

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

**ZAYIF SİNYAL TESPİT UYGULAMALARINA
YÖNELİK YENİ KAOTİK SİSTEM GELİŞTİRME
YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

Abdullah GÖKYILDIRIM

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU

Ekim 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZAYIF SİNYAL TESPİT UYGULAMALARINA
YÖNELİK YENİ KAOTİK SİSTEM GELİŞTİRME
YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

Abdullah GÖKYILDIRIM

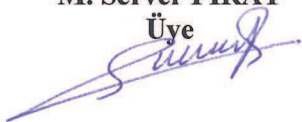
Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 21 / 10 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.
Yılmaz UYAROĞLU
Jüri Başkanı



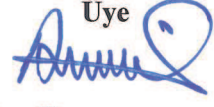
Yrd. Doç. Dr.
M. Server FIRAT
Üye



Doç. Dr.
İhsan PEHLİVAN
Üye



Doç. Dr.
Ali ÖZTÜRK
Üye

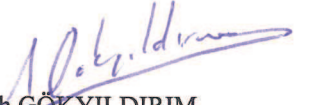


Yrd. Doç. Dr.
Ahmet ÇİFCİ
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Abdullah GÖKYILDIRIM

21.10.2016

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, herkonuda bilgi ve desteğini aldığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden ve yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU'na ve sayın hocam Doç. Dr. İhsan PEHLİVAN'a teşekkürlerimi sunarım. Her türlü anlayış, destek ve yardımlarından dolayı eşime ve kızıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı, Yapılacak İş	7
1.2. Tezde İzlenecek Yol	10
BÖLÜM 2.	
KAOS VE TEMEL KAVRAMLAR.....	12
2.1. Kaotik Sistemler.....	12
2.1.1. Ayırık zamanlı kaotik sistemler.....	12
2.1.2. Sürekli zamanlı kaotik sistemler.....	14
2.2. Kaotik Sistemlerin Analiz Yöntemleri.....	15
2.2.1. Denge nokta analizi.....	15
2.2.2. Faz portreleri.....	20
2.2.3. Zaman serisinde başlangıç değerlerine hassas bağımlılık analizi.....	22
2.2.4. Lyapunov üstelleri.....	23
2.2.5. Çatallaşma diyagramı.....	26

2.3. Kaotik Sistemlerin Modellenmesi ve Elektronik Devre.....	
Benzetimleri.....	27

BÖLÜM 3.

YENİ BULUNAN SİSTEMLER İLE LİTERATÜRDEN SEÇİLEN BAZI KAOTİK SİSTEMLERİN ANALİZ YÖNTEMLERİ VE MODELLENMESİ	33
3.1. Yeni Kaotik A Sistemi.....	33
3.1.1. Temel dinamik analizler.....	36
3.1.2. Lyapunov üstelleri analizi.....	39
3.1.3. Çatallaşma diyagramı analizi.....	41
3.2. Yeni Kaotik B Sistemi.....	43
3.2.1. Temel dinamik analizler.....	46
3.2.2. Lyapunov üstelleri analizi.....	49
3.2.3. Çatallaşma diyagramı analizi.....	51
3.3. Hiperkaotik Lorenz A Sistemi.....	53
3.3.1. Lyapunov üstelleri analizi.....	57
3.3.2. Çatallaşma diyagramı analizi.....	60
3.4. Hiperkaotik Lorenz B Sistemi.....	62
3.4.1. Lyapunov üstelleri analizi.....	65
3.4.2. Çatallaşma diyagramı analizi.....	67
3.5. Duffing-Holmes Sistemi.....	69
3.5.1. Lyapunov üstelleri analizi.....	72
3.5.2. Çatallaşma diyagramı analizi.....	74
3.6. Van Der Pol Sistemi.....	75
3.6.1. Lyapunov üstelleri analizi.....	79
3.6.2. Çatallaşma diyagramı analizi.....	81

BÖLÜM 4.

YENİ BULUNAN KAOTİK SİSTEMLERİN ELEKTRONİK DEVRE MODELLEMELERİ.....	84
4.1. Yeni Kaotik Sistem A'nın Elektronik Devre Modellemesi.....	84
4.2. Yeni Kaotik Sistem B'nin Elektronik Devre Modellemesi.....	87

BÖLÜM 5.

YENİ BULUNAN SİSTEMLER İLE LİTERATÜRDEN SEÇİLEN BAZI KAOTİK SİSTEMLERİN ZAYIF SİNYAL TESPİT UYGULAMALARI.....	90
5.1. Kaos Teorisi Tabanlı Zayıf Sinyal Tespiti.....	90
5.1.1. Sinyal gürültü oranı (SGO) analizi.....	90
5.2. İncelenen Sistemlerle Zayıf Sinyal Tespit (ZST) Uygulamaları.....	91
5.2.1. Yeni kaotik sistem A ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları.....	91
5.2.2. Yeni kaotik sistem B ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları.....	94
5.2.3. Hiperkaotik Lorenz A sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları.....	96
5.2.4. Hiperkaotik Lorenz B sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları.....	98
5.2.5. Duffing-Holmes sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları.....	100
5.2.6. Van Der Pol Sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları.....	102
5.3. ZST Uygulamalarından Elde Edilen Sonuçların..... Karşılaştırılması.....	104

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR.....	110
EKLER.....	122
ÖZGEÇMİŞ.....	123

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ANFIS	: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ZST	: Zayıf Sinyal Tespiti
FFT	: Fast Fourier Transform
EMAT	: Elektromanyetik Akustik Transdüser
λ	: Özdeğerler
Hz	: Hertz
W	: Watt
dB	: Desibel
mV	: Milivolt
μ V	: Mikrovolt
C	: Kondansatör Değeri
R	: Direnç Değeri
V	: Gerilim Değeri
ω	: Açısal Frekans
rad	: Radyan
sn	: Saniye
ms	: Mili Saniye
Div	: Division
AD	: Analog Devices
SNR	: Signal to Noise Ratio
SGO	: Sinyal Gürültü Oranı
max(x)	: Yerel Maksimum x
MATLAB	: Matrix Laboratory
r_l	: Sabit
c_0	: Sabit
α	: Sabit

β	: Sabit
k	: Sabit
a	: Sabit
b	: Sabit
c	: Sabit
f	: Frekans
r	: Zayıf Bilgi Sinyalinin Genliği
$n(t)$	: Arka Plan Gürültü
$H_s(\omega)$	: Zayıf Bilgi Sinyalinin Güç Spektrum Genliği
$H_n(\omega)$	: Arka Plan Gürültünün Güç Spektrum Genliği
RK4	: Dördüncü Dereceden Runge-Kutta Algoritması
RK5	: Beşinci Dereceden Runge-Kutta Algoritması
FPGA	: Field Programmable Gate Array
RLC	: Direnç, Bobin ve Kondansatörden Oluşan Devre
RL	: Direnç ve Bobinden Oluşan Devre
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronical Engineers

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	İleri seviye ZST için geliştirilen yöntemin algoritma şeması.....	8
Şekil 2.1.	Lojistik haritanın $x_0=0.2$ için, r_l parametresinin belirli değerlerine göre değişimi: a) $r_l=2.8$, b) $r_l=3.4$, c) $r_l=3.5$ ve d) $r_l=4$	13
Şekil 2.2.	Lojistik Haritanın çatallaşma diyagramı ($r_l = 0-4$).....	14
Şekil 2.3.	Örnek sistemin faz portreleri.....	21
Şekil 2.4.	Duffing osilatörünün Poincore kesiti örneği [141].....	22
Şekil 2.5.	Örnek sistemin başlangıç şartlarına hassas bağımlılığını gösteren zaman serileri.....	22
Şekil 2.6.	Örnek sistemin Lyapunov üstelleri spektrumu.....	26
Şekil 2.7.	Örnek sistemin çatallaşma diyagram.....	27
Şekil 2.8.	Denklem (2.27)'yi modelleyen blok diyagramı.....	28
Şekil 2.9.	Denklem (2.28)'in elektronik devre şeması.....	30
Şekil 2.10.	Denklem (2.28)'deki sistemin $\alpha=2$ için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktısı	32
Şekil 3.1.	Yeni kaotik A sistemi için zaman serileri.....	34
Şekil 3.2.	Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=1.15$ ($t=100-500sn$) ve $\alpha=1.5$ ($t=500sn$) için x-y faz portreleri ($\omega=1rad/sn$).....	34
Şekil 3.3.	Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=2.54$ ($t=1000sn$) ve $\alpha=2.55$ ($t=250-1000sn$) için x-y faz portreleri ($\omega=1rad/sn$).....	35
Şekil 3.4.	x durum değişkeninin farklı başlangıç şartları $x_1(0)=0$ ve $x_2(0)=0.0001$ için karşılaştırmalı zaman serileri grafiği ($\alpha=1.5$)...	36
Şekil 3.5.	Yeni kaotik A sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=0-5$)	40
Şekil 3.6.	Yeni kaotik A sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=2.5-2.6$).....	41
Şekil 3.7.	Yeni kaotik A sisteminin çatallaşma diyagramı ($\alpha=0-5$)	42

Şekil 3.8.	Detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($\alpha=2.5-2.6$).....	43
Şekil 3.9.	Yeni kaotik B sistemi için zaman serileri.....	44
Şekil 3.10.	Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=1.23$ ($t=200-1000sn$) ve $\alpha=2$ ($t=1000sn$) için x-y faz portreleri ($\omega=1rad/sn$).....	45
Şekil 3.11.	Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=2.787$ ($t=1000sn$) ve $\alpha=2.788$ ($t=500-1000sn$) için x-y faz portreleri ($\omega=1rad/sn$).....	45
Şekil 3.12.	x durum değişkeninin farklı başlangıç şartları $x_1(0)=0$ ve $x_2(0)=0.0001$ için karşılaştırmalı zaman serileri grafiği ($\alpha=2$).....	46
Şekil 3.13.	Yeni kaotik B sisteminin Lyapunov üstellleri spektrumu ($\alpha=0-5$)	50
Şekil 3.14.	Yeni kaotik B sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=2.75-2.85$).....	51
Şekil 3.15.	Yeni kaotik B sisteminin çatallaşma diyagramı ($\alpha=0-5$)	52
Şekil 3.16.	Yeni kaotik B sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($\alpha=2.6-3$).....	53
Şekil 3.17.	Lorenz sisteminin $a=10$, $b=8/3$ ve 25 için x-z ve x-y faz portreleri.....	54
Şekil 3.18.	Hiperkaotik Lorenz A sistemi için zaman serileri.....	55
Şekil 3.19.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin $c=0.2751$ için x-z ve x-y faz portreleri ($\omega=10rad/sn$).....	56
Şekil 3.20.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin $c=0.991$ ve $c=0.992$ için x-z faz portreleri ($\omega=10rad/sn$, $t=50-500sn$).....	56
Şekil 3.21.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin Lyapunov üstellleri spektrumu ($c=0-7$).....	58
Şekil 3.22.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=0.95-1.05$).....	59
Şekil 3.23.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin hiperkaotik davranış gösterdiği bir aralığı gösteren detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=0.2-0.3$).....	60
Şekil 3.24.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin çatallaşma diyagramı ($c=0-7$)..	61
Şekil 3.25.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($c=0.95-1.05$).....	62

Şekil 3.26.	Hiperkaotik Lorenz B sistemi için zaman serileri.....	63
Şekil 3.27.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin $c=6.29$ için $x-z$ ve $x-y$ faz portreleri ($\omega=9.6\text{rad/sn}$).....	64
Şekil 3.28.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin $c=33.771$ ve $c=33.772$ için $x-z$ faz portreleri ($\omega=9.6\text{rad/sn}$, $t=50-500\text{sn}$).....	64
Şekil 3.29.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=0-40$).....	65
Şekil 3.30.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=33-35$).....	66
Şekil 3.31.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin kaos ile hiperkaos arasında geçişler yaptığı bir aralığı gösteren detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=6-7$).....	67
Şekil 3.32.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin çatallaşma diyagramı ($c=0-40$).....	68
Şekil 3.33.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($c=33-35$).....	69
Şekil 3.34.	Duffing-Holmes sistemi için zaman serileri.....	71
Şekil 3.35.	Duffing-Holmes sisteminin $\alpha=0.7256$ ve $\alpha=0.7257$ için $x-y$ faz portreleri ($\omega=1\text{rad/sn}$).....	72
Şekil 3.36.	Duffing-Holmes sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=0-1$).....	72
Şekil 3.37.	Duffing-Holmes sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=0.68-0.8$).....	73
Şekil 3.38.	Duffing-Holmes sisteminin çatallaşma diyagramı ($\alpha=0-1$).....	74
Şekil 3.39.	Duffing-Holmes sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($\alpha=0.68-0.8$).....	75
Şekil 3.40.	Van Der Pol sisteminin $x-y$ faz portresi.....	76
Şekil 3.41.	Van Der Pol sistemi için zaman serileri.....	77
Şekil 3.42.	Van Der Pol sisteminin $b=4.97$ ve $b=4.98$ için $x-y$ faz portreleri ($\omega=1.788\text{rad/sn}$).....	77
Şekil 3.43.	Van Der Pol sisteminin (βy^3 terimi içeren) $x-y$ faz portresi.....	78
Şekil 3.44.	Shaw-Van Der Pol sisteminin $x-y$ faz portresi.....	79

Şekil 3.45.	Van Der Pol sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($b=0-8$)....	80
Şekil 3.46.	Van Der Pol sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($b=4.5-5.5$).....	81
Şekil 3.47.	Van Der Pol sisteminin çatallaşma diyagramı ($b=0-8$).....	82
Şekil 3.48.	Van Der Pol sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($b=4.5-5.5$).....	83
Şekil 4.1.	Yeni kaotik sistem A'nın elektronik devre tasarımı.....	85
Şekil 4.2.	Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=1.15$ ($t=200-1000sn$) ve $\alpha=1.5$ ($t=1000sn$) için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div).....	86
Şekil 4.3.	Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=2.623$ ($t=1000sn$) ve $\alpha=2.624$ ($t=200-1000sn$) için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div).....	86
Şekil 4.4.	Yeni kaotik sistem B'nin elektronik devre tasarımı.....	88
Şekil 4.5.	Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=1.5$ ($t=250-1000sn$) ve $\alpha=2$ ($t=1000sn$) için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div).....	89
Şekil 4.6.	Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=2.826$ ($t=1000sn$) ve $\alpha=2.827$ ($t=250-1000sn$) için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div).....	89
Şekil 5.1.	Yeni kaotik sistem A'nın zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı.....	93
Şekil 5.2.	Yeni kaotik sistem B'nin zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı.....	95
Şekil 5.3.	Hiperkaotik Lorenz sistem A'nın zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı.....	97
Şekil 5.4.	Hiperkaotik Lorenz sistem B'nin zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı.....	99
Şekil 5.5.	Duffing-Holmes sistemi zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı.....	101
Şekil 5.6.	Geliştirilmiş Van Der Pol sistemi zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı.....	103

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	3 ve 4 boyutlu sistemlerde sistem durumlarının Lyapunov üstellerinin işaretlerine göre değişimi.....	25
Tablo 3.1.	Sistem durumunun Lyapunov üstellerinin işaretlerine göre değişimi.....	57
Tablo 5.1.	Yeni kaotik sistem A'nın ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması.....	94
Tablo 5.2.	Yeni kaotik sistem B'nin ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması.....	96
Tablo 5.3.	Hiperkaotik Lorenz A sisteminin ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması ($\omega=10$, $c_0=0.991868$).....	98
Tablo 5.4.	Hiperkaotik Lorenz B sisteminin ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması ($\omega=9.6$, $c_0=33.771700$).....	99
Tablo 5.5.	Duffing-Holmes sisteminin ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması.....	101
Tablo 5.6.	Geliştirilmiş Van Der Pol sisteminin ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması.....	103
Tablo 5.7.	İncelenen sistemlerin analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	104

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kaos, Kaotik Sistemler, Kaos Tabanlı Zayıf Sinyal Tespiti, Gürültü, Çatallaşma, Lyapunov üstelleri, Sinyal-Gürültü Oranı

Bu tez çalışmasında, zayıf sinyal tespit uygulamaları için özgün kaotik sistem geliştirmeye yönelik yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen kaos tabanlı zayıf sinyal tespit yöntemi literatürdeki standart zayıf sinyal tespit yöntemlerinden farklıdır. Bu yolla, farklı frekans değerlerinde tespit yapmaya uygun iki yeni kaotik sistem bulunmuştur.

Tezde, yeni geliştirilen yöntem kullanılarak elde edilen iki özgün kaotik osilatör tanıtılmıştır. Bu sistemler basit yapılı olup, parametrik çeşitliliğe ve yüksek uygulanabilme kapasitesine sahiptir. Yeni sistemlerin dinamik karakteristikleri detaylı olarak incelenmiştir. Bununla beraber, Duffing-Holmes, Van Der Pol ve iki hiperkaotik Lorenz sisteminin de dinamik karakteristikleri detaylı olarak incelenmiştir. İlk olarak, sistemlerin Lyapunov metodu ile analizleri yapılmıştır. Sistemlerin durumu ile sürülme teriminin genliği arasındaki ilişki Lyapunov üstellerinin incelenmesi ile ortaya çıkarılmıştır. Kaotik sistemlerin dinamik davranışları bu yolla gözlemlenmiştir. İkinci olarak, kaotik sistemlerin kritik eşik değeri çatallaşma analizi yapılarak tespit edilmiştir. Tanjant çatallaşma noktası adı verilen bu nokta, güçlü gürültü altındaki zayıf sinyal bilgisinin tespiti için en uygun noktadır. Bununla beraber, yeni kaotik sistemlerin elektronik devreleri tasarlanarak benzetimleri de yapılmıştır.

Son olarak önerilen sistemlerin zayıf sinyal tespit uygulamaları yapılmıştır. Benzetim sonuçları, sistemlerin yüksek doğrulukta ve düşük değerli sinyal gürültü oranı (SGO) ile zayıf sinyal tespiti yapabildiğini göstermiştir. Bununla beraber bu sistemler, yüksek frekans değerlerinde de tespit yapabilmektedir. Duffing-Holmes, Van Der Pol ve iki hiperkotik Lorenz sisteminin de zayıf sinyal tespit uygulamaları yapılmıştır. Matlab-Simulink® ve OrCAD-PSpice® ortamlarında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları, çalışılan sistemlerin teorik analizlerinin doğru olduğunu göstermiştir. Yeni yöntemle geliştirilen özgün kaotik sistemler, endüstriyel metal malzemeleri tahribatsız muayene eden cihazlar, metal dedektörler, elektromanyetik akustik transdüserler gibi cihazların zayıf yankı sinyallerinin tespitinde kullanılabilecek potansiyel sistemlerdir.

A NEW APPROACH TO IMPROVE NOVEL CHAOTIC SYSTEMS FOR WEAK SIGNAL DETECTION APPLICATIONS

SUMMARY

Keywords: Chaos, Chaotic Systems, Weak Signal Detection Based on Chaos, Noise, Bifurcation, Lyapunov Exponents, Signal to Noise Ratio

In this thesis, a new approach to improve novel chaotic systems for weak signal detection applications is presented. The new weak signal detection method based on chaos is different from standart weak signal detection metod in the literature. Two novel chaotic systems, which are suitable for high level weak signal detection applications, are improved by this way.

In the thesis, two novel sinusoidal attractors, which are improved by the new metod, are presented. These new systems have simple stracture, parametric variety and high applicability. Dynamic characteristics of the novel systems are studied detailed. Furthermore, dynamic characteristics of Duffing-Holmes, Van Der Pol and two hyperchaotic Lorenz systems are also studied. Firstly, the relationship between the system state and amplitude of the forcing term is defined by examining the Lyapunov exponents of the systems. Dynamical behaviors of these chaotic systems are observed by this way. Secondly, the critical threshold values of these chaotic systems are determined by the bifurcation analysis. This critical value named as critical bifurcation point is a suitable one to detect weak signal which is submerged in strong noise. Furthermore, electronic circuits of the novel chaotic attractors are designed and simulated.

Finally, weak signal detection applications of the novel systems are studied. Simulation results indicate that these novel systems can detect weak signal with high detection accuracy and low signal to noise ratio (SNR). These systems can also detect weak signal in high frequencies. Weak signal detection applications of Duffing-Holmes, Van Der Pol and two hyperchaotic Lorenz systems are also studied. Matlab-Simulink[®] and OrCAD-PSpice[®] simulation results prove the correctness of the theorycal analysis of studied systems. These improved novel systems are potential sistems to detect weak echo signals, which are non-destructive detection devices of industrial metal materials, metal detectors and electromagnetic acoustic transducers.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kaos, doğrusal olmayan ve rastgele görünen olayların gerçekte düzenli bir birbirine bağlılık içerdiğini ifade eden bir bilim dalıdır. Kaos bilimi bir rastgelelik değildir, aksine karmaşık görünen fakat kendisine has düzeni olan davranışlar içerir. Zaman boyutunda düzensizlik, başlangıç şartlarına olan hassaslık, sınırsız sayıda değişik periyodik olmayan salınım içerme, gürültü benzeri geniş güç spektrumuna sahip olma, arka plan gürültüye karşı duyarsızlık, limit kümesi parçalı (fraktal) boyutlu olma, genliği ve frekansı tespit edilemeyen fakat sınırlı bir alanda değişen işaretler içerme, kaos ve kaotik işaretlerin başlıca önemli özellikleridir. Bu özellikleri ile kaos, dinamik sistemlerde bilinen en karmaşık kararlı hal davranışdır. Daha kısa bir ifade ile kaos, düzensizliğin düzenidir. Sonuç olarak “kaos bilimi” karmaşayı değil düzeni ifade eder.

Uzun yıllar boyunca birçok çalışmada karmaşık ve doğrusal olmayan davranışlar gözlemlenmiş fakat bu davranış şekillerinin bilimsel tanımları yapılamadığından kaosu varlığı gizli kalmıştır. Kaosu elektronik devrelerde ilk olarak gözlemlendiği çalışma Van der Pol ve Van der Mark’ın 1927 yılında yaptığı çalışma olmuştur [1]. Bu iki bilim adamı, harici kaynakla sürülen bir neon tüplü osilatörde periyot çoğullama olayını telefon ahizesindeki kulaklığı dinleyerek gözlemlmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak, kapasite değerindeki değişimler neticesindeki frekans değerleri değişimlerinin belli bir değerden sonra düzensiz bir gürültü halini aldığını tespit etmişlerdir. Fakat periyot çoğullamanın kaosa götürdüğü bilgisi o zamanın şartlarında bilinmediği için kaosu gürültü sanmışlardır.

Kaos bilimi için ikinci dönüm noktası bir meteorolog olan Edward Lorenz’in 1963 yılında yaptığı çalışma olmuştur [2]. Hava olaylarının tahminlerini daha belirgin şekilde yapabilmek amacıyla geliştirdiği atmosferdeki akışkan ısı-yayınımı

benzetimini gözlemlerken, düzensiz salınımlar oluştuğunu fark etmiştir. Bu düzensiz salınımları tanımlamak amacı ile yeni bir model önermiştir. Lorenz kaotik çekicisi adıyla bilinen ve doğrusal olmayan bir diferansiyel eşitlik çiftinden oluşan bu modeli çözdürürken, başlangıç şartlarındaki az bir farklılığın sonuçları oldukça farklı noktalara götürdüğünü keşfetmiştir. Bu durumun, kararlı hal davranışının oldukça farklı düzensiz salınımlarının oluşmasına neden olduğunu görmüştür. Bu çalışmanın önemi o dönemde anlaşılamamıştır fakat sonraki yıllarda Lorenz sistemi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Lorenz sistemi kaotik olayları açıklamak için kullanılan en önemli model sistem olmuştur. Li ve Yorke ise 1975 yılında yaptıkları çalışmada, bu davranış biçimine “kaos” ismini vermişlerdir [3]. Aynı yıl Feigenbaum, yıllık çalışma notlarında, periyot çoğullamanın kaosa götürdüğünü ifade etmiştir [4]. 1976 yılında Rösslerin geliştirdiği sistem ise, Lorenz sistemi gibi yedi terim içeriyordu fakat cebirsel olarak daha basitti [5]. Bu sistem sadece bir adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim içermekteydi. 1979 yılında Rössler, daha önceden keşfettiği kimyasal reaksiyon modelinden daha basit yapıya sahip bir sistem geliştirmiştir [6].

Ueda ve Akamatsu'nun [7] geliştirdiği zorlamalı negatif dirençli osilatör devresi, Linsay'ın [8] harmonik olmayan sürülen osilatör olarak adlandırdığı çalışması, Testa ve arkadaşlarının [9] yarı iletken elemanlar içeren osilatör devresi, Kennedy ve Chua [10] tarafından çalışılan harici bir kaynakla uyarılan neon lamba osilatörü, kaosun elektronik devrelerde deneysel olarak gözlemlendiği ilk çalışmalardır. Bu çalışmalar sinüzoidal kaynakla sürülen ve doğrusal olmayan osilatör devreleri ile yapılmıştır.

Kaos konusunda diğer bir çalışma alanı da hiperkaotik sistemlerdir. 1979 yılında Rössler, hiperkaotik özellik gösteren ilk sistemi tanıtmıştır [11]. Daha sonraki yıllarda ise hiperkaotik osilatörler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. 1986 yılında, Matsumoto ve arkadaşları ilk kez elektronik bir devredeki hiperkaotik davranışı gözlemlemişlerdir [12]. İlerleyen yıllarda hiperkaotik davranışı, yarı-iletken sistemi [13] ve kimyasal reaksiyon sistemi [14] içerisinde gözlemleyen çalışmalar yapılmıştır. 1998 yılında, Reiterer ve arkadaşları dokuz boyutlu bir sistem tanıtmışlardır [15]. Sun ve arkadaşları ise Lorenz sistemini sürülen hiperkaotik bir sisteme dönüştürdükten sonra, geliştirilen bu sistem ile kaos kontrol uygulaması

yapmışlardır [16]. 2008’de Zhao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, geliştirdikleri hiperkaotik Lorenz sisteminin değişen frekans değerlerindeki sistem davranışlarını gözlemlemişlerdir [17].

Kaotik davranış gösteren elektronik devrelerin ve bu tip devrelerdeki kaotik olayları anlamaya yardımcı olan kaotik osilatörlerin sınıflandırılması farklı kriterlere göre yapılmaktadır. Literatürdeki en yaygın şekli ile kaotik işaret üreten doğrusal olmayan osilatör devreleri, otonom ve otonom olmayan kaotik osilatör devreleri olarak iki kısma ayrılmaktadır [18]. Bu tez çalışmasında sinüzoidal kaynak içeren otonom olmayan kaotik sistemlerin frekans dönüşümleri yapılarak boyutları arttırılmış ve otonom hale gelen bu sistemlerin zayıf sinyal tespit çalışmaları yapılmıştır.

Son 30 yılda yapılan çalışmalarda, Duffing-Holmes ve Van Der Pol denklemleri kullanılarak elde edilmiş çeşitli osilatörler literatüre sunulmuştur [19-22]. Bununla beraber araştırmacılar, Duffing-Holmes osilatörünün devre gerçeklemelerini çeşitli elektronik devre benzetim programlarında gerçekleştirmişlerdir. Xuanchao ve Xiaolong yaptıkları çalışmada, Proteus yazılımını kullanarak tasarladıkları Duffing-Holmes sisteminin farklı frekans değerlerinde gösterdiği sistem davranışlarını incelemişlerdir [23]. Lindberg ve arkadaşları ise OrCAD-PSpice® yazılımı ile Duffing-Holmes tipi yeni bir otonom kaotik osilatör tasarlamışlardır [24]. Bu çalışmaların yanısıra araştırmacılar, sayısal ve adaptif filtreler [25-30], anahtarlama kapasitör devreleri [31-32], basit RC ve RLC devreleri [33-38], PLL’li yapılar [39-42], güç devreleri [43-46] gibi kaotik özellik gösterebilen devreler ve sistemler üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, çeşitli boyut ve özellikte olan yeni keşfedilmiş kaotik sistemler literatüre sunulmuştur. Chen ve Ueta’nın Lorenz sistemini referans alarak elde ettikleri Chen sistemi [47], Lü ve Chen’in geliştirdikleri yeni sistem [48], Pehlivan ve Uyaroğlu’nun keşfettiği sistem [49], Sprott’un bulduğu yeni sistemler [50-52] ile Sundarandian-Pehlivan [53], Burke-Shaw [54], Rabinovich [55], Rikitake [56] sistemleri son yıllarda literatüre sunulmuş kaotik sistemlerdendir. 2012 yılında Pehlivan ve Wei, tanıttıkları yeni kaotik osilatörün dinamik analizlerini

yapıp, bu osilatörün devre modellemesini gerçekleştirmişlerdir [57]. Bazı araştırmacılar ise denge noktasız kaotik sistemler üzerine çalışmışlar yapmışlardır [58-61]. Bununla beraber çeşitli alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmış, farklı özelliklere sahip birçok kaotik ve hiperkaotik sistem geliştirilmiştir [62-75].

Kaos kavramı üzerine yapılan çalışmalar sonucunda kaotik davranış gösteren sistemlerin kendine has birçok özelliğinin olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmalar iki kısımda toplanmıştır. Çalışmaların birinci kısmı, bu kadar çok özelliği olan kaotik işaret ve sistemlerin bu özelliklerinden azami şekilde yararlanma düşüncesiyle yapılan çalışmaları içermektedir. İkinci kısım ise; kaotik davranışın istenmeyen bir davranış olarak görüldüğü, dolayısıyla bu tür bir davranışın oluşmasının istenmediği sistemler için kaos kontrolü çalışmalarını içermektedir. Kaos kontrol alanında yapılan çalışmalarda, kaotik davranış bastırılarak sistemin DC bir denge noktasına getirilmesi ya da sistem davranışının periyodik hale getirilmesi amaçlanmıştır [76-83].

Kaotik sistemlerin özelliklerinden olumlu yönde yararlanılması fikri ile oluşan çalışma alanlarından bir tanesi, kaotik sistemlerin senkronizasyonu ve güvenli haberleşmede kullanılmasıdır. Pecora ve Carroll, buldukları yöntemle kaotik senkronizasyonu teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir [84, 85]. Cuomo ve Oppenheim yaptıkları çalışmada, senkronizasyonu bilgi işaretinin maskelenmesinde kullanmış ve kaotik güvenli haberleşme sistemi tasarlamışlardır [86]. Daha sonraki yıllarda ise kaotik senkronizasyon ve kaos tabanlı güvenli haberleşme üzerine birçok çalışma yapılmıştır [87-93].

1992 yılında Donald Birx yaptığı çalışma ile kaotik sistemlerin zayıf bilgi sinyaline oldukça hassas olduğunu, buna karşılık arka plan gürültüye karşı duyarsız olduğunu keşfetmiştir [94]. Kaotik sistemlerin bu özelliğinin filtreleme uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir. Daha sonraki yıllarda yapılan kaos teorisi tabanlı zayıf sinyal tespit çalışmalarının iki ana gruba ayrıldığı görülmüştür [95]. İlk gruptaki araştırmacılar; kaotik davranış içerisindeki zayıf sinyalin tespiti üzerinde durmuşlardır [96, 97]. Bu yöntemde gürültünün deterministik karakteristiğinin

incelenmesi ile kaotik olup olmadığı belirlenmektedir. Gürültünün gerçekte kaos olduğu anlaşıldığında ise gömülü sinyalin tespit edilmesi kolaylaşmaktadır. İkinci gruptaki araştırmacılar ise kaotik sistemlerin zayıf bilgi sinyaline duyarlı ve arka plan gürültüye duyarsız olma özelliğinden yaralanmışlardır [98, 99]. Buna göre kaotik sistem içerisine giren küçük bir sinyal, sistem durumunda ciddi değişiklikler yapabilmektedir. Bununla beraber, kaotik sistemler arka plan gürültüye karşı duyarsız olduğundan, gürültü içindeki zayıf bilgi sinyalinin kaotik sistem üzerinde yaptığı etki gözlemlenerek sinyalin genliği tespit edilebilmektedir.

Günümüze kadar yapılmış zayıf bilgi sinyali tespit çalışmalarında kullanılan kaotik sistemlerin eşik değerlerinin tespiti için iki yöntem üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki Melnikov metodudur [100-104]. Melnikov metodunun karmaşık ve eşik değer tespiti hassasiyetinin az oluşu, bu metodun daha az tercih edilmesine neden olmuştur [105, 106]. Kaotik sistemlerin eşik değerini bulmak için kullanılan ikinci yöntem ise Lyapunov üstelleri metodudur. Son yıllarda yapılan çalışmalarda bu yöntem sıklıkla kullanılmıştır [107-109].

Zayıf bilgi sinyali tespit çalışmaları için bilinmesi gerekli olan diğer bir konu ise çatalaşma (bifurcation) kavramıdır. Çatalaşma kavramı, dinamik bir sistemin kritik parametre değerlerinin değişimleri ile sistem durumunun faz uzayındaki değişiklikleri arasındaki yakın ilişkiyi ifade eder. Araştırmacılar dinamik sistemlerin davranışları hakkında fikir veren çatalaşma kavramı üzerine çalışmalar yapmışlardır [110-112].

Son 20 yılda kaos tabanlı zayıf sinyal tespiti ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. 1995 yılında Haykin ve Li yaptıkları çalışmada gürültünün deterministik durumu üzerinde durmuşlardır [113]. 1999 yılında Wang ve arkadaşları sinyal-gürültü oranı üzerine çalışmalar yapmışlardır [114]. Li ve arkadaşları, Duffing eşitliğini geliştirip, nV seviyesindeki zayıf sinyallerin tespit edilebileceğini göstermişlerdir [115]. Hu ve Liu yaptıkları çalışmada, Duffing-Holmes osilatörünün zaman skalası dönüşümünü yaparak çok yüksek frekans değerlerinde zayıf bilgi sinyali tespiti yapmışlardır [116]. Bununla beraber, yaptıkları benzetim çalışmalarıyla bu yöntemin metal

dedektörlerde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Bazı araştırmacılar ise zayıf bilgi sinyali tespit çalışmalarında Duffing sistemi yerine alternatif sistemleri kullanmışlardır [117, 118].

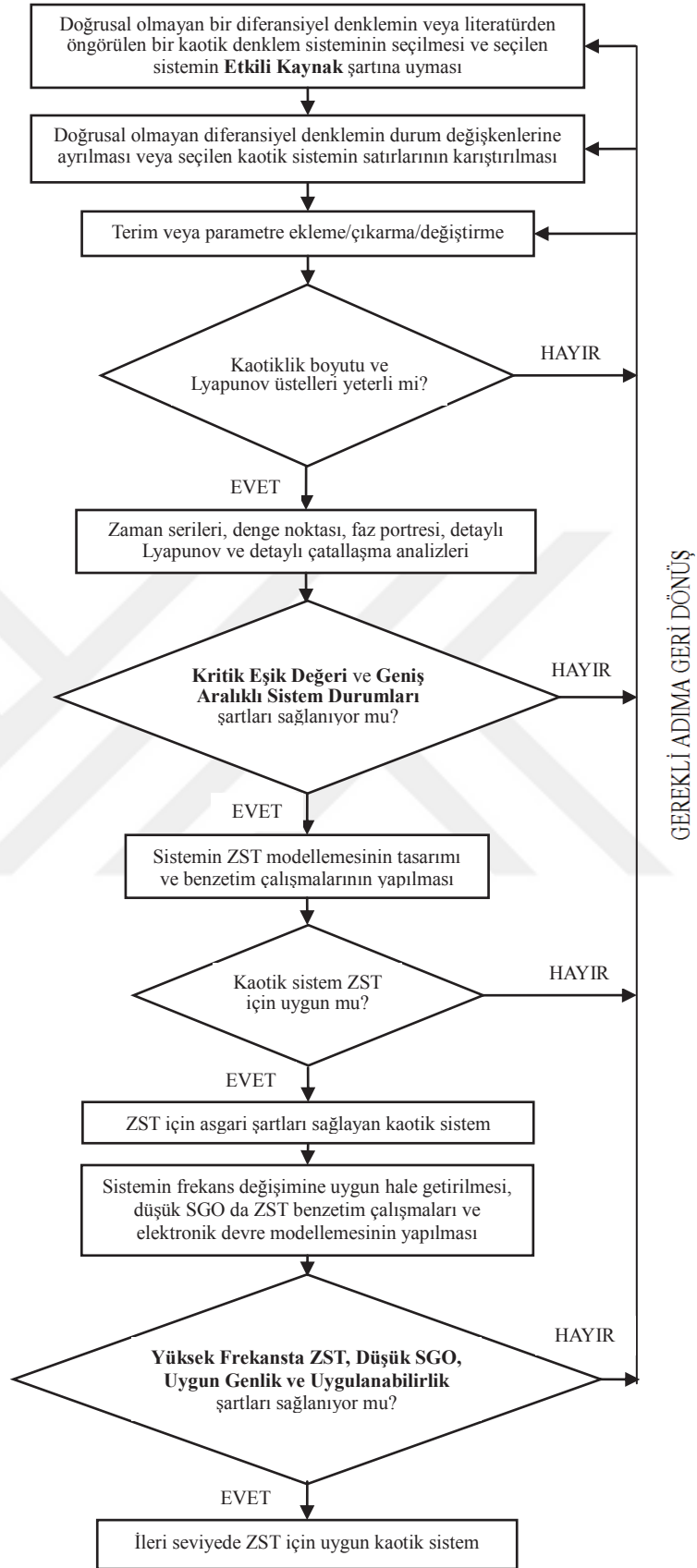
Son yıllarda yapılan bir çok farklı uygulamada kaos tabanlı zayıf sinyal tespit yöntemi kullanılmıştır. Deng ve Zhang, kaotik osilatör metodu ile genetik algoritma metodunu birleştirerek zayıf sinyal tespit çalışması yapmışlardır [119]. Sun ve arkadaşları ise arka plan gürültü ile zayıf bilgi sinyalini dalgacık yöntemi kullanarak birbirinden ayırmışlardır. Daha sonra elde edilen sinyali Duffing osilatörü içeren denetleme sistemi içerisinde geçirip zayıf bilgi sinyalini tespit etmişlerdir [120]. Ye ve Song, yaptıkları çalışmada, ANFIS kullanarak kaotik arka plan tahmin modeli oluşturmuşlardır. Elde ettikleri bu modeli de FFT algoritması ile birleştirerek sinyal-gürültü oranını geliştirmeye çalışmışlardır [121]. Li ve arkadaşları, bir Duffing osilatörü çiftinin senkronizasyonu yoluyla sinyal tespit çalışması yapmışlardır [122]. Wang ve Shi yaptıkları çalışmada, bir sualtı hedefinin ışıyan gürültüsünün çizgisel spektrumunun düşük frekanslı olması dolayısıyla güçlü geniş bant arka plan gürültüde tespit edilmesinin zor olacağını ifade edip, klasik frekans spektrum analizi metodu yerine kaos teorisi metodunu tespit çalışmalarında kullanmışlardır [123]. Jiang ve arkadaşları ise, dijital filtrelerin Balistokardiyografi sistemi sinyallerinin tespitinde yetersiz olduğunu ifade etmişler ve Duffing osilatörünün bu tarz sinyallerin tespitinde kullanılabileceğini göstermişlerdir [124]. Chen ve arkadaşları, insan vücudundaki kanın akış hızının belirlenmesinde kullanılan örnek bir ultrasonik doppler ölçüm cihazının yankı sinyalini kaotik yolla tespiti çalışması yapmışlardır. Sisteme açılmal frekans değerleri farklı sekiz Duffing kaotik osilatörü ekleyerek, arka plan gürültü altındaki yankı sinyalini -26.5dB'lik SGO ile tespit etmeyi başarmışlardır [125].

Son yıllarda, endüstride kullanılan çeşitli metal parçalardaki bozulmaların tespit çalışmaları benzetimlerinde kaotik osilatörler kullanılmaya başlanmıştır. Yang ve arkadaşları, silindirik metal bir boru üzerinde oluşan farklı açı ve konumlardaki bozulmalar üzerine benzetim çalışmaları yapmışlardır [126]. Yapılan benzetimlerde, bozulmaları belirlemede kullanılan ultrasonik güdümlü dalga çeşitlerinin yankı

(echo) sinyallerini Duffing-Holmes kaotik osilatörü ile tespit etmişlerdir. Jidong ve arkadaşları ise kaos tabanlı zayıf sinyal tespit yönteminin, yüksek gerilim hat kablolarında oluşan bozulmaların tespitini yapan elektromanyetik akustik transdüserlere (EMAT) uygulanabileceğini gösteren benzetim çalışmaları yapmıştır [127]. Bu çalışmada, 1nV genliğe ve 100kHz frekansa sahip zayıf yankı sinyallerinin tespitinin filtre ve otokorelasyon algoritması içeren bir benzetim sistemi ile yapılabileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmaların yanında birçok araştırmacı çeşitli alanlara uygulanmak üzere ZST çalışmaları yapmışlardır [128-138].

