

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

**KAOTİK DEVRELER VE SİSTEMLERİN İNCELENMESİNE DÖNÜK
EĞİTİM SETLERİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**
Proje No: FBA-11-3548

BAP Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Recai KILIÇ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Doç. Dr. Enis GÜNAY
Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Arş. Gör. Nimet KORKMAZ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Mayıs 2014

KAYSERİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii

BÖLÜM 1

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti.....	1
1.2. Projenin Amacı	4

BÖLÜM 2

KAOTİK EĞİTİM SETLERİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ.....	7
2.1. Kaotik Eğitim Seti-1	7
2.1.1. Kaotik Eğitim Seti-1'deki Devreler için Simülasyon Çalışmaları.....	8
2.1.2. Kaotik Eğitim Seti-1 ile Yapılan Deney Çalışmaları.....	15
2.2. Kaotik Eğitim Seti-2	20
2.2. Kaotik Eğitim Seti-3	29
2.3.1. Kaotik Eğitim Seti-3'teki Devreler için Simülasyon Çalışmaları.....	31
2.3.2. Kaotik Eğitim Seti-3 ile Yapılan Deney Çalışmaları.....	34
2.3. Kaotik Eğitim Seti-4	38
2.4.1. Kaotik Eğitim Seti-4'teki Devreler için Simülasyon Çalışmaları.....	44
2.4.2. Kaotik Eğitim Seti-4 ile Yapılan Deney Çalışmaları.....	46

BÖLÜM 3

FPAa TABANLI KAOS EĞİTİM MODÜLÜ VE UYGULAMALARI	52
3.1. Alan Programlanabilir Analog Diziler ve Programlanabilir Kaotik Eğitim Modülü	52

3.2. Çoklu Nonlinear Fonksiyonlarla Modellenen Kaotik Sistemlerin FPAA ile Gerçekleştirimi	60
3.2.1. Genelleştirilmiş Chua Sistemi'nin FPAA ile Gerçekleştirilmesi.....	60
3.2.2. Sprott Sistemi'nin FPAA ile Gerçekleştirilmesi.....	63
3.2.3. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi'nin FPAA ile Gerçekleştirilmesi.....	66
3.2. Çok Çekerli (n-scroll) Kaotik Osilatörlerin FPAA ile Gerçekleştirimi.....	69
3.3. Hücresel Sinir Ağı (CNN) Tabanlı Kaotik Osilatörlerin FPAA ile Gerçekleştirimi.	72
3.4. Kaotik Sinir Ağı (KNN) Tabanlı Nöron Haberleşme Uygulamasının FPAA ile Gerçekleştirimi	78

BÖLÜM 4

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR.....	89

ÖZET

Kaos ve kaotik sistem dinamiklerine yönelik geçen son birkaç on yıllık süreç içerisinde çok büyük bir ilgi olduğu gözlenmektedir. Doğrusal olmayan ve kompleks bir davranış ya da kısaca düzensizliğin düzeni şeklinde tanımlanan kaos ve kaotik dinamiklerle ilgili teorik, simülasyon ve deneysel çalışmalar literatürde sıkça yer almıştır. Buna karşın kaotik sistemlerle ilgili yapılan çalışmaların çoğunlukla akademik düzeyde kaldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmaların çoğunluğunu daha çok lisansüstü araştırmalar oluşturmaktadır. Bu araştırmaların eğitim uzantısı olarak da gerek ulusal gerekse uluslararası bazı üniversiteler, lisansüstü eğitim programlarında doğrusal olmayan dinamikler ve kaos ile ilgili derslere yer vermektedirler.

Uygulama alanlarındaki görülen artış nedeniyle, kaotik sistemlerin ulusal ve uluslararası düzeyde lisans seviyesinde de tanıtılmasına, pratik uygulamalar ve laboratuvar programları ile mühendislik lisans ve lisansüstü öğrencilerinin bu sistemlerle uygulama yapabilme becerisine kavuşturulmasına ve bu doğrultuda sistematik bir şekilde tasarlanacak eğitim setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu projede, kaotik sistemlerle ilgili literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla, mühendislik lisans ve lisansüstü eğitim programlarında kaotik devreler ve sistemlerin araştırılmasına yönelik elektronik tabanlı yeni eğitim setlerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan proje çalışmalarında, eğitim setlerinin kullanılmasında pedagojik bir yaklaşımın sergilenmesi ve uygulamaların deneysel bir format çerçevesinde düzenlenmesi hedeflenmiştir.

Proje çalışmaları kapsamında; ilk olarak bu proje fikrine temel teşkil eden daha önce tarafımızca tasarlanmış iki adet prototip eğitim setinin tasarımı güncellenmiştir. Bu güncellemelerin ardından, literatürde kaotik sistemler için eğitim modeli olabilecek Sprott ve Lorenz Kaotik Sistemleri'nin tanıtılmasına yönelik, eğitim açısından fonksiyonelliğe sahip farklı iki kartın daha tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Birbirini tamamlayan bu dört adet kaotik eğitim setine ilaveten, analog moddaki kaotik sistemlerin ve uygulamalarının programlanabilir bir eğitim modülünde gerçekleştirilmesine dönük bir eğitim seti uygulaması da bu proje çalışması kapsamında yapılmıştır. Programlanabilir eğitim seti yaklaşımında, son yıllarda analog devre tasarımında yeni olanaklar sunan Alan Programlanabilir Dizi elemanı olan FPAA'lar kullanılmıştır. Geliştirilen programlanabilir kaotik eğitim modülü üzerinde farklı özelliklerdeki kaotik sistemler ve uygulamaları, ilave donanıma gereksinim duyulmadan programlanabilir ve yeniden konfigüre edilebilir bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Proje kapsamında yukarıdaki hedefler doğrultusunda gerçeklenen kaotik eğitim setlerinin tasarım etkinlikleri yapılan ayrıntılı deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Tasarım etkinlikleri kanıtlanan eğitim setlerinin pedagojik açıdan değerlendirilmesi ise özellikle lisansüstü düzeyindeki nonlineer sistemler ve kaos ile ilgili dersler kapsamında yapılmış olup, bu deneme dersleri sayesinde kartların eğitim amaçlı laboratuvar kullanımına dönük test çalışmaları da tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaos, Kaotik Devreler ve Sistemler, Kaotik Eğitim Seti, FPAA.

ABSTRACT

Over the last decade, chaos and chaotic dynamics have received a great deal of attention. The theoretical, experimental and simulation studies on chaos and chaotic dynamics, which are described as nonlinear and complex behaviors or order of disorderliness, are appeared in literature frequently. Despite to this, most of the studies on chaos are seem to be on graduate researches and stay on the academic level. About chaos training in engineering education, it can be seen from the literature that some lectures on nonlinear dynamics and chaos take part in the graduate education programs of some national and international universities.

Because of the increments in the application fields, it seems to be a necessity, to introduce the chaotic systems to undergraduate programs in national and international levels. Also it is needed to gain the ability of making practical applications and laboratory studies by chaos training sets, which are designed systematically, to the undergraduate students of engineering departments. In this project it is aimed to design and realize new electronic training sets, which are intended to the investigation of chaotic circuits and systems, to fill the emptiness in the field of chaotic system studies in graduate and undergraduate training programs in literature. In line with this objective, in the design of the chaos training sets, it is aimed to prepare the applications in an experimental shape and exhibit a pedagogic approach in the usage of the chaotic training sets.

In the content of project studies, first of all, two prototype training sets, which are the basis of this project and are designed before by us, are updated. After this update, the design and the production of two more electronic sets, which are Sprott and Lorenz Chaotic Systems that can be accepted as an educational model for chaos systems and has the functionality in educational manner in the literature, are realized. In addition to these four chaotic sets that complement each other, an educational training set application that is a realization of analog chaotic systems and applications in the programmable educational module, is performed as a part this project. Field programmable analog arrays (FPAA) that presents new opportunities in the field of analog circuit design in recent years, are used in the programmable training set approach. The programmable training set is realized as in reconfigurable manner and there is no need to add external equipment while performing the various chaotic systems and applications.

In this project the effectiveness of the chaotic training sets that are realized in line with these objectives mentioned above, are proved by the experimental studies. The pedagogical evaluations of these sets are performed in the graduate level lectures concerned with nonlinear systems and chaos. By means of these lectures the tests of these sets are completed successfully.

Keywords: Chaos, Chaotic Circuits and Systems, Chaotic Training Board, FPAA.

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Sprottt sistemi için nonlinearer fonksiyonlar ve parametre değerleri.	30
Tablo 2.2. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi.....	42
Tablo 3.1. AnadigmDesigner2 yazılımında kullanılan CAM Listesi.	54
Tablo 3.2. Chua sistemi için nonlinearer fonksiyonlar ve parametre değerleri.	60
Tablo 3.3. Chua Sistemi’nde farklı nonlinearer fonksiyonlar için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları.	62
Tablo 3.4. Sprottt sistemi için nonlinearer fonksiyonlar ve parametre değerleri.	63
Tablo 3.5. Sprottt Sistemi’nde farklı nonlinearer fonksiyonlar için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları.	65
Tablo 3.6. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi’ndeki osilatörlerin tanımlamaları ve FPAA gerçekleştirimi için düzenlenmiş denklem tanımlamaları.	66
Tablo 3.7. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları.	68
Tablo 3.8. PWL fonksiyonu tabanlı çok çekerli kaos üreticinin parametre değerleri.	70
Tablo 3.9. PWL fonksiyon tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştiriminde kullanılan parametre değerleri.	71
Tablo 3.10. CNN tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştiriminde kullanılan parametre değerleri.	77

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Prototip amaçlı tasarlanan Kaotik Eğitim Setleri, a) Kaotik eğitim seti-1, b) Kaotik Eğitim Seti-2.....	5
Şekil 2.1.	Üzerinde dokuz adet blok bulunan <i>Kaotik Eğitim Seti-1</i>	8
Şekil 2.2.	a) Lineer bir direncin, b) Lineer olmayan bir direncin (i,v) karakteristikleri. ...	9
Şekil 2.3.	a) VOA tabanlı Chua Diyotu devre yapısı, b) CFOA tabanlı Chua Diyotu devre yapısı, c) VOA tabanlı Chua diyotu simülasyon sonucu.	9
Şekil 2.4.	Otonom Chua Devresi.	10
Şekil 2.5.	Op-Amp'larla oluşturulan lineer olmayan direnç yapısı ile Chua Devresi'nin gerçekleştirilmesi.	10
Şekil 2.6.	VOA tabanlı Chua Devresi'nin $R=1667 \Omega$ değeri için elde edilen simülasyon sonuçları; a) V_{C1} , V_{C2} ve I_L dinamikleri, b) Çeker yapısı.	11
Şekil 2.7.	CFOA tabanlı Chua Devresi'nin açık devre şeması [61].	11
Şekil 2.8.	CFOA tabanlı Chua Devresi'nin $R=1667 \Omega$ değeri için elde edilen simülasyon sonuçları; a) V_{C1} , V_{C2} ve I_L dinamikleri, b) Çeker yapısı.	11
Şekil 2.9.	Otonom olmayan MLC Devresi.	12
Şekil 2.10.	MLC Devresinde Genlik Parametresinin (A) iki farklı değeri için kapasitör üzerinden alınan çıkışlar ve çeker görüntüleri; a) $A=0.075V$, b) $A=0.1V$	13
Şekil 2.11.	Karışık Modlu Kaotik Devre modeli ve devredeki lineer olmayan direnç yapısı.	13
Şekil 2.12.	Karışık Modlu Kaotik Devrenin dinamik analizi, a) Anahtarlama kontrol işareti, b) $V_{C1}(t)$ çıkışı, c) Çeker gösterimi.....	14
Şekil 2.13.	Wien köprü tabanlı KMKD devresi.	14
Şekil 2.14.	Karışık S1-OFF, S2-ON olduğu durumda Şekil 2.13'teki devrenin simülasyon sonuçları; a) Kaotik devre dinamikleri, b) Devredeki Çeker Gösterimi [61]..	15
Şekil 2.15.	a) VOA tabanlı Chua diyotu x: 2V/div, y:500mV/div, b) CFOA-tabanlı Chua diyotu x: 2V/div, y: 500mV/div.	16
Şekil 2.16.	<i>Kaotik Eğitim Seti-1</i> üzerinde Chua Devresi'nin oluşturulabilmesi için yapılan örnek bir bağlantı şekli.	17
Şekil 2.17.	Chua Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{C1} ve V_{C2} için zaman domeni gösterimi: x:2V/div, y:1V/div, Time/div: 1ms; b) $V_{C1}-V_{C2}$ için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 500mV/div.....	18

Şekil 2.18.	<i>Kaotik Eğitim Seti-1</i> üzerinde MLC Devresi'nin oluşturulabilmesi için yapılan örnek bir bağlantı şekli.	19
Şekil 2.19.	MLC Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{C1} ve V_{L2} için zaman domenini gösterimi: x:2V/div, y:2V/div, Time/div: 250µs; b) V_{C1} - V_{L2} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 1V/div.....	19
Şekil 2.20.	<i>Kaotik Eğitim Seti-1</i> üzerinde KMKD'lerin oluşturulabilmesi için yapılan örnek bir bağlantı şekli.	20
Şekil 2.21.	a) Şekil 2.20'deki düzenerle elde edilen KMKD dinamiği ve anahtarlama işareti, b) Sırasıyla V_{C1} ve V_{C2} için zaman domenini gösterimi: x:5V/div, y:1V/div, Time/div: 1ms; b) V_{C1} - V_{C2} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 500mV/div.....	20
Şekil 2.22.	Üzerinde beş adet blok bulunan <i>Kaotik Eğitim Seti-2</i>	21
Şekil 2.23.	<i>Kaotik Eğitim Seti-2</i> 'deki Rössler Devresi'ne ait bir devre şeması.	22
Şekil 2.24.	Rössler Devresi'ne ait simülasyon sonuçları a) Sırasıyla V_{C1} ve V_{C2} için zaman domenini gösterimi; b) V_{C1} - V_{C2} için faz uzayı gösterimi.	22
Şekil 2.25.	Rössler Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{C2} ve V_{C3} için zaman domenini gösterimi: x:2V/div, y:1V/div, Time/div: 2.5ms; b) V_{C2} - V_{C3} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 500mV/div.....	23
Şekil 2.26.	Klasik Wien Köprü osilatörü devre şeması.....	23
Şekil 2.27.	Wien Köprü tabanlı kaotik osilatörün devre şeması.	24
Şekil 2.28.	Wien Köprü tabanlı kaotik osilatör devresine ait simülasyon sonuçları a) Sırasıyla V_{01} ve V_{02} için zaman domenini gösterimi; b) V_{02} - V_{01} için faz uzayı gösterimi.....	24
Şekil 2.29.	Wien Köprü tabanlı kaotik osilatör devresine ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{01} ve V_{02} için zaman domenini gösterimi: x:2V/div, y:500mV/div, Time/div: 100µs; b) V_{02} - V_{01} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 1V/div.....	25
Şekil 2.30.	Kaotik RLD devresi.....	25
Şekil 2.31.	Kaotik RLD Devresi'ne ait simülasyon sonuçları a) Sırasıyla V_{in} ve V_{out} için zaman domenini gösterimi; b) V_{out} - V_{in} için faz uzayı gösterimi.....	26
Şekil 2.32.	Kaotik RLD Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{in} ve V_{out} için zaman domenini gösterimi: x:10V/div, y:500mV/div, Time/div: 2.5µs; b) V_{out} - V_{in} için faz uzayı gösterimi, x: 5V/div, y: 500mV/div.....	26
Şekil 2.33.	Transistör tabanlı kaotik devre.....	27

Şekil 2.34.	Transistör tabanlı kaotik devreye ait simülasyon sonuçları a) V_{C1} için zaman domeni gösterimi; b) $V_{C1}-V_{AC}$ için faz uzayı gösterimi.....	27
Şekil 2.35.	Transistör tabanlı kaotik devreye ait deney sonuçları a) V_{C1} ve V_{AC} için zaman domeni gösterimi: x:2V/div, y:10V/div, Time/div: 250µs; b) $V_{C1}-V_{AC}$ için faz uzayı gösterimi, x: 2V/div, y: 5V/div.....	27
Şekil 2.36.	Kaotik Colpitts Osilatörü'ne ait devre şeması.....	28
Şekil 2.37.	Kaotik Colpitts osilatörüne ait simülasyon sonuçları a) V_{C1} için zaman domeni gösterimi; b) $V_{C2}-V_{C1}$ için faz uzayı gösterimi.	29
Şekil 2.38.	Kaotik Colpitts osilatörüne ait deney sonuçları a) V_{C1} ve V_{C2} için zaman domeni gösterimi: x:5V/div, y: 2V/div, Time/div: 25µs; b) $V_{C2}-V_{C1}$ için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 1V/div.....	29
Şekil 2.39.	<i>Kaotik Eğitim Seti-3</i>	30
Şekil 2.40.	Denklem 2.7 ile tanımlanan Sprot sistemi için önerilen temel devre yapısı...	31
Şekil 2.41.	Tablo 2.1'de Denklem 2.7.1 ile tanımlanan nonlinear fonksiyon için a) Önerilen temel devre yapısı, b) Dc karakteristik, c) Nümerik simülasyon sonucu.....	32
Şekil 2.42.	Tablo 2.1'de Denklem 2.7.2 ile tanımlanan nonlinear fonksiyon için a) Önerilen temel devre yapısı, b) Dc karakteristik, c) Nümerik simülasyon sonucu.....	32
Şekil 2.43.	Tablo 2.1'de Denklem 2.7.3 ile tanımlanan nonlinear fonksiyon için a) Önerilen temel devre yapısı, b) Dc karakteristik, c) Nümerik simülasyon sonucu.....	33
Şekil 2.44.	<i>Kaotik Eğitim Seti-3</i> 'te bulunan kaotik işaretlerin frekans değişimlerini ele alan yapıya ait simülasyon sonuçları: a) kapasitörlerin normal değerleri için, b) kapasitörlerin 10 kat küçültüldüğü değerler için, c) kapasitörlerin 100 kat küçültüldüğü değerler için.....	34
Şekil 2.45.	<i>Kaotik Eğitim Seti 3</i> 'teki Nonlinear Devre Bloklarının dc karakteristiklerine ait deneysel sonuçlar: a) Nonlinear Devre Bloğu-1'in dc karakteristiği, b) Nonlinear Devre Bloğu-2'nin dc karakteristiği, c) Nonlinear Devre Bloğu-3'ün dc karakteristiği.	35
Şekil 2.46.	Nonlinear Devre Bloğu-1 ana devreye bağlıyken elde edilen deney sonuçları: a) Periyot 2'ye ait zaman domeni gösterimi x:5V/div, y:500mV/div, Time/div: 2.5ms; b) Faz portresi gösterimi x:2V/div, y:200mV/div; c) Kaotik davranış	

	için zaman domeni gösterimi x:5V/div, y:200mV/div, Time/div: 2.5ms; d) faz domeni gösterimi x:1V/div, y:100mV/div.	36
Şekil 2.47.	Nonlinear Devre Bloğu-2 ana devreye bağlıken elde edilen deney sonuçları: a) Periyot 2'ye ait zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 1ms; b) Faz portresi gösterimi x:1V/div, y:100mV/div; c) Kaotik davranış için zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 2.5ms; d) faz domeni gösterimi x:1V/div, y:100mV/div.	36
Şekil 2.48.	Nonlinear Devre Bloğu-3 ana devreye bağlıken elde edilen deney sonuçları: a) Periyot 2'ye ait zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 500µs; b) Faz portresi gösterimi x:1V/div, y:100mV/div; c) Kaotik davranış için zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 1ms; d) faz domeni gösterimi x:1V/div, y:100mV/div.	37
Şekil 2.49.	<i>Kaotik Eğitim Seti-3</i> 'te bulunan kaotik işaretlerin frekans değişimlerini ele alan yapıya ait deney sonuçları: a) kapasitörlerin normal değerleri için; x:2V/div, y: 200mV/div, Time/div: 2.5ms; b) kapasitörlerin 10 kat küçültüldüğü değerler için; x:500mV/div, y:200mV/div, Time/div: 250µs; c) kapasitörlerin 100 kat küçültüldüğü değerler için; x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 25µs.	38
Şekil 2.50.	<i>Kaotik Eğitim Seti-4</i>	43
Şekil 2.51.	Denklem 2.8 ile tanımlanan Lorenz Sistemi'ne ait; a)Devre gerçekleştirimi, b) Bu devreye ait simülasyon sonucu.	45
Şekil 2.52.	Denklem 2.17 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-1'e ait; a)Devre gerçekleştirimi, b) Bu devreye ait simülasyon sonucu.	45
Şekil 2.53.	Denklem 2.16 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-2'ye ait; a)Devre gerçekleştirimi, b) Bu devreye ait simülasyon sonucu.	46
Şekil 2.54.	<i>Kaotik Eğitim Seti-4</i> 'te Lorenz Sistemi'nin oluşturulabilmesi için yapılan bağlantılar.	48
Şekil 2.55.	Lorenz Sistemi'ne ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: x:500mV/div, y:200mV/div, Time/div: 1ms; b) x-z için faz uzayı gösterimi, x: 100mV/div, y: 200mV/div.	48
Şekil 2.56.	<i>Kaotik Eğitim Seti-4</i> 'te Modifiye Lorenz Sistemi-I'in oluşturulabilmesi için yapılan bağlantılar.	49
Şekil 2.57.	Modifiye Lorenz Sistemi-I'e ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: x:200mV/div, y:500mV/div, Time/div: 1ms; b) x-z için faz uzayı gösterimi, x: 200mV/div, y: 500mV/div.	49

Şekil 2.58.	<i>Kaotik Eğitim Seti-4</i> 'te Modifiye Lorenz Sistemi-II'nin oluşturulabilmesi için yapılan bağlantılar.	50
Şekil 2.59.	Modifiye Lorenz Sistemi-II'ye ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: $x:1V/div$, $y:1V/div$, Time/div: 500 μs ; b) x - z için faz uzayı gösterimi, $x: 500mV/div$, $y: 500mV/div$	51
Şekil 3.1.	a) FPAA eğitim bordu için oluşturulan deney düzeneği, b) FPAA'nın içyapısı....	53
Şekil 3.2.	FPAA tabanlı gerçekleştirimler için akış diyagramı.	55
Şekil 3.3.	a) Denklem 3.1'deki Chua denklemlerinin SIMULINK programındaki nümerik analizi, b) x , y ve z durum değişkenleri için nümerik çözüm sonuçları, c) x - y faz uzayı gösterimi.	56
Şekil 3.4.	a) Denklem 3.3'teki ölçeklendirilmiş Chua denklemlerinin nümerik analiz sonuçları, a) x , y ve z durum değişkenleri, b) x - y faz uzayı gösterimi.	57
Şekil 3.5.	Chua Devresi'nin FPAA gerçekleştirim şeması.	59
Şekil 3.6.	Devrenin FPAA'e aktarılması için gereken düzenek.	59
Şekil 3.7.	FPAA tabanlı Chua Devresi'ne ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: $x: 1V/div$, $y: 1V/div$, Time/div: 1ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 1V/div$, $y: 500mV/div$	60
Şekil 3.8.	Chua Sistemi'nde Tablo 3.2'deki nonlinear denklemlerin değişmesi ile; a) $f(x)=bx+0.5\cdot(a-b)\cdot(x+c - x-c)$, b) $f(x)=h_1x-h_2x^3$, c) $f(x)=-\alpha\cdot\tanh(bx)$, d) $f(x)=d_1x+d_2\cdot x\cdot x $ nonlinear fonksiyonlarının kullanıldığı durumlar için elde edilen nümerik sonuçlar.	61
Şekil 3.9.	a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500mV/div$, $y:200mV/div$, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200mV/div$, $y: 200mV/div$	62
Şekil 3.10.	a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:1V/div$, $y:200mV/div$, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 500mV/div$, $y: 100mV/div$	62
Şekil 3.11.	a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500mV/div$, $y:100mV/div$, Time/div: 10ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 100mV/div$, $y: 100mV/div$	62
Şekil 3.12.	Sprott Sistemi'nde Tablo 3.4'teki nonlinear denklemlerin değişmesi ile; a) $f(x)= x -r$, b) $f(x)=-Bx+Csgn(x)$, c) $f(x)=B((x^2/C)-C)$, d) $f(x)=Bx((x^2/C)-1)$, e) $f(x)=-Bx((x^2/C)-1)$, f) $f(x)=-B[x-2\tanh((Cx)/C)]$ nonlinear fonksiyonlarının kullanıldığı durumlar için elde edilen nümerik sonuçlar.	64
Şekil 3.13.	a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500mV/div$, $y:500mV/div$, Time/div: 10ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200V/div$, $y: 500mV/div$	65

Şekil 3.14. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, Time/div: 10ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 500\text{mV/div}$	65
Şekil 3.15. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, Time/div: 10ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$	65
Şekil 3.16. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$	65
Şekil 3.17. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 500\text{mV/div}$	65
Şekil 3.18. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemine dâhil a) Lorenz, b) Chen, c) Lü-Chen, d) Lorenz Benzeri, e) Yeni Kaotik sistemleri için nümerik analiz sonuçları.	67
Şekil 3.19. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:200\text{mV/div}$, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$	68
Şekil 3.20. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:200\text{mV/div}$, $y:200\text{mV/div}$, Time/div: 2.5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 100\text{mV/div}$, $y: 100\text{mV/div}$	68
Şekil 3.21. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:200\text{mV/div}$, Time/div: 1ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 500\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$	68
Şekil 3.22. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:200\text{mV/div}$, $y:100\text{mV/div}$, Time/div: 10ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 100\text{mV/div}$, $y: 100\text{mV/div}$	68
Şekil 3.23. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:1\text{V/div}$, $y:500\text{mV/div}$, Time/div: 2ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, $x: 500\text{mV/div}$, $y: 500\text{mV/div}$	68
Şekil 3.24. PWL fonksiyonu tabanlı çok çekerli kaos üretici için nümerik analiz sonuçları.	70
Şekil 3.25. Çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştirim şeması.....	71
Şekil 3.26. FPAA elemanı kullanılarak gerçekleştirilen a) $n=3$, b) $n=4$, c) $n=5$, d) $n=6$, e) $n=7$ çekerli kaotik işaret üreticisine ait deney sonuçları.	72
Şekil 3.27. Temel CNN hücresinin blok gösterimi.....	73
Şekil 3.28. Temel hücresel sinir ağı modeli.....	74
Şekil 3.29. Chua devresinin üç CNN hücresi kullanılarak modellenmesi.....	74
Şekil 3.30. CNN tabanlı a) $n=2$, b) $n=3$, c) $n=4$, d) $n=5$, e) $n=6$, f) $n=7$ çok çekerli kaos üretici için nümerik analiz sonuçları.	76
Şekil 3.31. CNN tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştirim şeması. .	76
Şekil 3.32. FPAA elemanı kullanılarak gerçekleştirilen a) $n=2$, b) $n=3$, c) $n=4$, d) $n=7$ CNN tabanlı kaotik işaret üreticisine ait deney sonuçları.	77
Şekil 3.33. Kaotik nöron modelinin kavramsal blok diyagramı.	78
Şekil 3.34. İki nöron arasındaki etkileşimin sembolik blok diyagramı [115]	80

Şekil 3.35. İki kaotik nöronun etkileşiminde, a) a parametresi değişken, $c=0$ için, b) c parametresi değişken $a=1$, durumu için dallanma diyagramları.	80
Şekil 3.36. Etkileşimli iki nöron arasındaki ilişki için oluşturulmuş bir yapının, a) $w_{21}=0$, b) $w_{21}=0.01$ için, c) $w_{21}=0.1$ için, d) $w_{21}=1$ değerleri için dallanma diyagramları.	81
Şekil 3.37. PWL-N kaotik nöron ağ yapısının $\alpha=0.65$ değerinde, a) $w_{21}=0.01$, b) $w_{21}=0.1$, c) $w_{21}=0.5$, d) $w_{21}=1$ değerleri için nümerik simülasyon sonuçları.	82
Şekil 3.38. PWL-N Kaotik Nöral Ağ Yapısı'nın FPAA gerçekleştirim şeması.....	84
Şekil 3.39. PWL-N Kaotik Nöron Modeli için oluşturulan deneysel düzenek.....	84
Şekil 3.40. PWL-N Kaotik Nöral Ağ Yapısının FPAA tabanlı gerçekleştirimi için deney sonuçları.	85
Şekil 4.1. CNN tabanlı kaotik devre için ürettirilen prototip kartlar.	87
Şekil 4.2. a) Kaotik Eğitim Seti-3, b) Kaotik Eğitim Seti-4 için ürettirilen prototip kartlar.	88

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Nükleer fizik, lazer optiği, katı hal fiziği, biyoloji ve tıp, elektrik-elektronik mühendisliği, makine ve kimya mühendisliği gibi disiplinlerde ortaya çıkan ve kompleks davranış olarak nitelendirilip kısaca düzensizliğin düzeni şeklinde tanımlanan kaos olayına ve kaotik sistem dinamiğine yönelik geçen on yıl içerisinde çok büyük bir ilgi olmuştur. Kaos ve komplekslikle ilgili gözlemlere paralel olarak, bu olayın mekanizmasının anlaşılması, kaotik davranışın nitelendirilmesi, deneysel verilerin ölçülmesi ve analizinin yapılması ile ilgili araştırmalarda çok hızlı gelişmeler kaydedilmiştir [1-6]. Dinamik sistemlerdeki kaotik davranış fikri matematik literatürüne daha önce girmiş olmasına rağmen, fizik bilimlerinde bu alışık olmadık davranış 1970’li yıllara kadar tuhaf olarak tanımlanıyordu [2]. Günümüzde kaos, başlangıç şartlarına hassas bağıllıkla karakterize edilen, bir deterministik dinamik sistemde sınırlı yinelenen bir hareket olarak sınıflandırılmaktadır. Kaotik sistemler, başlangıç şartlarına hassas bağıllığa ilaveten, zaman domeninde düzensiz salınımlı, gürültü benzeri geniş bir sahaya yayılmış güç spektrumlu ve sistem yapısındaki değişim parametreleri ile periyodik, katlı periyodik ve periyodik olmayan kaotik dinamiklere sahip olma gibi özelliklere sahiptir. Kaotik sistemler frekans domeninde tek tonlu olmayıp, geniş bandlı bir özellik gösterirler. Yani kaotik işaret gücü periyodik işaretlerde olduğu gibi tek bir frekans değerinde yoğunlaşmayıp frekans ekseninde geniş bir bölgeye dağılır. Kaotik sistemlerin çok karmaşık olmayan devre yapılarına sahip olmalarına rağmen, bu derece ilginç özelliklere sahip olmaları, son 15 yılda kaotik sistemlere olan ilgiyi arttırmıştır. Değişik bilim dalları ve mühendisliğin hemen hemen bütün dallarında kaos varlığının ortaya konması, konuyla ilgili yapılan yoğun çalışmalar ve beraberinde yaşanan gelişmeler kaos ve kaotik sistemlerle ilgili bir çok uygulama alanının

oluşmasına yol açmıştır. Kaos ve kaotik sistemlerle ilgili oluşan olası uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir [3]:

- Kaotik paralel dağılımlı isleme,
- Deterministik lineer olmayan tahmin,
- Kimliklendirme ve lineer olmayan sistemlerin modellenmesi,
- Lineer olmayan filtreleme,
- Biyomedikal ve tıbbi uygulamalar,
- Dinamik bilgi sıkıştırma ve kodlama,
- Kaotik güvenilir haberleşme,
- Hassas desen tanıma,
- Kaotik dinamiklerin müzik ve sanat amaçlı kullanımı,
- Kaotik salınımların yapay olarak oluşturulması,
- Kaotik sistemlerin elektronik, optik ve optoelektronik olarak gerçekleştirimi,
- Kaotik titreşim ve osilasyonların belirlenmesi ve kontrol edilmesi.

Elektronik devrelerde DC denge noktası ve periyodik kararlı hal çözümleri elektronik teknolojisinin gelişmeye başladığı 1920’li yıllardan itibaren doğru bir şekilde tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır. Buna karşın elektronik devrelerdeki kompleks ve lineer olmayan davranışlar, özellikle kaos olayının varlığı, son 30 yıl içerisinde anlaşılabilmiştir. Bilim tarihi boyunca elektrik ve elektronik devrelerle gerçekleştirilen pek çok deneysel düzenekte kompleks ve lineer olmayan sistem davranışları gözlenmiş, fakat bunların kavramsal olarak tanımı yapılamadığı için bu tip gözlemler hep göz ardı edilmiş ve incelemeye değer bulunmamıştır. Bunun en çarpıcı örneği Hollanda’lı ünlü elektrik mühendisi ve fizikçisi Van der Pol tarafından harici kaynakla sürülen bir neon lamba osilatörü üzerinde yapılan deneysel çalışma olmuştur. Van der Pol 1927 yılında Nature Magazine adlı dergide [7] çıkan makalesinde bu devrenin çalışması sırasında sık sık düzensiz bir gürültü gözlendiğini belirterek, buna bir anlam verememiş ve üzerinde inceleme yapmaya değer görmemiştir. Çok daha sonraları gürültü olarak algılanan bu ve benzeri davranışların kaotik bir devre dinamiği olduğu anlaşılabilecektir [8,9]. Elektronik devrelerde kaosun deneysel olarak ilk gözlemleri, otonom olmayan ve harici bir kaynakla sürülen lineer olmayan osilatör devrelerinde olmuştur. Bu osilatör devreleri; Van der Pol & Van der Mark [7] ile Kennedy & Chua [9] tarafından çalışılan sinüzoidal bir kaynakla uyarılan neon lamba osilatörü, Ueda & Akamatsu [10] tarafından geliştirilen zorlamalı negatif dirençli osilatör ve yine harici bir kaynakla sürülen

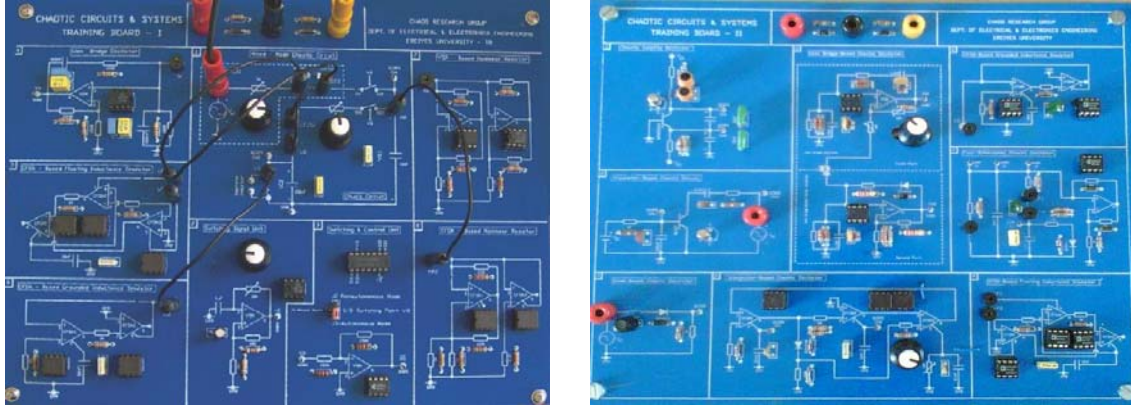
seri bağılı direnç, indüktör ve diyot kombinasyonundan oluşan osilatör devresidir [11,12]. Son 10-15 yılda yapılan çalışmalarda ise basit RLC ve RC devreleri [13-20], özellikle Van der Pol ve Duffing denklemleri ile tanımlanan değişik tipteki osilatörler [21], anahtarlama kapasitör devreleri [22], PLL'li yapılar [23], sayısal filtreler [24], adaptif filtreler [25] ve güç devreleri [26-28] gibi pek çok elektronik devre ve sistemin de kaotik davranış sergilediği ortaya konmuştur. Bu yapılardan özellikle güç devrelerinde anahtarlama mekanizmasından yararlanarak sistem kaotik moda dönüştürülmektedir. Bu yapılara ilaveten yapısındaki anahtarlama mekanizması ile hem otonom hem de otonom olmayan kaotik devre dinamiklerini üretebilme kapasitesine sahip kaotik devre modeli de tarafımızca literatüre kazandırılmıştır [29]. Kaos kavramının ve kaotik sistem özelliklerinin ortaya konmasıyla literatürde kaos olayıyla ilgili çalışmalar iki ana bölümde odaklanmıştır. Bunlardan ilki, kaosun ve kaotik davranışın olumsuz olarak algılandığı ve bu tür davranışların görülmemesi arzulanan sistem yapılarında kaotik kontrol çalışmalarıdır [30]. Literatürde bu konuda çok sayıda çalışma yapılmış olup bu çalışmalarda, kaotik osilasyonları bastırmak, sistem davranışını dc bir denge noktasına ya da sistem yapısındaki mevcut periyodik davranışlardan birine kaydırmak amacıyla değişik kontrol mekanizmaları ve algoritmaları geliştirilmiştir [31-35]. Kaos ve kaotik sistem dinamiği ile ilgili diğer bir çalışma alanı ise; bu derece ilginç özelliklere sahip kaotik işaretler ve sistemlerden olumlu yönde yararlanma fikri doğrultusunda yapılan çalışmalar olmuştur [1]. Bu çalışmalar özellikle kaotik işaretlerin ve sistemlerin senkronizasyonu ile bu senkronize kaotik sistemlerin güvenilir ve gizli haberleşme amaçlı tasarım ve uygulamalarda kullanılabilme olasılığını kapsamaktadır. Özellikle son on yılda kaotik sistemlerin senkronizasyonu ve senkronize kaotik sistemlerin güvenilir haberleşme amaçlı kullanımı ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır [36-42]. Yapısında anahtarlama mekanizması bulunan kaotik sistemlerle ilgili senkronizasyon çalışmalarında bu devre yapılarının dijital verilerin kaotik ortamda gönderilmesi ele alınmıştır [43-44].

Günümüz bilim ve teknoloji alanında önemli bir yer edinmesi beklenen, bir çok bilim disiplininde uygulama alanı bulan kaos ve kaotik sistemlerin fiziksel olarak pratik hayata geçirilmesinde kaotik devreler ve sistemlerin önemli rolü vardır. Fakat, literatürde yukarıda özetlenmeye çalışıldığı gibi kaotik devreler ve sistemlerle ilgili son yıllarda çok yoğun çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, bu çalışmaların niteliklerine bakıldığında çoğunun akademik bazda ve lisansüstü düzeyinde olduğu görülmektedir [45-55]. Son yıllarda ulusal ve uluslararası bazı üniversitelerin özellikle lisansüstü eğitim programlarında bu konuya

dönük derslere yer verdikleri görülmekle beraber bu derslerin içerikleri genelde teorik ve bilgisayar benzetimlerine dayalı olup, pratik anlamda uygulama eksikliği vardır. Ulusal bazda örneklendirilecek olursa İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü’nde lisansüstü seviyede “Doğrusal Olmayan Devreler ve Sistemler” dersi verilirken, yine lisansüstü öğrencilerine yönelik olarak Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde “Doğrusal Olmayan Dinamikler ve Sistem Modelleme” dersi okutulmaktadır. Uluslar arası düzeyde ise birçok önde gelen üniversite akademik araştırma merkezi bu duruma örnek olarak gösterilebilir. Nitekim Avrupa’da önde gelen eğitim merkezlerinden birisi olan École Polytechnique Fédérale De Lausanne üniversitesi, bünyesinde faaliyet gösteren Laboratory of Nonlinear Systems (LANOS) laboratuvarı ile kaotik sistemlerin sadece mühendislik alanında değil bilimin birçok dalında uygulama ve araştırılmasına yönelik çalışmaları yürüten bir merkez konumundadır. Bu merkezde okutulan bazı ders isimleri olarak Nonlinear Dynamics in Circuits and Systems, Nonlinear Systems Modelling and Identification, Applications of Chaos in Engineering sayılabilir. Doğrusal olmayan sistemler ve kaos üzerine çalışmalar yürüten bir diğer merkez olarak Georgia Institute of Technology üniversitesi Center for Nonlinear Science araştırma merkezi ve bu merkezde verilen bazı ders örnekleri Nonlinear Dynamics and Chaos, Spatiotemporal Dynamics and Pattern Formation şeklindedir. Erciyes Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği bünyesinde de konuyla ilgili lisans ve lisansüstü eğitime yönelik dersler ve araştırma çalışmaları yürütülmektedir. “Lineer Olmayan Devreler ve Sistemler” dersi lisans seviyesinde seçmeli bir ders olarak son sınıf öğrencilerine okutulurken, “Lineer Olmayan Elektronik Devreler ve Kaos”, “Kaotik Sistemler ve Elektronik Devre Uygulamaları”, “Dinamik Sistemler ve Kaos”, “Dinamik Sistemlerin Bilgisayar Benzetimli Uygulamaları” dersleri ise lisansüstü öğrencilerine yöneliktir. Kaotik sistemlerin araştırılmasına yönelik Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümümüzde Lineer Olmayan Devreler ve Sistemler Laboratuvarı (Nonlinear Circuits and Systems Laboratory-NCSL) kurulmuştur.

1.2. Projenin Amacı

Günlük hayatta uygulama alanlarındaki görülen artış nedeniyle, kaotik sistemlerin ulusal ve uluslararası düzeyde lisans ve lisansüstü seviyesinde tanıtılmasına, pratik uygulamalar ve laboratuvar programları ile mühendislik lisans ve lisansüstü öğrencilerinin bu sistemlerle uygulama yapabilme becerisine kavuşturulmasına ve bu doğrultuda sistematik bir şekilde



(a)

(b)

Şekil 1.1. Prototip amaçlı tasarlanan Kaotik Eğitim Setleri, a) Kaotik eğitim seti-1, b) Kaotik Eğitim Seti-2.

tasarlanacak eğitim setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıda bahsedilen araştırma çalışmaları kapsamında bu proje fikrine temel teşkil eden kaotik sistemlerin tanıtılmasına dönük örnek teşkil edebilecek prototip amaçlı iki eğitim seti tasarımı hazırlanmıştı [56]. Bu eğitim setlerine ait bir fotoğraf Şekil 1.1’de görülmektedir. *Kaotik Eğitim Seti-1* üzerinde sekiz adet devre bloğu bulunmaktadır. Bu bloklar şu şekilde listelenmektedir: 1- Karışık Modlu Kaotik Devre (KMKD) Kısmı, 2- Anahtarlamalı Sinyal Ünitesi-Kare Dalga Üreteci 3- Anahtarlama & Kontrol Ünitesi 4- Wien-Köprü Osilatör, 5- (CFOA) Tabanlı Topraksız İndüktans Simülatörü, 6- (CFOA) Tabanlı Topraklı İndüktans Simülatörü 7- Voltaj modlu İşlemsel Kuvvetlendirici (VOA) Tabanlı Lineer Olmayan Direnç, 8- CFOA Tabanlı Lineer olmayan Direnç (NR2). *Kaotik Eğitim Seti-2* üzerinde de sekiz devre bloğu bulunmaktadır. Bu bloklar aşağıdaki şekilde adlandırılmıştır: 1- Kaotik Colpitts Osilatör, 2- Transistör-Tabanlı Kaotik Osilatör, 3- Kaotik RLD Osilatörü, 4- Kaotik Wien-Köprü Osilatörü, 5- İntegratör-Tabanlı Kaotik Osilatör, 6- (CFOA) Tabanlı Topraksız İndüktans Simülatörü, 7- 4 Boyutlu (4D) Kaotik Osilatör, 8- (CFOA) Tabanlı Topraklı İndüktans Simülatörü.

