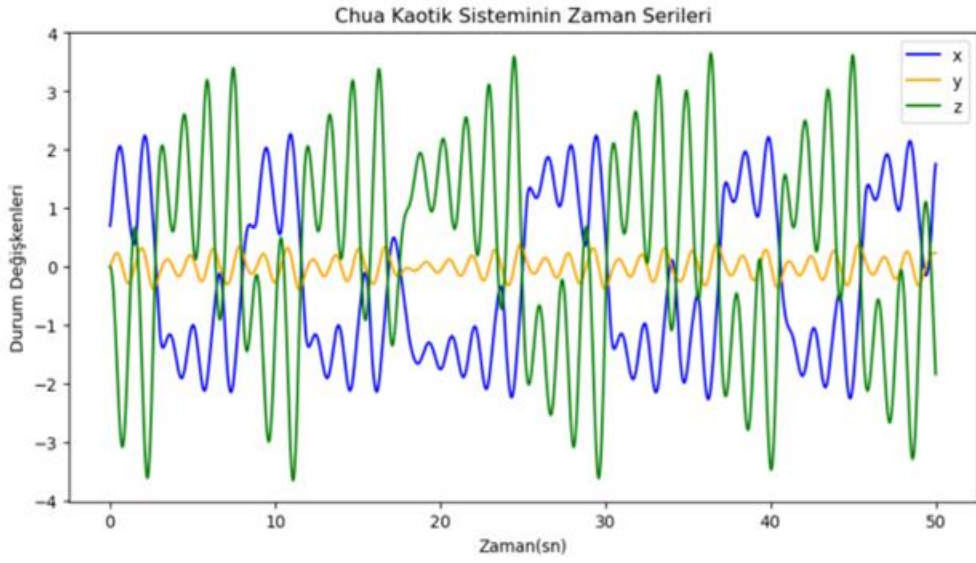
Şekil 3.11 Chua kaotik sisteminin x zaman serisi



Şekil 3.12 Chua kaotik sisteminin y zaman serisi



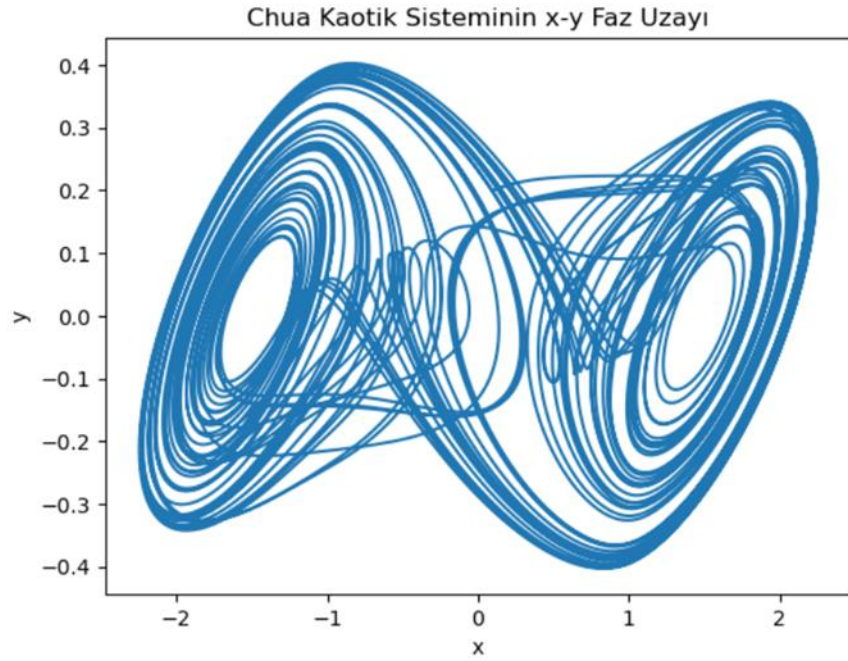
Şekil 3.13 Chua kaotik sisteminin z zaman serisi



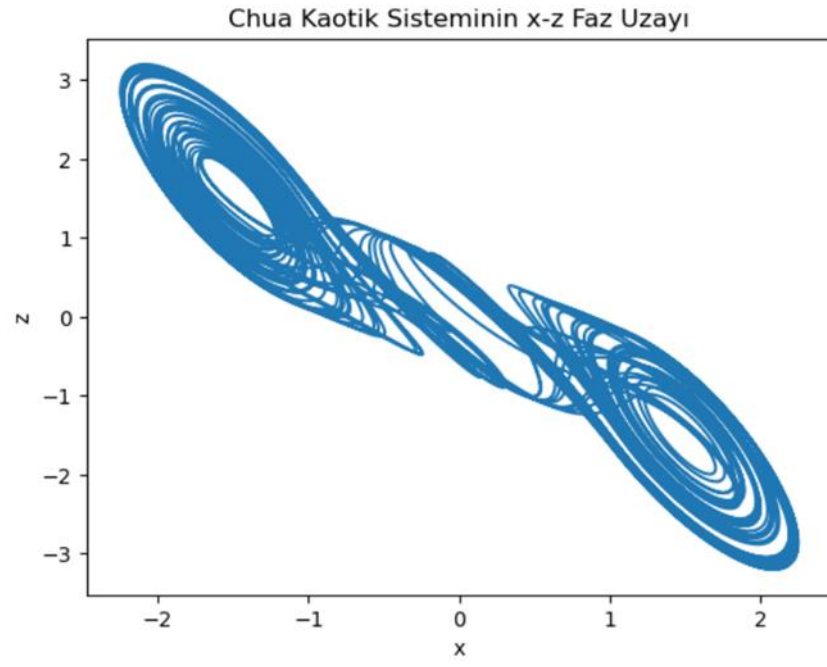
Şekil 3.14 Chua kaotik sisteminin x-y-z zaman serileri

3.2.2.2 Chua kaotik sistemini faz uzay grafikleri

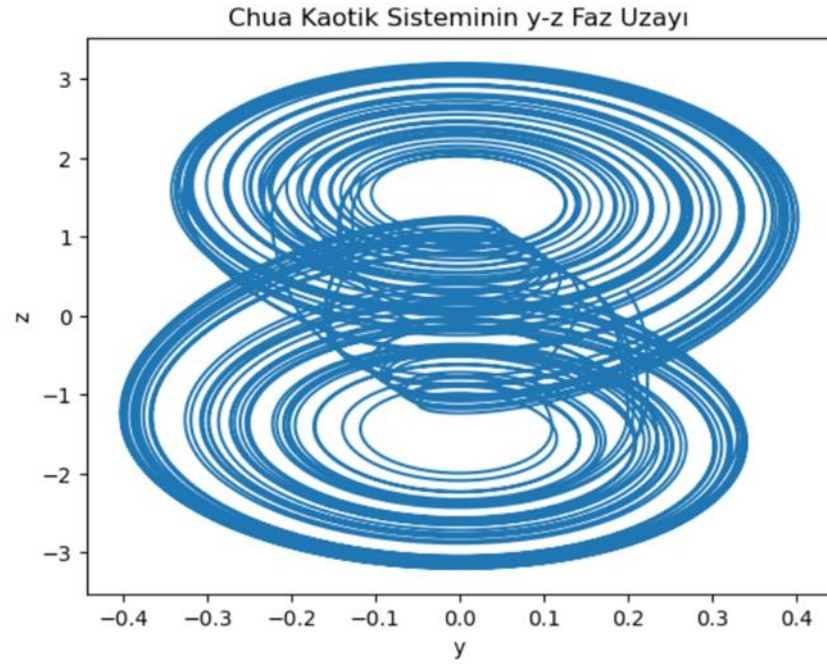
Aşağıdaki Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de Chua Kaotik Sisteminin iki boyutlu faz uzay grafikleri, Şekil 3.18 ise üç boyutlu faz uzayı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Chua kaotik sisteminin x-y faz uzayı

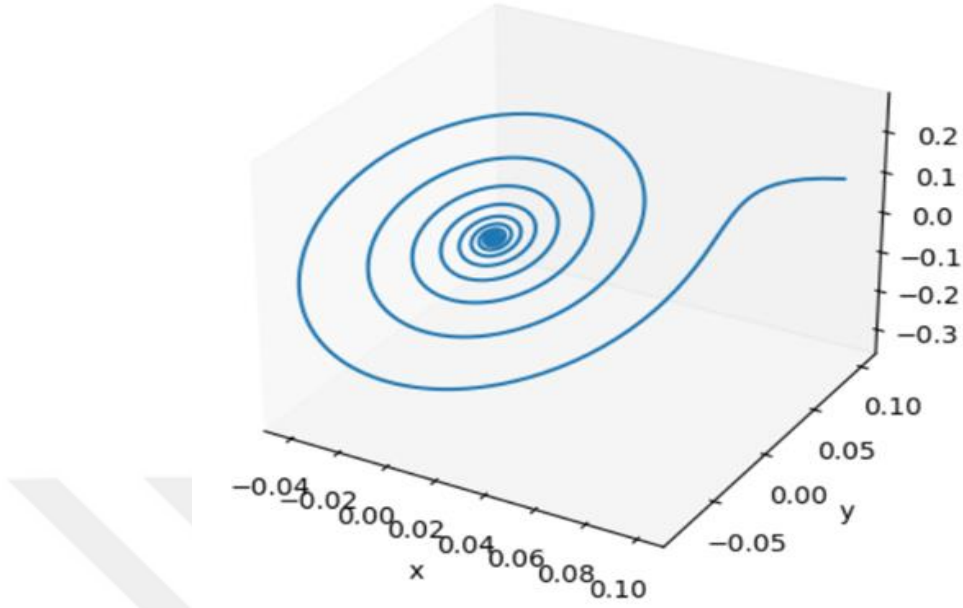


Şekil 3.16 Chua kaotik sisteminin x-z faz uzayı



Şekil 3.17 Chua kaotik sisteminin y-z faz uzayı

Chua Kaotik Sisteminin x-y-z Faz Uzayı



Şekil 3.18 Chua kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı

3.2.3 Rössler kaotik sistemi

Rössler kaotik sistemi, Otto Rössler tarafından tanımlanan bir dinamik sistemdir. Bu sistem, basit yapısına rağmen karmaşık ve kaotik davranışlar sergiler. Rössler sistemi, kaos teorisinin incelenmesinde ve nonlinear dinamik sistemlerin anlaşılmasında önemli bir araçtır. Rössler sistemi, üç adet doğrusal olmayan diferansiyel denklemden meydana gelir ve bu denklemler, sistemin çekicisinin fraktal yapıya sahip kaotik davranışlarını yansıtan sürekli zamanlı dinamikleri tanımlar (Rössler, 1976).

1976 yılında, Rössler'in önerdiği kaotik denklem sistemi aşağıda denklem takımı (3.8), (3.9) ve (3.10)'te verilmiştir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = -y - z \quad (3.8)$$

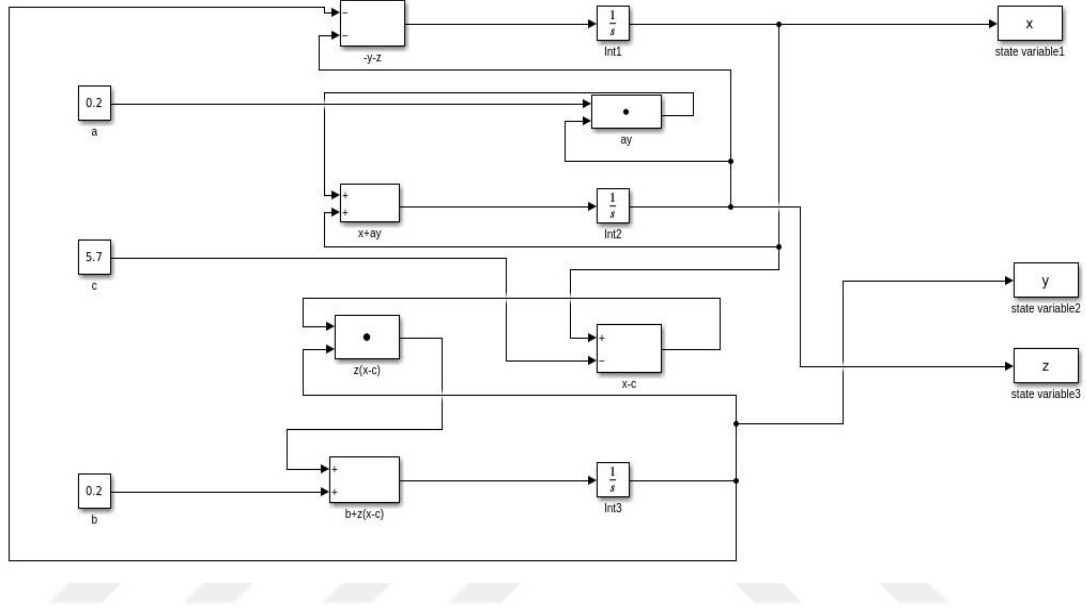
$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = x + ay \quad (3.9)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = b + z(x - c) \quad (3.10)$$

x, y, z durum değişkenleridir.

a, b, c sistemin parametreleridir.

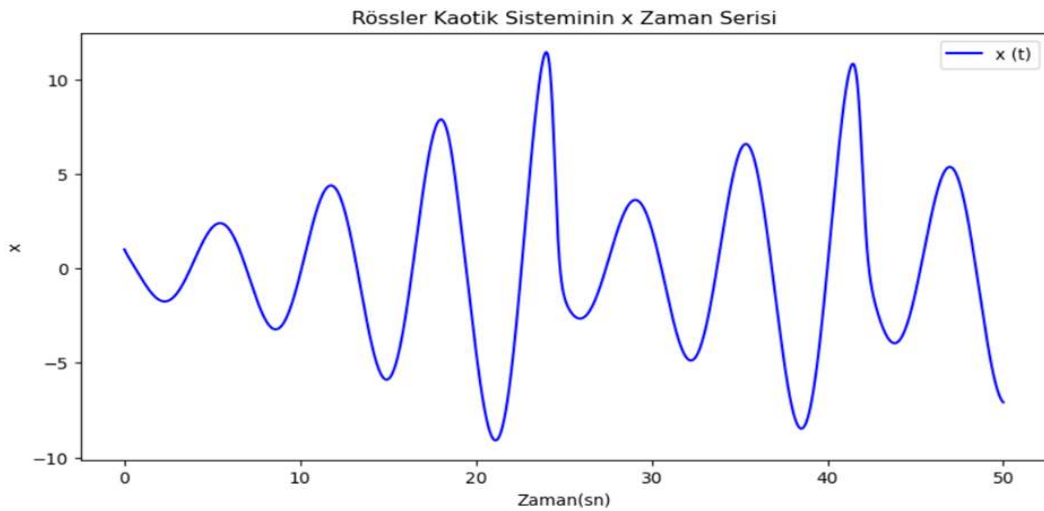
Rössler kaotik sisteminde; sistem parametreleri kaotik davranış üretmek için belirli değerlerde seçilir. Bunlar; $a=0.2$, $b=0.2$, $c=5.7$ ve $x_0 = -9.0$, $y_0 = 0.0$, $z_0 = 0.0$ başlangıç şartları için kaotik çekici oluşur. Şekil 3.19’da Rössler kaotik sisteminin Matlab-Simulink modeli verilmiştir.



