

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN  
KONTROL YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan KAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı

ARALIK 2024



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN KONTROL  
YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hakan KAYA**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU**

**ARALIK 2024**



Hakan KAYA tarafından hazırlanan “MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN KONTROL YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması 30.12.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı :**

**Jüri Üyesi :**

**Jüri Üyesi :**



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN KONTROL YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(30/12/2024)

Hakan KAYA





*Eşime ve çocuklarıma*



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin tamamlanmasında bana destek olan birçok kişiye teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

İlk olarak, beni yönlendirdiği, tezimin her aşamasında rehberlik ettiği için değerli danışman hocam Yılmaz UYAROĞLU'na teşekkür etmek istiyorum. Önerileri ve eleştirileri sayesinde çalışmamı geliştirmemde büyük bir rol oynadı.

Aileme ve sevdiklerime de teşekkür etmek istiyorum. Eğitim hayatım boyunca her zaman bana destek veren maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen sevgili babam Ahmet KAYA'ya, annem İlknur KAYA'ya, eşim Meral KAYA'ya, kızlarım Elif Eslem KAYA'ya, Amine Meva KAYA'ya ve oğlum Muhammed KAYA'ya en içten sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında emeği geçen herkese teşekkür ederim. Sizlerin yardımları ve destekleri olmadan bu çalışma mümkün olmazdı. Size minnettarım ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Hakan KAYA



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                             |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....                            | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                                              | ix    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                           | xi    |
| KISALTMALAR.....                                                            | xiii  |
| ÖZET.....                                                                   | xxi   |
| SUMMARY.....                                                                | xxiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                              | 1     |
| 2. MEMRİSTÖRÜN TANIMI .....                                                 | 3     |
| 2.1. Memristörün Özellikleri.....                                           | 6     |
| 2.2. Memristör Modelleri .....                                              | 7     |
| 2.2.1. Lineer sürüklenme (HP) modeli.....                                   | 8     |
| 2.2.2. Nonlineer sürüklenme modeli .....                                    | 12    |
| 2.2.3. Simmons tünel bariyer modeli .....                                   | 15    |
| 2.2.4. Eşik uyarlamalı memristör (TEAM) modeli .....                        | 17    |
| 2.3. Memristörün Makro Modelleri .....                                      | 18    |
| 2.4. Memristörün Fabrikasyonu .....                                         | 18    |
| 2.4.1. Moleküler yapı ve iyonik filmlili memristör.....                     | 18    |
| 2.4.2. Spintronik memristör .....                                           | 21    |
| 3. BÖLÜM KAOTİK VE HİPERKAOTİK SİSTEMLER .....                              | 23    |
| 3.1. Kaotik Sistemler.....                                                  | 23    |
| 3.1.1. Kaos teorisinin tarihçesi ve gelişimi .....                          | 23    |
| 3.1.2. Kaotik sistemlerin matematiksel modellenmesi.....                    | 24    |
| 3.1.3. Kaotik sistemlerin uygulamaları .....                                | 24    |
| 3.2. Hiperkaotik Sistemler.....                                             | 25    |
| 3.3. Kaotik ve Hiperkaotik Sistemlerin Matematiksel İncelemesi.....         | 26    |
| 3.3.1. Korunumlu-korunumsuz sistemler.....                                  | 26    |
| 3.3.2. Jakobian matrisi ve denge noktaları .....                            | 27    |
| 3.3.3. Öz değerler ve sistemin sağlamlığı .....                             | 28    |
| 3.3.4. Kararlılık ve kaos ilişkisi .....                                    | 29    |
| 4. BÖLÜM HİPERKAOTİK SİSTEMLERİN SINIFLANDIRILMASI.....                     | 31    |
| 4.1. Lorenz Tabanlı Hiperkaotik Sistemler.....                              | 31    |
| 4.2. Rössler Tabanlı Hiperkaotik Sistemler.....                             | 38    |
| 4.3. Lü Tabanlı Hiperkaotik Sistemler .....                                 | 42    |
| 4.4. Chen Tabanlı Hiperkaotik Sistemler .....                               | 45    |
| 4.5. Liu Tabanlı Hiperkaotik Sistemler .....                                | 48    |
| 4.6. Qi Tabanlı Hiperkaotik Sistemler.....                                  | 49    |
| 5. MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN<br>SENKRONİZASYONU ..... | 53    |
| 5.1. Memristör Tabanlı Hiperkaotik Lorenz Sisteminin Kaotik Analizi .....   | 53    |

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.1. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin pasif kontrol metodu ile senkronizasyonu .....       | 56        |
| 5.1.2. Pasif kontrol benzetim çalışmaları .....                                                             | 59        |
| 5.1.3. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin aktif kontrol metodu ile senkronizasyonu .....       | 62        |
| 5.1.4. Aktif kontrol benzetim çalışmaları .....                                                             | 65        |
| 5.1.5. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin kayan kipli kontrol metodu ile senkronizasyonu ..... | 68        |
| 5.1.6. Kayan kipli kontrol benzetim çalışmaları .....                                                       | 71        |
| <b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                                                         | <b>75</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                       | <b>79</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                        | <b>89</b> |



## **KISALTMALAR**

|               |                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------|
| <b>ALD</b>    | : Atomik Katman Depolama                              |
| <b>CMOS</b>   | : Complementary Metal Oxide Semiconductor             |
| <b>DNA</b>    | : Deoksiribo Nükleik Asit                             |
| <b>EWB</b>    | : Elektronik Osilatör Devresi                         |
| <b>FPGA</b>   | : Field Programmable Gate Array                       |
| <b>HP</b>     | : Hawlett Packard                                     |
| <b>ITO</b>    | : İndiyum İnce Oksit                                  |
| <b>MATLAB</b> | : Matrix Laboratory                                   |
| <b>MTKD</b>   | : Memristör Tabanlı Kaotik Devre                      |
| <b>RSA</b>    | : Rivest Shamir Adleman                               |
| <b>SPICE</b>  | : Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis |
| <b>TEAM</b>   | : ThrEshold Adaptive Memristor model                  |



## SİMGELER

|              |                                       |
|--------------|---------------------------------------|
| $\omega_1$   | : Parametre                           |
| $\omega_2$   | : Parametre                           |
| $\omega_3$   | : Parametre                           |
| $\omega_4$   | : Parametre                           |
| $a$          | : Parametre                           |
| $b$          | : Parametre                           |
| $V$          | : Gerilim [Volt]                      |
| $I$          | : Akım [Amper]                        |
| $C$          | : Kondansatör veya kapasitans [Farat] |
| $L$          | : Bobin veya indüktans [Henry]        |
| $M$          | : Memristör veya memristans [Ohm]     |
| $W(\varphi)$ | : Memdüktans [Siemens]                |
| $R_{on}$     | : Hücre gerilimi                      |
| $R_{off}$    | : Açık devre hücre gerilimi           |
| $W(x_4)$     | : Parçalı doğrusal fonksiyonu         |
| $J$          | : Jacobian matrisi                    |
| $k$          | : Kazanç sabiti                       |
| $q$          | : Kazanç sabiti                       |
| $D_{KY}$     | : Kaplan- Yorke boyutu                |
| $\lambda_i$  | : Özdeğerler                          |
| $x_1$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $x_2$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $x_3$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $x_4$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $y_1$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $y_2$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $y_3$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $y_4$        | : Kaotik durum değişkeni              |
| $e_1$        | : Hata                                |
| $e_2$        | : Hata                                |

|             |                                    |
|-------------|------------------------------------|
| $e_3$       | : Hata                             |
| $e_4$       | : Hata                             |
| $u_1$       | : Kontrolör                        |
| $u_2$       | : Kontrolör                        |
| $u_3$       | : Kontrolör                        |
| $u_4$       | : Kontrolör                        |
| $\dot{x}_1$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{x}_2$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{x}_3$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{x}_4$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{y}_1$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{y}_2$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{y}_3$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |
| $\dot{y}_4$ | : Kaotik durum değişkeninin türevi |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1.</b> Modeller .....                | 31 |
| <b>Tablo 6.1.</b> Karşılaştırma Sonuçları ..... | 77 |





## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Devre bileşenlerinin birbirleri çerçevesindeki ilişki (Sahin, 2020). ....                          | 3  |
| Şekil 2.2. Ana devre elemanlarının akım-gerilim arasındaki ilişki (Sahin, 2020). ....                         | 4  |
| Şekil 2.3. Chua'nın memristör modeli ve yük-akı karakteristiği (Chua, 1971). ....                             | 5  |
| Şekil 2.4. Chua ve Kang' ın çıkardığı memristörün histerezis eğrisi (Chua ve Kang, 1976) .....                | 7  |
| Şekil 2.5. HP'ye göre memristör modeli (Strukov ve ark, 2008). ....                                           | 9  |
| Şekil 2.6. Memristörün farklı frekanslarda akım-gerilim eğrisi (Sahin, 2020). ....                            | 11 |
| Şekil 2.7. Lineer olmayan modele sahip akım gerilim grafiği (Kavehei ve ark, 2010). ....                      | 12 |
| Şekil 2.8. Pencere fonksiyonu modeli (Strukov ve ark, 2008). ....                                             | 13 |
| Şekil 2.9. Önerilen pencere fonksiyonun grafiği (Joglekar ve Wolf, 2009). ....                                | 14 |
| Şekil 2.10. $p=2$ durumunda önerilen pencere fonksiyonu (Biolek ve ark, 2009). ....                           | 15 |
| Şekil 2.11. Simmons memristör modeli (Pickett ve ark, 2009). ....                                             | 16 |
| Şekil 2.12. Memristör çeşitlerinin sınıflandırılması (Sahin, 2020). ....                                      | 19 |
| Şekil 2.13. HP tarafından önerilen memristör modeli (Keshmiri, 2014). ....                                    | 19 |
| Şekil 2.14. Ag/TiO <sub>2</sub> /ITO katmanlı memristör (Kavehei, 2012). ....                                 | 20 |
| Şekil 2.15. Spintronik manyetik model (Keshmiri, 2014). ....                                                  | 21 |
| Şekil 4.1. Hu sistemi Lyapunov üstelleri grafiği (Hu, 2009). ....                                             | 33 |
| Şekil 4.2. Simetrik Rössler Çekerleri (Li ve ark, 2018). ....                                                 | 42 |
| Şekil 4.3. Dört kanatlı hiperkaotik atraktörler (Li ve ark, 2020). ....                                       | 45 |
| Şekil 4.4. Liu-Xin sisteminin atraktör yapısı (Liu ve ark, 2013). ....                                        | 49 |
| Şekil 4.5. Cang sistemi simetrik çeker yapısı (Cang ve ark, 2010). ....                                       | 51 |
| Şekil 5.1. Memristör tabanlı Lorenz devresi (Wen ve ark, 2013). ....                                          | 53 |
| Şekil 5.2. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin durum yörüngeleri. ....                            | 55 |
| Şekil 5.3. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin faz portreleri. ....                               | 55 |
| Şekil 5.4. Sistemin Lyapunov üstelleri grafiği. ....                                                          | 56 |
| Şekil 5.5. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatası (pasif kontrol). ....        | 60 |
| Şekil 5.6. $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$ senkronizasyon hataları (pasif kontrol). ....                     | 61 |
| Şekil 5.7. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonu (pasif kontrol). ....              | 62 |
| Şekil 5.8. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatası (aktif kontrol). ....        | 66 |
| Şekil 5.9. $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$ senkronizasyon hataları (aktif kontrol). ....                     | 67 |
| Şekil 5.10. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonu (aktif kontrol). ....             | 68 |
| Şekil 5.11. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatası (kayan kipli kontrol). .... | 72 |
| Şekil 5.12. $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$ senkronizasyon hataları (kayan kipli kontrol). ....              | 73 |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.13.</b> Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonu (kayan kipli kontrol)..... | 74 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN KONTROL YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

### ÖZET

Bu çalışma, memristörlerin ve kaotik sistemlerin kapsamlı bir incelemesini sunarak, memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemini teorik olarak inceleyerek önemli katkılar sağlamayı amaçlamaktadır. Memristörler, elektriksel dirençleri akım ve gerilime bağlantılı olarak değişen ve bu bilgiyi kalıcı olarak saklayabilen devre elemanları olarak, bilgi depolama ve işleme teknolojilerinde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Çalışmada, memristörlerin çeşitli modelleri, üretim yöntemleri ve makro modelleri incelenirken, bununla beraber bu teknolojilerin matematiksel temellerini ve uygulama alanlarını da incelemektedir.

Kaotik sistemler üzerindeki araştırmalar, hem bilinçli hem de tesadüfi olarak uzun yıllar boyunca devam etmektedir. 1890 yılında Henri Poincaré, sade dinamik kuralların kompleks ve rastgele görünümsergileyebileceğini keşfetmiştir. Bu gözlemi kaos olarak adlandırmamış olsa da, modern kaos teorisinin temellerini atmıştır. Kaotik sistemler, küçük başlangıç koşulu değişikliklerinin büyük, öngörülemez sonuçlara yol açtığı dinamik sistemlerdir. Kaotik sistemlerin incelenmesinde, kararlılık analizi önemli bir rol oynar. Ancak, bir sistemin kaotik olup olmadığını belirlemek için yalnızca kararlılık analizi yeterli değildir. Kaotik sistemler, düzensiz ve öngörülemez davranışlar sergileyebilir, bu yüzden bu sistemlerin dinamiklerini tam olarak anlamak için Lyapunov üst sınırları gibi diğer analiz yöntemlerine de başvurulması gereklidir. Lyapunov üst sınırları, bir sistemin başlangıç koşullarına duyarlılığını ve zamanla nasıl geliştiğini belirlemeye yardımcı olur.

Hiperkaos kavramı, ilk kez 1979 yılında Otto E. Rössler tarafından önerilen bir sistem ile literatüre kazandırılmıştır. Hiperkaotik sistemler, daha karmaşık yapıları ve öngörülmesi zor davranışları nedeniyle bilim insanlarının ilgisini çekmektedir. Rössler 1979 yılındaki çalışmasında, 3 boyutlu sistemlerin yanı sıra, 4 boyutlu bir kaotik sistem geliştirmiştir. Bu sistem, diğer kaotik sistemlere kıyasla daha karmaşık bir dinamik davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Karmaşık dinamiklerin incelenmesinde sıkça başvurulanan Lorenz sistemi, hiperkaotik davranış sergileyen pek çok sistemin temelini oluşturur. Farklı boyutlarda ve özelliklerde sayısız Lorenz benzeri sistemler literatürde yerini almıştır. Ele alınan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin farklı kontrol yöntemleri ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin; pasif, aktif ve kayan kipli kontrol metodları kullanarak senkronizasyonunu sağlamayı ve kullanılan metodların birbirleri arasındaki avantajları ve dezavantajları ile performansları hakkında bilgi sunmayı hedeflemektedir. Simülasyon sonuçları analiz edildiğinde memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonunda kullanılan metodlar içinde kayan kipli kontrol metodunun, pasif kontrol metodu ile aktif kontrol metodundan oturma süreleri açısından daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.



## **COMPARISON OF MEMRISTOR BASED HYPERCHAOTIC LORENZ SYSTEM WITH CONTROL METHODS**

### **SUMMARY**

This study aims to make significant contributions by providing a comprehensive review of memristors and chaotic systems, while theoretically analyzing the memristor-based hyperchaotic Lorenz system. Memristors, which are circuit elements whose electrical resistance changes in relation to current and voltage and can permanently store this information, have the potential to revolutionize information storage and processing technologies. The relationships between voltage-current, current-charge, voltage-current, voltage-charge, and current-current are expressed as fundamental circuit elements. However, the significance of the charge-current relationship, which falls outside of these five known relations, has remained unclear for many years. This uncertainty led Chua to propose that a previously unexplained relationship between charge and current could only be explained by a new circuit element. The fundamental logic of the memristor is that its resistance changes depending on the direction and amount of current passing through it. When current flows in a particular direction, the resistance increases, and when it flows in the reverse direction, the resistance decreases. When the current is interrupted and reapplied, the memristor retains its previous resistance value; this characteristic indicates that the memristor is a memory-resistor.

The passive characteristic of memristors is related to the fact that memristors are referred to as passive elements due to instantaneous power losses. When the memristor shows a positive memristance value under certain conditions, the instantaneous power is always greater than zero, making the memristor a passive component. This is valid as long as the charge-current curve of the memristor is a continuously differentiable function. A passive memristor's charge-current curve shows a monotonically increasing feature. The hysteresis property of memristors is observed in a periodic signal applied to the memristor, where the current is also zero when the voltage is zero. Therefore, the current and voltage curves intersect at the origin. The linear characteristic property of memristors is observed when a repetitive signal is applied. As the frequency approaches infinity, the memristor behaves like a linear resistor. This behavior is related to the change in the current-voltage curve's hysteresis characteristic, which depends on frequency. The areas in the hysteresis curve increase as the frequency decreases and decrease as the frequency increases. As the frequency approaches infinity, the memristor begins to exhibit behavior similar to a resistor.

The memristor is a component with critical importance and a wide range of applications. The widespread use of memristors is attributed to their advantages, including high scalability, low energy consumption, the possibility of fabrication at the nanoscale, and compatibility with traditional CMOS structures. However, for the

design of memristor-based circuits, it is necessary to develop a model that accurately describes the properties of the memristor.

Memristor models are mathematical representations that describe the electrical behavior and functions of memristors. These models are used to understand and optimize how memristors perform in different application areas. During the modeling process, factors such as the dynamics of the memristor, its memory properties, and the relationships between charge and voltage are taken into account. Various models have been developed to represent different characteristics of the memristor and application scenarios, playing an important role in determining the development and potential applications of memristor technology.

Among the memristor models, the linear drift model, known as the HP model, was proposed by Strukov and his team in 2008. This model consists of high-insulating titanium dioxide with oxygen-doped conductive titanium dioxide materials placed between two platinum electrodes. The Simmons tunnel barrier model is based on the HP team's memristor model, which relies on continuous regions of pure and doped titanium dioxide and their corresponding  $R_{on}$  and  $R_{off}$  resistances. However, Pickett and others advanced this approach by presenting an alternative physical memristor model. In this model, only one resistance is used instead of two series resistances, as in the HP model. The threshold adaptive memristor model, proposed by Kvatinsky and colleagues, offers a more comprehensive and advantageous approach. While it shares similar physical characteristics with the Simmons Tunnel Barrier model, its mathematical structure is simpler. In the threshold adaptive memristor model, there are no exponential dependencies, and a polynomial relationship exists between the memristor current and the derivative of the internal state variable.

The study examines various models of memristors, production methods, and macro models, while also exploring the mathematical foundations and application areas of these technologies.

Research on chaotic systems has been ongoing for many years, both consciously and incidentally. In 1890, Henri Poincaré discovered that simple dynamic rules could exhibit complex and random behaviors. While he did not call this observation "chaos," it laid the foundations for modern chaos theory. Chaotic systems are dynamic systems in which small changes in initial conditions lead to large, unpredictable outcomes. When looking at other fundamental properties of chaotic systems, one can observe their sensitivity to initial conditions. Chaotic systems exhibit a high degree of sensitivity to small changes in initial conditions. As a result, minor changes in initial conditions can lead to significant differences in system behavior. The divergence of orbits is a characteristic feature of chaotic systems, where two initially close orbits tend to diverge over time. This is known as the divergence of nearby orbits in chaotic systems. Chaotic systems are generally autonomous in nature, and their orbits do not intersect. Chaotic systems are systems in which energy is not conserved, meaning that energy cannot be preserved within the system, and the system's energy fluctuates within a certain range.

In the study of chaotic systems, stability analysis plays an important role. However, stability analysis alone is not sufficient to determine whether a system is chaotic. Chaotic systems can exhibit irregular and unpredictable behaviors, so other analysis methods, such as Lyapunov upper bounds, are necessary to fully understand the dynamics of these systems. Lyapunov upper bounds help determine a system's sensitivity to initial conditions and how it evolves over time.

The concept of hyperchaos was introduced to the literature in 1979 by Otto E. Rössler with a system he developed. Hyperchaotic systems attract the attention of scientists due to their more complex structures and unpredictable behaviors. In his 1979 study, Rössler developed a four-dimensional chaotic system, in addition to the three-dimensional systems. This system exhibited more complex dynamic behavior compared to other chaotic systems. Rössler's work laid an important foundation for the mathematical modeling and understanding of hyperchaos. Through his contributions, hyperchaotic systems transitioned from being a purely theoretical concept to being applied in engineering and practical sciences. Today, hyperchaotic systems are widely studied in fields such as cryptography, security technologies, and signal processing. These advancements have facilitated the understanding and application of hyperchaotic systems, offering innovative solutions across various fields, from engineering to natural sciences. The physical and theoretical models of hyperchaotic systems continue to have research relevance today, allowing for the discovery of even more complex and unpredictable dynamics.

The Lorenz system, often referred to in the study of complex dynamics, forms the basis for many systems that exhibit hyperchaotic behavior. Countless Lorenz-like systems of varying dimensions and characteristics are found in the literature. The memristor-based hyperchaotic Lorenz system examined in this study has been simulated using different control methods. This study aims to synchronize the memristor-based hyperchaotic Lorenz system using passive, active, and sliding mode control methods, and to provide information about the advantages, disadvantages, and performances of these methods relative to each other. Upon analyzing the simulation results, it was observed that, among the control methods used to synchronize the memristor-based hyperchaotic Lorenz system, the sliding mode control method achieved better results in terms of settling times compared to the passive and active control methods.



## 1. GİRİŞ

Bilgi ve verinin işlenmesi ve depolanması konularındaki yenilikler, çeşitli disiplinlerin ilerlemesine katkıda bulunmuş ve mevcut sınırları genişletmiştir. Bu bağlamda, memristörler ve kaotik sistemler, modern elektronik ve matematiksel analizlerin merkezinde yer alan konulardır. Bu çalışmanın amacı, memristörlerin tanımından başlayarak, ele alınan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin kontrol yöntemleri ile matematiksel analizlerini yaparak simülasyon sonuçları ile sistemi derinlemesine incelemektir.

Memristörler, elektriksel dirençleri akım ve gerilim ile ilişkili olarak değişen ve bu bilgiyi koruyan pasif iki terminalli bir devre elemanıdır. Memristörlerin üzerinden belli yönde bir akım geçtiğinde dirençleri azalan, ters yönde akım geçtiğinde ise dirençleri artan özelliktedirler. Memristörlerin üzerinden geçen akım kesildiğinde ise direnç değeri son kaldığı değerde sabit kalmaktadır. Bu özelliği sayesinde, memristörler bilgi depolama ve işleme alanında önemli bir yenilik sunmaktadır.

Öte yandan, kaotik sistemler ve hiperkaotik sistemler modern matematiksel araştırmaların önemli alanlarındanıdır. Kaotik sistemler, küçük başlangıç koşulu değişikliklerinin büyük ve öngörülemez sonuçlara yol açtığı sistemlerdir. Hiperkaotik sistemler ise, kaotik sistemlerin daha karmaşık ve genişletilmiş versiyonlarıdır ve genellikle daha yüksek boyutlu dinamikler içerirler. Çalışmamızda, bu sistemlerin matematiksel analizleri, denge noktaları, özdeğerler ve sistemlerin kararlılığı gibi konulara odaklanılacaktır.

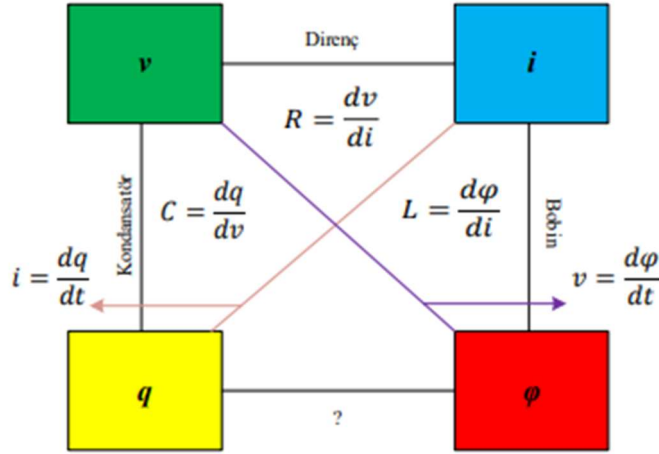
Ayrıca, farklı hiperkaotik sistemlerin sınıflandırılması da detaylı olarak ele alınacaktır. Lorenz, Rössler, Lü, Chen, Liu ve Qi tabanlı hiperkaotik sistemlerin incelenmesiyle, bu sistemlerin matematiksel ve uygulamalı özellikleri üzerinde durulacaktır.

Bu çalışmanın sonunda, memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin; pasif, aktif ve kayan kipli kontrol metodları kullanılarak senkronizasyonu sağlanacaktır. Elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırılarak kullanılan yöntemlerin etkinliği detaylı olarak analiz edilecektir.



## 2. MEMRİSTÖRÜN TANIMI

Akım, gerilim, yük ve akı, elektrik devrelerinde temel değişkenlerdendir. Şekil 2.1' de, bu dört temel devre değişkeni arasında altı farklı kombinasyon oluşturulabilir (Sahin, 2020). Bu kombinasyonlar, devre analizi ve tasarım süreçlerinde önemli yere sahiptir ve devrelerin çeşitli özelliklerini ve davranışlarını anlamamıza katkıda bulunur. Örneğin,  $I$  ile  $V$  arasındaki ilişki Ohm yasası ile tanımlanır. Akı ve yük arasındaki ilişki ise manyetik devrelerin analizinde büyük değere sahiptir. Bu kombinasyonlar, devre mühendislerinin ve tasarımcılarının karmaşık elektrik ve elektronik sistemleri daha iyi anlayıp optimize etmelerine yardımcı olur (Chua, 1971).



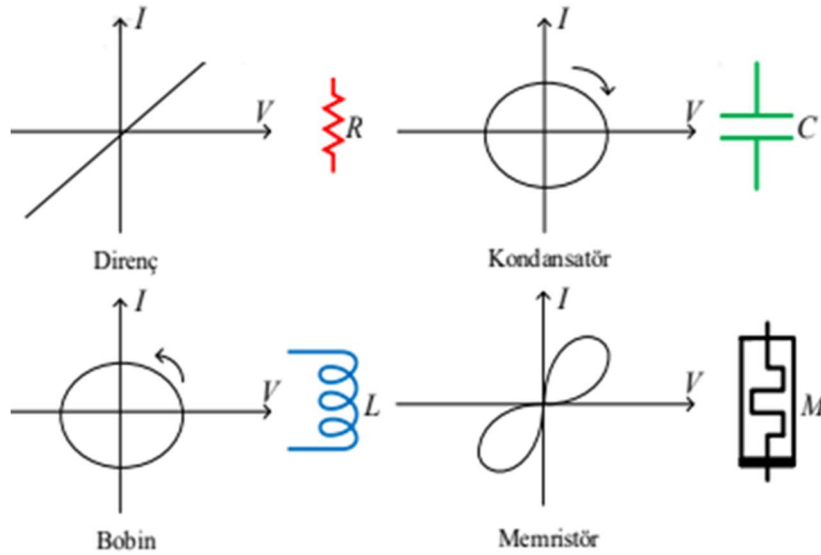
Şekil 2.1. Devre bileşenlerinin birbirleri çerçevesindeki ilişki (Sahin, 2020).

Bunlardan gerilim-akı ve akım-yük ikilisi arasındaki kombinasyon, devre teorisinin temel prensiplerini oluşturur (Strukov ve ark, 2008).

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

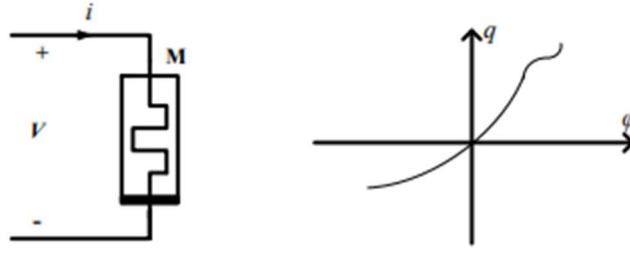
$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Diğer üç ilişkiden, yani gerilim-akım, gerilim-yük ve akım-akı arasındaki ilişkiler temel devre elemanı olarak ifade edilmektedir. Bu beş bilinen bağıntının dışında kalan  $(q-\varphi)$  ilişkisinin anlamı yıllardır anlaşılmamaya devam etti. Bu belirsizlik, Chua'nın,  $(q-\varphi)$  arasında daha önce açıklanmayan bir ilişkinin yalnızca yeni bir devre elemanı ile açıklanabileceği fikrini öne sürmesine neden oldu (Strukov ve ark, 2008). Memristörün temel mantığı, üzerinden geçen akımın yönüne ve miktarına bağlı olarak direnç değişikliği göstermesidir. Bu eleman, akım belirli bir yönde aktığında direncini artırır, ters yönde aktığında ise direncini azaltır. Akım kesildiğinde ve yeniden verildiğinde, önceki direnç değerini korur; bu özelliği, memristörün hafızalı bir direnç olduğunu belirtir. "MEMory" ve "ResISTOR" kelimelerinin birleşiminden türetilen memristör, adını bu benzersiz özellikten alır. Şekil 2.2' de, çeşitli devre elemanlarının ve memristörün akım-gerilim karakteristikleri gösterilmektedir (Sahin, 2020).



**Şekil 2.2.** Ana devre elemanlarının akım-gerilim arasındaki ilişki (Sahin, 2020).

Memristörün en dikkat çekici özelliklerinden biri, pasif bir bileşen olmasıdır (Arık, 2015). Diğer pasif bileşenler gibi enerji üretme yeteneğine sahip değildir; yalnızca enerji tüketir. Şekil 2.3' te, Chua'nın makalesinde tanımlanan memristör sembolü ve  $q-\varphi$  eğrisi gösterilmektedir. Memristör, enerji depolayabilen ve hafızalı direnç kabiliyetine sahiptir. Bu da onu diğer pasif bileşenlerden ayıran temel farklardan biridir. Bu bileşen, enerji depolama ve bilgi işlem uygulamalarında önemli potansiyel taşır.