Bu setlerin nonlinear sistemler ve kaos ile ilgili eğitim ve araştırma çalışmalarında olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu eğitim setlerinin kullanılmasıyla elde edilen geribildirimler ve öneriler dikkate alınarak mevcut eğitim setlerinin güncellenip geliştirilmesi ve set sayısı olarak da en azından 5 farklı kaotik eğitim seti tasarımı ve gerçekleştirimi projenin temel odak noktası olmuştur.

Proje çalışmaları kapsamında; ilk olarak bu proje fikrine temel teşkil eden daha önce tarafımızca tasarlanmış iki adet prototip eğitim setinin tasarımı güncellenmiştir. Bu güncellemelerin ardından, literatürde kaotik sistemler için eğitim modeli olabilecek Sprott ve

Lorenz Kaotik Sistemleri'nin tanıtılmasına yönelik, eğitim açısından fonksiyonelliğe sahip farklı iki kartın daha tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Birbirini tamamlayan bu dört adet kaotik eğitim setine ilaveten, analog moddaki kaotik sistemlerin ve uygulamalarının programlanabilir bir eğitim modülünde gerçekleştirilmesine dönük bir eğitim seti uygulaması da bu proje çalışması kapsamında yapılmıştır. Programlanabilir eğitim seti yaklaşımında, son yıllarda analog devre tasarımında yeni olanaklar sunan Alan Programlanabilir Dizi elemanı olan FPAA'lar kullanılmıştır. Geliştirilen programlanabilir kaotik eğitim modülü üzerinde farklı özelliklerdeki kaotik sistemler ve uygulamaları, ilave donanıma gereksinim duyulmadan programlanabilir ve yeniden konfigüre edilebilir bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Proje kapsamında yukarıdaki hedefler doğrultusunda gerçekleştirilen kaotik eğitim setlerinin tasarım etkinlikleri yapılan ayrıntılı deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Tasarım etkinlikleri kanıtlanan eğitim setlerinin pedagojik açıdan değerlendirilmesi ise özellikle lisansüstü düzeyindeki nonlineer sistemler ve kaos ile ilgili dersler kapsamında yapılmış olup, bu deneme dersleri sayesinde kartların eğitim amaçlı laboratuvar kullanımına dönük test çalışmaları da tamamlanmıştır. Bir sonraki bölümde tasarım ve gerçekleştirimi yapılan kaotik eğitim setleri ayrıntılı şekilde tanıtılacak ve uygulama örnekleri verilecektir.

BÖLÜM 2

KAOTİK EĞİTİM SETLERİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

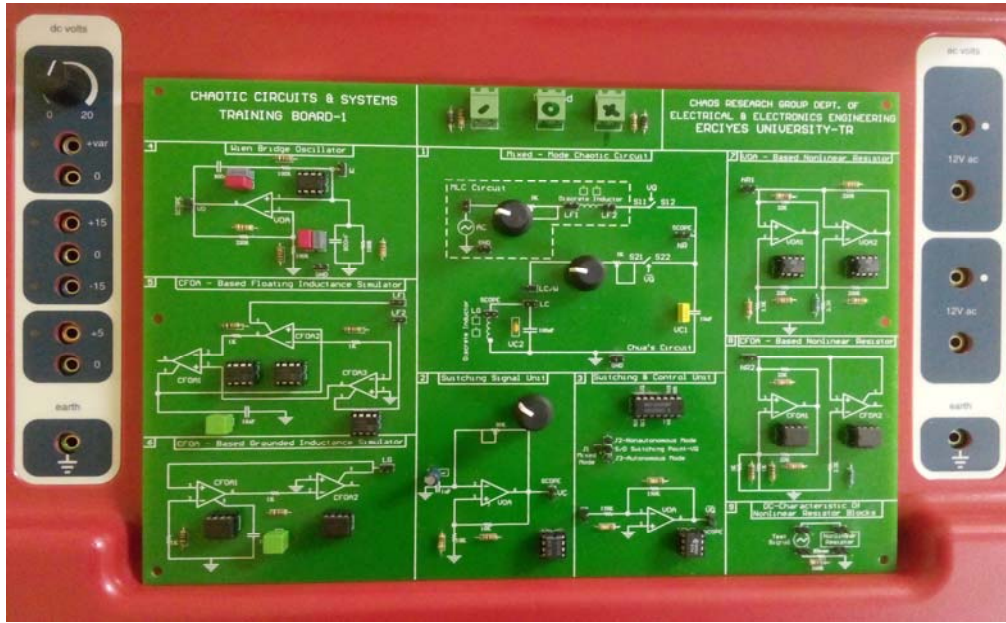
Çalışmanın bu bölümünde çeşitli kaotik sistemlerin incelenmesine imkân sağlayan dört eğitim kartının tasarım ayrıntıları, açık devre yapıları, simülasyon sonuçları, eğitim setlerinin tasarlanma süreçleri ve elde edilen deneysel sonuçlar sunulacaktır.

2.1. Kaotik Eğitim Seti-1

Kaotik eğitim Seti-1'de literatürde sıklıkla çalışılan Chua diyoduna dayalı kaotik osilatör yapıları incelenmektedir. Bu eğitim setiyle yapılabilecek deneylerin içeriğinde;

- a) Chua diyodunun nonlineer karakteristiğini gözlemleyebilmek için VOA ve CFOA tabanlı iki ayrı gerçekleştirim,
- b) Otonom kaotik osilatör yapılarına örnek olması açısından Chua Devresi,
- c) Otonom olmayan kaotik osilatör yapılarına örnek olması açısından MLC Devresi,
- d) Otonom ve otonom olmayan yapının eş zamanlı kullanılabildiği KMKD,
- e) KMKD yapısında kullanılan kare dalgaının temini için üreteç kısmı; kontrolü için ise anahtarlama birimleri, KMKD devresindeki LC rezonatörü yerine Wien köprü tabanlı RC konfigürasyonu
- f) Chua Devresi, MLC Devresi ve KMKD'de kullanılan bobinlerin temini için CFOA tabanlı gerçekleştirilen iki ayrı indüktans simülatörü devresi bulunmaktadır.

Şekil 1.1'de ilk prototip fotoğrafı verilen bu *Kaotik Eğitim Seti-1* kartı, Şekil 2.1'de görüldüğü üzere tasarımı güncellenmiş ve ilave nonlineer test bloğu ile birlikte gerçekleştirimi yapılmıştır. Güncellenen bu eğitim setinde, yukarıda özetlenen işlevleri yapan sekiz adet temel devre bloğu bulunmaktadır. Bu bloklar aşağıda listelenmektedir:



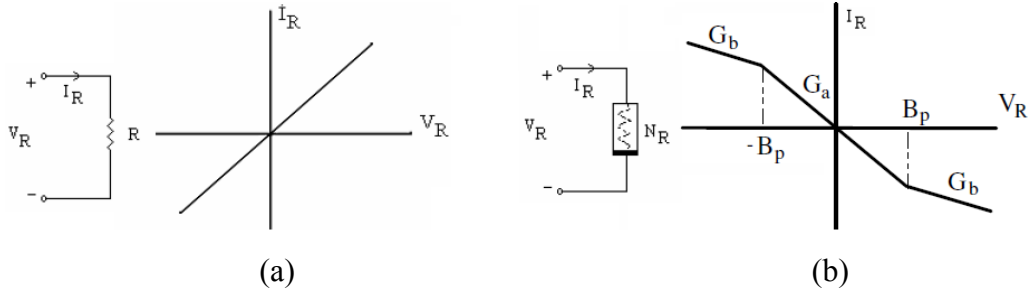
Şekil 2.1. Üzerinde dokuz adet blok bulunan *Kaotik Eğitim Seti-1*.

- 1) Karışık Modlu Kaotik Devre (KMKD) Kısım1,
- 2) Anahtarlama Sinyal Ünitesi-Kare Dalga Üretici,
- 3) Anahtarlama & Kontrol Ünitesi,
- 4) Wien-Köprü Osilatörü,
- 5) (CFOA) Tabanlı Topraksız İndüktans Simülatörü,
- 6) (CFOA) Tabanlı Topraklı İndüktans Simülatörü,
- 7) Voltaj modlu İşlemsel Kuvvetlendirici (VOA) Tabanlı Lineer Olmayan Direnç,
- 8) CFOA Tabanlı Lineer olmayan Direnç (NR2),
- 9) Nonlineer direnç bloğunun dc karakteristiği.

2.1.1. Kaotik Eğitim Seti-1'deki Devreler için Simülasyon Çalışmaları

Kaotik eğitim Seti-1'e konu olan temel kaotik osilatör yapılarına ait incelemeler ve bu yapılara ait simülasyon sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Chua Diyodu: Lineer olmayan elektronikte özellikle lineer olmayan osilatör devrelerinde lineer olmayan direnç olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Chua diyodu [13] olarak da adlandırılan lineer olmayan direnç normal lineer bir direncin aksine negatif eğime ve parçalı lineer karakteristiğe sahiptir. Şekil 2.2a'da normal bir direnç ve Chua diyodunun i-v

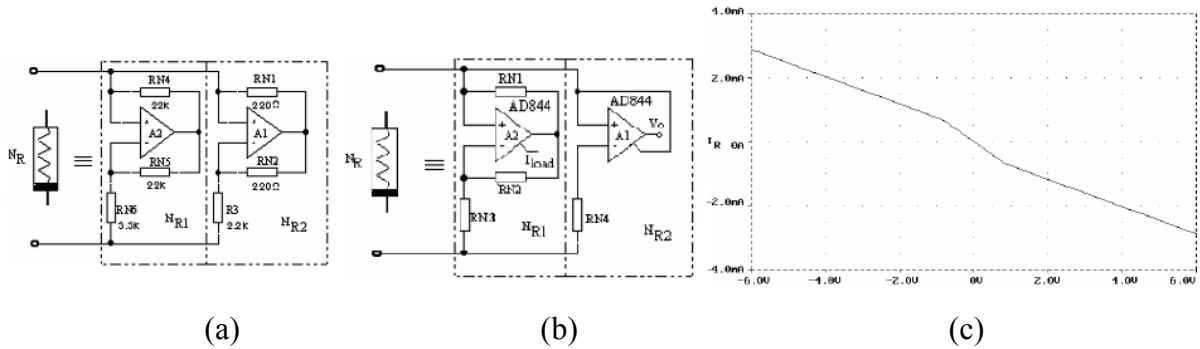


Şekil 2.2. a) Lineer bir direncin, b) Lineer olmayan bir direncin (i,v) karakteristikleri.

karakteristikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekil 2.2b’de gösterilen Chua diyotunun i-v karakteristiği Denklem 2.1’deki gibi tanımlanmaktadır.

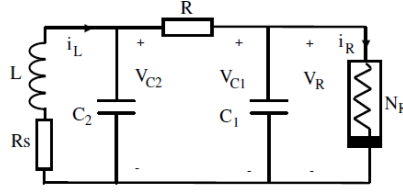
$$i_R = f(v_R) = G_B v_R + 0.5(G_a - G_b) \{ |v_R + B_P| - |v_R - B_P| \} \quad (2.1)$$

Chua diyotunun op-amplı, transistörlü ve İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricileriyle gerçekleştirilen lineer olmayan direnç devre yapıları örnek gösterilebilir [57-60]. Bunlar arasında Şekil 2.3a’da gösterilen iki op-amp ve direnç kombinasyonundan oluşan lineer olmayan direnç devresi [58], ve Şekil 2.3b’da gösterilen CFOA tabanlı lineer olmayan direnç devresi [61]; *Kaotik Eğitim Seti-1’de* kullanılan devrelerdir. VOA tabanlı devreye ait simülasyon sonucu Şekil 2.3c’de sunulmaktadır.



Şekil 2.3. a) VOA tabanlı Chua Diyotu devre yapısı, b) CFOA tabanlı Chua Diyotu devre yapısı, c) VOA tabanlı Chua diyotu simülasyon sonucu.

Otonom Chua Devresi: Literatürde çok sayıda otonom kaotik devre geliştirilmiş olsa da üzerinde en çok çalışma yapılan ve kaotik dinamikleri en iyi bilinen sistemlerden birisi otonom Chua devresidir [13]. Oldukça basit bir devre yapısına sahip olmasına rağmen kompleks dallanma ve kaos dinamikleri sergilemesi dolayısıyla elektronikteki kaos olayının

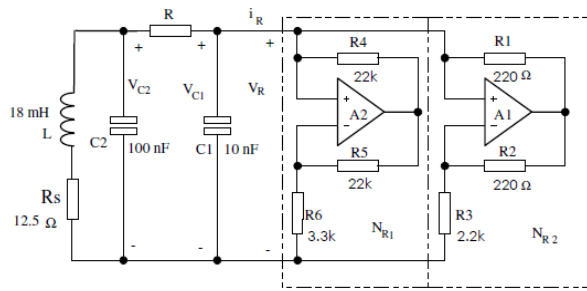


Şekil 2.4. Otonom Chua Devresi.

açıklanmasında model devre olmuştur. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi Chua devresi kapasitör, indüktör gibi enerji depolayıcı elemanlar, lineer direnç ve bir lineer olmayan direnç N_R 'den oluşmaktadır. Chua devresi Denklem 2.2'deki üç adet durum denklemleriyle tanımlanır:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{(v_{C2} - v_{C1})}{R} - f(v_{C1}) \\ C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} &= \frac{(v_{C1} - v_{C2})}{R} + i_L \\ L \frac{di_L}{dt} &= -v_{C2} - i_L R_s \end{aligned} \quad (2.2)$$

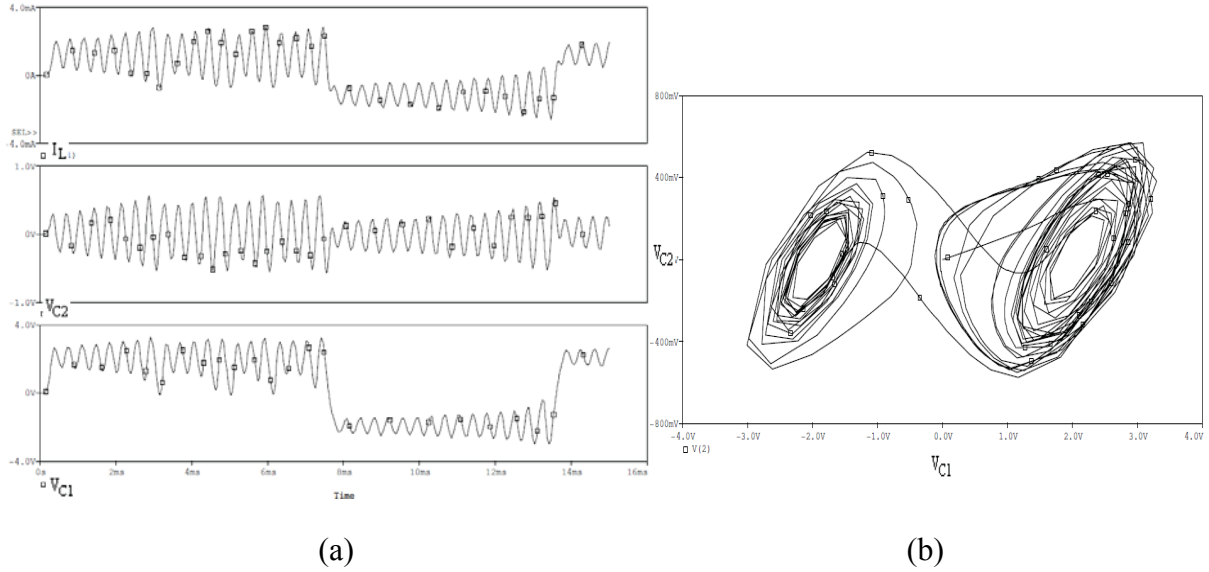
Kaotik Eğitim Seti-1'de hem VOA-tabanlı hem de CFOA-tabanlı Chua devre yapılarının ve kaotik dinamiklerinin incelenmesi mümkündür. VOA-tabanlı Chua devresinin açık devre şeması Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Şekildeki R direnç değeri 2000Ω 'dan yavaş yavaş sıfıra doğru azaltılırsa, Chua devresi periyodik davranışlardan kaosa kadar uzanan zengin otonom dinamikleri sergiler. R direncinin 1667Ω değeri için elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 2.6'da sunulmaktadır.



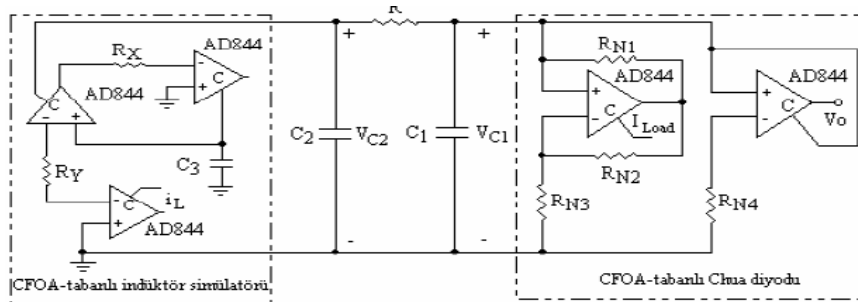
Şekil 2.5. Op-Amp'larla oluşturulan lineer olmayan direnç yapısı ile Chua Devresi'nin gerçekleştirilmesi.

Voltaj modlu op-amplara göre daha üstün özelliklere sahip olmalarından dolayı, akım geri beslemeli op-ampları (CFOA), yüksek frekanslı kaotik devre tasarımı ve gerçekleştirilmesinde son yıllarda voltaj modlu op-amplara göre tercih edilmektedir. *Kaotik Eğitim Seti-1*

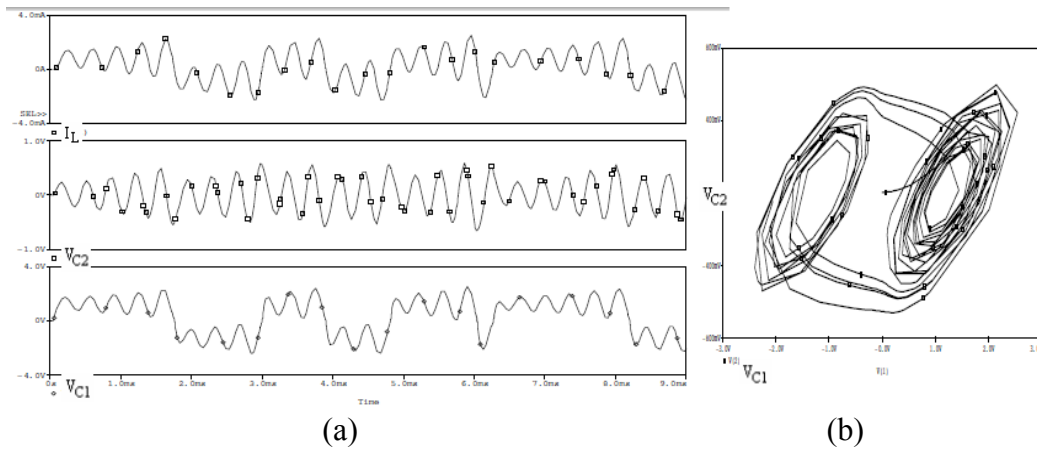
üzerindeki gerekli düzenlemeler ile indüktörsüz olarak gerçekleştirilebilen CFOA tabanlı Chua



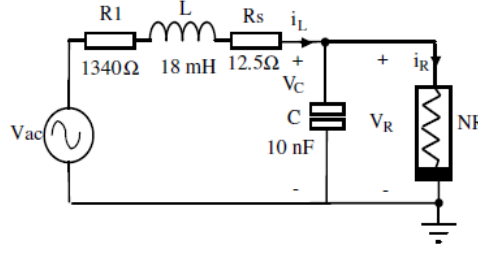
Şekil 2.6. VOA tabanlı Chua Devresi'nin $R=1667 \Omega$ değeri için elde edilen simülasyon sonuçları; a) V_{C1} , V_{C2} ve I_L dinamikleri, b) Çeker yapısı.



Şekil 2.7. CFOA tabanlı Chua Devresi'nin açık devre şeması [61].



Şekil 2.8. CFOA tabanlı Chua Devresi'nin $R=1667 \Omega$ değeri için elde edilen simülasyon sonuçları; a) V_{C1} , V_{C2} ve I_L dinamikleri, b) Çeker yapısı.



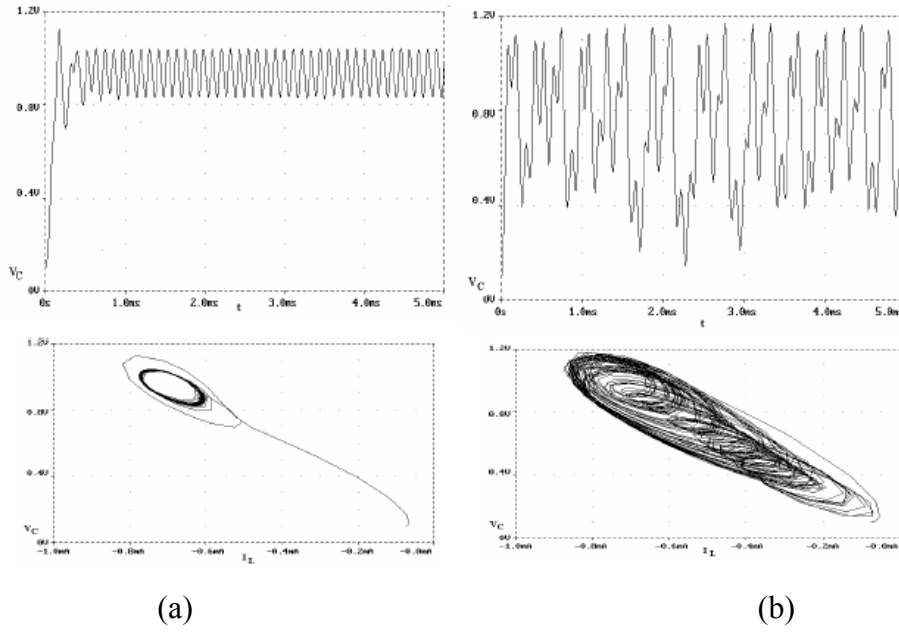
Şekil 2.9. Otonom olmayan MLC Devresi.

Devresi'nin açık devre şeması Şekil 2.7'de; $R_{N1}=R_{N2}=22\text{ K}$, $R_{N3}=2\text{ K}$ potansiyometre ve $R_{N4}=2.2\text{ K}$ direnç değerleri için devrenin simülasyon sonuçları ise Şekil 2.8'de gösterilmektedir [61].

Otonom Olmayan MLC (Murali,-Lakshmanan-Chua) Devresi: Kaotik Eğitim Seti-1'de otonom olmayan kaotik dinamiklerin tanıtılması ve incelenmesi amacıyla seçilen devredir. Devrede lineer olmayan direnç olarak Chua devresinde olduğu gibi Chua diyodu kullanılmaktadır. Otonom olmayan MLC devresi Şekil 2.9'da görülmektedir [62]. Devre yapısı; harici bir sinüzoidal kaynak, bir indüktör, bir kapasitör, iki lineer direnç ve tek bir lineer olmayan direnç NR'den oluşmaktadır. Buradaki lineer olmayan direnç Chua devresindeki lineer olmayan direnç yapısıyla aynıdır ve Denklem 2.1'deki ile aynı i-v karakteristiğine sahiptir. MLC devresi Denklem 2.3'teki gibi iki durum denkleminde tanımlanır.

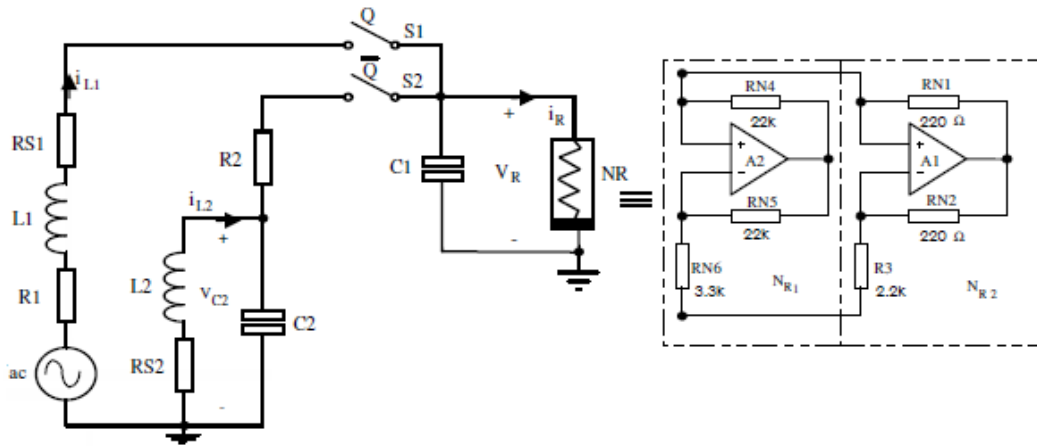
$$\begin{aligned} C \frac{dv_C}{dt} &= i_L - f(v_R) \\ L \frac{di_L}{dt} &= -R_1 i_L - i_L R_s - v_R + A \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

MLC devresindeki lineer olmayan direnç için, Chua devresinde olduğu gibi VOA ve CFOA tabanlı lineer olmayan direnç devre yapılarının her ikisi de kullanılabilir. Şekil 2.9'daki MLC devresinde harici sinüzoidal kaynağın genliği (A), bu sistemdeki kaotik değişim parametresidir. Devredeki ac kaynak frekansı $f=8890\text{Hz}$ 'de sabit tutularak A'nın sıfırdan itibaren artırılmasıyla denge noktasından başlayan, periyodik katlanmalarla devam eden ve sonunda kaotik dinamiklerin görüldüğü olaylar zinciri gözlenebilir. VOA-tabanlı Chua diyodu ile gerçekleştirilen MLC devresinin farklı (A) değerlerine göre elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 2.10'da görülmektedir.



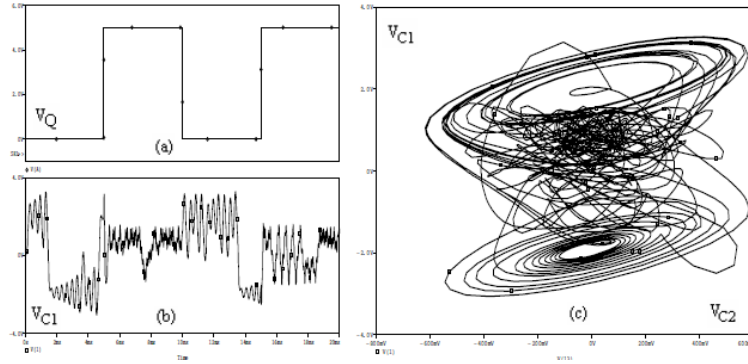
Şekil 2.10. MLC Devresinde Genlik Parametresinin (A) iki farklı değeri için kapasitör üzerinden alınan çıkışlar ve çekir görüntüleri; a) $A=0.075V$, b) $A=0.1V$.

Karışık Modlu Kaotik Devre: Bu model literatürde tasarımı ve ilginç uygulamaları dikkat çeken bir devre modelidir [29, 63]. Chua diyoduna dayalı olan bu devre modelinde anahtarlama mekanizması ile hem otonom hem de otonom olmayan dinamikler üretilebilmekte ve anahtarlamanın sürekli yapılmasıyla da karışık modlu kaotik dinamikler elde edilebilmektedir. Bu ilginç özelliği dolayısıyla *Kaotik Eğitim Seti-1*'in temel devre bloğu olarak bu devre yapısı seçilmiş olup, settteki diğer devre düzenlemeleri bu devre yapısına göre ayarlanmış ve tasarlanmıştır. Karışık modlu kaotik devre modelinin açık devre şeması Şekil 2.11'de gösterilmektedir.

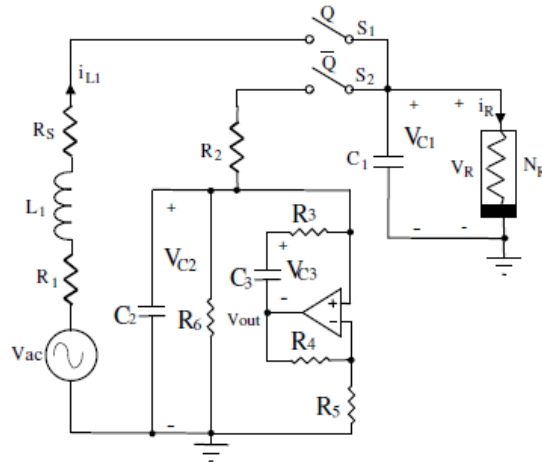


Şekil 2.11. Karışık Modlu Kaotik Devre modeli ve devredeki lineer olmayan direnç yapısı.

KMKD'deki S1 anahtarı kapalı (ON) ve S2 anahtarı açıkken (OFF), devre yapısı otonom olmayan MLC Devresi'ne dönüşür. S1 açık (OFF) ve S2 kapalı (ON) iken ise devre otonom Chua Devresi'ne dönüşmektedir ve otonom kaotik devre dinamiği sergilemektedir. Karışık modlu devre modelinin dinamik çalışma modu için S1 ve S2 anahtarlarının konumları statik olarak değil, dinamik olarak değiştirilir. Bu amaçla kare dalga formundaki iki eşlenik işaret sırasıyla S1 ve S2 analog anahtarlarına konum kontrolü için uygulanmışlardır. Simülasyon denemelerinde kontrol işaretleri olarak seçilen her bir kare dalganın darbe süresi 5 ms ve periyotları ise 10 ms olarak belirlenmiştir. Böylece devredeki anahtarlar uygulanan kontrol işaretlerinin darbe sürelerine bağlı olarak sürekli konum değiştirmekte ve devre modelinde C1 dinamiği üzerinde hem otonom hem de otonom olmayan bir özellik taşıyan karışık modlu kaotik davranış sergilenmektedir. Şekil 2.12'de karışık modlu kaotik devrenin dinamik analiz sonuçları görülmektedir. Bu simülasyonda VOA-tabanlı Chua diyotu kullanılmıştır.

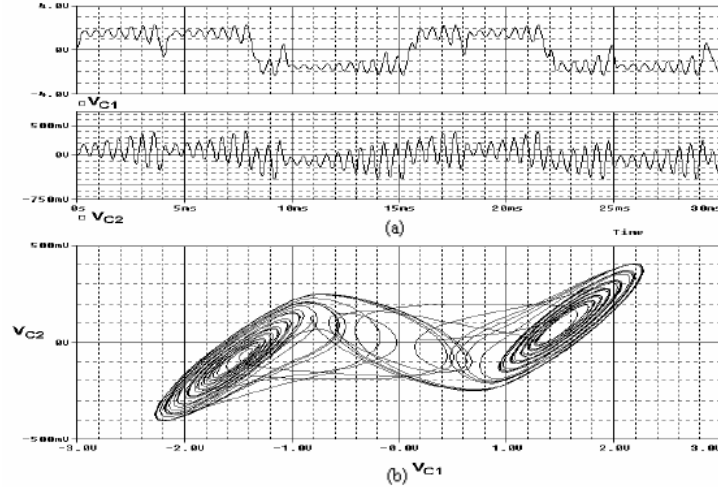


Şekil 2.12. Karışık Modlu Kaotik Devrenin dinamik analizi, a) Anahtarlama kontrol işareti, b) $V_{C1}(t)$ çıkışı, c) Çeker gösterimi.



Şekil 2.13. Wien köprü tabanlı KMKD devresi.

Karışık modlu kaotik devrenin (KMKD) bir alternatif tasarımı da Wien köprü tabanlı KMKD'dir [64, 65]. KMKD devresindeki LC rezonatörü yerine Wien köprü tabanlı RC konfigürasyonu eklenmiştir. Wien köprü tabanlı KMKD devresi hem lineer hem de lineer olmayan osilasyonlar sergilemektedir. Wien köprü tabanlı KMKD'nin devre yapısı Şekil 2.13'te gösterilmiştir. S1-OFF, S2-ON olduğu duruma ait simülasyon sonuçları ise Şekil 2.14'te verilmektedir.



Şekil 2.14. Karışık S1-OFF, S2-ON olduğu durumda Şekil 2.13'teki devrenin simülasyon sonuçları; a) Kaotik devre dinamikleri, b) Devredeki Çeker Gösterimi [61].

2.1.2. Kaotik Eğitim Seti-1 ile Yapılan Deney Çalışmaları

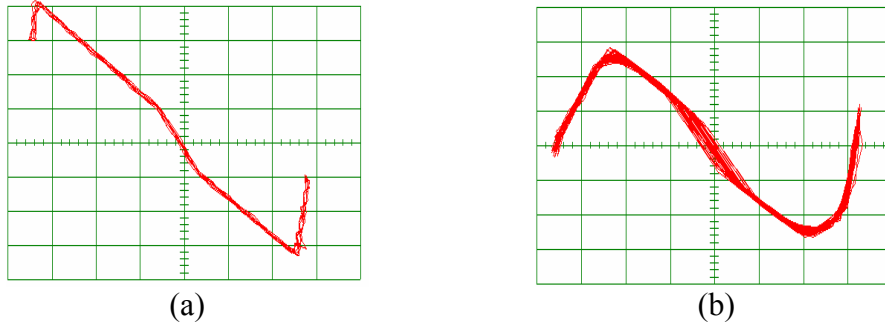
Bu bölümde *Kaotik Eğitim Seti-1* ile yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları verilmektedir. Set üzerinde sırasıyla otonom, otonom olmayan ve karışık modlu kaotik dinamiklerin incelenmesine dönük devre düzenekleri tanıtılacak ve her bir devre düzeneğine ilişkin örnek deney sonuçları sunulacaktır.

Eğitim setinin ana kısmını karışık-modlu kaotik devre [29, 63, 66] yapısı oluşturmakta olup, bu devre otonom ve otonom olmayan devre dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayan çok önemli bir yapıdır. Karışık modlu kaotik devre yapısının ayrıntılarından bahsetmeden önce devredeki anahtarlama kısmından bahsedilmesi gerekmektedir. Karışık modlu kaotik devrenin anahtarlama kontrolü, anahtarlama ve kontrol ünitesi tarafından sağlanır. Burada 4016 tümdevresi anahtarlama elemanı olarak kullanılmıştır. Ortak statik ve dinamik VQ noktası J1, J2 ve J3 jumper ayarlamalarıyla üç noktaya bağlanabilir. Bunlar sırasıyla otonom

olmayan, karışık mod ve otonom mod olmak üzere seçilir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dinamik anahtarlama yapılabilmesi için set üzerine bir kare dalga üretici (blok 2) ve onu terslendiren devre yapısı yerleştirilmiştir (blok 3). Deney setinin çok esnek ve çok yönlü şekilde tasarlanmasının bir sonucu olarak kullanıcı ana kaotik devre bloğunu iki şekilde oluşturabilir: Bunlardan birincisi, ayrıık indüktör elemanları için set üzerinde yerleştirilen soketlere ayrıık indüktör elemanları takılarak ilgili devre bağlantıları gerçekleştirilebilir. İkincisi ise Sekil 2.1’de gösterildiği gibi CFOA tabanlı bir ucu topraklı ve yüzen (floating) indüktans simülatörleri kullanılarak ilgili devre bağlantıları indüktörsüz olarak da gerçekleştirilebilir. Bu temel yapıların özetinin ardından *Kaotik Eğitim Seti-1*’i kullanarak yapılabilecek deneyler aşağıdaki gibi verilebilir:

Deney 1: Chua Diyotu’nun nonlinear karakteristiğinin elde edilmesi:

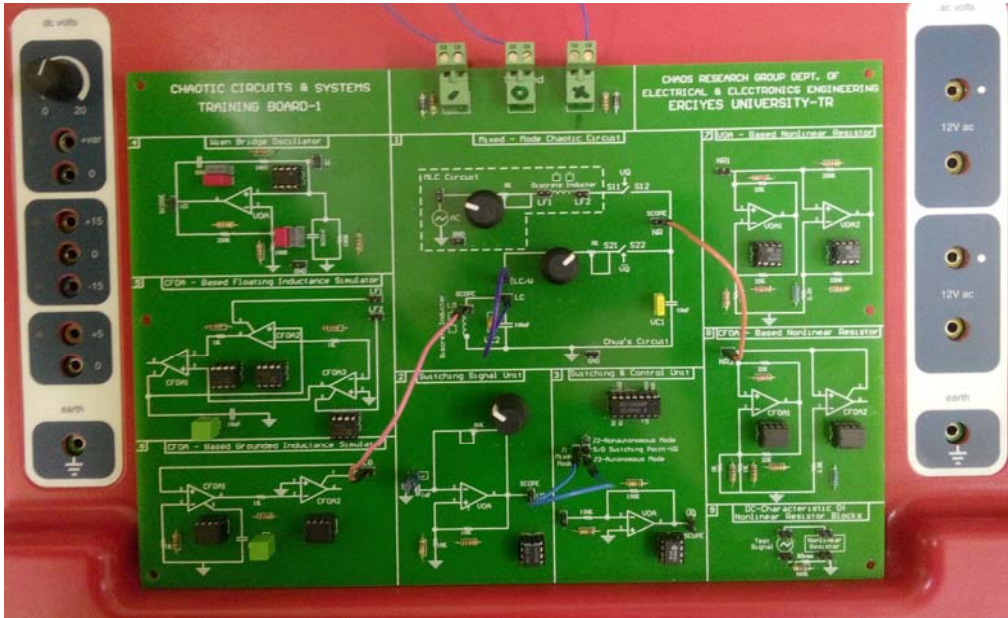
Set üzerinde bulunan kaotik işaret üreteç devrelerinin hepsi Chua diyodunu içermektedir. Bir önceki bölümde Chua diyodu ayrııntılı olarak anlatılmış, literatürdeki alternatif gerçekleştirimlerinden VOA ve CFOA tabanlı olan iki Chua diyot yapısı [13] tanıtılmıştı. Eğitim amaçlı olarak tasarlanan bu deney setinde hem VOA tabanlı hem de CFOA tabanlı Chua diyotu yapısı bulunmaktadır. Bu diyot yapılarının DC (i-v) karakteristikleri Sekil 2.1’de gösterilen blok 9 kurularak ölçülebilir. Bu blokta “Test Signal” ile gösterilen kısma $V_{pp}=7V$, frekansı 30Hz olan üçgen dalga formundaki bir işaret uygulandığında ve NR1 ya da NR2 çıkışları blok 9’daki “Nonlinear Resistor” kısmı ile eşleştirildiğinde dc karakteristiği elde etmek için gerekli deney düzeneği kurulmuş olacaktır. VOA ve CFOA tabanlı Chua diyodunun deneysel olarak elde edilen dc karakteristikleri sırasıyla Şekil 2.15a ve b’de gösterilmektedir.



Şekil 2.15. a) VOA tabanlı Chua diyotu x: 2V/div, y:500mV/div, b) CFOA-tabanlı Chua diyotu x: 2V/div, y: 500mV/div.

Deney 2: Otonom kaotik dinamiklerin incelenmesi:

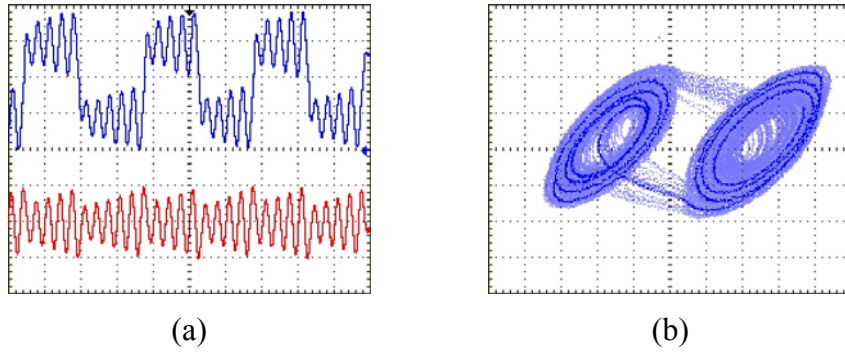
Bu işlem modunda ilk adım S/D- V_Q anahtarlama noktasının J3 konumuna getirilmesidir. Lineer olmayan direnç seçimi için VOA ve CFOA tabanlı lineer olmayan direnç blokları “NR1” veya “NR2”, KMKD devresindeki (NR) bağlantı noktasına bağlanabilir. Lineer olmayan direnç seçiminin yanı sıra eğitim seti üzerinde bulunan topraklı indüktans simülatörü ve Wien köprü-tabanlı RC devre bloğu kullanılarak indüktörsüz gerçekleştirim de yapılabilir. Örnek bir otonom çalışma modu için J3 jumper ayarı yapılarak otonom çalışma modu ayarlanılarak, lineer olmayan direnç olarak da CFOA-tabanlı Chua diyot yapısı seçilebilir. Ayrıca devredeki indüktör elemanı yerine Şekil 2.1, blok 6’daki CFOA-tabanlı topraklı indüktans simülatörü kullanılabilir. Bu düzenleme ile Şekil 2.16’da gösterilen set üzerinde oluşturulmuş otonom yapı, önceki bölümde ayrıntılı olarak incelenen otonom Chua devre yapısıdır. Bu düzenlemelere ilaveten set üzerindeki LC noktası LC/W noktasına bağlanmalıdır. Bu bağlantıyla otonom Chua devresindeki LC resonatör kısmı kullanıma alınmamaktadır. Bu düzenlemeye alternatif olarak; eğer LC devre kısmını elimine edip bu kısım yerine indüktörsüz Wien Köprü-tabanlı RC devre bloğu kullanılmak istenirse bunun için LC noktası ile LC/W noktası arasındaki bağlantı kaldırılıp, LC/W noktasına Wien Köprü devre blok çıkısındaki W noktası bağlayabilir.



Şekil 2.16. Kaotik Eğitim Seti-1 üzerinde Chua Devresi'nin oluşturulabilmesi için yapılan örnek bir bağlantı şekli.

CFOA tabanlı indüktör yerine VOA tabanlı indüktör kullanılabilir, CFOA tabanlı nonlinear direnç yerine VOA tabanlı nonlinear direnç kullanılabilir. Bu gibi alternatif düzenlemeler tamamen kullanıcının kullanımına bırakılarak deneyin oluşturulma şekli fonksiyonel olarak geliştirilebilir.