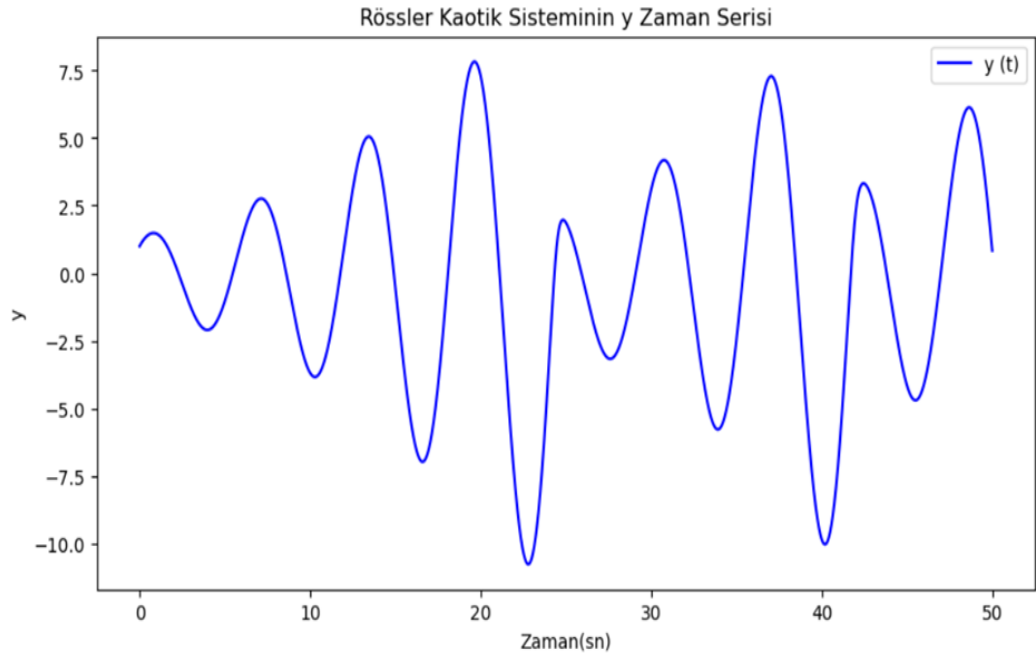
Şekil 3.19 Rössler sisteminin Matlab-Simulink Modeli

3.2.3.1 Rössler kaotik sisteminin zaman serisi grafikleri

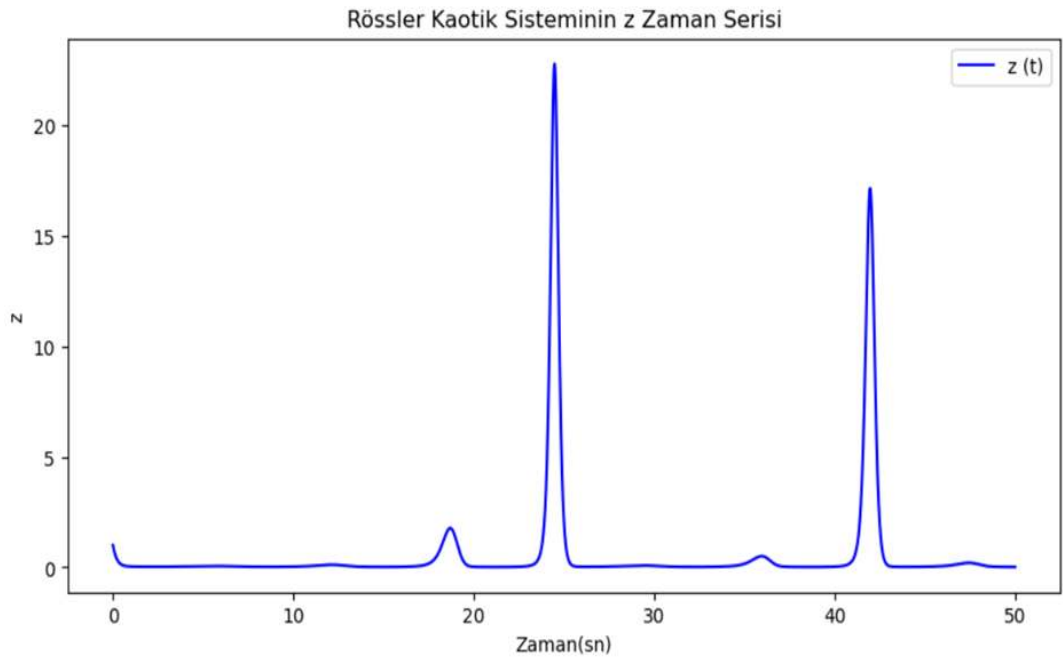
Aşağıdaki Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’te Rössler Kaotik Sisteminin x, y ve z zaman serisi grafikleri gösterilmiştir.



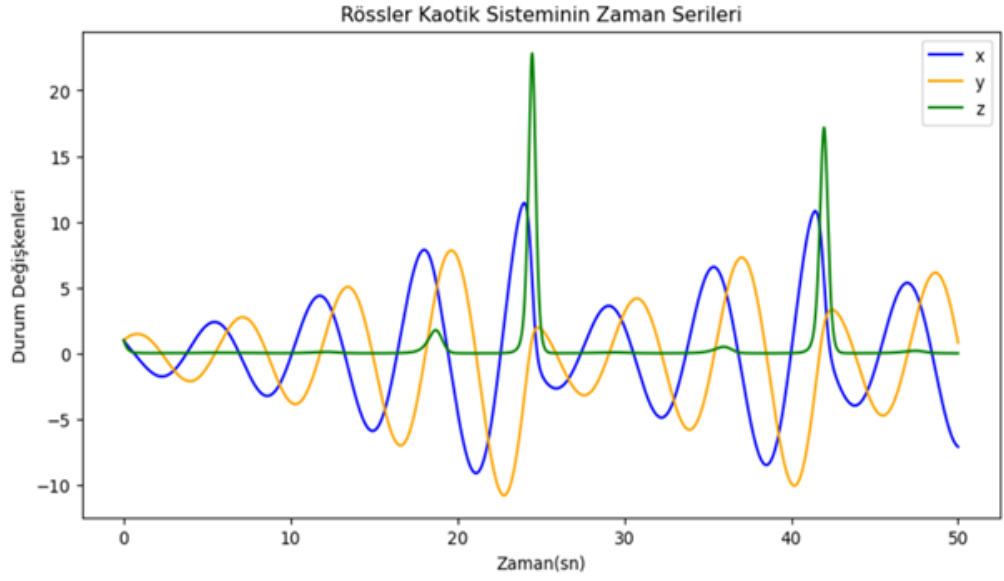
Şekil 3.20 Rössler kaotik sisteminin x zaman serisi grafiği



Şekil.3.21 Rössler kaotik sisteminin y zaman serisi grafiği



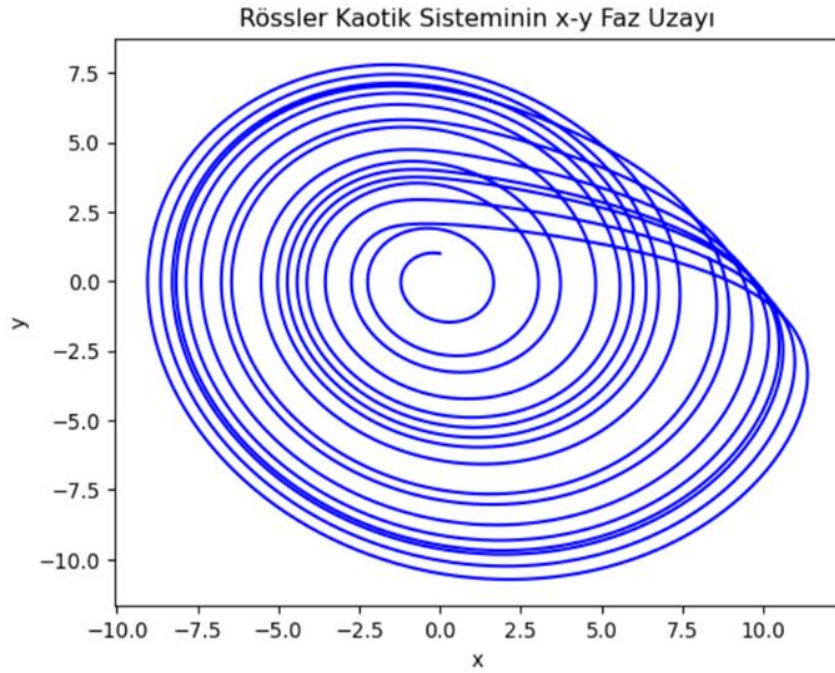
Şekil.3.22 Rössler kaotik sisteminin z zaman serisi grafiği



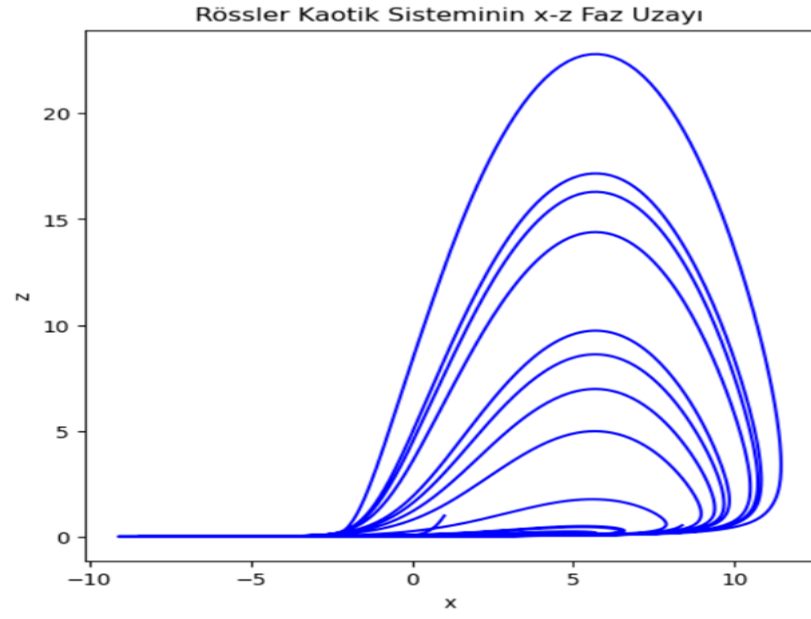
Şekil.3.23 Rössler kaotik sisteminin zaman serileri grafiği

3.2.3.2 Rössler kaotik sisteminin faz uzay grafikleri

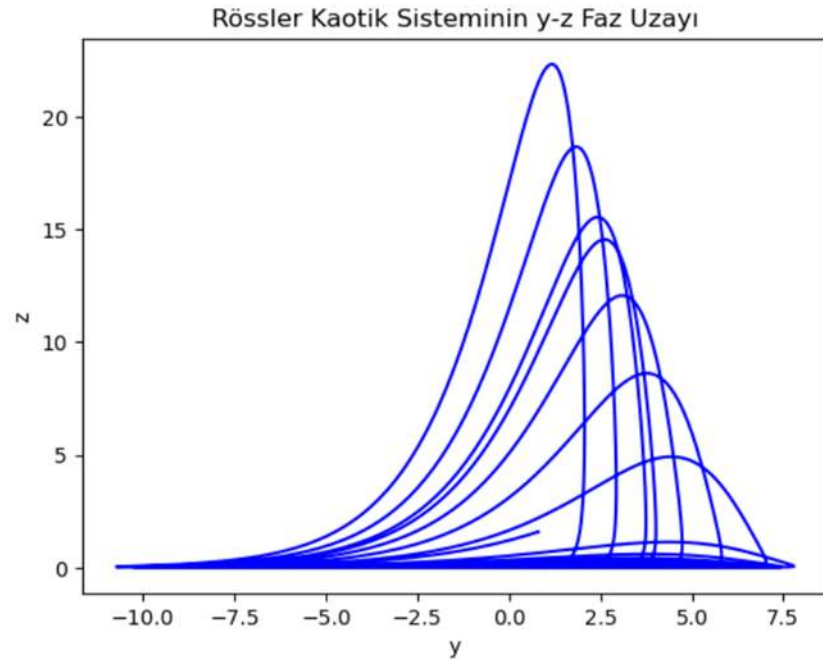
Aşağıdaki Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da Rössler Kaotik Sisteminin iki boyutlu faz uzay grafikleri, Şekil 3.27 ise üç boyutlu faz uzayı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.24 Rössler kaotik sisteminin x-y faz uzayı grafiği

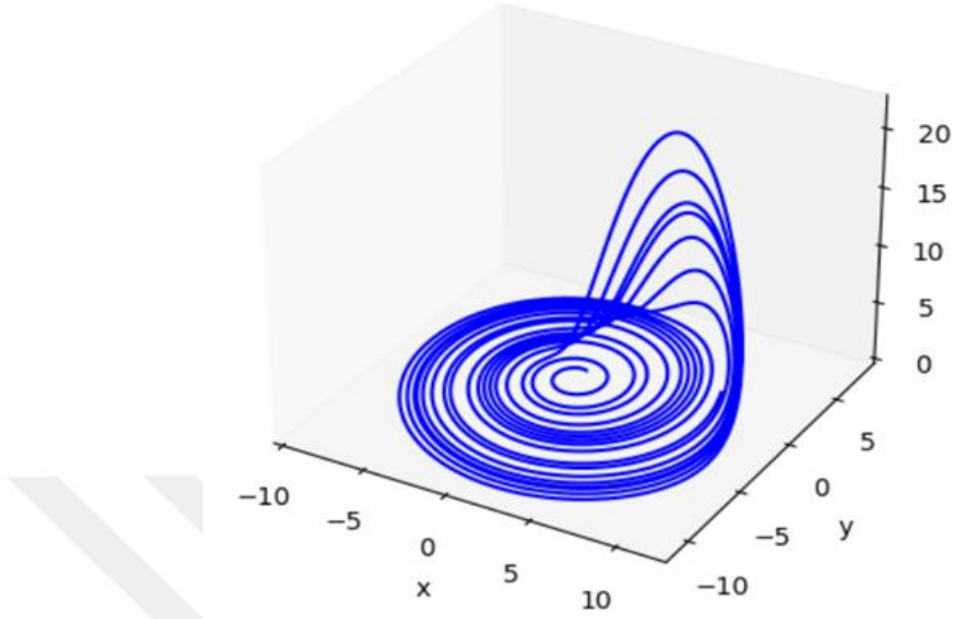


Şekil 3. 25 Rössler sisteminin x-z faz uzayı grafiği



Şekil 3.26 Rössler kaotik sisteminin y-z faz uzayı grafiği

Rössler Kaotik Sisteminin x-y-z Faz Uzayı



Şekil 3.27 Rössler kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı

3.2.4 Chen kaotik sistemi

Chen kaotik sistemi, Guanrong Chen tarafından tanıtılan bir kaotik dinamik sistemdir. Chen sistemi, kaos teorisi ve nonlinear dinamiklerin incelenmesinde önemli bir modeldir (Qi, Chen, Du, Chen ve Yuan, 2005)

