T.C.
KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOLOJİK NÖRON MODELLERİNİN FPGA GERÇEKLEŞTİRİMLERİNDE TAYLOR MACLAURİN SERİ AÇILIM YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Bekir ŞIVGA

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ

Temmuz 2023, KAYSERİ

Bekir ŞIVGA
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yüksek Lisans Tezi
2023

T.C.
KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOLOJİK NÖRON MODELLERİNİN FPGA GERÇEKLEŞTİRİMLERİNDE TAYLOR MACLAURİN SERİ AÇILIM YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Bekir ŞIVGA

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ

Temmuz 2023, KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu tezin kendi çalışmam olduğunu, planlanmasından yazımına kadar hiçbir aşamasında etik dışı davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları kaynaklar listesine aldığımı, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

Bekir ŞIVGA

	TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU	Doküman No	FR-287
		İlk Yayın Tarihi	8/02/2022
		Revizyon Tarihi	-
		Revizyon No	0
		Sayfa No	v/1

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Program Adı : Yüksek Lisans

Tez Başlığı : Biyolojik Nöron Modellerinin FPGA Gerçekleştirimlerinde Taylor Maclaurin Seri Açılım Yönteminin Kullanılması

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 44 sayfalık kısmına ilişkin 13/07/2023 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı**: %4'**tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Giriş dâhil
2. Ana Bölümler dâhil
3. Sonuç dâhil
4. Alıntılar dâhil
5. Kapak hariç
6. Önsöz ve Teşekkür hariç
7. İçindekiler hariç
8. Kaynakça hariç
9. Özet hariç
10. Yedi (7) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Önerisi Hazırlama, Tez Yazma ve Teslim Yönergesini inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim. 13/07/2023

Hazırlayan	Danışman
Bekir ŞIVGA	Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ

YÖNERGEYE UYGUNLUK

"Biyolojik Nöron Modellerinin FPGA Gerçekleştirimlerinde Taylor-Maclaurin Seri Açılım Yönteminin Kullanılması" adlı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Bekir ŞIVGA	Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Doç. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ danışmanlığında Bekir ŞIVGA tarafından hazırlanan " Biyolojik Nöron Modellerinin FPGA Gerçekleştirimlerinde Taylor Maclaurin Seri Açılım Yönteminin Kullanılması " adlı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

31 / 07 / 2023

JÜRİ:

Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ
Üye	: Prof. Dr. Recai KILIÇ
Üye	: Doç Dr. Ekin ASLAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...… tarih ve ……..……sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Doçent Dr. Ahmet TERZİ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmam boyunca, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, çalışmalarımın amacı doğrultusunda kalite bir çalışma yapmam için elinden geleni yapan, kıymetli yol göstericiliğinden dolayı danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ' a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, koşul ne olursa olsun en iyisini yapmam için çabalayan, bugünlere gelmemde kendi yaşamından bile taviz vermekten korkmayan ilham kaynağım, hayatım boyunca desteğini hissettiğim babaannem Fatma ŞIVGA' ya teşekkür ederim.

Bekir ŞIVGA
KAYSERİ 2023

BİYOLOJİK NÖRON MODELLERİNİN FPGA GERÇEKLEŞTİRİMLERİNDE TAYLOR MACLAURİN SERİ AÇILIM YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

Bekir ŞIVGA

Kayseri Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2023
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ

ÖZET

Bu tez çalışmasında doğrusal olmayan fonksiyonlarla tanımlanan biyolojik nöron modellerinin, dijital donanımlarla gerçekleştirimleri konusu ele alınmaktadır. Bu fonksiyonların dijital donanımlarla gerçekleştirimlerinde karşılaşılan problemlerin çözümü için geliştirilen alternatif yaklaşımlar üzerinde durulmaktadır. Mevcut çalışmalarda önerilen çözüm yöntemlerine alternatif bir yaklaşımın kullanılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda biyolojik nöron modellerindeki doğrusal olmayan fonksiyonların yerine, bu fonksiyonların matematiksel seri açılımlarının modele dâhil edilmesi planlanmıştır. Önerilen yaklaşımın hem hata miktarı hem de donanım kullanım maliyeti açısından optimum etkinliği değerlendirilmektedir. Kullanılan yöntemin biyolojik nöron modellerinin dijital donanımlarla gerçekleştirim sürecinde etkin kullanılabilirliğinin gösterilmesi için, önerilen seri açılımlarının adapte edildiği biyolojik nöron modellerinin dijital donanım ile gerçekleştiriminin yapılması da amaçlanmaktadır.

Bu kapsamda, literatürde sıkça çalışılan ve dijital donanımlarla gerçekleştirimleri güç olan biyolojik nöron modellerinden elektromanyetik tanımlı FitzHugh-Nagumo, Adaptive Exponential Integrate-and-Fire ve memristif Hindmarsh-Rose nöron modelleri ele alınmıştır. Basit tanımlamaları, nöron ateşleme türlerindeki çeşitlilikleri ve tanımlamalarında kullanılan doğrusal olmayan fonksiyonların karakteristikleri gözetilerek belirlenen bu modellerdeki doğrusal olmayan fonksiyonların basitleştirilmesi için literatürde mevcut çözüm yöntemleri incelenmiştir. Ardından, bahsi geçen nöron modellerindeki doğrusal olmayan fonksiyonlara matematiksel seri açılım yöntemleri uygulanmıştır. Bu biyolojik nöron modellerinin hem orijinal tanımlamalarının hem de seri açılımların adapte edildiği versiyonlarının nümerik simülasyonları yapılmıştır. Orijinal modeller ile revize edilmiş modeller arasındaki genlik ve faz hatası miktarları hesaplanmıştır. Son olarak, revize edilen biyolojik nöron modellerinde seri açılım yönteminin etkin kullanımının gösterilmesi

açısından, ilgili modeller dijital gerçekleştirimlerde paralel çalışma prensibi ile öne çıkan donanımlardan olan, alan programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array) elemanı ile gerçeklenmiştir. Seri açılımların adapte edildiği revize modellerin alan programlanabilir kapı dizisi elemanı ile gerçekleştirimi ile elde edilen deneysel sonuçlar, bu modellerin nümerik simülasyonu ile elde edilen sonuçlarla uyumludur.

Anahtar Kelimeler: Biyolojik Nöron Modelleri, Dijital Gerçekleştirim, Fonksiyonların Matematiksel Seri Açılımları, Alan Programlanabilir Kapı Dizisi**.**

THE USAGE OF TAYLOR MACLAURIN'S SERIAL EXPANSION METHOD IN FPGA IMPLEMENTATION OF BIOLOGICAL NEURON MODELS

Bekir ŞIVGA

Kayseri University, Institute of Graduate Education

Master Thesis, July 2023

Supervisor: Asst. Prof. Nimet KORKMAZ

ABSTRACT

In this thesis, the realization of biological neuron models defined by nonlinear functions with digital hardware is discussed. Alternative approaches developed to solve the problems encountered in the realization of these functions with digital hardware are emphasized. It is aimed to use an alternative approach to the solution methods proposed in the current studies. In this direction, instead of nonlinear functions in biological neuron models, it is planned to include mathematical series expansions of these functions in the model. The optimum efficiency of the proposed approach is evaluated in terms of both error rate and hardware usage cost. In order to demonstrate the effective usability of the method used in the realization process of biological neuron models with digital hardware, it is also aimed to realize the biological neuron models to which the proposed serial expansions are adapted, with digital hardware.

In this context, electromagnetically defined FitzHugh-Nagumo, Adaptive Exponential Integrate-and-Fire and memristive Hindmarsh-Rose neuron models, which are frequently studied in the literature and difficult to implement with digital hardware, are discussed. In order to simplify the nonlinear functions in these models, which are determined by considering their simple definitions, diversity in neuron firing types, and the characteristics of the nonlinear functions used in their definitions, the solution methods available in the literature are examined. Then, mathematical series expansion methods were applied to the nonlinear functions in the aforementioned neuron models. Numerical simulations of both the original descriptions and versions of these biological neuron models to which serial expansions were adapted were performed. The amplitude and phase error amounts between the original models and the revised models were calculated. Finally, in order to

demonstrate the effective use of the serial expansion method in the revised biological neuron models, the related models were implemented with the field programmable gate array (Field Programmable Gate Array) element, which is one of the hardware that stands out with its parallel working principle in digital realizations. The experimental results obtained by realizing the revised models to which the serial expansions are adapted with the field programmable gate array element are compatible with the results obtained by the numerical simulation of these models.

Keywords: Biological Neuron Models, Digital Realization, Mathematical Series Expansions of The Functions, Field Programmable Gate Array.

İÇİNDEKİLER

BİYOLOJİK NÖRON MODELLERİNİN FPGA GERÇEKLEŞTİRİMLERİNDE TAYLOR MACLAURİN SERİ AÇILIM YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK iv
TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU v
YÖNERGEYE UYGUNLUK vi
KABUL VE ONAY TUTANAĞI vii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜRLER viii
ÖZET ix
ABSTRACT xi
SİMGELER VE KISALTMALAR xv
TABLOLAR LİSTESİ xvi
ŞEKİLLER LİSTESİ xvii
GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM
NÖRON MORFOLOJİSİ VE TAYLOR-MACLAURİN SERİSİ

1.1. Nöron Elektrofizyolojisi 6
1.2. Taylor-Maclaurin Serisi 9

İKİNCİ BÖLÜM
SERİ AÇILIMLARIN NÖRON MODELLERİNE ADAPTASYONU

2.1. Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeli 14
2.2. Memristif HR Nöron Modeli 21
2.3. AdEx Nöron Modeli 26

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SERİ AÇILIM ADAPTASYONLU NÖRON MODELLERİNİN DİJİTAL DONANIM GERÇEKLEŞTİRİMLERİ

3.1. Elektromanyetik Tanımlı FHN Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi.....33
3.2. Memristif HR Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi.....36
3.3. AdEx Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi 38
SONUÇ 42
KAYNAKÇA 44
ÖZGEÇMİŞ.....50
TEZ İNTİHAL RAPORU.....52

SİMGELER VE KISALTMALAR

AdEx	Adaptive Exponential Integrate-And-Fire
Ca	Kalsiyum
CI	Klor
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
DAC	Dijital Analog Dönüştürücü (Digital Analog Convertor)
DC	Doğru Akım
DSP	Dijital Sinyal İşleme (Digital Signal Processing)
EIF	Exponential Integrate And Fire
FHN	Fitzhugh-Nagumo
FPAA	Alan Programlanabilir Analog Dizi (Field Programmable Analog Array)
FPGA	Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array)
HH	Hodgkin-Huxley
HR	Hindmarsh-Rose
K	Potasyum
LIF	Integrate And Fire
ML	Morris Lecar
Na	Sodyum
ODE	Adi Diferansiyel Denklemler (Ordinary Differential Equations)
PWL	Parçalı Lineer (Piecewise-Linear)
RMSE	Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error)
SG_{DSP}	DSP'ler İçin Sistem Üreteci (System Generator For DSP)
VHDL	Çok Yüksek Hızlı Entegre Devrelerde Donanım Tanımlama Dili (Very High Speed İntegrated Circuit Hardware Description Language)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Orijinal ve Revize Edilmiş Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modellerine ait RMS Hatası, Faz Hatası ve Kolerasyon Hatası Tablosu …….20

Tablo 2.2. Orijinal ve Revize Edilmiş Memristif HR Nöron Modellerine ait RMS Hatası, Faz Hatası ve Kolerasyon Hatası Tablosu ……..…….....24

Tablo 2.3. Adex Nöron Modelinin Nöral Dinamikler ve Modelin Parametre Değerleri……..…27

Tablo 2.4. Orijinal ve Revize Edilmiş Uyarlanabilir AdEx Nöron Modeline ait RMS Hatası, Faz Hatası ve Kolerasyon Hatası Tablosu (*Sayı Değil (Not a Number; NaN))…….28

Tablo 3.1. Elektromanyetik Etki Tanımlı FHN Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Uygulamasına Ait Alan Kullanımları ve Sentez Sonuçları…….……..36

Tablo 3.2. Memristif HR Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Uygulamasına Ait Alan Kullanımları ve Sentez Sonuçları……..…….38

Tablo 3.3. AdEx Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Uygulamasına Ait Alan Kullanımları ve Sentez Sonuçları……....41

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tipik Bir Aksiyon Potansiyelinin Evreleri……...8

Şekil 2.1. 200 Zaman Örneklemesi İçinde Dış Uyarana Farklı Frekanslar Uygulanarak Çizilen Hücre Zarı Potansiyelinin Dallanma Diyagramı (Harici Uyartım Genliği $A = 0.1$ rad/sn)...……....16

Şekil 2.2. Harici Kaynağın Genlik Değişiminin Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeli Üzerindeki Etkisini Gösteren Dallanma Diyagramı Sonucu (Harici Uyartım Frekansı $\omega = 0.7$ Hz)…….……... 16

Şekil 2.3. Farklı Dış Uyaran Frekansları Uygulanmış Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modelinin Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) 0.15 Hz, b) 0.3 Hz, c) 0.7 Hz ve d) 1.5 Hz. ……..……17

Şekil 2.4. Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeline Harici Kaynağın Farklı Genlik Değerleri Uygulandığında Elde Edilen ve Zaman Domeni ile Faz Portresi Gösterimlerini İçeren Nümerik Simülasyon Sonuçları; a) A = 0,1 rad/sn, b) A = 0,3 rad/sn, c) A = 0,5 rad/sn ve d) A = 0,7 rad/sn…..…..……...…….....18

Şekil 2.5. Orijinal ve Revize Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeline, Harici Kaynağın Basitleştirilmiş Denklemlerle Sisteme Dâhil Edildiği Sabit Genlik Değerleri $A = 0.1$ rad/sn ve Sabit Frekans Değeri $\omega = 0.15$ Hz Uygulandığında Elde Edilen Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) Orijinal Sinüs İfadesi, b) 2. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, c) 3. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, d) 4. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi ve e) 5. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi.....21

Şekil 2.6. Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modeline ait Orijinal Simülasyon Sonucu……...23

Şekil 2.7. Orijinal ve Revize Edilmiş Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modeline Harici Kaynağın Basitleştirilmiş Denklemlerle Sisteme Dahil Edilmesiyle Elde Edilen Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) Orijinal Sinüs İfadesi, b) 2. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, c) 3. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, d) 4. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi ve e) 5. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi ….25

Şekil 2.8. AdEx Nöron Modeli Nöronal Davranışları için Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) Düzenli Ateşleme, b) Uyarlamalı Ateşleme, c) Başlangıçta Patlamalı Ateşleme, d) Düzenli Patlamalı Ateşleme, e) Gecikmeli Ateşleme, f) Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme ve g) Düzensiz Ateşleme.……...32

Şekil 3.1. Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modelinin SG_{DSP} Tabanlı Tasarım Şeması……34

Şekil 3.2. Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modelinin Farklı Frekanslardaki Dış Uyaran için FPGA Tabanlı Gerçekleştirim Sonuçları; a) 0.15 rad/sn, b) 0.3 rad/sn, c) 0.7 rad/sn ve d) 1.5 rad/sn..……...…….……35

Şekil 3.3. Memristif HR Nöron Modelinin SG_{DSP} Tabanlı Tasarım Şeması…….37

Şekil 3.4. Asimetrik Davranışlara Sahip Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirim Sonuçları; a) Zaman Domeni ve b) Faz Portresi Gösterimleri ……...37

Şekil 3.5. DSP Üreteci İçin Sistem Oluşturucu Üzerinde Oluşturulan AdEx Nöron Modeli...39

Şekil 3.6. Üstel Fonksiyonu Dördüncü Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Genişletmeye Dönüştürmek İçin DSP Üreteci Kullanılan Önceden Tanımlanmış Bloklar…….39

Şekil 3.7. Dördüncü Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi ile Oluşturulan AdEx Nöron Modelleri Nöronal Davranışlarının FPGA Tabanlı Gerçekleştirim Sonuçları; a) Düzenli Ateşleme, b) Uyarlamalı Ateşleme, c) Başlangıçta Patlamalı Ateşleme, d) Düzenli Patlamalı Ateşleme, e) Gecikmeli Ateşleme, f) Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme ve g) Düzensiz Ateşleme ……...…41

GİRİŞ

Sinir sisteminin temel yapıtaşı ve işlevsel birimi nöronlardır. Fizyolojik olarak canlı vücudundaki diğer hücrelerle benzerlik göstermesine rağmen; nöronları diğer hücrelerden ayıran önemli bir özellik, nöronların canlı vücudundaki veri aktarımını gerçekleştirmeleridir [1]. Bu doğrultuda yapılan bilimsel çalışmalar, nöronların fizyolojik yapısından ve dinamik davranışlarından yola çıkarak beynin işlevselliğine odaklanmaktadır. Bu işlevsellik ve morfolojik yapı nöronların işbirlikçi çalışmasına dayandığını göstermektedir. Bu sebeple, tek bir nöronun incelenmesi, beyin ve sinir sisteminin yapısını anlamak için önemli bir araştırma konusu haline gelir. Gerçek bir nöronun dinamik davranışları, çeşitli biyolojik nöron modelleri ile ifade edilir ve bu modeller genellikle birbiriyle ilişkili adi diferansiyel denklemler (ordinary differential equations; ODE) ile temsil edilir [2-6]. Herhangi bir biyolojik nöron modeli bir nöronun davranışını tanımladığında, bu modelin kapsamı gerçek nöronların biyofiziksel işlevselliklerinin matematiksel tanımlara yansıma düzeyine göre sınıflandırılabilir. Bu model tanımları üç kategoriye genellenebilir [7]: Hodgkin-Huxley (HH) ve Morris-Lecar (ML) modelleri gibi trans-indüktans tanımlarını yansıtan modeller birinci kategoride yer alır ve biyofiziksel işlevsellikler hakkında detayları açıklar [5, 6]. İkinci kategori, FitzHugh–Nagumo (FHN) ve Hindmarsh-Rose modelleri [8, 9] gibi bağlantıcı modelleri içerir. Bu tip modeller, biyolojik işlevselliklerden ziyade zar potansiyelinin üretimine odaklanır. Son kategori, nöron popülasyonları arasındaki sinaptik bağlantıları hesaba katan Wilson-Cowan modeli gibi sinir ağlarıdır [10].

Nöron tanımlamalarının nümerik simülasyonlarla analizlerinin yanı sıra donanım gerçekleştirimlerinin yapılması da dikkat çeken çalışmalardandır. Bu çalışmalarda, nöral dinamiklerini etkilemeden ve mümkün olan en az eleman kullanımı ile yapılan gerçekleştirimler arzu edilmektedir. Bu amaçla yapılan analog [11-16] ve dijital [17-19] donanımlar ile gerçeklenen çeşitli nöral yapılar literatüre kazandırılmıştır. Analog devre tasarımları göz önüne alındığında;

Erdener ve Özoğuz (2016) [11] çalışmalarında güç tüketimi düşük olan ve aksiyon potansiyeli davranışlarını üretebilen eşik altı Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor; CMOS) tasarım tekniği kullanımıyla etkin nöron ve sinaps devrelerine sahip dinamik bir nöron modelinin gerçekleştirimi sunulmuştur. Glover vd. (2002) [12] AdEx nöronlarına ait gerçek zamanlı analizlerinde iki farklı çip tasarımı uygulayarak, ilk çipten alınan verilerle ikinci programlanabilir çipin veri işleme sürecini nöron ağ mimarisiyle sunmuşlardır. Frady vd. (2022) [13] Intel'in nöromorfik araştırma işlemcisi Loihi-2 üzerindeki simülasyon deneylerinde akış verilerini verimli bir şekilde işlemek için kullanılabilecek gelişmiş nöron modellerini ele almışlardır. Bu çalışma, sinyal işleme uygulamaları için kullanılabilecek verimli bir aksiyon potansiyeli tabanlı spektrogram kodlayıcı için yeni teknikler sunmaktadır. Khakipoor vd. (2022) [14] çalışmalarında, FitzHugh-Nagumo modelini bir LC konvansiyonel osilatörüne benzetmek için bir devre tekniği kullanmıştır. Millner vd. (2010) [15], tetikleyici bir akım ile uyarılan zarın aksiyon potansiyelini, transistör seviyesindeki bir prototip çip üzerinde analiz ederek nöron hücre benzetimlerini sağlamıştır. Sharifipoorand ve Ahmadi (2012) [16] çalışmalarında, Izhikevich modelinin bir versiyonu olan parçalı doğrusal bir modele dayanan nöronların CCII analog elemanlarını kullanarak bir uygulama yapmışlardır ve HSPICE nümerik benzetim ortamında CMOS 350 nm ±1,5 V teknolojisi ile farklı nöron davranışları için sonuçlar sunmuşlardır.

Öte yandan, dijital devre tasarımları dikkate alındığında; Soleimani vd. (2012) [17] çalışmalarında hem tek bir nöron hem de bir nöron ağı için biyolojik nörona benzer farklı davranışları yeniden üretebilen bir dizi parçalı doğrusal nöron modelleri sunmaktadır. Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array; FPGA) üzerinde denetimli ve denetimsiz öğrenme algoritmaları ile eğitilebilen kompakt bir model yapısı geliştirilip, aksiyon potansiyeli hız kodlamasına dayalı olarak, bir karakter tanıma çalışması gerçekleştirmiştir. Matsubara vd. (2011) [18] çalışmalarında basit asenkron sıralı mantık devresi tarafından uygulanabilen ve çeşitli doğrusal olmayan olguları ve uyarıcı girdilere karşın tepkiler sergileyebilen genelleştirilmiş bir AdEx nöron modeli önermiştir. Grübl vd. (2020) [19] çalışmalarında, nöromorfik devreler tasarımlarında kullanılan genel amaçlı bir mikroişlemci yapısında paralel dijital veri yollarının hızlandırılması için özel metodolojiler geliştirmişlerdir.

Biyolojik nöron modellerinin analog ve dijital donanım gerçekleştirim çalışmalarında kullanılan elektronik cihazlarda arzu edilen bazı özellikler ön plana çıkmaktadır. Bu özellikler; düşük güç tüketimi, düşük işlem kapasitesi ihtiyacı, ortaya çıkacak farklı konsept çalışmalarında ilave işlemlere ihtiyaç duymaksızın yeniden tasarım yapabilme ve tasarlanan sistemlerin test edilebilmesine olanak sağlama şeklinde özetlenebilir. Biyolojik nöron modellerinin, dahası nöral

ağların, analog ve dijital platformlarda gerçekleştirimlerinde hızlı ve kolay donanım tasarımı ile nöral yanıtların gerçek zamanlı olarak elde edilmesi bu platformların kullanılmasının faydalarındandır [20]. Donanımsal gerçekleştirim tekniklerinde, gürültüye karşı tolerans sağlama, işlem esnekliği, anlaşılabilir donanımsal ara yüzleri ve daha kolay test edilebilirlik özellikleri ile dijital gerçekleştirimler analog eşdeğerlerine göre daha fazla tercih edilir [21]. Dijital gerçekleştirimlerde elemanların donanım kullanım ihtiyacı azken, bilgi işleme süreçleri hızlıdır [22]. Dijital Sinyal İşleme (Digital Signal Processing; DSP) ve FPGA gibi donanımlar dijital uygulama devreleri için alternatif örneklerdendir. DSP tabanlı uygulamalar, sıralı kod işleyiş yapıları nedeniyle nöronların paralel dinamik davranışlarının modellenmesinde yeterli değildir [23]. Öte yandan FPGA'ler, yeniden yapılandırılabilirlik ve paralel veri işleme özelliği ile sinir ağlarının hızlı prototiplenmesi için oldukça uygun yapılardır [24].