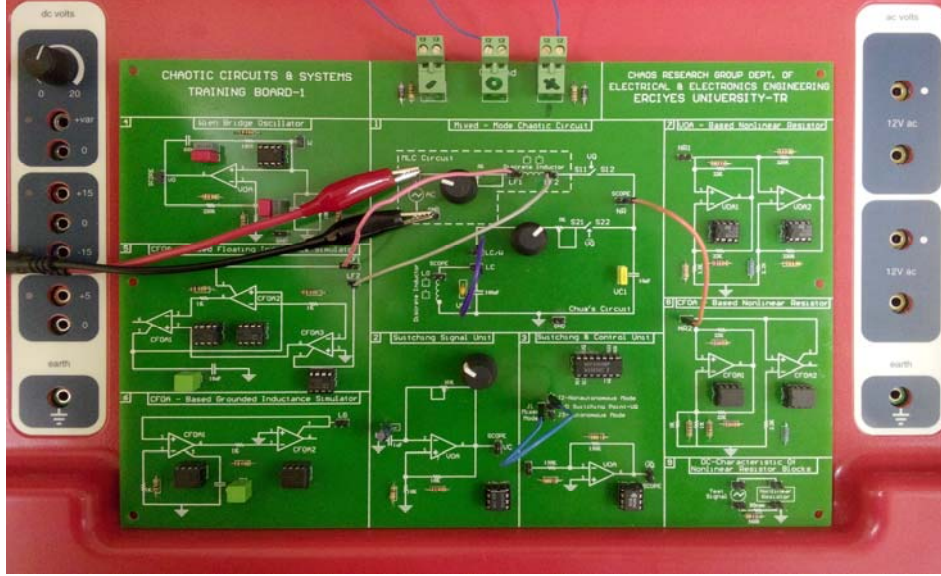
Şekil 2.16’da gösterildiği gibi bizim tercih ettiğimiz düzenlemelerin ardından, kullanıcı, Chua devre kısmındaki R2 potansiyometresini ayarlayarak, DC denge noktası, periyot dallanması (periyot-2), tek band kaos ve çift band kaos dinamiklerini içeren bir dizi lineer olmayan dinamikleri gözleyebilir. Chua Devresi kaos durumundayken V_{C1} ve V_{C2} çıkışlarından alınan işaretlerin zaman domeni gösterimi Şekil 2.17a’da gösterilirken V_{C1} - V_{C2} faz uzayı gösterimine ait deney sonuçları Şekil 2.17b’de gösterilmektedir.



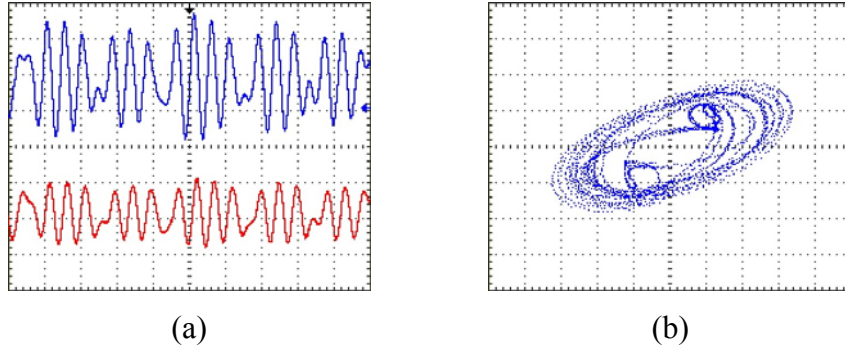
Şekil 2.17. Chua Devresi’ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{C1} ve V_{C2} için zaman domeni gösterimi: x:2V/div, y:1V/div, Time/div: 1ms; b) V_{C1} - V_{C2} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 500mV/div.

Deney 3: Otonom olmayan kaotik dinamiklerin incelenmesi:

Kaotik Eğitim Seti-1 üzerinde otonom olmayan çalışma modu için jumper ayarı J2 şeklinde yapılmalıdır. Otonom olmayan MLC devresi için örnek bir bağlantı konfigürasyonu Şekil 2.18’de sunulmaktadır. Bu bağlantı şeklinde MLC devresi için gerekli olan topraklanmamış indüktör için gerekli bağlantılar Blok 5 kullanılarak yapılmıştır. Devredeki nonlinear direnç için gerekli bağlantı ise Blok 8 de bulunan NR2 ile elde edilmiştir. MLC devresinde harici olarak frekansı 8890Hz olarak sabitlenen AC bir sinüzoidal voltaj kaynağı kullanılmaktadır. Kullanıcı, MLC [33] devre yapısındaki R1 potansiyometresini ve/veya harici voltaj kaynağının genliğini ayarlayarak çeşitli kaotik dinamikleri gözlemleyebilir. Örnek devre düzeneğine ilişkin deney sonuçları Şekil 2.19’da sunulmaktadır.



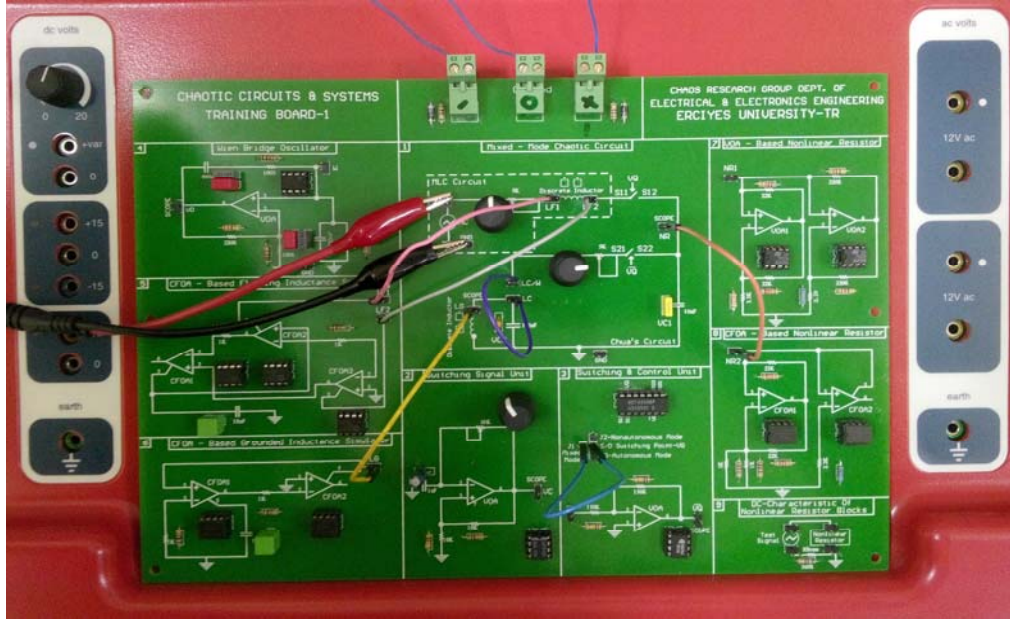
Şekil 2.18. Kaotik Eğitim Seti-1 üzerinde MLC Devresi'nin oluşturulabilmesi için yapılan örnek bir bağlantı şekli.



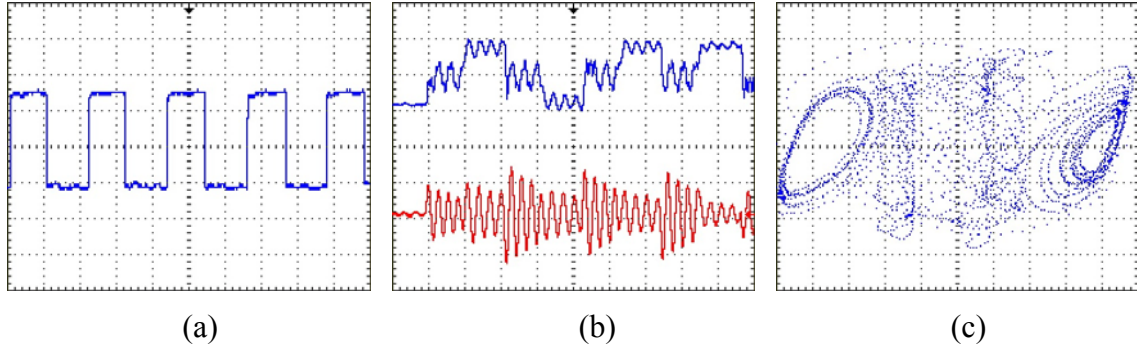
Şekil 2.19. MLC Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{C1} ve V_{L2} için zaman domeni gösterimi: x:2V/div, y:2V/div, Time/div: 250µs; b) V_{C1} - V_{L2} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 1V/div.

Deney 4: Karışık Modlu Kaotik Dinamiklerin (KMKD) incelenmesi:

Kaotik Eğitim Seti-1 üzerinde KMKD çalışma modu için S/D-VQ anahtarla noktası J1 jumper ayarıyla set üzerinde bulunan kare dalga üreticinin çıkışına bağlanır. Otonom ve otonom olmayan dinamikler arasındaki geçişi bu kare dalga üretici tayin etmektedir. Bu geçiş süresi Blok 2'deki kare dalga işaret üretic devresinde yer alan potansiyometrenin ayarlanmasıyla değiştirilebilmektedir. Bu çalışma modunda kullanıcı hem otonom hem de otonom olmayan dinamikleri içeren karışık modlu kaotik dinamikleri gözlemleyebilir. Şekil 2.20.'deki düzenlemeyle elde edilen karışık modlu kaotik devre yapısına ilişkin deney sonuçları Şekil 2.21'de verilmektedir.



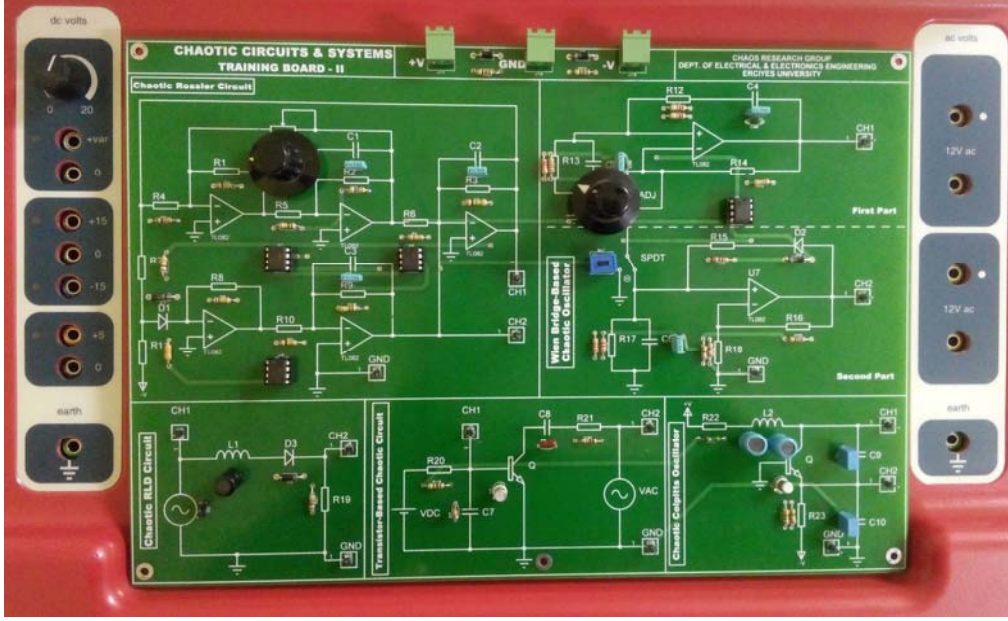
Şekil 2.20. *Kaotik Eğitim Seti-1* üzerinde KMKD'lerin oluşturulabilmesi için yapılan örnek bir bağlantı şekli.



Şekil 2.21. a) Şekil 2.20'deki düzeneikle elde edilen KMKD dinamiği ve anahtarlama işareti, b) Sırasıyla V_{C1} ve V_{C2} için zaman domeni gösterimi: $x:5V/div$, $y:1V/div$, $Time/div: 1ms$; b) $V_{C1}-V_{C2}$ için faz uzayı gösterimi, $x: 1V/div$, $y: 500mV/div$.

2.2. Kaotik Eğitim Seti-2

Kaotik eğitim Seti-2'de lineer osilatör yapılarından lineer olmayan osilatör yapılarına geçişi gösteren devre blokları bulunmaktadır. Şekil 2.22'deki bu eğitim setinde beş devre bloğu yapısı bulunmaktadır. Bu bloklar aşağıda listelenmektedir:



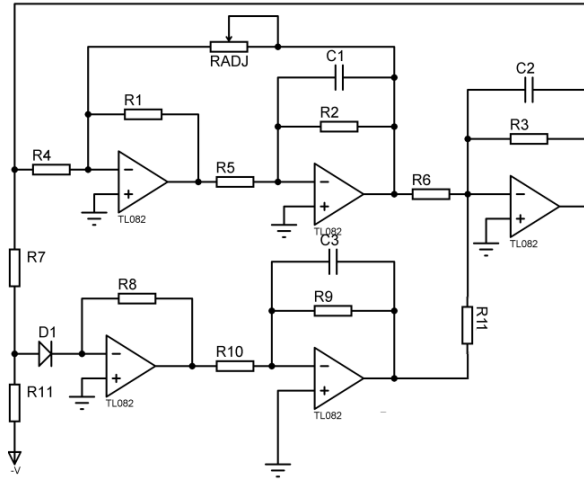
Şekil 2.22. Üzerinde beş adet blok bulunan *Kaotik Eğitim Seti-2*.

- 1) Kaotik Rössler Devresi,
- 2) Wien Köprü Tabanlı Kaotik Osilatör,
- 3) Kaotik RLD Devresi,
- 4) Transistör Tabanlı Kaotik Devre,
- 5) Kaotik Colpitts Osilatörü,

Kaotik eğitim Seti-2'ye konu olan temel kaotik osilatör yapılarına ait incelemeler, bu yapılara ait simülasyon ve deney sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Deney 1: Kaotik Rössler Devresi'nin incelenmesi:

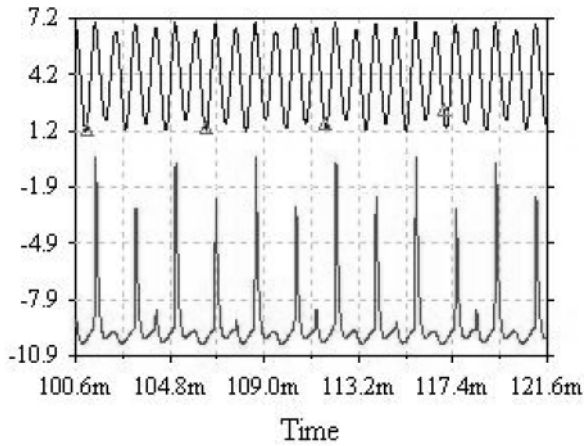
Otto Rössler, Lorenz sistemine çok benzeyen ve analizi daha kolay yapılan bir sistem tasarlamak istemiş ve bu amaçla yaptığı çalışmalar neticesinde 1970'li yıllarda Rössler sistemini ortaya koymuştur [67]. Bu sistem, Lorenz sistemine çok benzemekle birlikte daha basit yapıdadır. Literatürde Rössler sisteminin farklı elektronik devre gerçekleştirmeleri mevcuttur [68-71]. Bu devre gerçekleştirmelerinden *Kaotik Eğitim Seti-2*'de kullanılan devre yapısı Şekil 2.23'te görülmektedir. Bu devre yapısına ait matematiksel tanımlama Denklem 2.4'teki gibi üç adet diferansiyel denklemle ifade edilmektedir.



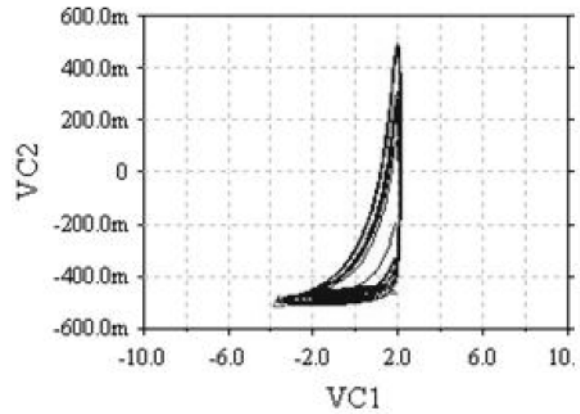
Şekil 2.23. *Kaotik Eğitim Seti-2*'deki Rössler Devresi'ne ait bir devre şeması.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= -\alpha(\Gamma x + \beta y + \lambda z) \\
 \dot{y} &= -\alpha(-x - \gamma y + 0.002z) \\
 \dot{z} &= -\alpha(-g(x) + z) \\
 g(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 3 \\ \mu(x - 3), & x > 3 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Burada $\alpha=104$, $\Gamma=0.05$, $\beta=0.5$, $\lambda=0.1$ ve $\gamma=0.133$ 'tür. Şekil 2.23'te verilen devreye ait simülasyon sonuçları Şekil 2.24'te gösterilmektedir.



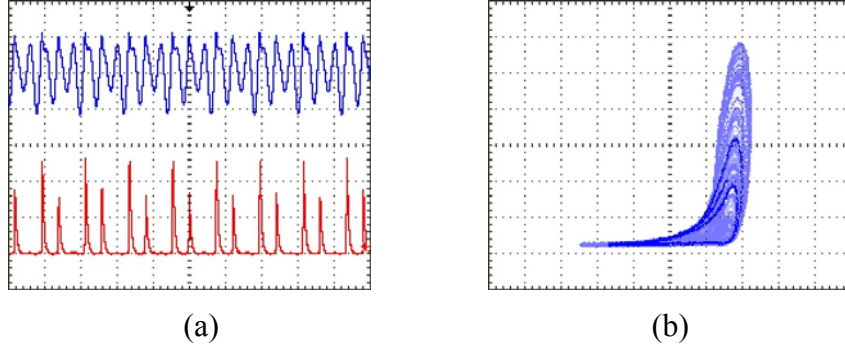
(b)



(b)

Şekil 2.24. Rössler Devresi'ne ait simülasyon sonuçları a) Sırasıyla V_{C1} ve V_{C2} için zaman domeni gösterimi; b) V_{C1} - V_{C2} için faz uzayı gösterimi.

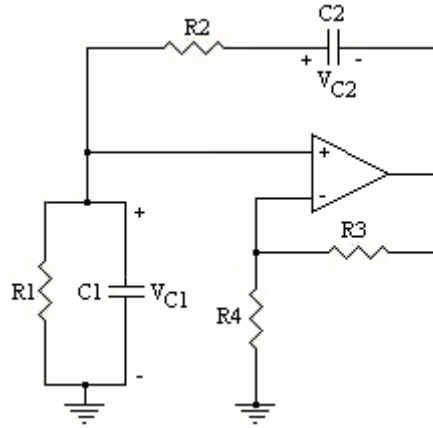
Şekil 2.23'teki devre yapısı Kaotik Eğitim Seti 2'nin ilk bloğunu oluşturmaktadır. Bu bloğa ait deneysel sonuçlar Şekil 2.25'te görülmektedir.



Şekil 2.25. Rössler Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{C2} ve V_{C3} için zaman domeni gösterimi: $x:2V/div$, $y:1V/div$, $Time/div: 2.5ms$; b) $V_{C2}-V_{C3}$ için faz uzayı gösterimi, $x: 1V/div$, $y: 500mV/div$.

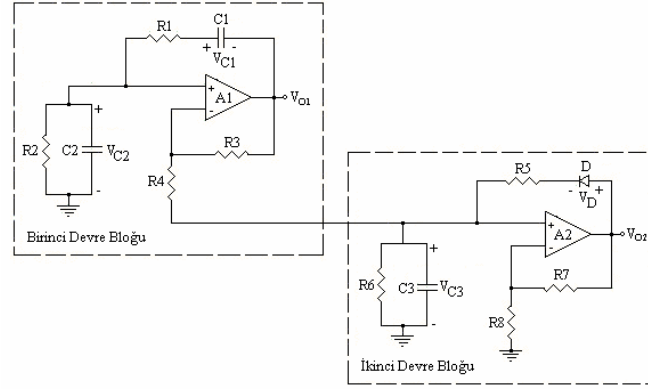
Deney 2: Wien Köprü tabanlı kaotik osilatörün incelenmesi:

Sinüzoidal bir çıkış elde etmek için kullanılan klasik Wien köprü osilatörüne ait bir devre şeması Şekil 2.26'da gösterilmektedir. Bu klasik devre konfigürasyonunda (A) kazancına sahip bir evirmeyen voltaj kuvvetlendiricisi, paralel RC köprü kolu ve RC geri besleme bloğu yer almaktadır. Burada önemli olan osilasyon için gerekli kapalı çevrim kazancını elde edebilmektir.



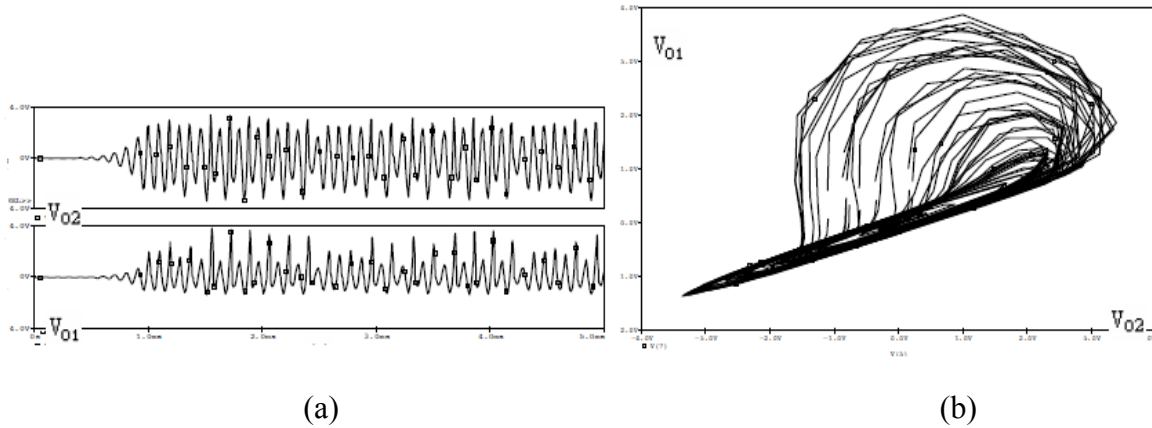
Şekil 2.26. Klasik Wien Köprü osilatörü devre şeması.

Normal bir sinüzoidal osilatör kullanılarak üçüncü dereceden bir kaotik osilatör tasarlanmanın yolu; osilatör devresine enerji depolayan eleman veya FET, diyot gibi lineer olmayan bir eleman veya devre düzeneği ilave etmektir. Literatürde buna benzer bir çok devre uygulaması gerçekleştirilmiş ve bunların bir çoğunda Wien köprü osilatör devreleri kullanılmıştır [72]. Wien köprü osilatörü ile kaotik işaret üretmek için yapılan modifikasyonlar Şekil 2.27'de gösterilmektedir.

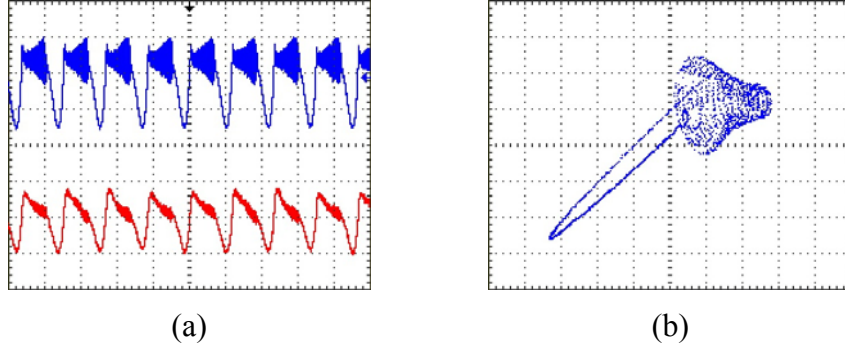


Şekil 2.27. Wien Köprü tabanlı kaotik osilatörün devre şeması.

Devre, voltaj modlu op-amp kullanılan iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım $A_1 = 1 + \frac{R_3}{R_4}$ kazancına sahip Wien köprü RC osilatörü ve ikinci kısım ise negatif empedans çeviricisidir (NIC). Bu tasarımda A_2 kazancını sağlayan ikinci devre yapısında pozitif geri beslemeye diyot ilave edilmiştir. NIC sadece $V_{C3}(A_2-1) > V_D$ şartı altında aktif olur. Burada A_2 kazancı $A_2 = 1 + \frac{R_7}{R_8}$ 'dir. $R_7=R_5$ durumunda giriş empedansı $Z_i=-R_8$ olmaktadır. Şekil 2.27'de gösterilen Wien köprü tabanlı kaotik osilatör devresinde $R_1=R_2=11 \text{ K}\Omega$, $R_3=10 \text{ K}\Omega$ pot., $R_4=5 \text{ K}\Omega$ pot., $R_5=R_7=2.7 \text{ K}\Omega$, $R_6=1.1 \text{ K}\Omega$, $R_8=780 \Omega$, $C_1=C_2=C_3=1.3 \text{ nF}$ eleman değerleri için yapıla simülasyon sonuçları Şekil 2.28'de sunulurken; *Kaotik Eğitim Seti-2'* den elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2.29'da sunulmaktadır.



Şekil 2.28. Wien Köprü tabanlı kaotik osilatör devresine ait simülasyon sonuçları a) Sırasıyla V_{01} ve V_{02} için zaman domeni gösterimi; b) $V_{02}-V_{01}$ için faz uzayı gösterimi.



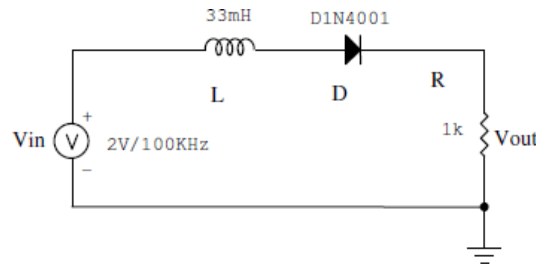
Şekil 2.29. Wien Köprü tabanlı kaotik osilatör devresine ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{01} ve V_{02} için zaman domeni gösterimi: x:2V/div, y:500mV/div, Time/div: 100µs; b) $V_{02}-V_{01}$ için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 1V/div.

Deney 3: Kaotik RLD devresinin incelenmesi:

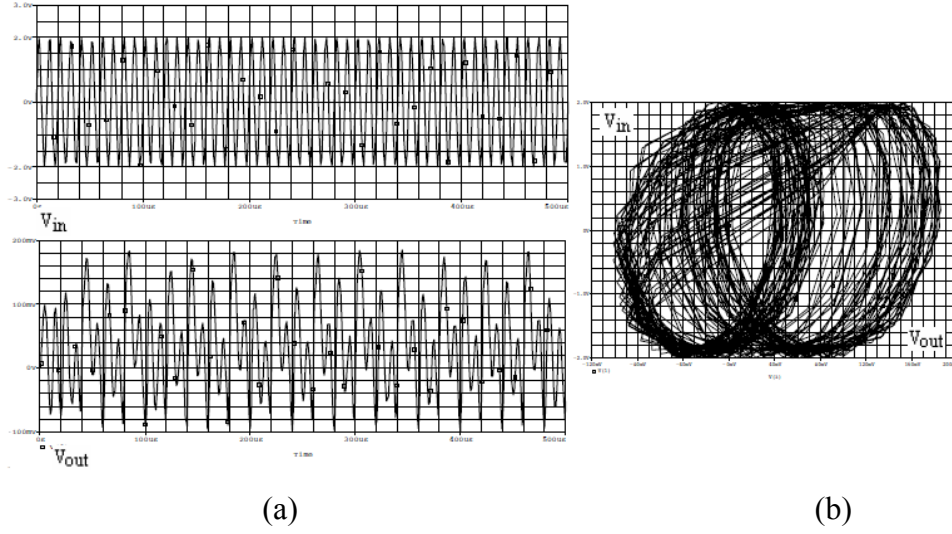
Otonom olmayan devrelere örnek olarak verilebilecek olması ve lineer olmama özelliğinin sadece bir diyotla sağlaması nedeniyle Kaotik RLD devresi de *Kaotik Eğitim Seti-2*'de yer almıştır. Kaotik davranış sergileyen bu devre yapısı Şekil 2.30'da görüldüğü gibi bir direnç, bir bobin, bir diyot ve harici bir AC kaynaktan oluşmaktadır. Devrenin kaosa girmesini sağlayan faktör kullanılan AC kaynağın hem genlik değeri hem de frekans değeridir. Bu devre Denklem 2.5 ile tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} V_{in} &= Ri + L \frac{di}{dt} + V_D \\ i &= I_S (e^{V_D/n_V T} - 1) \end{aligned} \quad (2.5)$$

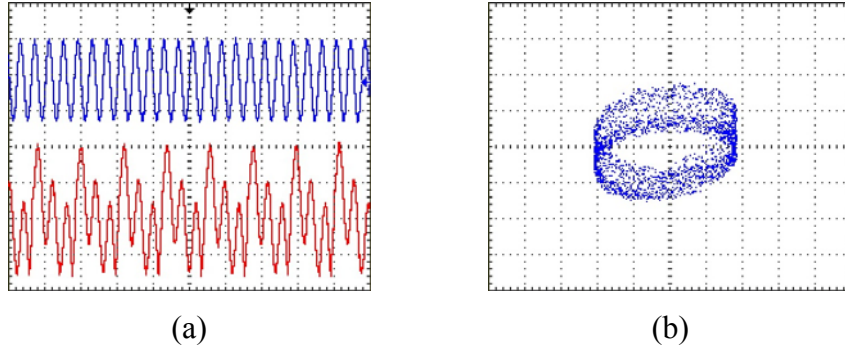
Bu yapıya ait simülasyon sonuçları Şekil 2.31'de sunulurken, *Kaotik Eğitim Seti-2* üzerindeki devreden kaydedilen deneysel sonuçlar Şekil 2.32'de sunulmaktadır.



Şekil 2.30. Kaotik RLD devresi.



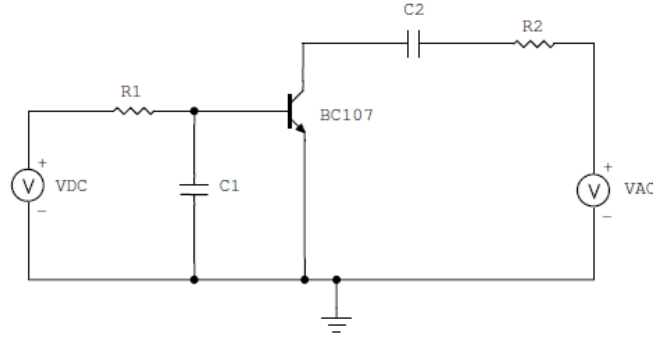
Şekil 2.31. Kaotik RLD Devresi'ne ait simülasyon sonuçları a) Sırasıyla V_{in} ve V_{out} için zaman domeni gösterimi; b) V_{out} - V_{in} için faz uzayı gösterimi.



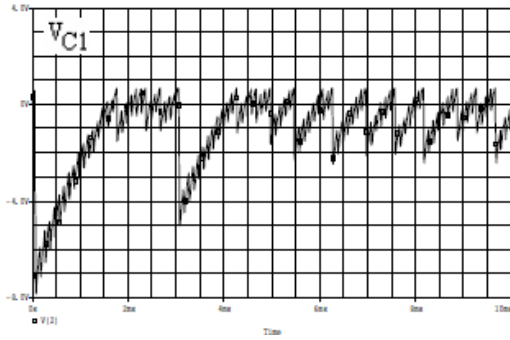
Şekil 2.32. Kaotik RLD Devresi'ne ait deney sonuçları a) Sırasıyla V_{in} ve V_{out} için zaman domeni gösterimi: x:10V/div, y:500mV/div, Time/div: 2.5µs; b) V_{out} - V_{in} için faz uzayı gösterimi, x: 5V/div, y: 500mV/div.

Deney 4: Transistör tabanlı kaotik devrenin incelenmesi:

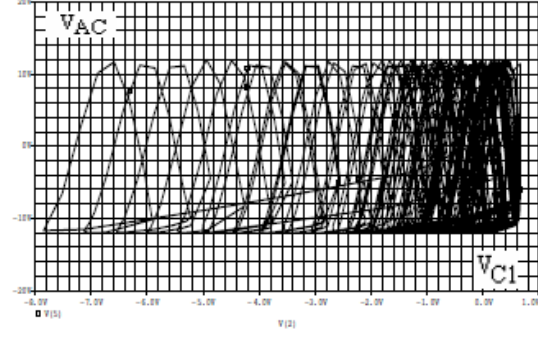
Sekil 2.33'te görülen bu devre otonom olmayan bir kaotik devredir. Transistorün beyzine bir ucu topraklı bir kapasite (C_1) bağlanmıştır ve bu kapasitör DC voltaj kaynağı ile şarj olmaktadır. C_1 'nin zaman sabiti 0.68ms'dir. Devrede kullanılan eleman değerleri; $R_1=1\text{ M}\Omega$, $R_2=1\text{ K}\Omega$, $C_1=680\text{ pF}$, $C_2=4.7\text{ nF}$ kaynaklar ise VDC 10V, VAC ise 12 V/10 KHz. Transistör tabanlı bu devrenin kaosa girmesini çok sayıda parametre sağlamaktadır. Kapasite değerleri, AC kaynak genliği ve/veya frekansı yada $1\text{ M}\Omega$ 'luk direnç değişimi devrenin kaosa girmesini sağlamaktadır. Devrenin simülasyon sonuçları Sekil 2.34'te verilirken deneysel sonuçlar Şekil 2.35'te sunulmaktadır.



Şekil 2.33. Transistör tabanlı kaotik devre.

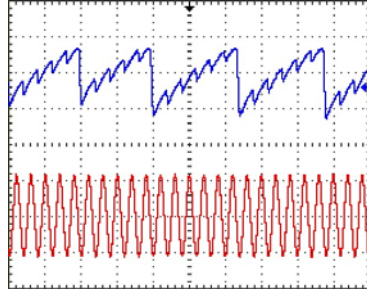


(b)

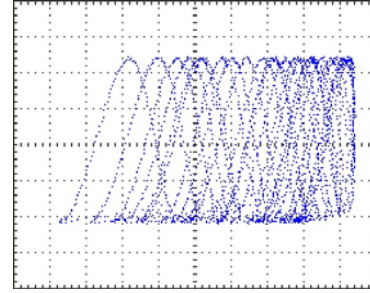


(b)

Şekil 2.34. Transistör tabanlı kaotik devreye ait simülasyon sonuçları a) V_{C1} için zaman domeni gösterimi; b) V_{C1} - V_{AC} için faz uzayı gösterimi.



(a)

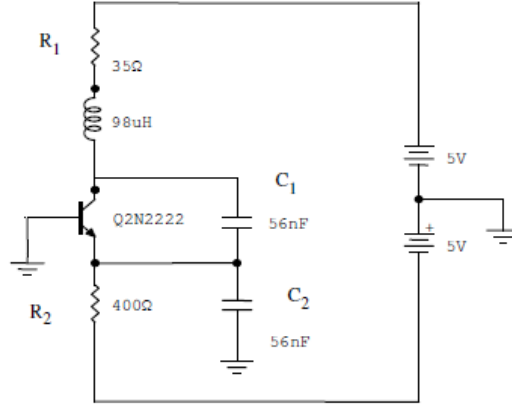


(b)

Şekil 2.35. Transistör tabanlı kaotik devreye ait deney sonuçları a) V_{C1} ve V_{AC} için zaman domeni gösterimi: x:2V/div, y:10V/div, Time/div: 250 μ s; b) V_{C1} - V_{AC} için faz uzayı gösterimi, x: 2V/div, y: 5V/div.

Deney 5: Kaotik Colpitts osilatörünün incelenmesi:

Colpitts osilatör devresi de Wien köprü osilatör devresi gibi klasik bir osilatör devre yapısıdır. Özellikle yüksek frekanslı osilasyon elde edilmesinde tercih edilen bu osilatöre, öğrencilerin ve araştırmacıların aşına olmasından dolayı, bu devre yapısında kaotik devre

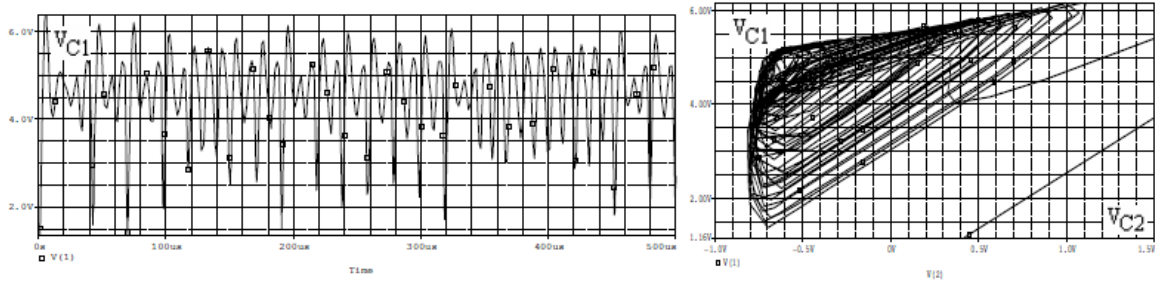


Şekil 2.36. Kaotik Colpitts Osilatörü'ne ait devre şeması.

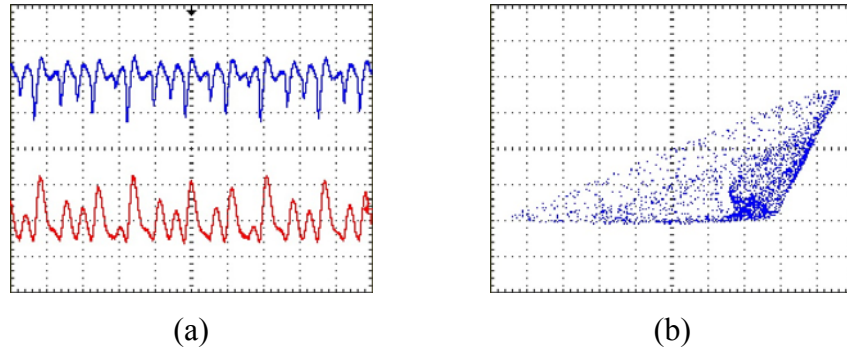
dinamiklerinin tanıtılması eğitim yönünden yararlı olacaktır. Bu yüzden *Kaotik Eğitim Seti-2*'de Şekil 2.36'daki kaotik Colpitts osilatör devresi yerleştirilmiştir. Genel bir Colpitts osilatör devresi sinüzoidal işaret üretmede kullanılmakta olup, farklı aktif elemanlarla birçok osilatör devresine dönüştürülebilir. Bununla birlikte bir BJT transistor ile oluşturulan Colpitts osilatörün devre parametrelerinin bazı farklı değerlerinde, oluşturulan osilatör kaotik yapı sergileyebilmektedir. Colpitts osilatörde kaotik yapının varlığı ilk defa Kennedy ve arkadaşları tarafından tespit edilmiştir [73]. Şekil 2.36'daki bu devre üç tane enerji depolayan eleman içermektedir (L , C_1 , C_2). Devredeki Q transistorü kuvvetlendirici özelliği ile birlikte lineer olmayan bir davranış da sergilemektedir. Bu devrenin dinamikleri Denklem 2.6'daki diferansiyel eşitliklerle tanımlanır:

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dV_{CE}}{dt} &= i_L - i_C \\
 C_2 \frac{dV_{BE}}{dt} &= -(V_{EE} + V_{BE}) / R_{EE} - i_L - i_B \\
 L \frac{di_L}{dt} &= V_{CC} - V_{CE} + V_{BE} - i_L R_L
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Kaotik Colpitts osilatörünün Şekil 2.36'daki eleman değerleri ile simüle edilmesiyle elde edilen sonuçlar Şekil 2.37'de gösterilirken, Kaotik Eğitim Seti-2 üzerindeki gerçekleştirimden kaydedilen deneysel sonuçlar Şekil 2.38'de verilmektedir.



Şekil 2.37. Kaotik Colpitts osilatörüne ait simülasyon sonuçları a) V_{C1} için zaman domeni gösterimi; b) V_{C2} - V_{C1} için faz uzayı gösterimi.



Şekil 2.38. Kaotik Colpitts osilatörüne ait deney sonuçları a) V_{C1} ve V_{C2} için zaman domeni gösterimi: x:5V/div, y: 2V/div, Time/div: 25µs; b) V_{C2} - V_{C1} için faz uzayı gösterimi, x: 1V/div, y: 1V/div.

2.2. Kaotik Eğitim Seti-3

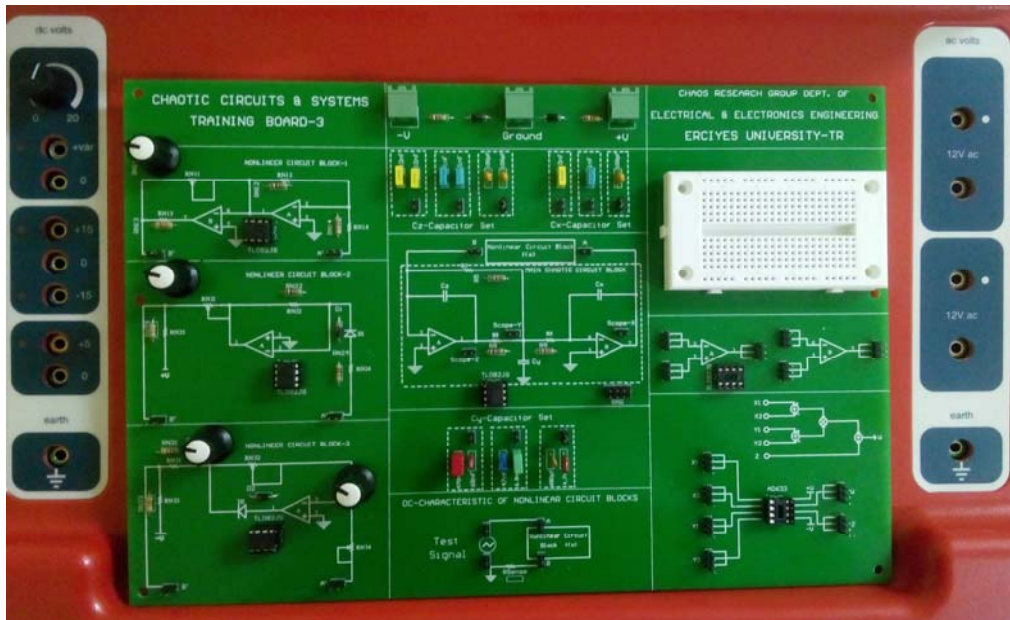
Kaotik Eğitim Seti-3'te literatürde sıklıkla kullanılan Sprott sistemine ait uygulamalar ele alınmıştır. *Kaotik Eğitim Seti-3* kullanılarak kaotik çekerlerin periyot geçişleri kolaylıkla kontrol edilebildiği için, bu kart hem Sprott sisteminin incelendiği hem de kaos kontrolünün yapılabildiği bir eğitim kartı şeklinde tasarlanmıştır. Sprott Devresi'nin gerçekleştirimi oldukça kolaydır. Bu devreler geniş bir çalışma frekansına sahiptir. Çok çeşitli dinamik davranışlar bu yaklaşımla modellenabilmektedir. Sprott sistemi $\ddot{x} + A\dot{x} + \dot{x} = f(x)$ denkleminin bir çözümüdür. Burada $f(x)$ bir nonlineer fonksiyondur. "Jerk" eşitliği olarak da bilinen bu sistemde gerekli dönüşümlerinin yapılmasının ardından Sprott sistemi aşağıdaki diferansiyel eşitliklerle ifade edilebilir [74, 75]

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= z, \\ \dot{z} &= f(x) - pz - y\end{aligned}\tag{2.7}$$

Burada x, y ve z sistemin durum değişkenlerini gösterirken, p sistem parametresidir. $f(x)$ ise sistemin kaos mekanizmasında önemli rol oynayan nonlinear fonksiyonu temsil eden bir fonksiyondur. Farklı tip parçalı lineer fonksiyonları içeren birçok farklı nonlinear fonksiyonun temel sisteme uygulanmasıyla, bu kaotik sistemin doğruluğu ispatlanmıştır. Sprott sisteminin modellenmesinde en çok tercih edilen nonlinear fonksiyonlar Tablo 2.1’de tipik parametre değerleriyle özetlenmiştir [75, 76].