Chen sistemi aşağıdaki Denklem (3.11), (3.12) ve (3.13) ile gösterilir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = a(y - x) \quad (3.11)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = (c - a)x - xz + cy \quad (3.12)$$

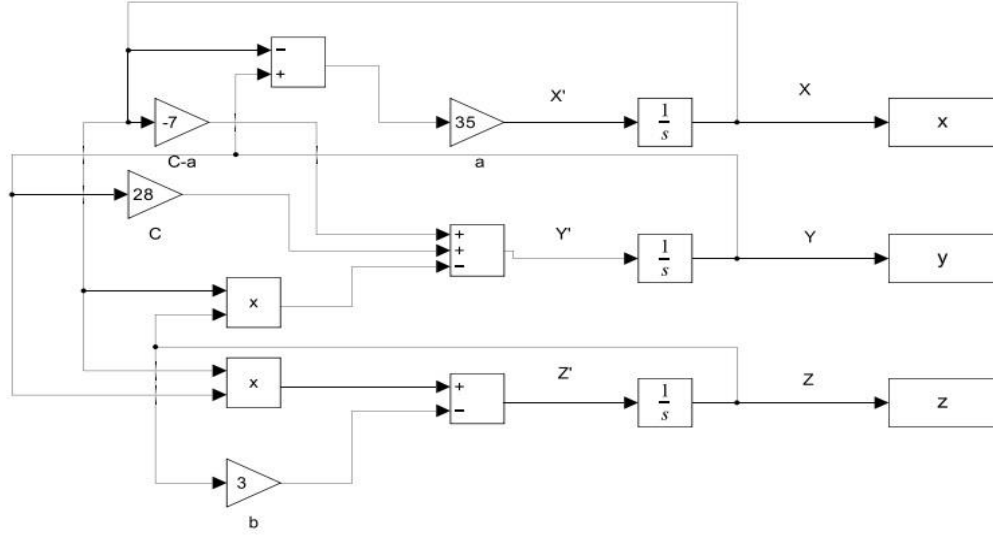
$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = xy - bz \quad (3.13)$$

x, y, z durum değişkenleridir.

a, b, c sistemin parametreleridir.

Chen sistemi için yaygın olarak kullanılan parametre değerleri $a=35$, $b=3$ ve $c=28$ şeklindedir. Sistemin parametreleri bu değerlerde kaotik davranış gösterir. Söz konusu sistem, yapısal açıdan Lorenz sistemine benzeyen bir eşlenik olup, daha karmaşık ve zengin dinamik davranışlara sahiptir (Chen ve Ueta, 1999).

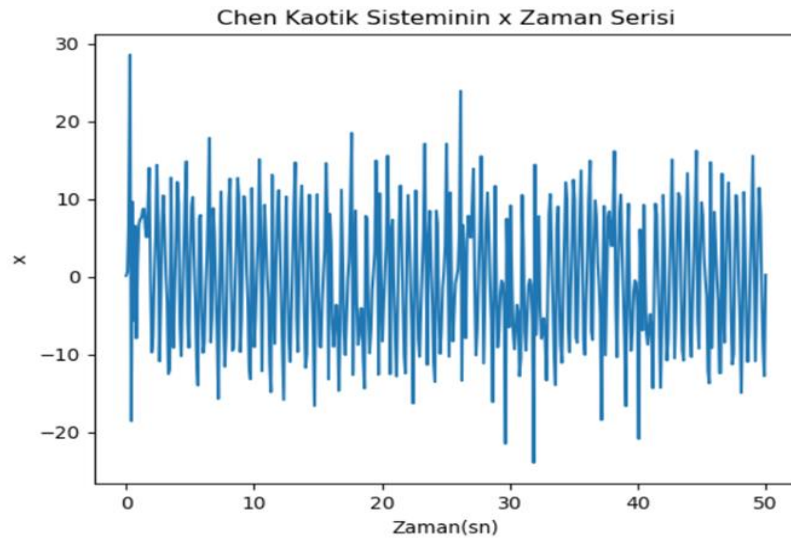
Başlangıç şartları: $x_0=5.0$, $y_0=5.0$ ve $z_0=5.0$, seçilerek elde edilen Matlab-Simulink modeli Şekil 3.25'te verilmiştir.



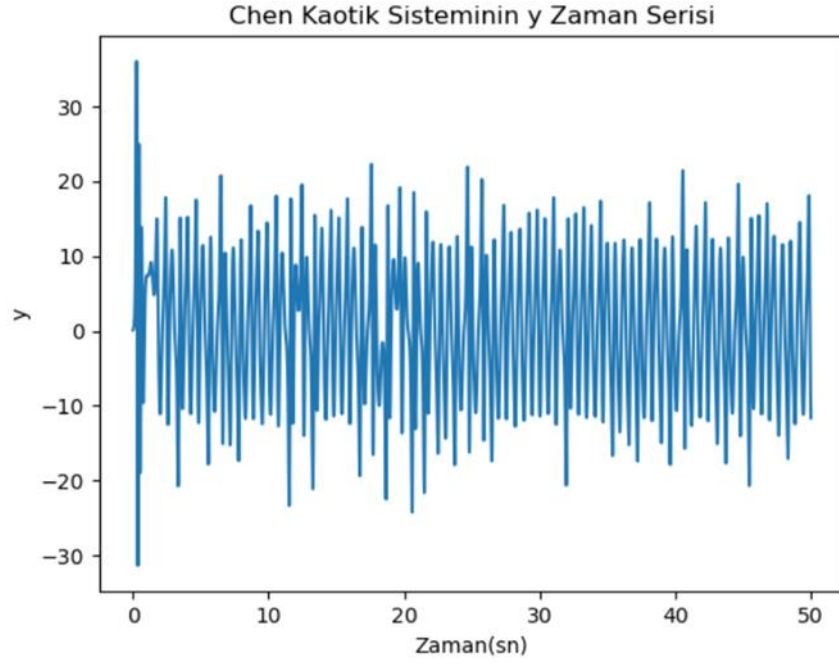
Şekil 3.28 Chen sisteminin Matlab-Simulink Modeli

3.2.4.1 Chen kaotik sisteminin zaman serisi grafikleri

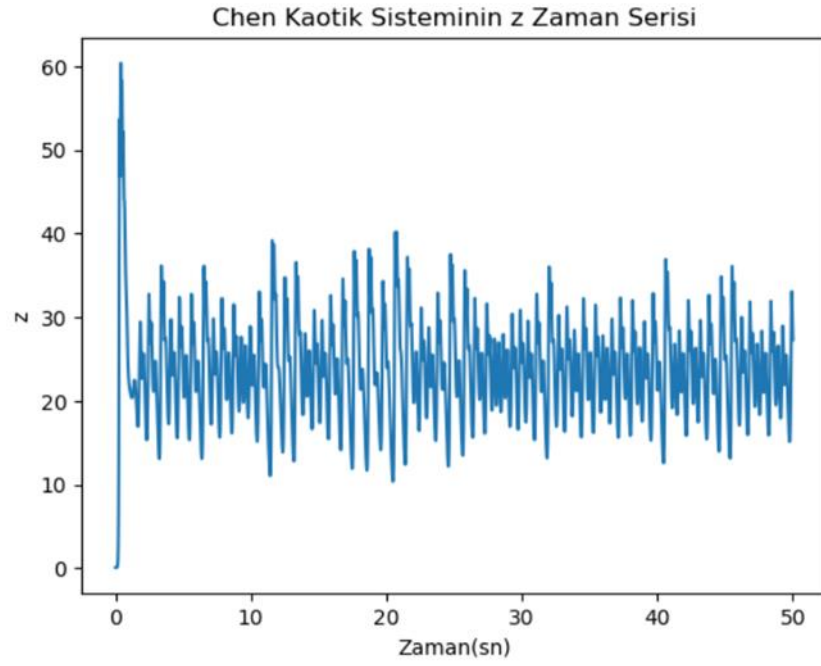
Aşağıdaki Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de Chen Kaotik Sisteminin x, y ve z zaman serisi grafikleri gösterilmiştir.



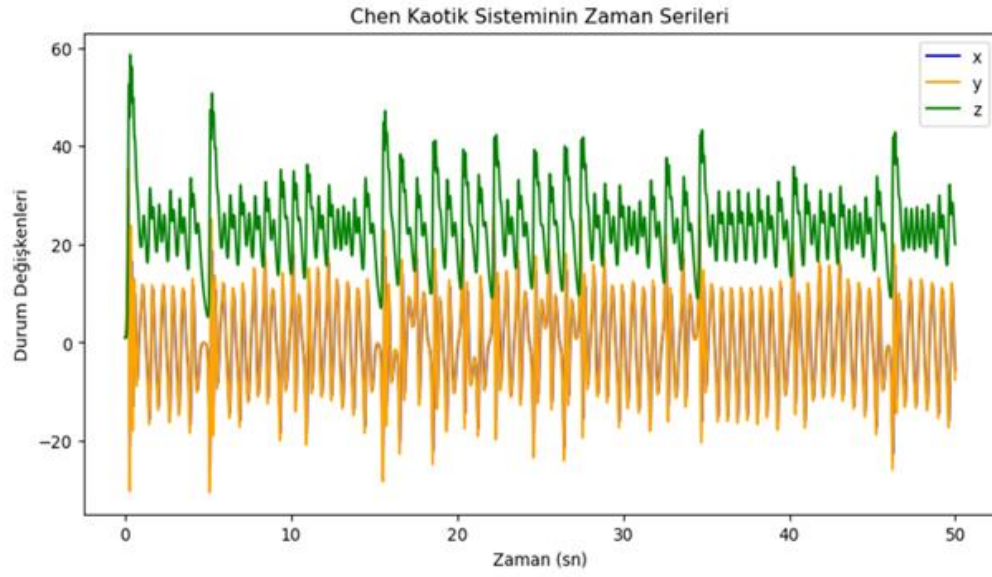
Şekil 3.29 Chen kaotik sisteminin x zaman serisi grafiği



Şekil 3.30 Chen kaotik sisteminin y zaman serisi grafiği



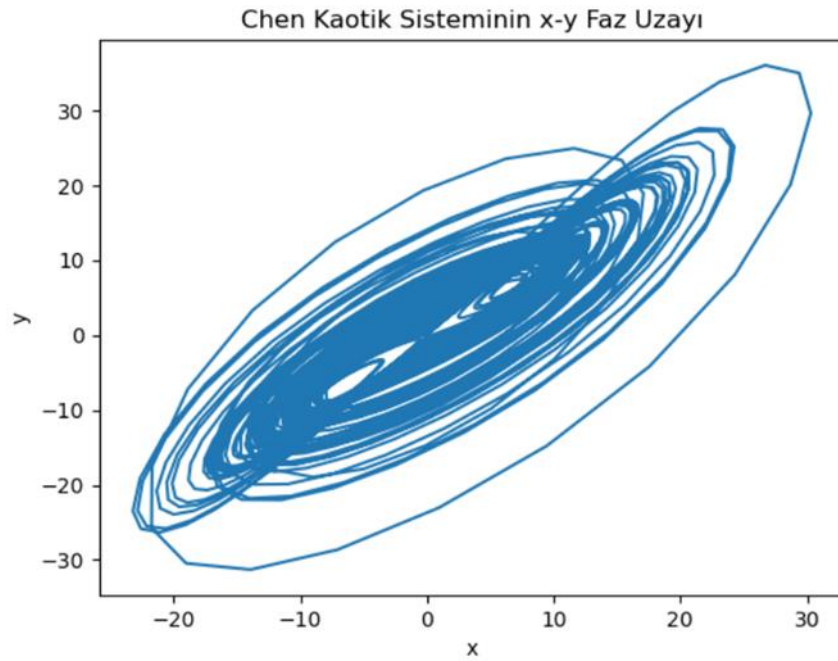
Şekil 3.31 Chen kaotik sisteminin z zaman serisi grafiği



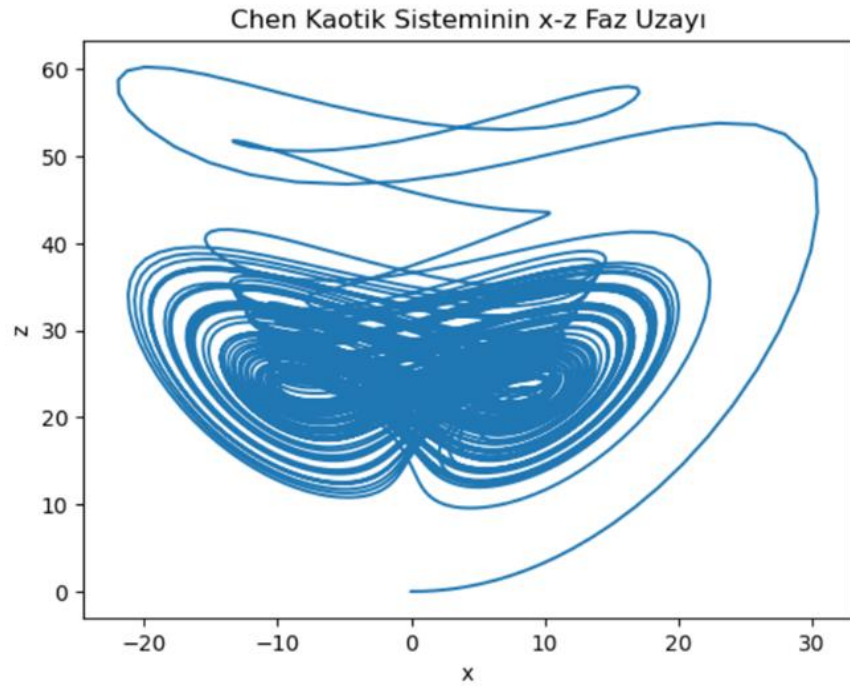
Şekil 3.32 Chen kaotik sisteminin zaman serileri grafiği