Yeterli işlem kapasitesi ve gerçekleştirim hızı, doğru prototiplendirme ve kapsamlı bir çözüm sunma, nöron modeli gerçekleştirim çalışmalarında kullanılan donanımlarda arzu edilen özelliklerdendir. Bununla birlikte, tüm bu özellikleri bir arada sunan bir donanımın belirlenmesi zor bir problemdir. Sayısal simülasyonlarda biyolojik süreçlerin ayrıntılı tanımlamalarının yer aldığı biyolojik nöron modeli kullanımları tercih edilmekle birlikte, elektronik donanım gerçekleştirim sürecinde iki önemli noktaya dikkat edilmelidir: Bunlardan ilki gerçekleştirme sürecinde model dinamiklerinde herhangi bir değişiklik olmaması, diğeri ise kullanılan donanımın belirtilen özelliklerin makul bir kısmını sağlamasıdır [25].

Nöronların ve nöral yapıların literatürde mevcut olan modelleri incelendiğinde, nöronal karakteristiğin yakalanması için modellerde genellikle;

- Eksponansiyel fonksiyonlar ($\ln(x+a)$, e^{x+a})
- Logaritmik fonksiyonlar ($\log_a x$)
- Sigmoid fonksiyonları ($\frac{1}{1+e^{-x}}$)
- Gauss Fonksiyonları ($ae^{\frac{(x-b)^2}{2x^2}}$)
- Trigonometrik fonksiyonlar ($\sin x$, $\cos x$, $tanx, cotx$, vb.)
- Hiperbolik fonksiyonlar ($\sinh x$, $\cosh x$, $tanhx, arsinhx$, vb.)

gibi bazı doğrusal olmayan tanımlamaların kullanıldığı görülmektedir. İlgili doğrusal olmayan fonksiyonlar analog olarak gerçeklenirken, kullanılan elektronik donanımın karakteristik

tanımlamalarından yararlanılmaktadır [26, 27]. Öte yandan, bu fonksiyonların dijital elemanlarla inşasında doğrudan gerçekleştirimleri ise oldukça güçtür. Bu sebeple ilgili doğrusal olmayan fonksiyonların seri açılımları ile doğrusallaştırılarak yeniden tanımlanmakta ya da eşdeğer fonksiyon tanımlamalarından yararlanılmaktadır. Ostojic ve Brunel (2011) [28] çalışmalarında Leaky Integrate-and-Fire (LIF), Exponential Integrate-and-Fire (EIF) ve iletkenliğe dayalı Wang-Buzsaki modelinde standart ters korelasyon analizi kullanarak filtre karakteristiğini doğrusallaştırmışlardır ve bu süreçteki parametre değişimlerinin sisteme etkilerini nicel olarak karşılaştırmışlardır. Amiri vd. (2019) [29] çalışmaların da Hodgkin-Huxley nöron modelinde fonksiyonların seri açılımları ile bazı denklemleri sadeleştirme yoluna giderek kök ortalama kare hatası (Root Mean Square Error; RMSE) hesaplamaları ile elde edilen nicel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Shama vd. (2020) [30] çalışmalarında Hodgkin-Huxley Nöron Modeline alternatif bir yaklaşımda bulunup, modeldeki hiperbolik fonksiyonları iki tabanındaki sistemlere çevirerek FPGA %69 tasarruf ile elde etmişlerdir. Benda vd. (2010) [31] çalışmalarında Integrate-and-Fire nöron modeline transfer fonksiyonu uygulayarak doğrusal ölçekli sonuçları nicel grafiklerle değerlendirmişlerdir. Lek vd. (1996) [32] çalışmalarında doğrusal olmayan fonksiyon içeren nöral ağlarda hataların kareleri toplamının minimizasyonunu sıfıra yaklaştırarak doğrusal hale getirilen nöral ağ verilerini nicel olarak analiz etmişlerdir. Tzilivaki vd. (2019) [33] çalışmalarında sadeleştirilmiş nöral devre modellemesi ile hızlı yükselme (fast spiking) hücrelerindeki iki modlu ve iki aşamalı integrasyon sürecinin, nöral kodlamada önemli ölçüde kaynak tasarrufu sağladığını göstermişlerdir.

Bu tez çalışmasının amacı; biyolojik nöron modellerinin elektronik donanımlarla gerçekleştirimleri sürecinde; özellikle dijital elektronik tasarımların yapıldığı gerçekleştirimlerde, donanımsal olarak inşası güç olan doğrusal karakteristiğe sahip olmayan fonksiyonlar yerine, bu fonksiyonların seri açılımlarının modellere adapte edilmesidir. Adapte edilen seri açılımı ve orijinal tanımlamanın arasındaki genlik ve faz hata miktarlarının belirlenmesiyle bu tez çalışması, hata hesaplanma konusunu da kapsamaktadır. Son olarak biyolojik nöron modelinin işlevselliğinde değişikliğe sebep olmayan ve donanım maliyeti açısından değerlendirildiğinde minimum donanım kullanımı imkânı sunan seri açılım terim sayısının kullanıldığı biyolojik nöron modellerinin FPGA ile gerçekleştirimlerinin yapılması hedefi ile ilgili tez çalışması biyolojik nöron modellerinin donanım gerçekleştirimini de kapsamaktadır.

Tez çalışmasında amaçlanan dijital donanımlar için model revizyonu amacı doğrultusunda, üç nöron modeli ele alınmaktadır. Ma vd. (2019) [34]' te elektromanyetik alanın etkisinin FitzHugh-Nagumo nöron modeline dahil edilen yeni bir durum değişkeni ile tanımlandığı ve dış ortamdaki elektrik alandan veya hücre zarındaki iyonların konsantrasyon değişiminden kaynaklanan ortamın polarizasyon modülasyonunun tarif edildiği bir model tanıtılmıştır. Bu modelde elektromanyetik alanın nöron dinamikleri üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi için '$I_{ext} = A\,sin(\,\omega t)$' fonksiyonu kullanılmaktadır. Ma vd. (2019) [34]' te tanımlanan bu model, tez çalışmasında elektromanyetik alan etkili FitzHugh-Nagumo nöron modeli olarak anılmaktadır. Nöral sistemlerde nöronların ürettiği elektriksel aktiviteler nöronların bulunduğu elektrofizyolojik ortamlarla yakından ilişkilidir. Ma vd. (2019) [34]' teki çalışmada nöral aktivite dinamiklerini tanımlarken elektromanyetik indüksiyonun da tanımlamalara dahil edildiği bir model tanıtılmıştır. Tanımlanan bu model, burada memristif HR nöron modeli olarak anılmaktadır. Son olarak Izhikevich modelindeki parabolik ifade yerine eksponansiyel bir fonksiyon kullanılması ile geliştirilen, nöronların fizyolojik özellikleri yerine üretilen aksiyon potansiyeli desenlerine odaklanan modeller arasında yer alan AdEx nöron modeli ele alınmaktadır.

Tez çalışmasının bölümlendirilmesi şu şekildedir: Bölüm 1' de nöron elektrofizyolojisi hakkında bilgilendirilme yapılmıştır. İlgili bölümün devamında önerilen sistemin matematiksel seri açılımları tanıtılmıştır. Literatürde önerilen nöron modellerinde sık karşılaşılan doğrusal olmayan fonksiyonların seri açılımları hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 2' de tez çalışmasında kullanılan Elektromanyetik Alan Etkili FHN Nöron modeli, memristif HR nöron modeli ve AdEx nöron modeli tanıtılmaktadır. Modellerde kullanılan doğrusal olmayan fonksiyonların yerine matematiksel seri açılımlar kullanılarak sisteme adapte edilmiş olup orijinal ve revize edilmiş modellerin nümerik analizleri ve hata hesaplamalarına yönelik sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Bölüm 3' te bahsi geçen nöron modellerinin FPGA donanımı kullanılarak gerçekleştirimi yapılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

NÖRON MORFOLOJİSİ VE TAYLOR-MACLAURİN SERİSİ

1.1. Nöron Elektrofizyolojisi

Sinir sisteminin temel işlevsel birimi sinir hücreleridir ve sinir hücrelerine aynı zamanda nöron denir. Nöronlar, dış etken uyaranlarının sinir sisteminde elektriksel ve kimyasal yollarla iletilmesini sağlarlar. Nöronlar, canlı vücuduna gelen uyarıları merkezi sinir sistemine, merkezi sinir sisteminden gelen cevapları da vücuda aktaran hücrelerdir.

Tipik bir nöron morfolojisi üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar hücre gövdesi, dentrit ve aksonlardır. Hücre gövdesi nöronun fonksiyonel işlem merkezidir ve diğer adı nörositondur (somadır). Bu bölgede mitokondri, endoplazmik retikulum, golgi cisimciği vb. organeller bulunur. Dentritler hücre gövdesinden dışarıya doğru saçak gibi uzanan uzantılardır. Bu uzantılar hücrede reseptör görevi yaparak diğer nöronlardan gelen bilgileri alırlar ve nörositona iletirler. Aksonlar hücre gövdesinde işlenen bilgileri sentezleyen ve diğer nöronlara veya efektör organlara (örneğin kas) taşıyan ince uzun uzantılardır.

Hücre zarı tüm prokaryot ve ökaryot hücrelerin stoplazmasını çevreleyen, çift katlı yağ tabakası (fosfolipid), protein molekülleri ve karbonhidrat içeren ve hücreyi dış ortamdan ayıran temel bir yapıdır [35-37]. Yapay bir hücre zarı saf fosfolipit çift katmandan oluştuğu için yapısında serbest iyonları ve taşıyıcılarını barındırmadığından etkili bir yalıtkandır. Birim alan başına iletkenliği çok küçük olup yaklaşık $10^{-13}\,S/m^2$' dir [38]. Gerçek bir hücre zarı iki fosfat kalınlığında fosfolipit çift katmandan meydana gelmektedir. Yapısında yağ tabakaları, çeşitli iyon kanalları ve sonradan oluşabilecek akımların geçmesine müsaade eden kanalları barındırdığı için yalıtkanlığı yapay hücre

zarına göre oldukça düşüktür. Hücre zarında gömülü bulunan bu iyon kanalları hücre içi ve dışı arasında iyon geçişini sağlar [39].

Hücre zarı ile birbirinden ayrılmış hücre iç ve dış ortamında bulunan yüklü iyonlar elektriksel akımın yük taşıyıcıları ve ileticileridir. Her iki bölgede farklı yoğunluklarda bulunan iyonların, zıt yüklü, Q yük miktarı kadarının bir V elektriksel potansiyelinin uygulanması ile karşılıklı hücre zarı üzerinden yer değiştirmesi sağlanabilir. Böylece hücrede pozitif ve negatif yüklerin çoğunluğu hücre zarının farklı taraflarında bulunacaktır. Bu durum hücre zarının dielektrik izolatör maddesi gibi davranarak kapasitif özelliğinin olduğunu göstermektedir. Hücre zarı $Q=V_mC_m$ ile hesaplanabilen elektriksel bir yük miktarını üzerinde tutabilmektedir. Bu yüklenme hücre zar potansiyelini oluşturmaktadır.

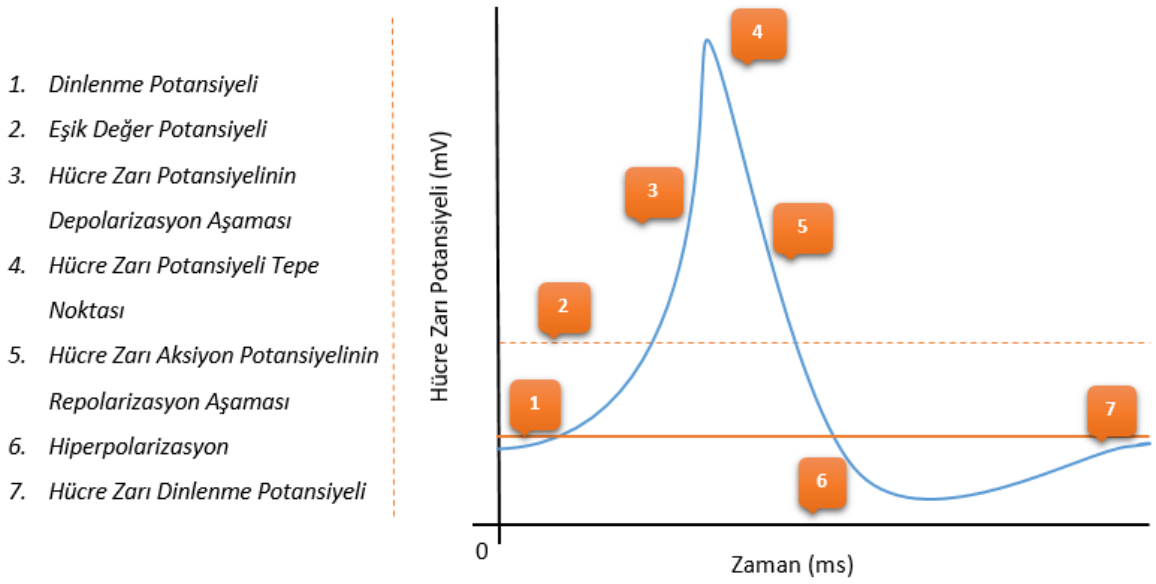
Hücre zarının elektriksel iletkenlik ve kapasitesinden dolayı hücre zarı bir RC devresi özelliğindedir. İyon kanalları birer direnç özelliği gösterir ve seçici geçirgen lipid tabaka ise kondansatör gibi çalışır. Bu tür devrelerin karakteristik değişkeni olan zaman sabiti, *"hücre zarı zaman sabiti"* ($\tau = R_mC_m$) olarak tanımlanır. Hücre zarı zaman sabitinin biyofiziksel anlamı hücreye uygulanan uyartıma karşılık hücrenin cevap verebilme süresi olarak tanımlanmaktadır.

İyon kanalları farklı iyon türleri için özelleşmiştir. Tabaka üzerinde homojen olmayacak şekilde dağılan iyon kanalları; gerilim bağımlı (voltage-dependent) [40], nörotransmiter bağımlı (ligand-dependent) [41] ve mekaniksel olarak [42] açılıp kapanarak iyonların giriş ve çıkışlarını sağlarlar. Hücrede içinde ve dışında meydana gelen elektriksel aktivitelerin gerçekleşmesinde etkin rol alan birçok pozitif ve negatif yüklü sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}), klor (Cl^-) gibi iyonlar vardır.

Canlı hücrelerini intrasellüler ve ekstrasellüler ortam olmak üzere ikiye ayıran hücre zarının iç yüzeyinde negatif yükler, dış yüzeyinde ise pozitif yükler daha fazla bulunmaktadır [37]. Hücre zarının iki yüzeyindeki bu yoğunluk farkından dolayı bir hücre zarı potansiyeli meydana gelir. Hücre zarı potansiyeli, hücre içi ve hücre dışı potansiyeli farkı şeklinde ifade edilmektedir ($V_m = V_{iç} - V_{dış}$). Herhangi bir dış uyartım almayan nöronun hücre zarı potansiyeli negatifken sabit bir değer almaktadır. Bu potansiyel fark *'dinlenme potansiyeli'* olarak isimlendirilir ve -40 mV ile -90 mV arasında değer almaktadır.

Nöronlar bilgiyi işleme ve iletme görevlerini yerine getirirken sistemdeki diğer nöronlarla etkileşim ve iletişim halindedir. Bu etkileşim "sinaps" olarak bilinen özel yapılar aracılığı ile gerçekleştirilir. Normal bir nöron yaklaşık 10^3 adet sinaptik bağlantıya sahiptir [43]. İnsan beyninde yaklaşık 10^{12} nöron olduğu düşünülürse; sadece beyinde yaklaşık 10^{15} adet sinaptik bağlantı mevcuttur. Sinaps bağlantılarında bilgiyi (aksiyon potansiyelini) gönderen kısım "presinaptik nöron" ve bilgiyi alan kısım ise "postsinaptik nöron" olarak adlandırılır. Postsinaptik nöronun hücre zarı üzerinde reseptörler yer alır. Günümüz görüntüleme ve elektrofizyoloji teknikleri ile yapılan deneysel çalışmalarda iletim mekanizmaları açısından iki tür sinaps tespit edilmiştir. Bunlar; elektriksel ve kimyasal sinapslardır.

İnsan vücudundaki tüm hücreler, hücre içi ve dışı arasındaki iyon yoğunluk farklarından kaynaklanan hücre zarı potansiyelini barındırırlar. Özellikle sinir ve kas hücreleri gibi uyarılabilir hücre zarlarındaki gerilim bazı durumlarda ani ve hızlı bir değişim gösterir. Bu hızlı değişim "ateşleme", "aksiyon potansiyeli" ya da "spike" olarak adlandırılır (Şekil 1.1). Bu ani gerilim değişikliği uyarılabilme özelliğine sahip hücrelere gelen uyartımın belirli bir eşik değeri aşması neticesinde gerçekleşir.



Şekil 1.1. *Tipik Bir Aksiyon Potansiyelinin Evreleri*

Biyolojik nöron modellerinde aksiyon potansiyelinin evreleri tanımlanırken doğrusal olmayan fonksiyon tanımlamalarından yararlanılır. Aksiyon potansiyeli evrelerinden dinlenim ve depolarizasyon aşamalarının tanımında üstel fonksiyondan (exponansiyel) yararlanılmaktadır.

Nöron modellerinde ateşleme sınırlamalarının belirlenmesinde de parabolik ve eksponansiyel fonksiyonlar kullanılmaktadır. Biyolojik nöron hücrelerine ait kimyasal sinaps tanımlanması, doğrusal olmayan sigmoid fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. İyon kanalları arasındaki bağlantılar hiperbolik fonksiyon yardımı ile tanımlanıp sınırlandırılmaktadır. Biyolojik nöron modellerine dış uyartım olarak tanımlanan ifadelerde ise trigonometrik ve gauss fonksiyonları gibi doğrusal olmayan ifadeler etkin olarak kullanılmıştır.

Bu doğrusal olmayan matematiksel fonksiyonların dijital platformlarda tanımlanması, işlenmesi ve donanım gerçekleştirimi çalışmaları için önemli bir engeldir. Nöron modelinin dijital platformlara aktarılması için alternatif yaklaşım olarak matematiksel seri açılımlardan yararlanılarak nöron modellerinin gerçeklenimi sağlanabilmektedir. Matematiksel seri açılımların popüler kullanımlarından biri de Taylor-Maclaurin matematiksel seri açılımlarıdır.

1.2. Taylor-Maclaurin Serisi

Taylor Serisi matematikte, bir fonksiyonun, o fonksiyonun terimlerinin tek bir noktadaki türev değerlerinden hesaplanan sonsuz toplamı şeklindeki açılımıdır. Taylor serisi' nin başlangıç değeri $a = 0$ olurak alınırsa Taylor serisi basitleşerek *Maclaurin Serisi'*ne dönüşür. Serinin terimlerinden sonlu bir sayı kadarını kullanmak, seriyi bir fonksiyona yakınsamak için öngörülmüş genel bir yöntemdir. Taylor serisi, Taylor-Maclaurin polinomunun limiti olarak da görülebilir.

Hesaplamada Taylor Teoremi, k' inci sıra Taylor polinomu olarak adlandırılan k dereceli bir polinom tarafından verilen bir nokta etrafında k-defa türevlenebilir ve bir fonksiyonun yaklaşıklığını verir. Birinci dereceden Taylor polinomu, fonksiyonun doğrusal yaklaşımıdır ve ikinci dereceden Taylor polinomu genellikle ikinci dereceden yaklaşım olarak adlandırılır. Taylor serisi teoremi, üstel fonksiyon ve trigonometrik fonksiyonlar gibi birçok transandantal fonksiyonun değerlerini doğru şekilde hesaplamak için basit aritmetik formüller verir. Taylor serisinin ilk $n + 1$ terimlerinin oluşturduğu kısmi toplam, fonksiyonun n inci Taylor-Maclaurin polinomu olarak adlandırılan, derecesi arttıkça daha iyi hale gelen n dereceli bir polinomdur.

Gerçek veya kompleks değerli a sayısında sonsuz türevli olan $f(x)$ fonksiyonunun reel veya kompleks değerli Taylor serisi, bir kuvvet serisidir:

$$f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!}(x-a)^3 + \ldots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n \qquad (1.1)$$

Denklem 1.1' de $n!$, n'nin faktöriyelini belirtir. Denklem 1.1, daha kısa şekilde Denklem 1.2' deki gibi yazılabilir.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n, \tag{1.2}$$

Denklem 1.2' de $f^{(n)}(a)$, f' in a noktasında hesaplanan n inci türevini göstermektedir. f' in sıfır mertebesinden türevi f' in kendisi olarak tanımlanır. $(x-a)^0$ ve $0!$değeri $1'$e eşittir. $a = 0$ olduğu noktada seri Maclaurin Serisi'dir [44].

Eğer $f(x)$, kompleks düzlemde (veya gerçek doğrudaki bir aralıkta) b merkezli açık bir dairede yakınsak bir güç serisi tarafından verilirse, bu bölgede analitik olduğu söylenir. Bu bölgedeki *x* için fonksiyon yakınsak güç serisi tarafından verilir. Böylece bu bölgedeki x için f yakınsak bir kuvvet serisi, Denklem 1.3' te verilmiştir:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x-a)^n \tag{1.3}$$

Yukarıdaki formülü x ile n kez işlem yapıldıktan sonra $x = b$ için Denklem 1.4' teki ifadeyi verir:

$$\frac{f^n(b)}{n!} = a_n \tag{1.4}$$

Böylece kuvvet serisi açılımı Taylor serisi ile uyumludur.

Polinomlar, üstel fonksiyon e^x ve trigonometrik fonksiyonlar sin ve cos doğrusal olmayan fonksiyonların örneklerindendir. Taylor serisi, fonksiyonun ve tüm türevlerinin değeri tek bir noktada biliniyorsa, tüm bir fonksiyonun her noktadaki değerini hesaplamak için kullanılabilir.

Taylor serisinin analitik fonksiyonlar için kullanımları şunları içerir:

- Serinin kısmi toplamları (Taylor polinomları), fonksiyonun yaklaşık değerleri olarak kullanılabilir. Yeterince çok terim dâhil edildiğinde bu yaklaşımlar daha iyidir.
- Kuvvet serilerinin türevlenmesi ve bütünleşmesi terim terim yapılabilir.
- Bir analitik fonksiyon, karmaşık düzlemde açık bir disk üzerindeki bir holomorfik fonksiyona benzersiz bir şekilde genişletilir.
- Seri açılımlar, fonksiyon değerlerini sayısal olarak hesaplamak için kullanılabilir.
- Kuvvet serileri gösterimi üzerinde cebirsel işlemler kolaylıkla yapılabilir.

Doğrusal olmayan fonksiyonlardan $\sin(x)$ için, matematiksel seri açılım Denklemi 1.5' te verilmiştir:

$$\sin(x) \approx x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!}.. \tag{1.5}$$

Bu yaklaşımdaki hata, '$\frac{|x|^9}{9!}$' dan fazla değildir. Orijinde '$-\pi < x < \pi$' merkezli tam bir çevrim için hata $0{,}08215$' ten küçüktür. Özellikle, '$-1 < x < 1$' için hata $0{,}00003$' ten küçüktür.

