



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**KAOTİK ELEKTRONİK DEVRE TASARIMI,
GERÇEKLEMESİ VE BİR HABERLEŞME UYGULAMASI**

Oğuzhan ÖNAL

Yüksek LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı

Yrd. Doç.Dr. İhsan PEHLİVAN

BİLECİK, 2013



BİLECİK ŞEYH EDEBALI UNIVERSITY
Graduate School of Sciences
Electrical and Electronics Engineering Program

**CHAOTIC ELECTRONIC CIRCUIT DESIGN, IT'S
REALIZATION AND A COMMUNICATION
IMPLEMENTATION**

Oğuzhan ÖNAL
Master of Science Thesis

Thesis Advisor
Assist. Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN

BİLECİK, 2013

 <p>BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ</p> <p>BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</p>	<p>YÜKSEK LİSANS</p> <p><u>JÜRİ ONAY FORMU</u></p>
---	--

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/08/2013 tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/09/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Oğuzhan ÖNAL'ın "Kaotik Elektronik Devre Tasarımı, Gerçekleşmesi Ve Bir Haberleşme Uygulaması" başlıklı tez çalışması Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd.Doç.Dr. İhsan PEHLİVAN

ÜYE : Doç. Dr. Mehmet KURBAN

ÜYE : Yrd.Doç.Dr. Nazım İMAL

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10/10/2013 tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Kaos günümüzde kendine bir çok uygulama alanı bulmuş popüler bir bilim dalıdır. Bu uygulama alanlarından biri de kaos ile güvenli haberleşmedir. Dinamik sistemlerin davranışları çeşitli yöntemlerle analiz edilerek hareketin kaotik olup olmadığı belirlenebilir. Kaotik işaretler, başlangıç şartlarına hassas bağımlıdır, tahmin edilemez özelliklere ve gürültü benzeri geniş yayılı spektruma sahiptirler. Kaotik işaretlerin bu özellikleri kullanılarak değişik güvenilir haberleşme uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir.

Bu tezin ikinci bölümünde dinamik sistemler ve kaos hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde bol miktarda kaotik sistem örneği incelenmiş ve analiz edilmiştir. Dördüncü bölümde sürekli zamanlı kaotik sistemlerin modellenmesi, devre tasarımı ve gerçeklemelerinin yapılması anlatılmıştır. Bu kapsamda dördüncü bölümde ilk olarak literatürde çok iyi bilien Chen sistemi için daha basit devre tasarımları önerilmiş ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. İkinci olarak daha önce devre tasarımı yapılmamış olan Halvorsen sisteminin devre tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılarak sonuçlar sunulmuştur. Üçüncü olarak Dört sarmallı bir kaotik sistemin(Pehlivan, 2011) devre tasarımları ve simülasyon sonuçları incelenmiştir. Dördüncü olarak Pehlivan tarafından 2007’de tanıtılan(Pehlivan, 2007) kaotik C sisteminin osilatör devresi tasarlanmış ve simülasyonları ilk defa yapılmıştır. Beşinci olarak 2007 ve 2011’de tanıtılan(Pehlivan, 2007), (Pehlivan, 2010), kaotik G sistemi ayrıntılı olarak analiz edilmiş, ilk defa olarak akım taşıyıcı elemanlarla(CCII’ler) devre tasarımı ve Simülasyonları yapılmıştır. Tezin beşinci bölümünde kaotik sistemlerin senkronizasyonu anlatılmış, Lorenz sistemi ve kaotik G(Pehlivan, 2010) sistemi üzerinde hem Matlab-Simulink hem de elektronik devre olarak başarılı bir şekilde senkronizasyon çalışmaları yapılmıştır. Tezin altıncı bölümünde kaotik sistemlerin gizleme yöntemiyle haberleşmesi anlatılmış, yine Lorenz sistemi ve kaotik G(Pehlivan, 2010) sistemi kullanılarak Orcad-PSpice ve gerçek devre ortamında başarılı bir şekilde sinyal gizleme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarla kaotik sistemlerin senkronize olabileceği ve sinyal gizleme uygulamalarında kullanılabileceği simülasyon ve uygulamalar ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaos, Kaotik Sistemler, Tuhaf Çekici, Kaotik Devreler, Kaotik Senkronizasyon, Kaotik Gizleme, Güvenli Haberleşme

ABSTRACT

Chaos is a popular discipline which has a lot of application fields. One of these application fields is secure communications. It can be determined whether behaviors are chaotic or not by analyzing the behaviors of the dynamic systems by different methods. Chaotic signals are sensitively dependent on the initial conditions. They have unpredictable features and an image-like wide-spring spectrum. Different, reliable communication applications can be carried out by using the features of chaotic signs.

In the first part of this thesis, some information about chaos and dynamic system was given. In the third part, a lot of chaotic system examples were examined and analyzed. In the fourth part, the modeling of continuous timing systems, circuit design and validation were mentioned. Within this scope in the fourth part, first a simple circuit design was proposed for a Chen system, which are well known in literature, and simulation results were presented. Secondly, the circuit design and application of Halvorsen system, which was not developed before, was made and the results were presented. Thirdly, the circuit design of a Dört sarmallı chaotic system (Pehlivan, 2011) and the simulation results were examined. Then, The oscillator circuit of chaotic C system, which was mentioned by Pehlivan in 2007 (Pehlivan, 2007), was designed and the simulations were made for the first time. Fifthly, chaotic G system, which was mentioned in 2007 and 2011 (Pehlivan, 2007), (Pehlivan, 2010), was analyzed in detail and the circuit design and simulations were made by current carrier elements (CCII) for the first time. In the fifth part of the thesis, synchronization of chaotic systems was told and synchronization performance was conducted successfully for Lorenz system and chaotic G (Pehlivan, 2010) system as both Matlab-Simulink and electronic circuit. In the sixth part, the communication of chaotic system by the hiding method of chaotic systems was presented, and signal hiding applications were conducted in Orcad-PSpice and real circuit environment by using Lorenz and chaotic (Pehlivan, 2010) system

again. It was conducted by the simulations and applications that the chaotic systems can be synchronized and can be used for signal hiding applications.

Key Words: Chaos, Chaotic Systems, Strange Attractor, Chaotic Circuits, Synchronization, Chaotic Masking, Secure Communication

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca her türlü emek, ilgi, destek ve teşviklerini esirgemeyen başta sayın danışmanım Yrd. Doç. Dr. İhsan PEHLİVAN' na teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü anlayış, destek ve yardımlarından dolayı aileme, eşime, kızıma, mesai arkadaşlarıma ve katkısı olan herkese teşekkür ederim.

Ayrıca bu yüksek lisans sürecinde bizlerden yardımlarını esirgemeyen her türlü desteği veren hocamız Doç. Dr. Mehmet KURBAN'a ve bizlere Laboratuvar ve Atölyelerini kullanma fırsatı veren Yüksekokul Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

Oğuzhan ÖNAL

Ekim, 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	i
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. DİNAMİK SİSTEMLER VE KAOS	6
2.1. Sürekli - Zaman Sistemleri.....	6
2.2. Ayrık – Zaman Sistemleri	9
2.3. Lyapunov Üstelleri.....	10
2.4. Boyut	11
2.5. Çatallaşma	12
3. KAOTİK SİSTEMLER	14
3.1. Lorenz Sistem Ailesi	14
3.2. Rössler Sistemi.....	21
3.3. Chua Sistemi ve Devresi	23
3.4. Shimizu-Morioka Sistemi	26
3.5. Strizhak-Kawczynski Sistemi	27
3.6. Aizawa Sistemi.....	28
3.7. Zorlanmış Brusselator Sistemi	29
3.8. Ueda Osilatörü	30
3.9. Hill Sistemi.....	31
3.10. Duffing-Moon-Holmes Sistemi	33
3.11. Duffing-Van Der Pol sistemi	34
3.12. Rayleigh-Duffing sistemi.....	35
3.13. Hadley dolaşım sistemi (Lorenz 1984b)	36
3.14. Guckenheimer-Holmes sistemi	37
3.15. ACT çekicisi.....	39
3.16. Leipnik-Newton sistemi	40
3.17. Matsumoto-Chua sistemi	41
3.18. Thomas dairesel simetrik çekicisi	42

3.19. Thomas 1996 sistemleri	43
4. KAOTİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE DEVRE GERÇEKLEMESİ	45
.....	45
4.1. Dinamik ve Kaotik Sistemlerin Modellenmesi	45
4.2. Devre Gerçeklemede Kullanılan İşlemsel Elemanlar ve Temel İşlem Devreleri	48
4.2.1. Analog çarpma entegreleri	48
4.2.2. Opamplar	49
4.2.3. Gerilim takipçisi devresi	50
4.2.4. Eviren ve evirmeyen yükselteç devresi	50
4.2.5. Toplama devresi	51
4.2.6. İntegral alma devresi	51
4.3. Kaotik Sistemlerin Devre Gerçeklemesi	52
4.4. Duffing Sistemi Modellemesi ve Devre Tasarımları	59
4.5. Chua Sistemi Modellemesi ve Devre Tasarımları	61
4.6. Chen Sistemi Modellemesi ve Devre Tasarımları	64
4.7. Halvorsen dairesel simetrik çekicisi.....	67
4.8. Yeni Dört Sarmallı Yıldız Kaotik Sistem	72
4.8.1. Dört-Sarmallı Kaotik Sistemin Devre Gerçeklemesi.....	78
4.9. Kaotik C Sistemi ve Devre Gerçeklemesi.....	80
4.10. G Kaotik Sistemi Ve Devre Gerçeklemesi.....	85
4.11. G Kaotik Sistemi İle Genel Lorenz Sistem Ailesinin Karşılaştırılması.....	94
4.12. G Kaotik Sisteminin CCII lerle Gerçekleştirilmesi	98
5. KAOTİK SİSTEMLERİN SENKRONİZASYONU.....	100
5.1. Kaotik Sistemlerin Senkronizasyonu	100
5.2. Lorenz Sistemi Simulink Ve Devre Senkronizasyonları	105
5.3. Kaotik G Sisteminin Simulink ve Devre Senkronizasyonları.....	109
6. KAOTİK SİSTEMLERİN GİZLEME YÖNTEMİYLE HABERLEŞMESİ... 114	114
6.1. Lorenz Sistemi Kaotik Gizleme Haberleşme Devresi	120
6.2. Kaotik G sistemi ile sinyal gizleme uygulamaları	124
7. SONUÇLAR	129
KAYNAKLAR.....	132

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1 Tipik kaotik sistemler için denge noktaları ve özdeğerler	76
Çizelge 4.2 Lorenz ve Chen sistemleri ile kaotik G sisteminin karşılaştırılması.....	89
Çizelge 4.3 Tipik kaotik sistemler için denge noktaları ve özdeğerler	95
Çizelge 4.4 Tipik kaotik sistemler için sistem parametreleri.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Lorenz sisteminin x, y, z durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi	15
Şekil 3.2. Lorenz sisteminin $x-y, x-z, y-z$ kaotik çekicileri	15
Şekil 3.3. Lorenz sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ yörüngesi.....	16
Şekil 3.4. Lorenz sisteminin Lyapunov üstelleri.....	16
Şekil 3.5. Rössler sisteminin x, y, z durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi	22
Şekil 3.6. Rössler sisteminin $x-y, x-z, y-z$ kaotik çekicileri.....	22
Şekil 3.7. Rössler sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ yörüngesi.....	23
Şekil 3.8. Chua Devresi.....	24
Şekil 3.9. Doğrusal olmayan direncin karakteristiği.....	24
Şekil 3.10. Chua devresinin $VC1, VC2, iL$ durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi	25
Şekil 3.11. Chua devresinin $x-y, x-z, y-z$ kaotik çekicileri	26
Şekil 3.12. Shimizu-Morioka sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	27
Şekil 3.13. Shimizu-Morioka sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi	27
Şekil 3.14. Strizhak-Kawczynski sisteminin $x-y$ kaotik çekicileri a) $R = 0.101115$ b) $R = 0.800$	28
Şekil 3.15. Aizawa sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri	29
Şekil 3.16. Aizawa sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	29
Şekil 3.17. Zorlanmış Brusselator sisteminin x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi	30
Şekil 3.18. Zorlanmış Brusselator sisteminin $x - y$ kaotik çekicisi.....	30
Şekil 3.19. Ueda Osilatör sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.....	31
Şekil 3.20. Ueda Osilatör sisteminin $x - y$ kaotik çekicisi.	31
Şekil 3.21. Hill sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi	32
Şekil 3.22. Hill sistemi, $x-y$ kaotik çekicileri a) $a = 1.5$ b) $a = -1$	32
Şekil 3.23. Duffing-Moon-Holmes sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi	33
Şekil 3.24. Duffing-Moon-Holmes sisteminin $x-y$ kaotik çekicisi.	34

Şekil 3.25. Duffing-van der pol sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.....	35
Şekil 3.26. Duffing-van der pol sisteminin $x-y$ kaotik çekicisi.....	35
Şekil 3.27. Rayleigh-Duffing sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.....	36
Şekil 3.28. Rayleigh-Duffing sisteminin $x-y$ kaotik çekicisi.....	36
Şekil 3.29. Hadley dolaşım sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	37
Şekil 3.30. Hadley dolaşım sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	37
Şekil 3.31. Guckenheimer-Holmes sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	38
Şekil 3.32. Guckenheimer-Holmes sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	38
Şekil 3.33. ACT çekicisi sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	39
Şekil 3.34. ACT çekicisi sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	39
Şekil 3.35. Leipnik-Newton sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	40
Şekil 3.36. Leipnik-Newton sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	40
Şekil 3.37. Matsumoto-Chua sisteminin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	41
Şekil 3.38. Matsumoto-Chua sisteminin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	41
Şekil 3.39. Thomas dairesel simetrik çekicisinin a) $x-y$, b) $x-z$, ve c) $y-z$ kaotik çekicileri.....	42
Şekil 3.40. Thomas dairesel simetrik çekicisinin üç boyutlu $x-y-z$ kaotik yörüngesi.....	42
Şekil 3.41. Thomas 1996 sistemlerinin $x-y$ kaotik çekicileri a) (A) sistemi b) (B) sistemi.....	43
Şekil 3.42. Thomas 1996 sistemlerinin $x-y-z$ kaotik yörüngeleri a) (A) sistemi b) (B) sistemi.....	44
Şekil 4.1. Blok diyagramlar ile modelleme için gereken temel işlemler (a) Toplama (b) Sabit ile çarpma (c) İntegral alma (d) İşaret tersleme (e) Analog çarpma.....	46
Şekil 4.2. (4.2) denklemini modelleyen blok diyagramı.....	48
Şekil 4.3. Örnek çarpma entegresinin(AD633) fonksiyonel blok diyagramı ve çıkış fonksiyonu.....	49
Şekil 4.4. Opamp'ın a) devre sembolü b) eşdeğer devresi.....	49
Şekil 4.5. Opampli gerilim takipçisi devresi.....	50

Şekil 4.6. (a) Opampli eviren yükselteç devresi, (b) Opampli evirmeyen yükselteç devresi	50
Şekil 4.7. Opampli toplama devresi.....	51
Şekil 4.8. Opampli integral alma devresi	51
Şekil 4.9. Lorenz sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.....	52
Şekil 4.10. Cuomo ve Oppenheim'in 1993 de tanıttığı Lorenz devresi.....	53
Şekil 4.11. Lorenz sisteminin basitleştirilmiş 2. devre tasarımı.	54
Şekil 4.12. Lorenz 2. devre tasarımının u hesaplama devresi.....	54
Şekil 4.13. Lorenz 2. devre tasarımının v hesaplama devresi.....	55
Şekil 4.14. Lorenz 2. devre tasarımının w hesaplama devresi.....	56
Şekil 4.15. Lorenz 2. devre tasarımının Pspice simülasyon sonuçları (a)kaotik u, v, w sinyallerinin zamana göre değişimi, b) u-v c) u-w d) v-w kaotik çekicileri.....	58
Şekil 4.16. Duffing sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.....	59
Şekil 4.17. Parçalı-Doğrusal Duffing devresi.	60
Şekil 4.18. Parçalı-Doğrusal Duffing devresindeki X3 işlemini yapan DFG (diyot fonksiyon generatörü) devresi.....	60
Şekil 4.19. Chua sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.....	61
Şekil 4.20. a) Chua devresi b) Chua diyodu akım-gerilim karakteristiği.....	62
Şekil 4.21. Bobin ve chua diyodunun opamplarla gerçekleştirilmesiyle elde edilen Chua devresi.	62
Şekil 4.22. Chua Devresinin pspice simülasyon sonuçları a) VC1, VC2 gerilimlerinin zaman göre değişimi b) VC2-VC1 c) VC1-IL d) VC1-IL kaotik çekicileri.....	63
Şekil 4.23.Chen sisteminin Matlab-Simulink modellemesi	64
Şekil 4.24. Chen sisteminin Pspice simülasyon devresi.	65
Şekil 4.25. Chen devresinin u, v, w değişkenlerinin zamana göre değişimi.....	65
Şekil 4.26. Chen devresinin pspice simülasyon sonuçları a) u-v, b) u-w, d) v-w kaotik çekicileri.....	66
Şekil 4.27. Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.	67

Şekil 4.28. Halvorsen dairesel simetrik çekicisinin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.....	68
Şekil 4.29. Halvorsen dairesel simetrik çekicisinin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.	68
Şekil 4.30. Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin Pspice devre şeması.	69
Şekil 4.31. Sistemin PSPICE analizinde elde edilen grafiksel sonuçlar, a,b,c şekilleri sırasıyla X-t, Y-t, Z-t zamana göre grafiksel sonuçları göstermek üzere, d,e,f şekilleri sırasıyla Y-X, X-Z, Y-Z grafiksel sonuçlarını göstermektedir.	70
Şekil 4.32. Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin osiloskop çıkışları...72	72
Şekil 4.33. Yeni dört sarmallı kaotik sisteminin 2 ve 3 boyutlu faz portreleri.	73
Şekil 4.34. $x_0=0.6$, $y_0=0$, $z_0=0$ başlangıç şartları ve $a=4$, $b=0.5$, $c=0.6$ parametreleri için yeni kaotik sistemin Lyapunov Üstelleri.....	74
Şekil 4.35. (a) c değişken parametresi ve $a=4$, $b=0.5$ sabit parametreleri için yeni sistemin Lyapunov Üstler Spektrumu. (b) c değişken parametresi ve $a=4$, $b=0.5$ sabit parametreleri için yeni sistemin en büyük Lyapunov Üstler Spektrumu..	78
Şekil 4.36. Dört sarmallı kaotik sistemin elektronik devre şeması.....	79
Şekil 4.37. Dört sarmallı kaotik sistemin x, y, z kaotik sinyalleri.	79
Şekil 4.38. Dört sarmallı kaotik sistemin faz portreleri.	80
Şekil 4.39. Kaotik C Sisteminin x,y,z kaotik durum değişkenlerinin zamana göre değişimi.	80
Şekil 4.40. Kaotik C Sisteminin x-y, x-z, y-z kaotik çekicileri ve üç boyutlu x-y-z yörüngesi.	81
Şekil 4.41. Kaotik C Sisteminin Lyapunov Üstelleri.....	81
Şekil 4.42. Kaotik C Sistemi elektronik devresinin Pspice devre tasarımı.....	83
Şekil 4.43. Kaotik C Sistemi x, y, z değişkenlerinin zamana göre değişimi.	84
Şekil 4.44. Kaotik C Sistemi x-y faz portresi.	84
Şekil 4.46. Kaotik C Sistemi y-z faz portresi.....	85
Şekil 4.47. Kaotik G sisteminin x, y, z kaotik durum değişkenlerinin zamana göre değişimi.	86

Şekil 4.48. Kaotik G sisteminin x-y, x-z, ve y-z kaotik faz portreleri.	86
Şekil 4.49. Yeni kaotik G sisteminin Lyapunov üstelleri.	89
Şekil 4.50. Yeni kaotik G sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.....	90
Şekil 4.51. Yeni kaotik G sisteminin tasarlanan elektronik devre şeması.	91
Şekil 4.52. Yeni kaotik G sisteminin elektronik elemanlarla yapılmış fiziksel gerçeklemesi.....	91
Şekil 4.53. G kaotik sisteminin sabit a parametresi (a=0.5) ve değişken b parametresi için elde edilen Lyapunov Spektrumu.....	93
Şekil 4.54. a değişken parametresi ve b=0.5 sabit parametresi için yeni kaotik sistemin Lyapunov Spektrumu	97
Şekil 5.1. Peş peşe bağlanmış senkronizasyon sisteminin blok diyagramı.....	104
Şekil 5.2. Pecora-Carroll (P-C) peşe bağlama metodunun farklı bir anlatımı.	104
Şekil 5.3. Lorenz sisteminin Simulink P-C senkronizasyon modellemesi.....	105
Şekil 5.4. Lorenz sistemi Simulink senkronizasyon sonuçları (a)Sürücü sinyal(X), cevap sinyali(Xc) ve senkronizasyon hatası($e = X - Xc$)'nın zaman göre değişimi (b) X -Xc değişimi (senkronizasyondan önce) (c) X -Xc değişimi (senkronizasyondan sonra).	106
Şekil 5.5. Lorenz sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi.....	107
Şekil 5.6. Lorenz Sistemi Simulink Ve Devre Senkronizasyonları	108
Şekil 5.7. Kaotik G sisteminin Simulink P-C senkronizasyon modellemesi.....	110
Şekil 5.8. Kaotik G sistemi Simulink senkronizasyon sonuçları (a) Senkronizasyon öncesi Sürücü(X) ve Cevap(Xc) kaotik sinyallerin zamana göre değişimi (b) X -Xc değişimi (senkronizasyondan önce) (c)Sürücü sinyal(X), cevap sinyali(Xc) ve senkronizasyo	111
Şekil 5.9. Kaotik G sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi	112
Şekil 5.10. Kaotik G sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi simülasyon sonuçları (a) Senkronizasyon öncesi Sürücü(X) ve Cevap(Xc) kaotik sinyallerin zamana göre değişimi(b) Senkronizasyonsuz X-Xc değişimi (c) Sürücü(X) ve Cevap(Xc) kaotik sinyallerinin zamana göre değişimi.	113
Şekil 6.1. Kaotik gizleme yöntemiyle haberleşmenin mantığını gösteren blok diyagram	115

Şekil 6.2. Lorenz sisteminin Simulink’de yapılan kaotik gizleme haberleşme modellemesi.	116
Şekil 6.3. Lorenz sisteminin Simulink’de yapılan kaotik gizleme yöntemiyle haberleşme modelinin simülasyon sonuçları (a) Verici sistemin $X(t)$ sinyali, alıcı sistemin $X_c(t)$ sinyali, bilgi işareti $i(t)$ ve tekrar elde edilen bilgi işareti $ic(t)$ ’nin zamana göre değişimi.....	117
Şekil 6.4. Lorenz sisteminin Pspice simülasyonu için kaotik gizleme yöntemiyle yapılan haberleşme devresi.	118
Şekil 6.5. Lorenz sistemi kaotik gizleme yöntemiyle haberleşme devresinin Pspice simülasyon sonuçları (a) Verici sistemin $X(t)$ sinyali ve alıcı sistemin $X_c(t)$ sinyali’nin zamana göre değişimi, (b) Bilgi işareti $i(t)$ ve tekrar elde edilen bilgi sinyali $ic(t)$ ’nin zamana göre değişimi.....	119
Şekil 6.6. Lorenz sisteminin Simulink’de yapılan kaotik gizleme haberleşme modellemesi.	120
Şekil 6.7. Lorenz sistemi kaotik gizleme haberleşme modeli simülasyon sonuçları ...	121
Şekil 6.8. Lorenz sistemi sisteminin Pspice kaotik gizleme haberleşme devresi.....	122
Şekil 6.9. Lorenz sistemi kaotik gizleme haberleşme devresinin Pspice simülasyon sonuçları.	123
Şekil 6.10 . P kaotik sistem maskeleye iletişim devresi a) Verici devre, b) Alıcı Devre, c) Toplayıcı ve Çevirici, d) Çıkarıcı.....	126
Şekil 6.11 P kaotik sistem maskeleye iletişim devresinin ORCAD-PSpice simülasyon sonuçları	127
Şekil 6.12 P Kaotik sistem maskeleye iletişim devresinin gerçek osiloskop çıkışları.	128

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Parametre
b	Parametre
c	Parametre
C	Kapasitör
d	Parametre
D_0	Kapasite boyutu, fraktal boyut
D_2	Korelasyon boyutu
e	Hata
E	Kaynak Gerilimi
F	Frekans
G	Kondüktans
I	Akım
$i(t)$	Bilgi işareti
$ic(t)$	Tekrar elde edilen bilgi işareti
L	Endüktör
L	Limit kümesi
R	Direnç
$S(t)$	İletilen İşaret
SR	Yükselme eğimi
B	Zaman skalalama faktörü
τ	Hesaplama (devre) zamanı
P_i	Relatif frekans
$N(\epsilon)$	Limit kümeyi örtmek için gerekli olan hacim elemanlarının sayısı
ϵ	Limit kümeyi örtmek için gerekli olan n boyutlu hacim elemanlarının bir kenarının uzunluğu
w_0	Frekans bileşeni
\bar{x}_n	Sistemin n. tekrarlama durumu

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun bitmez tükenmez merakı, çevresinde olup bitenleri anlama çabası çeşitli bilim dallarının doğmasına neden olmuştur. Bu bilim dalları sayesinde keşifler yapılmış ve doğrusal görünen hareketler formülize edilmiştir. Geçtiğimiz yüzyıla kadar doğrusal olmayan hareketler açıklanamamıştır ve geçtiğimiz yüzyılın ortalarında kaos bilimi doğmuştur.

Kaos, düzensizliğin düzeni şeklinde tanımlanan, doğrusal olmayan olayları açıklamaya yarayan bir bilim dalıdır. Özellikle dikkat edilmesi gereken bir nokta, kaos'un rastgelelik olmadığıdır. Kaos, karmaşık davranışlar gösteren kendine has bir "düzen" dir. Dinamik sistemlerde bilinen en karmaşık kararlı hal davranışı "kaos" dur. Kaos ile ilgili çalışmalar, doğrusal olmayan dinamik sistemler teorisinin bir kısmıdır.

Kaosun ve kaotik işaretlerin başlıca önemli özellikleri; zaman boyutunda düzensizliği, başlangıç şartlarına hassas bağımlılığı, sınırsız sayıda değişik periyodik salınımlar içermesi, gürültü benzeri geniş güç spektrumuna sahip olması, limit kümesinin parçalı(fraktal) boyutlu olması, genliği ve frekansı tespit edilemeyen, ancak sınırlı bir alanda değişen işaretler içermesidir.

Kaos bilimindeki, determinizmin kaotik sistemleri önceden tahmin edemeyeceği keşfi bilimin deterministik bakış tarzlarını değiştirmiştir. Doğrusal olmayan sistem teorilerindeki ilerleme, yeni deneysel teknikler, pahalı ve işlem gücü yüksek bilgisayarların ucuzlayıp yaygınlaşması, karmaşık ve doğrusal olmayan davranışları daha iyi analiz etmeye ve anlamaya sebep olmuş ve sonuç olarak Kaos Bilimi gelişmiştir. Kaos ve karmaşıklıkla ilgili gözlemlere paralel olarak, bu olayın mekanizmasının anlaşılması, kaotik davranışın nitelendirilmesi, özelliklerinin belirlenmesi, deneysel verilerin ölçülmesi ve analizinin yapılması ile ilgili araştırmalarda çok hızlı gelişmeler kaydedilmiştir.

Kaos kuramı ve bunun üzerine bina edilen kaos bilimi, evrende ve günlük hayatımızda sıklıkla karşılaşılan ve evvelce tamamen rastgele olarak nitelenen olayları sayısallaştırıp ölçülebilir hale getirmek, veya en azından bu tip sistemlerin davranış seyirleri hakkında yeterli kesinlikte tahminlerde bulunabilmekle uğraşır. Karmaşık ve öngörülemez olan her şey, kaos bilimcisinin ilgi alanındadır. Tabii ki, tıptan tutun, ekonomiye kadar, yaşadığımız evreni anlamaya çalıştığımız tüm bilim dallarının ana konuları, aslında böyle karmaşık ve öngörülemez birçok bileşen içerir.

Temel fizik kurallarına dayanan “kaos teorisi” makro iktisat ve finans literatüründe artan bir tempoda yer bulmaktadır. Ekonomideki karmaşık piyasa faaliyetleri nedeniyle bu faaliyetleri modellemek birçok güçlükler içermektedir. Kaos teorisinin ekonomideki uygulamaları bu güçlüklerin aşılmasını amaçlamaktadır.

Canlı sistemlerde, adeta tam bir karmaşa halinde hareket eden beyin dalgaları, kan basıncı dalgalanmaları, epilepsi ve benzeri sinirsel hastalıkların ortaya çıkış düzenleri gibi bir çok ‘rasgele’ hadisenin, aslında belli kurallar ve döngüler içinde gerçekleştiğini, yine kaos biliminin matematiksel formülleri ortaya koydu. Psikiyatri ve sinir bilimleri başta olmak üzere, yaşam bilimlerinin tüm alanları, yaşamın o akıl almaz karmaşıklığının bolca ‘kaos’ ihtiva ettiğini gün geçtikçe daha açık bir biçimde ortaya koyuyorlar.

Jeofizikte depremlerin zamansal ve konumsal dağılımları gibi birçok olgunun, kaotik davranış gösterdiği ve fraktal analiz yardımı ile incelenebilir olduğu bilinmektedir.

Bir derecede akan suyun oluşturduğu girdapların, uçak kanatlarının oluşturduğu hava tribülanslarının ve diğer başka birçok benzer görüngünün temelinde yine kaotik kuralların yattığı bir bir ortaya kondu. Günümüzde Kaos teorisinin meteoroloji, nüfus dinamikleri, politika, güvenli haberleşme, şifreleme, otomatik kontrol sistemleri, lazer fiziği, çevrebilim, biyoloji, mikrobiyoloji, robotik psikoloji ve sosyoloji gibi alanlarda başarılı uygulamaları vardır.

Ondokuzuncu yüzyılın sonlarında, 1892 yılında Fransız matematikçi Henri Poincare yeni ufuklar açan bir araştırma(Poincare, 1990) ile basit dinamik kuralların çok karmaşık kararlı-hal davranışlarına yol açabileceğini keşfetti. Şimdi bunlar “kaotik davranışlar” olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca Poincare, şimdi kaotik yörünge denilen çok karmaşık yörüngelerin mümkün olduğunu ve başlangıç şartlarına hassas bağlılık gibi kaotik dinamiklerin çok önemli özelliklerini gösterdi.

Van der Pol 1927 yılında Nature Magazine adlı dergide (Kennedy, 1995) çıkan makalesinde neon tüplü osilatöründeki periyot çoğullama olayını telefon ahizesindeki kulaklığı kullanarak gözlemiştir. Van der Pol, kapasite değerinin değişimi ile, frekanstaki değişimleri bir değerden sonra sık sık düzensiz bir gürültü şeklinde kulağıyla fark etmiş ve makalesine "Frequency demultiplication" adını vermiştir. Van der Pol, Feigenbaum'un 1975 yılında söyleyeceği periyot çoğullama kaosa götürür tezini kurduğu devrede gözlemiş, fakat o zamanki bilgilerle çıkan sonucu açıklayamadığı için kaosu gürültü sanmıştır. 1986 yılında (Kennedy, 1986) M. Peter Kennedy, Van der Pol'un çalışmasını tekrar inceleyerek Van der Pol'un gürültü olarak adlandırdığı şeyin aslında kaos olduğunu göstermiştir.

1963 yılında, M.I.T. bilimcisi E. N. Lorenz hava durumunu önceden belirleyebilmek için atmosferdeki akışkan ısı-yayınımını benzetim yaparken, yeni tip düzensiz salınımlar gözlemledi(Lorenz, 1963) ve bir model önerdi.

1975 yılında M. J. Feigenbaum' un periyot çoğullamayı kaosun bir belirtisi olarak verdiği çalışma(Moon, 1987) bunlardan biridir. 1975 yılında, Li ve Yorke (Li ve Yorke, 1975) bu çeşit davranışı belirtmek için “kaos” terimini kullanmayı önerdiler.

Dinamik sistemler teorisi üzerindeki gelişmelere paralel olarak, 1970'li yılların ortalarında bilgisayarların gelişmesi, hızlanması ve yaygın kullanımı, matematik, mühendislik ve farklı bilimsel alanlardaki geniş sayıda araştırma gruplarını kaotik davranışları gözlemlemeye yöneltti. Yüksek hızlı bilgisayarlar ve bilgisayar grafikleri, doğrusal olmayan dinamikler ve kaos alanındaki ilerlemelerin anahtar araçları olmuştur.

1976 yılında, Rössler (Rössler, 1976) düşük boyutlu dağıtık dinamik sistemlere olan ilgiyi yeniden alevlendiren önemli bir çalışma gerçekleştirdi. 1979 yılında yine Rössler'in kendisi(Rössler, 1976) cebirsel olarak daha basit olan bir sistemi önerdi.

Literatürde çok sayıda otonom kaotik devre geliştirilmiş olsa da üzerinde en çok çalışma yapılan ve kaotik dinamikleri en iyi bilinen otonom sistemler Chua osilatörü, Rössler osilatörü ve Lorenz sistemidir (Lakshmanah ve Muralı, 1996). 1984'te geliştirilen otonom Chua devresi (Chua vd.. 1993), (Matsumo vd.. 1984) basit bir devre yapısına sahip olmasına rağmen kompleks dallanma ve kaos sergilemesi dolayısıyla elektronikteki kaos olayının açıklanmasında model devre olmuştur.

Son 30 yılda yapılan çalışmalarda RLC ve RC devreleri (Matsumo vd.. 1987), (Cassais vd.. 1983) özellikle Van der Pol ve Duffing denklemleri ile tanımlanan değişik tipteki osilatörler (Kawakami,1984),(Kawakami, 1987) anahtarlamalı kapasitör devreleri (Ohmori vd.. 1985), (Rodriguez vd.. 1985), PLL'li yapılar (Endo ve Chua, 1988) sayısal filtreler (Chua ve Lin, 1990) güç devreleri (Hamil ve Jeffries, 1988) gibi pek çok elektronik devre ve sistemin de kaotik davranış sergilediği ortaya konulmuştur.

Bu kaotik elektronik devre gerçekleştirilmesi çalışmalarından farklı olarak kaotik kontrol alanında da çalışmalar yapılmıştır (Muralı vd.. 1995), (Ogorzalek, 1993)

Kaotik işaretlerin ve sistemlerin senkronizasyonu ile bu sistemlerin güvenli haberleşme amaçlı uygulamalarda kullanılması çalışmaları Pecora ve Carroll'un yaptıkları bir çalışmaya ile başlamıştır. Pecora ve Carroll (Pecoran ve Carroll, 1990), (Carroll ve Pecora, 1991), (Pecoran ve Carroll, 1991) kaotik senkronizasyonun sağlanabileceğini yani, alıcı modülde üretilen kaotik işaretin orijinal sistemden gelen kaotik işarete yakınsayacağını gerek teorik gerekse deneysel olarak göstermişlerdir.

Cuomo ve Oppenheim'in (Cuomo ve Oppenheim, 1993), (Cuomo vd.. 1993), (Kocarev vd.. 1992) bir bilgi işaretine kaotik işaret ekleyerek, senkronizasyon kavramının bildiri işaretinin maskelenmesinde nasıl kullanılabileceğini göstermesi, kaotik haberleşme sistem tasarımında ilk uygulamalar olması açısından önemlidir. Bu

ilk çalışmalardan sonra son yirmi yılda kaotik sistemlerin elektronik devre gerçeklemeleri, senkronizasyonu ve senkronize kaotik sistemlerin güvenilir haberleşme amaçlı kullanımı ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. (Parlitz vd.. 1992),(Wu ve Chua, 1993),(Chua vd.. 1993),(Pinkney vd.. 1995),(Short, 1996),(Itom, 1999) (Morgul ve Feki, 1999),(Sano vd.. 2007),(Pehlivan ve Uyaroglu, 2007),(Pehlivan ve Wei, 2012), (Pehlivan ve Uyaroglu, 2012), (Wei ve Pehlivan, 2012), (Sundarapandian ve Pehlivan, 2012), (Pehlivan, 2011), (Pehlivan vd.. 2010), (Uyaroglu ve Pehlivan, 2010), (Pehlivan ve Uyaroglu, 2010), (Pehlivan ve Uyaroglu, 2007).

2. DİNAMİK SİSTEMLER VE KAOS

Bir dinamik sistem, o anki durumu geçmiş durumlar cinsinden belirten bir kuralla birlikte olası durumların kümesini içerir. Eğer kural, ayrık zamanlı olarak uygulanırsa, bu ayrık-zamanlı dinamik sistem olarak adlandırılır. Sürekli-zaman dinamik sistemleri durumunda ise etkileyici kural genellikle diferansiyel denklemler kümesidir.

2.1. Sürekli - Zaman Sistemleri

Sürekli-zaman sistemleri, başlangıç şartları ile birlikte k adet birinci dereceden adi diferansiyel denklem ile tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} &= \bar{F} [\bar{x}(t), t] \\ \bar{x}(t_0) &= \bar{x}_0 \end{aligned} \quad (\text{E.2.1})$$

Burada $\bar{x} \in \mathbb{R}^m$ durum vektörü, \bar{x}_0 başlangıç durum vektörüdür. t zamanı, t_0 başlangıç zamanını, ve $\bar{F}: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ vektör alanını gösterir. Tüm ilk şartlar ve bütün $t \geq t_0$ lar için, \bar{F} alanının, E.2.1 denklemi çözümünün varlığı ve tekliğini temin etme şartlarını gerçeklediğini varsayıyoruz. E.2.1 denkleminde vektör alanının açıkça zamana bağlı olduğu durumda, sistemin otonom olmayan bir sistem olduğu söylenebilir. Aksi takdirde, zamana bağlı olmayan sistem yani otonom sistem denilebilir ve onun dinamik davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler sistemi şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} &= \bar{F} [\bar{x}(t)] \\ \bar{x}(t_0) &= \bar{x}_0 . \end{aligned} \quad (\text{E.2.2})$$

Bir otonom sistemin değişimini kendi faz uzayında temsil etmek yaygındır. Bu uzay, sistemin dinamik durumunu tanımlamak için gerekli olan tüm değişkenlerin kümesi tarafından oluşturulur. Dinamik sistemin durumu, verilen bir zamanda, bu sistemin değişimi yada geçmişini tanımlamak için bilgisi gerekli olan değişkenlerin kümesidir. Sistemin E.2.2 denklemleri ile tanımlandığı durumda faz uzayı \mathbb{R}^m dir. E.2.2 denklemleri gibi sonlu-boyutlu bir sistem için, faz uzayının boyutu E.2.1 denklemleri entegre etmek için gerekli olan başlangıç şartlarının sayısına eşittir.

Eğer, E.2.2 otonom denklemler sisteminin çözümünü $\bar{\varphi}_t(x_0)$ ile belirtirsek

$$\bar{\varphi}_t: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m; x \mapsto \bar{\varphi}_t(x_0) \quad (\text{E.2.3})$$

uygulamalar ailesi akış yada dinamik sistemin “zaman-t” haritası olarak adlandırılır.

Bu harita her \bar{x} durumunu, sistem durumunun sonraki t zaman birimleri ile ilişkilendirir. $\{\bar{\varphi}_t(x_0): -\infty < t < +\infty\}$ Noktalar kümesi, \bar{x}_0 boyunca giderken sistemin yörüngesi olarak adlandırılır. Başlangıç değer problemi çözümünün tekliğinin, otonom sistemin iki yörüngesinin faz uzayında kesişmeyeceğine işaret ettiği kolayca anlaşılır.

Doğrusal olmayan dinamik sistemlerin çözümleri bilinen basit fonksiyonlarla

(e^{-at} , $\sin(\omega t)$, vb.) ifade edilemediğinden, bu tür bir sistem hakkında doğrudan yargıya varmak mümkün değildir. E.2.1 eşitliği biçimindeki doğrusal olmayan bir dinamik sistemin davranışını anlamak için, sistemin denge noktaları diye adlandırılan, $\bar{F}[\bar{x}(t)]$ ’nin sıfır çözümüne sahip olduğu noktaları bulmak iyi bir başlangıç olacaktır.

E.2.1 denklemindeki gibi doğrusal olmayan bir sistemde $\bar{F}[\bar{x}(t)] = 0$ eşitliğini sağlayan denge noktaları (\bar{x}), \bar{x} yakınlarındaki çözümlerin davranışını karakterize eder. Yani doğrusal olmayan bir dinamik sistemin davranışını denge noktaları civarında doğrusal bir dinamik sistemin davranışı gibi düşünmek mümkündür. Göz önüne alınabilecek böyle bir doğrusal dinamik sistem, doğrusal olmayan dinamik sistemi, denge noktası civarında oldukça iyi bir yaklaşıklıkla temsil edecektir.

$\bar{F}[\bar{x}(t)]$ Fonksiyonu, \bar{x} denge noktası civarında Taylor serisine açılırsa, bu yaklaşık sisteme ilişkin yeni bir eşitlik elde edilir.

Sistem hakkında, ne tür bir davranış izleyeceğine, Jacobian matrisinin özdeğerlerine bakılarak karar verilir.

Tezde ele alınan sistemler sürekli ve dağıtık(dissipative) sistemlerdir. Dağılma faz uzayındaki herhangi bir hacmin zaman geçtikçe büzülmesidir. Herhangi bir yörünge, $t \rightarrow +\infty$ 'a giderken, asimptotik olarak faz uzayının bir alt kümesine yöneliyorsa, böyle bir altküme “çekici” olarak adlandırılır. Çekicilere doğru yakınsayan yörüngelere yol açan başlangıç şartları kümesi, çekicinin “çekim havuzu” olarak adlandırılır.

Çekicinin geometri bilgisi, sistem serüveninin asimptotik (yada kararlı-hal) tipinin karakterize edilmesinde çok büyük yardım sağlar. Aşağıdaki çekiciler gözlenebilir:

- Sabit nokta. Asimptotik davranış durağandır.
- Limit döngü. Örneğin Kapalı eğri. Kararlı-hal çözümü periyodiktir, spektrum ayrıktır ve temel frekans ve onun harmoniklerince oluşturulur.
- Torus T^r . Asimptotik çözüm yarı-periyodiktir ve spektrumu r temel frekanslara sahiptir. İki boyutlu torus ($r = 2$), durumunda bu açıkça spektrumun iki temel frekansa sahip olduğu anlamına gelir. İki frekansın oranı irrasyonel olduğunda, torus üzerindeki yörüngeler sık bir yoldadır ve spektrumun kendisi sıktır.

Tuhaf çekici. Kararlı-hal kaotiktir. Kaos bazen hariç tutma yoluyla tanımlanır: Deterministik sistemin kararlı-hal çözümü ne sabit, ne periyodik ne de yarı-periyodik ise kaotik olduğu söylenebilir.

Diğer önemli bir özellik başlangıç şartlarına hassas bağılıktır: iki yörünge, başlangıçta birbirine çok yakın da olsa, zamanla birbirinden uzaklaşır ve yörüngeler

arasındaki uzaklık genellikle zamana göre üssel olarak artar. Lyapunov üsteli kavramı, sistemin başlangıç şartlarına olan hassaslığını ölçmeye yardım eder. Lyapunov üsteli, başlangıçta birbirine yakın olan yörüngelerin ıraksama yâda yakınsama oranını ölçer.

Kaotik davranışın diğere bir özelliğı de sistemin limit kümesinin fraktal (parçalı) olmasıdır. Denge noktası, limit çevrim ve torusda boyut bir tamsayı iken kaotik bir sistemin boyutu parçalı (fraktal)' dır.

Dinamik sistemlerde kaos gözleyebilmek için, \bar{F} (sürekli-zaman sistemi) vektör alanının yada $\bar{\varphi}$ (ayrık-zaman sistemi) haritasının doğrusal-olmaması gerekir. Meşhur Poincare-Bendixson teoremi sürekli-zaman dinamik sistemi durumu için diğere bir temel şartı bize verir. Bu şart, kaos gözleyebilmek için faz uzayının boyutunun en azından 3 olması zorunluluğudur. Bu da sürekli-sistemin kaotik davranışlar üretebilmesi için en az üçüncü dereceden bağımsızlığa sahip olmasının gerektiğı anlamına gelir.

2.2. Ayrık – Zaman Sistemleri

$\bar{\varphi}: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ Haritası, bir ayrık zamanlı dinamik sistemi

$$\bar{x}_{n+1} = \bar{\varphi}(\bar{x}_n) \quad (E.2.4)$$

iterasyonu ile tanımlar. Burada \bar{x}_n sistemin n. iterasyon durumudur ve $\bar{\varphi}$ her \bar{x}_n durumunu bir sonraki \bar{x}_{n+1} durumuna devreder. Başlangıç durumu \bar{x}_0 dan başlayarak, $\bar{\varphi}$ haritasının iterasyonu “yörünge” adı verilen bir (\bar{x}_n) vektörler dizisine ulaştırır.

Tek boyutlu ve n boyutlu ayrık zamanlı dinamik sistemler mevcuttur. Yaygın olarak en fazla çalışılan tek-boyutlu doğrusal olmayan harita, lojistik harita dır. Lojistik harita, kuşlar, balıklar, memeliler vb. biyolojik nüfus dinamiğinin çok basit bir modeli olan lojistik denklemin ayrık hale getirilmiş şeklidir.

2.3. Lyapunov Üstelleri

Bir dinamik sistemin davranışının çözümlenmesinde çok önemli bir ölçüt olan Lyapunov üstelleri, sistem hakkında karakteristik bilgiler verir ve aynı zamanda kaotik davranışın da bir ölçüsüdür. Lyapunov üsteli λ , başlangıç şartlarına olan duyarlılığın bir ölçüsünü verir ve faz uzayı içindeki komşu eğrilerin yerel ayrılma derecelerinin ortalaması olarak tanımlanır. Eğer λ negatif ise farklı başlangıç şartları aynı çıkış değerlerini vermeye meyillidir ve dolayısıyla gelişme kaotik değildir. Eğer λ pozitif ise farklı başlangıç değerleri farklı çıkış değerleri verir, yani hareket kaotiktir.

Dinamik sistemin boyutu kadar Lyapunov Üsteli vardır. Lyapunov üstellerinin toplamı, sıfırdan küçük ise kayıplı bir sistemi, sıfır ise kayıpsız sistemi (Hamiltonian sistem), sıfırdan büyük ise genişleyen bir sistemi tanımlar. Tek boyutlu ayırık bir dinamik sistem için tanımlanan Lyapunov üstelini, diferansiyel denklem sistemlerine uygulamak için, diferansiyel denklemler ayırık sistemlere dönüştürülmelidir.

Lyapunov üstelleri başlangıçta çok ufak ayrımlı yörüngelerin birbirlerinden uzaklaşma oranının ölçülmesinde kullanılır. Bir dinamik sistem, toplamı sıfırdan küçük olmak üzere, sıfırdan büyük en az bir Lyapunov üsteli içeriyorsa kaotik olarak tanımlanır. Kaotik bir yörüngenin Lyapunov üstelleri, en azından bir pozitif λ_i 'ye sahiptir. Bu özellik tuhaf bir çekiciyi, sürekli hal davranışlarının diğer tiplerinden ayırır. Kaotik bir davranışı diğer davranışlardan ayıran diğer göstergeler, faz resmi görünümü ve frekans spektrumudur. Kaotik yapıya sahip sistemlerde faz resminin zaman gelişimi, dinamik sistemin yapısının belirlediği faz uzayı bölgesinde, sayılamayacak kadar yörüngeyle dolması şeklinde olur.

Zaman ilerledikçe, yörüngeler faz uzayını doldurmaya başlar ve hiçbir zaman üzerine kapanmaz, tekrar eder. Faz uzayının bu şekilde dolması kaotik işaretlerden biridir.

2.4. Boyut

Dinamik bir sistemin limit kümesinin $L \in \mathcal{R}^n$ yapısı genelleştirilmiş bir boyut fikriyle sınırlandırılabilir. Bu yalnızca bir geometrik yapı değil ayrıca L üstündeki yörünge zamanla değişimini verir.

D_0 Boyutu:En basit boyut kapasite olarak adlandırılır ve D_0 boyutu şu şekilde verilir.

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow \infty} -\frac{\ln(N(\epsilon))}{\ln(\epsilon)} \quad (\text{E.2.5})$$

ϵ , limit kümeyi örtmek için gerekli olan n boyutlu hacim elemanlarının bir kenarının uzunluğudur. $N(\epsilon)$, limit kümeyi örtmek için gerekli olan hacim elemanlarının sayısıdır. Boyut kavramı denge noktası, limit çevrim ve 2-periyot veya 2-torus'a uygulanırsa, sırasıyla 0, 1, 2 boyutları elde edilir. Yukarıdaki tanım kaotik bir işarete uygulandığında D_0 boyutu tamsayı olmayan bir sayı olarak elde edilir. Tamsayı olmayan bu boyuta parçalı (fraktal) denir.

D_2 Boyutu (Korelasyon Boyutu) : D_2 , yalnızca limit kümesinin geometrisini içermez ayrıca küme üstündeki yörünge zamanla değişimini inceler. D_2 boyutunda, limit küme aynı şekilde kenar uzunluğu ϵ olan $N(\epsilon)$ sayıda küpler ile örtülür. Her küp $1, 2, \dots, i, \dots, N(\epsilon)$ ile işaretlenir ve i ' inci küpün limit küme tarafından kaç defa kullanıldığı $n_i(N(\epsilon))$ sayılır. Buradan yörünge i ' inci küpü ziyaret etme sayısından relatif frekans p_i bulunur.

$$p_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i(N(\epsilon))}{N}$$

D_2 boyutu, p_i yardımıyla (2.14)'deki gibi verilebilir:

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \frac{1}{N(\epsilon)^2}}{\ln \epsilon} \quad \text{E.2.6)}$$

Genel olarak $D_2 \leq D_0$ 'dır. Eğer yörünge, bütün küpleri $p = \frac{1}{N(\epsilon)}$ relatif frekansıyla geçmiş olsaydı $D_2 = D_0$ olurdu.

2.5. Çatallaşma

Dinamik sistem denklemleri, durum değişkenlerine ilave olarak, verilen bir deneyim için, belirli değerlerde olan parametreleri içerir. Kararlı-hal çözüm tipi dinamik sistem tarafından bu parametrelere bağlı olarak gerçekleştirilir. Çatallaşma terimi, dinamik sistemlerde meydana gelen sistem parametrelerindeki en ufak değişimlerin, faz uzaylarındaki yapısal değişimlerine karşılık gelir. Böyle bir değişimde meydana gelen parametre değeri, kritik parametre değeri olarak adlandırılır. Çatallaşma terimi ilk olarak, bir grup diferansiyel denklem eşitliğinin denge çözümlerinin bölündüğünü tanımlamak için kullanılmıştır.