3.2.4.2 Chen sisteminin faz uzay grafikleri

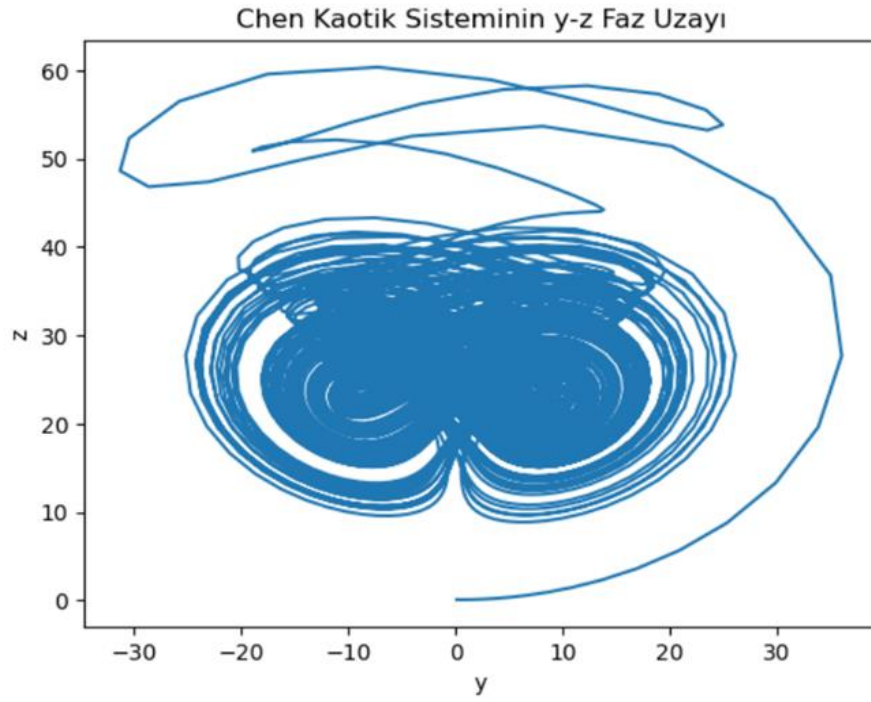
Aşağıdaki Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te Chen Kaotik Sisteminin iki boyutlu faz uzay grafikleri, Şekil 3.36 ise üç boyutlu faz uzayı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.33 Chen kaotik sisteminin x-y faz uzayı

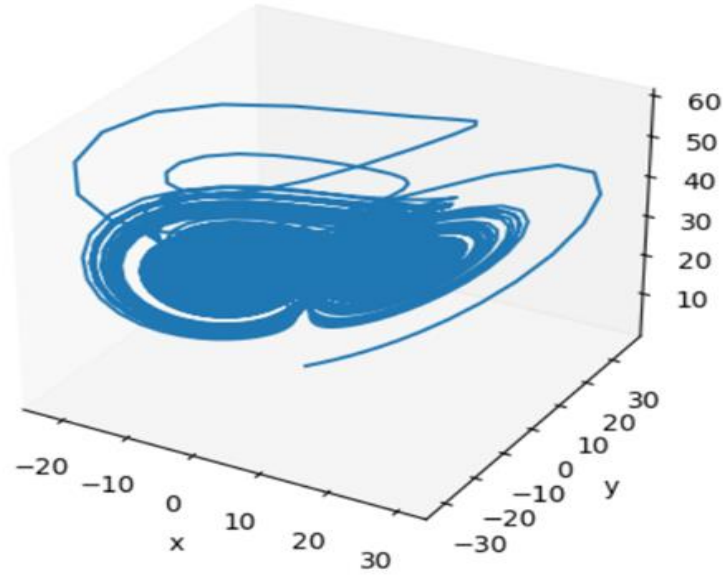


Şekil 3.34 Chen kaotik sisteminin x-z faz uzayı



Şekil 3.35 Chen kaotik sisteminin y-z faz uzayı

Chen Kaotik Sisteminin x-y-z Faz Uzayı



Şekil 3.36 Chen kaotik sisteminin x-y-z faz uzayı

İlgili dört kaotik sisteme ait zaman serileri ve faz uzayı incelendiğinde, faz uzayında karakteristik çekici (attractor) yapıların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, sistemlerin kaotik doğasını ortaya koyan önemli bir göstergedir.

3.3 Kontrol

Bir sistemin davranışını düzenlemek, izlemek ve yönlendirmek amacıyla kullanılan bir süreçtir. Bu süreç, bir mühendislik sisteminin belirli bir hedefe ulaşmasını sağlamak için çeşitli ölçüm ve geri bildirim mekanizmaları kullanarak sistemi yönlendirmeyi amaçlar. Kontrol, genellikle otomatik kontrol olarak bilinen ve sistemlerin otomatik olarak çalışmasını sağlayan yöntemlerle ilgilidir. Mühendislikte kontrolün temel amacı, belirli bir sistemin istenilen performansı sağlamasını ve kararlı bir şekilde çalışmasını garanti altına almaktır (Ogata, 2010).

3.3.1 Adaptif kontrol

Bir sistemin kontrolünü, çevresel değişiklikler veya sistem parametrelerindeki belirsizlikler gibi durumlara uyum sağlayacak şekilde dinamik olarak değiştiren bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem, özellikle sistemin davranışlarının zaman içinde değişebileceği veya tam olarak bilinmediği durumlarda kullanılır. Adaptif kontrol, sistemin parametrelerini veya dinamiklerini izleyerek, zamanla daha iyi performans gösteren bir kontrol stratejisi geliştirmeyi amaçlar. Adaptif kontrol, sistemin

parametreleri veya çevresel koşulları değiştikçe, kontrol stratejisini buna göre ayarlayarak çalışır (Astrom ve Wittenmark, 2013).

Sistemlerin bazı parametreleri zamanla değişebilir veya başlangıçta tam olarak bilinmeyebilir. Adaptif kontrol, bu tür belirsizliklerle başa çıkmak için uygundur. Adaptif kontrol, değişken veya belirsiz sistemlerde istenilen performansı sağlamak için güçlü bir araçtır. Dinamik çevresel koşullara ve parametre değişikliklerine uyum sağlayabilme yeteneği, adaptif kontrolün önemli bir avantajıdır. Bu nedenle, özellikle robotik, otomasyon ve havacılık gibi gelişmiş mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılır (Ogata, 2002).

3.3.1.1 Basit bir adaptif kontrolör tasarımı

İlk olarak, kaotik sistemi denge noktası olan 0'da stabilize edilir. Bu yaklaşımla elde edilen sonuçlar, sistemin diğer sabit noktalara stabilize edilmesi veya izlenmesi problemlerine de kolayca uygulanabilir (Hua ve Guan, 2004).

Sistemde $\mu=0$ olduğunda sistem kaotik davranış sergiler. Bu durumda, doğrusal olmayan terim Lipschitz koşulunu sağladığı için, basit bir adaptif kontrolör tasarımı mümkün hale gelir. Ayrıca her zaman aşağıdaki eşitsizliği sağlayan pozitif bir L skaleri vardır.

$$||f(x) - f(0)|| \leq L||x||$$

Burada L de bilinmiyor.

Bildiğimiz gibi, Q matrisinin tüm özdeğerleri olacak şekilde bir θ skaleri var olacaktır.

$$Q = A + LI + \theta I$$

Parametrede θ 'nın yeterince küçük seçilebileceği açıktır. Yukarıdaki bilgilerden hareketle ana sonuçlar aşağıdaki şekilde önerilir.

Sistem için, aşağıdaki uyarlanabilir durum geri bildirim denetleyicisi tasarlanmıştır (Hua ve Guan, 2004).

$$u = \hat{\theta}x,$$

Buradaki $\hat{\theta}$ adaptif yasaya sahip adaptif skalerdir.

$$\hat{\theta} = -k||x||^2$$

Burada k keyfi bir pozitif skalerdir.

Kapalı devre sistem için aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu seçilir.

$$V = \frac{1}{2}x^T x + k^{-1}(\theta - \hat{\theta})^2$$

Sistem boyunca Lyapunov fonksiyonunun zaman türevini alarak elde edilen matematiksel ifadeler;

$$\dot{V} = x^T(A + \theta I)x + 2x^T f(x) - (\theta - \hat{\theta})x^T x - k^{-1}(\theta - \hat{\theta})\dot{\hat{\theta}} \leq x^T(A + \theta I + LI)x - (\theta - \hat{\theta})(x^T x + k^{-1}\hat{\theta})$$

$$= x^T Qx - (\theta - \hat{\theta})(x^T x + k^{-1}\hat{\theta})$$

$$\dot{V} \leq x^T Qx$$

3.3.2 Kaos kontrol

Dinamik sistemlerin kaotik (düzensiz ve tahmin edilemez) davranışlarını düzenlemek, yönlendirmek veya stabilize etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Kaos, belirli bir sistemin başlangıç koşullarına duyarlı olduğu, küçük değişikliklerin büyük sonuçlara yol açtığı, zaman içinde düzensiz ve rastgele bir şekilde gelişen bir davranış ifade eder. Kaotik sistemler, geleneksel deterministik sistemlerin aksine, uzun vadede öngörülemez ve kararsız olabilirler. Kaos kontrolü, bu tür sistemlerde stabiliteyi sağlamak veya sistemin davranışını istenen şekilde yönlendirmek için geliştirilmiş teknikleri kapsar (Boccaletti vd., 2000).

Kaos kontrolünün amacı, kaotik bir sistemin öngörülebilirliğini artırmak veya daha iyi bir şekilde yönetilebilmesini sağlamaktır. Kaos, genellikle negatif olarak değerlendirilse de belirli koşullarda ve kontrol stratejileri ile kaotik sistemlerden yararlanmak da mümkündür.

Elektrik devrelerinde kaotik davranışlar, istenmeyen osilasyonlara yol açabilir. Kaos kontrolü, bu tür sistemlerde istenmeyen salınımları kontrol etmek için kullanılabilir.

Kaotik sinyallerin düzeltilmesi ve yönetilmesi, iletişim sistemleri ve sinyal işleme teknolojileri için önemlidir. Kaos kontrolü, iletişimdeki gürültüleri ve karışıklıkları azaltarak daha güvenilir sinyaller elde edilmesine yardımcı olabilir.

Kaotik dinamikler, uçuş kontrol sistemlerinde veya uzay araçlarının yönlendirilmesinde de görülebilir. Kaos kontrolü, uçuş sırasında daha kararlı hareketler sağlamak veya navigasyon sistemlerini optimize etmek için kullanılabilir.

Ekonomik sistemler, bazen kaotik dinamikler gösterebilir. Bu tür sistemlerde kaos kontrolü, piyasa dalgalanmalarını yönetmek veya finansal istikrarı sağlamak

amacıyla kullanılabilir. Kaos kontrolü, karmaşık ve düzensiz davranan sistemlerin daha kararlı ve tahmin edilebilir hale gelmesine yardımcı olabilir. Kaotik sistemlerin kontrolü, geleneksel mühendislik çözümlerinin ötesine geçebilir ve yenilikçi çözüm yolları açabilir. Kaoslu sistemlerin kontrolü, daha verimli enerji kullanımı, daha esnek mühendislik çözümleri ve daha verimli veri işleme yöntemleri gibi faydalar sağlar.

Kaos kontrolü, doğasında düzensizlik ve belirsizlik barındıran sistemleri yönetmek için güçlü bir araçtır. Hem teorik hem de pratik açıdan, kaotik davranışları öngörülebilir ve stabilize edilebilir hale getirmek, mühendislik ve bilim alanlarında önemli uygulamalara olanak tanımaktadır. Bu alan, sürekli gelişen bir araştırma alanı olup, farklı disiplinlerde daha verimli ve stabil sistemler tasarlamak için kullanılmaktadır (Boccaletti vd., 2000).

3.4 Python Programlama

Python, ücretsiz, açık kaynaklı, genel amaçlı, yorumlanmış ve güçlü bir komut dosyası dilidir. Web uygulamaları için idealdir. Kolay ama güçlü bir programlama dili olarak, geleneksel yüksek seviyeli dillerin gücü ve karmaşıklığının yanı sıra büyük uygulamalar için yapı ve destek sağlar. Python hem yorumlanmış hem de betik dili özelliklerine sahip tek bir dil arıyorsanız ideal bir seçimdir (Gupta, 2002).

Python, acemi ve deneyimli programcıların dili hızlı bir şekilde öğrenip anlayabilmeleri ve kolaylıkla kullanabilmeleri için tasarlanmıştır. Kendinden öncekilerin aksine Python, taşınabilir ve genişletilebilir olacak şekilde tasarlanmıştır. Python'un sözdizimi ve tasarımı, iyi programlama uygulamalarını teşvik eder ve şaşırtıcı derecede hızlı geliştirme süreleri sağlar. Bu, program ölçeklenebilirliğinden ve bakımından ödün vermeden yapılır. Python, yeni başlayan programcılar tarafından kullanılacak kadar basit, ancak profesyonelleri çekmek için yeterince güçlüdür. Python, var olan en taşınabilir programlama dillerinden biridir. Orijinal olarak UNIX üzerinde uygulanmış, ancak o zamandan beri Microsoft Windows ve Apple Mac OS X dahil olmak üzere birçok platforma yayılmıştır. Python programları genellikle bir işletim sisteminden diğerine herhangi bir değişiklik yapmadan geçebilir ve yine de düzgün bir şekilde çalışabilir (Paul Deitel ve Harvey Deitel 2001).