Genel olarak, Taylor-Maclaurin serisinin yakınsak olması gerekmez. Bir f fonksiyonunun Taylor-Maclaurin serisi yakınsak olsa bile, limitinin genel olarak $f(x)$ fonksiyonunun değerine eşit olması gerekmez. Denklem 1.6 da fonksiyon:

$$f(x) = \begin{cases} e^{-1/x^2}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases} \tag{1.6}$$

$x = 0$' a sonsuz türevlidir ve tüm türevleri sıfırdır. Sonuç olarak, $f(x)$ in $x = 0$ civarındaki Taylor-Maclaurin serisi aynı şekilde sıfırdır. Ancak $f(x)$ sıfır fonksiyonu değildir, dolayısıyla orijin etrafındaki Taylor-Maclaurin serisine eşit değildir. Böylece, $f(x)$ analitik olmayan bir düzgün fonksiyonun örneğidir.

Gerçek analizde, bu örnek, Taylor-Maclaurin serileri yakınsasalar bile $f(x)$'e eşit olmayan sonsuz türevlenebilir $f(x)$ fonksiyonlarının olduğunu gösterir.

Doğrusal olmayan birkaç fonksiyon örneğinin Maclaurin serisine genişletmesi aşağıda verilmiştir [45].

Üstel fonksiyon e^x (e tabanı ile) Maclaurin serisine sahiptir. Denklem 1.7, tüm x değerleri için yakınsamaktadır.

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots \tag{1.7}$$

Logartima fonksiyonu (e tabanı ile) Maclaurin serisine sahiptir. Denklem 1.8, tüm x değerleri için $|x| < 1$ değerinde yakınsar. (Ayrıca, $\ln(1-x)$ serisi $x = -1$ için yakınsar ve $\ln(1+x)$ serisi $x = 1$ için yakınsar.)

$$\ln(1-x) = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = -x - \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} - \cdots, \tag{1.8a}$$

$$\ln(1+x) = -\sum_{n=0}^{\infty} (1)^{n+1} \frac{x^n}{n!} = x - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} - \cdots, \tag{1.8b}$$

Geometrik seri ve türevleri Maclaurin serisine sahiptir. Denklem 1.9, tüm x değerleri için '$|x| < 1$' değerinde yakınsar.

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \tag{1.9a}$$

$$\frac{1}{(1-x)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} n x^{n-1} \tag{1.9b}$$

$$\frac{1}{(1-x)^3} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n-1)n}{2} x^{n-2} \tag{1.9c}$$

Trigonometrik fonksiyonlar ve trigonometrik fonksiyonların tersleri Denklem 1.10' da ki Maclaurin serilerine sahiptir:

$$\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1} = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \cdots, \text{ (Tüm x değerleri için)} \tag{1.10a}$$

$$\cos x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n} = x - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \cdots, \quad \text{(Tüm x değerleri için)} \tag{1.10b}$$

$$\tan x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{2n}(-4)^n(1-4^n)}{(2n)!} x^{2n-1} = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \cdots, (|x|<\pi/2) \tag{1.10c}$$

$$\sec x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{E_{2n}(-1)^n}{(2n)!} x^{2n} = x + \frac{x^2}{2} + \frac{5x^4}{24} + \cdots, \ (|x|<\pi/2) \tag{1.10d}$$

Tüm açılar radyan cinsinden ifade edilir. $tanx$ açılımlarında görünen B_k sayıları Bernoulli sayılarıdır [46]. $secx$' in açılımındaki E_k, Euler sayılarıdır [47].

Hiperbolik fonksiyonlar, Denklem 1.11' de karşılık gelen trigonometrik fonksiyonlar için serilerle yakından ilişkili Taylor-Maclaurin serilerine sahiptir:

$$\sinh x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \cdots, \text{ (tüm x değerleri için)} \tag{1.11a}$$

$$\cosh x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!} = x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \cdots, \text{ (tüm x değerleri için)} \quad (1.11b)$$

$$\tanh x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{2n}(4)^n(4^n-1)}{(2n)!} x^{2n-1} = x - \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} - \cdots, \ (|x|<\frac{\pi}{2}) \quad (1.11c)$$

$tanx$ açılımlarında görünen B_k sayıları Bernoulli sayılarıdır.

Hiperbolik fonksiyonlar, trigonometrik fonksiyonlarla benzerdir. Temel hiperbolik fonksiyonlar; hiperbolik sinüs $sinhx$, hiperbolik kosinüs $coshx$, bunlardan türetilen hiperbolik tanjant $tanhx$ ve benzer fonksiyonlardır. Hiperbolik fonksiyonların kullanım alanları; elektromanyetik teori, ısı transferi, akışkanlar dinamiği, özel görelilik, Laplace denklemleri, Doğrusal Diferansiyel Denklemler gibi alanlardır. Hiperbolik fonksiyonların Euler açılımları ise şu şekildedir:

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = \frac{e^{2x}-1}{2e^x} \quad (1.12a)$$

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} = \frac{e^{2x}+1}{2e^x} \quad (1.12b)$$

$$\tanh x = \frac{sinhx}{coshx} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1} \quad (1.12c)$$

$$\coth x = \frac{coshx}{sinhx} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}} = \frac{e^{2x}+1}{e^{2x}-1} \quad (1.12d)$$

$$\operatorname{sech} x = (coshx)^{-1} = \frac{2}{e^x + e^{-x}} = \frac{2e^x}{e^{2x}+1} \quad (1.12e)$$

$$\operatorname{csch} x = (sinhx)^{-1} = \frac{2}{e^x - e^{-x}} = \frac{2e^x}{e^{2x}-1} \quad (1.12f)$$

İKİNCİ BÖLÜM

SERİ AÇILIMLARIN NÖRON MODELLERİNE ADAPTASYONU

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan elektromanyetik alan tanımlı FHN Nöron Modeli, Memristif HR Nöron Modeli ve AdEx nöron modelleri tanıtılarak bu modellerin matematiksel denklemlerinde kullanılan doğrusal olmayan fonksiyonların yerine Taylor-Maclaurin matematiksel seri açılımları kullanılıp denklemler daha basit hale getirilerek nöron modelleri revize edilmiştir. Revize edilen nöron modellerinin nümerik simülasyonları ile orijinal nöron modellerine ait nümerik simülasyon sonuçları ve bu sonuçlara yönelik hata hesaplamaları bir arada sunulmuştur.

2.1. Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeli

Nöron zarlarının yüzeyinde meydana gelen elektriksel iletim, kalsiyum, potasyum ve sodyum gibi yüklerin akışına dayanır. Bu potansiyel değişim, bir akım akışı anlamına gelir ve değişken bir akım akışı varsa, bir akı değişikliği söz konusu olur [5,48-53]. Buna göre, son çalışmalar, bu elektrofizyolojik nöronal aktivitelerin zamanla değişen bir elektromanyetik alan dağılımını indükleyebileceğini öne sürmektedir. Bu elektromanyetik alan dağılımını açıklamak için, zar yüzeyi yüklü bir levha olarak kabul edilmiş ve yüzeyinin yük yoğunluğu σ, elektrik yükünün q' nun yüzey alanına S oranı olarak yazılmış olup '$\sigma = q/S$' şeklinde ifade edilmiştir. r yarıçaplı bir küre şeklindeki nöron için dielektrik sabiti ε olduğunda indüklenen elektromanyetik alan formülü '$E = \left({}^{q}/_{2S\varepsilon}\right)$' veya '$E = \left({}^{\sigma}/_{2S\varepsilon}\right)$' olmaktadır. Yüklü plakalar arasındaki voltaj farkı, '$V = rE \cong E\sqrt{S}$' da olduğu gibi elektromanyetik alana bağlı olarak tanımlanabilir. Nöronlarda, nöron zarının lipid tabakaları iletken malzeme olarak ve bu tabakalar arasındaki boşluk bir yalıtkan malzeme olarak kabul edilir, bu nedenle biyolojik nöron modellerine genellikle bir kapasitör tanımı C eklenir [54, 55]. Benzer şekilde, p iç parametresine sahip ortamın indüklenen elektromanyetik

alan indüktansı L dikkate alınarak Referans [34]' te yeni bir durum değişkeni olarak kabul edilmiştir. Bu varsayım, Denklem 2.1' deki gibi genel terimlerle formüle edilmiştir.

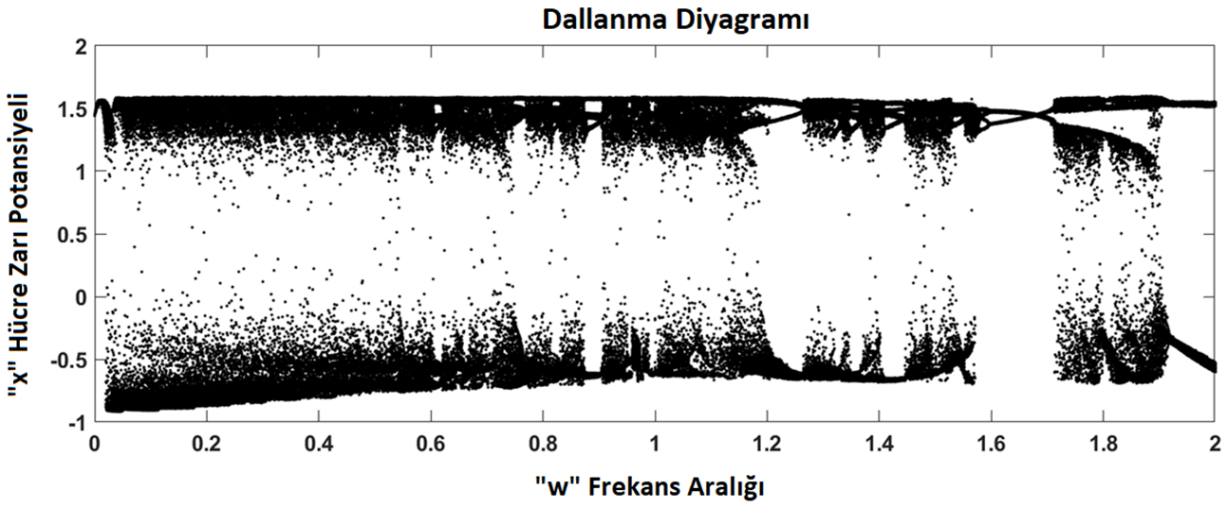
$$\begin{aligned} C\frac{dV}{dt} &= f(V,i,p), \\ L\frac{di}{dt} &= g(V,i) + rE, \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{1}{2\varepsilon S}\frac{dq}{dt} = \frac{1}{2\varepsilon S}i = ki \end{aligned} \tag{2.1}$$

Denklem 2.1' de ' $f(V,i,p)$' ve ' $g(V,i)$ ' fonksiyonları doğrusal olmayan fonksiyonlardır ve V,i sırasıyla hücre zarı potansiyelini ve transmembran akımını temsil ederler. Bahsi geçen özelliklerin FitzHugh-Nagumo nöron modeline uyarlanması ile elde edilen elektromanyetik alan etkili FitzHugh-Nagumo nöron modeli, Denklem 2.2' deki gibidir [34].

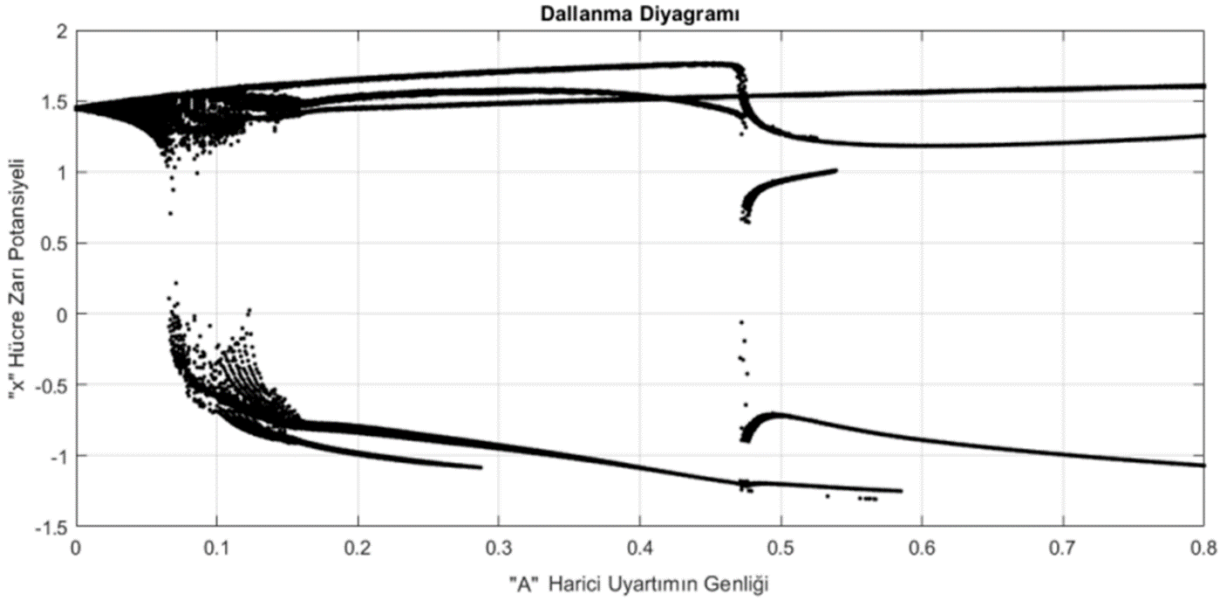
$$\begin{aligned} \sigma\frac{dx}{dt} &= x - \frac{x^3}{3} - y + I_{ext}, \\ \frac{dy}{dt} &= ax + by + d + rE, \\ \frac{dE}{dt} &= ky \end{aligned} \tag{2.2}$$

Burada, x durum değişkeni hücre zarı potansiyelinin aktivasyonunu tanımlarken, y durum değişkeni nöronun inaktivasyonunu temsil eder. a,b,c,d ve k model parametreleridir. Dış akım uyarıları '$I_{ext} = A\,sin(\omega t)$' parametresi ile verilir. Elektromanyetik alan etkisi içermeyen biyolojik nöron modellerinde nöronlara uygulanan dış akımlar genellikle doğrusal akımlar olarak tanımlanır [56-58]. Ancak elektromanyetik alanın etkisinin görülebilmesi için bir akı değişimi, yani zamana bağlı bir akım gerekir. Zamana bağlı akım değeri için FitzHugh-Nagumo nöron modelinde tanımlanan elektromanyetik etkide dış akım sinüzoidal bir kaynak olarak oluşturulabilir. Aslında bu akımın genliği ve frekansı, nöron modelinin dinamik davranışlarını etkiler. Frekansın, elektromanyetik alan tanımlı FitzHugh-Nagumo nöron modelinin dinamik davranışları üzerindeki etkisi, 200 zaman örneklemesi içinde dış uyarana farklı frekanslar uygulanarak çizilen hücre zarı potansiyelinin etkisi dallanma diyagramı ile verilmiştir. Şekil 2,1' deki bu diyagramda harici kaynağın genliği 0,1' e sabitlenerek farklı frekanslarındaki çatallanma diyagramı gözlemlenmiştir. Harici kaynağın farklı genlik değerlerinin sistem üzerindeki etkisini gözlemlemek için ikinci bir dallanma diyagramı da

frekans değeri $\omega = 0.7\ Hz$ de sabit tutularak 200 zaman örneklemesi için çizdirilmiş ve elde edilen grafik sonucu Şekil 2.2' de verilmiştir.

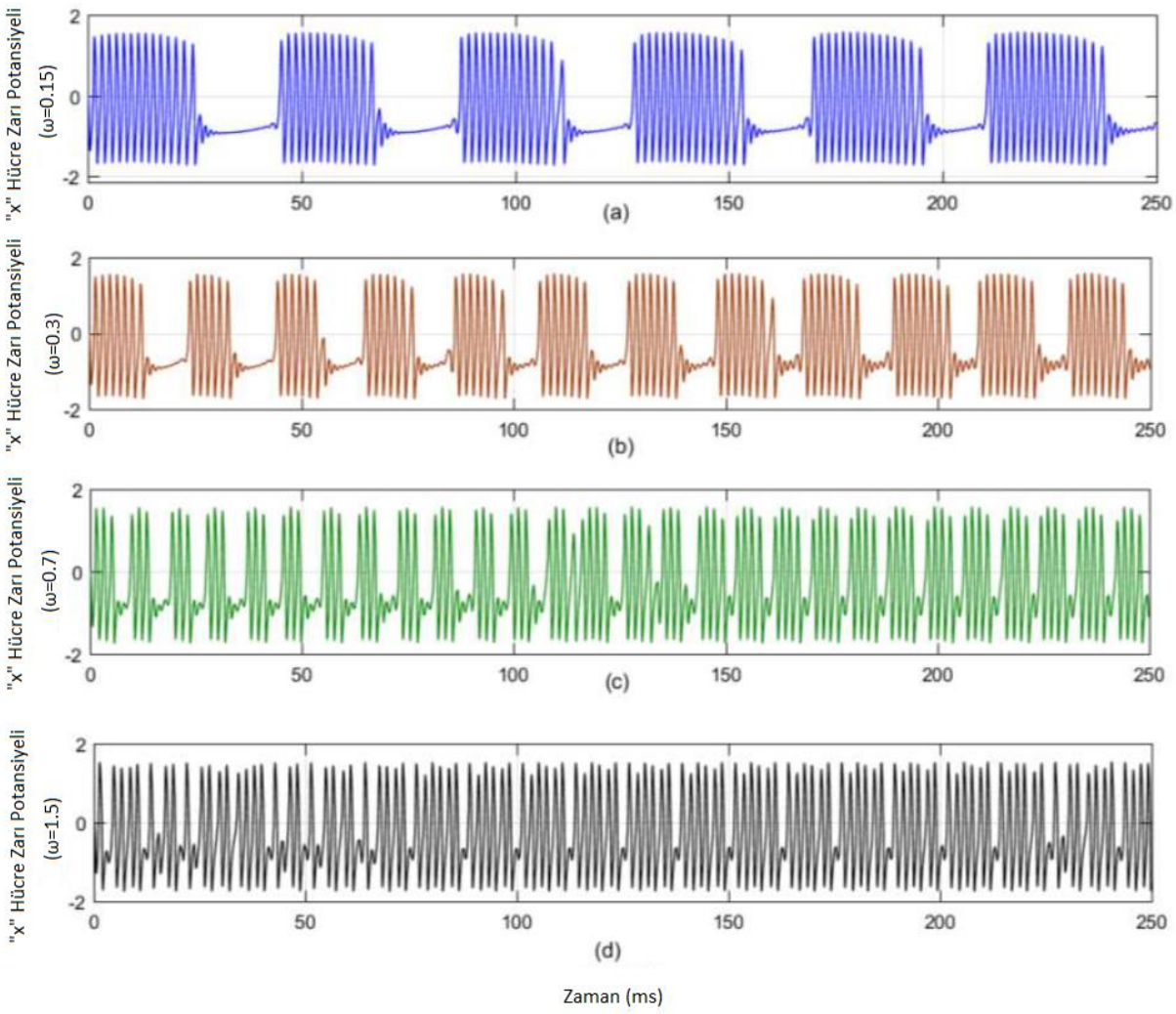


Şekil 2.1. *200 Zaman Örneklemesi İçinde Dış Uyarana Farklı Frekanslar Uygulanarak Çizilen Hücre Zarı Potansiyelinin Dallanma Diyagramı (Harici Uyartım Genliği $A = 0.1$ rad/sn).*



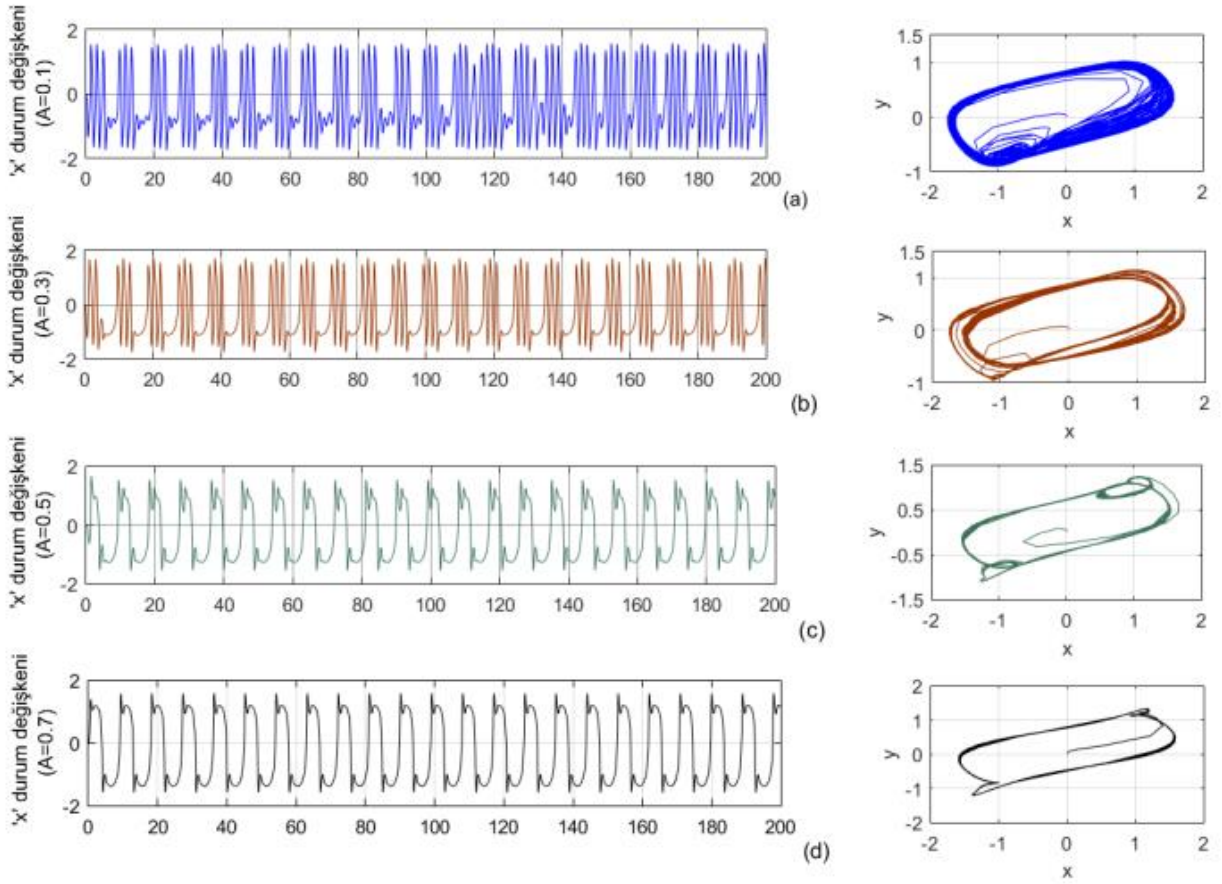
Şekil 2.2. *Harici Kaynağın Genlik Değişiminin Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeli Üzerindeki Etkisini Gösteren Dallanma Diyagramı Sonucu (Harici Uyartım Frekansı $\omega = 0.7\ Hz$).*

FitzHugh-Nagumo nöron modeli üzerine uygulanan elektromanyetik alan sinüzoidal kaynağının dört farklı frekans değeri için elde edilen sayısal simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 2.3' te, dört farklı genlik değeri için elde edilen sayısal simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 2.4' te verilmiştir. Numerik simülasyonlarda modeldeki parametre değerleri $a = 3$, $b = -3$, $d = 0.5$, $k = 15$, $r = 0.0001$ ve $\tau = 0.1$ olarak seçilmiştir.