Tablo 2.1. Sprott sistemi için nonlinear fonksiyonlar ve parametre değerleri.

Nonlinear Fonksiyonlar	Fonksiyon Parametreleri
$f(x)= x -r$ (2.7.1)	$r=2$
$f(x)=-Bx+C\text{sgn}(x)$ (2.7.2)	$B=1.2, C=2,$
$f(x)=-B\max(x,0)+C$ (2.7.3)	$B=6, C=0.5$
$f(x)=B(x^2/C-C)$ (2.7.4)	$B=0.58, C=1$
$f(x)=Bx(x^2/C-1)$ (2.7.5)	$B=1.6, C=5$
$f(x)=-Bx(x^2/C-1)$ (2.7.6)	$B=0.9, C=0.47$
$f(x)=-B[x-2\text{tanh}(Cx)/C]$ (2.7.8)	$B=2.15, C=1$



Şekil 2.39. Kaotik Eğitim Seti-3.

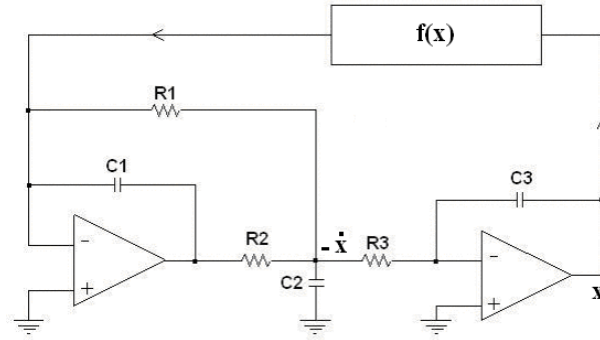
Şekil 2.39’da gösterilen Kaotik Eğitim Seti-3 bu sistemi gerçeklemek için kullanılan yedi bloktan oluşmaktadır:

- 1) Temel Kaotik Devre Bloğu,

- 2) Nonlinear Devre Bloğu -1
- 3) Nonlinear Devre Bloğu -2
- 4) Nonlinear Devre Bloğu -3
- 5) Nonlinear devre bloklarının dc karakteristikleri için test ünitesi,
- 6) C_x , C_y , C_z Kapasitör Setleri,
- 7) Farklı nonlinear devre bloklarının oluşturulabilmesi için geliştirme alanı.

2.3.1. Kaotik Eğitim Seti-3'teki Devreler için Simülasyon Çalışmaları

Sprott sisteminin Denklem 2.7 ile tanımlanan temel eşitliklerini pratikte gerçeklemek için kullanılan devre yapısı Şekil 2.40'ta görülmektedir. Bu devre yapısı Tablo 2.1'de özetlenen bütün nonlinear fonksiyonlar için ortak olarak kullanılmaktadır ve *Kaotik Eğitim Seti-3*'te de "Temel Devre Bloğu" olarak isimlendirilmektedir. Burada $R_1=R_2=R_3=1K\Omega$ iken $C_z=C_1=0.02\mu F$, $C_y=C_2=0.5\mu F$, $C_x=C_3=0.01\mu F$ olarak seçilmiştir.

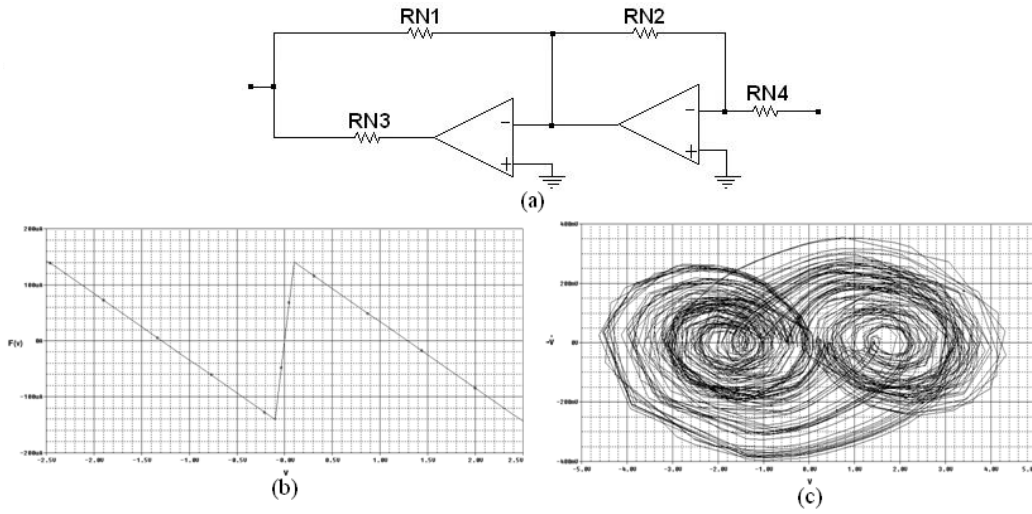


Şekil 2.40. Denklem 2.7 ile tanımlanan Sprott sistemi için önerilen temel devre yapısı.

Şekil 2.40'taki $f(x)$ fonksiyonunun yerine Tablo 2.1'deki nonlinear fonksiyonların gerçekleştirimleri eklendiğinde sistem çok çeşitli kaotik davranışlar sergilemektedir. Tablo 2.1'deki Denklem 2.7.1, 2.7.2 ve 2.7.3 ile tanımlanan nonlinear fonksiyonlar op-amp'larla gerçekleştirildikten sonra, 2.39'da da görüldüğü gibi sırasıyla Nonlinear Devre Bloğu 1, 2 ve 3 şeklinde Kaotik Eğitim Seti-3'e yerleştirilmiştir. Bu yapılara ait op-amp tabanlı gerçekleştirimler aşağıda özetlenmektedir:

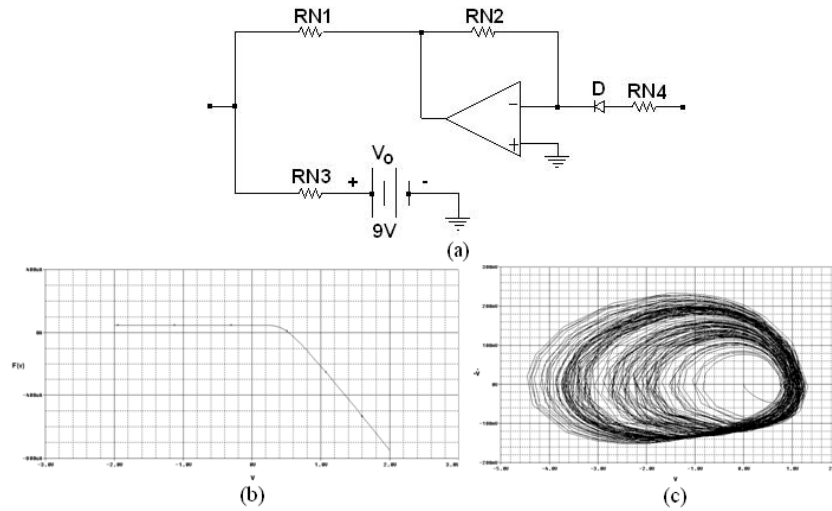
$f(x)=|x|-r$ nonlinear fonksiyonu için önerilen op-amp tabanlı devre yapısı Şekil 2.41a'daki gibidir. Bu fonksiyona ait parçalı lineer fonksiyonun karakteristiği Şekil 2.41b'de görülmektedir. Şekil 2.41a'daki nonlinear fonksiyona ait devre yapısı Şekil 2.40'taki temel blok ile birleştirilip, eleman değerleri $R_{N1}=10k\Omega$ 'luk potansiyometre, $R_{N2}=R_{N4}=1k\Omega$, $R_{N3}=45$

k Ω şeklinde ayarlandığında elde edilen kaotik çekere ait simülasyon sonucu Şekil 2.41c’de sunulmuştur.



Şekil 2.41. Tablo 2.1’de Denklem 2.7.1 ile tanımlanan nonlinear fonksiyon için a) Önerilen temel devre yapısı, b) Dc karakteristik, c) Nümerik simülasyon sonucu.

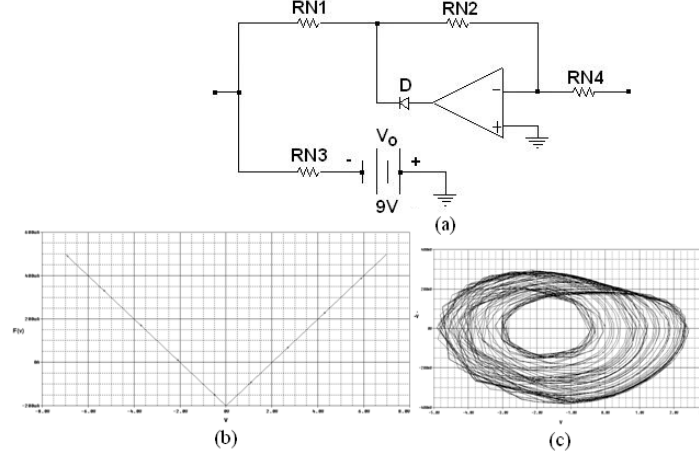
$f(x) = -B \max(x, 0) + C$ nonlinear fonksiyonun kullanıldığı yapının gerçekleştirimi için önerilen devre yapısı Şekil 2.42a’da görülmektedir. Burada $R_{N1} = 2k\Omega$ ’luk potansiyometre, $R_{N2} = R_{N4} = 1k\Omega$, $R_{N3} = 180k\Omega$ ’dur. Bu fonksiyona ait dc karakteristik Şekil 2.42b’de görüldüğü gibidir. Şekil 2.42a’daki devre ile gerçekleştirilen bu fonksiyon ana devreye bağlandığında elde edilen simülasyon sonucu Şekil 2.42c’de görülmektedir.



Şekil 2.42. Tablo 2.1’de Denklem 2.7.2 ile tanımlanan nonlinear fonksiyon için a) Önerilen temel devre yapısı, b) Dc karakteristik, c) Nümerik simülasyon sonucu.

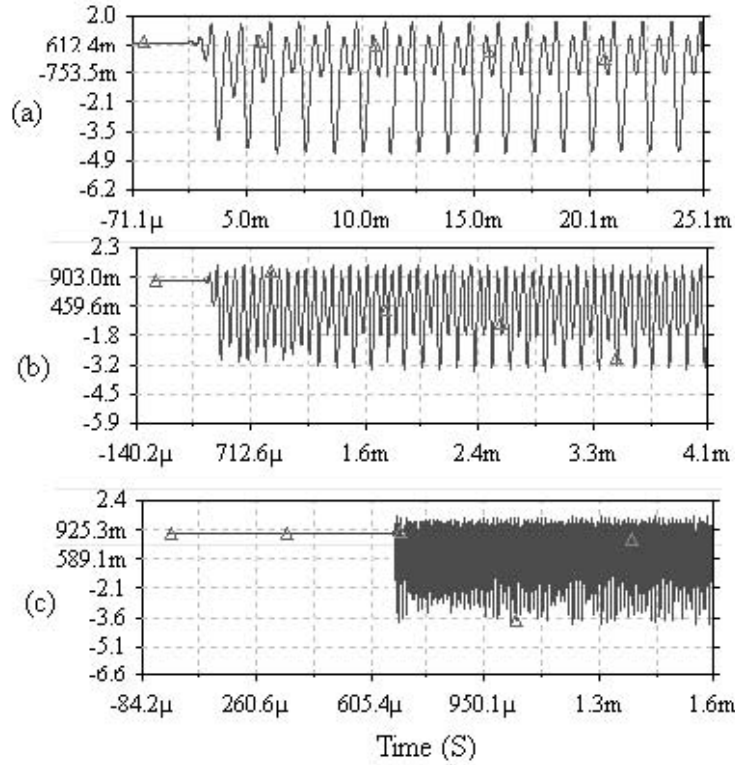
$f(x) = -Bx + C \operatorname{sgn}(x)$ nonlinear fonksiyonun op-amplarla gerçekleştirimi Şekil 2.43a’da verilmektedir. Bu devredeki eleman değerleri şu şekildedir: $R_{N1} = 5k\Omega$, $R_{N2} = 2k\Omega$ ’luk

potansiyometre $R_{N3}=45k\Omega$, $R_{N4}=5k\Omega$ luk potansiyometredir. Tablo 2.1'deki denklem 2.7.3 ile tanımlanan bu fonksiyona ait dc karakteristik Şekil 2.43.b'de sunulmaktadır. Nonlinear fonksiyon Şekil 2.40'taki ana devreye bağlandıktan sonra elde edilen kaotik çekere ait simülasyon sonucu Şekil 2.43c'de verilmektedir.



Şekil 2.43. Tablo 2.1'de Denklem 2.7.3 ile tanımlanan nonlinear fonksiyon için a) Önerilen temel devre yapısı, b) Dc karakteristik, c) Nümerik simülasyon sonucu.

Kaotik Eğitim Seti-3 üzerinde bulunan bir diğer blok ise kaotik işaretlerin frekans değişimlerini gözlemleyebilmek için eklenmiş kapasitör setleri kısmıdır. Bu kısımda Denklem 2.7'deki x , y ve z durum değişkenlerinin her birinin diferansiyel tanımlamalarını; elektronik donanımlarla gerçeklemek için eklenmiş kapasitörlerin değerleri sırasıyla 10 ve 100 ile ölçeklendirilmiştir. Elde edilen değerlerin devreye alınabilmesi için Şekil 2.39'dan da görülebileceği gibi yapıya jumperlar eklenmiştir. Devredeki kapasitörlerin değerleri birbirleri ile uyumlu bir şekilde değiştirildiğinde; yani kapasitörlerin değerleri sırasıyla 10 ve 100 kat azaltıldığında teorik hesaplamalarla uyumlu olarak kaotik osilasyon frekansıyla orantılı artış gözlemlenmiştir. Nonlinear Devre Bloğu-2 ana devreye bağlıken kapasitör değerlerinin değişimi sonucunda gözlemlenen frekans değişimine ait nümerik simülasyon sonuçları Şekil 2.44'te sunulmaktadır. Şekil 2.44a'da kapasitörlerin değerleri normal değerlerindeyken elde edilen x parametresine ait çıkış gösterilmektedir. Bu çıkışta işaret 0-25ms aralığında çizdirilirken; kapasitörlerin değerlerinin 10 kat küçültüldüğü Şekil 2.44b'deki simülasyon sonuçlarında çıkış işareti 0-4ms aralığında çizdirilmiştir. Son olarak kapasitör değerlerinin 100 kat küçültüldüğü değerlerdeki simülasyon sonuçları Şekil 2.44c'de sunulurken, sonuçlar 0-1.6ms aralığında çizdirilmiştir.



Şekil 2.44. *Kaotik Eğitim Seti-3*'te bulunan kaotik işaretlerin frekans değişimlerini ele alan yapıya ait simülasyon sonuçları: a) kapasitörlerin normal değerleri için, b) kapasitörlerin 10 kat küçültüldüğü değerler için, c) kapasitörlerin 100 kat küçültüldüğü değerler için

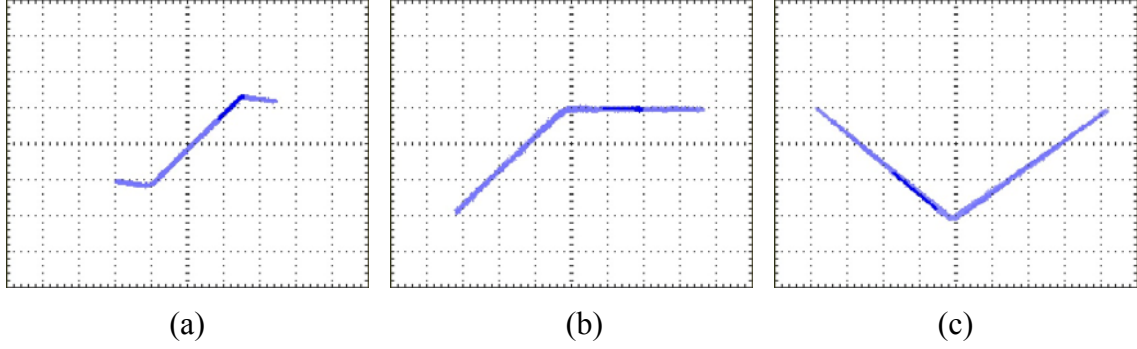
Kaotik Eğitim Seti-3'te bu blokların dışında Şekil 2.39'dan da görülebileceği gibi farklı nonlinear fonksiyonların gerçekleştirimlerinin yapılabilmesi için bir geliştirme alanı da bırakılmıştır. Bu kısımda farklı nonlinear fonksiyonların gerçekleştirilebilmesi için bir breadboard, iki adet işlemsel kuvvetlendirici, bir adet de çarpıcı devresi bulunmaktadır.

2.3.2. Kaotik Eğitim Seti-3 ile Yapılan Deney Çalışmaları

Deney 1: Nonlinear devre bloklarının dc karakteristiklerinin gözlemlenmesi.

Kaotik Eğitim Seti-3'te üç adet Nonlinear Devre Bloğu bulunmaktadır. Bu blokların dc karakteristiklerine ait simülasyon sonuçları önceki bölümde sunulmuştur. Bu nonlinear fonksiyonların dc karakteristiklerini deneysel olarak gözlemlemek için set üzerindeki “Nonlinear devre bloklarının dc karakteristikleri” test bloğu kullanılmaktadır. Bu bloktaki “Test Signal” ile gösterilen kısma $V_{pp}=7V$, frekansı 30Hz olan üçgen dalga formundaki bir işaret uygulanmalıdır. Nonlinear Devre Bloklarının giriş ve çıkışları sırayla “Test Signal” kısmına seri bağlanmış olan Nonlinear Devre Bloğu ile birleştirilmelidir. Osiloskopun bir

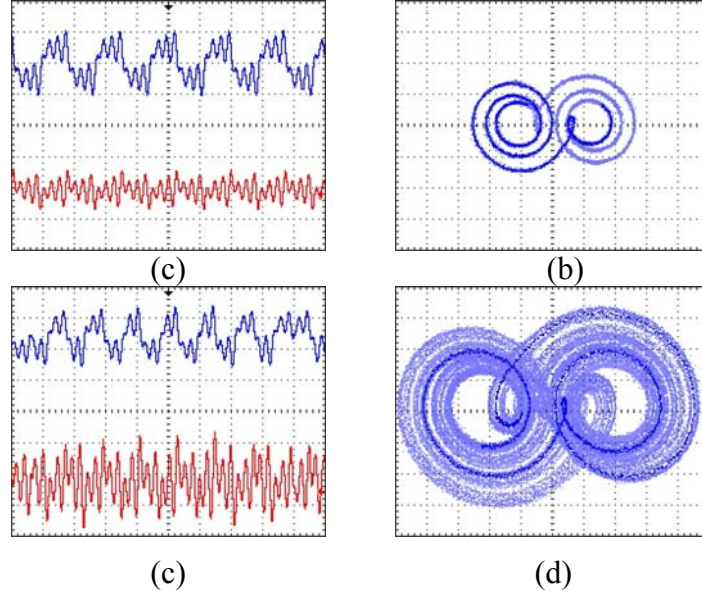
kanalı test işaret noktasına bağlanırken, diğeri ilgili nonlinear devre bloğunun ölçüm noktasına bağlanmalıdır. Nonlinear Devre Bloğu- 1, 2, 3 blokları için sırasıyla elde edilen deney sonuçları Şekil 2.45a, b, ve c’de görülmektedir.



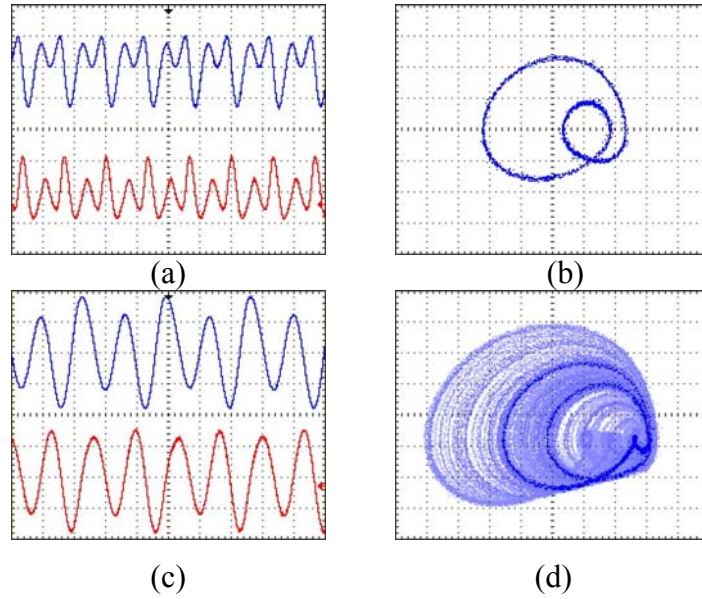
Şekil 2.45. *Kaotik Eğitim Seti 3*’teki Nonlinear Devre Bloklarının dc karakteristiklerine ait deneysel sonuçlar: a) Nonlinear Devre Bloğu-1’in dc karakteristiği, b) Nonlinear Devre Bloğu-2’nin dc karakteristiği, c) Nonlinear Devre Bloğu-3’ün dc karakteristiği.

Deney 2: Sprot Systemi’ne ait kaotik işaretlerin elde edilmesi.

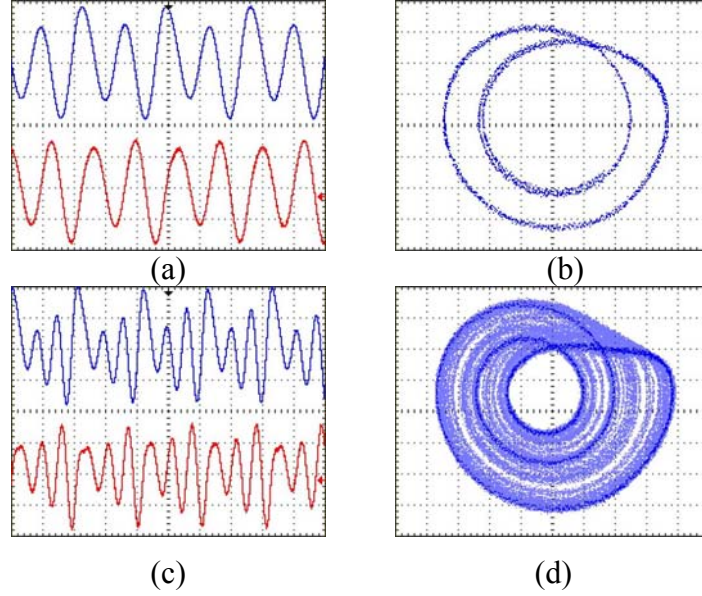
Denklem 2.7’deki $f(x)$ fonksiyonunun değişimi ile farklı kaotik işaretler elde edilmektedir. Tablo 2.1’deki $f(x)$ nonlinear fonksiyonlarının ilk üçüne ait devre yapılarından ve bu devrelerin simülasyonlarından bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Nonlinear devre blokları ana devreye bağlandığında elde edilen farklı kaotik çekerler ve bu kaotik çekerlerin periyodik geçişleri *Kaotik Eğitim Seti-3* ile kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Nonlinear Devre Bloğu-1 eğitim kartındaki ana devreye bağlandığında elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2.46’da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi periyodik katlanmalar ve kaotik işarete geçiş kart üzerinde RN11 ile temsil edilen potansiyometre vasıtasıyla kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Nonlinear Devre Bloğu-2 ana devredeki ilgili kısımlara bağlandığında elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2.47’de gösterilmektedir. Bu kısımdaki nonlinear fonksiyonun periyodik geçişleri ise kart üzerinde RN21 ile temsil edilen potansiyometrenin değerinin değiştirilmesi ile gözlemlenebilmektedir. Son olarak Nonlinear Devre Bloğu-3 ana devredeki ilgili kısımlara bağlandığında elde edilen deneysel sonuçlar ise Şekil 2.48’de gösterilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarındaki periyodik geçişler ve kaotik işaretin gözlemlenmesi bu blok üzerinde bulunan RN32 potansiyometresinin değiştirilmesi ile elde edilmektedir.



Şekil 2.46. Nonlinear Devre Bloğu-1 ana devreye bağlıyken elde edilen deney sonuçları: a) Periyot 2'ye ait zaman domeni gösterimi x:5V/div, y:500mV/div, Time/div: 2.5ms; b) Faz portresi gösterimi x:2V/div, y:200mV/div; c) Kaotik davranış için zaman domeni gösterimi x:5V/div, y:200mV/div, Time/div: 2.5ms; d) faz domeni gösterimi x:1V/div, y:100mV/div.



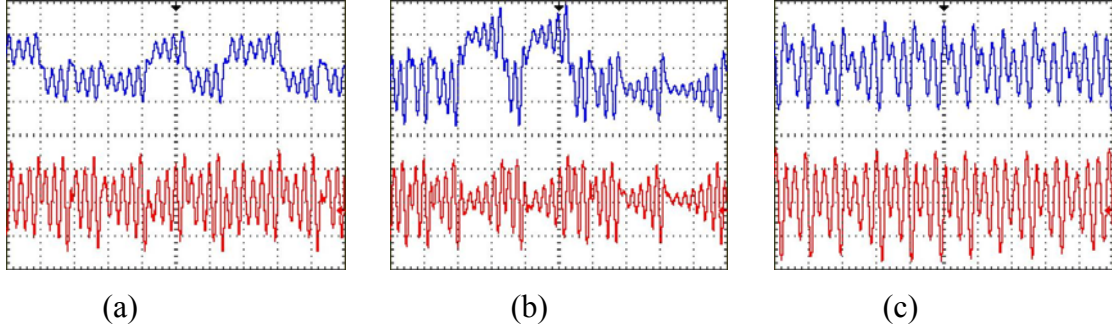
Şekil 2.47. Nonlinear Devre Bloğu-2 ana devreye bağlıyken elde edilen deney sonuçları: a) Periyot 2'ye ait zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 1ms; b) Faz portresi gösterimi x:1V/div, y:100mV/div; c) Kaotik davranış için zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 2.5ms; d) faz domeni gösterimi x:1V/div, y:100mV/div.



Şekil 2.48. Nonlinear Devre Bloğu-3 ana devreye bağlıken elde edilen deney sonuçları: a) Periyot 2'ye ait zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 500µs; b) Faz portresi gösterimi x:1V/div, y:100mV/div; c) Kaotik davranış için zaman domeni gösterimi x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 1ms; d) faz domeni gösterimi x:1V/div, y:100mV/div.

Deney 3: Farklı frekanslarda kaotik işaret elde etmek için kapasitör setlerinin devreye alınması.

Bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi Sprott Sistemi'nin ana devresinde C_x , C_y ve C_z ile gösterilen kapasitörlerin değerleri birbiri ile orantılı olarak ölçeklendirildiğinde frekansta da bir değişim gözlenmektedir. Bu sebeple ana devredeki kapasitörler Kaotik Eğitim Kartı-3 üzerinde 10 ve 100 kat küçültülmüş değerler için birer set şeklinde düşünülerek tasarlanmıştır. Örneğin kaotik işaretin normal değerlerdeki çıkışını gözlemlemek istiyorsak C_z , C_y , ve C_x -Kapasitör Seti olarak isimlendirilen bloklardaki ilk kapasitörleri jumperlarla devreye almalıyız. Nonlinear Devre Bloğu 2 ana devrede bağlıken yapılan simülasyonlara ait Şekil 2.44'teki sonuçlarından da görüldüğü gibi kapasitörlerin değerleri azaldıkça frekansta artma gözlemlenmektedir. *Kaotik Eğitim kartı 3*'te Nonlinear Devre Bloğu-1 ana devreye bağlıken kapasitör setlerinin değerlerinin sırasıyla değiştirilmesiyle elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2.49'da sunulmaktadır. Şekil 2.49a $C_z=20$ nF, $C_x=10$ nF, $C_y=500$ nF değerleri için kaydedilen deneysel sonuçları, Şekil 2.49b $C_z=2$ nF, $C_x=1$ nF, $C_y=50$ nF değerleri için kaydedilen sonuçları Şekil 2.49c ise $C_z=0.2$ nF, $C_x=0.1$ nF, $C_y=5$ nF değerleri için kaydedilen deneysel sonuçları göstermektedir.



Şekil 2.49. *Kaotik Eğitim Seti-3*'te bulunan kaotik işaretlerin frekans değişimlerini ele alan yapıya ait deney sonuçları: a) kapasitörlerin normal değerleri için; x:2V/div, y: 200mV/div, Time/div: 2.5ms; b) kapasitörlerin 10 kat küçültüldüğü değerler için; x:500mV/div, y:200mV/div, Time/div: 250μs; c) kapasitörlerin 100 kat küçültüldüğü değerler için; x:2V/div, y:200mV/div, Time/div: 25μs.

2.3. Kaotik Eğitim Seti-4

Kaos başlangıç şartlarına hassas bağıllıkla karakterize edilen, bir deterministik dinamik sistemde sınırlı yinelenen bir hareket olarak tanımlanmaktadır. Literatürde kaosla ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan en çok karşımıza çıkanlardan biri de Lorenz Sistemi'dir. Lorenz sistemi aşağıdaki diferansiyel denklemler ile tanımlanmaktadır [77].

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha(y - x), \\ \dot{y} &= cx - xz - y, \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}\tag{2.8}$$

Lorenz sistemi için tipik kaos parametreleri $a=10$, $c=28$ ve $b=8/3$ 'tür.

Literatürde Lorenz Sistemi'ne benzeyen fakat kaotik dinamikleri farklı olan başka sistemler de mevcuttur. *Kaotik Eğitim Seti-4* bu sistemleri ele almaktadır. Bu sistemler Vanecek ve Celikovsky tarafından Genelleştirilmiş Lorenz Sistemleri olarak toparlanmıştır [78]. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi ile ifade edilen kaotik sistemlerin matematiksel tanımlamaları ilerleyen kısımlardan da görüleceği gibi birbirine çok benzerdir. Kaotik Eğitim Seti-4 bu benzerlikten yola çıkılarak tasarlanmış bir eğitim kartıdır.

Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi denklem 2.9'daki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}\tag{2.9}$$

Denklem 2.9'daki parametrelerin, denklem tanımlamalarının bir kısmı değiştirildiğinde Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi; özel sistemlere dönüşmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda ele alınmaktadır:

Denklem 2.9'daki Genelleştirilmiş Lorenz Sistemleri'nin tanımlamaları kullanılarak orijinal **Lorenz sistemi** şu şekilde tarif edilebilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'daki Lorenz Sistemi'nde $a_{12}.a_{21}>0$ 'dır. ($10.28>0$).

Chen, Lorenz sisteminden farklı topolojiye sahip kontrol geri beslemeli diğer bir kaotik sistem geliştirmiştir [79, 80]. **Chen sistemi**:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y - x), \\ \dot{y} &= (c - a)x - xz + cy, \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \quad (2.11)$$

Chen sistemi için tipik parametreler $a=35$, $c=28$ ve $b=3$ 'tür. Bu sistem basit yapıların ve Lorenz sisteminin birleşimidir. Burada, Vanecek ve Celikovsky tarafından formüle edilen sınıflandırma esasına dayandırılmıştır. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi formuna göre Chen Sistemi şu şekilde tarif edilebilir:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ (c-a) & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -35 & 35 & 0 \\ -7 & 28 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Chen Sistemi'nde $a_{12}.a_{21}<0$ 'dır. ($35.(-7) < 0$). Chen sistemi $a_{12}a_{21}<0$ şeklinde iken, özel bir durum olarak Lorenz Sistemi ailesinin lineer kısmının $A=[a_{ij}]$ için $a_{12}a_{21}>0$ olması Vanecek ve Celikovsky'nin Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi ailesinin sınıflandırılmasında dikkate değer bir özelliktir. Gerçekte Chen Sistemi diğer kaotik sistem ailelerine ait kabul edilmiştir.

Lü ve Chen; Lorenz ve Chen çekerleri arasında geçişi sağlayan ve $a_{12}.a_{21}=0$ durumu ile tanımlanan yeni bir kaotik sistem bulmuştur [81, 82]. Bu kaotik sistem aşağıdaki diferansiyel denklemlerle tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha(y-x), \\ \dot{y} &= -xz + cy, \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}\tag{2.13}$$

Lü Sistemi için tipik parametreler $a=36$, $c=20$ ve $b=3$ 'tür. Bu sistem Lorenz ve Chen arasındaki boşluk için bir köprüdür. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemleri için, Lü sistemi şu şekilde tarif edilir:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 36 & 36 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{2.14}$$

Lü Sistemi'nde $a_{12}.a_{21}=0$ 'dır. ($36.0=0$).

Lü başka bir kaotik sistem olan Birleştirilmiş Sistem'i bulmuştur. Bu yeni **Birleştirilmiş Sistem** şu şekilde tanımlanır [83]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (25.\alpha + 10)(y - x), \\ \dot{y} &= (28 - 35.\alpha)x - xz + (29.\alpha - 1)y, \\ \dot{z} &= xy - \frac{(a+8)}{3}z\end{aligned}\tag{2.15}$$

Burada $\alpha \in [0,1]$ olarak seçilmelidir. Vanecek ve Clikovsky'e göre bir sabit matris olan $A=[a_{ij}]$ Denklem 2.15'teki lineer kısım $a_{12}.a_{21}$ kritik değerini sağlar. Denklem 2.15'teki bu kritik değer alacağı değere göre bütün kaotik sistem ailelerinin özelliklerini taşır. $0 \leq \alpha \leq 0,8$ ise Denklem 2.15 Genelleştirilmiş Lorenz Sistemine ait olur; çünkü $a_{12}.a_{21}>0$ 'dır. $\alpha = 0,8$ ise kaotik sistem sınıfına aittir; çünkü $a_{12}.a_{21} = 0$ 'dır. $0,8 < \alpha \leq 1$ ise Genelleştirilmiş Chen sınıfına aittir; çünkü $a_{12}.a_{21}<0$ olur.

Lü ve Chen **Lorenz Benzeri Sistem**'i de bulmuşlardır [84]. Bu sistem ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= -\frac{(a.b)x}{a+b} - yz + c, \\
\dot{y} &= ay + xz \\
\dot{z} &= bz + xy
\end{aligned}
\tag{2.16}$$

Burada a, b, c reel sabitlerdir (a=10, b=4, c=0).

Yeni Kaotik Sistem; nonlinear bağımsız adi diferansiyel denklemler kullanılarak önerilmiştir. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi'ne benzemektedir. Bu sistem aşağıdaki diferansiyel denklemlerle tanımlanmaktadır [85]:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= (y - x), \\
\dot{y} &= ay - xz \\
\dot{z} &= xy - b
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

Bu **yeni sistem** altı adet terim, iki adet çarpım şeklindeki nonlinear (x.z, x.y) ifade ve iki pozitif reel sabit parametre içermektedir. Sistemin sabit değişkenleri x, y, z ve a=0.5, b=0.5'tir. Yeni sistemde $a_{12}.a_{21}=0$ 'dır, bu açıdan Lü Sistemine benzemektedir.

Yeni sistemin Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi'ne göre tanımı aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.5 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2.18}$$

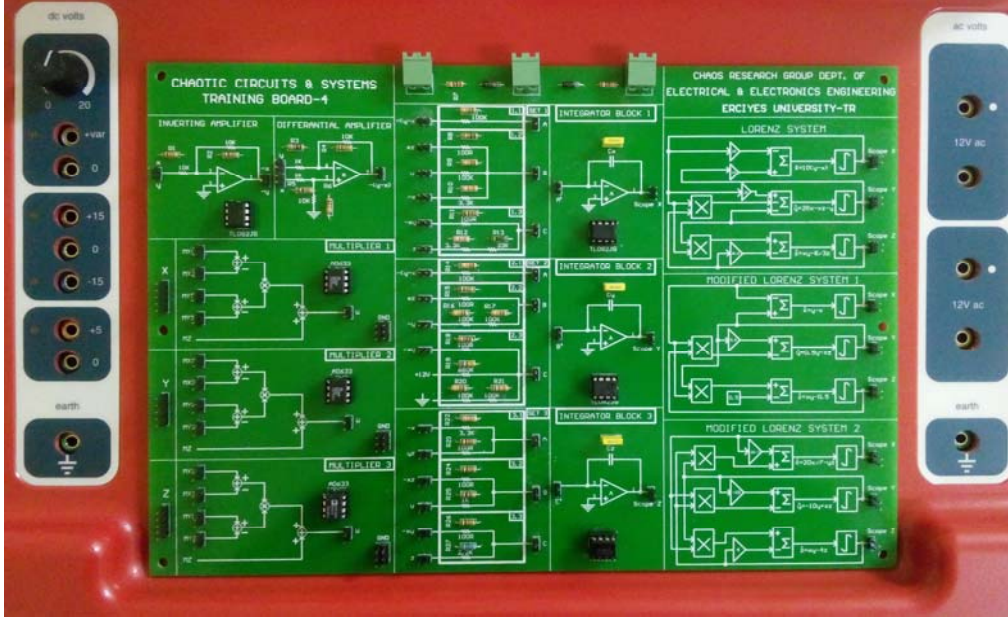
Denklem 2.9'daki genel tanımlama kullanılarak ifade edilebilen bu sistemlerin hepsi, matematiksel tanımlamalarındaki benzerliklerinin görülebilmesi açısından Tablo 2.2'de toparlanmıştır. *Kaotik Eğitim Seti-4* Lorenz Sistemi'ne benzer sistemleri ele alan bir eğitim kartı olarak tasarlanmıştır. Bu sebeple kartta oluşturulan ilk sistem Lorenz Sistemi'dir. Tablo 2.2'den görüldüğü gibi Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi'ndeki birçok sistemde x dinamiği için “(y-x)” ifadesi ortaktır. Bu ortak tanımlamadan faydalanmak için *Kaotik Eğitim Seti-4*'te incelenen bir diğer sistem; Denklem 2.17 ile tanımlanan, eğitim kartında Modifiye Lorenz Sistemi-1 olarak ele alınan ve literatüre “Yeni Kaotik Sistem” olarak sunulan kaotik sistemdir. Tablo 2.2'deki tanımlamalarda dikkat çeken bir diğer husus ise bu sistemlerdeki nonlinearlığın iki sistem dinamiğinin çarpımı ile elde edilmesidir. En fazla nonlinear çarpım ifadesine sahip sistem Tablo 2.2'den de görülebileceği gibi Lorenz Benzeri sistemdir. Bu

sebeple *Kaotik Eğitim Seti-4*'te ele alınan son sistem Lorenz Benzeri Sistem'dir ve kartta Modifiye Lorenz Sistemi-2 olarak isimlendirilmiştir. Özetle; *Kaotik Eğitim Seti-4*'te Denklem 2.8 ile tanımlanan Lorenz Sistemi, Denklem 2.16 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-1, ve Denklem 2.17 ile Tanımlanan Modifiye Lorenz sistemi-2 ele alınmaktadır.

Tablo 2.2. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi.

Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi	Tipik Parametre Değerleri	Parametre Değerleri Yerine Yazıldıktan Sonraki Tanımlamalar
Lorenz Sistemi	$a = 10$ $b = 8/3$ $c = 28$	$\dot{x} = 10(y - x),$ $\dot{y} = 28x - xz - y,$ $\dot{z} = xy - \frac{8}{3}z$
Chen Sistemi	$a = 35$ $b = 3$ $c = 28$	$\dot{x} = 35(y - x),$ $\dot{y} = -7x - xz + 28y,$ $\dot{z} = xy - 3z$
Lü ve Chen Sistemi	$a = 36$ $b = 3$ $c = 20$	$\dot{x} = 910(y - x),$ $\dot{y} = -1232x - xz + 1043y,$ $\dot{z} = xy - \frac{44}{3}z$
Lorenz Benzeri Sistem	$a = 10$ $b = 4$ $c = 0$	$\dot{x} = \frac{20}{7}x - yx + 0,$ $\dot{y} = -10y + xz,$ $\dot{z} = xy - 4z$
Yeni Kaotik Sistem	$a = 0$ $b = 0.5$ $c = 0$	$\dot{x} = (y - x),$ $\dot{y} = 0.5y - xz,$ $\dot{z} = xy - 0.5$

Şekil 2.50'de görülen *Kaotik Eğitim Seti-4* diferansiyel denklemlerle tanımlanmış kaotik sistemlerin matematiksel tanımlamalarından faydalanılarak donanımına nasıl aktarılacağını anlamak için oldukça faydalı bir karttır. Matematiksel tanımlamalardan donanımına geçiş için kartta kullanılan temel bloklar şu şekilde sıralanabilir:



Şekil 2.50. Kaotik Eğitim Seti-4.

- 1) Eviren Kuvvetlendirici bloğu
- 2) Fark Kuvvetlendiricisi Bloğu
- 3) Çarpıcı Blokları
- 4) Toplama Blokları
- 5) İntegrator Blokları,
- 6) Sistem Tanımlanması Blokları

. Bu blokların işlevleri şu şekilde özetlenebilir:

- $(y-x)$ işlemlerini gerçekleştirmek için fark kuvvetlendirici devresi kullanılmıştır. Kullanılan fark kuvvetlendirici devresinin kazancı bir olarak ayarlanmıştır. Eğer sistemde α gibi bir kazanç varsa bu kazanç ağırlıklandırılmış toplama yapılan bir sonraki blokta gerçekleştirilmiştir.
- $-x$ ya da $-y$ gibi işlemleri gerçekleştirmek için eviren kuvvetlendirici devresi kullanılmıştır. Eviren kuvvetlendiricinin kazancı bir olarak seçilmiştir.
- xy , yz , xz ya da $-xy$, $-yz$, $-xz$ çarpımları için AD633 entegresi kullanılarak üç adet çarpım bloğu karta eklenmiştir. AD633 entegresi şu matematiksel ifadeyi kullanarak işlem yapmaktadır:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + constant \quad (2.19)$$

Bu ifadeden yararlanarak örneğin $W=x.y$ işlemi için x durum değişkeni X_1 girişine, y durum değişkeni ise Y_1 girişine bağlanmalıdır. X_2 , Y_2 ve constant tanımları kullanılmadığı için bunlar sıfır olarak değerlendirilir. Devrede ise bu kısımların topraklanması gerekmektedir. Burada w çıkışının 10 kat kuvvetlendirilmesi gerektiği de unutulmamalıdır.