1.1. Tezin Amacı, Yapılacak İş

Sunulan tezin genel amacı; literatürdeki zayıf sinyal tespit (ZST) sistemlerine göre daha yüksek frekans değerlerinde çalışabilen, yüksek doğrulukla ve düşük SGO ile tespit yapabilen, devre gerçeklemeye uygun, yeni bir kaos tabanlı ZST sistemi tasarımının yapılması ve bu sistem kullanılarak çeşitli frekans değerlerinde ZST çalışmasının yapılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle sürekli zamanlı, 3 boyutlu, sinüzoidal kaynak içeren özgün kaotik sistemler tasarlanması, tasarlanan bu sistemlerin detaylı analizlerinin yapılması ve istenilen şekilde ZST çalışmalarında kullanılıp kullanılamayacağını tespitinin yapılması amaçlanmaktadır. Bununla beraber, bu kaotik sistemler kullanılarak yeni ZST sistemlerinin tasarlanması ve bu ZST sistemleri ile istenilen şartlarda zayıf bilgi sinyali tespit benzetim çalışmalarının yapılması hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, ileri düzeyde ZST uygulamaları yapmak üzere kullanılabilecek potansiyel sistemlerin geliştirilme aşamalarını ifade eden yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemle göre kaotik bir sistem ile ZST çalışması yapabilmek için asgari üç şart bulunmaktadır. Bununla beraber daha ileri düzeyde ZST çalışmaları için ise bu asgari şartlarla beraber üç şart daha bulunmaktadır. Bulunan yeni yöntemle göre kaotik bir sistemin ileri düzeyde ZST yapabilmesi için altı şartı sağlaması gereklidir. Şekil 1.1.'de ileri düzeyde ZST uygulamaları yapmak üzere kullanılabilecek potansiyel sistemlerin geliştirilme aşamalarını ifade eden yeni yöntemin algoritma şeması verilmiştir.



Şekil 1.1. İleri seviye ZST için geliştirilen yeni yöntemin algoritma şeması

Şekil 1.1.'de gösterilen yeni yönteme göre ZST için kullanılacak bir kaotik sistemde olması gereken asgari üç özellik şunlardır:

- a. Etkili Kaynak: Ele alınan lineer olmayan dinamik kaotik sistemin sinüzoidal bir kaynak içermesi ve bu kaynağın sistem durumuna doğrudan etkisinin olması.
- b. Kritik Eşik Değeri: Sinüzoidal kaynak genliğinin $1 \mu V$ civarı bir değişiminde, sistemin kaotik durumdan periyodik duruma geçtiği en az bir değerin (tanjant çatallaşma noktası veya çift-periyot çatallaşma noktası gibi) bulunması. Bu sayede, μV seviyesindeki zayıf bir bilgi sinyalinin kaotik sisteme giriş yapması ile sistem durumu ani ve keskin olarak değiştiğinden, bu özellikten faydalanarak zayıf bilgi sinyali kolaylıkla tespit edilebilmektedir.
- c. Geniş Aralıklı Sistem durumları: Zayıf sinyal tespiti için seçilen sisteme ait eşik değeri civarında (tespit yapmaya yetecek kadar geniş bir değer aralığında) başka çatallaşmaların olmaması. Bu özellik sayesinde sistem durumundaki değişimin, giriş yapan zayıf bilgi sinyalinden kaynaklandığı daha kolay anlaşılmaktadır.

Yeni yönteme göre geliştirilen ve asgari üç şartı sağlayan bir kaotik sistemin ileri seviyede ZST yapabilmesi için gerekli üç özellik ise şunlardır:

- d. Yüksek Frekansta ZST: 10kHz-50kHz arası Yüksek frekans değerlerinde ZST (zayıf sinyal tespiti) yapılabilmesi için kaotik sistemin durum denklemlerinin frekans değişimine uygun hale getirilebilmesi.
- e. Düşük SGO: Sistemin ileri seviye sinyal görüntü oranlarında (-90dB'den daha düşük değerler) ZST yapabilmesi.
- f. Uygun Genlik ve Uygulanabilirlik: Kaotik sistemdeki sinüzoidal kaynak genliğinin, sistemin elektronik devre benzetim programlarında tasarlanabilmesi için uygun olan değerlerde (0.5V-5V arası) olması ve sistemin elektronik devre benzetimlerinin yapılabilmesi.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, yukarıda ifade edilen altı özelliğe sahip olan kaotik sistemlerin yeni geliştirilen bir yöntem kullanarak bulunması ve bulunan bu sistemlerle ileri düzeyde ZST yapılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır.

1.2. Tezde İzlenecek Yol

Bu tez çalışması, sonuç ve öneriler bölümüyle birlikte altı bölüme ayrılmıştır. İkinci bölümde; kaotik sistemler hakkında temel bilgiler verilmiş, ayırık zamanlı ve sürekli zamanlı kaotik sistemler tanıtılmıştır. Daha sonra, kaotik sistemlerin analiz yöntemleri hakkında geniş bilgiler verilmiş ve bu analiz yöntemleri ile örnek olarak verilen kaotik sistemler analiz edilmiştir.

Üçüncü bölümde; yeni geliştirilmiş bir yöntem ile ZST uygulamalarında kullanılmak üzere iki adet yeni, üç boyutlu ve sinüzoidal kaynak içeren kaotik sistem bulunmuştur. Yeni bulunan bu kaotik sistemlerin dinamik davranışlarını belirlemek için sırasıyla, zaman serisi, faz portresi, denge noktası, Lyapunov spektrumu ve çatallaşma diyagramı analizleri Matlab benzetim programı kullanılarak yapılmıştır. Böylece tasarlanan iki yeni sistemin kaotiklik analizleri de yapılmıştır. Bununla beraber bu bölümde; literatürde ZST uygulamaları görülmeyen iki adet hiperkaotik Lorenz sistemi ile daha önce ZST uygulamalarında kullanılmış olan Duffing-Holmes ve Van Der Pol sistemlerinin dinamik analizleri yapılmıştır.

Dördüncü bölümde; yeni geliştirilmiş olan iki kaotik sistem OrCAD-PSpice® elektronik devre benzetim programında elektronik elemanlar ile modellenmiş ve sistemlerin benzetim çalışması yapılmıştır. Elde edilen faz portreleri ile Matlab® benzetim programında nümerik analizler neticesinde elde edilen faz portreleri karşılaştırılmış ve sonuçların paralellik arz ettiği görülmüştür.

Beşinci bölümde; iki yeni kaotik sistem ile detaylı analizleri yapılan diğer dört kaotik sistemin ZST sistemleri Matlab-Simulink® ortamında tasarlanmış ve bu altı sistemin ZST benzetim çalışmaları yapılmıştır. Son olarak, benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise; tez çalışmasında gerçekleştirilen kaos tabanlı ZST çalışmalarının sonuçlarından bahsedilerek, ileride yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulup, değerlendirmeler yapılmıştır.



BÖLÜM 2. KAOS VE TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Kaotik Sistemler

Kaotik sistemler doğrusal olmayan bir davranış türü sergileyen sistemlerdir. Bunun yanı sıra, sınırsız sayıda değişik periyodik salınımlar içerebilirler ve genlikleri ile frekansları tespit edilemez. Fakat sınırlı bir alanda kaotik işaretler içeren dinamiklere sahiptirler.

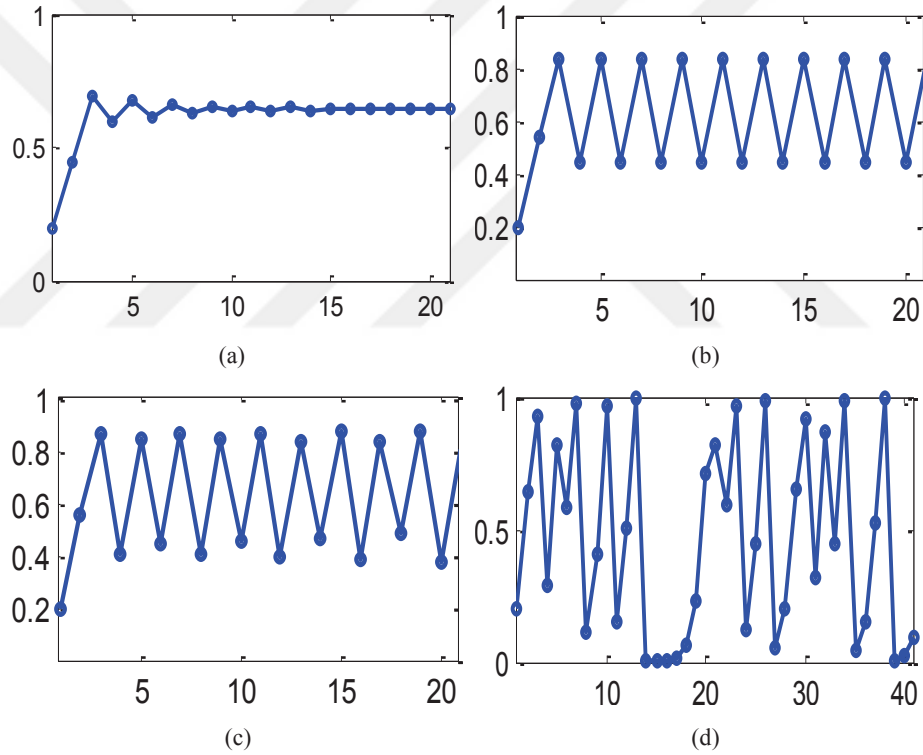
Bir dinamik sistem, o an bulunduğu durumu geçmiş durumlar cinsinden belirten bir kuralla birlikte içerdiği gibi, aynı kuralla olası durumların kümesini de içerir. Bu kural, ayrık zamanlı olarak uygulanırsa, bu ayrık-zamanlı dinamik sistem olarak adlandırılır. Şayet bu kural sürekli işaretler olarak uygulanırsa, bu sürekli-zaman dinamik sistem olarak adlandırılır. Böyle bir sistem ise diferansiyel denklemler kümesinden oluşmaktadır [18].

2.1.1. Ayrık zamanlı kaotik sistemler

$\vec{\varphi}: \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K}^m$ bir haritayı ifade eder. $\vec{x}_n$ sistemin n . iterasyonu ve $\vec{x}_{n+1}$ bir sonraki durumu ifade edecek şekilde, $\vec{x}_{n+1} = \varphi(\vec{x}_n)$ iterasyon ifadesi ayrık zamanlı bir dinamik sistemi tanımlar. Sonuçta, oluşan $(\vec{x}_n)$ vektörler dizisi bir yörüngeyi ifade eder. Ayrık zamanlı sistemler tek boyutlu olabildikleri gibi birden fazla boyuta da sahip olabilirler. Bu sistemler içinde tek boyutlu haritaların yapısı oldukça basittir. Bununla beraber, ayrık zamanlı haritaların doğrusal olanları kaotik davranış göstermezler. Doğrusal olmayan haritaların ise kaotik olduğu durumlar vardır.

Tek boyutlu ve doğrusal olmayan haritaya bir örnek Lojistik haritadır. Bu tek boyutlu harita, biyolojik populasyon dinamiğinin basit bir modeli olan lojistik denklemin ayrıklaştırılmış halidir. Lojistik harita, $0 \leq x \leq 1$ olmak üzere, $f(x) = r_l \cdot x \cdot (1 - x)$ şeklinde tanımlanır. Burada r_l parametresinin sistem davranışı üzerinde büyük etkisi vardır. Şekil 2.1.'de, r_l parametresindeki değişimlere göre lojistik haritanın sistem durumları gösterilmiştir.

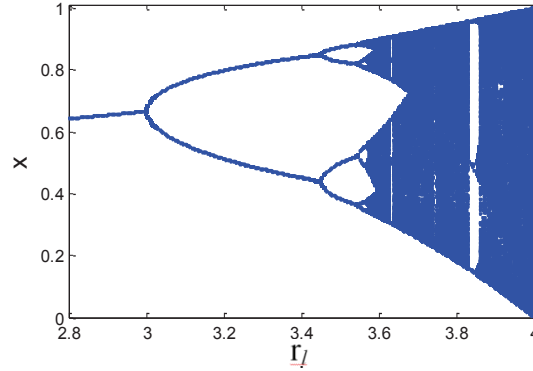
Lojistik harita literatürde sıklıkla kullanılan tek boyutlu kaos üreteçlerindendir. Bu harita; kuşlar, memeliler gibi biyolojik nüfus modelinin en basit modeli olan denklemin ayrık halidir [18].



Şekil 2.1. Lojistik haritanın $x_0=0.2$ için, r_l parametresinin belirli değerlerine göre değişimi: a) $r_l = 2.8$, b) $r_l = 3.4$, c) $r_l = 3.5$ ve d) $r_l = 4$

Şekil 2.1.'de görüleceği üzere lojistik harita, r_l parametresinin değeri 2.8 olduğunda sabit nokta, 3.4 olduğunda çift periyot, 3.5 olduğunda dörtlü periyot ve son olarak 4 olduğunda kaotik durum davranışı göstermektedir. Sonuçta, r_l parametresinin değişimlerine bağlı olarak, lojistik haritada periyot çoğullanması durumu ortaya çıkmaktadır. Feigenbaum yıllık araştırma notlarında bu olayı, periyot çoğullamanın

kaosa götüreceği şeklinde ifade etmiştir [4]. Bu ifadeye göre, dinamik bir sistemin herhangi bir parametresinin değişimleri esnasında osilasyonların periyodu $2T$, $4T$, $8T$, ... şeklinde çiftlendiğinde kaotik durum ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.2. Lojistik haritanın çatallaşma diyagramı ($r_l = 0-4$)

Şekil 2.2.'de. Lojistik Haritanın çatallaşma diyagramı gösterilmiştir. Lojistik harita dışında literatürde kullanılan tek boyutlu ayrık zamanlı kaotik haritalara; Kübik, Sine, Tent, Gauss, Pinchers ve Spence gibi haritalar örnek gösterilebilir. İki boyutlu ayrık zamanlı kaotik haritalara ise; Henon, Tinkerball, Kaplan-Yorke, Ikeda, Geciktirmeli Lojistik, Lozi, Holmes kübik, Dissipative Standart, Ayrık Avcı-Av ve Chirikov gibi haritalar örnek olarak verilebilir. Üç boyutlu ayrık zamanlı kaotik haritalara ise Lorenz kaotik haritası örnek gösterilebilir [139].

2.1.2. Sürekli zamanlı kaotik sistemler

Sürekli zamanlı bir sistem, $\vec{x}(t_0) = \vec{x}_0$ olmak üzere, Denklem (2.1)'de gösterildiği şekilde tanımlanabilir.

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \vec{F}[\vec{x}(t), t] \quad (2.1)$$

Burada $\vec{F}: R^m \rightarrow R^m$ vektör alanını, $\vec{x} \in R^m$ durum vektörünü, $\vec{x}_0$ başlangıç durum vektörünü, t zamanı ve t_0 başlangıç zamanını göstermektedir. Denklem (2.1)'de gösterilen vektör alanı zamana bağlı olduğundan otonom olmayan bir sistemdir.

Diğer taraftan, zamana bağlı olmayan yani otonom olan bir sistemin dinamik davranışları, $\vec{x}(t_0) = \vec{x}_0$ olmak üzere, Denklem (2.2.)’de gösterildiği gibi olur.

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \vec{F}[\vec{x}(t)] \quad (2.2)$$

Genellikle bir otonom sistemin değişimi, sistemin durumunu tanımlamak için gerekli bütün değişkenlerin kümesi ile oluşan kendi faz uzayında temsil edilir. Diğer bir ifade ile dinamik bir sistemin durumu, belirli bir zamanda, bu sistemin geçmişini veya değişimini tanımlamak için bilinmesi gereken değişkenlerin kümesidir [18].

Literatürde sıklıkla kullanılmış olan sürekli zamanlı kaotik sistemlere; Lorenz, Rössler, Chua, Duffing-Holmes, Van Der Pol, Chen, Rikikate, Rucklidge, Lotka-Volterra, Sprott94, Moore-Spiegel gibi sistemler örnek olarak verilebilir [139].

2.2. Kaotik Sistemlerin Analiz Yöntemleri

Kaotik sistemlerle çalışılabilmesi için öncelikle bu tarz sistemlerin dinamik analizlerinin yapılması ve kaotik olup olmadıklarının anlaşılması gerekmektedir. Bir dinamik sistemin kaotik olup olmadığının anlaşılması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu bölümde örnek bir sistem ele alınmış ve bu sistemin kaotik olup olmadığı hakkında karar verilebilmesi için sırasıyla, denge noktaları, zaman serileri, faz portreleri, Lyapunov üstelleri ve çatallaşma diyagramı analizleri yapılmıştır.

2.2.1. Denge nokta analizi

Kaotik sistemler karmaşık yapıda oldukları için, bu sistemler hakkında doğrudan çıkarım yapmak mümkün olamamaktadır. Bu tarz doğrusal olmayan dinamik sistemlerin detaylı analizlerini yapabilmek için öncelikli olarak denge noktalarının bulunması gerekmektedir.

Bir sistemin denge noktalarını bulmak için $F[x(t)]=0$ şeklinde sistem denklemlerinin her biri sıfıra eşitlenir. Sistemin denklemlerinin çözümü sonucunda elde edilen ifadeler reel sayılar ise sistemin denge noktalarının olduğu söylenebilir [18]. Bununla beraber bazı kaotik sistemlerin reel denge noktaları olmayıp sadece sanal denge noktaları vardır. Bu gibi sistemlere denge noktasız kaotik sistemler denilmektedir.

Kaotik sistemin denge noktaları bulunduktan sonra sistemin Jacobian matrisine denge noktalarında bulunan ifadeler yazılır. Daha sonra ise $|J - \lambda I| = 0$ karakteristik denge çözümünden özdeğerler bulunur. Bulunan bu özdeğerlerden sistemin kararsızlık durumu incenebilmektedir. Elde edilen özdeğerlerden en az bir tanesinin reel kısmı pozitif ise denge noktası kararsızdır denilebilir.

Denklem (2.3)'te üç boyutlu ve yeni bir denklem sistemi örnek olarak verilmiştir.

$$\begin{cases} \dot{x} = y^* - x + a \\ \dot{y} = b y^* - x^* x^* z^* \\ \dot{z} = y^* - c z^* \end{cases} \quad (2.3)$$

Sistemin kaotik olup olmadığını anlamak için $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ şeklinde türevler sıfıra eşitlenirse,

$$\begin{aligned} 0 &= y^* (1 + z^*) - x^* + a \\ 0 &= b y^* - x^* x^* z^* \\ 0 &= y^* - c z^* \end{aligned} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'teki ifadeler elde edilir. Burada $a=1.8$, $b=2.5$ ve $c=4$ 'dir. x^*, y^*, z^* için denklem kümesi çözümlerse, denge noktaları Denklem (2.5)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
E_1(1.8, 0, 0) \\
E_2(3.162, 1.074, 0.268) \\
E_3(3.162, -5.074, -1.268) \\
E_4(-3.162, -2 + 3.98i, -0.5 + 0.995i) \\
E_5(-3.162, -2 - 3.98i, -0.5 - 0.995i)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Denge noktaları analizi sonucunda; E_1 , E_2 , E_3 , E_4 ve E_5 denge noktaları elde edilmiştir. Denge noktalarının kararsız olup olmadığını anlamak için sistemin özdeğerlerinin bulunması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda sistemin Jacobian matrisinin alınması gerekmektedir. Denklem (2.6)'da sistemin Jacobian matrisi verilmiştir.

$$J(x, y, z) = \begin{bmatrix} -1 & 1+z & y \\ -2xz & 2.5 & -x^2 \\ 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

E_1 denge noktaları sistemin Jacobian matrisinde yerlerine yazılırsa, Denklem (2.7) elde edilir.

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 2.5 & -3.24 \\ 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Daha sonra ise, $|\lambda I - J(E_1)| = 0$ çözümünden Denklem (2.8)'de gösterilen E_1 için karakteristik denklem bulunur.

$$\lambda^3 + (2.5)\lambda^2 - (5.26)\lambda - (6.76) = 0 \tag{2.8}$$

E_1 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (2.9)'da gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= -1 \\
\lambda_2 &= 1.956 \\
\lambda_3 &= -3.456
\end{aligned} \tag{2.9}$$

E_2 denge noktalarına göre sistemin Jacobian matrisi Denklem (2.10)'da gösterildiği gibi olur.

$$J(E_2) \begin{bmatrix} -1 & 1.268 & 1.074 \\ -1.6948 & 2.5 & -9.9982 \\ 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

E_2 için karakteristik denklem ise;

$$\lambda^3 + (2.5)\lambda^2 + (3.6473)\lambda + (10.4147) = 0 \tag{2.11}$$

olarak bulunur. E_2 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (2.12)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= 0.0616 + 1.9916i \\
\lambda_2 &= 0.0616 - 1.9916i \\
\lambda_3 &= -2.6231
\end{aligned} \tag{2.12}$$

E_3 denge noktaları için Jacobian matrisi Denklem (2.13)'te gösterilmiştir.

$$J(E_3) \begin{bmatrix} -1 & -0.268 & -5.074 \\ 8.0188 & 2.5 & -9.9982 \\ 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

E_3 için karakteristik denklem ise;

$$\lambda^3 + (2.5)\lambda^2 + (3.6473)\lambda + (49.282) = 0 \quad (2.14)$$

olarak bulunur. E_3 denge noktaları için özdeğerler Denklem (2.15)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.9042 + 3.259i \\ \lambda_2 &= 0.9042 - 3.259i \\ \lambda_3 &= -4.3084 \end{aligned} \quad (2.15)$$

E_4 denge noktaları sistemin Jacobian matrisinde yerlerine yazılırsa, Denklem (2.16) elde edilir.

$$J(E_4) \begin{bmatrix} -1 & 0.5 + 0.995i & -2 + 3.98i \\ -3.162 + 6.2924i & 2.5 & -9.9982 \\ 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

E_4 için karakteristik denklem;

$$\lambda^3 + (2.5)\lambda^2 + (9.3402)\lambda + (50.0856 + 25.1695i) = 0 \quad (2.17)$$

olarak bulunur. E_4 denge noktaları için özdeğerler ise;

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.209 + 4.084i \\ \lambda_2 &= 1.1167 - 3.334i \\ \lambda_3 &= -3.8257 - 0.75i \end{aligned} \quad (2.18)$$

olarak bulunur. Son olarak E_5 denge noktaları sistemin Jacobian matrisinde yerlerine yazılırsa, Denklem (2.19) elde edilir.

$$J(E_4) \begin{bmatrix} -1 & 0.5 - 0.995i & -2 - 3.98i \\ -3.162 - 6.2924i & 2.5 & -9.9982 \\ 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

E_5 için karakteristik denklem;

$$\lambda^3 + (2.5)\lambda^2 + (9.3402)\lambda + (50.0856 - 25.1695i) = 0 \quad (2.20)$$

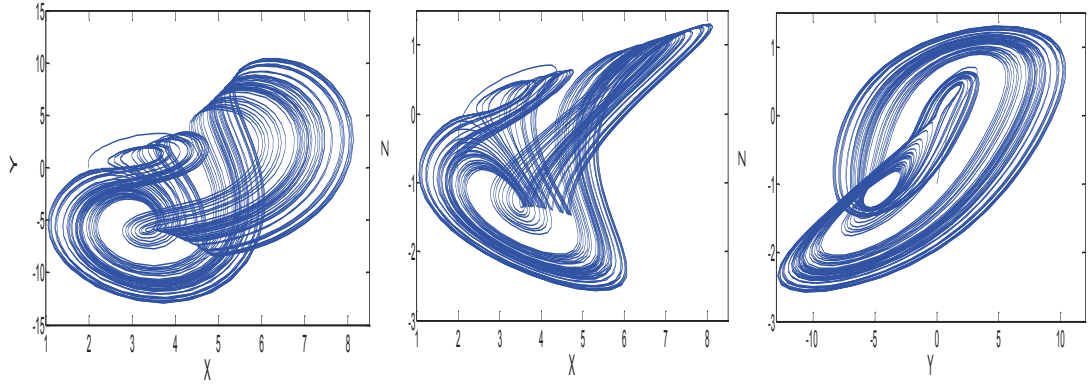
olarak bulunur. E_5 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (2.21)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.209 - 4.084i \\ \lambda_2 &= 1.1167 + 3.334i \\ \lambda_3 &= -3.8257 + 0.75i \end{aligned} \quad (2.21)$$

Denge noktalarından elde edilen özdeğerlerin her biri kendi içerisinde incelendiğinde reel kısımlarından en az birisinin pozitif olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre, verilen sistemin kararsız olduğu söylenebilir. Fakat bulunan bu sonuçlar tek başına ele alındığında sistemin kaotik olup olmadığı konusunda kesin bir kanıya varılamamaktadır. Sistemin kaotikliği konusunda net bir fikir elde edilebilmesi için, daha sonraki kısımlarda anlatılan diğer analizlerin de yapılması gerekmektedir.

2.2.2. Faz portreleri

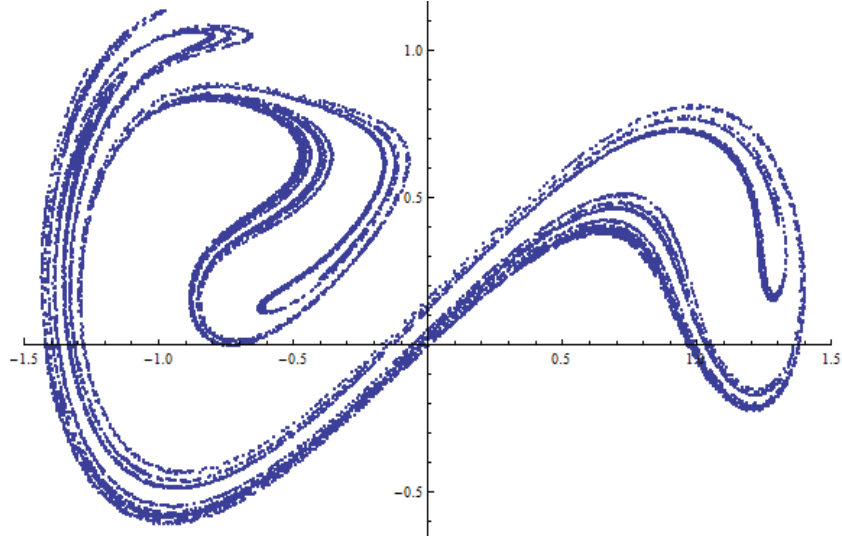
Üç boyutlu bir sistem için x-y, x-z, y-z şeklinde sistemin kaotik faz portrelerine bakılabilir. Matlab[®] programı ile kaotik sistem verileri girilerek program çıktısında istenen faz portreleri elde edilebilmektedir. Aynı işlemler Matlab-Simulink[®] ve elektronik devre gerçekleştirme benzetim programlarından osilaskop çıktıları olarak da elde edilebilmektedir. Şekil 2.3.'te örnek sistemin faz portre çıktıları görülmektedir.



Şekil 2.3. Örnek sistemin faz portreleri

Kaotik sistemlerden bazılarının faz portresi çıktıları oldukça karmaşık olabilmektedir. Böyle durumlarda gözlem yapabilmek oldukça zor olabilmektedir. Bu tarz oldukça karmaşık bir sistem için Poincaré kesiti yöntemi uygulandığında, sistemin kaotikliği hakkında karar verilebilmesi kolaylaşmaktadır. Bu yöntem ile kaotik bir sistemin faz portresinin herhangi bir bölümünden kesitler alınır. Daha sonra bu kesitler yorumlanıp sistemin kaotik olup olmadığı hakkında karar verilebilir.

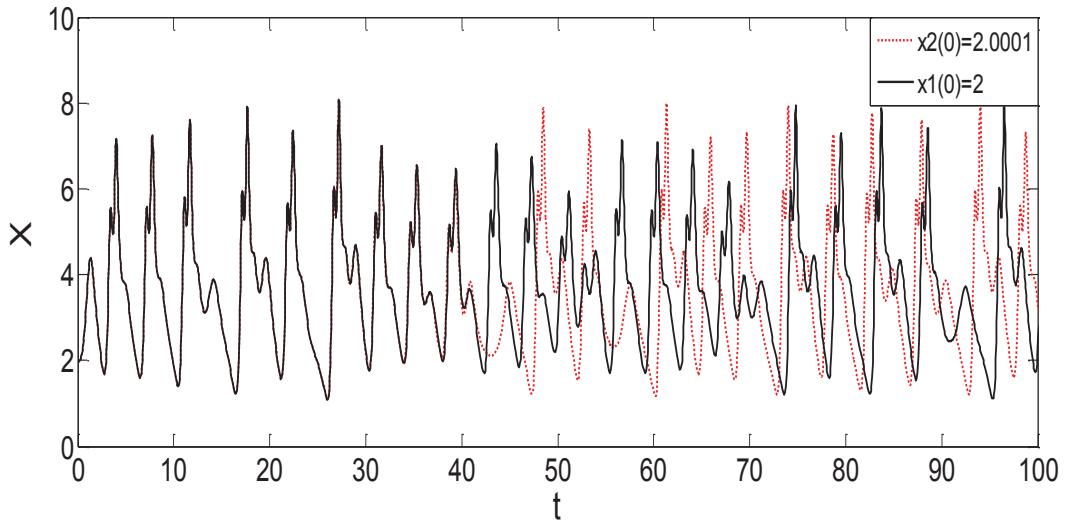
Poincaré kesitindeki noktaların belirli alanlarda yoğunlaşmış kümeler şeklinde olması durumunda, incelenen sistemin kaotik olduğu söylenebilir. Aksi durumda sistem periyodik ya da yarı periyodiktir denilebilir [140]. Örnek olarak bir bardağın herhangi bir kısmından alınan Poincore kesiti daire veya elips şeklinde olduğundan, bu cismin yapısının kaotik özellik göstermediği söylenebilir. Şekil 2.4.'te Duffing osilatörünün örnek bir Poincore kesiti görülmektedir.



Şekil 2.4. Duffing osilatörünün Poincore kesiti örneği [141]

2.2.3. Zaman serisinde başlangıç değerlerine hassas bağımlılık analizi

Bir sistemin kaotik olma şartlarından bir tanesi de başlangıç şartlarına olan hassas bağımlılıktır. Kaotik bir sistemin başlangıç şartlarından herhangi biri kontrollü olarak değiştirildiğinde, sistemin aynı zaman zarfında farklı kaotik işaretler üretmesi gerekmektedir. Böyle bir sistemin değişkenlerinden bir tanesinin iki farklı başlangıç değerinin aynı ekranda incelenmesi yoluyla sistemin başlangıç şartlarına olan hassas bağımlılığı gözlemlenebilir. Denklem (2.3)'te verilen örnek sistemin başlangıç şartlarına olan hassas bağımlılığı Şekil 2.5.'te gösterildiği gibi olur.



Şekil 2.5. Örnek sistemin başlangıç şartlarına olan hassas bağımlılığını gösteren zaman serileri

2.2.4. Lyapunov üstelleri

Lyapunov üstelleri, dinamik sistemlerin başlangıç şartlarına olan hassasiyetinin bir ölçüsü olan ve bu sistemlerin karakteristik özellikleri hakkında bilgiler veren değerlerdir. Bu üsteller kaotik bir sistemin davranışlarının anlaşılmasında oldukça önemli bir ölçüttür. Şayet dinamik bir sistem başlangıç şartlarına karşı oldukça hassas ise, faz uzayındaki birbirine yakın olan yörüngeler zamanla birbirinden hızlıca uzaklaşır ve sistem kararsızlığa gider. Faz uzayında oluşan bu komşu eğrilerin yerel ayrılma derecelerinin ortalaması Lyapunov üsteli olarak tanımlanır. Bu üstel negatif değerli ise değişen başlangıç şartlarında aynı çıkış değerleri görülmekte, bu üstel pozitif değerli ise değişen başlangıç şartlarında farklı çıkış değerleri görülmektedir.

Bir dinamik sisteme ait Lyapunov üstellerini bulmak için, Denklem (2.22)'de gösterilen tek boyutlu ayrık zamanlı sistem örnek olarak alınsın.

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (2.22)$$

Burada, n tekrarlama sayısını göstermektedir. Buna göre, (x_0, y_0) R faz uzayında birbirine yakın iki başlangıç noktasını ifade etmek üzere, f fonksiyonunun n . tekrarları x_n ve y_n Denklem (2.23)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} x_n &= f^n(x_0) \\ y_n &= f^n(y_0) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Bu iki nokta n ile üstel olarak birbirinden ayrılırsa;

$$|y_n - x_n| = A \cdot e^{\lambda n} \quad (\lambda > 0)$$

$$A = |y_0 - x_0|, \text{ büyük } n \text{ için}$$

$$\frac{1}{n} \ln |y_n - x_n| \rightarrow \lambda, \text{ büyük } n \text{ için}$$

olur. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, sınırlı bölgede hareket esnasında, çok büyük n değerlerinde üstel ayrılma oluşması için başlangıç noktaları x_0 ve y_0 'ın birbirine çok yakın olması gerekliliğidir. Aksi durumda üstel ayrılma oluşmaz. Denklem (2.25), $\gamma = \{x_n = f^n(x_0); n = 0, 1, 2, \dots\}$ yörüngesi için Lyapunov üstelini tanımlar.

$$\lambda_\gamma = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ln \left| \frac{x_n - y_n}{x_0 - y_0} \right| \quad (2.25)$$

Burada, tek boyutlu ve ayrık zamanlı bir sistem için elde edilen Lyapunov üstelini diğer diferansiyel denklem sistemlerine uygulamak için, diferansiyel denklemler ayrık zamanlı sistemlere dönüştürülmelidir [18].

Bir sistem, faz uzayında zamanla hacimce büzülme gösteriyorsa, böyle bir sisteme dissipative (dağıtık) sistem denir. Bir yörünge, zaman geçtikçe faz uzayının asimtotik olarak bir alt kümesine yöneliyorsa, bu altküme çekici (attractor) denir. Başlangıç şartları kümesi böyle bir yapıya doğru yakınsayan yörüngelere yol açıyorsa, buna çekicinin “çekim havuzu” denir. Bu tezde ele alınan sistemler sürekli zamanlı ve dissipative sistemlerdir.

Dinamik bir sistem için, Lyapunov üstellerinin toplamı sıfırdan küçük ise sistem kayıplı, sıfır ise kayıpsız, sıfırdan büyük ise genişleyen bir sistemdir denilebilir. Bununla beraber, bir dinamik sistemin kaotik özellik gösterebilmesi için sistemin Lyapunov üstelleri toplamının sıfırdan küçük olması ve en az bir üstelinin pozitif değerli olması gereklidir.

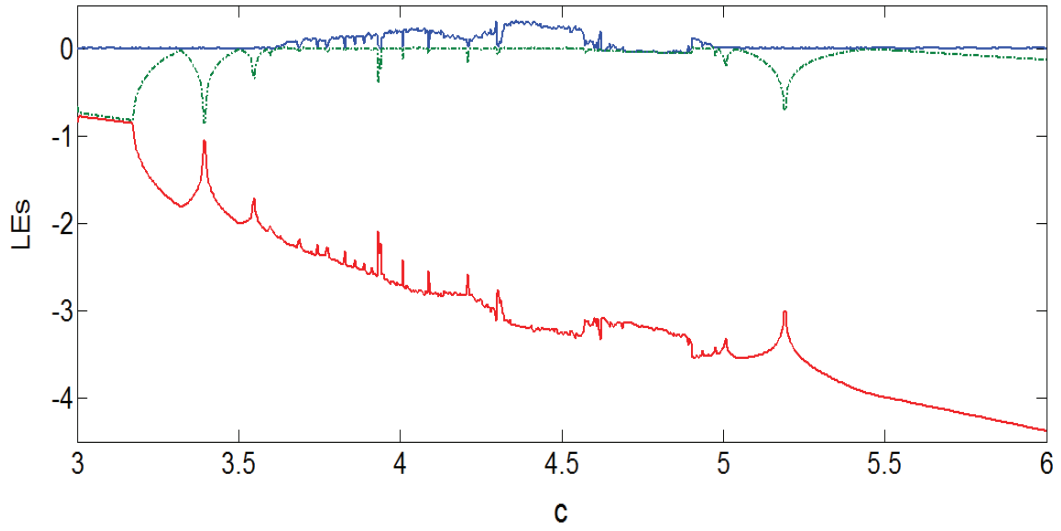
Dinamik bir sistemin boyut sayısı ile Lyapunov üstelleri sayısı eşittir. Üç boyutlu bir sistemin kaotik olabilmesi için, Lyapunov üstellerinin işaretleri sırasıyla (+,0,-) olmalıdır. Dört boyutlu sistemlerde ise kaotiklik için iki durum söz konusudur.

Üstellerin işaretleri sırasıyla $(+,0,-,-)$ olduğunda, sistem kaotik durumdadır. Üstellerinin işaretleri sırasıyla $(+,+,0,-)$ olduğu bir sistem ise, hiperkaotik özellik gösterir. 3 ve 4 boyutlu sistemlerde sistem durumlarının Lyapunov üstellerinin işaretlerine göre değişimi Tablo 2.1.'de gösterildiği gibi olur.

Tablo 2.1. 3 ve 4 Boyutlu Sistemlerde Sistem Durumlarının Lyapunov Üstellerinin İşaretlerine Göre Değişimi

Sistem Türü	Sistem Durumları	Lyapunov Üstellerinin İşaretleri
3 Boyutlu Sistemler	Sabit Nokta	$(-, -, -)$
	Limit Döngü	$(0, -, -)$
	Torus	$(0, 0, -)$
	Tuhaf Çekici	$(+, 0, -)$
4 Boyutlu Sistemler	Sabit Nokta	$(-, -, -, -)$
	Limit Döngü	$(0, -, -, -)$
	Tuhaf Çekici	$(+, 0, -, -)$
	Hiperkaos	$(+, +, 0, -)$

Denklem (2.3)'te verilen örnek sisteme ait Lyapunov üstelleri spektrumu Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi olur. Sistemin kaotik olabilmesi için Lyapunov üstellerinin $(+,0,-)$ olması gerekmektedir. Şekilde belli aralıklarla sistemin kaosa girip çıktığı görülmektedir.

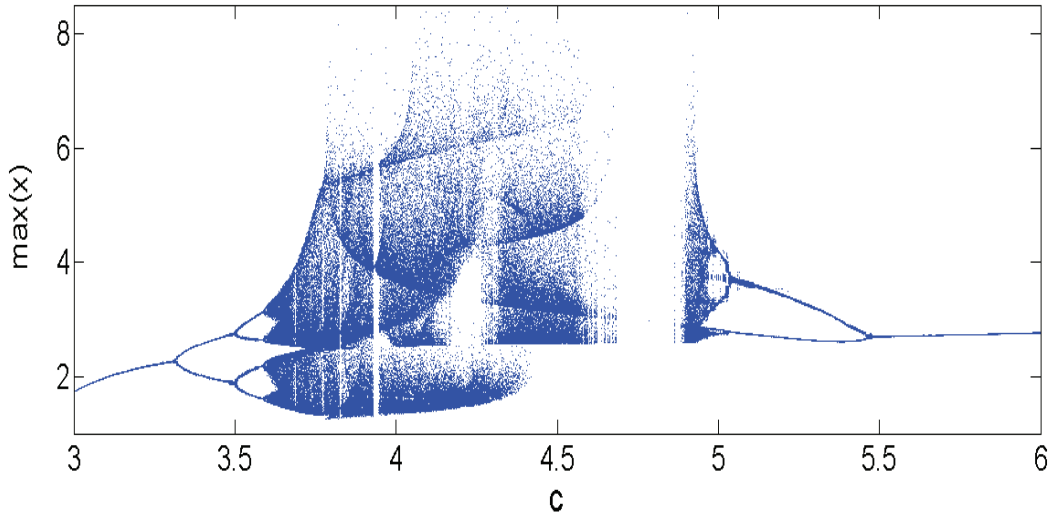


Şekil 2.6. Örnek sistemin Lyapunov üstelleri spektrumu

2.2.5. Çatallaşma diyagramı

Dinamik bir sistemin faz uzayında elde edilen çözümleri ya bir denge noktasına yada $\mp$ 'a gitmektedir. Böyle bir sistem için elde edilen vektör alanları, sistemi tanımlayan parametrelerin değerlerine göre değişiklikler göstermektedir. Parametre değerlerindeki bu değişiklikler ile bir denge noktası oluşabilmekte veya yok olabilmektedir. Bu tarz değişiklikler sistem kararlılığına etki etmektedir. Dinamik bir sistemin kritik parametre değerlerinin küçük değişimler gösterdiği bu gibi durumlarda, sistemin faz uzayında meydana gelen yapısal değişikliklere çatallaşma denir.

Bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik özellik göstermelidir. Denklem (2.3)'te verilen örnek sisteme ait yerel maksimum x 'in c 'ye göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi olur. Şekil 2.6. ile Şekil 2.7. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiği görülmektedir.



Şekil 2.7. Örnek sistemin çatallaşma diyagramı

Çatallaşma diyagramında görüleceği üzere örnek sistem; değişken parametrenin farklı değerleri için farklı sistem durumları göstermektedir. Sistemin belli değer aralıklarında kaotik özellik gösterdiği söylenebilir. İlk olarak c parametresi 3-3.5 arasında periyodik davranış göstermektedir. 3.3-3.5 arası çift periyot, 3.5-3.58 arası dördü periyot ve 3.58'den sonra kaotik davranış göstermektedir. Diyagramdan görüldüğü üzere sistem belli aralıklarla kaosa girip çıkmaktadır.