Şekil 2.3. *Farklı Dış Uyaran Frekansları Uygulanmış Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modelinin Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) 0.15 Hz, b) 0.3 Hz, c) 0.7 Hz ve d) 1.5 Hz.*

Doğrusal olmayan fonksiyonlar üzerinde uygulanan matematiksel seri açılımların orijinal fonksiyonlarla karşılaştırılması amacıyla çeşitli hata hesaplamalarının uygulanması, sistemlerin doğruluğunun tespiti açısından gereklidir. Orijinal ve revize modeller arasındaki hata hesaplaması, kullanılan yöntemin hakkında fikir verir. RMSE, yaygın olarak tercih edilen bir hata hesaplama yöntemidir. Bu yöntem, veriler arasındaki farkların ikinci dereceden ortalamasını temsil eder. Aslında RMSE, farklı modellerin veri kümelerinin N hata hesaplamalarını karşılaştırmak için bir doğruluk ölçüm yöntemidir [59]. RMSE hesaplaması her zaman pozitif sonuç verir ve daha düşük değerler daha az hatalı anlamına gelir. Kullanılan veri sayısına bağlı olarak hesaplanan hata değerleri değişmektedir. RMSE hesaplaması Denklem 2.3 ile verilen ifadeler kullanılarak yapılır [60].



Şekil 2.4. *Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeline Harici Kaynağın Farklı Genlik Değerleri Uygulandığında Elde Edilen ve Zaman Domeni ile Faz Portresi Gösterimlerini İçeren Nümerik Simülasyon Sonuçları; a) A = 0,1 rad/sn, b) A = 0,3 rad/sn, c) A = 0,5 rad/sn ve d) A = 0,7 rad/sn.*

$$RMS\ Hatası = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_{i(orijinal_data)} - x_{i(revize_data)}\right)^2} \tag{2.3}$$

RMSE hesaplamaları genellikle veri kümelerinin genliklerindeki fark hakkında bilgi sağlar. Bununla birlikte, orijinal ve revize biyolojik nöron modellerinin benzerlikleri araştırılırken, faz ilişkilerinin belirlenmesi çok önemlidir. Böylece iki nöron dinamiği arasındaki faz hatası hesaplamaları da literatüre taşınmış olur. Bu faz hatası hesaplama yöntemlerinden biri Denklem 2.4' te [61] verilmektedir:

$$\emptyset(t) = arctan\frac{s_1(t)-s_1(0)}{s_2(t)-s_2(0)} \tag{2.4}$$

Biyolojik nöron modeli hücre zar potansiyeli $\dot{x} = f(x)$, $s_1(t) = s_1(x, \dot{x}, \ddot{x} \dots)$ ve $s_2(t) = s_2(x, \dot{x}, \ddot{x} \dots)$ olarak tanımlanan durum değişkenlere atanan fonksiyonların birleşimidir. İki

nöral dinamiğin faz senkronizasyonları $\emptyset_1(t) \cong \emptyset_2(t)$ durumunda sağlanır. Bu duruma göre, bu dinamikler arasındaki faz farklılıkları Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Faz\ Hatası = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|\emptyset_1(i) - \emptyset_2(i)|} \tag{2.5}$$

Öte yandan, korelasyon analizi iki sistem arasında benzerliği ortaya koymak için kullanılan bir başka istatistiksel yöntemdir [62]. Bu yöntem, farklı veri kümeleri arasındaki ilişkinin yönü ve miktarı hakkında bilgi verir. Korelasyon katsayısı $\rho_{X,Y}$ iki bağımsız değişken X, Y arasındaki doğrusal ilişkinin bir ölçüsüdür ve bu katsayı '$-1 \leq \rho_{X,Y} \leq 1$' arasındadır. Korelasyon katsayısının sıfıra yaklaşması bu değişkenler arasında zayıf bir ilişkinin varlığını gösterir. Bu değişkenler birlikte artar veya azalırsa, pozitif bir ilişki vardır. Değişkenlerden biri artarken diğeri azalıyorsa (ya da tam tersi bir durum gerçekleşiyorsa), negatif bir ilişki vardır. İki bağımsız değişken için korelasyon hesabı Denklem 2.6' daki eşitlikler kullanılarak yapılır.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\left(N\sum_{i=1}^{N}X_iY_i\right) - \left(\left(\sum_{i=1}^{N}X_i\right)\left(\sum_{i=1}^{N}Y_i\right)\right)}{\left(\sqrt{\left(N\sum_{i=1}^{N}X_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}X_i\right)^2}\right)\left(\sqrt{\left(N\sum_{i=1}^{N}Y_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}Y_i\right)^2}\right)} \tag{2.6}$$

X_i bağımsız değişkeni, orijinal nöron modelinin veri kümesini temsil ederken, Y_i bağımsız değişkeni, revize nöron modelinin veri kümesidir.

Burada elektromanyetik alan tanımlı FHN Nöron modeli tanımlamasına dâhil edilen harici uyaranın doğrusal olmayan fonksiyonunun matematiksel seri açılımlarla tanımlanarak daha basit denklemlere açılması sonucu elde edilen revize modeldeki hesaplamalar ile orijinal modeldeki hesaplamalar arasındaki farklılıklar belirlenecektir. Bu amaçla sinüs matematiksel fonksiyonunun Taylor-Maclaurin seri açılımı ile elektromanyetik alan tanımlı FHN nöron modeli tanımlamasına 2, 3, 4 ve 5. dereceden açılan matematiksel seri denklemleri sırasıyla uygulanmıştır. Denklem 2.3, Denklem 2.5 ve Denklem 2.6' da bahsedilen üç farklı hata hesabı yöntemi kullanılarak orijinal model ile revize model arasındaki genlik ve faz farklılıklarını gösteren hata hesaplamaları ile dinamiklerin benzerlikleri hakkında fikir veren korelasyon hesaplamaları yapılmıştır.

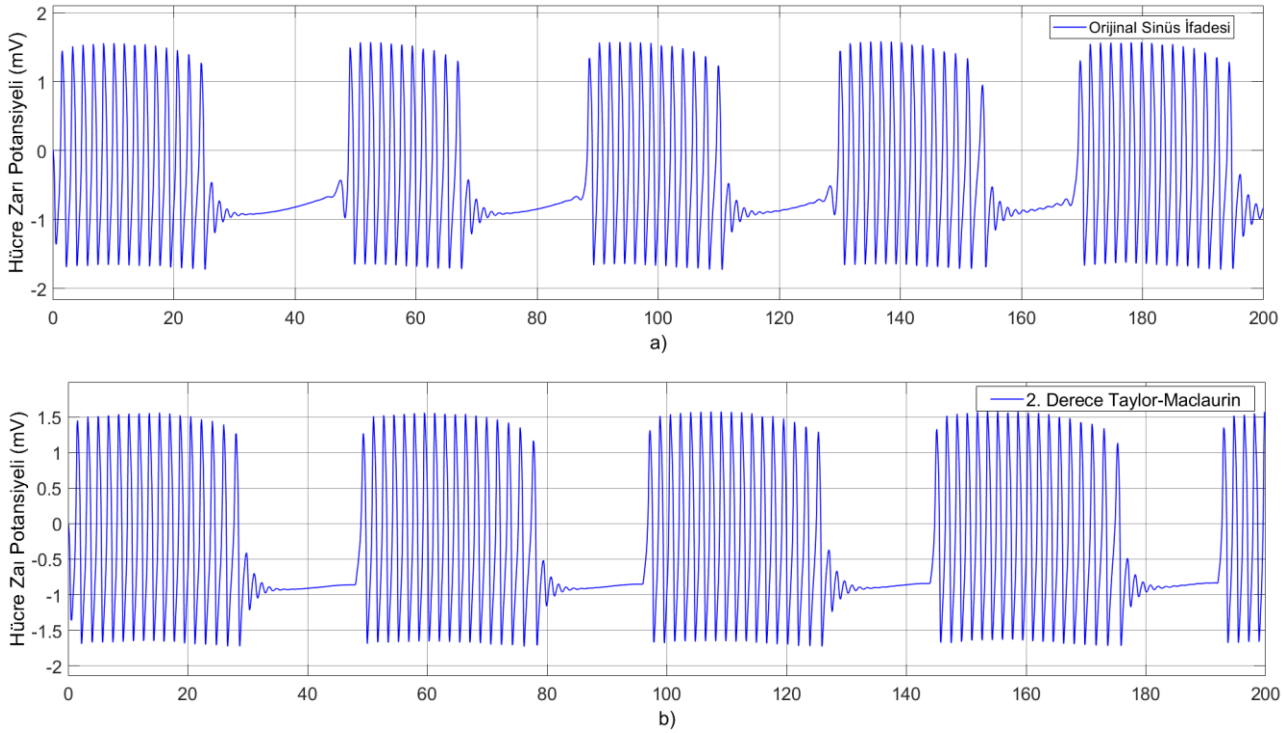
$A = 0.1$ rad/sn ve frekans değeri $\omega = 0.15$ Hz' e sabitlenerek uygulanan sinüs işareti matematiksel seri ifadelerine açılarak sistem modeline dâhil edilmiştir. Orijinal ve revize elektromanyetik alan

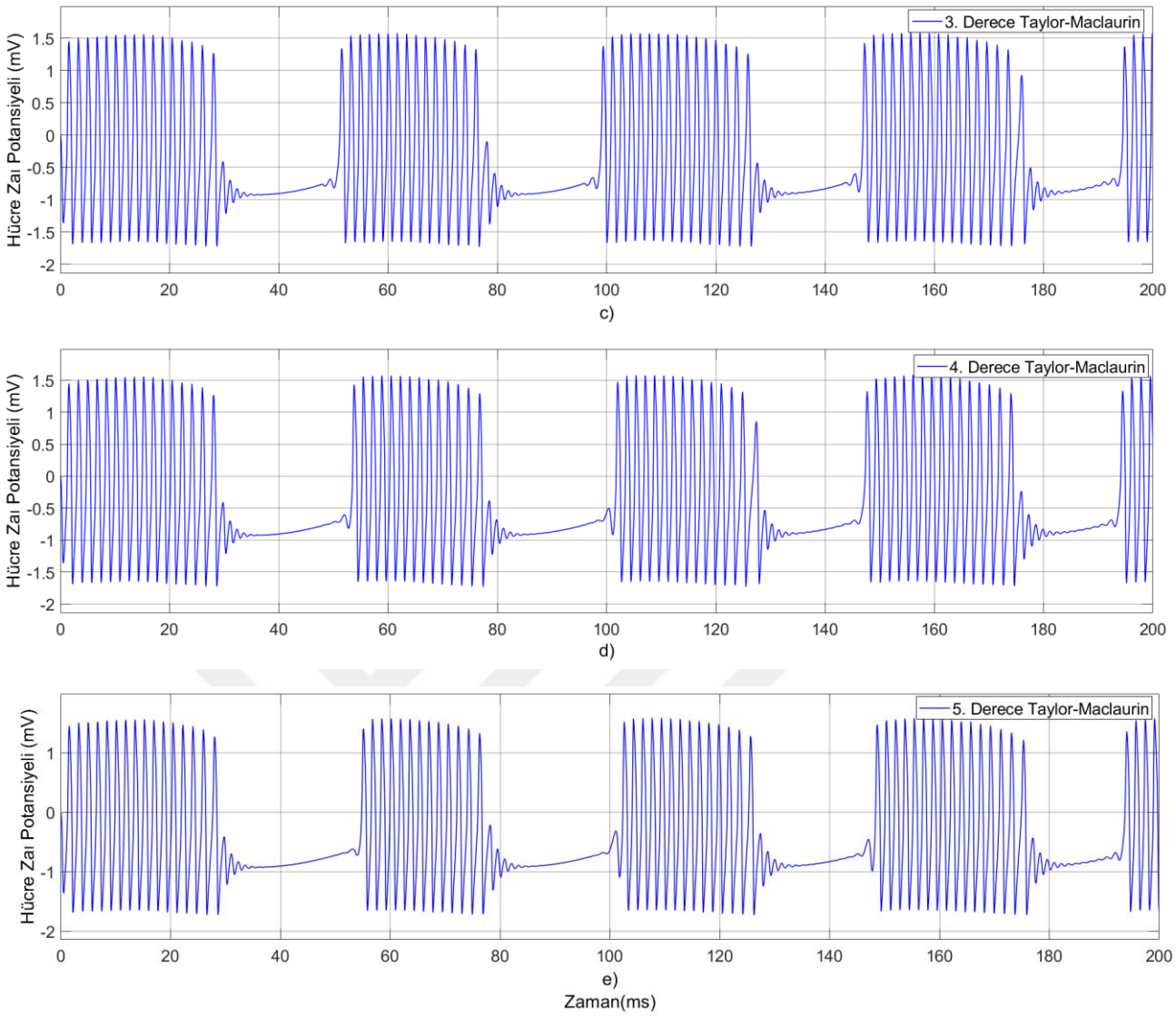
tanımlı FHN nöron modellerinde N=3000 terim için hesaplanan hata sonuçları Tablo 2.1 de verilmiştir. Bu hesaplamalarda orijinal doğrusal olmayan fonksiyon yerine kullanılan fonksiyonların seri açılımının terim sayısı sırasıyla artırılmıştır. Bu sıralı artışın nedeni seri açılımda terim sayısının artmasına paralel olarak hata miktarında azalma beklenmesidir fakat beklenilen sonuç elde edilememiştir.

Tablo 2.1. *Orijinal ve Revize Edilmiş Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modellerine ait RMS Hatası, Faz Hatası ve Kolerasyon Hatası Tablosu*

Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	RMS Hatası	Faz Hatası	Kolerasyon
2. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.1603	0.9948	0.2360
3. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.2588	1.0528	0.0856
4. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.2666	1.0681	0.0657
5. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.2553	1.0677	0.0677

2, 3, 4 ve 5. derece Taylor-Maclaurin sinüs matematik fonksiyonun basitleştirilmiş denklemlerinin sırasıyla matematiksel denklemlere dâhil edildiği sabit genlik değerleri $A = 0{,}1$ rad/sn ve sabit frekans değeri $\omega = 0.15$ Hz için uygulanan Elektromanyetik alan tanımlı Fitzhugh-Nagumo nöron modeline ait simülasyon sonuçları Şekil 2.5' te sunulmuştur.





Şekil 2.5. *Orijinal ve Revize Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modeline, Harici Kaynağın Basitleştirilmiş Denklemlerle Sisteme Dâhil Edildiği Sabit Genlik Değerleri* $A = 0.1$ rad/sn *ve Sabit Frekans Değeri* $\omega = 0.15$ Hz *Uygulandığında Elde Edilen Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) Orijinal Sinüs İfadesi, b) 2. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, c) 3. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, d) 4. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi ve e) 5. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi.*

2.2. Memristif HR Nöron Modeli

Klasik HH modelini [5] basitleştirerek, iki boyutlu HR nöron modeli 1982' de önerilmiş olup [9] Denklem 2.7' de tanımlanmıştır.

$$\frac{dx}{dt} = y - ax^3 - bx^2 + I,$$
$$\frac{dy}{dt} = c - dx^2 - y \tag{2.7}$$

Denklem 2.7 de x ve y sırasıyla hücre zarı potansiyeli ve geri kazanım değişkenidir (aksiyon potansiyeli değişkeni olarak da adlandırılır) ve I terimi harici olarak uygulanan akımdır. a, b, c ve d parametreleri, genellikle sırasıyla $a = 1, b = 3, c = 1$ ve $d = 5$ olarak kabul edilen dört pozitif sabittir [9, 63-66]. Hücre zarı potansiyeli için çok sayıda dinamik davranışı, örneğin kaotik dinamik davranışı bu model ile elde edebilmek için, HR [53] tarafından 1984' te iki boyutlu nöron modeline üçüncü bir denklem daha eklenmiştir (Denklem 2.8):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y - ax^3 - bx^2 + I - z, \\ \frac{dy}{dt} &= c - dx^2 - y, \\ \frac{dz}{dt} &= r(s(x - x_{\text{rest}}) - z) \end{aligned} \tag{2.8}$$

Burada z patlama değişkenidir ve x_{rest} sabiti modelin dinlenme potansiyelidir. Yeni eklenen parametreler r ve s iki pozitif sabittir ancak r çok küçüktür. Böylece, yavaş gelişen bir akım olan yeni bir değişken z, harici olarak uygulanan akımını ayarlamak için iki boyutlu modelin (Denklem 2.7) ilk denklemine bağlanır. Üç boyutlu nöron modelinin (Denklem 2.8) ateşlenme durumunda ise, z' nin değeri artar [67]

Denklem 2.7' deki modelin ilk denklemine akı kontrollü ideal bir memristör eklenerek elektromanyetik indüksiyon etkisine sahip üç boyutlu memristif HR nöron modeli elde edilmiştir. Bu model Denklem 2.9' daki gibi tanımlanmıştır [68].

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y - ax^3 - bx^2 + I - k\cos(\varphi)x, \\ \frac{dy}{dt} &= c - dx^2 - y, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= x \end{aligned} \tag{2.9}$$

Burada sisteme sonradan dâhil edilen φ değişken, zar potansiyelinin x zaman integralini gösteren manyetik akıdır. Bu terim $k\cos(\varphi)x$, harici olarak uygulanan elektromanyetik indüksiyonu ve k, elektromanyetik indüksiyonun gücünü temsil eder.

Denklem 2.9' da tanıtılan modelde kullanılan memristörün ideal ve akı kontrollü olduğunu vurgulamak önemlidir. Terminal voltajı V ve terminal akımı i [69,70] arasındaki duruma bağlı

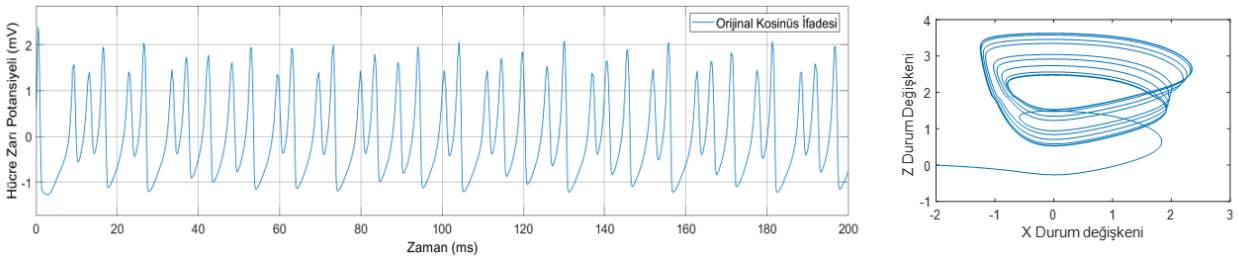
olarak Ohm kanunu ve ideal memristör tanımlamalarına göre, akı kontrollü bir ideal memristör W şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned} &\mathrm{i} = \mathrm{W}(\varphi)\mathrm{v}, \\ &\frac{d\varphi}{dt} = v \end{aligned} \tag{2.10}$$

Burada $W(\varphi)$ akıya bağlı yük değişim oranını gösteren memdüktans tanımlamasıdır ve k nın bir katsayı olduğu Denklem 2.11 gibi sadeleştirelebilir:

$$W(\varphi) = k\varphi \tag{2.11}$$

Numerik Simülasyon için denklem parametreleri sırasıyla $a = 1, b = 3, c = 1,\ d = 5$ ve $\mathrm{k} = 0.95$ seçilmiştir. Başlangıç değerleri '$(\mathrm{x}_0, \mathrm{y}_0, \varphi_0) = (0, 0, 0)$' olarak atanmıştır. Önerilen orijinal nöron modeline ait simülasyon sonucu Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6. *Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modeline ait Orijinal Simülasyon Sonucu.*

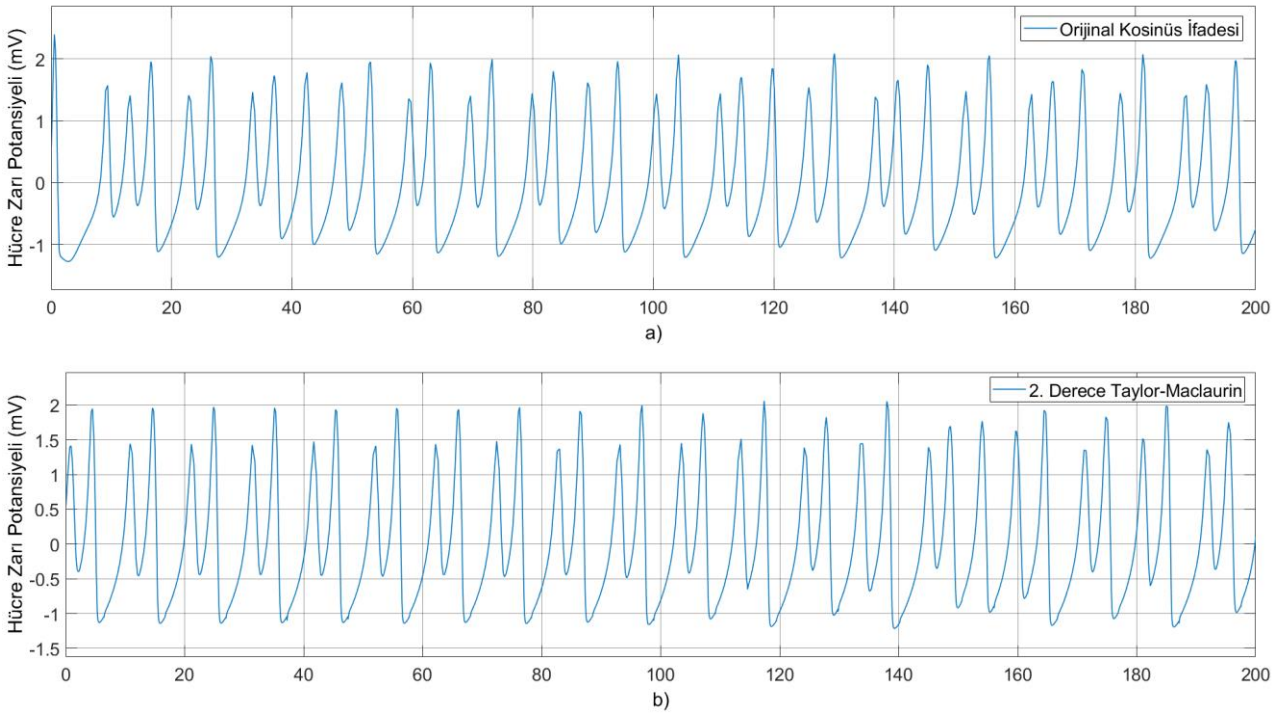
Burada üç boyutlu Memristif HR nöron modeli tanımlamasına dâhil edilen harici uyaranın doğrusal olmayan fonksiyonunun matematiksel fonksiyonların seri açılımlarıyla tanımlanarak daha basit denklemlere açılması sonucu elde edilen revize modeldeki hesaplamalar ile orijinal modeldeki hesaplamalar arasındaki farklılıklar belirlenecektir. Bu amaçla kosinüs matematiksel fonksiyonunun Taylor-Maclaurin seri açılımı ile üç boyutlu Memristif HR nöron modeli tanımlamasına 2, 3, 4 ve 5. dereceden basitleştirilmiş denklemleri sırasıyla uygulanmıştır. Denklem 2.3, denklem 2.5 ve denklem 2.6 bahsedilen üç farklı hata hesabı yöntemi kullanılarak orijinal model ile revize model arasındaki genlik ve faz farklılıklarını gösteren hata hesaplamaları ile nöronal dinamiklerin benzerlikleri hakkında fikir veren korelasyon hata hesaplamaları yapılmıştır.