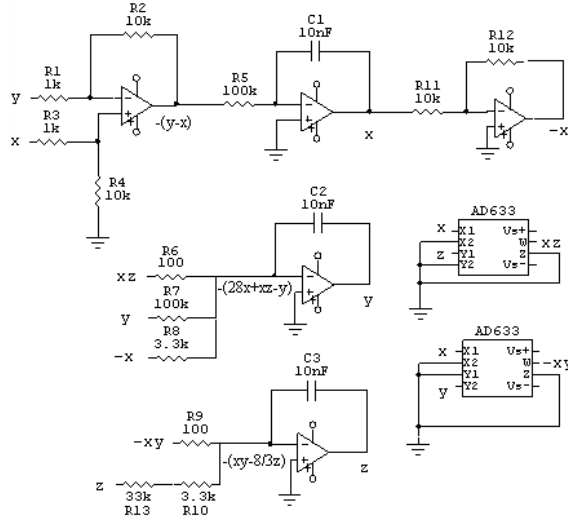
Bir başka örnek $W=-yz$ işlemi için; y durum değişkeni X_2 girişine, z durum değişkeni Y_1 girişine bağlanmalıdır. Diğer girişler topraklandığında yani sıfır yapıldığında Denklem 2.19'a göre $W=-yz/10$ elde edilir. W çıkışı 10 kat kuvvetlendirildiğinde $W=-yz$ elde edilmiş olur.

- Toplama ve çıkarma işlemleri için değişik direnç değerleri kullanılarak her sistem için ayrı ayrı ağırlıklandırılmış toplama blokları oluşturulmuştur.
- Diferansiyel denklemlerle tanımlanan kaotik sistemlerin gerçekleştiriminde integral alıcı devrelerden yararlanılmaktadır. *Kaotik Eğitim Seti-4'*'te ele alınan kaotik yapılar üç adet bağımsız değişkene sahip oldukları için (x , y ve z) üç adet integratör bloğu karttaki ortak temel blokları oluşturmaktadır.
- Son olarak eğitim kartında ele alınan sistemlerin şematik gerçekleştirmelerine ilaveten eğitim setinin sağ tarafında bloksal gerçekleştirim de yer almıştır. Sistem davranışlarının nihai elektriksel ölçümleri şematik gösterim üzerinden yapılabileceği gibi bu bloksal gösterim üzerinden de yapılabilir.

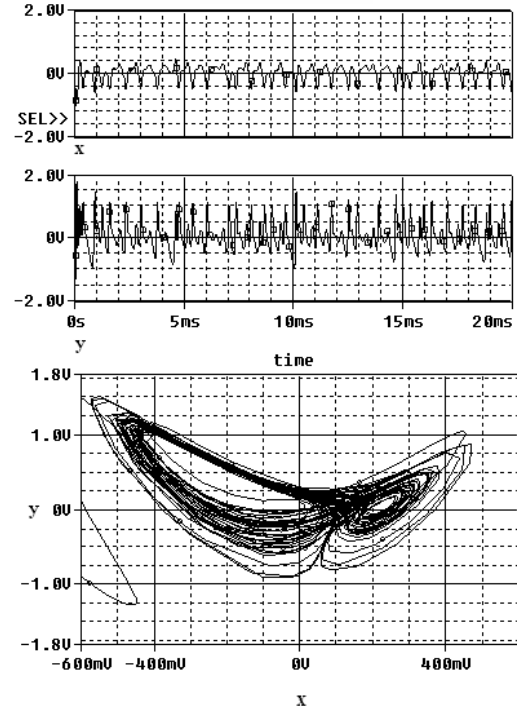
2.4.1. Kaotik Eğitim Seti-4'teki Devreler için Simülasyon Çalışmaları

Kaotik eğitim Seti-4''te ele alınan ilk sistem Denklem 2.8 ile tanımlanan Lorenz Sistemi'dir. Lorenz sisteminin devre gerçekleştirimi Şekil 2.51a'da sunulurken, bu devreye ait simülasyon sonuçları ise Şekil 2.51b de görülmektedir.

Bu kartta incelenen bir başka yapı Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi içerisinde Denklem 2.17 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-I'dir. Bu sisteme ait devre gerçekleştirimi ve simülasyon sonuçları Şekil 2.52'de sunulmaktadır.

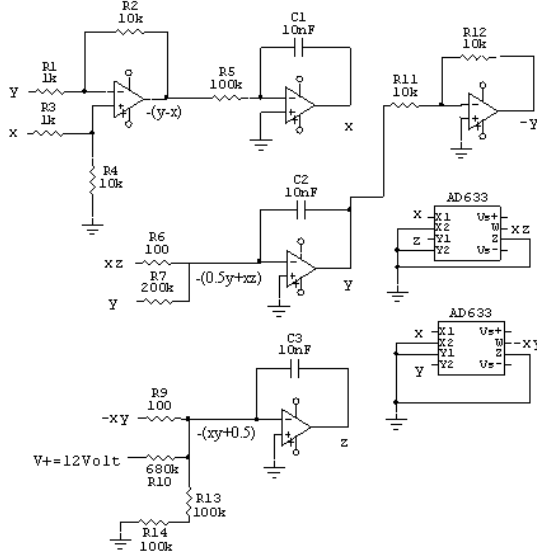


(a)

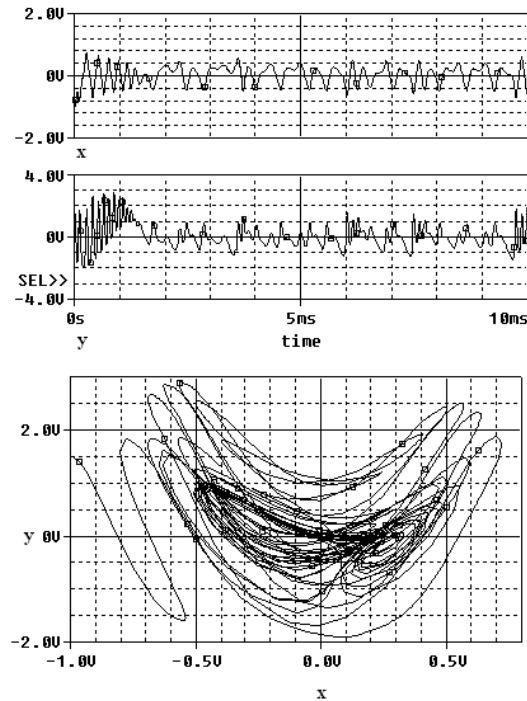


(b)

Şekil 2.51. Denklem 2.8 ile tanımlanan Lorenz Sistemi'ne ait; a)Devre gerçekleştirimi, b) Bu devreye ait simülasyon sonucu.

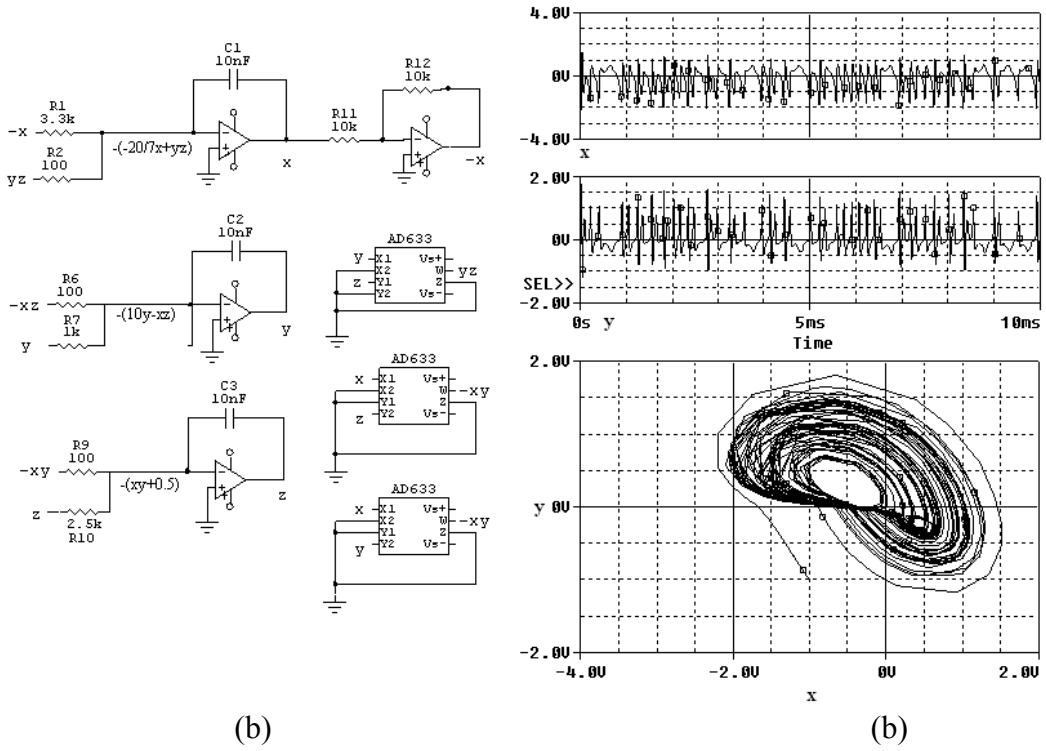


(a)



(b)

Şekil 2.52. Denklem 2.17 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-1'e ait; a)Devre gerçekleştirimi, b) Bu devreye ait simülasyon sonucu.



Şekil 2.53. Denklem 2.16 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-2'ye ait; a)Devre gerçekleştirimi, b) Bu devreye ait simülasyon sonucu.

Kaotik Eğitim Seti-4'te ele alınan son sistem Denklem 2.16 ile tanımlanan Modifiye Lorenz Sistemi-II'dir. Bu sistem için tasarlanan devre gerçekleştirimi Şekil 2.53a'da, bu devreye ait simülasyon sonuçları ise Şekil 2.53b'de verilmektedir.

2.4.2. Kaotik Eğitim Seti-4 ile Yapılan Deney Çalışmaları

Kaotik Eğitim Seti-4'te ele alınan üç sisteme ait devre şemaları detaylıca incelendiğinde; sistemlerin gerçekleştirmeleri için birçok bloğun ortak kullanıldığı görülmektedir. Örneğin çarpım işlemleri için çarpıcı blokları, integral işlemi için integratör blokları ortaktır. Bu benzerliklerden yola çıkılarak *Kaotik Eğitim Seti-4* tasarlanmıştır. Tasarımda yapılarda ortak kullanılan bloklar kart üzerinde hazır oluşturulmuş, devre bağlantıları ise uygun şekilde yapılarak her bir sistemin bu ortak bloklar temelinde oluşturulması hedeflenmiştir. Bu kartla yapılan deneyler aşağıda verilmektedir.

Deney 1: Lorenz Sistemi'ne ait devre yapısının oluşturulması:

Lorenz Sistemi'ne ait devre yapısının gerçekleştirimi için aşağıdaki devre bloklarından yararlanılacak ve blok bağlantıları aşağıdaki gibi yapılacaktır:

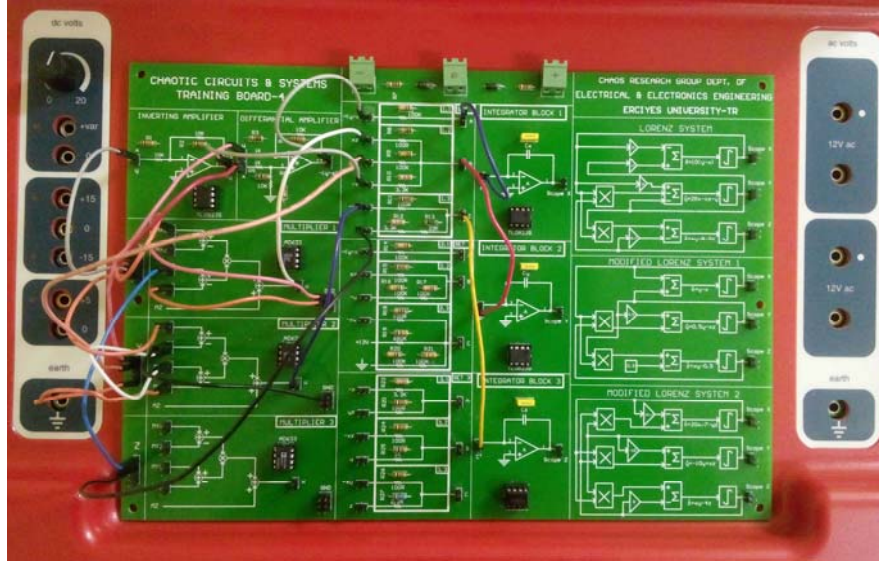
- x, y, z durum değişkenleri için sırasıyla integratör bloğu-1, 2, 3 kullanılacaktır.
- Lorenz Sistemi için toplama ve çıkarma işlemlerine denk gelen dirençler Set-1 bloğunda toparlanmıştır. Bu bloktaki "1.1" kısmı x değişkeni için ayarlanan dirençleri, "1.2" kısmı y değişkeni için ayarlanan dirençleri ve "1.3" kısmı z değişkeni için ayarlanan dirençleri içermektedir. Bu dirençlerin girişlerine yapılması gereken bağlantılar da kart üzerinde ifadelendirilmiştir.
- x durum değişkenindeki ifadeler incelendiğinde $(y-x)$ bağlantısının yapılması gerekmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi bu ifade fark kuvvetlendiricisi kullanılarak yapılmaktadır.
- y durum değişkenine geçildiğinde xz çarpımı için, çarpım bloklarından birincisi kullanılabilir. y bağlantısı direk yapılmalıdır. $-x$ için ise eviren kuvvetlendiriciden yararlanılmalıdır.
- Son olarak z durum değişkeninde $-xy$ çarpımı için ikinci çarpıcı blok kullanılabilir. z bağlantısı direk yapılmalıdır.

Eviren kuvvetlendirici, fark kuvvetlendiricisi ve çarpıcılardaki bütün bağlantıların yapılmasının ardından Lorenz Sistemi için tasarlanan devrenin gerçekleştirimi tamamlanmış olacaktır. Bu devreyi oluşturmak için *Kaotik Eğitim Seti-4* üzerinde yapılan bağlantılar Şekil 2.54'te verilmektedir. Bu bağlantıların ardından elde edilen deney sonuçları ise Şekil 2.55'te sunulmaktadır.

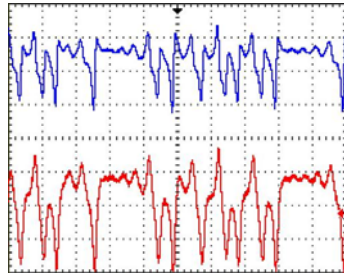
Deney 2: Modifiye Lorenz Sistemi-I'e ait devre yapısının oluşturulması:

Modifiye Lorenz Sistemi-I için kullanılacak olan devre blokları ve bu bloklar arasındaki bağlantılar şöyledir:

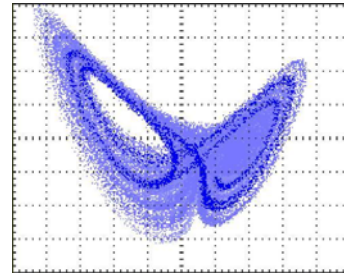
- x, y, z durum değişkenleri için sırasıyla integratör bloğu-1, 2, 3 kullanılacaktır.



Şekil 2.54. Kaotik Eğitim Seti-4'te Lorenz Sistemi'nin oluşturulabilmesi için yapılan bağlantılar.



(a)



(b)

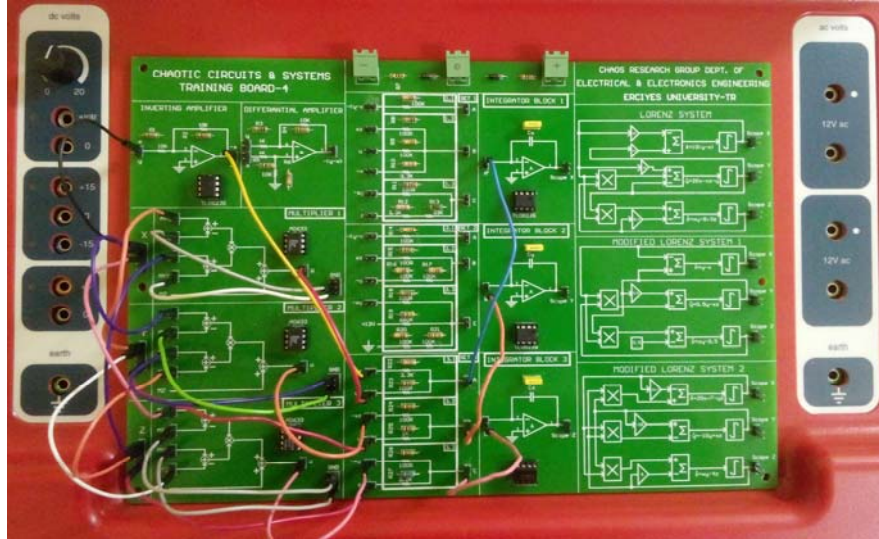
Şekil 2.55. Lorenz Sistemi'ne ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: x :500mV/div, y :200mV/div, Time/div: 1ms; b) x - z için faz uzayı gösterimi, x : 100mV/div, y : 200mV/div.

- Modifiye Lorenz Sistemi-I'deki toplama ve çıkarma işlemleri için Set-2 bloğu kullanılmalıdır. Bu bloktaki "2.1" kısmı x değişkeni için ayarlanan dirençleri, "2.2" kısmı y değişkeni için ayarlanan dirençleri ve "2.3" kısmı z değişkeni için ayarlanan dirençleri içermektedir. Bu dirençlerin girişlerinde yapılması gereken bağlantılar da belirtilmiştir.
- x durum değişkenindeki ifadeleri incelendiğinde $(y-x)$ bağlantısının yapılması gerekmektedir. Bu yapı Lorenz Sistemi'ndeki gibi oluşturulmalıdır.
- y durum değişkenine geçildiğinde xz çarpımı için, çarpım bloklarından birincisi kullanılabilir. $-y$ bağlantısı için eviren kuvvetlendirici bloğu kullanılmalıdır.

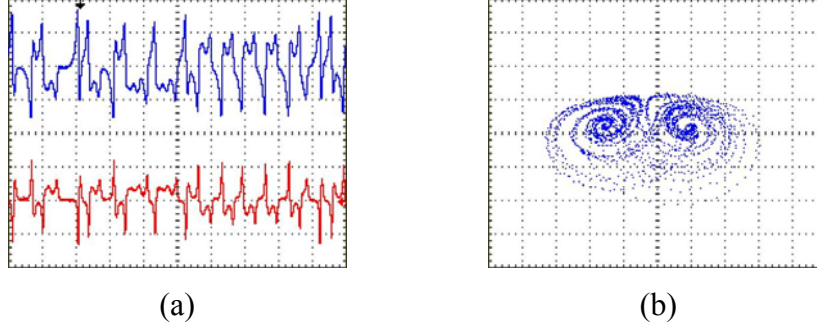
Deney 3: Modifiye Lorenz Sistemi-II'ye ait devre yapısının oluşturulması:

Kaotik Eğitim Seti-4'te ele alınan üçüncü sistem Modifiye Lorenz Sistemi-II'dir. Bu sistemi gerçeklemek için eğitim setinde kullanılacak bloklar ve bloklar arası bağlantılar aşağıda özetlenmektedir:

- x, y, z durum değişkenleri için sırasıyla integratör bloğu-1, 2, 3 kullanılacaktır.
- Modifiye Lorenz Sistemi-2 için toplama ve çıkarma işlemlerine denk gelen dirençler Set-3 bloğundadır. Bu bloktaki "3.1" kısmı x değişkeni için ayarlanan dirençleri, "3.2" kısmı y değişkeni için ayarlanan dirençleri ve "3.3" kısmı z değişkeni için ayarlanan dirençleri içermektedir. Bu dirençlerin girişlerine yapılması gereken bağlantılar kart üzerinde belirtilmiştir.
- x durum değişkeninde $-x$ ve yz ifadeleri vardır. Burada $-x$ ifadesi için eviren kuvvetlendirici bloğu, yz çarpımı için de ilk çarpıcı blok kullanılabilir.
- y durum değişkenine geçildiğinde $-xz$ çarpımı için, çarpım bloklarından ikincisi kullanılabilir. y bağlantısı ise doğrudan yapılmalıdır.
- Son olarak z durum değişkeninde $-xy$ çarpımı için üçüncü çarpıcı blok kullanılabilir. z bağlantısı direk yapılmalıdır.



Şekil 2.58. Kaotik Eğitim Seti-4'te Modifiye Lorenz Sistemi-II'nin oluşturulabilmesi için yapılan bağlantılar.



Şekil 2.59. Modifiye Lorenz Sistemi-II'ye ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: $x:1V/div$, $y:1V/div$, $Time/div: 500\mu s$; b) $x-z$ için faz uzayı gösterimi, $x: 500mV/div$, $y: 500mV/div$.

x , y ve z durum değişkenlerindeki ifadeleri oluşturmak için yardımcı olarak kullanılan eviren kuvvetlendirici ve çarpıcı bloklardaki gerekli bağlantılarda yapıldıktan sonra Modifiye Lorenz Sistemi-II'nin devre gerçekleştirimi tamamlanmış olacaktır. Bu devre için yapılan bağlantılar Şekil 2.58'de gösterilmektedir. Elde edilen deneysel sonuçları ise Şekil 2.59'da sunulmaktadır.

Bu bölümde tanıtılan eğitim setleri; literatürde kaotik sistemler için en temel model yapıları teşkil eden Chua, Rössler, Sprott, Lorenz gibi sistemleri içermekte olup, kaos ve kaotik sistemlerle ilgilenen araştırmacı ve öğrencilerin bu sistemler üzerinden sistematik bir çalışma yapmaları mümkün hale gelmektedir. Bu sistematik deneysel çalışmalardan aşağıda özetlenen kavramlar da bu setleri kullananların kazanımları arasında gösterilebilir:

- Nonlineer direnç kavramı,
- Otonom ve otonom olmayan kaotik dinamikler ve bu dinamikleri tek bir devre yapısında birleştiren karışık modlu kaotik devre,
- Sinüzoidal osilatörlerin kaotik osilatör sistemlerine dönüştüğü özel yapılar,
- Kaotik işaretlerin periyodik geçişlerinin gözlemlenmesi,
- Kaotik osilatörlerde frekans kontrolü,
- Kaotik bir sistemin tasarımı ve gerçekleştirim işlemleri.

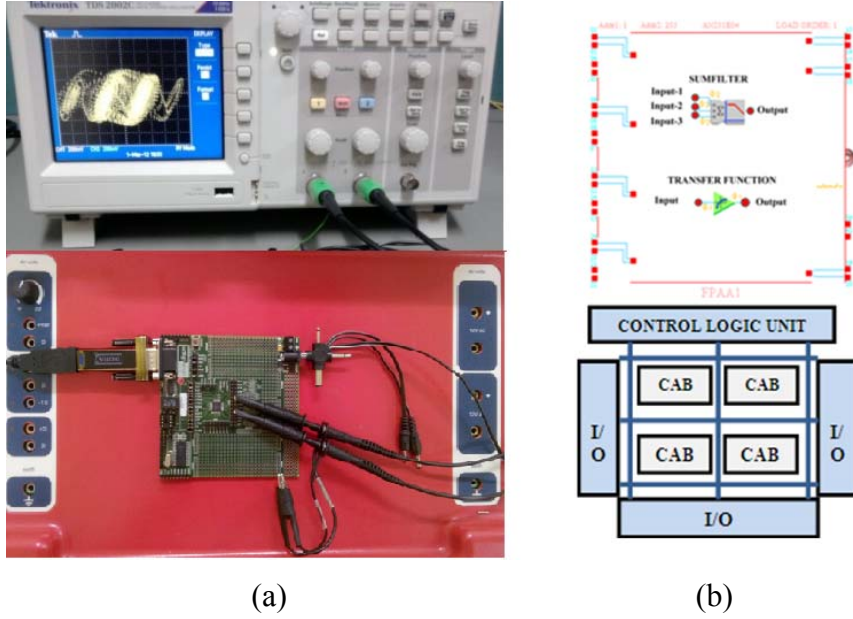
BÖLÜM 3

FPAA TABANLI KAOS EĞİTİM MODÜLÜ VE UYGULAMALARI

Önceki bölümde tanıtılan dört adet kaotik eğitim setine ilaveten, beşinci eğitim seti olarak kaotik sistemlerin programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir bir şekilde gerçekleştirilmesine imkan tanıyan programlanabilir bir eğitim modülü de proje çalışmasına dahil edilmiştir. Bu eğitim modülü için analog sistemlerin programlanabilir tasarımında kullanılan Alan Programlanabilir Analog Dizi (Field Programmable Analog Array-FPAA) elemanının yer aldığı modül yazılım ve donanım destekli uygulamalarla kaotik eğitim seti şeklinde kullanılmıştır. FPAA elemanı ile oluşturulan örnek bir deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 3.1a’da sunulmaktadır. Bu bölümde öncelikle FPAA elemanının özellikleri incelenecek, ardından bu eleman kullanılarak kaotik sistemlerin bu modül üzerinde nasıl tasarlanacağı ele alınacaktır. Bu bölümde; Chua, Sprott, Lorenz Sistemleri gibi kaotik işaret üreteçleri, çok çekerli kaotik sistem uygulamaları, Hücresel Sinir Ağı (Cellular Neural Networks-CNNs) tabanlı kaotik sistem uygulamaları ve kaotik haberleşme örnekleri programlanabilir kaotik eğitim seti modülü ile gerçekleştirilecek olup, bu gerçekleştirim süreçleri pedagojik bir yaklaşım çerçevesinde sunulacaktır.

3.1. Alan Programlanabilir Analog Diziler ve Programlanabilir Kaotik Eğitim Modülü

Tasarım süreçleri uzun olan analog devrelerin tasarımını hızlandırmak ve hem analog hem de hibrid (analog-dijital) devrelerin tasarımında kararlılık sağlamak için Alan Programlanabilir Analog Dizileri (Field Programmable Analog Array, FPAA) oldukça uygun elemanlardır. FPAA elemanı kararlılık, doğruluk ve hızlı prototip teknikleri sunmasının yanı sıra, temel analog işlemleri içermesi ve farklı analog fonksiyonları gerçekleştirmek için elektriksel olarak



Şekil 3.1. a) FPAA eğitim bordu için oluşturulan deney düzeneği, b) FPAA'nın içyapısı.

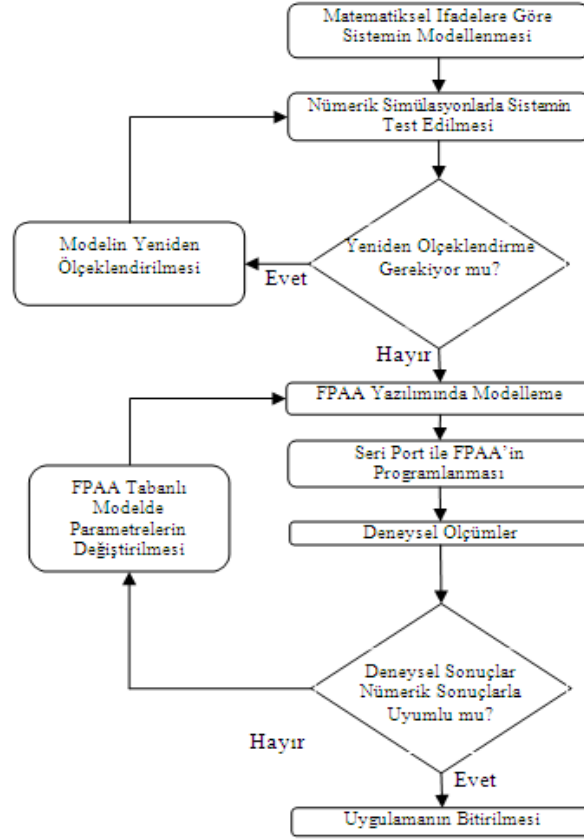
yeniden programlanabilmesi açısından, analog işaretler üreten kaotik devreleri gerçeklemek için oldukça uygun bir tümdevredir. FPAA elemanı Şekil 3.1b'de de görüldüğü gibi, giriş çıkış portlarından, lojik kontrol biriminden ve elemanın hafızasını belirleyen ve CAB (Configurable Analog Block) adı verilen yapılandırılabilir analog bloklardan meydana gelir. Bir FPAA bordunun hafızasının yetmediği tasarımlarda FPAA bordları birleştirilebilir [86]. Analog işlemler CAB blokları içerisinde gerçekleşir ve bu işlemler için anahtarlamalı kapasitör tekniği kullanılmaktadır. Entegre tasarımları sırasında yarıiletken üzerinde kapasitör oluşturmak direnç oluşturmaktan daha kolaydır. Ayrıca kapasitörlerde güç tüketimi olmaz ve devrede direnç gerekli olduğunda anahtarlamalı kapasitör tekniği ile direnç eşdeğerleri oluşturulabilir. Yeniden programlanabilir kapasitörler sayesinde ihtiyaç duyulan direnç değerleri, daha doğru ve kararlı bir şekilde elde edilebilir. CAB içerisindeki lojik kontrol, dış dünyadan gölge SRAM'e bilgiyi transfer eder ve konfigürasyon SRAM'e de bu bilgiyi kopyalar. Anahtar matrisler, konfigürasyon SRAM tarafından kontrol edilen ve devre bağlantıları için kullanılan iki dizilik anahtarlara sahip olan yapılardır. Kapasitör dizileri; içerisinde birçok küçük ama eşit boyutta kapasitör bulunan ve bu kapasitörlerin istenilen kapasitans değerleri için programlanabildiği yapılardır.

FPAA'ler tasarım sırasında ihtiyaç duyulan analog fonksiyonları gerçekleştirmek, CAB' ler arasındaki ve diğer gerekli olan arabağlantıları düzenlemek için yazılım geliştirme programı

Tablo 3.1. AnadigmDesigner2 yazılımında kullanılan CAM Listesi.

CAM	Description	Version	Approved
ADC-SAR	Analog to Digital Converter (SAR)	1.0.0	Yes
Comparator	Comparator	1.1.0	Yes
Differentiator	Inverting Differentiator	1.0.2	Yes
Divider	Divider	1.0.0	Yes
FilterBilinear	Bilinear Filter	1.0.1	Yes
FilterBiquad	Biquadratic Filter	1.0.1	Yes
FilterLowFreqBi...	Low Corner Frequency Bilinear LPF (External...	1.0.0	Yes*
GainHalf	Half Cycle Gain Stage	1.0.0	Yes
GainHold	Half Cycle Inverting Gain Stage with Hold	1.0.0	Yes
GainInv	Inverting Gain Stage	1.0.0	Yes
GainLimiter	Gain Stage with Output Voltage Limiting	1.0.0	Yes*
GainPolarity	Gain Stage with Polarity Control	1.1.0	Yes
GainSwitch	Gain Stage with Switchable Inputs	1.1.0	Yes
GainVoltageCo...	Voltage Controlled Variable Gain Stage	1.0.0	Yes
Hold	Sample and Hold	1.0.0	Yes
HoldVoltageCo...	Voltage Controlled Sample and Hold	1.1.0	Yes
Integrator	Integrator	1.1.0	Yes
Multiplier	Multiplier	1.0.0	Yes
MultiplierFilterL...	Multiplier with Low Corner Frequency LPF (E...	1.0.0	Yes*
OscillatorSine	Sinewave Oscillator	1.0.2	Yes
PeakDetect2	Peak Detector	1.0.3	No
PeriodicWave	Arbitrary Periodic Waveform Generator	1.0.2	Yes
RectifierFilter	Rectifier with Low Pass Filter	1.0.1	Yes
RectifierHalf	Half Cycle Rectifier	1.0.0	Yes
RectifierHold	Half Cycle Inverting Rectifier with Hold	1.0.0	Yes
SquareRoot	Square Root	1.0.0	Yes
SumBiquad	Sum/Difference Stage with Biquadratic Filter	1.0.1	Yes
SumDiff	Half Cycle Sum/Difference Stage	1.0.0	Yes
SumFilter	Sum/Difference Stage with Low Pass Filter	1.0.1	Yes
SumIntegrator	Sum/Difference Integrator	1.1.0	Yes
SumInv	Inverting Sum Stage	1.0.0	Yes
SumFilter	Sum/Difference Stage with Low Pass Filter	1.0.1	Yes
SumIntegrator	Sum/Difference Integrator	1.1.0	Yes
SumInv	Inverting Sum Stage	1.0.0	Yes
TransferFunction	User-defined Voltage Transfer Function	1.0.0	Yes
Transimpedance	Transimpedance Amplifier	1.0.0	Yes*
Voltage	DC Voltage Source	1.0.0	Yes
ZeroCross	Zero Crossing Detector	1.1.0	Yes

kullanırlar. Bu çalışmada Anadigm firmasının ürettiği AN231E04 bordu kullanılmıştır. Anadigm firmasının ürettiği bordları programlayabilmek için Anadigm Designer2 programı kullanılmaktadır. Bu programda çeşitli analog fonksiyonları gerçekleştirmek için önceden tanımlı CAM (Configurable Analog Modules) olarak adlandırılan yapılandırılabilir analog bloklar mevcuttur. Bu blokların listesi Tablo 3.1’de verilmektedir, ayrıca programda bütün CAM blokları için ayrıntılı dokümantasyon mevcuttur [86]. Kaotik sistem tasarımı için kullanılan bloklarla ilgili özellikler, deneysel sonuçların verileceği bölümde sunulacaktır. FPAA’ler; analog fonksiyonları gerçekleştirmek için elektriksel olarak yeniden programlanabilen tümdevrelerdir. FPAA üzerinde gerçeklenmek istenen sistem, öncelikle nümerik analizlerle test edilmelidir. Bunun sebebi, FPAA elemanı $\pm 2V$ satürasyon seviyesine sahiptir. Satürasyon seviyesini aşan parametrelere yeniden ölçeklendirme işlemi uygulanır. Ölçeklendirme işleminden sonra modeldeki fonksiyonlara karşılık gelen uygun CAM blokları belirlenir. Bu bloklar arasındaki arabağlantılar arayüz programı üzerinde oluşturulur.



Şekil 3.2. FPAA tabanlı gerçekleştirmeler için akış diyagramı.

Modellenen sistem bir seri port aracılığı ile FPAA borduna gönderilir. Bord üzerinde bulunan giriş çıkış birimlerinden yararlanılarak, osiloskop yardımı ile gerekli ölçümler yapılır. Elde edilen sonuçlar nümerik simülasyonlarla karşılaştırılır. Sonuçlar uyuşuyorsa işlem sonlandırılır, aksi durumda sistem davranışını etkileyen parametreler üzerinde küçük değişiklikler yapılarak doğru cevap elde edilmeye çalışılır. Şekil 3.2’de bu süreci özetleyen bir akış diyagramı verilmiştir.

Bu kısımda diğer tasarımlar için örnek olması açısından Şekil 3.2’deki akış diyagramı kullanılarak *Kaotik Eğitim Seti-1*’de de incelenen Chua Devresi’nin FPAA tabanlı gerçekleştirimi için tasarım aşamaları detaylı şekilde ele alınacaktır:

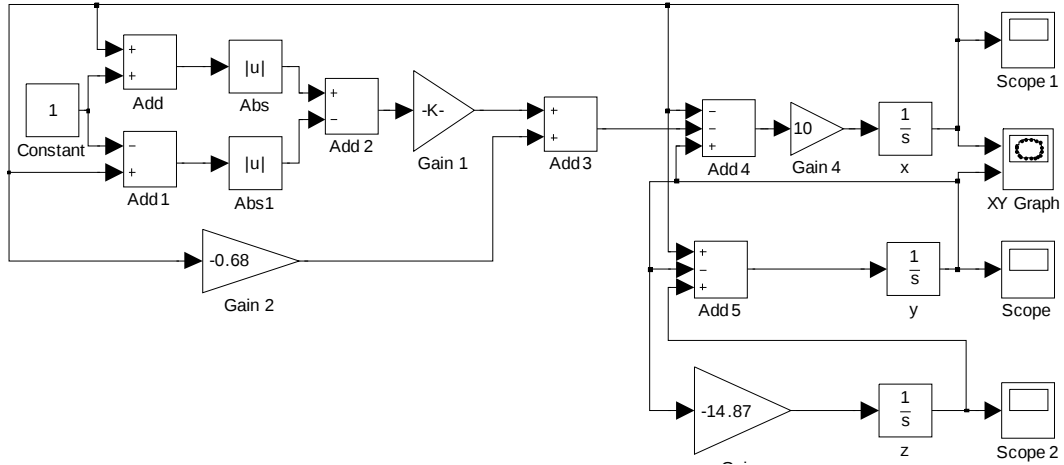
Genelleşmiş Chua Sistemi şu şekilde tanımlanmaktadır [13]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \alpha(y - x - f(x)), \\
 \dot{y} &= x - y + z \\
 \dot{z} &= -\beta y
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

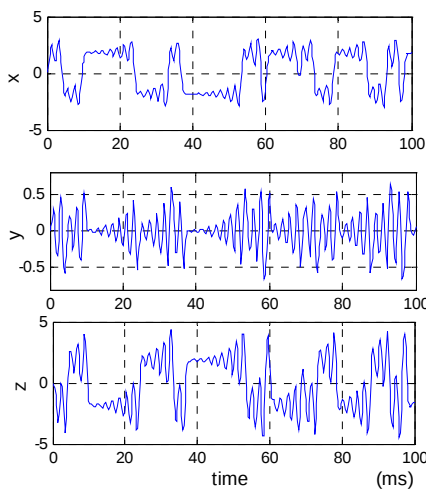
Burada $f(x)$ ile temsil edilen nonlinear fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$f(x) = bx + 0.5(a - b)(|x + c| - |x - c|) \quad (3.2)$$

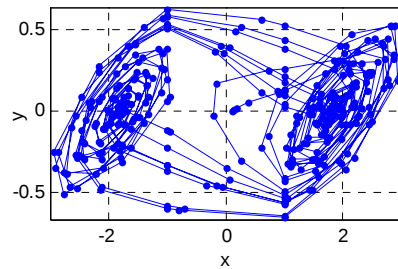
Burada Denklem 3.1 ve 3.2'deki parametrelerin değerleri; $\alpha=10$, $\beta=14.87$, $a=-1$, $b=-0.67$, $c=1$ 'dir. Bu parametreler yerine konuların Denklem 3.1'in nonlinear analizi yapıldığında; x , y ve z durum değişkenleri için elde edilen dinamikler kaotik davranış sergilemektedir. Bu denklemlerin çözümü için ANADIGM DESIGNER2 programına benzediği için MATLAB'in SIMULINK arayüzü kullanılabilir. Denklem 3.1 SIMULINK arayüzünde nümerik olarak çözülmesi için oluşturulan sistem Şekil 3.3a'da sunulurken, nümerik analiz sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 3.3b ve c'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3. a) Denklem 3.1'deki Chua denklemlerinin SIMULINK programındaki nümerik analizi, b) x , y ve z durum değişkenleri için nümerik çözüm sonuçları, c) x - y faz uzayı gösterimi.

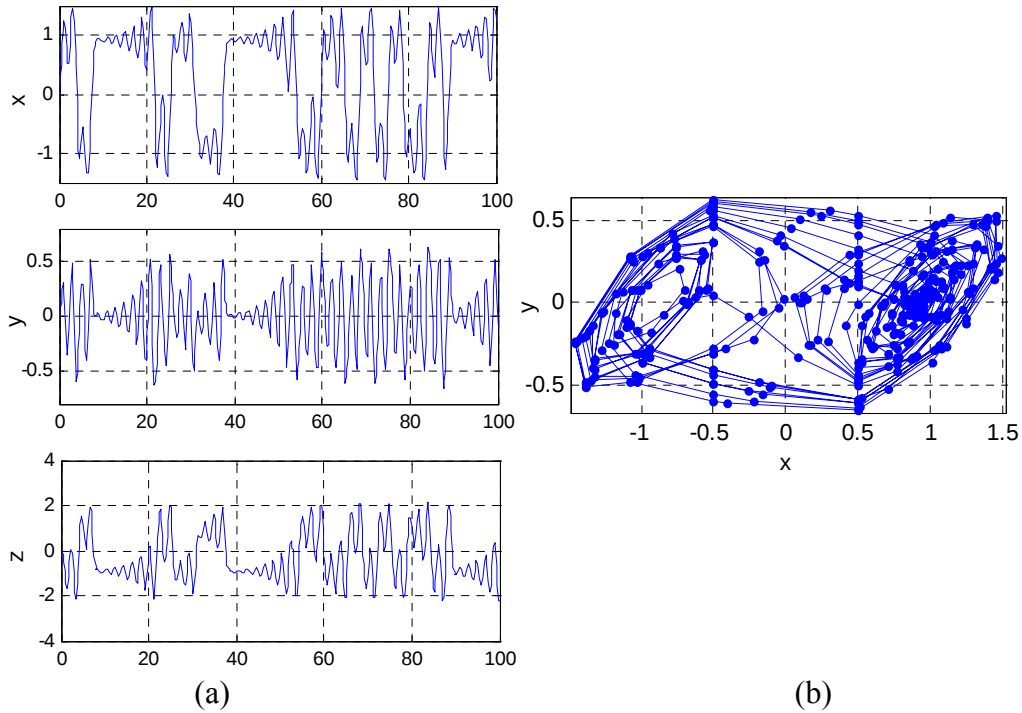
Şekil 3.3b'deki x , y ve z durum değişkenleri incelendiğinde, x ve z değişkeninin FPAA saturasyon voltajı olan $\pm 2V$ 'u geçtiği görülmektedir. Bu sebeple x ve z durum değişkenleri yeniden ölçeklendirilmelidir. Ölçeklendirme işleminde x ve z değerleri olması gereken değerden yaklaşık 2 kat kadar büyük olduğu için bu değişkenler 2'ye bölünmelidir. Yeni x , y ve z değişkenlerine x_1 , y_1 ve z_1 dersek:

$$x_1 = \frac{x}{2}, \quad y_1 = y, \quad z_1 = \frac{z}{2} \Rightarrow x = 2x_1, \quad y = y_1, \quad z = 2z_1 \text{ olur.}$$

Yeni x , y ve z değerleri Denklem 3.1'de yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} 2\dot{x}_1 &= 10(y_1 - 2x_1 - f(2x_1)), \\ \dot{y}_1 &= 2x_1 - y_1 + 2z_1 \\ 2\dot{z}_1 &= -\beta y_1 \\ f(2x_1) &= -1.36x_1 - 0.295(|2x_1 + 1| - |2x_1 - 1|) \end{aligned} \quad (3.3)$$

şeklindeki ölçeklendirilmiş denklemler elde edilir. Bu denklemler kullanılarak oluşturulan çözüm sonucu elde edilen nümerik sonuçlar Şekil 3.4'te görülmektedir. Sonuçlarda da görüldüğü gibi x ve z durum değişkenleri $\pm 2V$ aralığındadır.



Şekil 3.4. a) Denklem 3.3'teki ölçeklendirilmiş Chua denklemlerinin nümerik analiz sonuçları, a) x , y ve z durum değişkenleri, b) x - y faz uzayı gösterimi.

Sistem FPAA elemanı ile gerçekleştirim için uygun hala dönüştürüldükten sonra AN231E04 FPAA'ı için ANADIGM DESIGNER2 arayüz programı kullanılarak devre yapısı oluşturulur. Program içerisinde Tablo 3.1'de verilen bütün CAM bloklarının detaylı matematiksel anlatımları ve anahtarlamalı kapasitör teknolojisine dayalı devre gerçekleştirmeleri mevcuttur. Bu yapılar incelenerek gerçeklemek istediğimiz modelin matematiksel tanımlamalarına en uygun CAM blokları seçilmelidir.