2.3. Kaotik Sistemlerin Modellenmesi ve Elektronik Devre Benzetimleri

Sürekli zamanlı kaotik bir sistemin sayısal ve gerçek ortam uygulamalarının yapılabilmesi için sistemin modellenmesinin yapılması gerekmektedir. Böyle bir sistemin sadece denklemleri tek başına uygulama ve benzetim çalışmaları için yeterli olmayabilir. Buna karşılık verilen denklem sistemi matematiksel olarak modellenir ve bu şekilde uygulaması yapılırsa, böyle bir sistem için gözlemler ve analizler kolaylıkla yapılabilir. Sürekli zamanlı kaotik bir sistemin denklemlerinin modellenmesi için; toplama, çarpma, tersleme, integral alma gibi işlemler kullanılır. Bu ve benzeri işlemleri, blok diyagram ve elektronik devre olarak sayısal ortamlardaki uygulamalar için kullanmak mümkündür. Bir denklem sisteminin elektronik devre benzetimini yapmak için analog toplama devresi, çarpma entegresi, integral alma devresi, opamp, eviren ve evirmeyen yükselteç devreleri gibi temel

işlemler kullanılmaktadır. Bununla beraber, blok diyagramların ve elektronik devre benzetimlerinin çıktıları birbirine oldukça yakın sonuçlar verebilmektedir.

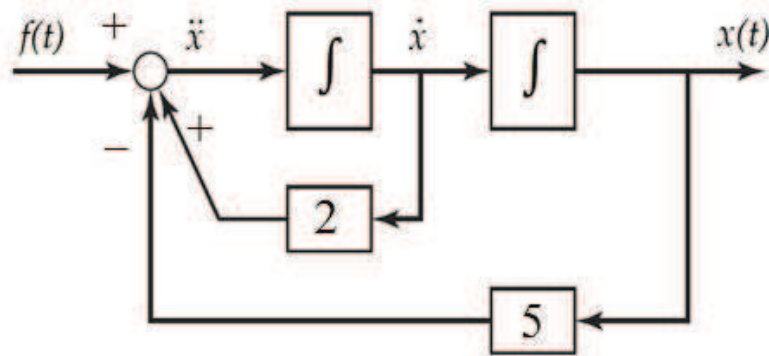
Denklem (2.26)'da verilen denklem, blok diyagramı gerçekleştirilecek örnek bir sistem olsun.

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} + \beta x = f(t) \quad (2.26)$$

Burada α ve β parametreleri sırasıyla 2 ve 5 olsun. En yüksek mertebeli x terimi yalnız bırakılırsa Denklem (2.27) elde edilir.

$$\ddot{x} = -\alpha \dot{x} - \beta x + f(t) \quad (2.27)$$

Bir diferansiyel denklem sisteminden blok diyagramı elde edilmesi yoluyla, denklemin çeşitli alanlarda uygulamalarının yapılması kolaylaştırılmaktadır. Elde edilen blok diyagramları çeşitli benzetim programlarına uygulanarak çıkışlar ve grafikler alınır. Böylece istenilen analiz ve gözlemler kolayca yapılabilir. Denklem (2.27)'deki ifadeyi gösteren blok diyagram Şekil 2.8.'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Denklem (2.27)'yi modelleyen blok diyagramı

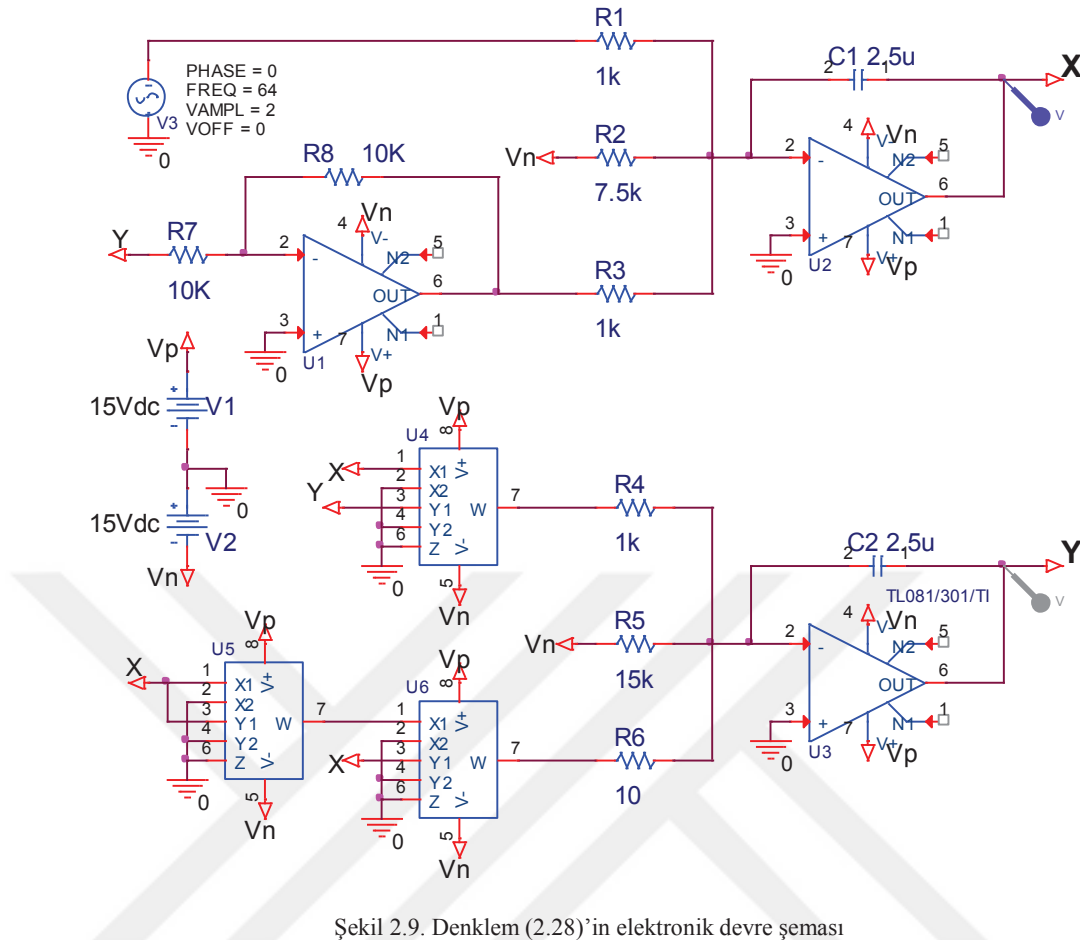
Bununla beraber kaotik sistemlerin denklemleri de benzer şekilde modellenerek blok diyagramları çıkarılabilir. Elde edilen blok diyagramları referans alınarak temel işlemsel elektronik elemanlar ile devreler tasarlanabilir. Tasarlanan devrelerin

benzetim çalışmaları yapılabilir. Bu amaç doğrultusunda, örnek bir elektronik devre analizi çalışması için Denklem (2.28)'de gösterilen denklem sistemi verilsin.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha \sin(\omega t) + 2) \\ \dot{y} &= (\nu/10) - x^3 + 1) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Burada başlangıç şartları $x(0)=0$ ve $y(0)=0$ olarak alınmıştır. Tüm başlangıç şartlarının 0 olması gerçek ortam uygulamaları için kolaylık sağlamaktadır. Denklemde “ f ” frekans değeri 64Hz olduğundan, açısal frekans değeri yaklaşık olarak $\omega=2\pi f=402\text{rad/sn}$ olur. Verilen denklemin $\alpha=2$ için elektronik devre gerçekleştirilmesi Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi olur.

Devre şeması tasarlanırken 3 adet TL081 opamp, 3 adet AD633 (Analog Devices) çarpma entegresi, 8 adet direnç, 2 adet kondansatör ve bir adet sinüzoidal gerilim kaynağı kullanılmıştır. Devrenin direnç değerleri $R_1=1K$, $R_2=7.5K$, $R_3=R_4=1K$, $R_5=15K$, $R_6=10$, $R_7=R_8=10K$ ve kondansatör değerleri $C_1=C_2=2.5\mu F$ olarak alınmıştır. Besleme gerilim değerleri $V_N=-15V$, $V_P=15V$ 'dur.



Şekil 2.9.'da gösterilen elektronik devreyi X ve Y değerleri olarak iki kısma ayırıp analiz edersek, X değeri aşağıda gösterildiği gibi olur.

$$X = \frac{-1/j\omega C_1}{R_1}(\alpha \sin(\omega t)) + \frac{-1/j\omega C_1}{R_2}V_n + \frac{-1/j\omega C_1}{R_3}(-Y). \quad \text{Buradan,}$$

$$X = \frac{\alpha \sin(\omega t)}{R_1 C_1} \left(\frac{1}{s} \right) - \frac{V_n}{R_2 C_1} \left(\frac{1}{s} \right) + \frac{Y}{R_3 C_1} \left(\frac{1}{s} \right) \text{ elde edilir. Buradan da,}$$

(C₁) $\left(\frac{\alpha \sin(\omega t)}{R_1} - \frac{V_n}{R_2} + \frac{Y}{R_3} \right)$ denklemi elde edilmiş olur.

Benzer şekilde Y değerini hesaplarsak;

$$Y = \frac{-1/j\omega C_2}{R_4}(XY) + \frac{-1/j\omega C_2}{R_5}V_n + \frac{-1/j\omega C_2}{R_6}(X^3) \text{ elde edilir. Buradan,}$$

$$Y = -\frac{XY}{R_4 C_2} \left(\frac{1}{s} \right) - \frac{V_n}{R_5 C_2} \left(\frac{1}{s} \right) - \frac{X^3}{R_6 C_2} \left(\frac{1}{s} \right) \quad \text{elde edilir. Buradan da,}$$

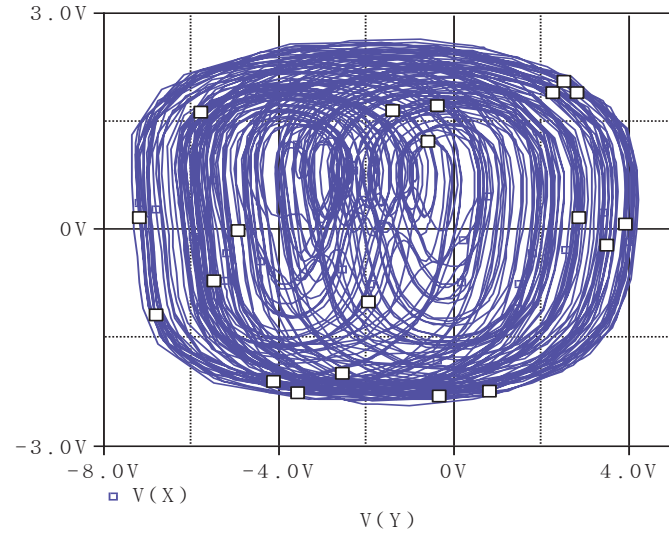
$$\therefore \left(\frac{1}{C_2} \right) \left(-\frac{XY}{R_4} - \frac{V_n}{R_5} - \frac{X^3}{R_6} \right) \text{ denklemi elde edilmiş olur.}$$

Sonuç olarak, elde edilen iki eşitlik birleştirilirse;

$$\therefore \left(\frac{1}{C_1} \right) \left(\frac{\alpha \sin(\omega t)}{R_1} - \frac{V_n}{R_2} + \frac{Y}{R_3} \right)$$

$$\therefore \left(\frac{1}{C_2} \right) \left(-\frac{XY}{R_4} - \frac{V_n}{R_5} - \frac{X^3}{R_6} \right)$$

denklem sistemi elde edilmiş olur. Bu sistemin kaotik durumda olduğu $\alpha=2$ değeri için OrCAD-PSpice[®] benzetim programında çizdirilen x-y faz portresi Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi olur. Faz portre çıktılarının genlik değerleri +15V ile -15V arasında olduğundan skala etmek gerekmemektedir.



Şekil 2.10. Denklem (2.28)'deki sistemin $\alpha=2$ için OrCAD-PSpice[®] programı x-y faz portre çıktısı

BÖLÜM 3. YENİ BULUNAN SİSTEMLER İLE LİTERATÜRDEN SEÇİLEN BAZI KAOTİK SİSTEMLERİN ANALİZ YÖNTEMLERİ VE MODELLENMESİ

3.1. Yeni Kaotik A Sistemi

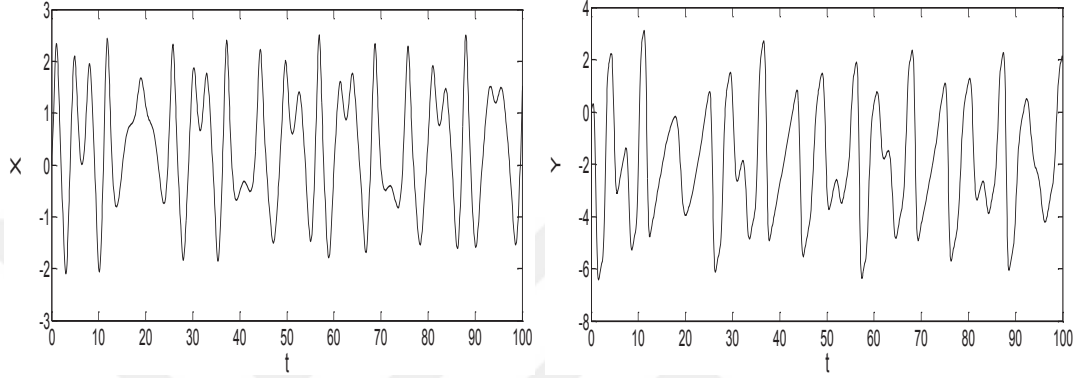
Yeni bulunan kaotik sistem A, sürekli zamanlı iki boyutlu ve sinüzoidal bir kaotik sistemdir. Sistem, Denklem (3.1)'de verildiği gibi 2 ayrı diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Sistemde iki adet durum değişkeni (x,y) ve “a, b, c, α ” olmak üzere dört adet parametre vardır. Bununla beraber sistem, bir adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xy), bir adet üçüncü dereceden doğrusal olmayan terim (x^3) ve bir adet zamana bağlı sürülme (kuvvetlendirme) terimi ($\alpha \sin(\omega t)$) olmak üzere toplam altı adet terim içermektedir. Sistem, başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=0$ ve $\alpha=2$ iken kaotik özellik göstermektedir. Tüm başlangıç şartlarının 0 olması gerçek ortam uygulamaları için kolaylık sağlamaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sin(\omega t) + a \\ \dot{y} &= b) - x^3 + c \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sistemin parametreleri sabit tutulup α değeri artırılırsa, sistem durumu sırasıyla limit döngü, kaotik durum, kaotik kritik durum ve geniş-ölçek periyodik durum şeklinde değişimler gösterir. Önerilen sistem A parametrik çeşitliliğe, zengin dinamik davranışlara ve yüksek uygulanabilme kapasitesine sahiptir. Sistemin parametre değerleri $a=2$, $b=10$, $c=1$ olarak alınırsa, sistemin parametrelili hali Denklem (3.2)'de gösterildiği gibi olur.

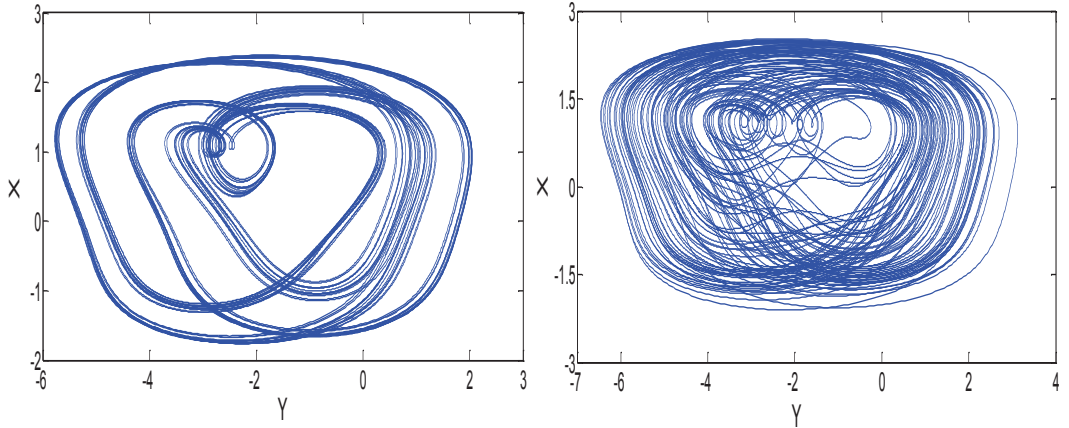
$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sin(\omega t) + 2 \\ \dot{y} &= 10 - x^3 + 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$\alpha=1.5$ ve açısal frekans $\omega=1\text{rad/sn}$ alınırsa, kaotik sistemin zaman serileri Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi olur.



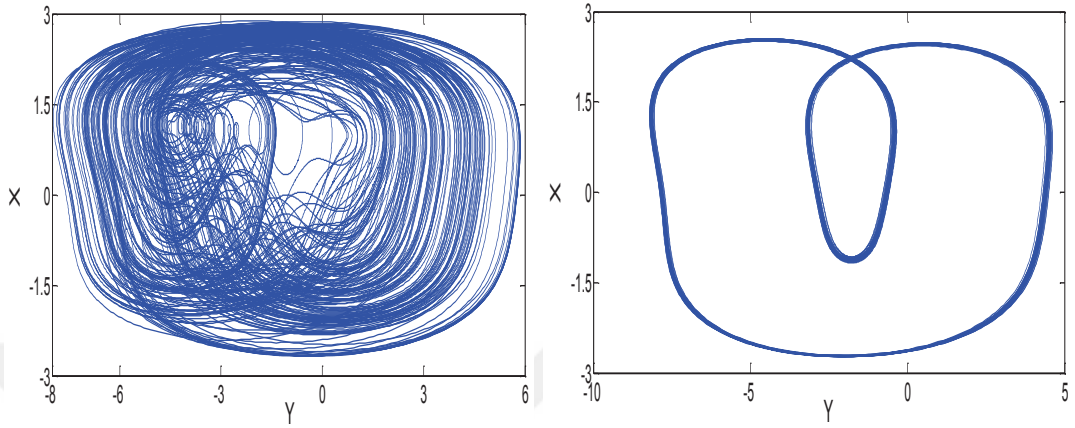
Şekil 3.1. Yeni kaotik A sistemi için zaman serileri

Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=1.15$ ($t=100-500\text{sn}$) ve $\alpha=1.5$ ($t=500\text{sn}$) için iki boyutlu faz portreleri Şekil 3.2.'de verilmiştir. Sistemin faz portreleri Matlab programı ile gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2. Yeni kaotik A sisteminin $\alpha = 1.15$ ($t=100-500\text{sn}$) ve $\alpha=1.5$ ($t=500\text{sn}$) için x-y faz portreleri ($\omega=1\text{rad/sn}$)

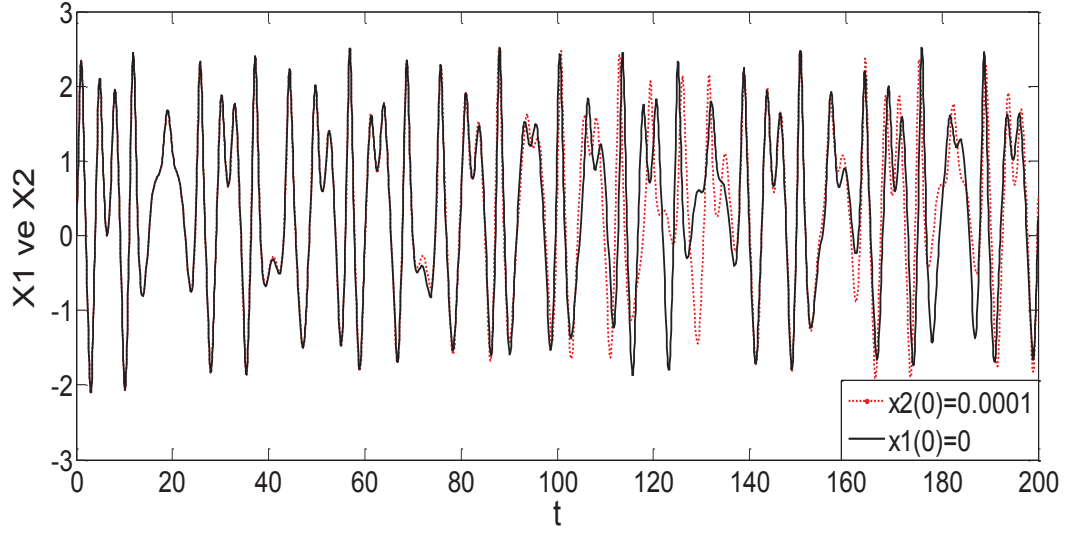
Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=2.54$ ($t=1000\text{sn}$) ve $\alpha=2.55$ ($t=250-1000\text{sn}$) için iki boyutlu faz portreleri ise Şekil 3.3.'te verilmiştir. Faz portrelerinden de görüleceği üzere yeni kaotik sistem A'nın dinamik davranışları çeşitlilik göstermektedir.



Şekil 3.3. Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=2.54$ ($t=1000\text{sn}$) ve $\alpha=2.55$ ($t=250-1000\text{sn}$) için x-y faz portreleri ($\omega=1\text{rad/sn}$)

Yeni bulunan kaotik A sisteminin sinüzoidal kaynakla sürülmüş olması ve bu kaynağın genlik değerinin değişmelerine sistemin yüksek duyarlılık göstermesi zayıf sinyal tespit çalışmaları için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla beraber sistemin parametrik çeşitliliğe sahip olduğu söylenebilir.

Kaotik sistemlerin bir diğer özelliği başlangıç şartlarına olan hassas bağımlılıktır. Kaotik bir sistemin başlangıç şartlarında çok küçük bir değişiklik olduğunda sistemin zaman serilerinin farklı çıktılar vermesi kaotik olma durumu hakkında fikir vermektedir. Şekil 3.4.'te görüldüğü üzere x durum değişkeninin başlangıç şartı 0 olarak alındığında siyah renkli eğri elde edilmiştir. Başlangıç şartı 0.0001 olarak alındığında ise kırmızı kesik çizgili eğri elde edilmiştir. Sistemin x durum değişkeninin 1/10000 gibi küçük bir değer artışına farklı tepki verdiği görülmektedir. Sonuç olarak, yeni kaotik A sisteminin kaotik sistemlerin bir özelliği olan başlangıç şartlarına hassas bağımlı olma özelliğini gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.4. x durum değişkeninin farklı başlangıç şartları $x_1(0)=0$ ve $x_2(0)=0.0001$ için karşılaştırmalı zaman serileri grafiği ($\alpha=1.5$)

3.1.1. Temel dinamik analizler

Yeni kaotik sistem A'da denge noktalarını bulmak için $\dot{x}$ ve $\dot{y}$ sıfıra eşitlenirse,

$$0 = y + 2 \sin(\omega t) + 2$$

$$0 = (-xy/10) - x^3 + 1$$

elde edilir. Bu denklem sistemi $\sin(\omega t)=1$ olacak şekilde çözülürse denge noktaları Denklem (3.3)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} E_1 &= \left(\frac{2}{15G_2} + G_2 - 4 \right) \\ E_2 &= \left(-\frac{G_2}{2} - \frac{1}{15G_2} + G_1, -4 \right) \\ E_3 &= \left(-\frac{G_2}{2} - \frac{1}{15G_2} - G_1, -4 \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Burada;

$$G_1 = \frac{3^{1/2} \left(\frac{2}{15G_2} + G_2 \right) i}{2} \text{ ve,}$$

$$G_2 = \left(\frac{3343^{1/2} \times 135^{1/2}}{135} + \frac{1}{2} \right)^{1/3} \text{ 'dir.}$$

Denge noktaları analizi sonucunda; E_1 , E_2 ve E_3 denge noktaları elde edilmiştir. Denge noktalarının kararsız olup olmadığını anlamak için sistemin özdeğerlerinin bulunması gerekmektedir. Özdeğerleri bulmak için öncelikle sistemin Jacobian matrisinin alınması gerekmektedir. Sistemin Jacobian matrisi Denklem (3.4)'te verildiği gibidir.

$$J(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{y}{10} - 3x^2 & -\frac{x}{10} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

E_1 denge noktaları sistemin Jacobian matrisinde yerlerine yazılırsa, Denklem (3.5) elde edilir.

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9.7377 & -0.1838 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Daha sonra ise, $|\lambda I - J(E_1)| = 0$ çözümünden Denklem (3.6)'da gösterilen E_1 için karakteristik denklem bulunur.

$$\lambda^2 + 0.1838\lambda + 9.7377 = 0 \quad (3.6)$$

E_1 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (3.7)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -0.0919 + 3.1192i \\ \lambda_2 &= -0.0919 - 3.1192i\end{aligned}\tag{3.7}$$

E_2 denge noktalarına göre sistemin Jacobian matrisi Denklem (3.8)'de gösterildiği gibi olur.

$$J(E_2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 4.2689 - 8.0557i & 0.0919 + 0.1461i \end{bmatrix}\tag{3.8}$$

E_2 için karakteristik denklem ise;

$$\lambda^2 - (0.0919 + 0.1461i)\lambda + (-4.2689 + 8.057i) = 0\tag{3.9}$$

olarak bulunur. E_2 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (3.10)'da gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -2.502 + 1.695i \\ \lambda_2 &= 2.6321 - 1.4834i\end{aligned}\tag{3.10}$$

E_3 denge noktaları için Jacobian matrisi Denklem (3.11)'de gösterilmiştir.

$$J(E_3) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 4.2689 + 8.0557i & 0.0919 - 0.1461i \end{bmatrix}\tag{3.11}$$

E_3 için karakteristik denklem ise;

$$\lambda^2 + (-0.0919 + 0.1461i)\lambda - (4.2689 + 8.057i) = 0\tag{3.12}$$

olarak bulunur. E_3 denge noktaları için özdeğerler Denklem (3.13)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -2.502 - 1.695i \\ \lambda_2 &= 2.6321 + 1.4834i\end{aligned}\tag{3.13}$$

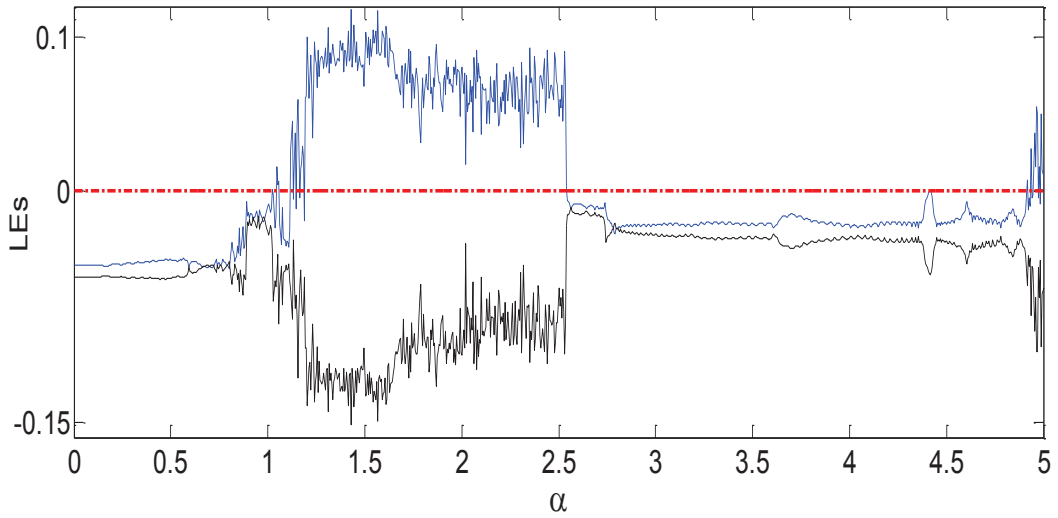
Denge noktalarından elde edilen sonuçlara göre E_1 denge noktasının kararlı, E_2 ve E_3 denge noktalarının kararsız olduğu görülmektedir. Sonuç olarak yeni sistem A'nın verilen değerler için kararsız olduğu görülmektedir. Fakat bulunan bu sonuçlar tek başına ele alındığında sistemin kaotik olup olmadığı konusunda kesin bir kanıya varılamamaktadır. Sistemin kaotikliği konusunda net bir fikir elde edilebilmesi için, daha sonraki kısımlarda anlatılan diğer analizlerin de yapılması gerekmektedir.

3.1.2. Lyapunov üstelleri analizi

Dinamik bir sistemin deterministik karakteristiği Lyapunov üstellerinin incelenmesi yoluyla bulunabilir. Bu üsteller kaotik bir sistemin kaos durumunda olup olmadığının anlaşılmasında yardımcı olur. Denklem (3.1)'de gösterilen yeni kaotik sistem iki boyutlu otonom olmayan bir sistemdir. Bu sistemin üç boyutlu otonom bir sisteme dönüştürülmesi Denklem (3.14)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\dot{z} &= \ln(z) + 2 \\ \dot{x} &= 10 - x^3 + 1 \\ \dot{y} &= \dots\end{aligned}\tag{3.14}$$

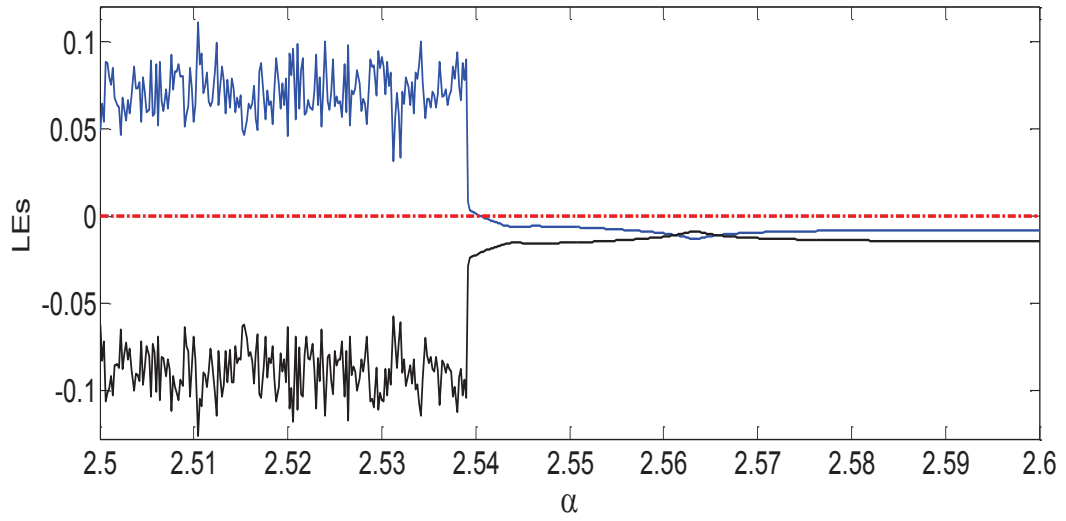
Üç boyutlu bir sistemin üç adet Lyapunov üsteli vardır. Lyapunov üstellerinin üçü de negatif işaretli olursa, sistem sabit nokta davranışına yakınsamaya başlar. Lyapunov üstelleri işaret dağılımı $(0, -, -)$ ve $(+, 0, -)$ olursa, sistem durumu sırasıyla limit döngü ve tuhaf çekici görünümlüdür [109]. Şekil 3.5.'te, yeni kaotik A sisteminin α parametresinin 0-5 değer aralığında değişen değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$).



Şekil 3.5. Yeni kaotik A sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=0-5$)

Sistem durumu birinci Lyapunov üstelinin pozitif, ikinci Lyapunov üstelinin sıfır ve üçüncü Lyapunov üstelinin negatif olduğu durumlarda kaotiktir. Birinci Lyapunov üstelinin çok ani ve oldukça belirgin şekilde negatif değere inmesi durumunda, sistem kaotik durumdan çıkar ve geniş ölçek periyodik duruma geçer. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere sistem 0-1 aralığında kaosta değildir. 1-1.19 aralığında limit döngü, çift-periyot, dörtlü-periyot gibi davranışlar göstermekte ve bazı değerlerde kaosa girip çıkmaktadır. Sistem 1.19 ve 2.54 değer aralığının tamamında ise kaotik davranış göstermektedir. α parametresinin değeri 2.55 olduğunda ise geniş ölçek periyodik davranışa geçmekte ve bu davranışı parametrenin 4.91 değerine kadar devam ettirmektedir. Bu değerden sonra tekrar kaotik duruma geçişler yapmaktadır. Sistemin sinüzoidal kaynağın genlik değerini ifade eden α parametresinin değişimlerine yüksek duyarlılık gösterdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, yeni kaotik sistem A'nın uzun bir aralıkta kaotik olmasının ardından ani ve keskin bir değişimle geniş ölçek periyodik duruma geçmesi ve uzun bir değer aralığında bu davranışı sürdürmesi zayıf sinyal tespit çalışmalarını oldukça kolaylaştıracaktır. Yapılacak sinyal tespit çalışmasının kritik noktasının bu ani ve keskin geçiş noktası olması uygun olacaktır. Şekil 3.6.'da, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylı Lyapunov üstelleri spektrumu verilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$).



Şekil 3.6. Yeni kaotik A sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=2.5-2.6$)

Bununla beraber Lyapunov üstelleri spektrumu yardımıyla boyut analizi yapılabilir. Sistemin kaotik davranış gösterdiği $\alpha=2$ noktasındaki ilgili Lyapunov üstelleri $L_1=0.0582$, $L_2=0$ ve $L_3=-0.804$ 'tür. Bulunan bu değerleri Denklem (3.15)'te yerlerine yazacak olursak sistemin boyutu;

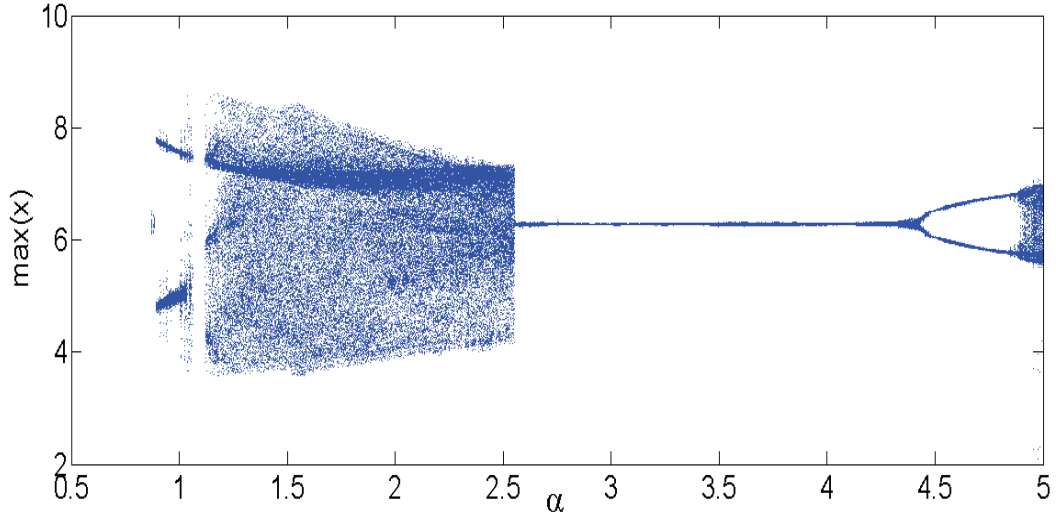
$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 2 + \frac{L_1 + L_2}{|L_3|} = 2.07238806 \quad (3.15)$$

olarak elde edilir.

3.1.3. Çatallaşma diyagramı analizi

Kaotik bir sistemin karmaşık dinamik davranışları sistemin çatallaşma analizi yapılarak kolaylıkla gözlemlenebilir [57-111]. Şekil 3.7.'de, yerel maksimum x 'in α 'ya göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı görülmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$). Bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik

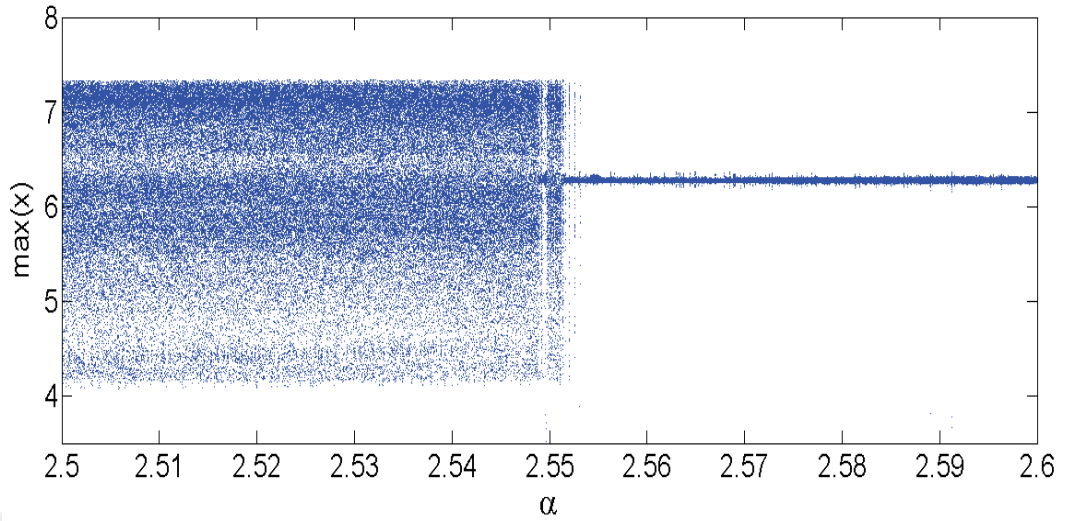
özellik göstermelidir. Şekil 3.5. ile Şekil 3.7. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiği görülmektedir.



Şekil 3.7. Yeni kaotik A sisteminin çatallaşma diyagramı ($\alpha=0-5$)

Çatallaşma diyagramında görüleceği üzere yeni sistem; limit döngü, çift-periyot çatallaşması, dörtlü-periyot çatallaşması, kaotik durum, tanjant çatallaşması ve geniş ölçek periyodik durum gibi farklı sistem durumları göstermektedir. Bununla beraber, sistemin eşik değeri çatallaşma davranışının analiz edilmesi ile ortaya çıkarılabilir. Bu kritik eşik değeri tanjant çatallaşma noktası olarak adlandırılmaktadır. Bu nokta zayıf sinyal tespiti için en uygun noktadır. $\alpha=2.54$ iken oluşan bir tanjant çatallaşması diyagramda görülmektedir. α parametresinin değeri 2.54'den 2.55'e çıktığında, sistem kaotik kritik durumdan geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir.

Şekil 3.8.'de, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren deteylandırılmış çatallaşma diyagramı verilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$). α 'nın herhangi bir değeri için yerel maksimum x oldukça fazla noktada değer alıyorsa, α 'nın bu değeri için sistem kaotiktir denilir. Bununla beraber, α parametresinin değerinin 2.54'den 2.55'e çıktığı tanjant çatallaşma noktasında yerel maksimum x değeri belli bir nokta üzerinde yoğunlaşmaya başlamaktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir. Bu kritik çatallaşma noktası zayıf sinyal bilgisi tespit çalışmaları için kullanılabilecek bir noktadır.



Şekil 3.8. Detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($\alpha=2.5-2.6$)

3.2. Yeni Kaotik B Sistemi

Yeni bulunan kaotik sistem B, sürekli zamanlı iki boyutlu ve sinüzoidal bir kaotik sistemdir. Sistem, Denklem (3.16)'da verildiği gibi 2 ayrı diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Sistemde iki adet durum değişkeni (x, y) ve “ a, b, α ” olmak üzere üç adet parametre vardır. Bununla beraber sistem, bir adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xy), bir adet üçüncü dereceden doğrusal olmayan terim (x^3) ve bir adet zamana bağlı sürülme (kuvvetlendirme) terimi ($\alpha \sin(\omega t)$) olmak üzere toplam beş adet terim içermektedir. Sistem, başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=0$ ve $\alpha=2$ iken kaotik özellik göstermektedir. Tüm başlangıç şartlarının 0 olması gerçek ortam uygulamaları için kolaylık sağlamaktadır.

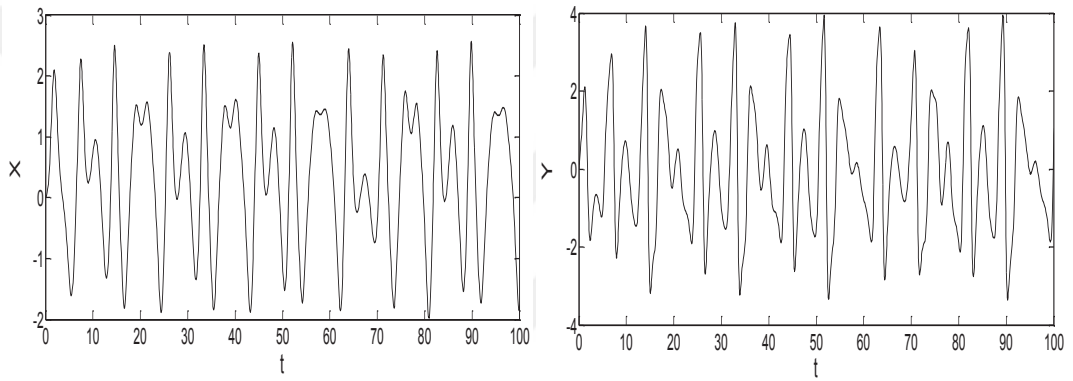
$$\begin{aligned} \dot{x} &= a - x^3 + \alpha \sin(\omega t) + b \\ \dot{y} &= \dots \end{aligned} \quad (3.16)$$

Sistemin parametreleri sabit tutulup α değeri artırılırsa, sistem durumu sırasıyla limit döngü, kaotik durum, kaotik kritik durum ve geniş-ölçek periyodik durum şeklinde değişimler gösterir. Önerilen sistem B’de parametrik çeşitliliğe, zengin dinamik

davranışlara ve yüksek uygulanabilme kapasitesine sahiptir. Sistemin parametre değerleri $a=5$, $b=1$ olarak alınır, sistemin parametrelili hali Denklem (3.17)'de gösterildiği gibi olur.