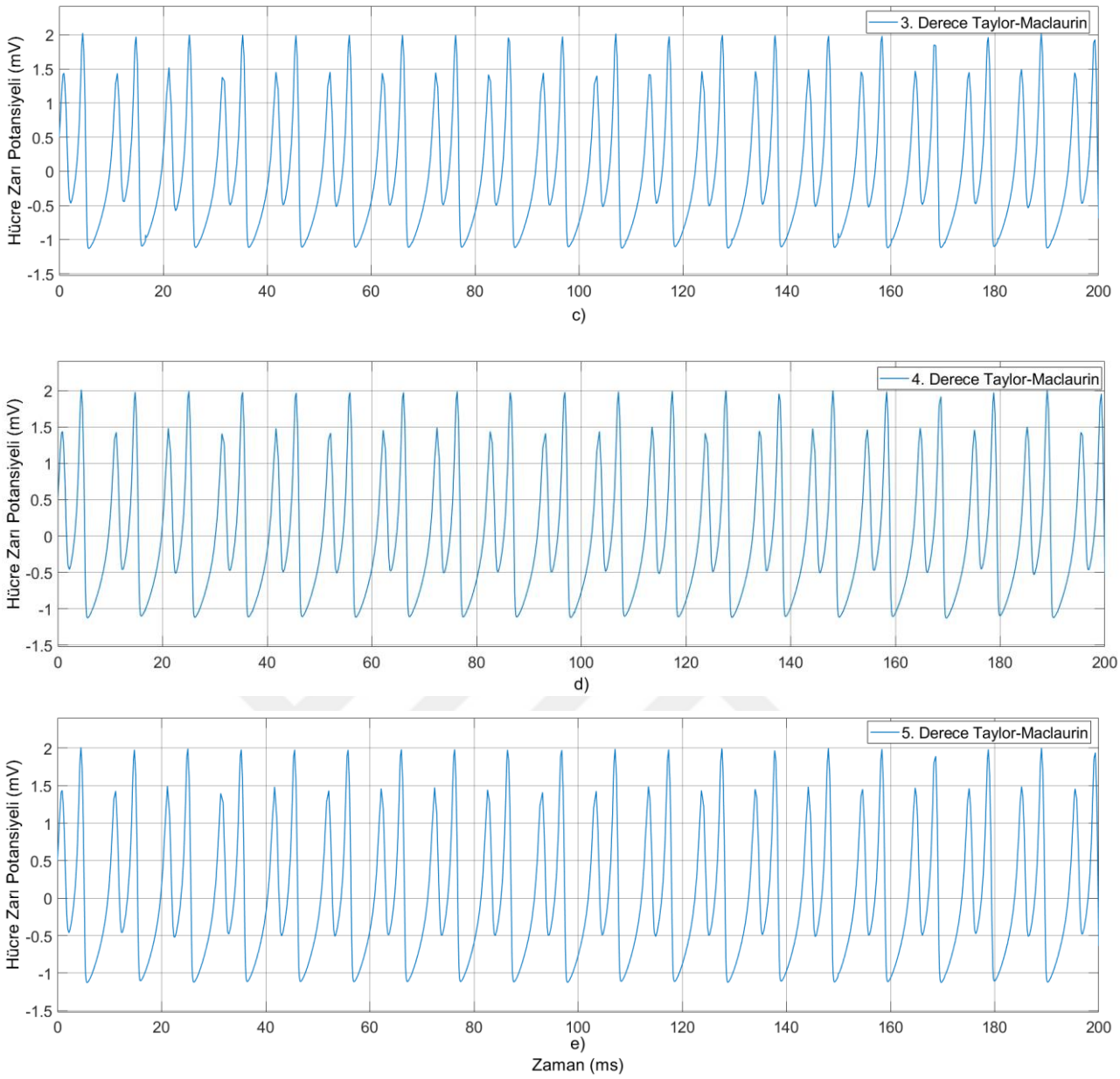
Kosinüs matematik fonksiyonun basitleştirilmiş denklemlerle dâhil edildiği Üç Boyutlu Memristif HR Nöron N=3000 terim için hesaplanan hata hesaplama sonuçları Tablo 2.2' de verilmiştir. Bu hesaplamalarda orijinal doğrusal olmayan fonksiyon yerine kullanılan fonksiyon seri açılımının terim sayısı sırasıyla artırılmıştır. Bu sıralı artışın nedeni seri açılımda terim sayısının artmasına paralel olarak hata miktarında azalma beklenmesidir fakat beklenilen sonuç elde edilememiştir.

Tablo 2.2. *Orijinal ve Revize Edilmiş Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modeline ait RMS Hatası, Faz Hatası ve Kolerasyon Hatası Tablosu*

Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	RMS Hatası	Faz Hatası	Kolerasyon
2. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.3213	1.0624	0.0519
3. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.4792	1.1179	-0.1402
4. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.3604	1.0893	-0.0342
5. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı	1.3766	1.1094	-0.1657

2, 3, 4 ve 5. Derece Taylor-Maclaurin kosinüs matematik fonksiyonun basitleştirilmiş denklemlerinin sırasıyla matematiksel denklemlere dâhil edildiği Üç Boyutlu Memristif HR Nöron modeline ait simülasyon sonuçları Şekil 2.7' de sunulmuştur.





Şekil 2.7. *Orijinal ve Revize Edilmiş Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modeline Harici Kaynağın Basitleştirilmiş Denklemlerle Sisteme Dahil Edilmesiyle Elde Edilen Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) Orijinal Sinüs İfadesi, b) 2. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, c) 3. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi, d) 4. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi ve e) 5. Derece Taylor-Maclaurin Sinüs İfadesi.*

2.3. AdEx Nöron Modeli

AdEx nöron modeli, bağlantıcı nöron modelleri kategorisinde yer almakta ve en basit nöron modellerinden biri olan Integrate-and-Fire (I&F) tipi modeli temel almaktadır. AdEx nöronu, doğrusal olmayan ifadeleri değiştirerek Izhikevich nöron modelinden türetilmiştir. Izhikevich nöron modeli, hesaplama verimliliği ve çeşitli nöral dinamiklerini sergileme yeteneği açısından modelleme başarılarıyla bilinmektedir [2]. Izhikevich nöron modeline benzer şekilde, AdEx nöron

modelide nöron dinamiklerini sergilemede öne çıkmaktadır. AdEx nöron modeli Denklem 2.12' deki adi diferansiyel denklemlerle tanımlanır:

$$C\frac{dV}{dt} = -g_L(V - E_L) + g_L\Delta_T \exp\left(\frac{V - V_T}{\Delta_T}\right) + I_{inj} - \omega \tag{2.12}$$

$$\tau_\omega \frac{d\omega}{dt} = \alpha(V - E_L) - \omega$$

Denklem 2.12' de $\{V, C, \omega, \alpha, \tau_w, I, g_L, E_L, V_T, \Delta_T\}$ sembolleri sırasıyla hücre zarı potansiyeli, hücre zarı kapasitansı, adaptasyon değişkeni, adaptasyon kuplaj parametresi, adaptasyon zaman sabiti, giriş akımı, sızıntı iletkenlik, sızıntı ters potansiyeli, eşik gerilimi ve eğim faktörüdür. Burada, harici giriş akımı I, eşik voltajını V_T aşarak hücre zarı potansiyelini indüklemektedir. Üstel terim, pozitif geri besleme sağlar ve aksiyon potansiyeli davranışının oluşmasına sebep olur. Ek olarak, üstel terim sodyum kanalına karşılık gelir ve sodyum kanalı, HH tipi nöron modelinde aksiyon potansiyeli oluşumuna sebeptir. Pozitif geri besleme hücre zarı potansiyelinin sonsuza gitmesine neden olur ve hücre zarı potansiyelinin sonsuz tanımlamalarını önlemek için Denklem 2.13' teki sıfırlama koşulları uygulanır.

$$\begin{aligned} &V > 0 \Longrightarrow V \rightarrow V_R \\ &\omega \rightarrow \omega_R = \omega + b \end{aligned} \tag{2.13}$$

Bu durumda hücre zarı potansiyelinin sıfırlama değeri, V_R dir ve ω durum değişkeninin sıfırlanma değeri b değeri kullanılarak belirlenir. Bu modelle elde edilen nöral dinamikler, modeldeki değişkenin uygun değerlere ayarlanmasıyla oluşur [71]. AdEx nöron modeli ile elde edilen nöral dinamiklerin listesi ve bu dinamiklerin elde edildiği parametrelerin değerleri Tablo 2.3' te özetlenmiştir.

Tablo 2.3. *AdEx Nöron Modelinin Nöral Dinamikler ve Modelin Parametre Değerleri [71].*

Nöron Dinamikleri	C **(pF)**	g_L **(nS)**	E_L **(mV)**	V_T **(mV)**	Δ_T **(mV)**	α **(nS)**	b **(pA)**	τ_w **(ms)**	V_R **(mV)**	I **(pA)**
Düzenli Ateşleme	200	10	-70	-50	2	2	0	30	-58	500
Uyarlamalı Ateşleme	200	12	-70	-50	2	2	60	300	-58	500
Başlangıçta Patlamalı Ateşleme	130	18	-58	-50	2	4	120	150	-50	400
Düzenli Patlamalı Ateşleme	200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210
Gecikmeli Ateşleme	200	12	-70	-50	2	-10	0	120	-58	110
Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme	200	12	-70	-50	2	-10	30	300	-47	110
Düzensiz Ateşleme	100	12	-60	-50	2	-11	30	130	-48	160

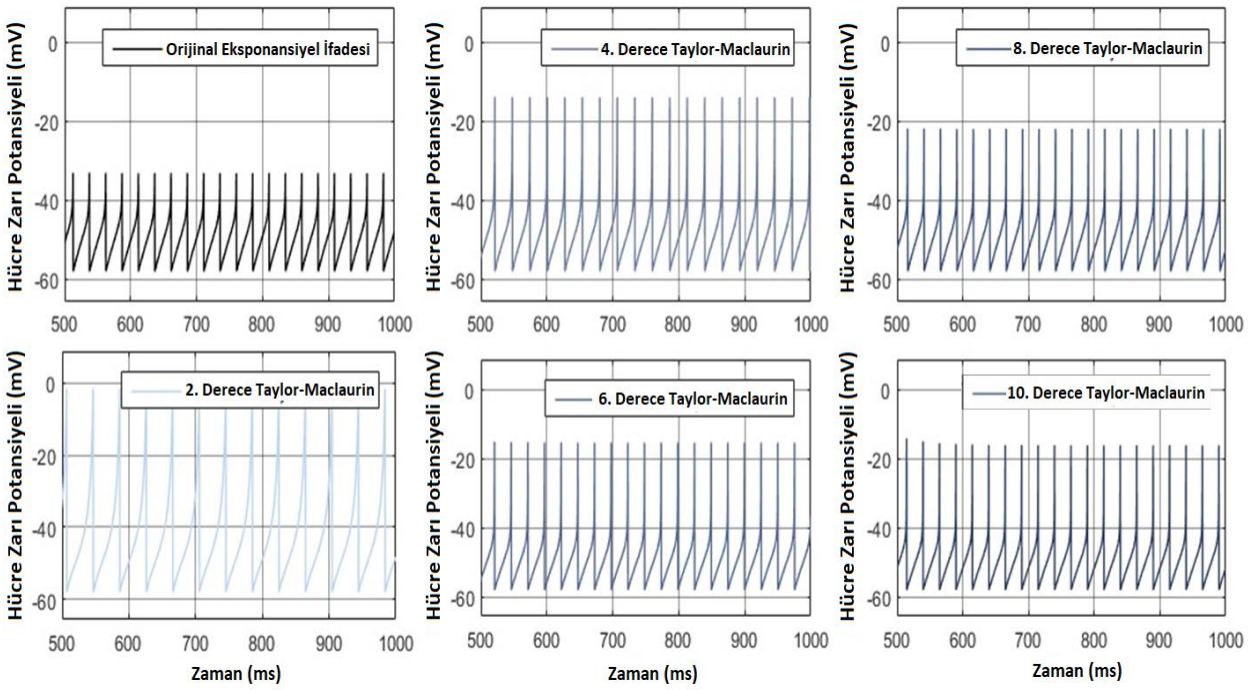
Giriş bölümünde bahsedilen doğrusal olmayan fonksiyonlardan biri olan Denklem 2.12’ deki eksponansiyel ifade Taylor-Maclaurin matematiksel seri açılımından yararlanılarak onuncu üsteline kadar açılmıştır. Açılımların kullanıldığı model ile orijinal model arasındaki hata hesaplamaları benzetim programı kullanılarak yapılmıştır. Bahsedilen bu hata hesaplamaları, orijinal ve revize AdEx modelleri arasındaki uyumluluğu belirlemek için yapılmıştır. Bu süreçte $N=3000$ terim için hesaplanan hata hesaplama sonuçları Tablo 2.4' e kaydedilmiştir. Tablo 2.4 hem RMSE hem de faz hatası sonuçlarını içerir. Ayrıca doğrusal ilişkilerinin bir ölçüsü olan korelasyon sonuçları da hesaplanarak aynı tabloya kaydedilmiştir.

Bu sıralı artışın nedeni seri açılımda, terim sayısının artmasına paralel olarak hata miktarında azalma beklenmektedir. Bununla birlikte, Taylor serisinin tek sayılı seri açılımlarında bazı hesaplanmamış sonuçlar (*Sayı Değil (Not a Number; NaN)) bulunmaktadır. Dolayısıyla sadece hata değerlerini hesaplayarak sonuçları değerlendirmek istenilen bir uygulama değildir. Bu nedenle, burada sayısal benzetim çalışmaları da yapılmıştır. Bu sonuçlar ile hem revize edilmiş AdEx nöron modelinin hem de orijinal modelin dinamikleri aynı anda gözlemlenebilmektedir. Bu simülasyonlarda orijinal ve revize edilmiş AdEx nöron modelleri Euler yöntemi kullanılarak $\Delta h=0.1$ adım büyüklüğü için ayrıklaştırılmıştır. Her iki modelin de başlangıç koşulları aynıdır ve modelleri Parametreleri Tablo 2.3' teki değerlere ayarlanmıştır. Orijinal AdEx nöron modelinin üstel fonksiyonu, ikinci, dördüncü, altıncı, sekizinci ve onuncu dereceden Taylor-Maclaurin açılımlarına dönüştürülür ve bu revize edilmiş yapıların sayısal simülasyonları yürütülür. Sayısal simülasyon sonuçları, Şekil 2.8.a-e' de sırasıyla Düzenli Ateşleme, Uyarlamalı Ateşleme, Başlangıçta Patlamalı Ateşleme, Düzenli Patlamalı Ateşleme, Gecikmeli Ateşleme, Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme, Düzensiz Ateşleme nöronal davranışları için verilmiştir.

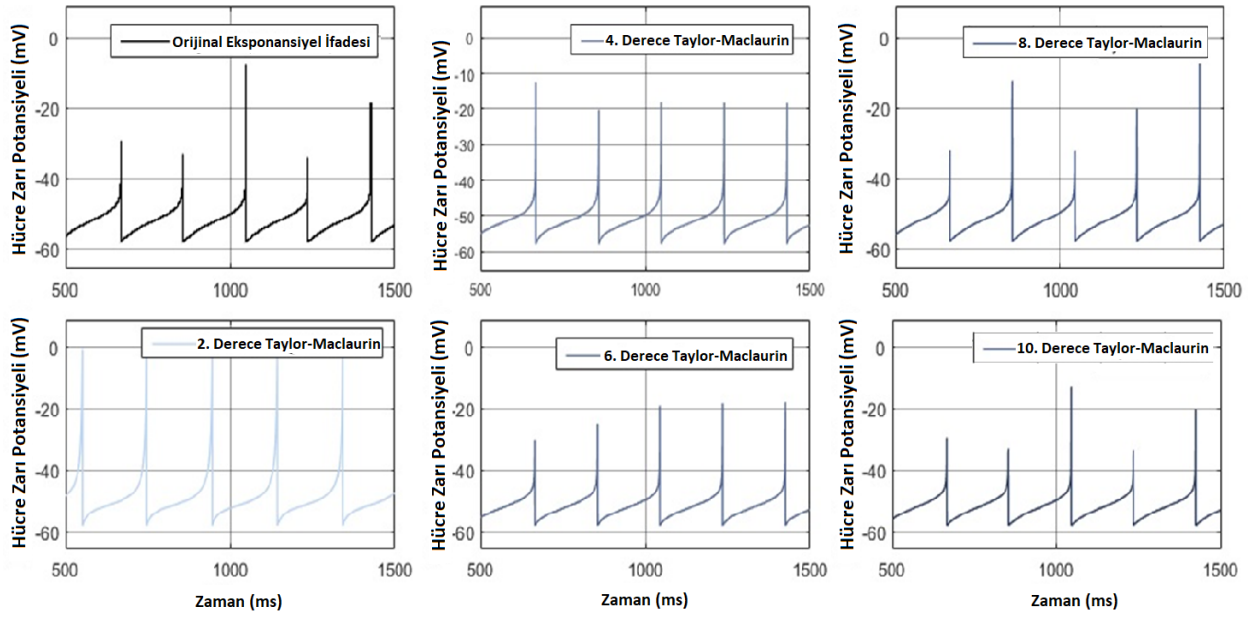
Hem Tablo 2.4' teki bu hata hesaplamalarına hem de Şekil 2.9' da ki sayısal simülasyon sonuçlarına göre, Taylor-Maclaurin serisinin dördüncü dereceden açılımı, bu üstel doğrusal olmayan ifadenin daha basit ifadelere dönüştürülmesi için uygundur.

Tablo 2.4. *Orijinal ve Revize Edilmiş Uyarlanabilir AdEx Nöron Modeline ait RMS Hatası, Faz Hatası ve Kolerasyon Hatası Tablosu (*Sayı Değil (Not a Number; NaN))*

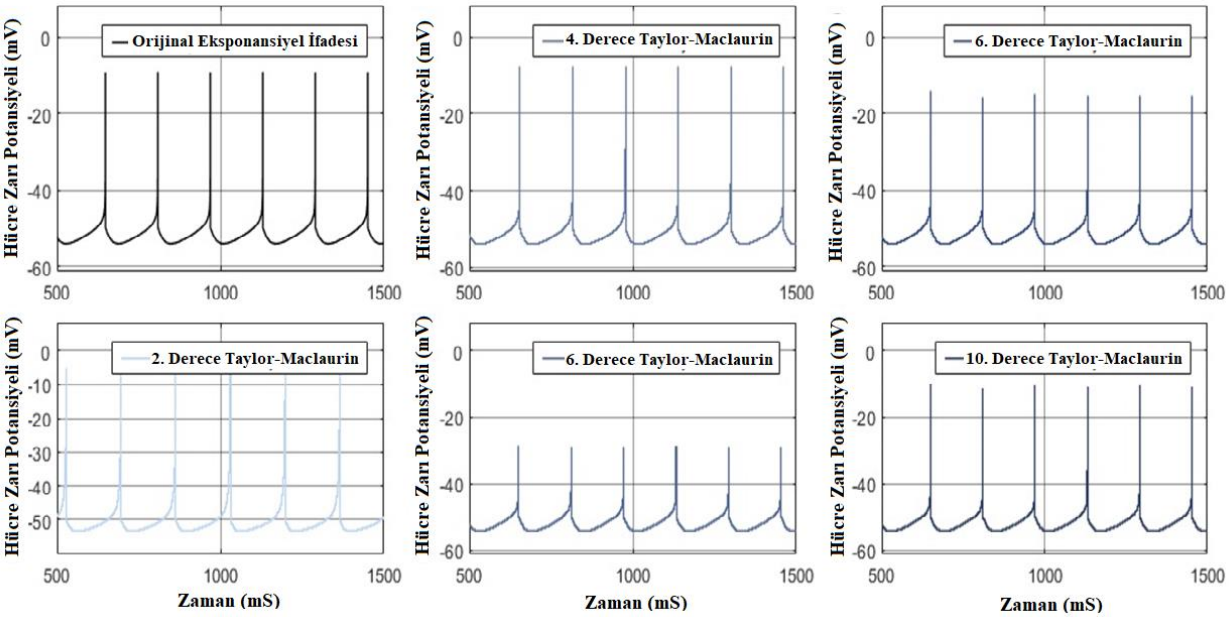
Nöral Dinamik	2. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı			3. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı			4. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı		
	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon
Düzenli Ateşleme	14,8123	0,4903	0,0031	9,8007	0,3071	0,0054	8,5729	0,2732	-0,0022
Uyarlamalı Ateşleme	8,2946	0,1001	0,022	NaN*	NaN*	NaN*	3,5627	0,0587	0,0527
Başlangıçta Patlamalı Ateşleme	5,9038	0,1307	0,0278	NaN*	NaN*	NaN*	3,1829	0,0825	0,4271
Düzenli Patlamalı Ateşleme	12,5658	0,2956	0,0036	8,3172	0,3039	0,037	6,0215	0,2809	0,0741
Gecikmeli Ateşleme	11,6437	0,29	0,1014	NaN*	NaN*	NaN*	6,3721	0,1869	0,1221
Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme	8,253	0,3741	0,351	NaN*	NaN*	NaN*	4,5509	0,4002	0,2711
Düzensiz Ateşleme	9,236	0,3037	-0,0012	5,0977	0,2765	-0,0101	3,9316	0,2854	0,033
NöralDinamik	**5. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı**			**6. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı**			**7. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı**		
	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon
Düzenli Ateşleme	7,6211	0,243	0,0097	7,8061	0,2441	0,0286	7,4223	0,237	0,0321
Uyarlamalı Ateşleme	NaN*	NaN*	NaN*	1,7611	0,0372	0,8759	3,0816	0,0439	0,6367
Başlangıçta Patlamalı Ateşleme	2,5757	0,0522	0,602	1,7762	0,0289	0,7857	1,7723	0,0224	0,7933
Düzenli Patlamalı Ateşleme	4,1496	0,2092	0,5419	0,1756	0,1428	0,7233	2,9733	0,105	0,7589
Gecikmeli Ateşleme	NaN*	NaN*	NaN*	5,7537	0,1646	0,1735	NaN*	NaN*	NaN*
Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme	NaN*	NaN*	NaN*	3,5862	0,3401	0,4993	NaN*	NaN*	NaN*
Düzensiz Ateşleme	3,6423	0,2944	0,353	3,4187	0,2957	0,0606	3,2985	0,2897	0,0668
Nöral Dinamik	**8. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı**			**9. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı**			**10. Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Açılımı**		
	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon	RMS Hatası	Faz Hatası	Korelasyon
Düzenli Ateşleme	7,4141	0,2347	0,0245	7,3945	0,2347	0,0247	7,5104	0,2315	0,0536
Uyarlamalı Ateşleme	2,0661	0,0251	0,8388	2,3628	0,0265	0,7887	1,3587	0,0147	0,9263
Başlangıçta Patlamalı Ateşleme	1,7032	0,02	0,8129	0,1126	0,0049	0,9994	0,0562	0,0034	0,9999
Düzenli Patlamalı Ateşleme	2,4044	0,0668	0,8267	2,2663	0,0506	0,8493	0,2353	0,0101	0,9985
Gecikmeli Ateşleme	6,3542	0,1748	-0,0342	NaN*	NaN*	NaN*	5,0804	0,1248	0,3368
Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme	2,5547	0,2696	0,7503	NaN*	NaN*	NaN*	1,5395	0,1906	0,9122
Düzensiz Ateşleme	3,24	0,2939	0,0533	3,2104	0,276	0,0966	3,0803	0,2648	0,1197