Denklem 3.3 ile tanımlanan ölçeklendirilmiş Chua sisteminde türevsel ifadeleri tanımlamak için kullanılabilecek en uygun CAM bloğu SUMFILTER bloğudur. Tek kutuplu alçak geçiren filtreye de sahip olan bu blok, üç girişe kadar toplama yapabilmektedir. Girişler eviren veya evirmeyen giriş olup, kullanılan fonksiyona göre bu girişler, toplanır veya çıkartılır. Her giriş programlanabilir bir kazanca sahiptir. Giriş voltajlarının toplamı doğru bir çıkış üretmek için programlanabilir köşe frekansına sahip, tek kutuplu alçak geçiren filtreden geçirilir. Bu elemana ait çıkış gerilimi aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$V_{out}(s) = \frac{2\pi f_0 [\pm G_1 V_{input1}(s) \pm G_2 V_{input2}(s) \pm G_3 V_{input3}(s)]}{s + 2\pi f_0} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'ten görüldüğü gibi bu blok toplam ve çıkarma işlemleri için uygun olmasının yanı sıra türev alıcı devre işlevi görmesi açısından Chua sistemini gerçeklemede kullanmak için uygun bir bloktur. Bu bloktan faydalanmak için Denklem 3.3'ün Laplace dönüşümü alındığında şu eşitlikler elde edilir:

$$\begin{aligned} sx(s) &= -3.2x(s) + 5y(s) + 1.475(|2x(s) + 1| - |2x(s)|) \\ sy(s) &= 2x(s) - y(s) + 2z(s) \\ sz(s) &= -7.435y(s) \end{aligned} \quad (3.5)$$

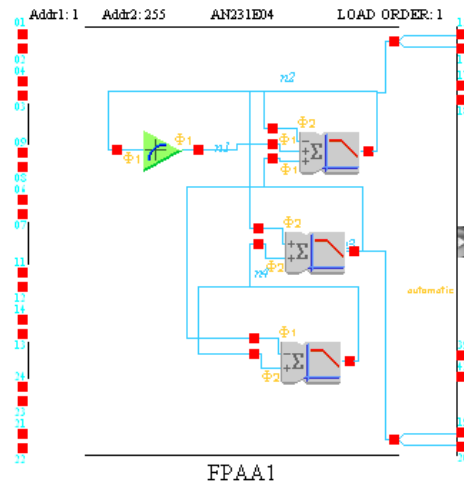
Denklem 3.5'teki durum değişkenlerini Denklem 3.4'teki ifadeye benzetmek için her iki taraflarına sırasıyla $x(s)$, $y(s)$ ve $z(s)$ eklenir:

$$\begin{aligned} sx(s) + x(s) &= -3.2x(s) + 5y(s) + 1.475(|2x(s) + 1| - |2x(s)|) + x(s) \\ sy(s) + y(s) &= 2x(s) - y(s) + 2z(s) + y(s) \\ sz(s) + z(s) &= -7.435y(s) + z(s) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'nın sol tarafı durum değişkeni parantezine alındıktan sonra, her iki taraf $(s+1)$ 'e bölünür ve eşitlik düzenlenirse Denklem 3.7'deki son durum elde edilir:

$$\begin{aligned}
 x(s) &= \frac{-2.2x(s) + 5y(s) + 1.475(|2x(s) + 1| - |2x(s) - 1|)}{s + 1} \\
 y(s) &= \frac{2x(s) + 2z(s)}{s + 1} \\
 z(s) &= \frac{-7.435y(s) + z(s)}{s + 1}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Bu sistem SUMFILTER için uygun hale gelmiştir. Burada $f(x)$ fonksiyonunu gerçeklemek için TRANSFER FUNCTION bloğu kullanılabilir. Bu blok, kullanıcı tarafından belirlenen LUT'a göre 256 adımlık bir çıkış voltajı üretir. Kaotik yapılar içerisindeki nonlinear fonksiyonlar bu eleman kullanılarak kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Denklem 3.7'de de $(|2x(s) + 1| - |2x(s) - 1|)$ nonlinear fonksiyonu TRANSFER FUNCTION bloğuna gömülmüştür. Durum değişkenlerindeki kazanç ifadelerinin SUMFILTER bloğundaki kazanç katlarına aktarılmasının ardından, bloklar arasındaki bağlantılar da SIMULINK analizi mantığı ile yapılır ve Şekil 3.5'teki devrenin son hali elde edilir.

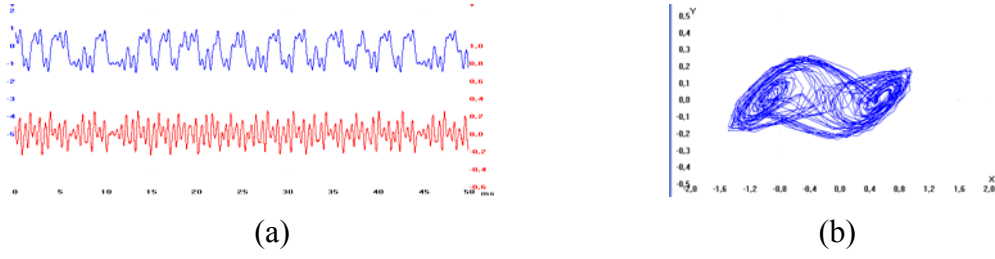


Şekil 3.5. Chua Devresi'nin FPAA gerçekleştirim şeması.

AN231E04 bordu bilgisayara COM port ile bağlanır. Şekil 3.6'daki gibi bordun enerjilendirilmesi ile devre çalışmaya hazır hale getirilir. Şekil 3.5'te oluşturulan model FPAA'ye aktarılır. Bu sistem için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Devrenin FPAA'ye aktarılması için gereken düzenek.



Şekil 3.7. FPAA tabanlı Chua Devresi'ne ait deney sonuçları a) x ve y durum değişkenleri için zaman domeni gösterimi: x : 1V/div, y : 1V/div, Time/div: 1ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, x : 1V/div, y : 500mV/div.

3.2. Çoklu Nonlinear Fonksiyonlarla Modellenen Kaotik Sistemlerin FPAA ile Gerçekleştirimi

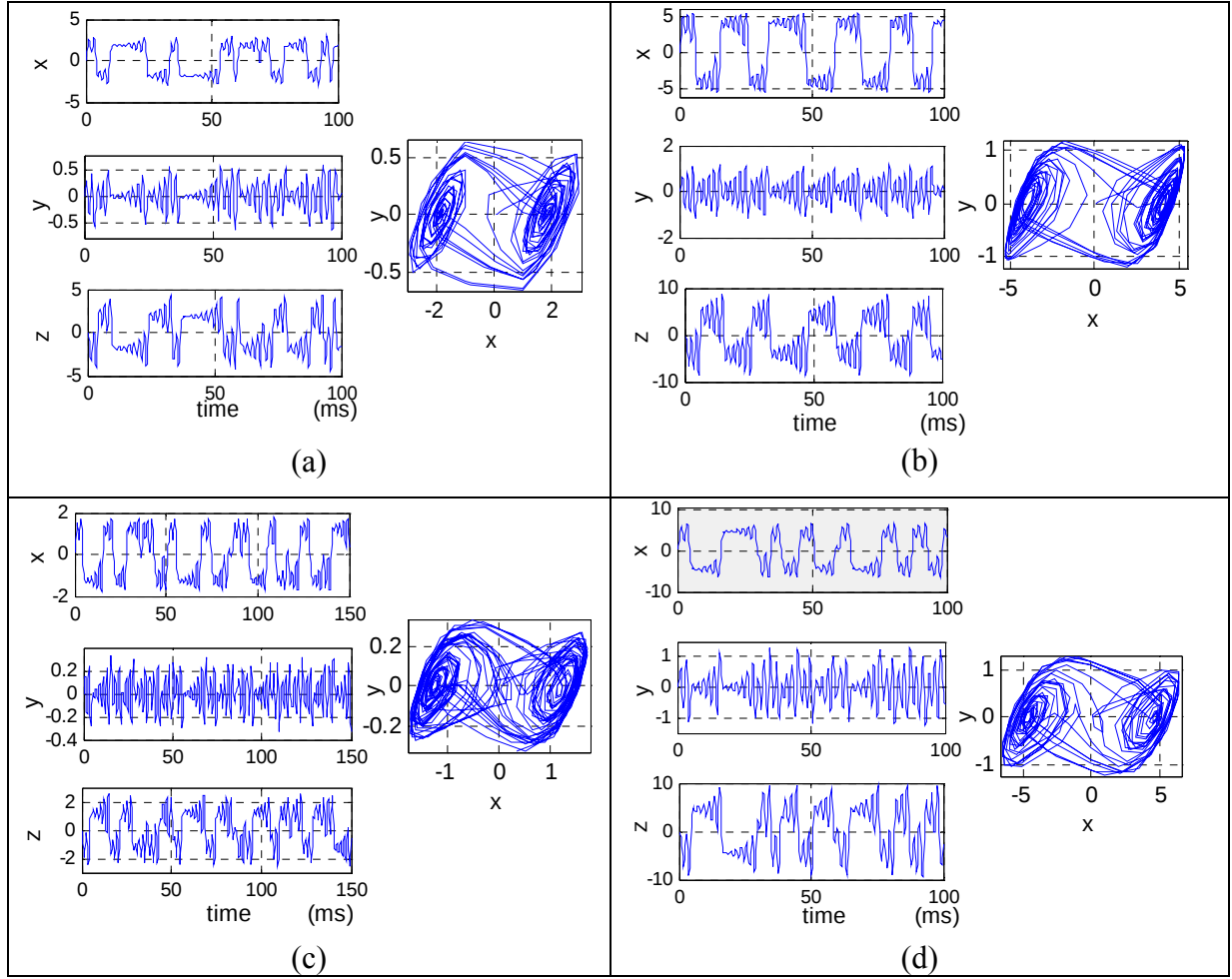
Nonlinear fonksiyonların değiştirilmesi ile modellenen kaotik devre uygulamalarına Chua ve Sprot Devreleri örnek olarak gösterilebilir. Diferansiyel denklem takımı, sabit değişkenlerden birine bağlı bir nonlinear fonksiyona sahiptir. *Kaotik Eğitim Seti-3*'ten de bilindiği gibi bu nonlinear fonksiyon değiştirilerek değişik kaotik sistem uygulamaları yapılmaktadır. Bu bölümde öncelikle Chua daha sonra Sprot Sistemleri'ndeki nonlinear fonksiyonlar değiştirilerek modellenen kaotik sistemlerin FPAA ile gerçekleştirimi üzerinde durulacaktır.

3.2.1. Genelleştirilmiş Chua Sistemi'nin FPAA ile Gerçekleştirilmesi

Daha öncede belirtildiği gibi Chua Sistemi Denklem 3.1 ile tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte x , y ve z sistemin durum değişkenlerini; α ve β değişken parametreleri ve $f(x)$ sistemin kaos mekanizmasında önemli bir rol oynayan nonlinear fonksiyonu temsil eder. $f(x)$ fonksiyonu Tablo 3.2'deki Chua devre modellemesinde en çok tercih edilen fonksiyonlar olan piecewise-linear, kübik, piecewise-quadratic ve trigonometrik fonksiyonları içeren çeşitli nonlinear fonksiyonlar ile tanımlanabilir [87].

Tablo 3.2. Chua sistemi için nonlinear fonksiyonlar ve parametre değerleri.

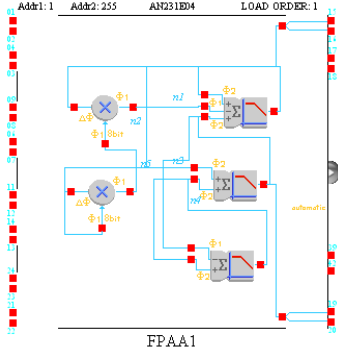
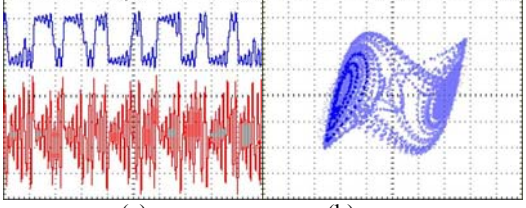
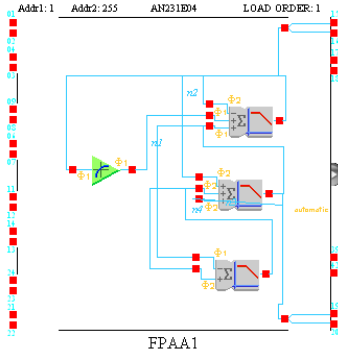
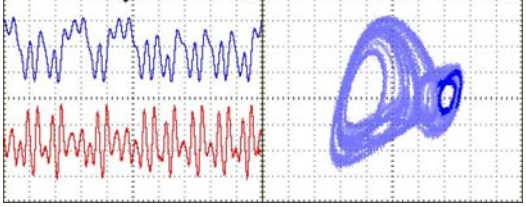
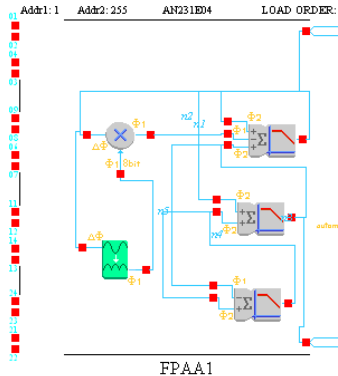
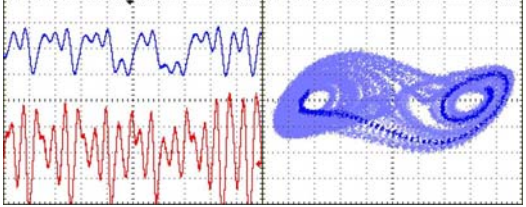
Chua Sistemi için nonlinear $f(x)$ fonksiyonları	Fonksiyondaki parametrelerin değerleri
$f(x) = bx + 0.5(a - b)(x + c - x - c)$	$a=1.27, b=-0.68, c=1$ (3.7.1)
$f(x) = h_1x - h_2x^3$	$h_1=-1.27, h_2=-0.0157$ (3.7.2)
$f(x) = -\alpha \tanh(bx)$	$\alpha=2, b=0.38$ (3.7.3)
$f(x) = d_1x + d_2x x $	$d_1=-8/7, d_2=4/63$ (3.7.4)



Şekil 3.8. Chua Sistemi'nde Tablo 3.2'deki nonlinear denklemlerin değişmesi ile; a) $f(x)=bx+0.5\cdot(a-b)\cdot(|x+c|-|x-c|)$, b) $f(x)=h_1x-h_2x^3$, c) $f(x)=-a\cdot\tanh(bx)$, d) $f(x)=d_1x+d_2x\cdot|x|$ nonlinear fonksiyonlarının kullanıldığı durumlar için elde edilen nümerik sonuçlar.

Tablo 3.2'deki Denklem 3.1.1-4 ile tanımlanan nonlinear fonksiyonlar Denklem 3.1'de yerine konduğunda elde edilen nümerik analiz sonuçları sırasıyla Şekil 3.8a-d'de sunulmaktadır. Tablo 3.2'deki parçalı lineer bir fonksiyon olan ve Denklem 3.1.1. ile tanımlanan $f(x)$ 'in Chua Sistemi'nde kullanıldığı FPAA tabanlı uygulamaya ait detaylar bir önceki bölümde ele alınmıştır. Bu örnekten yola çıkılarak diğer nonlinear fonksiyonların kullanıldığı yapılarda sırasıyla FPAA tabanlı olarak gerçekleştirilmişlerdir. Bu gerçeklemlere ait FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları Tablo 3.3'te sunulmaktadır. Şekil 3.9'da deneysel sonuçları verilen $f(x)=h_1x-h_2x^3$ fonksiyonunu kullanan FPAA tabanlı Chua Sistemi'ni gerçeklemek için parçalı lineer (PWL) fonksiyondan farklı olarak MULTIPLIER bloğu kullanılmıştır.

Tablo 3.3. Chua Sistemi'nde farklı nonlinearer fonksiyonlar için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları.

$f(x)$ Fonksiyonu	FPAA Gerçekleştirim Şeması	Deney sonuçları
$f(x) = h_1x - h_2x^3$		 (a) (b) Şekil 3.9. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: x :500mV/div, y :200mV/div, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, x : 200mV/div, y : 200mV/div.
$f(x) = -\alpha \tanh(bx)$		 (a) (b) Şekil 3.10. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: x :1V/div, y :200mV/div, Time/div: 5ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, x : 500mV/div, y : 100mV/div.
$f(x) = d_1x + d_2x x $		 (a) (b) Şekil 3.11. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: x :500mV/div, y :100mV/div, Time/div: 10ms; b) x - y için faz uzayı gösterimi, x : 100mV/div, y : 100mV/div.

Bu blok çarpma işlemini gerçekleştirmektedir. X ve Y giriş işaretleri ve çarpım faktörü birbiriyle çarpılır. $V_{out} = M.X.Y$ şeklinde bir çıkışa sahiptir. $f(x) = -\alpha \tanh(bx)$, fonksiyonunun kullanılarak gerçekleştirilen yapıda PWL fonksiyonunun gerçekleştirimine benzer şekilde trigonometrik ifade TRANSFER FUNCTION bloğuna gömülmüştür. Bu yapıya ait deney sonuçları Şekil 3.10'da sunulmaktadır. Son olarak $f(x) = d_1x + d_2x \cdot |x|$ fonksiyonunu gerçeklemek için diğer uygulamalardan farklı olarak RECTIFIERHALF bloğu kullanılmış olup bu blok bir kaynaktan alınan işareti yarım ya da tam dalga doğrultmaktadır. Doğrultma

işlemi matematiksel ifadelerde mutlak değere denk geldiği için bu blok mutlak değer ifadesini gerçeklemek için kullanılmıştır. Şekil3.11’de ise son nonlinear fonksiyonun kullanıldığı sistem için gerçekleştirim sonuçları sunulmaktadır.

3.2.2. Sprot System’in FPAA ile Gerçekleştirilmesi

Sprot System’in özelliklerinden, matematiksel tanımlamalarından, bu devrede kullanılan nonlinear fonksiyonların çeşitliliğinden *Kaotik Eğitim Seti-3* ile ilgili konuların ele alındığı kısımda detaylı olarak bahsedilmiştir. Sprot sistemi şu şekilde tanımlanmaktadır:

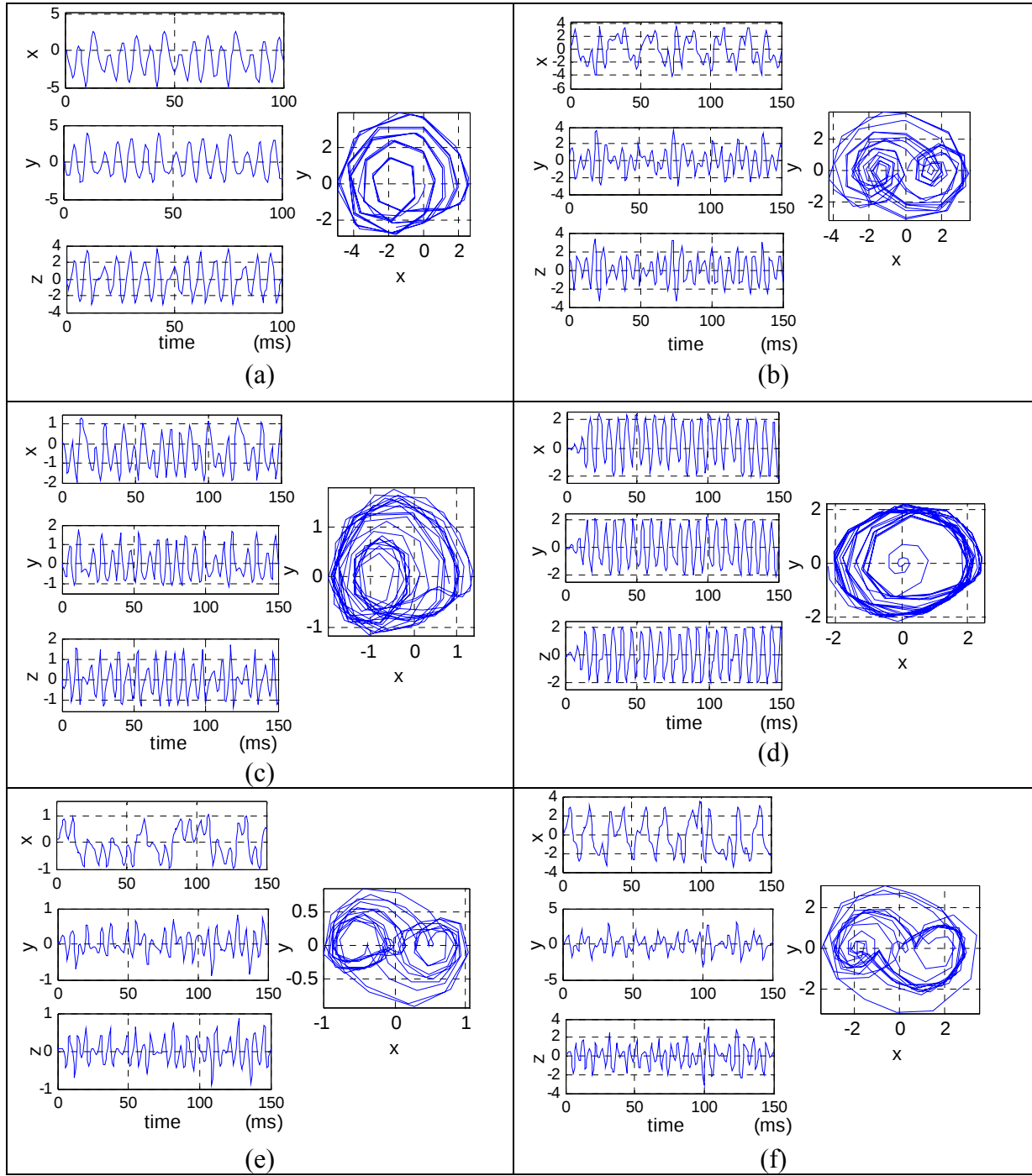
$$\begin{aligned}\dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= z, \\ \dot{z} &= f(x) - pz - y\end{aligned}\tag{3.8}$$

Bu bölümde ise Sprot devresinin nonlinear fonksiyonlarının çeşitliliğinden yararlanılarak bir önceki bölümdeki uygulamalara benzer şekilde FPAA tabanlı gerçekleştirim detayları sunulacaktır. Sprot devresine ait nonlinear fonksiyonların karakteristiklerini ve parametre değerlerini özetleyen bir tablo daha önce verilmesine rağmen, FPAA tabanlı gerçekleştirim detaylarının daha rahat takip edilmesi açısından Tablo 3.4’te yeniden sunulmaktadır.

Tablo 3.4. Sprot sistemi için nonlinear fonksiyonlar ve parametre değerleri.

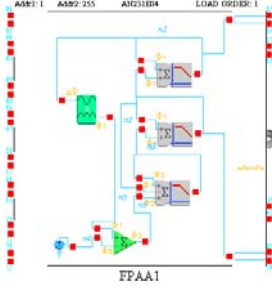
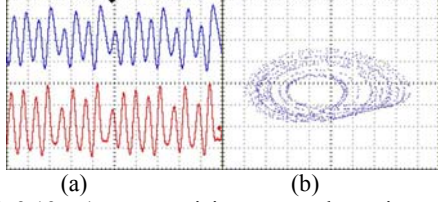
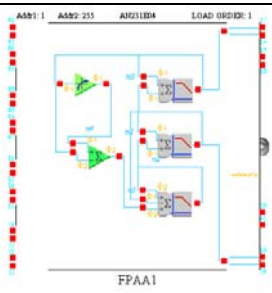
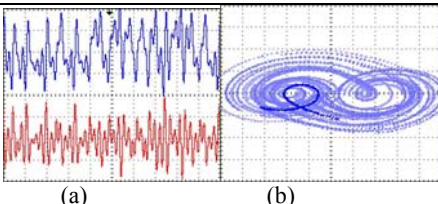
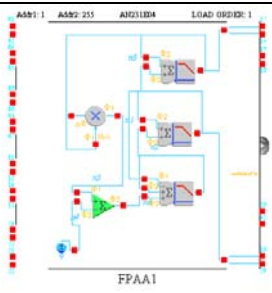
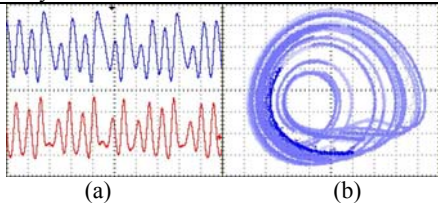
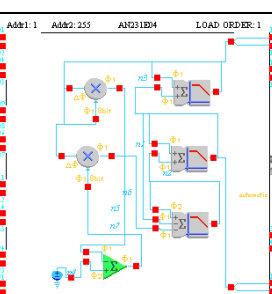
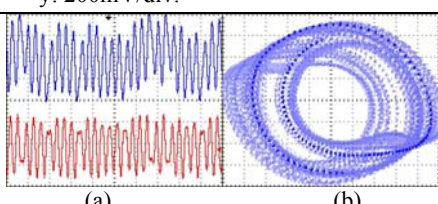
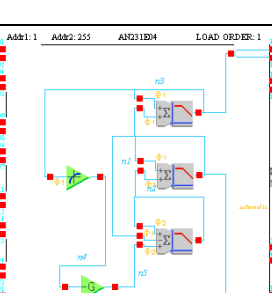
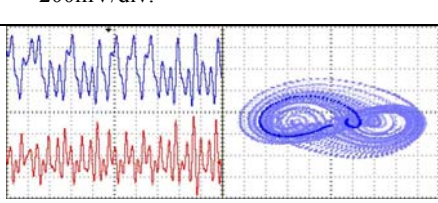
Nonlinear Fonksiyonlar	Fonksiyon Parametreleri
$f(x)= x -r$ (3.8.1)	$r=2$
$f(x)=-Bx+C\operatorname{sgn}(x)$ (3.8.2)	$B=1.2, C=2,$
$f(x)=B(x^2/C-C)$ (3.8.4)	$B=0.58, C=1$
$f(x)=Bx(x^2/C-1)$ (3.8.5)	$B=1.6, C=5$
$f(x)=-Bx(x^2/C-1)$ (3.8.6)	$B=0.9, C=0.47$
$f(x)=-B[x-2\tanh(Cx)/C]$ (3.8.8)	$B=2.15, C=1$

Tablo 3.4’teki nonlinear fonksiyonlar Denklem 3.8’de yerine yazıldığında farklı davranışlar sergileyen kaotik işaretler elde edilecektir. Bu denklemler yerine yazılarak yapılan nümerik simülasyon sonuçları aşağıda verilmektedir:



Şekil 3.12. Sprott Sistemi'nde Tablo 3.4'teki nonlinear denklemlerin değişmesi ile; a) $f(x) = |x| - r$, b) $f(x) = -Bx + C \operatorname{sgn}(x)$, c) $f(x) = B((x^2/C) - C)$, d) $f(x) = Bx((x^2/C) - 1)$, e) $f(x) = -Bx((x^2/C) - 1)$, f) $f(x) = -B[x - 2 \tanh((Cx)/C)]$ nonlinear fonksiyonlarının kullanıldığı durumlar için elde edilen nümerik sonuçlar.

Tablo 3.5. Sprot Systemi'nde farklı nonlinear fonksiyonlar için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları.

$f(x)$ Fonksiyonu	FPAA Gerçekleştirim Şeması	Deney sonuçları
$f(x)= x -r$		 (a) (b) Şekil 3.13. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 10\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{V/div}$, $y: 500\text{mV/div}$.
$f(x)=-Bx+C\text{sgn}(x)$		 (a) (b) Şekil 3.14. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 10\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 500\text{mV/div}$.
$f(x)=B((x^2/C)-C)$		 (a) (b) Şekil 3.15. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 10\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$.
$f(x)=Bx((x^2/C)-1)$		 (a) (b) Şekil 3.16. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 5\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$.
$f(x)=-B[x-2\tanh((Cx)/C)]$		 (a) (b) Şekil 3.17. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:500\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 5\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 500\text{mV/div}$.

Tablo 3.4’te verilen nonlinearer fonksiyonlar kullanılarak oluşturulan Sprot Sistemi için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları Tablo 3.5’te verilmektedir. Chua Sistemi’nin ardından Sprot Sistemi’nin de FPAA tabanlı gerçekleştirilebileceği bu örneklerle gösterilmiştir. FPAA gerçekleştirim şemalarında görüldüğü gibi önceki kısımlarda kullanılan CAM bloklarının haricinde iki yeni blok kullanılmıştır. Bunlardan ilki eviren kuvvetlendirici vazifesi gören GAIN bloğudur. Diğer blok ise ağırlıklandırılmış üç adet toplama ya da çıkarma işlemini yapabilen SUMDIFF bloğudur.

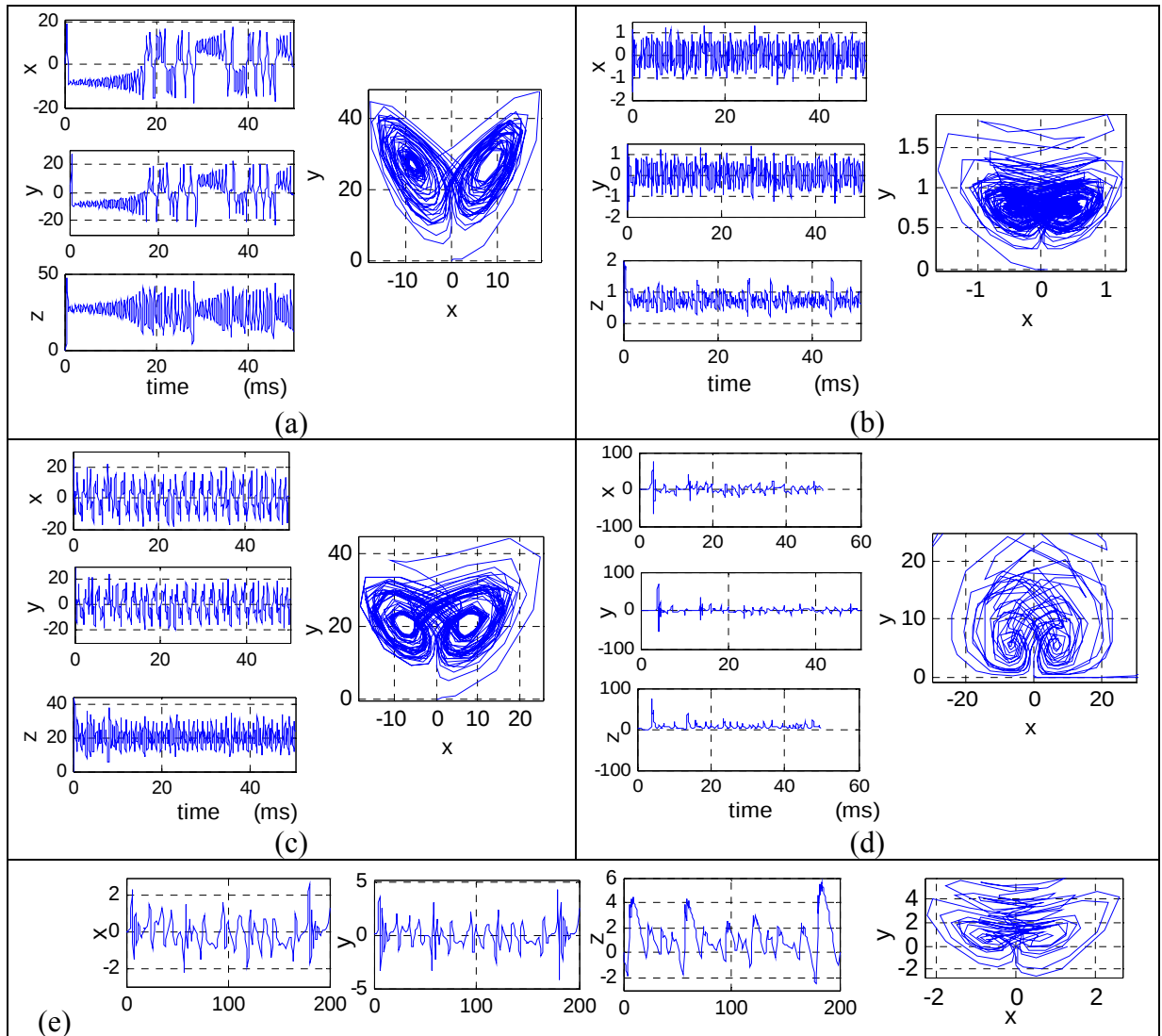
3.2.3. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi’nin FPAA ile Gerçekleştirilmesi

Bir önceki bölümde, *Kaotik Eğitim Seti-4*’ün incelendiği kısımda Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi’nin detayları ele alınmıştı. Çalışmanın bu bölümünde Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi içerisinde kabul edilen beş kaotik sistem tanımlamasının FPAA tabanlı gerçekleştirimi üzerinde durulacaktır.

Tablo 3.6. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi tanımlamaları ve FPAA gerçekleştirimi için düzenlenmiş denklem tanımlamaları.

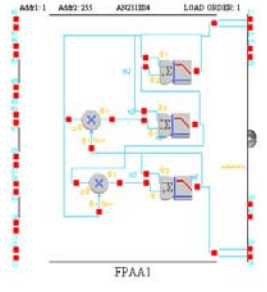
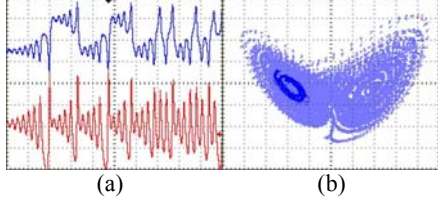
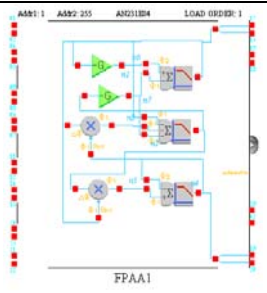
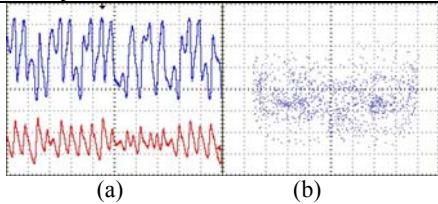
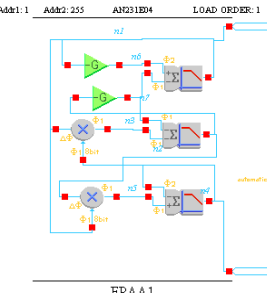
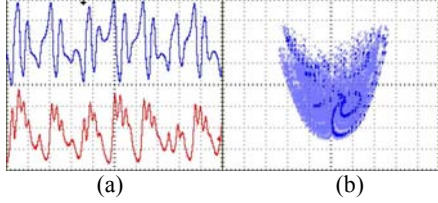
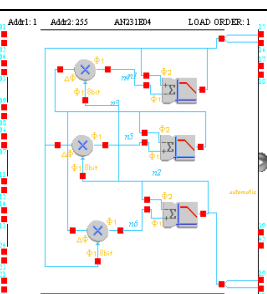
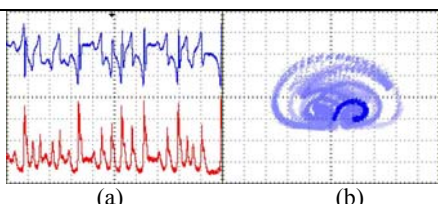
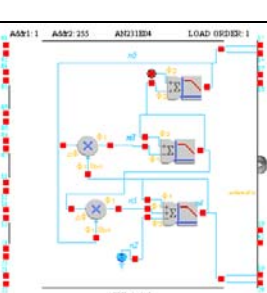
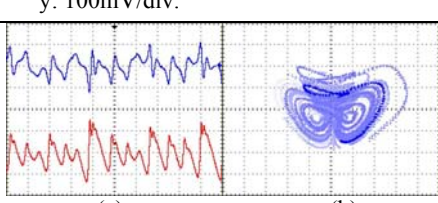
Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi	Parametre Değerleri Yerine Yazıldıktan Sonraki Tanımlamalar	FPAA Gerçekleştirimi İçin Düzenlenmiş Denklem Tanımlamaları
Lorenz Sistemi	$\dot{x} = 10(y - x),$ $\dot{y} = 28x - xz - y,$ $\dot{z} = xy - \frac{8}{3}z$	$\dot{x} = 12y - 9x,$ $\dot{y} = 18.67x - 16xz,$ $\dot{z} = 6.25y - 1.67z$
Chen Sistemi	$\dot{x} = 35(y - x),$ $\dot{y} = -7x - xz + 28y,$ $\dot{z} = xy - 3z$	$\dot{x} = 38.8y - 34x$ $\dot{y} = 6.3x - 28.8xz + 29y,$ $\dot{z} = 11.25xy - 2z$
Lü ve Chen Sistemi	$\dot{x} = 910(y - x),$ $\dot{y} = -1232x - xz + 1043y,$ $\dot{z} = xy - \frac{44}{3}z$	$\dot{x} = 36y - 35x,$ $\dot{y} = -24x - 18xz,$ $\dot{z} = 9.375xy - 5z$
Lorenz Benzeri Sistem	$\dot{x} = \frac{20}{7}x - yx + 0,$ $\dot{y} = -10y + xz,$ $\dot{z} = xy - 4z$	$\dot{x} = 3.857x - 37.5yx,$ $\dot{y} = -9y + 44.44xz,$ $\dot{z} = -3xy - 36z$
Yeni Kaotik Sistem	$\dot{x} = (y - x),$ $\dot{y} = 0.5y - xz,$ $\dot{z} = xy - 0.5$	$\dot{x} = 1.6y,$ $\dot{y} = 1.5y - 2xz,$ $\dot{z} = z + 1.125xy - 0.366$

Bölüm 3.1’de bahsedildiği gibi kaotik sistemlerin FPAA tabanlı gerçekleştirmelerinde, öncelikle nümerik simülasyon sonuçları incelenmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre $\pm 2V$ değerini aşan durum değişkenleri ile karşılaşırsa bu durum değişkenleri, aşma miktarı göz önünde bulundurularak yeniden ölçeklendirilmektedir. Ölçeklendirilen sistemlerin SUMFILTER tanımlamasına uygun hale getirilmesi için Laplace Dönüşümleri alınmakta ve devre gerçekleştirmeleri yapılmaktadır. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi’ne dahil edilen sistemler için nümerik analiz sonuçları Şekil 3.18’de sunulmaktadır. Nümerik analiz sonuçları incelenerek FPAA gerçekleştirimi için düzenlenen ve son hali elde edilen sistemlerin eşitlikleri Tablo 3.6’da sunulmaktadır.



Şekil 3.18. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemine dâhil a) Lorenz, b) Chen, c) Lü-Chen, d) Lorenz Benzeri, e) Yeni Kaotik sistemleri için nümerik analiz sonuçları.

Tablo 3.7. Genelleştirilmiş Lorenz Sistemi için FPAA gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları.

$f(x)$ Fonksiyonu	FPAA Gerçekleştirim Şeması	Deney sonuçları
<i>Lorenz Sistemi</i>		 Şekil 3.19. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:200\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 5\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 200\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$.
<i>Chen sistemi</i>		 Şekil 3.20. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:200\text{mV/div}$, $y:200\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 2.5\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 100\text{mV/div}$, $y: 100\text{mV/div}$.
<i>Lü-Chen Sistemi</i>		 Şekil 3.21. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:500\text{mV/div}$, $y:200\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 1\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 500\text{mV/div}$, $y: 200\text{mV/div}$.
<i>Lorenz Benzeri Sistem,</i>		 Şekil 3.22. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:200\text{mV/div}$, $y:100\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 10\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 100\text{mV/div}$, $y: 100\text{mV/div}$.
<i>Yeni Kaotik Sistem</i>		 Şekil 3.23. a) x ve y için zaman domeni gösterimi: $x:1\text{V/div}$, $y:500\text{mV/div}$, $\text{Time/div: } 2\text{ms}$; b) x-y için faz uzayı gösterimi, $x: 500\text{mV/div}$, $y: 500\text{mV/div}$.

Tablo 3.6’da FPAA tabanlı gerçekleştirim için son hale getirilmiş Genelleştirilmiş Lorenz Sistemleri’nin FPAA tabanlı gerçekleştirim şemaları ve deney sonuçları Tablo 3.7’de sunulmaktadır. FPAA tabanlı gerçekleştirim şemalarında da görüldüğü gibi devrelerde durum değişkenlerini gerçeklemek için SUMFILTER blokları, nonlinearliğin temelini oluşturan durum değişkeni çarpımları için MULTIPLEIR blokları, toplama ve çıkarma işlemlerindeki işaret uyumları için GAIN blokları kullanılmıştır. Sistemler farklı tanımlamalara sahip olmasına rağmen sadece üç farklı CAM bloğu kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum programlanabilir eleman kullanmanın, devre gerçekleştirimlerini kolaylaştırdığını bir kez daha göstermiştir.