3.4.1 Python'ın tarihçesi

Python, 1989 yılının sonlarında Amsterdam'daki Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Araştırma Enstitüsü (CWI) bünyesinde araştırmacı olan Guido Van Rossum tarafından geliştirilmeye başlandı. O dönemde, Van Rossum Ulusal Araştırma Merkezi'nde çalışıyordu ve bir araştırma grubunun Amoeba dağıtılmış işletim sistemi için idari görevleri yerine getirecek yüksek seviyeli bir komut dosyası dili ihtiyacı vardı. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla Python'u yaratma sürecine girdi. Python'u tasarlariken, Guido Van Rossum yüksek seviyeli bir öğretim dili olan All Basic Code (ABC) ve sistem programlama dili Modula-3'ün çeşitli özelliklerini ödünç aldı. All Basic Code, basit ve anlaşılır bir sözdizimi sunduğu için tercih edildi. Ancak, ABC'nin en büyük eksikliklerinden biri genişletilebilirlikten yoksun olmasıydı; dil, yeni geliştirmelere veya uzantılara açık değildi. Guido Van Rossum, bu durumu göz önünde bulundurarak, mevcut dillerde beğendiği birçok özelliği bir araya getiren ve sınıflar aracılığıyla genişletilebilen yeni bir dil yaratmaya karar verdi. Bu sayede, programlama arayüzlerini geliştirmek ve dilin esnekliğini artırmak mümkün oldu. Python ismi, Guido Van Rossum'un popüler bir İngiliz komedi grubu olan Monty Python'un eserlerinden esinlenerek verdiği bir isimdir. Python adı, hem dilin eğlenceli ve kullanıcı dostu olmasını hem de yaratıcılığın ön planda olmasını yansıtır. Python'un tasarımı, kullanıcılarının dilin sözdizimini hızlıca öğrenip kullanabilmesini sağlamak amacıyla basit ve anlaşılır olmasına önem verilmiştir. Bu özellikleri sayesinde Python, günümüzde veri bilimi, web geliştirme, yapayzeka, bilimsel hesaplamalar ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir programlama dili haline gelmiştir. Guido Van Rossum'un bu vizyonu ve Python dilinin esnekliği, programcıların çeşitli projelerde hızlı ve verimli bir şekilde çalışabilmelerini sağlamıştır. Python'un başarısının arkasındaki bu nedenler, dilin hızla popülerlik kazanmasını ve geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmesini sağlamıştır (Paul Deitel ve Harvey Deitel, 2001).

3.4.2 Python özellikleri

Python'un çok yönlü ve platformdan bağımsız bir dil olarak yaygın kullanımı, onu birçok geliştirici ve şirket için cazip ve kullanışlı kılıyor. Python'un çok yönlülüğü, esnekliği, gücü ve zengin kütüphanelere sahip olması, onun çok farklı alanlarda kullanılabilmesini sağlar. Python; web geliştirme alanında, veri bilimi ve analizinde,

veri görselleştirme ve bilimsel hesaplamalarda, makine öğrenimi ve derin öğrenme projelerinde, oyunlar ve etkileşimli uygulamalarda, günlük görevlerin otomasyonu ve yönetiminde, robotik ve nesnelerin interneti (IoT) alanında, mikrodenetleyicilerle ve gömülü sistemlerle iletişim kurmada, finans ve ekonomi alanında sıklıkla kullanılır. Python, basit ve anlaşılır yapısıyla programlamaya yeni başlayanlar için ideal olduğundan eğitim alanında da yaygın olarak kullanılır.

Python'un gücü ve esnekliği, onu çok yönlü bir programlama dili haline getiriyor. Basit sözdizimi sayesinde çeşitli yazılım bileşenlerini kolayca birbirine bağlayabiliyor ve bu yüzden birçok alanda tercih ediliyor. Ayrıca, Python'un kılavuz dil olarak kullanılma özelliği, karmaşık projelerde yol gösterici olarak işlev görmesini sağlıyor. Veri analizi, web geliştirme, yapay zeka ve bilimsel hesaplamalar gibi birçok alanda Python'un popülerliği artmaya devam ediyor (Gupta, 2002).

Python, modüler olarak genişletilebilir bir dildir; bu, yeni modüllerin (yeniden kullanılabilir yazılım parçalarının) eklenebileceği anlamına gelir. Bu modüller, herhangi bir Python geliştiricisi tarafından yazılabilir ve Python'un yeteneklerini genişletir. Python kaynak kodu, modülleri ve dokümantasyonu için birincil dağıtım merkezi Python'un resmi web sitesidir: www.python.org. Ayrıca, yalnızca Python modüllerinin bakımına adanmış bir site geliştirme planları da vardır (Paul Deitel ve Harvey Deitel, 2001).

Python, çeşitli alanlarda kullanılmakta olan gelişmiş bir betik dilidir. Python'un kullanıldığı bazı alanlar şunlardır (Gupta, 2002):

- Büyük yazılım bileşenlerinin birbirine yapıştırılması. Bu büyük yazılım bileşenleri C, C++ veya Java dillerinde yazılabilir.
- Bir uygulamanın prototiplerini oluşturma. Prototip, Python'da yazılabilir ve herhangi bir C, C++ veya Java kodu yazmadan geliştirme süresinden tasarruf sağlar. Genellikle, prototip yeterince işlevseldir ve nihai ürün olarak teslim edilebilecek kadar iyi performans gösterir.
- Tüm platformlarda (Unix, Windows ve Mac) CGI betikleri yazma. Bu nedenle Python, web üzerinde güçlü bir varlığa sahiptir. CGI, bir web

sunucusunun, dışarıdan çalıştırılabilen bir programı (örneğin bir Python betiğini) kullanarak dinamik web içeriği üretmesini sağlayan bir teknolojidir.

- Python, dağıtık sistemler dünyasında da iyi bir şekilde temsil edilmektedir. Xerox PARC'ın ILU'su tarafından desteklenen ana dillerden biridir. Ayrıca, web tarayıcısı Grail'i uygulamak için de kullanılmıştır.

Betik dillerinin derlenmiş dillerden daha yavaş olduğu bilinen bir gerçektir. Python yorumlayıcısı, bir derleyici tarafından gerçekleştirilen görevlerin çoğunu yerine getirir. Ancak Python hem derlenmiş hem de yorumlanmış dillerin özelliklerini sağlayan bir ara dildir. Python'un diğer birçok dille karşılaştırılabilmesinin başlıca nedeni, birçok göze çarpan özelliğinin C, C++, Modula-3, ABC, Small Talk ve Unix kabuğundan türetilmiş olmasıdır (Gupta, 2002).

Python genellikle C ve C++ ile karşılaştırılır, çünkü bu dillerin sözdizimine benzer bir sözdizimine sahiptir. Python, C ve C++ uygulamalarını test etmek için iyi bir araç olarak kabul edilir. Ayrıca, C/C++ projelerine katkıda bulunan bazı C/C++ bileşenlerini de birbirine bağlar. Python'un C/C++'a göre birçok üstünlüğü vardır. Bellek ayırma ve referans hataları, C/C++'da sıkça karşılaşılan sorunlar, Python yorumlayıcısı tarafından ortadan kaldırılır. Bellek yönetimi, Python'da otomatik olarak gerçekleştirilir. Python kodu genellikle C ve C++ kodundan daha kolay ve daha küçüktür. Python'un dizi yapıları, C++'ın dizi yapılarından daha az sorun yaratır (Gupta, 2002).

Lorenz, Chua, Rössler ve Chen Kaotik Sistemlerinin matematiksel modelleri yazılmış Matlab-Simülink modelleri oluşturulup zaman serileri ve faz uzay grafikleri elde edilmiştir. Kontrol teorisi bağlamında adaptif kontrol, basit bir adaptif kontrolör tasarımı, kaos kontrol ve Python programlama dili konularına değinilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kaotik Sistemlerde Adaptif Kontrol

Adaptif kontrol, kaotik sistemlerde belirsiz parametreler veya zamana bağlı değişken dinamiklerin varlığı durumunda, kontrol girişini gerçek zamanlı olarak ayarlayarak sistemi istenilen bir referans yörüngeye yönlendirmeyi amaçlayan bir kontrol yöntemidir. Bu yaklaşımın temel hedefi, kaotik davranışı bastırmak, sistem parametrelerindeki belirsizliklere uyum sağlamak ve sistemin kararlı bir şekilde hedeflenen dinamikleri takip etmesini temin etmektir.

Adaptif kontrol için kullanılan tipik bir uyarlayıcı yasa (Ioannou ve Baldi, 2010):

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \gamma e(t)\phi(t) \quad (4.1)$$

$\theta(t)$: zaman t 'deki parametre vektörü

γ : öğrenme ortamı

$e(t)$: zaman t 'deki hata sinyali

$\phi(t)$: sistem dinamiklerini tanımlayan regresyon vektörü

4.1.1 Lorenz kaotik sisteminin adaptif kontrolü

Lorenz kaotik sisteminde adaptif kontrol, sistemin kaotik davranışını düzenleyerek belirli bir referans noktaya veya kararlı duruma yönlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Adaptif kontrol, sistemin bilinmeyen veya zamanla değişen parametrelerini tahmin ederek kontrol girişlerini dinamik olarak ayarlayabilen bir yöntemdir. Adaptif kontrolün amacı, sistemin durumlarını belirli bir referans noktaya veya istenilen bir davranışa yönlendirmektir.

Lorenz kaotik sisteminde adaptif kontrol için, bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi ve kontrol girdisi olarak μ parametresini eklemek gerekir.

Lorenz kaotik sisteminde adaptif kontrol durum denklemleri 4.2, 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) + \mu_x \quad (4.2)$$

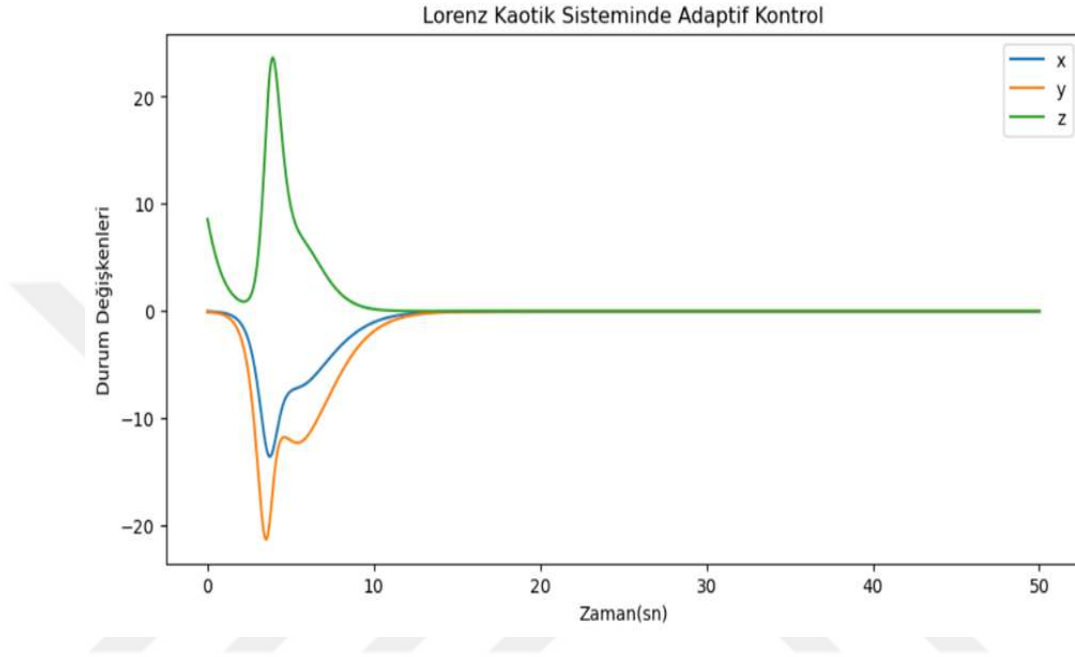
$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = x(p - z) - y + \mu_y \quad (4.3)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = xy - \beta z + \mu_z \quad (4.4)$$

x , y ve z sistemin durum değişkenleridir.

μ_x , μ_y , ve μ_z kontrol sinyalleridir. Bu sinyaller, adaptif kontrol algoritmaları ile beslenir.

Lorenz kaotik sisteminde adaptif kontrol Şekil 4.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Lorenz kaotik sisteminde adaptif kontrol

Şekil 4.1’de verilen grafik, Lorenz kaotik sistemine uygulanan adaptif kontrol algoritması sonucunda elde edilen x , y ve z durum değişkenlerinin zamanla nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Sistemin başlangıçta kaotik ve düzensiz bir davranış sergilemesine rağmen, adaptif kontrol sayesinde her üç değişkenin de zamanla sönümlendiği ve referans duruma (0, 0, 0) doğru yöneldiği gözlemlenmektedir. Bu davranış, kontrol algoritmasının sistemin dinamiklerine uyum sağladığını ve kaotik salınımları bastırabildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle kazançların sürekli güncellenmesi, sistemdeki hata miktarına göre kontrol gücünün ayarlanmasını sağlayarak sistemin kararlı hale gelmesinde etkili olmuştur.

4.1.2 Chua kaotik sisteminin adaptif kontrolü

Chua kaotik sistemi, elektronik devrelerde kaotik davranış sergileyen en ünlü sistemlerden biridir. Bu sistem, doğrusal olmayan bir devre elemanı olan Chua diyotu sayesinde kaotik dinamikler üretir. Adaptif kontrol ile bu kaotik davranış

düzenlenerek sistem istenilen bir referans yörüngeye yönlendirilebilir veya kararlı hale getirilebilir. Buradaki amaç Chua sisteminin kaotik salınımlarını kontrol ederek Sistemi belirli bir referans noktaya (sabit noktaya) stabilize etmek, Sistem dinamiklerini istenilen bir yörüngeye yönlendirmek, belirsiz veya değişken sistem parametrelerini tahmin ederek kontrolü sağlamaktır.

Chua kaotik sisteminde adaptif kontrol için, bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi ve kontrol girdisi olarak μ parametresini eklemek gerekir.

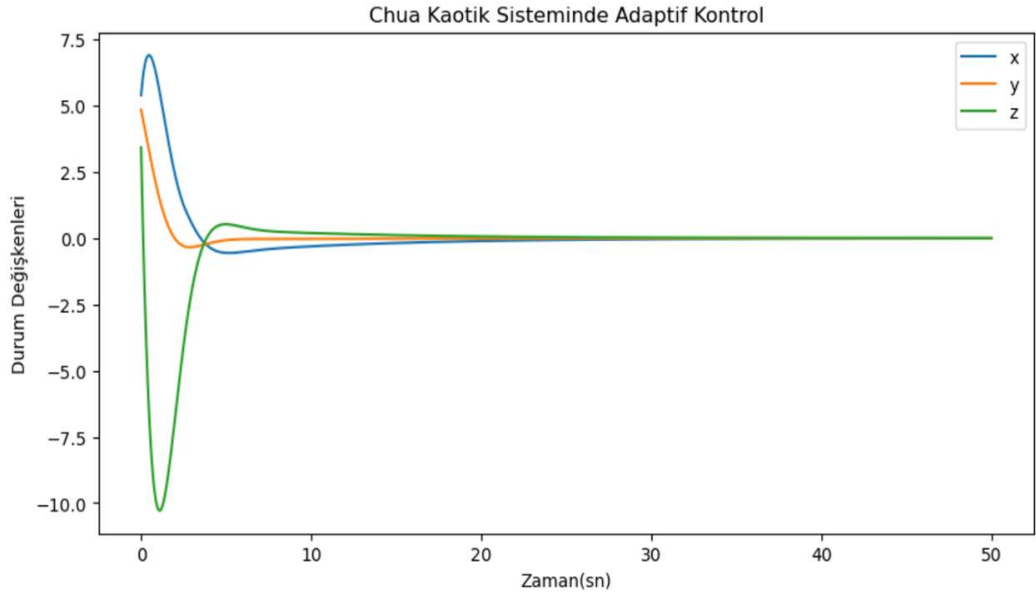
Chua kaotik sisteminde adaptif kontrol durum denklemleri 4.5, 4.6 ve 4.7’de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \alpha(y - x - f(x)) + \mu_x \quad (4.5)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = x - y + z + \mu_y \quad (4.6)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = -\beta y + \mu_z \quad (4.7)$$

Chua kaotik sisteminde adaptif kontrol Şekil 4.2’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Chua kaotik sisteminde adaptif kontrol

Şekil 4.2’de, Chua kaotik sisteminin adaptif kontrol altında x, y ve z durum değişkenlerinin zamanla nasıl değiştiği görülmektedir. Başlangıçta büyük genlikli ve

düzensiz salınımlar gösteren sistem, zaman ilerledikçe adaptif kontrol etkisiyle kararlı bir duruma yönelmiş ve referans noktası olan (0, 0, 0) durumuna başarılı bir şekilde ulaşmıştır. Özellikle y ve z değişkenlerinin daha hızlı sönümlenmesi, bu eksenlerde uygulanan kontrol kazançlarının daha yüksek olmasının bir sonucudur.