Orijinal Eksponansiyel İfadesi
4. Derece Taylor-Maclaurin
8. Derece Taylor-Maclaurin
2. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
10. Derece Taylor-Maclaurin
Hücre Zarı Potansiyeli (mV)
Zaman (ms)

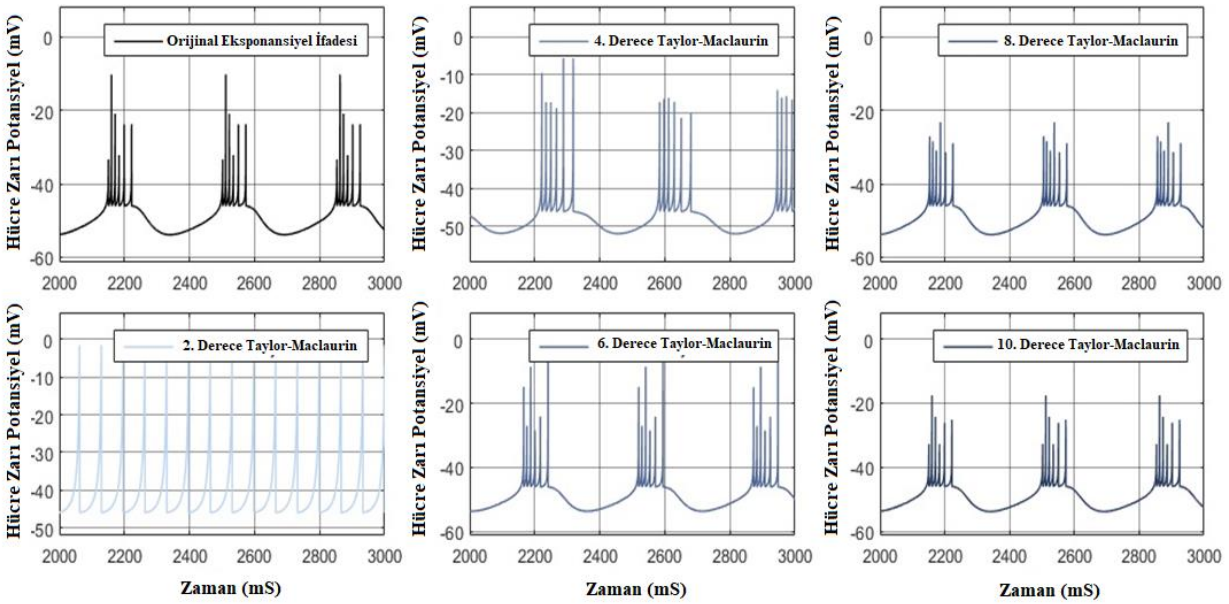
(a)


Orijinal Eksponansiyel İfadesi
4. Derece Taylor-Maclaurin
8. Derece Taylor-Maclaurin
2. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
10. Derece Taylor-Maclaurin
Hücre Zarı Potansiyeli (mV)
Zaman (ms)

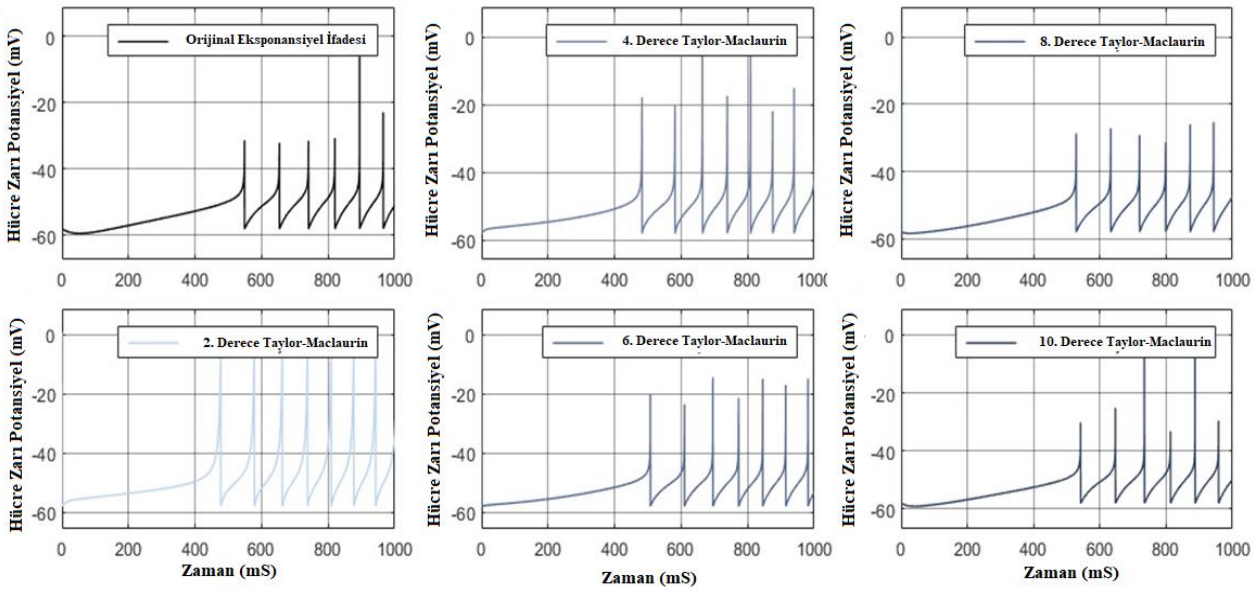
(b)


Orijinal Eksponansiyel İfadesi
4. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
2. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
10. Derece Taylor-Maclaurin
Hücre Zarı Potansiyeli (mV)
Zaman (mS)

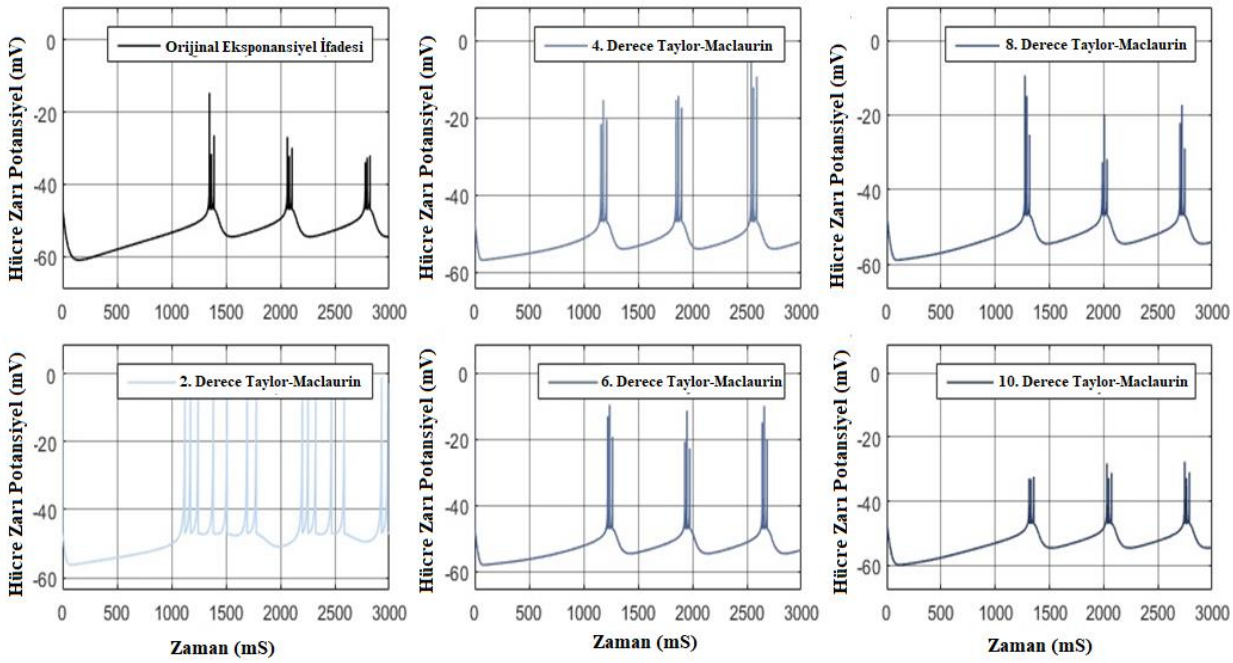
(c)


Orijinal Eksponansiyel İfadesi
4. Derece Taylor-Maclaurin
8. Derece Taylor-Maclaurin
2. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
10. Derece Taylor-Maclaurin
Hücre Zarı Potansiyeli (mV)
Zaman (mS)

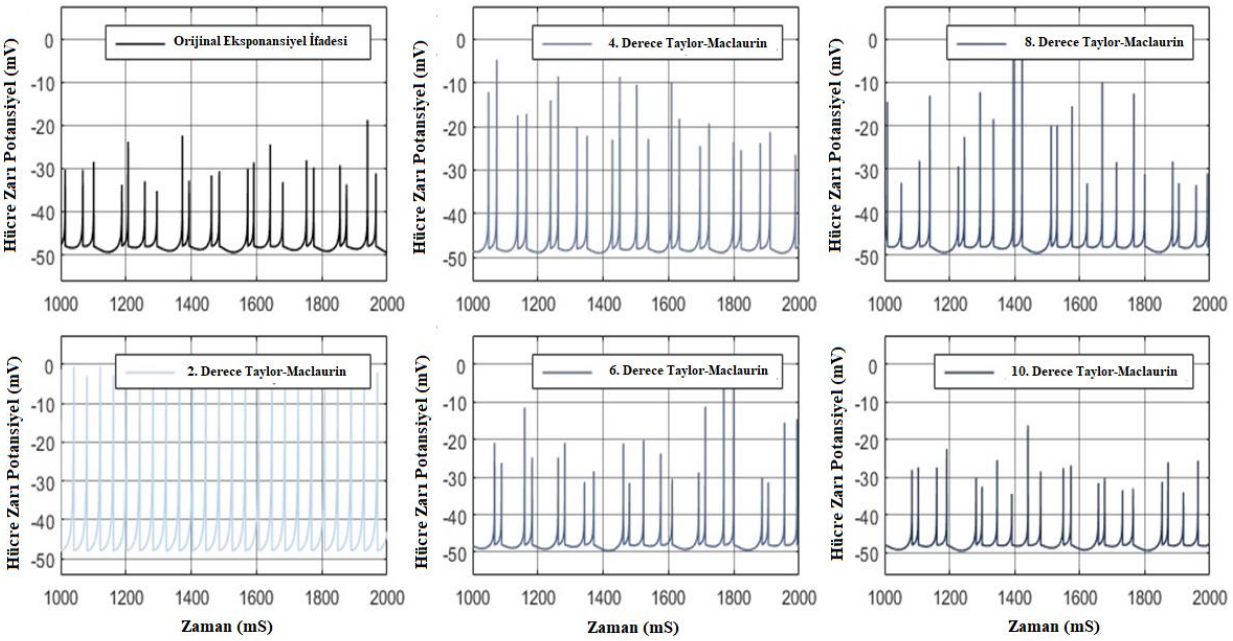
(d)


Orijinal Eksponansiyel İfadesi
4. Derece Taylor-Maclaurin
8. Derece Taylor-Maclaurin
2. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
10. Derece Taylor-Maclaurin
Hücre Zarı Potansiyel (mV)
Zaman (mS)

(e)


Orijinal Eksponansiyel İfadesi
4. Derece Taylor-Maclaurin
8. Derece Taylor-Maclaurin
2. Derece Taylor-Maclaurin
6. Derece Taylor-Maclaurin
10. Derece Taylor-Maclaurin
Hücre Zarı Potansiyel (mV)
Zaman (mS)

(f)



(g)

Şekil 2.8. *AdEx Nöron Modeli Nöronal Davranışları için Sayısal Simülasyon Sonuçları; a) Düzenli Ateşleme, b) Uyarlamalı Ateşleme, c) Başlangıçta Patlamalı Ateşleme, d) Düzenli Patlamalı Ateşleme, e) Gecikmeli Ateşleme, f) Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme ve g) Düzensiz Ateşleme.*

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SERİ AÇILIM ADAPTASYONLU NÖRON MODELLERİNİN DİJİTAL DONANIM GERÇEKLEŞTİRİMLERİ

Bu bölümde, revize edilen Fitzhugh-Nagumo Nöron Modeli, Memristif Hindmarsh–Rose Nöron Modeli ve Adaptive Exponential Integrate-and-Fire nöron modellerinin FPGA donanımı kullanılarak gerçek zamanlı gerçeklenimi yapılmıştır. FPGA cihazı, paralel çalışma prosedürü ile çalışan, programlanabilirlik ve yeniden yapılandırılabilirlik özelliklerine sahip dijital elektronik bir cihazdır. Bu cihaz,

i) paralel işlem yapabilmesi,
ii) yeniden programlanabilmesi,
iii) yüksek frekanslara ulaşabilmesi,
iv) yazılım ile donanım güncellemesine olanak sağlaması,
v) kaynak kullanım verimliliği

gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır ve literatürde farklı modellerin prototip gerçekleştirmesi için FPGA tercih edilmektedir.

3.1. Elektromanyetik Tanımlı FHN Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi

Burada, elektromanyetik tanımlı FitzHugh-Nagumo nöron modelinin donanımsal uygulaması için FPGA cihazı kullanılmaktadır. FPGA cihazı dijital elektronik cihaz olduğu için; Denklem 2.2' deki adi diferansiyel denklemlerle tanımlanan elektromanyetik etki tanımlı FitzHugh-Nagumo nöron modeli, FPGA tabanlı uygulama için ayrık zamanlı bir ifadeye dönüştürülmelidir. Burada bu dönüştürme işlemi için Euler ayrıklaştırma yöntemi kullanılmış ve adım büyüklüğü $\Delta h = 0.015625$ olarak belirlenmiştir. Ayrıklaştırılmış modele ait tanımlamalar Denklem 3.1' de verilmiştir.

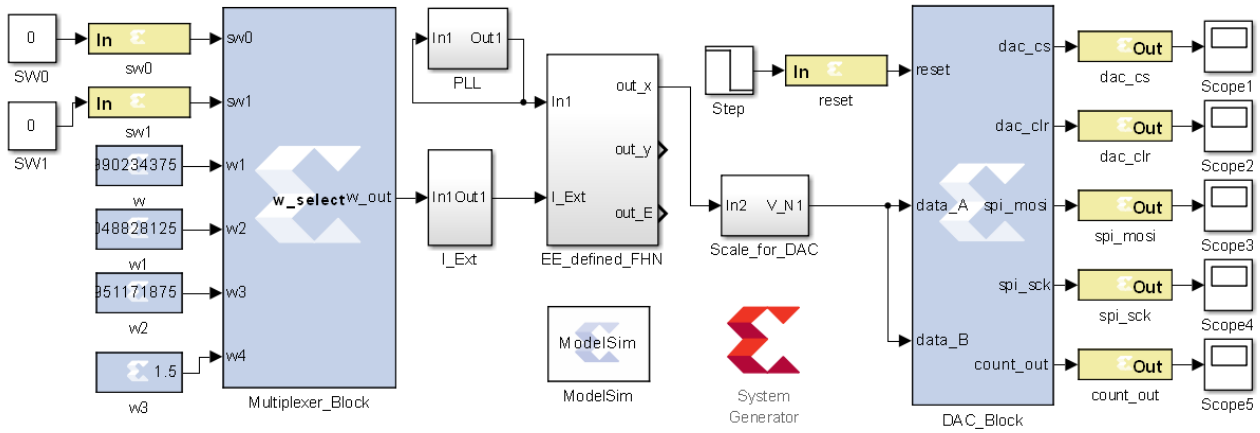
Denklem 3.1' de elektromanyetik alan tanımlı FHN nöron modelinin FPGA tabanlı uygulaması için "System Generator for DSP-XILINX^{TM}-SG$_{DSP}$" program aracı kullanılmaktadır.

$$x_{i+1} = \left[\frac{\left(x_i - \frac{x_i^3}{3} - y_i + I_{ext}\right)}{\tau}\right] * \Delta h + x_i, \tag{3.1}$$

$$y_{i+1} = [(ax_i - by_i + d + rE_i)] * \Delta h + y_i,$$

$$E_{i+1} = [ky_i] * \Delta h + x_i$$

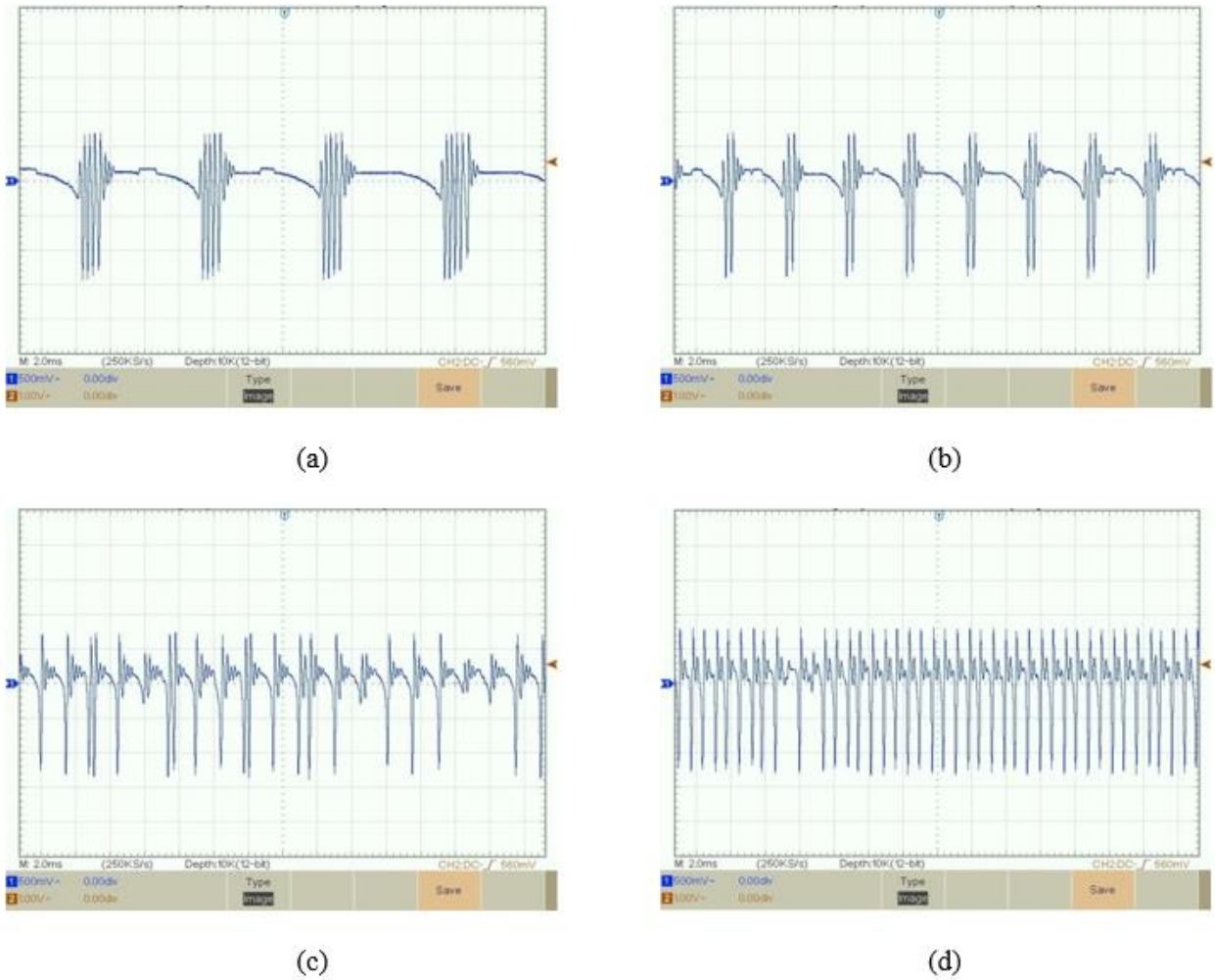
Bu program, MATLAB-SIMULINK^{TM} ve XILINX^{TM} kodları arasında otomatik bir dönüşüm sağlar. Dönüştürme işleminden sonra, MATLAB-SIMULINK^{TM} üzerine kurulan sistem, doğrudan XILINX^{TM} tarafından üretilen FPGA cihazına gömülebilir [72-73]. Elektromanyetik etki tanımlı FHN nöron modeli için, System Generator for DSP aracıyla tasarlanmış model diyagramı Şekil 3.1 de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. *Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modelinin SG_{DSP} Tabanlı Tasarım Şeması.*

Bu tasarımda, '$I_{ext} = A\,sin(\omega t)$' ifadesindeki sinüs fonksiyonu ikinci bölümde bahsedilen matematiksel seri açılım ifadesi kullanılarak ikinci dereceden Taylor-Maclaurin serisine açılarak oluşturulmuştur. Frekans değerlerinin '$\omega(Hz) = [0.15, 0.3, 0.7, 1.5]$' olarak seçilmesi için bu tasarıma bir multiplexer eklenmiştir. Böylece frekansı dört farklı değere ayrı ayrı ayarlamak yerine, tüm frekans değerleri aynı tasarımda FPGA' ya gömülmüştür. Böylece, FPGA geliştirme kartı üzerindeki anahtar konumları basitçe değiştirilerek uygulama sonuçları kolayca gözlemlenmiştir. Tasarımda sabit nokta aritmetiği Q= (32,18) kullanılmıştır. Otomatik dönüştürme işleminden sonra Çok Yüksek Hızlı Entegre Devrelerde Donanım Tanımlama Dili (Very High Speed İntegrated Circuit Hardware Description Language; VHDL) kodları, XILINX^{TM} şirketinin SPARTAN-3AN

geliştirme kartına gömülmüştür. Bu geliştirme kartında bir dijital-analog dönüştürücü (LTC2624) mevcuttur. '$\omega(Hz) = [0.15, 0.3, 0.7, 1.5]$' frekans değerleri için yapılan ölçüm sonuçları bahsedilen sayısal-analog dönüştürücü kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Elektromanyetik etki tanımlı FHN nöron modelinin FPGA tabanlı gerçekleştirim sonuçları bu frekanslar için sırasıyla Şekil 3.2' de verilmiştir. Böylece elektrik alan tanımı için yeni bir durum değişkenine sahip olan nöronal sistemlerin donanımsal gerçeklemelerinin de gerçekleştirilebileceği kanıtlanmıştır.



Şekil 3.2. *Elektromanyetik Alan Tanımlı FHN Nöron Modelinin Farklı Frekanslardaki Dış Uyaran için FPGA Tabanlı Gerçekleştirim Sonuçları; a) 0.15 rad/sn, b) 0.3 rad/sn, c) 0.7 rad/sn ve d) 1.5 rad/sn.*

Bu gerçekleştirim sonuçları, Şekil 2.4' teki sayısal simülasyon için elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bu benzerliğe göre elektromanyetik etki tanımlı FHN nöron modelinin FPGA tabanlı donanım uygulaması başarıyla tanımlanmış ve tamamlanmıştır. FPGA tabanlı gerçekleştirilmiş modele ait sentez sonuçları Tablo 3.1' de sunulmuştur.