Çatallaşma teorisi, doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde anahtar rol oynamaktadır. Sistemdeki anlık değişiklikler, sistemi kararlı normal durumundan artarak uzaklaştırmakta, bu da kaos olaylarını beraberinde getirmektedir. Bir sistemin dinamik davranışı bir parametre değişimiyle değiştirildiği zaman sistemde çatallaşmalar doğmaktadır.

Çatallaşmanın bir çok çeşidi vardır. Çoğu pratik mühendislik sistemleri için en ilgi çekicisi, yerel çatallaşmadır. Bu yerel çatallaşma bir denge durumunda kararlılığını kaybetmesiyle oluşur. Global çatallaşma ise, durum uzayında bazı domenlerde meydana gelir. Sadece denge noktalarında oluşan çatallaşmalar, ikiye ayrılmalarda, stasyonere yada statik çatallaşma olarak bilinmektedir. Hopf çatallaşması gibi denge ve periyodik çözümleri içeren çatallaşmalar da bulunmaktadır.

Çatallaşma diyagramı bir veya daha fazla parametre değiştirildiğinde, kararlı-hal çözüm tipinin değişimini temsil eder. Kararlı-hal çözüm tipi genellikle, parametre değiştiğinde gözlenebilen uç noktaları göstermek yoluyla temsil edilir. Kararlı-hal çözümünün niteliksel değişimine karşılık gelen bir çatallaşma, çatallaşma diyagramında kolaylıkla ayırt edilebilir.

Çatallaşma diyagramlarının ana kullanım amaçlarından biride üzerinde düşünülen sistemin kaos rotalarını tespit etmektir. Örn. parametre değeri sürekli olarak değiştirildiğinde bu yolla hangi kaosa ulaşılır. Düşük-boyutlu sistemlerde kaos için farklı tipte rotalar gözlenmiştir. Bunlardan biri periyot-katlamalı kaskattır(veya harmonik-altı kaskat veya Feigenbaum kaskat). Bu rotada, kaosa ulaşılıncaya kadar, limit döngü iki kat daha büyük periyotlu başka limit döngülere yol açar(kararlı hal genellikle periyodik değildir). Diğer bir kaos rotası yarı-periyodiklik yoluyladır: sabit nokta rejimi bir limit döngüye, oradan da bir torusa T^2 , ve kaosa (Curry-Yorke rotası) ulaştırır veya T^2 torusa, sonra T^3 torusa ve son olarak kaosa (Ruelle-Takens rotası) ulaştırır. Çatallaşmalara ilave olarak, çatallaşma diyagramında kriz denilen diğer ilginç bir olay gözlenebilir. Bu, tuhaf çekicinin ani bir şekilde görünüp kaybolmasına veya çekicinin boyut ve şeklinde sürekli olmayan değişikliklere karşılık gelir. Krizin meydana çıkması, faz uzayında, kararsız sabit nokta veya kararsız limit döngüyle tuhaf çekicinin çarpışmasına bağlı olabilir.

3. KAOTİK SİSTEMLER

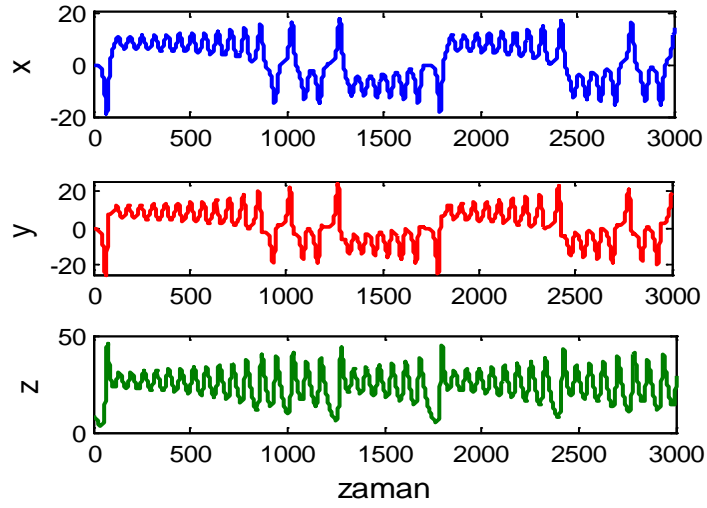
3.1. Lorenz Sistem Ailesi

1963 yılında, M.I.T.'den meteoroloji uzmanı E. N. Lorenz'in atmosferdeki akışkan ısı-yayınımını benzetim yaparken bulduğu denklemler başlangıç şartlarına hassas bağlılık ve kaos göstermekte olan doğrusal olmayan sistemlerin ilkidir.(Lorenz, 1963).

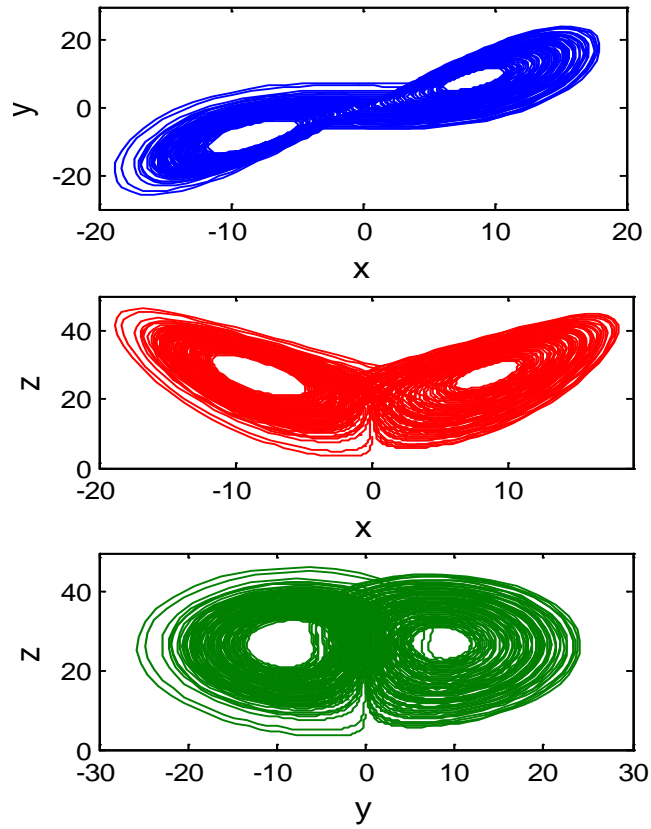
Lorenz'in önerdiği otonom doğrusal olmayan birinci dereceden adi diferansiyel denklem sistemi, E.3.1 denkleminde verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= -x \cdot z + r \cdot x - y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z\end{aligned}\tag{E.3.1}$$

Sistem, iki adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xz ve xy) olmak üzere toplam yedi terim içermektedir. $\sigma = 10$, $r = 28$ ve $b = 8/3$ Parametreleri ve $x_0 = 0$, $y_0 = -0.1$, $z_0 = 9$ başlangıç şartları için kaotik çözümler elde edilmiştir. Lorenz sistemine ait zaman serileri Şekil 3.1.'de, verilmiştir.

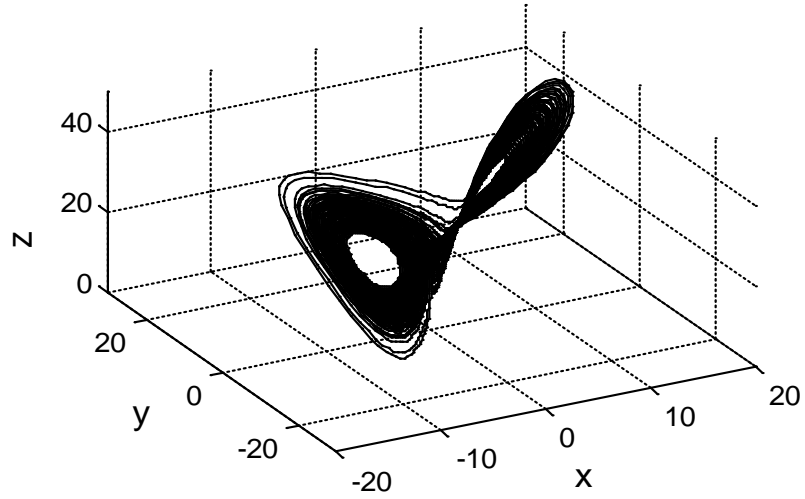


Şekil 3.1. Lorenz sisteminin x , y , z durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi



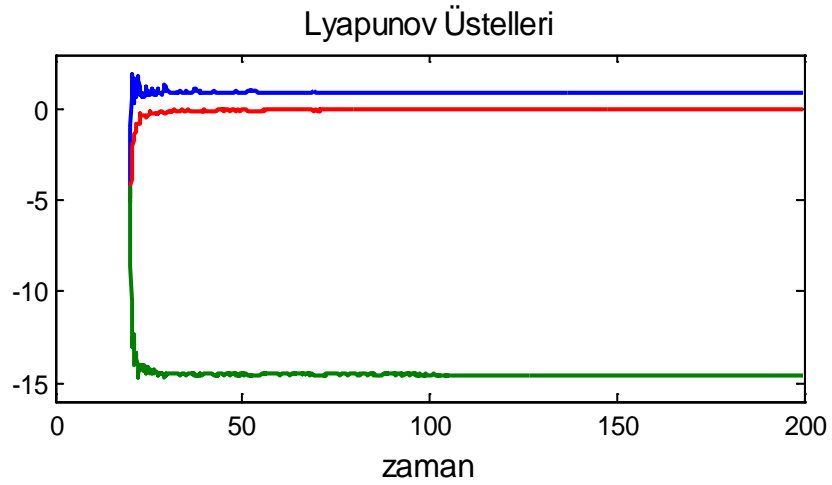
Şekil 3.2. Lorenz sisteminin x - y , x - z , y - z kaotik çekicileri

Lorenz sistemine, faz portreleri Şekil 3.2.'de, üç boyutlu x - y - z yörüngesi ise Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Lorenz sisteminin üç boyutlu x-y-z yörüngesi

Bu sayısal simülasyon sonuçları Matlab'da, odesolve. m (Polking, 2003) programı yardımı ile elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Lorenz sisteminin Lyapunov üstelleri

Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi lyapunov üstelleri, sistemin kaotik olması için gereken durumu(+,0,-) sağlayacak şekilde $\lambda_1 = 0.901$, $\lambda_2 = 0$, $\lambda_3 = -14.56$ olarak bulunmuştur.

Vanecek ve Celikovsky'nin aşağıdaki genelleştirilmiş formuna göre

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3.2})$$

Lorenz sistemi şu şekilde tanımlanmaktadır,,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3.3})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

(E.3.4)

Lorenz sistemi $a_{12} \cdot a_{21} > 0$, ($10 \cdot 28 > 0$) şartını sağlamaktadır

Chen, mühendislik geri besleme kontrol yaklaşımından (Chen ve Ueta, 1999) diğer bir kaotik sistem oluşturdu, yine de bu sistem Lorenz'in sistemine topolojik olarak eşit değildir. (Chen ve Ueta, 1999), (Ueta ve Chen, 2000) , (Lü vd.. 2002).

Chen sistemi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= (c - a) \cdot x - x \cdot z - c \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z \end{aligned} \quad (\text{E.3.5})$$

Chen sistemindeki tipik parametreler $a=35$, $c=28$, ve $b=3$ 'tür. Bu sistem Lorenz sistemine benzer şekilde basit bir yapıya sahiptir, fakat daha karmaşık dinamik davranışlar sergiler. (Ueta ve Chen, 2000) , (Lü vd.. 2002a). Burada dualite, Vanecek ve Celikovsky (Vanecek ve Celikovsky, 1996) tarafından formüle edilmiş bir sınıflandırma

durumuna dayanır(Vanecek ve Celikovsky, 1996). Genelleştirilmiş Lorenz sistem biçimine göre, Chen sistemi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c-a & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3.6})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -35 & 35 & 0 \\ -7 & 28 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3.7})$$

Chen sistemi $a_{12} \cdot a_{21} < 0$, $(35 \cdot (-7) < 0)$ eşitliğini sağlar.

Vanecek ve Celikovsky (Vanecek ve Celikovsky, 1996), doğrusal $A=[a_{ij}]$:

$a_{12}a_{21} > 0$ terimine göre genelleştirilmiş Lorenz sistem ailesini sınıflandırmışlardır ve bu durum Lorenz sistemine özel bir durumdur. Buna karşılık Chen sistemi $a_{12}a_{21} < 0$ eşitliğini sağlamaktadır. Bu yüzden, Chen sistemi bu genelleştirilmiş Lorenz sistem ailesine ait değildir. Aslında, Chen sistemi kaotik sistemlerdeki başka bir standart aileye aittir. (Celikovsk ve Chen, 2002), (Lü ve Chen, 2002) Lü ve Chen ktirik yeni kaotik bir sistem bulmuşlardır (Lü ve Chen, 2002), (Lü vd.. 2002). Bu sistem, $a_{12}a_{21} = 0$ şartını sağlamaktadır ve Lorenz ve Chen çekicileri arasındaki geçişi temsil eder. Bu kaotik çekiciler aşağıdaki 3 boyutlu otonom sistemle oluşturulmuştur:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= -x \cdot z + c \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z \end{aligned} \quad (\text{E.3.8})$$

Lü sistemi için tipik parametreler; $a=35$, $c=28$, ve $b=3$. Bu system, Lorenz ve Chen sistemleri arasında köprü kurmuştur. Genelleştirilmiş Lorenz sistemine göre, Lü sistemi şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3.9})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -36 & 36 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.3.10})$$

Lü sistemi $a_{12} \cdot a_{21} = 0$, ($36 \cdot 0 = 0$) eşitliğini sağlar. Lü ve Chen (Lü ve Chen, 2002) şu açıklamada bulunmuşlardır: “ Açıkçası, yeni sistem Lorenz ve Chen sistemleri ile benzer yapıda değildir. Çünkü bu sistemlerin hepsinin denge noktalarının özdeğer yapıları birbirinden farklıdır. Bir sistemi diğerine dönüştürebilecek tekil olmayan koordinat dönüşümlerinin olmadığı söylenebilir. Bundan dolayı, bunların hiçbiri diğerine topolojik olarak eşit değildir.” Lü ve Chen ayrıca şunu da söylemişlerdir: “Daha da ilginç, Vanecek ve Celikovsky tarafından kurulan önemli durumla Lorenz ve Chen sistemleri kaotik sistemlerin iki zıt sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. (Vanecek ve Celikovsky, 1996): $A=[a_{ij}]$ doğrusal kısımlarında, Lorenz sistemi $a_{12} \cdot a_{21} > 0$ eşitliğini sağlar; Chen sistemi ise $a_{12} \cdot a_{21} < 0$ eşitliğini sağlar. Çok yakın zamanda, $a_{12} \cdot a_{21} = 0$. (Lü ve Chen, 2002) şartını sağlayan yeni bir kaotik sistemin olduğu bulunmuştur (Lü ve Chen, 2002), buda Lorenz ve Chen sistemleri arasında bir köprü oluşturur. (Lü ve Chen, 2002)”. Lü ve diğerleri yukarıda belirtilen birbiriyle ilişkili fakat eşdeğer olmayan kaotik sistemleri içeren bir bütün sistem oluşturdular. (Lü vd.. 2002b). Bu yeni birleştirilmiş sistem aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= (25 \cdot \alpha + 10) \cdot (y - x) \\
\dot{y} &= (28 - 35 \cdot \alpha) \cdot x - x \cdot z + (29 \cdot \alpha - 1) \cdot y \\
\dot{z} &= x \cdot y - \frac{\alpha + 8}{3} \cdot z
\end{aligned} \tag{E.3.11}$$

burada $\alpha \in [0, 1]$ 'dir. Vanecek ve Celikovsky'e göre (Vanecek ve Celikovsky, 1996), sistemin doğrusal kısmı (Lü vd.. 2002a) , a $A=[a_{ij}]$ sabit matrisi $a_{12} \cdot a_{21}$ kritik değerini sağlar. Bu kritik değere göre, kaotik sistemlerin bütünü (Lü vd.. 2002a) aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir: $0 \leq \alpha < 0.8$ olduğunda, sistem (Lü vd.. 2002a) (Vanecek ve Celikovsky, 1996) da tanımlanan genelleştirilmiş Lorenz sistemine aittir, çünkü yukarıdaki eşitlikteki bu α değerleri için $a_{12} \cdot a_{21} > 0$ eşitliği vardır; $\alpha = 0.8$ olduğunda, sistem (Lü vd.. 2002a) (Lü ve Chen, 2002), (Lü vd.. 2002) de belirtilen kaotik sistem sınıfına aittir; çünkü bu durumda $a_{12} \cdot a_{21} = 0$ dır; $0.8 < \alpha \leq 1$ olduğunda sistem $a_{12} a_{21} < 0$ için (Chen ve Ueta, 1999) da formüle edilen genelleştirilmiş Chen sistemine aittir.

Lü ve Chen aynı anda farklı iki kaotik çekici davranışı gösterebilecek yeni kaotik Lorenz-like sistemini buldular. (Lü vd.. 2004). Aynı anda farklı iki kaotik çekici davranışı gösterebilecek aşağıdaki basit 3-boyutlu ikinci dereceden otonom sistemi ele alalım:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= -\frac{a \cdot b}{a + b} \cdot x - y \cdot z + c \\
\dot{y} &= a \cdot y + x \cdot z \\
\dot{z} &= b \cdot z + x \cdot y
\end{aligned} \tag{E.3.12}$$

Burada a, b, c gerçek sabitlerdir. Genelleştirilmiş Lorenz sistem kavramı, ayrıca standart form içindeki Lorenz-like sistemlerinin yeni bir sınıfına genişletilmiştir(Lü vd.. 2004).

Aşağıdaki genel Lorenz sistem ailesini ele alalım:(Lü vd.. 2004), (Yu, 2006):

$$\begin{aligned}\frac{dx}{d\tau} &= a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_{13} \cdot x \cdot z + a_{23} \cdot y \cdot z \\ \frac{dy}{d\tau} &= b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_{13} \cdot x \cdot z + b_{23} \cdot y \cdot z + d_2 \\ \frac{dz}{d\tau} &= c_3 \cdot z + c_{12} \cdot x \cdot y + c_{11} \cdot x^2 \cdot z + c_{22} \cdot y^2 + c_{33} \cdot z^2 + d_3\end{aligned}\tag{E.3.13}$$

Burada $i=1,2$ için, a_i, b_i, a_{i3}, b_{i3} olur; $j=1,2,3$ için c_{jj} olur ve c_3, d_2, d_3, c_{12} gerçek sabitlerdir. Sistem, (Celikovsk ve Chen, 2002), Lorenz sistemi, Chen sistemi(Chen ve Ueta, 1999) , Lü sistemi(Lü ve Chen, 2002), Lorenz-like sistemi(Lü vd.. 2004), ve Sprot sistemleri (Sprot, 1994) ve diğerleri de dahil bir çok tipik 3-boyutlu iki dereceden denklemlerle otonom kaotik sistemler için genel bir şekildedir. Bu 3 boyutlu iki dereceden denklemlerle otonom kaotik sistemler için kurulum parametreleri 3.kısımda Tablo I de listelenmiştir.

3.2. Rössler Sistemi

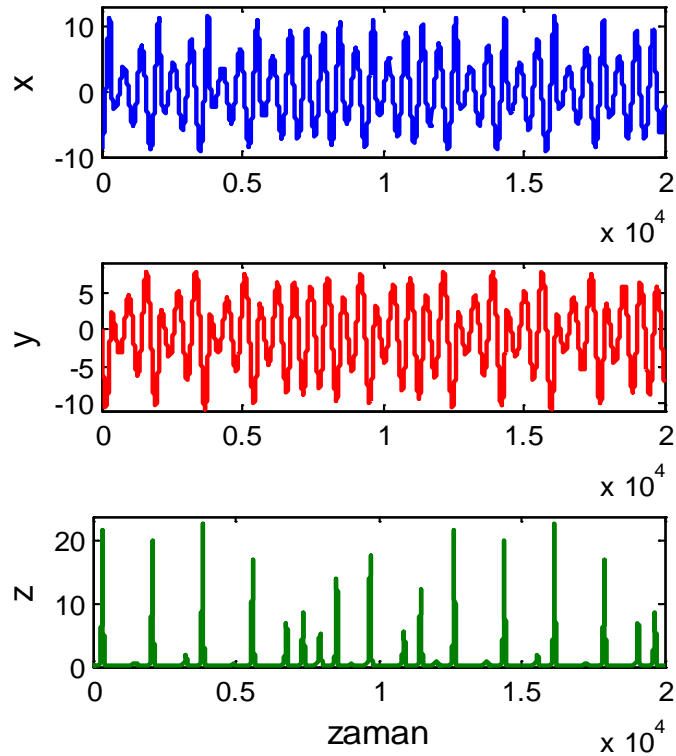
1976 yılında, Rössler'in önerdiği (Rössler, 1976) kaotik denklem sistemi E.3.14'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + a \cdot y \\ \dot{z} &= b + z \cdot (x - c)\end{aligned}\tag{E.3.14}$$

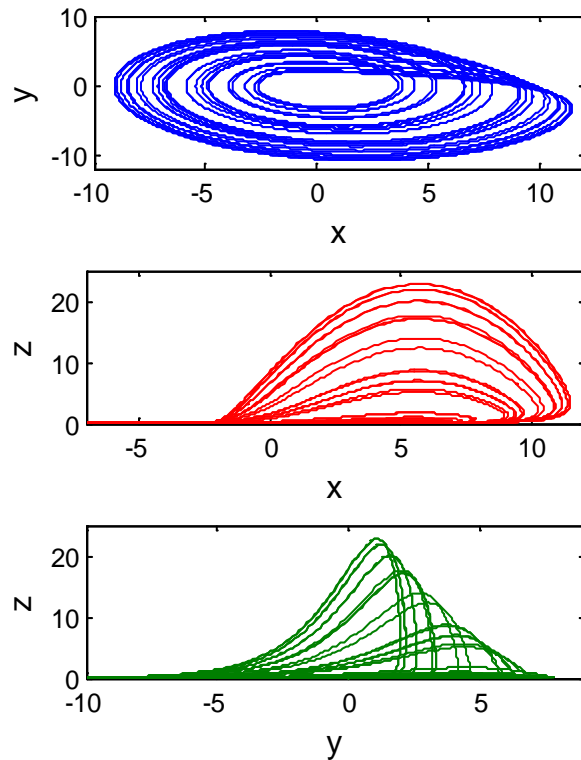
Sistem, bir adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xz) olmak üzere toplam yedi terim içermektedir. $a = 0.2$, $b = 0.2$ ve $c = 5.7$ parametreleri ve

$x_0 = -9, y_0 = 0, z_0 = 0$ başlangıç şartları için kaotik çözümler elde edilmiştir.

Rössler sistemine ait zaman serileri Şekil 3.5.'de, verilmiştir.

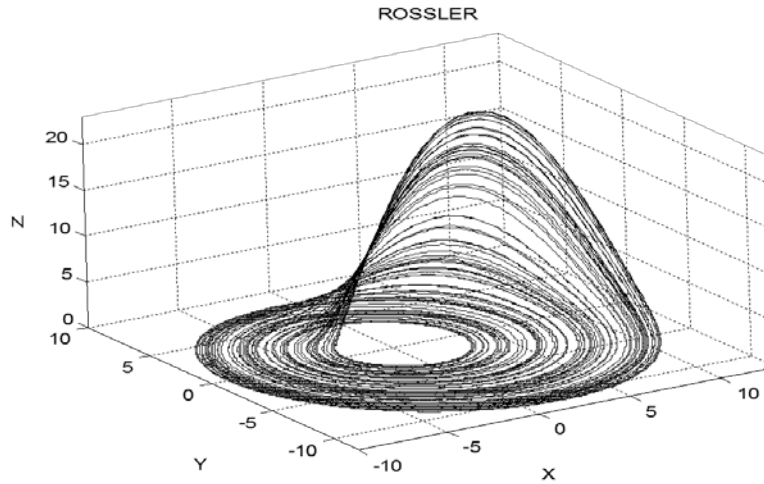


Şekil 3.5. Rössler sisteminin x, y, z durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi



Şekil 3.6. Rössler sisteminin $x-y, x-z, y-z$ kaotik çekicileri

Rössler çekicisine ait , faz portreleri Şekil 3.6.'da , üç boyutlu x-y-z yörüngesi ise Şekil 3.7.'de verilmiştir.

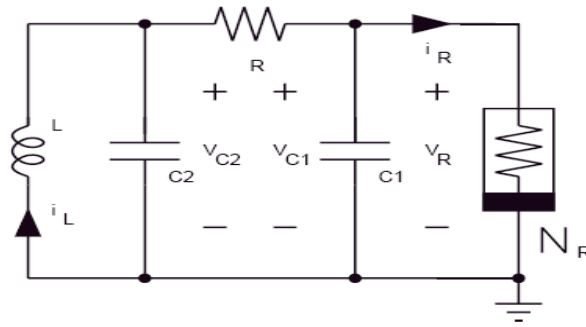


Şekil 3.7. Rössler sisteminin üç boyutlu x-y-z yörüngesi

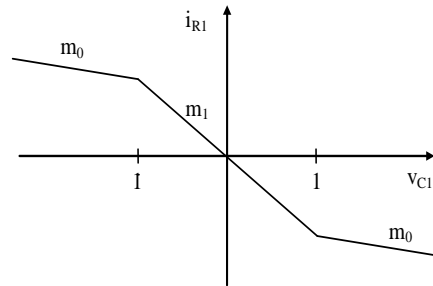
3.3. Chua Sistemi ve Devresi

Chua devresi en karmaşık kaosu varlığının deneysel olarak kurulabildiği, sayısal olarak doğrulanabildiği ve matematiksel olarak kanıtlanabildiği en basit devrelerden biridir. Chua elektronik devresinin sistem yapısı basittir. Dört doğrusal eleman ve bir doğrusal olmayan eleman olan Chua diyodundan oluşmaktadır Şekil 3.8. Chua diyonu farklı aktif devre yapılarıyla da oluşturulabilir.

Chua'nın devresi bir doğrusal indüktans (L), iki doğrusal kapasitör (C_1 ve C_2), bir doğrusal direnç (R) ve Chua diodu olarak adlandırılan gerilim kontrollü direnç (N_R)'den oluşur. Chua devresi ve doğrusal olmayan direncin parça parça lineerleştirilmiş I-V karakteristiği Şekil 3.9.'da görülmektedir. Chua devre denklemleri, denklemindeki üç adet adi diferansiyel denklemlerle tanımlanır.



Şekil 3.8. Chua Devresi



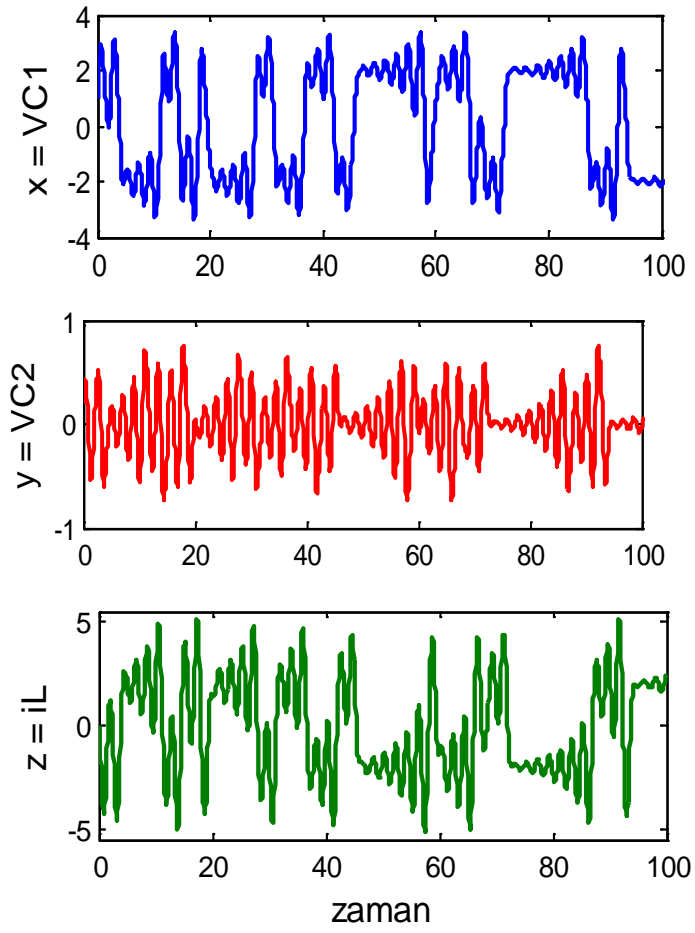
Şekil 3.9. Doğrusal olmayan direncin karakteristiği

$$\begin{aligned}
 C_1 \cdot \frac{dV_{C_1}}{dt} &= G \cdot (V_{C_2} - V_{C_1}) - g(V_{C_1}) \\
 C_2 \cdot \frac{dV_{C_2}}{dt} &= G \cdot (V_{C_1} - V_{C_2}) + i_L \\
 L \cdot \frac{di_L}{dt} &= -V_{C_2} - R_L i_L
 \end{aligned} \tag{E.3.15}$$

Burada, $G=1/R$ ve doğrusal olmayan elemanın V_{C_1} - i karakteristiği aşağıda tanımlanmaktadır. Chua diodunun \dot{I}_R akımı iki kırılma noktasına sahip parça parça doğrusal fonksiyon olan $g(V_{C_1})$ ile ifade edilir. Analitik ifadesi ise:

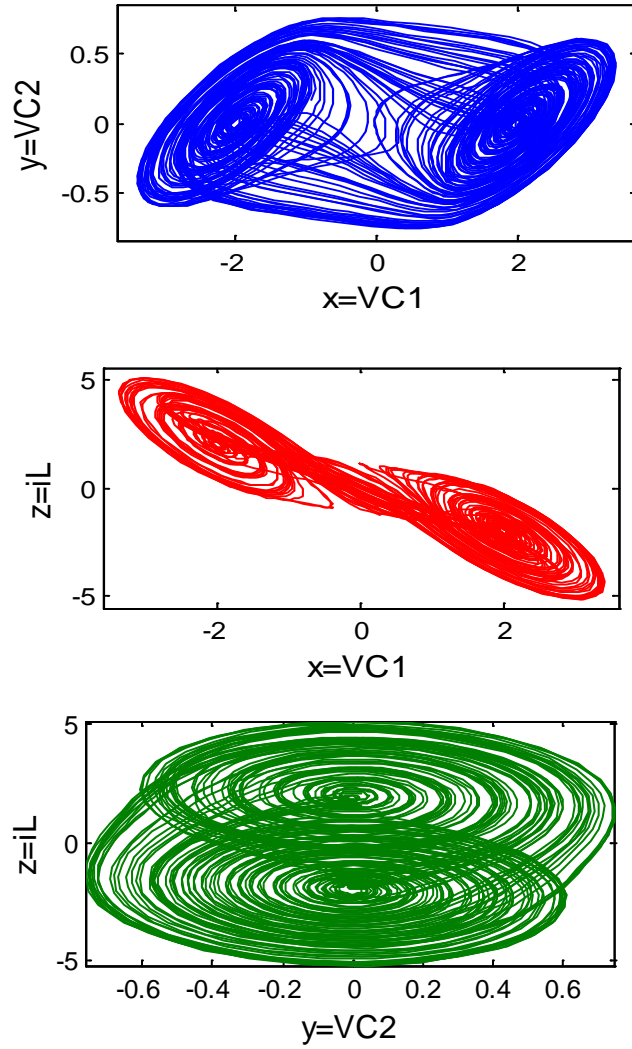
$$g(V_R) = m_0 \cdot V_R + \frac{1}{2} \cdot (m_1 - m_0) \cdot (|V_R + B_P| - |V_R - B_P|) \tag{E. 3.16}$$

olur. Burada devre parametreleri $1/C_1=9$, $1/C_2=1$, $1/L=7$, $G=0.7$, $m_0=-0.5$, $m_1=-0.8$ $x_1=V_{C_1}$, $x_2=V_{C_2}$ ve $x_3=i_L$ olup $E=1$ 'dir. Durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi Şekil 3.10.'de görülmektedir.



Şekil 3.10. Chua devresinin VC1, VC2, iL durum değişkenlerinin zamana göre kaotik değişimi

Durum değişkenlerinin kaotik faz portreleri Şekil 3.11.'de görölmektedir.



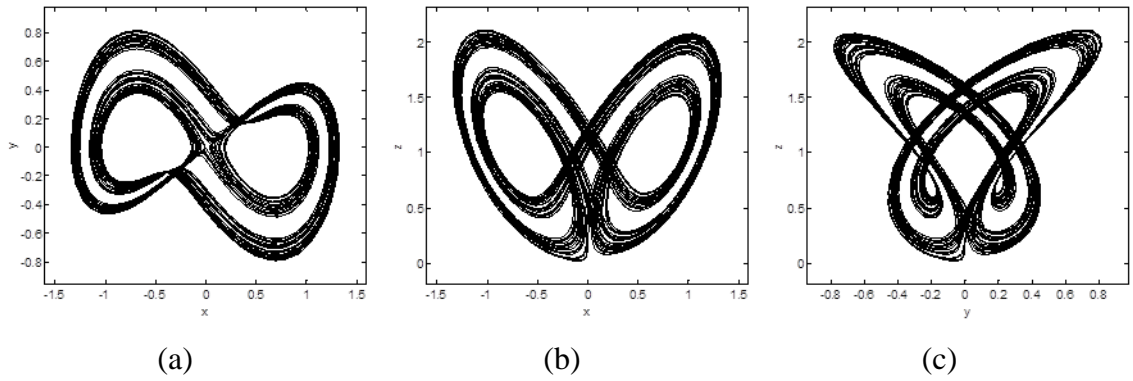
Şekil 3.11. Chua devresinin x-y, x-z, y-z kaotik çekicileri

3.4. Shimizu-Morioka Sistemi

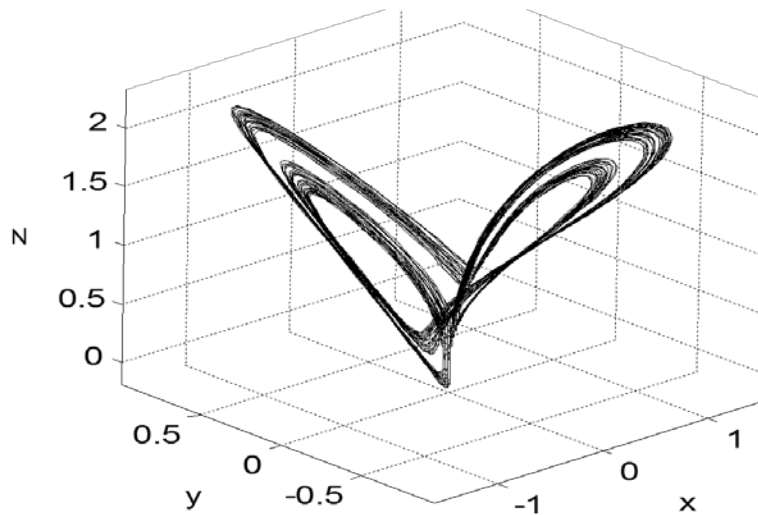
T. Shimizu ve N. Morioka'nın, 1980 yılında(Shimizu ve Moroika, 1980), bilgisayar simülasyonları ile keşfettiği doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= y \\
 \dot{y} &= x - a \cdot y - x \cdot z \\
 \dot{z} &= -b \cdot z + x^2
 \end{aligned}
 \tag{E. 3.17}$$

$a = 0.85$ ve $b = 0.5$ Parametreleri ve $x_0 = 0.1$, $y_0 = 0.1$, $z_0 = 0.1$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.12.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.13.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Shimizu-Morioka sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri



Şekil 3.13. Shimizu-Morioka sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi

3.5. Strizhak-Kawczynski Sistemi

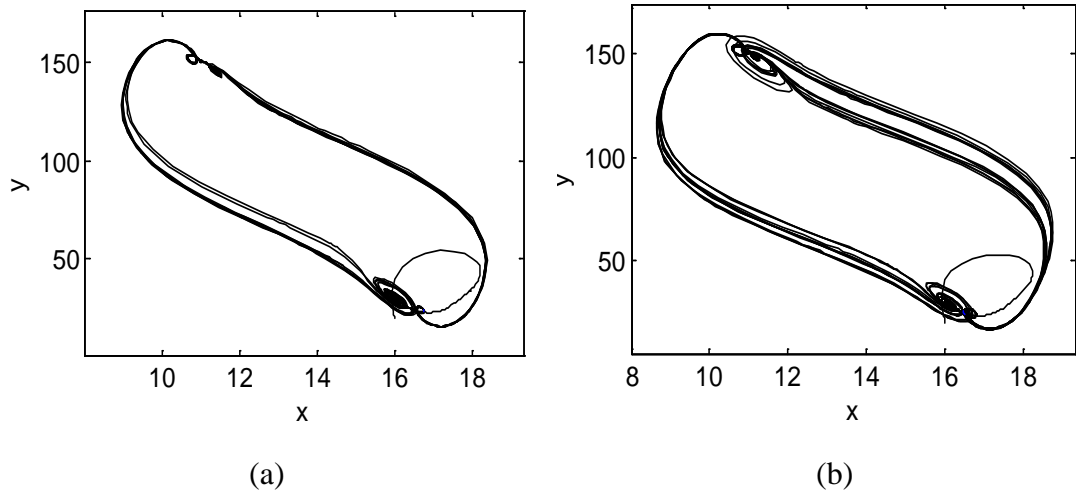
Bu sistem bir Batch Reaktoründeki, Belousov-Zhabotinsky reaksiyonunun kompleks geçici osilasyonlarını modellemek için Peter E. Strizhak ve Andrzej L. i

tarafından 1995 yılında[Strizhak ve Kawczyhsk, 1995] önerilen bir modeldir. Bu doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= R \cdot [y - (x - x_1) \cdot (x - x_2) \cdot (x - x_3) - a] \\ \dot{y} &= b - b_1 \cdot z - b_2 \cdot x - y \\ z &= q \cdot (x - z)\end{aligned}\tag{E.3.18}$$

$$x_1 = 10, \quad x_2 = 11, \quad x_3 = 20, \quad a = 150, \quad b = 436.6, \quad b_1 = 3.714, \quad b_2 = 21.7, \quad q = 0.07$$

Parametreleri ve $x_0 = 16, y_0 = 20, z_0 = 1$ ilk şartları için, R parametresinin farklı değerlerine karşılık elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.14.'de, verilmiştir.



Şekil 3.14. Strizhak-Kawczynski sisteminin x-y kaotik çekicileri a) $R = 0.101115$ b) $R = 0.800$

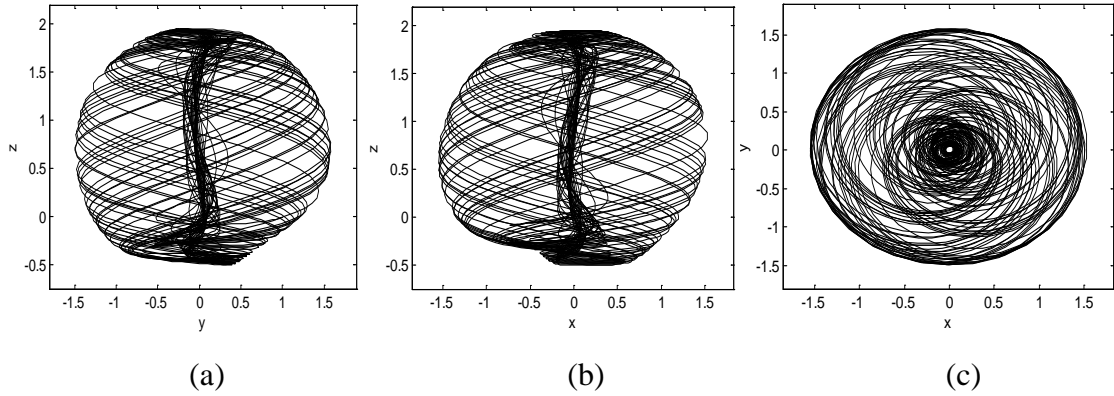
3.6. Aizawa Sistemi

Doğrusal olmayan kaotik Aizawa sistemi denklemleri aşağıda verilmiştir.

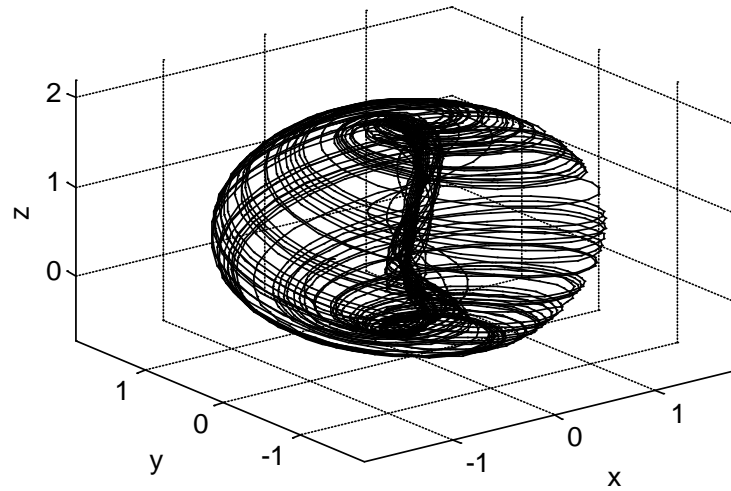
$$\begin{aligned}\dot{x} &= (z - \beta) \cdot x - \omega \cdot y \\ \dot{y} &= \omega \cdot x + (z - \beta) \cdot y \\ z &= \lambda + \alpha \cdot z - (1/3) \cdot z^3 + (x^2 + y^2)(1 + \rho \cdot z) + \varepsilon \cdot z \cdot x^3\end{aligned}\tag{E.3.19}$$

$$\alpha = 1.0, \quad \beta = 0.7, \quad \lambda = 0.6, \quad \omega = 3.5, \quad \rho = 0.25, \quad \varepsilon = 0.1 \quad \text{Parametreleri ve}$$

$x_0 = 0$, $y_0 = 1$, $z_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.15.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.16.'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Aizawa sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri



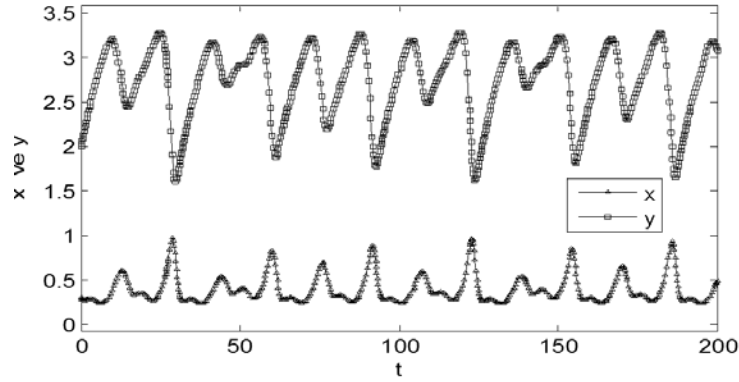
Şekil 3.16. Aizawa sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

3.7. Zorlanmış Brusselator Sistemi

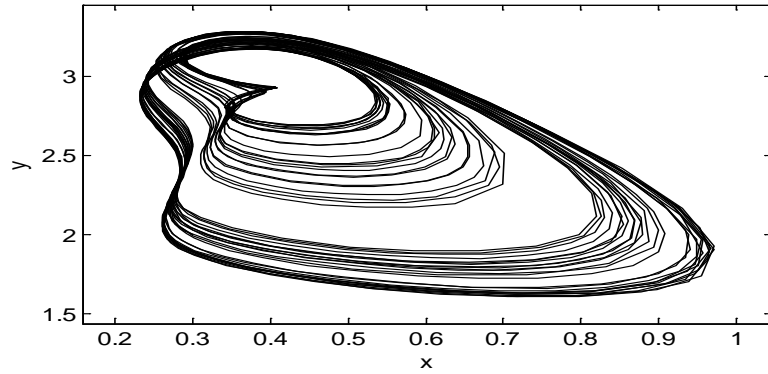
Kimyadan gelen bu denklemler Prigogine ve Lefever tarafından 1968 yılında tanıtılmış(Prigogine ve Lefever, 1968), zorlanmış terim ise 1978 yılında Tomita ve Kai tarafından(Tomita ve Kai 1978), eklenmiştir. Doğrusal olmayan kaotik Zorlanmış Brussellator Sistemi denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x^2 \cdot y - (b + 1) \cdot x + a + A \cdot \sin(\Omega \cdot t) \\ \dot{y} &= -x^2 \cdot y + b \cdot x \end{aligned} \quad (\text{E.3.20})$$

$a = 0.4$, $b = 1.2$, $A = 0.05$, $\Omega = 0.8$ parametreleri ve $x_0 = 0.3$, $y_0 = 2$ ilk şartları için elde edilen x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi Şekil 3.17.'da, $x - y$ kaotik çekicisi Şekil 3.18.'da verilmiştir.



Şekil 3.17. Zorlanmış Brusselator sisteminin x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi.



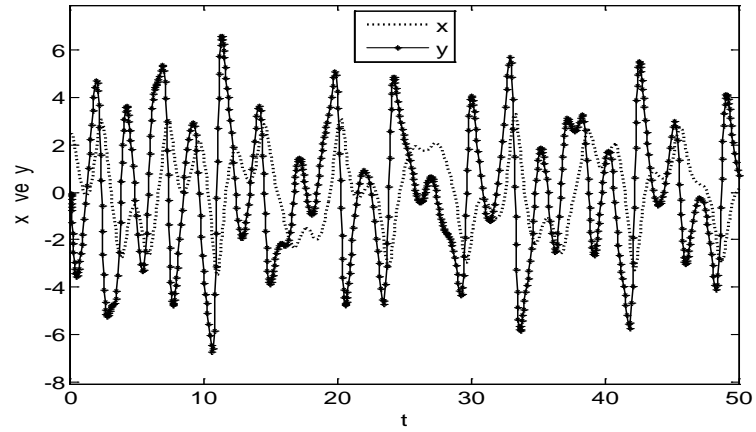
Şekil 3.18. Zorlanmış Brusselator sisteminin $x - y$ kaotik çekicisi.

3.8. Ueda Osilatörü

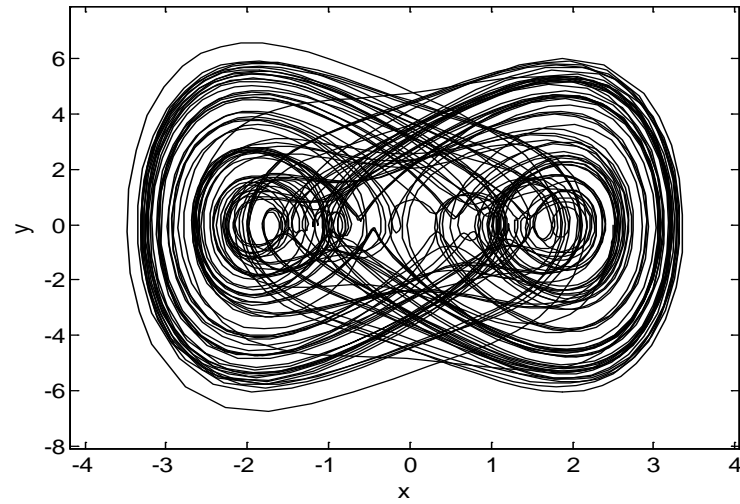
Ueda tarafından 1979 yılında (Ueda, 1979) bulunmuştur. Doğrusal olmayan kaotik Ueda Osilatör sisteminin denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -x^3 - b \cdot y + A \cdot \sin(\Omega \cdot t)\end{aligned}\quad (\text{E.3.21})$$

$b = 0.05$, $A = 7.5$, $\Omega = 1$ Parametreleri ve $x_0 = 2.5$, $y_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi Şekil 3.19'da, x - y kaotik çekicisi Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.19. Ueda Osilatör sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.



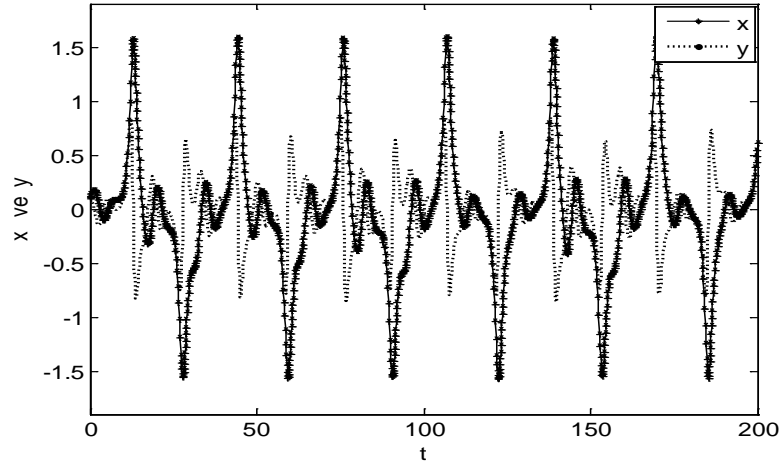
Şekil 3.20. Ueda Osilatör sisteminin $x - y$ kaotik çekicisi.

3.9. Hill Sistemi

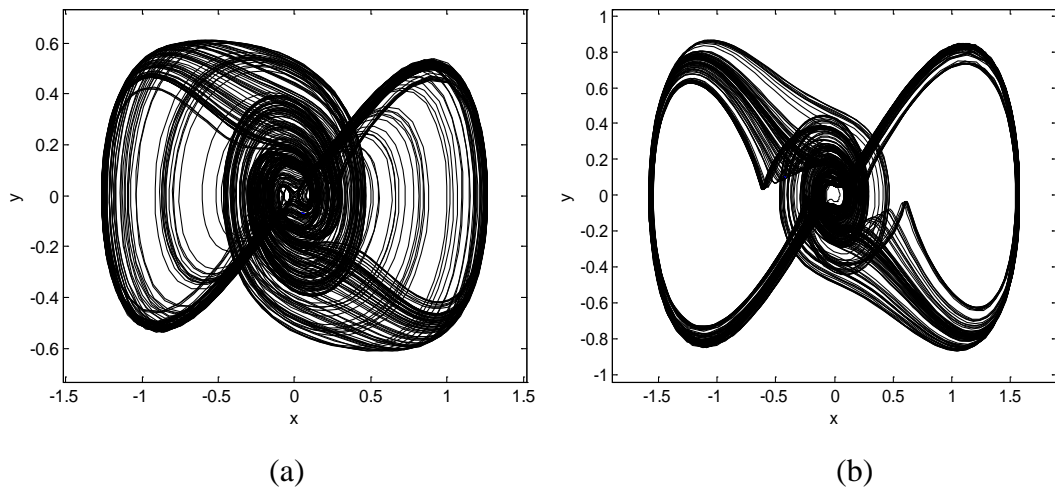
Doğrusal olmayan kaotik Hill sisteminin denklemleri aşağıda verilmiştir (Hill, 1987).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -\mu \cdot y - x^3 - a \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot x\end{aligned}\quad (\text{E.3.22})$$

$\mu = 0.3$, $\omega = 0.4$ parametreleri ve $x_0 = 0.1$, $y_0 = 0.1$ ilk şartları için elde edilen x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi Şekil 3.21.'de, a parametresinin farklı değerleri için elde edilen $x - y$ kaotik çekicisi Şekil 3.22.'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Hill sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi



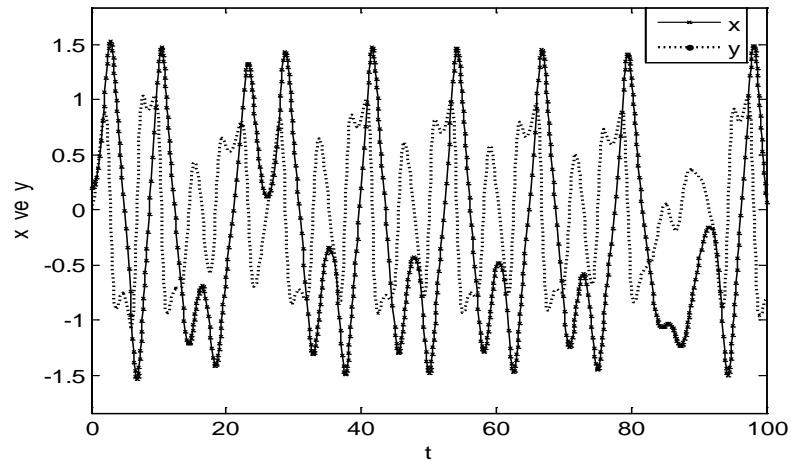
Şekil 3.22. Hill sistemi, $x-y$ kaotik çekicileri a) $a = 1.5$ b) $a = -1$.