4.1.3 Rössler kaotik sisteminin adaptif kontrolü

Rössler kaotik sisteminde adaptif kontrol, sistemin kaotik dinamiklerini stabilize etmek veya belirli bir referans sinyale yönlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu kontrol yöntemi, sistemin parametrelerindeki belirsizlikleri ve dış bozucuları telafi edebilmek için adaptif algoritmalar içerir. Genellikle Lyapunov tabanlı adaptif kontrol veya geri beslemeli lineerleştirme teknikleri uygulanarak, sistemin belirlenen bir denge noktasına veya periyodik bir yörüngeye oturması sağlanır. Adaptif kontrol yasası, hata sinyali ve sistem durumlarından elde edilen bilgilerle güncellenerek, sistemin dinamik değişimlerine uyum sağlar. Böylece, Rössler sisteminin kaotik yapısı kontrol altında tutularak, istenmeyen dalgalanmalar ve öngörülemez davranışlar engellenebilir.

Rössler kaotik sisteminde adaptif kontrol için, bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi ve kontrol girdisi olarak μ parametresini eklemek gerekir.

Rössler kaotik sisteminde adaptif kontrol durum denklemleri 4.8, 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = -y - z + \mu_x \quad (4.8)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = x + \alpha y + \mu_y \quad (4.9)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = b + z(x - c) + \mu_z \quad (4.10)$$

μ_x , μ_y ve μ_z ; adaptif kontrol sinyalleridir.

$$\mu_x = -k_1 x, \quad \mu_y = -k_2 y, \quad \mu_z = -k_3 z, \quad (4.11)$$

Daha gelişmiş bir kontrol yaklaşımıyla;

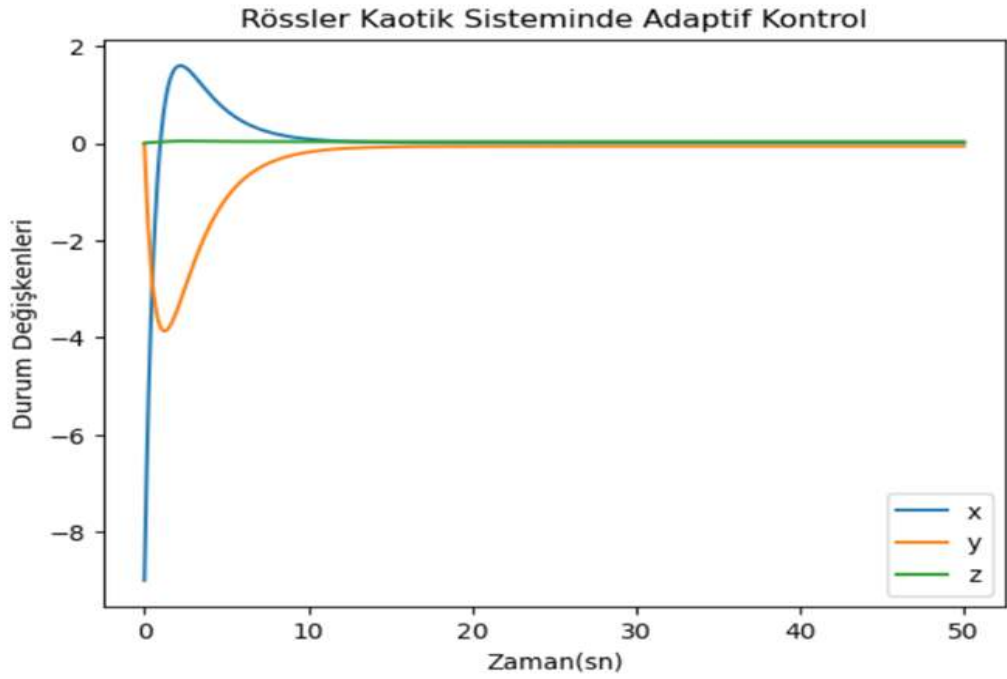
$$\frac{dk_1}{dt} = \gamma_1 x^2, \quad \frac{dk_2}{dt} = \gamma_2 y^2, \quad \frac{dk_3}{dt} = \gamma_3 z^2 \quad (4.12)$$

k_1, k_2, k_3 ; adaptif kazanç olup, zamanla değişerek sistemi stabilize etmeye veya belirli bir referansa yönlendirir.

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$; adaptasyon hızlarını belirleyen pozitif sabitlerdir.

Adaptasyon mekanizması, sistemin kaotik davranışını bastırmak veya belirli bir referans yörüngeye yönlendirmek için kullanılır.

Rössler Kaotik Sisteminde adaptif kontrol Şekil 4.3'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Rössler kaotik sisteminde adaptif kontrol

Şekil 4.3 'te, Rössler kaotik sistemine uygulanan basit formda bir adaptif kontrol yapısı sonucunda elde edilen x, y ve z durum değişkenlerinin zamana göre değişimini göstermektedir. Başlangıçta düzensiz ve büyük genlikli salınımlar sergileyen sistem, uygulanan kontrol etkisiyle özellikle x değişkeni üzerinden bastırılmış ve sistemin genel dinamiği daha sönümlü ve kararlı bir yapıya yönelmiştir. Kontrol girişi, sistemin x, y ve z değişkenlerine bağlı olarak doğrudan uygulanmış ve bu değişkenlerin büyüklüğü bastırılarak sistemin geri kalan dinamikleri üzerinde de dolaylı bir dengeleme etkisi yaratmıştır. Grafikte görülen sınırlı salınımlar, adaptif kontrolün sistemin kaotik davranışını başarılı bir şekilde zayıflattığını ve kontrollü bir rejime geçiş sağladığını göstermektedir. Bu durum, Rössler sistemi gibi doğrusal olmayan yapıya sahip bir sistemde dahi basit kontrol yaklaşımlarının etkili

olabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca kontrol uygulanmadan önceki referanssız kaotik davranışa kıyasla sistemin daha düzenli, tahmin edilebilir bir yapıya geçmesi, kontrol stratejisinin doğruluğunu desteklemektedir.

4.1.4 Chen kaotik sisteminin adaptif kontrolü

Chen kaotik sisteminde adaptif kontrol, sistemin kaotik dinamiklerini bastırmak veya belirli bir referans duruma yönlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Chen sistemi, Lorenz ve Lü sistemleri gibi yüksek derecede duyarlılığa sahip olup, kontrol edilmediğinde kaotik yörüngelerde hareket eder. Adaptif kontrol teknikleri, sistem parametrelerindeki belirsizlikleri ve dış bozucuları telafi ederek sistemin kararlı bir duruma getirilmesini sağlar. Genellikle Lyapunov tabanlı adaptif kontrol veya geri besleme lineerleştirme yöntemleri uygulanarak, sistemin durum değişkenleri istenen bir referans değere yönlendirilir. Adaptif kontrol yasası, hata sinyali ve sistemin mevcut durumu kullanılarak sürekli güncellenir, böylece sistemin değişen dinamiklerine uyum sağlanır. Bu sayede, Chen sisteminin kaotik davranışı kontrol edilerek, mühendislik ve güvenlik uygulamalarında daha kararlı bir yapı elde edilebilir.

Chen kaotik sisteminde adaptif kontrol durum denklemleri 4.13, 4.14 ve 4.15'te gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \alpha(y - x) + \mu_x \quad (4.13)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = (c - a)x - xz + cy + \mu_y \quad (4.14)$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = xy - bz + \mu_z \quad (4.15)$$

x, y ve z durum değişkenleridir.

a, b ve c sistemin parametreleridir.

μ_x , μ_y ve μ_z ; adaptif kontrol sinyalleridir ve sistemin dinamiklerini değiştirmek için eklenmiştir.

$$\mu_x = -k_1x, \quad \mu_y = -k_2y, \quad \mu_z = -k_3z, \quad (4.16)$$

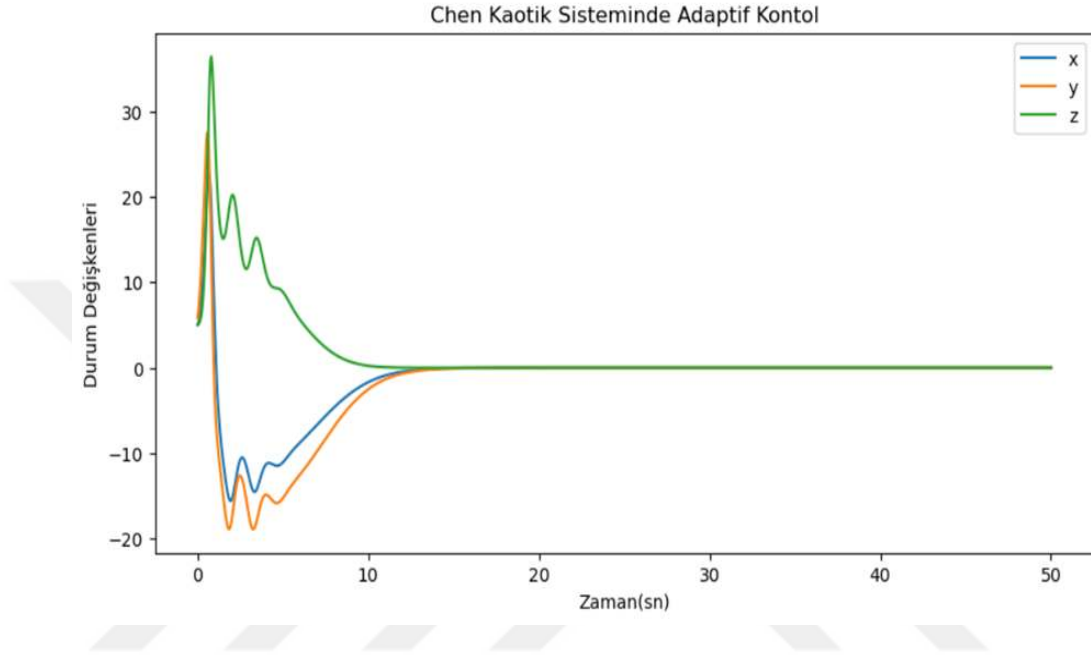
Daha gelişmiş bir kontrol yaklaşımıyla;

$$\frac{dk_1}{dt} = \gamma_1 x^2 \quad \frac{dk_2}{dt} = \gamma_2 y^2 \quad \frac{dk_3}{dt} = \gamma_3 z^2 \quad (4.17)$$

k_1, k_2, k_3 ; adaptif kazanç olup, zamanla değişerek sistemi kaotik hareketlerini kontrol altına almaya çalışır.

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$; adaptasyon hızlarını belirleyen pozitif sabitlerdir.

Chen Kaotik Sisteminde adaptif kontrol Şekil 4.4'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Chen kaotik sisteminde adaptif kontrol

Şekil 4.4 'te, Chen kaotik sistemine uygulanan adaptif kontrol algoritmasının x, y ve z durum değişkenleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Başlangıçta yüksek genlikli ve düzensiz salınımlar sergileyen sistem, zamanla adaptif kontrol etkisiyle sönümlenmiş ve her üç durum değişkeni de referans değeri olan sıfıra doğru yönelmiştir. Bu durum, sistemin kaotik davranışının başarıyla bastırıldığını ve kontrol algoritmasının etkin biçimde çalıştığını göstermektedir. Kontrol algoritması, sistem hatalarını sürekli ölçerek kazançları dinamik olarak güncellemiş ve kontrol girişlerini buna göre uyarlamıştır. Bu sayede sistemin farklı evrelerinde değişen dinamiklerine uyum sağlanmış ve kararlı bir yapı elde edilmiştir. Özellikle Chen sistemi gibi güçlü kaotik karaktere sahip bir yapının kısa sürede dengeye ulaşması, kullanılan adaptif kontrol yapısının esneklik ve doğruluk bakımından güçlü bir performans sergilediğini göstermektedir.