**Şekil 2.3.** Chua'nın memristör modeli ve yük-akı karakteristiği (Chua, 1971).

Memristörün çalışma prensiplerinden birincisi, elektrik yükü fonksiyonu olarak tanımlanan akı ve yük arasındaki ilişki, memristörün yük kontrollü olduğunu ve bu değerın memristans olarak adlandırıldığını belirtir. İkincisi ise, manyetik akı fonksiyonu olarak tanımlanan akı ve yük arasındaki ilişki, memristörün akı kontrollü olduğunu ve bu değerın mendüktans olarak adlandırıldığını ifade eder (Keshmiri, 2014). Yük-kontrollü memristör durumu, aşağıda belirtilen şekilde açıklanmaktadır. (Arık, 2015).

$$\varphi = f(q) \quad (2.3)$$

Bu denklemde zamana göre türevini aldığımızda, aşağıdaki denklem ortaya çıkar.

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{df(q)}{dq} \frac{dq}{dt} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)' de  $v(t) = d\varphi/dt$  ve  $i(t) = dq/dt$  olarak ifade edilip düzenlenirse,

$$v(t) = M(q)i(t) \quad (2.5)$$

olarak ifade edilir ve  $M(q)$ , aşağıdaki ile açıklanır.

$$M(q) = \frac{df(q)}{dq} \quad (2.6)$$

$M(q)$  terimi, birimi ohm olan memristans olarak bilinir.

Akı-kontrollü memristör, şu denklemle tanımlanır:

$$q = f(\varphi) \quad (2.7)$$

Burada,  $q'$  nun zamana göre türevini aldığımızda,

$\frac{dq}{dt} = \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}$  olur. Son olarak,  $v(t) = \frac{d\varphi}{dt}$  ve  $i(t) = dq/dt$  olarak düzenler isek:

$$i(t) = W(\varphi)v(t) \quad (2.8)$$

elde edilir ve  $W(\varphi)$ , aşağıdaki denklem ile açıklanabilir.

$$W(\varphi) = \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \quad (2.9)$$

Burada  $W(\varphi)$  terimi, birimi Siemens olan mendüktans olarak isimlendirilir.

## 2.1. Memristörün Özellikleri

Verilen denklemler arasındaki karşılaştırmalar yapıldığında, memristör ile klasik direnç arasındaki farklar daha belirgin hale gelmektedir. Memristör, kalıcı hafıza (non-volatile memory), sıfır geçiş (zero-crossing) ve çarpımsal transfer fonksiyonu gibi benzersiz özelliklerle donatılmıştır. Memristörün çıkışı, girişin ve memristansı temsil eden doğrusal olmayan bir fonksiyonun çarpımı olarak tanımlanır (Arık, 2015). Memristörün girişi sıfır ise, çıkış da sıfıra yaklaşır.  $M(q)$  ve  $W(\varphi)$  terimlerinde yer alan  $q$  ve  $\varphi$  değişkenlerinin yerine, integral ifadelerinin yerleştirilmesi durumunda:

$$v(t) = M\left(\int_{-\infty}^t i(\tau)d\tau\right)i(t) \quad (2.10)$$

$$i(t) = M\left(\int_{-\infty}^t v(\tau)d\tau\right)v(t) \quad (2.11)$$

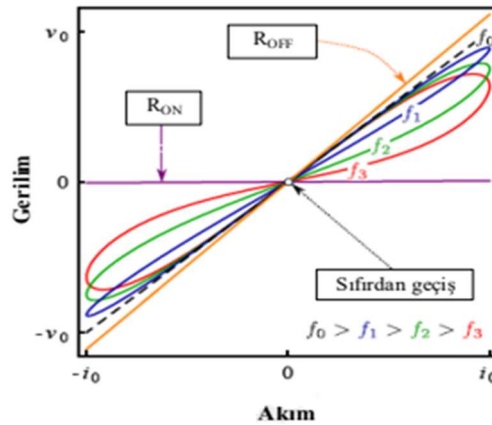
Elde edilen bulgularda, memristörün kalıcı hafıza kapasitesinin olduğu aşıkardır. Bunun nedeni, integral ifadesinin geçmiş verileri de kapsamasıdır; bu nedenle memristans ve mendüktans değerleri, Giriş sinyalinin önceki değerlerine dayanarak hafızalı bir şekilde hesaplama yapılır. Giriş sinyali sistemde olduğu sürece, memristans (veya mendüktans) değeri değişmeye devam eder. Ancak, giriş sinyali

kesildiğinde, memristans (veya mendüktans) değeri, yeni bir giriş sinyali uygulanana kadar son aldığı değerde kalır (Chua, 1971; Oster ve Auslander, 1972; Oster, 1974). Chua ve Kang, memristörün bazı özelliklerini literatüre kazandırmıştır. Bu özelliklerden bazıları, memristans özelliği ışığında aşağıda sıralanmıştır (Chua, 1971; Chua ve Kang, 1976).

**Pasiflik Kriteri:** Memristörlerin pasif bir elaman olarak anılmaları anlık güç kayıpları olması ile alakalıdır. Anlık güç kaybı,  $p(t) = M(q)[i(t)]^2$  formülüyle hesaplanır. Eğer  $q \geq 0$  ise ve  $M(q)$  pozitif bir memristans değeri gösteriyorsa, anlık güç her zaman sıfırdan büyük olur ve bu nedenle memristör, pasif bir bileşendir (Chua, 1971). Bu teori  $\varphi - q$  eğrisinin sürekli türevlenebilir bir fonksiyon olduğu sürece geçerlidir. Pasif bir memristörün  $\varphi - q$  eğrisi monoton olarak artan bir özellik gösterir (Chua, 1971).

**Sıkıştırılmış (Pinched) Histerezis Döngüsü:** Memristöre uygulanan periyodik bir sinyalde, gerilim sıfır olduğunda akım da sıfır olur. Bu nedenle,  $I$  ve  $V$  eğrileri birbirlerini orjinde keserler (Chua, 1971; Chua ve Kang, 1976; Chua, 2011).

**Doğrusal Karakteristik Sınırlaması:** Yinelenen bir sinyal uygulandığında, frekans sonsuza yaklaştıkça memristör, lineer bir direnç gibi hareket eder. Bu durum, memristörün histerezis karakteristiği olan  $i-v$  eğrisinin frekansa bağlı olarak değişmesiyle ilişkilidir. Histerezis eğrisindeki alanlar, frekans düştükçe artar ve frekans yükseldikçe azalır. Frekans sonsuz değerlere yaklaştığında, memristör dirence benzer hareketler sergilemeye başlar. Şekil 2.4' te, Chua ve Kang tarafından tanımlanan memristörün histerezis eğrisi gösterilmektedir (Chua ve Kang, 1976).



**Şekil 2.4.** Chua ve Kang'ın çıkardığı memristörün histerezis eğrisi (Chua ve Kang, 1976)

## 2.2. Memristör Modelleri

Memristör, birçok farklı uygulamada kritik bir öneme sahip ve geniş bir kullanım alanı bulunan bir bileşendir. Bu yaygın kullanımın ardında, yüksek ölçeklenebilirlik, düşük enerji tüketimi, nano boyutlarda üretim olanağı ve geleneksel CMOS yapılarıyla uyumlu olma gibi avantajlar bulunmaktadır. Bununla birlikte, memristörlü devrelerin tasarımı için, memristörün özelliklerini doğru şekilde açıklayan bir modelin geliştirilmesi gerekmektedir.

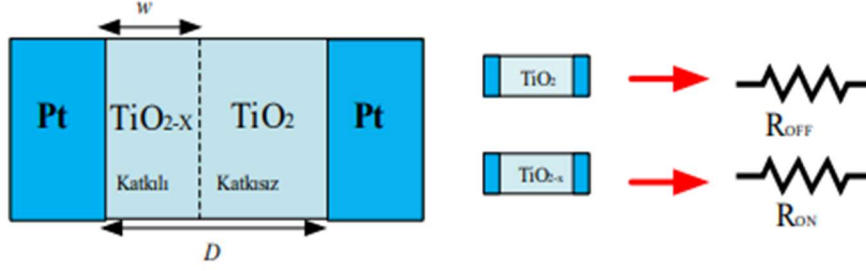
Memristör modelleri, memristörün elektriksel davranışını ve fonksiyonlarını temsil eden matematiksel ifadelerdir. Bu modeller, memristörün farklı uygulama alanlarında nasıl performans sergilediğini anlamak ve optimize etmek için kullanılır.

Modelleme sürecinde, memristörün dinamikleri, hafıza özellikleri ve akı ile gerilim arasındaki ilişkiler gibi etmenler göz önünde bulundurulur. Çeşitli modeller, memristörün farklı özelliklerini ve uygulama senaryolarını temsil etmek amacıyla geliştirilmiştir ve bu modeller, memristör teknolojisinin gelişimini ve potansiyel uygulamalarını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.

### 2.2.1. Lineer sürüklenme (HP) modeli

HP modeli olarak bilinen bir yapıyı, Strukov ve ekibi 2008 yılında önermiştir. Bu model, iki platinyum elektrot arasına yerleştirilen, yüksek yalıtkanlık özelliğine sahip saf titanyum dioksit ve oksijen katkısı ile iletkenliği artırılmış titanyum dioksit malzemelerinden oluşur (Strukov ve ark, 2008).

Önerilen yapıda,  $D$  sembolü, katkılı ve katkısız titanyum dioksit malzemelerinin toplam genişliğini temsil ederken,  $w$  sembolü sadece katkılı titanyum dioksit malzemesinin genişliğini gösterir. Bu yapının tasarımı, memristörün elektriksel davranışını modelleme açısından önemli bir adım olmuştur. Söz konusu model, memristörlerin çeşitli uygulamalardaki performansını değerlendirmek için temel bir referans sağlar ve aynı zamanda memristör teknolojisinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.5. HP'ye göre memristör modeli (Strukov ve ark, 2008).

Şekil 2.5' te, katkılı ve katkısız bölgelerde her bir  $\text{TiO}_2$  bölgesi direnç olarak modellenmiştir. Katkılı bölge, katkısız bölgeye kıyasla daha düşük bir direnç değerine ( $R_{ON}$ ) sahip olduğundan daha yüksek bir iletkenlik gösterir. Buna karşın, katkısız bölge daha yüksek bir direnç değerine ( $R_{OFF}$ ) sahiptir. Ayrıca,  $\text{TiO}_2$  bölgesindeki alanın iletken ve homojen olduğu, iyon hareketliliğinin ise doğrusal ve eşit bir şekilde dağıldığı kabul edilmektedir (Strukov ve ark, 2008; Keshmiri, 2014).

Memristörün memristansı,  $w$  parametresine bağlı olarak belirlenir (Strukov ve ark, 2008).

$$M(w) = R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D}\right) \quad (2.12)$$

$$v(t) = M(w)i(t) = \left[ R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D}\right) \right] i(t) \quad (2.13)$$

Memristöre bir  $i(t)$  akımı uygulandığında, iki bölge arasındaki sınır, yüklenmiş katkı maddelerinin hareketi nedeniyle memristör boyunca kayacaktır. Yük altında, iyon hareketliliğinin doğrusal olduğu varsayıldığında, memristör üzerindeki gerilim, iyonların düzgün bir şekilde hareket etmesiyle birlikte değişir (Strukov ve ark, 2008).

Bu durumda, memristörün direnci, yüklenmiş katkı maddelerinin kayması sonucu değişirken, gerilim de bu değişiklikleri yansıtacak şekilde ayarlanır. İyon sürüklenmesinin doğrusal karakteri göz önünde bulundurulduğunda, memristör üzerindeki voltaj, iyon hareketliliğinin etkisiyle doğrusal bir şekilde değişir. Bu durum, memristörün karakteristiği ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bu durumda,  $x(t) = \frac{w(t)}{D}$  olarak tanımlandığında, denkleme  $x$ 'e bağlı olarak ifade edilir.

$$M(x) = R_{ON}x(t) + R_{OFF}(1 - x(t)) \quad (2.14)$$

Burada  $x(t)$ ,  $[0, 1]$  aralığında sınırlıdır.  $x(t) = 0$  durumu için,  $M(x) = R_{OFF}$  ve  $x(t) = 1$  durumu için,  $M(x) = R_{ON}$  değerinde ifade edilmektedir. Böylece, aşağıdaki denklem bu durumu oluşturmaktadır.

$$v(t) = (R_{ON}x(t) + R_{OFF}(1 - x(t)))i(t) \quad (2.15)$$

Durum net bir şekilde açıklanabilir.  $w(t)$  fonksiyonunun türevi, titanyumdioksit bölgeleri arasındaki sınır kayma hızını yansıtır. Bu durumda,  $w(t)$  fonksiyonunun minimize edilmiş versiyonu olan  $x(t)$ 'nin türevi dikkate alınır.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{R_{ON}}{\beta}i(t) \quad (2.16)$$

Karakteristik sürüklenme hareketliliğini ifade eden  $\beta$ , burada bir sabit olup  $\beta = \frac{D^2}{\mu_V}$  ile tanımlanır. Denklem 2.17' den akım değişkeni çekilip, aşağıda yerine konulduğunda

$$v(t) = \beta[x(t) + \frac{R_{OFF}}{R_{ON}}(1 - x(t))]\frac{dx(t)}{dt} \quad (2.17)$$

temin edilir. Burada  $r = R_{OFF}/R_{ON}$  olarak ifade edildiğinde,

$$v(t) = \beta[x(t) + r(1 - x(t))]\frac{dx(t)}{dt} \quad (2.18)$$

saptanır.  $x(t)\frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}x^2(t)$  matematiksel özelliği dikkate alınır ve aşağıda her iki taraf için integral alındığında,

$$\varphi(t) = \beta\left[\frac{1-r}{2}x^2(t) + rx(t) + \varphi(0)\right] \quad (2.19)$$

sonucuna varılır.

Burada  $\varphi(0)$  sabit bir değerdir,  $x=0$  durumunda değeri sıfır olarak kabul edilir.  $x(t) = \frac{w(t)}{D}$  ifadesinin her iki tarafının türevini aldığımızda,

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} i(t) \quad (2.20)$$

sonucuna varılır. Her iki tarafın integrali alınacak olunursa:

$$\frac{w(t)}{D} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} q(t) \quad (2.21)$$

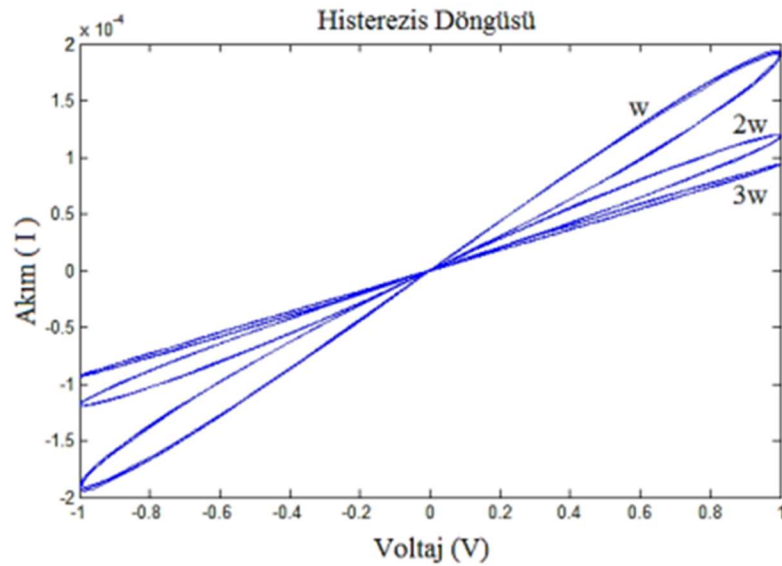
tespit edilir.

$$M(q) = \frac{d\varphi}{dq} = R_{ON} \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} q(t) + R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} q(t)\right) \quad (2.22)$$

Bu şekilde memristans değeri artık  $q$ 'ya bağlı olarak belirlenir. ( $R_{OFF} \gg R_{ON}$ ) durumu için memristans değeri kısaca ifade edilir (Yener, 2014).

$$M(q) = R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} q(t)\right) \quad (2.23)$$

Denklem 2.23, memristansın  $D$  kalınlığı ile ilgili bağımlılığını ifade eder. Aralarında ters kare ilişkisi olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, daha üstün memristans özellikleri elde etmek için  $D$  kalınlığının azaltılması yeterli olacaktır. Üç farklı frekans değeri ( $3w > 2w > w$ ) için LABVIEW ortamında elde edilen doğrusal sürüklenme modelinin histerezis göngüleri Şekil 2.6' da sunulmuştur (Sahin, 2020).

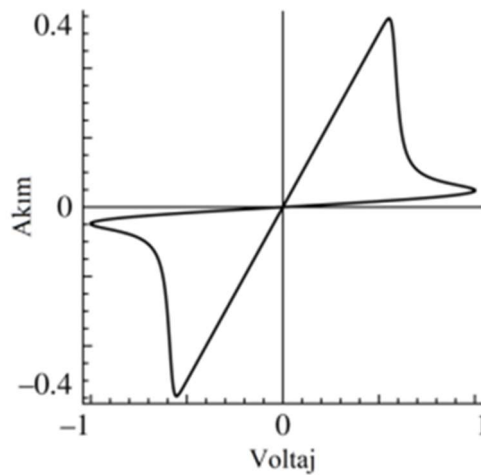


**Şekil 2.6.** Memristörün farklı frekanslarda akım-gerilim eğrisi (Sahin, 2020).

### 2.2.2. Nonlineer sürüklenme modeli

Doğrusal sürüklenme modeli, memristörler için gerekli olan histerezis eğrisini sağlaması nedeniyle geniş bir teorik çerçeve sunar. Nano ölçekte uygulanan küçük voltajlar, yüksek elektrik alanları oluşturarak memristörlerin iyon sınırlarının doğrusal olmayan şekilde hareket etmesine yol açar. Ayrıca,  $w$  değerinin sıfıra düşürülemez. Çünkü  $w=0$  durumu, modelde ifade edilen yük taşıma mekanizmalarının oksijen boşluğu içermediğini gösterir. Titanyumdioksit bölgesinin tüm  $D$  uzunluğu, oksijen boşluklarıyla dolabilir. Modelde, titanyumdioksit bölgeleri arasındaki sınır kayma hızı maksimumda olmalı ve  $w$  her iki uca (yani  $w=0$  ve  $w=D$ ) yaklaştığında sıfıra indirgenmelidir (McDonald ve ark, 2010).

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} i(t) F(x) \quad (2.24)$$



**Şekil 2.7.** Lineer olmayan modele sahip akım gerilim grafiği (Kavehei ve ark, 2010).

Burada  $x = w/D$  ifadesi,  $w$  değişkeninin normalize edilmiş versiyonudur. Lineer olmayan sürüklenme modeline ait akım-gerilim eğrisi vardır.  $F(x)$  fonksiyonu Denklem 2.24'te ifade edilerek literatürde yer almıştır (Strukov ve ark, 2008; Arık, 2015; Takashi ve ark, 2015; Chowdhury ve ark, 2015). Bu fonksiyonlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir:

- **Strukov'un Pencereleme Fonksiyonu Yaklaşımı**

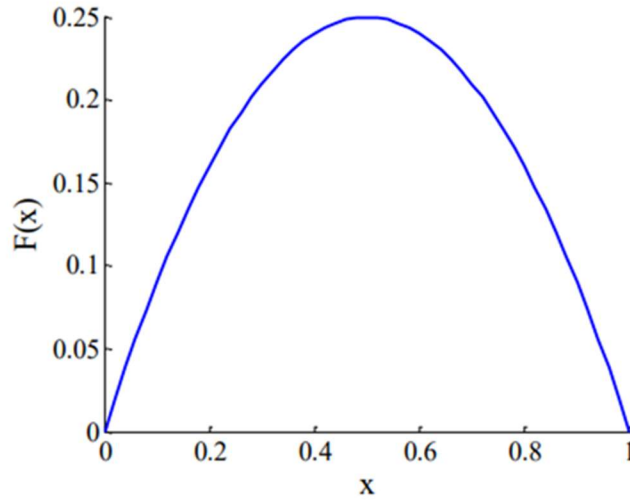
$F(x)$  fonksiyonu,  $\text{TiO}_2$  bölgesinin merkezinde, yani  $x=0.5$  noktasında maksimum değeri sağlamalıdır. Fonksiyon  $x=0$  için ve  $x=1$  için sıfır olmalıdır. Bu türden bir model, Strukov'un yaklaşımı gibi örneklerle temsil edilir (Strukov ve ark, 2008):

$$F(x) = x\left(\frac{1}{D} - x\right) \quad (2.25)$$

$F(x)$  fonksiyonu Denklem 2.25' te belirtilen şekilde ifade edilir.  $F(0) = 0$  ,  $F(D) = \frac{1-D}{D} \cong 0$  değerini alır. Pencereleme fonksiyonu Şekil 2.8' de sunulmuştur. Bu  $F(x)$  için sınır koşulları incelendiğinde:

$$\left\{ \begin{array}{l} w \rightarrow 0 \\ w \rightarrow D \end{array} \right\} \rightarrow \frac{dw}{dt} = 0 \quad (2.26)$$

Bu, pencereleme fonksiyonunun sağladığı sonuçlardır. Ancak, bu modelin bir dezavantajı, dışsal alan etkilerinin memristörün durumunu değiştirmemesidir. Bu da beraberinde önemli problemler ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 2.8. Pencere fonksiyonu modeli (Strukov ve ark, 2008).

- **Benderli Pencere Fonksiyonu**

Benderli tarafından önerilen bir diğer model, pencereleme fonksiyonunu tüm gerekli sınır koşullarını tam olarak karşılayacak şekilde tanımlamıştır. Benderli'ye ait bu pencere fonksiyonu aşağıdaki biçimde oluşturulmuştur:

$$F(x) = x(1 - x) \quad (2.27)$$

Bu pencere fonksiyonunun sınır koşullarına göz atıldığında,

$$\begin{cases} w \rightarrow 0, & F(x) \rightarrow 0 \\ w \rightarrow D, & F(x) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

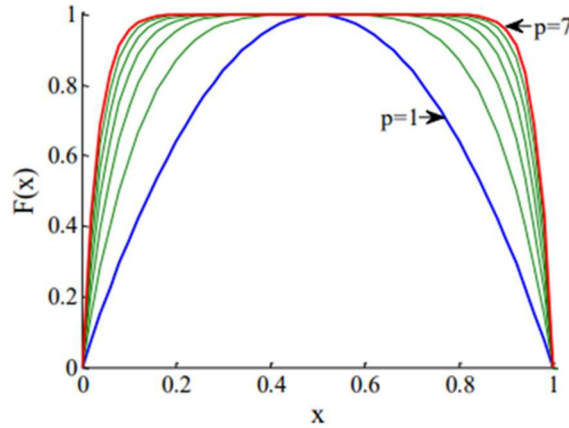
tanımlanır.

### Joglekar Pencere Fonksiyonu Modeli

Joglekar ve Wolfun 2009 yılında beraber ortaya koyduğu bir başka pencereleme fonksiyonu ise şu şekildedir (Joglekar ve Wolf, 2009). Bu işlevin doğrusal olup olmadığını belirlemek amacıyla, pencereleme fonksiyonuna bir kontrol parametresi eklenmiştir.

$$F(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (2.29)$$

Burada  $p$  kontrol parametresini temsil eder ve pozitif tam sayılar alabilir. Fonksiyonun ürettiği grafik,  $p$  değeri arttıkça dikdörtgen pencere formuna yaklaşır ve doğrusal olmayan kayma durumu azalır. İstenilen sınır koşulları  $F(0) = F(1) = 0$  olarak belirlenmiştir. Şekil 2.9'da Joglekar ve Wolf tarafından önerilen, ortada maksimum değere sahip ve sınır noktalarında sıfıra inen pencere fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 2.9. Önerilen pencere fonksiyonunun grafiği (Joglekar ve Wolf, 2009).

- **Biolek Pencere Fonksiyonu Modeli**

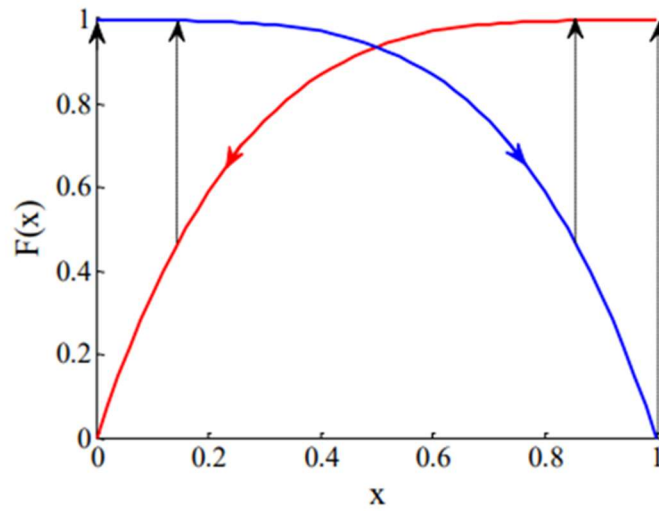
Joglekar'ın pencere fonksiyonuna alternatif olarak yeni bir pencereleme fonksiyonunu Biolek ve ekibi tasarlamışlardır (Biolek ve ark, 2009). Bu çalışmada, Joglekar'ın modeline dayanarak, memristör akımının bir dışsal parametre olarak

pencere fonksiyonuna dahil edilmesi sağlanmıştır. Biolek'in geliştirdiği pencereleme fonksiyonu, bu ek parametre sayesinde daha geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.

$$F(x) = 1 - (x - \text{sgn}(-i))^{2p} \quad (2.30)$$

$$\text{sgn}(i) = \{1, i \geq 0; 0, i < 0\} \quad (2.31)$$

Biolek ve ekibi tarafından önerilen pencere fonksiyonunu grafiği Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

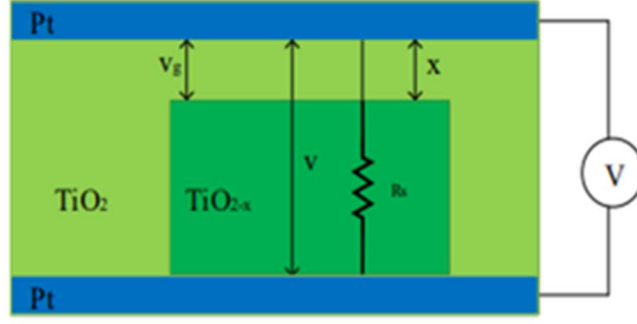


Şekil 2.10.  $p=2$  durumunda önerilen pencere fonksiyonu (Biolek ve ark, 2009).

### 2.2.3. Simmons tünel bariyer modeli

Bir diğer iki model, HP ekibinin önerdiği memristör modelinin sürekli bağlı saf ve katkılı titanyumdioksit bölgeleri ile bu bölgelerin  $R_{ON}$  ve  $R_{OFF}$  dirençlerine dayandığını temel alır. Ancak, Pickett ve diğerleri bu yaklaşımı geliştirerek alternatif bir fiziksel memristör modeli sunmuşlardır (Pickett ve ark, 2009).

Yeni modelde, HP modeline kıyasla, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, iki seri direnç yerine yalnızca bir direnç kullanılmıştır (Strukov ve ark, 2008).



**Şekil 2.11.** Simmons memristör modeli (Pickett ve ark, 2009).

Buradaki elektronlar arasındaki mesafe,  $x$  durum değişkeninin değerine göre değişir (Simmons, 1963). Bu nedenle, değişen  $x$ , oksijen boşluklarının hareket hızını belirtir ve aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanabilir:

Durum değişkeni  $x$ 'e bağlı olan Simmons tünel bariyerinin genişliği, farklı  $x$  değerleri için oksijen boşluklarının kayma hızıyla ilişkilidir ve bu ilişki denklemde açıklanmıştır (Chua ve Kang, 1976).

$$\frac{dx(t)}{dt} = \left\{ C_{off} \sinh\left(\frac{i}{i_{off}}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{x - a_{off}}{W_c} - \frac{|i|}{b}\right) - \frac{x}{w_c}\right], i > 0 \right. \quad (2.32)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \left\{ C_{on} \sinh\left(\frac{i}{i_{on}}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{x - a_{on}}{W_c} - \frac{|i|}{b}\right) - \frac{x}{w_c}\right], i < 0 \right. \quad (2.33)$$

Burada  $C_{off}$ ,  $C_{on}$ ,  $a_{off}$ ,  $a_{on}$ ,  $i_{off}$ ,  $i_{on}$  ve  $b$  modelin parametreleridir.  $C_{on}$ ,  $C_{off}$ 'tan büyük değerde olmalıdır. Çünkü her iki parametre de  $x$  değişkeninin büyüklüğünü etkiler.  $i_{on}$  ve  $i_{off}$  değerleri, modelin akım sınırını etkili bir şekilde kısıtlayarak, bu akımlar altında  $x$  değişkeninin türevinde önemli bir değişiklik oluşmasını engeller.  $a_{off}$  ve  $a_{on}$  parametreleri ise  $x$ 'in üst ve alt sınırlarını belirler. Durum değişkeninin türevinin küçük olması, Simmons Tünel Bariyer modelinin pencereleme fonksiyonlarına gerek duymamasını sağlayarak olumlu bir özelliği olarak öne çıkar (Chua ve Kang, 1976).

Modelin dezavantajlarına baktığımızda, karmaşık matematiksel yapıda olması, denklemlerinde görüldüğü gibi, memristörün akım ve gerilim değerlerini bu modelle tahmin etmeyi zorlaştırmasıdır (Sahin, 2020).