3.2. Çok Çekerli (n-scroll) Kaotik Osilatörlerin FPAA ile Gerçekleştirimi

Çok çekerli kaotik osilatörler güvenilir haberleşme, rastgele sayı üreteçleri, CNN (Hücrel Sinir Ağları) gibi birçok alanda uygulamaya sahiptir [88-92]. Suykens ve Vandewalle tarafından quasilineer fonksiyon kullanılarak üretilen ilk çok çekerli kaotik osilatörün ardından [93], çok çekerli kaos üreteçleri yaygın bir araştırma alanı olmuştur. Bu çalışmalarda quasilineer fonksiyonların dışında başka nonlinear fonksiyonlar da kullanılmıştır [94-103]. Bu fonksiyonlardan en yaygın olanı Chua Devresinde kullanılan üç parçalı PWL fonksiyonudur. PWL fonksiyon tabanlı çok çekerli kaotik osilatörün ayrık devre elemanlarıyla gerçekleştirimi oldukça karmaşıktır. Çeker sayısı arttıkça devrenin dinamik sahası da artmakta ve çeker sayısı devrede kullanılan aktif elemanın saturasyon voltajı ile sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple çok çekerli kaotik üreteçlerde programlanabilir eleman kullanmak, devrenin tasarımını daha kolay hale getirmektedir. Bu bölümde Chua Sistemi’ne dayalı, Denklem 3.9’da matematiksel tanımlaması verilen PWL fonksiyonunun kullanıldığı çok çekerli kaos üreticinin FPAA tabanlı gerçekleştirim detayları ele alınacaktır.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha[y - h(x)] \\ \dot{y} &= x - y + z \\ \dot{z} &= -\beta y\end{aligned}\tag{3.9}$$

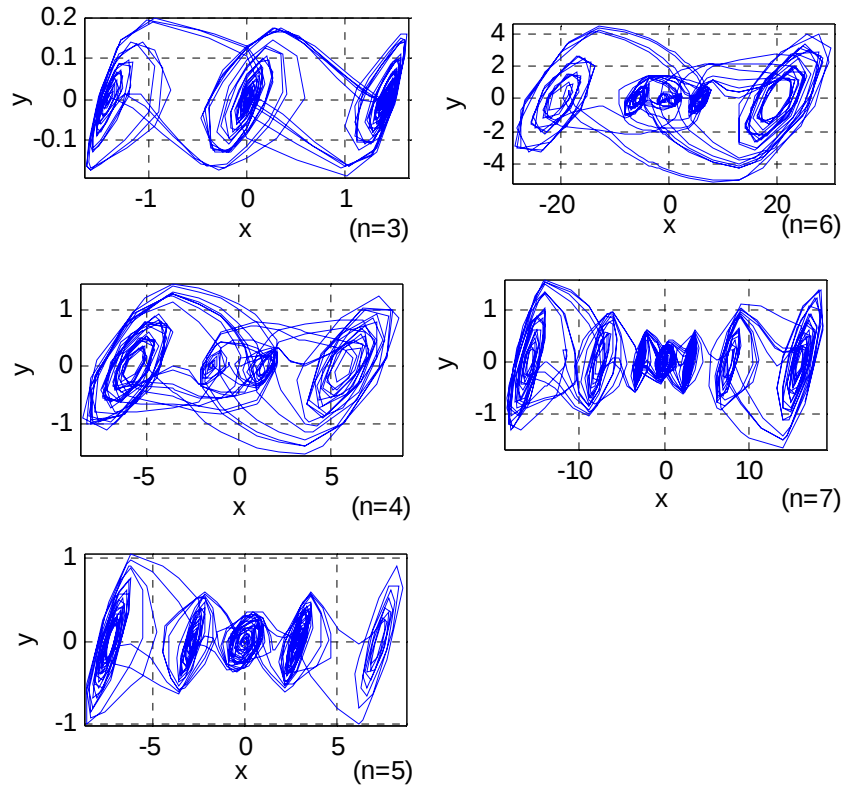
Burada $h(x)$ parçalı lineer fonksiyonu temsil etmektedir. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$h(x) = m_{2q-1}x + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2q-1} (m_{i-1} - m_i) (|x + c_i| - |x - c_i|)$$

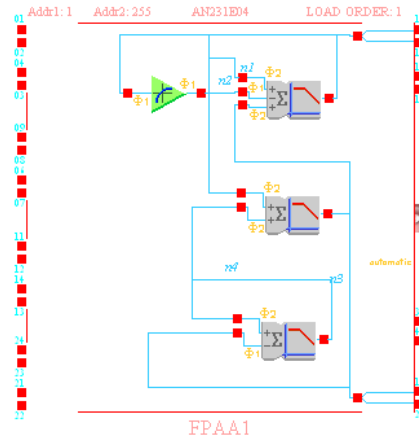
Bu yapıda çoklu çeker üretmek için kullanılan parametre değerleri Tablo 3.8’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak üretilen kaotik çekere ait nümerik simülasyon sonuçları Şekil 3.24’te sunulmaktadır.

Tablo 3.8. PWL fonksiyonu tabanlı çok çekerli kaos üreticinin parametre değerleri.

Çeker Sayısı	Parametre Değerleri
n=3	$q=2$ $m=[+0.9/7 \quad -3/7 \quad +3.5/7 \quad -2.4/7]$ $c=[1 \quad 2.15 \quad 4]$
n=4	$q=2$ $m=[-1/7 \quad +2/7 \quad -4/7 \quad +2/7]$ $c=[1 \quad 2.15 \quad 3.6]$
n=5	$q=3$ $m=[+0.9/7 \quad -3/7 \quad +3.5/7 \quad -2.7/7 \quad +4/7 \quad -2.4/7]$ $c=[1 \quad 2.15 \quad 3.6 \quad 6.2 \quad 9]$
n=6	$q=3$ $m=[-1/7 \quad +2/7 \quad -4/7 \quad +2/7 \quad -4/7 \quad +2/7]$ $c=[1 \quad 2.15 \quad 3.6 \quad 8.2 \quad 13]$
n=7	$q=3$ $m=[+0.9/7 \quad -3/7 \quad +3.5/7 \quad -2.4/7 \quad +2.52/7 \quad -1.68/7 \quad +2.52/7 \quad -1.68/7]$ $c=[1 \quad 2.15 \quad 3.6 \quad 6.2 \quad 9 \quad 14 \quad 23]$



Şekil 3.24. PWL fonksiyonu tabanlı çok çekerli kaos üretici için nümerik analiz sonuçları.



Şekil 3.25. Çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştirim şeması.

Şekil 3.24'te nümerik analiz sonuçları verilen çok çekerli yapıya FPAA tabanlı gerçekleştirimi için, nümerik simülasyon sonuçlarından yararlanarak yeniden ölçeklendirme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra SUMFILTER bloğuna uygun hale getirmek için Laplace dönüşümü alınmış ve sistemin son hali Denklem 3.10'da verilmiştir. Şekil 3.25'te görüldüğü gibi bu sistemin FPAA tabanlı gerçekleştirimi için FPAA'de kullanılan CAM blokları ortaktır. Bu denklemdeki durum değişkenleri için SUMFILTER bloğu kullanılırken, PWL fonksiyonu TRANSFER FUNCTION bloğu içerisine gömülmüştür. Denklem 3.10'da FPAA tabanlı gerçekleştirim için kullanılan parametre değerleri ise Tablo 3.9'da verilmektedir.

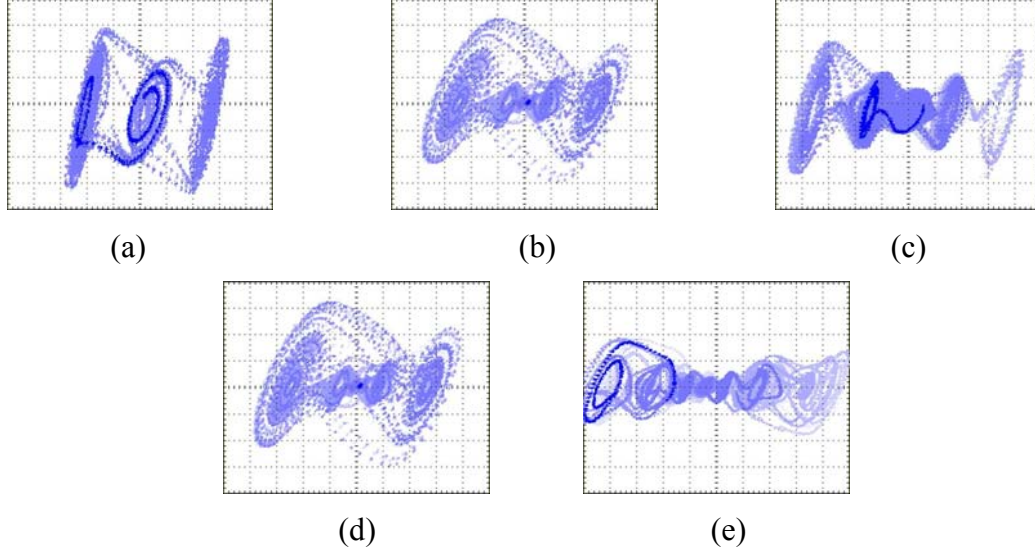
$$\begin{aligned}\dot{x} &= ax + by - ch(r_s x) \\ \dot{y} &= dx + ez \\ \dot{z} &= z - fy\end{aligned}\quad (3.10)$$

$$h(r_s x) = m_{2q-1} r_s x + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2q-1} (m_{i-1} - m_i) (|r_s x + c_i| - |r_s x - c_i|)$$

Tablo 3.9. PWL fonksiyon tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştiriminde kullanılan parametre değerleri.

ÇEKER SAYISI	DENEYSSEL PARAMETRELER
n=3	a=0.8, b=4.15, c=3.15, d=3, e=3, f=4.76, r _s =3.
n=4	a=1, b=1.87, c=4.2075, d=5, e=7, f=2.04, r _s =5.
n=5	a=1, b=1.8, c=1.8, d=5, e=6, f=2.04, r _s =5.
n=6	a=1, b=1.93, c=2.895, d=5, e=5, f=2.856, r _s =20.
n=7	a=1, b=0.955, c=1.719, d=10, e=12, f=1.19, r _s =10.

Tablo 3.9'daki parametreler kullanılarak gerçekleştirilen FPAA tabanlı çok çekerli kaos üreteçlerine ait deney sonuçları Şekil 3.26'da görülmektedir. Deney sonuçları nümerik simülasyon sonuçları ile uyumludur. FPAA elemanı çok çekerli kaotik işaret üretiminde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

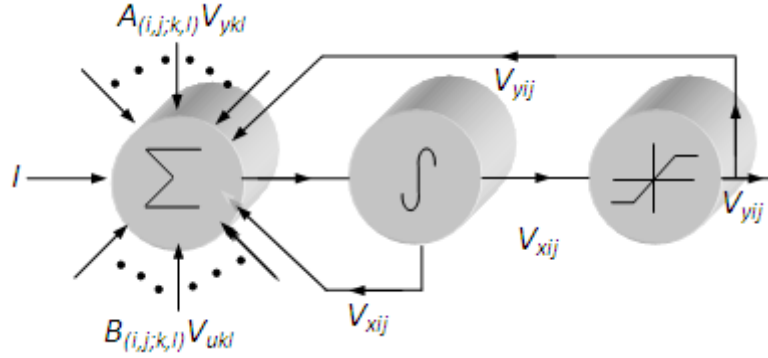


Şekil 3.26. FPAA elemanı kullanılarak gerçekleştirilen a) $n=3$, b) $n=4$, c) $n=5$, d) $n=6$, e) $n=7$ çekerli kaotik işaret üreteğine ait deney sonuçları.

3.3. Hücresel Sinir Ağı (CNN) Tabanlı Kaotik Osilatörlerin FPAA ile Gerçekleştirimi

Hücresel Sinir Ağları nonlinear sistemler alanında önemli yeri olan diğer bir çalışma konusudur. Önerildiği günden bu yana, CNN tabanlı otonom ve otonom olmayan kaotik işaret üreteçleri ile ilgili gerek teorik, gerekse pratik pek çok çalışma literatüre sunulmuştur [104-109]. Projenin bu bölümünde CNN yapısı kısaca ele alındıktan sonra CNN tabanlı kaotik işaret üreteçlerine örnek olması açısından FPAA tabanlı bir uygulama örneği ele alınacaktır.

Hücresel Sinir Ağı (CNN): CNN biyolojik bir sinir ağı gibi gerçek zamanda işaret işleyen geniş ölçekli doğrusal olmayan analog bir yapıdır ve *hücreler (cells)* adı verilen özdeş, dinamik ve devamlı sistemlerin dizileridir. Bu yapılarda en yakın komşular birbirleriyle iletişim kurmakta ve bilginin birimler arasında doğrudan değişimine imkân sağlamaktadırlar. HSA 1988'de Chua ve Yang tarafından literatüre sunulmuştur [110]. Temel bir CNN hücresinde, genel olarak bir yapay sinir ağı nöronunda da görülebilecek toplama, dinamik ve aktivasyon fonksiyonu kısımları mevcuttur. Bu tanıma uygun olarak CNN'nin blok gösterimi Şekil 3.27'de verilmektedir.



Şekil 3.27. Temel CNN hücresinin blok gösterimi.

Genelleştirilmiş bir CNN hücresinin boyutsuz durum denklemi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\dot{x}_{ij} = -x_{ij} + a_{ij} + f(x_{ij}) + b_{ij}u_{ij} + z_{ij} \quad (3.11)$$

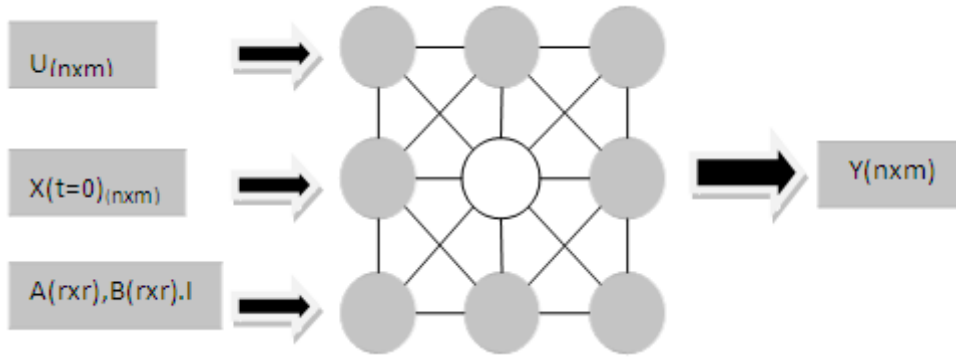
Denklem 3.11’de a_{ij} ve b_{ij} , ağırlık katsayılarını temsil ederken $f(x_{ij})$ ise nonlinear fonksiyondur ve Denklem 3.12’deki gibi tanımlanmaktadır.

$$f(x_{ij}) = \frac{1}{2}(x_{ij} + 1 - |x_{ij} - 1|) \quad (3.12)$$

Denklem 3.11’deki a katsayısı, hücrenin komşu hücre çıkışlarıyla olan bağlantı ağırlıklarını veren klonlama şablonunu (*clonning template*), b katsayısı ise C_{ij} hücresinin komşu girişleriyle olan bağlantı ağırlıklarını veren klonlama şablonunu oluşturmaktadır. Bir CNN hücresinin etkinlik alanı ya da etki bölgesi Denklem 3.13’te verilen *komşuluk ifadesi* (*neighbourhood*) ile belirlenmektedir [110].

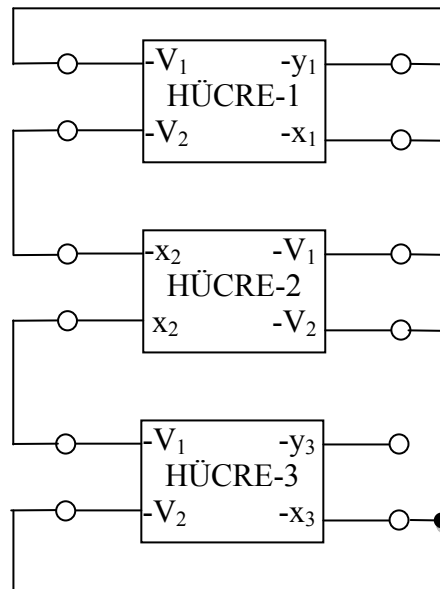
$$Si_j(r) = \{C_{kl} : \max(|k - i|, |l - j|) \leq r, 1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N\} \quad (3.13)$$

Birbirleriyle komşu hücresel yapıların blok şekli ve temel bileşenleri ise Şekil 3.28’de görülmektedir.



Şekil 3.28. Temel hücresel sinir ağı modeli.

Şekil 3.28'den de görüleceği gibi CNN'de her bir hücre çevre hücrelerle paralel iletişim kurmaktadır. CNN'nin paralel işlem kapasitesi görüntü işlemede gerçek zamanlı işlem yapabilme yeteneği sağlamıştır. Hücresel ağlarda her hücre, doğrusal ve doğrusal olmayan elemanlar içermektedir. Bu elemanlar; direnç, kapasitans ve kontrollü kaynaklar ile bağımsız kaynaklardan oluşmaktadır. CNN'nin sürekli ve gerçek zamanda işaret işlemeyi ve bölgesel ara bağlantı özelliği vardır. Buna karşın, verilen bir giriş-çıkış işlevini yerine getiren ağ parametrelerinin yani bağlantı ağırlıklarını belirleyen geribesleme, giriş ve eşik şablon katsayılarının belirlenmesi karmaşık bir optimizasyon problemi oluşturmaktadır. YSA'dan farklı olarak aktivasyon fonksiyonu PWL fonksiyonudur ve uygulama alanları onlara göre daha sınırlıdır.



Şekil 3.29. Chua devresinin üç CNN hücresi kullanılarak modellenmesi.

Otonom CNN tabanlı kaotik işaret üreticilerinin oluşturulabilmesi için üç adet hücrenin etkileşimi gereklidir. Şekil 3.29 Chua Devresi'nin üç adet durum kontrollü hücresel sinir ağı hücresi kullanılarak modellenmesini ele alan blok yapıyı göstermektedir. Diğer pek çok CNN tabanlı kaotik işaret üretici de bu yapıya benzer bağlantılarla oluşturulmaktadır. CNN tabanlı modellenen kaotik işaret üreticilerine bir örnek tarafımızca geliştirilmiştir [103]. Bu yapıda CNN tabanlı çok çekerli kaotik üretici tasarlanmıştır. Üreticinin nonlinear fonksiyonundaki parametre değişimi ile çeker sayısı kontrol edilebilmektedir. Trigonometrik ve PWL nonlinear fonksiyonlarının aynı anda kullanıldığı durum kontrollü hücresel sinir ağı tabanlı bu yapıya ait boyutsuz durum eşitliği Denklem 3.14'te sunulmaktadır.

$$\dot{x}_j = -x_j + a_j y_j + G_0 + G_s + w + i_j \quad (3.14)$$

Burada j hücre indeksini, x_j durum değişkenlerini, a_j sabit bir parametreyi, i_j eşik değerini, y_j hücre çıkışını, w sinüzoidal bir fonksiyonu, temsil etmektedir. w ve y_j aşağıdaki eşitlikte tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} w &= n \cdot \sin\left(\frac{k\pi}{n} x_j + z\right) \\ y_j &= 0.5 \times \left(|x_j + 1| - |x_j - 1| \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

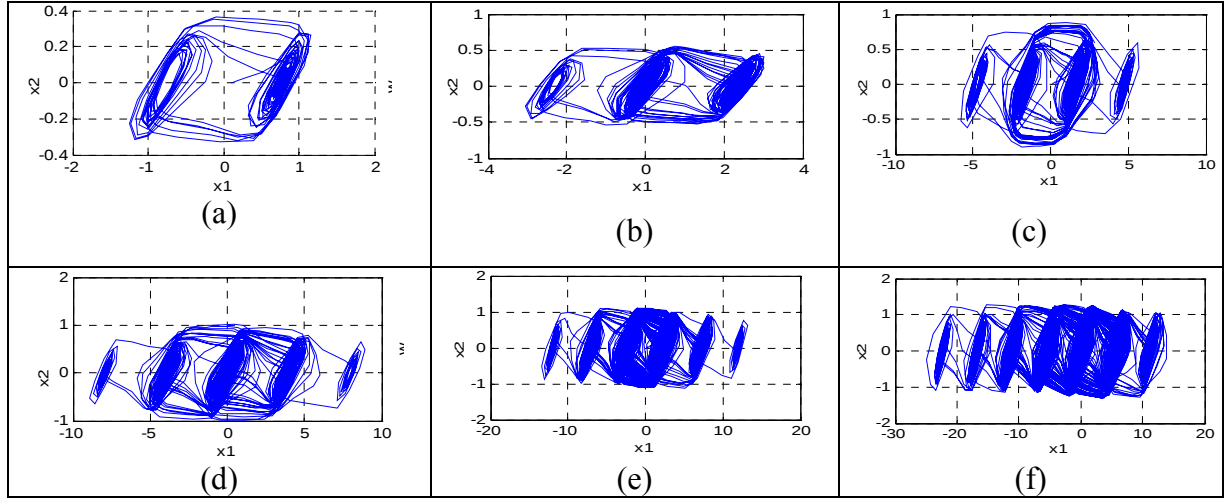
w fonksiyonundaki $n=1, 2, 3, \dots$ 'dir. n tek ise $z=\pi$, n çift ise $z=0$ 'dır.

Çok çekerli kaotik işaret üretici için üç durum değişkeninin açıkça ifade edildiği tanımlama Denklem 3.16'da sunulmaktadır.

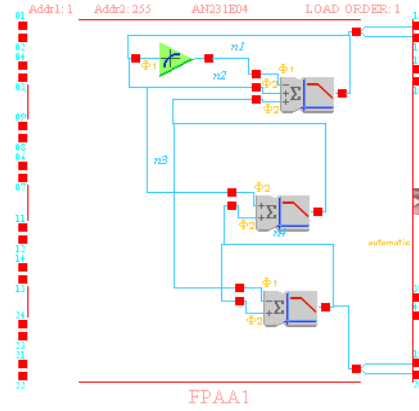
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + a_1 y_1 + s_{11} x_1 + w + s_{12} x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + s_{21} x_1 + s_{23} x_3 \\ \dot{x}_3 &= -x_3 + s_{32} x_2 + s_{33} x_3 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Denklem 3.16'daki $a_1 = -0.426$, $s_{11}=1$, $s_{32} = -14$, $s_{12} = 10.2$, $s_{21} = s_{23} = s_{33} = 1$, $k=5/2$ seçilerek 2-7 çeker arasında çok çekerli kaotik işaretler elde edilebilmektedir. Bu parametre değerleri kullanılarak yapılan nümerik simülasyon sonuçları Şekil 3.30'da verilmektedir.

FPAA elemanı kullanılarak gerçekleştirimi yapılan diğer sistemlerde olduğu gibi CNN tabanlı bu yapının gerçekleştiriminde de nümerik analiz sonuçları incelenmiş, satürasyon voltajını geçen dinamikler için yeniden ölçeklendirme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.30. CNN tabanlı a) n=2, b) n=3, c) n=4, d) n=5, e) n=6, f) n=7 çok çekerli kaos üretici için nümerik analiz sonuçları.



Şekil 3.31. CNN tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştirim şeması.

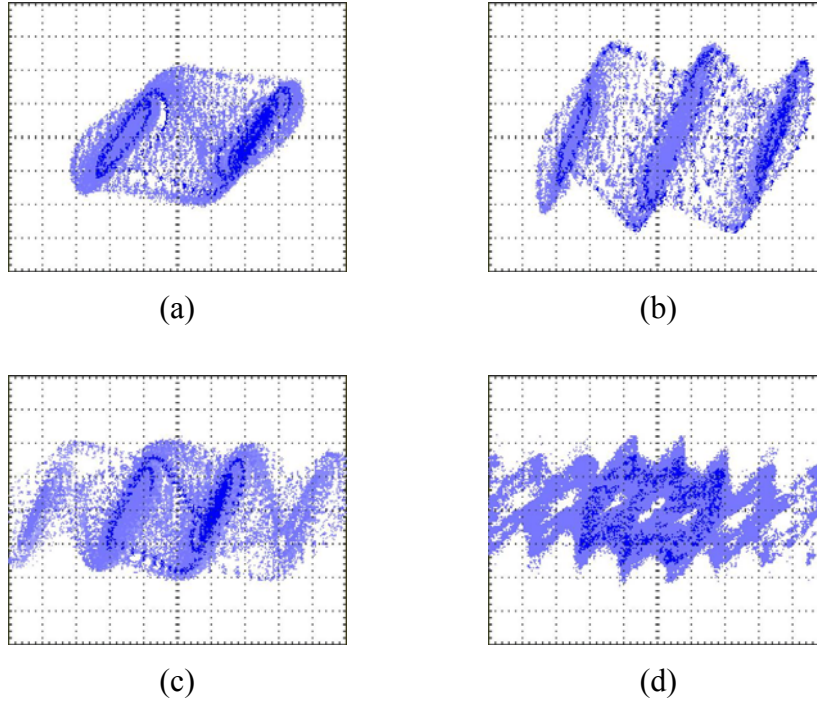
CNN tabanlı yapı önceki sistemlere benzediği için, Şekil 3.31’de verilen FPAA gerçekleştirim şemasında da görüldüğü gibi bu sistemde de SUMFILTER bloğu kullanılmış, yani ölçeklendirilen sistemin Laplace dönüşümü alınmıştır. Matematiksel işlemlerin ardından FPAA gerçekleştirimine uygun hale gelen eşitlikler Denklem 3.17’de sunulurken, farklı sayılarda çekerler elde etmek için kullanılan parametre değerleri Tablo 3.10’da verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= a_1 y_1 + s_{11} x_1 + b_1 w + s_{12} x_2 \\
 \dot{x}_2 &= s_{21} x_1 + s_{23} x_3 \\
 \dot{x}_3 &= s_{32} x_2 + s_{33} x_3 \\
 w &= n \cdot \sin\left(\frac{k\pi}{n} c_1 x_j + z\right) \\
 y_1 &= 0.5 \times (|c_1 x_1 + 1| - |c_1 x_1 - 1|)
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Tablo 3.10. CNN tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA gerçekleştiriminde kullanılan parametre değerleri.

n=2;	$a_1=-0.426, s_{11}=1, b_1=1, s_{12}=10.2, s_{21}=1, s_{23}=1, s_{32}=1, s_{33}=-14, k=2.5, z=0, c_1=1.$
n=3;	$a_1=-0.213, s_{11}=1, b_1=0.5, s_{12}=5.1, s_{21}=2, s_{23}=2, s_{32}=1, s_{33}=-7, k=2.5, z=\pi, c_1=2.$
n=4;	$a_1=-0.142, s_{11}=1, b_1=0.33, s_{12}=3.4, s_{21}=3, s_{23}=3, s_{32}=1, s_{33}=-4.667, k=2.5, z=0, c_1=3.$
n=7;	$a_1=-0.0426, s_{11}=1, b_1=0.1, s_{12}=1.02, s_{21}=10, s_{23}=30, s_{32}=1, s_{33}=-0.4667, k=2.5, z=\pi, c_1=10.$

İki adet nonlinear fonksiyona sahip bu sistemi FPAA tabanlı gerçeklemenin sağladığı en büyük avantaj, nonlinear fonksiyonların gerçekleştiriminin oldukça kolay yapılmasıdır. PWL ve trigonometrik ifadelerle tanımlanan nonlinear fonksiyonlar, FPAA tabanlı gerçekleştirimde TRANSFER FUNCTION bloğuna gömülmüştür. Tablo 3.10'daki parametreler kullanılarak FPAA elemanı ile gerçekleştirilen CNN tabanlı çok çekerli kaos üreticilerine ait deney sonuçları Şekil 3.32'de görülmektedir.

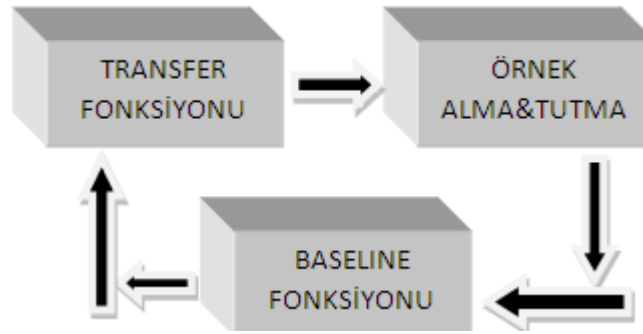


Şekil 3.32. FPAA elemanı kullanılarak gerçekleştirilen a) n=2, b) n=3, c) n=4, d) n=7 CNN tabanlı kaotik işaret üreticisine ait deney sonuçları.

3.4. Kaotik Sinir Ağı (KNN) Tabanlı Nöron Haberleşme Uygulamasının FPAA ile Gerçekleştirimi

Son yıllarda yapılan gerek nümerik, gerekse deneysel çalışmalarda beynin ve nöron hücrelerinin nonlinear dinamiklerinin değişik dallanma ve kaotik davranış sergiledikleri ispatlanmıştır [111-113]. Kaotik sinir ağları gerçek bir biyolojik nöron hücresinin kaotik cevabına benzer kompleks dinamik davranışlar sergileyen yapılardır. Bu bölümde kaotik işaretlerin haberleşme uygulamalarında nasıl kullanıldığını örnekleyen bir çalışma, kaotik nöron modeli ve ağ yapısı kullanılarak ele alınmaktadır.

Bir kaotik nöronda ise üç bileşen vardır. Bunlar; transfer fonksiyonu, örnek alma ve tutma, geribeslemeli baseline fonksiyonudur. Bir kaotik nöronun bu bileşenlerinin gösterildiği blok diyagramı Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.33. Kaotik nöron modelinin kavramsal blok diyagramı.

Aihara ve arkadaşları tarafından önerilen ilk kaotik nöron modeline ait matematiksel ifadeler Denklem 3.18'de sunulmaktadır [114]:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= k.x(t) - \alpha.g(x(t)) + B, \\ y(t+1) &= f(x(t+1)), \\ f(x) &= \frac{1}{1 + \exp(-x/\varepsilon)} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Burada $x(t)$ nöronun dahili durum değişkenini, B bütün harici uyarıların toplamını, k dayanımın sönümlleme parametresini, α dayanımın ölçeklendirme parametresini, $y(t)$ nöronun analog çıkışını, $f(x)$ sigmoid benzeri transfer fonksiyonunu, $g(x)$ ise dayanımla ilgili bir fonksiyonu temsil etmektedir. Aihara ve arkadaşları tarafından önerilen kaotik nöron modelinde $g(x)$ fonksiyonu ve $f(x)$ fonksiyonu aynı fonksiyonlardır ve Denklem 3.18'deki $f(x)$ ifadesi ile tanımlanırlar. Bu modelin ardından farklı fonksiyonların kullanıldığı kaotik nöron modelleri literatüre sunulmuştur. Burada PWL fonksiyonunun kullanıldığı kaotik nöron modeli için bir haberleşme uygulaması örneği ele alınacaktır.

Aihara'nın modelinden elde edilen PWL tabanlı kaotik nöron modele ait tanımlamalar Denklem 3.19'da verilmektedir [115].

$$\begin{aligned} y(t+1) &= N[x(t)] \\ x(t+1) &= ay(t+1) + c \\ N(x) &= \begin{cases} \alpha x + 5, & x \leq 1.33 \\ (\alpha - 3.65)x + 9.85, & 1.33 < x \leq 2.7 \\ \alpha x, & 2.7 < x \end{cases} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Burada nöron modelin ayar parametresi α 'dır. α 'nın farklı değerleri için bu model periyodik geçişler ve kaotik davranışlar sergilemektedir.

Birçok kaotik nöronun birleşiminden kaotik sinir ağ yapısı oluşur. PWL-N kaotik nöron modeli M-adet nörondan oluşan bir kaotik ağ yapısına dönüşebilir. Bu kaotik nöral ağ Denklem 3.20 ile tanımlanır [115].

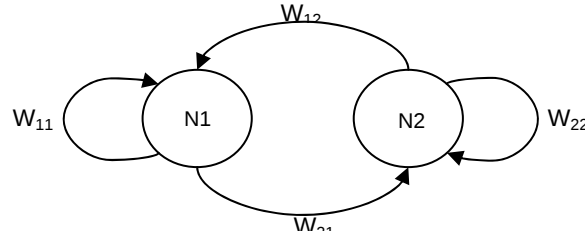
$$\begin{aligned} y(t+1) &= N[x(t)] \\ x(t+1) &= w_{ii}y_i(t+1) + \sum_{j \neq i}^M w_{ij}y_j(t+1) + \sum_{j=1}^L v_{ij}I_j + \theta_i, \quad i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2.20)$$

Denklem 3.20'de w_{ij} ; j. nörondan i. nörona olan bağıntının ağırlığını, M ; nöron sayısını, L ; harici giriş sayısını, v_{ij} ; j. harici girişten i. nörona olan bağıntının ağırlığını, I_j ise j. harici girişi temsil etmektedir. Bu denklem yapısında $A_i(t) = \sum_{j \neq i}^M w_{ij}y_j(t+1) + \sum_{j=1}^L v_{ij}I_j + \theta_i$ alınarak

bir düzenleme yapıldığında, eşitlik iki nörondan oluşan basit bir ağ yapısı için, Denklem 3.21'deki gibi bir ifadeye dönüşür:

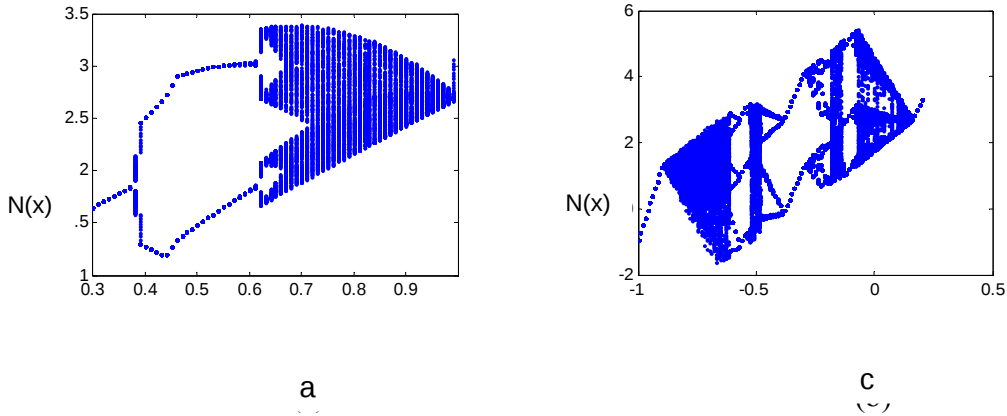
$$\begin{aligned} x_1(t+1) &= w_{11}y_1(t+1) + w_{12}y_2(t+1) \\ x_2(t+1) &= w_{22}y_2(t+1) + w_{21}y_1(t+1) \\ y_1(t+1) &= a N[x_1(t)] + c \\ y_2(t+1) &= a N[x_2(t)] + c \end{aligned} \quad (2.21)$$

İki kaotik nöron arasındaki etkileşimi gösteren bir blok diyagram Şekil 3.34'te gösterilmektedir.



Şekil 3.34. İki nöron arasındaki etkileşimin sembolik blok diyagramı [115].

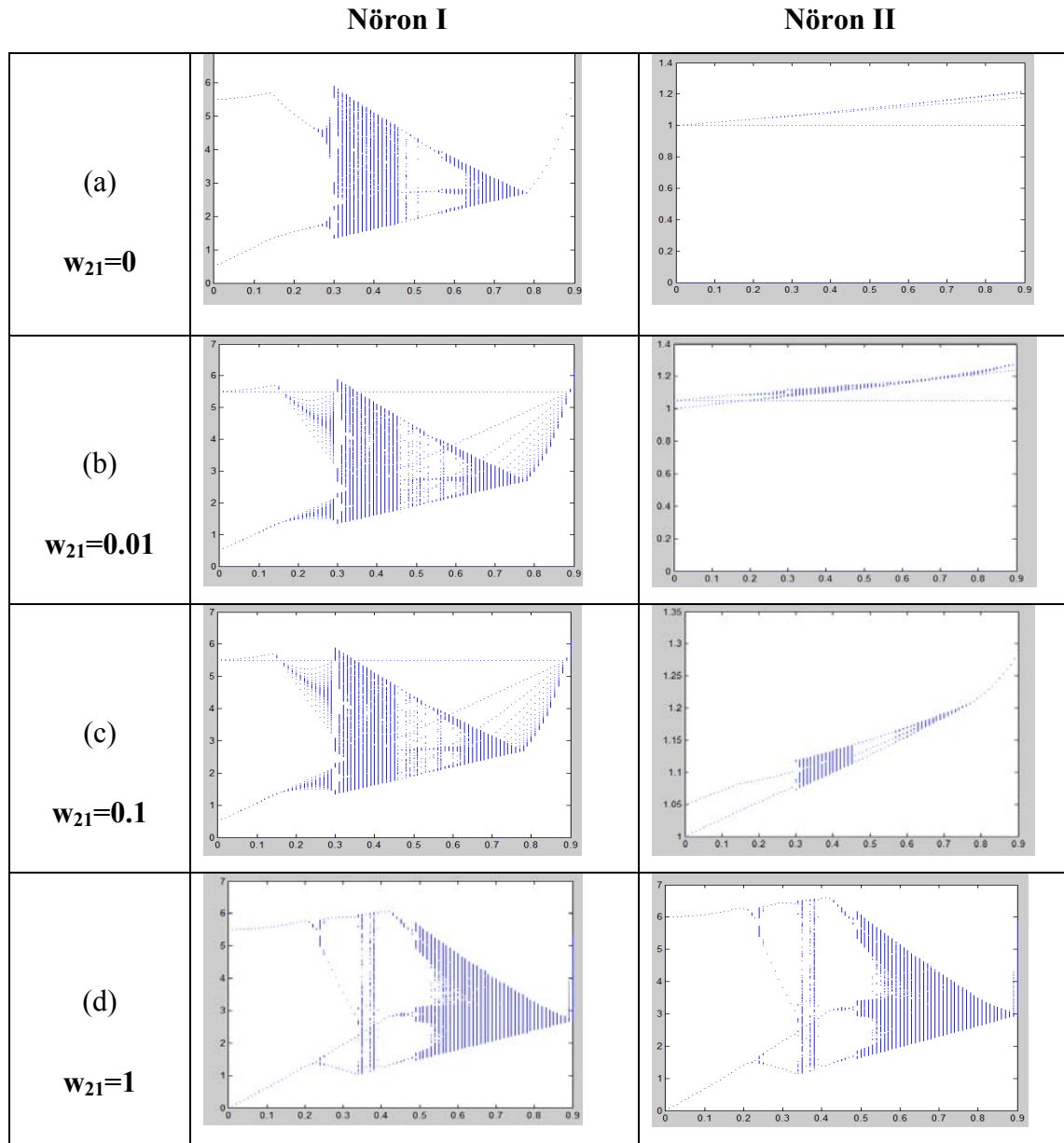
Kaotik ağ yapısındaki bir nöron göz önüne alındığında, nöron davranışını etkileyen iki parametre vardır. Bunlardan ilki nöronun kendine olan geribeslemesini ifade eden $a=w_{11}$; diğeri ise komşu nöronlardan gelen katkıyı ifade eden c parametresidir. Bu parametrelerin değişimlerinin nöron davranışını nasıl etkilediğini incelemek amacı ile iki durumu göz önüne alalım: Birinci durumda a parametresi değişken, $c=0$ olsun. Parametre ayarları bu şekilde yapıldığında nöronun diğer nöronlardan gelen katkısı sıfır kabul edilerek, sadece kendinden gelen geribeslemenin göz önünde bulundurulduğu bir davranış elde edilir. Bu davranışa ait dallanma diyagramı Şekil 3.35a’da verilmektedir. Diğer durumda ise c parametresi değişken, $a=1$ olsun. Bu şekilde bir parametre ayarı yapıldığında ise nöronun kendi davranışından gelen geribeslemeye ek olarak, diğer nöronlardan gelen katkılarda dikkate alınmaktadır. Bu duruma ait dallanma diyagramı ise Şekil 3.35b’de verilmektedir.



Şekil 3.35. İki kaotik nöronun etkileşiminde, a) a parametresi değişken, $c=0$ için, b) c parametresi değişken $a=1$, durumu için dallanma diyagramları.

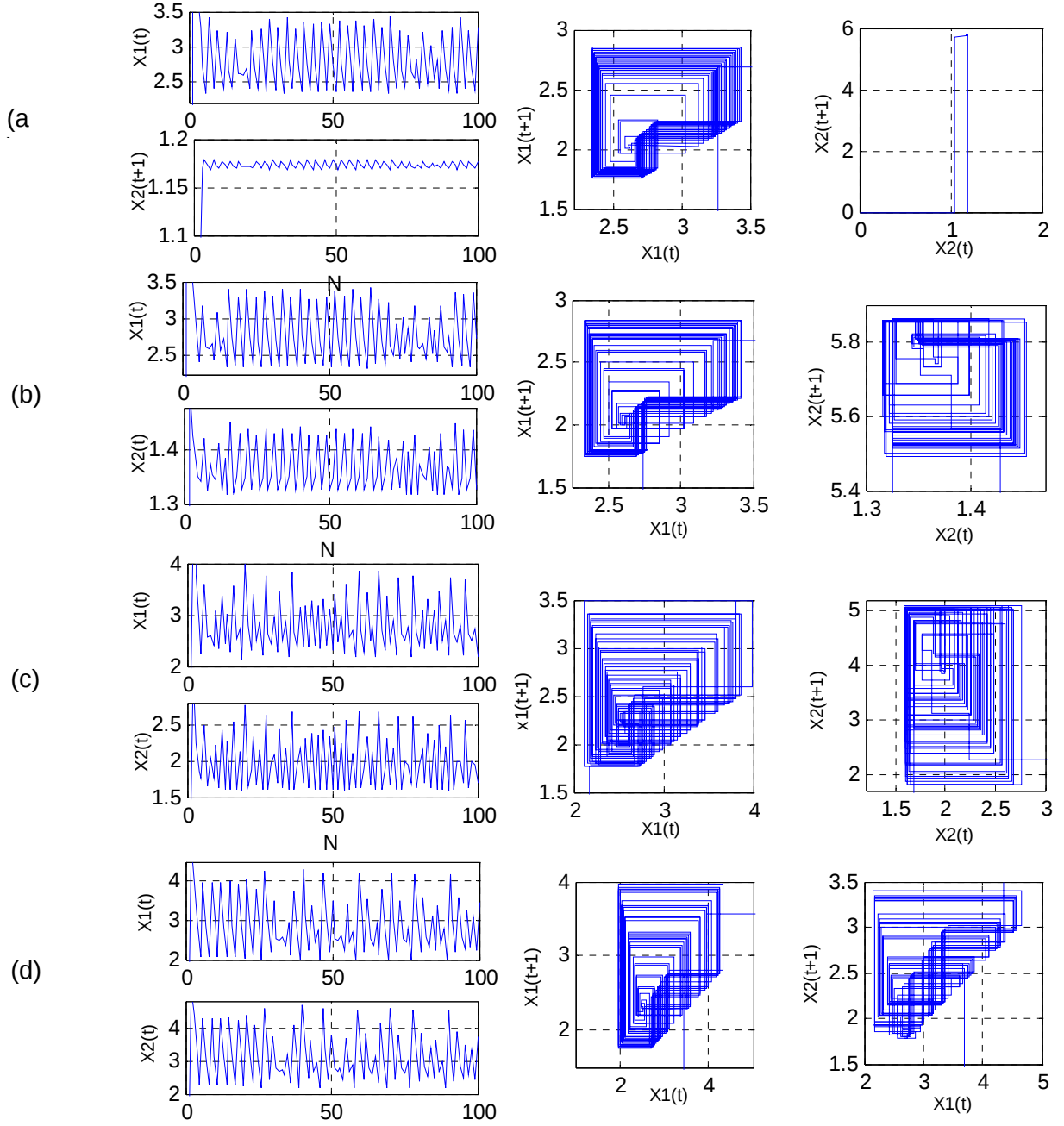
İki nörondan oluşan basit bir ağ yapısının davranışı; bir örnekle daha kolay açıklanabilir [36]. Bu örnekte Şekil 3.34’teki sembolik nöron yapısı göz önünde bulundurulmaktadır. Birinci nöronun parametreleri kaotik davranış sergileyecek şekilde ayarlanırken, ikinci nöronun

parametre ayarları düzenli bir davranış sergileyecek şekilde yapılmıştır. Yapılan parametre ayarlamaları şu şekilde sıralanabilir:



Şekil 3.36. Etkileşimli iki nöron arasındaki ilişki için oluşturulmuş bir yapının, a) $w_{21}=0$, b) $w_{21}=0.01$ için, c) $w_{21}=0.1$ için, d) $w_{21}=1$ değerleri için dallanma diyagramları.

- 1) Kaotik bir nöron elde edebilmek için Denklem 3.19'daki α parametresi "0.65" değerine ayarlanmıştır.
- 2) Birinci nöronun kaotik davranış sergilemesi için kendine olan geribeslemesini ifade eden w_{11} ağırlığı, Şekil 3.35a'daki dallanma diyagramından yararlanılarak "1" değerine ayarlanır.