Tablo 3.1. *Elektromanyetik Etki Tanımlı FHN Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Uygulamasına ait Alan Kullanımları ve Sentez Sonuçları.*

11776 REGISTER'dan kullanılan miktar	184 (1%)
11776 4-INPUT LUT'dan kullanılan miktar	1825 (15%)
5888 SLICE'dan kullanılan miktar	975 (16%)
24 BUFGMUX'dan kullanılan miktar	2 (8%)
MULT18X18SIO'dan kullanılan miktar	19 (95%)
Maksimum Gecikme (ns)	1.083

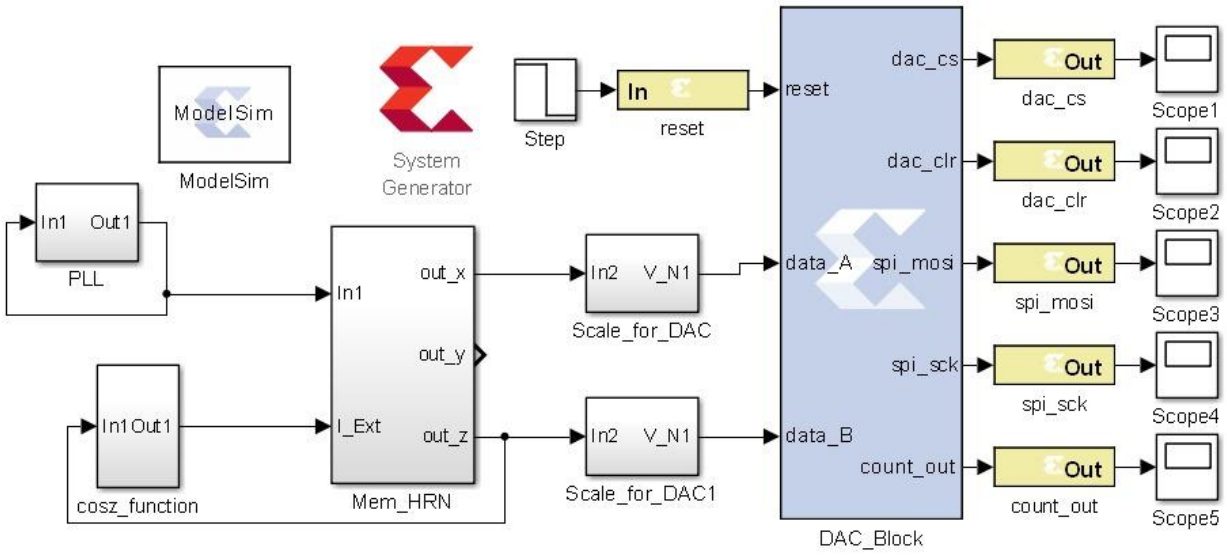
3.2. Memristif HR Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi

Memristif HR Nöron Modelinin donanımsal uygulaması için FPGA cihazı kullanılmaktadır. FPGA cihazı dijital elektronik cihaz olduğu için; Denklem 2.8' deki adi diferansiyel denklemlerle tanımlanan asimetrik davranışlara sahip üç boyutlu Memristif HR Nöron Modeli, FPGA tabanlı uygulama için ayrık zamanlı bir ifadeye dönüştürülmelidir. Burada bu dönüştürme işlemi için Euler ayrıklaştırma yöntemi kullanılmış ve adım büyüklüğü $\Delta h = 0.015625$ olarak belirlenmiştir. Ayrık zamanlı bir ifadeye dönüştürülmüş Memristif HR Nöron Modeli ifadesi Denklem 3.2' de verilmiştir.

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= [y_i - ax_i^3 - bx_i^2 + I - \text{kcos}(\varphi)x_i] * \Delta h + x_{i,} \\ y_{i+1} &= [c - dx_i^2 - y_i] * \Delta h + y_i, \\ \varphi_{i+1} &= \lceil x_i \rceil * \Delta h + x_i \end{aligned} \tag{3.2}$$

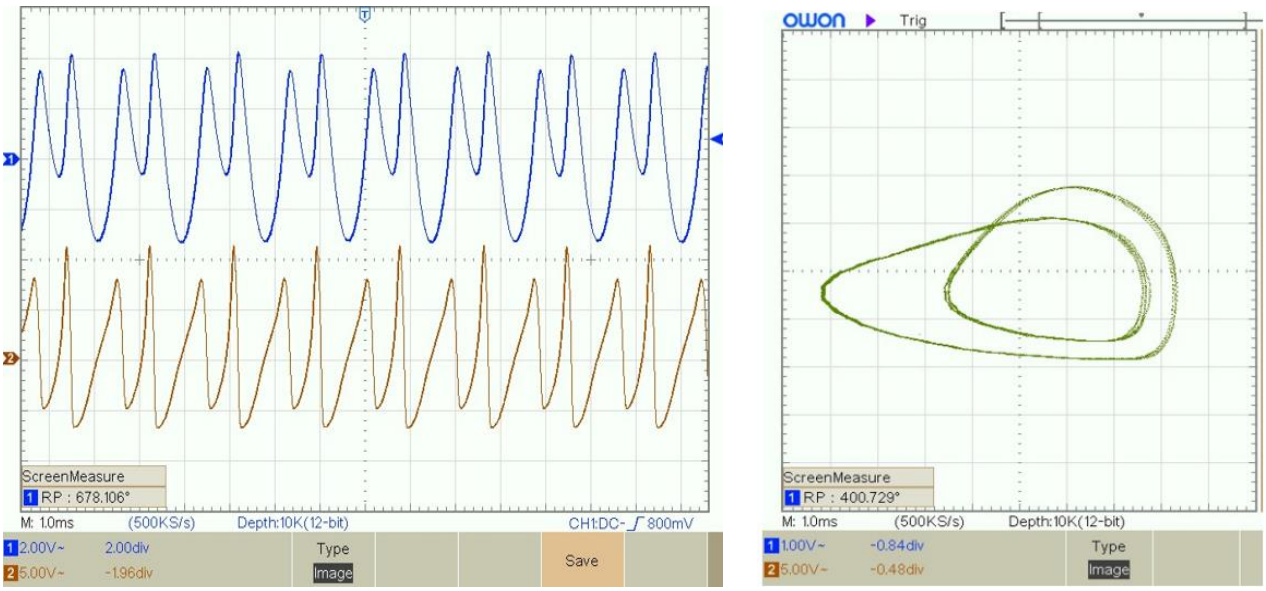
"System Generator for DSP-XILINX^{TM}" program aracı, Denklem 3.2' deki Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modelinin FPGA tabanlı uygulaması için kullanılmaktadır. Bu program, MATLAB-SIMULINK^{TM} ve XILINX^{TM} kodları arasında otomatik bir dönüşüm sağlar. Dönüştürme işleminden sonra, MATLAB-SIMULINK^{TM} üzerine kurulan sistem, doğrudan XILINX^{TM} tarafından üretilen FPGA cihazına gömülebilir. Şekil 3.3' te asimetrik davranışlara sahip üç boyutlu Memristif HR Nöron modeli için SG_{DSP} aracıyla tasarlanmış bir diyagramı göstermektedir.

Bu tasarımda, $\cos(\varphi)$ fonksiyonu ikinci bölümde bahsedilen matematiksel seri açılım ifadesi kullanılarak ikinci dereceden Taylor-Maclaurin serisine açılarak oluşturulmuştur. Tasarımda sabit nokta aritmetiği $Q=(32,24)$ kullanılmıştır. Otomatik dönüştürme işleminden sonra VHDL kodları, XILINX^{TM} şirketinin SPARTAN-3AN geliştirme kartına gömülmüştür.



Şekil 3.3. *Memristif HR Nöron Modelinin SG_{DSP} Tabanlı Tasarım Şeması.*

Üç boyutlu Memristif HR Nöron modelinin FPGA tabanlı gerçekleştirim sonuçları Şekil 3.4' te verilmiştir. Böylece elektrik alan tanımı için yeni bir durum değişkenine sahip olan nöronal sistemlerin donanımsal gerçeklemelerinin gerçekleştirilebileceği de donanımsal olarak gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 3.4. *Asimetrik Davranışlara Sahip Üç Boyutlu Memristif HR Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirim Sonuçları; a) Zaman Domeni ve b) Faz Portresi Gösterimleri.*

FPGA tabanlı gerçekleştirilmiş modele ait sentez sonuçları Tablo 3.2' de sunulmuştur.

Tablo 3.2. *Memristif HR Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Uygulamasına ait Alan Kullanımları ve Sentez Sonuçları.*

11776 REGISTER'dan kullanılan miktar	137 (1%)
11776 4-INPUT LUT'dan kullanılan miktar	1539 (13%)
5888 SLICE'dan kullanılan miktar	966 (16%)
24 BUFGMUX'dan kullanılan miktar	2 (8%)
MULT18X18SIO'dan kullanılan miktar	20 (100%)
Maksimum Gecikme (ns)	1.114

3.3. AdEx Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi

Taylor-Maclaurin matematiksel seri açılım dönüşümün verimlilik doğrulaması olarak üstel fonksiyon yerine dördüncü dereceden Taylor-Maclaurin serisinden oluşan AdEx nöron modeli FPGA platformu ile gerçekleştirilmiştir. FPGA cihazı dijital elektronik cihaz olduğu için; Denklem 2.12' deki adi diferansiyel denklemlerle tanımlanan asimetrik davranışlara sahip AdEx Nöron Modeli, FPGA tabanlı uygulama için ayrık zamanlı bir ifadeye dönüştürülmelidir. Burada bu dönüştürme işlemi için Euler ayrıklaştırma yöntemi kullanılmış ve adım büyüklüğü $\Delta h = 0.015625$ olarak belirlenmiştir. Denklem 3.3' te verilmiştir.

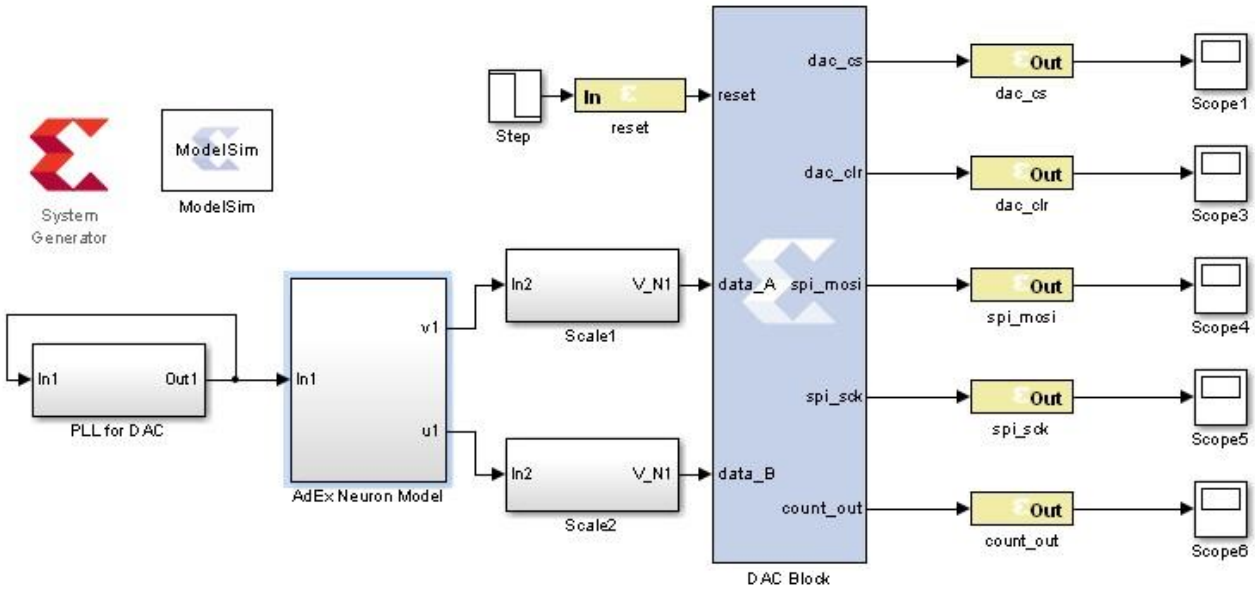
$$V_{i+1} = \left[\frac{-g_L(V_i - E_L) + g_L\Delta_T \exp\left(\frac{V_i - V_T}{\Delta_T}\right) + I_{inj} - \omega_i}{C}\right] * \Delta h + V_i,$$

$$\omega_{i+1} = \left[\frac{\alpha(V_i - E_L) - \omega_i}{\tau_\omega}\right] * \Delta h + \omega_i \tag{3.3}$$

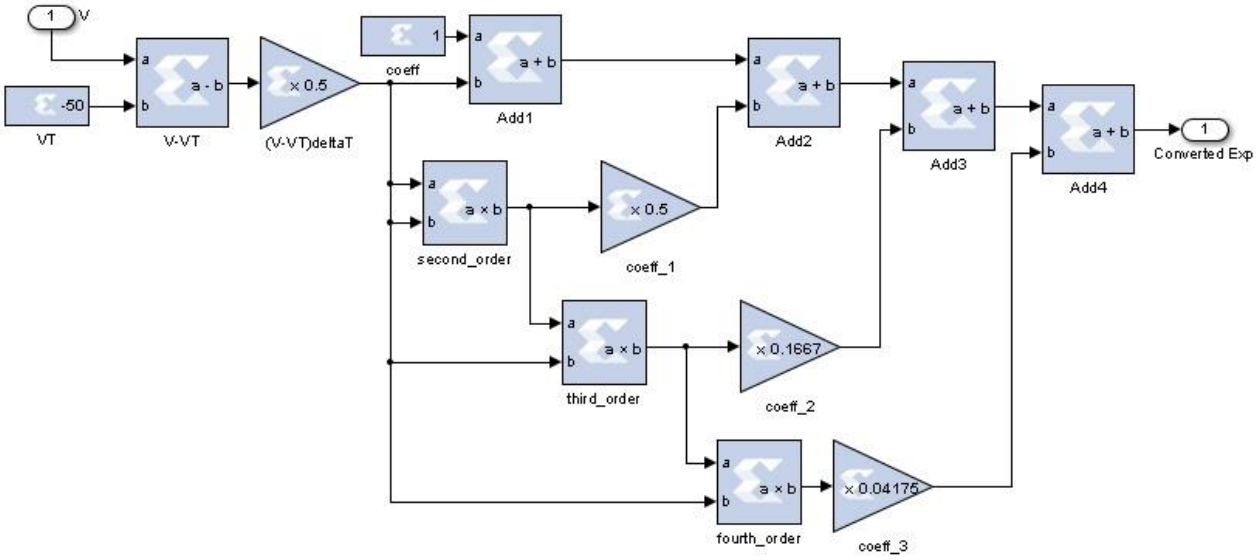
AdEx nöron modeli, XILINX^{TM} firması tarafından üretilen SPARTAN-3AN kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görsel programlamaya olanak sağlayan SG_{DSP} üreteci aracı kullanılmış ve hesaplamalar sabit noktalı aritmetik Q=(32, 18) ile yapılmıştır. Bu araç üzerine inşa edilen AdEx nöron modeli için bir konfigürasyon, Şekil 3.5' te gösterilmektedir.

Dördüncü dereceden Taylor-Maclaurin matematik serisi açılımına üstel fonksiyon dönüşümünü gerçekleştirmek için kullanılan önceden tanımlanmış bloklar, Şekil 3.6' da sunulmaktadır.

Şekil 3.6' da oluşturulan model VHDL' ye dönüştürüldükten sonra bu model FPGA kartına aktarılmıştır.

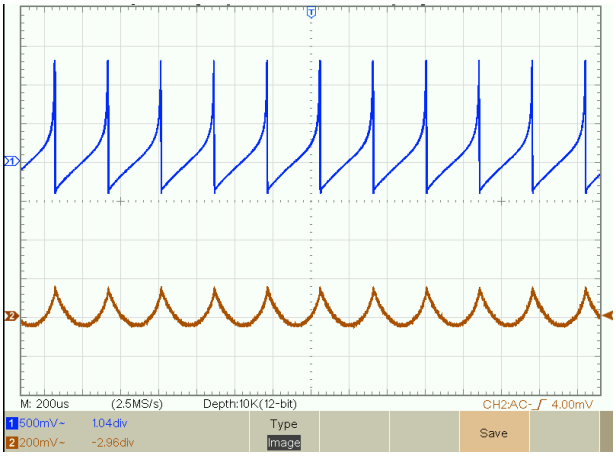


Şekil 3.5. *DSP Üreteci için Sistem Oluşturucu Üzerinde Oluşturulan AdEx Nöron Modeli.*

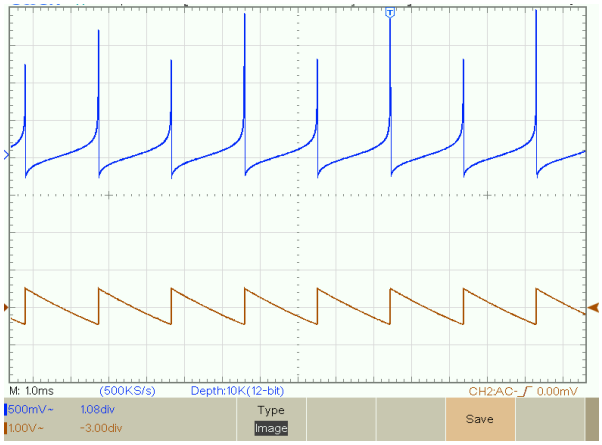


Şekil 3.6. *Üstel Fonksiyonu Dördüncü Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi Genişletmeye Dönüştürmek için DSP Üreteci Kullanılan Önceden Tanımlanmış Bloklar.*

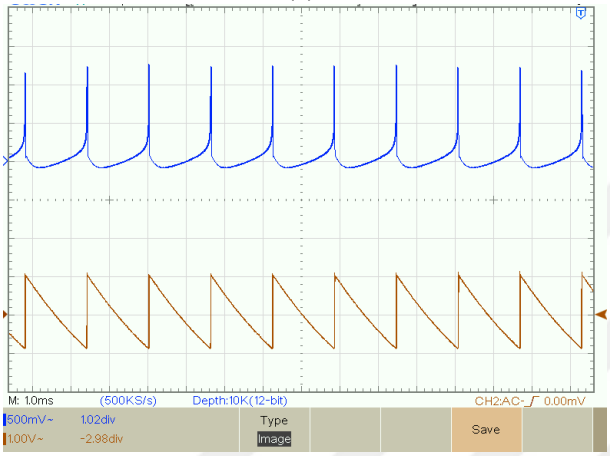
Elde edilen çıkışlar bir dijital-analog dönüştürücü (DAC) modülü aracılığıyla ölçülmüştür. Revize edilmiş AdEx nöron modelinin nöranal davranışlarının FPGA tabanlı uygulama sonuçları osiloskop ile kaydedilmiş ve Şekil 3.7' de deneysel uygulama sonuçları verilmiştir. Şekil 3.7' de yer alan sonuçlarda üstteki işaret (mavi), zar potansiyelidir (V) ve alttaki işaret (kırmızı) adaptasyon değişkenidir (ω).


M: 200us (2.5MS/s) Depth:10K(12-bit) CH2:AC-⎍ 4.00mV
1 500mV~ 1.04div
2 200mV~ -2.96div
Type
Image
Save

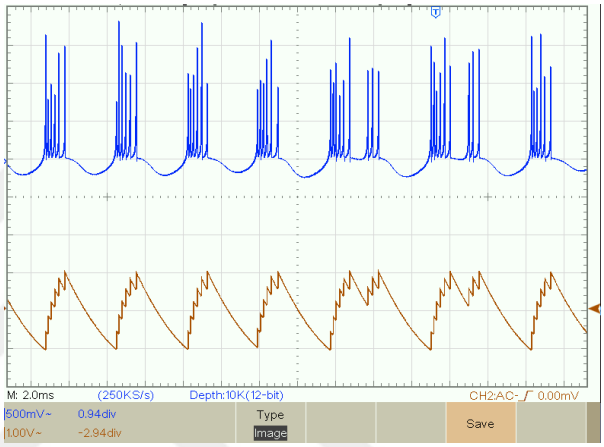
(a)


M: 1.0ms (500KS/s) Depth:10K(12-bit) CH2:AC-⎍ 0.00mV
500mV~ 1.08div
1.00V~ -3.00div
Type
Image
Save

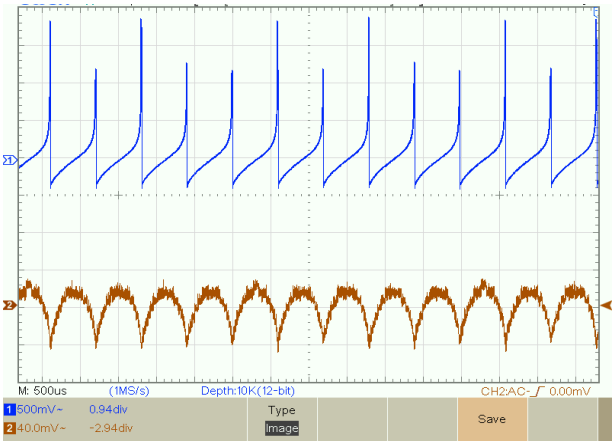
(b)


M: 1.0ms (500KS/s) Depth:10K(12-bit) CH2:AC-⎍ 0.00mV
500mV~ 1.02div
1.00V~ -2.98div
Type
Image
Save

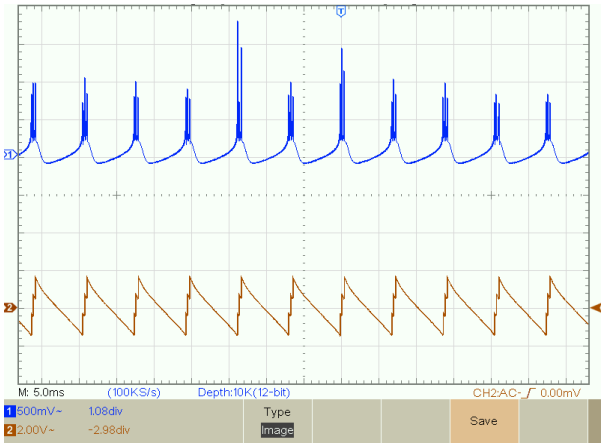
(c)


M: 2.0ms (250KS/s) Depth:10K(12-bit) CH2:AC-⎍ 0.00mV
500mV~ 0.94div
1.00V~ -2.94div
Type
Image
Save

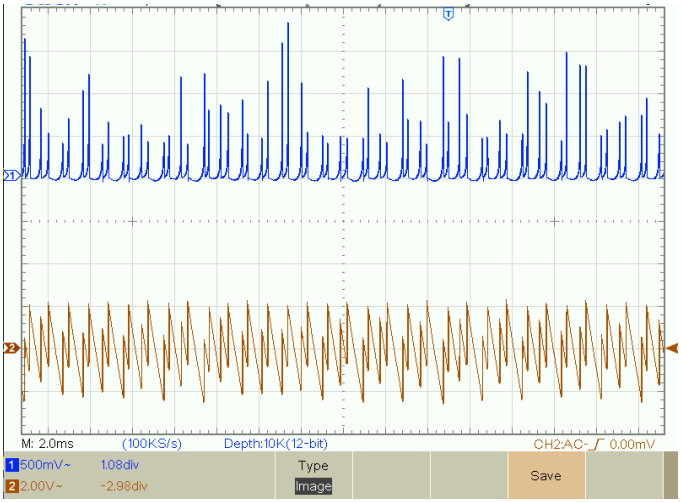
(d)


M: 500us (1MS/s) Depth:10K(12-bit) CH2:AC-⎍ 0.00mV
1 500mV~ 0.94div
2 40.0mV~ -2.94div
Type
Image
Save

(e)


M: 5.0ms (100KS/s) Depth:10K(12-bit) CH2:AC-⎍ 0.00mV
1 500mV~ 1.08div
2 2.00V~ -2.98div
Type
Image
Save

(f)



(g)

Şekil 3.7. *Dördüncü Dereceden Taylor-Maclaurin Serisi ile Oluşturulan AdEx Nöron Modelleri Nöronal Davranışlarının FPGA Tabanlı Gerçekleştirim Sonuçları; a) Düzenli Ateşleme, b) Uyarlamalı Ateşleme, c) Başlangıçta Patlamalı Ateşleme, d) Düzenli Patlamalı Ateşleme, e) Gecikmeli Ateşleme, f) Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme ve g) Düzensiz Ateşleme.*

Şekil 3.7' da ki sonuçlardan görüldüğü gibi bu süreç başarıyla tamamlanmıştır. Elde edilen gerçek zamanlı işaretlerin sonuçları osiloskop kullanılarak dijital bir osiloskop ile kaydedilmiştir. FPGA tabanlı gerçekleştirilmiş modele ait sentez sonuçları Tablo 3.3' te özetlenmektedir.