#### 2.2.4. Eşik uyarlamalı memristör (TEAM) modeli

Bu model, Kvatinsky ve çalışma arkadaşları tarafından önerilen daha geniş kapsamlı ve avantajlı bir yaklaşımdır (Kvatinsky ve ark, 2012). Simmons Tünel Bariyer modeline benzer fiziksel özellikler taşımasına rağmen, matematiksel yapısı daha basittir. TEAM modelinde, üstel bağımlılıklar yoktur. Memristör akımı ile iç durum değişkeninin türevi arasında polinomyal bir ilişki bulunur. Bu bağlamda, durum değişkeninin türevi şu şekilde tanımlanır:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \{k_{off} \left( \frac{i}{i_{off}} - 1 \right)^{a_{off}} \cdot f_{off}(x), 0 < i_{off} < i \quad (2.34)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \{k_{on} \left( \frac{i}{i_{on}} - 1 \right)^{a_{on}} \cdot f_{on}(x), i < i_{on} < 0 \quad (2.35)$$

Bu ifadede  $k_{off}$ ,  $k_{on}$ ,  $a_{off}$ ,  $a_{on}$  sabit parametrelerdir. ( $k_{off} > 0$ ,  $k_{on} < 0$ ) ve  $i_{off}$  ile  $i_{on}$  ise iyon akım eşik değerleridir. Denklemden  $f_{off}(x)$  ve  $f_{on}(x)$ , pencereleme işlevi gibi davranarak  $x$ 'i  $[x_{on}, x_{off}]$  aralığında sınırlandırır. Bu fonksiyonlar aynı olmak zorunda değildir.

$$f_{off}(x) =^{def} \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - a_{off}}{w_c} \right) \right] \quad (2.36)$$

$$f_{on}(x) =^{def} \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - a_{on}}{w_c} \right) \right] \quad (2.37)$$

Memristörün gerilim-akım ilişkisini lineer ve üstel olduğu TEAM modeline baktığımızda,

$$v(t) = [R_{ON} + \frac{R_{OFF} - R_{ON}}{x_{off} - x_{off}} + (x - x_{on})]i(t) \quad (2.38)$$

veya

$$v(t) = \left[ R_{ON} + e^{\frac{\lambda}{x_{off} - x_{on}}(x_{off} - x_{on})} \right] i(t) \quad (2.39)$$

olarak ifade edilir. Burada  $\lambda$ , ayar parametresidir.  $R_{ON}$  ve  $R_{OFF}$ , sınır durumlarındaki karşılık gelen dirençlerdir.

Eksponansiyel ilişkideki ise  $\lambda$ , ayar parametresidir.  $R_{ON}$  ve  $R_{OFF}$ , uç noktadaki benzer dirençlerdir.

$$\frac{R_{OFF}}{R_{ON}} = e^{\lambda} \quad (2.40)$$

### 2.3. Memristörün Makro Modelleri

Memristörü elektrik ve elektronik devre teorisinde ve tasarlama süreçlerinde kullanmak için sadece fiziksel modelleme değil, aynı zamanda bir simülasyon ortamında (örneğin, SPICE programı) modellemek de lazımdır. Literatürde bulunan diğer SPICE modelleri belirteceğimiz şekilde sırasıyla belirtilmektedir:

- Biolek ve diğerleri ile Benderli ve Wey'in doğrusal sürüklenme modeline dayalı SPICE modelleri (Biolek ve ark, 2009; Benderli ve Wey, 2009).
- Lehtonen ve Laihos'nun doğrusal olmayan sürüklenme modeline dayalı SPICE modeli (Lehtonen ve Laiho, 2010),
- Abdalla ve Pickett'in simülasyonunu gerçekleştirdiği SPICE modeli (Abdalla ve Pickett, 2011),
- Yakopcic ve ekibinin memristör tabanlı nöromorfik sistemler için modellenen SPICE modeli (Yakopcic ve ark, 2011).

### 2.4. Memristörün Fabrikasyonu

Memristörün fiziksel olarak üretilmesi üzerine birçok çalışma daha sürmektedir. Şekil 2.12'de memristör bileşeninin üretim yöntemlerine göre dağıtılması izlenilmiştir. Buradaki amaç memristörlerinde aynı operasyonel yükselteçte olduğu gibi entegre bir kart şeklinde üretilmesidir.

#### 2.4.1. Moleküler yapı ve iyonik filmli memristör

Bu tür memristörlerde kullanılan malzemeler, uygulanan yük altında histerezis özelliğine sahiptirler. Devam eden çalışmalar neticesinde, farklı malzemelerden üretilmiş ince filmlerin kullanıldığı memristör tasarımları bulunmaktadır.



**Şekil 2.12.** Memristör çeşitlerinin sınıflandırılması (Sahin, 2020).

- **TiO<sub>2</sub> Tabanlı Memristör**

Titanyumdioksit tabanlı memristör, fiziksel olarak ilk kez gerçekleştirilen ve en çok tercih edilen kullanılan memristör yapısıdır (Strukov ve ark, 2008; Yang ve ark, 2008). Şekil 2.13'te HP tarafından tanıtılan memristör modeli sergilenmektedir. Aşağıda, TiO<sub>2</sub> kullanılarak üretilen bazı yapılar listelenmiştir.



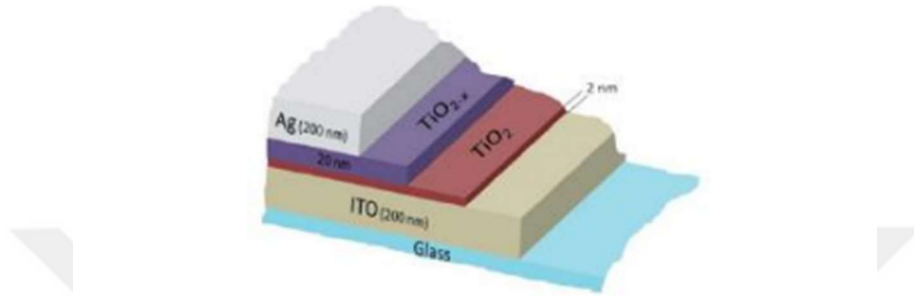
**Şekil 2.13.** HP tarafından önerilen memristör modeli (Keshmiri, 2014).

- **Pt/ TiO<sub>2</sub>/Pt Memristör**

Bu tür memristör çeşidi, bir tarafı oksijen boşlukları içeren, platin temas noktaları arasında sıkıştırılmış ince bir titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) katmanından oluşur. Temelde, saf TiO<sub>2</sub> bir yarı iletkenidir ve ısıtıldığında oksijen atomlarının bir kısmı katkılanmış bölgeye geçer. Bu durum, malzemenin direncinin düşmesine yol açar. Diğer bir deyişle, bu yapı metal benzeri özellikler göstererek yüksek performanslı bir yarı iletken işlevi görür (Strukov ve Williams, 2009; Lehtonen, 2012). Bu tasarım, platin temas noktaları arasında sıkıştırılmış ince bir TiO<sub>2</sub> katmandan oluşan HP tarafından önerilen memristör modelidir (Uhle, 1988).

- **Ag/TiO<sub>2</sub>/ITO Memristör**

Kavehei ve ekibi, üst elektrot olarak gümüş ve alt elektrotlarda indiyum kalay oksit (ITO) kullanarak yeni bir memristör tasarımı geliştirmiştir (Kavehei, 2012). Memristör, indiyum kalay oksit (ITO) kaplı bir cam alt tabaka üzerinde üretilmiş ve platinyum yerine üst elektrot olarak gümüş (Ag) tercih edilmiştir. Memristörün katman yapısı, Şekil 2.14' te görüldüğü gibi düzenlenmiştir



**Şekil 2.14.** Ag/TiO<sub>2</sub>/ITO katmanlı memristör (Kavehei, 2012).

- **Anodik TiO<sub>2</sub> Memristör**

TiO<sub>2</sub> tabanlı memristörler genellikle Atomik Katman Depolama (ALD), püskürtme veya sol-jel yöntemi ile üretilir. Iowa Eyalet Üniversitesi'nden Miller, maliyet etkin bir üretim yöntemi olan anodizasyonu kullanarak ince filmler anodik TiO<sub>2</sub> memristörler üretmiştir (Miller, 2010).

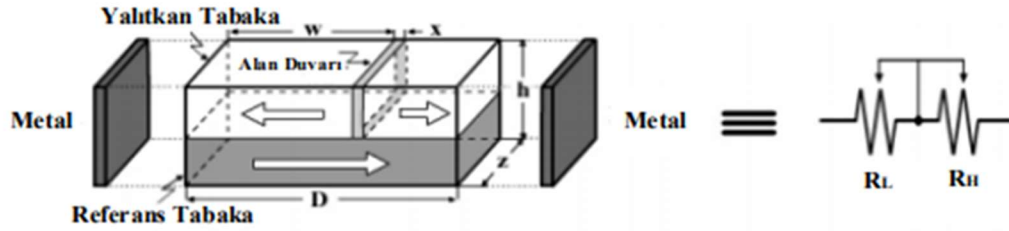
- **Diğer İnce Filmler Memristör Çeşitleri**

Günümüzde titanyum dioksit kullanılmadan tamamen farklı malzemelerle üretilmiş memristörler de mevcuttur. Örneğin, Jo ve ekibi, silikon (Si) ve gümüşten (Ag) yararlanarak yeni bir memristör türü geliştirmişlerdir (Jo ve ark, 2010). Bu memristör, özel olarak formüle edilmiş Ag/Si karışımı ile yüksek iletkenlik gösteren Ag bölgeleri ve düşük iletkenlik gösteren Si bölgelerinden oluşur. İletkenliğin artması için pozitif gerilim uygulandığında, gümüş iyonları gümüş zengin bölgeden gümüş fakir bölgeye hareket eder (Jo ve ark, 2010). Negatif gerilim uygulandığında ise ters bir durum gerçekleşir ve iletkenlik azalır. Oblea ve ekibi, Ag<sub>2</sub>Se ve Ag malzemelerini tungsten elektrotlar arasında yerleştirerek kalkojenit tabanlı bir memristör tasarlamışlardır (Oblea ve ark, 2010). Çinko oksit (ZnO) tabanlı memristör ise Kumar ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. Bu memristörde, sırasıyla

platinyum (Pt), krom (Cr) ve altın (Au) elementleri kullanılmıştır (Kumar ve ark, 2012; Kumar ve ark, 2014).

#### 2.4.2. Spintronik memristör

Titanyum dioksit bazlı memristörde, oksijen boşluklarının iki katman arasındaki hareketi memristörün durumunu değiştirirken, spintronik memristör modelinde manyetik alan duvarının etkisi memristörün durumunu değiştirir (Arık, 2015). Bu memristör, referans katman ve serbest katman olarak adlandırılan iki ferromanyetik katman olarak tasarlanmıştır (Wang ve ark, 2009; Chen ve ark, 2010). Şekil 2.15' te, bu spintronik memristör yapısının çalışma prensibi ve eşdeğer direnç değeri gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Spintronik manyetik model (Keshmiri, 2014).



### **3. BÖLÜM KAOTİK VE HİPERKAOTİK SİSTEMLER**

#### **3.1. Kaotik Sistemler**

Kaos terimi, Eski Yunanca'da 'büyük boşluk' ya da 'dünya yaratılmadan önceki boşluk' anlamında kullanılan  $\chi\acute{\alpha}\omicron\varsigma$  kelimesinden türetilmiştir. Fransızca kökenli 'chaos' sözcüğü ise 'tam anlamıyla düzensizlik' anlamına gelir (Etimolojiturkce, 2021). Bugün Türk Dil Kurumu, kaosu “evrenin düzen bulmadan önceki şekli, düzensiz ve karmaşık durumu” olarak tanımlar. Kaos, genelde karmaşıklık ve düzensizliği ifade etmekle birlikte, bilimsel bağlamda kaos teorisi olarak önemli bir yer tutmaktadır (Türk Dil Kurumu [TDK], 2021)

##### **3.1.1. Kaos teorisinin tarihçesi ve gelişimi**

Kaotik sistemler üzerindeki araştırmalar, hem bilinçli hem de tesadüfi olarak uzun yıllar boyunca devam etmektedir. 1890 yılında Henri Poincaré, sade dinamik kuralların kompleks ve rastgele görünümsergileyebileceğini keşfetmiştir (Poincaré, 1890). Bu gözlemi kaos olarak adlandırmamış olsa da, modern kaos teorisinin temellerini atmıştır (Yılmaz, 2021).

Edward Norton Lorenz 1963 yılında, kaotik sistemlerin belirleyici özelliklerinden birini ortaya çıkarmıştır. Hava tahminleri üzerine çalışırken, önemsiz gibi görünen küçük değişikliklerin büyük farklar yarattığını fark eden Lorenz, bu durumu "kelebek etkisi" olarak adlandırmıştır. Bu kavram, "Brezilya'da kanat çırpın bir kelebek Teksas'ta kasırgaya sebep olabilir" şeklinde ifade edilir ve kaos teorisinde önemli bir yer tutar (James, 2014).

Li ve Yorke tarafından 1975 yılında, "Period Three Implies Chaos" adlı çalışmalarıyla literatürde ilk kez kaos terimini kullanmışlardır. Basit bir düşünmeyle tanımlanan bir modelin karmaşık dinamikler gösterebileceğini göstererek, nüfus artışıındaki kaotik davranışları araştırmışlardır (Li ve Yorke, 1975). 1976 yılında Otto E. Rössler, Lorenz'in kaotik sisteminden daha basit bir yapı önererek kaos teorisine katkıda bulunmuştur (Rössler, 1976).

### 3.1.2. Kaotik sistemlerin matematiksel modellenmesi

Kaotik sistemlerin matematiksel modelleri, genellikle diferansiyel denklemler ile ifade edilir. Örneğin, kaotik bir sistem Denklem 3.1 ile gösterilebilir:

$$\begin{aligned}\frac{dx_{(1)}}{dt} &= F_1(x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}) \\ \frac{dx_{(2)}}{dt} &= F_2(x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}) \\ \frac{dx_{(n)}}{dt} &= F_n(x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)})\end{aligned}\tag{3.1}$$

Denklem 3.1' de n, sistemin boyutunu temsil eder ve bir sistemin kaotik olabilmesi için en az üç boyutlu bir yapıda olması gerektiği belirtilir (Hilborn, 2000). Kaotik sistemlerin diğer temel özellikleri ise şunlardır:

- **Başlangıç Koşullarına Hassasiyet:** Kaotik sistemler, başlangıç koşullarındaki ufak değişimlere karşı büyük hassasiyet gösterir. Bu nedenle, başlangıç koşullarında yapılan küçük değişiklikler, sistem davranışında büyük farklılıklara yol açar.
- **Yörüngelerin İraksaması:** Kaotik sistemlerde ilk başlarda birbirine yakın olan iki yörünge, zamanla birbirinden uzaklaşır. Bu durum, kaotik sistemlerin yakın yörüngelerinin ıraksaması olarak bilinir.
- **Otonom Yapı:** Kaotik sistemler genellikle otonom yapıdadır. Bu sistemlerde yörüngeler birbirleriyle kesişmezler.
- **Korunumsuz Sistemler:** Kaotik sistemler, enerji korunumunun olmadığı sistemlerdir. Bu nedenle, sistemdeki enerji korunamaz ve sistemin enerjisi belirli bir değerde hareket eder.

### 3.1.3. Kaotik sistemlerin uygulamaları

Kaotik sistemler, hem matematiksel ve grafiksel analizlerle hem de deneysel uygulamalarla incelenmiştir. 1984 yılında Chua, ismini verdiği Chua devresi aracılığıyla kaotik sistemlerin fiziksel uygulamalarda da mümkün olduğunu kanıtlamıştır (Chua ve ark, 1984).

Farklı kaotik sistemler, literatüre önemli katkılarda bulunmuş ve elektronik haberleşme, şifreleme, ekonomi, tıp, sinyal işleme gibi birçok alanda uygulanmaya başlanmıştır; bu tür uygulamalar hala aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Lü, Chen, Liu, Qi ve Sprott sistemleri, kaotik ve hiperkaotik sistemlerin çeşitli alanlardaki uygulamalarına örnek teşkil etmektedir (Yılmaz, 2021).

### 3.2. Hiperkaotik Sistemler

Hiperkaos kavramı, ilk kez 1979 yılında Otto E. Rössler tarafından önerilen bir sistem ile literatüre kazandırılmıştır (Rössler, 1979). Hiperkaotik sistemler, daha karmaşık yapıları ve öngörülmesi zor davranışları nedeniyle bilim insanlarının ilgisini çekmektedir. Rössler 1979 yılındaki başka bir çalışmasında ise 3 boyutlu sistemlerin yanı sıra, 4 boyutlu bir kaotik sistem geliştirmiştir. Bu sistem, diğer kaotik sistemlere kıyasla daha karmaşık bir dinamik davranış sergilediği gözlemlenmiştir (Rössler, 1979).

Rössler'in *"Hiperkaos için bir denklem"* adlı çalışması, hiperkaotik sistemlerin doğruluğunu esaslı bir şekilde ispatlamıştır. Rössler'in hiperkaotik 4 boyutlu bu sistemi, en basit kaos üreticisine doğrusal bir  $w$  durum değişkeni eklenerek elde edilmiştir. Bu yeni sistem, sadece 3 boyutlu kaotik sistemlere kıyasla daha yüksek boyutlu ve daha karmaşık yapısıyla dikkat çekmiştir.

Rössler'in çalışmaları, hiperkaosun matematiksel modellemesi ve kavranması açısından önemli bir temel oluşturmuştur. Onun katkılarıyla, hiperkaotik sistemler yalnızca teorik bir kavram olmaktan çıkmış ve mühendislik ile uygulamalı bilimlerde de kullanılmaya başlanmıştır. Bugün, hiperkaotik sistemler özellikle kriptografi, güvenlik teknolojileri ve sinyal işleme gibi alanlarda geniş bir araştırma konusu olmaktadır.

Hiperkaotik sistemlerin gelişimi, bilim dünyasında kaos ve karmaşıklık konularında önemli ilerlemelere yol açmıştır. Rössler'in çalışmaları, bu alandaki araştırmalara öncülük ederek, daha yüksek boyutlu ve daha kompleks kaotik sistemlerin keşfine zemin hazırlamıştır.

Ek olarak, hiperkaotik sistemlerin özellikleri ve davranışları üzerine yapılan araştırmalar, kaos teorisinin sınırlarını genişletmekte ve daha önce öngörülemeyen dinamiklerin anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu araştırmalar hem

matematiksel hem de uygulamalı olarak önemli bulgular ortaya koyarak, modern bilimin yeni perspektifler kazanmasına katkıda bulunmaktadır.

1986 yılında Chua ve ekibi, hiperkaotik sistemleri ilk kez gerçek bir fiziksel sistemde başarıyla gözlemlemişlerdir (Chua ve Kobayashi, 1986). Bu gözlem, doğrusal olmayanlığın parçalı doğrusal bir fonksiyonla sağlandığı 4 boyutlu basit bir elektronik devre üzerinden gerçekleştirilmiştir. 1994'te Kapitaniak ve Chua, tek yönlü bağlanmış iki özdeş Chua devresinde hiperkaotik çekiciler gözlemlemişlerdir (Chua ve Kapitaniak, 1994). Zamanla, çeşitli yapı ve özelliklere sahip birçok hiperkaotik sistem geliştirilmiş ve geniş çalışma alanları bulmuştur.

Hiperkaotik sistemlerin yapısı, diferansiyel denklemlerle tanımlanır. Kaotik sistemlere lineer ve lineer olmayan yeni değişkenler dahil edildiğinde, en az dört boyutlu hiperkaotik sistemler ortaya çıkar.

Bu sistemler, kaotik sistemlere benzer özellikler taşımakla birlikte, daha karmaşık bir yapı sergiler. Bir sistemin hiperkaotik dinamikler gösterebilmesi için, Lyapunov üstellerinden en az ikisinin pozitif değerde olması gerekmektedir (Yılmaz, 2021).

Bu ilerlemeler, hiperkaotik sistemlerin anlaşılmasını ve uygulanmasını kolaylaştırmış, mühendislikten doğa bilimlerine kadar birçok alanda yenilikçi çözümler sunmuştur. Hiperkaotik sistemlerin fiziksel ve teorik modelleri, günümüzde halen çalışma alanlarına sahiptir ve daha karmaşık ve öngörülemez dinamiklerin keşfine olanak tanımaktadır.

### **3.3. Kaotik ve Hiperkaotik Sistemlerin Matematiksel İncelemesi**

#### **3.3.1. Korunumlu-korunumsuz sistemler**

Korunumsuz (dissipative) ve korunumlu (conservative) kavramları, bir sistemin zamanla yörüngelerinin nasıl davrandığını açıklar. Korunumsuz sistemlerde, yörüngeler belirli bir bölge içinde sıkışıp kalır ve zamanla çekici bir yapıya doğru yakınsama eğilimindedir. Bu fenomen, sistemde enerjinin korunmayıp kaybolmasıyla da ilişkilidir. Kaotik ve hiperkaotik sistemlerin faz uzayında gözlemlenen çekici yapılar, bu sistemlerin korunumsuz doğasını ortaya koyar (Yılmaz, 2021).

Bir sistemin korunumsuz olup olmadığını anlamak için sistemin gradyan değeri hesaplanır:

$$\nabla V = \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} + \dots + \frac{\partial \dot{x}_n}{\partial x_n} \quad (3.2)$$

Bir n-boyutlu dinamik sistemde, tüm durum değişkenlerinin kısmi türevleri alınarak elde edilen sonuca göre, sistemin korunumsuz mu yoksa korunumlu mu olduğunu belirlenir. Bu değer 0'dan küçükse sistem korunumsuz olarak sınıflandırılırken, 0'dan büyükse sistem korunumlu olarak değerlendirilir.

Qi hiperkaotik sistemi Denklem 3.3' te ki diferansiyel denklemler ile ele alınmıştır (Qi ve ark, 2007).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) + eyz \\ \dot{y} &= cx - dxz + y + u \\ \dot{z} &= xy - bz \\ \dot{u} &= -y \end{aligned} \quad (3.3)$$

Yukarıda matematiksel olarak ifade edilen Qi tabanlı hiperkaotik sistem modeli üzerinden gradyan değeri hesaplanmış ve şu şekilde gösterilmiştir:

$$\nabla V = -a + 1 - b + 0$$

Burada, parametreler ( $a=35$  ve  $b=4.9$ ) olarak alınmıştır. Bu değerlere göre gradyan değeri  $\nabla V = -38.9$  olarak bulunmuştur. Bu negatif değer, Qi sisteminin korunumsuz ve dolayısıyla kaotik yapıda olduğunu doğrulamaktadır.

### 3.3.2. Jakobian matrisi ve denge noktaları

Sistemlerin teorik analizi, genellikle denge noktalarının tanımlanmasıyla başlar. Denge noktalarının bulunabilmesi için sistemdeki tüm denklemler sıfıra eşitlenir (Emiroğlu ve Uyaroğlu, 2020). Bu işlem, sistemin durağan hallerini tanımlamak için yapılır. Matematiksel olarak bu durum şöyle açıklanır:

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = F[x_n(t)] = 0 \quad (3.4)$$

Denklemde çözümlerinden elde edilen değerler gerçek sayılar ise, sistemin denge noktalarının varlığından söz edilir ve denge noktaları vardır olarak değerlendirilir. Ancak, eğer kaotik bir sistemde Denklem 3.4' ün çözümü yalnızca sanal (imajiner) değerler içeriyorsa, bu sistem "denge noktası olmayan kaotik sistem" olarak değerlendirilir.

Denge noktaları belirlendikten sonra, sistemin stabilitesini ve dinamik davranışlarını incelemek için Jakobian matrisi bulunur. Jakobian matrisi, sistemin durum değişkenlerinin kısmi türevlerinin alınmasıyla oluşturulur.

Denklem 3.5' te, n boyutlu bir sistem için Jakobian matrisinin genel formu verilmiştir:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Denge noktalarının ve Jakobian matrisinin hesaplanması, sistemin lokal stabilite analizinin yapılmasını sağlar. Denge noktaları etrafındaki küçük perturbasyonlar, sistemin bu noktalara geri dönüp dönmeyeceğini veya bu noktalardan uzaklaşıp uzaklaşmayacağını belirler. Özdeğer analizi, Jakobian matrisinin özelliklerini inceleyerek sistemin dinamikleri hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Pozitif gerçekteğerler, denge noktasının kararsız olduğunu ve küçük sapmaların zaman içinde büyüme eğiliminde olduğunu gösterir. Negatif gerçekteğerler ise, sistemin denge noktasına geri döneceğini ve stabil olduğunu belirtir (Emiroğlu ve Uyaroğlu, 2020).

Dinamik sistemlerde denge noktaları ve Jakobian matrisi, sistemin uzun dönemli davranışlarını ve olası kaotik özelliklerini incelememize olanak tanır. Bu analizler, sistem tasarımı, kontrol ve optimizasyon çalışmaları için temel bilgiler sağlar.

### 3.3.3. Öz değerler ve sistemin sağlamlığı

Jakobian matrisini analiz etmek için,  $x_1 x_2 \dots x_n$  değerlerinin yerine hesaplanan denge noktaları yerleştirilmesiyle elde edilir. Bu matrisin determinantı hesaplandığında, sistemin öz değerleri belirlenir (Yılmaz, 2021).

Bu işlem Denklem 3.6 ile gösterilir:

$$\det (J - \lambda I) = |J - \lambda I| = 0 \quad (3.6)$$

Burada,  $I$  birim matrisini temsil eder. Hesaplanan öz değerler  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  şeklinde ifade edilir ve bu değerler aracılığıyla sistemin kararlılığı hakkında yorum yapılabilir (Shnol, 2007).

Bir sistem, pozitif değerde bir öz değere sahip ise, sistemin kararsız olduğunu ve muhtemelen kaotik bir yapı sergileyebileceğini gösterir. Ancak, her kaotik sistem kararsızdır desekte, her kararsız sistem kaotiktir diyemeyiz. Bu sebeple, bir sistemin kaotik ya da hiperkaotik olup olmadığını belirlemek için ilave analiz yöntemlerine başvurulması gerekmektedir.

Denge noktalarının belirlenmesi ve Jakobian matrisinin öz değerlerinin hesaplanması, dinamik sistemlerin analizi için temel adımlardır. Öz değerler, sistemin denge noktasının çevresindeki davranışını anlamak için kritik bilgi sağlar.

Örneğin, pozitif gerçek parçalı bir öz değer, sistemin kararsız olduğunu ve küçük bir sapmanın zamanla büyüyeceğini gösterir. Negatif gerçek parçalı öz değerler ise, sistemin denge noktasına geri dönmeye eğilimli olduğunu ve dolayısıyla kararlı olduğunu belirtir.

#### **3.3.4. Kararlılık ve kaos ilişkisi**

Kaotik sistemlerin incelenmesinde, kararlılık analizi önemli bir rol oynar. Ancak, bir sistemin kaotik olup olmadığını belirlemek için yalnızca kararlılık analizi yeterli değildir. Kaotik sistemler, düzensiz ve öngörülemez davranışlar sergileyebilir, bu yüzden bu sistemlerin dinamiklerini tam olarak anlamak için Lyapunov üst sınırları gibi diğer analiz yöntemlerine de başvurulması gereklidir. Lyapunov üst sınırları, bir sistemin başlangıç koşullarına duyarlılığını ve zamanla nasıl geliştiğini belirlemeye yardımcı olur (Özdemir, 2011).

Jakobian matrisleri ve özdeğer analizleri, birçok pozitif bilim dalında kullanılabilir. Bu tür analizler, dinamik sistemlerin davranışlarını daha iyi kavrayıp kontrol edebilmek için önemli veriler sunar ve bu da bilimsel çalışmaların ve uygulamaların başarısına büyük katkı sağlar.



## 4. BÖLÜM HİPERKAOTİK SİSTEMLERİN SINIFLANDIRILMASI

### 4.1. Lorenz Tabanlı Hiperkaotik Sistemler

Karmaşık dinamiklerin araştırılmasında yaygın olarak kullanılan Lorenz sistemi, hiperkaotik davranış sergileyen birçok sistemin temelini oluşturur. Çeşitli boyutlarda ve farklı özelliklerde birçok Lorenz benzeri model, akademik literatürde yer bulmuştur. Bu çalışmada incelenen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemi, karmaşıklığın farklı boyutlarını gözler önüne sermektedir.

**Tablo 4.1. Modeller**

| Çalışma Senesi | Önerilen sistem              |
|----------------|------------------------------|
| 2005           | Li-Tang Hiperkaotik modeli   |
| 2006           | Gao Hiperkaotik modeli       |
| 2007           | Jia Hiperkaotik modeli       |
| 2008           | Wang Hiperkaotik modeli      |
| 2009           | Yang Hiperkaotik modeli      |
| 2011           | Si Hiperkaotik modeli        |
| 2015           | Chen-Yang Hiperkaotik modeli |

Lorenz sistemine dayalı hiperkaotik sistemlerin incelenmesinde sıkça kullanılan 4 boyutlu Li-Tang modeli, bu alandaki çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır (Li ve ark, 2005). Sistemin dinamik davranışları, farklı parametre kombinasyonları altında sayısal simülasyonlar ve deneysel uygulamalar eşliğinde analiz edilmiştir. Bulunan sonuçlar, sistemin karmaşık ve zengin bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Benzer bir model, farklı parametrelerle başka bir çalışmada da incelenmiş olup, sistemin duyarlılığını ve parametrelerin önemini vurgulamaktadır.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= 10y - 10x \\ \dot{y} &= 28x - y - xz + w \\ \dot{z} &= -\frac{8}{3z} + xy \\ \dot{w} &= -5x\end{aligned}\tag{4.1}$$

Sistem 4.1' in Lyapunov değerleri şu şekildedir:

$$\lambda_{l1} = 0.3997, \lambda_{l2} = 0.3113, \lambda_{l3} = 0, \lambda_{l4} = -14.3776.$$

Cai'nin çalışmasında, 2008 yılında Sistem 4.1' in senkronizasyonu sağlanmıştır (Qiang ve Liu, 2006). Bu araştırmada, parametreleri bilinmeyen iki eşdeğer 4 boyutlu Lorenz sistemi ile farklı parametreler kullanılarak onerilen Lorenz-Liu hiperkaotik sistemlerinin senkronizasyonu, Lyapunov kararlılık teoremi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir (Liang ve ark, 2008). Senkronizasyon surecinde üç farklı kontrolör ve adaptif kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, Gao ve çalışma arkadaşları 2007 yılında, 3 boyutlu Lorenz kaotik sistemine doğrusal olmayan kuadratik bir kontrolör entegre ederek 4 boyutlu bir hiperkaotik sistem geliştirmiştir (Gao ve ark, 2007). Bu sistemin denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= 10(y - x) \\ \dot{y} &= 28x + y - xz - w \\ \dot{z} &= xy - \frac{8}{3z} \\ \dot{w} &= kyz\end{aligned}\tag{4.2}$$

Denklem 4.2' de ki  $k$  değeri  $[0, 1]$  aralığında değiştirildiğinde, sistemin hiperkaotik çekirdekten limit çevrimine kadar çeşitli dinamik davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir.