3.10. Duffing-Moon-Holmes Sistemi

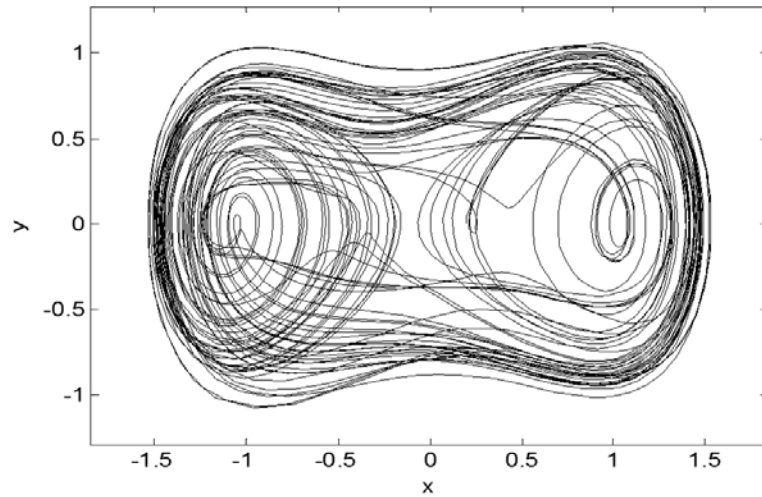
Moon ve Holmes'in, 1979 yılında(Moon ve Holmes, 1979) bulduğu doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= x - x^3 - b \cdot y + A \cdot \sin(\Omega \cdot t) \end{aligned} \quad (\text{E.3.23})$$

$b = 0.25$, $A = 0.4$, $\Omega = 1$ Parametreleri ve $x_0 = 0.2$, $y_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi şekil 3.23.'de, $x - y$ kaotik çekicisi Şekil 3.24.'de verilmiştir.



Şekil 3.23.Duffing-Moon-Holmes sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.



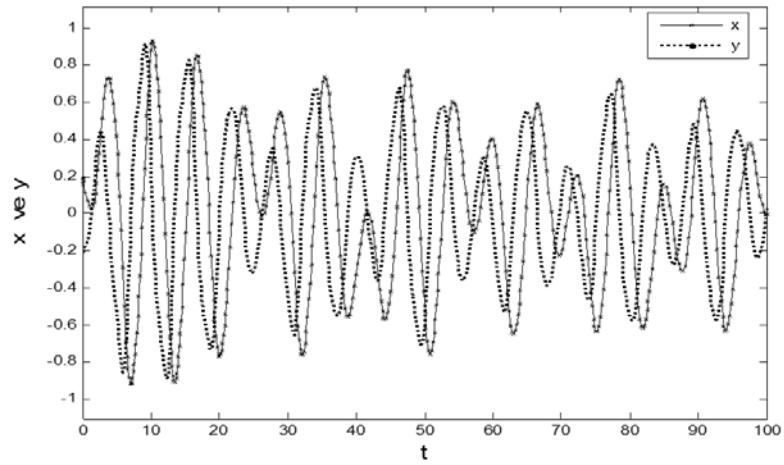
Şekil 3.24. Duffing-Moon-Holmes sisteminin x-y kaotik çekicisi.

3.11. Duffing-Van Der Pol sistemi

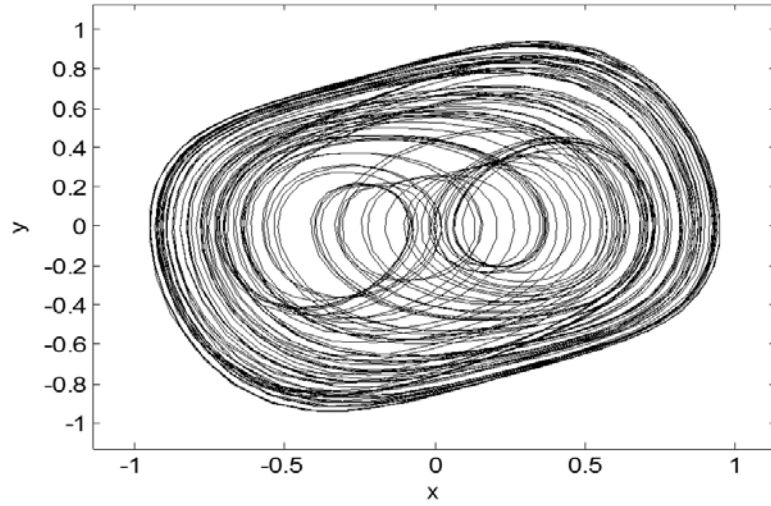
Duffing-Van Der Pol doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= \mu \cdot (1 - b \cdot x^2) \cdot y - x^3 + A \cdot \sin(\Omega \cdot t) \end{aligned} \quad (\text{E. 3.24})$$

$\mu = 0.2$, $b = 8$, $A = 0.35$, $\Omega = 1.02$ parametreleri ve $x_0 = 0.2$, $y_0 = -0.2$ ilk şartları için elde edilen x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi şekil 3.25.'de, x - y kaotik çekicisi Şekil 3.26.'de verilmiştir.



Şekil 3.25. Duffing-van der pol sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.



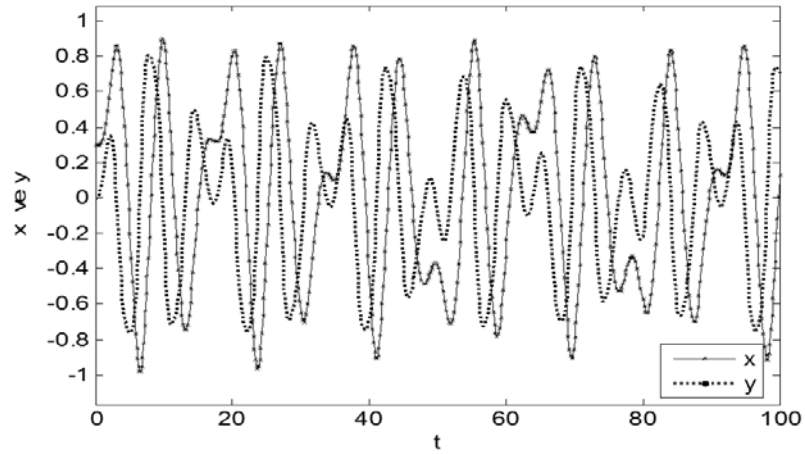
Şekil 3.26. Duffing-van der pol sisteminin $x-y$ kaotik çekicisi.

3.12. Rayleigh-Duffing sistemi

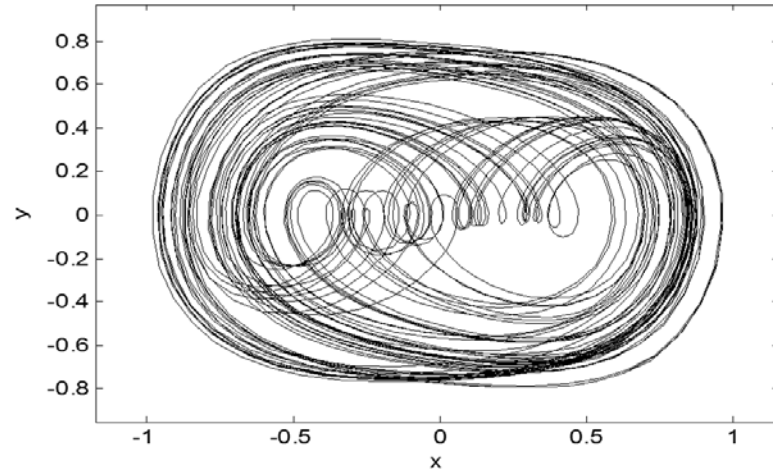
Rayleigh-Duffing denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= \mu \cdot (1 - b \cdot y^2) \cdot y - x^3 + A \cdot \sin(\Omega \cdot t) \end{aligned} \quad (\text{E.3.25})$$

$\mu = 0.2$, $b = 4$, $A = 0.3$, $\Omega = 1.1$ parametreleri ve $x_0 = 0.3$, $y_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen x ve y durum değişkenlerinin kaotik değişimi Şekil 3.27.'da, $x - y$ kaotik çekicisi Şekil 3.28.'de verilmiştir.



Şekil 3.27. Rayleigh-Duffing sisteminin $x - y$ durum değişkenlerinin kaotik değişimi.



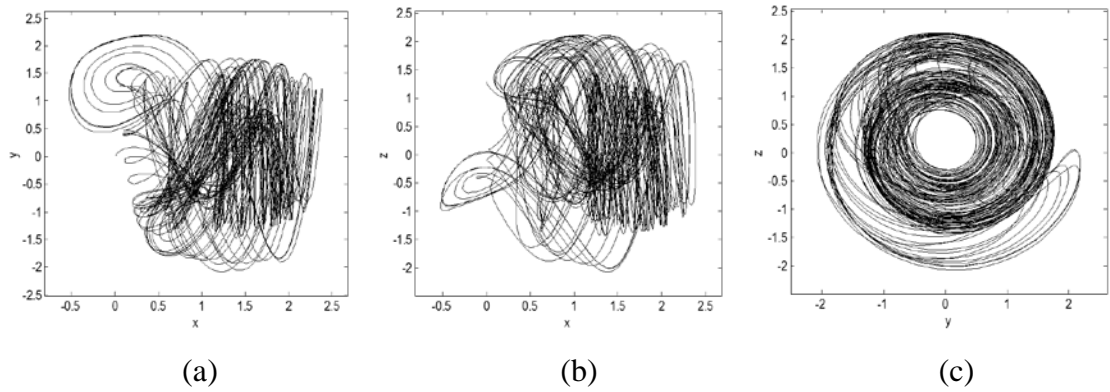
Şekil 3.28. Rayleigh-Duffing sisteminin $x-y$ kaotik çekicisi.

3.13. Hadley dolaşım sistemi (Lorenz 1984b)

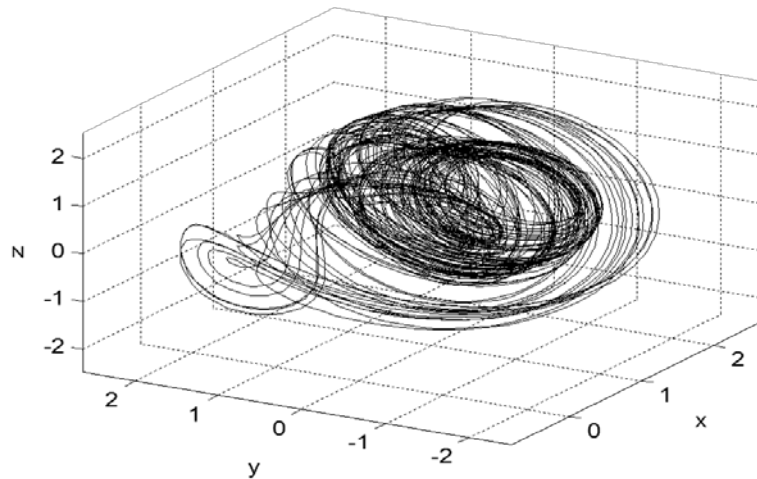
E. Lorenz tarafından 1984 yılında bulunan(Lorenz, 1984) doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= -y^2 - z^2 - a \cdot x + a \cdot F \\
\dot{y} &= x \cdot y - b \cdot x \cdot z - y + G \\
\dot{z} &= b \cdot x \cdot y + x \cdot z - z
\end{aligned}
\tag{E.3.26}$$

$a = 0.25$, $b = 4$, $F = 8$, $G = 1$ Parametreleri ve $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 1.3$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.29.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.30.'da verilmiştir.



Şekil 3.29. Hadley dolaşım sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



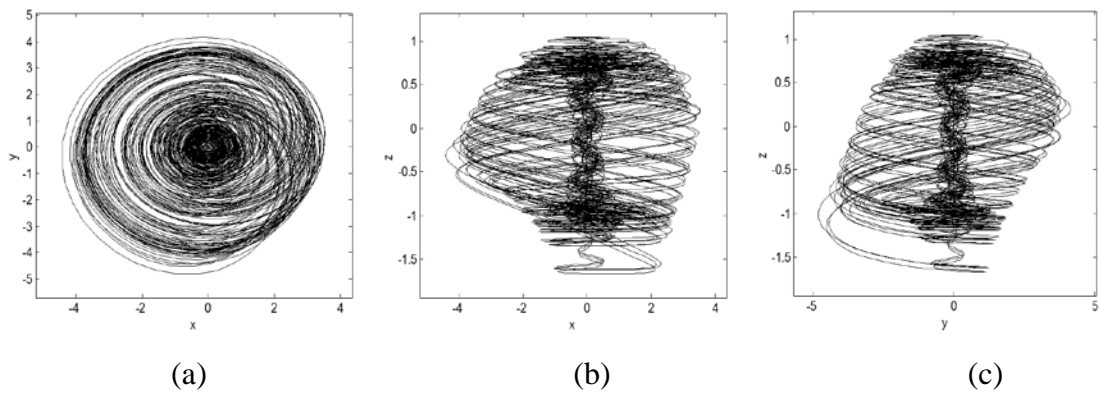
Şekil 3.30. Hadley dolaşım sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

3.14. Guckenheimer-Holmes sistemi

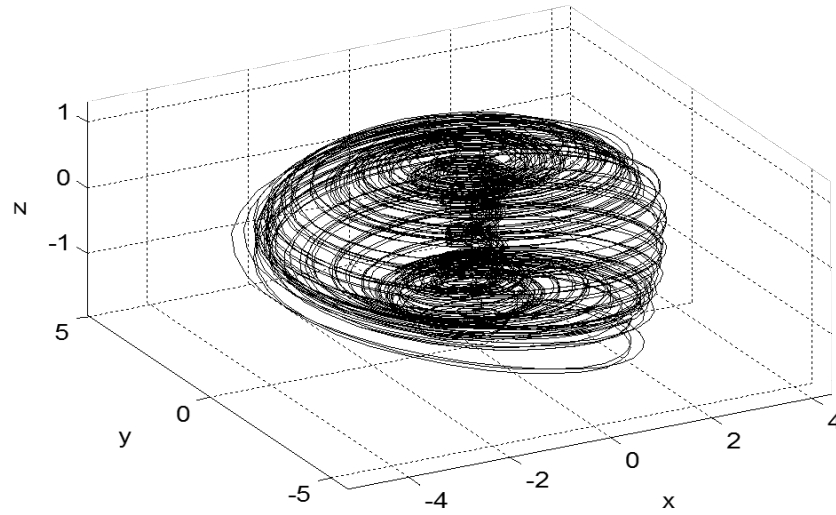
Guckenheimer, J., and Holmes P., tarafından 1986 yılında bulunan(Guckenheimer, J., ve Holmes P, 1986) doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= \lambda \cdot x - \omega \cdot y + a \cdot z \cdot x + d \cdot z \cdot (x^2 + y^2) \\
\dot{y} &= \lambda \cdot y + \omega \cdot x + a \cdot z \cdot y \\
\dot{z} &= \mu - z^2 - e \cdot (x^2 + y^2) + c \cdot z^3
\end{aligned}
\tag{E.3.27}$$

$a = 3$, $c = -0.4$, $d = 1.6$, $e = 0.44$, $f = 1$, $\omega = 20.25$, $\lambda = 0.4$, $\mu = 1.7$ Parametreleri ve $x_0 = 1$, $y_0 = -1$, $z_0 = 1$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.31.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.32.'da verilmiştir.



Şekil 3.31. Guckenheimer-Holmes sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



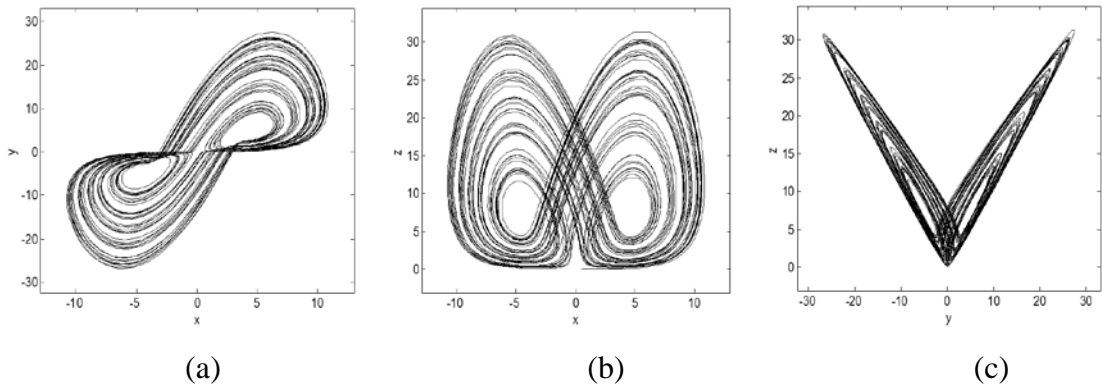
Şekil 3.32. Guckenheimer-Holmes sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

3.15. ACT çekicisi

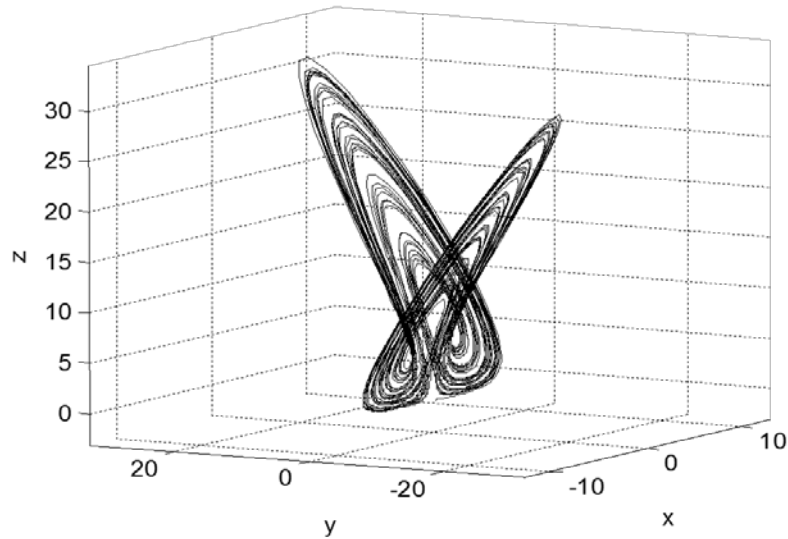
1980 yılında Arneodo ve arkadaşları tarafından bulunan(Arneodo vd., 1980) doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha \cdot (x - y) \\ \dot{y} &= -\alpha y + x z + \mu x \cdot^3 \\ \dot{z} &= \delta - \alpha \cdot z + x y + \beta z \cdot^2\end{aligned}\tag{E.3.28}$$

$\alpha = 1.8$, $\beta = -0.07$, $\delta = 1.5$, $\mu = 0.02$ parametreleri ve $x_0 = 0.5$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.33.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.34.'de verilmiştir.



Şekil 3.33. ACT çekicisi sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



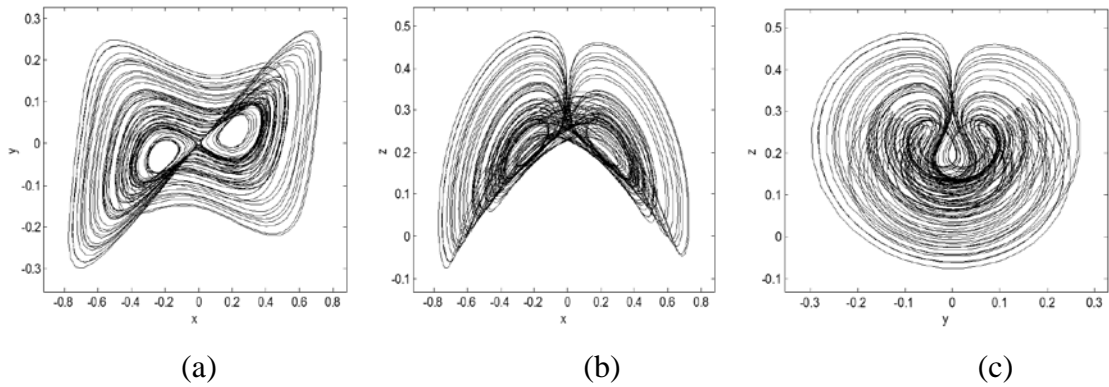
Şekil 3.34. ACT çekicisi sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

3.16. Leipnik-Newton sistemi

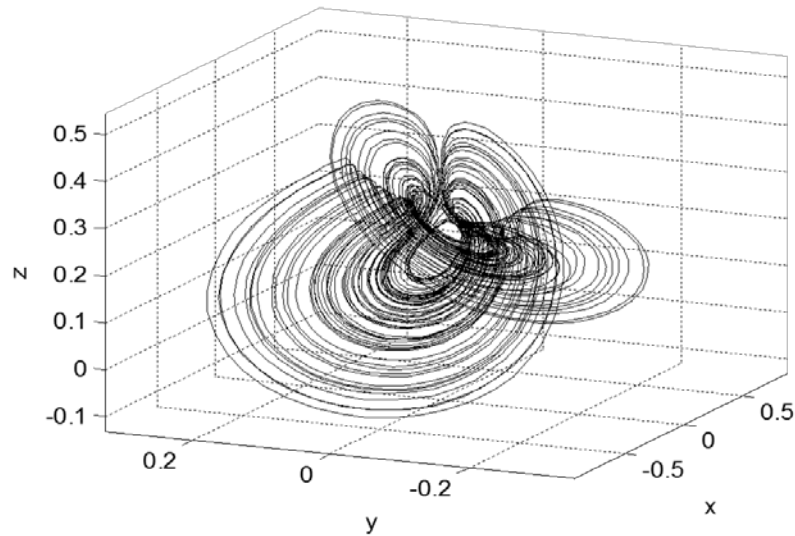
Leipnik ve Newton tarafından 1981 yılında bulunan(Leipnik ve Newton 1981) doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -0.4 \cdot x + y + 10 \cdot y \cdot z \\ \dot{y} &= -x - 0.4 \cdot y + 5 \cdot x \cdot y \\ \dot{z} &= \alpha \cdot z - 5 \cdot x \cdot y\end{aligned}\tag{E.3.29}$$

$\alpha = 3$ Parametresi ve $x_0 = 0.6$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.37.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.38.'de verilmiştir.



Şekil 3.35. Leipnik-Newton sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



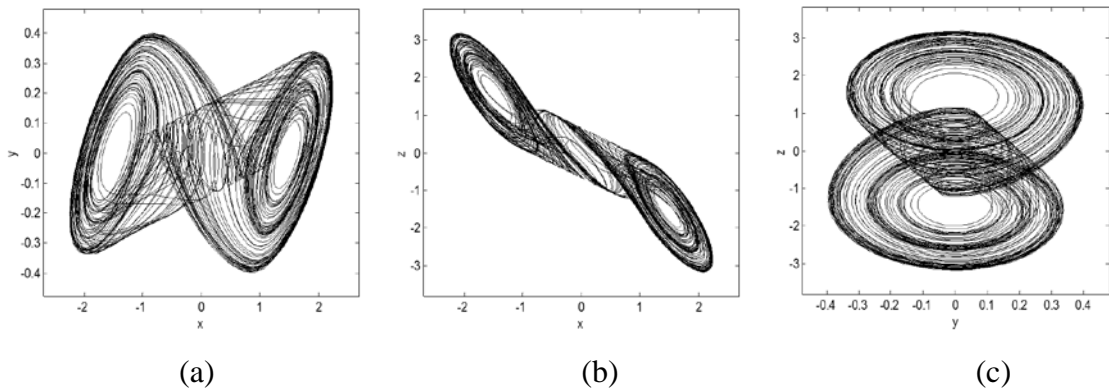
Şekil 3.36. Leipnik-Newton sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

3.17. Matsumoto-Chua sistemi

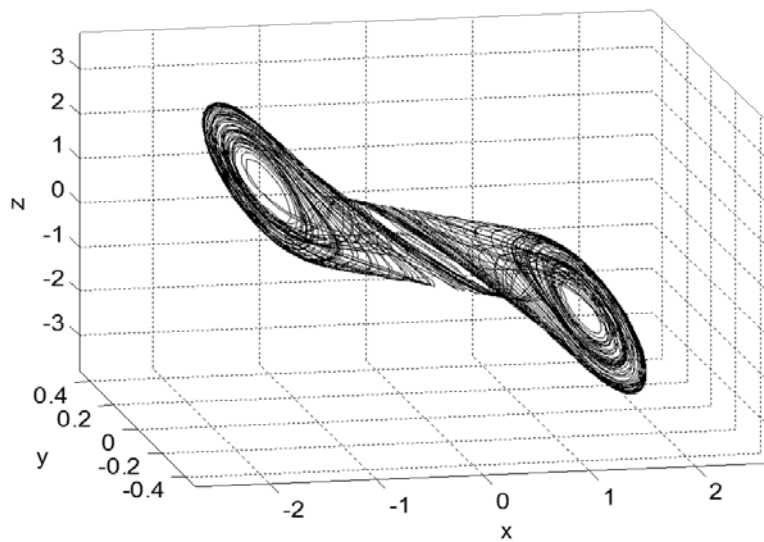
Matsumoto ve arkadaşları tarafından 1984 yılında tanıtılan(Matsumoto vd.. 1984) doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\alpha \cdot [y - x + b \cdot x + \frac{1}{2} \cdot (a - b) \cdot (|x + 1| - |x - 1|)] \\ \dot{y} &= x - y + z \\ \dot{z} &= -\beta \cdot y\end{aligned}\tag{E.3.30}$$

$\alpha = 9$, $\beta = 100/7$, $a = 8/7$, $b = 5/7$ Parametresi ve $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0.6$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.39.'da, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise şekil 3.40.'de verilmiştir.



Şekil 3.37. Matsumoto-Chua sisteminin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



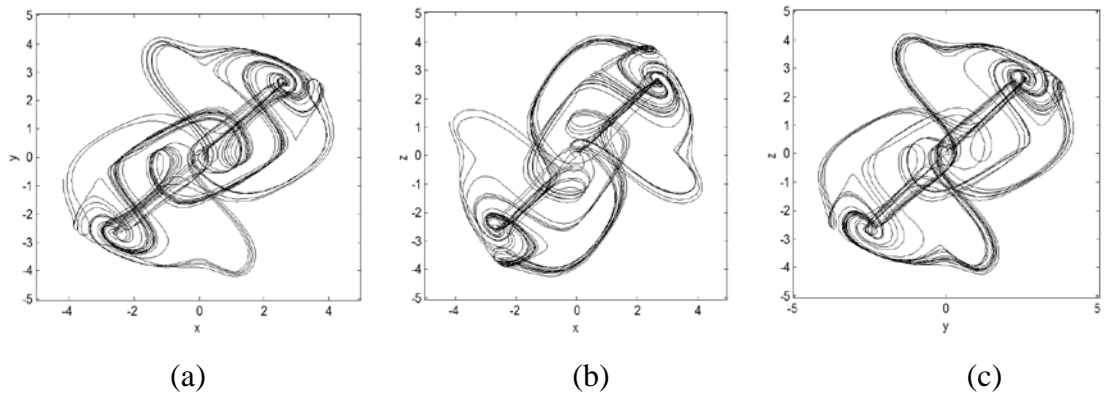
Şekil 3.38. Matsumoto-Chua sisteminin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

3.18. Thomas dairesel simetrik çekicisi

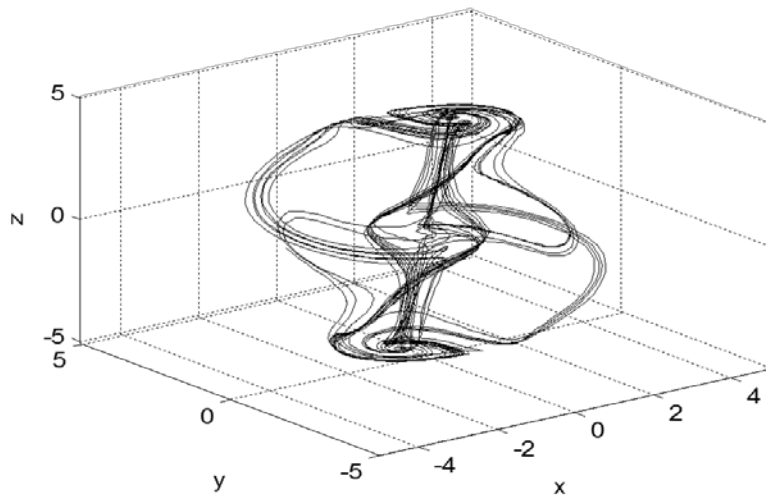
Thomas tarafından 1999 yılında bulunan (Thomas, 1999) doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sin y - b \cdot x \\ \dot{y} &= \sin z - b \cdot y \\ \dot{z} &= \sin x - b \cdot z\end{aligned}\tag{E.3.31}$$

$b = 0.18$ parametresi ve $x_0 = 0.1$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen kaotik çekiciler Şekil 3.41.'de, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi ise Şekil 3.42.'da verilmiştir.



Şekil 3.39. Thomas dairesel simetrik çekicisinin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



Şekil 3.40. Thomas dairesel simetrik çekicisinin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

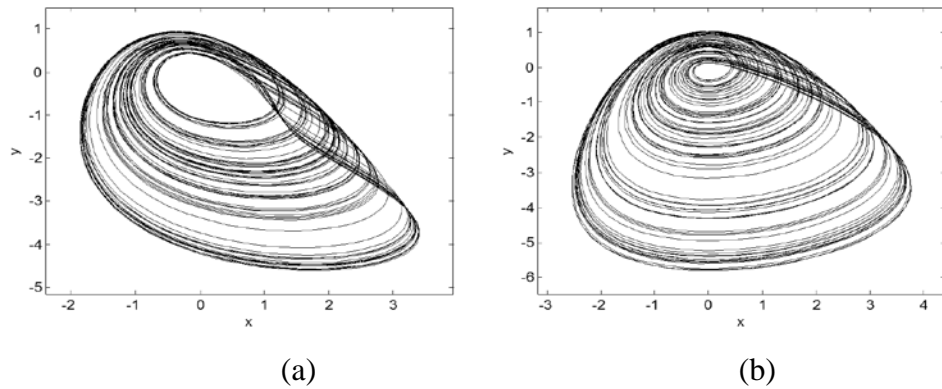
3.19. Thomas 1996 sistemleri

Thomas tarafından 1996 yılında bulunan(Thomas, 1996) doğrusal olmayan denklem sistemleri aşağıda verilmiştir.

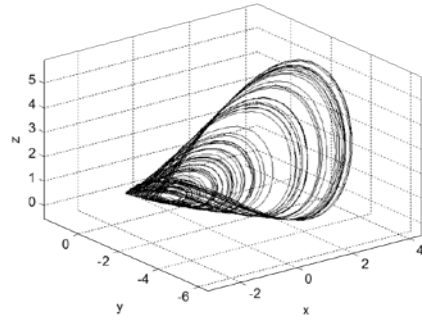
$$\begin{aligned}\dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + a \cdot y \\ \dot{z} &= x^2 - c \cdot z\end{aligned}\tag{E.3.32}$$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a \cdot x - y - z \\ \dot{y} &= x \\ \dot{z} &= x^2 - c \cdot z\end{aligned}\tag{E.3.33}$$

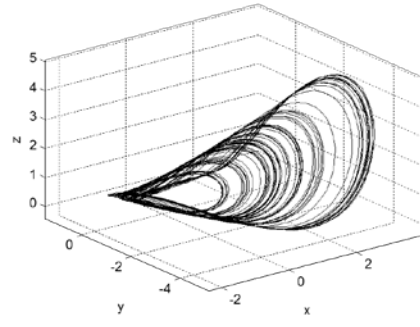
E.3.34 ve E.3.35 denklemleri için sırasıyla $a = 0.385$, $c = 2$ ve $a = 0.25$, $c = 2$ parametreleri ve $x_0 = 0.5$, $y_0 = 0.5$, $z_0 = 0.5$ ilk şartları için elde edilen x-y kaotik çekicileri Şekil 3.43.'da, üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngeleri ise şekil 3.44.'de verilmiştir.



Şekil 3.41. Thomas 1996 sistemlerinin x-y kaotik çekicileri a) (A) sistemi b) (B) sistemi.



(a)



(b)

Şekil 3.42. Thomas 1996 sistemlerinin x-y-z kaotik yörüngeleri a) (A) sistemi b) (B) sistemi.

4. KAOTİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE DEVRE GERÇEKLEMESİ

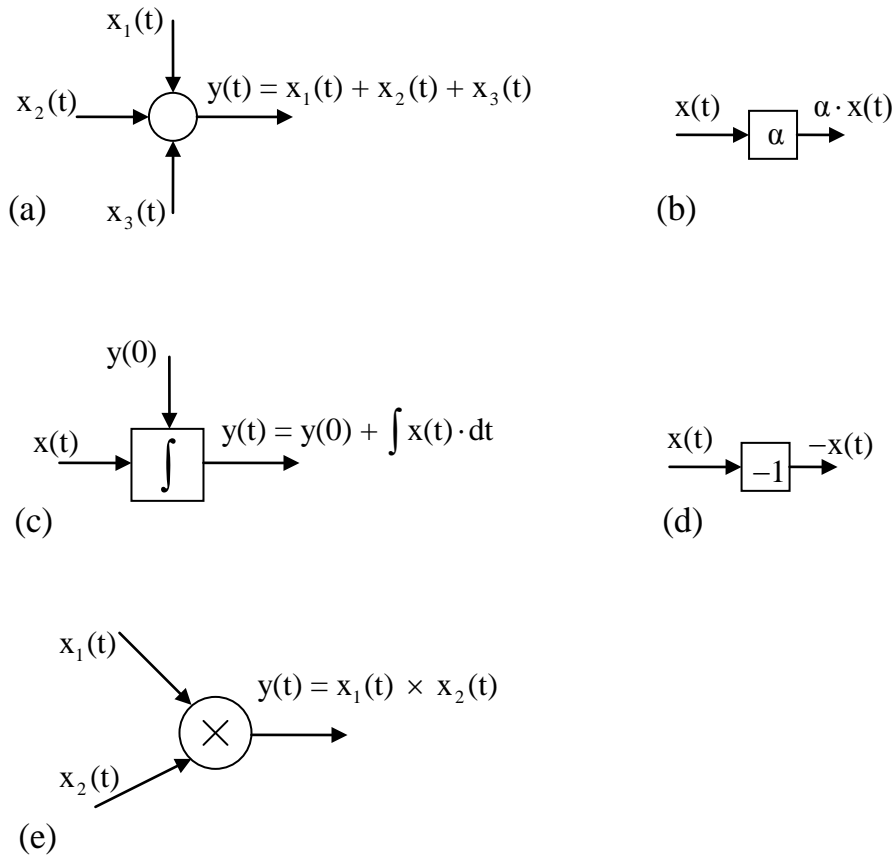
4.1. Dinamik ve Kaotik Sistemlerin Modellenmesi

Bir fiziksel sistemin blok diyagramlar ile bilgisayarda sayısal modellenmesi ve simülasyonu için bir yâda daha fazla diferansiyel denklem ile değişkenler üzerinde başlangıç şartlarını içeren matematiksel model gerekmektedir. Sistem doğrusal veya doğrusal-olmayan tipte olabilir. Bu tezde doğrusal olmayan sistemlerin kaotik yapıda olanları ele alınmıştır. Diferansiyel denklemleri modellemek için gereken işlemler toplama, işaret tersleme, sabit sayı ile çarpma, analog çarpma, integral alma, türev alma vb. olabilir.

İkinci olarak oluşturulan blok diyagramların analog işlemsel elemanlar kullanarak elektronik devre programları ile modellenmesi ve simülasyonu yapılabilir. Yine sayısal modellenmesi ve simülasyonu yapılan elektronik devrenin gerçek elektronik devresi kurularak da aynı simülasyon sonuçları elde edilebilir.

Sonuçta, blok diyagramlar ve elektronik devre programları ile yapılan sayısal modellemenin simülasyon sonuçları ile gerçek elektronik devrenin osiloskop çıktısı sonuçları birbirinin aynı olacaktır.

Pratik nedenlerden dolayı integral alma işlemini gerçekleştirmek, türev alma işlemine göre daha kolaydır. Sebep hesaplayıcı sinyallerinin gerçek voltajlar olması gerçeğinde yatmaktadır. Yani sinyaller bir dereceye kadar gürültüler tarafından bozulmaktadır. Türev alma işleminin gürültü etkilerini kuvvetleştirmesine karşılık, integral alma işlemi, bu gürültü etkilerini vasatlaştırma eğiliminde olduğundan çoğu kesinlik isteyen çözüm integral alma teknikleri kullanılarak elde edilebilir. Diferansiyel denklemleri blok diyagramları ile modellemek için gereken temel işlemler Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Blok diyagramlar ile modelleme için gereken temel işlemler (a) Toplama (b) Sabit ile çarpma (c) İntegral alma (d) İşaret tersleme (e) Analog çarpma.

Blok diyagramların elektronik devre gerçeklemelerinde kullanılan işlemsel opamp elemanı ve temel işlem devreleri bir sonraki Bölüm 4.2.'de açıklanacaktır.

Dirençler, kapasitörler, opamplar ve benzeri işlemsel elemanların bulunduğu aktif elektriksel devrelerin ileri yön voltaj transfer karakteristikleri, sistemlerin matematiksel modellerinde rastlanılan temel doğrusal matematiksel işlemlere benzer olduğundan dolayı, herhangi bir doğrusal sistemi modellemeye elverişlidir. Diyot, analog çarpım entegreleri, fonksiyon jeneratörleri ve özel devreler kullanarak, doğrusal-olmayan voltaj transfer karakteristiklerine de sahip olunabilir. Böylece doğrusal-olmayan sistemleri ve dolayısıyla kaotik sistemleri modellemek de mümkün olmaktadır.

Blok diyagramların elektronik devre olarak gerçekleşmesi ile ortaya çıkan sistem “Analog bilgisayar” olarak da adlandırılabilir. Belirli bir fiziksel sistemi modellemek için oluşturulan analog bilgisayarın matematiksel modeli, sistemin

matematiksel modeli ile özdeştir. Elektriksel devrenin voltaj transfer karakteristikleri, istenilen matematiksel işlemlere benzerdir. Devrenin giriş ve çıkış voltajları ona karşılık gelen sistemin matematiksel değişkenlerine benzerdir. Analog hesaplayıcı çözümü, zamana bağlılığı istenen değişkeninki ile aynı olan basit bir voltaj dalga formudur.

Analog bilgisayarlar birçok cazip özelliklere sahip olmaları ve bir çok alanda da digital bilgisayarlardan daha iyi performans sergilemeleri nedeniyle ilgilenilen alanlardandır. Analog bilgisayarlar çok hızlıdır, işlemler sürekli ve paralel olarak yapılır. Analog devre ile problemin matematiksel formülasyonu arasındaki uygunluktan dolayı analog bilgisayar modülleri problemin matematiğini direkt olarak modeller.

Analog bilgisayarların sahip olduğu pozitif yönlerin zenginliği ile birlikte birçok uygulamalar gelmiştir. Analog bilgisayarlar için en yaygın kullanım basit diferansiyel denklemlerin çözümleri olmuştur. Parçalı diferansiyel denklemlerin belirli tiplerini, cebirsel denklemlerini, integral denklemlerini, eşzamanlı lineer cebirsel denklemleri, doğrusal-olmayan diferansiyel denklemleri ve bu tezde olduğu gibi kaotik diferansiyel denklemleri içeren diğer tip sistemler ve problemler de analog bilgisayarlar ile çözülebilir. Örneğin;

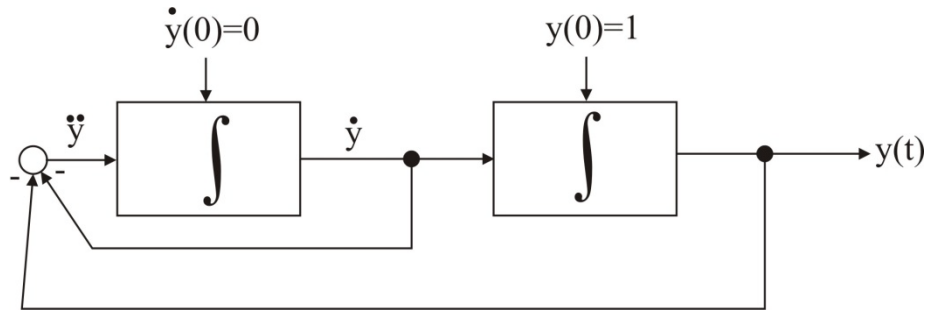
$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + y = 0, \quad y(0) = 1, \quad \dot{y}(0)=0 \quad (\text{E.4.1})$$

şeklinde verilen bir diferansiyel denklemin blok diyagramını elde etmek için en yüksek mertebeli olan terim(y 'nin ikinci türevi) yalnız bırakılarak diğer terimler karşı tarafa geçirilir ve şu ifade elde edilmiş olur:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = - \frac{dy}{dt} - y, \quad y(0) = 1, \quad \dot{y}(0)=0 \quad (\text{E.4.2})$$

Bu ifadeyi gösteren blok diyagram Şekil 4.2.'de verilmiştir ve bu blok diyagram E.4.2 diferansiyel denkleminin analog blok diyagramları ile çözümü olacaktır. Bu blok

diyagramın Matlab-Simulink gibi bir programla, $y(t)$ çıkış değerleri ve grafikleri elde edilebilir.



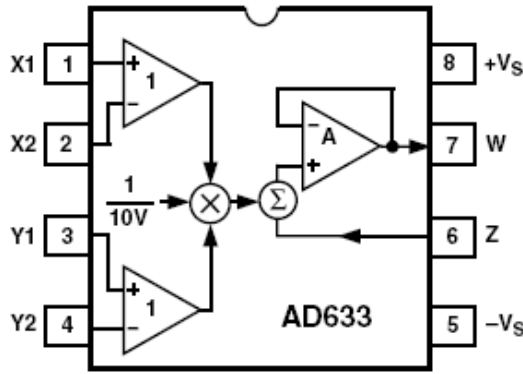
Şekil 4.2. (4.2) denklemini modelleyen blok diyagramı.

İlerleyen bölümlerde diferansiyel denklemlerin çok sayıda blok diyagramları elde edileceğinden burada bu örnek yeterli olacaktır. Elde edilen blok diyagramların elektronik devrelerinin elde edilmesinde ise blokların yerine geçecek işlemsel elemanlar ve temel işlem devreleri, bu blokların yerlerine konulmak suretiyle devreler tasarlanır.

4.2. Devre Gerçeklemede Kullanılan İşlemsel Elemanlar ve Temel İşlem Devreleri

4.2.1. Analog çarpma entegreleri

Farklı firmalara ait çeşitli çarpma entegreleri mevcuttur. Analog çarpma entegreleri, X ve Y fark girişleri ve Z toplama girişi için yüksek empedansa sahiptirler. Girişteki analog sinyalleri çarpma özelliğinin yanında toplama işlemi de yapabilirler. Örnek olarak tezde kullanılan AD6333 entegresi -10V ile +10V arasında kabul edilebilir fark giriş gerilimine sahiptir. Çıkış geriliminin çarpma ile çok büyüyerek besleme gerilimini geçmemesi için, çıkış gerilimi çarpma işleminden sonra 10'a bölünmektedir. AD633 entegresinin çıkış transfer fonksiyonu ile, fonksiyonel blok diyagramı Şekil 4.3.'de görülmektedir.

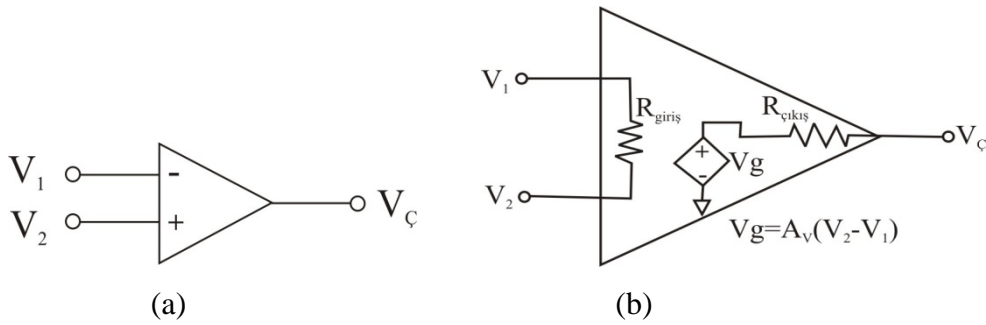


$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10V} + Z$$

Şekil 4.3. Örnek çarpma entegresinin(AD633) fonksiyonel blok diyagramı ve çıkış fonksiyonu.

4.2.2. Opamplar

İşlemsel kuvvetlendirici (Opamp), yüksek kazançlı, çok sayıda doğrusal ve doğrusal olmayan işaret işleme fonksiyonlarını gerçekleştirme yeteneğine sahip tümleşik devre, direkt kupaçlı yükselticidir. Günümüzde, 100MHz' i geçen frekanslarda ve 100w güç seviyesini aşan değerlerde kullanılan işlemsel kuvvetlendiriciler mevcuttur.



Şekil 4.4. Opamp'ın a) devre sembolü b) eşdeğer devresi.

Opamp'ın ideal durumdaki tanım denklemleri aşağıdadır:

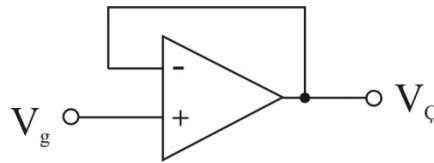
$$\begin{aligned} \dot{I}_p &= 0, \quad \dot{I}_n = 0 \\ V_p - V_n &= 0 \end{aligned} \quad (E.4.3)$$

Doğrusal aralıkta çalışan gerçek bir opamp'ın çıkış geriliminin alabileceği maksimum değer, $\pm V_{max}$ bellidir. V_{max} kaynak gerilimi E'ye yaklaşık olarak eşittir ($|V_o(t)| < E$).

Opamp bir gerilim darbesi ile sürüldüğünde, opampın çıkışı girişi takip edemez. Buna karşılık çıkış, üretici tarafından belirtilen bir hızla yükselir ve düşer. Bu orana yükselme eğimi (Slew rate) SR adı verilir ($\left| \frac{dv_0}{dt} \right| < SR$). SR, Volt / μs olarak verilir.

4.2.3. Gerilim takipçisi devresi

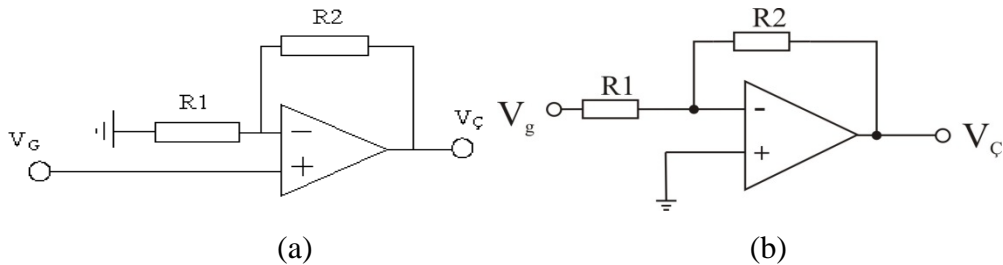
Şekil 4.5.'te verilen bu devrenin çıkışındaki sinyal girişindeki sinyal ile aynıdır. Yani çıkış girişi olduğu gibi takip eder. Bu devrenin kullanılmasındaki amaç empedans uygunlaştırmaktır. Çıkış gerilimi, $V_C = V_G$ şeklindedir.



Şekil 4.5. Opampli gerilim takipçisi devresi

4.2.4. Eviren ve evirmeyen yükselteç devresi

Eviren yükselteç, girişine uygulanan sinyali kazanç kadar yükseltir ve 180 derece faz farkı ile çıkışa verir. Bu devrenin kazancı $V_C = (-R2/R1).V_G$ formülü ile hesaplanabilir.

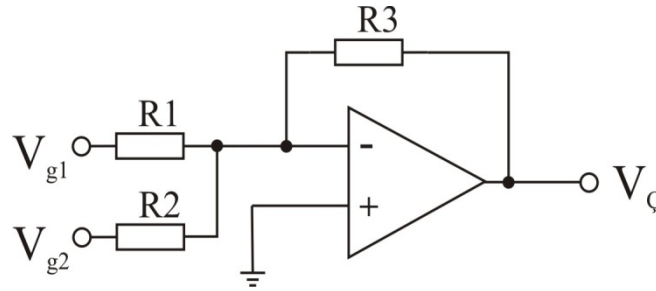


Şekil 4.6. (a) Opampli eviren yükselteç devresi, (b) Opampli evirmeyen yükselteç devresi

Evirmeyen yükselteç, girişine uygulanan gerilimi evirmeden, genliğini $V_C = (1 + (R2/R1)).V_G$ denkleminde uygun olarak yükseltme işlemi yapar. Bu devrenin kazancı daima birden büyüktür.

4.2.5. Toplama devresi

Girişlerine uygulanan sinyalleri toplar ve çıkışa tersleyerek verir. Her bir giriş sinyalinin kazancı ayrı ayrı ayarlanabilir. Devreye daha fazla giriş ucu bağlayarak daha fazla sayıda giriş toplanabilir. Çıkış gerilimi, $V_{\text{Ç}} = -[(R3/R1) \cdot V_{g1} + (R3/R2) \cdot V_{g2}]$ ifadesi ile bulunur.