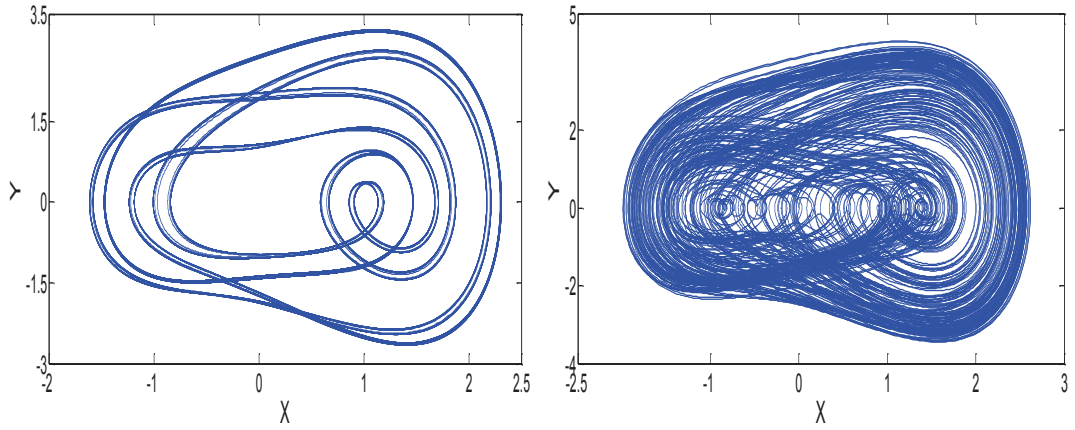
$$\dot{x} = 5 - x^3 + \alpha \sin(\omega t) + 1 \quad (3.17)$$

$\alpha=2$ ve açısal frekans $\omega=1\text{rad/sn}$ alınır, kaotik sistemin zaman serileri Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi olur.



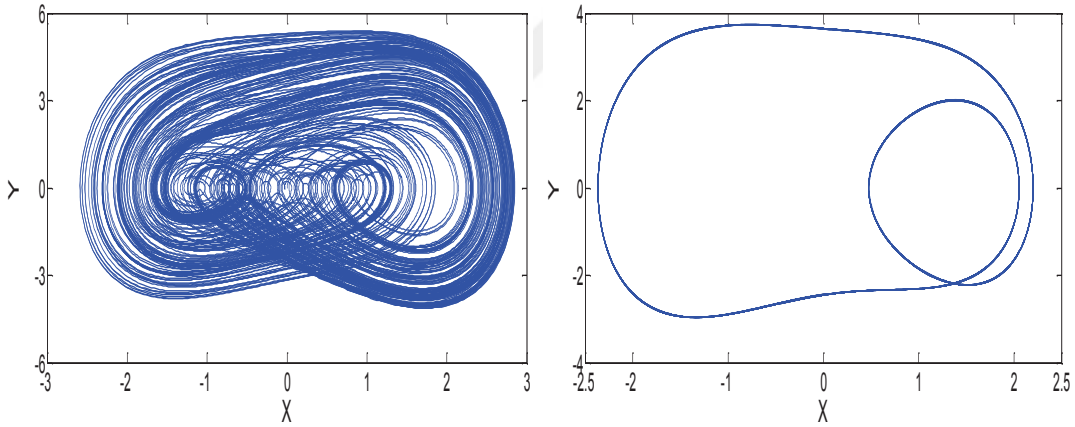
Şekil 3.9. Yeni kaotik B sistemi için zaman serileri

Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=1.23$ ($t=200-1000\text{sn}$) ve $\alpha=2$ ($t=1000\text{sn}$) için iki boyutlu faz portreleri Şekil 3.10.'da verilmiştir. Sistemin faz portreleri Matlab programı ile gözlemlenmiştir.



Şekil 3.10. Yeni kaotik B sisteminin $\alpha = 1.23$ ($t = 200-1000sn$) ve $\alpha = 2$ ($t = 1000sn$) için x-y faz portreleri ($\omega = 1rad/sn$)

Yeni kaotik B sisteminin $\alpha = 2.787$ ($t = 1000sn$) ve $\alpha = 2.788$ ($t = 500-1000sn$) için iki boyutlu faz portreleri ise Şekil 3.11.'de verilmiştir. Faz portrelerinden görüldüğü üzere yeni kaotik sistem B'nin dinamik davranışları çeşitlilik göstermektedir.

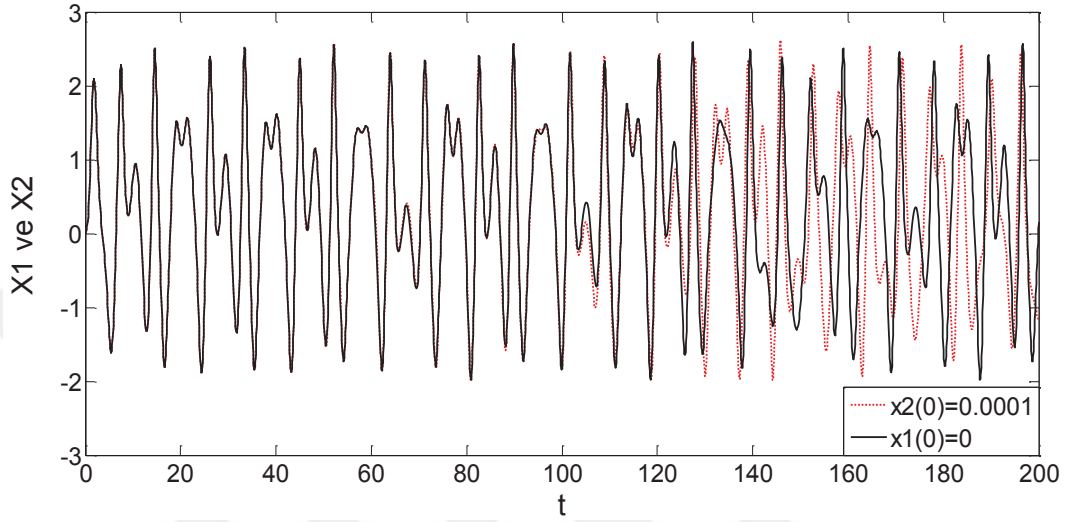


Şekil 3.11. Yeni kaotik B sisteminin $\alpha = 2.787$ ($t = 1000sn$) ve $\alpha = 2.788$ ($t = 500-1000sn$) için x-y faz portreleri ($\omega = 1rad/sn$)

Yeni bulunan kaotik B sisteminin sinüzoidal kaynakla sürülmüş olması ve bu kaynağın genlik değerinin değişmelerine sistemin yüksek duyarlılık göstermesi zayıf sinyal tespit çalışmaları için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmaların yanında, yeni kaotik B sisteminin başlangıç şartlarına hassas bağımlılık analizi yapılmıştır. Şekil 3.12.'de görüldüğü üzere x durum değişkeninin başlangıç şartı 0 olarak alındığında siyah renkli eğri elde edilmiştir. Başlangıç şartı

0.0001 olarak alındığında ise kırmızı kesik çizgili eğri elde edilmiştir. Sistemin x durum değişkeninin $1/10000$ gibi küçük bir değer artışına farklı tepki verdiği görülmektedir. Sonuç olarak, yeni kaotik B sisteminin kaotik sistemlerin bir özelliği olan başlangıç şartlarına hassas bağımlı olma özelliğini gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.12. x durum değişkeninin farklı başlangıç şartları $x_1(0)=0$ ve $x_2(0)=0.0001$ için karşılaştırmalı zaman serileri grafiği ($\alpha=2$)

3.2.1. Temel dinamik analizler

Yeni kaotik sistem B’de denge noktalarını bulmak için $\dot{x}$ ve $\dot{y}$ sıfıra eşitlenirse,

$$0 = y$$

$$0 = (xy / 5) - x^3 + \alpha \sin(\omega t) + 1$$

elde edilir. Bu denklem sistemi $\sin(\omega t)=1$ olacak şekilde çözülmüşse denge noktaları (Denklem 3.18)’de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
E_1 &= (3^{1/3}, 0) \\
E_2 &= \left(+\frac{3^{5/6}i}{2} - \frac{3^{1/3}}{2}, 0 \right) \\
E_3 &= \left(-\frac{3^{5/6}i}{2} - \frac{3^{1/3}}{2}, 0 \right)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Denge noktaları analizi sonucunda; E_1 , E_2 ve E_3 denge noktaları elde edilmiştir. Denge noktalarının kararsız olup olmadığını anlamak için sistemin özdeğerlerinin bulunması gerekmektedir. Özdeğerleri bulmak için öncelikle sistemin Jacobian matrisinin alınması gerekmektedir. Sistemin Jacobian matrisi Denklem (3.19)'da verildiği gibidir.

$$J(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{y}{5} - 3x^2 & +\frac{x}{5} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

E_1 denge noktaları sistemin Jacobian matrisinde yerlerine yazılırsa, Denklem (3.20) elde edilir.

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6.2403 & -0.2884 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Daha sonra ise, $|\lambda I - J(E_1)| = 0$ çözümünden Denklem (3.21)'de gösterilen E_1 için karakteristik denklem bulunur.

$$\lambda^2 + 0.2884\lambda + 6.2403 = 0 \tag{3.21}$$

E_1 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (3.22)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -0.1442 + 2.4939i \\ \lambda_2 &= -0.1442 - 2.4939i\end{aligned}\tag{3.22}$$

E_2 denge noktalarına göre sistemin Jacobian matrisi Denklem (3.23)'te gösterildiği gibi olur.

$$J(E_2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 3.1201 + 5.4042i & 0.1442 - 0.2498i \end{bmatrix}\tag{3.23}$$

E_2 için karakteristik denklem ise;

$$\lambda^2 + (-0.1442 + 0.2498i)\lambda - (3.1201 + 5.4042i) = 0\tag{3.24}$$

olarak bulunur. E_2 denge noktaları için karakteristik denklem çözümünden elde edilen özdeğerler Denklem (3.25)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -2.0877 - 1.3718i \\ \lambda_2 &= 2.2319 + 1.122i\end{aligned}\tag{3.25}$$

E_3 denge noktaları için Jacobian matrisi Denklem (3.26)'da gösterilmiştir.

$$J(E_3) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 10.1404 + 4.0532i & -0.0721 + 0.3747i \end{bmatrix}\tag{3.26}$$

E_3 için karakteristik denklem ise;

$$\lambda^2 + (0.0721 - 0.3747i)\lambda - (10.1404 - 4.0532i) = 0\tag{3.27}$$

olarak bulunur. E_3 denge noktaları için özdeğerler Denklem (3.28)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 3.2036 + 0.8108i \\ \lambda_2 &= -3.2757 - 0.4361i\end{aligned}\tag{3.28}$$

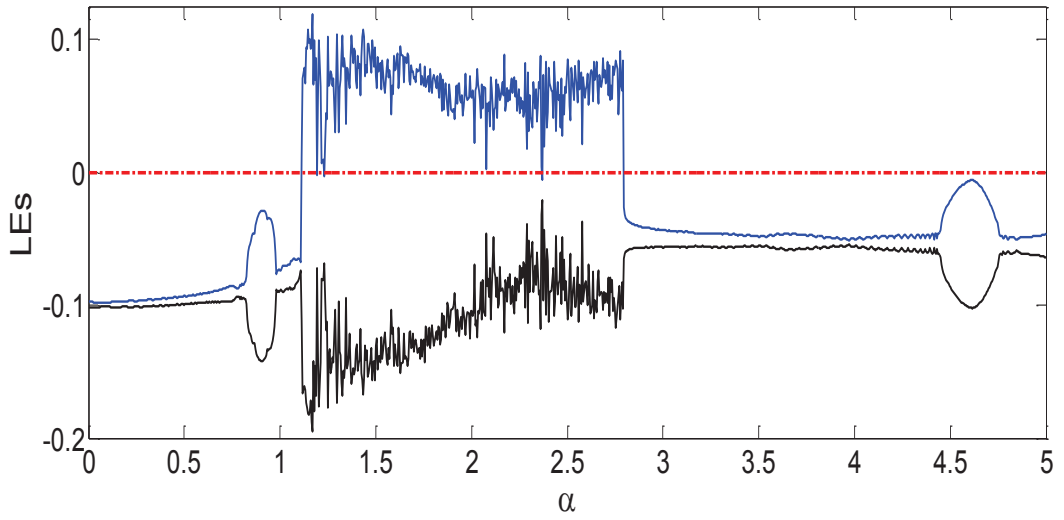
Denge noktalarından elde edilen sonuçlara göre E_1 denge noktasının kararlı, E_2 ve E_3 denge noktalarının kararsız olduğu görülmektedir. Sonuç olarak yeni sistem B'nin verilen değerler için kararsız olduğu görülmektedir. Fakat bulunan bu sonuçlar tek başına ele alındığında sistemin kaotik olup olmadığı konusunda kesin bir kanıya varılamamaktadır. Sistemin kaotikliği konusunda net bir fikir elde edilebilmesi için, daha sonraki kısımlarda anlatılan diğer analizlerin de yapılması gerekmektedir.

3.2.2. Lyapunov üstelleri analizi

Denklem (3.16)'da gösterilen yeni kaotik sistem iki boyutlu otonom olmayan bir sistemdir. Bu sistemin üç boyutlu otonom bir sisteme dönüştürülmesi Denklem (3.29)'da gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= 5 - x^3 + \alpha \sin(z) + 1 \\ \dot{y} &= \dots \\ \dot{z} &= \dots\end{aligned}\tag{3.29}$$

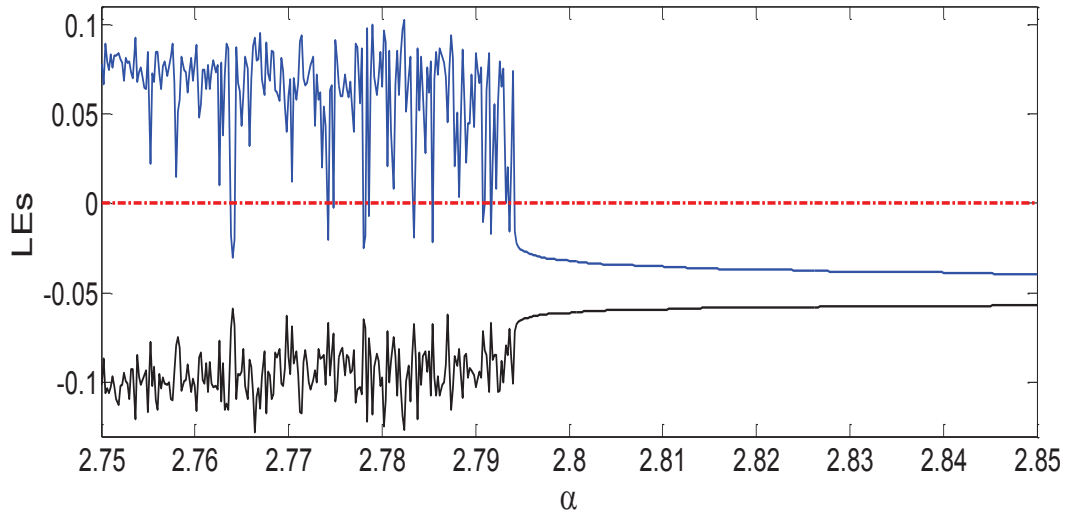
Şekil 3.13.'te, yeni kaotik B sisteminin α parametresinin 0-5 değer aralığında değişen değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$).



Şekil 3.13. Yeni kaotik B sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=0-5$)

Sistemin kaotik olma koşulu, birinci Lyapunov üstelinin pozitif, ikinci Lyapunov üstelinin sıfır ve üçüncü Lyapunov üstelinin negatif olmasıdır. Birinci Lyapunov üstelinin çok ani ve oldukça belirgin şekilde negatif değere inmesi durumunda, sistem kaotik durumdan çıkar ve geniş ölçek periyodik duruma geçer. Şekil 3.13.'te görüldüğü üzere sistem 0-1.11 aralığında kaosta değildir. Bu aralıkta limit döngü davranışı göstermektedir. 1.11 ile 2.79 aralığında çoğunlukla kaotik durumda olup bazı değerlerde periyodik duruma girip çıkmaktadır. α parametresinin değeri 2.8 olduğunda ise periyodik davranışa geçmekte ve bu davranışı parametrenin 5 değerine kadar devam ettirmektedir. Sistemin sinüzoidal kaynağın genlik değerini ifade eden α parametresinin değişimlerine yüksek duyarlılık gösterdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, yeni kaotik sistem B'nin uzun bir aralıkta kaotik olmasının ardından ani ve keskin bir değişimle periyodik duruma geçmesi ve uzun bir değer aralığında bu davranışı sürdürmesi zayıf sinyal tespit çalışmalarını oldukça kolaylaştıracaktır. Bu sistemle yapılacak sinyal tespit çalışmasının kritik noktasının bu ani ve keskin geçiş noktası olması uygun olacaktır. Şekil 3.14.'de, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylı Lyapunov üstelleri spektrumu verilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$).



Şekil 3.14. Yeni kaotik B sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($\alpha=2.75-2.85$)

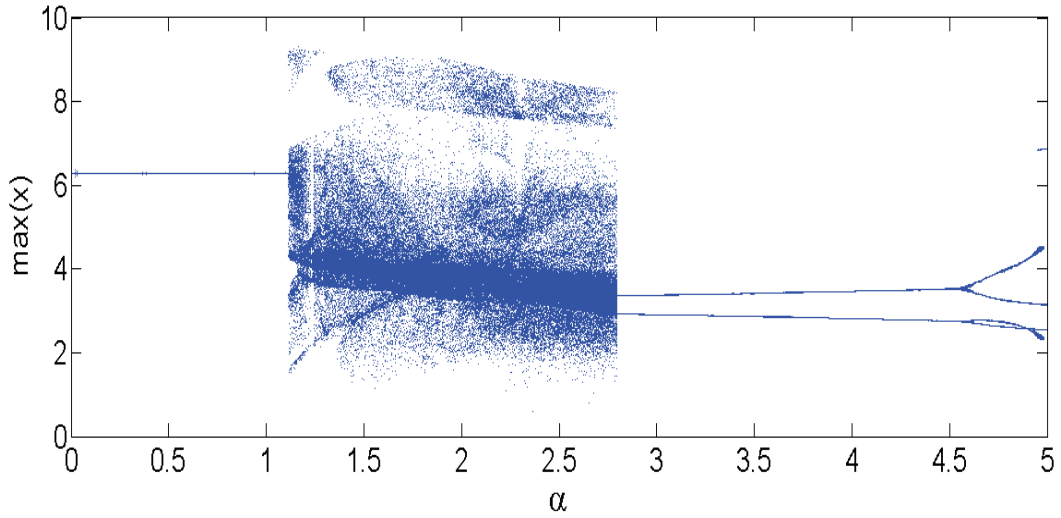
Lyapunov üstelleri spektrumu yardımıyla boyut analizi yapmak üzere sistemin kaotik davranış gösterdiği $\alpha=2$ noktasındaki ilgili Lyapunov üstelleri $L_1= 0.05592$, $L_2=0$ ve $L_3=-0.1041$ olarak bulunur. Bulunan bu değerleri Denklem (3.30)'da yerlerine yazacak olursak sistemin boyutu;

$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 2 + \frac{L_1 + L_2}{|L_3|} = 2.537175792505 \quad (3.30)$$

olarak elde edilir.

3.2.3. Çatallaşma diyagramı analizi

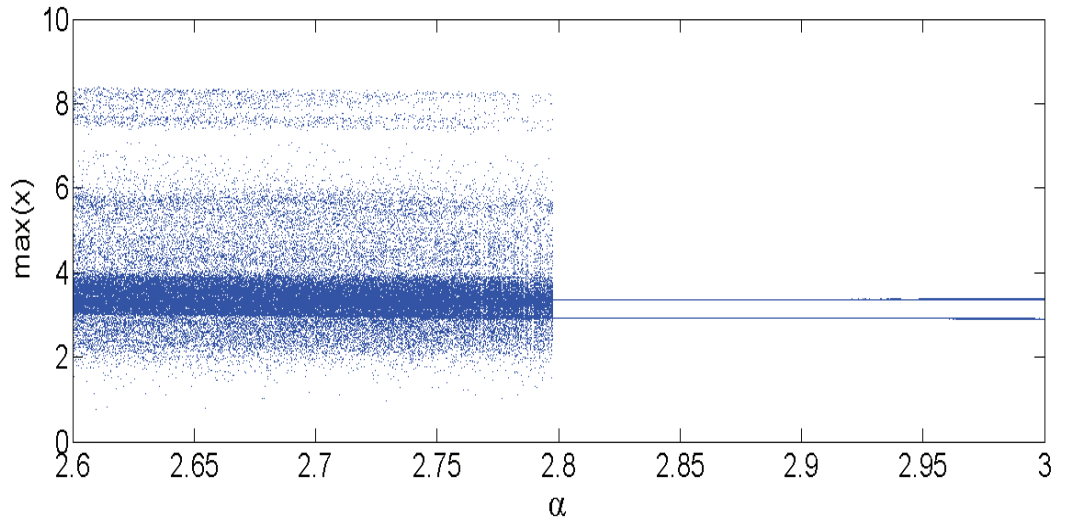
Şekil 3.15.'te, yerel maksimum x 'in α 'ya göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı görülmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$). Daha önceden de belirtildiği gibi bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik özellik göstermelidir. Şekil 3.13. ile Şekil 3.15. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiği görülmektedir.



Şekil 3.15. Yeni kaotik B sisteminin çatallaşma diyagramı ($\alpha=0-5$)

Çatallaşma diyagramında görüleceği üzere yeni kaotik B sisteminin limit döngü, tanjant çatallaşması, çift-periyot çatallaşması, dörtlü-periyot çatallaşması, kaotik durum gibi farklı sistem durumları göstermektedir. Bununla beraber, sistemin eşik değeri çatallaşma davranışının analiz edilmesi ile ortaya çıkarılabilir. Bu sistem için kritik eşik değeri çift-periyot çatallaşma noktası olur. Bu nokta zayıf sinyal tespiti için en uygun noktadır. $\alpha=2.79$ iken oluşan çift-periyot çatallaşması diyagramda görülmektedir. α parametresinin değeri 2.79'dan 2.8'e çıktığında, sistem kaotik kritik durumdan geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir.

Şekil 3.16.'da, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren deteylandırılmış çatallaşma diyagramı verilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$). α 'nın herhangi bir değeri için yerel maksimum x oldukça fazla noktada değer alıyorsa, α 'nın bu değeri için sistem kaotiktir denilir. Bununla beraber, α parametresinin değerinin 2.79'dan 2.8'e çıktığı çift-periyot çatallaşma noktasında yerel maksimum x değeri belli bir nokta üzerinde yoğunlaşmaya başlamaktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan periyodik duruma geçmektedir. Bu kritik çatallaşma noktası zayıf sinyal bilgisi tespit çalışmaları için kullanılabilecek bir noktadır.



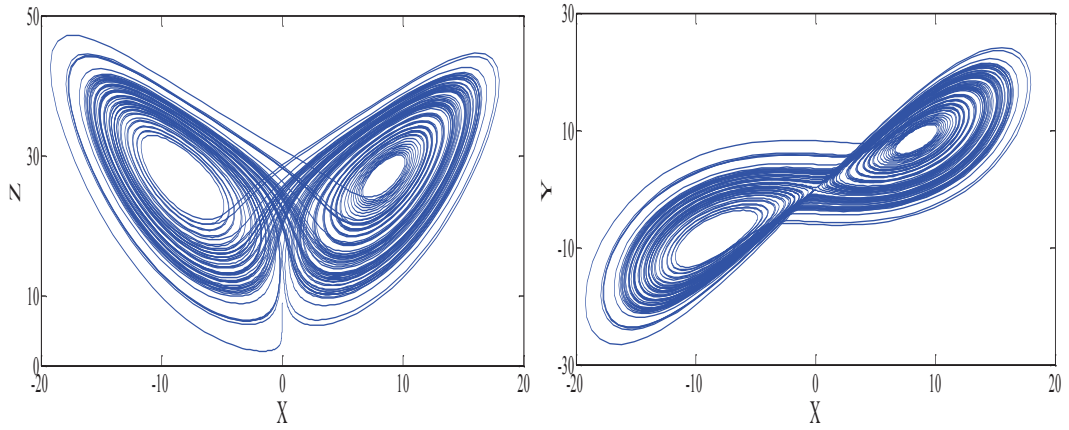
Şekil 3.16. Yeni kaotik B sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($\alpha=2.6-3$)

3.3. Hiperkaotik Lorenz A Sistemi

Lorenz kaotik sisteminin dinamik modeli Denklem (3.31)'de gösterilmiştir.

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = bx - y + yz \\ \dot{z} = c - yz \end{cases} \quad (3.31)$$

burada x , y ve z durum değişkenlerini ifade etmektedir. Sistemin parametre değerleri $a=10$, $b=8/3$, $c=25$ ve ilk şartları $x(0)=0$, $y(0)=-0.01$, $z(0)=9$ olduğunda sistem kaotik durumdadır. Sistemin kaotik faz portreleri Şekil 3.17'de gösterildiği gibi olur.



Şekil 3.17. Lorenz sisteminin $a=10$, $b=8/3$ ve $c=25$ için x - z ve x - y faz portreleri

Basitleştirilmiş hiperkaotik Lorenz A sistemi Denklem (3.32)'de ifade edildiği gibidir [112].

$$\begin{cases} \dot{x} = (c_0 - x^2)y \\ \dot{y} = (c_0 - xz)y \\ \dot{z} = c_0 y \end{cases} \quad (3.32)$$

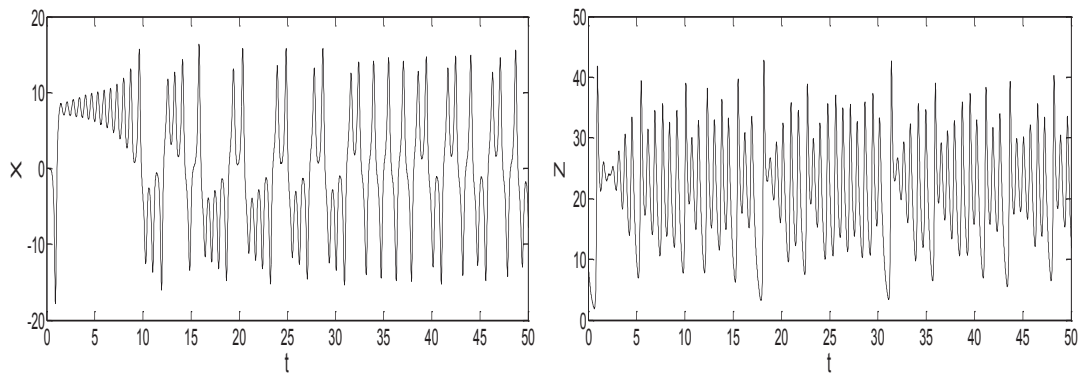
Burada c_0 parametresi sistem durumundaki değişimleri gözlemlemek için kullanılabilmektedir. Denklemden parametre $c_0=0$ veya $c_0=6$ olduğunda, y 'li veya x 'li terim ortadan kalkar. Parametre $c_0=-1$ olduğunda ise standart Lorenz sistemi elde edilir. Dolayısıyla c_0 parametresi aynı zamanda basitleştirme değişkenidir. Bu değişkeni basit sinüzoidal kontrol fonksiyonu $c_0=c\sin(\omega t)$ şeklinde ifade edersek yeni denklem zamana bağlı bir sürülme terimi içermiş olur. Denklem (3.32)'deki üç boyutlu otonom sistem, sürülme terimi ile üç boyutlu otonom olmayan sisteme dönüşür. Bu otonom olmayan sistem ise Denklem (3.33)'te gösterildiği üzere dört boyutlu otonom bir sisteme eşittir [16].

$$\begin{cases} \dot{x} = (c \sin(u) - x^2)y \\ \dot{y} = (c \sin(u) - xz)y \\ \dot{z} = c \sin(u) y \\ \dot{u} = \omega \end{cases} \quad (3.33)$$

Burada ω açısal frekansı ve c sürülme teriminin genliğini ifade etmektedir. Lorenz sisteminin geliştirilmesi ile elde edilen bu sistem, sürekli zamanlı dört boyutlu ve sinüzoidal bir hiperkaotik sistemdir. Sistem, Denklem (3.33)'te verildiği gibi 4 ayrı diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Sistemde dört adet durum değişkeni (x, y, z, u) ve “a, b, c” olmak üzere üç adet parametre vardır. Bununla beraber sistem, ikisi ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xy, xz) olmak üzere toplam dokuz adet terim içermektedir. Sistemde ω sabit tutulup c arttırılırsa sabit nokta, limit döngü, torus, kaotik durum ve hiperkaotik durum gibi durumlar gözlemlenebilir. Hiperkaotik Lorenz A sistemi, yapı itibariyle orijinal Lorenz sisteminden daha karmaşıktır ve zengin dinamik davranışlara sahiptir. Sistemin parametre değerleri $a=10$ ve $b=8/3$ olarak alınırsa, sistemin parametrelili hali Denklem (3.34)'te gösterildiği gibi olur.

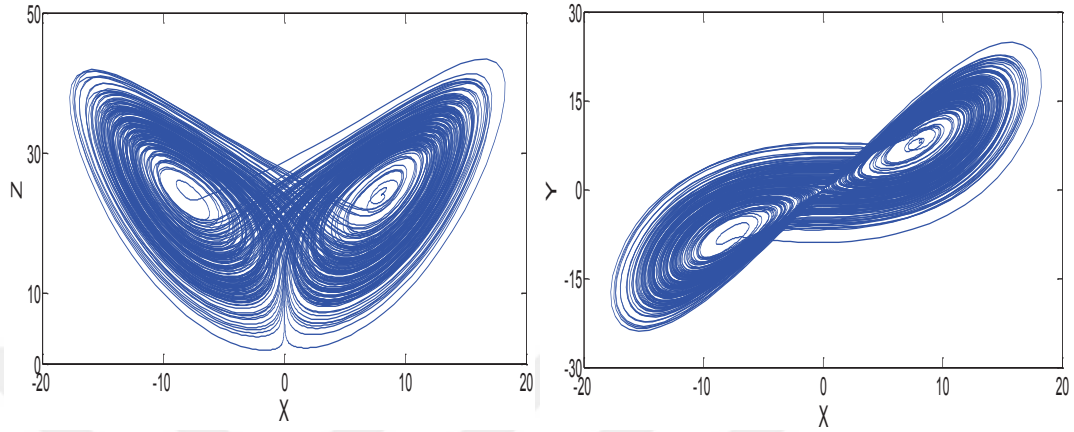
$$\begin{aligned} \dot{x} &= -ax + c \sin(u) \\ \dot{y} &= bx - cy + xz + c \sin(u)y \\ \dot{z} &= xz - bz \\ \dot{u} &= \omega \end{aligned} \quad (3.34)$$

Denklemden sürülme terimi $c=0.2751$, açısal frekans $\omega=10\text{rad/sn}$ ve başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=-0.01$, $z(0)=9$ olarak alınırsa, kaotik sistemin zaman serileri Şekil 3.18.'de gösterildiği gibi olur.



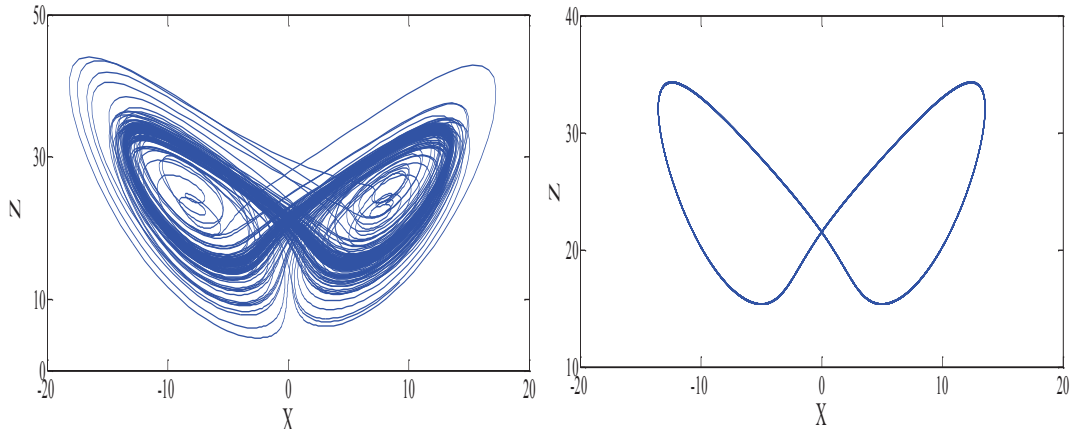
Şekil 3.18. Hiperkaotik Lorenz A sistemi için zaman serileri

Hiperkaotik Lorenz A sisteminin $c=0.2751$ için iki boyutlu faz portreleri Şekil 3.19.'da verilmiştir. Faz portrelerinden de görüleceği sistem hiperkaotik özellik göstermektedir. Sistemin faz portreleri Matlab programı ile gözlemlenmiştir.



Şekil 3.19. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin $c = 0.2751$ için x-z ve x-y faz portreleri ($\omega=10\text{rad/sn}$)

Hiperkaotik Lorenz A sisteminin sırasıyla $c=0.991$ ve $c=0.992$ için iki boyutlu faz portreleri Şekil 3.20.'de verilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere sistem durumu kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma geçmektedir.



Şekil 3.20. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin $c=0.991$ ve $c=0.992$ için x-z faz portreleri ($\omega=10\text{rad/sn}$, $t=50-500\text{sn}$)

Hiperkaotik Lorenz A sistemi sinüzoidal kaynağın genlik değerinin değişmelerine yüksek duyarlılık gösterdiğinden zayıf sinyal tespit çalışmaları için kullanılabilecek potansiyel bir sistemdir.

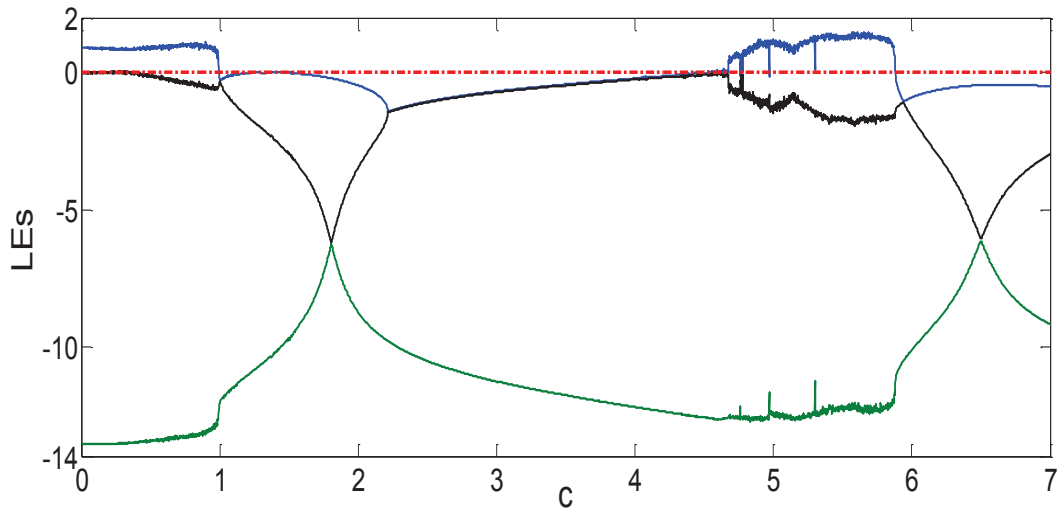
3.3.1. Lyapunov üstelleri analizi

Dört boyutlu bir sistemin dört adet Lyapunov üsteli vardır. Bu üstellerin tamamı negatif değerli ise sistem sabit nokta davranışı gösterir. Şayet üstellerin dağılımı $(0, -, -, -)$ ve $(+, 0, -, -)$ şeklinde ise sistem sırasıyla limit döngü ve tuhaf çekici görünümlüdür. Sistemin hiperkaotik davranış göstermesi için ise Lyapunov üstellerinin dağılımı $(+, +, 0, -)$ şeklinde olmalıdır [109,116]. Tablo 3.1.'de, dört boyutlu hiperkaotik bir sistemin Lyapunov üstellerinin işaretleri ile sistem durumu arasındaki ilişki gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Sistem Durumunun Lyapunov Üstellerinin İşaretlerine Göre Değişimi

Lyapunov Üstellerinin İşaretleri (L_1, L_2, L_3, L_4)	Sistem Durumu
$(-, -, -, -)$	Sabit Nokta
$(0, -, -, -)$	Limit Döngü
$(+, 0, -, -)$	Tuhaf Çekici
$(+, +, 0, -)$	Hiperkaos

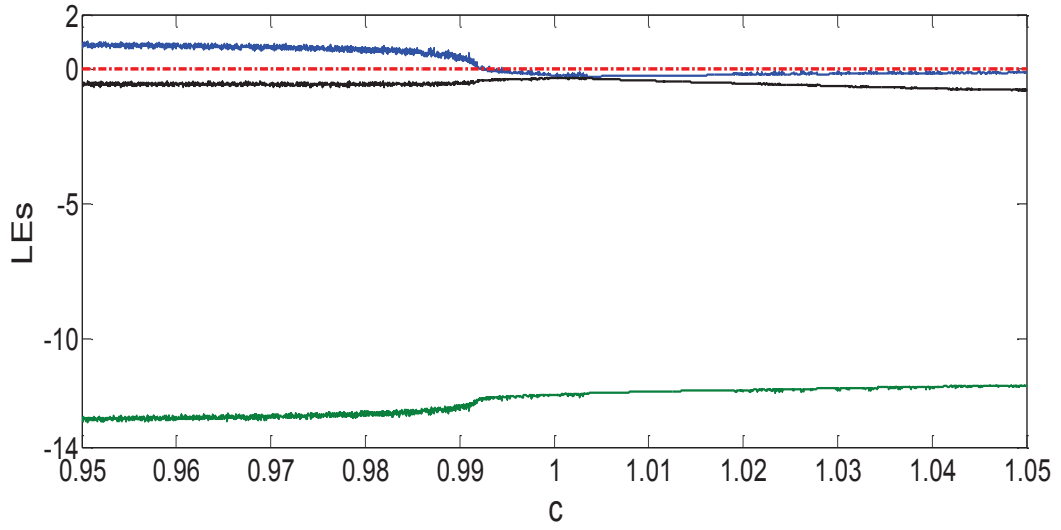
Şekil 3.21.'de, hiperkaotik Lorenz A sisteminin c parametresinin 0-7 değer aralığında değişen değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmektedir ($\omega=10\text{rad/sn}$).



Şekil 3.21. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=0-7$)

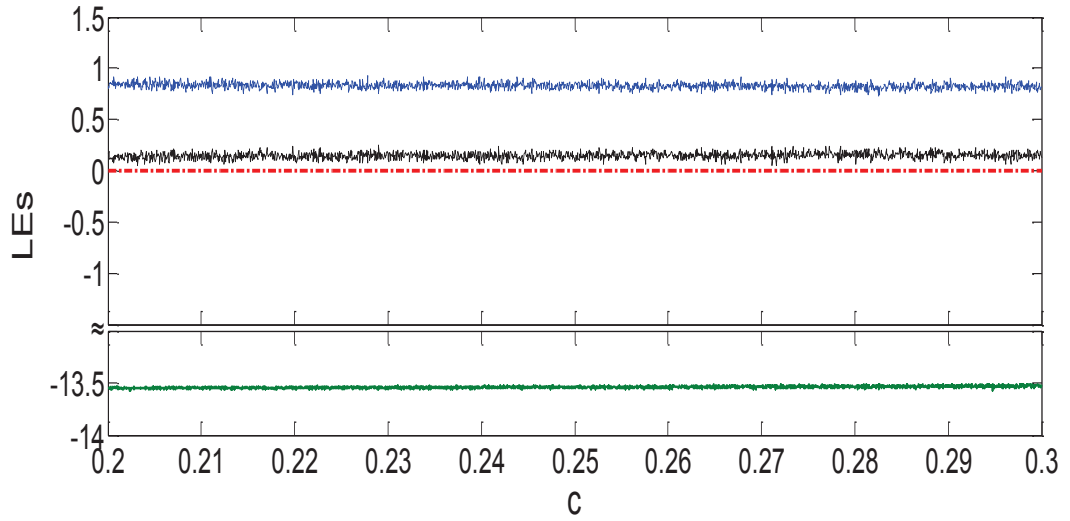
Hiperkaotik bir sistemin kaotik olma koşulu, birinci Lyapunov üstelinin pozitif, ikinci Lyapunov üstelinin sıfır, üçüncü ve dördüncü Lyapunov üstellerinin negatif olmasıdır. Birinci Lyapunov üstelinin çok ani ve oldukça belirgin şekilde negatif değere inmesi durumunda, sistem kaotik durumdan çıkar ve geniş ölçek periyodik duruma geçer. Şekil 3.21.'de görüldüğü üzere sistem 0-0.99 değer aralığında kaotik durum ile hiperkaotik durum arası geçişler yapmaktadır. Sistem 0.99-4.6 değer aralığında periyodik durum davranışı göstermektedir. c parametresi 4.7-5.8 değer aralığında olduğunda ise sistem kaotik duruma geçmektedir. Son olarak, sistem 5.9-7 değer aralığında periyodik durum davranışı göstermektedir. Sistemin sinüzoidal kaynağın genlik değerini ifade eden c parametresinin değişmelerine yüksek duyarlılık gösterdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, hiperkaotik Lorenz A sisteminin uzun bir aralıkta kaotik olmasının ardından ani ve keskin bir değişimle periyodik duruma geçmesi ve uzun bir değer aralığında bu davranışı sürdürmesi bu sistem ile zayıf sinyal tespit çalışmalarının yapılabileceğini göstermektedir. Bu sistemle yapılacak sinyal tespit çalışmasının kritik noktasının bu ani ve keskin geçiş noktası olması uygun olacaktır. Şekil 3.22.'de, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylı Lyapunov üstelleri spektrumu verilmektedir ($\omega=10\text{rad/sn}$).