Şekil 3.37. PWL-N kaotik nöron ağ yapısının $\alpha=0.65$ değerinde, a) $w_{21}=0.01$, b) $w_{21}=0.1$, c) $w_{21}=0.5$, d) $w_{21}=1$ değerleri için nümerik simülasyon sonuçları.

- 3) İkinci nöronun kaotik davranış sergilememesi için nöronun kendine olan geribeslemesini ifade eden w_{22} ağırlığı, Şekil 3.35a'daki dallanma diyagramından "0.2" değerine ayarlanır.
- 4) İkinci nöronun birinci nörona doğru olan geribeslemeyi ifade eden w_{12} parametresi de ilk nöronun kaotik davranış sergileyebilmesi için Şekil 3.35b'den yararlanılarak "0.1" değerine ayarlanır.

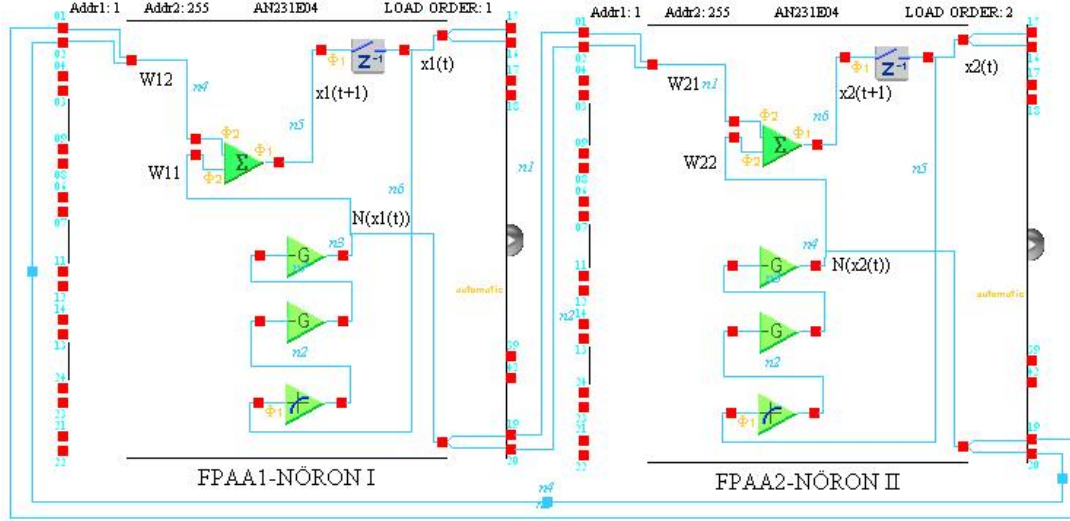
5) Birinci nörondan ikinci nörona doğru olan geribeslemeyi ifade eden w_{21} parametresinin değeri ise nöron geribeslemelerinin, kaotik dinamikler üzerindeki etkilerinin görülmesi açısından sırası ile birinci nörondan ikinci nörona;

- Hiçbir etkinin olmadığı $w_{21}=0.01$ değerine,
- Etkinin çok az olduğu $w_{21}=0.1$ değerine,
- Orta durumdaki bir etkinin uygulandığı $w_{21}=0.5$ değerine,
- Birinci nörondan gelen etkinin tamamen uygulandığı $w_{21}=1$ değerine ayarlanmıştır.

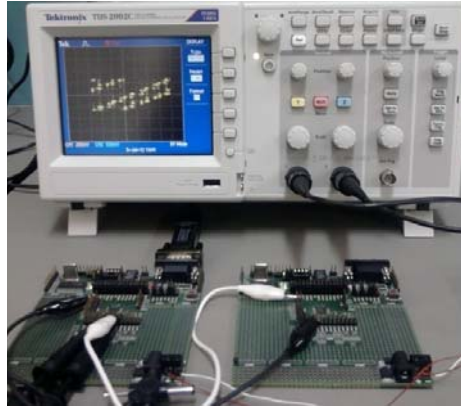
Bu durumlar göz önünde bulundurularak nöronların her biri için yapılan dallanma diyagramı analizi Şekil 3.36'da sunulmaktadır. Şekilden de görüleceği gibi, $w_{21}=0.01$ iken 2. nöron kaotik davranış sergilememekte, $w_{21}=0.1$ değerinde sistem çözümlerinin sayısı artış göstermekte, $w_{21}=0.5$ değerinde kaotik davranışa doğru bir geçiş gözlemlenmekte, $w_{21}=1$ durumunda ise kaotik davranış elde edilmektedir. α 'nın ve ağırlıkların kaotik ağ yapısı davranışlarını üzerindeki etkilerini dallanma diyagramı dışında zaman domeninde ya da faz portresi gösterimlerinde gözlemlemek daha pratiktir. İki kaotik nörondan oluşan kaotik ağ yapısının davranışlarını gözlemlemek için, $\alpha=1$ değerinde iken w_{21} ağırlığı sırasıyla $w_{21}=0.01$, $w_{21}=0.1$, $w_{21}=0.5$ ve $w_{21}=1$ değerlerine ayarlanmıştır. Bu değerler için yapılan nümerik simülasyon sonuçları Şekil 3.37'de verilmiştir. Nümerik analizde de dallanma diyagramına paralel bir durum elde edilmiştir.

Kaotik ağ yapısında haberleşme uygulamalarına geçiş olması açısından, iki nörondan oluşan basit bir sistem FPAA ile oluşturulmuştur. Gerçekleştirimlerde Denklem 3.21'deki fark denklemleri kullanılmıştır. Tasarımın daha kolay anlaşılabilmesi için Şekil 3.34'ten yararlanılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi farklı özelliklerdeki iki nöron ayrı ayrı oluşturulmuş ve nöron ağırlıkları ile etkileşimli hale getirilmişlerdir. Bu sebeple her bir nöron farklı FPAA bordunda gerçekleşmiştir. Tek bir PWL-N kaotik nöron modelinin FPAA gerçekleştirimi için tasarlanan nümerik programdan yararlanılarak $N(x)$ fonksiyonu belirli değerler arasında, 256 adım için hesaplatılıp TRANSFER FUNCTION bloğuna gömülmüştür. Bu blok çıkışında kazanç katına ihtiyaç olabileceği düşünülerek iki adet GAININV bloğu ardı ardına bağlanmıştır. İki nörondan oluşan kaotik bir sistemde bir kaotik nöronu etkileyen iki ağırlık bulunmaktadır. Bunlardan biri nöronun kendinden gelen geribeslemesi, diğeri ise komşu nörondan gelen katkıdır. Denklem 3.21'den de görülebileceği gibi ağırlıklar nöron çıkışları ile çarpılıp, çarpım sonuçları toplanmaktadır. Bu işlemi FPAA ile gerçekleyebilmek için SUMDIFF bloğundan yararlanılmıştır. Bu blok ağırlıklandırılabilir ve işaretleri

ayarlanabilir dört adet girişe sahiptir. Bu girişlerden ikisi isteğe göre on/off şeklinde ayarlanabilmektedir. Sistemde gecikmenin sağlanabilmesi için SAMPLE&HOLD bloğu kullanılmıştır. FPAA tabanlı gerçekleştirime ait model Şekil 3.38’de verilirken, deneysel düzeneğe ait bir fotoğraf Şekil 3.39’da sunulmaktadır [116].

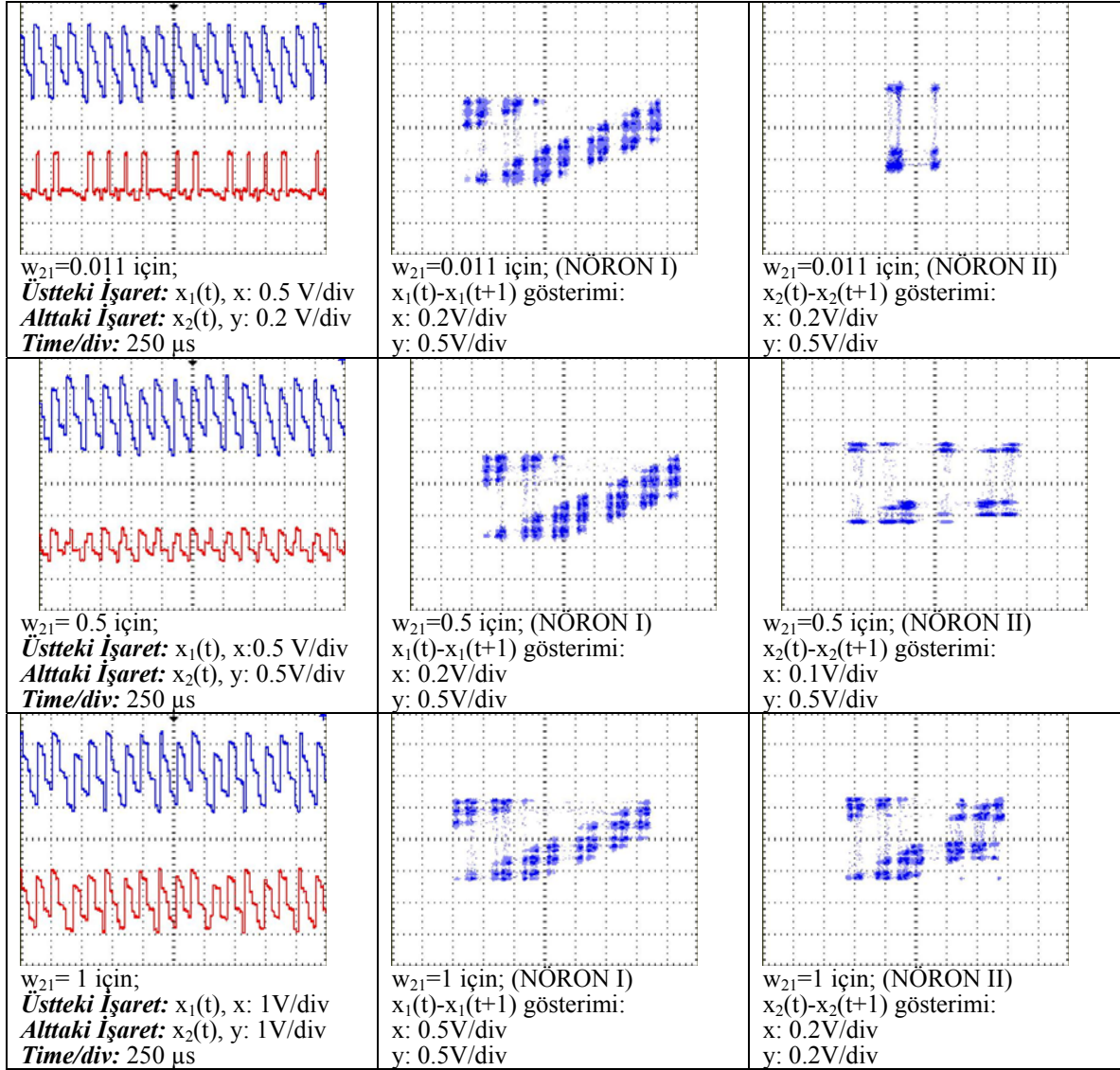


Şekil 3.38. PWL-N Kaotik Nöral Ağ Yapısı'nın FPAA gerçekleştirim şeması.



Şekil 3.39. PWL-N Kaotik Nöron Modeli için oluşturulan deneysel düzeneğin fotoğrafı.

Kaotik haberleşme uygulamasının ele alındığı bu kısımda, nöronlardaki α değeri 0.65 alınarak eşdeğer iki nöron oluşturulmuştur. Birinci nöronun kaotik davranış sergilemesi için kendinden gelen geribeslemesini ifade eden $w_{11}=1$ değerinde, $w_{12}=0.1$ değerinde seçilmiştir. İkinci nöronun kaotik davranış sergilememesi içinse $w_{22}=0.2$ değerine ayarlanmıştır. w_{21} ağırlığı ise birinci nöronun ikinci nörona olan etkisini gözlemlemek için sırasıyla $w_{21}=0.011$, $w_{21}=0.5$ ve $w_{21}=1$ değerlerine ayarlanmıştır. Bu değerler için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 3.40'ta sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde;



Şekil 3.40. PWL-N Kaotik Nöral Ağ Yapısının FPAA tabanlı gerçekleştirimi için deney sonuçları.

- Etkinin çok az olduğu $w_{21}=0.011$ değerinde ikinci nöron herhangi bir dinamik davranış sergilememektedir.
- Orta durumdaki bir etkinin uygulandığı $w_{21}=0.5$ değerinde ikinci nöron kaotik davranışa geçiş yapmaktadır, fakat ürettiği çıkış işaretinin genliği birinci nöronun ürettiği çıkış işaretinin genliğinden daha küçüktür.
- Birinci nörondan gelen etkinin tamamen uygulandığı $w_{21}=1$ değerine ayarlandığında ise, ikinci nöron da kaotik davranış sergilemektedir.

Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi FPAA elemanı kaotik nöronların etkileşiminin incelenmesi için oldukça uygun bir araçtır. Elde edilen sonuçlar nümerik sonuçlarla uyumaktadır.

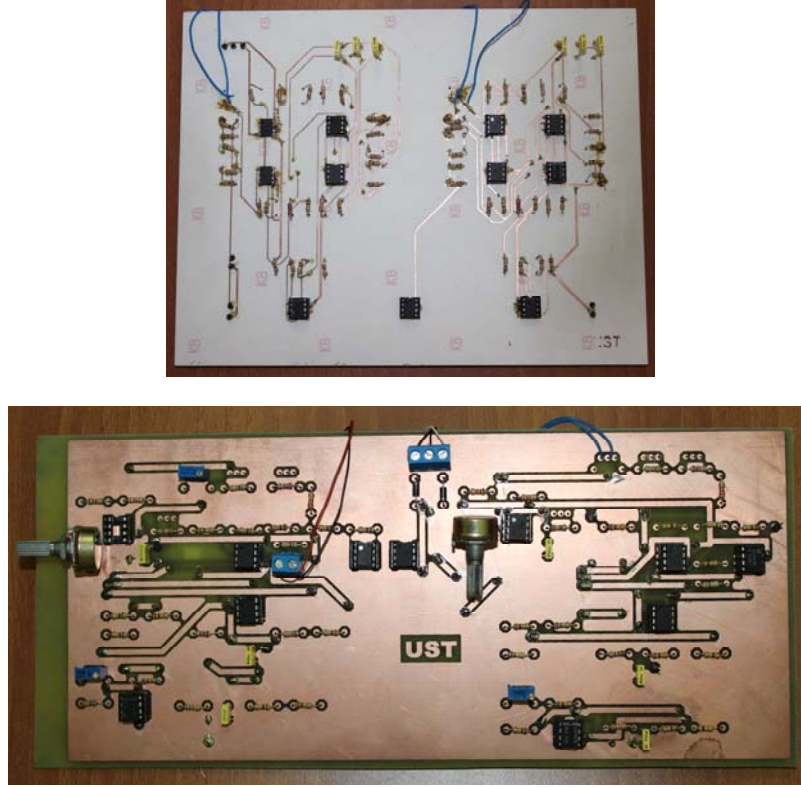
BÖLÜM 4

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu projede mühendislik lisans ve lisansüstü eğitim programlarında kaotik devreler ve sistemlerin araştırılmasına yönelik elektronik tabanlı yeni eğitim setlerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda; teorik alt yapı hazırlığı, bilgisayar simülasyonları ile tasarım doğruluğu ve fiziksel gerçekleştirim aşamalarını içeren bir süreç takip edilmiştir. Lineer olmayan dinamikler ve kaosla ilgili mühendislik alanındaki araştırmalar; genelde teorik ve simülasyon temelli olup, deneysel olarak yapılan araştırmalar ise tek bir devre modelinin incelenmesi ve onunla ilgili sonuçların rapor edilmesi şeklinde literatüre yansımıştır. Kaos konusunun lisans ve lisansüstü düzeyine kadar indirilip araştırılması ve bu sistemlerle ilgili laboratuvar çalışmalarının bir ders formatında işlenebilmesi için sistematik tarzda hazırlanmış eğitim setlerine duyulan ihtiyaç bu proje çalışması ile giderilmeye çalışılmıştır. Bu durumun bir ilk olması ve benzer uygulamalara örnek teşkil etmesi açısından ulusal ve uluslararası literatürde önemli bir sonuç arz etmektedir.

Projenin hazırlanması süresince pek çok kaotik yapı incelenmiş, uygulama devreleri geliştirilmiş, prototip devreler üretilmiştir. Matematiksel modeli verilen bir sistemin devre gerçekleştiriminin nasıl olacağı, devredeki durumu etkileyecek parametrelerin nasıl gerçekleştirileceği, devredeki elemanların değerlerinin devre dinamiklerini nasıl etkileyeceği soruları göz önünde bulundurularak tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımlardan bazıları eğitim setleri için kullanılabilir yetkinliğe ulaşmasa bile, çeşitli uluslararası konferanslarda değerlendirilerek literatüre kazandırılmıştır. Bunlardan biri 20.'si 2011 yılında İsveç, Linköping'de düzenlenen ECCTD2011 (European Conference on Circuit Theory and Design) konferansında "External and Internal Control Applications for SC-CNN-Based Chaotic Circuit" isimli makale ile sunulmuştur. Makalede sisteme ait simülasyon sonuçları verilmiştir

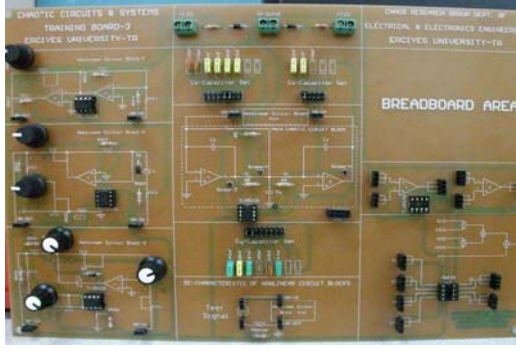
[117]. Sonrasında bu yapı için bir uygulama devresi de tasarlanmıştır; fakat uygulama devresinde istenilen tasarım esnekliği sınırlı kaldığından diğer tasarımlar devreye alınmıştır. Tasarlanan bu devre yapısı için ürettirilen prototiplere ait fotoğraflar Şekil 4.1’de verilmektedir.



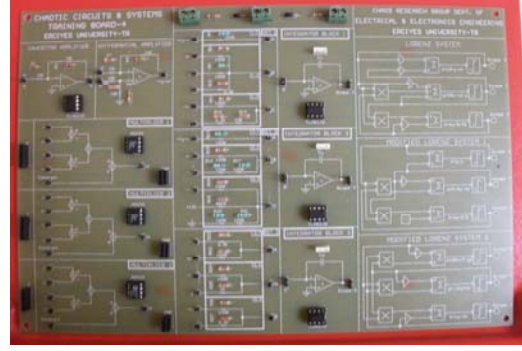
Şekil 4.1. CNN tabanlı kaotik devre için ürettirilen prototip kartlar.

Proje kapsamında yapılan deneylerin değerlendirildiği bir başka çalışma da 2012 yılında Almanya Wolfenbüttel’de yapılan uluslararası NDES2012 (Nonlinear Dynamics of Electronic Systems) konferansında yayınlanan “SC-CNN Based n-scroll Generator: Implementation Issues and Experimental Verification” çalışmasıdır. Bu çalışmada daha önce teorik altyapısı tarafımızca sunulan CNN tabanlı çok çeker üreticini ele alan ve Bölüm 3’te detayları sunulan çalışmamızın deneysel gerçekleştirimi üzerinde durulmuştur [118].

2013 yılında ise İtalya, Bari’de düzenlenen NDES2013 konferansında Bölüm 2’deki Sprott ve Lorenz Sistemlerini ele alan eğitim setlerinin prototip devreleri kullanılarak “An Introductory Study For Chaos Training Board Series” isimli çalışma sunulmuştur [119]. Bölüm 2’de son haline ait fotoğrafların sunulduğu bu eğitim setleri için geliştirilen prototiplere ait fotoğraflar Şekil 4.2’de sunulmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.2. a) Kaotik Eğitim Seti-3, b) Kaotik Eğitim Seti-4 için üretilen prototip kartlar.

Proje kapsamında değerlendirilen son çalışma ise 2013 yılında Türkiye, Bursa’da düzenlenen uluslararası ELECO2013 (International Conference on Electrical and Electronics Engineering) konferansında sunulan “Reconfigurable Implementations of PWL-Based Multiscroll Chaos Generator” çalışması olmuştur [120]. Bu çalışmada ise Bölüm 3’te ele alınan PWL fonksiyonu tabanlı çok çekerli kaos üretici devresinin FPAA ve FPGA tabanlı gerçekleştirimi ele alınmaktadır.

Proje çalışması kapsamında çok sayıda prototip kart tasarımından sonra son şekilleri verilen ayırık elemanlarla gerçekleştirilmiş dört kaotik eğitim seti ve programlanabilir elemanlarla gerçekleştirilen programlanabilir setle birlikte beş adet kaotik eğitim modülü gerçekleştirilmiş ve pratik olarak da üretilmiştir. Üretilen kartların tasarım etkinlikleri ulusal ve uluslar arası bilimsel faaliyetlerde kanıtlandığı gibi örnek olarak seçilen lisansüstü düzeydeki derslerde laboratuvar uygulaması şeklinde bu eğitim setleri ile çalışılmıştır. Öğrencilerden gelen geribildirimlerle setlerle yapılabilecek deneylere son hali verilmiş, kullanım kolaylığı sunacak bazı ilave donanım düzenlemeleri de setlere kazandırılmıştır. Bu çalışmalardan sonraki adım, proje raporundaki anlatıma benzer tarzda bir deney föyü hazırlamak olacaktır. Uluslararası literatürde bir ilki teşkil eden kaotik eğitim setlerinin Erciyes Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm etiketli olarak yurt içi ve yurt dışındaki üniversitelerin mühendislik ve temel bilimler tabanlı bölümlerinde kullanılabileceği ümit edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ogorzalek, M.J., 1993. Taming chaos-part I: Synchronization. **IEEE Trans. Circuits & Syst.-I**, **40**: 693-698.
- [2] Gleick, J., 1995. Kaos, TÜB.TAK Yayınları, Ankara.
- [3] Aihara, K., Katayama, R., 1995. Chaos engineering in Japan. **Communication of the ACM**, **38**: 103-107.
- [4] Katayama, R., Kajitani, Y., Kuwata, K., Nishida, Y., 1993. Developing tools and methods for applications incorporating neuro, fuzzy and chaos technology. **Computers ind. Engng.**, **24**: 579-592.
- [5] Lakshmanan, M., Murali, K., 1996. Chaos in nonlinear oscillators. Controlling and Synchronization, World Scientific.
- [6] Ogorzalek, M.J., 1997. Chaos and complexity in nonlinear electronic circuits. World Scientific.
- [7] Kennedy, M.P., 1995. Experimental chaos from autonomous electronic circuits. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. A**, **353**: 13-32.
- [8] Ruelle, D., 1995. Rastlantı ve kaos. TÜB.TAK Yayınları.
- [9] Kennedy, M.P., Chua, L.O., 1986. Van der Pol and chaos, **IEEE Trans. Circuits & Systems-I**, **33**: 974-980.
- [10] Ueda, Y., Akamatsu, N., 1980. Chaotically transitional phenomena in the forced negative-resistance oscillator. **IEEE Trans. Circuits&Systems-I**, **CAS-28**: 217-226.
- [11] Linsay, P., 1981. Period doubling and chaotic behavior in a driven inharmonic oscillator. **Phys. Rev. Lett.**, **47**: 1349-1392.
- [12] Testa, J., Perez, J., Jeffries, C., 1982. Evidence for universal chaotic behaviour of a driven nonlinear oscillator. **Phys. Rev. Lett.**, **48**: 716-717.
- [13] Chua, L.O., 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**, **40**: 732-761.
- [14] Matsumoto, T., Chua, L.O., Tanama, S., 1984. Simplest chaotic nonautonomous circuit. **Physical Rev. A**, **30**: 1155-1157.
- [15] Matsumoto, T., Chua, L.O., Takunaga, R., 1987. Chaos via torus breakdown. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **CAS-34**: 240-253.

- [16] Inaba, N., Mori, S., 1988. Chaotic phenomena in a circuit with a diode due to change of the oscillation frequency. **IEICE Trans. Fundamentals.**, **E71**: 842-849.
- [17] Ogorzalek, M.J., 1989. Order and chaos in a third order RC ladder network with nonlinear feedback. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **CAS-36**: 1221-1230.
- [18] Mögel, A., Schwarz, W., 1995. High frequency chaos generators, pp: 1133-1136. *ECCTD'95. European Conference on Circuit Theory and Design, İstanbul.*
- [19] Tamasevicius, A., Namajunas, A., Cenys A., 1996. Simple 4D chaotic oscillator. **Electronic Letters**, **32**: 957-958.
- [20] Nakagawa, S., Saito, T., 1996. An RC OTA hysteresis chaos generator. **IEEE Trans. Circuits & Systems-I**, **43**: 1019-1021.
- [21] Cascais, J., Dialo, N., Costa, A.N., 1983. Chaos and reverse bifurcation in a RCL Circuit. **Physics Letters**, **93A**: 213-216.
- [22] Rodriguez-Vasquez, A.B., Huertas, J.L., Chua, L.O., 1985. Chaos in a switched-capacitor circuit. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **CAS-32**: 1083-1085.
- [23] Endo, T., Chua, L.O., 1988. Chaos from phase-locked loops. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **CAS-34**: 987-1003.
- [24] Chua, L.O., Lin, T., 1990. Chaos and fractals from third-order digital filters. **Int. J. of Circuit Theory and Appl.**, **18**: 241-256.
- [25] Macchi. O., Jaidane-Saidane. M., 1989. Adaptive IIR filtering and chaotic dynamics: Application to audio frequency coding. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **CAS-36**: 591-599.
- [26] Hamill, D.C., Jeffries, D.J., 1988. Subharmonics and chaos in a controlled switch-mode power converters. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **CAS-35**: 1059-1061.
- [27] Poddar, G., Chakrabarty, K., Banerjee, S., 1995. Control of chaos in the boost converter. **Electronics Letters**, **31**: 841-842.
- [28] Tse, C.K., Fung, S.C., Kwan, M.W., 1996. Experimental confirmation of chaos in a current-programmed Cuk converter. **IEEE Trans. Circuits & Systems-I**, **43**: 605-608.
- [29] Kılıç, R., Alçı, M., Tokmakçı, M., 2000. Mixed-Mode chaotic circuit. **Electronics Letters**, **36**: 103-104.
- [30] Ogorzalek, M.J., 1993. Taming Chaos-Part II: Control. **IEEE Trans. Circuits & Syst.-I**, **40**: 700-706.

- [31] Chen, G., Dong, X., 1993. From chaos to order- perspectives and methodologies in controlling chaotic nonlinear dynamical systems. **International J. of bifurcation &Chaos**, **3**: 1363-1409.
- [32] Yang, T., Chua, L.O., 1998. Control of chaos using sampled data feedback control. **International J. of Bifurcation &Chaos**, **8**: 2433-2438.
- [33] Arecchi, F.T., Boccaletti, S., Ciofini, M., Grebogi, C., Meucci, R., 1998. The control of chaos: Theoretical schemes and experimental realizations. **International J. of Bifurcation &Chaos**, **8**: 1643-1655.
- [34] Hu, G., Qu, Z., He, K., 1995. Feedback control of chaos in spatiotemporal systems, **International J. of Bifurcation &Chaos**, **5**: 901-936.
- [35] Kapitanik, T., Kocarev, L., Chua, L.O., 1993. Controlling chaos without feedback and controlling signals. **International J. of Bifurcation &Chaos**, **3**: 459-468.
- [36] Pecora, L.M., Carroll T.L., 1990. Synchronization in chaotic systems. **Phys. Rev. Lett.**, **64**: 821- 824.
- [37] Cuomo, K.M., Oppenheim, A.V., 1993. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communication, **Phys. Rev. Lett.**, **71**: 65-68.
- [38] Frey, D.R., 1993. Chaotic digital encoding: An approach to secure communication, **IEEE Trans. Circuits &Syst.-II**, **40**: 660-666.
- [39] Corron, N.J., Hains, D.W., 1997. A new communications using chaotic signals. **IEEE Trans. Circuits &Syst.-I**, **44**: 373-382.
- [40] Hasler, M., 1998. Synchronization of chaotic systems and transmission of information. **International J. of Bifurcation &Chaos**, **8**: 647-655.
- [41] Kawata, J., Nishio, Y., Dediu, H., Ushida, A., 1998. On the influence of transmission line on communication system using chaos synchronization. **IEICE Trans. Fundamentals**, **E81-A**: 1713-1724.
- [42] Kolumban, G., Kis, G., Jako, Z., Kennedy, M.P., 1998. FM-DCSK: A robust modulation scheme for chaotic communications. **IEICE Trans. Fundamentals**, **E81-A**: 1798-1802.
- [43] Panas, A.I., Yang, T., Chua, L.O., 1998. Experimental results of impulsive synchronization between two Chua's circuits. **International J. of Bifurcation &Chaos**, **8**: 639-644.
- [44] Yang, T., Yang, L.B., Yang, M., 1998. Breaking chaotic switching using generalized synchronization: Examples. **IEEE Trans. Circuits &Syst.-I**, **45**, 1062-1067.

- [45] A Brief History of Chaos Theory, [http:// www. schuelers. com/ ChaosPsyche/ part_1_3.html](http://www.schuelers.com/ChaosPsyche/part_1_3.html).
- [46] Chen, G., Ueta, T., 2002. Chaos in Circuits and Systems, World Scientific.
- [47] Bilotta, E., Campolo, R., Pantano, P., Stranges, F., 2006. Sound synthesis and chaotic behaviour in Chua's oscillator. **Mathematics in Industry, 9(Part IV):** 289-294.
- [48] Boukabou, A., 2007. Communication using chaotic modulation demodulation approach. **Arab Research Institute in Sciences & Engineering – ARISER, 3(2):** 69-75.
- [49] Moon, F. C., 2004. Chaotic vibrations: An introduction for applied scientists and engineers. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, USA.
- [50] Szemplinska-Stupnicka, W., 2003. Chaos, bifurcations and fractals around us: A brief introduction. World Scientific.
- [51] Suneel, M., 2006. Electronic circuit realization of the logistic map. **SADHANA – Academy Proceedings in Engineering Sciences, 31(1):** 69-78.
- [52] Gürses, S., Akkas, N., Platin, B. E., 2006. Ters dönmüş bir sarkacın dogrusal olmayan konum denetiminde en büyük lyapunov üstelinin poincare kesitinden elde edilmesi. **Journal of İstanbul Kültür University, 4:** 121-137.
- [53] Kılıç, R., 2010. A practical guide for studying Chua's Circuits. World Scientific.
- [54] Volos, C.K., Kyprianidis, I.M., Stouboulos, I.N., 2006. Experimental study of a nonlinear circuit described by Duffing's equation. **Journal of İstanbul Kültür University, 4:** 45-54.
- [55] Blakely, J.N., Eskridge, M.B., Corron, N.J., 2007. A simple Lorenz circuit and its radio frequency implementation. **Chaos, 17:** 023112-1 - 023112-5.
- [56] Kılıç, R., Karauz, B., 2008. Chaos training boards: Versatile pedagogical tools for teaching chaotic circuits and systems. **The International Journal of Engineering Education, 24(3):** 634-644.
- [57] Chua, L. O., Desoer, C. A., Kuh, E. S., 1987. Linear and nonlinear circuits. McGraw Hill, New York.
- [58] Kennedy, M. P., 1992. Robust op-amp realization of Chua's circuit. **Frequenz, 46:** 66-80.
- [59] Cruz, J.M., Chua, L. O., 1993. An IC chip of Chua's circuit. **IEEE Trans. Circuits & Systems-II, 40:** 614-625.

- [60] Rodriguez-Vazquez, A., Delgado-Restituto, M., 1993. CMOS design of chaotic oscillators using state variables: A monolithic Chua's circuit. **IEEE Trans. Circuits & Systems-II**, **40**: 596-612.
- [61] Yıldırım, F., 2004. Elektronik Devrelerde Yüksek Frekanslı Kaotik Osilatörlerin Tasarım ve Gerçeklesirimi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [62] Murali, K., Lakshmanan, M., Chua, L. O., 1994. Bifurcation and Chaos in The Simplest Dissipative Nonautonomous Circuit. **International J. of Bifurcation & Chaos**, **4**: 1511-1524.
- [63] Kılıç, R., Çam, U., Alçı, M., Kuntman, H., 2002. Improved Realization of Mixed Mode Chaotic Circuit. **Int. Journal of Bifurcation and Chaos**, **12**: 1429-1435.
- [64] Kılıç R., Yıldırım. F, 2003. Wien köprü tabanlı karışık modlu kaotik devre modeli WMMCC, pp: 334-337. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, Eylül 18-21, 2003, İstanbul.*
- [65] Kılıç R., Yıldırım. F., 2003. Wien bridge-based mixed-mode chaotic circuit W-MMCC: An educational chaotic circuit model for studying linear & nonlinear oscillations, pp: 121-124. *NDES2003. The 11th Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic System, Scuol / Schuls, Switzerland.*
- [66] Çam, U., 2002. Inductorless realization of mixed-mode chaotic circuit using current feedback operational amplifiers, pp: 69-72. *NDES2002. The 10th Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems.*
- [67] Rössler, O.E., 1976. An equation for continuous chaos. **Physics Letters**, **57(5)**: 397–398.
- [68] Carroll, T.L., 1995. A simple circuit for demonstrating regular and synchronized chaos. **American Journal of Physics**, **63(4)**: 377-379.
- [69] Yoshinaga, T., Kitajima, H., Kawakami, H., 1995. Bifurcation in a coupled Rössler system. **IEICE Trans. Fundamentals**, **78(10)**: 1276-1280.
- [70] Pisarchik, A.N., Jaimes-Reátegui, R., 2005. Homoclinic orbits in a piecewise linear Rössler-like circuit, pp: 122-127. *International Conference on Control and Synchronization of Dynamical Systems.*
- [71] García-Lopez, J.H., Jaimes-Reátegui, R., Pisarchik, A.N., Murguía-Hernandez, A., Medina-Gutiérrez, C., Valdivia-Hernandez, R., Villafana-Rauda, E., 2005. Novel communication scheme based on chaotic Rössler circuits, pp: 276-284. *International Conference on Control and Synchronization of Dynamical Systems.*

- [72] Namajunas, A., Tamasevicius, A., 1995. Modified Wien bridge oscillator for chaos. **Electronics Letters**, **31**: 335-336.
- [73] Kennedy, M. P., 1994. Chaos in the Colpitts oscillator. **IEEE Trans. Circuits Systems-I**, **41**: 771-774.
- [74] Sprott, J.C. 2000. A new class of chaotic circuit. **Physics Letters A**: **266**: 19-23.
- [75] Sprott, J.C. 2000. Simple chaotic systems and circuits. **Am. J. Phys**, **68(8)**: 758-763.
- [76] Yildirim Dalkiran F., Uzunhisarcikli E., Kiliç R., Alçi M., 2005. Experimental verification of high frequency performance of FTFN-based simple chaotic circuit. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, **15**: 191-205.
- [77] Lorenz, E.N., 1963. Deterministic nonperiodic flow. **J. Atmos. Sci.**, **20**: 130–141.
- [78] Vanecek, A., Celikovsky, S., 1996. Control systems: From linear analysis to synthesis of chaos. London: Prentice-Hall.
- [79] Ueta, T., Chen, G. 2000. Bifurcation analysis of Chen's attractor. **Int. J. Bifurcation and Chaos**, **10(8)**: 1917-1931.
- [80] Lü, J., Zhou, T., Chen, G., Zhang S., 2002. The compound structure of Chen's attractor. **Int. J. Bifurcation and Chaos**, **12(4)**: 855-858.
- [81] Lü, J., Chen, G., 2002 A new chaotic attractor coined. **Int. J. Bifurcation and Chaos**, **12(3)**: 659-661.
- [82] Lü, J., Chen, G., Zhang, S., 2002. Dynamical analysis of a new chaotic attractor. **Int. J. Bifurcation and Chaos**, **12(5)**: 1001-1015.
- [83] Lü, J., Chen, G., Cheng, D., Celikovsky, S., 2002. Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system. **Int. J. Bifurcation and Chaos**, **12(12)**: 2917-2926.
- [84] Lü, J., Chen, G., Cheng, D., 2004. A new chaotic system and beyond: The generalized Lorenz-like system. **Int. J. Bifurcation and Chaos**, **14(5)**: 1507-1537.
- [85] Pehlivan, İ., Uyaroğlu, Y., 2010. A new chaotic attractor from general Lorenz system family and its electronic experimental implementation. **Turk J. Elec. Eng. & Comp. Sci.**, **18(2)**: 171-184.
- [86] Anadigm Inc., 1901 South Bascom Avenue Suite 1550 Campbell CA 95008, USA, 2010, www.anadigm.com.
- [87] Kılıç, R., Dalkiran, F.Y., 2009. Reconfigurable implementations of Chua's Circuit. **International Journal of Bifurcation & Chaos**, **19(4)**: 1339-1350.

- [88] Wada, M., Nishio, Y., Ushida, A., 1999. Chaotic itinerancy phenomena on coupled n-double scrolls chaotic circuits, pp. 487–490. *ISCAS '99. In Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*.
- [89] Yalcin, M. E., Suykens, A. K., Vandewalle, J., 2004. True random bit generation from a double-scroll attractor. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 51(7): 1395–1404.
- [90] Yalcin, M. E., Suykens, A. K., Vandewalle, J., 2004. A double scroll based true random bit generator. *ISCAS '04. In Proc. Int. Symp. Circuits and Systems*.
- [91] Tang, K.S., Man, K.F., Chen, G., 2001. Digitized n-scroll attractor model for secure communications, pp. 787–790. *ISCAS 2001. In Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*.
- [92] Arena, P., De Fiore, S., Fortuna, L., Frasca, M., Patan'e, L., Vagliasindi, G., 2008. Reactive navigation through multiscroll systems: From theory to real-time implementation. **Autonomous Robots**, 25(1): 123–146.
- [93] Suykens J., Vandewalle, J., 1991. Quasilinear approach to nonlinear systems and the design of n-double scroll ($n=1, 2, 3, 4, \dots$). **IEE Proceedings G Circuits, Devices and Systems**, 138(5): 595–603.
- [94] Yalçın, M.E., Suykens, J., Vandewalle, J., 2005. Cellular neural networks, multi-scroll chaos and synchronization. *Nonlinear Science, Series A*. World Scientific Pub Co Inc, vol. 50
- [95] Lu, J., Chen, G., 2006. Generating multiscroll chaotic attractors: theories, methods and applications. **International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering**, 16(4): 775.
- [96] Arena, P., Baglio, S., Fortuna, L., Manganaro, G., 1996. Generation of n-double scrolls via cellular neural networks. **International journal of circuit theory and applications**, 24(3): 241–252.
- [97] Aziz-Alaoui, M., 1999. Differential equations with multispiral attractors. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, 9: 1009–1040.
- [98] Tang, W. K. S., Zhong, G.Q., Chen, G., Man, K. F., 2001. Generation of n-scroll attractors via sine function. **IEEE Trans. Circuits Syst. I**, 48(11): 1369–1372.
- [99] Cafagna, D., Grassi, G., 2003. Hyperchaotic coupled Chua circuits: An approach for generating new nxm-scroll attractors. **International Journal of Bifurcation And Chaos In Applied Sciences And Engineering**, 13(9): 2537–2550.

- [100] Cafagna, D., Grassi, G., 2003: New 3D-scroll attractors in hyperchaotic Chua's circuits forming a ring. **International Journal of Bifurcation and Chaos In Applied Sciences and Engineering**, **13(10)**: 2889–2904.
- [101] Yu, S., Lu, J., Leung, H., Chen, G., 2005. Design and implementation of n-scroll chaotic attractors from a general jerk circuit. **IEEE Trans. Circuits Syst. I**, **52(7)**: 1459–1476.
- [102] Yalcin, M.E., Suykens, J., Vandewalle, J., Ozoguz, S., 2002. Families of scroll grid attractors. **International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering**, **12(1)**: 23–42.
- [103] Günay, E., Kılıç, R.: A new way of generating n-scroll attractors via trigonometric function. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, **21(3)**: 897–901.
- [104] Chua, L.O., 1998. CNN: A Paradigm for complexity. World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A- Vol. 31.
- [105] Arena, P., Baglio, S., Fortuna, L., and Manganaro, G., 1995. Chua's circuit can be generated by CNN cells. **IEEE Trans. Circuits & System-I**, **42(2)**: 123-125.
- [106] Caponetto, R., Lavorgna, M., and Occhipinti, L., 1996. Cellular Neural Networks in secure transmission applications, pp. 411-416. *Proc. of CNNA '96, Sevilla, Spain*.
- [107] Kılıç, R., Alçı, M., Günay, E., 2004. A SC-CNN-Based Chaotic Masking System with Feedback. **Int. Journal of Bifurcation and Chaos**, **14(1)**: 245-256.
- [108] Günay, E., Alçı, M., 2006. n -Double Scrolls In SC-CNN circuit via diode-based PWL function. **Int. J. Bifurcation & Chaos**, **16(4)**.
- [109] Günay E., 2010. MLC Circuit in the Frame of CNN. **Int. J. Bifurcation & Chaos**, **20(10)**.
- [110] Chua, L.O., Yang, L., 1988. Cellular neural networks: Theory. **IEEE Trans. Circuits & Systems**, **35**: 732-745.
- [111] Skarda, C.A, Freeman, W.J., 1987. How brain make chaos in order to make sense of the world. *Behavioral and Brain Sciences*, **10**: 161-194.
- [112] Freeman, W.J., 1992. Tutorial on neurobiology: From single neuron to brain chaos. **Int. J. Bifurcation & Chaos**, **2**: 451-482.
- [113] Freeman, W.J., 1994. Neural networks and chaos. **J. Theory. Biol.**, **171**: 13-18.
- [114] Aihara, K., Takbe, T., Toyoda, M., 1990. Chaotic neural networks. **Phys. Lett. A**, **144**: 333-340.

- [115]Hsu, C.C, Gobovic, D., Zaghloul, M.E., Szu, H.H., 1996. Chaotic neuron models and their VLSI implementations. *IEEE Trans. Neural Networks*, 7: 1339-1350.
- [116]Korkmaz, N., Kılıç, R., 2014. Implementations of modified chaotic neural models with analog reconfigurable hardware. **Int. J. Bifurcation & Chaos**, **24(4)**: 1450046.
- [117]Günay, E., Kılıç, R., Dahasert, N., 2011. External and internal control applications for SC-CNN-based chaotic circuit. *ECCDT2011. European Conference on Circuit Theory and Design*.
- [118]Kılıç, R., Günay, E., Dahasert, N., 2012. SC-CNN based n-scroll generator: implementation issues and experimental verification. *NDES2012. Nonlinear Dynamics of Electronic Systems*.
- [119]Kılıç, R., Korkmaz, N., Günay, E., 2013. “An introductory study for chaos training board series. *NDES2013. Nonlinear Dynamics of Electronic Systems*.
- [120]Arık, S, Korkmaz, N., Öztürk, İ., Kılıç, R., Günay E., 2013. Reconfigurable implementations of PWL-based multiscroll chaos generator. *ELECO2013. International Conference on Electrical and Electronics Engineering*.