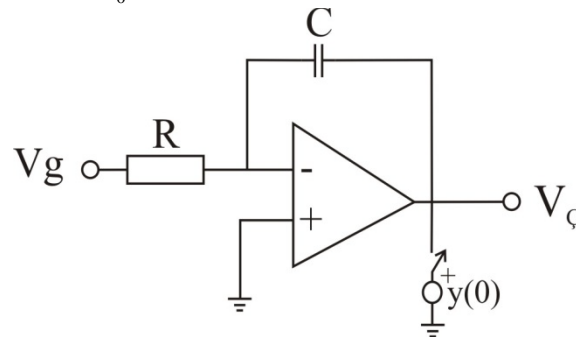


Şekil 4.7. Opampli toplama devresi.

4.2.6. İntegral alma devresi

Bu devre temel olarak girişindeki sinyalin integralini alarak çıkışa veren devredir. Devrenin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$V_{\text{Ç}}(t) = V_{\text{Ç}}(0) - \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t V_{g}(t) \cdot dt$$



Şekil 4.8. Opampli integral alma devresi

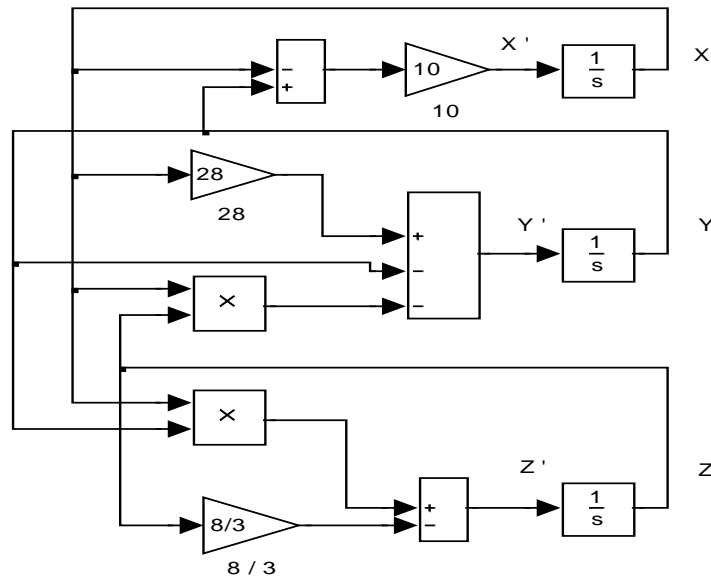
4.3. Kaotik Sistemlerin Devre Gerçeklemesi

Örnek Lorenz sistemi üzerinde, kaotik sistemlerin devre gerçeklemeleri anlatılacaktır. Lorenz sistemi denklemleri şu şekildedir;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= -x \cdot z + r \cdot x - y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z\end{aligned}\tag{E.4.4}$$

Sistem, $\sigma = 10$, $r = 28$ ve $b = 8/3$ parametreleri ve $x_0 = 0$, $y_0 = -0.01$, $z_0 = 9$ başlangıç şartları için kaotik çözüm göstermektedir.

Lorenz sisteminin Matlab-Simulink'de yapılan blok diyagramları ile modellenmesi Şekil 4.9.'da verilmiştir.



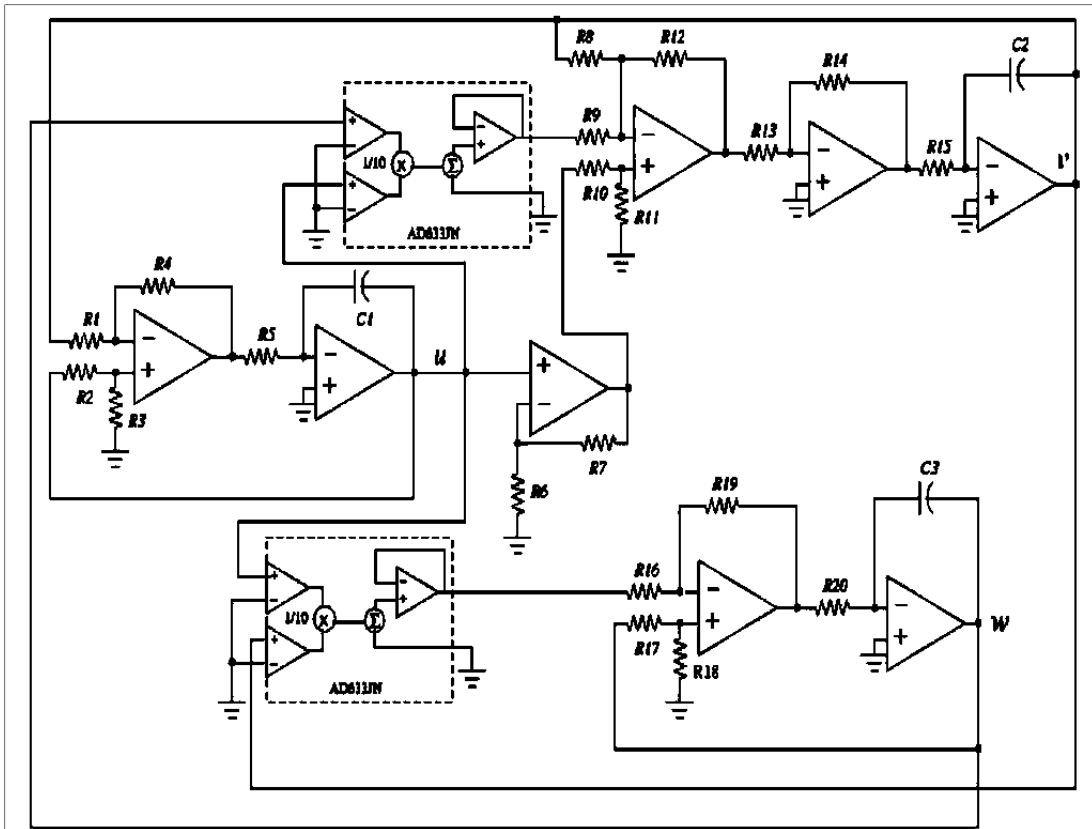
Şekil 4.9. Lorenz sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.

Pecora ve Carroll'ün 1991'de yaptığı(Pecora ve Carroll, 1990),(Pecora ve Carroll, 1991) çalışmaları temel alarak, 1993 yılında Cuomo ve Oppenheim(Cuomo Ve Oppenheim,1993), (Cuomo vd..1993) Lorenz sisteminin analog devre gerçeklemesini tanıttılar. Onların kullandıkları analog devrelerle direkt gerçeklemede açıklandığı gibi sistemin dinamik sınırları güç kaynağının sınırlarını aştığı için x, y ve z değişkenlerinin

skala edilmesi gerekmektedir. Cuomo yeni değişkenleri $u = x/10$, $v = y/10$, ve $w = z/20$ olarak tanımlamıştır. Bu skala faktörleriyle birlikte skala edilmiş Lorenz denklemleri şu şekilde dönüşmektedir;

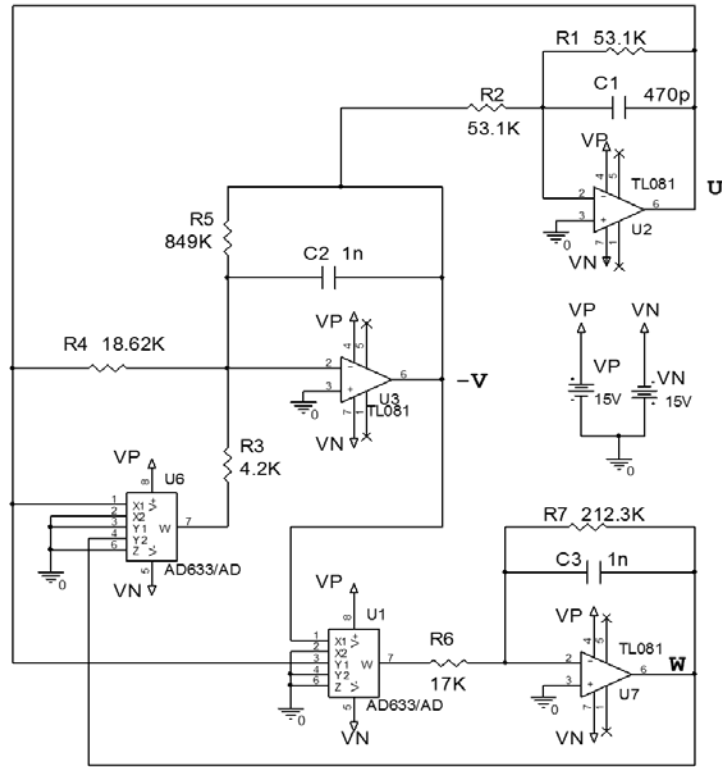
$$\begin{aligned} \dot{u} &= \sigma \cdot (v - u) \\ \dot{v} &= -20 \cdot u \cdot w + r \cdot u - v \\ \dot{w} &= 5 \cdot u \cdot v - b \cdot w \end{aligned} \quad (\text{E. 4.5})$$

Bu denklemlerin elektronik devre gerçekleştirilmesi için 2 devre sunulacaktır. Bunlardan birincisi Şekil 4.10. olan Cuomo ve Oppenheim'in tanıttığı devrede 8 opamp, 2 analog çarpma entegresi, 20 direnç, ve 3 kapasitör kullanılmıştır.



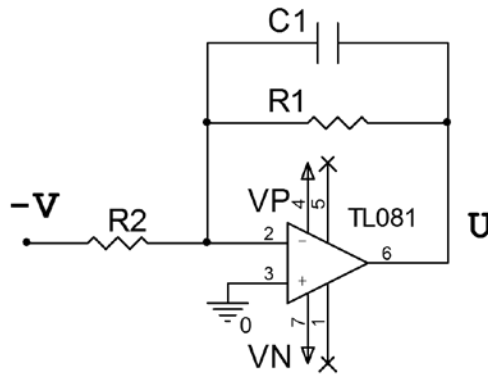
Şekil 4.10. Cuomo ve Oppenheim'in 1993 de tanıttığı Lorenz devresi.

Buna karşılık tasarlanan 2.devrede ise 3 opamp, 2 analog çarpma entegresi 7 direnç ve 3 kapasitör bulunmaktadır.



Şekil 4.11. Lorenz sisteminin basitleştirilmiş 2. devre tasarımı.

Bu devreyi analiz etmek için, her bir kısım u, v, ve w hesaplamalarını verecek şekilde 3 bölüme ayırabiliriz



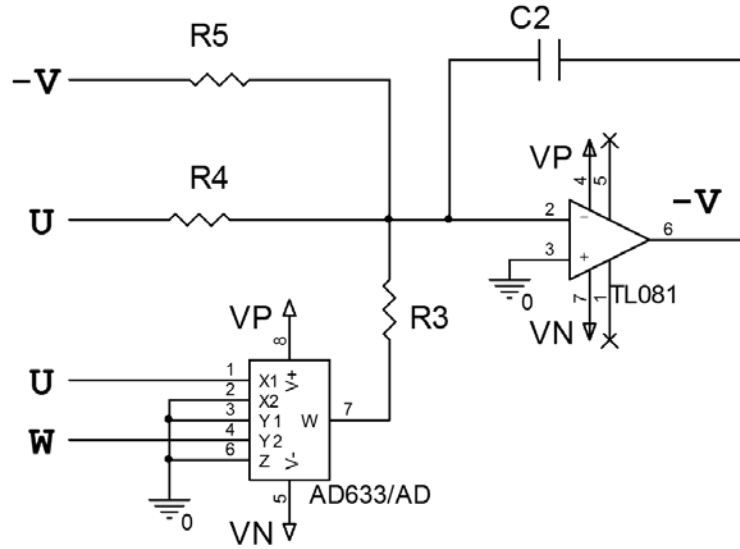
Şekil 4.12. Lorenz 2. devre tasarımının u hesaplama devresi.

Şekil 4.12.'yi analiz edersek,

$$u = -v \cdot \frac{(-1/j \cdot \omega \cdot C_1) // R_1}{R_2}, \quad \text{buradan} \quad u = v \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + R_1 \cdot j \cdot \omega \cdot C_1} \text{ olur. Buradan da,}$$

$$u \cdot j \cdot \omega \cdot R_1 \cdot C_1 + u \cdot \frac{R_1}{R_2} = \dot{u} \cdot R_1 \cdot C_1 = v \cdot \frac{R_1}{R_2} - u \quad \text{ve}$$

Burada $R = R_1 = R_2$ için, $\dot{u} = \frac{1}{R \cdot C_1} (v - u)$ elde edilir.



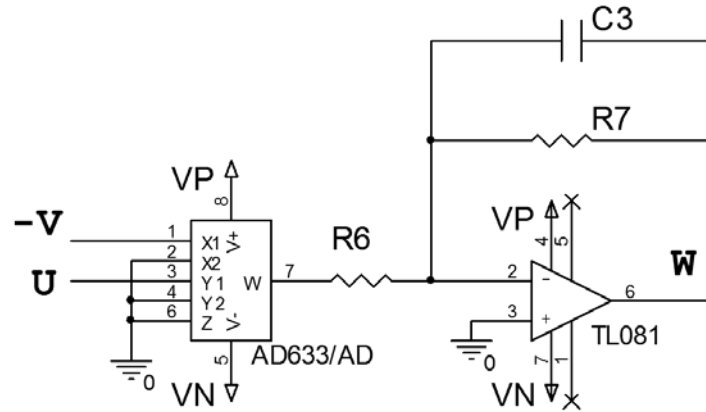
Şekil 4.13. Lorenz 2. devre tasarımının v hesaplama devresi

Şekil 4.13.'ü analiz edersek,

$$-v = \frac{-1/j \cdot \omega \cdot C_2}{R_4} \cdot u + \frac{-1/j \cdot \omega \cdot C_2}{R_3} \cdot (-u \cdot w) + \frac{-1/j \cdot \omega \cdot C_2}{R_5} \cdot (-v)$$

$$v = \frac{u}{C_2 \cdot R_4} \cdot \frac{1}{s} - \frac{u \cdot w}{C_2 \cdot R_3} \cdot \frac{1}{s} - \frac{v}{C_2 \cdot R_5} \cdot \frac{1}{s}$$

$$\dot{v} = \frac{1}{C_2} \cdot \left(\frac{u}{R_4} - \frac{u \cdot w}{R_3} - \frac{v}{R_5} \right) \quad \text{elde edilir.}$$



Şekil 4.14. Lorenz 2. devre tasarımının w hesaplama devresi.

Şekil 4.14.'ü analiz edersek,

$$w = \frac{-1/j \cdot w \cdot C_3}{R_6} \cdot (-u \cdot v) + \frac{-1/j \cdot w \cdot C_3}{R_7} \cdot w$$

$$w = \frac{u \cdot v}{C_3 \cdot R_6} \cdot \frac{1}{s} - \frac{w}{C_3 \cdot R_7} \cdot \frac{1}{s}, \quad \text{Buradan da}$$

$$\dot{w} = \frac{1}{C_3} \cdot \left(\frac{u \cdot v}{R_6} - \frac{w}{R_7} \right) \quad \text{elde edilir.}$$

Elde edilen \dot{u} , \dot{v} , \dot{w} ifadeleri birleştirilirse;

$$\dot{u} = \frac{1}{R \cdot C_1} (v - u)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{C_2} \cdot \left(\frac{v}{R_3} - \frac{u \cdot w}{R_4} - \frac{v}{R_5} \right) \quad (\text{E.4.6})$$

$$\dot{w} = \frac{1}{C_3} \cdot \left(\frac{u \cdot v}{R_6} - \frac{w}{R_7} \right)$$

Burada $R = R_1 = R_2$ 'dir. Kapasitörlerin değerleri devrenin zamanlama skalasını belirlemektedir. Cuomo ve Oppenheim'in yaptıkları çalışmaya göre (Pecora ve Carroll,

1990) zamanlama skalası 2505'dir. (Charlesworth, Fletcher Jr., 19749), problemin kendi çözümünde olan fiziksel zaman ile (problem zamanı), analog bilgisayarda incelenen çözüm zamanının(hesaplama zamanı) birbirinden çok farklı olabileceğini belirterek zamanlama skalasına duyulan ihtiyacın sebebini açıklamıştır. Charlesworth(Charlesworth, Fletcher Jr., 19749),' a göre $t =$ problem zamanı, $\tau =$ hesaplama(devre) zamanı, $\beta =$ zaman skalalama faktörü olmak üzere $\tau = \beta \times t$ 'dir. Bu tezde de aynı şekilde bütün devre gerçeklemelerinde zaman skalalama faktörü $\beta = 2505$ alınmıştır. E.4.7 denklemini E.4.5 denklemi ile karşılaştırarak ve zaman skalalaması uygulayarak, σ , r , ve b parametrelerinin matematiksel karşılıkları elde edilir.

σ için: $\dot{u} = \sigma \cdot (v - u) = \frac{1}{R \cdot C_1} (v - u)$ 'dir. $\sigma = \frac{1}{R \cdot C_1}$ olur. Zaman skalalaması

uygulanırsa $\sigma = \frac{1}{2505 \cdot R \cdot C_1}$ elde edilir.

r için: $\dot{v} = -20 \cdot u \cdot w + r \cdot u - v = \frac{1}{C_2} \cdot \left(\frac{u}{R_3} - \frac{u \cdot w}{R_4} - \frac{v}{R_5} \right)$ 'dir.

Buradan $r = \frac{1}{2505 \cdot C_2 \cdot R_3}$ elde edilir.

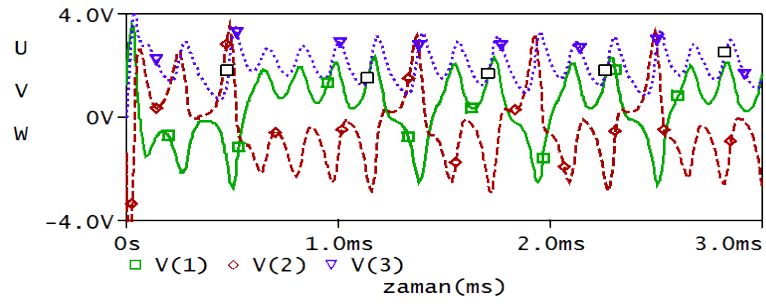
b için: $\dot{w} = 5 \cdot u \cdot v - b \cdot w = \frac{1}{C_3} \cdot \left(\frac{u \cdot v}{R_6} - \frac{w}{R_7} \right)$ 'dir.

Buradan $b = \frac{1}{2505 \cdot C_3 \cdot R_7}$ elde edilir.

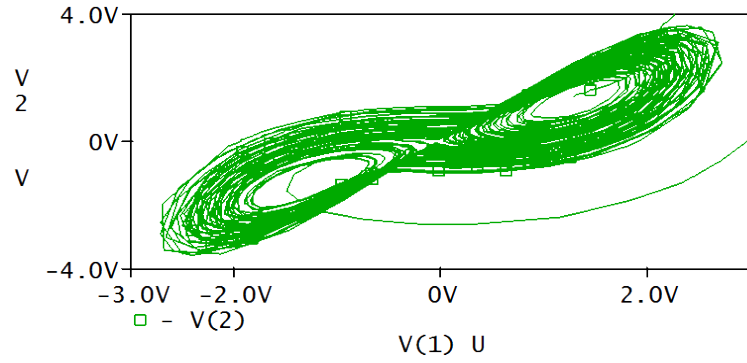
Bulunan bu parametre değerleri ile birlikte, (4.6) denklemi ile (4.5) denklemindeki diğer katsayılar karşılaştırılarak diğer direnç değerleri de tespit edilir. Örneğin $u \cdot w$ 'nin

katsayısını analiz edersek; $\frac{1}{2505 \cdot C_2 \cdot R_4} = 20$ olur. Devrede $C_2 = 470$ pf alındığı

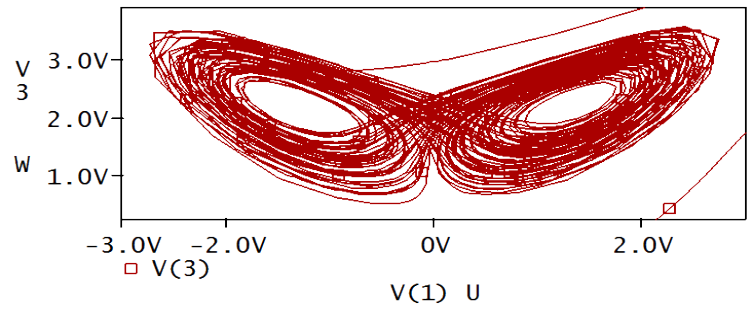
düşünülürse buradan R_3 değeri kolayca $R_3 = 18.62$ K olarak hesaplanır. Aynı şekilde tüm direnç değerleri $R_1=R_2=53.1K$, $R_3=18.6K$, $R_4=4.2K$, $R_5=849.3K$, $R_6=17K$, $R_7=212.3K$ olarak elde edilir. Devrede $C_1=C_2=C_3=470$ pf 'dır. Basitleştirilmiş Lorenz 2. devresinin Pspice simülasyon sonuçları Şekil 4.15'de verilmiştir.



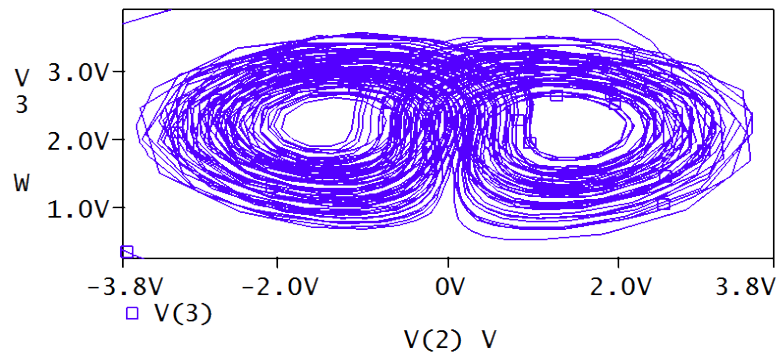
(a)



(b)



(c)



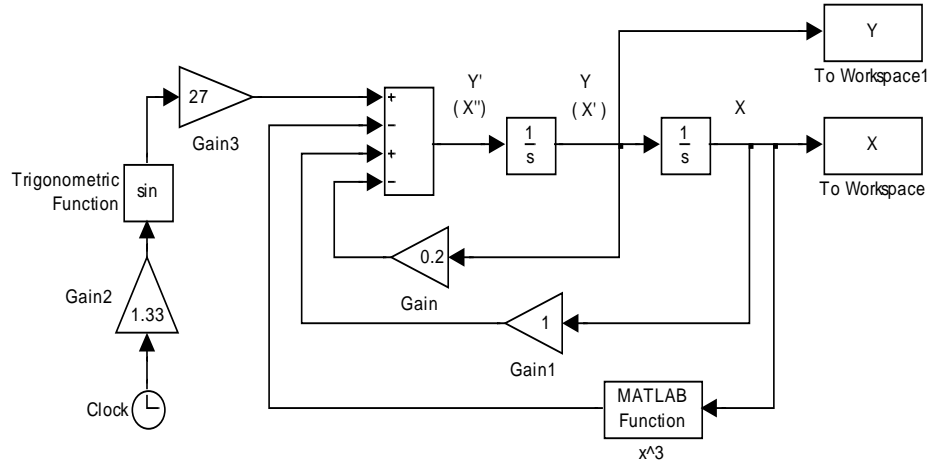
(d)

Şekil 4.15. Lorenz 2. devre tasarımının Pspice simülasyonu sonuçları (a)kaotik u, v, w sinyallerinin zamana göre değişimi, b) u-v c) u-w d) v-w kaotik çekicileri.

4.4. Duffing Sistemi Modellemesi ve Devre Tasarımları

Kaotik Duffing sistemi denklemleri şu şekildedir;

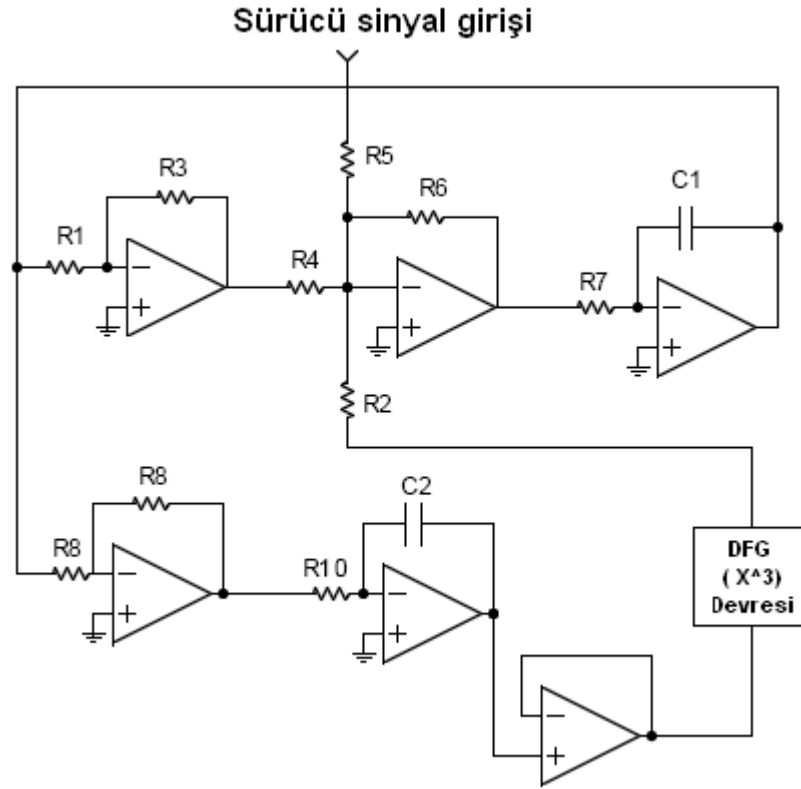
$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -r \cdot y + w_0^2 \beta x x + f^3 \cos(w t) \end{aligned} \quad (E.4.8)$$



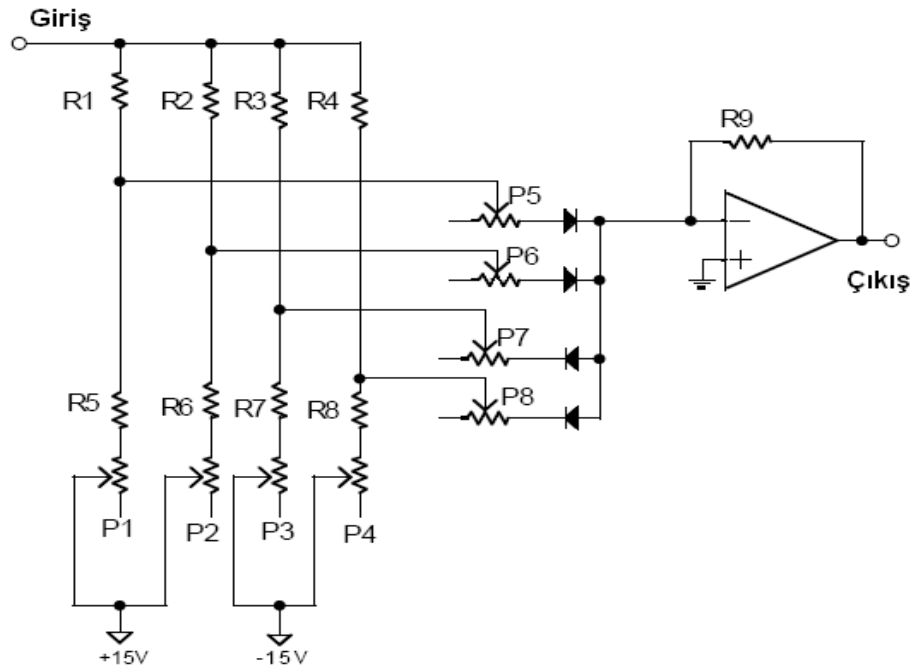
Şekil 4.16. Duffing sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.

Duffing sisteminin, parametreler $r = 0.2$, $w_0^2 = 1$, $\beta = 1$, $f = 27$, $w = 1.33$ olarak Matlab-Simulink'de yapılan blok diyagramları ile modellenmesi şekil 4.16.'da verilmiştir.

Duffing sistemi blok diyagramının elektronik devre gerçekleştirilmesinde en zor kısım x^3 fonksiyonunun gerçekleştirilmesidir. Parçalı-doğrusal yaklaşımla kurulan Duffing devresi (Bkz. Şekil 4.37.)'de verilmiştir. Bu devrede $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ K}$, $R_2 = 39.2 \text{ K}$, $R_7 = R_{10} = 100 \text{ K}$, $R_8 = R_9 = 1 \text{ M}$, $C_1 = C_2 = 0.001 \text{ mF}$ 'dir. DFG olarak görülen blok ise diyot fonksiyon generatörü olup, x^3 fonksiyonunun doğrusal yaklaşıklığını sağlamaktadır. DFG devre şeması ise (Bkz. Şekil 4.48.)'de verilmiştir. Bu devrede ise $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_9 = 100 \text{ K}$, $R_5 = R_7 = 680 \text{ K}$, $R_6 = R_8 = 2 \text{ M}$, $P_1 = P_3 = 20 \text{ K}$ potansiyometre, $P_2 = P_4 = 20 \text{ K}$ potansiyometre, $P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = 20 \text{ K}$, tüm diyotlar 1N485B'dir. Kullanımda bu devre genliği 0,1-5V arası ve frekansı 100 Hz – 2 KHz arası olan bir sinüs dalgası ile sürülmüştür.



Şekil 4.17. Parçalı-Doğrusal Duffing devresi.



Şekil 4.18. Parçalı-Doğrusal Duffing devresindeki X^3 işlemini yapan DFG (diyot fonksiyon generatörü) devresi.

4.5. Chua Sistemi Modellemesi ve Devre Tasarımları

Kaotik Chua sistemi denklemleri şu şekildedir;

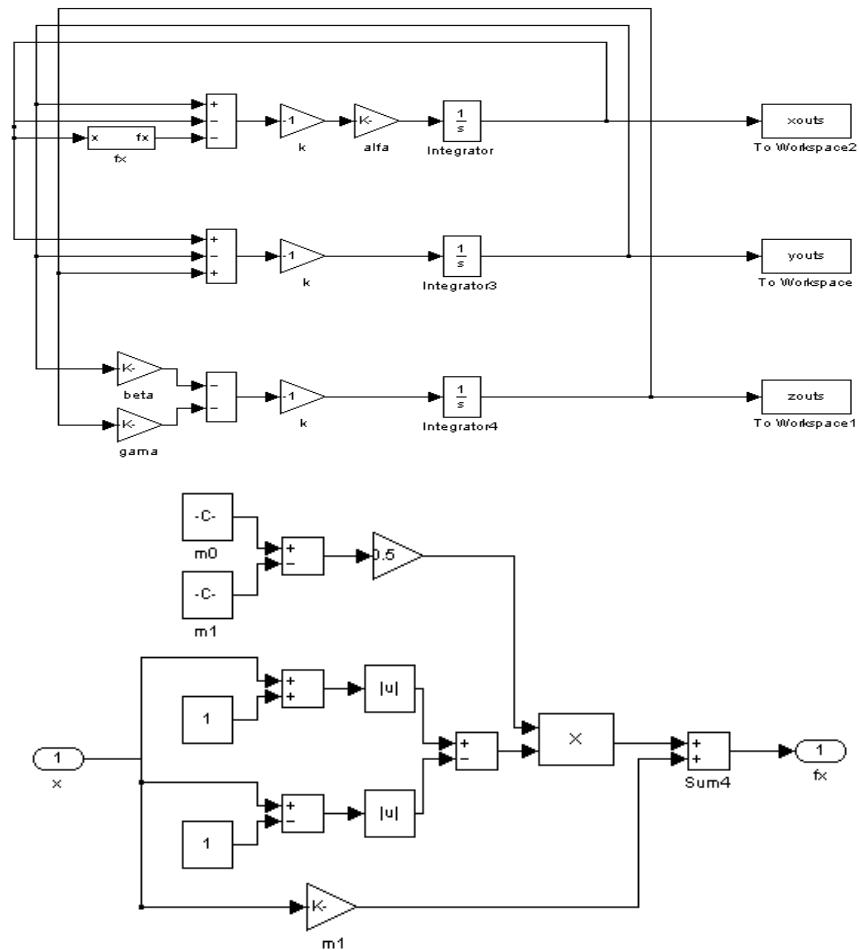
$$\frac{dx}{dt} = k\alpha \cdot (-y - x - f(x))$$

$$\frac{dy}{dt} = k \cdot (x - y + z)$$

(E.4.9)

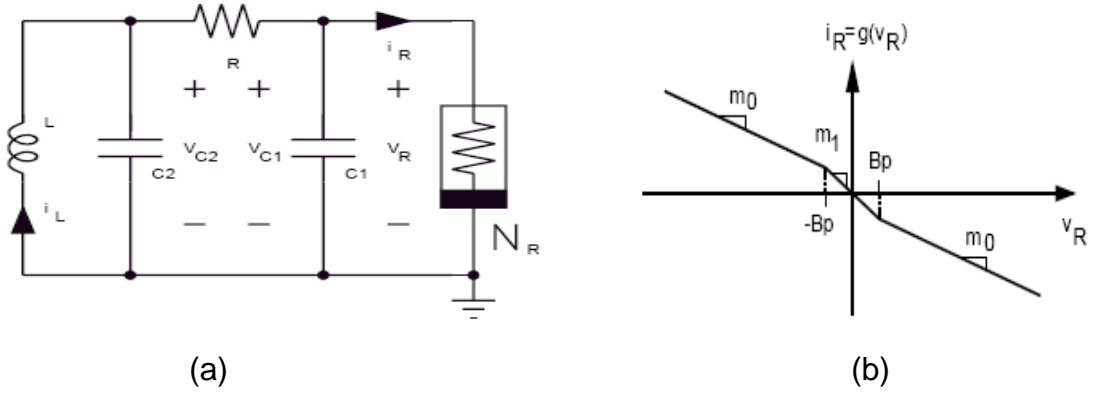
$$\frac{dz}{dt} = k \cdot (\beta y - \gamma z)$$

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

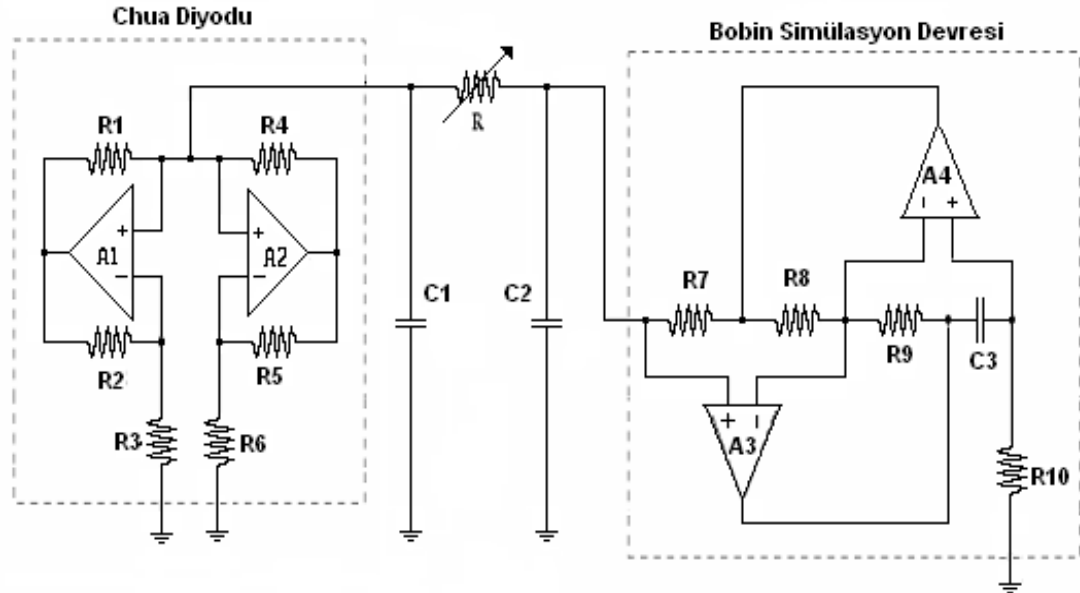


Şekil 4.19. Chua sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.

Chua sisteminin, Matlab-Simulink’de yapılan blok diyagramları ile modellenmesi Şekil 4.19.’de verilmiştir. Chua Devresi standart gösterimi Şekil 4.20.’da verilmiştir. Burada N_R chua diyodu olarak bilinen doğrusal-olmayan dirençtir. Bobin elemanı ve doğrusal-olmayan direnç elemanının opamplarla gerçekleştirilmesiyle elde edilen Chua devresi Şekil 4.21.’da verilmiştir.

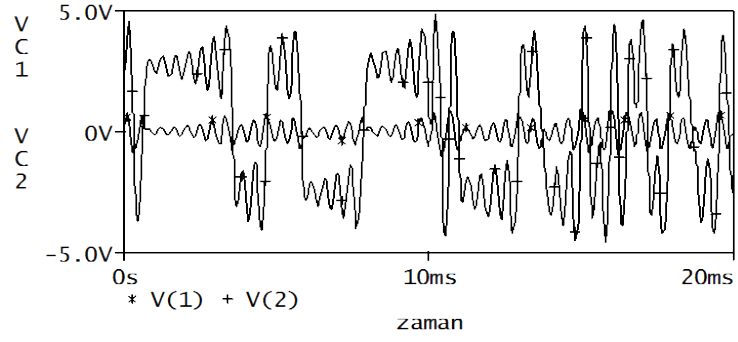


Şekil 4.20. a) Chua devresi b) Chua diyodu akım-gerilim karakteristiği.

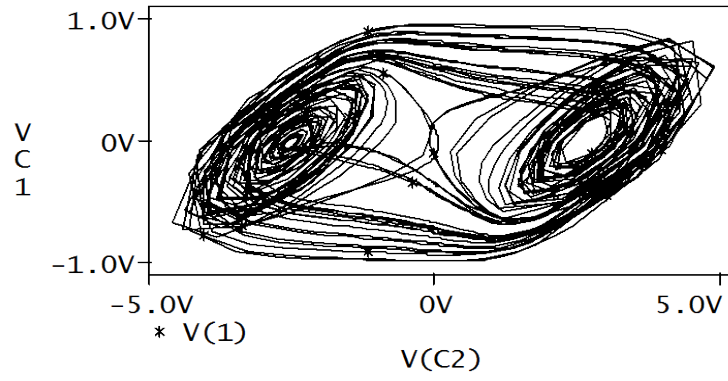


Şekil 4.21. Bobin ve chua diyodunun opamplarla gerçekleştirilmesiyle elde edilen Chua devresi.

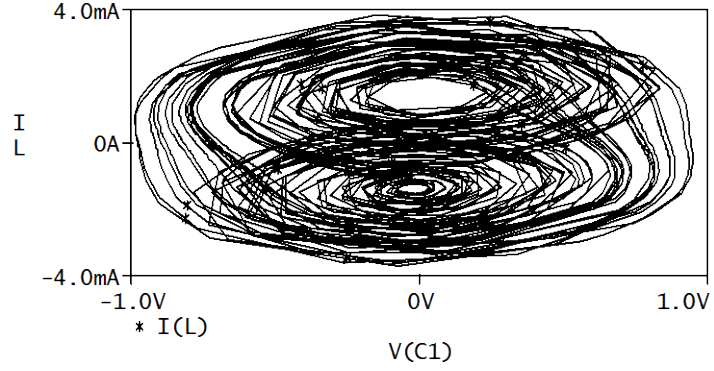
Chua Devresinin pspice simülasyon sonuçları Şekil 4.22 de verilmiştir



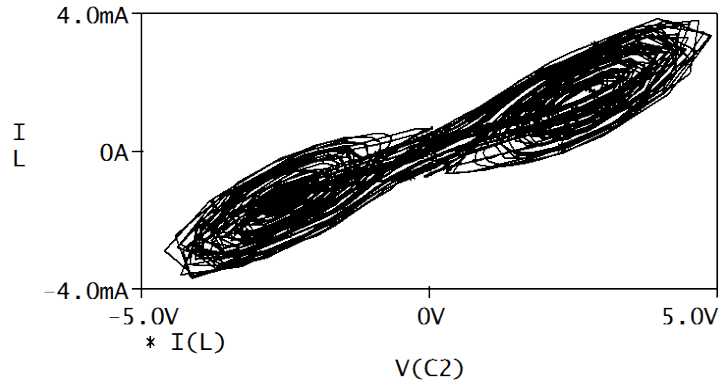
(a)



(b)



(c)



(d)

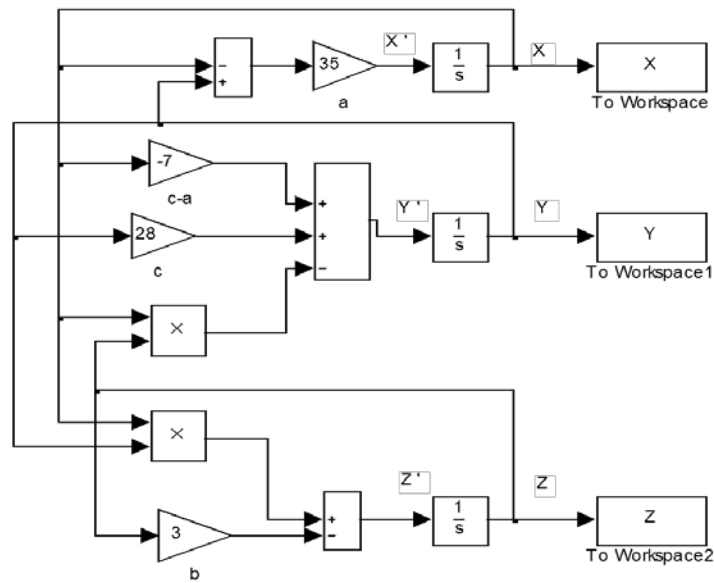
Şekil 4.22. Chua Devresinin pspice simülasyon sonuçları a) VC1, VC2 gerilimlerinin zaman göre değişimi b) VC2-VC1 c) VC1-IL d) VC1-IL kaotik çekicileri.

4.6. Chen Sistemi Modellemesi ve Devre Tasarımları

Kaotik Chen sistemi denklemleri şu şekildedir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= (c - a) \cdot x - x \cdot z + c \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z\end{aligned}\quad (\text{E.4.10})$$

Chen sisteminin, $a = 35$, $b = 3$, $c = 28$ parametreleri ve $x_0 = -10$, $y_0 = 0$, $z_0 = 37$ ilk şartları altında Matlab-Simulink'de yapılan blok diyagramları ile modellenmesi Şekil 4.23.'de verilmiştir.

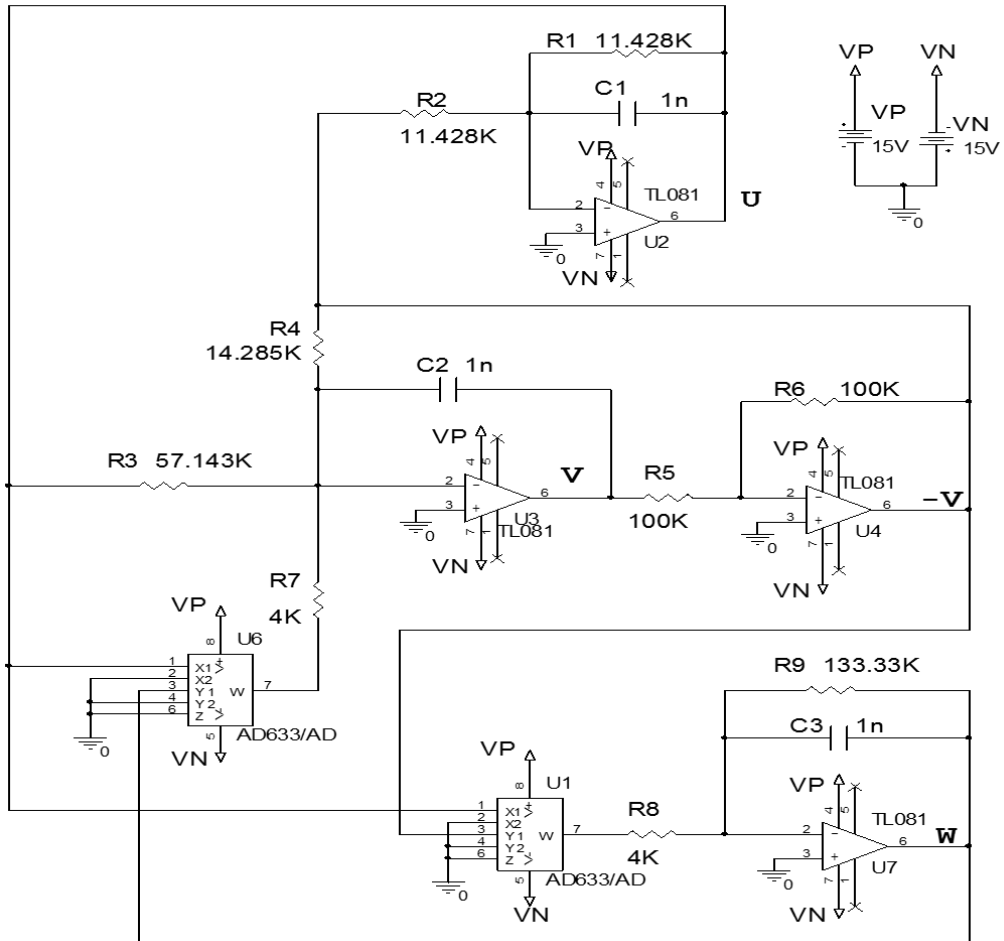


Şekil 4.23.Chen sisteminin Matlab-Simulink modellemesi .

Lorenz sistemi gibi Chen sisteminin de dinamik sınırları güç kaynağının sınırlarını aştığı için x , y ve z değişkenlerinin skala edilmesi gerekmektedir. Yeni değişkenler $u = x/10$, $v = y/10$, ve $w = z/10$ olarak alınırsa aşağıdaki (pp) denklemi elde edilir.

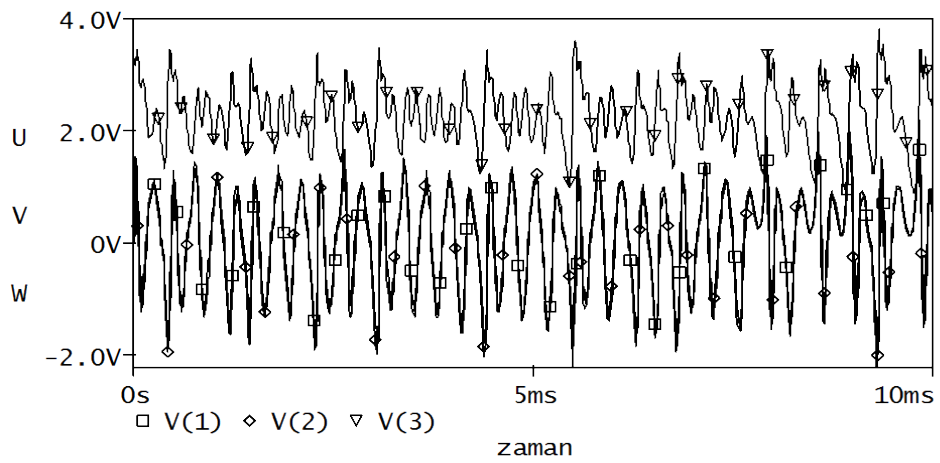
$$\begin{aligned}\dot{x} &= a \cdot (v - u) \\ \dot{y} &= (c - a) \cdot u - 10 \cdot u \cdot w + c \cdot v \\ \dot{z} &= 10 \cdot u \cdot v - b \cdot w\end{aligned}\quad (\text{x})$$

Chen sisteminin skala edilmiş (x) denklemlerinin elektronik devre gerçekleştirilmesi Şekil 4.24.'de verilmiştir.

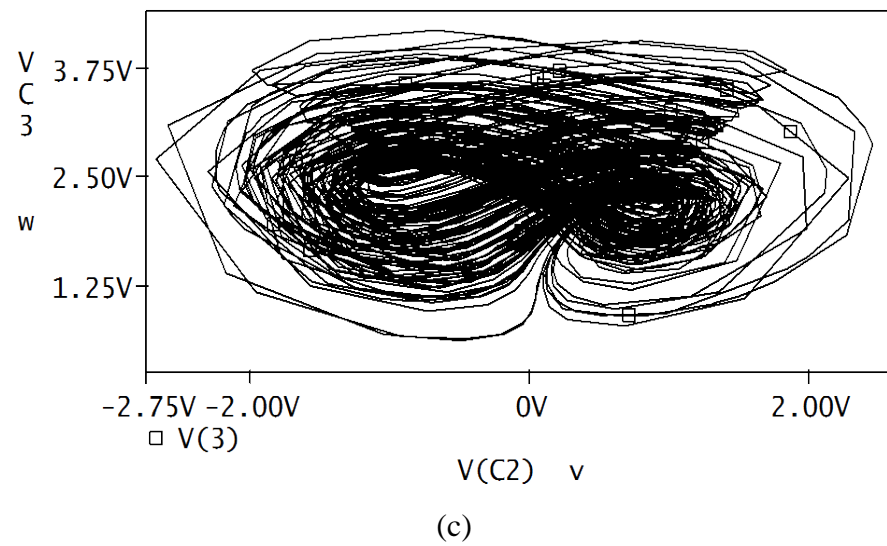
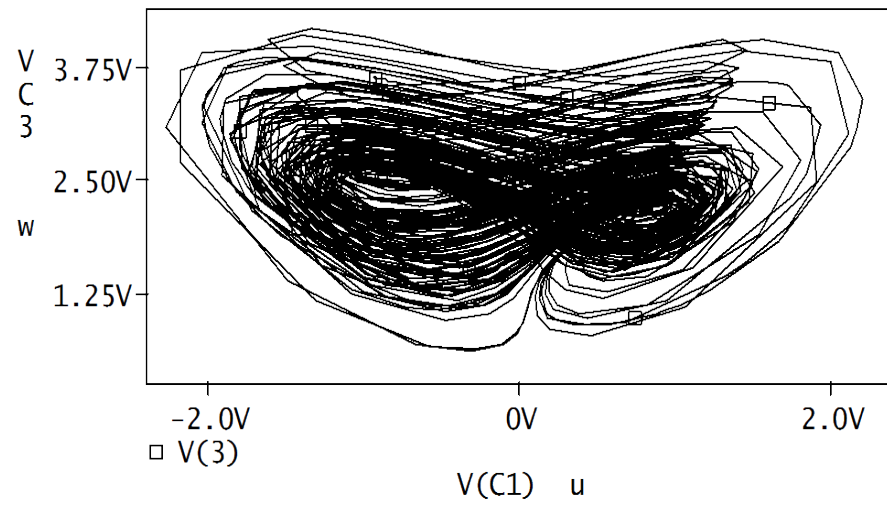
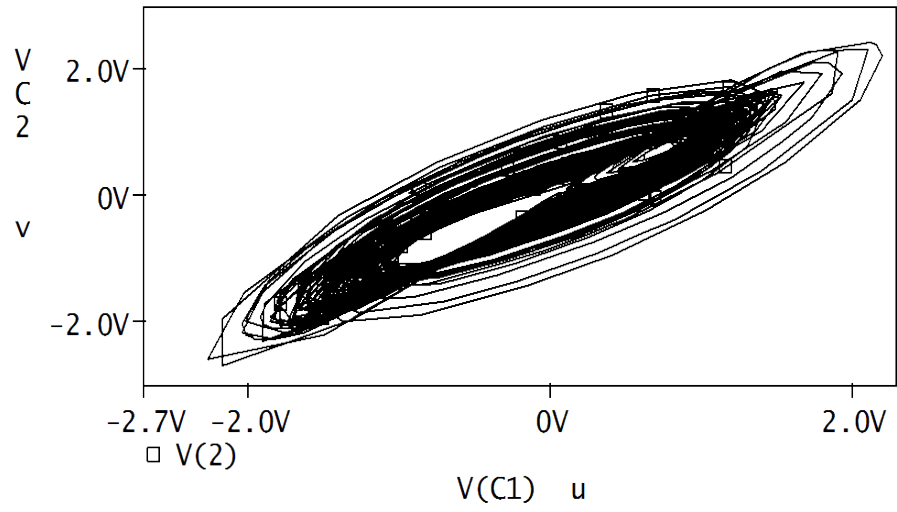


Şekil 4.24. Chen sisteminin Pspice simülasyon devresi.