Üç boyutlu Lorenz sistemine 2007 yılında durum geri beslemeli kontrol yöntemi ekleyen Jia, dördüncü bir durum değişkeni ile 4 boyutlu bir hiperkaotik sistem oluşturmuştur (Jia, 2007a). Bu sistemin durum denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) + u \\ \dot{y} &= -xz + rx - y \\ \dot{z} &= xy - bz \\ \dot{u} &= -xz + du\end{aligned}\tag{4.3}$$

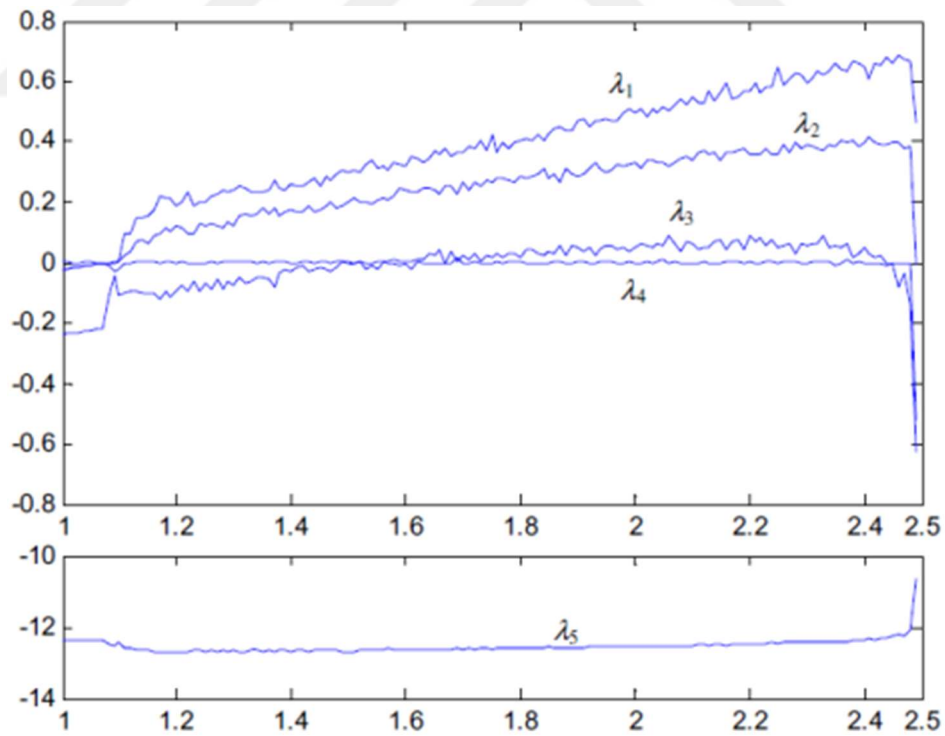
Bu yaklaşım, sistemin karmaşıklığını artırarak daha geniş bir dinamik davranış yelpazesi sunmuştur.

Jia, 2007 yılında yürüttükleri başka bir araştırmada, Sistem 4.3'n senkronizasyonunu sağlamıştır (Jia, 2007b). Bu çalışmada, başlangıç koşulları farklı olan sürücü sistemi ve cevap sistemi, başlangıçta aynı hiperkaotik çekirdekleri

ürettiği, ancak zamanla farklı yörüngelere sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu noktada kontrol işlemi uygulandığında, iki sistem tekrar senkronize olup benzer bir davranış göstermiştir.

Jia'nın geliştirdiği dört boyutlu hiperkaotik sistem, 2009 yılında Hu tarafından beşinci bir boyut eklenerek yeniden tasarlanmıştır (Hu, 2009). Bu çalışmada, Hu'nun modifiye edilmiş üç boyutlu Lorenz sistemine, lineer olmayan kontrolör ekleyerek beş boyutlu bir hiperkaotik sistem oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu sistem, sadece iki çarpıcı (multiplier) içermesine rağmen üç pozitif Lyapunov üsteline sahiptir ve oldukça karmaşık yapıda garip çekiciler (strange attractors) üretebilmektedir. Şekil 4.1'de, sistemin üç pozitif Lyapunov üsteline sahip olduğunu gösteren grafik yer almaktadır.

Hu tarafından geliştirilen bu karmaşık sistem, 2019 yılında kaos tabanlı gömülü sistem uygulamaları geliştirmek amacıyla FPGA uygulamasında kullanılmıştır (Koyuncu, 2019). Bu çalışmanın avantajı,  $430,146\text{ MHz}$  gibi yüksek bir uygulama frekansına sahip olmasıdır.



**Şekil 4.1.** Hu sistemi Lyapunov üstelleri grafiği (Hu, 2009).

2014 yılında Vaidyanathan, 4 boyutlu Jia sisteminden yola çıkarak yeni bir hiperkaotik model önerdi. Bu yeni 5 boyutlu sistemin dinamik analizleri, maksimum

Lyapunov üstelinin (MLE) 4 boyutlu modelden daha yüksek olduğunu gösterdi. Bu analizlerin ardından, adaptif kontrolör tasarımı ile sistemin denge durumu sağlanmaya çalışıldı ve iki özdeş sistemin senkronizasyonu başarıyla gerçekleştirildi (Vaidyanathan ve ark, 2014).

Ayrıca Elektronik devre tasarımı, SPICE programı aracılığıyla ayrıntılı olarak analiz edildi ve kapsamlı bir çalışma sonucunu ortaya çıkardı (Vaidyanathan ve ark, 2014).

Wang, 2008 yılında 3 boyutlu Lorenz sistemine yeni bir  $w$  değişken ekleyerek bir hiperkaotik sistem geliştirdi. Doğrusal olmayan bir  $w$  kontrolörün eklenmesiyle oluşturulan sistemin modeli Denklem 4.4' te verilmiştir (Wang, 2008).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= cx - y - xz \\ \dot{z} &= xy - bz \\ \dot{w} &= -yz + rw\end{aligned}\tag{4.4}$$

Wang ve ekibi, 2013 yılında kesir dereceli bir sistem olarak yeniden düzenlenmiş ve bu sayede hiperkaotik davranışlar gözlemlenmiştir (Wang ve ark, 2013). Bu sistem, görüntü şifreleme uygulamalarında kullanılarak geniş anahtar alanı ve yüksek güvenlik avantajları sunmuştur. 2021 yılında yapılan bir diğer çalışmada da Wang hiperkaotik sistemi, Rivest-Shanir-Adlenon (RSA) algoritması ile birleştirilerek görüntü şifreleme için kullanılmıştır. Bu yeni yöntem, saldırılara karşı etkili ve güvenli bir çözüm sunmuştur (Yılmaz, 2021).

Yang ve ekibi, Lorenz kaotik sistemini temel alarak çeşitli hiperkaotik sistemler geliştirmiştir (Yang ve Liu, 2009). Lineer yapılı kontrolörlü 4 boyutlu hiperkaotik sistem Denklem 4.5' te verilmiştir. Sistem parametreleri  $a = 35$ ,  $b = 3$ ,  $c = 35$ ,  $k_1 = 2$  ve  $k_2 = 7.5$  olarak belirlenmiştir ve bu değerlerle hiperkaotik çekiciler elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= cx - xz + w \\ \dot{z} &= xy - bz \\ \dot{w} &= -k_1x - k_2y\end{aligned}\tag{4.5}$$

2013 yılında, aynı araştırma ekibi bu sistemi geliştirerek 5 boyutlu bir hiperkaotik modele dönüştürmüştür (Yang ve Chen, 2013). Bu modeli, Denklem 4.5' te ki sisteme doğrusal olmayan bir kontrolör ekleyerek oluşturmuşlardır. Bu yeni model, üç pozitif Lyapunov üsteline sahiptir ve dinamik davranışları daha karmaşık bir yapı sergilemiştir. Lyapunov üsteli değerleri şu şekildedir:

$$\lambda_{L1} = 0.5441, \lambda_{L2} = 0.3743, \lambda_{L3} = 0.1164, \lambda_{L4} = 0.0030, \lambda_{L5} = -11.7044$$

Hesaplanan Lyapunov üstelleri 4 boyutlu hiperkaotik Yang sisteminin değerlerinden yüksektir. Bu çalışmada daha önceki çalışmalarda olduğu gibi parametre değerleri farklı aralıklarla değiştirilerek sistemin dinamik davranışlarındaki değişimler gözlemlenmiştir.

2015 yılında, Yang ve ekibi 5 boyutlu bir hiperkaotik sistemi tek boyutlu doğrusal bir sistemle birleştirerek 6 boyutlu karmaşık davranışlar sergileyen yeni bir hiperkaotik model geliştirmiştir (Yang ve ark, 2015). Bu yeni sistem, Lorenz kaotik sistemine doğrusal ve doğrusal olmayan geri beslemeli kontrolörler eklenerek oluşturulmuştur. Sistemin modeli Denklem 4.6' da ki gibidir:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) + u \\ \dot{y} &= cx - y - xz + v \\ \dot{z} &= xy - bz \\ \dot{u} &= du - xz \\ \dot{v} &= -ky \\ \dot{w} &= hw + ly\end{aligned}\tag{4.6}$$

Bu çalışmada, sabit değerler ( $a=10$ ,  $b=8/3$ ,  $c=28$ ,  $d=2$ ,  $k=8.4$ ,  $h=1$ ,  $l=1$ ) ) kullanılarak sistemin Lyapunov üstellerinin hesaplandığında dört adet pozitif üstel elde edilmiştir. Bu değerler şunlardır:

$$\lambda_{L1} = 0.9995 \quad \lambda_{L2} = 0.4892 \quad \lambda_{L3} = 0.3256$$

$$\lambda_{L4} = 0.0514 \quad \lambda_{L5} = 0.0000 \quad \lambda_{L6} = -12.5324$$

Parametre  $d'$  nin değeri,  $[0.8, 2.5]$  arasında farklı değerler verilerek sistemin dinamik davranışları, çatallanma diyagramları ve Lyapunov üstelleri ile incelenmiştir. 2019 yılında, bu sistemin senkronizasyonu sağlanmıştır (Al-Obeidi ve Al-Azzawi, 2019).

2018'de Yang ve ekibi, 6 boyutlu hiperkaotik sistemi tek boyutlu doğrusal bir sistemle birleştirerek yeni bir model oluşturmuştur (Yang ve ark, 2018). Bu model, 5

pozitif Lyapunov üsteline sahiptir ve hiperkaotik sistemin devre gerçekleştirimini de içermektedir. 2020' li yıllardaki çalışmalarda daha yüksek boyutlu hiperkaotik sistemler geliştirilmiştir (Benkouider ve ark, 2020a; Benkouider ve ark, 2020b).

Yang ve Bai, 3 boyutlu Lorenz kaotik sistemini modifiye ederek, doğrusal kontrolörlerle 4 ve 5 boyutlu hiperkaotik sistemler üretmiştir (Yang ve Bai, 2016). Denklem 4.7' de ki gibi ifade edilen bu sistemler, 3 pozitif Lyapunov üsteli ile hiperkaotik davranış sergilemektedir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= cx + dy - xz + w \\ \dot{z} &= -bz + x^2 \\ \dot{u} &= ey + fu \\ \dot{w} &= -rx - kw\end{aligned}\tag{4.7}$$

Denklem 4.7' de kullanılan parametreler ( $a=35, b=7, c=35, d=-5, e=10.6, f=1, r=5, k=0.05$ )' dir. Sistemin Lyapunov üstelleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\lambda_{L1} = 0.9899 \quad \lambda_{L2} = 0.3297 \quad \lambda_{L3} = 0.2951$$

$$\lambda_{L4} = 0.0000 \quad \lambda_{L5} = -47.6637$$

Bu çalışmada, devre uygulaması gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca, Lorenz kaotik sistemi temel alınarak geliştirilen bir diğer model 2011 yılında Si tarafından ortaya atılmıştır. Bu sistemde, Denklem 4.8' de görüldüğü üzere  $x^4$  ve  $y^4$  gibi dördüncü dereceden değişkenler bulunmaktadır (Si ve ark, 2011).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= cx - xz - y + ew \\ \dot{z} &= x^4 + y^4 - bz \\ \dot{w} &= -dy\end{aligned}\tag{4.8}$$

Denklem 4.8' de kullanılan parametreler ( $a = 10, b = 8/3, c = 46, d = 2$  ve  $e = 12$ )' dir. Sistemin Lyapunov üstelleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\lambda_{L1} = 0.60613 \quad \lambda_{L2} = 0.28066 \quad \lambda_{L3} = 0.0000 \quad \lambda_{L4} = -11.489$$

Bu çalışmada, adaptif kontrol metodu kullanılarak hiperkaotik model kontrol edilmiştir. Chen ve Yang'ın 2015'te önerdiği Lorenz tabanlı model, denge noktaları eğrisine sahip olup çeşitli kaotik davranışlar sergilemektedir (Chen ve Yang, 2015).

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= a(y - x) \\
 \dot{y} &= cx - y - xz + w \\
 \dot{z} &= -bz + xy \\
 \dot{w} &= (c - 1)y + w - \frac{x^3}{b}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Yukarıdaki denkleme göre, sistemde üç kontrol parametresi ( $a=10$ ,  $b=2$ ,  $c=28$ ) bulunur. Başlangıç koşulları ( $x_0=1$ ,  $y_0=0$ ,  $z_0=0$ ,  $w_0=0$ ) olduğunda sistem hiperkaotik çekerler gösterir. Dinamik analizler,  $a$  parametresinin değiştirilmesiyle farklı dinamiklerin gözlemlenmesini sağlar. Ayrıca, başlangıç koşulları değiştirilerek birlikte görülen çekerler elde edilmiştir. Lü ve Chen'in 2012'de önerdiği beş boyutlu Lorenz tabanlı hiperkaotik sistem, beş kontrol parametresi ve beş durum değişkeniyle oluşturulmuş olup, Denklem 4.10' da ki bu parametreler ( $a=10$ ,  $b=8/3$ ,  $c=28$ ,  $d=-1$ ,  $e=5$ ) olduğunda hiperkaotik davranış sergilemiştir (Yadong ve Aijun, 2012).

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= a(y - x) + w - v \\
 \dot{y} &= cx - y - xz \\
 \dot{z} &= -bz + xy \\
 \dot{w} &= dw - yz \\
 \dot{v} &= ex
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Wang ve ekibi, 2019 yılındaki çalışmasında altı ve yedi boyutlu yeni hiperkaotik sistemler üzerinde durmuştur. Altı boyutlu sistem, Denklem 4.10' da ki sisteme, doğrusal olmayan  $u$  durum değişkeninin eklenmesiyle oluşturulmuş ve hiperkaosun yanı sıra periyodik ve kaotik dinamikler gözlemlenmiştir (Wang ve ark, 2019). Sistem, sinyal şifreleme ve çözme uygulamalarında kullanılmıştır. Benzer adımlar izlenerek, yedi boyutlu yeni bir hiperkaotik sistem de geliştirilmiş ve kontrol parametrelerinin değiştirilmesiyle çeşitli dinamik davranışlar incelenmiştir. Bu sistem de şifreleme ve çözme uygulamalarında verimli bulunmuştur (Yu ve ark, 2019).

## 4.2. Rössler Tabanlı Hiperkaotik Sistemler

Hiperkaotik sistemler üzerindeki çalışmalar ilk olarak 1979 yılında Rössler tarafından tanıtılmıştır. Rössler, bu çalışmasında dört değişkenli basit bir osilatör modeli önermiştir. Sistemde bulunan kuadratik  $xz$  değişkeni, çift yönlü davranış göstererek daha karmaşık kaotik dinamiklerin oluşmasına olanak sağlamaktadır. Rössler'in hiperkaotik sistemi Denklem 4.11' de belirtilmiştir (Rossler,1979).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -(y + z) \\ \dot{y} &= x + ay + w \\ \dot{z} &= xz + b \\ \dot{w} &= -cz + dw\end{aligned}\tag{4.11}$$

Sistemdeki  $xz$  değişkeni, doğrusal olmayan tek bileşen olup,  $a, b, c, d$  sabit parametrelerini;  $x, y, z, w$  ise durum değişkenlerini ifade eder. Başlangıç koşulları ( $x_0 = -20, y_0 = 0, z_0 = 0, w_0 = 15$ ) ve sabit parametre değerleri ( $a = 0.25, b = 3, c = 0.5, d = 0.05$ ) olarak seçildiğinde, sistem hiperkaotik davranış göstermektedir. Dört boyutlu Rössler hiperkaotik sistemi, basit üç değişkenli kaos üreticisinden türetilmiştir.

Rössler'in hiperkaotik sistemlerinin tanıtılması, bu alandaki araştırmalara farklı bir bakış açısı kazandırmıştır. Bu çalışmalar, hem yeni sistemlerin tasarımı hem de mevcut sistemlerin çeşitli uygulama alanlarına entegrasyonu üzerine yoğunlaşmıştır. Örneğin, 2003 ve 2008 yıllarında, Rössler'in hiperkaotik sistemlerinin senkronizasyonu gerçekleştirilmiştir (Chen ve ark, 2004). 2003 yılında, iki Rössler sistemi arasında biri ana, diğeri ise köle olarak tanımlanmış ve köle sistem, ana sistemin senkronizasyonunu sağlamak amacıyla kullanılmıştır. 2008 yılında gerçekleştirilen bir başka araştırmada ise, Rössler hiperkaotik sistemlerinin senkronizasyonu başarıyla tamamlanmıştır (Runzi, 2008).

Hiperkaotik sistemlerin kontrolü de önemli bir araştırma konusudur. 2002'de kayan kipli kontrol yöntemi ile dört boyutlu Rössler hiperkaotik sistemi kontrol edilmiştir. Sonuçlar, sistemdeki bozukluklara rağmen kontrolörün Rössler sisteminin hiperkaotik hareketini stabilize edebildiğini göstermiştir. 2006'da ise Rössler hiperkaotik sisteminin takip kontrolü üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu tür kontrol yöntemleri, kaotik ve hiperkaotik sistemlerin dinamiklerini anlamamıza ve pratik uygulamalarına olanak tanır (Jang ve ark, 2002).

2006 yılında Kayan Kipli Kontrolün yanı sıra Rössler hiperkaotik sisteminin takip kontrolü çalışmalara konu olmuştur (Wang ve Wu, 2006). Elde edilen referans sinyali ve kontrolör tasarlanmıştır. Sistem Denklem 4.12’ de ki gibi ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -(y + z) \\ \dot{y} &= x + ay + w \\ \dot{z} &= xz + b \\ \dot{w} &= -cz + dw\end{aligned}\tag{4.12}$$

Bu çalışmada, kontrol girişini temsil eden  $u$  değişkeni kullanılmıştır. Referans sinyali olarak sinüs fonksiyonu ( $\sin x$ ) seçilmiş ve bu sinyale dayalı olarak kontrol girişi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır :

$$u = -0.75x - 1.25y - z - w - xw + 0.75\sin t - \cos t - 3$$

Sistemin kontrol edilmesinin ardından, bu çalışmada iki özdeş Rössler sisteminin senkronizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Rössler tabanlı hiperkaotik sistemler üzerine yapılan bir diğer önemli çalışma, Yanchuk ve Kapitaniak'a aittir. Bu çalışmada, iki özdeş ve simetrik Rössler sistemi birleştirilerek, 6 boyutlu dinamik bir sistem elde edilmiştir (Yanchuk ve Kapitaniak, 2001). Yeni önerilen sistem modeli Denklem 4.13’te sunulmuştur.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -(x_2 + x_3) \\ \dot{x}_2 &= (x_1 + ax_2) \\ \dot{x}_3 &= b + x_3(x_1 - c) + d(y_3 - x_3) \\ \dot{y}_1 &= -(y_2 + y_3) \\ \dot{y}_2 &= (y_1 + ay_2) \\ \dot{y}_3 &= b + y_3(y_1 - c) + d(y_3 - x_3)\end{aligned}\tag{4.13}$$

Sistemin kontrol edilmesinin ardından, çalışmada iki özdeş Rössler sisteminin senkronizasyonuna yer verilmiştir.

Rössler tabanlı hiperkaotik sistemler üzerine yapılan bir diğer önemli araştırma, bu sistemlerin senkronizasyon özelliklerini incelemeye yönelik olmuştur., Yanchuk ve Kapitaniak tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada, iki özdeş ve simetrik Rössler sistemi birleştirilerek 6 boyutlu dinamik bir sistem oluşturulmuştur. Modelin kaos-hiperkaos geçişini sayısal verilerle kanıtlayan ve yüksek boyutlu bir sistemde hiperkaosun varlığını ortaya koyan bu çalışma, önemli bir katkı sunmuştur. Bu

modelde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  parametrelerini ve  $d$  birleşme katsayısını tanımlamaktadır (Yanchuk, Kapitaniak, 2001).

Tam sayı dereceli sistemlerin ötesinde, kesirli dereceli sistemlerde de Rössler'in hiperkaotik modeli üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Li ve Chen, 2004 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, kesir dereceli ilk hiperkaotik sistemi önererek önemli bir adım atmışlardır. Bu sistem modeli, hiperkaotik davranışların kesir dereceli sistemlerde de incelenebileceğini göstermiştir (Li ve Chen, 2004).

Bu araştırmalarda, özellikle Rössler sistemlerinin kaos ve hiperkaos üretme kapasitesi vurgulanmıştır. Yüksek boyutlu sistemlerde ve kesir dereceli modellerde gerçekleştirilen bu çalışmalar, hiperkaosun farklı yapı ve parametreler altında nasıl ortaya çıkabileceğini ve kontrol edilebileceğini detaylı bir şekilde analiz etmiştir.

$$\begin{aligned}\frac{d^a x}{dt^a} &= -(y + z) \\ \frac{d^a y}{dt^a} &= x + ay + w \\ \frac{d^a z}{dt^a} &= xz + 3 \\ \frac{d^a w}{dt^a} &= -0.5z + 0.05w\end{aligned}\tag{4.14}$$

Denklem 4.14' te ki kesir dereceli (fractional order) sistemlerin incelenmesi, Rössler hiperkaotik modeliyle ilgili önemli çalışmalardan biridir. Kesir derecesini ifade eden  $\alpha$ , klasik tam sayılı Rössler sisteminde 1'e eşittir ve  $a = 0.25$  parametre değeri hiperkaotik davranışı gösterir. Ancak,  $\alpha$ 'nın farklı parametre değerlerinde de sistemin hiperkaotik yapıda olduğu görülmüştür. Çalışmalar, Rössler sisteminin kesir dereceli yapılar altında da hiperkaotik davranış sergileyebileceğini ortaya koymuştur.

Rössler hiperkaotik sistemlerinin senkronizasyonu üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 2008 yılında yapılan bir çalışmada, kesir dereceli Rössler sisteminin senkronizasyonu için Laplace Dönüşümü teorisi kullanılmıştır (Yu ve Li, 2008). 2012 yılında ise gözcü tabanlı bakış açısıyla senkronizasyon gerçekleştirilmiştir (Cafagna ve Grassi, 2012). Bu çalışmalar, farklı yöntemlerle Rössler sistemlerinin senkronizasyonunun mümkün olduğunu göstermiştir.

2004 yılında gerçekleştirilen bir araştırmada, dört boyutlu Rössler hiperkaotik sistemi çeşitli düzenlemelere tabi tutulmuş ve onbeş farklı Rössler sistemi

geliştirilmiştir (Nikolov ve Clodong, 2004). Örneğin, Rössler sisteminin Denklem 4.15' te ki  $b$  parametresi, doğrusal geri besleme yöntemleri kullanılarak değiştirilmiş ve böylece yeni sistemler ortaya konmuştur.

$$b \rightarrow b + b_1x + b_2y + b_3z + b_4w \quad (4.15)$$

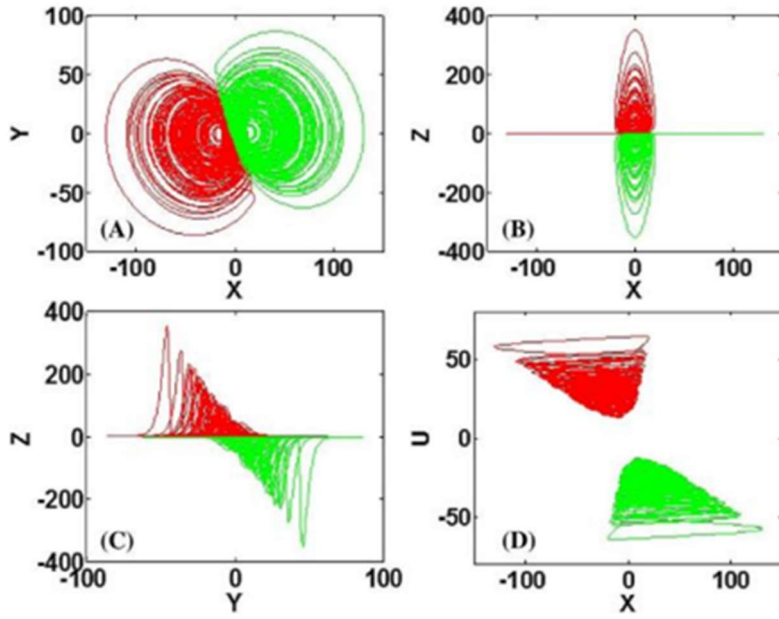
Rössler hiperkaotik sistemleri temel alınarak yeni hiperkaotik modeller geliştirilmiştir. Denklem 4.15' te yer alan  $b_1, b_2, b_3$  ve  $b_4$  değerlerinin farklı kombinasyonlarıyla oluşturulan bu sistemler, 15 farklı yapı ortaya koymuştur. Araştırılan tüm sistemlerin hiperkaotik özellikler gösterdiği belirlenmiştir.

Bu çalışmalar, Rössler sistemlerinin farklı parametrelerle nasıl değişiklik gösterdiğini ve hiperkaotik yapıların nasıl ortaya çıktığını anlamamıza yardımcı olmuştur. Hiperkaotik sistemlerin analizi, bu sistemlerin senkronizasyonu ve kontrolü için önemli bilgiler sunmuştur. Özellikle, yüksek boyutlu sistemlerde hiperkaosun varlığını kanıtlayan çalışmalar, kaos-hiperkaos geçişini anlamamıza yardımcı olmuştur.

Son olarak, 2018'de simetrik iki hiperkaotik Rössler atraktörü elde edilmiştir (Li ve ark, 2018). Bu çalışmada, simetrik yapı bazı değişkenlerin kutuplaşmasıyla oluşturulmuştur. Düzenlemeler sonucu elde edilen yeni sistem Denklem 4.16' da ki gibidir:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -(y + z) \\ \dot{y} &= x + ay + u \\ \dot{z} &= b \operatorname{sgn}(z) + x|z| \\ \dot{w} &= cu - dz \end{aligned} \quad (4.16)$$

Rössler tabanlı hiperkaotik sistemlerin tasarımı ve incelenmesi, kaos teorisi ve dinamik sistemler alanındaki çalışmalara büyük katkı sağlamaktadır. Bu sistemlerin senkronizasyonu ve kontrolü üzerine yapılan araştırmalar, hem teorik hem de pratik uygulamalar için önemli bilgiler sunmaktadır. Yeni hiperkaotik modellerin geliştirilmesi ve mevcut sistemlerin farklı alanlarda uygulanması, gelecekteki araştırmalar için geniş bir potansiyel sunmaktadır.



Şekil 4.2. Simetrik Rössler Çekerleri (Li ve ark, 2018)

#### 4.3. Lü Tabanlı Hiperkaotik Sistemler

Hiperkaotik sistemlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamış olan Lü tabanlı sistemler, pek çok araştırmanın temelini oluşturmuştur.

- **2006:** Lü, durum geri beslemeli kontrol yöntemiyle 4 boyutlu bir hiperkaotik sistem geliştirdi. Sabit parametreler kullanılarak farklı dinamik davranışlar gözlemlendi ve deneysel doğrulamalar yapıldı (Lü ve ark, 2006).
- **2009:** Lü tabanlı hiperkaotik sistem senkronize edilerek özdeş iki sistem, hibrit yapıda elde edildi. Durum değişkenlerinin senkronizasyonu ve anti-senkronizasyonu sağlandı (Sudheer ve Sabir, 2009).
- **2010:** Özdeş olmayan hiperkaotik Lü ve Liu sistemleri senkronize edildi. Bilinen parametreler için aktif kontrolör, bilinmeyenler için adaptif kontrolör tasarlandı (Wang, 2010).
- **Başka bir senkronizasyon çalışması:** Geri beslemeli pasifleştirme yöntemi kullanılarak Lü sistemi senkronize edildi. Sonlu-zaman pasifliği ve senkronizasyonu sağlandı (Sangpet ve Kuntanapreeda, 2020).
- **2017:** Güvenli haberleşme üzerine yapılan çalışmada, veriler şifrelenerek güvenli iletişim sağlandı. Kahuren-Loeve dönüşümü ve hiperkaotik Lü sisteminin senkronizasyonu birleştirildi (Smaoui ve ark, 2017).

- **2015:** 4 boyutlu Lü sisteminden türetilen 5 boyutlu hiperkaotik sistem geliştirildi (Wu ve ark, 2015).

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= a(y - x) \\
\dot{y} &= -xz + cy + v \\
\dot{z} &= xy - bz \\
\dot{w} &= xz + dw \\
\dot{v} &= -x - y
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Denklem 4.17' de sistem dört kontrol parametresine sahiptir. Bunlar ( $a=36$ ,  $b=3$ ,  $c=20$ ). Parametre değeri  $d$  ise  $-0.35$  ile  $1.3$  aralığında alınmıştır. Bu parametrelerle sistem hiperkaotik davranış sergilemektedir. Parametrelerin değiştirilmesiyle dinamik davranışlar gözlemlenmiş ve sonuçlar çatallanma diyagramları ve Lyapunov tekniğiyle analiz edilmiştir.