4.1.5 Dört Farklı Kaotik Sistemde Adaptif Kontrol Karşılaştırma Tablosu

Tablo 4.1’de 4 farklı kaotik sistem için başlangıç koşulları, parametre, kontrol tipleri, kazanç ve referans durumları, zaman serisi davranışları, kontrol sinyal yapıları, stabilizasyon hızlarının değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1 Dört farklı kaotik sistemde adaptif kontrol karşılaştırma tablosu

Kriter	Lorenz Sistemi	Chua Sistemi	Rössler Sistemi	Chen Sistemi
Başlangıç Koşulları	[0.0, -0.1, 9.0]	[5.0, 5.0, 5.0]	[-9.0, 0.0, 0.0]	[5.0, 5.0, 5.0]
Parametreler	$\sigma=10$, $\rho=28$, $\beta=8/3$	$\alpha=15.6$, $\beta=28.0$, $m_0=-8/7$, $m_1=-5/7$	$a=0.2$, $b=0.2$, $c=5.7$	$a=35$, $b=3$, $c=28$
Öğrenme Oranı	$\eta=0.01$	Yok (sabit kazanç)	Yok (sabit kazanç)	$\eta=0.01$
Başlangıç Kazançları	$k_1=k_2=k_3=2.0$	$k_1=k_2=k_3=4.0$	$k=2.0$	$k_1=k_2=k_3=2.0$
Hedef Durum	[0.0, 0.0, 0.0]	[0.0, 0.0, 0.0]	[0.0, 0.0, 0.0]	[0.0, 0.0, 0.0]
Zaman Serisi Davranışı	Sönümlenerek referansa yakınsıyor	Hızlı kararlılığa ulaşıyor	Zayıf salınımlar bastırılıyor	Yavaşça dengeye yaklaşıyor
Kontrol Sinyali Yapısı	Kazanç güncellemesine bağlı	Sabit kazançlı	Tek kontrol ($u = -k \cdot x$)	Kazanç güncellemesine bağlı
Kontrol Zorluğu	Orta (3D nonlineer)	Yüksek (parçalı lineer olmayan $f(x)$)	Düşük (tek kontrol sinyali)	Yüksek (Lorenz’den daha karmaşık dinamikler)
Stabilizasyon Hızı	Orta düzeyde	Yüksek	Orta-düşük	Orta düzeyde
Genel Değerlendirme	Esnek ve güvenli kontrol	Güçlü baskılama etkisi	Basit yapı ile temel kontrol	Uyarlanabilir ve dengeli kontrol

Tablo 4.1’ de, dört farklı kaotik sistem üzerinde uygulanan adaptif kontrol yaklaşımları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Adaptif kontrol sistemlerinde öğrenme oranı (η), sistemin dinamiklerine uyum sağlama hızını belirleyen kritik bir parametredir. Öğrenme oranının değeri, kontrolcünün performansını doğrudan etkiler: Çok küçük η değerleri sistemin yavaş yakınsamasına yol açarken, aşırı büyük değerler salınımlara ve kararsızlığa neden olabilir. Kaotik sistemler gibi yüksek dereceli nonlinear sistemlerde, öğrenme oranının optimize edilmesi, kontrol sinyalinin aşırı büyümesini engellemek ve enerji verimliliği sağlamak açısından önem taşımaktadır (Astrom ve Wittenmark, 2013).

Lorenz ve Chen sistemlerinde kazançların zamanla güncellenmesiyle gerçekleştirilen uyarlanabilir kontrol mekanizması, sistemin dinamiklerine daha esnek şekilde uyum sağlamış ve kararlı duruma ulaşmada etkili olmuştur. Buna karşın, Chua sisteminde sabit fakat yüksek değerli kontrol kazançları kullanılarak hızlı bir baskılama sağlanmıştır. Rössler sistemi ise daha sade bir kontrol yapısıyla düşük genlikli salınımları bastırmış, ancak diğer sistemlere kıyasla daha sınırlı bir stabilizasyon performansı göstermiştir. Her bir sistemin başlangıç koşulları ve parametrelerine bağlı olarak farklı kontrol tepkileri gözlemlenmiş, bu da adaptif kontrolün sistem özelliklerine göre özelleştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, adaptif kontrol yöntemlerinin hem sabit hem de değişken kazançlı biçimlerinin farklı avantajlar sunduğu ve kaotik sistemlerin bastırılmasında etkili olduğu görülmüştür.

4.2 Tartışma

Kaotik sistemlerin adaptif kontrolünü içeren çalışmalar aşağıda kronolojik bir sıralama ile verilmiştir.

1997 yılında Zeng ve Singh, Lorenz kaotik sisteminde parametre belirsizlikleri olsa bile kaotik davranışın bastırılmasını ve sistem durumlarının belirli bir hedef noktaya ayarlanmasını uyarlanabilir bir kontrol yasasıyla sağlamış, bunu da simülasyonlarla göstermiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yapısının başlangıçta kaotik davranış gösteren sistemi kısa sürede kararlı bir duruma getirdiğini ve sistem parametrelerinde ani değişiklikler olsa dahi istenen denge noktasına başarıyla yönlendirebildiğini göstermiştir. Ek olarak, referans noktası değiştirildiğinde sistemin yeni hedefe uyum sağlayabildiği gözlemlenmiştir.

1998 yılında Ramaswamy ve arkadaşları, kaotik sistemleri daha karmaşık davranışlara yönlendiren uyarlanabilir kontrol algoritmalarını tanımladılar. Ele alınan özel bir uygulama, sistemi kontrolsüz durumdan daha kaotik veya karışık bir duruma yönlendirme amacına sahiptir. Bu "anti-kontrol" yaklaşımı, sistem parametrelerini dinamik olarak güncelleyerek hedeflenen Lyapunov üsteline ulaşmayı amaçlamaktadır. Yöntem, sistemin detaylı model bilgisine ihtiyaç duymadan hem süreksiz hem de sürekli sistemlere uygulanabilmektedir. Lojistik harita ve Lorenz sistemi üzerindeki simülasyonlar, yöntemin etkinliğini göstermiştir.

2004 yılında Hua ve Guan, kaotik sistemleri kararsız sabit noktalara yönlendirebilen basit bir adaptif kontrol yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem, yalnızca sabit noktaların ve sistem boyutunun bilinmesini yeterli görerek kesin matematiksel modele ihtiyaç duymadan çalışmaktadır. Lorenz, Lu, Chen ve Arneodo sistemleri üzerinde yapılan simülasyonlar, kontrolörün etkinliğini doğrulamıştır.

2005 yılında Hua ve arkadaşları, doğrusal olmayan fonksiyonları Lipschitz koşulunu sağlamasa da kazançları polinomla sınırlı olan kaotik sistemler için bir kontrol yöntemi geliştirmiştir. Adaptif bir kontrolör tasarlayarak kapalı döngü sistemin asimptotik kararlılığını sağlamışlardır. Yöntemin etkinliği, birleşik kaotik sistemler ve Arneodo sistemi üzerinde yapılan simülasyonlarla doğrulanmıştır.

2007 yılında Yau ve Chen, Lorenz kaotik sistemi için, giriş doygunluğu ve dış bozuculara rağmen sistemi denge noktasına yönlendirebilen uyarlanabilir bir kayma modlu kontrol şeması geliştirmiştir. Sayısal simülasyonlar, yöntemin kaotik sistem kontrolünde etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kontrol girişinin doygunluk sınırı gevşetildiğinde yerleşme süresinin azaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, giriş sınırlamalarının olduğu durumlarda bile yüksek performanslı kontrol sağlanabileceğini doğrulamaktadır.

2009 yılında Kobravi ve Erfanian, hareket denklemleri bilinmeyen kaotik sistemler için kayan kipli kontrol, adaptif kontrol ve bulanık mantığa dayalı bir kontrol stratejisi geliştirmiştir. Önerilen yöntem, dış bozuculara ve sistem parametre değişimlerine karşı dayanıklıdır. Kaotik yörüngeleri hem istenen periyodik yörüngelere hem de istenen başka kaotik hareketlere dönüştürebilmektedir. Simülasyon sonuçları, yöntemin yüksek dereceli kaotik sistemlerde etkili olduğunu

ve sistem dinamiklerinin tam olarak bilinmediği durumlarda bile uygulanabilirlik göstermektedir.

2009 yılında Xiaobing ve arkadaşları, belirsiz parametrelere sahip yeni bir 3B kaotik sistemin kontrolü için basit bir uyarlanabilir kontrolör önermiştir. Pasif sistem özellikleri kullanılarak, sistemin düzgün durum geri beslemesiyle küresel asimptotik kararlılık sağlanabileceği gösterilmiştir. Simülasyonlar, geliştirilen kontrol yönteminin etkili ve uygulanabilir olduğunu doğrulamıştır.

2011 yılında Goharrizi ve arkadaşları, zamanla değişen parametrelere sahip kaotik sistemlerin kontrolü için Lyapunov üstel katsayılarına dayalı adaptif ve gözlemci tabanlı bir kontrol yöntemi geliştirmiştir. Maksimum Lyapunov üstel katsayısı çevrimiçi hesaplanarak sistemin kararlı hale getirilmesi hedeflenmiştir. Durum değişkenleri doğrudan ölçülemediğinde ise doğrusal olmayan bir gözlemci kullanılmıştır. Henon haritası üzerindeki simülasyonlar, yöntemin etkinliğini doğrulamıştır.

2014 yılında Nik, He ve Talebian çalışmalarında, üç boyutlu Pehlivan–Uyaroğlu kaotik sisteminin kontrolü için optimal ve adaptif kontrol yöntemleri geliştirmiştir. Adaptif kontrol Lyapunov kararlılık teorisine dayanarak sistemin kararlılığı sağlanmıştır. Çalışmada ayrıca tek durum geri beslemeli bir kontrol yaklaşımı da ele alınmıştır. Sayısal simülasyonlar, önerilen yöntemlerin sistemin denge noktalarına hızlı ve etkili şekilde ulaşabildiğini göstermektedir.

2015 yılında Vaidyanathan ve Volos, denge noktası bulunmayan ve gizli kaotik çekiciler sergileyen yeni bir üç boyutlu kaotik sistem önermiştir. Bu sistem için Lyapunov üstel katsayıları ve Kaplan-Yorke boyutu hesaplanmış, sistemin konservatif yapıda olduğu gösterilmiştir. Bilinmeyen parametreler altında sistemi stabilize etmek ve benzer sistemlerin senkronizasyonunu sağlamak için adaptif kontrol yasaları geliştirilmiş ve Lyapunov teorisiyle kararlılık ispatlanmıştır. MATLAB simülasyonları, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamış ve çalışma kaotik sistemlerin kontrol edilebilirliğine önemli katkılar sunmuştur.

2018 yılında Raudak ve arkadaşları, yapısal güvenilirlik analizinde kullanılan HL-RF yönteminin kaotik davranışlarını kontrol etmek için adaptif bir kaos kontrol faktörü

geliştirmiştir. Sabit bir değer yerine değişken bir kontrol faktörü kullanılarak, yüksek doğrusal olmayan problemlerde iterasyon sayısının azaltılması ve yöntemin verimliliğinin artırılması sağlanmıştır. Sayısal analizler, önerilen yöntemin doğruluğunu ve etkinliğini doğrulamıştır. Sonuçlar, adaptif kontrol faktörünün HL-RF yönteminin kararlılığını ve hesaplama performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

2018 yılında Eastman ve arkadaşları, kuantum Duffing osilatöründe kaotik dinamikleri kontrol etmek için uyarlanabilir ölçüm tekniklerine dayalı bir geri besleme kontrolü geliştirmiştir. Bu yöntem, ölçüm geri hareketi kullanılarak kuantum Lyapunov üsteli üzerinden kaosu derecesini kontrol etmekte ve kuantum-klasik sınırını kuantum rejimine doğru itmektedir. Sayısal hesaplamalar, kontrolün etkinliğini doğrulamıştır.

2019 yılında Hajipour ve Tavakoli, belirsiz parametrelere sahip yeni bir kesirli mertebeden 3B finansal sistemin kaotik davranışlarını incelemiş ve sistemin düşük mertebelerde kaosa girdiğini göstermiştir. Sistemi kararlı hale getirmek ve senkronize etmek için uyarlanabilir bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Sayısal simülasyonlar, önerilen kontrol yönteminin başarılı olduğunu doğrulamıştır.

2020 yılında Khan ve Prasad, parametreleri bilinmeyen özdeş ve özdeş olmayan iki kaotik sistemin senkronizasyonu için uyarlanabilir kontrol yasaları geliştirmiştir. Lyapunov kararlılık teorisine dayanarak kontrolör ve parametre güncelleme yasaları tasarlamışlardır. Sayısal simülasyonlar, yöntemlerinin başarıyla çalıştığını göstermiştir.

2022 yılında Khan ve Chaudhary, kaotik kimyasal reaktör sistemlerinde adaptif kontrol yöntemleri kullanarak anti-senkronizasyon stratejisi geliştirmiştir. Lyapunov teorisine dayalı bu yöntem, belirsiz parametrelerde asimptotik kararlılık sağlamış ve MATLAB simülasyonlarıyla etkinliği doğrulanmıştır. Sonuçlar, adaptif kontrolün kaotik sistemleri başarılı şekilde stabilize edilmiştir.

2023 yılında Khan, insan-humanoid robot etkileşiminde güvenliği artırmak için kayma kipli kontrol destekli adaptif bir kaos kontrol yöntemi önermektedir. Robot kolu modellerinde aktüatör arızalarına karşı enerji dağıtıcı adaptif kontrol eklenerek

hareket takibinin sürdürülebilirliği sağlanmıştır. Simülasyonlar, yöntemin kaotik hareketleri stabilize ederek güvenli görev tamamlamayı mümkün kıldığını göstermektedir.

2023 yılında Roldán ve arkadaşları, iki özdeş Nwachioma kaotik sistemin senkronizasyonu için adaptif bir kontrolör tasarlamış ve kapalı döngü kararlılığını Lyapunov analiziyle garanti etmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalar, adaptif kontrolün etkinliğini ve Arduino UNO kartlarının düşük maliyetli deneysel kurulumlar için uygunluğunu göstermiştir.

2024 yılında Li ve arkadaşları (2024), akım modlu Boost çevirici sisteminin kaotik davranışını bastırmak için yalnızca giriş/çıkış verilerine dayalı model serbest uyarlamalı bir kaos kontrol yöntemi (MFACC) geliştirmiştir. Sistemin kontrolü küçük titreşimler verilerek ve sistemin davranışı tahmin edilerek çevrim içi kontrolü sağlanmış ve MATLAB simülasyonlarıyla yöntemin etkinliği doğrulanmıştır. Sonuçlar, yöntemin hızlı, model bağımsız ve pratik bir kontrol çözümü sunduğunu göstermektedir.

2024 yılında Eshaghi ve arkadaşları, Lorenz–Haken denklemlerinden türetilmiş yeni bir fraksiyonel lazer kaotik sistemin dinamiklerini ve kontrolünü incelemiştir. Sayısal yöntemler kullanılarak sistemin kaotik davranışları analiz edilmiş, geri besleme kontrolü ile kaotik hareketlerin bastırıldığı ve senkronizasyonun sağlandığı gösterilmiştir. Ayrıca, fraksiyonel türev derecesinin azaltılmasının sistemin kararlılığını artırdığı vurgulanmıştır.

2024 yılında Kobiolka ve arkadaşları, farklı boyutlardaki kaotik Hindmarsh–Rose nöron sistemleri arasında senkronizasyon sağlamak için iki yöntem önermektedir. Biri Lyapunov tabanlı aktif kontrol, diğeri ise makine öğrenmesine dayalı veri odaklı bir kontrol yaklaşımıdır. Simülasyonlar, her iki yöntemin de senkronizasyonda etkili olduğunu göstermektedir. Hindmarsh–Rose (HR) nöron sistemi, biyolojik nöronların elektriksel davranışlarını modellemek için geliştirilmiş bir matematiksel modeldir.