Şekil 3.22. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=0.95-1.05$)

Şekil 3.23.'te, hiperkaotik Lorenz A sisteminin kaotik durum ile hiperkaotik durum arasında geçişler yaptığı bir değer aralığını gösteren detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmiştir ($c=0.2-0.3$). Şekilden de görüleceği üzere birinci Lyapunov üsteli (mavi renkli) pozitif, ikinci Lyapunov üsteli (kırmızı renkli) sıfır ve dördüncü Lyapunov üsteli (yeşil renkli) ise negatif değerlidir. Üçüncü Lyapunov üsteli (siyah renkli) ise sıfır civarında c parametresinin değerlerine göre sistem durumunu değiştirmektedir. Bu üstelin pozitif değerleri için sistem hiperkaotik, negatif değerleri için kaotik özellik göstermektedir.



Şekil 3.23. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin hiperkaotik davranış gösterdiği bir aralığı gösteren detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu (c=0.2-0.3)

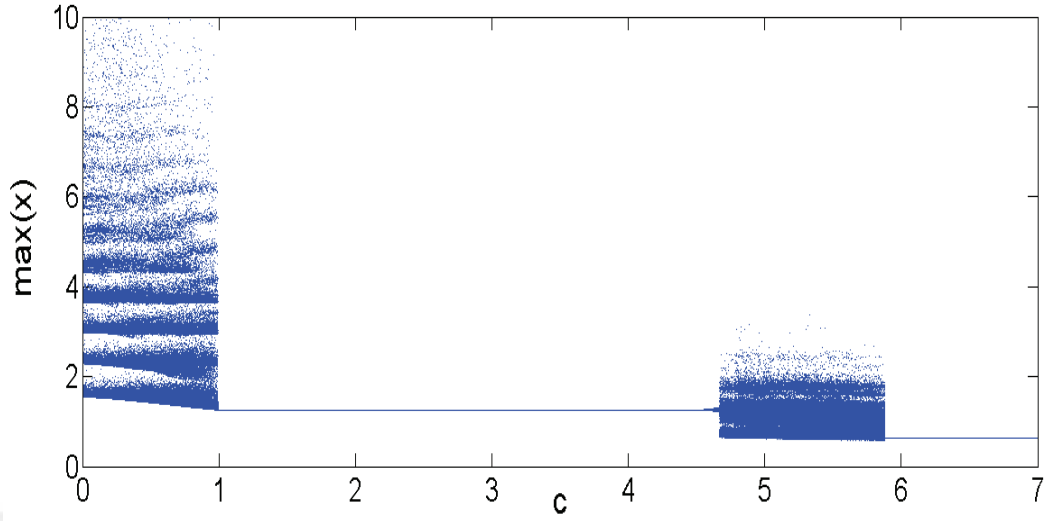
Lyapunov üstelleri spektrumu yardımıyla boyut analizi yapmak üzere sistemin hiperkaotik davranış gösterdiği $c=0.2751$ noktasındaki ilgili Lyapunov üstelleri $L_1=0.7934$, $L_2=0.06757$, $L_3=0$ ve $L_4=-13.53$ olarak bulunur. Bulunan bu değerler Denklem (3.35)'te yerlerine yazılacak olursa sistemin boyutu;

$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 3 + \frac{L_1 + L_2 + L_3}{|L_4|} = 3.0636341463 \quad (3.35)$$

olarak elde edilir.

3.3.2. Çatallaşma diyagramı analizi

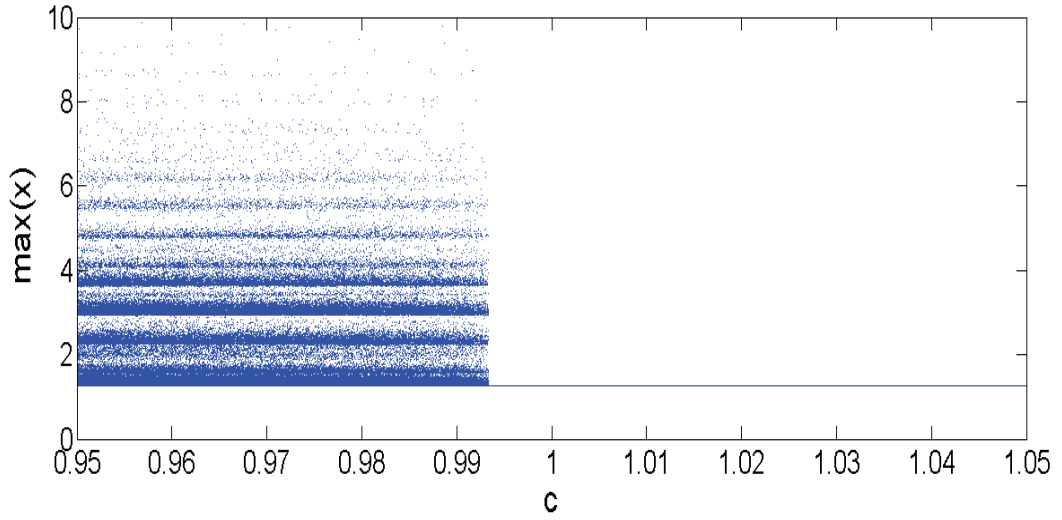
Şekil 3.24.'te, yerel maksimum x 'in c 'ye göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı görülmektedir ($\omega=10\text{rad/sn}$). Daha önceden de belirtildiği gibi bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik özellik göstermelidir. Şekil 3.21. ile Şekil 3.24. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiği görülmektedir.



Şekil 3.24. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin çatallaşma diyagramı (c=0-7)

Çatallaşma diyagramında görüleceği üzere hiperkaotik Lorenz A sistemi, iki ayrı noktada kaotik durumdan periyodik duruma geçişler yapmaktadır. Bununla beraber, sistemin eşik değeri çatallaşma davranışının analiz edilmesi ile ortaya çıkarılabilir. Bu sistem için kritik eşik değeri, zayıf sinyal tespiti için en uygun nokta olan tanjant çatallaşma noktasıdır. $c=0.991$ iken oluşan tanjant çatallaşması diyagramda görülmektedir. c parametresinin değeri 0.991'den 0.992'ye çıktığında, sistem kaotik kritik durumdan geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir.

Şekil 3.25.'te, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren deteylandırılmış çatallaşma diyagramı verilmektedir ($\omega=10\text{rad/sn}$). c 'nin herhangi bir değeri için yerel maksimum x oldukça fazla noktada değer alıyorsa, c 'nin bu değeri için sistem kaotiktir denilir. c parametresinin değerinin 0.991'den 0.992'e çıktığı tanjant çatallaşma noktasında yerel maksimum x değeri belli bir nokta üzerinde yoğunlaşmaya başlamaktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma geçmektedir. Bu kritik nokta zayıf sinyal bilgisi tespit çalışmaları için kullanılabilecek bir noktadır.



Şekil 3.25. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($c=0.95-1.05$)

3.4. Hiperkaotik Lorenz B Sistemi

Denklem (3.31)'deki standart Lorenz sisteminin ikinci denklemine c_0 parametresi eklendiğinde oluşan yeni sistem aşağıda gösterildiği gibi olur [17].

$$\begin{cases} \dot{x} = y - x \\ \dot{y} = xz + y + c_0 \\ \dot{z} = -x - yz \end{cases} \quad (3.36)$$

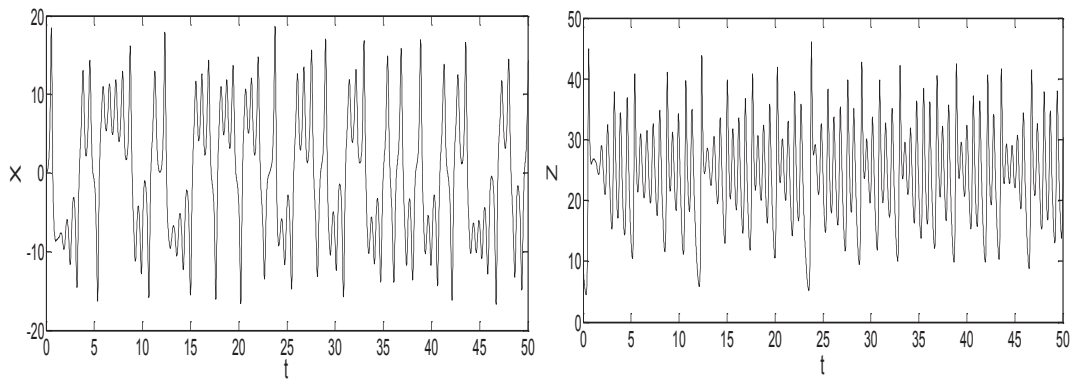
Burada c_0 parametresini sinüzoidal kontrol fonksiyonu $c \sin(\omega t)$ şeklinde ifade edersek yeni denklem zamana bağlı bir sürülme terimi içermiş olur. Bu terim sistem durumundaki değişimleri gözlemlemek için kullanılabilir. Hiperkaotik Lorenz B sistemi olarak adlandırdığımız Denklem (3.36)'daki üç boyutlu otonom sistem, sürülme terimi ile üç boyutlu otonom olmayan sisteme dönüşür. Bu otonom olmayan sistem ise Denklem (3.37)'de gösterildiği üzere dört boyutlu otonom bir sisteme eşittir.

$$\begin{cases} \dot{x} = y - x \\ \dot{y} = xz + y + c \sin(u) \\ \dot{z} = -x - yz \\ \dot{u} = \omega \end{cases} \quad (3.37)$$

Burada ω açısal frekansı ve c sürülme teriminin genliğini ifade etmektedir. Bu sistem, sürekli zamanlı dört boyutlu ve sinüzoidal bir hiperkaotik sistemdir. Sistem, Denklem (3.37)'de verildiği gibi 4 ayrı diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Sistemde dört adet durum değişkeni (x,y,z,u) ve “a, b, c” olmak üzere üç adet parametre vardır. Bununla beraber sistem, iki adet ikinci dereceden doğrusal olmayan terim (xy, xz) ve bir adet zamana bağlı sürülme (kuvvetlendirme) terimi $(c\sin(\omega t))$ olmak üzere toplam dokuz adet terim içermektedir. Sistemde ω sabit tutulup c arttırılırsa sabit nokta, limit döngü, kaotik durum ve hiperkaotik durum gibi durumlar gözlemlenebilir. Hiperkaotik Lorenz B sistemi Lorenz sisteminden daha karmaşıktır ve daha zengin dinamik davranışlara sahiptir. Sistemin parametre değerleri $a=10$ ve $b=8/3$ olarak alınırsa, sistemin parametrelili hali Denklem (3.38)'de gösterildiği gibi olur.

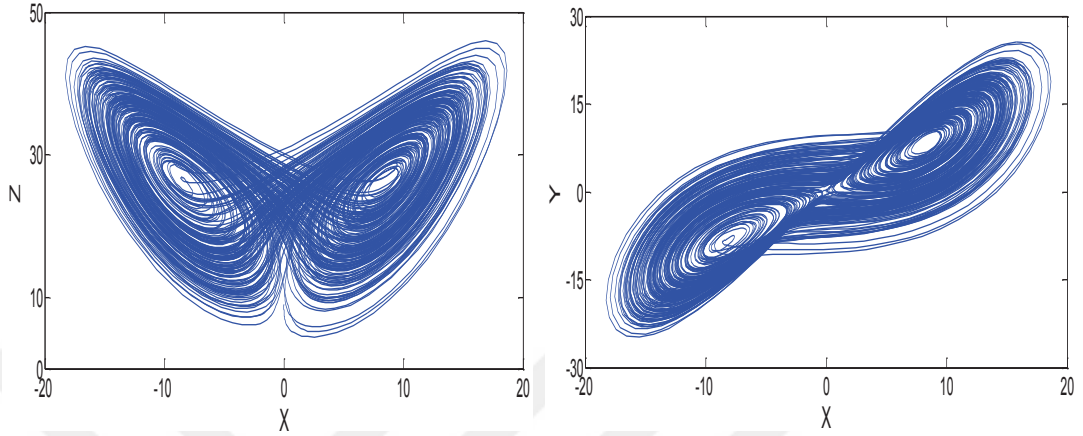
$$\begin{aligned} \dot{x} &= -bx \\ \dot{y} &= az + y + c \sin(u) \\ \dot{z} &= -x^2/3 \\ \dot{u} &= 1 \end{aligned} \quad (3.38)$$

Denklemden sürülme terimi $c=6.29$, açısal frekans $\omega=9.6\text{rad/sn}$ ve başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=-0.01$, $z(0)=9$ olarak alınırsa, kaotik sistemin zaman serileri Şekil 3.26.'da gösterildiği gibi olur.



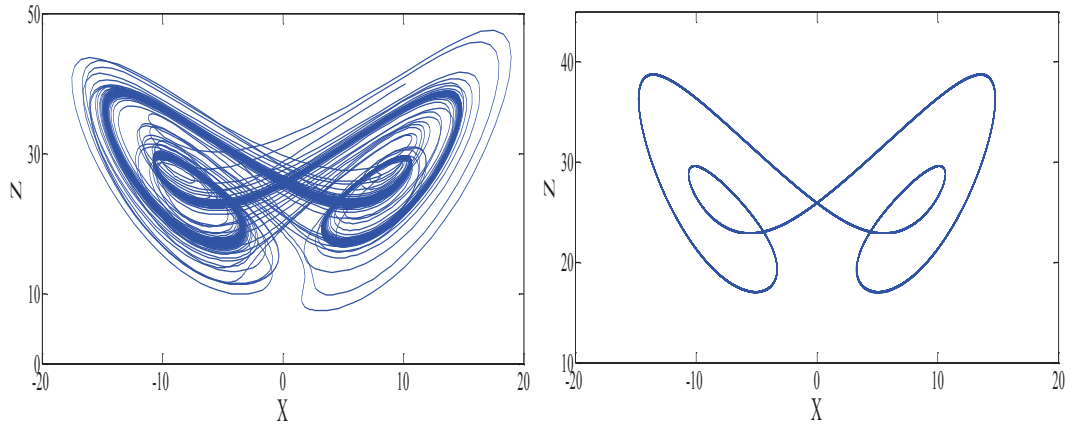
Şekil 3.26. Hiperkaotik Lorenz B sistemi için zaman serileri

Hiperkaotik Lorenz B sisteminin $c=6.29$ için Matlab programı ile gözlemlenen iki boyutlu faz portreleri Şekil 3.27.'de verilmiştir. Faz portrelerinden de görüleceği sistem hiperkaotik özellik göstermektedir.



Şekil 3.27. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin $c = 6.29$ için x-z ve x-y faz portreleri ($\omega=9.6\text{rad/sn}$)

Hiperkaotik Lorenz B sisteminin sırasıyla $c=33.771$ ve $c=33.772$ için iki boyutlu faz portreleri Şekil 3.28.'de verilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere sistem durumu kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma geçmektedir.

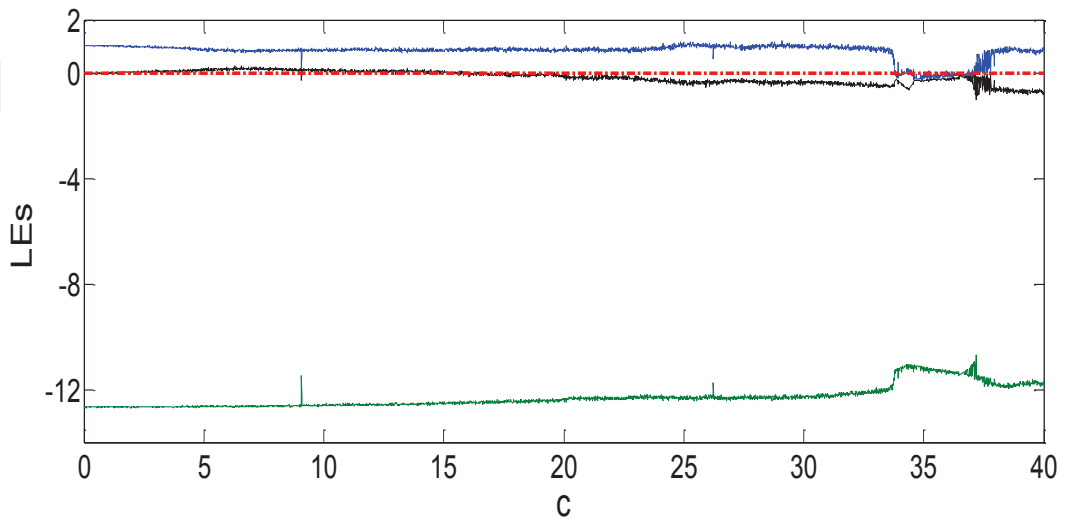


Şekil 3.28. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin $c = 33.771$ ve $c = 33.772$ için x-z faz portreleri ($\omega=9.6\text{rad/sn}$, $t=50-500\text{sn}$)

Hiperkaotik Lorenz B sistemi sinüzoidal kaynağın genlik değerinin değişmelerine yüksek duyarlılık gösterdiğinden zayıf sinyal tespit çalışmaları için kullanılabilecek potansiyel bir sistemdir.

3.4.1. Lyapunov üstelleri analizi

Dört boyutlu bir sistemin dört adet Lyapunov üsteli olduğu daha önceki kısımlarda ifade edilmişti. Bu üstellerin dağılımı $(+, 0, -, -)$ ve $(+, +, 0, -)$ şeklinde olduğunda sistem sırasıyla tuhaf çekici ve hiperkaotik görünümlüdür. Şekil 3.29.'da, hiperkaotik Lorenz B sisteminin c parametresinin 0-40 değer aralığında değişen değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmektedir ($\omega=9.6\text{rad/sn}$).

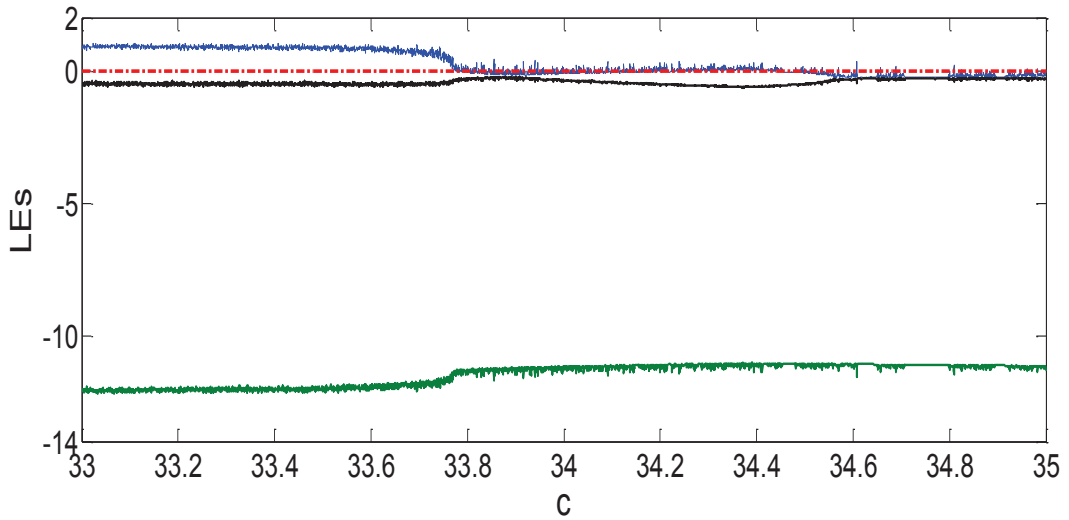


Şekil 3.29. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=0-40$)

Hiperkaotik bir sistemin birinci Lyapunov üstelinin çok ani ve oldukça belirgin şekilde negatif değere inmesi durumunda, sistem kaotik durumdan çıkar ve geniş ölçekli periyodik duruma geçer. Şekil 3.29.'da görüldüğü üzere sistem, c 'nin değer aralığı 0-19.62 olduğunda genellikle hiperkaotik davranış göstermekte olup kaotik durum ile hiperkaotik durum arasında geçişler yapmaktadır. Siyah renk ile gösterilen ikinci Lyapunov üstelinin ulaştığı en yüksek pozitif değer 0.255'dir ($c=6.29$). Spektrumda mavi renk ile gösterilen birinci Lyapunov üsteli pozitif değerde iken ikinci Lyapunov üstelinin negatif olduğu 19.63-33.7 değer aralığında sistem kaotik davranış göstermektedir. c parametresinin değeri 33.7'den 33.8'e çıktığında birinci üstelin ani ve belirgin şekilde negatif değere indiği görülmektedir. Bu nokta sistemin kritik noktasıdır. Bu kritik noktada sistem kaotik durumdan geniş-ölçekli periyodik

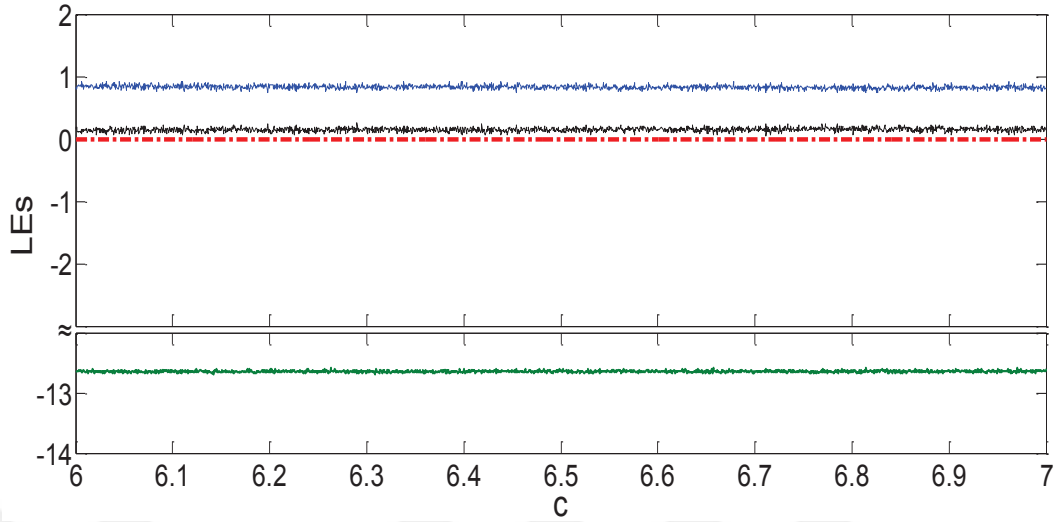
duruma geçiş yapmaktadır. Sistem, c parametresinin 33.8-40 değer aralığında periyodik davranış veya kaotik davranış göstermektedir. Sistemin sinüzoidal kaynağın genlik değerini ifade eden c parametresinin değişmelerine yüksek duyarlılık gösterdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, hiperkaotik Lorenz B sisteminin uzun bir aralıkta kaotik olmasının ardından ani ve keskin bir değişimle geniş-ölçek periyodik duruma geçmesi, bu sistem ile zayıf sinyal tespit çalışmalarının yapılabileceğini göstermektedir. Zayıf sinyal tespit çalışmalarının kritik noktasının bu ani ve keskin geçiş noktası olması uygun olacaktır. Şekil 3.30.'da, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylı Lyapunov üstelleri spektrumu verilmektedir ($\omega=9.6\text{rad/sn}$).



Şekil 3.30. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=33-35$)

Şekil 3.31.'de, hiperkaotik Lorenz B sisteminin kaotik durum ile hiperkaotik durum arasında geçişler yaptığı bir değer aralığını gösteren detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmiştir ($c=6-7$). Şekilden de görüleceği üzere birinci Lyapunov üsteli (mavi renkli) pozitif, ikinci Lyapunov üsteli (kırmızı renkli) sıfır ve dördüncü Lyapunov üsteli (yeşil renkli) ise negatif değerlidir. Üçüncü Lyapunov üsteli (siyah renkli) ise sıfır civarında c parametresinin değerlerine göre sistem durumunu değiştirmektedir. Bu üstelin pozitif değerleri için sistem hiperkaotik, negatif değerleri için kaotik özellik göstermektedir.



Şekil 3.31. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin kaos ile hiperkaos arasında geçişler yaptığı bir aralığı gösteren detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($c=6-7$)

Lyapunov üstelleri spektrumu yardımıyla boyut analizi yapmak üzere sistemin hiperkaotik davranış gösterdiği $c=6.29$ noktasındaki ilgili Lyapunov üstelleri $L_1=0.7475$, $L_2=0.255$, $L_3=0$ ve $L_4=-12.67$ olarak bulunur. Bulunan bu değerler Denklem (3.39)'da yerlerine yazılacak olursa sistemin boyutu;

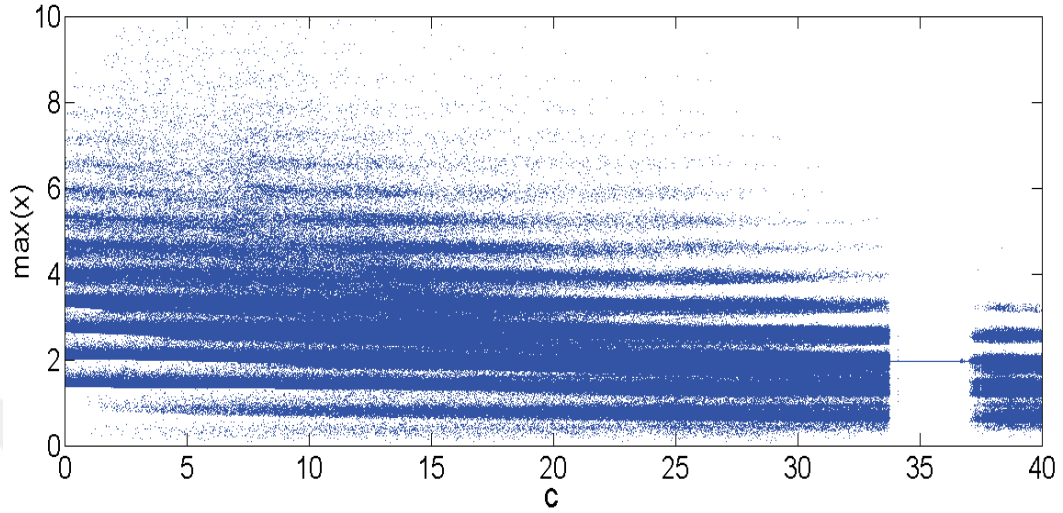
$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 3 + \frac{L_1 + L_2 + L_3}{|L_4|} = 3.0791239147 \quad (3.39)$$

olarak elde edilir.

3.4.2. Çatallaşma diyagramı analizi

Şekil 3.32.'de, yerel maksimum x 'in c 'ye göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı görülmektedir ($\omega=9.6\text{rad/sn}$). Daha önceden de belirtildiği gibi bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik

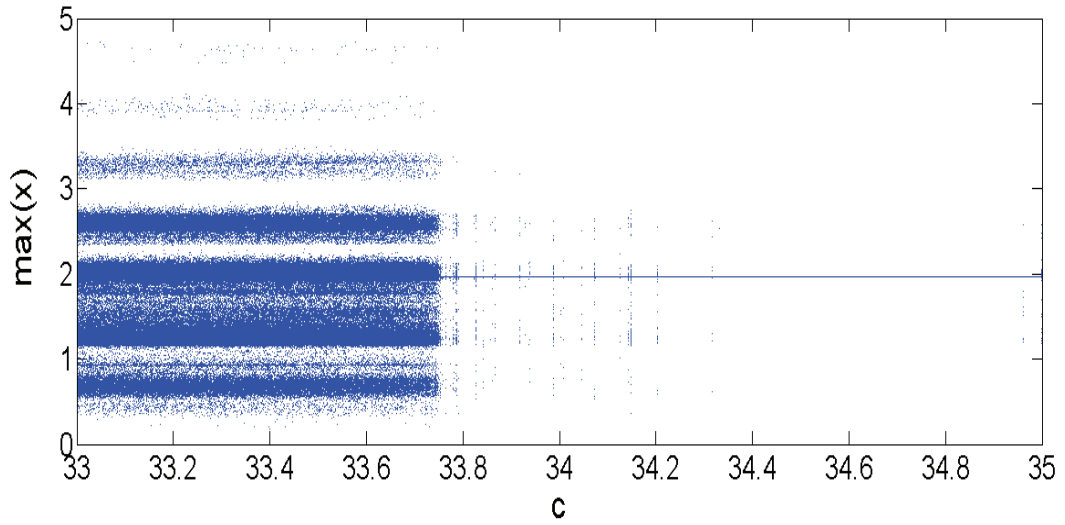
özelliik göstermelidir. Şekil 3.29. ile Şekil 3.32. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiğı görölmektedir.



Şekil 3.32. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin çatallaşma diyagramı (c=0-40)

Çatallaşma diyagramında göröleceğı üzere hiperkaotik Lorenz B sistemi kaotik durum, tanjant çatallaşması, geniş ölçek periyodik durum gibi farklı sistem durumları göstermektedir. Bununla beraber, sistemin eşik değeri olan tanjant çatallaşma noktası zayıf sinyal tespiti için en uygun noktadır. Bu sistem için tanjant çatallaşma noktası, c parametresinin 33.771 değerinden 33.772 değerine geçiş yaptığı noktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir.

Şekil 3.33.'te, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren deteylandırılmış çatallaşma diyagramı verilmektedir ($\omega=9.6\text{rad/sn}$). c'nin herhangi bir değeri için yerel maksimum x oldukça fazla noktada değeri alıyorsa, c'nin bu değeri için sistem kaotiktir denilir. c parametresinin değerinin 33.771'den 33.772'ye çıktığı tanjant çatallaşma noktasında yerel maksimum x değeri belli bir nokta üzerinde yoğunlaşmaya başlamaktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma geçmektedir. Bu kritik nokta zayıf sinyal bilgisi tespit çalışmaları için kullanılabilecek bir noktadır.



Şekil 3.33. Hiperkaotik Lorenz B sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı (c=33-35)

3.5. Duffing-Holmes Sistemi

Duffing-Holmes sistemi üçüncü dereceden kaotik bir sistem olup oldukça iyi derecede genlik ve frekans hassasiyetine sahiptir. Bu özelliği ile Duffing-Holmes osilatörü, gürültü altında zayıf sinyal tespit çalışmalarında sıklıkla kullanılmıştır. Sistemin dinamik modeli Denklem (3.40)'da gösterildiği gibidir.

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + x^3(t) = a \sin(t) \quad (3.40)$$

Burada $(-x(t) + x(t)^3)$ ifadesi doğrusal olmayan düzeltme kuvvetini, k kararsızlığı önleme sabitini ve a sürülme kuvvetinin genliğinin ifade eder. k parametresi sabit tutulup a 'nın değeri arttırılırsa, sabit nokta, periyodik durum, kaotik durum, kaotik kritik durum ve geniş-ölçek periyodik durum gibi sistem davranışları gözlemlenir.

Duffing-Holmes sisteminin yüksek frekans değerlerine uyumlu hale gelmesi için sistemin frekans dönüşümünün yapılması gereklidir. $t = \omega\tau$ olarak tanımlandığında, sırasıyla $x(t)$, $\dot{x}(t)$ ve $\ddot{x}(t)$ Denklem (3.41)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x(\omega\tau) = x_\tau(\tau) \\
 \frac{dx(t)}{dt} &= \frac{1}{\omega} \frac{dx_\tau(\tau)}{d\tau} \\
 \frac{d^2x(t)}{dt^2} &= \frac{1}{\omega^2} \frac{d^2x_\tau(\tau)}{d\tau^2}
 \end{aligned} \quad (3.41)$$

Denklem (3.41)'deki ifadeler dinamik denklemde yerlerine yazılırsa, sistemin dinamik denklemi Denklem (3.42)'de gösterildiği gibi olur.

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2x_\tau(\tau)}{d\tau^2} + x_\tau^3(\tau) = a \sin(\omega\tau) \quad (3.42)$$

Burada ω periyodik sürülme teriminin açısal frekansını ifade etmektedir. Denklem (3.42)'deki denklemi durum değişkenleri formunda ifade edersek Denklem (3.43) elde edilir.

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + x - x^3 + a \sin(\omega\tau) = 0 \quad (3.43)$$

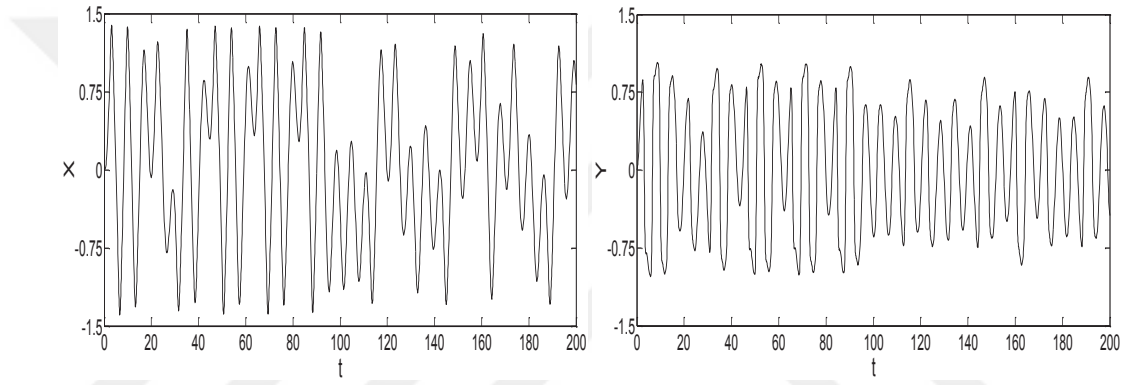
Bununla beraber, Li ve Yang doğrusal olmayan denklemin kuvveti artırılarak sistemin hassasiyetinin artırılabilceğini göstermiştir [115]. Geliştirilmiş sistem Denklem (3.44)'te gösterildiği gibidir.

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + x^3 - x^5 + a \sin(\omega\tau) = 0 \quad (3.44)$$

Denklem (3.44)'te gösterilen sistem iki boyutlu otonom olmayan bir sistemdir. Bu sistemin üç boyutlu otonom bir sisteme dönüştürülmesi Denklem (3.45)'de gösterildiği gibi olur ($z=\omega t$).

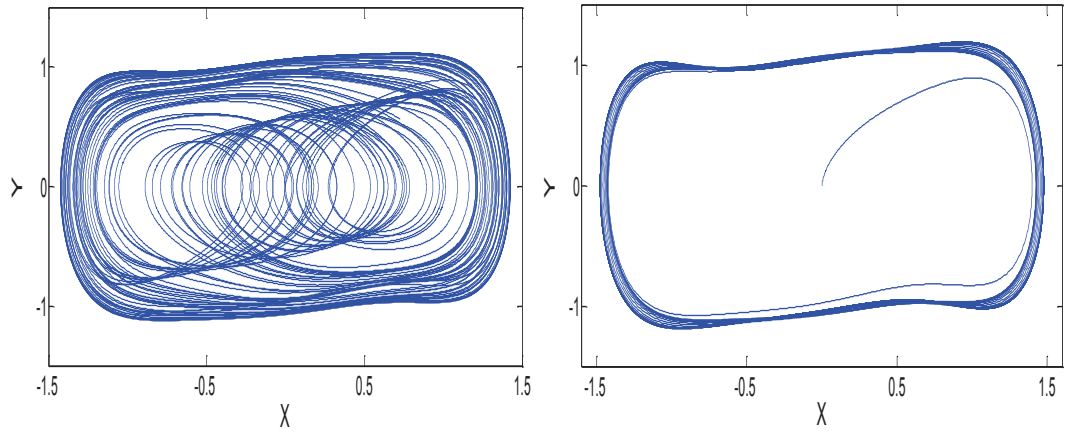
$$\ddot{z} + z^3 - z^5 + a \sin(z)) \quad (3.45)$$

Burada x , y ve z durum değişkenlerini ifade etmektedir. Sistem durumundaki değişimleri gözlemlemek için a sürülme terimi parametresi kullanılabilmektedir. Denklemden sürülme terimi parametresi $a=0.7$, parametre $k=0.5$, açısal frekans $\omega=1$ ve başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=0$, $z(0)=0$ olarak alındığında, kaotik sistemin zaman serileri Şekil 3.34.'te gösterildiği gibi olur.



Şekil 3.34. Duffing-Holmes sistemi için zaman serileri

Sistemin sırasıyla $a=0.7256$ ve $a=0.7257$ için x - y kaotik faz portreleri ise Şekil 3.35.'te gösterildiği gibi olur. Şekilde de görüleceği üzere sistem durumu kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma geçmektedir.

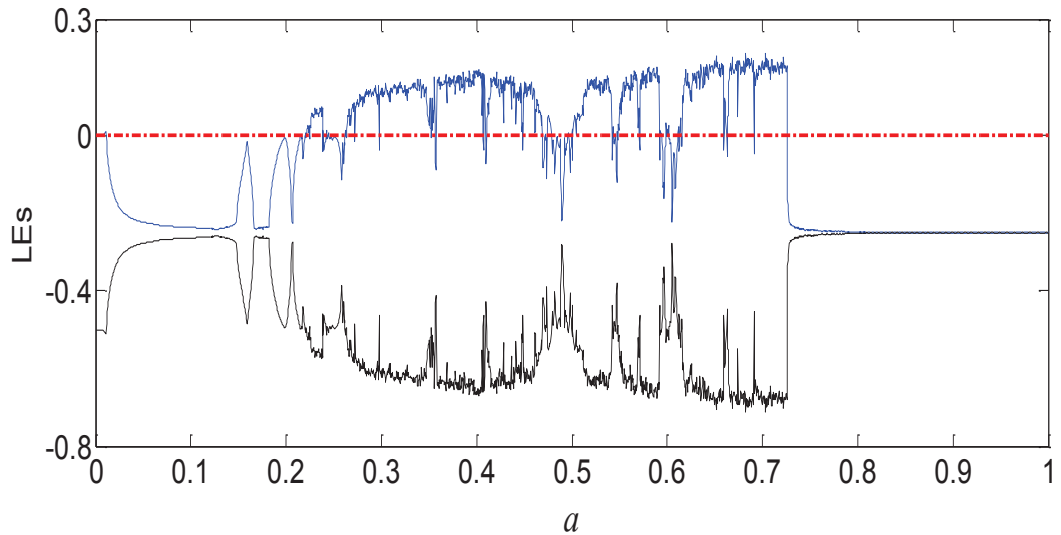


Şekil 3.35. Duffing-Holmes sisteminin $a = 0.7256$ ve $a = 0.7257$ için x-y faz portreleri ($\omega=1\text{rad/sn}$)

Sonuç olarak, Duffing-Holmes sistemi sinüzoidal kaynağın genlik değerinin değişmelerine yüksek duyarlılık gösterdiğinden zayıf sinyal tespit çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir sistemdir.

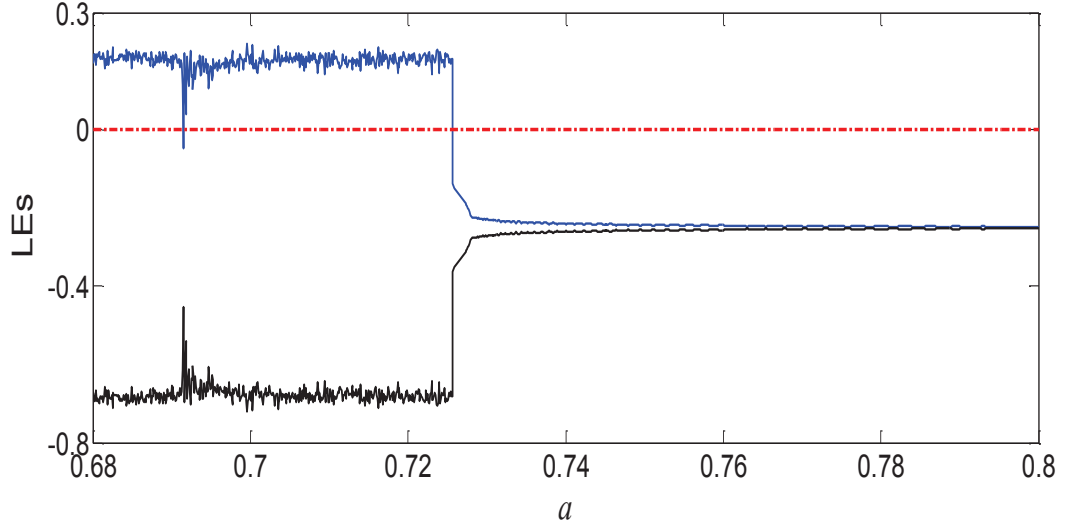
3.5.1. Lyapunov üstelleri analizi

Şekil 3.36.'da, Duffing-Holmes sisteminin a parametresinin 0-1 değer aralığında değişen değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$).