Chen devresinin Pspice simülasyon sonuçları Şekil 4.25. ve Şekil 4.26.de verilmiştir.



Şekil 4.25. Chen devresinin u, v, w değişkenlerinin zamana göre değişimi.



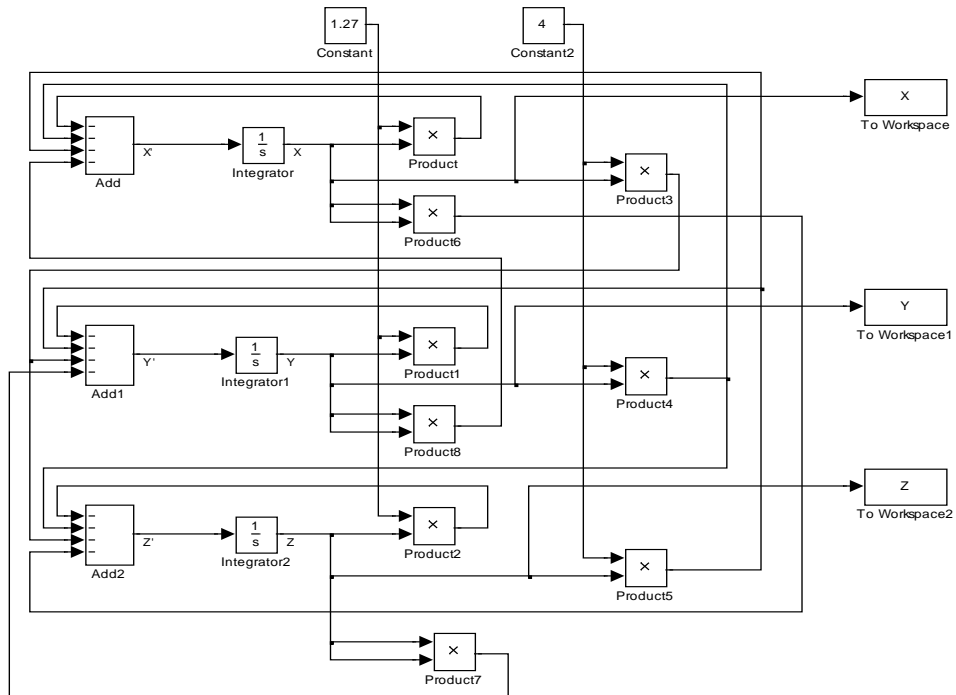
Şekil 4.26. Chen devresinin pspace simülasyonu sonuçları a) u-v, b) u-w, d) v-w kaotik çekicileri.

4.7. Halvorsen dairesel simetrik çekicisi

Halvorsen dairesel simetrik çekicisine ait doğrusal olmayan denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

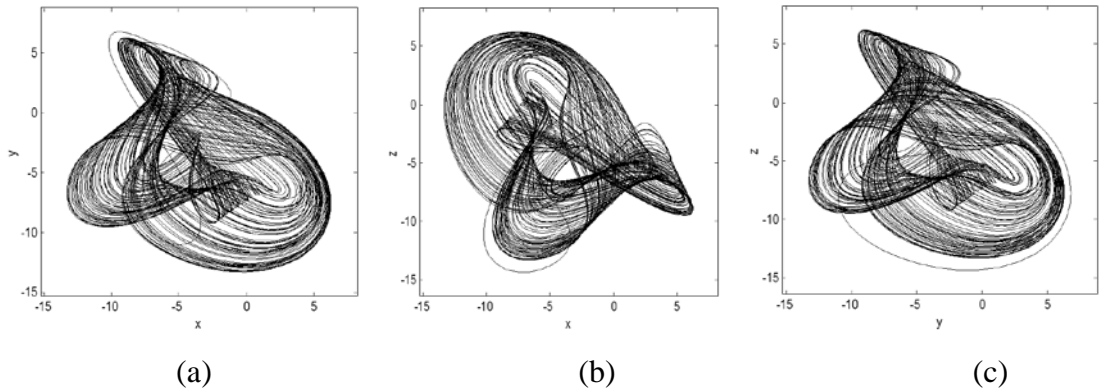
$$\begin{aligned}\dot{x} &= -a \cdot x - 4 \cdot y - 4 \cdot z - y^2 \\ \dot{y} &= -a \cdot y - 4 \cdot z - 4 \cdot x - z^2 \\ \dot{z} &= -a \cdot z - 4 \cdot x - 4 \cdot y - x^2\end{aligned}\tag{E.4.11}$$

Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin $x_0=-5$, $y_0=0$, $z_0=0$ ve $a=1,27$ başlangıç şartları altında Matlab-Simulink'de hazırlanan blok diyagramlar ile modellenmesi Şekil 4.27'de verilmiştir.

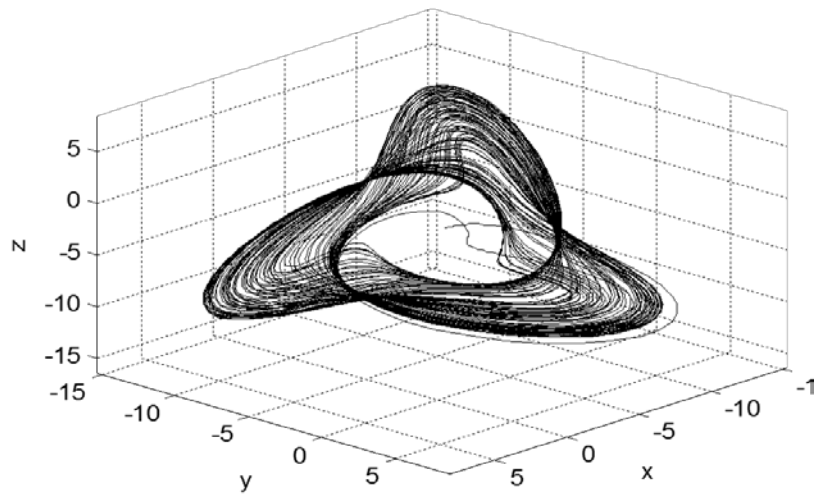


Şekil 4.27. Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin Matlab-Simulink modellemesi.

Şekil 4.7.1'de Matlab-Simulink modeli verilen Halvorsen kaotik sistemi için elde edilen nümerik simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.28. Halvorsen dairesel simetrik çekicisinin a) x-y, b) x-z, ve c) y-z kaotik çekicileri.



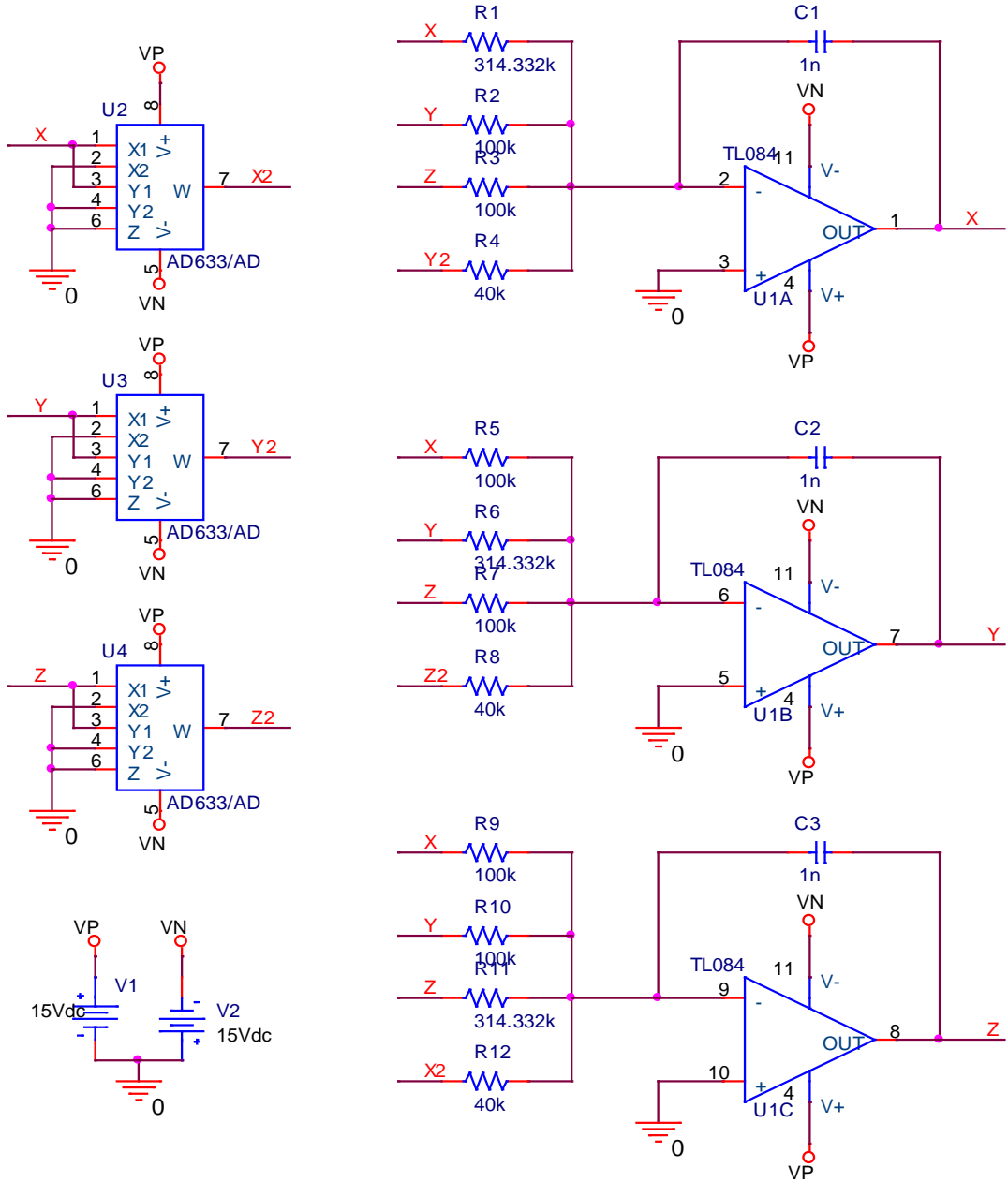
Şekil 4.29. Halvorsen dairesel simetrik çekicisinin üç boyutlu x-y-z kaotik yörüngesi.

Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin $x_0=-5$, $y_0=0$, $z_0=0$ ve $a=1,27$ başlangıç şartları altında gerçekleştirilen PSPICE simülasyon devre şeması Şekil 4.30'de verilmiştir.

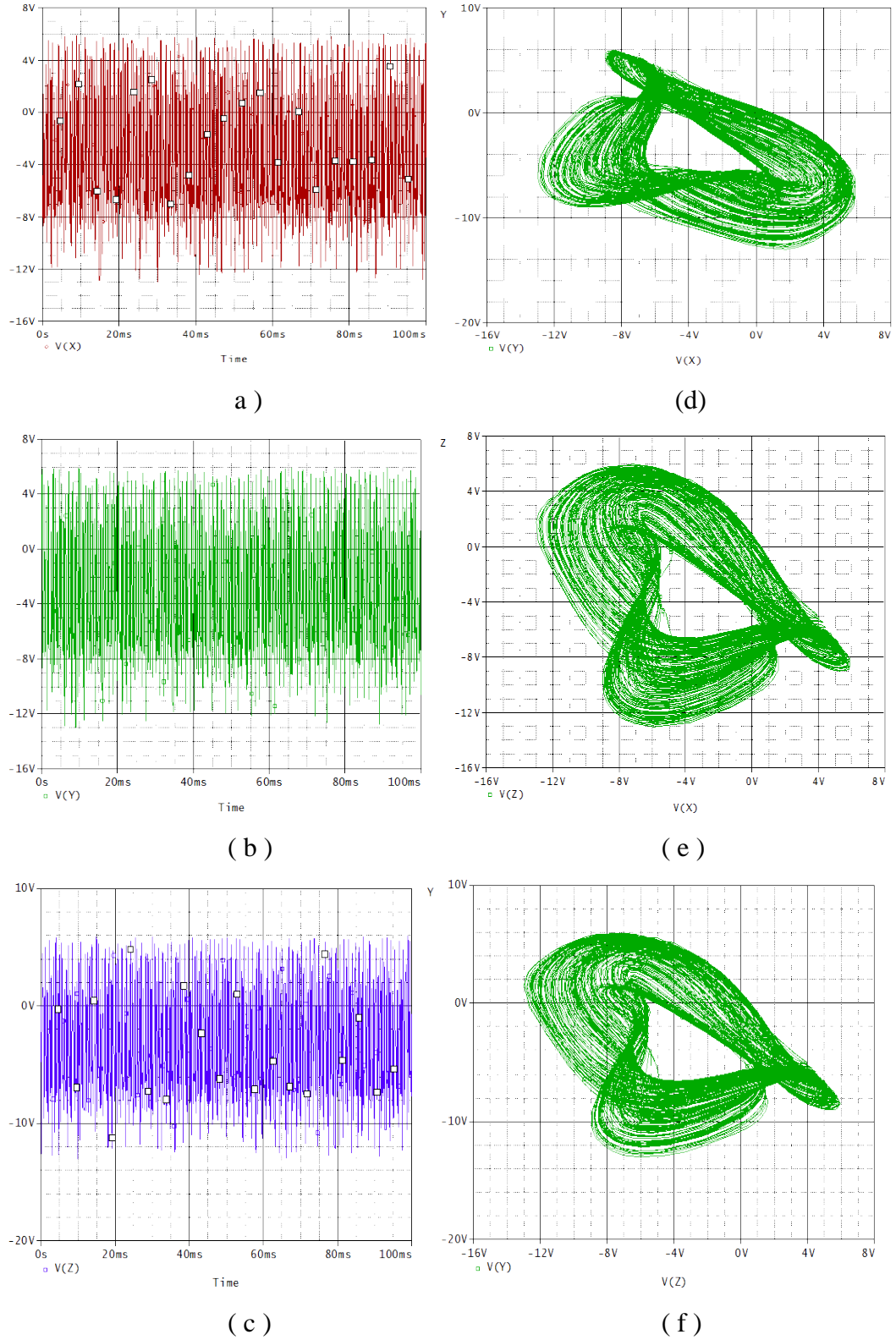
Devre tasarımı yapılırken, AD633 analog çarpıcı entegresinin çıkışın 10V değeri ile ölçeklendirilmiştir. Bu özellikten dolayı çarpıcı çıkışındaki sinyal gerçek sinyalin 10'da birine eşit olmaktadır.

AD633 çıkış denklemi aşağıdaki gibidir.

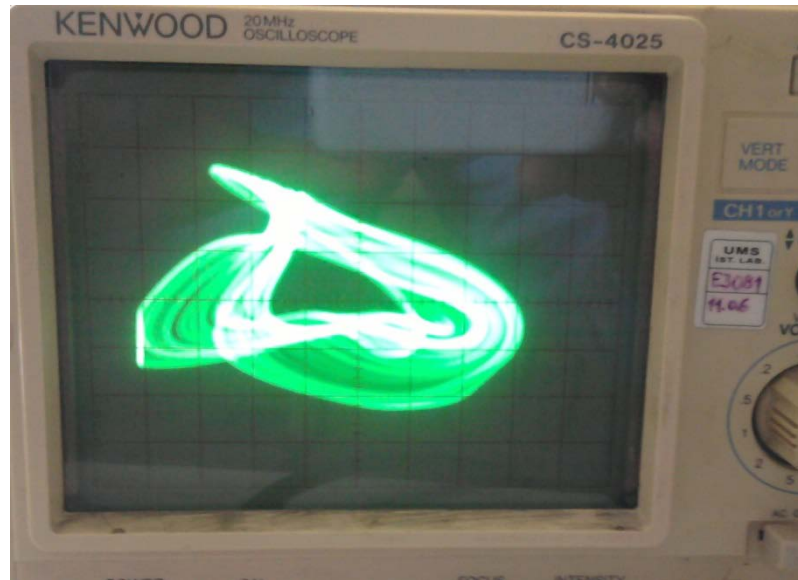
$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10V} + Z \quad (E.4.12)$$



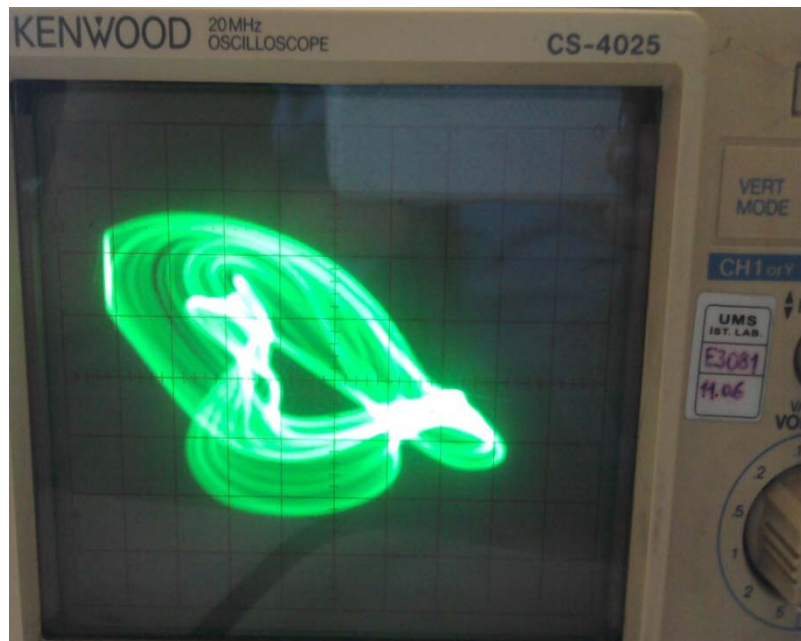
Şekil 4.30. Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin Pspice devre şeması.



Şekil 4.31. Sistemin PSPICE analizinde elde edilen grafiksel sonuçlar, a,b,c şekilleri sırasıyla X-t, Y-t, Z-t zamana göre grafiksel sonuçları göstermek üzere, d,e,f şekilleri sırasıyla Y-X, X-Z, Y-Z grafiksel sonuçlarını göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.32. Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin osiloskop çıktıları.

4.8. Yeni Dört Sarmallı Yıldız Kaotik Sistem

Pehlivan tarafından 2011 yılında bulunan(Pehlivan, 2011) kaotik denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -a \cdot x + y + y \cdot z \\ \dot{y} &= x - a \cdot y + b \cdot x \cdot z \\ \dot{z} &= c \cdot z - b \cdot x \cdot y\end{aligned}\tag{E.4.13}$$

Burada $a, b, c \in \mathbb{R}$ sistemin parametreleridir. Tipik parameter değerleri $a=4$, $b=0.5$, $c=0.6$ 'dır. Sisteme ait durum uzayında tanımlanan hacim

$$\Delta V = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} = -a - a + c = -2a + c < 0$$

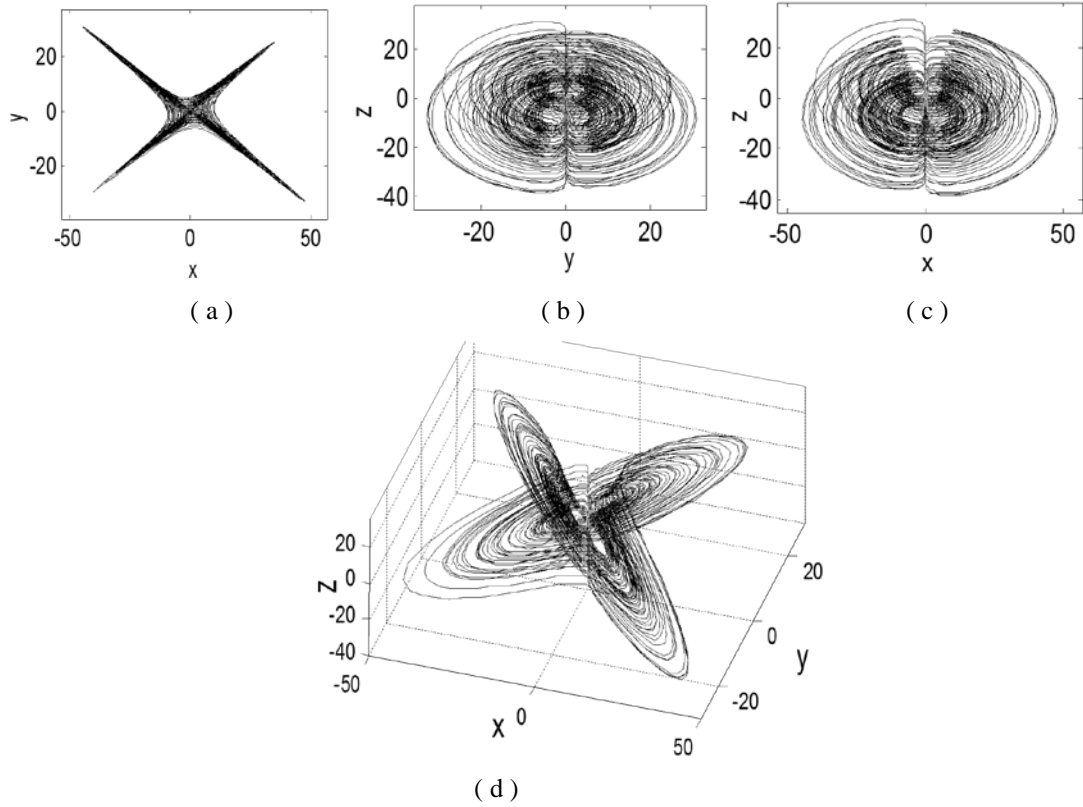
ifadesiyle bulunur.

Vektör alanının diverjansı negatif olduğunda, sistemin kayıplı bir system olduğu sonucuna varılır. Sistemin kayıplı kalabilmesi için $c < 2a$ olmalıdır. Bu durumda

$$\frac{dV}{dt} = e^{-2a+c}$$

olur.

$x_0=0.6, y_0=0, z_0=0$ başlangıç şartları ve $a=4, b=0.5, c=0.6$ parametreleri ile elde edilen numerik simülasyon sonuçları Şekil 4.33 'de görülmektedir.

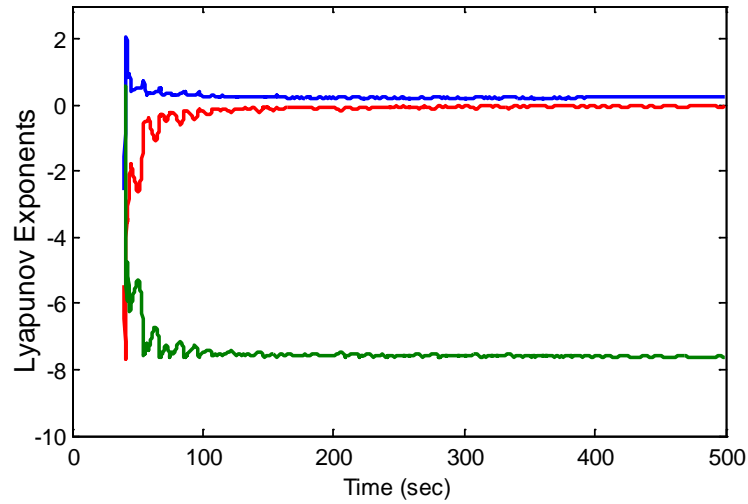


Şekil 4.33. Yeni dört sarmallı kaotik sisteminin 2 ve 3 boyutlu faz portreleri.

Şekil 4.34'den görüldüğü gibi, $x_0=0.6, y_0=0, z_0=0$ başlangıç şartları ve $a=4, b=0.5, c=0.6$ parametreleri için elde edilen Lyapunov üstelleri

$$\lambda_1 = 0.2439, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -7.6254$$

olarak bulunmuştur.



Şekil 4.34. $x_0=0.6, y_0=0, z_0=0$ başlangıç şartları ve $a=4, b=0.5, c=0.6$ parametreleri için yeni kaotik sistemin Lyapunov Üstelleri

Yeni sistem eşitliklerinde 5 denge noktası vardır. Bunlar;

$$(0,0,0), (\pm 3.648, \mp 2.361, -7.179), (\pm 2.548, \pm 1.968, 4.179)$$

$$a=4, b=0.5, c=0.6 .$$

$E_1(x^*, y^*, z^*) = (0, 0, 0)$ Denge noktası için, sistemin Jacobiyen matrisi aşağıdaki gibidir:

$$J(E_1) = \begin{pmatrix} -4 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Açıkçası, E_1 deki denge noktası ile ilgili karakteristik denklem aşağıdaki gibidir:

$$\det(\lambda I - J(E_1)) = \lambda^3 + 7.4 \cdot \lambda^2 + 10.2 \cdot \lambda - 9 = 0 ,$$

Karakteristik eşitliği çözerek, özdeğerler aşağıdaki gibi bulunur

$$\lambda_1 = -5, \quad \lambda_2 = -3, \quad \lambda_3 = 0.6 .$$

$E_2(x^*, y^*, z^*) = (3.648, -2.361, -7.179)$ sabit noktası için, sistemin Jacobi matrisi aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$J(E_2) = \begin{pmatrix} -4 & -6.179 & -2.361 \\ -2.590 & -4 & 1.824 \\ 1.181 & -1.824 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Açıkçası, E_2 denklemindeki karakteristik denklem şu şekildedir:

$\det(\lambda I - J(E_2)) = \lambda^3 + 7.4 \cdot \lambda^2 + 1.312 \cdot \lambda + 48.928 = 0$, karakteristik eşitliği çözerek, özdeğerler şu şekilde bulunur:

$$\lambda_1 = -8, \quad \lambda_2 = 0.3 + 2.455 \cdot \mathbf{i}, \\ \lambda_3 = 0.3 - 2.455 \cdot \mathbf{i}$$

$E_3(x^*, y^*, z^*) = (-3.648, +2.361, -7.179)$ denge noktası için, sistemin Jacobiyen matrisi aşağıdaki gibidir:

$$J(E_3) = \begin{pmatrix} -4 & -6.179 & 2.361 \\ -2.590 & -4 & -1.824 \\ -1.181 & 1.824 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Açıkçası, E_3 denge noktası için, karakteristik denklem şu şekildedir:

$\det(\lambda I - J(E_3)) = \lambda^3 + 7.4 \cdot \lambda^2 + 1.312 \cdot \lambda + 48.928 = 0$, karakteristik denklemin çözülmesiyle, özdeğerler şu şekilde elde edilir:

$$\lambda_1 = -8, \quad \lambda_2 = 0.3 + 2.455 \cdot \mathbf{i}, \quad \lambda_3 = 0.3 - 2.455 \cdot \mathbf{i} .$$

$E_4(x^*, y^*, z^*) = (2.548, 1.968, 4.179)$ denge noktası için, sistemin Jacobiyen matrisi şu şekildedir:

$$J(E_4) = \begin{pmatrix} -4 & 5.179 & 1.968 \\ 3.090 & -4 & 1.274 \\ -0.984 & -1.274 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Açıkçası, E_4 denge noktası için karakteristik denklem şu şekildedir:

$$\det(\lambda I - J(E_4)) = \lambda^3 + 7.4 \cdot \lambda^2 - 1.244 \cdot \lambda + 28.48 = 0,$$

Karakteristik denklemin çözülmesiyle, özdeğerler şu şekilde bulunur:

$$\lambda_1 = -8, \lambda_2 = 0.3 + 1.863 \cdot \mathbf{i}, \lambda_3 = 0.3 - 1.863 \cdot \mathbf{i}.$$

$E_5(x^*, y^*, z^*) = (-2.548, -1.968, 4.179)$ denge noktası için, sistemin Jacobiyen matrisi şu şekildedir:

$$J(E_5) = \begin{pmatrix} -4 & 5.179 & -1.968 \\ 3.090 & -4 & -1.274 \\ 0.984 & 1.274 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Açıkçası, E_5 denge noktası için karakteristik denklem şu şekildedir:

$$\det(\lambda I - J(E_5)) = \lambda^3 + 7.4 \cdot \lambda^2 - 1.244 \cdot \lambda + 28.48 = 0, \quad \text{karakteristik denklemi}$$

çözerek, özdeğerler şu şekilde bulunur:

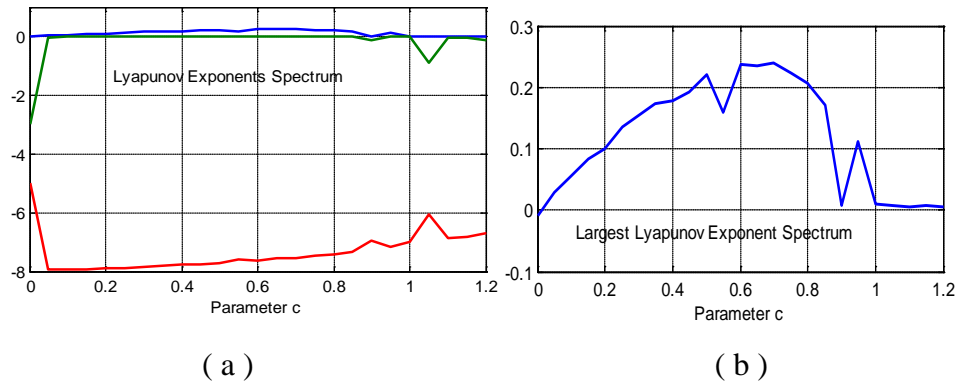
$$\lambda_1 = -8, \lambda_2 = 0.3 + 1.863 \cdot \mathbf{i}, \lambda_3 = 0.3 - 1.863 \cdot \mathbf{i}.$$

Belirli sistemler için denge ve özdeğerler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir

Çizelge 4.1 Tipik kaotik sistemler için denge noktaları ve özdeğerler

Sistem	Parametre	Denge Noktaları	Özdeğerler
Lorenz sistemi (1)	$a=10, b=8/3, c=28$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 6\sqrt{2}, \pm 6\sqrt{2}, 27) \end{cases}$	$\begin{cases} -22.8277, -2.6667, 11.8277 \\ -13.8546, 0.0940 \pm 0.1945 \cdot i \end{cases}$
Chen sistemi (4)	$a=35, b=3, c=28$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 3\sqrt{7}, \pm 3\sqrt{7}, 21) \end{cases}$	$\begin{cases} -30.8359, -3, 23.8359 \\ -18.4288, 4.2140 \pm 14.8846 \cdot i \end{cases}$
Lü sistemi (6)	$a=36, b=3, c=20$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 2\sqrt{15}, \pm 2\sqrt{15}, 20) \end{cases}$	$\begin{cases} -36, -3, 20 \\ -22.6516, 1.8258 \pm 13.6887 \cdot i \end{cases}$
Lorenz-like sistemi (9)	$a=-10, b=-4, c=0$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (2\sqrt{10}, \pm \frac{4}{7}\sqrt{35}, \frac{10}{7}\sqrt{14}) \\ -(2\sqrt{10}, \pm \frac{4}{7}\sqrt{35}, \frac{10}{7}\sqrt{14}) \end{cases}$	$\begin{cases} -10, -4, 2.8571 \\ -13.6106, 1.2339 \pm 5.6626 \cdot i \end{cases}$
Yeni Sistem	$a=4, b=0.5, c=0.6$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 3.648, \pm 2.361, -7.179) \\ (\pm 2.548, \pm 1.968, 4.179) \end{cases}$	$\begin{cases} -5, -3, 0,6 \\ -8, -0,3, \pm 2.455.i \\ -8, -0,3, \pm 2.455.i \\ -8, -0,3, \pm 1.863.i \\ -8, -0,3, \pm 1.863.i \end{cases}$

Şekil 4.35.'de, c değişken parametresi ve $a=4, b=0$ sabit parametreler için yeni sistemin Lyapunov Üstelleri Spektrumu gösterilmektedir. Lyapunov Üstelleri Spektrumundan da anlaşılacağı gibi, Lyapunov üsteli pozitif olunca sistem kaotik olur.



(a) (b)
 Şekil 4.35. (a) c değişken parametresi ve $a=4$, $b=0.5$ sabit parametreleri için yeni sistemin Lyapunov Üsler Spektrumu. (b) c değişken parametresi ve $a=4$, $b=0.5$ sabit parametreleri için yeni sistemin en büyük Lyapunov Üsler Spektrumu..

4.8.1. Dört-Sarmallı Kaotik Sistemin Devre Gerçeklemesi

Tasarlanan devre şeması ve $a=4$, $b=0.5$, $c=0.6$ parametreleri için yeni kaotik sistemin Orcad-PSpice simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.37 ve 4.38 de gösterilmiştir.

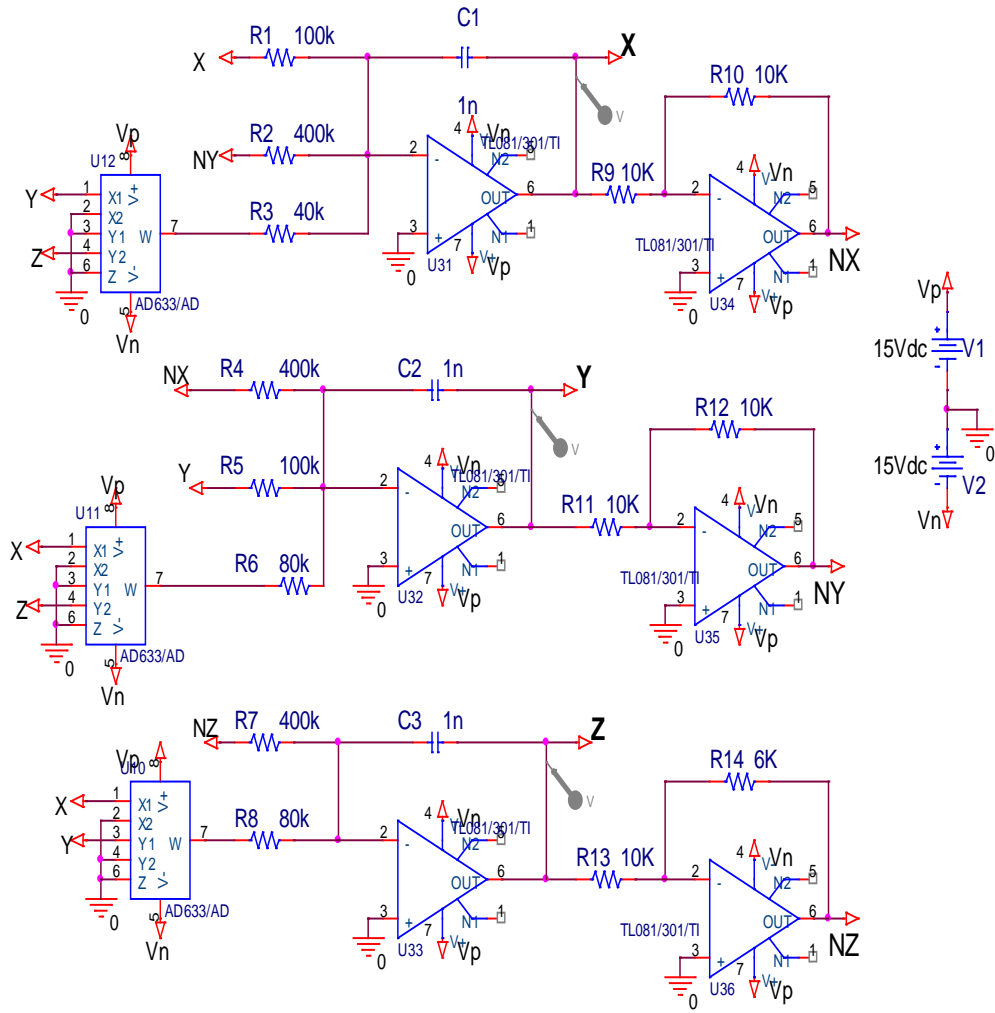
Yeni devrenin kaotik diferansiyel eşitlikleri aşağıda verilmiştir:

$$\dot{x} = \frac{1}{R_1 C_1} x - \frac{1}{R_2 C_1} y - \frac{1}{R_3 C_1} y \cdot z$$

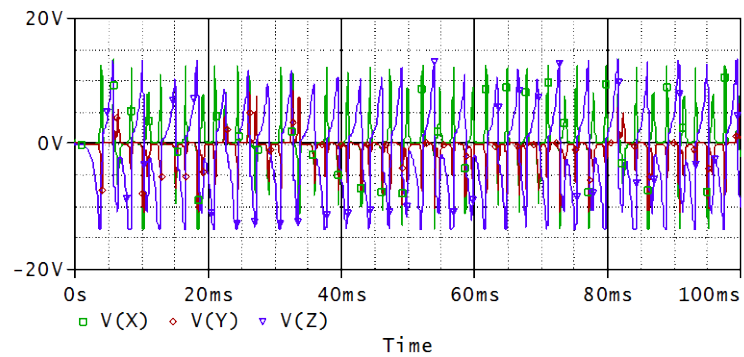
$$\dot{y} = \frac{1}{R_4 C_2} x - \frac{1}{R_5 C_2} y + \frac{1}{R_6 C_2} x \cdot z$$

$$\dot{z} = \frac{1}{R_7 C_3} z - \frac{1}{R_8 C_3} x \cdot y$$

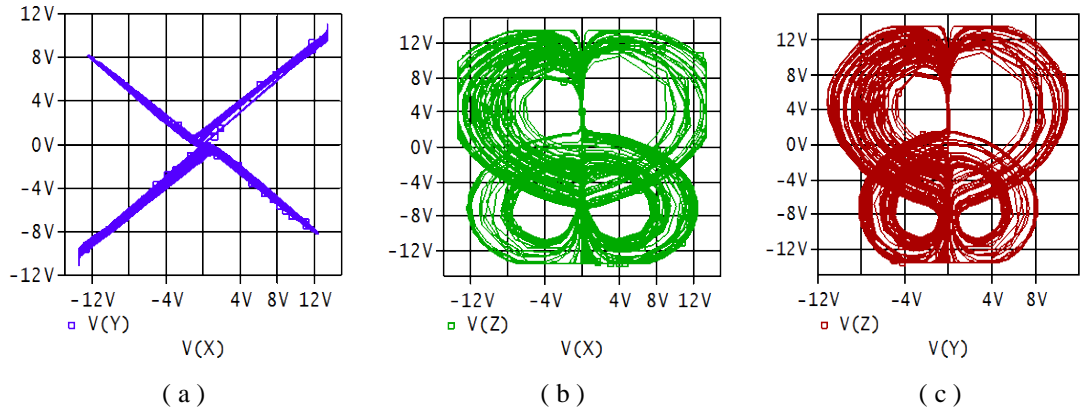
Dört sarmallı kaotik sistemin elektronik devresi basittir. Kaos tabanlı uygulamalarda bilinçli olarak kaotik işaret oluşturmak için bu sistem rahatlıkla kullanılabilir.



Şekil 4.36. Dört sarmallı kaotik sistemin elektronik devre şeması.



Şekil 4.37. Dört sarmallı kaotik sistemin x, y, z kaotik sinyalleri.



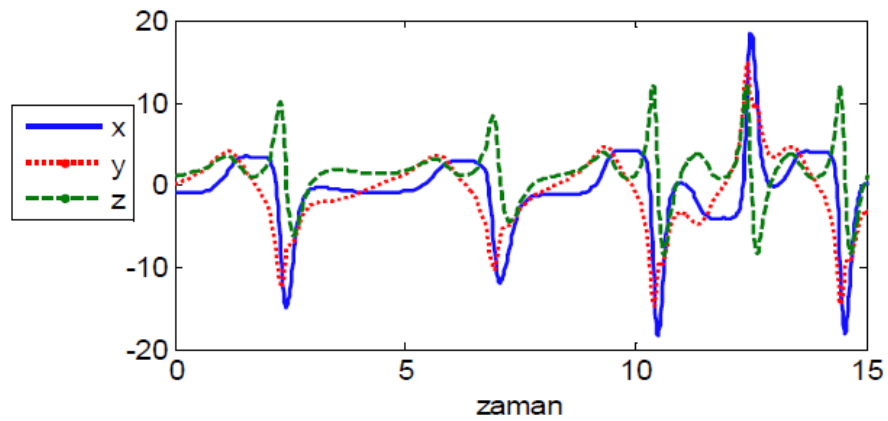
Şekil 4.38. Dört sarmallı kaotik sistemin faz portreleri.

4.9. Kaotik C Sistemi ve Devre Gerçeklemesi

Pehlivan tarafından 2007 yılında doktora tezinde tanıtılan(Pehlivan, 2007) kaotik denklem sistemi(C sistemi) aşağıda verilmiştir.

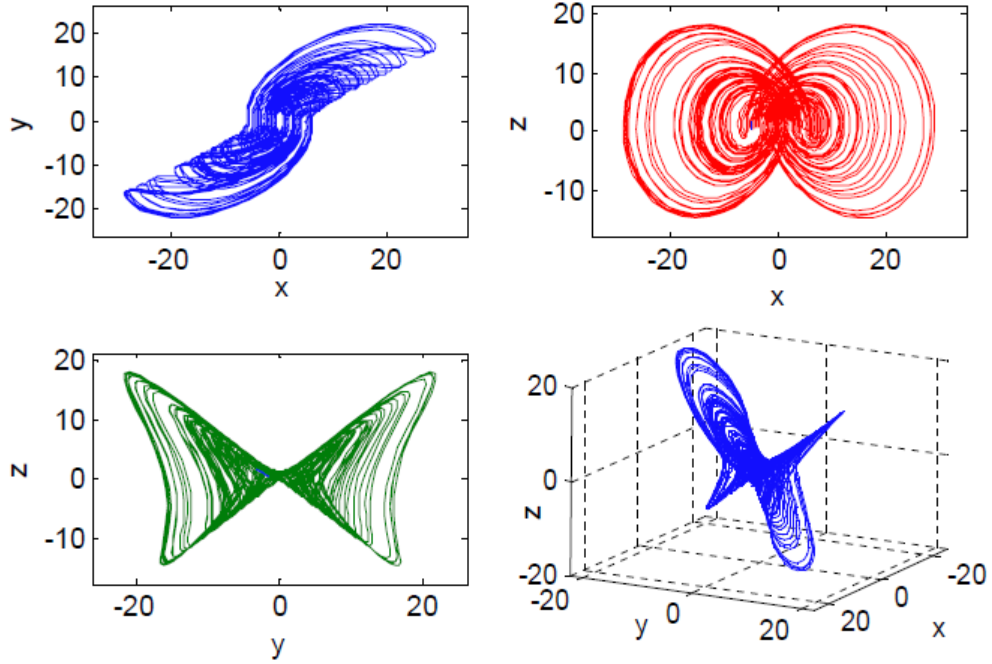
$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= y \cdot (2z - \alpha) \\
 \dot{y} &= y \cdot (2z - \alpha) - x \cdot (2z + \alpha) \\
 \dot{z} &= -2y \cdot (ax - y) - b \cdot (z^2)
 \end{aligned}
 \tag{E.4.14}$$

Kaotik C sisteminin, $a = 1.3$, $b = 4$ parametreleri, ve ilk şartları için elde edilen x , y , z kaotik durum değişkenlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.39.'de görülmektedir. $X_0 = -1$, $Y_0 = 0$, $Z_0 = 1$



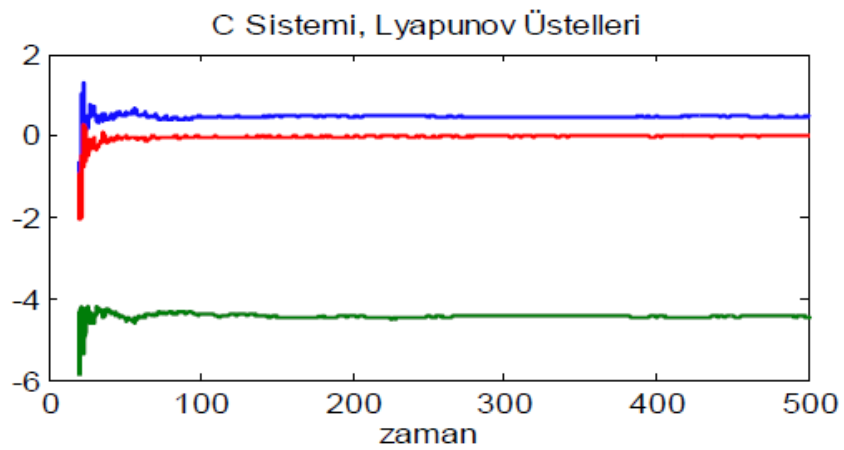
Şekil 4.39. Kaotik C Sisteminin x, y, z kaotik durum değişkenlerinin zamana göre değişimi.

Aynı parametre ve ilk şartlardaki x-y, x-z, ve y-z kaotik faz portreleri ile üç boyutlu x-y-z yörüngesi ise Şekil 4.40.'da görülmektedir.



Şekil 4.40. Kaotik C Sisteminin x-y, x-z, y-z kaotik çekicileri ve üç boyutlu x-y-z yörüngesi.

Sistemin kaotik yapıda olduğunu göstermek için Matlab'da LET programı kullanılarak bulunan Lyapunov üstelleri Şekil 4.41.'da verilmiştir.



Şekil 4.41. Kaotik C Sisteminin Lyapunov Üstelleri.

Şekil 4.41.'de görüldüğü gibi Lyapunov üstelleri

$$\lambda_1=+0.4803, \lambda_2=0, \lambda_3=-4.439$$

olarak bulunmuştur. Buradan kaotik davranışın oluşması için gereken

$$(+, 0, -)$$

Durumunun sağlandığı ve sistemin kaotik olduğu görülmektedir.

Matlab simülasyon grafiklerinden görüldüğü gibi C kaotik sisteminin dinamik sınırları güç kaynağının sınırlarını aştığı için x, y ve z değişkenlerinin skala edilmesi gerekmektedir.

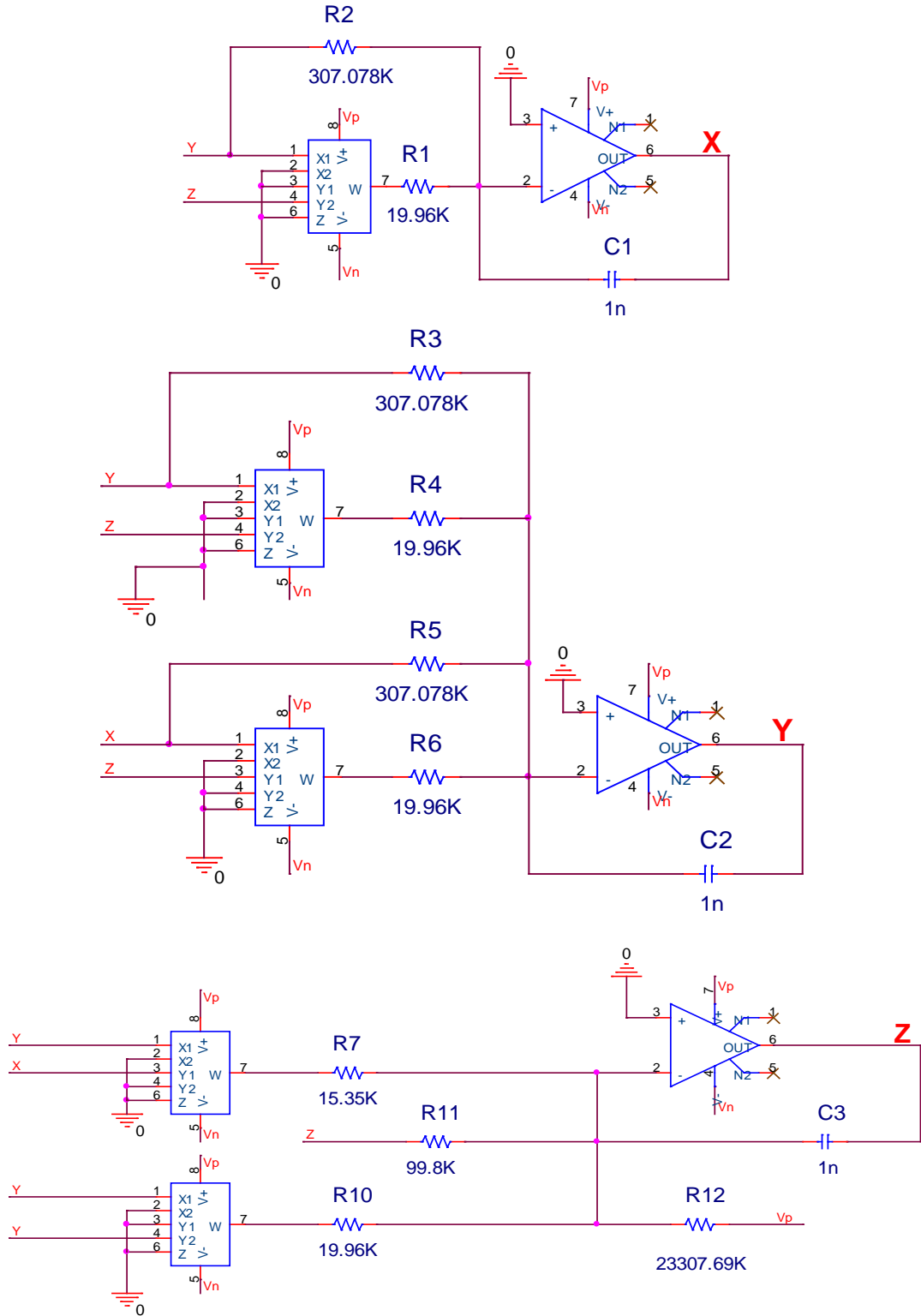
Yeni değişkenler $u = x/2$, $v = y/2$, $w = z/2$ olarak alınırsa skala edilmiş Kaotik C Sistemi Denklemleri,

$$\dot{x} = y \cdot (2z - \alpha)$$

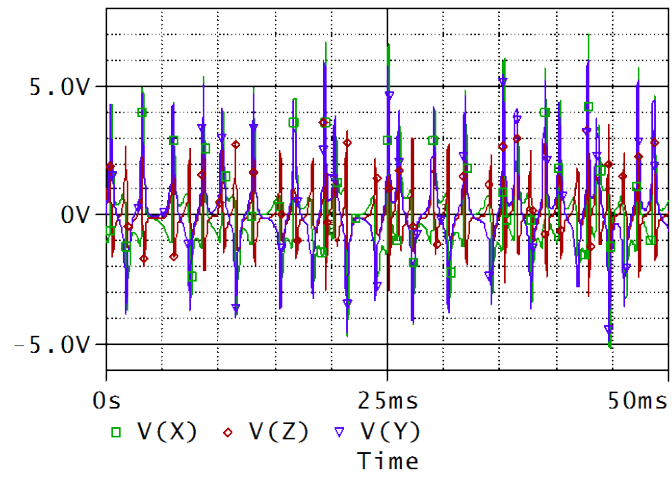
$$\dot{y} = y \cdot (2z - \alpha) - x \cdot (2z + \alpha)$$

$$\dot{z} = -2y \cdot (ax - y) - b \cdot (z/2)$$

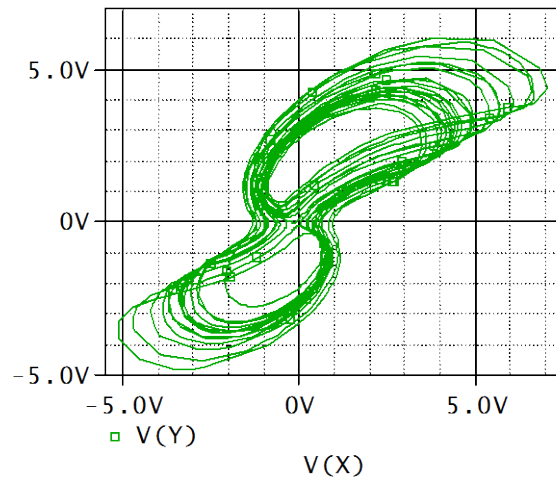
şekline gelecektir. Skala edilmiş yeni diferansiyel denklemlerle tasarlanan kaotik devre aşağıda görülmektedir.