Wang ve ekibi, 3 boyutlu Lü kaotik sistemine nonlinear geri beslemeli bir kontrolör ekleyerek yenilikçi bir hiperkaotik model geliştirmiştir (Wang ve ark, 2006). Denklem 4.18' de verilen modelin dinamik davranışları, kontrol parametreleri ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$ ) değiştirilerek incelenmiştir. Ayrıca sistemin devre şeması tasarlanarak uygulamalı sonuçlar elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= a(y - x + yz) \\
\dot{y} &= -xz + by + u \\
\dot{z} &= xy - cz \\
\dot{u} &= -kx
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Elabbasy ve ekibi, yeni bir Lü tabanlı hiperkaotik sistem üzerinde çalışarak senkronizasyon sorununu çözmüştür (Elabbasy ve ark, 2006). Lyapunov kararlılık teoremiyle adaptif kontrolör tasarlayarak iki Özdeş Lü hiperkaotik sistemlerinin asimptotik senkronizasyonunu sağlamıştır. Bao ve Liu 2008 yılında, temelinde Lü kaotik sistemi yatan, dört boyutlu hiperkaotik geri beslemeli kontrolörlü sistem tasarlamıştır (Bao ve Liu, 2008).

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= a(y - x) + w \\
\dot{y} &= -xz + cy \\
\dot{z} &= xy - bz \\
\dot{w} &= kx + dyz
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Denklem 4.19' da ki sistem için parametreleri ( $a = 36$ ,  $b = 3$ ,  $c = 20$  ve  $d = 0.1$ ) olarak alınıp,  $k$  değeri  $[-2.661, 49.933]$  arasında seçildiğinde sistemde hiperkaotik davranış gözlemlenmiştir. Sistem periyodik ve yarı-periyodik davranışlar sergilemiş, geniş bir parametre aralığında hiperkaotik olduğu belirlenmiştir. Bao'nun sistemine benzer olan Zhou'nun 2009'da önerdiği sistemde parametreler  $(35, 3, 12, 0.5)$  olarak kullanılmış ve  $0 \leq k \leq 34.8$  aralığında hiperkaotik dinamikler gözlenmiştir (Ping ve ark, 2009). Bao'nun sistemi, Zhou'nunkinden daha geniş bir hiperkaotik yapıya sahiptir. Öte yandan, Lü tabanlı başka bir hiperkaotik sistem 2011 yılında Pang tarafından önerilmiş ve dinamik analizler, negatif geri besleme, basit geri besleme ve hız geri besleme yöntemleriyle kontrol edilmiştir (Pang ve Liu, 2011).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= cy - xz + w \\ \dot{z} &= -bz + xy \\ \dot{w} &= -k_1x - k_2y\end{aligned}\tag{4.20}$$

2012 yılında yapılan bir çalışmada, özdeş ve özdeş olmayan Pang hiperkaotik sistemleri senkronize edilmiştir. Bu çalışmada, adaptif kontrol ve Lyapunov kararlılık teoremlerinin kullanılmasıyla, parametreleri bilinmeyen hiperkaotik sistemlerin senkronizasyonunda adaptif kontrolün etkili bir yöntem olduğu vurgulanmıştır (Vaidyanathan ve Rajagopal, 2012). Pang sistemine ait model Denklem 4.20' de ifade edilmiştir. 2014 yılında Li ve ekibi, Lü tabanlı hiperkaotik sistemi memristör kullanarak geliştirmiş ve memristör kuvvetinin karmaşık dinamikler sağladığını göstermiştir (Li ve ark, 2014).

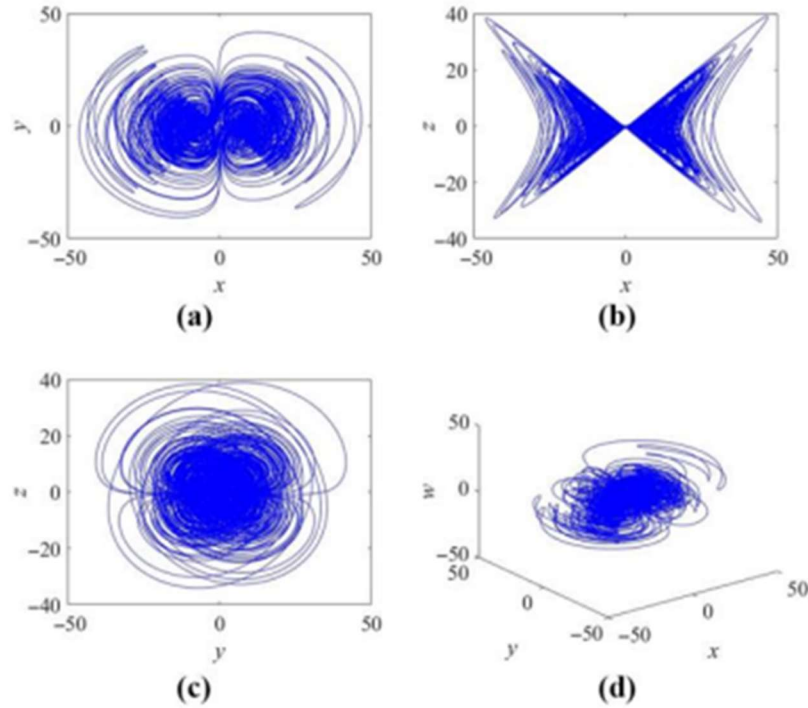
$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha(y - x) \\ \dot{y} &= -xz + \beta y - \rho W(w)x \\ \dot{z} &= -xy - \gamma z \\ \dot{w} &= x\end{aligned}\tag{4.21}$$

Denklem 4.21' de memristörlü modelin akım kontrollü memdüktans fonksiyonu  $W(w)=a+bx^2$  olarak belirlenmiş ve  $a$  ile  $b$  değerleri sırasıyla 4 ve 0.01 olarak seçilmiştir.  $(\alpha, \beta, \gamma) = (36, 20, 3)$  değerlerinde ve  $\rho$  ise  $[2.67 \ 3.26]$  aralığında seçildiğinde sistem hiperkaotiktir (Wang ve ark, 2016).

Ayrıca, 2020 yılında kesir dereceli Lü tabanlı hiperkaotik sistemler önerilmiştir (Li ve ark, 2020).

$$\begin{aligned}
 a^{D_t^q X} &= y - ax + kyz \\
 a^{D_t^q y} &= by - xz - w \\
 a^{D_t^q z} &= xy - cz \\
 a^{D_t^q w} &= dy - z
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Denklem 4.22' de ile verilen sistemin  $q = 0.98$  kesir derecesinde hiperkaos özelliği taşıdığı ve 3.92 kesir derecesinde dört kanatlı hiperkaotik çekere dönüşebildiği belirtilmiştir. Çalışma, kesir dereceli sistemlerin tamsayıli sistemlere kıyasla daha yüksek karmaşıklığa sahip olduğunu ve sadece bir parametre değışikliğı ile hiperkaotik çekirdeklerin (four-wing) elde edilebildiğini göstermiştir. Li tabanlı Hiperkaotik çeker yapısı Şekil 4.3' te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Dört kanatlı hiperkaotik atraktörler (Li ve ark, 2020).

#### 4.4. Chen Tabanlı Hiperkaotik Sistemler

Chen kaotik sistemleri, hiperkaotik sistemlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir modeldir (Chen ve Ueta, 1999). 2005 yılında Li ve Chen, Chen kaotik sistemini

kullanarak basit doğrusal geri beslemeli kontrolör ile dört boyutlu bir hiperkaotik sistem tasarlamıştır (Li ve ark, 2005). Li-Chen hiperkaotik sistemi 2011 ve 2014 yıllarında senkronizasyon ve güvenli haberleşme uygulamaları için kullanılmıştır (Smaoui ve ark, 2011; He ve Cai, 2014). 2018'de görüntü-seçici şifreleme için önerilen yöntemle yüksek çözünürlük ve güçlü gizlilik özellikleri sağlanmıştır (Zhou ve Wilke, 2018).

2008 yılında Li-Chen hiperkaotik sisteminin senkronizasyonu kesir dereceli sistem için sağlanmıştır (Wu ve Lu, 2008). Sistem kesir dereceli olarak düzenlenerek hiperkaotik performansın en düşük 3.72 olması gerektiği belirlenmiştir. Kesir dereceli sistem Denklem 4.23' te ki gibidir:

$$\begin{aligned}\frac{d^a x}{dt^a} &= a(y - x) + w \\ \frac{d^a y}{dt^a} &= bx - xz + cy \\ \frac{d^a z}{dt^a} &= xy - dz \\ \frac{d^a w}{dt^a} &= yz + rw\end{aligned}\tag{4.23}$$

Kesir derecesi  $0 \leq a \leq 1$  değer alır ve sistemin hiperkaotik çekirdekler üretmesini sağlar. Kesir derecesi  $\alpha=0.93$  ve parametreler değerleri ( $a=35$ ,  $b=7$ ,  $c=12$ ,  $d=3$ ,  $r=0.5$ ) seçildiğinde sistem hiperkaotik çekirdekler üretir ve senkronizasyon Laplace Dönüşüm Teorisi kullanılarak gerçekleştirilir. 2005'te Li ve Chen hiperkaotik sisteminin kontrolü için çeşitli yöntemler, özellikle lineer ve lineer olmayan geri beslemeli kontrol teknikleri kullanılmıştır (Yan, 2005). 2013'te ise Pontryagin'in Minimum Prensibi ve adaptif kontrol ile etkili bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir (Effati ve ark, 2013).

2006 yılında yeni bir hiperkaotik model Gao ve ekibi tarafından sunulmuştur (Gao ve ark, 2006). Sisteme bir kontrolör eklenmesiyle oluşturulan yeni model Denklem 4.24' te ki gibidir:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= 36(y - x) \\
\dot{y} &= -16x - xz + 28y - w \\
\dot{z} &= xy - 3z \\
\dot{w} &= x + k
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Gao'nun önerdiği dört boyutlu hiperkaotik sistem,  $k$  parametresi değiştirildiğinde hiperkaostan limit çevrimine kadar çeşitli dinamik davranışlar sergiler ve bu özellikleri sayesinde güvenli haberleşme ve şifreleme uygulamalarında kullanılabilir.

2007'de adaptif kontrol yöntemi kullanılarak sistemin senkronizasyonu sağlanmıştır (Gao ve ark, 2007).

Yeni sistemin  $k$  parametresindeki değişiklikler, hiperkaostan limit çevrime kadar çeşitli dinamik davranışlar sergilemektedir. Bu zengin dinamikler, güvenli haberleşme ve şifreleme gibi bilgi teknolojileri alanlarında uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. 2016'da, bu sistem DNA kodlama ve görüntü şifrelemesinde kullanılmaya başlanmıştır. DNA kodlamasıyla entegre edilmiş Gao'nun sistemi, yeni bir görüntü şifreleme algoritması sunarak sistem güvenliğini  $8.4 \times 10^{128}$  anahtar alanıyla artırmıştır (Zhang ve ark, 2016). 2009'da ise, Gao'nun dört boyutlu hiperkaotik sistemi kesir dereceli olarak yeniden ele alınmış ve hiperkaotik davranış için en küçük derecenin 2.88 olduğu belirlenmiştir (Wu ve ark, 2009). Sistem modeli ve parametreleri Denklem 4.25' te ki gibi ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\frac{d^a x}{dt^a} &= a(y - x) \\
\frac{d^a y}{dt^a} &= dx - xz + cy + w \\
\frac{d^a z}{dt^a} &= xy - dz \\
\frac{d^a w}{dt^a} &= x + k
\end{aligned} \tag{4.25}$$

( $a=35, b=3, c=28, d=-16, k=0.5$ ) parametreleriyle,  $0.72 \leq \alpha \leq 1$  aralığında bu sistem hiperkaotik davranış göstermektedir. Sistem, bilinmeyen parametreler için senkronize edilmiştir ve uygun Lyapunov fonksiyonu ile aktif kontrol parametreleri kullanılarak senkronizasyonu sağlanmıştır (Wu ve Lu, 2008).

#### 4.5. Liu Tabanlı Hiperkaotik Sistemler

Hiperkaotik sistemlerin üretiminde kullanılan bir diğer yöntem Liu kaotik sistemleridir. Literatürdeki çeşitli Liu hiperkaotik sistemleri şunlardır:

2006 yılında, 3 boyutlu Liu kaotik sistemine, yeni bir durum değişkeni olarak  $w$  ekleyerek hiperkaotik düzeyde 4 boyutlu model geliştirmiştir (Wang ve Liu, 2006). Sistem modeli ve parametreleri aşağıdaki Denklem 4.26' da verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= bx - kxz + w \\ \dot{z} &= hx^2 - cz \\ \dot{w} &= -dx\end{aligned}\tag{4.26}$$

Sistemdeki ( $a=10$ ,  $b=40$ ,  $c=2.5$ ,  $h=4$ ,  $k=1$ ) parametreleri sabit tutulup  $d$  parametresine farklı değerler verilerek sistemde farklı kaotik davranışlar gözlemlenmiştir. Bilgisayar simülasyonları ve elektronik devre uygulamaları uyumlu sonuçlar vermiştir.

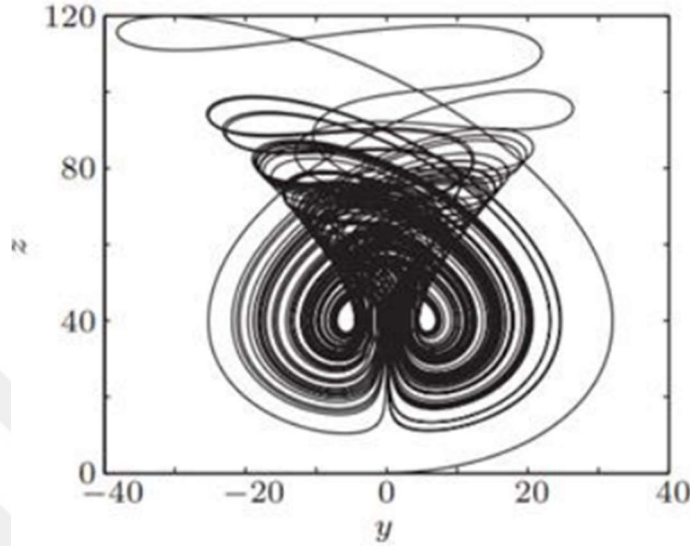
2009 yılında Dou ve ekibi tarafından, Wang-Liu hiperkaotik sisteminin kontrolü yönündeki çalışmada, çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak sistem kontrol edilmiştir (Dou ve ark, 2009).

2012'de, dört boyutlu Liu hiperkaotik sisteminin senkronizasyonu gerçekleştirilmiş ve geri-adım kontrol yöntemi uygulanarak iki özdeş sistem senkronize edilmiştir. Bu yöntem sistematik bir prosedür sunar ve türev kullanılmadan uygulanabilir (Rasappan ve Vaidyanathan, 2012).

2007'de Liu Chong tarafından önerilen yeni Liu tabanlı hiperkaotik sistemin matematiksel modeli Denklem 4.27' de verilmiştir (Chong, 2007). Bu sistemde ( $a=10$ ,  $b=40$ ,  $c=2.5$ ,  $d=2.5$ ,  $e=1$ ,  $h=4$ ,  $k=1$ ,  $m=1$ ) parametreleri kullanılmış ve ters kelebek şeklinde hiperkaotik çekirdekler ürettiği belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= bx + kxz + ew \\ \dot{z} &= -cz - hx^2 + mw \\ \dot{w} &= -dy\end{aligned}\tag{4.27}$$

2013 yılında, Liu ve ekibi hiperkaotik sisteminden kesir dereceli yeni bir model türetilmiş ve 3.6'dan büyük derece değerlerinde hiperkaotik yapı gösterdiği analitik olarak belirlenmiştir (Liu ve ark, 2013). Sistemin grafiği Şekil 4.4' te gösterilmektedir.



**Şekil 4.4.** Liu-Xin sisteminin atraktör yapısı (Liu ve ark, 2013).

2021 yılında, Liu-Xin sisteminin senkronizasyonu üzerine kesir dereceli olarak kapsamlı bir araştırma yapmıştır (Bouridah ve ark, 2021). Durağan hata geri beslemesi kullanılarak, belirli bir zaman gecikmesiyle kesir dereceli hiperkaotik sistemlerin senkronizasyonu sağlanmıştır.

#### 4.6. Qi Tabanlı Hiperkaotik Sistemler

2007'de Chen ve ekibi, üç boyutlu kaotik Qi sistemine durum geri beslemesi ekleyerek yeni bir dört boyutlu hiperkaotik model tasarlamıştır. Bu model, tek bir denge noktasına sahip olup, çeşitli kaotik davranışlar sergilemektedir. Modelin matematiksel denklemleri Denklem 4.28' de sunulmuştur (Chen ve ark, 2007).

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= a(y - x) + eyz \\
 \dot{y} &= cx - dxz + y + u \\
 \dot{z} &= xy - bz \\
 \dot{u} &= -y
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Sistemde parametre değerleri ( $a=35$ ,  $b=4.9$ ,  $c=25$ ,  $d=5$ ,  $e=35$ ,  $k=22$ ) olduğunda, Lyapunov üsteller  $\lambda_{L1} = 4.031$ ,  $\lambda_{L2} = 0.252$ ,  $\lambda_{L3} = 0$ ,  $\lambda_{L4} = -43.182$  olarak

bulunmuştur. 2011 yılında, aktif kontrolörlerle özdeş ve özdeş olmayan Lorenz sistemleriyle senkronizasyon sağlanmıştır (Jia, 2007; Sarasu ve Sundarapandian, 2011). 2010 yılında Rabinovich sistemi olarak bilinen sistem, farklı parametrelerle yeniden incelenmiş ve farklı Lyapunov üstelleri elde edilmiştir (Liu ve ark, 2010).

2017’de, Rabinovich sistemi kesir dereceli hiperkaotik modele dönüştürülmüş ve çeşitli kesir derecelerinde analiz edilmiştir. Sistem, kesir dereceleri eşit olduğunda hiperkaotik, eşit olmayan derecelerle ise oransız kesir dereceli olarak değerlendirilmiştir (He ve Chen, 2017).

Aynı yıl, farklı kontrol yöntemleriyle (doğrusal geri besleme, kayan kipli kontrol, pasif kontrol) Denklem 4.28 kontrol edilmiştir. Çalışma sonucunda, kayan kipli kontrolün en yüksek performansı sağladığı belirlenmiştir (Kocamaz ve ark, 2017).

2008’de Wang ve ekibi tarafından önerilen Qi tabanlı Denklem 4.29’ da belirtilen sistem, çeşitli kaotik davranışlar sergileyen dinamikler göstermiştir (Wang ve ark, 2008).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) + yz \\ \dot{y} &= cx - xz - y - \frac{1}{2}w \\ \dot{z} &= xy - 3z \\ \dot{w} &= \frac{1}{2}xz - bw\end{aligned}\tag{4.29}$$

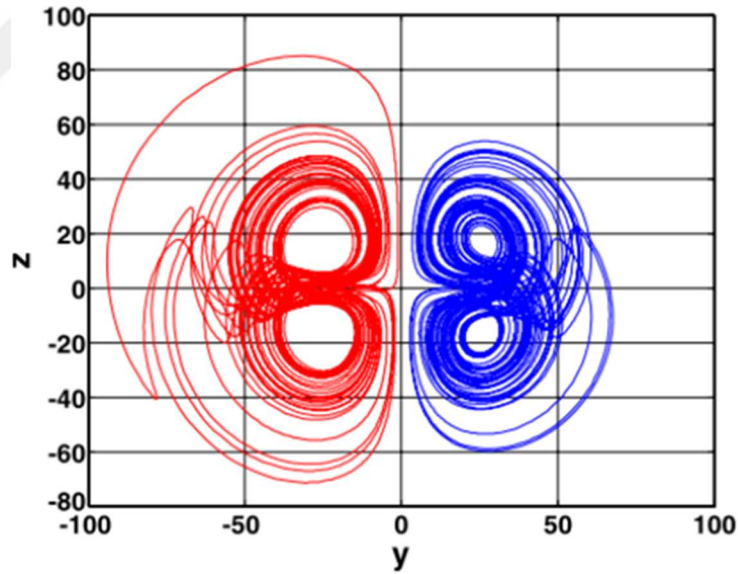
2009’da, 3 boyutlu Qi sistemine eklenen yeni değişkenlerle, Denklem 4.30’ da verilen yüksek Lyapunov üstellerine sahip bir hiperkaotik model geliştirmiştir (Qi ve ark, 2009). Model, yüksek rastgelelik ve karmaşıklık sunarak mühendislik uygulamalarında tercih edilmesini sağlar. 2010’da iki özdeş Qi-Wyk hiperkaotik sistemi senkronize edilmiş ve güvenlik açısından avantajlar sağlanmıştır (Sudheer ve Sabir, 2010).

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= a(x_2 - x_1) + x_2x_3 \\ \dot{x}_2 &= b(x_1 + x_2) - x_1x_3 \\ \dot{x}_3 &= -cx_3 - ex_4 + x_1x_2 \\ \dot{x}_4 &= -dx_4 + fx_3 + x_1x_2\end{aligned}\tag{4.30}$$

2010’da, doğrusal olmayan geri beslemeli kontrolörle yeni bir Qi tabanlı hiperkaotik sistem önerilmiştir. Kontrol parametresi değiştirilerek kaotik, hiperkaotik ve periyodik dinamiklere rastlanmıştır (Yujun ve ark, 2010).

Aynı yıl, Cang ve ekibi tarafından başka bir Qi tabanlı hiperkaotik sistem geliştirilmiştir. Sistem Denklem 4.31’ de ki şekilde ifade edilmiştir. Bu dört kanatlı çekerler üreten modelin matematiksel ifadeleri Denklemden Sistem ( $a=50$ ,  $b=-16$ ,  $c=10$ ,  $d=0.2$ ,  $e=10$ ,  $f=16$ ,  $g=0.5$ ) parametre değerlerinde çalıştırıldığında, dört kanatlı çekerler ve simetrik başlangıç koşullarıyla iki-kanatlı çekerler gözlemlenmiştir. Şekil 4.5 'te  $y$ - $z$  düzleminde görülen Cang sistemi çekerleri yer almaktadır (Cang ve ark, 2010).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -a - ew + yz \\ \dot{y} &= by + xz \\ \dot{z} &= -cz + fw - xy \\ \dot{w} &= dw - gz\end{aligned}\tag{4.31}$$



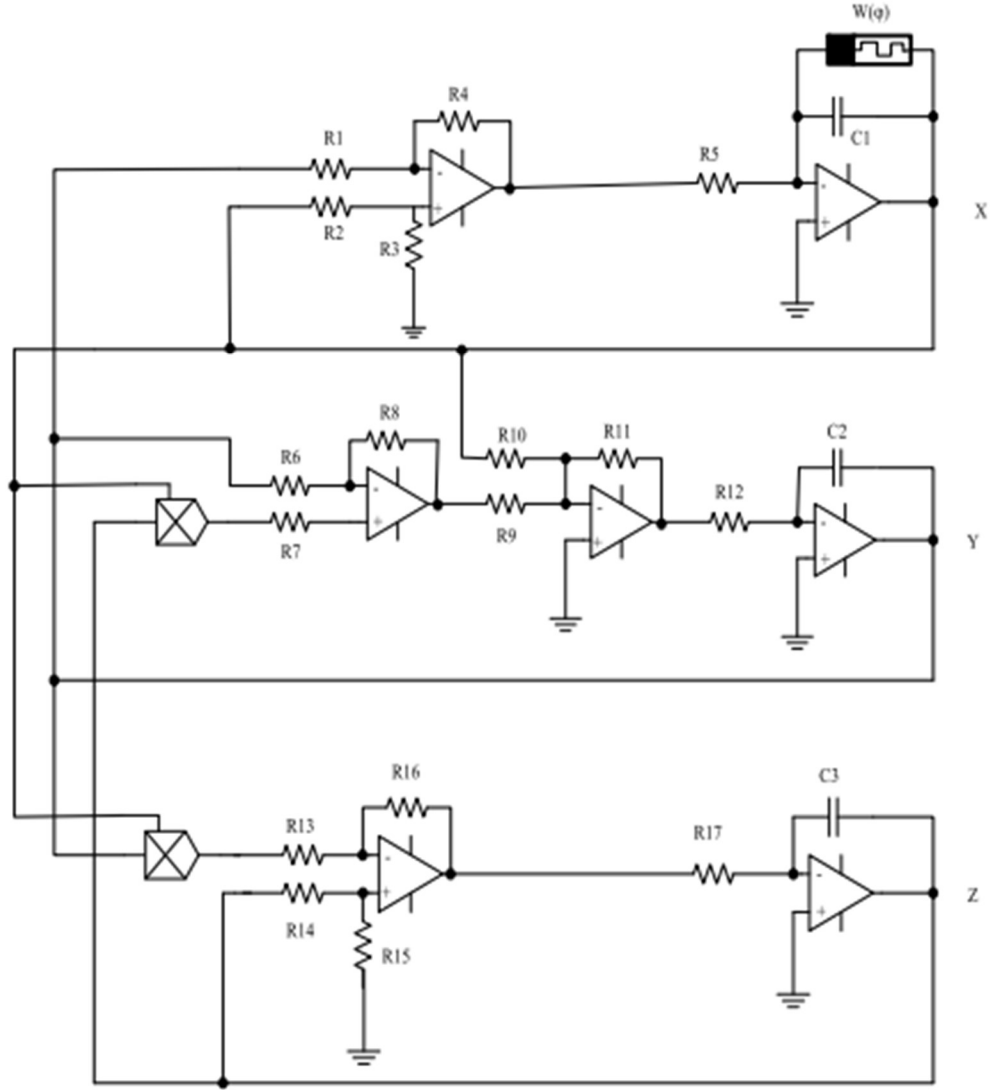
**Şekil 4.5.** Cang sistemi simetrik çeker yapısı (Cang ve ark, 2010).

Son olarak 2014 yılında 3 boyutlu Qi kaotik sistemin bazı parametrelerini değiştirilerek geri beslemeli 4 boyutlu hiperkaotik yeni bir sistem üzerinde çalışılmıştır ve sistemin hiperkaotik davranışlar sergilediği izlenmiştir (Li ve ark, 2014).



## 5. MEMRİSTÖR TABANLI HİPERKAOTİK LORENZ SİSTEMİNİN SENKRONİZASYONU

### 5.1. Memristör Tabanlı Hiperkaotik Lorenz Sisteminin Kaotik Analizi



Şekil 5.1. Memristör tabanlı Lorenz devresi (Wen ve ark, 2013).

Yukarıda Şekil 5.1' de ele alınan memristör tabanlı Lorenz devresinden aşağıdaki denklemler elde edilmektedir (Wen ve ark, 2013):

$$\begin{cases} -R_5 C_1 \dot{X}(t) = -\frac{R_4}{R_1} Y(t) + (1 + \frac{R_4}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} X(t) + R_5 W(\varphi(t)) X(t) \\ -R_{12} C_2 \dot{Y}(t) = -\frac{R_{11}}{R_{10}} X(t) + \frac{R_{11}}{R_9} (\frac{R_8}{R_6} Y(t) + \frac{R_8}{R_7} X(t) Z(t)) \\ -R_{17} C_3 \dot{Z}(t) = -\frac{R_{16}}{R_{13}} X(t) Y(t) + (\frac{1}{R_{16}} + \frac{1}{R_{13}}) \frac{R_{15} R_{16}}{R_{14} + R_{15}} Z(t) \\ \dot{\varphi}(t) = -X(t) \end{cases} \quad (5.1)$$

Yukarıdaki denklemlerde kolaylık olması açısından

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]^T = [X(t), Y(t), Z(t), \varphi(t)]^T, \quad (1 + \frac{R_4}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{1}{R_5 C_1} = \omega_1,$$

$$\frac{R_4}{R_1} \frac{1}{R_5 C_1} = \omega_2, \quad \frac{R_{11}}{R_{10}} \frac{1}{R_{12} C_2} = \omega_3, \quad (\frac{1}{R_{16}} + \frac{1}{R_{13}}) \frac{R_{15} R_{16}}{R_{14} + R_{15}} \frac{1}{R_{17} C_3} = \omega_4, \quad C_1 = 1,$$

$\frac{R_{11}}{R_9} \frac{R_8}{R_6} \frac{1}{R_{12} C_2} = 1, \frac{R_{11}}{R_9} \frac{R_8}{R_7} \frac{1}{R_{12} C_2} = 1, \frac{R_{16}}{R_{13}} \frac{1}{R_{17} C_3} = 1$  varsayımları yapılmıştır (Wen ve ark, 2013).

Bu nedenle memristör tabanlı Lorenz sistemini şöyle tanımlanabilir (Wen ve ark, 2013):

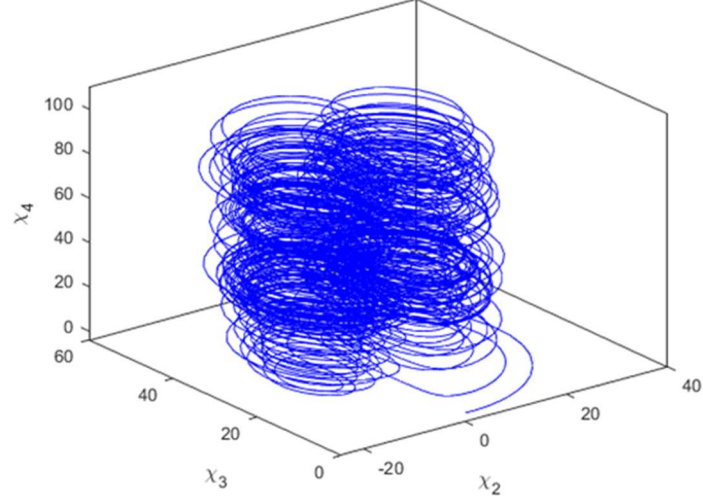
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\omega_1 x_1 - W(x_4) x_1 + \omega_2 x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega_3 x_1 - x_2 - x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - \omega_4 x_3 \\ \dot{x}_4 = -x_1 \end{cases} \quad (5.2)$$

Burada  $x_1, x_2, x_3, x_4$  durum değişkenleri ve  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  sistemin sabit parametreleridir.