Şekil 3.36. Duffing-Holmes sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($a=0-1$)

Şekil 3.36.'da görüldüğü üzere sistem 0-0.21 aralığında kaosta değildir. Bu aralıkta limit döngü davranışı göstermektedir. 0.21 ile 0.725 aralığında çoğunlukla kaotik durumda olup bazı değerlerde periyodik duruma girip çıkmaktadır. a parametresinin değeri 0.726 olduğunda, birinci Lyapunov üstelinin çok ani ve oldukça belirgin şekilde negatif değere indiği görülmektedir. Bu noktada sistem kaotik durumdan çıkmakta ve geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir. Sistem bu davranışını parametrenin 1 değerine kadar devam ettirmektedir. Sistemin sinüzoidal kaynağın genlik değerini ifade eden a parametresinin değişmelerine oldukça yüksek duyarlılık gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak, Duffing-Holmes sisteminin uzun bir aralıkta kaotik olmasının ardından ani ve keskin bir değişimle periyodik duruma geçmesi ve uzun bir değer aralığında bu davranışı sürdürmesi, bu sinüzoidal sistemle zayıf sinyal tespit çalışmalarının yapılabileceğini göstermektedir. Sinyal tespit çalışmasının kritik noktasının bu ani ve keskin geçiş noktası ($a=0.725$) olması uygun olacaktır. Şekil 3.37.'de, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylı Lyapunov üstelleri spektrumu verilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$).



Şekil 3.37. Duffing-Holmes sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu ($a=0.68-0.8$)

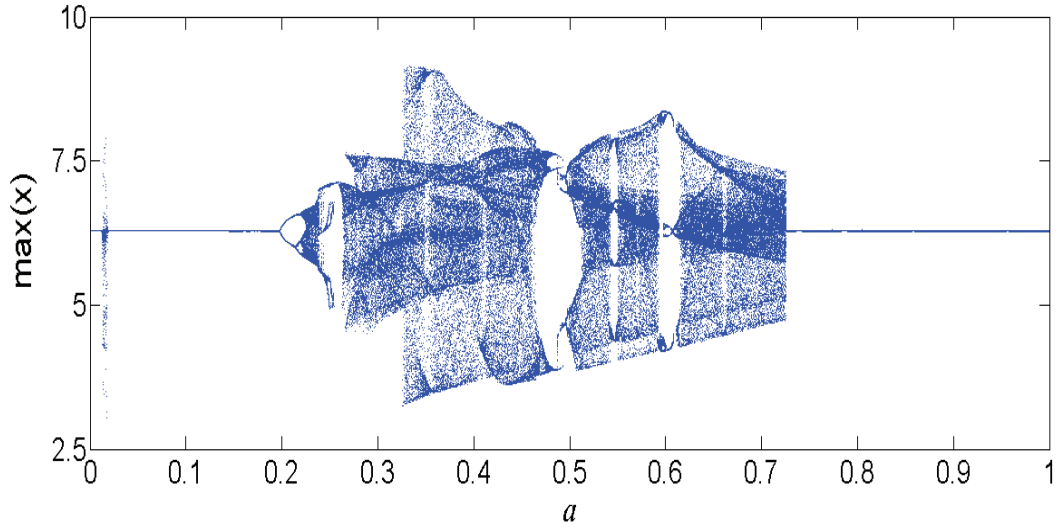
Lyapunov üstelleri spektrumu yardımıyla boyut analizi yapmak üzere sistemin kaotik davranış gösterdiği $a=0.7$ noktasındaki ilgili Lyapunov üstelleri $L_1=0.1767$, $L_2=0$ ve $L_3=-0.6767$ olarak bulunur. Bulunan bu değerleri Denklem (3.46)'da yerlerine yazacak olursak sistemin boyutu;

$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 2 + \frac{L_1 + L_2}{|L_3|} = 2.261120142 \quad (3.46)$$

olarak elde edilir.

3.5.2. Çatallaşma diyagramı analizi

Şekil 3.38.'de, yerel maksimum x 'in a 'ya göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı görülmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$). Daha önceden de belirtildiği gibi bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik özellik göstermelidir. Şekil 3.36. ile Şekil 3.38. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiği görülmektedir.

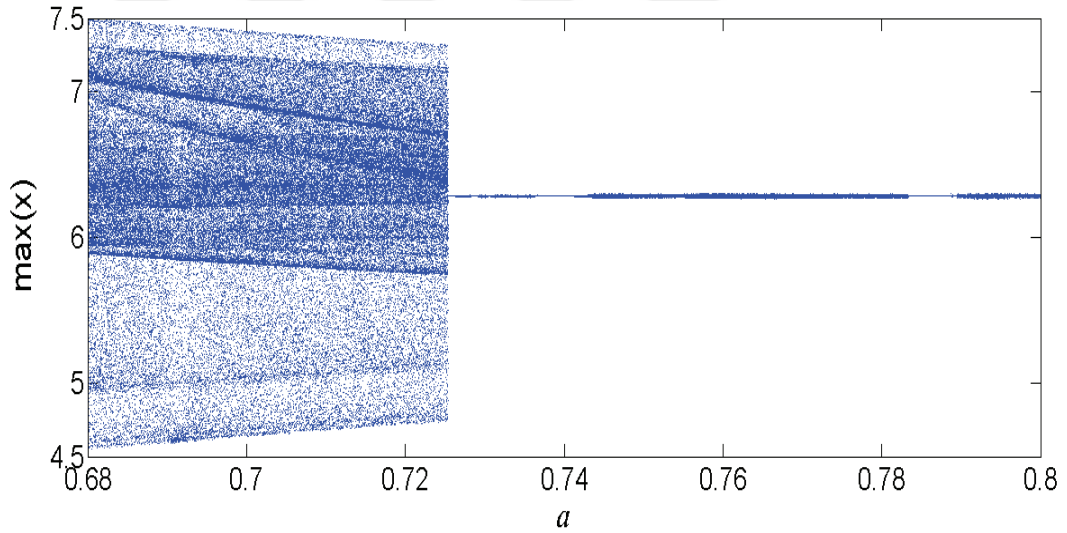


Şekil 3.38. Duffing-Holmes sisteminin çatallaşma diyagramı ($a=0-1$)

Çatallaşma diyagramında görüleceği üzere Duffing-Holmes sistemi limit döngü, çift-periyot çatallaşması, dörtlü-periyot çatallaşması, kaotik durum, tanjant çatallaşması ve geniş-ölçek periyodik durum gibi farklı sistem durumları göstermektedir. Bununla beraber, sistemin eşik değeri olan tanjant çatallaşma noktası zayıf sinyal tespiti için

en uygun noktadır. Bu sistem için tanjant çatallaşma noktası, a parametresinin 0.725 değerinden 0.726 değerine geçiş yaptığı noktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan geniş ölçek periyodik duruma geçmektedir.

Şekil 3.39.'da, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylandırılmış çatallaşma diyagramı verilmektedir ($\omega=1\text{rad/sn}$). a 'nın herhangi bir değeri için yerel maksimum x oldukça fazla noktada değer alıyorsa, a 'nın bu değeri için sistem kaotiktir denilir. a parametresinin değerinin 0.725'den 0.726'ya çıktığı tanjant çatallaşma noktasında yerel maksimum x değeri belli bir nokta üzerinde yoğunlaşmaya başlamaktadır. Bu noktada sistem kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma geçmektedir. Bu kritik nokta zayıf sinyal bilgisi tespit çalışmaları için kullanılabilecek bir noktadır.



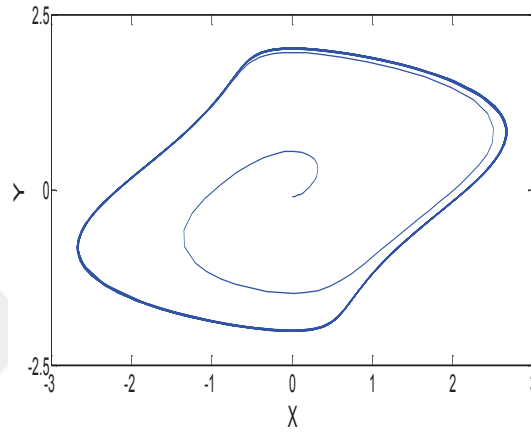
Şekil 3.39. Duffing-Holmes sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($a=0.68-0.8$)

3.6. Van Der Pol Sistemi

Van Der Pol eşitliğinin çözümü, kapalı bir eğri üzerinde bir noktanın hareketini ifade eden osilasyondur. Bu otonom osilasyonun genliği sabittir. Denklem (3.47)'de, Van Der Pol osilatörünün denklemleri verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -x^2 - y \end{aligned} \quad (3.47)$$

Burada x ve y durum değişkenlerini ifade eder. $x(0)=0$ ve $y(0)=-0.1$ için sistemin x - y faz portresi Şekil 3.40.'ta gösterildiği gibidir. Böyle bir çekici “limit döngü” olarak adlandırılır.

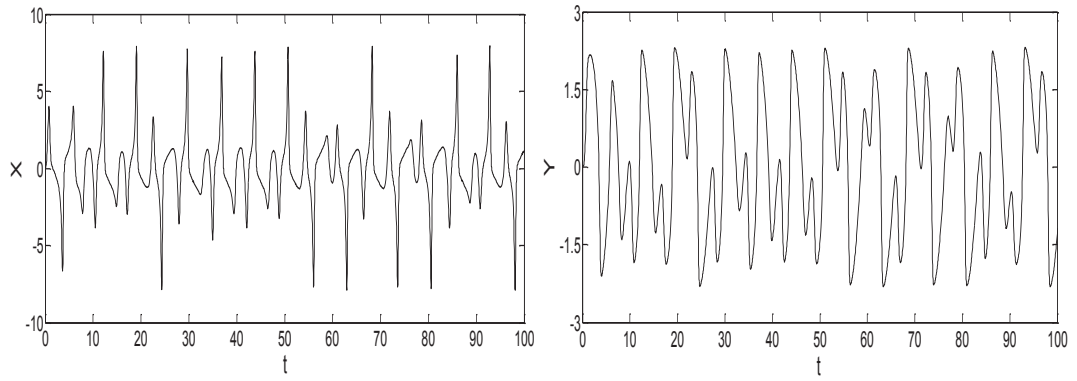


Şekil 3.40. Van Der Pol sisteminin x - y faz portresi

Bununla beraber, Denklem (3.47)'deki doğrusal olmayan denklem sistemine sinüzoidal bir kaynak eklenmesi ile Denklem (3.48)'de gösterilen sürülen Van Der Pol osilatörü elde edilir.

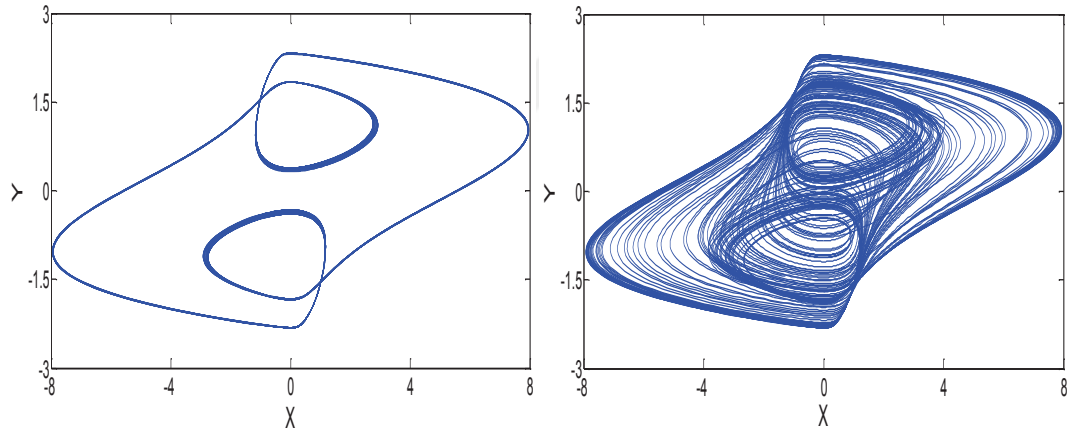
$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= x^2 - y + b \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Burada ω açısal frekansı ve b sürülme teriminin genliğini ifade etmektedir. Sistemin, başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=0$, parametre değerleri $a=3$, $b=5$ ve açısal frekans $\omega=1.788\text{rad/sn}$ için elde edilen kaotik zaman serileri Şekil 3.41.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.41. Van Der Pol sistemi için zaman serileri

Sistemin sırasıyla $b=4.97$ ($t=60-500\text{sn}$) ve $b=4.98$ ($t=500\text{sn}$) için x - y kaotik faz portreleri ise Şekil 3.42.'de gösterildiği gibi olur ($\omega=1.788\text{rad/sn}$). Şekilde de görüleceği üzere sistem durumu periyodik durum benzeri kaotik durumdan kaotik davranışa geçmektedir.

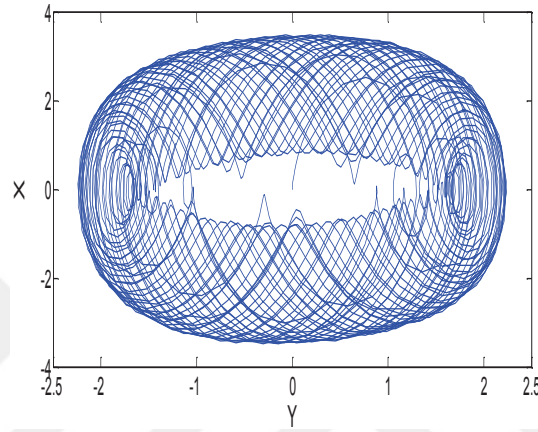


Şekil 3.42. Van Der Pol sisteminin $b=4.97$ ve $b=4.98$ için x - y faz portreleri ($\omega=1.788\text{rad/sn}$)

Sonuç olarak, sürülen Van Der Pol sistemi sinüzoidal kaynağın genlik değerinin değişmelerine yüksek duyarlılık gösterdiğinden zayıf sinyal tespit çalışmalarında kullanılabilecek bir sistemdir. Bununla beraber sisteme βy^3 terimi eklendiğinde, Van Der Pol sisteminin Denklem (3.49)'da gösterilen başka bir versiyonu elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -y^2 - \alpha y - \beta y^3 + b \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Sistemin, başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=0$, parametre değerleri $a=0.1$, $b=0.65$, $\alpha=1$, $\beta=0.1$ ve açısal frekans $\omega=5\text{rad/sn}$ için elde edilen kaotik faz portresi Şekil 3.43.'te gösterildiği gibidir.

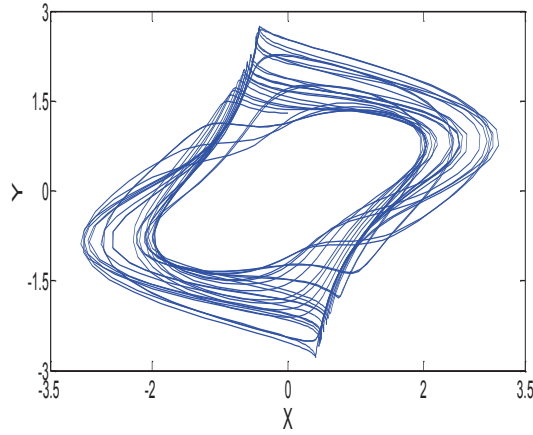


Şekil 3.43. Van Der Pol sisteminin (βy^3 terimi içeren) x-y faz portresi

Denklem (3.50)'de, Van Der Pol sisteminin başka bir versiyonu olan Shaw-Van Der Pol Osilatörü gösterilmektedir. Denklemden de görüleceği üzere sürülme terimi ikinci denkleme eklenmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y^2 - y \\ \dot{y} &= n(\omega t) \end{aligned} \quad (3.50)$$

Sistemin, başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=1.3$, parametre değerleri $a=1$, $b=1$ ve açısal frekans $\omega=2\text{rad/sn}$ için elde edilen kaotik faz portresi Şekil 3.44.'te gösterildiği gibidir.



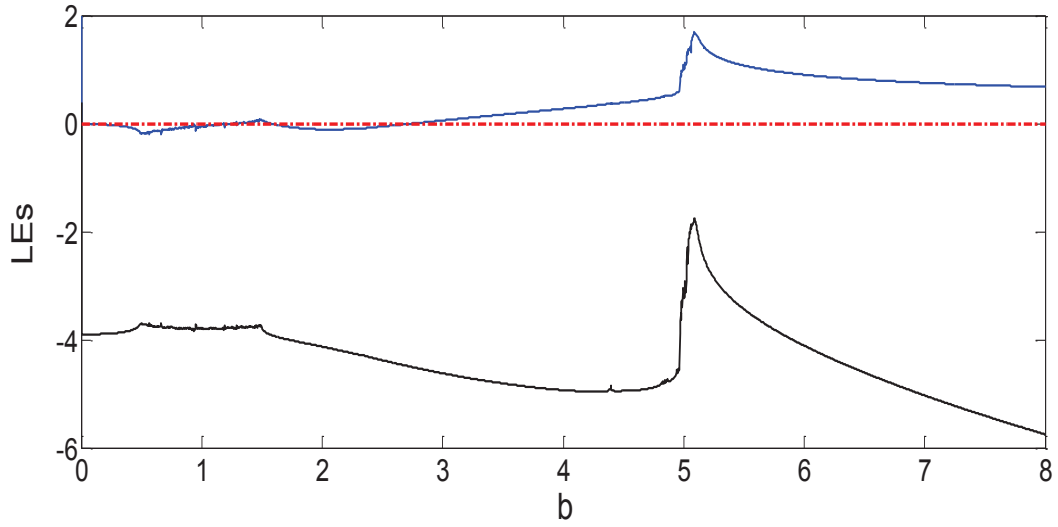
Şekil 3.44. Shaw-Van Der Pol sisteminin x-y faz portresi

3.6.1. Lyapunov üstelleri analizi

Denklem (3.48)'de gösterilen sistem iki boyutlu otonom olmayan bir sistemdir. Bu sistemin üç boyutlu otonom bir sisteme dönüştürülmesi Denklem (3.51)'de gösterildiği gibi olur ($z = \omega t$).

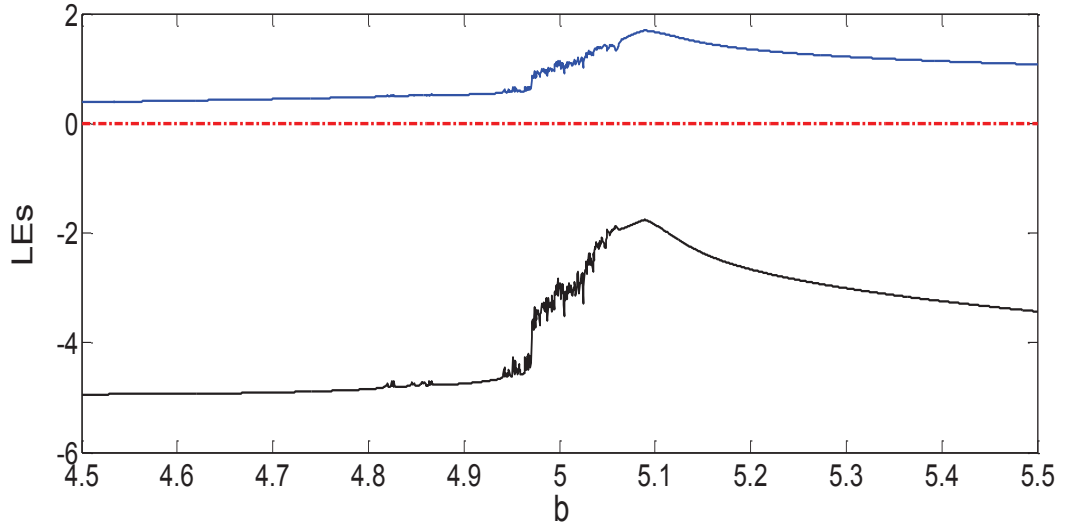
$$\begin{cases} \dot{x} = a - x^2 - y^2 - y + b \sin(z) \\ \dot{y} = x \\ \dot{z} = \omega \end{cases} \quad (3.51)$$

Burada x , y ve z durum değişkenlerini ifade etmektedir. Sistemin başlangıç şartları $x(0)=0$, $y(0)=0$, $z(0)=0$, parametre $a=3$, açısal frekans $\omega=1.788\text{rad/sn}$ olarak alınmıştır. Sistem durumundaki değişimleri gözlemlemek için b sürülme terimi parametresi kullanılabilir. Şekil 3.45.'te, Van Der Pol sisteminin b parametresinin 0-8 değer aralığında değişen değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 3.45. Van Der Pol sisteminin Lyapunov üstelleri spektrumu ($b=0-8$)

Şekil 3.45.'te görüldüğü üzere sistem, 0-2.75 aralığında çoğunlukla kaotik durumda olmayıp bazı değerlerde kaosa girip çıkmaktadır. Sistem, 2.75-4.97 aralığında kaos durumunda olsa da periyodik davranışa benzer bir faz çıktısı vermektedir. b parametresinin değeri 4.98 olduğunda, birinci ve ikinci Lyapunov üstellerinin çok ani ve oldukça belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Sistem bu noktadan 5.1 noktasına kadar periyodik davranışa benzemeyen kaotik davranış göstermektedir. 5.1-8 değer aralığında ise periyodik davranış benzeri kaotik davranış göstermektedir. Sistemin sinüzoidal kaynağın genlik değerini ifade eden b parametresinin değişmelerine duyarlılık gösterdiği görülmektedir. Van Der Pol sisteminin uzun bir aralıkta periyodik durum benzeri kaotik davranış göstermesinin ardından ani bir değişimle periyodik duruma benzemeyen kaotik duruma geçmesi ve belli bir değer aralığında bu davranışı sürdürmesi, bu sinüzoidal sistemle zayıf sinyal tespit çalışmalarının yapılabileceğini göstermektedir. Sinyal tespit çalışmasının kritik noktasının bu ani geçiş noktası ($b=4.97$) olması uygun olacaktır. Şekil 3.46.'da, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren detaylı Lyapunov üstelleri spektrumu verilmektedir ($\omega=1.788\text{rad/sn}$).



Şekil 3.46. Van Der Pol sisteminin detaylandırılmış Lyapunov üstelleri spektrumu (b=4.5-5.5)

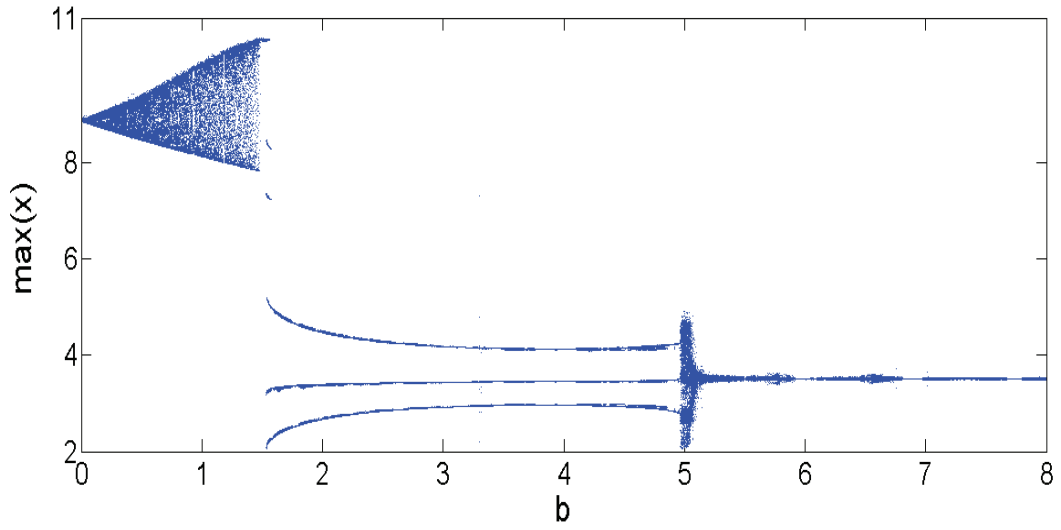
Lyapunov üstelleri spektrumu yardımıyla boyut analizi yapmak üzere sistemin kaotik davranış gösterdiği $b=5$ noktasındaki ilgili Lyapunov üstelleri $L_1= 1.663$, $L_2=0$ ve $L_3=-1.856$ olarak bulunur. Bulunan bu değerleri Denklem (3.52)'de yerlerine yazacak olursak sistemin boyutu;

$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 2 + \frac{L_1 + L_2}{|L_3|} = 2.896012931 \quad (3.52)$$

olarak elde edilir.

3.6.2. Çatallaşma diyagramı analizi

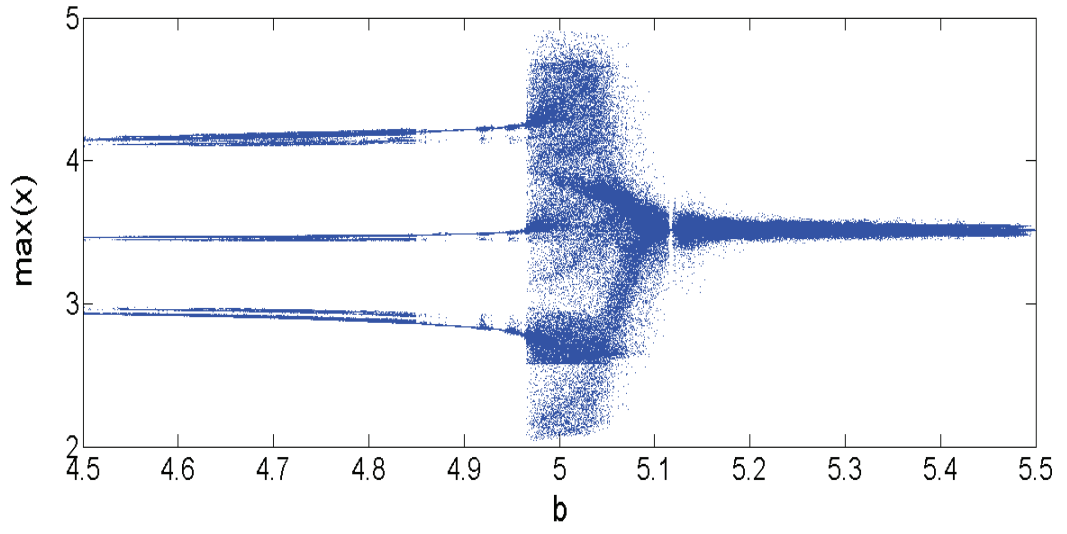
Şekil 3.47.'de, yerel maksimum x 'in b 'ye göre değişimini gösteren çatallaşma diyagramı görülmektedir ($\omega=1.788\text{rad/sn}$). Daha önceden de belirtildiği gibi bir sistemin eşit parametre değerleri için Lyapunov üstelleri spektrumu ile çatallaşma diyagramı aynı aralıklarda aynı sonuçlar vermelidir. Lyapunov üstelleri spektrumunun kaotik özellik gösterdiği yerlerde çatallaşma diyagramı da kaotik özellik göstermelidir. Şekil 3.45. ile Şekil 3.47. karşılaştırıldığında sistem durumlarının paralellik arz ettiği görülmektedir.



Şekil 3.47. Van Der Pol sisteminin çatallaşma diyagramı ($b=0-8$)

Çatallaşma diyagramında görüleceği üzere sürülen Van Der Pol sistemi limit döngü, kaotik durum ve periyodik durum benzeri kaotik durum gibi farklı sistem durumları göstermektedir.

Şekil 3.48.'de, sistemin kritik noktası ve civarını gösteren deteylandırılmış çatallaşma diyagramı verilmektedir ($\omega=1.788\text{rad/sn}$). b parametresinin değerinin 4.97'den 4.98'e çıktığı kritik noktada yerel maksimum x değeri çok daha fazla noktada değer almaktadır. Bu noktada sistem, periyodik durum benzeri kaotik durumdan periyodik davranışa benzemeyen kaotik duruma geçmektedir. Bu kritik nokta sistemin eşik değeri olarak kabul edilebilir ve zayıf sinyal bilgisi tespit çalışmaları için kullanılabilir.



Şekil 3.48. Van Der Pol sisteminin detaylandırılmış çatallaşma diyagramı ($b=4.5-5.5$)

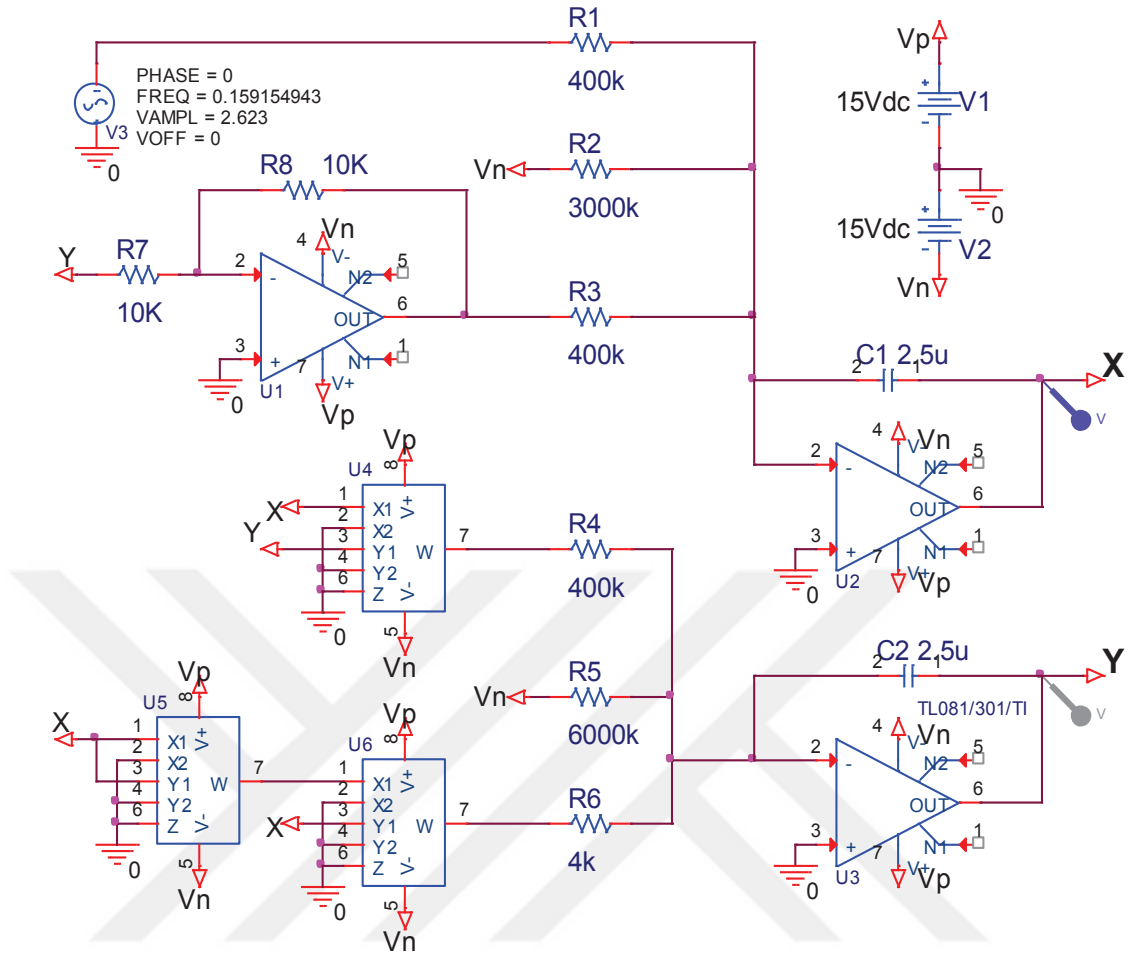
BÖLÜM 4. YENİ BULUNAN KAOTİK SİSTEMLERİN ELEKTRONİK DEVRE MODELLEMELERİ

4.1. Yeni Kaotik Sistem A'nın Elektronik Devre Modellemesi

Yeni kaotik sistem-A'nın $\alpha=2.623$, $a=2$, $b=10$ ve $c=1$ parametre değerlerine göre OrCAD-PSpice® programı kullanılarak tasarlanan elektronik devre şeması Şekil 4.7.'de gösterildiği gibidir. Başlangıç şartları $x(0)=0$ ve $y(0)=0$ olarak alınmıştır. Başlangıç şartlarının değerlerinin 0 olması uygulama için kolaylaştırıcı bir etkidir. Devrede açısal frekans $\omega=1\text{rad/sn}$ olarak alındığından frekans değeri yaklaşık olarak $f=0.159154943\text{Hz}$ alınmıştır.

Devre şeması tasarlanırken 3 adet TL081 opamp, 3 adet AD633 (Analog Devices) çarpma entegresi, 8 adet direnç, 2 adet kondansatör ve bir adet sinüzoidal gerilim kaynağı kullanılmıştır. Bu temel elektronik elemanların kolaylıkla temin edilebilir olması sistemin uygulanabilirliğini arttırmaktadır.

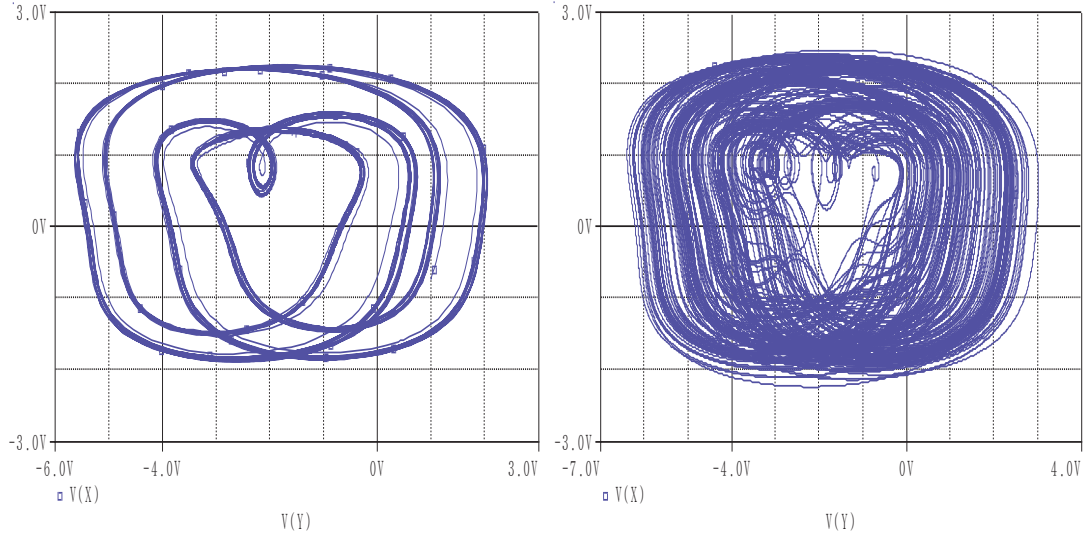
Devrenin direnç değerleri $R_1=400\text{K}$, $R_2=3000\text{K}$, $R_3=R_4=400\text{K}$, $R_5=6000\text{K}$, $R_6=4\text{K}$, $R_7=R_8=10\text{K}$ ve kondansatör değerleri $C_1=C_2=2.5\mu\text{F}$ olarak alınmıştır. Bu değerler sistemin diferansiyel denklemlerinden yapılan modelleme neticesinde elde edilmiştir. Besleme gerilim değerleri $V_N=-15\text{V}$, $V_P=15\text{V}$ 'dur.



Şekil 4.1. Yeni kaotik sistem A'nın elektronik devre tasarımı

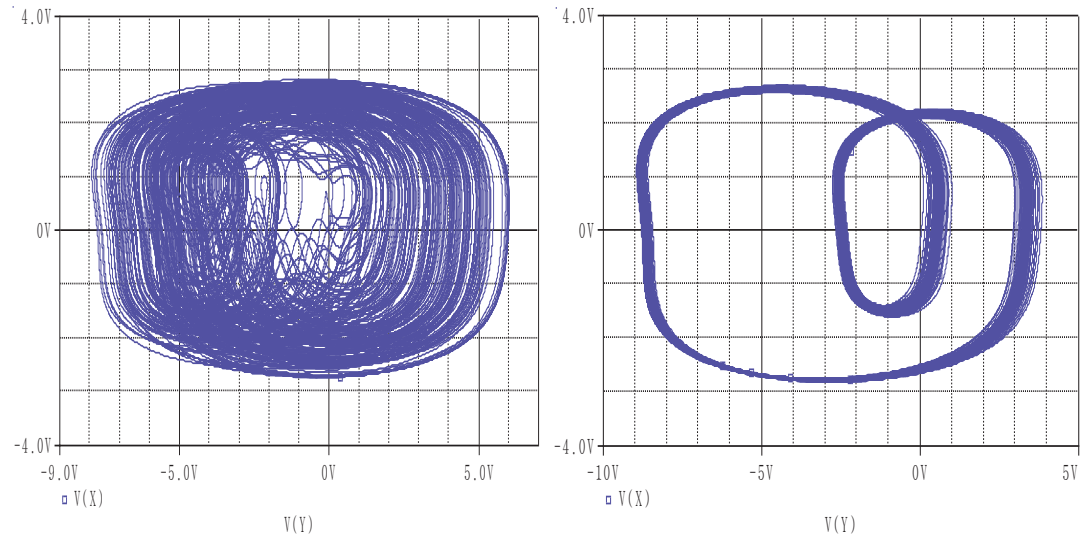
Yeni kaotik sistem A'nın sırasıyla dörtlü-periyot durumda olduğu $\alpha=1.15$ ve kaotik durumda olduğu $\alpha=1.5$ değerleri için OrCAD-PSpice® benzetim programında çizdirilen x-y faz portreleri Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi olur ($\omega=1$).

Yeni kaotik sistem A'nın faz portre çıktılarının genlik değerleri +15V ile -15V arasında olduğundan skala etmek gerekmemektedir. Dikkat edilirse OrCAD-PSpice® benzetim programından elde edilen faz portre çıktıları ile Matlab programından elde edilen faz portre çıktıları paralellik arz etmektedir.



Şekil 4.2. Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=1.15$ ($t=200-1000\text{sn}$) ve $\alpha=1.5$ ($t=1000\text{sn}$) için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div)

Yeni kaos jeneratörü A'nın sırasıyla $\alpha=2.623$ ve $\alpha=2.624$ için OrCAD-PSpice® benzetim programında çizdirilen x-y faz portreleri Şekil 4.3.'te gösterildiği gibi olur ($\omega=1$). Faz portrelerinden de görüleceği üzere sinüzoidal kaynağın genliğinin sadece 1mV'luk artışı ile sistem durumu kaotik kritik durumdan periyodik duruma geçiş yapmaktadır.