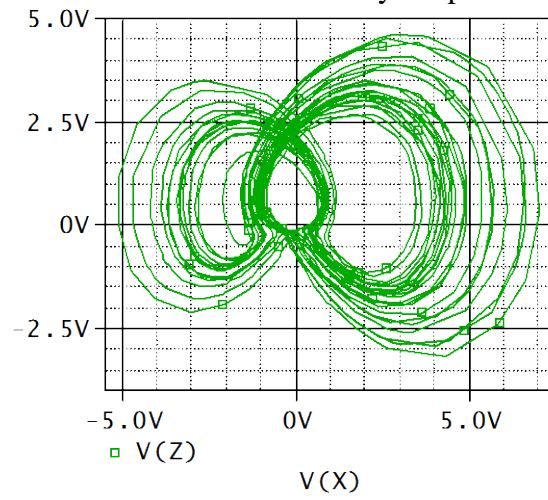
Şekil 4.42. Kaotik C Sistemi elektronik devresinin Pspice devre tasarımı.



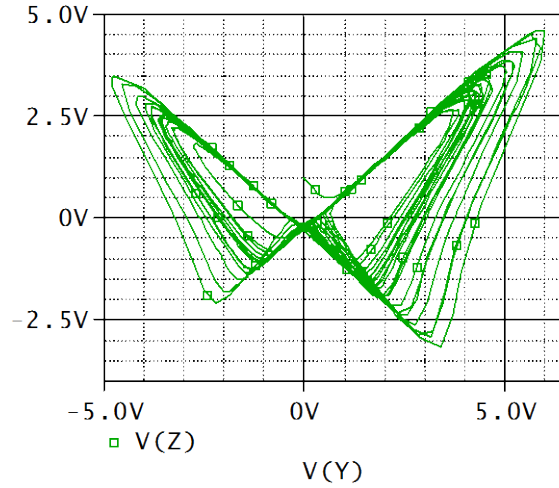
Şekil 4.43. Kaotik C Sistemi x, y, z değişkenlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 4.44. Kaotik C Sistemi x-y faz portresi.



Şekil 4.45 Kaotik C Sistemi x-z faz portresi.



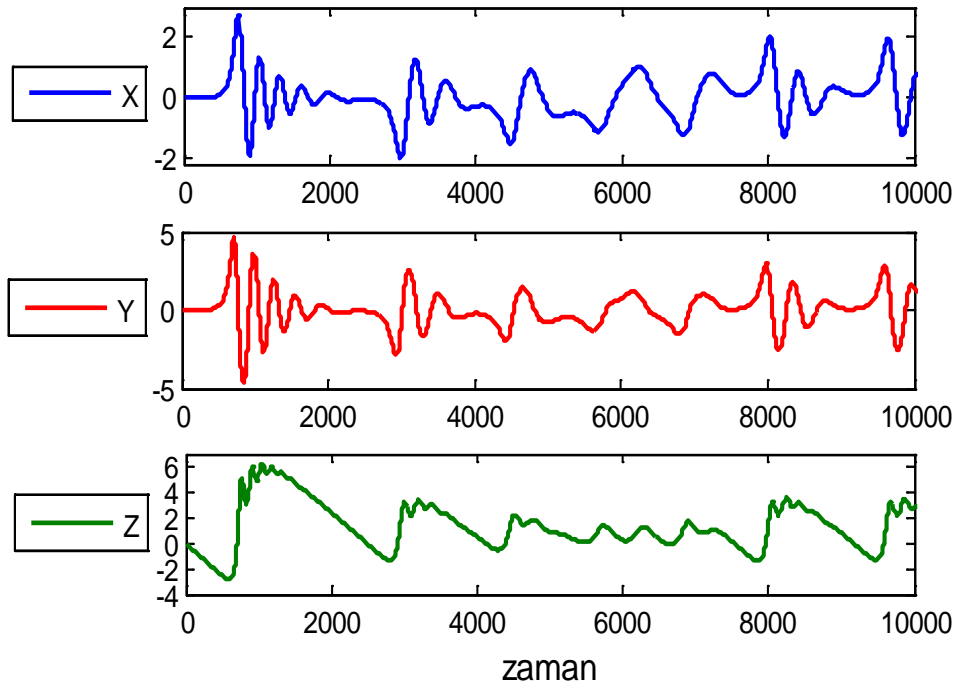
Şekil 4. 46. Kaotik C Sistemi y-z faz portresi.

4.10. G Kaotik Sistemi Ve Devre Gerçeklemesi

Pehlivan tarafından 2007 ve 2010 yıllarında tanıtılan (Pehlivan, 2007),(Pehlivan, 2010) kaotik denklem sistemi aşağıda verilmiştir.

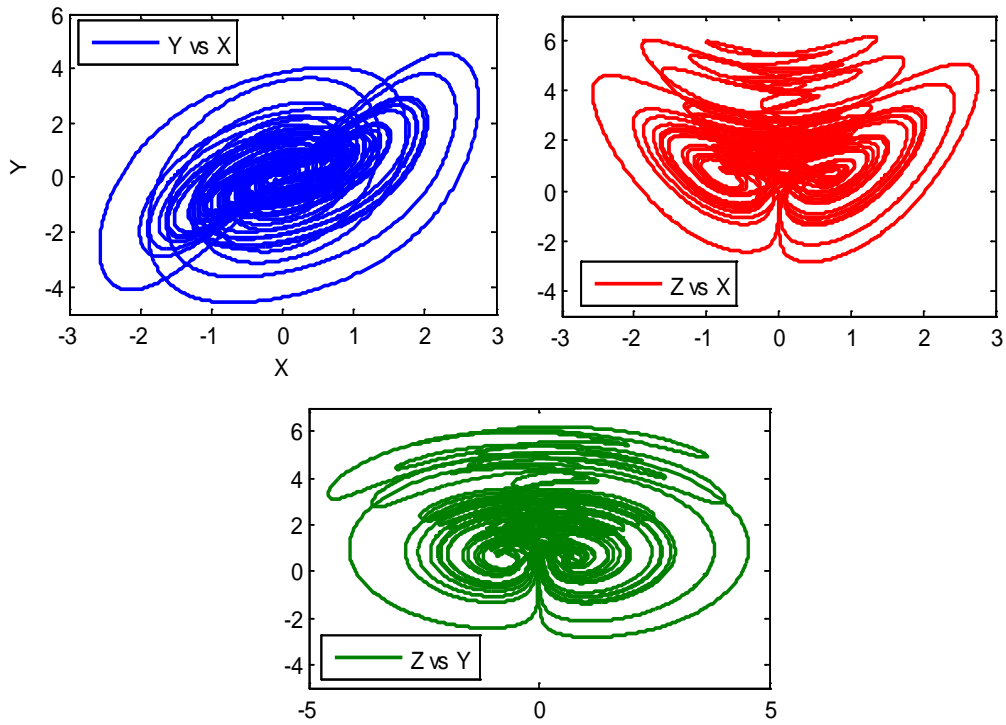
$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= y - x \\
 \dot{y} &= a \cdot y - x \cdot z \\
 \dot{z} &= x \cdot y - a
 \end{aligned}
 \tag{E.4.15}$$

Kaotik G sisteminin, $a = 0.5$ parametresi, ve $x_0 = 0.001$, $y_0 = 0.001$, $z_0 = 0$ ilk şartları için elde edilen x , y , z kaotik durum değişkenlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.47.'da görülmektedir.



Şekil 4.47. Kaotik G sisteminin x , y , z kaotik durum değişkenlerinin zamana göre değişimi.

Aynı parametre ve ilk şartlardaki x - y , x - z , ve y - z kaotik faz portreleri ise Şekil 4.48.'de görülmektedir.



Şekil 4.48. Kaotik G sisteminin x - y , x - z , ve y - z kaotik faz portreleri.

Kaotik G sistemi, dinamik davranış olarak Lorenz tipi kaos gösterirken, kararsız olan simetrik iki kritik nokta etrafındaki kaotik yörüngelerde dolanmaktadır. Lorenz ve Chen sistemlerindeki gibi $(0, 0, 0)$ orjin noktasının kritik nokta olma özelliği yoktur. Denge(kritik) noktalarını bulmak için E.4.15 denkleminde $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z} = 0$ yapılırsa,

$$\begin{aligned} 0 &= y^* - x^* \\ 0 &= a \cdot y^* - x^* \cdot z^* \\ 0 &= x^* \cdot y^* - a \end{aligned} \tag{E.4.16}$$

elde edilir. Bu denklem sistemi x^*, y^*, z^* için çözümlerse denge noktaları $(x^*, y^*, z^*) = (\pm\sqrt{a}, \pm\sqrt{a}, a)$ olarak bulunur. $x, y, z \in \mathbf{R}$ olduğundan, denge noktalarının $a > 0$ için mevcut olduğu anlaşılır.

Denge noktalarının kararsız olup olmadığını anlamak için özdeğerlerin bulunması gerekir. En az bir özdeğerin reel kısmı pozitif olduğu takdirde, denge noktasının kararsızlığına ve kaosa işaret eder.

Sistemin Jacobian matrisi aşağıdaki gibidir.

$$J = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -z & a & -x \\ y & x & 0 \end{bmatrix} \tag{E.4.17}$$

İlk, $(x^*, y^*, z^*) = (\sqrt{a}, \sqrt{a}, a)$ denge noktasında, Jacobian matrisi şu şekilde olur.

$$J = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -a & a & -\sqrt{a} \\ \sqrt{a} & \sqrt{a} & 0 \end{bmatrix} \tag{E.4.18}$$

$|J_{\lambda}| \neq 0$ Karakteristik denkleminin çözümünden özdeğerler bulunur. Karakteristik denklem hesaplanırsa,

$$-\lambda^3 + a\lambda^2 - \lambda^2 - a\lambda - 2a = 0 \quad (\text{E.4.19})$$

elde edilir. Buradan özdeğerler,

$$\lambda_1 = -1, \quad \lambda_2 = -\frac{\sqrt{a^2 - 8a} - a}{2}, \quad \lambda_3 = \frac{\sqrt{a^2 - 8a} + a}{2} \quad (\text{E.4.20})$$

olarak bulunur.

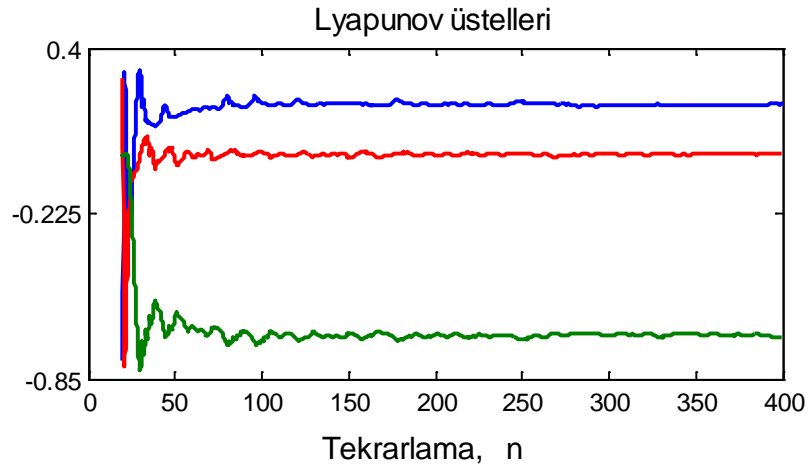
$a = 0.5$ için özdeğerler,

$$\lambda_1 = -1, \quad \lambda_2 = -\frac{1.93649 \cdot i - 0.5}{2}, \quad \lambda_3 = \frac{1.93649 \cdot i + 0.5}{2}, \quad \text{ve}$$

$\lambda_1 = -1, \quad \lambda_2 = -0.968245 \cdot i - 0.25, \quad \lambda_3 = 0.968245 \cdot i + 0.25$ olarak elde edilir.

Özdeğerlerden birisinin gerçel kısmı pozitif olduğundan, $(x^*, y^*, z^*) = (\sqrt{a}, \sqrt{a}, a)$ denge noktası kararsızdır. Diğer $(-\sqrt{a}, -\sqrt{a}, a)$ denge noktası için de Jacobian matris elde edilip, $|J_{\lambda}| \neq 0$ karakteristik denkleminin çözümüne bakılırsa aynı özdeğerler bulunacaktır. Demek ki sistem kararsız olan simetrik iki kritik nokta etrafındaki yörüngede gezmektedir.

Sistemin kaotik yapıda olduğunu garantilemek için Matlab'da LET kullanılarak bulunan Lyapunov üstelleri Şekil 4.49.'de verilmiştir.



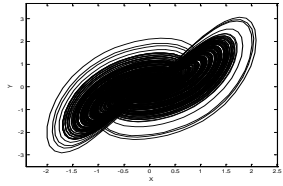
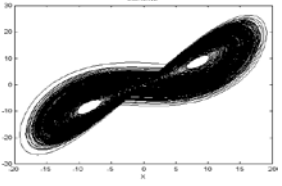
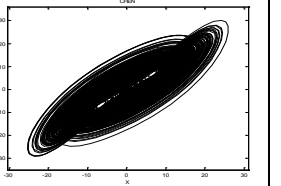
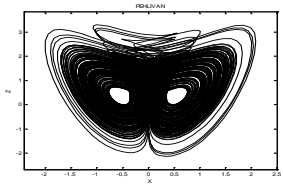
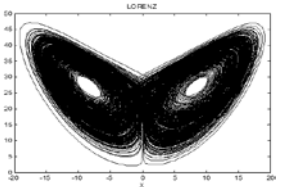
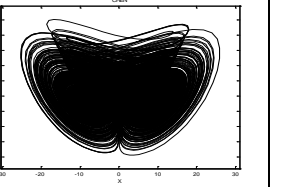
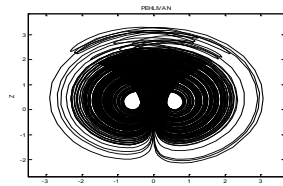
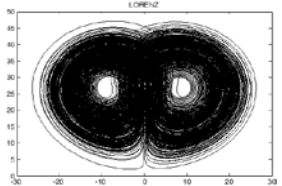
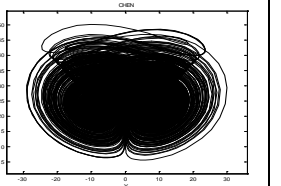
Şekil 4.49. Yeni kaotik G sisteminin Lyapunov üstelleri.

Şekil 4.49.'den görüldüğü gibi Lyapunov üstelleri, $\lambda_1=0.18717$, $\lambda_2=0$, $\lambda_3=-0.68919$

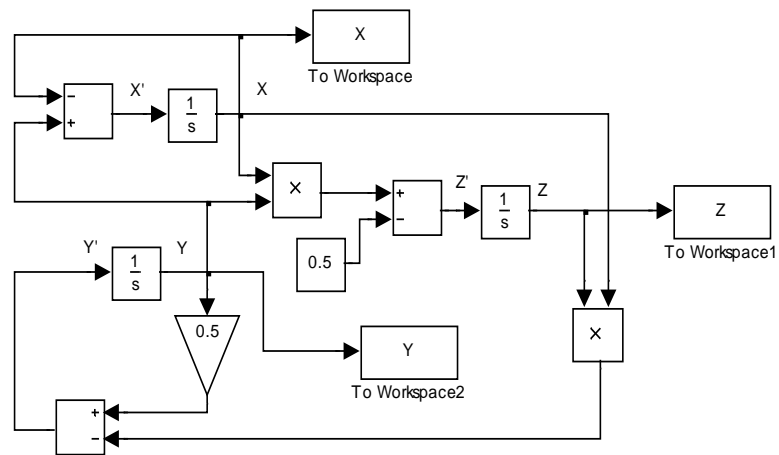
olarak bulunmuştur. Buradan kaotik davranışın oluşması için gereken (+, 0, -) durumunun sağlandığı ve sistemin kaotik olduğu görülmektedir.

Kaotik G sistemi, faz portrelerinin görünümü olarak Lorenz ve Chen sistemlerine benzemektedir. Yeni sistem, iki adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xz ve xy) olmak üzere toplam altı terim içermekte olduğundan dolayı, Lorenz ve Chen sistemlerinden topolojik olarak daha basittir. Çünkü Lorenz sisteminde yedi terim, Chen sisteminde ise sekiz terim bulunmaktadır. Ayrıca G sisteminde tek parametre varken, diğerlerinde üçer parametre vardır. Lorenz ve Chen sistemleri ile yeni kaotik G sisteminin karşılaştırılması Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Lorenz ve Chen sistemleri ile kaotik G sisteminin karşılaştırılması

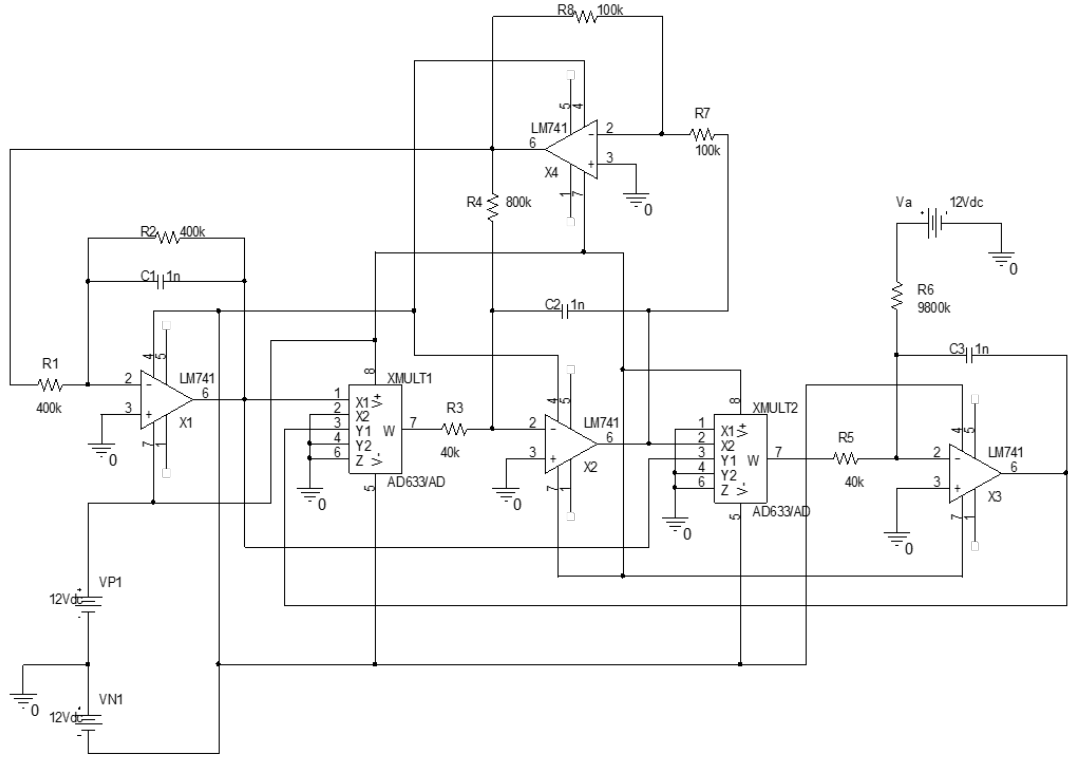
	G	LORENZ	CHEN
Terim	6	7	8
Parametre	1	3	3
x-y			
x-z			
y-z			

Kaotik G sisteminin, $a = 0.5$ parametresi, ve $x_0 = 0.001$, $y_0 = 0.001$, $z_0 = 0$ ilk şartları altında Matlab-Simulink'de yapılan blok diyagramları ile modellenmesi Şekil 4.50.'de verilmiştir.

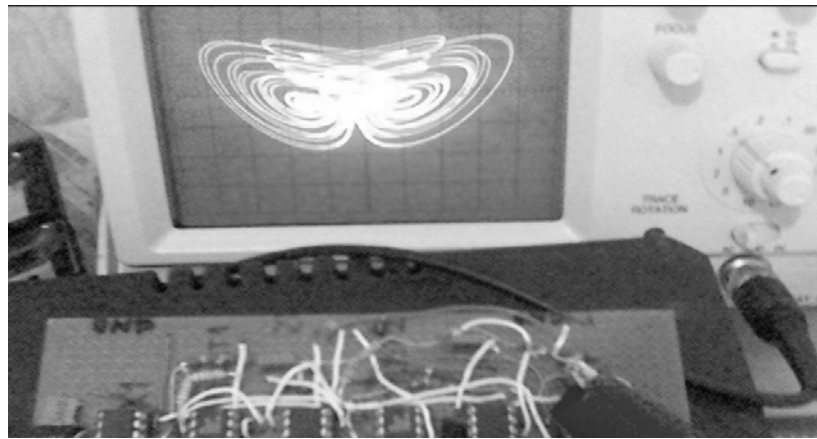


Şekil 4.50. Yeni kaotik G sisteminin Matlab-Simulink modellemesi

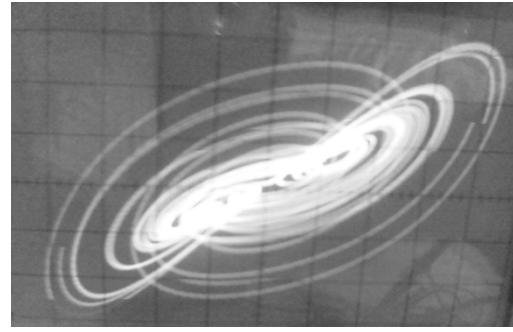
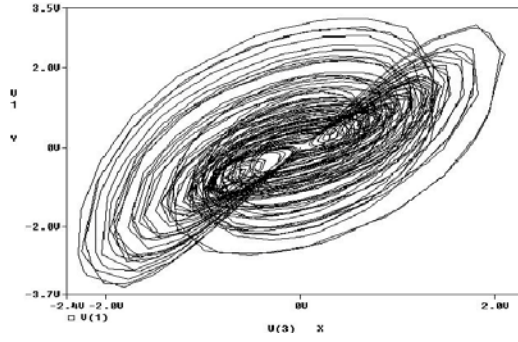
Kaotik G sistemi E.4.15 denklemlerini gerçeklemek için blok diyagramdan faydalanılarak tasarlanan elektronik devre şeması Şekil 4.51.'de, elektronik elemanlarla yapılmış fiziksel gerçekleştirilmesi Şekil.4.52.'de, Pspice simülasyon sonuçları ile gerçek elektronik devrenin osiloskop çıkışları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.53.'de verilmiştir.



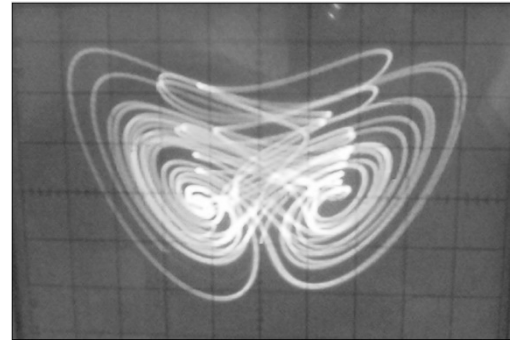
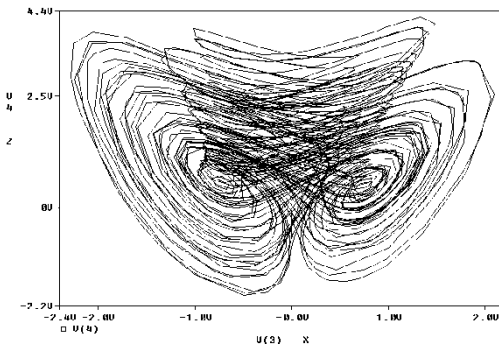
Şekil 4.51. Yeni kaotik G sisteminin tasarlanan elektronik devre şeması.



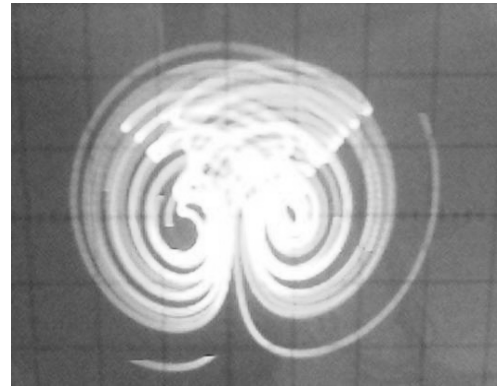
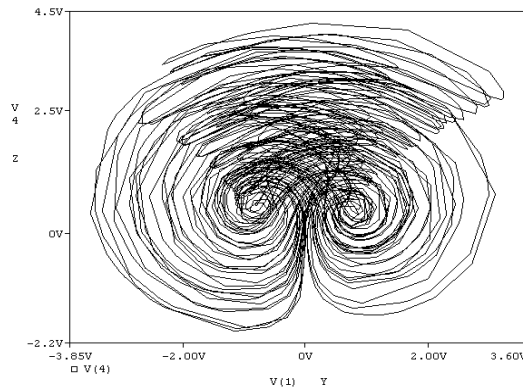
Şekil 4.462. Yeni kaotik G sisteminin elektronik elemanlarla yapılmış fiziksel gerçekleştirilmesi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.53. Kaotik G devresi pspice simülasyon sonuçları ve gerçek devrenin osiloskop çıkışları a) x-y, b) x-z, c) y-z kaotik çekicileri.

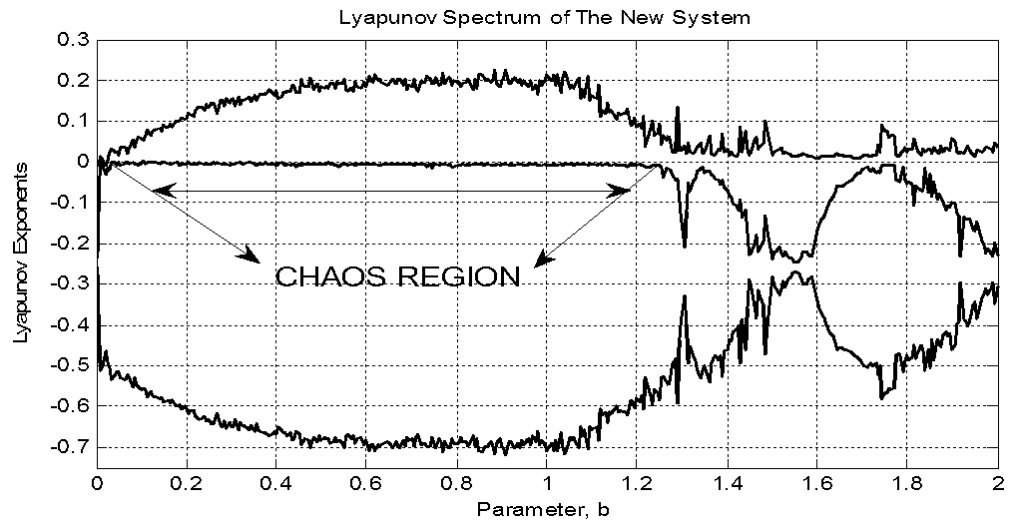
G kaotik sistemi iki denge noktasına sahip iken Lorenz ve Chen sistemleri üç denge noktasına sahiptir. $(0,0,0)$ orjin noktası Lorenz ve Chen sistemi için denge noktası iken G sisteminde denge noktası değildir. G sisteminde orjin noktası, denge noktası

olmadığından devreyi çalıştırmak için başlangıç şartlarına gerek duyulmaz. Bu sebeple, devreyi gerçekleştirmek çok kolaydır.

Devre parametreleri cinsinden elde edilen G sistemine ait kaotik diferansiyel denklemler aşağıda görülmektedir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{1}{R_1 C_1} y - \frac{1}{R_2 C_1} x \\ \dot{y} &= \frac{1}{R_4 C_2} y - \frac{1}{R_3 C_2} x \cdot z \\ \dot{z} &= \frac{1}{R_5 C_3} x \cdot y - \frac{1}{R_6 C_3 \cdot V_p}\end{aligned}\quad (E.4.21)$$

G kaotik sistemi elektronik devresinin fiziksel gerçekleştirilmesi $a=0.5$, $b=0.5$ parametreleri ve $x_0=0$, $y_0=0$, $z_0=0$ başlangıç şartları için yapılmıştır. Devrede LM741 opampları, ve Analog Devices AD633JN çarpma entegreleri kullanılmıştır. $R_1=R_2=400K$, $R_3=R_5=40K$, $R_4 = 800K$, $R_6 = 9600K$, $R_7 = R_8 = 100K$, $C_1 = C_2 = C_3 = 1nF$, $V_N = -12V$, $V_P=12V$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.474. G kaotik sisteminin sabit a parametresi ($a=0.5$) ve değişken b parametresi için elde edilen Lyapunov Spektrumu

G kaotik sisteminin sabit a parametresi (a=0.5) ve değişken b parametresi için elde edilen Lyapunov Spektrumu Şekil 4.54.'de görölmektedir.

4.11. G Kaotik Sistemi İle Genel Lorenz Sistem Ailesinin Karşılaştırılması

Vanecek ve Celikovsky'nin aşığıdaki genelleştirilmiş Lorenz sistem formuna göre

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.4.22})$$

Lorenz sistemi şu şekilde tanımlanmaktadır,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.4.23})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E. 4.24})$$

Lorenz sistemi $a_{12} \cdot a_{21} > 0$, ($10 \cdot 28 > 0$) şartını sağlamaktadır.

Chen'in geribesleme kontrol yaklaşımı ile keşfettiği yeni kaotik sistem topolojik olarak Lorenz sistemine eşit değildir(Chen ve Ueta, 1999),(Ueta, ve Chen, 2000),(Lü vd.. 2002).

Chen sistemi şu formdadır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= (c-a) \cdot x - x \cdot z - c \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z \end{aligned} \quad (\text{E.4.25})$$

Chen sisteminin tipik parametre değerleri a=35, c=28, ve b=3 tür. Sistem Lorenz sistemine benzer yapı göstermekle beraber daha kompleks dinamik davranışlar

göstermektedir.(Ueta ve Chen, 2000),(Lü vd.. 2002). Bu benzerlik Vanecek ve Celikovsky'nin geliştirdiği Lorenz sistemi sınıflandırma şartına göre değerlendirilirse şu şekilde tanımlanır.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c-a & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E. 4.26})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -35 & 35 & 0 \\ -7 & 28 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{E.4.27})$$

Chen sistemi $a_{12} \cdot a_{21} < 0$, ($35 \cdot (-7) < 0$) şartını sağlar

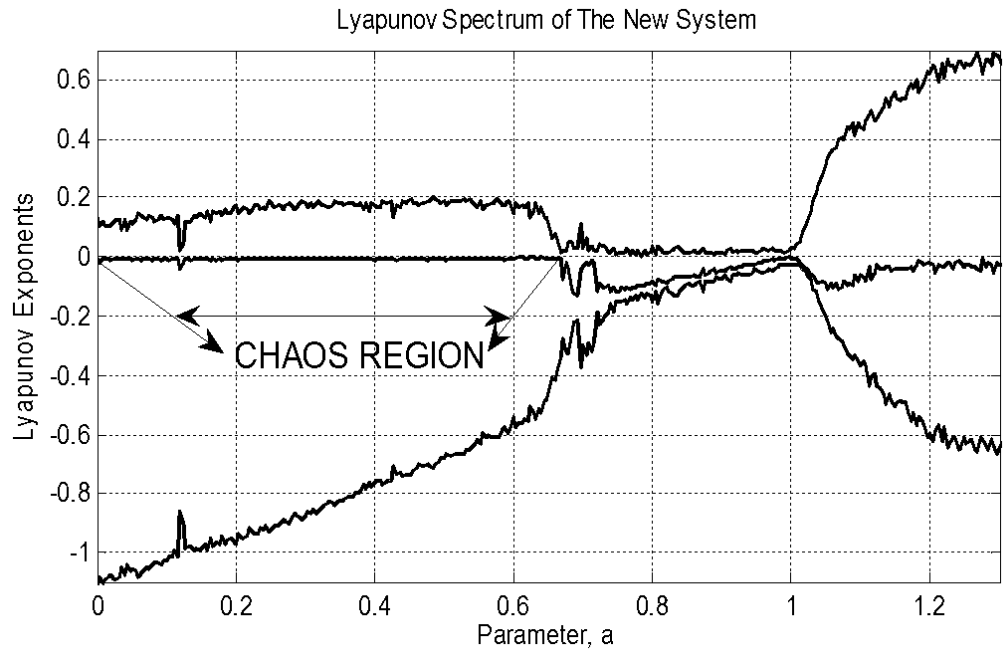
Yeni sistem Lü sistemi gibi $a_{12} \cdot a_{21} = 0$, ($1 \cdot 0 = 0$) eşitliğini sağlar. (Lü ve Chen, 2002),(Lü vd.. 2002). Chen sistemi $a_{12} \cdot a_{21} < 0$ eşitliğini sağlarken, Lorenz sistemi $a_{12} \cdot a_{21} > 0$ eşitliğini verir. Ayrıca, Lü sistemi gibi yeni kaotik sistem de $a_{12} \cdot a_{21} = 0$ şartını sağlar. Lorenz(Chen ve Dong, 1998), Chen(Rossler, 1979) ve Lü(Chen ve Ueta, 1999) sisteminde 3 denge noktası varken, yeni sistemde 2 denge noktası vardır,ve Lorenz-like(Lü ve Chen, 2002) sisteminde 5 denge noktası vardır.Bu sistemler için, (0,0,0)orijin denge noktasıdır, fakat bu nokta yeni sistem için denge noktası değildir. Açıkçası, yeni sistem Lorenz, Chen, Lü ve Lorenz-like sistemleriyle difeomorf değildir, çünkü bu sistemlerin denk gelen denge noktalarının öz değer yapıları eşit değildir. (Lü ve Chen, 2002), (Lü vd.. 2002), (Lü vd.. 2004). Bu 3 boyutlu ikinci dereceden denklemlili otonom kaotik sistemler Çizelge 4.3' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Tipik kaotik sistemler için denge noktaları ve özdeğerler

Sistem	Parametre	Denge Noktaları	Özdeğerler
Lorenz sistemi(1)	$a=10, b=8/3, c=28$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 6\sqrt{2}, \pm 6\sqrt{2}, 27) \end{cases}$	$\begin{cases} -22.8277, -2.6667, 11.8277 \\ -13.8546, 0.0940 \pm 0.1945 \cdot i \end{cases}$
Chen sistemi(4)	$a=35, b=3, c=28$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 3\sqrt{7}, \pm 3\sqrt{7}, 21) \end{cases}$	$\begin{cases} -30.8359, -3, 23.8359 \\ -18.4288, 4.2140 \pm 14.8846 \cdot i \end{cases}$
Lü sistemi(6)	$a=36, b=3, c=20$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (\pm 2\sqrt{15}, \pm 2\sqrt{15}, 20) \end{cases}$	$\begin{cases} -36, -3, 20 \\ -22.6516, 1.8258 \pm 13.6887 \cdot i \end{cases}$
Lorenz-like sistemi(9)	$a=-10, b=-4, c=0$	$\begin{cases} (0, 0, 0) \\ (2\sqrt{10}, \pm \frac{4}{7}\sqrt{35}, \frac{10}{7}\sqrt{14}) \\ -(2\sqrt{10}, \pm \frac{4}{7}\sqrt{35}, \frac{10}{7}\sqrt{14}) \end{cases}$	$\begin{cases} -10, -4, 2.8571 \\ -13.6106, 1.2339 \pm 5.6626 \cdot i \end{cases}$
Yeni sistemi(11)	$a=0.5, b=0.5$	$\left\{ \left(\pm \sqrt{\frac{1}{2}}, \pm \sqrt{\frac{1}{2}}, \frac{1}{2} \right) \right.$	$\left. -1, \frac{1}{4} \pm 0.9682 \cdot i \right.$

Bir sistemi diğereine dönüştürebilecek tekil olmayan koordinat dönüşümlerinin olmadığını doğrulamak doğrudur. Bu yüzden, hepsi topolojik olarak eşdeğer değildir. (Lü ve Chen, 2002), (Lü vd.. 2002),(Lü vd.. 2004). Fakat yeni sistem ve diğereeri arasında bir türün iki farklı forma sahip olma durumu difeomorfizm olmadığını söylemek aslında kolaydır, çünkü bu sistemde denk gelen Jakobiyenlerin özdeğerleri eşdeğer değildir. Yeni sistem ve diğereeri difeomerfor değildir, ayrıca topolojik eşdeğerler de değildir. (Lü ve Chen, 2002), (Lü vd.. 2002), (Lü vd.. 2004).

Şekil 4.55 de a değişken parametresi ve $b=0.5$ sabit parametreleri için yeni sistemin Lyapunov Spektrumunu gösterir. Lyapunov Üstünün Spektrumununun da anlaşılacağı gibi, a (0, 0.665) olduğunda, yeni sistem pozitif bir Lyapunov üssü ile kaotik olur.



Şekil 4.485. a değişken parametresi ve b=0.5 sabit parametresi için yeni kaotik sistemin Lyapunov Spektrumu

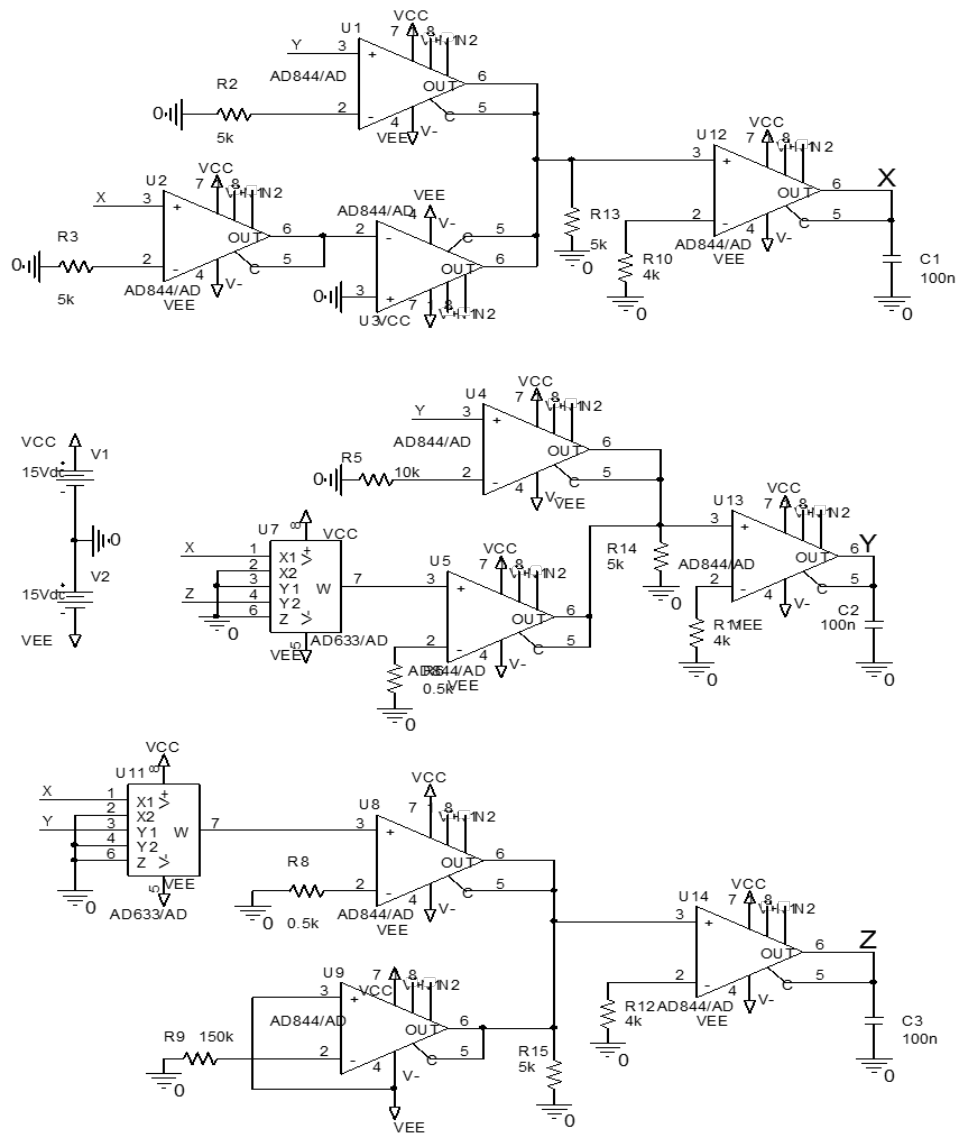
Verilen genel Lorenz sistem ailesi göz önüne alındığında (Celikovsk ve Chen, 2002),(Lü vd.. 2004), (Yu vd.. 2006), kaotik G sistem parametreleri Çizelge 4.4'de gösterilmiştir

Çizelge 4.4 Tipik kaotik sistemler için sistem parametreleri

a_1	a_2	a_{13}	a_{23}	b_1	b_2	b_{13}	b_{23}	d_2	c_3	c_{12}	c_{11}	c_{22}	c_{33}	d_3	System
-10	10	0	0	28	-1	-1	0	0	$-\frac{8}{3}$	1	0	0	0	0	Lorenz
-35	35	0	0	-7	28	-1	0	0	-3	1	0	0	0	0	Chen
-36	36	0	0	0	20	-1	0	0	-3	1	0	0	0	0	Lü
2.86	0	0	-1	0	-10	1	0	1	-4	1	0	0	0	0	Lorenz-like
-1	1	0	0	0	0.5	-1	0	0	0	1	0	0	0	0.5	The New

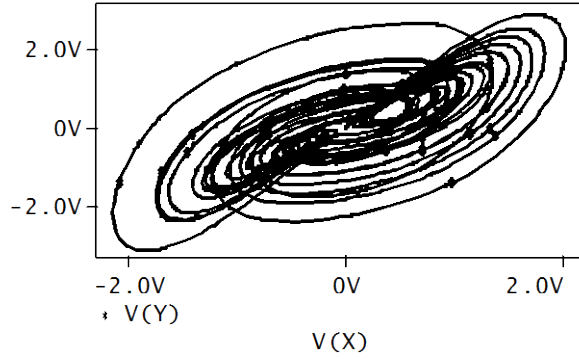
4.12. G Kaotik Sisteminin CCII lerle Gerçekleştirilmesi

Şekil 4.56.'CCIIs ile yeni kaotik sistem için tasarlanmış devre şemasını göstermektedir. $(0,0,0)$ orjin noktası Lorenz, Chen, ve Lü sistemleri için denge noktasıdır, fakat bu yeni sistem için denge noktası değildir. $(0,0,0)$ orjin noktasının bu yeni sistem için denge olmamasından dolayı, devrenin uygulanması için başlangıç şart gerilimine ihtiyaç duymaz. Sonuç olarak, yeni devrenin gerçekleştirilmesi kolaydır.



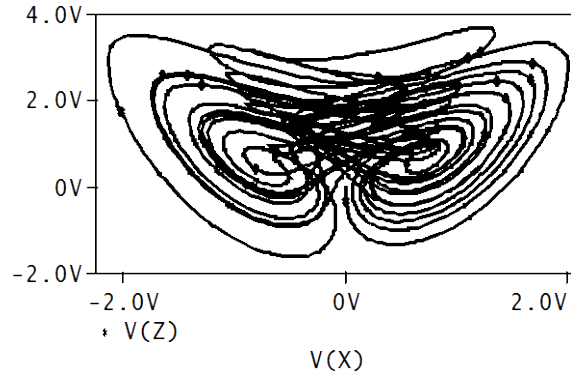
Şekil 4.56. $a=0.5$, $b=0.5$, ve $x_0=0$, $y_0=0$, $z_0=0$ için yeni devre şeması.

Yeni kaotik sistemin PSpice simülasyonları Şekil 4. 56 (xy, xz, yz çekicileri) da elde edilmiştir. Bu simülasyonda, “a ve b” parametreleri 0.5 olarak ve bütün başlangıç durumları 0 olarak alınmıştır.

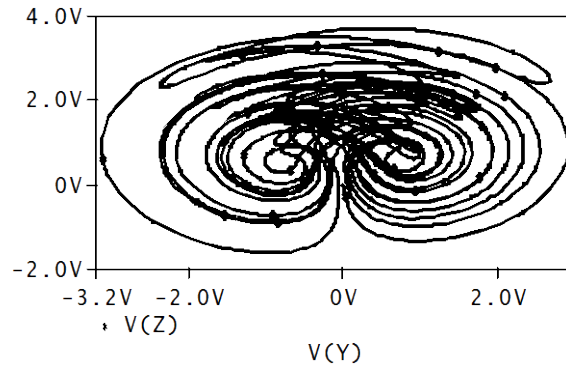


53

Şekil 4.57. Yeni kaotik osilatörün Pspice simülasyon sonuçları (xy kaotik çekicileri)



Şekil 4.58. Yeni kaotik osilatörün Pspice simülasyon sonuçları (xz kaotik çekicileri).



Şekil 4.59. Yeni kaotik osilatörün Pspice simülasyon sonuçları (yz kaotik çekicileri).

5. KAOTİK SİSTEMLERİN SENKRONİZASYONU

5.1. Kaotik Sistemlerin Senkronizasyonu

Kaotik sistemler arasındaki senkronizasyon son yıllarda çok fazla ilgi çeken bir konu olmuştur. Yaygın spektruma sahip olan kaotik işaretlerin güvenli haberleşmede kullanılabileceği fikriyle birlikte haberin alıcıda tekrar çözülebilmesi için senkronizasyon kavramı ortaya çıkmıştır. Senkronizasyon kaotik davranan iki veya daha fazla sistemin bir süre sonra aynı kaotik davranışı göstermesidir. Kaos senkronizasyonu bize güvenli haberleşmeler ve sinyal işleme için potansiyel uygulamalar sağlamaktadır. Kaotik işaretlerin yaygın spektruma sahip olması mühendisleri bu işaretleri haberleşmede kullanmanın haberleşme açısından güvenli ve gürültüye bağışık kılacağı fikrine itmiştir (Ogarzalek, 1993). Kaotik işaretlerin özelliklerinden biri olan başlangıç noktasına duyarlık, alıcı açısından problem olacağından alıcı ve vericiyi bir birine senkronize edecek sistemler önerilmiştir.

Özdeş kaotik sistemlerin kuplajı ve senkronize edilmeleri ile ilgili ilk çalışma Pecora-Carroll(Pecora ve Carroll, 1990),(Pecora ve Carroll, 1991)'ündür. Bu tezde kullanılan metod Pecora-Carroll (P-C)'un, literatürde özdeş(identical) veya tam (complete) senkronizasyon olarak adlandırılan metodudur. P-C tekniğinde, kaotik olarak değişen sistemden bir durum değişkeni orjinal sistemin ikinci kopyasına giriş olarak gönderilirse, kopya alt-sistem(alıcı), orjinal sistem(verici) ile senkronize olabilmektedir. Bir kaotik sistem sürücü alt-sistem ve kararlı alt-sistem olarak iki alt-sisteme ayrıştırıldığında kendi kendinden senkronizasyon özelliğine sahip olduğu söylenebilir(Carroll ve Pecora, 1991), (Pecora ve Carroll, 1991) Pecora ve Carroll, bu sistemin senkron olması için gerek koşul olarak alt sistemin Lyapunov üstellerinin negatif olmasını göstermişlerdir.

Senkronize alt-sistemlerin kurulması için çok kullanılan bu metotta,

$$\dot{u} = f(u), \quad u=(u_1, \dots, u_n)$$

şeklinde verilen bir dinamik sistem,

$$\dot{v} = g(v,w)$$

$$\dot{w} = h(v,w)$$

şeklinde iki alt-sisteme ayrıştırılır.

m 'in belirli değerleri için $v = (v_1, \dots, v_m)$, $g = (g_1, \dots, g_m)$, $w = (w_1, \dots, w_{n-m})$, $h = (h_1, \dots, h_{n-m})$ fonksiyonları elde edilir. Bu noktada, w alt-sisteminin bütünüyle bir kopyası oluşturulur ve yeni değişkenler olarak w' kullanılır. Bu işlem $2n-m$ boyutlu bir sistem oluşturur.

$$\dot{v} = g(v,w)$$

$$\dot{w} = h(v,w)$$

$$\dot{w}' = h(v,w')$$

(E.5.1)

v alt-sistemi, w' ile bağımsız çalışırken “sürücü sistem” olarak adlandırılır ve v işareti, w' alt-sistemini sürmek için bu sisteme beslenir. w' alt-sistemi “cevap sistemi” olarak bilinir.

Belirli bir zaman sonunda, doğru şartlar altında (örn. seçilen alt sistem kararlıysa) w' değişkenleri asimptotik olarak w değişkenlerine yaklaşacaktır ve zamanla aynı olacaktır. Bu, $t \rightarrow \infty$ iken, $\Delta w = w - w'$ farkının sifıra gitmesi demektir. Bu durumun oluşması için gerekli ve yeterli şart, w' alt-sisteminin şartlı Lyapunov üstellerine ait işaretlerin durumudur. Lyapunov üstelleri, w alt-sisteminin kararlılığını ve w' ' nün w 'ya olan yakınlığını belirler. Bu üstellerin tümü negatif olduğu zaman w alt-sistemi kararlıdır. Bu durum, w' ' nün w 'dan farklı olmayacağını garanti eder. Bu işlem senkronizasyon için yeterli şartı sağlar (Pecora ve Carroll, 1990).