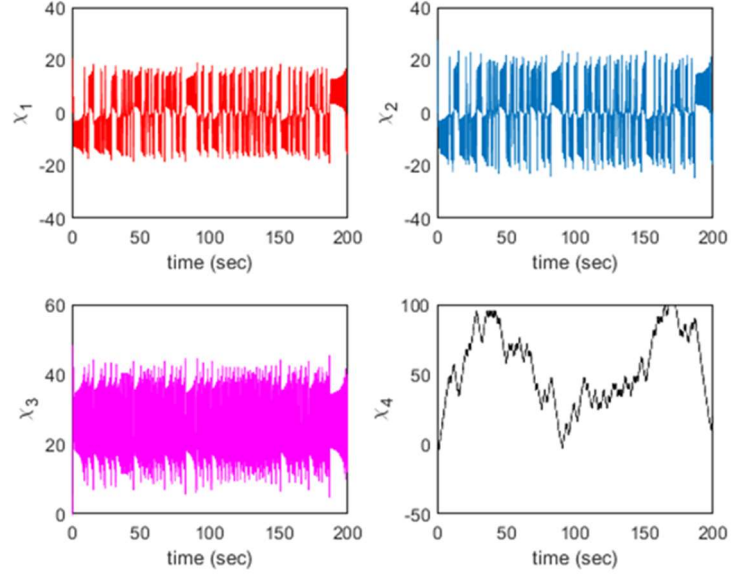
Parçalı doğrusal  $W(x_4)$  fonksiyonunu aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$W(x_4) = \begin{cases} a, |x_4| \leq 1; \\ b, |x_4| > 1. \end{cases} \quad (5.3)$$

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' te gösterildiği gibi parametreler  $\omega_1 = 8, \omega_2 = 15, \omega_3 = 28, \omega_4 = 8/3, a = 5$  ve  $b = 8$  olarak seçildiğinde Denklem 5.2' de ki sistem,  $(10^4, 0, 0, 0)$  başlangıç koşulları altında kaotiktir.



**Şekil 5.2.** Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin durum yörüngeleri.



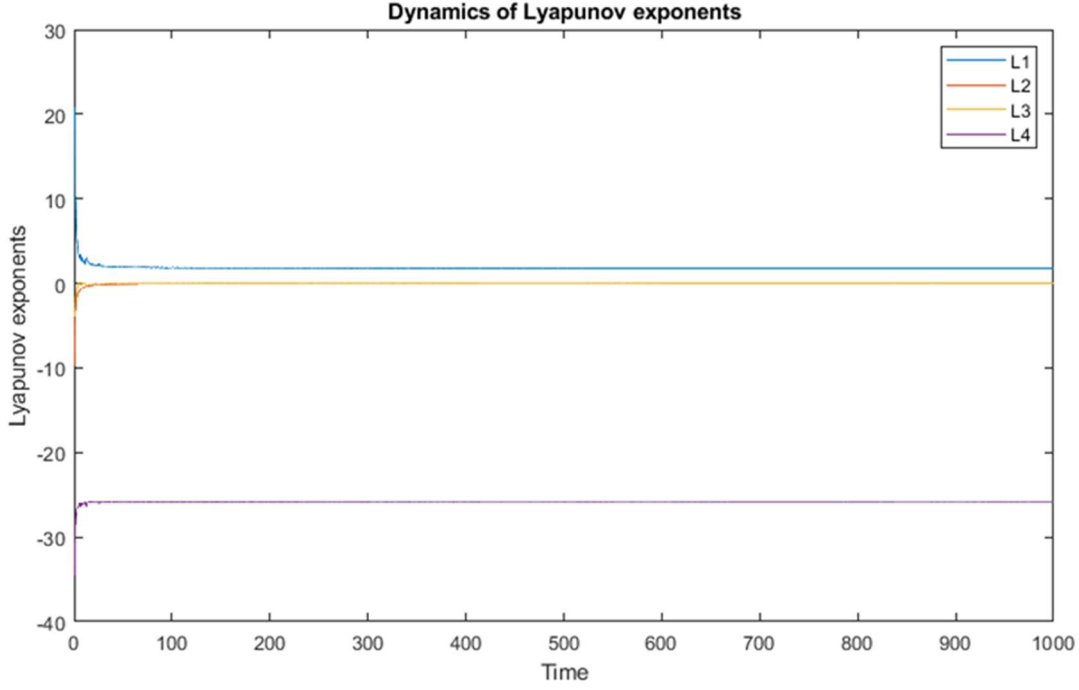
**Şekil 5.3.** Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin faz portreleri.

Şekil 5.4' te zamana göre değişimleri verilen sistemin Lyapunov üstelleri  $L_1 = 1.768023$ ,  $L_2 = -0.004860$ ,  $L_3 = 0.005835$ ,  $L_4 = -25.789058$  olarak hesaplanmıştır. Sistemin en az iki pozitif üstelinin olması ( $L_1$  ve  $L_3$ ) sistemin hiperkaotik olduğunu göstermektedir.

Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin Lyapunov fraktal boyutu (Kaplan-York) Denklem 5.4 ile hesaplanmıştır.

$$D_{KY} = j + \frac{\sum_{i=1}^j L_i}{|L_{j+1}|} = 3 + \frac{L_1 + L_2 + L_3}{|L_4|} = 3.07 \quad (5.4)$$

Görüldüğü üzere sonucun kesirli çıkması sistemin kaotik davranış sergilediğini göstermektedir.



Şekil 5.4. Sistemin Lyapunov üstelleri grafiği.

### 5.1.1. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin pasif kontrol metodu ile senkronizasyonu

Bu bölümde memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin pasif kontrol metoduyla senkronizasyonunu inceleyeceğiz.

Denklem 5.5 numaralı sistemimizi sürücü sistemi olarak aldığımızda (Wen ve ark, 2013),

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\omega_1 x_1 - W(x_4)x_1 + \omega_2 x_2, \\ \dot{x}_2 = \omega_3 x_1 - x_2 - x_1 x_3, \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - \omega_4 x_3, \\ \dot{x}_4 = -x_1, \end{cases} \quad (5.5)$$

cevap sistemimiz aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\omega_1 y_1 - W(y_4) y_1 + \omega_2 y_2 + u_1, \\ \dot{y}_2 = \omega_3 y_1 - y_2 - y_1 y_3, \\ \dot{y}_3 = y_1 y_2 - \omega_4 y_3, \\ \dot{y}_4 = -y_1 + u_2, \end{cases} \quad (5.6)$$

Buradaki  $u_1$  ve  $u_2$  cevap sistemindeki tasarlanacak kontrolörlerdir. Hata durumları  $e_1 = y_1 - x_1, e_2 = y_2 - x_2, e_3 = y_3 - x_3$  ve  $e_4 = y_4 - x_4$  olsun. Denklem 5.5 ve 5.6' dan hata dinamikleri şu şekilde olur:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\sigma_1 e_1 + \sigma_2 e_2 - W(y_4) y_1 + W(x_4) x_1 + u_1, \\ \dot{e}_2 = \sigma_3 e_1 - e_2 - y_1 y_3 + x_1 x_3, \\ \dot{e}_3 = -\sigma_4 e_3 + y_1 y_2 - x_1 x_2, \\ \dot{e}_4 = -e_1 + u_2. \end{cases} \quad (5.7)$$

Burada

$$\begin{aligned} -y_1 y_3 + x_1 x_3 &= -y_1 e_3 - x_3 e_1. \\ y_1 y_2 - x_1 x_2 &= y_1 e_2 + x_2 e_1. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Denklem 5.8, Denklem 5.7' de yerine yazıldığında hata sistemin aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\omega_1 e_1 + \omega_2 e_2 - W(y_4) y_1 + W(x_4) x_1 + u_1, \\ \dot{e}_2 = \omega_3 e_1 - e_2 - y_1 e_3 - x_3 e_1, \\ \dot{e}_3 = -\omega_4 e_3 + y_1 e_2 + x_2 e_1, \\ \dot{e}_4 = -e_1 + u_2. \end{cases} \quad (5.9)$$

Durum değişkenleri  $e_1$  ve  $e_4$ 'ün sistemin çıktıları olduğunu  $Z_1 = e_2, Z_2 = e_3, Y_1 = e_1, Y_2 = e_4, z = [Z_1 Z_2]^T$  ve  $y = [Y_1 Y_2]^T$  olduğunu varsaydığımızda hata dinamik sistemi normal formda ifade edilebilir:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = \omega_3 Y_1 - Z_1 - y_1 Z_2 - x_3 Y_1, \\ \dot{Z}_2 = -\omega_4 Z_2 + y_1 Z_1 + x_2 Y_1, \\ \dot{Y}_1 = -\omega_1 Y_1 + \omega_2 Z_1 - W(y_4) y_1 + W(x_4) x_1 + u_1, \\ \dot{Y}_2 = -Y_1 + u_2, \end{cases} \quad (5.10)$$

Buradan

$$\begin{cases} \dot{z} = f_0(z) + p(z, y)y, \\ \dot{y} = b(z, y) + a(z, y)u, \end{cases} \quad (5.11)$$

Burada

$$f_0(z) = \begin{bmatrix} -Z_1 - y_1 Z_2 \\ -\omega_4 Z_2 + y_1 Z_1 \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

$$p(z, y) = \begin{bmatrix} \omega_3 - x_3 & 0 \\ x_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.13)$$

$$b(z, y) = \begin{bmatrix} -\omega_1 Y_1 + \omega_2 Z_1 - W(y_4)y_1 + W(x_4)x_1 \\ -Y_1 \end{bmatrix}, \quad (5.14)$$

$$a(z, y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Pasif kontrol yasası aşağıdaki diferansiyel denklemlerle ifade edilir (Qi ve ark, 2004; Chen ve Liu, 2010; Wang ve Liu, 2007; Kemih, 2009):

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x), \end{cases} \quad (5.16)$$

Burada  $x \in R^n$  durum değişkeni,  $u \in R^m$  giriş,  $y \in R^m$  çıkıştır.  $f(x)$  ve  $g(x)$  düzgün vektör alanıdır.  $h(x)$  ise düzgün bir eşlemedir.

Eğer Sistem 5.16,  $x=0'$  da bağıl dereceye  $[1,1,...]$  sahipse, Sistem 5.16 minimum fazlı bir sistemdir. Bu durumda Sistem 5.11 pasif bir sisteme eşdeğer olacak ve asimptotik kararlı olacaktır.

$$u = a(z, y)^{-1} \left[ -b^T(z, y) - \frac{\partial}{\partial z} W(z) p(z, y) - \alpha y + v \right], \quad (5.17)$$

burada  $W(z)$ ,  $f_0(z)$ 'nin Lyapunov fonksiyonudur.  $\alpha$  pozitif gerçek bir değerdir.  $v$  referans girişine bağlanan harici bir sinyaldir.

Depolama fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilirse:

$$V(z, y) = W(z) + \frac{1}{2}(y^2), \quad (5.18)$$

Burada

$$W(z) = \frac{1}{2}(Z_1^2 + Z_2^2), \quad (5.19)$$

$W(0) = 0$  ise,  $W(z)$  Lyapunov fonksiyonudur.

Denklem 5.19' a göre  $W(z)$  ' nin türevini alarak şunu elde ederiz:

$$\dot{W}(z) = \frac{d}{dt}W(z) = \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Z_1 - y_1 Z_2 \\ -\omega_4 Z_2 + y_1 Z_1 \end{bmatrix} = -Z_1^2 - \omega_4 Z_2^2. \quad (5.20)$$

Denklem 5.10 ve Denklem 5.17' den  $u_1$  ve  $u_2$  kontrolörleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} u_1 &= \omega_1 Y_1 - \omega_2 Z_1 + W(y_4)y_1 - W(x_4)x_1 - \omega_3 Z_1 + x_3 Z_1 - x_2 Z_2 - \alpha_1 Y_1 + v_1, \\ u_2 &= Y_1 - \alpha_2 Y_2 + v_2, \end{aligned} \quad (5.21)$$

Burada  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  pozitif sabitler,  $v_1$  ve  $v_2$  harici giriş sinyalleridir. Dönüşümler geri alındığında kontrolörler aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} u_1 &= \omega_1 Y_1 - \omega_2 Z_1 + W(y_4)y_1 - W(x_4)x_1 - \omega_3 Z_1 + x_3 Z_1 - x_2 Z_2 - \alpha_1 Y_1 + v_1, \\ u_2 &= Y_1 - \alpha_2 Y_2 + v_2, \end{aligned} \quad (5.22)$$

Böylece memristör tabanlı hiperaotik Lorenz cevap sistemi, Denklem 5.6, pasif kontrol ile senkronizasyonu Denklem 5.22 ile sağlanmış olur.

### 5.1.2. Pasif kontrol benzetim çalışmaları

Pasif kontrol metoduyla senkronizasyonu sağlanan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin sayısal simülasyonları MATLAB üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon algoritması olarak ode45 kullanılmıştır.

Parametreler:

$$\omega_1 = 8, \omega_2 = 5, \omega_3 = 28, \omega_4 = \frac{8}{3}, a = 5, b = 8, \alpha_1 = 2, v_1 = 0, \alpha_2 = 2, v_2 = 0$$

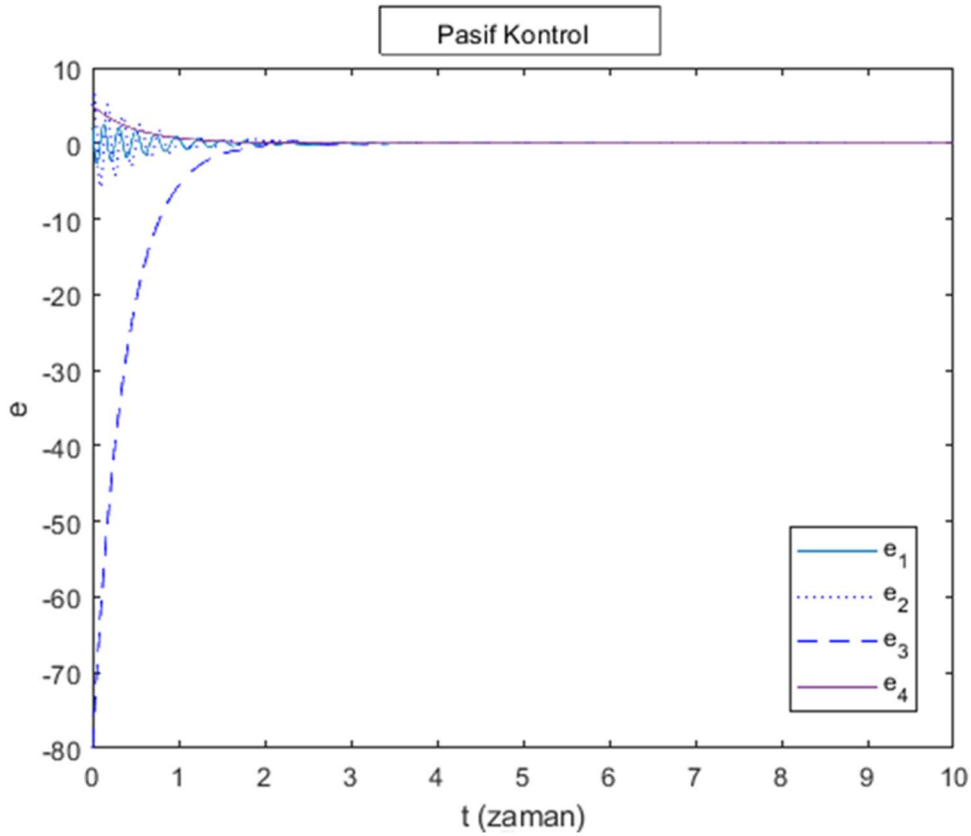
olarak seçilmiştir.

Senkronizasyon simülasyonunun, başlangıç koşulları sürücü sistem ve cevap sistemi için sırasıyla  $x_1(0) = 0.0001$ ,  $x_2(0) = 0$ ,  $x_3(0) = 0$ ,  $x_4(0) = 0$  ve  $y_1(0) = 2$ ,  $y_2(0) = 5$ ,  $y_3(0) = -80$ ,  $y_4(0) = 5$  olarak seçilmiştir.

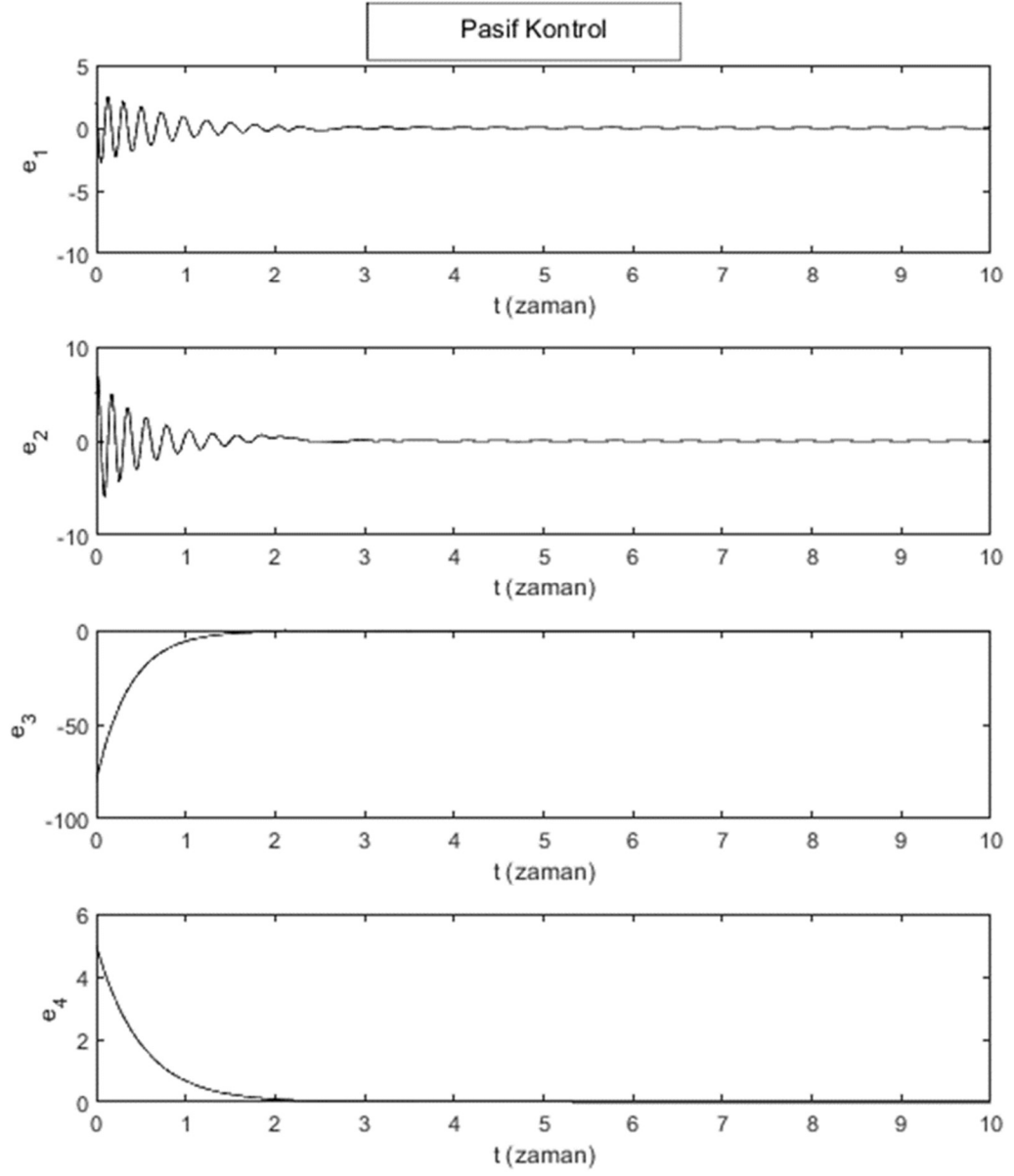
Şekil 5.5, pasif kontrol metodu ile senkronize edilen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatasını göstermektedir.

Şekil 5.6,  $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$  senkronizasyon hatalarını ayrı grafiklerde göstermektedir.

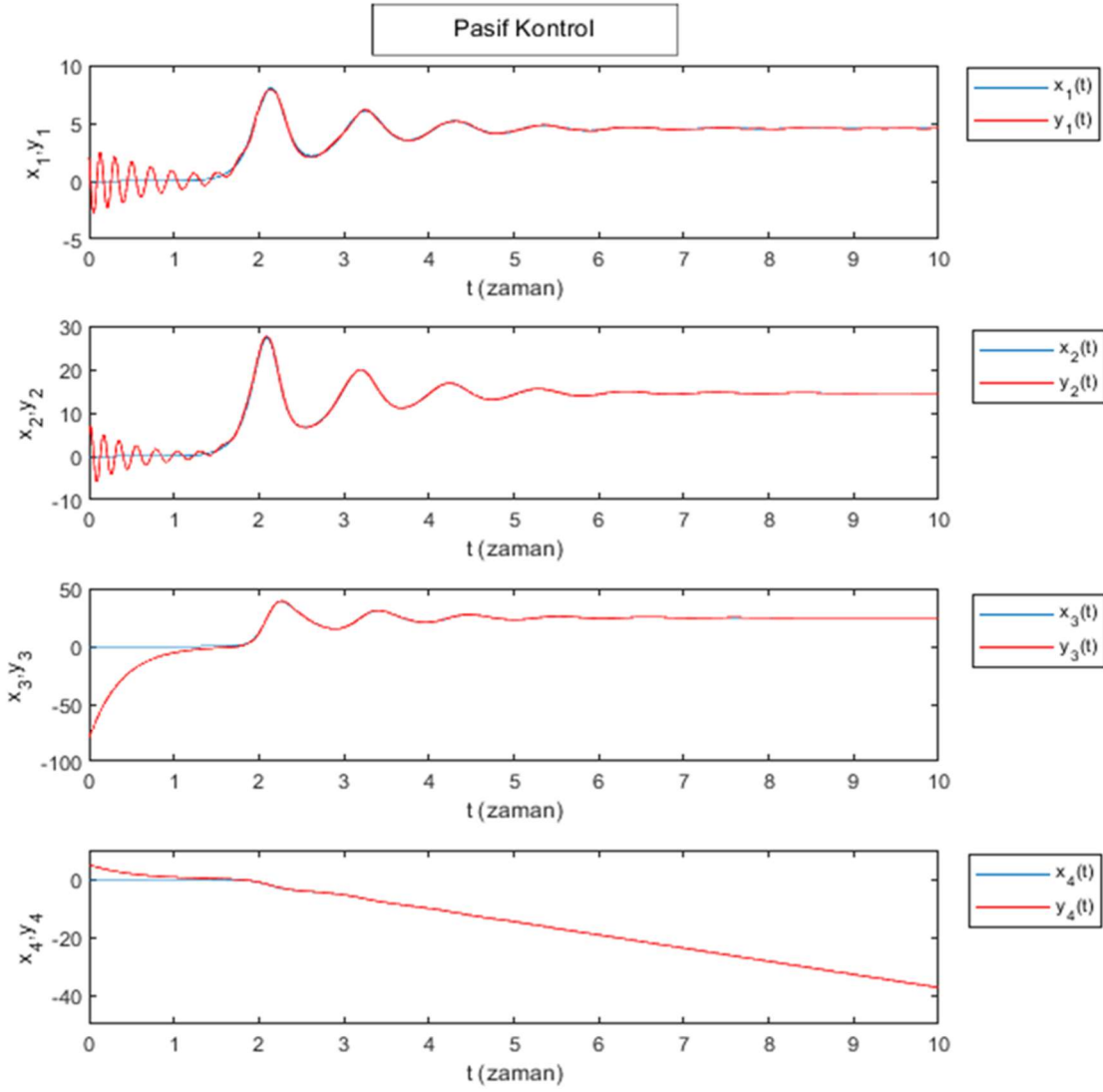
Şekil 5.7, pasif kontrol metodu ile senkronize edilen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonunu göstermektedir.



**Şekil 5.5.** Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatası (pasif kontrol).



**Şekil 5.6.**  $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$  senkronizasyon hataları (pasif kontrol).



**Şekil 5.7.** Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonu (pasif kontrol).

### 5.1.3. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin aktif kontrol metodu ile senkronizasyonu

Bu bölümde memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin aktif kontrol metoduyla senkronizasyonunu inceleyeceğiz.

Denklem 5.23 numaralı sistemimizi sürücü sistemi olarak aldığımızda (Wen ve ark, 2013):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\omega_1 x_1 - W(x_4)x_1 + \omega_2 x_2, \\ \dot{x}_2 = \omega_3 x_1 - x_2 - x_1 x_3, \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - \omega_4 x_3, \\ \dot{x}_4 = -x_1, \end{cases} \quad (5.23)$$

cevap sistemimiz aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\omega_1 y_1 - W(y_4) y_1 + \omega_2 y_2 + u_1(t), \\ \dot{y}_2 = \omega_3 y_1 - y_2 - y_1 y_3 + u_2(t), \\ \dot{y}_3 = y_1 y_2 - \omega_4 y_3 + u_3(t), \\ \dot{y}_4 = -y_1 + u_4(t), \end{cases} \quad (5.24)$$

Buradaki  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$  ve  $u_4(t)$  cevap sistemindeki tasarlanacak kontrolörlerdir. Hata durumları  $e_1 = y_1 - x_1$ ,  $e_2 = y_2 - x_2$ ,  $e_3 = y_3 - x_3$  ve  $e_4 = y_4 - x_4$  olsun. Denklem 5.23 ve Denklem 5.24' ten hata dinamikleri şu şekilde olur:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\omega_1 e_1 + \omega_2 e_2 - W(y_4) y_1 + W(x_4) x_1 + u_1(t), \\ \dot{e}_2 = \omega_3 e_1 - e_2 - y_1 y_3 + x_1 x_3 + u_2(t), \\ \dot{e}_3 = -\omega_4 e_3 + y_1 y_2 - x_1 x_2 + u_3(t), \\ \dot{e}_4 = -e_1 + u_4(t), \end{cases} \quad (5.25)$$

$u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$  ve  $u_4(t)$  kontrol fonksiyonları aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{cases} u_1(t) = -W(x_4) x_1 + W(y_4) y_1 + v_1(t), \\ u_2(t) = y_1 y_3 - x_1 x_3 + v_2(t), \\ u_3(t) = -y_1 y_2 + x_1 x_2 + v_3(t), \\ u_4(t) = +y_1 + u_4 + v_4(t), \end{cases} \quad (5.26)$$

Burada  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $v_3(t)$  ve  $v_4(t)$  kontrol girişlerimizdir. Kontrol fonksiyonları Denklem 5.25' te yerlerine koyularak hata denklemlerimizi elde ederiz.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\omega_1 e_1 + \omega_2 e_2 - W(y_4) y_1 + v_1(t), \\ \dot{e}_2 = \omega_3 e_1 - y_2 + v_2(t), \\ \dot{e}_3 = -\omega_4 e_3 + v_3(t), \\ \dot{e}_4 = v_4(t), \end{cases} \quad (5.27)$$

$v_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $v_3(t)$  ve  $v_4(t)$  hata sistemini kontrol eden kontrol girişleridir. Kontrol girişleri hatanın sifira yakınsamasını sağlar. Hatanın sifira yakınsaması senkronizasyonun sağlandığı anlamına gelir.  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $v_3(t)$  ve  $v_4(t)$  kontrol girişleri aşağıda görüldüğü gibi seçilir.

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ v_4(t) \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Denklem 5.27' nin kararlılığı özdeğerlerine bağlıdır. Sistemin kararlı olabilmesi, tüm özdeğerlerinin negatif olmasına bağlıdır.  $B$  matrisi  $4 \times 4$  lük sabit bir matristir. Öyle bir  $B$  matrisi seçmeliyiz ki sistemin özdeğerleri negatif olmalıdır.  $B$  matrisi sistemin özdeğerleri negatif olacak şekilde seçildiğinde asimptotik kararlılık sağlanmış olur.

$$B = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \omega_1 & -\omega_2 & 0 & 0 \\ -\omega_3 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 + \omega_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) = (-1, -1, -1, -1)$  olarak seçilebilir.

Hata dinamik sistemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -e_1, \\ \dot{e}_2 = -e_2, \\ \dot{e}_3 = -e_3, \\ \dot{e}_4 = -e_4. \end{cases} \quad (5.30)$$

Sistem 5.30' a uygun Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilir.

$$V(e_1, e_2, e_3, e_4) = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2) \quad (5.31)$$

Lyapunov fonksiyonunun türevini aldığımızda,

$$\frac{dV}{dt} = -(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2) \quad (5.32)$$

$\dot{V}$  ' kesin negatif olduğundan sistem asimptotik karardır denir. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronize olduğu kanıtlanmış olur.

#### 5.1.4. Aktif kontrol benzetim çalışmaları

Aktif kontrol metoduyla senkronizasyonu sağlanan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin sayısal simülasyonları MATLAB üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon algoritması olarak ode45 kullanılmıştır.