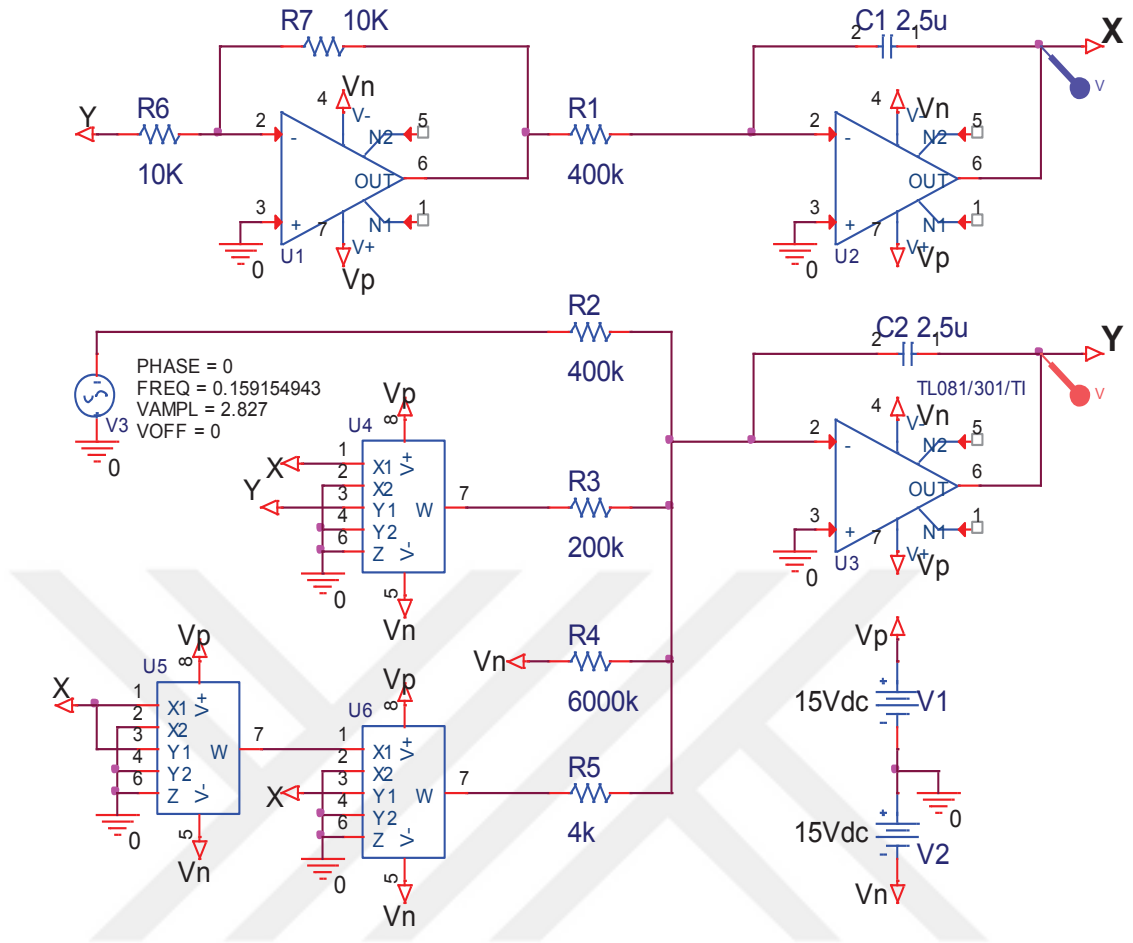
Şekil 4.3. Yeni kaotik A sisteminin $\alpha=2.623$ ($t=1000\text{sn}$) ve $\alpha=2.624$ ($t=200-1000\text{sn}$) için OrCAD-PSpice® programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div)

4.2. Yeni Kaotik Sistem B'nin Elektronik Devre Modellemesi

Yeni kaotik sistem-B'nin $\alpha=2.827$, $a=5$ ve $b=1$ parametre değerlerine göre OrCAD-PSpice® programı kullanılarak tasarlanan elektronik devre şeması Şekil 4.4.'te gösterildiği gibidir. Başlangıç şartları ilk sistemde olduğu gibi $x(0)=0$ ve $y(0)=0$ olarak alınmıştır. Başlangıç şartlarının değerlerinin 0 olması uygulama için kolaylaştırıcı bir etkidir. Devrede açısal frekans ilk sistemde olduğu gibi $\omega=1\text{rad/sn}$ olarak alındığından frekans değeri yaklaşık olarak $f=0.159154943\text{Hz}$ alınmıştır.

Devre şeması tasarlanırken 3 adet TL081 opamp, 3 adet AD633 (Analog Devices) çarpma entegresi, 7 adet direnç, 2 adet kondansatör ve bir adet sinüzoidal gerilim kaynağı kullanılmıştır. Bu temel elektronik elemanların kolaylıkla temin edilebilir olması sistemin uygulanabilirliğini arttırmaktadır.

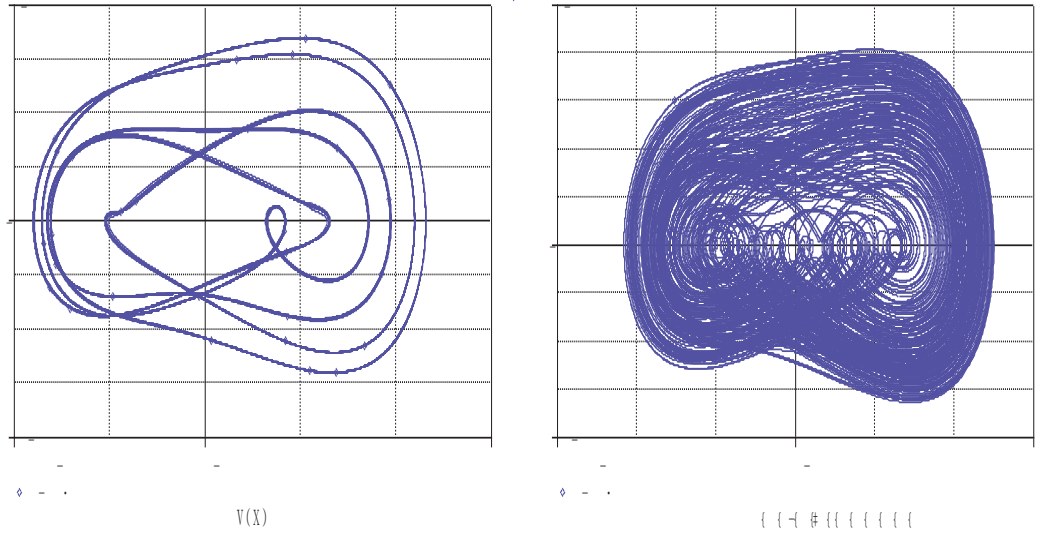
Devrenin direnç değerleri $R_1=R_2=400\text{K}$, $R_3=200\text{K}$, $R_4=6000\text{K}$, $R_5=4\text{K}$, $R_6=R_7=10\text{K}$ ve kondansatör değerleri $C_1=C_2=2.5\mu\text{F}$ olarak alınmıştır. Besleme gerilim değerleri $V_N=-15\text{V}$, $V_P=15\text{V}$ 'dur. Bu değerler kaotik sistemin diferansiyel denklemlerinden yapılan modelleme sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Yeni kaotik sistem B'nin elektronik devre tasarımı

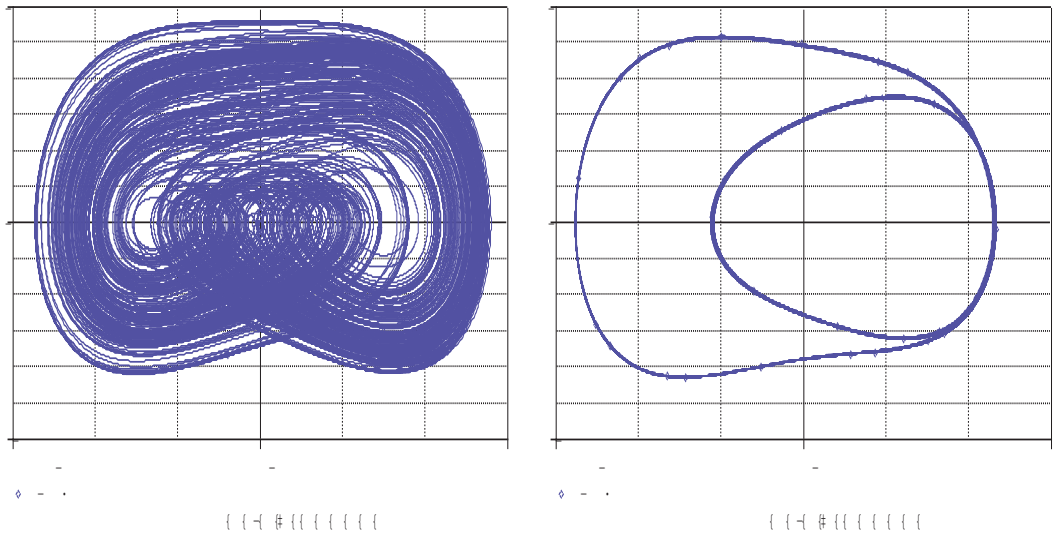
Yeni kaotik sistem B'nin sırasıyla dörtlü-periyot durumunda olduğu $\alpha=1.5$ ve kaotik durumda olduğu $\alpha=2$ değerleri için OrCAD-PSpice® benzetim programında çizdirilen x-y faz portreleri Şekil 4.5.'te gösterildiği gibi olur ($\omega=1$).

Yeni kaotik sistem B'nin faz portre çıktılarının genlik değerleri +15V ile -15V arasında olduğundan skala etmek gerekmemektedir. Dikkat edilirse OrCAD-PSpice® benzetim programından elde edilen faz portre çıktıları ile Matlab programından elde edilen faz portre çıktıları paralellik arz etmektedir.



Şekil 4.5. Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=1.5$ ($t=250-1000\text{sn}$) ve $\alpha=2$ ($t=1000\text{sn}$) için OrCAD-PSpice[®] programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div)

Yeni kaos jeneratörü B'nin sırasıyla $\alpha=2.826$ ve $\alpha=2.827$ için OrCAD-PSpice[®] benzetim programında çizdirilen x-y faz portreleri Şekil 4.6.'da gösterildiği gibi olur ($\omega=1$). Faz portrelerinden de görüleceği üzere sinüzoidal kaynağın genliğinin sadece 1mV'luk artışı ile sistem durumu kaotik kritik durumdan periyodik duruma geçiş yapmaktadır.



Şekil 4.6. Yeni kaotik B sisteminin $\alpha=2.826$ ($t=1000\text{sn}$) ve $\alpha=2.827$ ($t=250-1000\text{sn}$) için OrCAD-PSpice[®] programı x-y faz portre çıktıları (1V/Div)

BÖLÜM 5. YENİ BULUNAN SİSTEMLER İLE LİTERATÜRDEN SEÇİLEN BAZI KAOTİK SİSTEMLERİN ZAYIF SİNYAL TESPİT UYGULAMALARI

5.1. Kaos Teorisi Tabanlı Zayıf Sinyal Tespiti

Bu bölümde, sinyal gürültü oranı (SGO) ifadesi ile ilgili bilgiler verilmiş ve daha önceki bölümlerde detaylı olarak incelenmiş sistemlerin kaos teorisi tabanlı zayıf sinyal tespit (ZST) uygulamaları yapılmıştır.

5.1.1. Sinyal gürültü oranı (SGO) analizi

Sinyal gürültü oranı (SGO), zayıf sinyal bilgisi ile arka plan gürültüsü arasındaki bir ortalama güç oranını ifade eder [114]. SGO girdisi Denklem (5.1)'de gösterildiği gibi olur.

$$(SGO)_i = \frac{H_s(\omega)}{H_n(\omega)} \Big|_{\omega=\omega_0} \quad (5.1)$$

Burada, $H_s(\omega)$ zayıf bilgi sinyalinin güç spektrum genliğini ve $H_n(\omega)$ arka plan gürültünün güç spektrum genliğini ifade etmektedir. $H_s(\omega)$ ve $H_n(\omega)$ ifadelerinin bileşenlerine ayrılmış halleri sırasıyla Denklem (5.2)'de ve Denklem (5.3)'te gösterildiği gibi olur.

$$H_s(\omega) = \begin{cases} \frac{r^2}{4}, & \omega = \pm\omega_0 \\ = 0, & \omega \neq \pm\omega_0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$H_n(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_n^2 \delta(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = P_n^2 \quad (5.3)$$

Buna göre SGO girdisi Denklem (5.4)'te gösterildiği gibi olur.

$$(SGO)_i = \frac{H_s(\omega)}{H_n(\omega)} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{r^2}{4P_n^2} \quad (5.4)$$

Burada P_n arka plan gürültünün gücü ve r zayıf sinyal bilgisinin genliğini ifade etmektedir. Denklem (5.4)'teki ifade logaritmik formda yazılacak olursa, Denklem (5.5) elde edilir.

$$(SGO)_i = 10 \lg \frac{0.5 \times r^2}{P_n} (dB) \quad (5.5)$$

5.2. İncelenen Sistemlerle Zayıf Sinyal Tespit (ZST) Uygulamaları

Bu bölümde, Bölüm 3'te incelenen kaotik sistemlerin zayıf sinyal tespit uygulamaları yapılmıştır.

5.2.1. Yeni kaotik sistem A ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları

Yeni kaotik sistem A ile yüksek frekans değerlerinde zayıf sinyal tespit uygulaması yapmak için Denklem (3.14)'te verilen sistemde bazı frekans dönüşümleri yapılmalıdır. Sistemin frekans dönüşümü yapılmış hali Denklem (5.6)'te gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha \sin(z) + 2 \\ \dot{y} &= \nu / 10 - x^3 + 1 \\ \dot{z} &= \end{aligned} \quad (5.6)$$

Yeni kaotik sistem A ile ZST uygulaması yapabilmek için Denklem (5.6)'ya zayıf sinyal bilgisi ve arka plan gürültüden oluşan bir giriş sinyali (input) eklenir. Sistemin giriş sinyali eklenmiş hali Denklem (5.7)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\alpha \sin(z) + input) + 2 \\ \dot{y} &= (y/10) - x^3 + 1 \\ \dot{z} &= \dots \end{aligned} \quad (5.7)$$

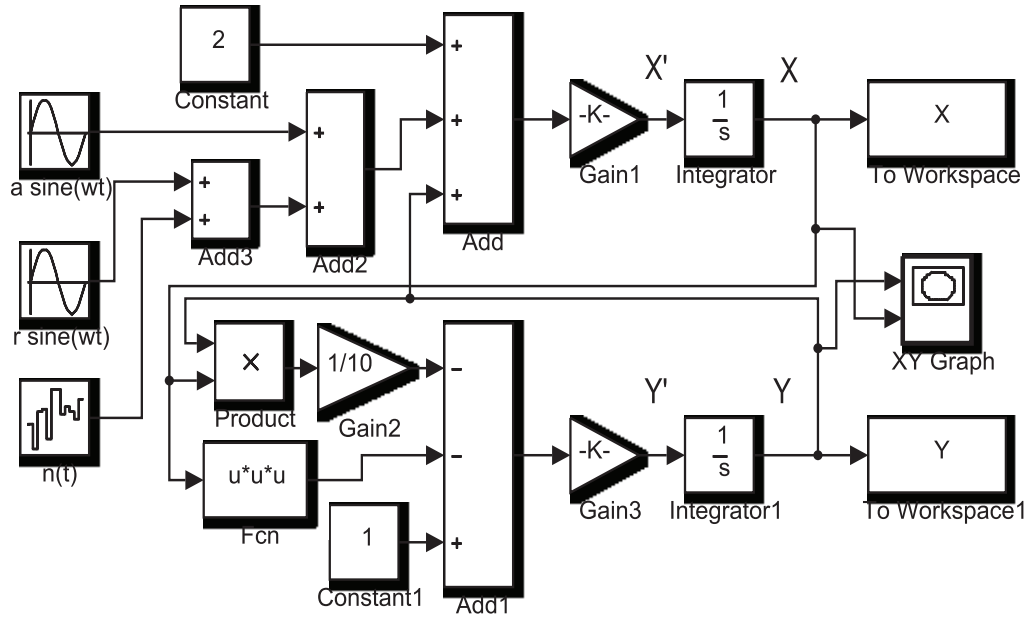
Buradaki giriş sinyali (input) Denklem (5.8)'de ifade edildiği gibi olur.

$$input = s(t) + n(t) = r \sin(\omega t) + n(t) \quad (5.8)$$

Denklem (5.8)'de, $r \sin(\omega t)$ zayıf sinyal bilgisini, $n(t)$ ise beyaz gürültüyü ifade eder.

Zayıf sinyal tespit uygulaması için gerekli olan benzetim modeli Matlab-Simulink® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yazılım ile Euler, Heun, dördüncü dereceden Runge Kutta (RK4), beşinci dereceden Runge Kutta (RK5), Dormand-Prince gibi nümerik analiz algoritmaları kullanılarak diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü gerçekleştirilir [139]. Bu yolla sürekli zamanlı sistemler ayrıklaştırılıp birçok sayısal uygulamada kullanılabilir.

Yeni kaotik sistem A'nın sayısal çözümü için RK4 algoritması kullanılmıştır. RK4 algoritması hassas sonuçlar vermekle beraber hata oranı oldukça düşüktür. Bununla beraber bu algoritma, RK5 gibi algoritmalara göre daha az gelişmiş olsada daha basit yapılıdır [142]. Şekil 5.1.'de, yeni kaotik sistem A'nın farklı frekans değerlerine uyumlu olan ZST uygulaması blok diyagramı görülmektedir. Sistem sinyal kaynağı, integral alıcı, fonksiyon ve toplama blokları içermektedir. Benzetim süresi, $\omega=1\text{rad/sn}$ için $250\text{sn}-1000\text{sn}$ arasındadır.



Şekil 5.1. Yeni kaotik sistem A'nın zayıf sinyal tespiti uygulaması blok diyagramı

Tespit işleminin üç adımı aşağıda belirtildiği gibidir:

Adım-1. Sistem durumu kaotik iken arka plan gürültü sisteme eklenir.

Adım-2. Bu adımda değişken parametrenin (α) değerlerine göre sistemin durumu gözlemlenir. α 'nın değeri ilk tanjant çatallaşma noktasına geldiğinde, sistem durumu kaotik kritik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma ani ve belirgin bir biçimde geçecektir. Bu kritik nokta zayıf sinyal bilgisinin tespiti için en uygun olan noktadır. Bu noktadaki α değeri not edilir.

Adım-3. Son olarak sisteme zayıf sinyal bilgisi eklenir. α 'nın değeri sistemi kritik durumdan periyodik duruma geçirecek noktaya tekrar getirilir. Bu ikinci tanjant çatallaşma noktası da not edilir. Gürültü altındaki zayıf sinyal bilgisinin genlik değeri, bulunan iki tanjant çatallaşma noktası arasındaki farka eşittir.

Tablo 5.1'de yeni kaotik sistem A'nın değişen frekans değerlerinde ZST uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 5.1. Yeni Kaotik Sistem A'nın ZST Uygulaması Sonuçlarının Karşılaştırılması

Frekans (rad/sn)	Zayıf Sinyalin Genliği (r)	Tespit Eşik Değeri (α)	Gürültü Gücü (P_n)	Gürültü Etkisi	SGO (dB)
$\omega=1$	10^{-9}	2.565345882	10^{-4}	2.6179337×10^{-2}	-143
$\omega=10^3$	10^{-9}	2.565345882	10^{-7}	2.6179337×10^{-2}	-113
$\omega=10^5$	10^{-9}	2.565345882	10^{-9}	2.6179337×10^{-2}	-93

Tablo 5.1.'de görüleceği üzere, benzetim çalışmasının sonuçları çalışılan sistemin yüksek doğrulukla tespit yapabildiğini göstermiştir. Sistemin frekans değeri $\omega=1$ rad/sn, zayıf bilgi sinyalinin genliği 10^{-9} V ve gürültünün gücü 10^{-4} W alındığında tespit eşik değeri $\alpha= 2.565345882$ olur. Buna göre kaotik tespit sisteminin doğrulukla tespit yapabildiği en küçük sinyal gürültü oranı (SGO) eşiği aşağıdaki gibi olur:

$$SGO = 10 \lg \frac{0.5 \times (10^{-9})^2}{(10^{-4})^2} = -143.0103 (dB)$$

Bununla beraber, önerilen sistem A yüksek frekans değerlerinde de ZST yapabilmektedir. Frekans değerleri $\omega=10^3$ rad/sn ve $\omega=10^5$ rad/sn olduğunda, en küçük sinyal gürültü oranları sırasıyla -113dB ve -93dB olur.

5.2.2. Yeni kaotik sistem B ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları

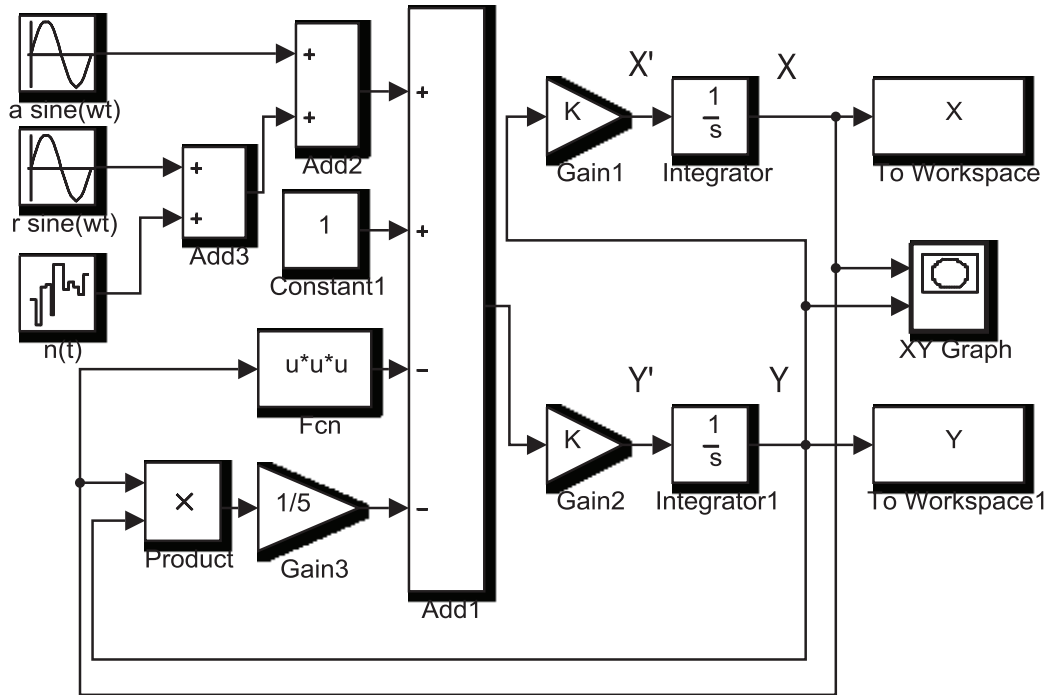
Yeni kaotik sistem B ile yüksek frekans değerlerinde zayıf sinyal tespit uygulaması yapmak için Denklem (3.29)'da verilen sistemin frekans dönüşümleri yapılmalıdır. Sistemin frekans dönüşümü yapılmış hali Denklem (5.9)'da gösterildiği gibi olur.

$$\dot{z} = \nu / 5 - x^3 + \alpha \sin(z) + 1) \quad (5.9)$$

Yeni kaotik sistem B ile ZST uygulaması yapabilmek için Denklem (5.9)'a zayıf sinyal bilgisi ($r\sin(\omega t)$) ve arka plan gürültüden ($n(t)$) oluşan bir giriş sinyali (input) eklenir. Sistemin giriş sinyali eklenmiş hali Denklem (5.10)'da gösterildiği gibi olur.

$$\dot{v} = \frac{v}{5} - x^3 + (\alpha \sin(z) + input) + 1 \quad (5.10)$$

Zayıf sinyal tespit uygulaması için gerekli olan benzetim modeli Matlab-Simulink® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Yeni kaotik sistem B'nin sayısal çözümü için RK4 algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.2.'de, yeni kaotik sistem B'nin farklı frekans değerlerine uyumlu olan ZST uygulaması blok diyagramı görülmektedir. Sistem sinyal kaynağı, integral alıcı, fonksiyon ve toplama blokları içermektedir. Benzetim süresi, $\omega=1$ rad/sn için 250sn-750sn arasındır.



Şekil 5.2. Yeni kaotik sistem B'nin zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı

Yeni kaotik sistem B ile ZST çalışması yapmak için Bölüm 5.2.1.'de ifade edilen üç adım sırasıyla uygulanır. Burada, kritik nokta olarak sistem durumunu ani ve keskin

biçimde kaotik durumdan geniş-ölçek periyodik duruma değiştiren nokta alınmalıdır. Bu adımların uygulanması ile elde edilen ZST sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.2.'de gösterildiği gibi olur.

Tablo 5.2. Yeni Kaotik Sistem B'nin ZST Uygulaması Sonuçlarının Karşılaştırılması

Frekans (rad/sn)	Zayıf Sinyalin Genliği (r)	Tespit Eşik Değeri (α)	Gürültü Gücü (P_n)	Gürültü Etkisi	SGO (dB)
$\omega=1$	10^{-9}	2.790818136	10^{-4}	-3.352802×10^{-3}	-143
$\omega=10^3$	10^{-9}	2.790818136	10^{-7}	-3.352802×10^{-3}	-113
$\omega=10^5$	10^{-9}	2.790818136	10^{-9}	-3.352802×10^{-3}	-93

Tablo 5.2.'de görüleceği üzere, benzetim çalışmasının sonuçları yeni kaotik sistem B'nin de kabul edilebilir seviyede doğrulukla tespit yapabildiğini göstermiştir. Benzetim süresince eşik değeri civarında sistem durumlarının değişimi zaman almaktadır. Bundan dolayı tespit doğruluğu azalmaktadır. Sistemin frekans değeri $\omega=1$ rad/sn, zayıf bilgi sinyalinin genliği 10^{-9} V ve gürültünün gücü 10^{-4} W alındığında tespit eşik değeri $\alpha=2.790818136$ olur. Buna göre kaotik tespit sisteminin doğrulukla tespit yapabildiği en küçük SGO eşiği aşağıdaki gibi olur:

$$SGO = 10 \lg \frac{0,5 \times (10^{-9})^2}{(10^{-4})^2} = -143,0103(dB)$$

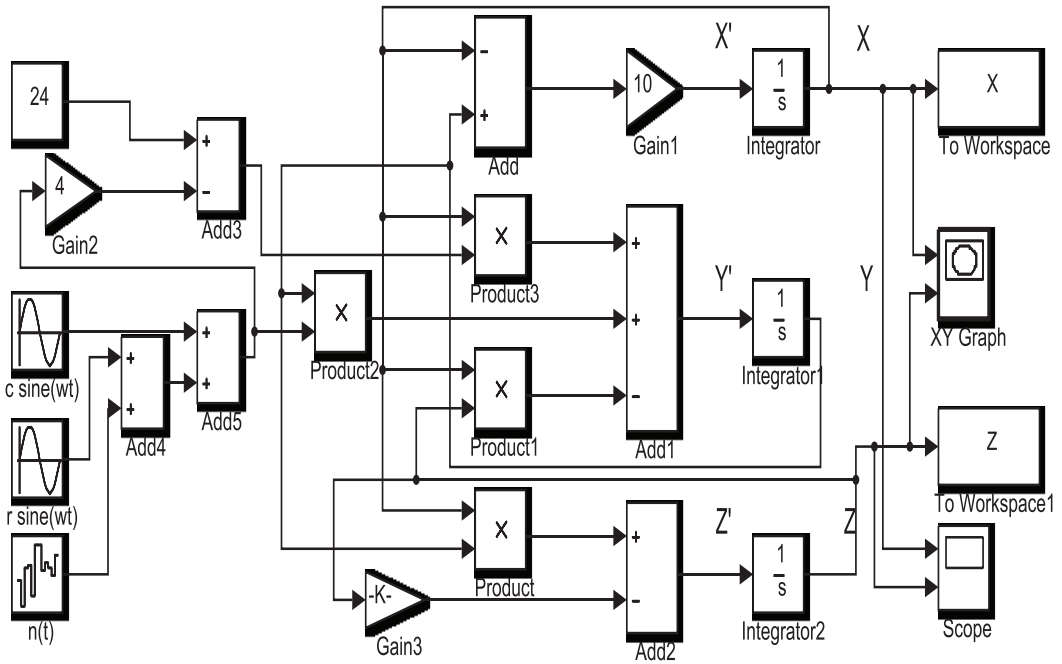
Bununla beraber, yeni sistem B yüksek frekans değerlerinde de ZST yapabilmektedir. Frekans değerleri $\omega=10^3$ rad/sn ve $\omega=10^5$ rad/sn olduğunda, en küçük sinyal gürültü oranları sırasıyla -113dB ve -93dB olur.

5.2.3. Hiperkaotik Lorenz A sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları

Bu bölümde Hiperkaotik Lorenz A sistemi ile ZST uygulaması yapılmıştır. Benzetim çalışması yapabilmek için öncelikle Denklem (3.34)'e zayıf sinyal bilgisi ($r \sin(\omega t)$) ve arka plan gürültüden ($n(t)$) oluşan bir giriş sinyali (input) eklenir. Sistemin giriş sinyali eklenmiş hali Denklem (5.11)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x) \\ \dot{y} &= (c \sin(u) + input))x - xz + (c \sin(u) + input)y \\ \dot{z} &= -x/3 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Hiperkaotik Lorenz A sistemi ile ZST uygulaması yapmak için gerekli olan benzetim modeli Matlab-Simulink® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Hiperkaotik Lorenz A sisteminin sayısal çözümü için RK4 algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.3.'te, Hiperkaotik Lorenz A sisteminin ZST uygulaması blok diyagramı görülmektedir. Sistem sinyal kaynağı, integral alıcı, fonksiyon ve toplama blokları içermektedir. Benzetim süresi 150sn-1500sn arasındır.



Şekil 5.3. Hiperkaotik Lorenz sistem A'nın zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı

Hiperkaotik Lorenz A sistemi ile ZST çalışması yapmak için Bölüm 5.2.1.'de ifade edilen üç adım sırasıyla uygulanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, değişken parametre olarak α 'nın değil c 'nin kullanıldığıdır. Bu adımların uygulanması ile elde edilen ZST sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.3.'te gösterildiği gibi olur.

Tablo 5.3. Hiperkaotik Lorenz A Sisteminin ZST Uygulaması Sonuçlarının Karşılaştırılması ($\omega=10, c_0=0.991868$)

Zayıf Sinyalin Genliği (r)	Tespit Eşik Değeri (c)	Gürültü Gücü (P_n)	Gürültü Etkisi	SGO (dB)
10^{-3}	1.002	10^{-3}	11×10^{-3}	-33
10^{-4}	0.9968	10^{-4}	5×10^{-4}	-43
10^{-5}	0.99273	10^{-5}	8.7×10^{-4}	-53
10^{-6}	0.992027	10^{-6}	16×10^{-5}	-63
10^{-6}	0.992871	10^{-5}	10.03×10^{-4}	-73
10^{-6}	0.998504	10^{-4}	6.637×10^{-3}	-83

Tablo 5.3.'te görüleceği üzere, benzetim çalışmasının sonuçları Hiperkaotik Lorenz A sisteminin de yüksek doğrulukla ZST yapabildiğini göstermiştir. Sistemin frekans değeri $\omega=10\text{rad/sn}$, zayıf bilgi sinyalinin genliği 10^{-6}V ve gürültünün gücü 10^{-4}W alındığında tespit eşik değeri $c=0.998504$ olur. Buna göre kaotik tespit sisteminin doğrulukla tespit yapabildiği en küçük SGO eşiği aşağıdaki gibi olur:

$$SGO = 10 \lg \frac{0,5 \times (10^{-6})^2}{(10^{-4})^2} = -83(\text{dB})$$

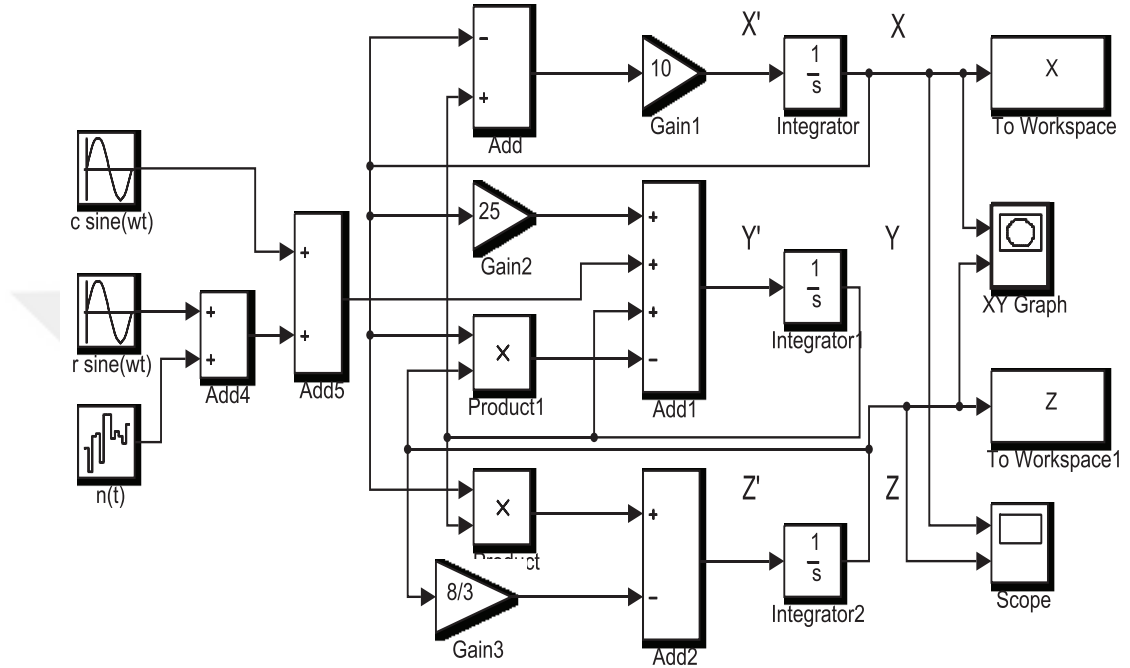
5.2.4. Hiperkaotik Lorenz B sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları

Bu bölümde Hiperkaotik Lorenz B sistemi ile ZST uygulaması yapılmıştır. Benzetim çalışması yapabilmek için öncelikle Denklem (3.38)'e zayıf sinyal bilgisi ($r \sin(\omega t)$) ve arka plan gürültüden ($n(t)$) oluşan bir giriş sinyali (input) eklenir. Sistemin giriş sinyali eklenmiş hali Denklem (5.12)'de gösterildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x + yz \\ \dot{y} &= x + yz + c \sin(u) + input \\ \dot{z} &= -x - yz \\ i &= z/3 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Hiperkaotik Lorenz B sistemi ile tespit uygulaması yapmak için gerekli olan benzetim modeli Matlab-Simulink® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

Hiperkaotik Lorenz B sisteminin sayısal çözümü için RK4 algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.4.'te, Hiperkaotik Lorenz B sisteminin tespit uygulaması blok diyagramı görülmektedir. Sistem sinyal kaynağı, integral alıcı, fonksiyon ve toplama blokları içermektedir. Benzetim süresi 150sn-1500sn arasındır.



Şekil 5.4. Hiperkaotik Lorenz sistem B'nin zayıf sisnyal tespit uygulaması blok diyagramı

Hiperkaotik Lorenz B sistemi ile tespit çalışması yapmak için Bölüm 5.2.1.'de ifade edilen üç adım sırasıyla uygulanır. Burada, değişken parametre olarak c parametresi kullanılmıştır. Bu adımların uygulanması ile elde edilen ZST sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.4.'te gösterildiği gibi olur.

Tablo 5.4. Hiperkaotik Lorenz B Sisteminin ZST Uygulaması Sonuçlarının Karşılaştırılması ($\omega=9.6$, $c_0=33.771700$)

Zayıf Sinyalin Genliği (r)	Tespit Eşik Değeri (c)	Gürültü Gücü (P_n)	Gürültü Etkisi	SGO (dB)
10^{-3}	33.778	10^{-3}	7×10^{-3}	-33
10^{-4}	33.7729	10^{-4}	12×10^{-4}	-43
10^{-5}	33.77181	10^{-5}	11×10^{-5}	-53
10^{-6}	33.771722	10^{-6}	2.2×10^{-5}	-63
10^{-6}	33.771793	10^{-5}	9.3×10^{-5}	-73
10^{-6}	33.773103	10^{-4}	14.03×10^{-4}	-83

Tablo 5.4.'te görüleceği üzere, benzetim çalışmasının sonuçları Hiperkaotik Lorenz B sisteminin de yüksek doğrulukla ZST yapabildiğini göstermiştir. Sistemin frekans değeri $\omega=9.6\text{rad/sn}$, zayıf bilgi sinyalinin genliği 10^{-6}V ve gürültünün gücü 10^{-4}W alındığında tespit eşik değeri $c=33.773103$ olur. Buna göre kaotik tespit sisteminin doğrulukla tespit yapabildiği en küçük SGO eşiği aşağıdaki gibi olur:

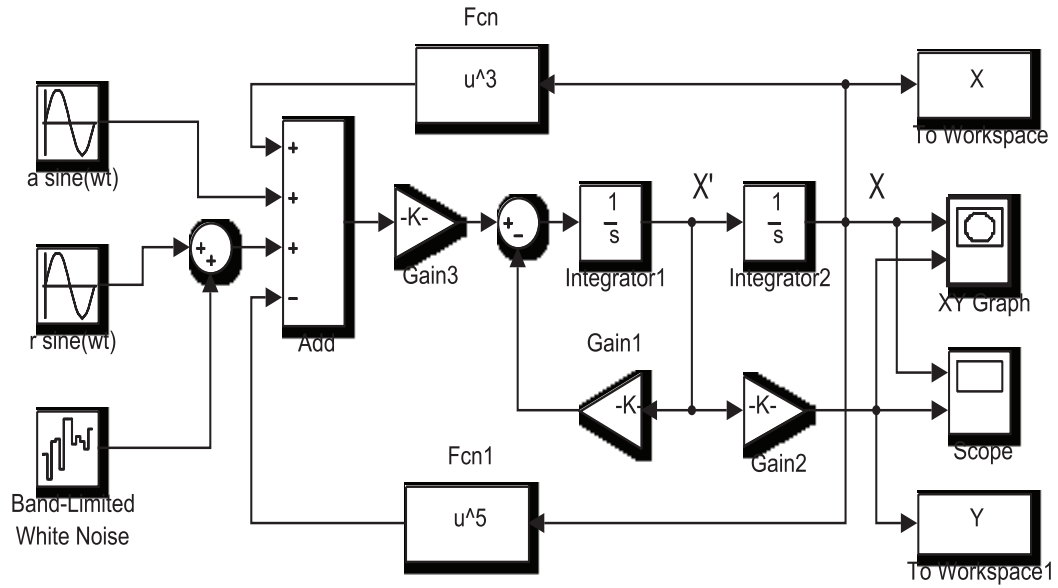
$$SGO = 10 \lg \frac{0,5 \times (10^{-6})^2}{(10^{-4})^2} = -83(\text{dB})$$

5.2.5. Duffing-Holmes sistemi ile ZST uygulaması ve simulasyon sonuçları

Bu bölümde, Duffing-Holmes sistemi ile yüksek frekans değerlerinde ZST çalışması yapılmıştır. Denklem (3.45)'de, Duffing-Holmes sisteminin frekans dönüşümlerinin yapılmış hali gösterilmişti. Bu denkleme zayıf sinyal bilgisi ($r \sin(\omega t)$) ve arka plan gürültüden ($n(t)$) oluşan bir giriş sinyali ($input$) eklenirse Denklem (5.13) elde edilir.

$$\ddot{x} + x^3 - x^5 + (a \sin(z) + input)) \quad (5.13)$$

Duffing-Holmes sistemi ile ZST uygulaması yapmak için gerekli olan benzetim modeli Matlab-Simulink® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemin sayısal çözümü için RK4 algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.5.'te, Duffing-Holmes sisteminin farklı frekans değerlerine uyumlu olan ZST uygulaması blok diyagramı görülmektedir. Sistem sinyal kaynağı, integral alıcı, fonksiyon ve toplama blokları içermektedir. Benzetim süresi, $\omega=1\text{rad/sn}$ için $t=500\text{sn}$ 'dir.



Şekil 5.5. Duffing-Holmes sistemi zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı

Duffing-Holmes sistemi ile ZST çalışması yapmak için Bölüm 5.2.1.'de ifade edilen üç adım sırasıyla uygulanır. Burada, değişken parametre olarak a parametresi kullanılmıştır. Sistemin gürültü dahil edilmeden önceki eşik değeri $a=0,725616119$ 'dur. Bu adımların uygulanması ile elde edilen ZST sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.5.'te gösterildiği gibi olur.

Tablo 5.5. Duffing-Holmes Sisteminin ZST Uygulaması Sonuçlarının Karşılaştırılması

Frekans (rad/sn)	Zayıf Sinyalin Genliği (r)	Tespit Eşik Değeri (a)	Gürültü Gücü (P_n)	Gürültü Etkisi	SGO (dB)
$\omega=1$	10^{-9}	0,724268011	10^{-4}	$1,8651892 \times 10^{-2}$	-143
$\omega=10^3$	10^{-9}	0,724268011	10^{-7}	$1,8651892 \times 10^{-2}$	-113
$\omega=10^5$	10^{-9}	0,724268011	10^{-9}	$1,8651892 \times 10^{-2}$	-93
$\omega=10^3$	10^{-9}	0,725450576	10^{-9}	$1,655414 \times 10^{-4}$	-93

Tablo 5.5.'te görüleceği üzere, benzetim çalışmasının sonuçları Duffing-Holmes sisteminin yüksek doğrulukla tespit yapabildiğini göstermiştir. Sistemin frekans değeri $\omega=1$ rad/sn, zayıf bilgi sinyalinin genliği 10^{-9} V ve gürültünün gücü 10^{-4} W alındığında tespit eşik değeri $a=0,724268011$ olur. Buna göre kaotik tespit

sisteminin doğrulukla tespit yapabildiği en küçük sinyal gürültü oranı (SGO) eşiği aşağıdaki gibi olur:

$$SGO = 10 \lg \frac{0,5 \times (10^{-9})^2}{(10^{-4})^2} = -143,0103(dB)$$

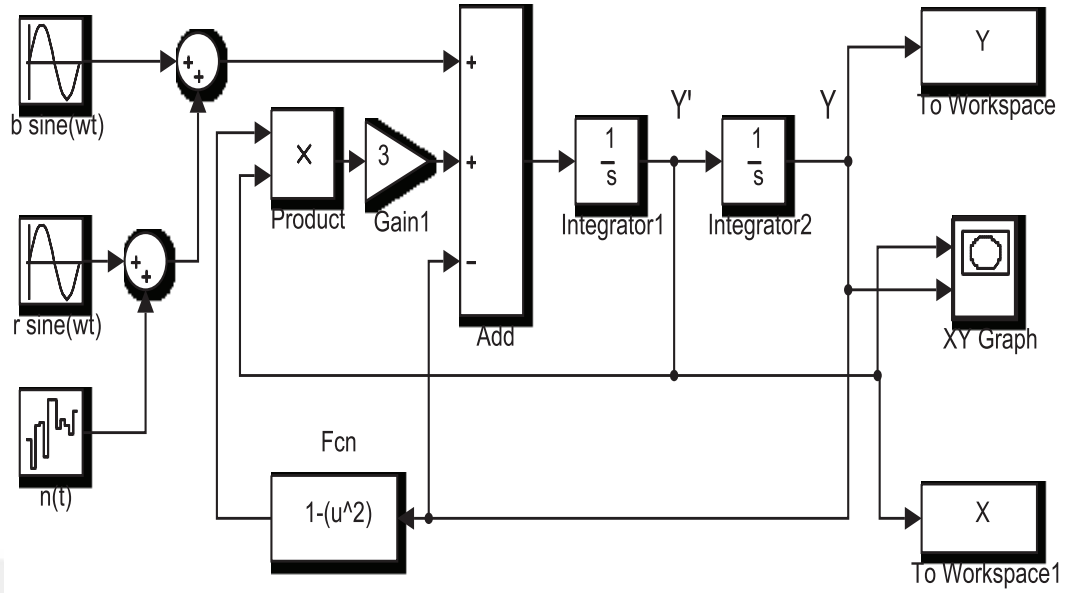
Bununla beraber, Duffing-Holmes sistemi yüksek frekans değerlerinde de ZST yapabilmektedir. Frekans değerleri $\omega=10^3 \text{ rad/sn}$ ve $\omega=10^5 \text{ rad/sn}$ olduğunda, en küçük sinyal gürültü oranları sırasıyla -113dB ve -93dB olur.