Örneğin aşağıdaki Lorenz sistemini ele alalım;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= r \cdot x - x \cdot z - y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z\end{aligned}\tag{E.5.2}$$

(x_1, z_1) kararlı olan cevap alt-sistemine,

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \sigma \cdot (y - x_1) \\ \dot{z}_1 &= x_1 \cdot y - b \cdot z_1\end{aligned}\tag{E.5.3}$$

şeklinde, ve ikinci bir (y_2, z_2) kararlı olan cevap alt-sistemine de,

$$\begin{aligned}\dot{y}_2 &= r \cdot x - y_2 - x \cdot z_2 \\ \dot{z}_2 &= x \cdot y_2 - b \cdot z_2\end{aligned}\tag{E.5.4}$$

şeklinde ayrıştırılabilir (Cuomo ve Openheim, 1993),(Cuomo vd.. 1993).

Ayrıştırma işlemi, kaotik sistemlerin kendinden senkronize olabilme özelliğinin arkasındaki bir sonucudur. Kaos senkronizasyonu iki ayrı kaotik osilatör birbirlerine master-slave konfigürasyonu ile bağlandığında da gösterilebilir. Ana(master) sistem aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= r \cdot x - x \cdot z - y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z\end{aligned}\tag{E.5.5}$$

Tabi(slave) sistem, ana sistemin tam bir eşidir, tek fark (y_2, z_2) sabit olan cevap alt-sisteminin ana sistemde üretilen x sinyali ile sürülmesidir. Dolayısıyla tabi(slave) sistem şu şekilde olacaktır.

$$\begin{aligned}\dot{x}_r &= \sigma \cdot (y_r - x_r) \\ \dot{y}_r &= r \cdot x - x \cdot z_r - y_r \\ \dot{z}_r &= x \cdot y_r - b \cdot z_r\end{aligned}\tag{E.5.6}$$

Eğer σ, r, b parametreleri aynı ise x ve x_r sinyalleri tamamen aynı olacaktır. Senkronizasyon ana ve tabi sistem arasındaki kararlı hata dinamiklerinin bir sonucu olarak da gösterilebilir. $\mathbf{d} = (x, y, z)$, $\mathbf{r} = (x_r, y_r, z_r)$ olarak tanımlarsak, dinamik hata $\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{r}$ olur. Önceki tanımlamaları dikkate alarak, $e_1 = x - x_r$, $e_2 = y - y_r$, $e_3 = z - z_r$ elde edilir. Parametreler aynı farz edilirse, dinamik hata \mathbf{e} , aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= \sigma (e_2 - e_1) \\ \dot{e}_2 &= -x(t) \cdot e_3 - e_2 \\ \dot{e}_3 &= x(t) \cdot e_2 - b \cdot e_3\end{aligned}\tag{E.5.7}$$

Buradaki son iki denklemi çözmek için, birinciyi e_2 ile, ikincisini e_3 çarpalım.

$$\begin{aligned}e_2 \cdot \dot{e}_2 &= -x(t) \cdot e_3 \cdot e_2 - e_2^2 \\ e_3 \cdot \dot{e}_3 &= x(t) \cdot e_2 \cdot e_3 - b \cdot e_3^2\end{aligned}\tag{E.5.8}$$

elde edilir. İki denklem toplanırsa

$$e_2 \cdot \dot{e}_2 + e_3 \cdot \dot{e}_3 = -e_2^2 - b \cdot e_3^2\tag{E.5.9}$$

elde edilir. Dikkat edilirse burada $x(t)$ terimi kaybolmuştur. Cuomo ve Oppenheim'in dikkate aldıkları üç boyutlu Lyapunov fonksiyonu

$$E(\mathbf{e}, t) = \frac{1}{2} [(1/\sigma) \cdot e_1^2 + e_2^2 - e_3^2]$$

şeklinindedir. Lyapunov fonksiyonunun türevi alınırsa,

$$\dot{E}(\mathbf{e}, t) = (1/\sigma) \cdot e_1 \cdot \dot{e}_1 + e_2 \cdot \dot{e}_2 + e_3 \cdot \dot{e}_3$$

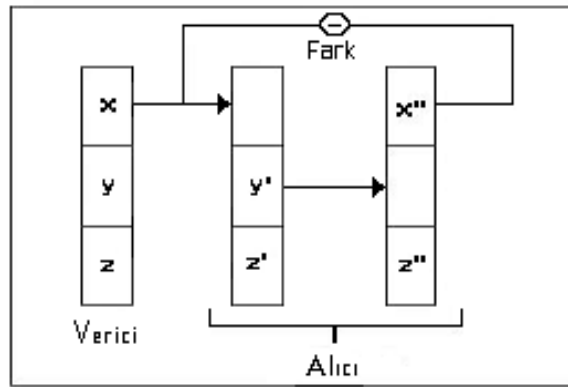
elde edilir. Bu son denklemde daha önce elde edilen

$$e_2 \cdot \dot{e}_2 + e_3 \cdot \dot{e}_3 = -e_2^2 - b \cdot e_3^2 \quad \text{ve} \quad \dot{e}_1 = \sigma (e_2 - e_1)$$

$$\dot{E}(e,t) = \left(\frac{\sigma}{\sigma}\right) \cdot [e_1 \cdot (e_2 - e_1)] - e_2^2 - b \cdot e_3^2$$

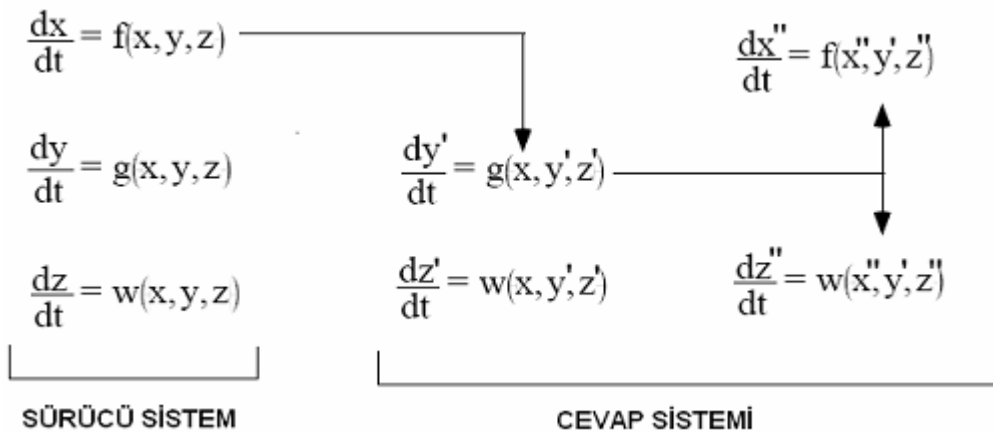
sonucuna ulaşılır. Bu son denklem $E(e,t)$ 'nin bütün $e \neq 0$ değerleri için sıfıra gittiğini göstermektedir. Yine Cuomo ve Oppenheim $E(e,t)$ sıfıra doğru gittiğinde senkronizasyonun oluşacağına işaret etmişlerdir (Cuomo ve Oppenheim, 1993), (Cuomo vd., 1993).

Şekil 5.1, peş peşe bağlanmış senkronizasyon sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Sürücü alt-sistem ve cevap alt-sistemleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Peş peşe bağlanmış senkronizasyon sisteminin blok diyagramı.

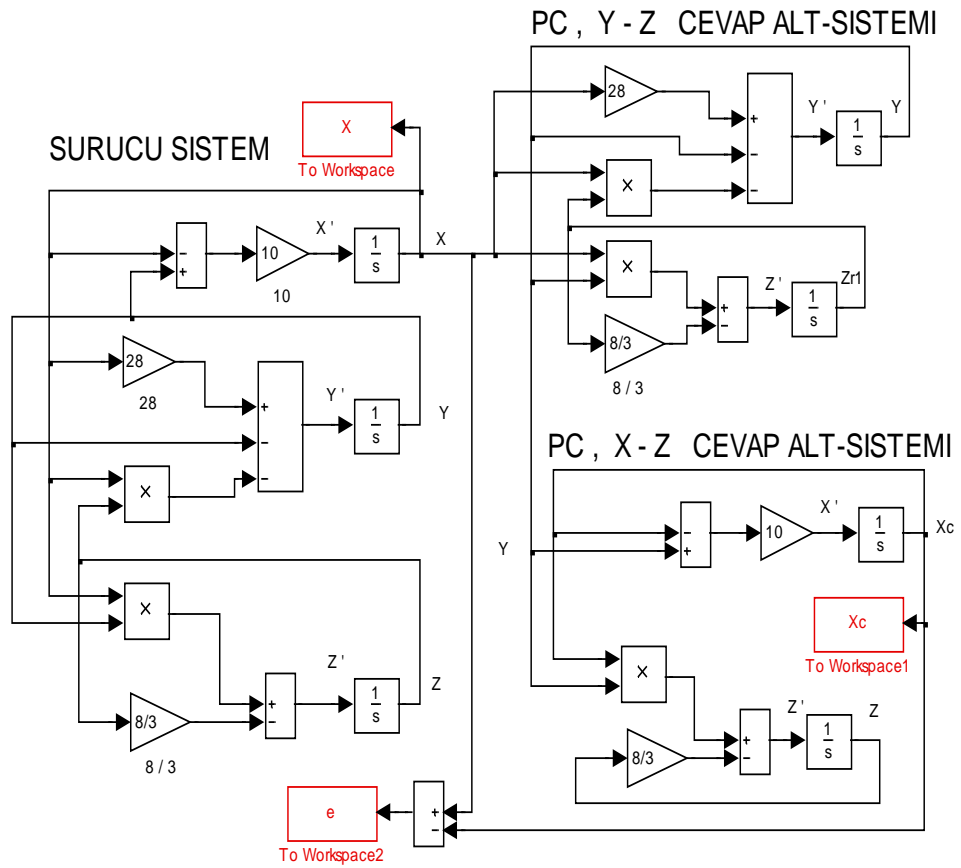
Pecora-Carroll (P-C) peşe bağlama metodunun bir başka anlatım şekli de Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



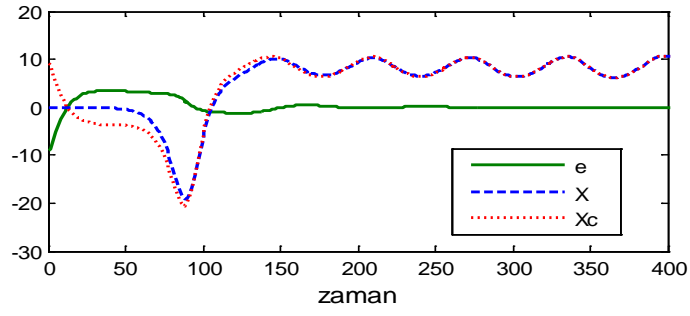
Şekil 5.2. Pecora-Carroll (P-C) peşe bağlama metodunun farklı bir anlatımı.

5.2. Lorenz Sistemi Simulink Ve Devre Senkronizasyonları

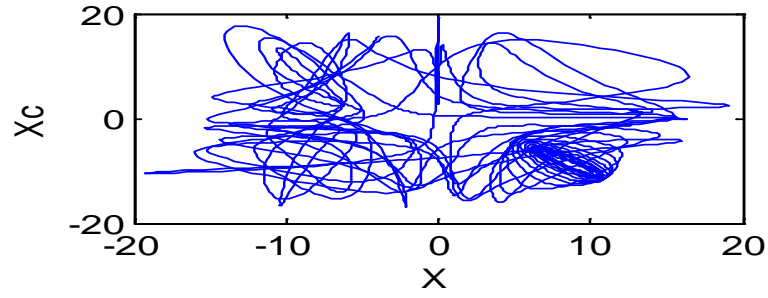
Lorenz sisteminin Pecora-Carroll yöntemi ile Matlab-Simulink'de yapılan blok diyagramları ile senkronizasyon modellemesi Şekil 5.3.'de, simülasyon sonuçları , Şekil 5.4.'da verilmiştir.



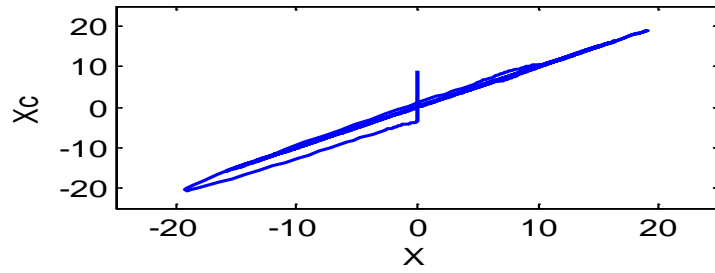
Şekil 5.3. Lorenz sisteminin Simulink P-C senkronizasyon modellemesi.



(a)



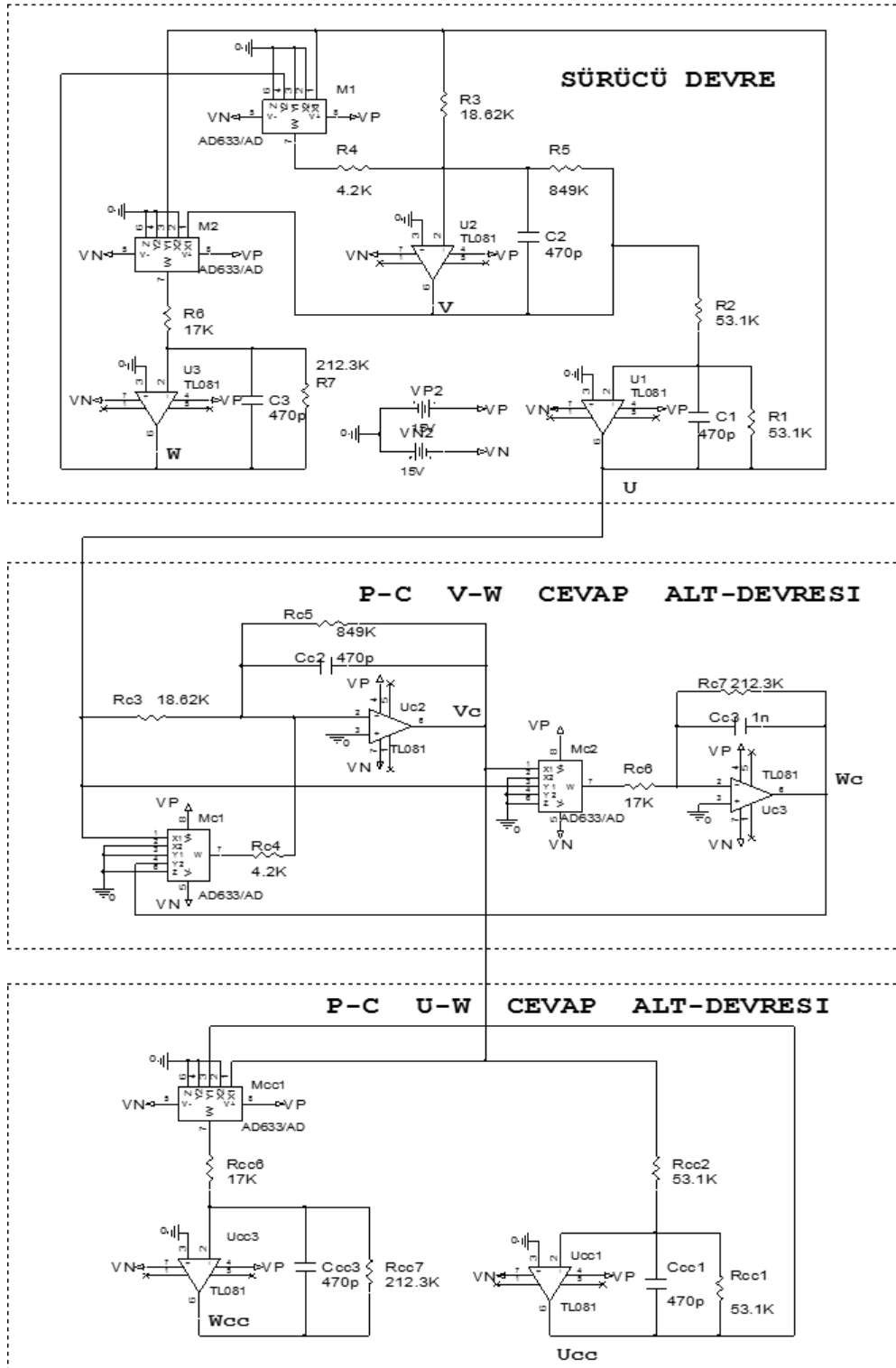
(b)



(c)

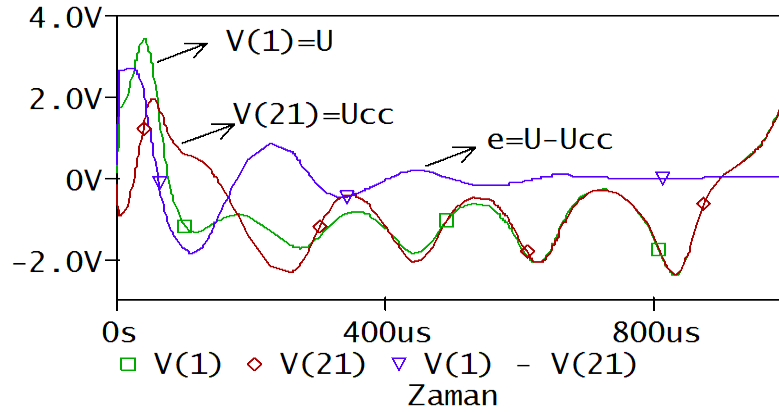
Şekil 5.4. Lorenz sistemi Simulink senkronizasyon sonuçları (a)Sürücü sinyal(X), cevap sinyali(X_c) ve senkronizasyon hatası($e = X - X_c$)'nın zaman göre değişimi (b) $X - X_c$ değişimi (senkronizasyondan önce) (c) $X - X_c$ değişimi (senkronizasyondan sonra).

Lorenz sisteminin tasarlanan Pspice P-C senkronizasyon devresi Şekil.5.5'de verilmiştir.

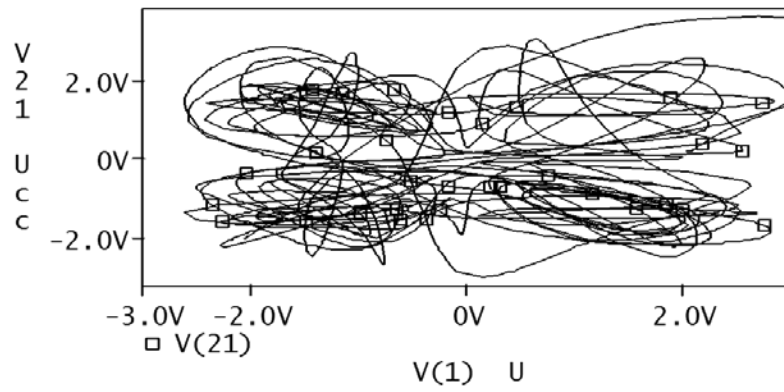


Şekil 5.5. Lorenz sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi.

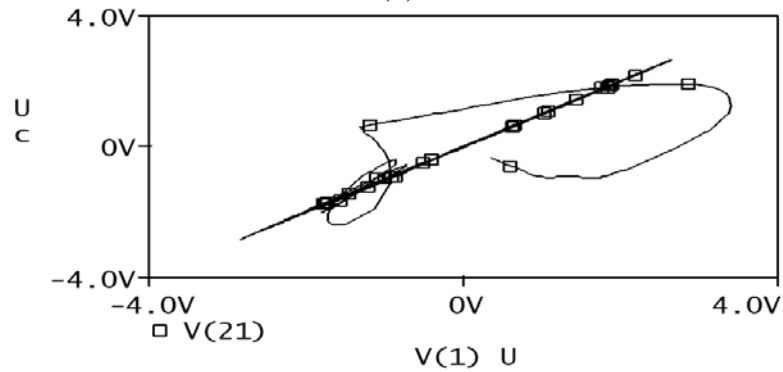
Lorenz sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi simülasyon sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.6. Lorenz Sistemi Simulink Ve Devre Senkronizasyonları

5.3. Kaotik G Sisteminin Simulink ve Devre Senkronizasyonları

Kaotik G sistemi verici devresinin denklemleri şu şekilde verilsin;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y - x \\ \dot{y} &= a \cdot y - x \cdot z \\ \dot{z} &= x \cdot y - a\end{aligned}\tag{E.5.10}$$

Kaotik G sistemi, P-C yöntemiyle senkronizasyonu için;

$$\begin{aligned}\dot{y}_1 &= a \cdot y_1 - x \cdot z_1 \\ \dot{z}_1 &= x \cdot y_1 - a\end{aligned}\tag{E.5.11}$$

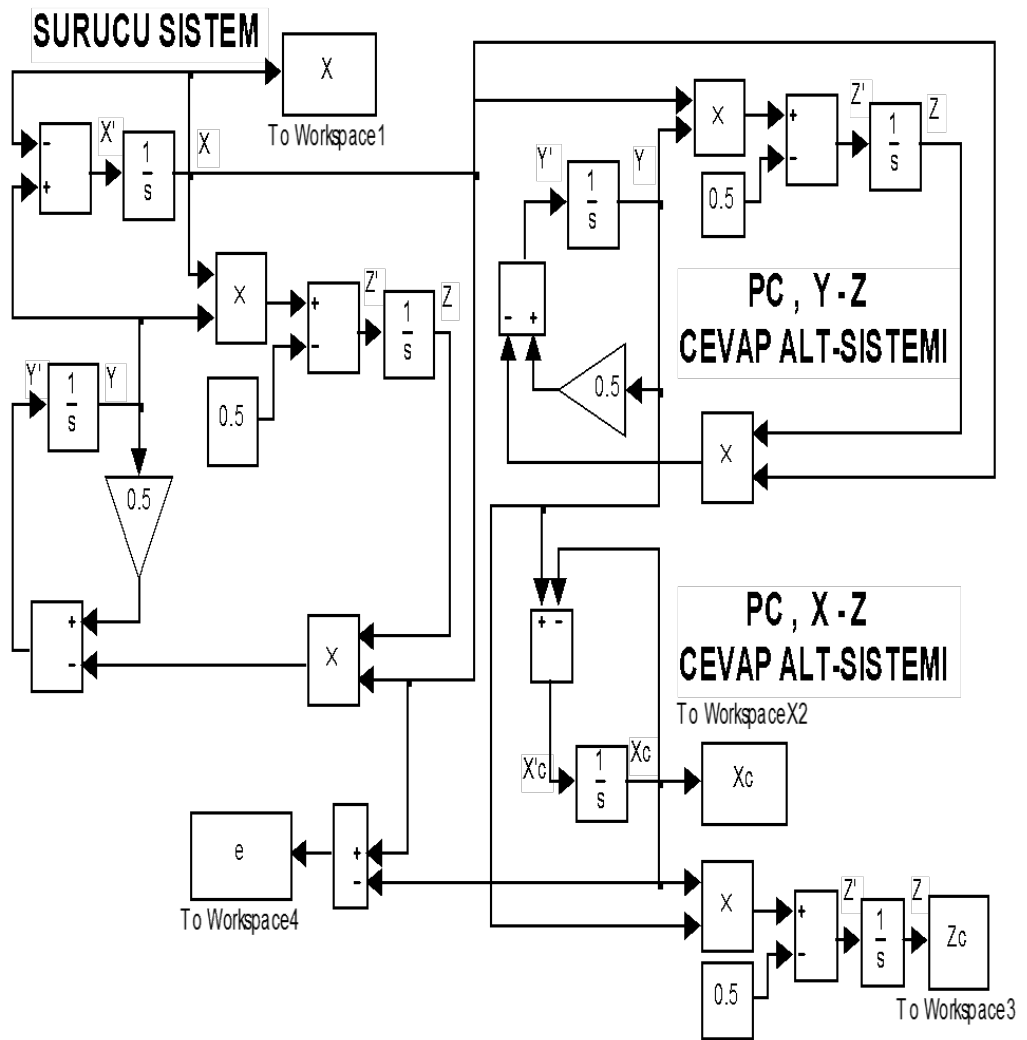
şeklinde (y_1, z_1) sürücü olan cevap alt-sistemine, ve

$$\begin{aligned}\dot{y}_c &= a \cdot y_1 - x_c \cdot z_c \\ \dot{z}_c &= x_c \cdot y_1 - a\end{aligned}\tag{E.5.12}$$

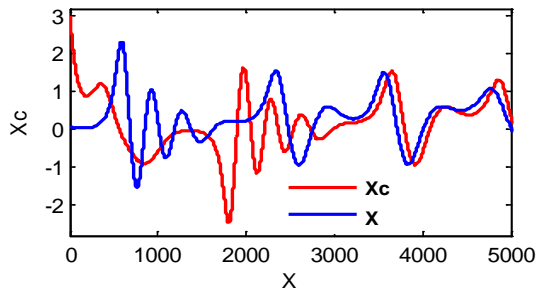
şeklinde (x_c, z_c) kararlı cevap alt-sistemine ayrıştırılabilir.

Senkronizasyondan sonra alıcı devrenin x_c sinyali, verici devrenin x sinyaline kısa sürede yaklaşacak ve senkronize olacaktır.

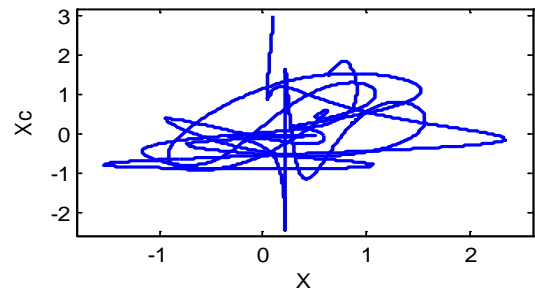
Kaotik G sisteminin Pecora-Carroll yöntemi ile Matlab-Simulink'de yapılan blok diyagramları ile senkronizasyon modellenmesi Şekil 5.7.'de, simülasyon sonuçları ise Şekil 5.8.'de verilmiştir.



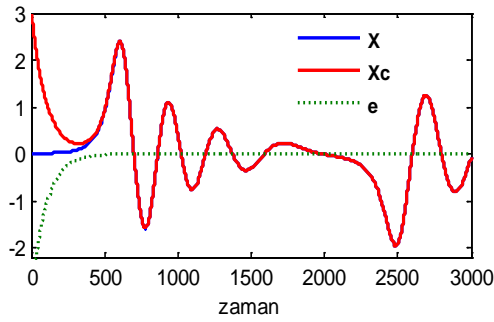
Şekil 5.7. Kaotik G sisteminin Simulink P-C senkronizasyon modellemesi.



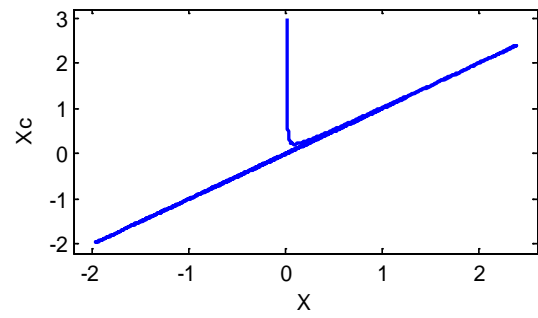
(a)



(b)



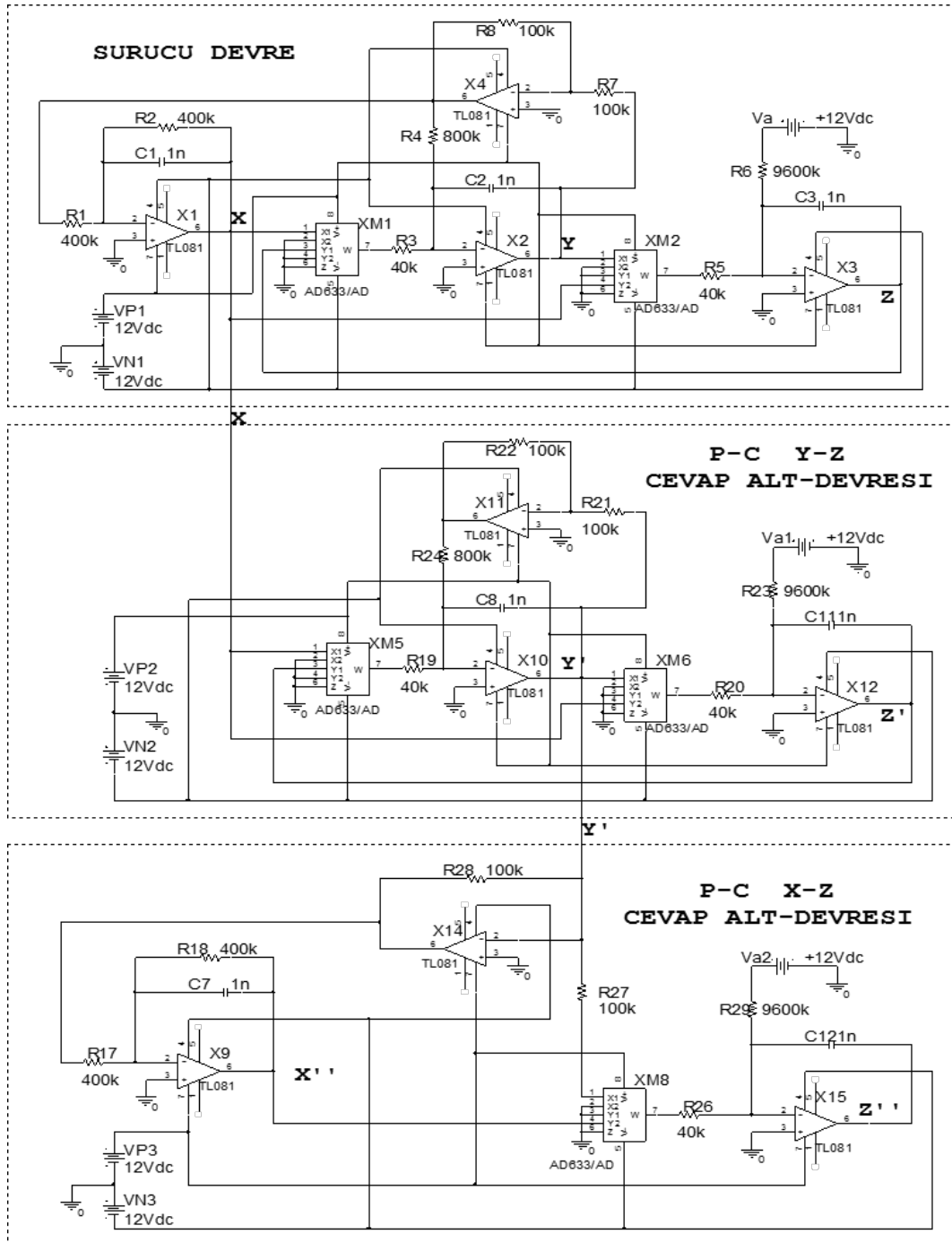
(a)



(b)

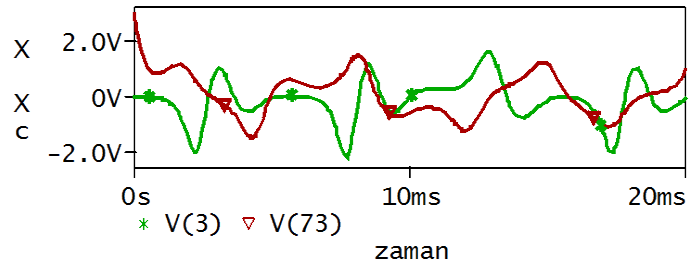
Şekil 5.8. Kaotik G sistemi Simulink senkronizasyon sonuçları (a) Senkronizasyon öncesi Sürücü(X) ve Cevap(X_c) kaotik sinyallerin zamana göre değişimi (b) $X - X_c$ değişimi (senkronizasyondan önce) (c) Sürücü sinyal(X), cevap sinyali(X_c) ve senkronizasyon

Kaotik G sisteminin Pspice P-C senkronizasyon devresi Şekil 5.9'de verilmiştir.

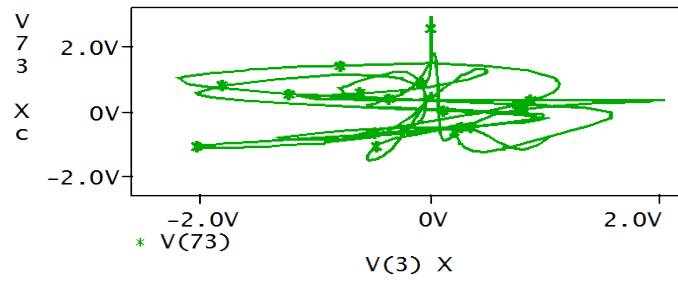


Şekil 5.9. Kaotik G sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi .

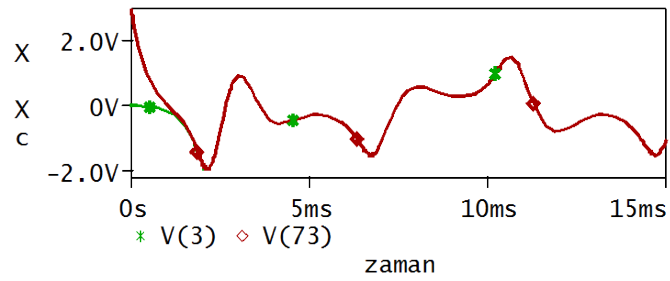
Kaotik G sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi simülasyon sonuçları Şekil 5.10'da verilmiştir.



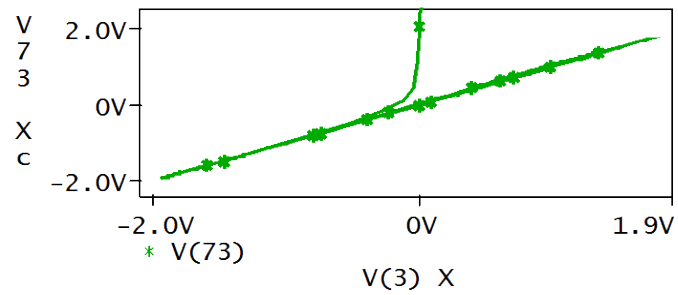
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.10. Kaotik G sistemi Pspice P-C senkronizasyon devresi simülasyon sonuçları (a) Senkronizasyon öncesi Sürücü(X) ve Cevap(Xc) kaotik sinyallerin zamana göre değişimi(b) Senkronizasyonsuz X-Xc değişimi (c) Sürücü(X) ve Cevap(Xc) kaotik sinyallerinin zamana göre değişimi.

6. KAOTİK SİSTEMLERİN GİZLEME YÖNTEMİYLE HABERLEŞMESİ

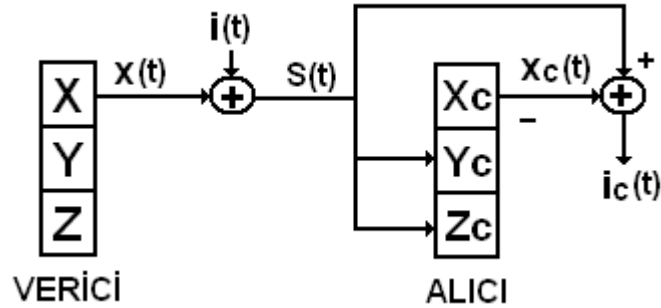
Kaos kullanarak veriyi taşıma ve şifreleme, Pecora ve Carroll tarafından ayrı iki farklı kaotik osilatörde senkronizasyonun mümkün olduğunu gösterdiği 1990 yılında başlamıştır. Haberleşme konusunda yapılan ilk çalışma kaotik maskeleyedir. 1993’de, Cuomo ve Oppenheim(Cuomo ve Openheim, 1993),(Cuomo vd.. 1993)., Lorenz denklem sistemini kullanarak güvenli haberleşme sistemini kurdular ve gösterdiler. Cuomo ve Oppenheim’in Lorenz devresini kullanmalarına karşın, aynı kavramsal yaklaşımı Kocarev ve arkadaşları (Kocarev vd.. 1992) kaotik sistem olarak Chua devresini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların, bir bilgi işaretine kaotik işaret ekleyerek, senkronizasyon kavramının bilgi işaretinin maskelenmesinde nasıl kullanılabileceğini göstermesi, kaotik haberleşme sistem tasarımında ilk uygulamalar olması açısından önemlidir.

Kaotik gizleme (maskeleye)’de amaç, adından da anlaşılacağı gibi haber işaretini kaotik işaretle maskeleymeden geçirmektir. Üretilen kaotik işaret kanala verilmeden önce haber işaretiyle toplanmakta ve kanala verilmektedir. Alıcı devrenin verici devre ile bağlantısı ise Pecora ve Carroll yöntemi ile yapılır. Demodülasyon ise, alıcının ürettiği kaotik işareti, vericiden gelen işareten çıkartarak yapılır. Alıcının kaosta kalması ve senkronizasyonun gerçekleşmesi için haber işaretinin genliğinin kaotik işaretin genliğinden 15-20 dB ufak olması istenmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kaos tabanlı güvenilir haberleşme amaçlı sistemlerde kullanılan metotlar dört ana grupta toplanabilir. Bunlar kaotik gizleme(maskeleye), kaotik modülasyon, kaotik anahtarlama ve tahminsel kontrol metotlarıdır. Bunlardan ilk ikisi analog işaretlerin iletiminde kullanılırken diğer ikisi de dijital işaretlerin iletiminde kullanılmaktadırlar. Tezde kullanılan metot kaotik gizleme metodudur.

Kaotik gizleme haberleşmesinin mantığını gösteren blok diyagram Şekil 4.22.’de görülmektedir. Kaotik maskeleyedeki temel prensip; analog olan $i(t)$ bilgi

işaretini, verici kısımdaki $x(t)$ kaotik işaretiyle maskeleyerek ve bu şekilde iletmektir. Bu amaçla $i(t)$ bilgi işareti, maskeleyici $x(t)$ kaotik işaretiyle toplanır ve iletim ortamına aktarılır. İletilen $s(t)$ işareti ikisinin toplamıdır. Alıcı kısımda ise, bir önceki bölümde anlatılan Pecora-Carroll yöntemine göre gerçekleştirilen senkronizasyonla, maskeleyici $x(t)$ işaretinin aynı formu oluşturulmakta ve senkronize olmuş olan $x_c(t)$ kaotik işareti, iletim ortamından gelen $s(t)$ işaretinden çıkartılarak tekrar bilgi işareti elde edilmektedir.



Şekil 6.1. Kaotik gizleme yöntemiyle haberleşmenin mantığını gösteren blok diyagram

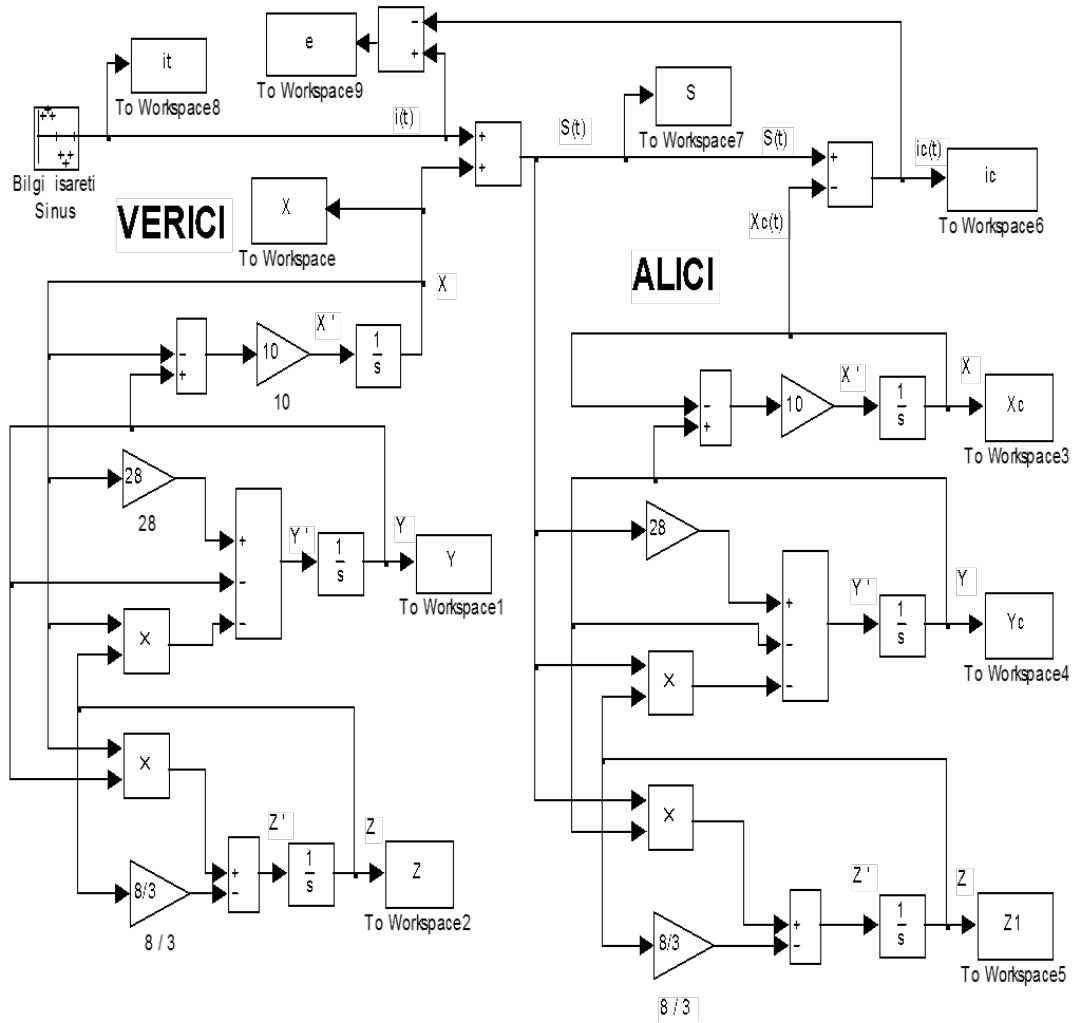
Kaotik gizleme yöntemiyle haberleşme için Lorenz sisteminin, verici devresinin denklemleri şu şekilde verilsin;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= r \cdot x - x \cdot z - y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z\end{aligned}\tag{E.6.1}$$

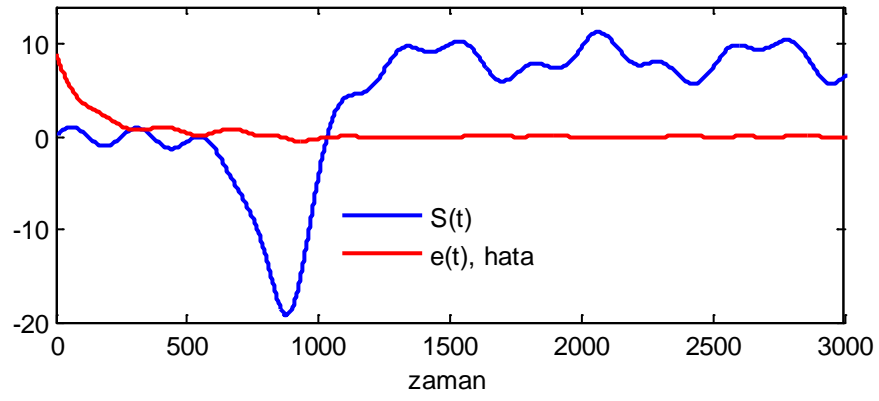
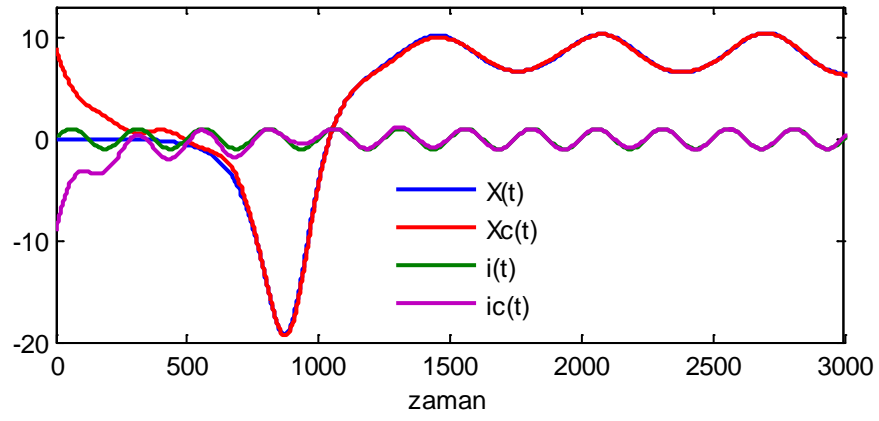
alıcı devresinin denklemleri aşağıdaki şekilde olacaktır;

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= \sigma \cdot (y_c - x_c) \\ \dot{y}_c &= r \cdot s(t) - s(t) \cdot z_c - y_c \\ \dot{z}_c &= s(t) \cdot y_c - b \cdot z_c\end{aligned}\tag{E.6.2}$$

Lorenz sisteminin Matlab-Simulink'de yapılan kaotik gizleme yöntemiyle haberleşme modellemesi Şekil 6.2'de, simülasyon sonuçları Şekil 6.3'de verilmiştir. Bilgi işareti olarak 1V, 10KHz sinüs işareti kullanılacaktır. Pspice devre simülasyonunda ise devre denklemleri skala edilip tasarlandığından, Bilgi işareti olarak 0.2V, 10KHz sinüs işareti kullanılacaktır.



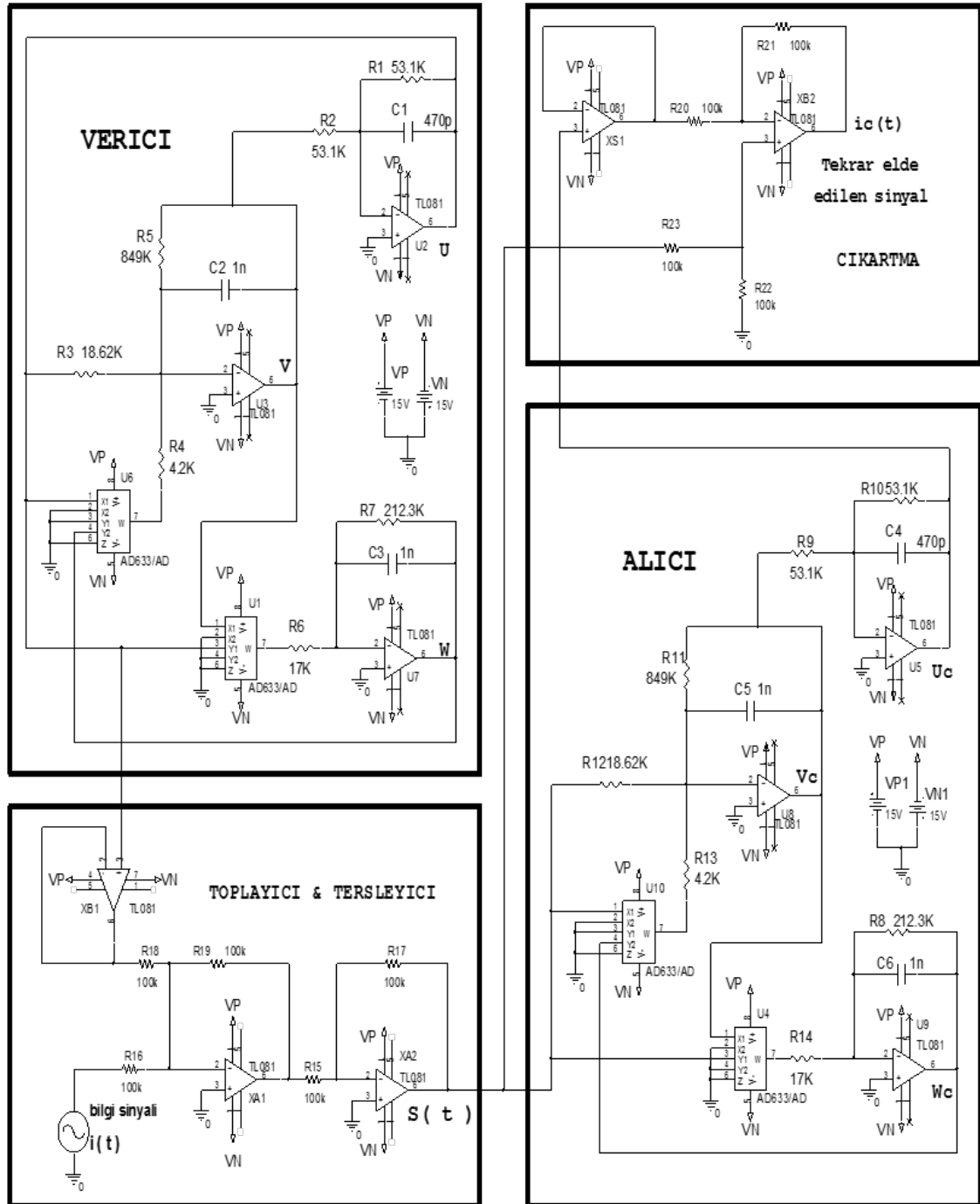
Şekil 6.2. Lorenz sisteminin Simulink’de yapılan kaotik gizleme haberleşme modellemesi.



(b.)

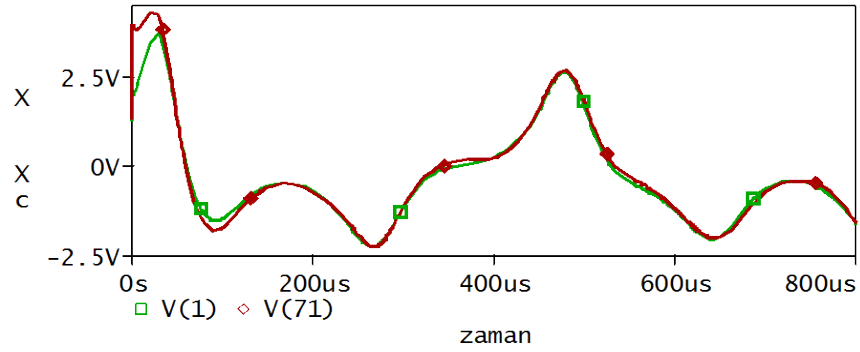
Şekil 6.3. Lorenz sisteminin Simulink’de yapılan kaotik gizleme yöntemiyle haberleşme modelinin simülasyon sonuçları (a) Verici sistemin $X(t)$ sinyali, alıcı sistemin $X_c(t)$ sinyali, bilgi işareti $i(t)$ ve tekrar elde edilen bilgi işareti $i_c(t)$ ’nin zamana göre değişimi

Lorenz sisteminin Pspice simülasyonu için yapılan kaotik gizleme haberleşme devresi Şekil 6.4.'de verilmiştir.