2025 yılında Ding ve arkadaşları, dış etkiler ve belirsizlikler altında kaotik sistemleri hızlı ve güvenilir şekilde senkronize etmek için yeni bir adaptif kontrol yöntemi sunmaktadır. Yöntem, sistemin kararlılığını kısa sürede sağlar ve parametre

değişimlerine karşı dayanıklıdır. Simülasyonlar ve deneyler, yöntemin başarılı ve etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, Kaotik Sistemlerin Adaptif Kontrolü üzerine odaklanılmıştır. Tez, kaotik sistemlerin adaptif kontrol yöntemleri ile düzenlenebilirliğini incelemekte ve elde edilen sonuçları değerlendirilmektedir. Çalışmada, kaotik dinamiklerin kontrol edilmesi amacıyla adaptif kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda, bu algoritmaların kaotik davranışı başarılı bir şekilde stabilize ettiği gözlemlenmiştir. Kontrol öncesinde düzensiz olan sistem dinamikleri, adaptif kontrol sayesinde belirli bir denge noktasına yönlendirilmiş ve kararlı bir yapı elde edilmiştir. Lorenz, Chua, Rössler ve Chen gibi tanınmış kaotik sistemler üzerinde yapılan adaptif kontrol uygulamaları, sistemlerin kararlı hale getirilmesinde etkili olmuştur. Ayrıca, çalışmada yapay zekâ yöntemlerinin entegrasyonu ve gerçek sistemlerde test edilmesi gibi gelecekteki araştırmalara yönelik öneriler de sunulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışma adaptif kontrol yöntemlerinin kaotik sistemler üzerinde başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Kaotik sistemlerde adaptif kontrol üzerine yapılan çalışmalar daha ileri seviyeye taşınabilir ve gerçek dünya uygulamalarında daha etkin çözümler sunabilir.

Bu tez çalışmasının literatüre özgün katkısı, kaotik sistemlerin adaptif kontrolünü Python ortamında uygulamalı olarak gerçekleştirmesi ve bu kontrol yapısını Lorenz, Chua, Chen ve Rössler gibi farklı kaotik dinamik sistemlere entegre etmesidir. Bu yönüyle çalışma, literatürde yaygın olan tek sistem ve MATLAB odaklı yaklaşımların ötesine geçmekte, açık kaynaklı yazılımlar ile yeniden üretilebilir ve üzerine eklemeler yapılarak geliştirilebilir bir kontrol altyapısı sunmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, Kaotik sistemlerin adaptif kontrol yöntemleri ile uyarlanabilirliği incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, kullanılan adaptif kontrol algoritmasının sistemin kaotik davranışını başarılı bir şekilde düzenlediği gözlemlenmiştir.

Kontrol öncesinde öngörülemez ve düzensiz olan sistem dinamikleri, adaptif kontrol sayesinde belirli bir denge noktasına yönlendirilmiş ve sistemin kararlı bir yapıya ulaşması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin hata oranını minimize ettiğini ve kararlılık süresini optimize ettiğini göstermektedir.

Gelecekte, yapay zekâ destekli adaptif kontrol stratejilerinin entegrasyonu ve yöntemin gerçek sistemlerde test edilmesi, bu alandaki çalışmalara önemli katkılar sağlayabilir. Sonuç olarak, bu çalışma adaptif kontrol yöntemlerinin kaotik sistemler üzerinde başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermiş ve ilerleyen araştırmalar için önemli bir temel oluşturmuştur.

5.2 Öneriler

Bu çalışmadan çıkan sonuçlara dayanarak, kaotik sistemlerde adaptif kontrolün daha etkin ve verimli hale getirilmesi için çeşitli öneriler sunulmaktadır. Öncelikle, adaptif kontrolün yapay zekâ temelli yöntemler, örneğin yapay sinir ağları ve bulanık mantık ile desteklenmesi, sistemin daha hızlı uyum sağlamasına ve performansının gelişmesine yardımcı olabilir. Özellikle derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme tekniklerinin adaptif kontrol stratejilerine entegre edilmesi, daha öngörülebilir ve kararlı sistem dinamikleri elde edilmesini mümkün kılabilir. Bunun yanı sıra, kullanılan algoritmaların hesaplama maliyetlerinin düşürülmesi ve gerçek zamanlı uygulamalara uygun hale getirilmesi için optimizasyon teknikleri uygulanmalıdır. Kontrol parametrelerinin otomatik ayarlanmasını sağlayan adaptif algoritmaların geliştirilmesi, sistemin farklı koşullara daha hızlı yanıt vermesini sağlayabilir.

Simülasyon ortamında elde edilen başarılı sonuçların fiziksel sistemler üzerinde test edilmesi de büyük önem taşımaktadır. Özellikle robotik, biyomedikal ve finansal sistemler gibi kaotik davranış gösteren alanlarda adaptif kontrolün uygulanabilirliği

değerlendirilmelidir. Ayrıca, endüstriyel süreçlerde ve enerji sistemlerinde kaotik dalgalanmaların kontrolü için geliştirilen yöntemlerin test edilmesi, teorik çalışmaların pratik uygulamalarla desteklenmesini sağlayacaktır.

Gelecek çalışmalar açısından, adaptif kontrol yöntemlerinin daha karmaşık ve yüksek boyutlu kaotik sistemlerde uygulanabilirliği araştırılmalı, klasik kontrol teorisi ile yapay zekâ tabanlı yaklaşımların birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşımlar geliştirilebilmelidir. Bu öneriler doğrultusunda, kaotik sistemlerde adaptif kontrol üzerine yapılan çalışmalar daha ileri seviyeye taşınabilir ve gerçek dünya uygulamalarında daha etkin çözümler sunulabilir.



KAYNAKLAR

- Al-Hussein, A.-B. A. (2021). Chaos phenomenon in power systems: A review. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, 17(2), 219–240.
- Alligood, K. T., Sauer, T. D., & Yorke, J. A. (1996). *Chaos: An introduction to dynamical systems*. Springer.
- Astrom, K. J., & Wittenmark, B. (2013). *Adaptive control* (2nd ed.). Dover Publications.
- Boccaletti, S., Grebogi, C., Lai, Y.-C., Mancini, H., & Maza, D. (2000). *The control of chaos: Theory and applications*. *Physics Reports*, 329(3), 103–197.
- Chen, G., & Ueta, T. (1999). Yet another chaotic attractor. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 9(7), 1465–1466.
- Chua, L. O. (1983). *A universal circuit for studying and generating chaos—Part I: Routes to chaos*. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 40(10), 732–744.
- Ding, H., Qian, J., Tian, D., & Zeng, Y. (2025). Norm-based adaptive control with a novel practical predefined-time sliding mode for chaotic system synchronization. *Mathematics*, 13(5), 748.
- Eastman, Jessica K., Stuart S. Szigeti, Joseph J. Hope, and André R. R. Carvalho. 2018. “Controlling Chaos in the Quantum Regime Using Adaptive Measurements.” doi:10.1103/PhysRevA.99.012111.
- Eshaghi, Shiva, Nematollah Kadkhoda, and Mustafa Inc. 2024. “Chaos Control and Synchronization of a New Fractional Laser Chaotic System.” *Qualitative Theory of Dynamical Systems* 23(5). doi:10.1007/s12346-024-01097-7.
- Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a new science*. Penguin Books.
- Goharrizi, A. Y., Khaki-Sedigh, A., & Sepehri, N. (2009). *Observer-based adaptive control of chaos in nonlinear discrete-time systems using time-delayed state feedback*. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41(5), 2448–2455.
- Goharrizi, A. Y., & Khaki-Sedigh, A. (2011). Adaptive observer-based control of nonlinear discrete-time chaotic systems with online maximum Lyapunov exponent estimation. *Nonlinear Dynamics*, 65(4), 579–589.
- Gupta R., 2002. *Making Use of Python*.
- Hajipour, Ahmad, and Hamidreza Tavakoli. 2019. “On Adaptive Chaos Control and Synchronization of a Novel Fractional-Order Financial System.” In *Proceedings - 2019 6th International Conference on Control, Instrumentation and Automation, ICCIA 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ICCIA49288.2019.9030921.

- Hilborn, R. C. (2000). *Chaos and nonlinear dynamics: An introduction for scientists and engineers* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Hua, C. C., Guan, X. P., & Shi, P. (2005). Adaptive feedback control for a class of chaotic systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 23(3), 757–765.
- Hua, Changchun, and Xinping Guan. 2004. “Adaptive Control for Chaotic Systems.” *Chaos, Solitons and Fractals* 22(1): 55–60. doi:10.1016/j.chaos.2003.12.071.
- Khalil, H. K. (2015). *Nonlinear systems* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Khan, Ayub, and Ram Prasad. 2020. “Adaptive Control for Synchronization of Identical and Non-Identical Chaotic Systems with Unknown Parameters.” *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences* 5(2): 77–92. doi:10.30931/jetas.756968.
- Khan, Taqseer, and Harindri Chaudhary. 2022. “Adaptive Controllability Of Microscopic Chaos Generated In Chemical Reactor System Using Anti-Synchronization Strategy.” *Numerical Algebra, Control and Optimization* 12(3): 611–20. doi:10.3934/naco.2021025.
- Kobiolka, J., Habermann, J., & Yamakou, M. E. (2025). *Reduced-order adaptive synchronization in a chaotic neural network with parameter mismatch: A dynamical system versus machine learning approach*. *Nonlinear Dynamics*, 113, 10989–11008.
- Kobravi, Hamid Reza, and Abbas Erfanian. 2009. “A Decentralized Adaptive Robust Method for Chaos Control.” *Chaos* 19(3). doi:10.1063/1.3183806.
- Khan, S. G. (2023). *Adaptive chaos sliding-mode control for fault-tolerant human–humanoid robot interaction*. *Mechanical Sciences*.
- Li, Ning Zhou, Yi Xiang Jiang, and Xiao Juan Wei. 2024. “Model-Free Adaptive Chaos Control for the Boost Converter.” *Measurement and Control (United Kingdom)* 57(5): 519–29. doi:10.1177/00202940231194117.
- Lorenz, E. N. (1963). *Deterministic nonperiodic flow*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130–141.
- Ioannou, P., & Baldi, S. (2010). Robust adaptive control. In *Control System Advanced Methods* (Chapter 35). CRC Press
- Ogata, Katsuhiko. 2002. *Modern Control Engineering a Fourth Edition* Pearson Education International.
- Ogata, K. (2010). *System dynamics* (4th ed.). Pearson Education.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Paul Deitel; Harvey Deitel. 2001. “Python How to Program.”

- Qi, G., Chen, G., Du, S., Chen, Z., & Yuan, Z. (2005). Analysis of a new chaotic system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 352(2), 295–308.
- Ramaswamy, Ramakrishna, Sudeshna Sinha, and Neelima Gupte. 1998. *Targeting Chaos through Adaptive Control*.
- Roldán-Caballero, Alfredo, J. Humberto Pérez-Cruz, Eduardo Hernández-Márquez, José Rafael García-Sánchez, Mario Ponce-Silva, Jose De Jesus Rubio, Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes, et al. 2023. “Synchronization of a New Chaotic System Using Adaptive Control: Design and Experimental Implementation.” *Complexity* 2023. doi:10.1155/2023/2881192.
- Roudak, Mohammad Amin, Mohsen Ali Shayanfar, and Mohammad Karamloo. 2018. “Improvement in First-Order Reliability Method Using an Adaptive Chaos Control Factor.” *Structures* 16: 150–56. doi:10.1016/j.istruc.2018.09.010.
- Rössler, O. E. (1976). *An equation for continuous chaos*. *Physics Letters A*, 57(5), 397–398.
- Saberi Nik, Hassan, Ping He, and Sayyed Taha Talebian. 2014. “Optimal, Adaptive and Single State Feedback Control for a 3D Chaotic System with Golden Proportion Equilibria.” *Kybernetika* 50(4): 596–615. doi:10.14736/kyb-2014-4-0596.
- Strogatz, S. H. (2015). *Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering* (2nd ed.). Westview Press.
- Vaidyanathan, Sundarapandian, and Christos Volos. 2015. “Analysis and Adaptive Control of a Novel 3-D Conservative No-Equilibrium Chaotic System.” *Archives of Control Sciences* 25(3): 333–53. doi:10.1515/acsc-2015-0022.
- Yau, Her Terng, and Chieh Li Chen. 2007. “Chaos Control of Lorenz Systems Using Adaptive Controller with Input Saturation.” *Chaos, Solitons and Fractals* 34(5): 1567–74. doi:10.1016/j.chaos.2006.04.048.
- Zeng, Q., & Singh, S. N. (1997). Adaptive control of Lorenz chaotic systems with uncertain parameters. *Chaos, Solitons & Fractals*, 8(9), 1591–1602.
- Zeng, Yueming. 1997. *7 Dynamics and Control Adaptive Control of Chaos in Lorenz System*. Kluwer Academic Publishers.
- Zhou, Xiaobing, Jinfu Zhang, and Murong Jiang. 2009. “Passivity-Based Adaptive Chaos Control of a New 3D Chaotic System with Uncertain Parameters.” In *Proceedings - 2009 International Forum on Information Technology and Applications, IFITA 2009*, , 57–60. doi:10.1109/IFITA.2009.404.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

GÜZEL, Mehmet

Web sayfası
(Research Gate, Academia, vs.)

<https://www.linkedin.com/in/mehmet-g%C3%BCzel-6124381b0/>

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	D.Ü. Elektrik Elektronik Mühendisliği (Devam)	
Lisans	Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği	2023
Lise	Diyarbakır Namık Kemal Lisesi	2006

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2011-2025	Milli Eğitim Bakanlığı	Elektrik Eğitimi Koordinatörlüğü

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1.Mehmet Güzel ve Muhittin Bayram, Lorenz Kaotik Sisteminin Adaptif Kontrolü, DUFEBLAS-2025, Diyarbakır, TÜRKİYE.

Özel İlgi

Kitap Okumak

Bilimsel Araştırmalar Yapmak

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Mehmet GÜZEL
Öğrenci No	23805022
Ana Bilim Dalı	Elektrik Elektronik Mühendisliği
Program Türü	Proje ☐ Yüksek Lisans ☒ Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	
Tez Başlığı	Kaotik Sistemlerin Adaptif Kontrolü
RAPOR BİLGİLERİ	
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası
Sayfa Sayısı	79
Raporlama Tarihi	
Benzerlik Oranı (%)	11

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 79 sayfalık kısmına ilişkin, 23/06/2025 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %11 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☐Kaynaklar hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☒Diğer (her şey dahil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Tez benzerlik oranı üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mehmet GÜZEL

Tarih: 03/07/2025

İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM

İmza:

Tarih: 03/07/2025

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Bahaddin KURT

İmza:

Tarih: 03/07/2025