5.2.6. Van Der Pol Sistemi ile ZST Uygulaması ve Simulasyon Sonuçları

Bu bölümde, Van Der Pol sistemi ile ZST çalışması yapılmıştır. Denklem (3.48)'de gösterilen Van Der Pol sistemine zayıf sinyal bilgisi ($r \sin(\omega t)$) ve arka plan gürültüden ($n(t)$) oluşan bir giriş sinyali (input) eklenirse Denklem (5.14) elde edilir.

$$\ddot{y} + y^2 - y + (b \sin(\omega t) + input) = 0 \quad (5.14)$$

Burada, a ve ω değerleri sırasıyla 3 ve 1.788 olur. Van Der Pol sistemi ile ZST uygulaması yapmak için gerekli olan benzetim modeli Matlab-Simulink® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemin sayısal çözümü için RK4 algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.6.'de, Van Der Pol sisteminin ZST uygulaması blok diyagramı görülmektedir. Benzetim süresi, $\omega=1.788 \text{ rad/sn}$ için 500sn-1000sn arasındır.



Şekil 5.6. Geliştirilmiş Van Der Pol sistemi zayıf sinyal tespit uygulaması blok diyagramı

Geliştirilmiş Van Der Pol sistemi ile ZST çalışması yapmak için Bölüm 5.2.1.’de ifade edilen üç adım sırasıyla uygulanır. Burada, değişken parametre olarak b parametresi kullanılmıştır. Bu adımların uygulanması ile elde edilen ZST sonuçları Tablo 5.6.’da gösterildiği gibi olur

Tablo 5.6. Van Der Pol Sisteminin ZST Uygulaması Sonuçları

Frekans (rad/sn)	Zayıf Sinyalin Genliği (r)	Tespit Eşik Değeri (b)	Gürültü Gücü (P_n)	SGO (dB)
$\omega=1.788$	10^{-6}	4.961275	10^{-5}	-73

Tablo 5.6.’da görüleceği üzere, benzetim çalışmasının sonuçları Van Der Pol sisteminin kabul edilebilir bir doğrulukla tespit yapabildiğini göstermiştir. Benzetim süresince, eşik değeri civarında sistem durumlarının değişimi zaman almaktadır. Bundan dolayı tespit doğruluğu azalmaktadır. Sistemin frekans değeri $\omega=1.788\text{rad/sn}$, zayıf bilgi sinyalinin genliği 10^{-6}V ve gürültünün gücü 10^{-5}W alındığında tespit eşik değeri $b=4.961275$ olur. Buna göre kaotik tespit sisteminin doğrulukla tespit yapabildiği en küçük sinyal gürültü oranı (SGO) eşiği aşağıdaki gibi olur:

$$SGO = 10 \lg \frac{0,5 \times (10^{-6})^2}{(10^{-5})^2} = -73,0103(dB)$$

5.3. Zayıf Sinyal Tespit (ZST) Uygulamalarından Elde Edilen Sonuçlarının Karşılaştırılması

ZST benzetim çalışmaları yapılan altı adet kaotik sistemin analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.7.'de gösterildiği gibi olur.

Tablo 5.7. İncelenen Sistemlerin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Yeni Sistem A	Yeni Sistem B	Hiper Lorenz A	Hiper Lorenz B	Duffing-Holmes	Van Der Pol
Düşük Frekans SGO Değeri (dB)	-143	-143	-83	-83	-143	-73
Yüksek Frekans ZST	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Evet	Hayır
Yüksek Frekans SGO Değeri (dB)	-93	-93	-	-	-93	-
Eşik Değer Uygunluğu	Yüksek	Normal	Normal	Düşük	Yüksek	Düşük
Geniş Aralık Eşik Değer Özelliği	Yüksek	Düşük	Normal	Düşük	Yüksek	Düşük
Uygulanabilirlik	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Normal	Yüksek

Tablo 5.7.'den görüleceği üzere yeni sistem A ve yeni sistem B, literatürdeki Duffing-Holmes sistemi gibi ileri düzeyde ZST yapabilmektedir. Yeni bulunan bu iki sistem yüksek frekans ve düşük SGO değerlerinde tespit yapmaktadır. Bunun yanında, önerilen iki yeni kaotik sistem ZST benzetim çalışmalarında kullanılırken, eşik değeri noktasında kaotik durumdan periyodik duruma hemen geçmediği, benzetimlerin başlamasından kısa bir süre sonra istenilen sistem durumu değişikliklerinin olduğu görülmüştür. Bu geçiş süresinin yeni sistem B için daha uzun olduğu ortaya çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, iki hiperkaotik Lorenz sistemi yüksek frekans değerlerinde ZST için uygun değildir. Bu iki sistemin SGO değerleri de yüksek çıkmıştır. Van Der Pol sistemi ise frekans değişimine uygundur fakat yüksek frekansta yapılan ZST uygulamalarında SGO değerleri -73dB'den yüksek olacaktır.

Yeni bulunan iki kaotik sistemin elektronik devre benzetimleri yapılabilmektedir. İki hiperkaotik sistemin de elektronik devre şemaları yapılabilmekte fakat besleme gerilim değerleri analog devre çalışmaları için uygun değerlerde olmadığından uygulanabilirlikleri düşük olmaktadır. Literatürde Duffing-Holmes sisteminin devre şemaları olmakla beraber bu sistem 5. dereceden bir terim içerdiğinden, uygulamada ardı ardına 3 çarpma devresi kullanılacaktır. Bu durum direnç değerlerinde ciddi bir orantısızlık oluşturacak ve uygulanabilirlik seviyesini düşürecektir. Van Der Pol sisteminin ise literatürde elektronik devre modelleri bulunmaktadır.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sunulan tez çalışmasında, standart zayıf bilgi sinyali tespit yöntemlerinden farklı olarak, yeni geliştirilen bir yöntem ile zayıf sinyal tespit (ZST) çalışmalarında kullanmaya uygun yeni kaotik sistemlerin bulunması ve bulunan bu sistemlerin elektronik devre şemaları ile ZST sistemlerinin tasarımı ve benzetim çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır. Sunulan bu yeni yöntem ile ZST için asgari şartları sağlayacak yeni bir kaotik sistem için üç adet özelliğin olması gerektiği gösterilmiştir. Bununla beraber, bu üç özelliği taşıyan yeni kaotik bir sistem ile daha ileri seviyelerde ZST çalışmalarının yapılabilmesi için üç özelliğin daha gerekli olduğu ortaya konulmuştur. Bu altı özelliği içeren yeni bir kaotik sistem, ileri düzeydeki bir ZST çalışmasında kullanılabilecektir (Şekil 1.1.).

Tez çalışmasının başında kapsamlı bir literatür taramasından sonra, ilk kısımlarda doğrusal olmayan dinamik sistemler ve kaos ile ilgili temel kavramlardan bahsedilmiştir. Daha sonra, kaotiklik analizi için örnek olarak verilen üç boyutlu yeni bir sistem tanıtılmıştır. Verilen bu sistemin sırasıyla, denge noktası, başlangıç şartlarına hassaslık, faz portresi, Lyapunov üstelleri ve çatallaşma diyagramı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar örnek sistemin kaotik olduğunu göstermiştir.

Tez çalışmasında, ZST uygulamalarında kullanılmak üzere yeni bulunan iki adet sinüzoidal kaynaklı, sürekli zamanlı kaotik sistem tanıtılmış ve bu iki sistemin detaylı olarak zaman serileri, faz portresi, başlangıç şartlarına hassaslık, denge noktası, Lyapunov üstelleri, çatallaşma diyagramı analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, bu iki sistemin ZST çalışmalarında kullanılabilmesi için gerekli olan üç asgari şartı sağladığı görülmüştür. İlk olarak; sistemlerden herbirisinin içerdiği sinüzoidal kaynağın sistem durumuna doğrudan etkisinin olduğu tespit edilmiştir. İkinci olarak bu sistemler; Sinüzoidal kaynak genliğinin 1 μ V civarı bir değişiminde,

sistemin kaotik durumdan periyodik duruma geçtiği en az bir kritik değerin (tanjant çatallaşma noktası veya çift-periyot çatallaşma noktası gibi) bulunması şartını sağlamışlardır. Bu sayede, μV seviyesindeki zayıf bir bilgi sinyalinin kaotik sisteme giriş yapması ile sistem durumu ani ve keskin olarak değiştiğinden, bu özellikten faydalanarak zayıf bilgi sinyali kolaylıkla tespit edilecektir. Üçüncü olarak ise; ZST için seçilen sisteme ait eşik değeri civarında (tespit yapmaya yetecek kadar geniş bir değer aralığında) başka çatallaşmaların olmaması gereklidir. Böylece sistem durumundaki değişimin, giriş yapan zayıf bilgi sinyalinden kaynaklandığı daha kolay anlaşılmaktadır. Bulunan yeni sistemler bu üçüncü şartı da sağlamışlardır.

Literatürde ZST uygulaması görülmeyen iki adet hiperkaotik Lorenz sistemi ile Duffing-Holmes ve Van Der Pol sistemlerinin detaylı analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu incelenen bu dört sistemin ZST için asgari üç şartı sağladığı görülmüştür.

Geliştirilen yeni yöntemle göre kaotik sistemlerle ileri düzeyde ZST yapılabilmesi için, ele alınan kaotik sistemin asgari şartlar dışında üç özelliği daha taşıması gerekmektedir. İlk olarak özellik olarak; 10kHz-50kHz arası Yüksek frekans değerlerinde ZST yapılabilmesi için kaotik sistemin durum denklemlerinin frekans değişimine uygun hale getirilebilmesi gereklidir. İki yeni sistemin ve Duffing-Holmes sisteminin frekans dönüşümleri yapıp ZST sistemleri tasarlanmış, bu sistemlerin yüksek frekans değerlerinde ZST yapabildiği görülmüştür. Bununla beraber ZST çalışmaları yapılırken frekans değeri arttıkça sistemlerin gürültüye daha duyarlı hale geldiği görülmüştür. Bunun sonucunda SGO değerleri yükselmiştir. Bu özellik hiperkaotik iki sistem ve Van Der Pol sistemlerine istenildiği şekilde uygulanamamıştır.

İkinci özellik olarak, yapılan benzetimler sonucu iki yeni sistemin ve Duffing-Holmes sisteminin çok düşük değerlerdeki SGO'larında (-90dB den daha düşük değerler) ZST yapabildiği görülmüştür. Buna karşılık, iki hiperkaotik sistemi ile Van Der Pol sisteminin en düşük SGO değerleri bu şartı sağlamamaktadır.

İleri düzeyde bir ZST çalışması için kullanılacak bir sistemin sahip olması gereken üçüncü özellik ise, sistemlerden herbirisinin içerdiği sinüzoidal kaynağın genliğinin, sistemin elektronik devre modelinin tasarlanabilmesi için uygun olan değerlerde (0.5V-5V arası) olması ve sistemin elektronik devre benzetimlerinin yapılabilmesidir. Bulunan iki yeni kaotik sistem analog devre elemanları ile modellenmiş ve bu sistemler OrCAD-PSpice® simulasyon programı ile elektronik devre uygulamaları gerçekleştirilmiştir. OrCAD-PSpice® faz portresi sonuçları, Matlab-Simulink® faz portre çıktıları ile karşılaştırılmıştır. İki ayrı programdan elde edilen sonuçların paralellik arz ettiği görülmüştür. Buna karşılık, iki hiperkaotik Lorenz sistemi bu üçüncü şartı sağlamamaktadır. Duffing-Holmes ve Van Der Pol sistemlerinin ise devre çizim programlarında yapılmış benzetimleri literatürde mevcuttur.

Sunulan tez çalışmasının son aşamasında ise, yeni bulunan iki kaotik sistemin zayıf sinyal tespiti benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu iki sistemin; 1rad/sn ile 1×10^5 rad/sn arası değişen açısal frekans değerlerinde, yüksek hassasiyette ve düşük SGO değerlerinde zayıf sinyal bilgisi tespit edebildiği görülmüştür. Bununla beraber literatürde zayıf sinyal tespit çalışması görülmeyen iki adet hiperkaotik Lorenz sisteminin tespit çalışmaları yapılmıştır. Bu dört sistemin ZST uygulama sonuçları ile literatürde tespit çalışmaları sıklıkla görülen Duffing-Holmes ve Van Der Pol sistemlerinin ZST uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır (Tablo 5.7.).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yeni keşfedilen kaotik sistemlerin başarılı bir şekilde tespit yapabildiği görülmüştür. Bunun yanında, elde edilen kaotik sistemler ZST benzetim çalışmalarında kullanılırken, eşik değeri noktasında kaotik durumdan periyodik duruma hemen geçmediği, benzetimlerin başlamasından kısa bir süre sonra istenilen sistem durumu değişikliklerinin olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, yeni bir yöntem ile bulunmuş sinüzoidal kaotik sistemlerle oluşturulan ZST sistemleri kullanılarak güçlü gürültü altındaki zayıf bilgi sinyalleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre iki sistemin ileri düzeyde ZST yapılabilmesi aynı zamanda geliştirilen yöntemin de doğruluğunu göstermiştir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, elde edilen yeni kaotik ZST sistemlerine otokorelasyon algoritmaları, çeşitli filtreler, dalgacık dönüşümü vb. yöntem ve algoritmalar eklenerek çok daha hassas şekilde ve daha düşük SGO seviyelerinde tespit yapılması amaçlanabilir. Elde edilebilecek bu tarz hibrit sistemlerle arka plan gürültünün etkisi daha da azaltılabilir. Sunulan yeni sistemler, endüstriyel metal malzemeler üzerinde tahribatsız muayene yapan cihazlar, elektromanyetik akustik transdüserler (EMAT), metal dedektörler, biyomedikal alanında ultrasonik ölçüm yapan cihazlar ve balistokardiyografi cihazları gibi birçok farklı tespit cihazının yankı (echo) sinyallerinin tespiti benzetim çalışmalarında kullanılabilecek sistemlerdir. Bununla beraber bu kaotik sistemler, ZST uygulamaları dışında pek çok farklı alanda benzetim çalışmaları yapılabilecek potansiyel sistemlerdir.

KAYNAKLAR

- [1] Van Der Pol, B., Van Der Mark, J., Frequency demultiplication. *Nature*, 120: 363-364, 1927.
- [2] Lorenz, E. N., Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20: 130-141, 1963.
- [3] Li, T., Yorke, J. A., Period three implies chaos. *Amer. Math. Monthly*, 82: 985-992, 1975.
- [4] Feigenbaum, M. J., Universality in complex discrete dynamics. *Theoretical Division Annual Report, LA-6816-PR*, Los Alamos, 1975.
- [5] Rössler, O. E., An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 57: 397-398, 1976.
- [6] Rössler, O. E., Continuous chaos - four prototype equations. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 316: 376-392, 1979.
- [7] Ueda, Y., Akamatsu, K., Chaotically transitional phenomena in the forced negative-resistance oscillator. *IEEE Transactions Circuits and Systems-I*, CAS-28: 217-226, 1981.
- [8] Linsay, P., Period doubling and chaotic behaviour in a driven anharmonic oscillator. *Phys. Rev. Lett.*, 47: 1349-1392, 1981.
- [9] Testa, J., Perez, J., Jeffries, C., Evidence for universal chaotic behaviour of a driven nonlinear oscillator. *Phys. Rev. Lett.*, 48: 716-717, 1982.
- [10] Kennedy, M. P., Chua, L. O., Van Der Pol and chaos. *IEEE Transactions Circuits and Systems*, CAS-33: 974-980, 1986.
- [11] Rössler, O. E., An equation for hyperchaos. *Physics Letters A*, 71: 155-157, 1979.

- [12] Matsumoto, T., Chua, L. O., Kobayashi, K., Hyperchaos: laboratory experiment and numerical confirmation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, CAS-33(11): 1143-1147, 1986.
- [13] Stoop, R., Peinke, J., Parisi, J., Röhricht, B., Hübener, R. P., A p-Ge semiconductor experiment showing chaos and hyperchaos. *Physica D*, 35: 425-435, 1989.
- [14] Eismwirth, M., Kruel, T. M., Ertl, G., Schneider, F. W., Hyperchaos in a chemical reaction. *Chemical Physics Letters*, 193(4): 305, 1992.
- [15] Reiterer, P., Lainscsek, C., Schürer, F., Letellier, C., Maquet, J., A nine-dimensional Lorenz system to study high-dimensional chaos. *Journal of Physics A*, 31: 7121-7139, 1998.
- [16] Sun, K., Liu, X., Zhu, C., Sprott, J. C., Hyperchaos and hyperchaos control of the sinusoidally forced simplified Lorenz system. *Nonlinear Dynamics*, 69: 1383-1391, 2012.
- [17] Zhao, D., Li, Y., Liu, X., Cao, Y., The generation of a new hyperchaos based on Lorenz system. *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 1020-1024, 2008.
- [18] Pehlivan, İ., Yeni kaotik sistemler: Elektronik devre gerçeklemeleri, senkronizasyon ve güvenli haberleşme uygulamaları. *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi*, 2007.
- [19] Cascais, J., Dialo, N., Costa, A. N., Chaos and reverse bifurcation in a RCL circuit. *Physics Letters*, 93A: 213-216, 1983.
- [20] Kawakami, H., Bifurcation of periodic responses in forced dynamic nonlinear circuits: Computation of bifurcation values of the system parameters. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, CAS-31: 248-260, 1984.
- [21] Saito, T., A chaos generator based on a quasi-harmonic oscillator. *IEEE trans. Circuits and Systems*, CAS-32: 320-331, 1985.
- [22] Ohmori, Y., Nakagawa, N., Saito, T., Mutual coupling of oscillators with chaos and period doubling bifurcation. *International Conference on Circuits and Systems*, 61-64, 1985.
- [23] Xuanchao, L., Xiaolong, L., Weak signal detection research based on Duffing oscillator used for downhole communication. *Journal of Computers*, 6: 359-367, 2011.

- [24] Lindberg, E., Tamaseviciute, E., Mykolaitis, G., Bumeliene, S., Pyragiene, T., Tamasevicius, A., Kirvaitis, R., Autonomous third-order Duffing-Holmes type chaotic oscillator. European Conference on Circuit Theory and Design, Antalya, 663-666, 2009.
- [25] Rubio, R. F., Aracil, J., Camacho, E. F., Chaotic motion in adaptive control system. *Int. J. Control*, 42: 353-360, 1985.
- [26] Macchi, O., Saidane, M., Bifurcation in adaptive ARMA predictors. European Conference on Circuit Theory and Design, Paris, 287-294, 1987.
- [27] Deschamps, D. D., Some chaotic consequences of quantization in digital filters and digital systems. International Conference on Circuits and Systems, Portland, 602-605, 1989.
- [28] Macchi, O., Saidane, M., Adaptive UR filtering and chaotic dynamics: Application to audio frequency coding. *IEEE Trans. Circuits and Systems, CAS-36*: 591-599, 1989.
- [29] Chua, L. O., Lin, T., Fractal pattern of second-order nonlinear digital filters. *Int. J. of Circuit Theory and Appl.*, 18: 541-550, 1990.
- [30] Chua, L. O., Lin, T., Chaos and fractals from third-order digital filters. *Int. J. of Circuit Theory and Appl.*, 18: 241-256, 1990.
- [31] Rodriguez, A. B., Huertas, J. L., Chua, L. O., Chaos in a switched capacitor circuit. *IEEE Trans. Circuits and Systems, CAS-32*: 1083-1085, 1985.
- [32] Horio, Y., Suyama, K., Experimental verification of signal transmission using synchronized SC chaotic neural networks. *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, 42: 393-395, 1995.
- [33] Matsumoto, T., Chua, L. O., Tanama, S., Simpiest chaotic nonautonomous circuit. *Physical Rev. A*, 30: 1155-1157, 1984.
- [34] Inaba, N., Mori, S., Chaotic phenomena in a circuit with a diode due to change of the oscillation frequency. *IEICE Trans. Fundamentals*, E71: 842-849, 1988.
- [35] Ogorzalek, M. J., Order and chaos in a third order RC ladder network with nonlinear feedback. *IEEE Trans. Circuits and Systems, CAS-36*: 1221-1230, 1989.
- [36] Mögel, A., Schwarz, W., High frequency chaos generators. European Conference on Circuit Theory and Design, İstanbul, 1133-1136, 1995.

- [37] Tamasevicius, A., Namajunas, A., Cenys, A., Simple 4D chaotic oscillator. *Electronic Letters*, 32: 957-958, 1996.
- [38] Nakagawa, S., Saito, T., An RC OTA hysteresis chaos generator. *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, 43: 1019-1011, 1996.
- [39] Kudrewicz, L., Gudniewicz, J., Swidzhshe, B., Chaos, phase slipping and cantor like sets in a discrete Phase-Locked Loop. *European Conference on Circuit Theory and Design*, 507-512, 1987.
- [40] Endo, T., Chua, L. O., Chaos from Phase-Locked Loops. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, CAS-34: 987-1003, 1988.
- [41] Endo, T., Chua, L. O., Chaos from Phase-Locked Loops - Part II: High dissipation case. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, CAS-35: 155-263, 1989.
- [42] Bradley, E., Straub, D. E., Using chaos to broaden the capture range of a Phase-Locked Loop: Experimental verification. *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, 43: 914-922, 1996.
- [43] Hamill, D. C., Jeffries, D. J., Subharmonics and chaos in a controlled switch-mode power converters. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, CAS-35: 1059-1061, 1988.
- [44] Tse, C. K., Flip bifurcation and chaos three-state boost switching regulators. *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, 41: 16-23, 1994.
- [45] Poddar, G., Chakrabarty, K., Banerjee, S., Control of chaos in the boost converter. *Electronics Letters*, 31: 841-842, 1995.
- [46] Ueno, F., Oota, I., Harada, I., A low-noise control circuit using Chua's circuit for a switching regulator. *European Conference on Circuit Theory and Design*, Istanbul, 1149-1152, 1995.
- [47] Chen, G., Ueta, T., Yet another chaotic attractor. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 9(7): 1465-1466, 1999.
- [48] Lü, J., Chen, G., Zhang, S., Dynamical analysis of a new chaotic attractor. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 12(5): 1001-1015, 2002.
- [49] Pehlivan, I., Uyaroglu, Y., A new 3D chaotic system with golden proportion equilibria: Analysis and electronic circuit realization. *Computers and Electrical Engineering*, 38(6): 1777-1784, 2012.

- [50] Sprott, J. C., Some simple chaotic flows. *Physical Review-E, Statistical Physics Plasma Fluids Related Interdiscipl Topics*, 50(2), 1994.
- [51] Sprott, J. C., Simplest dissipative chaotic flow. *Physics Letters A*, 228(4): 271-274, 1997.
- [52] Sprott, J. C., A new class of chaotic circuit. *Physics Letters A*, 266(1): 19-23, 2000.
- [53] Sundarapandian, V., Pehlivan, I., Analysis, control, synchronization and circuit design of a novel chaotic system. *Mathematical and Computer Modelling*, 55(7-8): 1904-1915, 2012.
- [54] Koyuncu, I., Ozcerit, A. T., Pehlivan, P., An analog circuit design and FPGA-based implementation of the Burke-Shaw chaotic system. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 7(9-10): 635-638, 2013.
- [55] Kocamaz, U. E., Uyaroglu, Y., Kizmaz, H., Control of Rabinovich chaotic system using sliding mode control. *Int. J. of Adaptive Control and Signal Proc.*, Wiley, 1-9, 2013.
- [56] Vembarasan, V., Balasubramaniam, P., Chaotic synchronization of Rikitake system based on TS fuzzy control techniques. *Nonlinear Dyn.*, 74(1-2): 31-44, 2013.
- [57] Pehlivan, I., Wei, Z., Analysis, nonlinear control and circuit design of another strange chaotic system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20(2): 1229-1239, 2012.
- [58] Wei, Z., Dynamical behaviors of a chaotic system with no equilibria. *Physics Letters A*, 376: 102-108, 2011.
- [59] Leonov, G., Kuznetsov, N., Vagitsev, V., Localization of hidden Chua's attractors. *Physics Letters A*, 375: 2230-2233, 2011.
- [60] Wang, Z., Cang, S., Ochola, E. O., Sun, Y., A hyperchaotic system without equilibrium. *Nonlinear Dynamics*, 69: 531-537, 2012.
- [61] Jafari, S., Sprott, J. C., Hashemi, G., Elementary quadratic chaotic flows with no equilibria. *Physics Letters A*, 377: 699-702, 2013.
- [62] Yu, S., Lü, J., Chen, G., A module-based and unified approach to chaotic circuit design and its applications. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 17(5): 1785-1800, 2007.

- [63] Pehlivan, I., Uyaroglu, Y., Simplified chaotic diffusionless Lorenz attractor and its application to secure communication systems. *IET Communications*, 1(5): 1015-1022, 2007.
- [64] Mello, L. F., Messias, M., Braga, D. C., Bifurcation analysis of a new Lorenz-like chaotic system. *Chaos, Solitons and Fractals*, 37: 1244-1255, 2008.
- [65] Chen, Z., Zhang, X., Bi, Q., Bifurcation and chaos of coupled electrical circuits. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 9: 1158-1168, 2008.
- [66] Qi, G., Chen, G., Zhang, Y., On a new asymmetric chaotic system. *Chaos, Solitons and Fractals*, 37: 409-423, 2008.
- [67] Zhou, W., Xu, Y., Lu, H., Pan, L., On Dynamics analysis of a new chaotic attractor. *Physics Letters A*, 372: 5773-5777, 2008.
- [68] Li, X. F., Chlouverakis, K. E., Xu, D. L., Nonlinear dynamics and circuit realization of a new chaotic flow: A variant of Lorenz, Chen and Lü. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 10: 2357-2368, 2009.
- [69] Chen, C., Sheu, L., Chen, H., Chen, J., Wang, H., Chao, Y., Lin, Y., A new hyper-chaotic system and its synchronization. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 10: 2088-2096, 2009.
- [70] Uyaroglu, Y., Pehlivan, I., Nonlinear Sprott94 case A chaotic equation: Synchronization and masking communication applications. *Computers and Electrical Engineering*, 36(6): 1093-1100, 2010.
- [71] Quan, S. G., Hui, C., Bin, Z. Y., A new four-dimensional hyperchaotic Lorenz system and its adaptive control. *Chinese physics B*, 20(1), 2011.
- [72] Wei, Z., Pehlivan, I., Chaos, coexisting attractors, and circuit design of the generalized Sprott C system with only two stable equilibria. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 6(7-8): 742-745, 2012.
- [73] Cicek, S., Uyaroglu, Y., Pehlivan, I., Simulation and circuit implementation of Sprott case H chaotic system and its synchronization application for secure communication systems. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 22(4), 2013.
- [74] Pehlivan, I., Moroz, I. M., Sundarapandian, V., Analysis, synchronization and circuit design of a novel butterfly attractor. *Journal of Sound and Vibration*, 333: 5077-5096, 2014.

- [75] Li, C., Pehlivan, I., Sprott, J. C., Akgül, A., A novel four-wing strange attractor born in bistability. *IEICE Electronic Express*, 12(4), 2015.
- [76] Ogorzalek, M. J., Taming chaos-part II: Control. *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, 40: 700-706, 1993.
- [77] Kapitanik, T., Kocarev, L., Chua, L. O., Controlling chaos without feedback and controlling signals. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3: 459-468, 1993.
- [78] Hayes, S., Grebogi, C., Ott, E., Mark, A., Experimental control of chaos for communication. *Phys. Rev. Lett.*, 73: 1781-1785, 1994.
- [79] Murali, K., Lakshmanan, M., Chua, L. O., Controlling and synchronization of chaos in the simplest dissipative nonautonomous circuit. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 5: 563-571, 1995.
- [80] Pan, S., Yin, F., Optimal control of chaos with synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 7: 2855-2860, 1997.
- [81] Yang, T., Chua, L. O., Control of chaos using sampled data feedback control. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 8: 2433-2438, 1998.
- [82] Jang, M. J., Chen, C. L., Chen, C. K., Sliding mode control of chaos in the cubic Chua's circuit system. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 12: 1437-1449, 2002.
- [83] Sundarpandian, V., Sampath, S., Anti-synchronization of four-wing chaotic systems via sliding mode control. *International Journal of Automation and Computing*, 9: 274-279, 2012.
- [84] Pecora, L. M., Carroll, T. L., Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 64: 821-824, 1990.
- [85] Pecora, L. M., Carroll, T. L., Driving systems with chaotic signals. *Physical Review A*, 44: 2374-2383, 1991.
- [86] Cuomo, K., M., Oppenheim, A. V., Circuit implementation of synchronized chaos with application to communication. *Phys. Rev. Lett.*, 71: 65-68, 1993.
- [87] Kocarev, L., Halle, K. S., Eckert, K., Chua, L. O., Parlitz, U., Experimental demonstration of secure communication via chaotic synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2: 709-713, 1992.

- [88] Kolumban, G., Kennedy, M. P., Chua, L. O., The role of synchronization in digital communications using chaos - part-I: Fundamentals of digital communication. IEEE Trans. Circuits and Systems-I, 44: 927-936, 1997.
- [89] Morgul, O., Akgul, M., A switching synchronization scheme for a class of chaotic systems. Physics Letters A, 301: 241-249, 2002.
- [90] Gökyıldırım, A., 2. ve 3. derece en basit kaotik akışlı sistemlerin senkronizasyonu ve güvenli haberleşmede kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2007.
- [91] Pehlivan, I., Uyaroglu, Y., Rikitake attractor and its synchronization application for secure communication systems. Journal of Applied Sciences, 7(2): 232-236, 2007.
- [92] Sundarpandian, V., Rajagopal, K., Hybrid synchronization of hyperchaotic Wang-Chen and hyperchaotic Lorenz system by active non-linear control. International Journal of Systems Signal Control and Engineering Application, 4: 55-61, 2011.
- [93] Çavuşoğlu, Ü., Uyaroğlu, Y., Pehlivan, İ., Sürekli zamanlı otonom kaotik devre tasarımı ve sinyal gizleme uygulaması. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29(1): 79-87, 2014.
- [94] Birx, D. L., Pipenberg, S. J., Chaotic oscillators and complex mapping feed forward networks (CMFFN)s for signal detection in noisy environments. IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 881-888, 1992.
- [95] Wang, G., He, S., A quantitative study on detection and estimation of weak signal using chaotic Duffing oscillator. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 50: 945-953, 2003.
- [96] Leung, H., Haykin, S., Is there a radar clutter attractor? App. Physics Letters, 56(6): 592-595, 1990.
- [97] Nieminen, H., Takala, E. P., Evidence of deterministic chaos in the myoelectric signal. Electromyogr. Clinical Neurophysiol. 36(1): 49-58, 1996.
- [98] Brown, R., Chua, L. O., Popp, B., Is sensitive dependence on initial conditions nature's sensory device? International Journal of Bifurcation and Chaos, 2(1): 193-199, 1992.
- [99] Wang, G., The theoretical research and practice weak signal detection by chaotic oscillator. Ph.D. dissertation, Zhejiang University, Hangzhou, China, 1998.

- [100] Holmes, C., Holmes, P. J., Second order averaging and bifurcations to subharmonics in Duffing equation. *Journal of Sound and Vibration*, 78(4): 161-174, 1981.
- [101] Guckenheimer, J., Holmes, P. J., *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Chaos*. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [102] Wiggins, S., *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*. New York: Springer-Verlag, 1990.
- [103] Hou, C. L., Xiong, P., Wang, D. S., Detection of underwater target signals by combining cross-correlation with chaos theory. *Torpedo Technology*, 14: 17-19, 2006.
- [104] Chunyan, N., Yaowu, S., The research of chaotic characteristic identification base on weak signal detection. *ACTA Metrological Sinica*, 10(4): 308-313, 2000.
- [105] Liu, D., Ren, H., Song, L., Li, H., Weak signal detection based on chaotic oscillator. *Proceedings of the IEEE Industry Applications Conference, The Fourtieth IAS Annual Meeting*, 3: 2054-2058, 2005.
- [106] Wang, J., Hou, C., A method of weak signal detection based on Duffing oscillator. *International Conference on e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning*, 387-390, 2010.
- [107] Chen, W. G., Zhang, S., Du, L., Photoacoustic signal measuring based on cross-correlation analysis and chaotic detection. *Electric Power Automation Equipment*, 28: 22-26, 2008.
- [108] Chen, W. G., Zhang, S., Du, L., Chaotic detection of weak sine signals based on cross-correlation and Lyapunov exponent. *Automation of Electric Power Systems*, 32: 44-48, 2008.
- [109] Honglei, Q., Xingli, S., Tian, J., Weak GPS signal detect algorithm based on Duffing chaos system. *IEEE Tenth International Conference on Signal Processing (ICSP)*, 2501-2508, 2010.
- [110] Xie, T., Wei, X., Yu, R., Noise immunity analysis in external excitation chaotic oscillator detection system. *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, 1013-1016, 2010.

- [111] Cheng, F., Yan, Z., A new method to determine the bifurcation threshold of the Duffing chaos detection system. The Seventh International Conference on Computer Science and Education, Melbourne, Australia, 1143-1146, 2012.
- [112] Sun, K. H., Sprott, J. C., Dynamics of a simplified Lorenz system. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 19(4): 1357-1366, 2009.
- [113] Haykin, S. L., Li, X. B., Detection of signals in chaos. *Proceedings of the IEEE*, 83: 95-122, 1995.
- [114] Wang, G., Chen, D., Lin, J., Chen, X., The application of chaotic oscillator to weak signal detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46: 440-444, 1999.
- [115] Li, Y., Yang, B. J., Shi, W., Study on chaotic detection method of nV-level sine signal. *Journal of China Institute of Communications*, 24(4): 25-30, 2003.
- [116] Hu, W., Liu, Z., Study of metal detection based on chaotic theory. *Proceedings of the Eighth World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 2309-2314, 2010.
- [117] Yanchun, X., Xiaodong, Q., Chunling, Y., The study of novel chaotic oscillator detection weak signal amplitude. *Proceeding of the Seventh IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 303-307, 2012.
- [118] Yanchun, X., Xiaodong, Q., Mi, L., The promising chaos model establishment of weak signal detection system. *International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, 306-310, 2013.
- [119] Deng, C., Zhang, S., The weak signal detection based on chaos and genetic algorithms. *Second International Symposium on Information Science and Engineering (ISISE)*, 579-582, 2009.
- [120] Sun, Y., Zhan, X., Shi, J., Hu, Z., Based on wavelet denoising and Duffing oscillator to detect weak signal. *IEEE International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 1917-1920, 2011.
- [121] Ye, M., Song, L., Weak signal detection in chaos using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 928-931, 2011.
- [122] Li, N., Li, L., Yang, D., Zhao, Y., Yang, Y., The research of weak fault signal detection based on the Duffing oscillator coupled synchronization. *Fourth*

International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications (IWCFTA), 319-323, 2011.

- [123] Wang, H., Shi, M., Detection of line-spectrum of radiated noises from underwater target based on chaotic system. IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), 1-4, 2013.
- [124] Jiang, F., Wang, X., Jin, J., Yang, D., The application of chaotic Duffing oscillator to ballistocardiograph signal detection. Proceeding of the Eighth World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, China, 6903-6906, 2010.
- [125] Chen, H. Y., Lv, J. T., Zhang, S. Q., Zhang, L. G., Li, J., Chaos weak signal detecting algorithm and its application in the ultrasonic Doppler bloodstream speed measuring. 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics: Conference Series 13: 320-324, 2005.
- [126] Yang, F., Jing, L., Zhang, W., Ma, H., Experimental and numerical studies of the oblique defects in the pipes using a chaotic oscillator based on ultrasonic guided waves. Journal of Sound and Vibration, 347: 218-231, 2015.
- [127] Jidong, J., Haihua, S., Teng, C., Shanming, L., Chaos theory apply in high voltage transmission line defect detection. Proceedings of the Tenth IEEE Conference on Signal Processing, 17-21, 2010.
- [128] Xiang, X., Shi, B., Weak signal detection based on the information fusion and chaotic oscillator. American Institute of Physics-Chaos, 20: 1-6, 2010.
- [129] Xu, Y., Yang, C., Qu, X., Yang, M., Yang, Q., The frequency estimation of weak signal based on chaotic system fusion technology. International Joint Conference ICROS-SICE, Fukuoka, Japan, 5301-5304, 2009.
- [130] Li, Y., Yang, B., Chaotic system for the detection of periodic signals under the background of strong noise. Chinese Science Bulletin, 48(5): 508-510, 2003.
- [131] Huiying, L., Zhiyu, C., Xiaopeng, Y., Ping, L., A combined method of weak signal detection. Second Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications (PACIIA), 106-109, 2009.
- [132] Chen, X., Zhang, X., Gao, C., Yang, Y., Audio Watermarking system based on detection theory of chaotic phase transformation. Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 4020-4025, 2009.

- [133] Yongsheng, W., Xiangling, M., Yu, W., Hongda, F., A new method of weak signal detection using chaos phase change. The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI-3: 812-816, 2007.
- [134] Pan, J., Du, J., Yang, S., Weak signal detection based on chaotic prediction. Second International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, WKDD: 300-303, 2009.
- [135] Mei, W., Huifeng, Z., Yong, Y., The detection of bi-frequency weak signal based on chaos and correlation. Fifth International Conference on Information Assurance and Security, IAS: 83-86, 2009.
- [136] Jalilvand, Abolfazl, Fotoohabadi, H., The application of Duffing oscillator in weak signal detection. ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics and Communications, 9(1): 1-6, 2011.
- [137] Üstündağ, M., Şengür, A., Gökbulut, M., Ata, F., Fourier dönüşümü tabanlı zayıf sinyal tespiti. Sixth International Advanced Technologies Symposium (IATS-11), Elazığ, Turkey, 97-100, 2011.
- [138] Han, J., Sun, H., A study of detection method in power line communication based on Duffing chaotic system. Fourth International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 812-815, 2011.
- [139] Akgül, A., Yeni kaotik sistemler ile rasgele sayı üretici tasarımı ve çoklu ortam verilerinin yüksek güvenli şifrelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2015.
- [140] <http://www.evrenindili.com/component/content/article/101-dostlarimiz/263-kaos-kuram-ve-kaotik-sistemler?directory=194>, Erişim Tarihi: 04.10.2016.
- [141] https://www.wolfram.com/mathematica/new-in-9/advanced-hybrid-and-differential-algebraic-equations/HTMLImages.en/poincare-sections/O_9.png, Erişim Tarihi: 04.10.2016.
- [142] Koyuncu, İ., Kriptolojik uygulamalar için FPGA tabanlı yeni kaotik osilatörlerin ve gerçek rasgele sayı üreteçlerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2014.

EKLER

EK A: Doktora Tez Kapsamında Yapılan Bilimsel Çalışmalar

Doktora tez kapsamında yapılan bilimsel yayınlar aşağıda verilmiştir.

- [1] Gokyildirim, A., Uyaroglu, Y., Pehlivan, I., A novel attractor and its weak signal detection application. International Journal for Light and Electron Optics, 127: 7889-7895, 2016.
- [2] Gokyildirim, A., A novel attractor: Analysis and weak signal detection application. International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16), Kilis, 2151-2157, March 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah GÖKYILDIRIM, 02.06.1982 tarihinde Ankara’da doğdu. İlkokulu Kalecik Dumlupınar İlköğretim okulunda, ortaokulu Ankara Tevfik İleri İmam Hatip Lisesi ortaokul kısmında tamamladı. 2000 yılında Ankara Yahya Kemal Beyatlı Lisesi’nden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2008 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. Ağustos 2011’de Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamış olup halen aynı görevini sürdürmektedir. Yazar evli ve bir çocuk babasıdır.