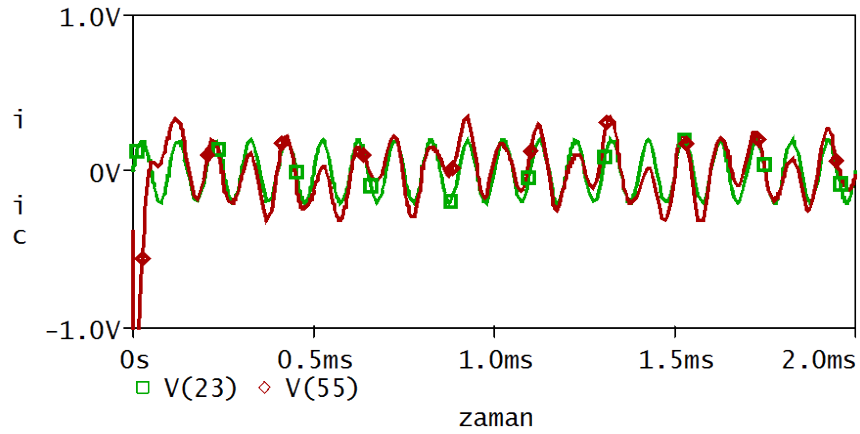


Şekil 6.4. Lorenz sisteminin Pspice simülasyonu için kaotik gizleme yöntemiyle yapılan haberleşme devresi.

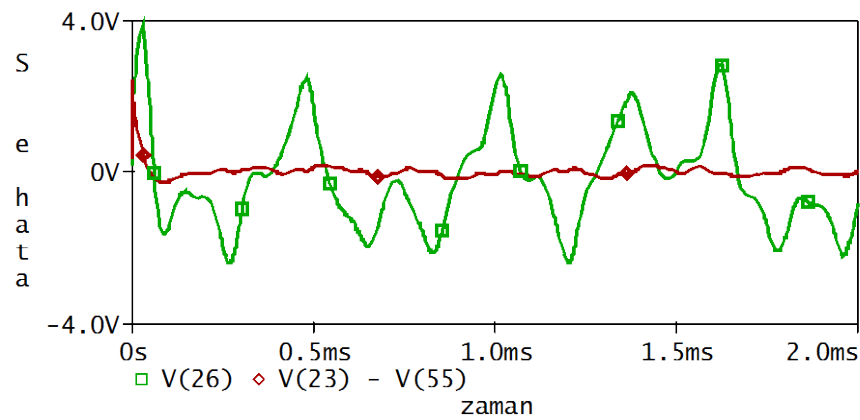
Lorenz sisteminin kaotik gizleme yöntemiyle yapılan haberleşme devresinin Pspice simülasyon sonuçları Şekil 6.5.' de verilmiştir.



(a)



(b)

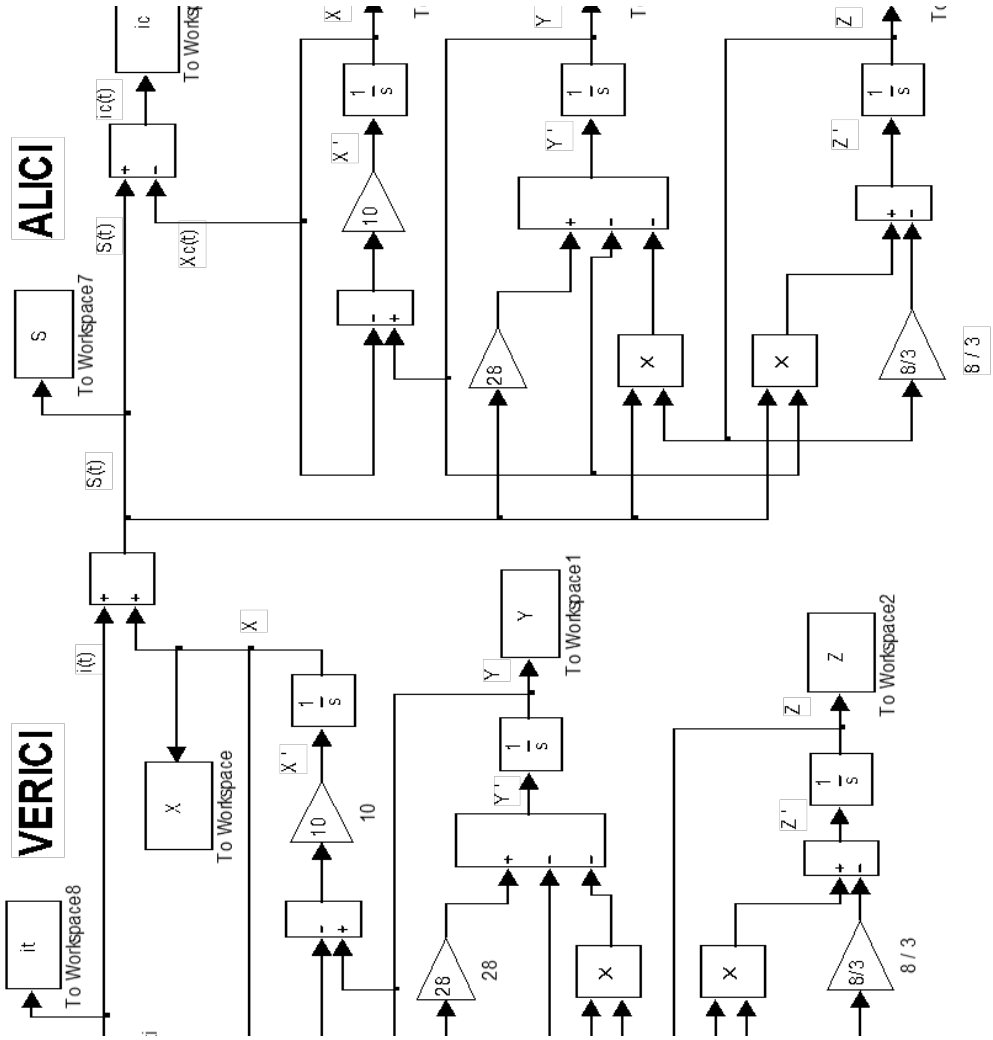


(c)

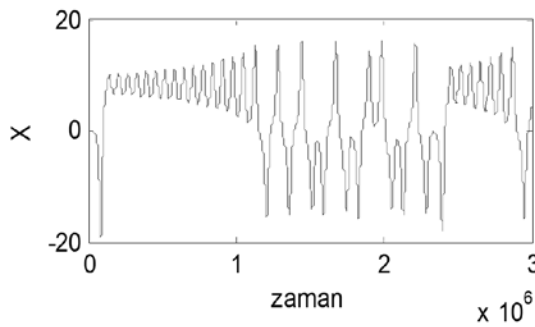
Şekil 6.5. Lorenz sistemi kaotik gizleme yöntemiyle haberleşme devresinin Pspice simülasyon sonuçları (a) Verici sistemin $X(t)$ sinyali ve alıcı sistemin $X_c(t)$ sinyali'nin zamana göre değişimi, (b) Bilgi işareti $i(t)$ ve tekrar elde edilen bilgi sinyali $i_c(t)$ 'nin zamana göre değişimi

6.1. Lorenz Sistemi Kaotik Gizleme Haberleşme Devresi

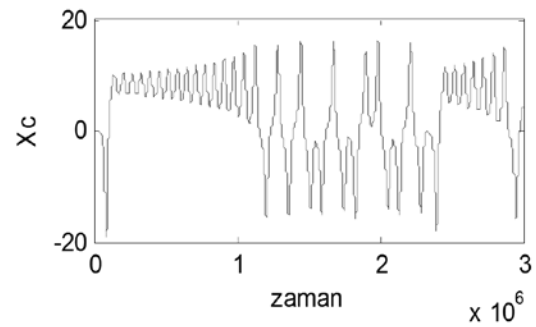
Lorenz sisteminin Matlab-Simulink’de yapılan Kaotik gizleme haberleşme modellemesi Şekil 6.6.’de verilmiştir.



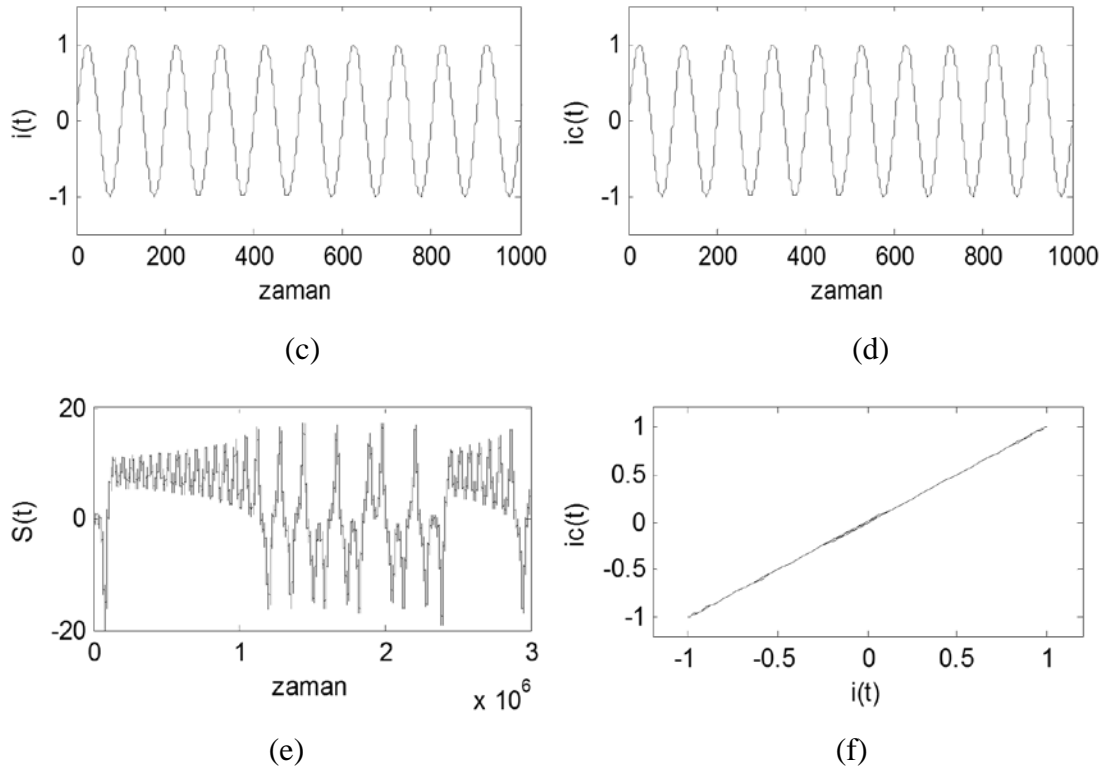
Şekil 6.6. Lorenz sisteminin Simulink’de yapılan kaotik gizleme haberleşme modellemesi.



(a)

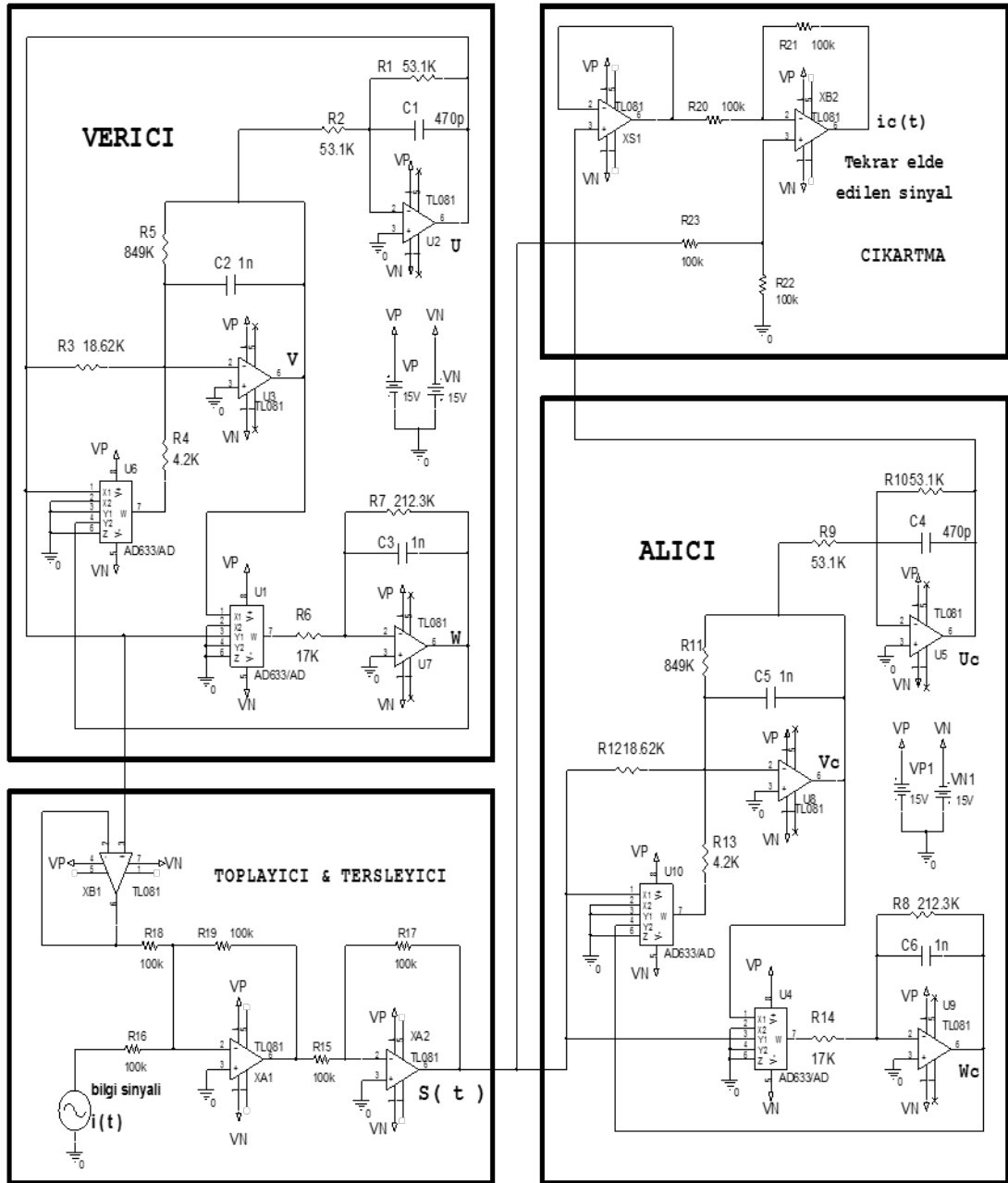


(b)



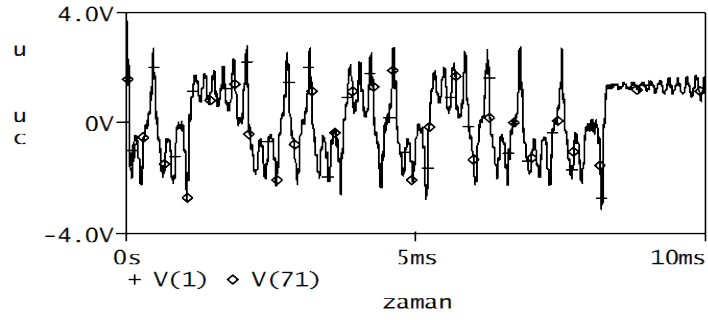
Şekil 6.7. Lorenz sistemi kaotik gizleme haberleşme modeli simülasyon sonuçları
 (a) Verici sistemin kaotik X sinyali (b) Alıcı sistemin kaotik Xc sinyali
 (c) Bilgi işareti, (1V genlikli, 10KHz frekanslı sinüs dalgası)
 (d) Tekrar elde edilen bilgi sinyali
 (e) İletilen sinyal $S(t) = x(t) + i(t)$
 (f) Bilgi sinyali $i(t)$ ile, tekrar elde edilen bilgi sinyali $ic(t)$ arasındaki senkronizasyon

Simulink’de yapılan Lorenz sistemi kaotik gizleme haberleşme modelinin simülasyon sonuçları Şekil 6.7’de verilmiştir. Lorenz sisteminin Pspice simülasyonu için yapılan kaotik gizleme haberleşme devresi Şekil 6.8’de verilmiştir.

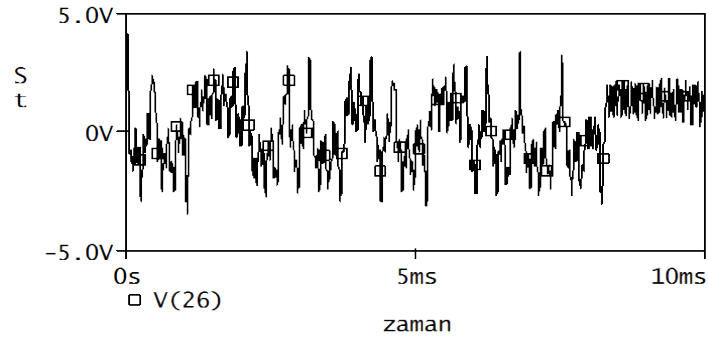


Şekil 6.8. Lorenz sistemi sisteminin Pspice kaotik gizleme haberleşme devresi.

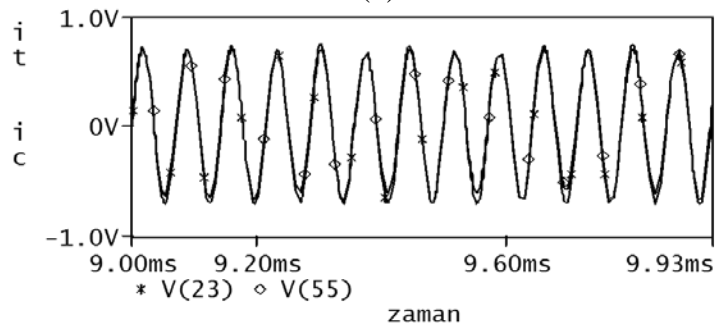
Lorenz sistemi kaotik gizleme haberleşme devresinin Pspice simülasyon sonuçları Şekil 6.9'da verilmiştir.



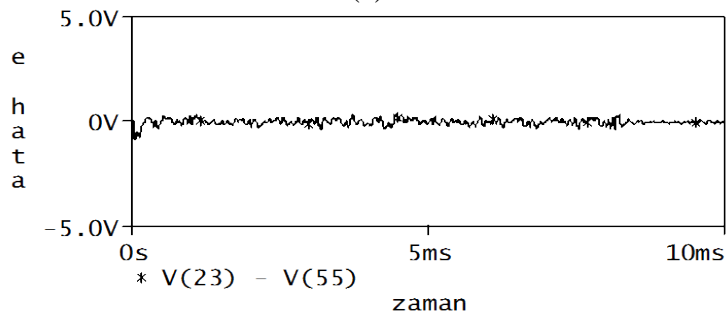
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.9. Lorenz sistemi kaotik gizleme haberleşme devresinin Pspice simülasyon sonuçları.

(a) Verici sistemin U sinyali ile alıcı sistemin U_c sinyalinin zamana göre değişimi

(b) İletilen sinyal $S(t) = U(t) + i(t)$

(c) Bilgi işareti (0.7V genlikli, 14KHz frekanslı sinüs dalgası), ile tekrar elde edilen bilgi sinyali

(d) Hata $e(t) = i(t) - ic(t)$

6.2. Kaotik G sistemi ile sinyal gizleme uygulamaları

Kaotik sinyaller başlangıç koşullarına çok hassas bir şekilde bağlıdır. Bu yüzden, birçok iletişim uygulamalarında kullanılabilirler, çünkü maskeleyme ve sese karşı bilginin duyarlılık kazanması özelliklerine sahiptir. Kaos-tabanlı güvenli haberleşme sistemleri, standart yaygın spektrum sistemlerine alternatif olmuştur çünkü bu sistemler bilgi sinyallerin spektrumunu yayabilir ve aynı zamanda basit ve pahalı olmayan kaotik devresi ile işlenmiş bilgi sinyallerini şifreleyebilirler.

Çıkış sinyalinin giriş sinyalini geri kazanabilmesi, kaotik sistem için güvenli iletişimin oluşturulmasının mümkün olduğunu gösterir. Şekil 6.10 da, Kaotik G sisteminin maskeleyme iletişim devreleri gösterilmektedir. Verici ve alıcı arasında kaotik sinyal olması, güvenli iletişim sistemlerinde kaos kullanımını mümkün kılar. Bu sistemlerin tasarlanması, kaotik G sisteminin öz senkronizasyon özelliğine bağlıdır. İletici ve alıcı sistemler şekil 6.10 da gösterildiği gibi özdeşdir. Kaotik maskeleyme iletişimini uygulamak için verici ve alıcı parametrelerinin özdeş olduğundan emin olmak gerekir. Maskeleyme şemasında, alıcıda temiz sürüş sinyalini yeniden oluşturmak için düşük seviyede bir sinyal, senkronizasyon sürüş kaotik sinyaline eklenir. Bu yüzden, kaotik G sistemindeki özdeş senkronizasyon ile sinyal maskeleyme yaklaşımı kullanılarak, iletici çok iyi bir şekilde geri kazanılmıştır. Bilgisayar simülasyon sonuçları, kaotik maskeleymedeki G sisteminin performansının ve iletinin geri kazanılmasının çok kuvvetli olduğunu göstermiştir. 2 farklı sinyal maskeleyme uygulamaları tasarlanmıştır ve gerçekleştirilmiştir. İlk iletilen sinyalin sinüs dalgasının genliği 0,5 V tur ve frekansı 1 kHzdir. İkinci iletilen sinyali kare dalga genliği 0,5 V ve frekansı 1 kHz dir.

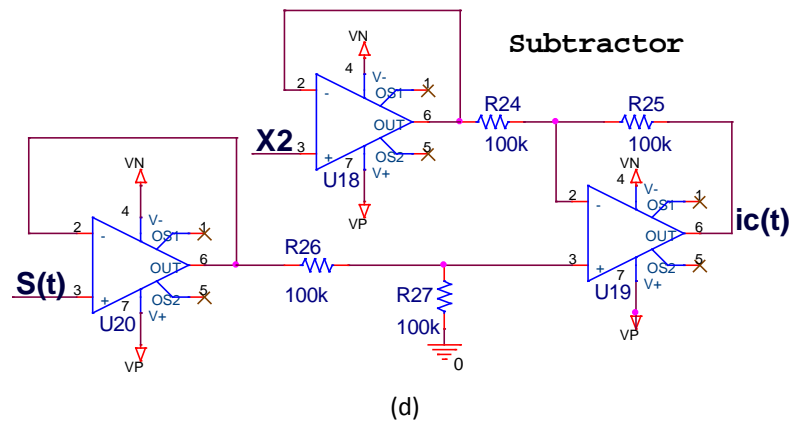
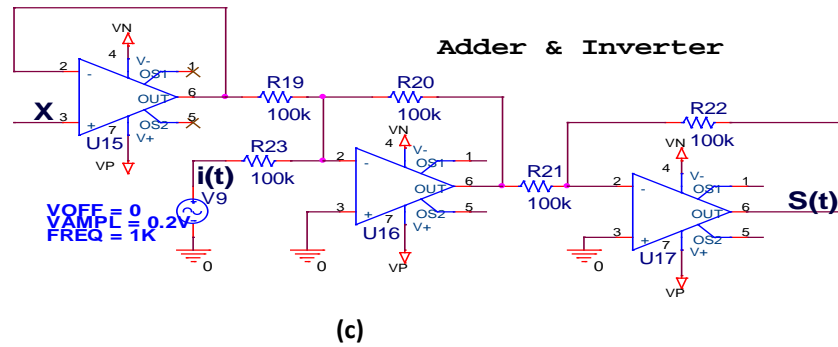
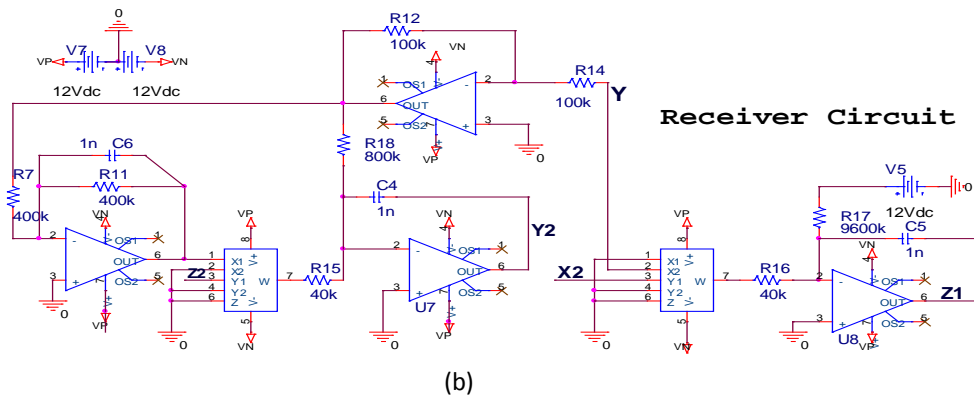
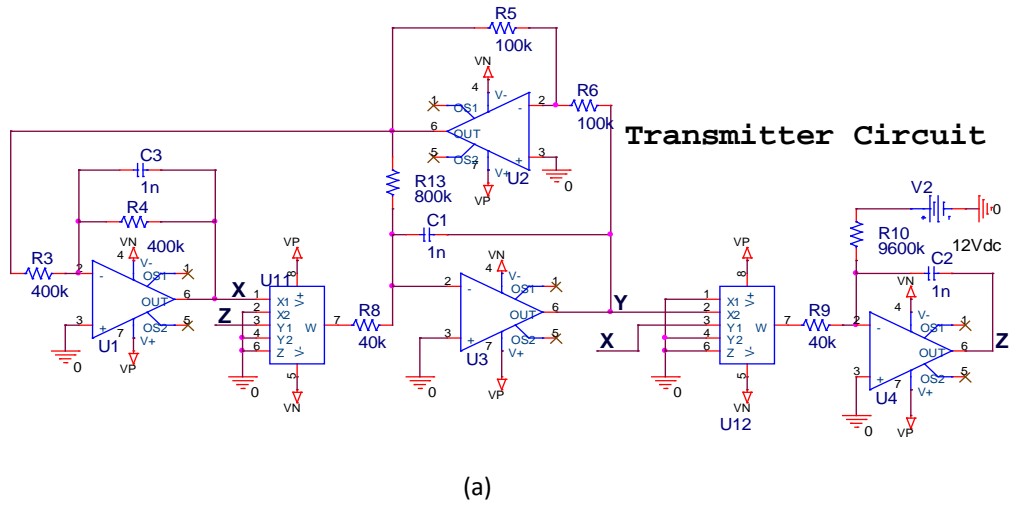
Sinüs ve kare dalga sinyalleri oluşturulan kaotik X sinyaline eklenmiştir. İletilen sinyali geri almak için tek bir eksilme ile kaotik x sinyali yeniden oluşturulmuştur.

$$[X+i(t)] - X_2 = i(t), \text{ If } X = X_2.$$

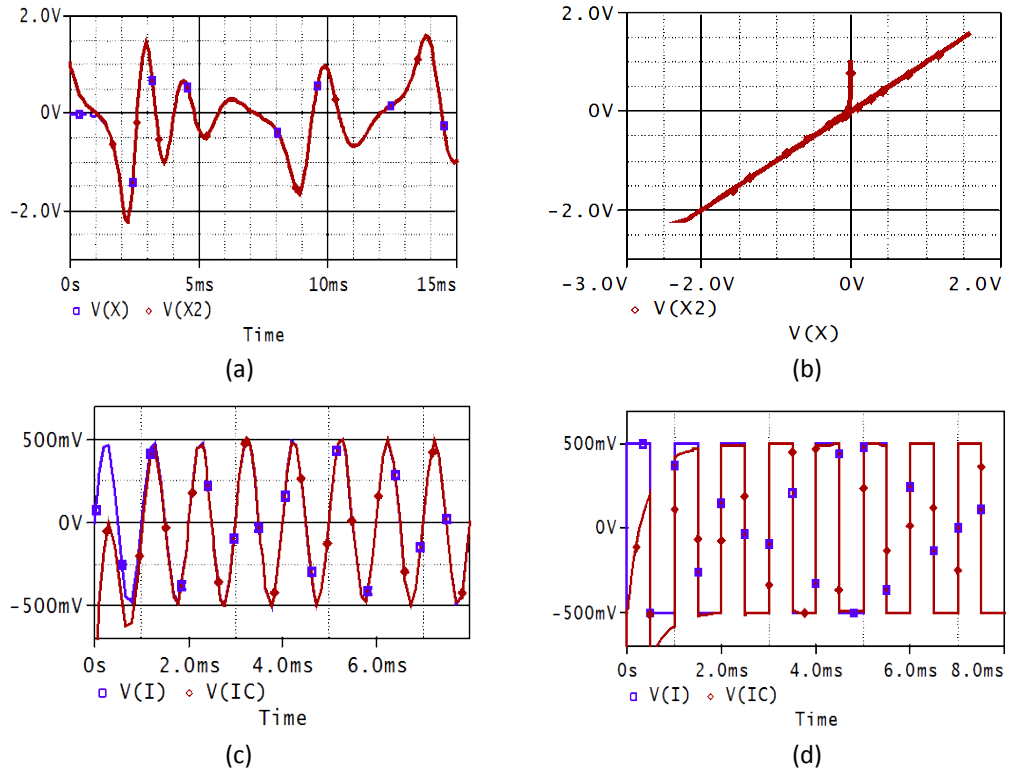
Şekil 6.10. da G sistemi için kaotik maskeleyme devresinin uygulanması gösterilmiştir. Şekil 6.11. de kaotik maskeleyme devresinin PSpice simülasyon sonuçları

gösterilmiştir. İletilen sinyallerin sinüs dalga genliği 0.5 V ve frekansı 1KHz dır ve sinüs dalga genliği 0.5V ve frekansı 1KHz dir.Verici ve alıcı devreleri başlangıç değerleri dışında özdeşdir. Başlangıç değerlerinde verici devresi 0, 0, 0 ve alıcı devresi 1, 0, 0 dır. Şekil 6.11. (c) sinyal-sinüs dalga bilgisini ve PSpice geri alınan çıkış sinyalini göstermektedir. Şekil 6.11. (d)sinyal-kare dalga bilgisini ve PSpice de geri alınan sinyal çıkışını göstermektedir.

Şekil 6.12. P kaotik sistem maskeleye iletişiminin gerçek osiloskop çıkışlarını göstermektedir. Şekil 6.12.(c) sinyal-sinüs dalga bilgisini ve geri kazanılan sinyal çıkışını göstermektedir. Şekil 6.12.(d) sinyal-kare dalga bilgisini ve geri kazanılan sinyal çıkışını göstermektedir.

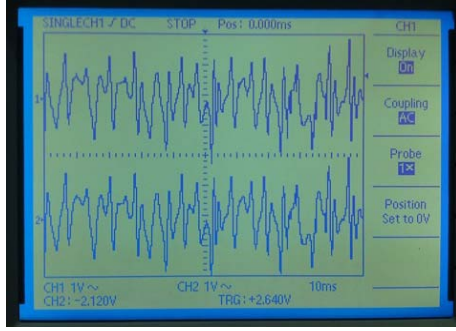


Şekil 6.10 . P kaotik sistem maskeleye iletişim devresi a) Verici devre, b) Alıcı Devre, c) Toplayıcı ve Çevirici, d) Çıkarıcı

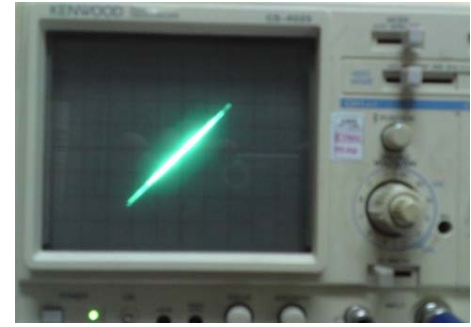


Şekil 6.11 P kaotik sistem maskeleye iletişim devresinin ORCAD-PSpice simülasyon sonuçları

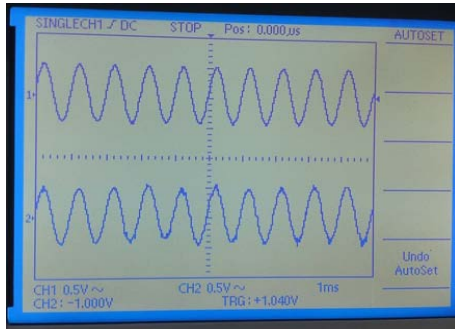
- a) Sırasıyla Verici ve Alıcı devrelerin Kaotik X ve X2 sinyalleri,
- b) X ve X2 arasındaki senkronizasyon
- c) Sinüs dalga formları olarak bilgi sinyali ve geri kazanılan sinyal,
- d) Kare dalga formları olarak bilgi sinyali ve geri kazanılan sinyal



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.12 P Kaotik sistem maskeleye iletişim devresinin gerçek osiloskop çıkışları.

- a) Sırasıyla Verici ve alıcı devrelerinin Kaotik X ve X2 sinyalleri,
- b) X ve X2 arasındaki senkronizasyon ,
- c) Sinüs dalga formları olarak bilgi sinyali ve geri kazanılan sinyal
- d) Kare dalga formları olarak bilgi sinyali ve geri kazanılan sinyal

7. SONUÇLAR

Güvenli haberleşme için bugüne kadar kullanılan kaotik sistemlerin bilinen yaygın sistemler olması ve defalarca kullanılması güvenlik açısından zaafiyet oluşturmaktadır. Bu yüzden, yeni kaotik sistemlerin çalışılması gerekliliği hasıl olmuştur.

Bu tezde güvenli haberleşmede alternatif olarak kullanılabilen son dönemde bulunmuş kaotik sistemler ile senkronizasyon ve güvenli haberleşme devreleri tasarlanarak, bulunan yeni sistemlerin güvenli haberleşmede kullanılabilenliği gösterilmiştir.

Tezde literatür taramasından sonra, doğrusal olmayan dinamik sistemler ve kaos ile ilgili temel kavramlar anlatılmıştır. Lorenz, Chua, Rössler, Duffing gibi çok bilinen sistemler ile Leipnik-Newton sistemi, Duffing-van der pol sistemi, Hadley dolaşım sistemi gibi az bilinen ve elektronik devre gerçeklemelerine literatürde rastlanılmamış bol miktarda yeni sistemler tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde sürekli zamanlı kaotik sistemlerin modellenmesi, devre tasarımı ve gerçeklemelerinin yapılması anlatılmıştır. Bu kapsamda dördüncü bölümde ilk olarak literatürde çok iyi bilinen Lorenz ve Chen sistemleri için daha basit devre tasarımları önerilmiş ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. İkinci olarak literatürde daha önceden gerçekleştirilmemiş Halvorsen dairesel simetrik çekimli kaotik sisteminin Orcad PSpice'da senkronizasyon modelinin elektronik devre tasarımları şekil 4.30'da yapılarak benzetim sonuçları şekil 4.31'de elde edilmiş daha sonra elektronik devre kurularak osiloskop çıkışları şekil 4.32'de gösterilmiştir. Üçüncü olarak Dört sarmallı bir kaotik sistemin(Pehlivan, 2011) devre tasarımları ve simülasyon sonuçları incelenmiştir. Dördüncü olarak Pehlivan tarafından 2007'de tanıtılan(Pehlivan, 2007) kaotik C sisteminin osilatör devresi tasarlanmış ve simülasyonları ilk defa yapılmıştır. Beşinci olarak 2007 ve 2011'de tanıtılan(Pehlivan, 2007), (Pehlivan, 2010), kaotik G sistemi ayrıntılı olarak analiz edilmiş, ilk defa olarak akım taşıyıcı elemanlarla(CCII'ler) elektronik devre tasarımları şekil 4.51'de yapılarak benzetim

sonuçları şekil 4.51’de elde edilmiştir. Devre tasarımlarında kullanılan akım taşıyıcılar(CCII) sayesinde, band genişliği ve devre boyutunda iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde kaotik sistemlerin senkronizasyonu anlatılmış, Lorenz sistemi üzerinde ve literatürde senkronizasyon uygulaması görülmeyen kaotik G(Pehlivan, 2010) sistemi üzerinde hem Matlab-Simulink ortamında senkronizasyon modellemeleri Şekil 5.7 ‘de, hem de Orcad-Pspice’da elektronik devre olarak Pecora-Carroll yöntemiyle senkronizasyon devrelerinin tasarım ve gerçeklemeleri yapılarak Şekil 5.9.’da senkronizasyon Pspice devre şeması, Şekil 5.10.’da simülasyon sonuçları verilmiştir. Sonuç olarak ele alınan tüm sistemlerde 1ms gibi kısa bir zamanda verici devre ile alıcı devrenin tamamen senkronize olduğu ve Matlab-Simulink’deki senkronizasyonları ile Pspice’da yapılan simülasyonlarının birebir aynı sonuçları verdiği gözlenmiştir.

Tezin altıncı bölümünde kaotik sistemlerin gizleme yöntemiyle haberleşmesi anlatılmış, yine Lorenz sistemi ve kaotik G(Pehlivan, 2010) sistemi kullanılarak Orcad-PSpice ve gerçek devre ortamında başarılı bir şekilde sinyal gizleme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11.’de kaotik G sisteminin sinyal maskeleyme devresinin PSpice simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Maskeleyme sinyali olarak 2 farklı sinyal kullanılmıştır. Şekil 6.12.’deki ilgili şekiller PSpice simülasyon sonuçları ile gerçek devre osiloskop çıkışlarının aynı olması ve birbirlerini doğrulaması dikkat çekicidir. Bütün bu sonuçlar P sisteminin sinyal maskeleyme uygulaması verimliliği ve uygulanabilirliği görselleştirmek ve göstermek için kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalarla kaotik sistemlerin senkronize olabileceği ve sinyal gizleme uygulamalarında kullanılabilmesi simülasyon ve uygulamalar ile gösterilmiştir.

Öneri olarak bu tezde senkronizasyon ve güvenli haberleşme simülasyonları yapılan sistemlerinin “kaotik modülasyon” ve “kaotik anahtarlama” gibi diğer kaos tabanlı haberleşme yöntemleri kullanılarak da haberleşme devreleri tasarlanabilir.

Tezde ele alınan değişik bilim dallarında mevcut olan, fakat senkronizasyon ve güvenli haberleşme uygulamaları daha önceden yapılmamış sistemlerin de, kaotik elektronik devre tasarımları, senkronizasyon ve güvenli haberleşme devreleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Arneodo, A., Couillet, P. and Tresser, C. (1980), "Occurrence of Strange Attractors in Three Dimensional Volterra Equations", *Physics Letters* 79: 259-263.
- Carroll TL., Pecora LM., Synchronizing Chaotic Circuits, *IEEE Trans. On Circuits&Systems*, 1991;38:453-456.
- Cascais J., Dialo N., Costa AN., Chaos and Reverse Bifurcation in a RCL Circuit, *Physics Letters*, 1983; 93A:213-216.
- Celikovsk_y, S. & Chen, G., "On a generalized Lorenz canonical form of chaotic systems" *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2002.
- Charlesworth As., Fletcher Jr., Systematic Analogue Computer Programming, 2nd Edition , Unwin Brothers Limited, 1974
- Chen G. and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor", *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 9, pp. 1465-1466, 1999.
- Chen, G. & Dong, X., "From Chaos to Order: Methodologies; Perspectives and Applications"; World Scientific, 1998.
- Chen G., Dong X., From Chaos to Order- Perspectives and Methodologies in Controlling Chaotic Nonlinear Dynamical Systems, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1993;3:1363-1409.
- Chua LO., Itoh M., Kocarev L, Eckert K., Chaos Synchronization in Chua's Circuit, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1993;3: 93-108.
- Chua LO., Lin T., Chaos and Fractals from Third-Order Digital Filters, *Int. J. of Circuit Theory and Appl.*, 1990;18:241-256.
- Chua LO., Wu C.W., Huang A., Zhong G., A Universal Circuit for Studying and Generating Chaos-Part I: Routes to Chaos, *IEEE Trans. Circuits&Systems-I*, 1993;40:732-761.
- Cuomo KM., Oppenheim AV., Circuit Implementation of Synchronized Chaos with applications to Communication, *Phys. Rev. Lett.*, 1993;71:65-68.
- Cuomo KM., Oppenheim AV., STROGATZ S. H., Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications, *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1993;40(10):626-633.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Guckenheimer, J. And Holmes, P. (1986). *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems And Bifurcations Of Vector Fields*. New York: Springer
- Hamill DC., Jeffries DJ., Subharmonics and Chaos in a Controlled Switch-Mode Power Converters, *IEEE Trans. Circuits&Systems*, 1988;CAS-35:1059-1061.
- Hayashi, c., Ueda, y., Akamatsu, n. & Itakura, h.[1970] “on the behavior of self-oscillatory systems with external force,” *trans. Instit. Electron. Com-mun. Engin. Japan* 53-a, 150–158.
- Holmes PJ., Poincare celestial mechanics, dynamical-systems theory and “chaos”, *Phys. Rep.*, 1990;193(3):138-163.
- Itoh M., Spread Spectrum Communication via Chaos, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1999;9:155-213.
- Kawakami H., Bifurcation of Periodic Responses in Forced Dynamic Nonlinear Circuits: Computation of Bifurcation Values of the System Parameters, *IEEE Trans. Circuits&Systems.*, 1984;CAS-31:248-260.
- Kawakami H., Fuzzy Boundary of Domain of Attraction in Forced Oscillatory Circuit, *ECCTD'87 European Conference on Circuit Theory and Design*, Paris, 1987;393-398.
- Kennedy, MP., Experimental Chaos from Autonomous Electronic Circuits. *Phil. Trans. R. Soc., London*, 1995; A(353):13-32.
- Kennedy MP., Chua LO, Van Der Pol and Chaos, *IEEE Trans. Circuit Syst.*, 1986;CAS-33:974-980
- Kocarev L., Halle KS., Eckert K., Chua L.O., Parlitz U., Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1992;2:709-713.
- Lorenz E. N., Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.*, 1963;20:130–141. Lorenz E. N., Irragularity: a fundamental property of the atmosphere. *Tellus*, 36A 98-110
- Lakshmanan M., Murali K., *Chaos in Nonlinear Oscillators, Controlling and Synchronization*, World Scientific, 1996.
- Leipnik RB, Newton TA. Double strange attractors in rigid body motion with linear feedback control. *Phys Lett* A86:63-7(1981)
- Li T., Yorke JA., Period three implies chaos, *Amer. Math. Monthly*, 1975;82:985–992.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Lü J. and Chen G., “A new chaotic attractor coined”, *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 12(3), pp. 659-661, 2002.
- Lü J., Chen G., Cheng D. and Celikovsky S., “Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system”, *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 12(12), pp. 2917-2926, 2002.(b)
- Lü, J., Chen, G. and Cheng, D., “A New Chaotic System and Beyond:The Generalized Lorenz-Like System”, *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 14(5), pp. 1507-1537, 2004.
- Lü, J., Zhou T., Chen G. And Zhang, S., “The Compound Structure of Chen’s Attractor”; *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 12(4), pp. 855-858, 2002.(a)
- MATSUMOTO T.,Chua LO., Tanama S., Simplest Chaotic Nonautonomous Circuit, *Physical Rev. A*, 1984;30:1155-1157.
- Matsumoto T.,Chua LO., Takunaga R., Chaos via Torus Breakdown, *IEEE Trans. Circuits&Systems*, 1987;CAS-34:240-253.
- MOON F.C. and P. J. HOLMES 1979 *Journal of Sound and Vibration* 65,275-296. A magnetoelastic strange attractor.
- MOON FC., *Chaotic Vibrations: An Introduction for Applied Scientists and Engineers*, John Wiley & Sons, New York, 1987
- Morgul O., Feki M., A chaotic masking scheme by using synchronized chaotic systems, *Physics Letters A*, 1999;251:169-176.
- Murali K., Lakshmanan M., Chua LO., Controlling and Synchronization of Chaos in The Simplest Dissipative Nonautonomous Circuit, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1995;5:563-571.
- Ogarzalek MJ., Taming Chaos Part-I Synchronization, *IEEE Trans. Circuit Syst. CAS I*, 1993;40(10):693-699
- Ogorzalek MJ., Taming Chaos-Part II: Control, *IEEE Trans. Circuits&Syst.-I*, 1993;40:700-706.
- Ohmori Y., Nakagawa N., Saito T., Mutual Coupling of Oscillators with Chaos and Period Doubling Bifurcation, *ISCAS'85 International Conference on Circuits and Systems*, 1985;61-64.
- Parlitz U, Chua LO., Halle KS., Shang A., Transmission of Digital Signals by Chaotic Synchronization, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1992;2:973-977.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Pecora LM., Carroll TL., Synchronization in Chaotic Systems, Phys. Rev. Lett., 1990;64:821-824.
- Pecora LM., Carroll TL., Driving systems with chaotic signals, Physical review A , 1991;44:2374-2383.
- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., Rikitake Attractor and it's synchronization application for secure communication systems, Journal of Applied Sciences, 2007;7(2):232-236.
- PEHLİVAN İ., WEI Z. "Analysis, Nonlinear Control and Circuit Design of an Another Strange Chaotic System", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Volume 20, Issue sup2, 1229-1239, 2012.
- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., "A New 3D Chaotic System with Golden Proportion Equilibria: Analysis and Electronic Circuit Realization", Computers & Electrical Engineering, Vol. 38, Issue 6 , 1777-1784, 2012.
- PEHLİVAN İ., "Four-Scroll Stellate New Chaotic System", Optoelectronics and Advanced Materials–Rapid Communications, Vol.5, No.9, 1003–1006, September 2011
- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., YOĞUN M., "Chaotic Oscillator Design and Realizations of the Rucklidge Attractor and its Synchronization and Masking Simulations", Scientific Research and Essays, Vol. 5(16), 2210-2219, 2010
- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., "A New Chaotic Attractor from General Lorenz System Family and its Electronic Experimental Implementation", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences", Volume 18, Issue 2, 171-184, 2010
- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., "Simplified Chaotic Diffusionless Lorenz Attractor and its Application to Secure Communication Systems", IET Communications, 1, 5, 1015-1022, 2007
- PEHLİVAN İ. Yeni Kaotik Sistemler: Elektronik Devre Gerçeklemeleri, Senkronizasyon Ve Güvenli Haberleşme Uygulamaları, Danışman:Prof. Dr. Abdullah FERİKOĞLU, 2007, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi
- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., ÖNAL O. "Signal Masking Applications Using Chaotic Circuits" ,6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu İats'11, Mayıs,2011,Elazığ, Turkey

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- PEHLİVAN İ., UYAROĞLU Y., ÖNAL, O. "A New Chaotic System And Its Realization With Cciis" ,The Third International Interdisciplinary "Chaos And Complex Systems" Symposium, Mayıs,2010,İstanbul
- Pinkney J.Q., Camwell P.L, Davies R., Chaos Shift Keying Communications System Using Self-Synchronizing Chua's Oscillators, Electronics Letters, 1995; 31:1021-1022.
- Poddar G., Chakrabarty K., Banerjee S., Control of Chaos in the Boost Converter, Electronics Letters, 1995;31: 841-842.
- POLKING JC., Download Odesolve.m, Rice University, <http://math.rice.edu/~dfield/>, 2003
- Prigogine, I., and Lefever, R., J. Chem. Phys., 48, 1695 (1968).
- Rössler OE., An equation for continuous chaos, Phys. Lett. A, 1976;57:397–398.
- Rössler OE., Continuous Chaos – Four Prototype Equations, Ann. N.Y. Acad. Sci., 1979;316:376-392.
- Rodriguez A.B., Huertas JL., Chua L.O., Chaos in a Switched Capacitor Circuit, IEEE Tran. Circuits&Syst., 1985;CAS-32:1083-1085
- Sano S., Uchida A., Yoshimori S., Roy R., Dual synchronization of chaos in Mackey-Glass electronic circuits with time-delayed feedback, Physical Review E, vol.75, 2007;1(016207):1-6 .
- Shimizu T. & Moroika, N. On the bifurcation of a symmetric limit cycle to an asymmetric one in a simple model, Physics Letters A, 76, 201-204, 1980.
- Short KM., Unmasking a Modulated Chaotic Communications Scheme, International J. of Bifurcation&Chaos, 1996;6:367-375.
- Sprott J. C. ,“Some simple chaotic flows”; Phys. Rev. E 50, R647-R650, 1994.
- SUNDARAPANDIAN V., PEHLİVAN İ. “Analysis, Control, Synchronization and Circuit Design of a Novel Chaotic System”, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 55(7–8), 1904–1915, 2012
- Strizhak P.E. and Kawczynski A.L. , J. Phys. Chem. 99, 10830 (1995)
- T. Endo, L.O. CHUa, Chaos from Phase-Locked Loops- Part II: High Dissipation Case, IEEE Trans. Circuits&Systems, 1989;CAS-35:155-263.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Thomas R. Deterministic chaos seen in terms of feedback circuits: analysis, synthesis, 'labyrinth chaos'. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 9:1889{1905, 1999.
- R. Thomas, "Laws for the dynamics of regulatory networks", *Int. Dev. Biol.* 42, 479-485 (1996).
- Tomita K. and Kai T. *Phys. Letters* 66A 1978 Ueta, T. and Chen, G., "Bifurcation analysis of Chen's attractor"; *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol 10(8), pp. 1917-1931, 2000.
- Ueda Y., Randomly transitional phenomena in the system governed by Dufing's equation, *Journal of Statistical Physics*, 20, 181-196 (1979).
- Ueda, Y. *The Road to Chaos* (Aerial Press, SantaCruz, CA)1992.
- UYAROGLU Y., PEHLIVAN İ., "Nonlinear Sprott94 Case A Chaotic Equation: Synchronization and Masking Communication Applications", *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 36, Issue 6, 1093-1100, 2010
- Vanecek, A. and Celikovsky, S., "Control Systems: From Linear Analysis to Synthesis of Chaos"; Prentice-Hall, London, 1996.
- Yu, S., Lü, J., Tang, W. and Chen, G "A general multiscroll Lorenz system family and its realization via digital signal processors", *Chaos*, 16, 033126, 2006.
- WEI Z., PEHLIVAN İ., "Chaos, coexisting attractors, and circuit design of the generalized Sprott C system with only two stable equilibria", *Optoelectronics and Advanced Materials–Rapid Communications*, Vol.6, No. 7-8, p. 742–745, July-August 2012.
- Wu CW., Chua LO., A Simple Way to Synchronize Chaotic Systems with Applications to Secure Communication Systems, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 1993;3:1919-1627.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Oğuzhan ÖNAL

Doğum Yeri ve Tarihi : Polatlı 1975

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi

Yüksek Lisans Öğrenimi : Bilecik Şeyh Edebali Üni. Müh. Fak. Elektrik Elektronik Mühendisliği

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri :

İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar : Milli Eğitim Bakanlığı, Anadolu Üniversitesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

İletişim

Adres :Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulu
11210 - BİLECİK

Tel : 0 228 216 00 61

E-Posta Adresi : oguzhan.onal@bilecik.edu.tr

03 Ekim 2013

İmza