Parametreler:

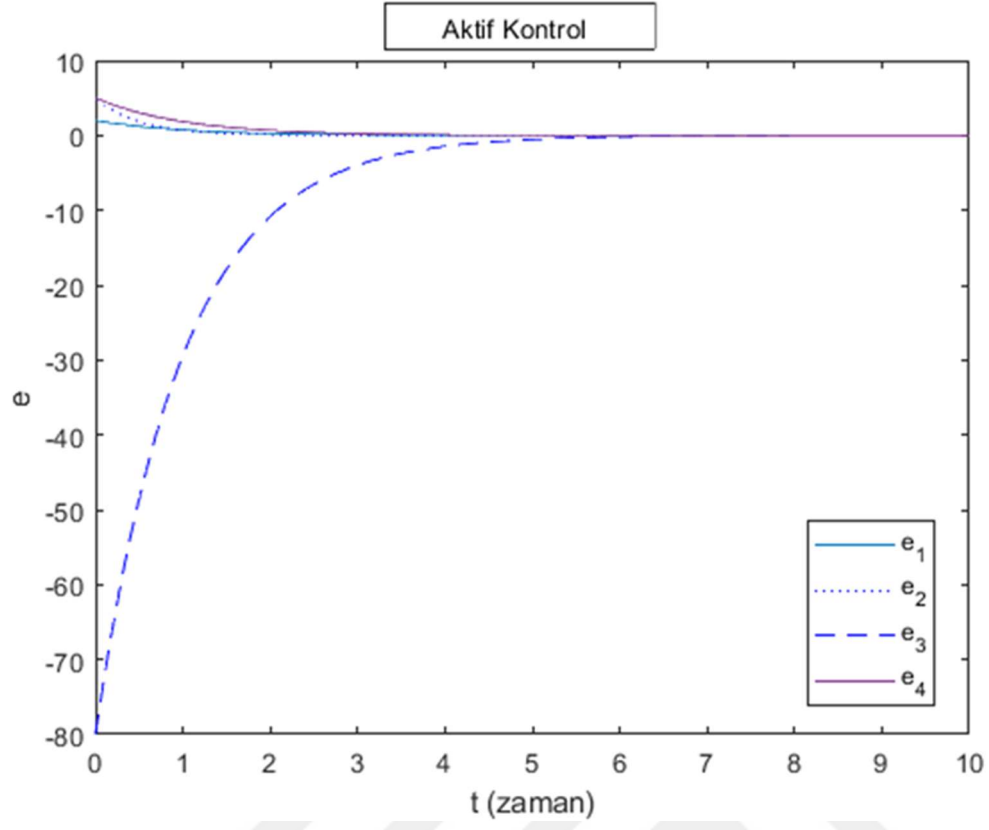
$$\omega_1 = 8, \omega_2 = 5, \omega_3 = 28, \omega_4 = \frac{8}{3}, a = 5, b = 8 \text{ olarak seçilmiştir.}$$

Senkronizasyon simülasyonunun, başlangıç koşulları sürücü sistem ve cevap sistemi için sırasıyla  $x_1(0) = 0.0001, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0, x_4(0) = 0$  ve  $y_1(0) = 2, y_2(0) = 5, y_3(0) = -80, y_4(0) = 5$  olarak seçilmiştir.

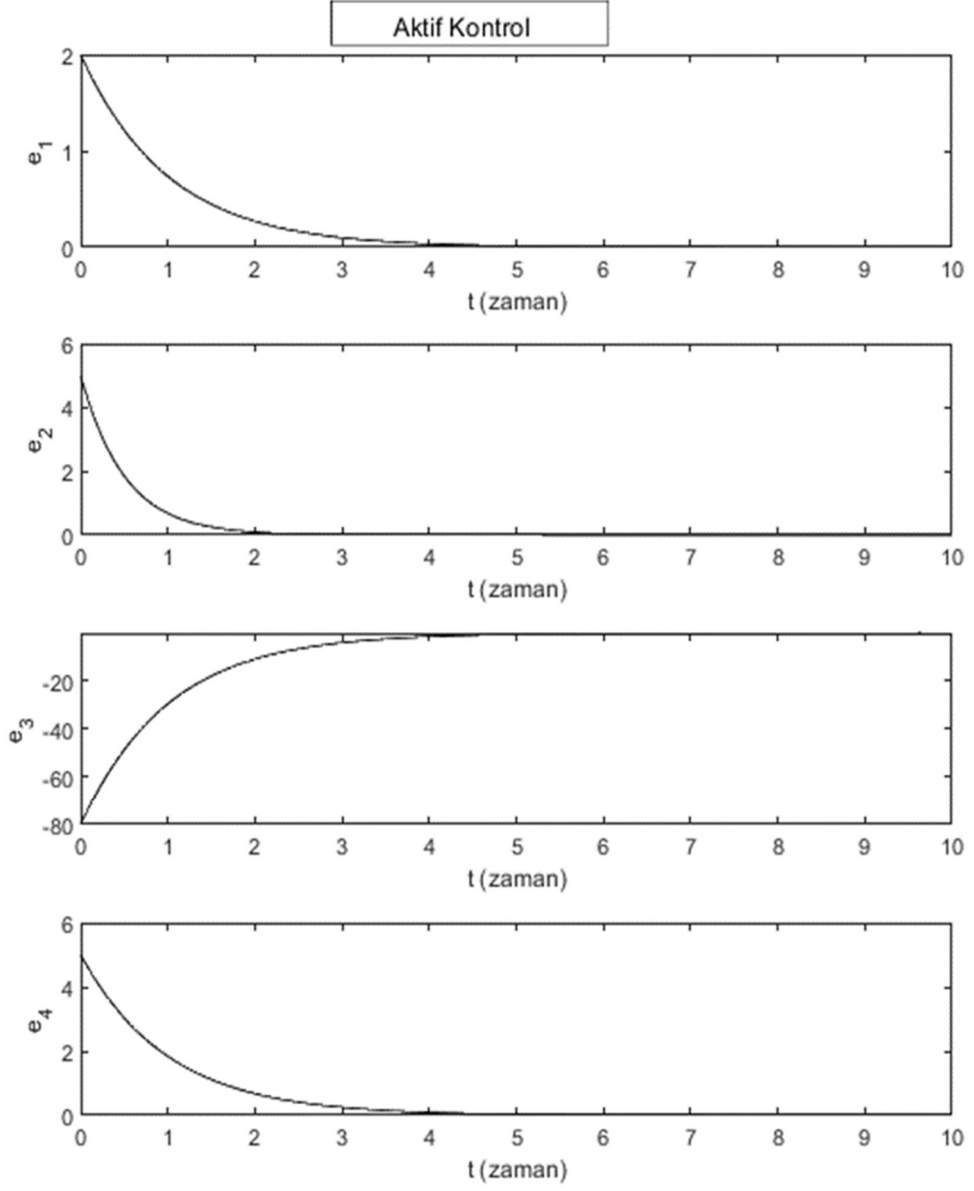
Şekil 5.8, aktif kontrol metodu ile senkronize edilen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatasını göstermektedir.

Şekil 5.9,  $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$  senkronizasyon hatalarını ayrı grafiklerde göstermektedir.

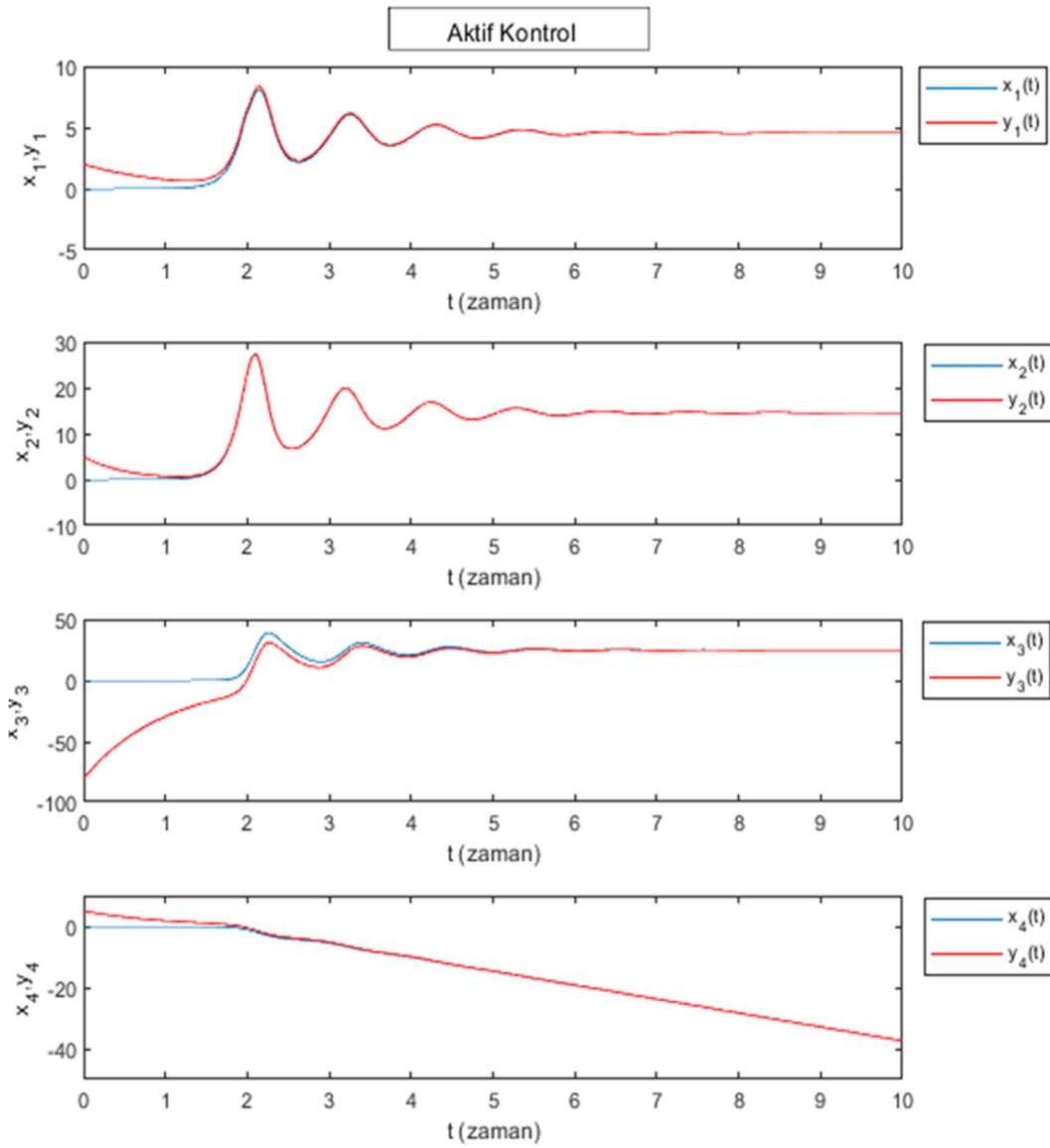
Şekil 5.10, aktif kontrol metodu ile senkronize edilen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonunu göstermektedir.



**Şekil 5.8.** Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatası (aktif kontrol).



Şekil 5.9.  $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$  senkronizasyon hataları (aktif kontrol)



**Şekil 5.10.** Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonu (aktif kontrol).

#### 5.1.5. Memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin kayan kipli kontrol metodu ile senkronizasyonu

Bu bölümde iki özdeş memristör tabanlı hiperkaotik lorenz sisteminin kayan kipli kontrol metodu ile senkronizasyonunu inceleyeceğiz.

Denklem 5.33 numaralı sistemimizi sürücü sistemi olarak aldığımızda (Wen ve ark, 2013),

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\omega_1 x_1 - W(x_4)x_1 + \omega_2 x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega_3 x_1 - x_2 - x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - \omega_4 x_3 \\ \dot{x}_4 = -x_1 \end{cases} \quad (5.33)$$

cevap sistemi aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\omega_1 y_1 - W(y_4)y_1 + \omega_2 y_2 + u_1, \\ \dot{y}_2 = \omega_3 y_1 - y_2 - y_1 y_3 + u_2, \\ \dot{y}_3 = y_1 y_2 - \omega_4 y_3 + u_3, \\ \dot{y}_4 = -y_1 + u_4, \end{cases} \quad (5.34)$$

Burada  $y_1, y_2, y_3, y_4$  durum değişkenleri ve  $u_1, u_2, u_3, u_4$  kontrolörlerdir.

Koas senkronizasyon hatası şu şekilde tanımlanır,

$$e = y - x \quad (5.35)$$

Hata dinamik denklemleri aşağıdaki gibi kolayca elde edilir.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\omega_1 e_1 + \omega_2 e_2 - W(y_4)y_1 + W(x_4)x_1 + u_1 \\ \dot{e}_2 = \omega_3 e_1 - e_2 - y_1 y_3 + x_1 x_3 + u_2 \\ \dot{e}_3 = -\omega_4 e_3 + y_1 y_2 - x_1 x_2 + u_3 \\ \dot{e}_4 = -e_1 + u_4 \end{cases} \quad (5.36)$$

Hata dinamiklerinin matris gösterimlerini, Denklem 5.36' dan aşağıdaki gibi yazıyoruz.

$$\dot{e} = Ke + \eta(x, y) + u \quad (5.37)$$

Burada

$$K = \begin{bmatrix} -\omega_1 & \omega_2 & 0 & 0 \\ \omega_3 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_4 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

$$\eta(x, y) = \begin{bmatrix} -W(y_4)y_1 + W(x_4)x_1 \\ -y_1y_3 + x_1x_3 \\ y_1y_2 - x_1x_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

Öncelikle  $u$ 'yu şu şekilde ayarlıyoruz,

$$u = -\eta(x, y) + Lv \quad (5.41)$$

burada  $L$ ,  $(K, L)$  kontrol edilebilir olacak şekilde seçilir.

$L$  'yi aşağıdaki gibi seçiyoruz,

$$L = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

Kayan kip değişkeni aşağıdaki gibi seçilirse:

$$s = Ce = [-2 \ -3 \ -1 \ 4]e = -2e_1 - 3e_2 - e_3 + 4e_4 \quad (5.43)$$

Bu durumda kayan kipli durum denklemleri asimptotik olarak kararlı hale gelir.

Burada  $C$  sabit bir vektördür.

Kayan kip kazançlarımızı,  $k = 5$  ve  $q = 0.2$  olarak seçiyoruz.

Kayan kipli kontrol yönteminin özelliğinden kontrol sinyali şu şekildedir.

$$v(t) = -(CL)^{-1} [C(kI + K)e + q \sin(s)] \quad (5.44)$$

Burada  $k$  ve  $q$  kayan kipli kontrol parametreleridir.  $k$ 'nın büyük değeri çatırtıya neden olabilir. Uygun bir  $q$  değeri, çatırtıyı ve kayma yüzeyine ulaşma süresini azaltır.

Şimdi,  $v(t)$  kontrol sinyali şu hale gelir:

$$v(t) = -41e_1 - 21e_2 - 1.1670e_3 + 10e_4 - 0.10\text{sign}(s) \quad (5.45)$$

Dolayısıyla kayan kipli kontrolör şu şekildedir:

$$u = -\eta(x, y) + Lv \quad (5.46)$$

Burada  $\eta(x, y)$ ,  $L$  ve  $v(t)$ ; Denklem 5.38, 5.39, 5.40, 5.42 ve 5.45 denklemlerindeki gibi tanımlanır.

Böylece memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz cevap Sisteminin 5.34, kayan kipli kontrol metodu ile senkronizasyonu Denklem 5.46 ile sağlanmış olur.

#### 5.1.6. Kayan kipli kontrol benzetim çalışmaları

Kayan kipli kontrol metoduyla senkronizasyonu sağlanan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin sayısal simülasyonları MATLAB üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon algoritması olarak ode45 kullanılmıştır.

Parametreler:

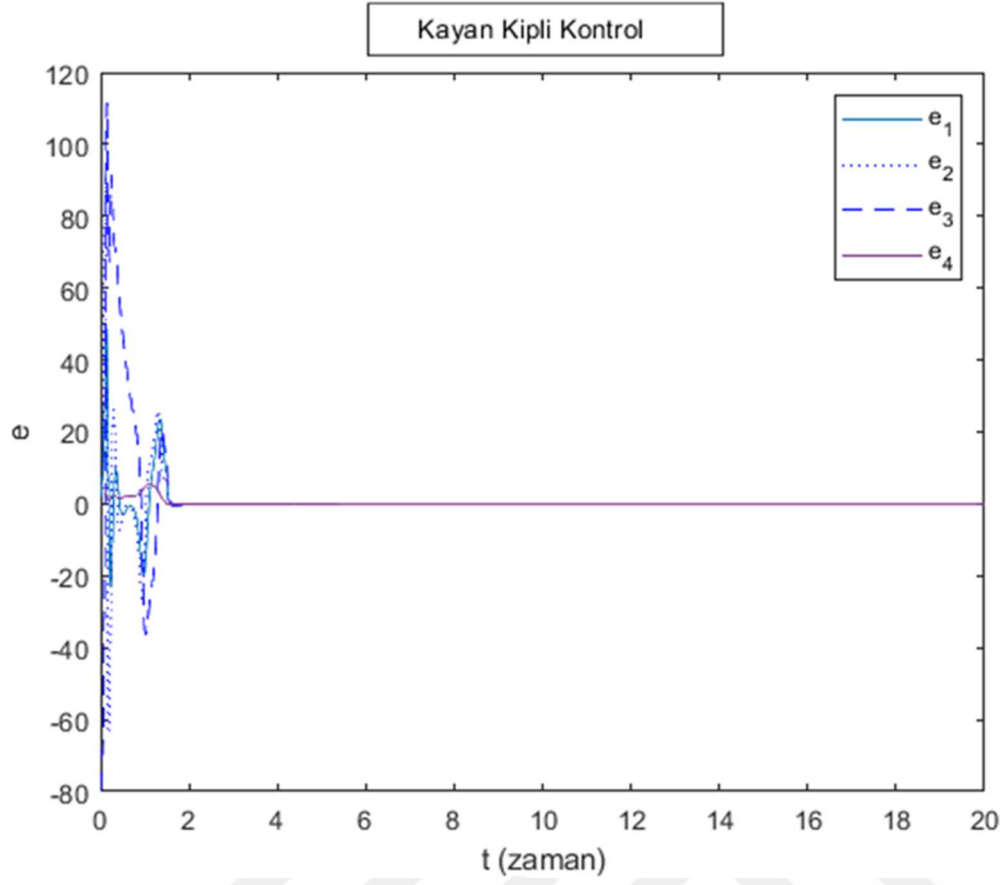
$$\omega_1 = 8, \omega_2 = 5, \omega_3 = 28, \omega_4 = \frac{8}{3}, a = 5, b = 8 \text{ olarak seçilmiştir.}$$

Senkronizasyon simülasyonunun, başlangıç koşulları sürücü sistem ve cevap sistemi için sırasıyla  $x_1(0) = 0.0001$ ,  $x_2(0) = 0$ ,  $x_3(0) = 0$ ,  $x_4(0) = 0$  ve  $y_1(0) = 2$ ,  $y_2(0) = 5$ ,  $y_3(0) = -80$ ,  $y_4(0) = 5$  olarak seçilmiştir.

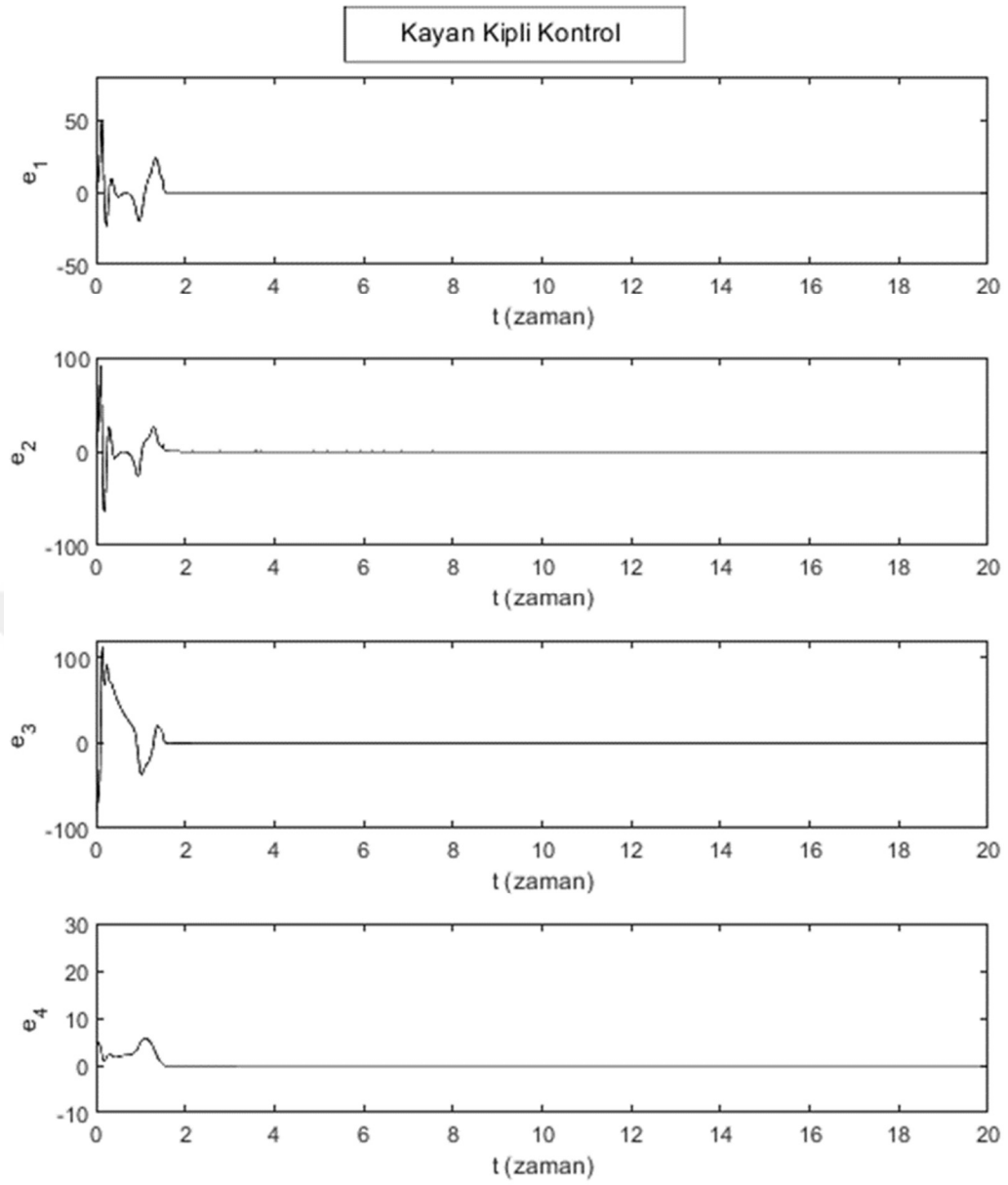
Şekil 5.11, kayan kipli kontrol metodu ile senkronize edilen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatasını göstermektedir.

Şekil 5.12,  $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$  senkronizasyon hatalarını ayrı grafiklerde göstermektedir.

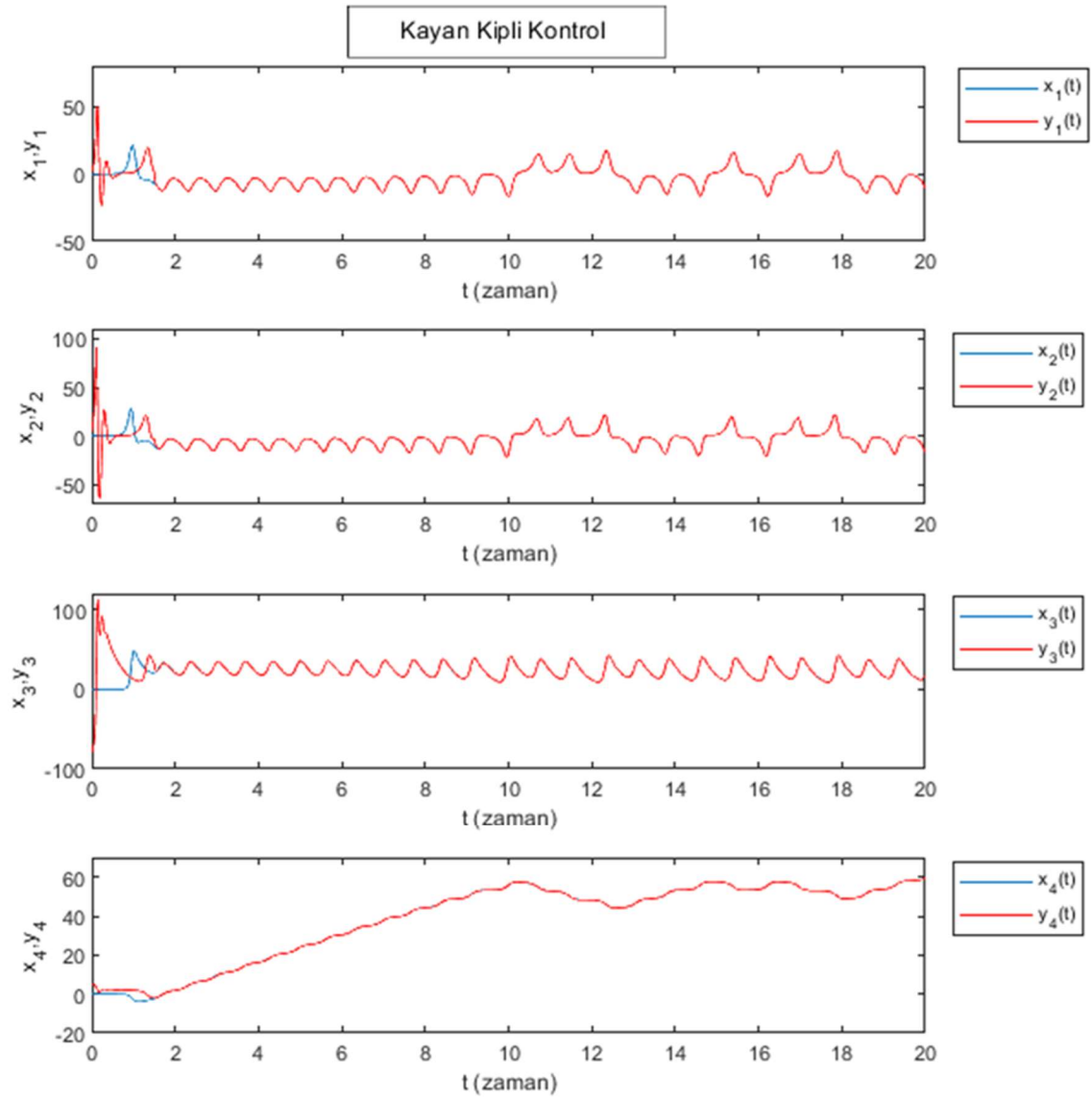
Şekil 5.13, kayan kipli kontrol metodu ile senkronize edilen memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonunu göstermektedir.



**Şekil 5.11.** Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyon hatası (kayan kipli kontrol).



**Şekil 5.12.**  $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$  senkronizasyon hataları (kayan kipli kontrol).



**Şekil 5.13.** Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonu (kayan kipli kontrol).

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Memristörler, elektriksel dirençleri voltaj ve akıma bağlı olarak değişen ve bu bilgiyi kalıcı olarak saklayabilen devre elemanlarıdır. Memristörlerin çeşitli modelleri, üretim yöntemleri ve makro modelleri incelenmiş; bu teknolojinin matematiksel temelleri ve uygulama alanları detaylandırılmıştır. Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemi pasif kontrol, aktif kontrol ve kayan kipli kontrol yöntemleri esas alınarak aynı şartlar ve aynı başlangıç koşulları altında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Pasif kontrol metodu altında ele alınan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  ve  $e_4$  sistem hatalarının (Bkz. Şekil 5.6), 2 saniye gibi birbirlerine yakın sürelerde sıfıra yaklaştığı,  $e_1$  sistem hatasının genliği 2.52 birim,  $e_2$  sistem hatasının genliği 6.83 birim salınımlı şekilde aşma yaparak,  $e_3$  ve  $e_4$  sistem hataları ise salınımsız şekilde sıfıra yaklaştığı görülmektedir.

Pasif kontrol metodu altında durum değişkenleri incelendiğinde (Bkz. Şekil 5.7), birinci durum değişkenleri ( $x_1$  ve  $y_1$ ), ikinci durum değişkenleri ( $x_2$  ve  $y_2$ ), üçüncü durum değişkenleri ( $x_3$  ve  $y_3$ ) ve dördüncü durum değişkenleri ( $x_4$  ve  $y_4$ ) arasındaki senkronizasyonun aynı şartlar ve aynı başlangıç koşulları altında 2 saniyede sağlandığı görülmektedir.

Aktif kontrol metodu altında ele alınan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin  $e_1$ ,  $e_3$  ve  $e_4$  sistem hataları incelendiğinde (Bkz. Şekil 5.9), salınımsız şekilde 4 saniyede,  $e_2$  sistem hatasının ise salınımsız şekilde 2 saniyede sıfıra yaklaştığı görülmektedir.

Aktif kontrol metodu altında durum değişkenleri incelendiğinde (Bkz. Şekil 5.10), birinci durum değişkenleri ( $x_1$  ve  $y_1$ ), üçüncü durum değişkenleri ( $x_3$  ve  $y_3$ ) ve dördüncü durum değişkenleri ( $x_4$  ve  $y_4$ ) arasındaki senkronizasyonun 4 saniyede salınımsız şekilde, ikinci durum değişkenleri ( $x_2$  ve  $y_2$ ) arasındaki senkronizasyonun 2 saniyede salınımsız şekilde sağlandığı görülmektedir.

Pasif kontrol metodu ve aktif kontrol metodu için sistem hataları ikili olarak karşılaştırıldığında sistem hatalarının sıfıra yaklaşma zamanlarına baktığımızda, pasif

kontrol metodunda salınımlar yaparak 2 saniyede, aktif kontrol metodunda ise salınımsız 4 saniyede sifıra yaklaşmaktadır. Oturma süreleri dikkate alındığında pasif kontrol metodunun uygulanan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemi için daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

Kayan kipli kontrol metodu altında ele alınan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin sistem hataları incelendiğinde (Bkz. Şekil 5.12),  $e_1$  sistem hatasının aşım genliği 50 birim,  $e_2$  ve  $e_3$  sistem hatalarının aşım genliği 100 birim ve  $e_4$  sistem hatasının ise 10 birimin altında aşım genliği ile az salınımlı şekilde 1.5 saniyede sifıra yaklaştığı görülmektedir.

Kayan kipli kontrol metodu altında durum değişkenleri incelendiğinde (Bkz. Şekil 5.13), birinci durum değişkenleri ( $x_1$  ve  $y_1$ ), ikinci durum değişkenleri ( $x_2$  ve  $y_2$ ), üçüncü durum değişkenleri ( $x_3$  ve  $y_3$ ) ve dördüncü durum değişkenleri ( $x_4$  ve  $y_4$ ) arasındaki senkronizasyonun 1.5 saniyede az salınımlı şekilde sağlandığı görülmektedir.

Kayan kipli kontrol metodu ve aktif kontrol metodu için sistem hataları ikili olarak karşılaştırıldığında sistem hatalarının sifıra yaklaşma zamanları açısından kayan kipli kontrol metodunun daha kısa sürede sifıra yaklaştığından, kayan kipli kontrol yönteminin uygulanan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemi için daha verimli olduğu görülmektedir.

Kayan kipli kontrol metodu ve pasif kontrol metodu için sistem hataları ikili olarak karşılaştırıldığında sistem hatalarının sifıra yaklaşma zamanları açısından kayan kipli kontrol metodunun daha kısa sürede sifıra yaklaştığından, kayan kipli kontrol yönteminin uygulanan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemi için daha verimli olduğu görülmektedir.

Çalışmanın amacı pasif kontrol, aktif kontrol ve kayan kipli kontrol metodlarıyla ele alınan memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin senkronizasyonunu sağlayarak sonuçlarının karşılaştırılmasıydı.

Sonuçlar incelendiğinde, memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sistemi pasif kontrol, aktif kontrol ve kayan kipli kontrol metodları için üçlü olarak karşılaştırıldığında, sistem hatalarının sifıra yaklaşmaları ve durum değişkenlerinin senkronizasyonlarının oturma sürelerine bakıldığında kayan kipli kontrol metodunun

performansı, pasif kontrol ve aktif kontrol metodlarından daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Memristör tabanlı hiperkaotik Lorenz sisteminin pasif, aktif ve kayan kipli kontrol metodları kullanılarak senkronizasyon sonuçlarını karşılaştırdığımız bu çalışmaya, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve adaptif kontrol metodları uygulayarak senkronizasyon performansları analiz edilerek bu çalışma dahada ileriye götürülebilir.

**Tablo 6.1.** Karşılaştırma Sonuçları

|                            |  | Aşma | Oturma  | Osilasyon    |
|----------------------------|--|------|---------|--------------|
| <b>Pasif Kontrol</b>       |  | Var  | İyi     | Salınımlı    |
| <b>Aktif Kontrol</b>       |  | Var  | Orta    | Salınımsız   |
| <b>Kayan Kipli Kontrol</b> |  | Var  | Çok iyi | Az salınımlı |



## KAYNAKLAR

- Abdalla, H., & Pickett, M. D. (2011). SPICE modeling of memristors. *In 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1832-1835. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2011.5937942>
- Arık S., (2015). *Memristör Tabanlı Nonlinear Sistem Uygulamaları* [Yüksek lisans tezi]. Erciyes Üniversitesi.
- Al-Obeidi, A., S., ve S. F. AL-Azzawi, S., F., (2019). Projective synchronization for a cass of 6- D hyperchaotic lorenz system. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 692–700. <https://doi.org/10.11591/IJEECS.V16.I2.PP692-700>
- Bao, B. C., ve Liu, Z., (2008). A hyperchaotic attractor coined from chaotic lü system. *Chinese Phys. Lett.*, vol. 25, no. 7, pp. 2396–2399. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/25/7/018>
- Biolek, Z., Biolek, D., Biolkova, V. (2009). SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift. *Radioengineering*, vol. 18, No. 2, pp. 210-214.
- Benderli, S., & Wey, T. A. (2009). On SPICE macromodelling of TiO 2 memristors. *Electronicsletters*, vol.45(7), pp. 377-379. <https://doi.org/10.1049/el.2009.3511>
- Benkouider, K., Bouden, T., Yalcin, M., E., ve S. Vaidyanathan, S., (2020). A new family of 5D, 6D, 7D and 8D hyperchaotic systems from the 4D hyperchaotic Vaidyanathan system, the dynamic analysis of the 8D hyperchaotic system with six positive Lyapunov exponents and an application to secure communication design. *Int. J. Model. Identif. Control*, vol. 35, no. 3, pp. 241–257. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2020.114191>
- Benkouider, K., T. Bouden, T., Vaidyanathan, S., ve M. E. Yalcin, M., E., (2020). A new family of 9D and 10D hyperchaotic systems from the 8D hyperchaotic Benkouider system, the bifurcation analysis of the 10D hyperchaotic system, circuit design and an application to secure voice communication. *Int. J. Model. Identif. Control*, vol. 36, no. 4, p. 271. <https://doi.org/10.1504/ijmic.2020.117494>
- Bouridah, M. S., Bouden, T., ve M. E. Yalçın, M. E., (2021). Delayed outputs fractional-order hyperchaotic systems synchronization for images encryption. *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 10, pp. 14723–14752. <https://doi.org/10.1007/S11042-020-10425-3>
- Chua, L.O., (1971). Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, No. 5, pp. 507-519. <http://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>
- Chua, L.O., Kang, S.M (1976). Memristive Devices and Systems. *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, No. 2, pp. 209-223. <http://doi.org/10.1109/PROC.1976.10092>

- Chua, L. O., Matsumoto T., Tanaka, S. (1984). Simplest chaotic nonautonomous circuit, *Phys. Rev. A*, vol.30, no.2, pp.1155–1157. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.30.1155>
- Chua, L. O., Kobayashi, K. (1986). Hyperchaos: Laboratory Experiment and Numerical Confirmation, *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 33, no. 11, pp. 1143– 1147. <https://doi.org/10.1109/TCS.1986.1085862>
- Chen, G., ve T. Ueta, T., (1999). Yet another chaotic attractor. *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 9, no. 7, pp. 1465–1466. <https://doi.org/10.1142/S0218127499001024>
- Chen, S., Hu, J., C. Wang, C., ve J. Lü, J., (2004). Adaptive synchronization of uncertain Rössler hyperchaotic system based on parameter identification. *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 321, no. 1, pp. 50–55. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSLETA.2003.12.011>
- Chen, A., Lu, J., Lü, J., ve Yu, S., (2006). Generating hyperchaotic Lü attractor via state feedback control. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 364, pp. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.09.039>
- Chong-Xin, L., (2007). A new hyperchaotic dynamical system. *Chinese Physics*, vol. 16, no. 11, p. 3279. <https://doi.org/10.1088/1009-1963/16/11/022>
- Chen, Z., Yang, Y., Qi, G., Yuan, Z., (2007). A novel hyperchaos system only with one equilibrium, *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 360, no. 6, pp. 696–701. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.08.085>
- Chen, Y., Wang, X., Sun, Z., & Li, H. (2010). The application of spintronic devices in magnetic bio-sensing. In *2nd Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED)*, pp. 230-234, *IEEE*.
- Cang, S., Qi, G., ve Chen, Z., (2010). A four-wing hyper-chaotic attractor and transient chaos generated from a new 4-D quadratic autonomous system. *Nonlinear Dynamics*, vol. 59, no. 3, pp. 515–527. <https://doi.org/10.1007/s11071-009-9558-0>
- Chua, L.O., (2011). Resistance switching memories are memristors. *Applied Physics A*, vol. 102, No. 4, pp. 765-783. <http://doi.org/10.1007/s00339-011-6264-9>
- Cafagna, D., ve Grassi, G., (2012). Observer-based projective synchronization of fractional systems via a scalar signal: Application to hyperchaotic Rössler systems. *Nonlinear Dyn.*, vol. 68, no. 1–2, pp. 117–128. <http://doi.org/10.1007/S11071-011-0208-Y>
- Chen, Y., ve Q. Yang, Q., (2015). A new Lorenz-type hyperchaotic system with a curve of equilibria. *Math. Comput. Simul.*, vol. 112, pp. 40–55. <http://doi.org/10.1016/J.MATCOM.2014.11.006>
- Chowdhury, J., Das, J. K., Rout, N. K. (2015). Trigonometric window functions for memristive device modeling. In *2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, India*, pp. 157-161. <http://doi.org/10.1109/ACCT.2015.25>
- Dou, F., Sun, J., Duan, W., ve Lü, K., (2009). Controlling hyperchaos in the new hyperchaotic system. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 14, no. 2, pp. 552–559. <http://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2007.10.009>

- Elabbasy, E. M., Agiza, H. N., ve El-Dessoky, M. M., (2006). Adaptive synchronization of a hyperchaotic system with uncertain parameter. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 30, no. 5, pp. 1133–1142. <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2005.09.047>
- Effati, S., Nik, H. S., ve Jajarmi, A., (2013). Hyperchaos control of the hyperchaotic Chen system by optimal control design. *Nonlinear Dynamics*, vol. 73, no. 1, pp. 499–508. <https://doi.org/10.1007/S11071-013-0804-0>
- Emiroglu, S., Uyaroğlu, Y., (2020). T Kaotik Sisteminin Geri Besleme ile Kontrolü. *Journal of the Institute of Science and Technology*, vol. 10(3), pp. 1649-1658.
- Gao, T., Chen, Z., Yuan, Z., ve Chen, G., (2006). A hyperchaos generated from Chen's system. *Int. J. Mod. Phys. C*, vol. 17, no. 4, pp. 471–478. <https://doi.org/10.1142/S0129183106008625>
- Gao, T., Chen, Z., Yuan, Z., ve Yu, D., (2007). Adaptive synchronization of a new hyperchaotic system with uncertain parameters. *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 33, no. 3, pp. 922–928. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.01.042>
- Gao, T., Chen, G., Chen, Z., Cang, S. (2007). The generation and circuit implementation of a new hyper-chaos based upon Lorenz system. *Phys. Lett. Sect.*, vol. 361, no. 1–2, pp. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.09.042>
- Hilborn, R, C,. (2000). *Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers*. Oxford University Press.
- Hu, G. (2009). Generating hyperchaotic attractors with three positive Lyapunov exponents via state feedback control. *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 19, no. 2, pp. 651–660. <https://doi.org/10.1142/S0218127409023275>
- Han, Q., Liu, C. X., Sun, L., ve D. R. Zhu, D. R., (2013). A fractional order hyperchaotic system derived from a Liu system and its circuit realization. *Chinese Physics B*, vol. 22, no. 2, pp. 20502–020502. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/22/2/020502>
- He, J., ve Cai, J., (2014). Parameter modulation for secure communication via the synchronization of Chen hyperchaotic systems, *Systems Science & Control Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 718–726, 2014, <https://doi.org/10.1080/21642583.2013.860057>
- He, J. M., ve F. Q. Chen, F. Q., (2017). A new fractional order hyperchaotic Rabinovich system and its dynamical behaviors. *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 95, pp. 73–81. <https://doi.org/10.1016/J.IJNONLINMEC.2017.05.013>
- Jang, M., J., Chen, C., L., ve C. K. Chen, K., C., (2002). Sliding mode control of hyperchaos in Rössler systems. *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 14, no. 9, pp. 1465–1476. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(02\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(02)00084-X)
- Jia, Q. (2007). Hyperchaos generated from the Lorenz chaotic system and its control. *Phys. Lett. Sect.*, vol. 366, no. 3, pp. 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.02.024>
- Jia, Q. (2007). Projective synchronization of a new hyperchaotic Lorenz system. *Phys. Lett. A*, vol. 370, no. 1, pp. 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.05.028>

- Jo, S. H., Chang, T., Ebong, I., Bhadviya, B. B., Mazumder, P., & Lu, W. (2010). Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems. *Nano letters*, vol. 10(4), pp. 1297-1301. <https://doi.org/10.1021/nl904092h>
- James, G. (2014). *Kaos*. Alfa Yayıncılık.
- Kapitaniak, T., L. O. Chua, L. O., (1994). Hyperchaotic Attractors of Unidirectionally-Coupled Chua's Circuits, *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 04, no. 02, pp. 477–482. <https://doi.org/10.1142/s0218127494000356>
- Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y. S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S. F., & Abbott, D. (2010). The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2120), 2175-2202. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0553>
- Kavehei, O., (2012) *Memristive Devices and Circuits for Computing, Memory, and Neuromorphic Applications* [Doktora Tezi]. University of Adelaide.
- Kumar, A., Rawal, Y., & Baghini, M. S. (2012). Fabrication and Characterization of the ZnO-based Memristor. In *2012 International Conference on Emerging Electronics*, pp. 1-3, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEmElec.2012.6636244>
- Kvatinsky, S., Friedman, E. G., Kolodny, A., & Weiser, U. C. (2012). TEAM: Threshold adaptive memristor model. *IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers*, vol. 60, pp. 211-221. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2012.2215714>
- Keshmiri, V. (2014). *A Study of the Memristor Models and Applications* [M.Sc Thesis]. Linköping University.
- Kumar, A., & Baghini, M. S. (2014). Experimental study for selection of electrode material for ZnO based memristors. *Electronics Letters*, vol. 50(21), pp. 1547-1549. <https://doi.org/10.1049/el.2014.1491>
- Kocamaz, U. E., Uyaroğlu, Y., ve Kızmaz, H., (2017). Controlling hyperchaotic Rabinovich system with single state controllers: Comparison of linear feedback, sliding mode, and passive control methods. *Optik (Stuttg.)*, vol. 130, pp. 914– 921. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2016.11.006>
- Koyuncu, I., Alçın, M., Tuna, M., Pehlivan, I., Varan, M., ve Vaidyanathan, S. (2019). Real-time high-speed 5-D hyperchaotic Lorenz system on FPGA. *Int. J. Comput. Appl. Technol.*, vol. 61, no. 3, pp. 152–165. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2019.102852>
- Kaos Kelime Kökeni, Kelimesinin Anlamı - Etimoloji. <https://www.etimoloji.org/kelime/kaos> adresinden 13 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Kaos ne demek TDK Sözlük Anlamı. <https://sozluk.gov.tr/> adresinden 13 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Li, T. Y., Yorke, J. A. (1975). Period three implies chaos. *The American Mathematical Monthly*, vol. 82, no. 10, pp. 985-992. <https://doi.org/10.2307/2318254>

- Li, C., ve G. Chen, G., (2004). Chaos and hyperchaos in the fractional-order Rössler equations. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 341, no. 1–4, pp. 55–61. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2004.04.113>
- Li, Y., Tang, K., S., Chen, G. (2005). Hyperchaos evolved from the generalized Lorenz equation. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 33, no. 4, pp. 235–251. <https://doi.org/10.1002/cta.318>.
- Liang, C.G., Zheng, S., Tian, L. X. (2008). Adaptive control and synchronization of an uncertain new hyperchaotic Lorenz system. *Chinese Physics B*, vol. 17, no. 7, pp. 143 2412–2419. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/17/7/014>
- Lehtonen, E., & Laiho, M. (2010). CNN using memristors for neighborhood connections. In *2010 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA2010)*, IEEE, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/CNNA.2010.5430304>
- Liu, Y., Yang, Q., ve G. Pang, G., (2010). A hyperchaotic system from the Rabinovich system. *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 234, no. 1, pp. 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2009.12.008>
- Lehtonen, E. (2012). *Memristive Computing* [Doktora Tezi]. University of Turku.
- Li, Q., Zeng, H., ve Li, J., (2014). Hyperchaos in a 4D memristive circuit with infinitely many stable equilibria. *Nonlinear Dyn.* 2014 794, vol. 79, no. 4, pp. 2295–2308. <https://doi.org/10.1007/S11071-014-1812-4>
- Li, L. C., Bin Xiong, J., ve Li, W., (2014). A new hyperchaotic system and its generalized synchronization. *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 1, pp. 575–579. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2013.07.013>
- Li, C., Akgul, A., Sprott, J., C., H. Iu, H., H., C., ve Thio, W., J.,C., (2018). A symmetric pair of hyperchaotic attractors. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 46, no. 12, pp. 2434– 2443. <https://doi.org/10.1002/CTA.2569>
- Li, X., Li, Z., ve Wen, Z., (2020). One-to-four-wing hyperchaotic fractional-order system and its circuit realization. *Circuit World*, vol. 46, no. 2, pp. 107–115. <https://doi.org/10.1108/CW-03-2019-0026>
- McDonald, N. R., Pino, R. E., Rozwood, P. J., & Wysocki, B. T. (2010). Analysis of dynamic linear and non-linear memristor device models for emerging neuromorphic computing hardware design. In *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* , USA, pp. 1-5, ISSN: 1098-7576.
- Miller, K. (2010). *Fabrication and modeling of thin-film anodic titania memristors*, [Yüksek Lisans Tezi]. Iowa State University.
- Nikolov, S., ve Clodong, S., (2004). Occurrence of regular, chaotic and hyperchaotic behavior in a family of modified Rossler hyperchaotic systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 22, no. 2, pp. 407–431. <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2004.02.030>
- Oster, G.F., Auslander, D.M. (1972). The Memristor: A New Bond Graph Element. *Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control*, vol. 94, No. 3, pp. 249-252. <http://doi.org/10.1115/1.3426595>
- Oster, G. (1974). A note on memristors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 21, No. 1, pp. 152-152. <https://doi.org/10.1109/TCS.1974.1083778>

- Oblea, A. S., Timilsina, A., Moore, D., & Campbell, K. A. (2010). Silver chalcogenide based memristor devices. *In The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pp. 1-3.
- Özdemir, S. D. (2011). *Kaotik Zaman Serileri Ve Lyapunov Kararlılık Teorisi Ile Doğrusal Olmayan Eştleştirme Analizi* [Doktora tezi]. Marmara Üniversitesi
- Poincaré, H., (1890). Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Math.*, 13, A3–A270. <https://doi.org/10.1007/BF02392506>
- Pickett, M. D., Strukov, D. B., Borghetti, J. L., Yang, J. J., Snider, G. S., Stewart, D. R., Williams, R. S. (2009). Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices. *Journal of Applied Physics*, vol. 106, No. 7, 074508. <https://doi.org/10.1063/1.3236506>
- Ping, Z., Yu-Xia, C., ve Xue-Feng, C., (2009). A new hyperchaos system and its circuit simulation by EWB. *Chinese Phys. B*, vol. 18, no. 4, pp. 1394–1398. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/18/4/018>
- Pang, S., ve Y. Liu, Y., (2011). A new hyperchaotic system from the Lü system and its control. *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 235, no. 8, pp. 2775–2789. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.11.029>
- Qiang W, F., Liu, C, X. (2006). Hyperchaos evolved from the Liu chaotic system. *Chinese Physics*, vol. 15, no. 5, pp. 963–968, <https://doi.org/10.1088/1009-1963/15/5/016>
- Qi, G., Wyk, M. A., Wyk, B. J., ve Chen, G., (2009). A new hyperchaotic system and its circuit implementation. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 40, no. 5, pp. 2544–2549. <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2007.10.053>
- Rössler, O. E., (1976). An equation for continuous chaos. *Phys. Lett. A*, vol. 57, no. 5, pp. 397–398. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(76\)90101-8](https://doi.org/10.1016/0375-9601(76)90101-8)
- Rössler, O. E., (1979). Continuous Chaos-Four Prototype Equations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 316, no. 1, pp. 376–392. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1979.tb29482.x>
- Rössler, O. E., (1979). An equation for hyperchaos. *Phys. Lett. A*, vol. 71, pp. 155–157. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(79\)90150-6](https://doi.org/10.1016/0375-9601(79)90150-6)
- Runzi, L., (2008). Adaptive function project synchronization of Rössler hyperchaotic system with uncertain parameters. *Phys. Lett. A*, vol. 20, no. 372, pp. 3667–3671. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSLETA.2008.02.035>
- Rasappan, S., ve Vaidyanathan, S., (2012). Synchronization of hyperchaotic Liu system via backstepping control with recursive feedback. *Communications in Computer and Information Science*, vol. 305 CCIS, pp. 212–221. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32112-2\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32112-2_26)
- Shnol, E., (2007). Stability of equilibria, *Scholarpedia*, vol. 2, no. 3, p. 2770. <http://doi.org/10.4249/scholarpedia.2770>.
- Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), pp. 80-83. <http://doi.org/10.1038/nature06932>

- Strukov, D. B., & Williams, R. S. (2009). Exponential ionic drift: fast switching and low volatility of thin-film memristors. *Applied Physics A*, vol. 94(3), pp. 515–519. <http://doi.org/10.1007/s00339-008-4975-3>
- Sudheer, K., S., ve Sabir, M., (2009). Hybrid synchronization of hyperchaotic Lu system. *Pramana - J. Phys.*, vol. 73, no. 4, pp. 781–786. <http://doi.org/10.1007/S12043-009-0145-1>
- Sudheer, K. S., ve M. Sabir, M., (2010). Switched modified function projective synchronization of hyperchaotic Qi system with uncertain parameters. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 15, no. 12, pp. 4058–4064. <http://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2010.01.014>
- Si, G., Q., Cao, H., ve Zhang, Y., B., (2011). A new four-dimensional hyperchaotic Lorenz system and its adaptive control. *Chinese Phys. B*, vol. 20, no. 1, <http://doi.org/10.1088/1674-1056/20/1/01050>
- Sarasu, P., ve Sundarapandian, V., (2011). The generalized projective synchronization of hyperchaotic Lorenz and hyperchaotic Qi systems via active control. *Int. J. Soft Comput.*, vol. 6, no. 5, pp. 216–223. <http://doi.org/10.3923/ijscmp.2011.216.223>
- Smaoui, N., Karouma, A., ve Zribi, M., (2011). Secure communications based on the synchronization of the hyperchaotic Chen and the unified chaotic systems. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 16, no. 8, pp. 3279–3293. <http://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2010.10.023>
- Smaoui, N., Zribi, M., ve T. Elmokadem, T., (2017). A novel secure communication scheme based on the Karhunen–Loève decomposition and the synchronization of hyperchaotic Lü systems. *Nonlinear Dyn.* 2017 901, vol. 90, no. 1, pp. 271–285. <http://doi.org/10.1007/S11071-017-3660-5>
- Sahin M. E., (2020). *Memristör Tabanlı Kaotik Sistemlerin Tasarımı ve Kaotik Haberleşme Sistemlerine Uygulanması* [Doktora tezi]. Fırat Üniversitesi
- Sangpet T., ve S. Kuntanapreeda, S., (2020). Finite-time synchronization of hyperchaotic systems based on feedback passivation. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 132, p. 109605. <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2020.109605>
- Takahashi, Y., Sekine, T., & Yokoyama, M. (2015). SPICE model of memristive device using Tukey window function. *IEICE Electronics Express*, Vol. 12, No. 5, pp. 20150149. <https://doi.org/10.1587/elex.12.20150149>
- Uhle, M. (1988). Chua, LO, CA Desoer, ES Kuh: Linear and Nonlinear Circuits. *Biometrical Journal*, vol. 30(7), pp. 867–868. <https://doi.org/10.1002/bimj.4710300726>
- Vaidyanathan, S., ve Rajagopal, K., (2012). Global chaos synchronization of hyperchaotic Pang and hyperchaotic Wang systems via adaptive control. *Int. J. Soft Comput.*, 146 vol. 7, no. 1, pp. 28–37. <https://doi.org/10.3923/ijscmp.2012.28.37>
- Vaidyanathan, S., Volos, C., ve Pham, V., T., (2014). Hyperchaos, adaptive control and synchronization of a novel 5-D hyperchaotic system with three positive Lyapunov exponents and its SPICE implementation. *Arch. Control Sci.*, vol. 24, no. 4, pp. 409–446. <https://doi.org/10.2478/ACSC-2014-0023>

- Wang, G., Zhang, X., Zheng, Y., ve Li, Y., (2006). A new modified hyperchaotic Lü system. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 371, no. 2, pp. 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.03.048>
- Wang, X., ve Wang, M., (2008). A hyperchaos generated from Lorenz system. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 387, no. 14, pp. 3751–3758. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.02.020>
- Wu, X., ve Lu, Y., (2008). Generalized projective synchronization of the fractional-order Chen hyperchaotic system. *Nonlinear Dyn.*, vol. 57, no. 1, pp. 25–35. <https://doi.org/10.1007/S11071-008-9416-5>
- Wu, X., Lu, H., ve Shen, S., (2009). Synchronization of a new fractional-order hyperchaotic system. *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 373, no. 27–28, pp. 2329–2337. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.04.063>
- Wang, X., Chen, Y., Xi, H., Li, H., & Dimitrov, D. (2009). Spintronic memristor through spin-torque-induced magnetization motion. *IEEE electron device letters*, vol. 30(3), pp. 294–297. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2012270>
- Wang, Z., L., (2010). Projective synchronization of hyperchaotic Lü system and Liu system. *Nonlinear Dyn.*, vol. 59, no. 3, pp. 455–462. <https://doi.org/10.1007/S11071-009-9552-6>
- Wen, S.P., Zeng, Z.G., Huang, T.W., Chen, Y.R. (2013). Fuzzy modeling and synchronization of different memristor-based chaotic circuits. *Physics Letters A*, vol. 377, pp. 2016–2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2013.05.046>
- Wang, Z., Huang, X., Li, Y., X., ve Song, X., N., (2013). A new image encryption algorithm based on the fractional-order hyperchaotic Lorenz system. *Chinese Phys. B*, vol. 22, no. 1, pp. 010504. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/22/1/010504>
- Wu, X., Fu, Z., ve Kurths, J., (2015). A secure communication scheme based generalized function projective synchronization of a new 5D hyperchaotic system. *Phys. Scr.*, vol. 90, no. 4, pp. 90 045210. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/4/045210>
- Wang, S., Wang, X., Zhou, Y., ve Han, B., (2016). A memristor-based hyperchaotic complex Lü system and its adaptive complex generalized synchronization. *Entropy*, vol. 18, no. 2. <https://doi.org/10.3390/E18020058>
- Wang, J., Yu, W., Wang, J., Zhao, Y., Zhang, J., ve D. Jiang, D., (2019). A new six-dimensional hyperchaotic system and its secure communication circuit implementation. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 702–717. <https://doi.org/10.1002/CTA.2617>
- Yanchuk, S., ve Kapitaniak, T., (2001). Chaos-hyperchaos transition in coupled Rössler systems. *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 290, no. 3–4, pp. 139–144. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(01\)00651-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(01)00651-X)
- Yan, Z., (2005). Controlling hyperchaos in the new hyperchaotic Chen system. *Appl. Math. Comput.*, vol. 168, no. 2, pp. 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.10.016>
- Yu, Y., ve Li, H., X., (2008). The synchronization of fractional-order Rössler hyperchaotic systems. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 387, no. 5–6, pp. 1393–1403. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2007.10.052>

- Yang, J. J., Pickett, M. D., Li, X., Ohlberg, D. A., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices. *Nature nanotechnology*, vol. 3(7), pp. 429-433. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.160>
- Yang, Q., ve Y. Liu, Y., (2009). A hyperchaotic system from a chaotic system with one saddle and two stable node-foci. *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 360, no. 1, pp. 293–306. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2009.06.051>
- Yujun, N., Xingyuan, W., Mingjun, W., ve Huaguang, Z., (2010). A new hyperchaotic system and its circuit implementation. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 15, no. 11, pp. 3518–3524. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.005>
- Yakopcic, C., Taha, T. M., Subramanyam, G., Pino, R. E., & Rogers, S. (2011). A memristor device model. *IEEE electron device letters*, vol. 32(10), pp. 1436-1438. <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2163292>
- Yadong, W., ve Z. Aijun, Z., (2012). Dynamics Analysis of a Novel Five-dimensional Hyperchaotic System. *Sh. Electron. Eng.*, vol. 32, no. 7, pp. 68-69.
- Yang, Q., ve Chen, C., (2013). A 5D hyperchaotic system with three positive lyapunov exponents coined. *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 23, no. 6, pp. 1350109. <https://doi.org/10.1142/S0218127413501095>
- Yener, Ş.Ç., (2014). *New Opportunities in Analog Circuit Design Provided By Memristor* [Ph.D. Thesis]. Istanbul Technical University
- Yang, Q., Osman, W., M., ve C. Chen, C., (2015). A new 6D hyperchaotic system with four positive Lyapunov exponents coined. *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 25, no. 4, p. 144 1550060. <https://doi.org/10.1142/S0218127415500601>
- Yang, Q., ve Bai, M., (2016). A new 5D hyperchaotic system based on modified generalized Lorenz system. *Nonlinear Dynamics*, vol. 88, no. 1, pp. 189–221. <https://doi.org/10.1007/S11071-016-3238-7>
- Yang, Q., Zhu, D., ve L. Yang, L., (2018). A New 7D Hyperchaotic System with Five Positive Lyapunov Exponents Coined. *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 28, no. 5. <https://doi.org/10.1142/S0218127418500578>
- Yu, W., Wang, J., Wang, J., Zhu, H., Li, M., Li, Y., (2019). Design of a new seven-dimensional hyperchaotic circuit and its application in secure communication,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 125586–125608. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935751>
- Yılmaz G., (2021). Hiperkaotik Sistemler: Sınıflandırılması, Yeni Modellerin Önerilmesi ve FPAA Uygulamaları [Yüksek Lisans tezi]. Erciyes Üniversitesi
- Zhang, J., Hou, D., ve Ren, H., (2016). Image Encryption Algorithm Based on Dynamic DNA Coding and Chen’s Hyperchaotic System. *Math. Probl. Eng.*, vol. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6408741>
- Zhou, H., ve Wilke, S. V., (2018). Research on image selective encryption and compression algorithm under hyperchaotic system. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 35, no. 4, pp. 4329–4337. <https://doi.org/10.3233/JIFS-169753>



## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hakan KAYA

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2024-halen, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Elektrik Programı

### MESLEKİ DENEYİM :

- 2011-2012, yılları arasında Ziraat Bankası Adapazarı Şubesinde çalıştı.
- 2013-Halen, Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi Anonim Şirketine çalışmaktadır.
- Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulunda misafir öğretim görevlisi olarak Otomasyon Sistemleri, Elektromekanik Kumanda Sistemleri ve Elektrik Malzeme Bilgisi derslerini vermektedir.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kaya, H., Uyaroglu, Y. (2024). Control and Synchronization of a Memristor-based Hyperchaotic Lorenz System using Sliding Mode Control, *Journal of Smart Systems Research*.