Tablo 3.3. *AdEx Nöron Modelinin FPGA Tabanlı Uygulamasına ait Alan Kullanımları ve Sentez Sonuçları.*

11776 REGISTER'dan kullanılan miktar	107(1%)
11776 4-INPUT LUT'dan kullanılan miktar	1399 (12%)
5888 SLICE'dan kullanılan miktar	965 (16%)
24 BUFGMUX'dan kullanılan miktar	2(8%)
MULT18X18SIO'dan kullanılan miktar	12 (60%)
Maksimum Gecikme (ns)	1.058

SONUÇ

Bu tez çalışmasında sonuç olarak;

- Gerçek nöronların karakteristik özelliklerini yansıtan biyolojik nöron modelleri gibi doğrusal olmayan fonksiyonlarla tanımlı dinamik sistemlerin, dijital elektronik donanımlarla gerçekleştirimleri sürecinde karşılaşılan, doğrusal olmayan fonksiyonların dijital elektronik donanımlarla kolay gerçeklenememesi problemi için önerilen çözüm yöntemlerine alternatif bir yaklaşım önerilmiştir,
- Bu süreçte kullanılan yaklaşımın hem hata miktarı hem de donanım kullanım maliyeti açısından optimum etkinliğinin değerlendirilmesi sunulmuştur,
- Son olarak takip edilen sürecin etkinliğinin gösterilmesi için seri açılımın adapte edildiği modelin FPGA elemanı ile donanım gerçekleştirimi yapılmıştır.

Tezin amacı doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmalarda doğrusal olmayan fonksiyonların tanımlamaları ve tanımlara bağlı matematiksel seri açılım ifadelerin FPGA üzerine işlenerek sonuçların elde edilme süreci tamamlanmıştır. Çeşitli hata hesaplama yöntemleri ile orijinal model ile revize model arasındaki benzerlik oranları değerlendirilmiştir. Değerlendirmede doğrusal olmayan fonksiyonların tanımında kullanılan seri açılım denklemlerinin dereceleri kademeli olarak artırılmış ve hata miktarları her bir derece için ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Ayrıca her bir derece için numerik simülasyonlar yapılıp sonuçları paylaşılmıştır. Seri açılımın adapte edildiği sistemde kullanılacak en uygun derecenin belirlenmesi için hem hata sonuçlarından hem nümerik simülasyon sonuçlarından faydalanılmıştır.

Tez çalışması süresince elektromanyetik alan tanımlı FHN Nöron modeli matematiksel tanımlamalarında yer alan sin ifadesi matematiksel serilerle basitleştirilmiş fonksiyonların seri açılımlarına dönüştürülerek nöron modeli üzerinde elektromanyetik alanın etkisi gözlemlemek için bir tanımlama yapılmıştır. Revize edilen model ile orijinal model arasında çeşitli hata hesaplamaları

ve simülasyon sonuçları gözlemlenerek işaretlerdeki desen benzerlikleri kıyaslanmıştır. Fonksiyonların seri açılımları ile ifade edilen sin matematiksel ifadesinin revize edilen modele basit denklemlerle adapte edilmesi ile bu sistemin donanımsal gerçekleştirimi ilk kez FPGA cihazı üzerine kurgulanmıştır. Kurgulanan sisteme dış etken olarak kullanılan elektromanyetik etkiyi FPGA içerisinde sisteme entegre edilmiş ve sonuçlar başarıyla elde edilmiştir. Böylece elektrik alan tanımı için yeni bir durum değişkeni tanımlanan bu nöral sistemin donanımsal gerçekleştiriminde memristif tanımlı modellere benzer şekilde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Diğer bir çalışma, memristif HR nöron modeli içerisinde yer alan cos doğrusal olmayan matematiksel ifadesi, matematiksel serilerle basitleştirilmiş doğrusal denklemlere dönüştürülerek tanımlanmıştır. Orijinal model ile revize model arasındaki hata oranları çeşitli hata hesaplama yöntemleriyle yapılırken bu iki model ile elde edilen işaretlerin desenleri arasındaki görsel benzerlik de benzetim çalışmaları yapılarak gözlemlenmiştir. cos doğrusal olmayan matematiksel ifadenin basitleştirilmiş seri açılımlarıyla ifade edildiği tanımlamalar kullanılarak revize edilen memristif HR nöron modeli ilk kez FPGA cihazı üzerinde gerçeklenmiştir ve sonuçlar başarıyla elde edilmiştir.

Üzerinde çalışılan diğer bir nöron modeli bağlantıcı AdEx nöron modelidir. AdEx nöron modeli orijinal matematiksel tanımında yer alan doğrusal olmayan eksponansiyel matematiksel ifadesi seri açılımlar aracılığıyla basit denklemlerle ifade edilmiştir. Orijinal ve revize AdEx nöron modeli arasındaki benzerlik ve hata oranları hesaplanmıştır. Revize edilen AdEx nöron modeli nöral dinamiklerini gözlemlemek için FPGA üzerinde başarıyla gerçeklenmiştir.

Yapılan bu çalışmalarla elde edilen sonuçlar; doğrusal olmayan karakteristikte ve dijital donanımlarla gerçekleştirimleri güç olan matematiksel ifadelerin yerine, bu ifadelerin matematiksel seri açılımlarının adapte edilmesi ile bu güçlüğün üstesinden gelinebileceğini göstermektedir. Gelecekte yapılan çalışmalarda bu tez çalışmasından ilham alınarak seri açılımların doğrusal olmayan sistemlerde kullanılabileceği ve toplama/çıkarma ve çarpma gibi basit matematiksel işlemlerle bu fonksiyonların gerçeklenebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Hines M. L., Carnevale N.T. Neuron: A Tool for Neuroscientists. *The Neuroscientist,* Vol.7, ss. 123-135, 2006.

[2] Izhikevich, E. M. Simple Model of Spiking Neurons. *IEEE Trans. Neural Network,* 14(6), ss. 1569–1572, 2003.

[3] Izhikevich, E. M. Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting. *Computational Neuroscience.* Cambridge, MA: MIT Press, 2006.

[4] Gerstnerand, W., Kistler, W. M. Spiking Neuron Models Single Neurons, Populations, Plasticity. *Cambridge, U.K.* Cambridge Univ. Press, 2002.

[5] Hodgkin, A. L., Huxley, A.F. A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *J. Physiol.,* 117(4), ss. 500–544, 1952.

[6] Morris, C., Lecar, H. Voltage Oscillations in the Barnacle Giant Muscle Fiber. *Biophys. J.*, 35, ss. 193–213, 1981.

[7] Isjpeert, A.J. Central Pattern Generators for Locomotion Control in Animals and Robots. A Review. *Neural Networks*, 21, ss. 642-653, 2008.

[8] Fitzhugh, R. Mathematical Models for Excitation and Propagation in Nerve. *Biological Engineering, H.P. Schawn (Ed.),* New York: Mcgraw-Hill, ss. 1- 85, 1969.

[9] Hindmarsh, J. L., Rose, R. M. A Model of The Nerve Impulse Using Two First-Order Differential Equations. *Nature,* Vol. 296, No. 5853, ss. 162–164, 1982.

[10] Wilson H.R., Cowan J. D. Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations Of Model Neurons. *Biophysical Journal,* 12(1), ss. 1-24, 1972.

[11] Erdener, Ö., Ozoguz, S. A New Neuron and Synapse Model Suitable For Low Power VLSI Implementation. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.*, 89, ss. 749–770, 2016.

[12] Glover, M., Hamilton, A., Smith, L.S. Analogue VLSI Leaky Integrate-And-Fire Neurons and Their Use in A Sound Analysis System. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.*, 30, ss. 91–100, 2002.

[13] Frady, E.P., Sanborn, S., Shrestha, S.B. Et Al.: Efficient Neuromorphic Signal Processing With Resonator Neurons. *J. Sign. Process. Syst.*, 94, ss. 917–927, 2022.

[14] Khakipoor, Y., Bahar, H.B., Karimian, G.: An Efficient Analysis of Fitzhugh-Nagumo Circuit Model. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.*, 110, ss. 385–393, 2022.

[15] Millner, S., Grübl, A., Meier, K., Schemmel, J., Schwartz, M. O.: A VLSI Implementation of The Adaptive Exponential Integrate-And-Fire Neuron Model. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, ss. 1642–1650, 2010.

[16] Sharifipoorand, O., Ahmadi, A.: An Analog Implementation of Biologically Plausible Neurons Using CCII Building Blocks," *Neural Network*, 36, ss. 129-135, 2012.

[17] Soleimani, H., Ahmadi, A., Bavandpour, M.: Biologically Inspired Spiking Neurons: Piecewise Linear Models and Digital Implementation. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Papers*, 59(12), ss. 2994–3001, 2012.

[18] Matsubara, T., Torikai, H., Hishiki, T. A Generalized Rotate-and-Fire Digital Spiking Neuron Model And Its On-FPGA Learning. *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs*, 58(10), ss. 677–681, 2011.

[19] Grübl, A., Billaudelle, S., Cramer, B. Et Al. Verification and Design Methods For The Brainscales Neuromorphic Hardware System. *J. Sign. Process. Syst.*, 92, ss. 1277–1292, 2020.

[20] Indiveri, G., Linares-Barranco, B., Hamilton, T., Vanschaik, A., Etienne- Cummings, R., Delbruck, T., Et Al.. Neuromorphic Silicon Neuron Circuits. *Front. Neurosci.* 5, ss. 73, 2011.

[21] Muthuramalingam, A., Himavathi, S., & Srinivasan, E. Neural Network Implementation Using FPGA: Issues and Application. *Int. J. Inform. Technol. 4*, ss. 86–92, 2008.

[22] Gatet, L., Tap-Béteille, H., & Bony, F. Comparison Between Analog And Digital Neural Network Implementations For Range-Finding Applications. *IEEE Trans. Neural Netw.* 20, ss. 460–470, 2009.

[23] Wanhammar, L. DSP Integrated Circuits. *Academic Press.* 1999.

[24] Wang, R. M., Hamilton, T. J., Tapson, J. C., & Van Schaik, A. A Mixed-Signal Implementation of A Polychronous Spiking Neural Network With Delay Adaptation. *Front. Neurosci*. 8, ss. 51, 2014.

[25] Toubouland, J., Brette, R.: Dynamics and Bifurcations of The Adaptive Exponential Integrate-And-Fire Model," *Biol. Cybern.*, 99 (4–5), ss. 319–334, 2008.

[26] Zhang, G., Hayat, T. & Ren, G. Model Electrical Activity of Neuron Under Electric Field. *Nonlinear Dynamics.* 95, ss. 1-14, 2019.

[27] Wu, F., Zhang, G. A New Neuron Model Under Electromagnetic Field. *Applied Mathematics and Computation.* 347, ss. 590-599, 2019.

[28] Ostojic S, Brunel N. From Spiking Neuron Models to Linear-Nonlinear Models. *PLOS Computational Biology 7(1),* E1001056, 2011.

[29] Amiri, M., Nazari, S., & Faez, K. Digital Realization of The Proposed Linear Model Of The Hodgkin-Huxley Neuron. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 47.3, ss. 483-497, 2019.

[30] Shama, F., Haghiri, S., &Imani, M. A. FPGA Realization Of Hodgkin-Huxley Neuronal Model. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(5), ss. 1059-1068, 2020.

[31] Benda, J., Maler, L., & Longtin, A. Linear Versus Nonlinear Signal Transmission In Neuron Models With Adaptation Currents Or Dynamic Thresholds. *Journal of Neurophysiology*, 104(5), ss. 2806–2820, 2010.

[32] Lek, S., Delacoste, M., Baran, P., Dimopoulos, I., Lauga, J., & Aulagnier, S. Application Of Neural Networks To Modelling Nonlinear Relationships In Ecology. *Ecological Modelling, 90(1),* ss. 39–52, 1996.

[33] Tzilivaki, A., Kastellakis, G., & Poirazi, P. Challenging The Point Neuron Dogma: FS Basket Cells As 2-Stage Nonlinear Integrators. *Nature Communications***,** 10(1), ss. 3664, 2019.

[34] Ma, J., Zhang, G., Hayat, T., Ren, G. Model Electrical Activity of Neuron Under Electric Field. *Nonlinear Dynamics*, 95(2), ss. 1585-1598, 2019.

[35] Gobley T. N. Recherches Chimiques Sur Le Jaune D'oeuf. J. Chim. *Méd, Pharm. Toxicol., 3(3),* ss. 320-329, 1846.

[36] Gobley, T. N. Recherches Chimiques Sur Le Jaune D'oeuf. [Premier Mémoire]. *J. Pharm. Chim.*, 9, ss. 81-91; ss. 161-174, 1846.

[37] Hille, B. Ionic Channels of Excitable Membranes, *Sinauer Press*, s. 607, 1992.

[38] Goldup, A., Ohki, S. & Danielli, J. F. Recent Progress In Surface Science. *Academic Press*, s. 346, 1970.

[39] Schneidman, E. Noise and Information In Neural Codes. *Phd. Thesis, Department Of Computer Engineering, Hebrew University.* 2001.

[40] Strassberg, A. F., Defelice, L. J. Limitations of The Hodgkin-Huxley Formalism: Effects Of Single Channel Kinetics On Transmembrane Voltage Dynamics. *Neural Computation, 5(6)*, ss. 843-855, 1993.

[41] Zhou, W. M., Cabral, J. H. M., Mann S.& Mackınnon, R. Potassium Channel Receptor Site For The Inactivation Gate And Quaternary Amine Inhibitors. *Nature*, 411(6838), ss. 657-661, 2001.

[42] Weiss, T. F. Cellular Biophysics, *MIT Press*, 1996.

[43] Kandel, E. R., Schwartz, J. H. & Jessell, T. M. *Principles Of Neural Science, 4th Ed. Mcgraw-Hill, New York*, ss. 1227-1246, 2000.

[44] Thomas, George B., Jr. Finney, Ross L. Calculus and Analytic Geometry (9th Ed.), *Addison Wesley*, 1996.

[45] Abramowitz, M., & Stegun, I. A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. *National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 55. Tenth Printing*, 1972.

[46] Weisstein, Eric W. Bernoulli Number. *Wolfram Mathworld*, 2016.

[47] Jha, Sumit Kumar. A New Explicit Formula for Bernoulli Numbers Involving The Euler Number. *Moscow Journal of Combinatorics and Number Theory*. 8 (4), ss. 385–387, 2019.

[48] Chua, L. Memristor-The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18 (5), ss. 507-519, 1971.

[49] Lv, M., Wang, C., Ren, G., Ma, J. & Song, X. Model of Electrical Activity In A Neuron Under Magnetic Flow Effect. *Nonlinear Dynamics*, 85(3), ss. 1479-1490, 2016.

[50] Lv, M., Ma, J. Multiple Modes Of Electrical Activities In A New Neuron Model Under Electromagnetic Radiation. *Neurocomputing, 205*, ss. 375-381, 2016.

[51] Xu, Q., Song, Z., Bao, H., Chen, M. & Bao, B. Two-Neuron-Based Non-Autonomous Memristive Hopfield Neural Network: Numerical Analyses and Hardware Experiments. *AEU-International Journal Of Electronics And Communications*, 96, ss. 66-74, 2018.

[52] Fitzhugh, R. Impulses and Physiological States In Theoretical Models Of Nerve Membrane. *Biophysical Journal*, 1(6), ss. 445-466, 1961.

[53] Hindmarsh, J. L., Rose, R. M. A Model of Neuronal Bursting Using Three Coupled First Order Differential Equations. *Proceedings of The Royal Society Of London. Series B. Biological Sciences*, 221(1222), ss. 87-102, 1984.

[54] Kim, Y. Identification Of Dynamical States In Stimulated Izhikevich Neuron Models By Using A 0-1 Test. *Journal Of The Korean Physical Society*, 57(6), ss. 1363-1368, 2010.

[55] Bizzarri, F., Brambilla, A., Storti Gajani, G. Lyapunov Exponents Computation for Hybrid Neurons. *Journal of Computational Neuroscience,* 35(2), ss. 201-212, 2013.

[56] Çimen, Z., Korkmaz, N., Altuncu, Y. & Kılıç, R. Evaluating The Effectiveness Of Several Synchronization Control Methods Applying To The Electrically And The Chemically Coupled Hindmarsh-Rose Neurons. *Biosystems,* 198, s. 104284, 2020.

[57] Thottil, S. K., Ignatius, R. P. Nonlinear Feedback Coupling In Hindmarsh–Rose Neurons. *Nonlinear Dynamics,* 87(3), ss. 1879-1899, 2017.

[58] Karaca, Z., Korkmaz, N., Altuncu, Y. & Kılıç, R. An Extensive FPGA-Based Realization Study About The Izhikevich Neurons And Their Bio-Inspired Applications. *Nonlinear Dynamics*, 105(4), ss. 3529-3549, 2021.

[59] Li, Z. Exponential Stability Of Synchronization In Asymmetrically Coupled Dynamical Networks. *Chaos Interdiscip. J. Nonlinear. Sci.,* 18(2), ss. 023124, 2008.

[60] Shuai, J.W., Durand, D.M. Phase Synchronization In Two Coupled Chaotic Neurons. *Phys. Lett. A*, 264(4), ss. 289–297, 1999.

[61] Gogtay, N. J., Thatte, U.M. Principles of Correlation Analysis. *Journal of The Association Of Physicians Of India,* 65(3), ss. 78-81, 2017.

[62] Innocenti, G., Morelli, A., Genesio, R. & Torcini, A. Dynamical Phases of The Hindmarsh-Rose Neuronal Model: Studies Of The Transition From Bursting To Spiking Chaos. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,* Vol. 17, No. 4, 2007.

[63] Gonzalez-Miranda, J. M. Complex Bifurcation Structures In The Hindmarsh-Rose Neuron Model. *International Journal of Bifurcation And Chaos,* Vol. 17, No. 9, ss. 3071–3083, 2007.

[64] Gonzalez-Miranda, J. M. Observation of A Continuous Interior ´ Crisis In The Hindmarsh-Rose Neuron Model. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,* Vol. 13, No. 3, ss. 845– 852, 2003.

[65] Innocenti, G., Genesio, R. On The Dynamics of Chaotic Spiking-Bursting Transition In The Hindmarsh-Rose Neuron. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,* Vol. 19, No. 2, 2009.

[66] Kaslik, E. Analysis of Two- And Three-Dimensional Fractionalorder Hindmarsh-Rose Type Neuronal Models. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, Vol. 20, No. 3, ss. 623–645, 2017.

[67] Bao, B., Hu, A., Bao, H., Xu, Q., Chen, M., & Wu, H. Three-Dimensional Memristive Hindmarsh–Rose Neuron Model With Hidden Coexisting Asymmetric Behaviors. *Complexity, 2018,* ss. 1-11, 2018.

[68] Chua, L. Resistance Switching Memories Are Memristors. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 102, No. 4, ss. 765–783, 2011.

[69] Chua, L. O. The Fourth Element. *Proceedings of The IEEE,* Vol. 100, No. 6, ss. 1920–1927, 2012.

[70] Touboul, J., Brette, R. Dynamics and Bifurcations of The Adaptive Exponential Integrate-And-Fire Model. *Biol. Cybern.,* 99(4), ss. 319-334, 2008.

[71] Başargan, A. A Synaptic Coupling for The Adaptive Exponential Integrate And Fire (AdExI&F) Neuron Model With Circuit Simulations. *M. Sc. Thesis, Istanbul Technical University,* s. 65, 2013.

[72] Erişim: www.xilinx.com , [Erişildi: 01 Temmuz, 2023].

[73] Erişim: www.mathworks.com/products/matlab.html , [Erişildi: 01 Temmuz, 2023].

ÖZGEÇMİŞ

1. KİŞİSEL BİLGİLERİ

ADI SOYADI : Bekir ŞIVGA

UYRUĞU : Türkiye (TC)

2. ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Y.Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Kayseri Üniversitesi	-
Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Erciyes Üniversitesi	2014

3. YABANCI DİL : İngilizce

4. İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-	Kayseri Şehir Hastanesi	Teknik Hizmetleri Müdürlüğü Bakım ve Onarım İşleri Elektrik Elektronik Mühendisi
2019-2020	Develi Devlet Hastanesi	Bakım ve Onarım İşleri Elektrik Elektronik Mühendisi
2018-2019	Aksaray İl Sağlık Müdürlüğü	Teknik Hizmetler Yapım-Bakım-Onarım İşleri Elektrik Elektronik Mühendisi
2012-2018	Kayseri İl Ambulans Servisi Başhekimliği	Acil Sağlık Otomasyon Sistemi İl Yönetici ve Eğitimcisi

5. YAYINLAR

1. Korkmaz, N., ŞIVGA, B. The FPGA-Based Realization of the Electromagnetic Effect Defined FitzHugh-Nagumo Neuron Model. *Chaos Theory and Applications, 4(2),* 88-93, 2022.
2. KORKMAZ, N., ŞIVGA, B. Elektromanyetik Alan Etkili Fitzhugh-Nagumo Nöron Modeline Rotasyon Kontrol İşleminin Uygulanması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 38(2),* 242-249, 2022.

TEZ İNTİHAL RAPORU

BİYOLOJİK NÖRON MODELLERİNİN FPGA GERÇEKLEŞTİRİMLERİNDE TAYLOR MACLAURİN SERİ AÇILIM YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

Yazar Bekir Şıvga

Gönderim Tarihi: 13-Tem-2023 11:09AM (UTC+0300)
Gönderim Numarası: 2130490520
Dosya adı: tez_intihal.pdf (10.31M)
Kelime sayısı: 582
Karakter sayısı: 3288

BİYOLOJİK NÖRON MODELLERİNİN FPGA GERÇEKLEŞTİRİMLERİNDE TAYLOR MACLAURİN SERİ AÇILIM YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

ORİJİNALLİK RAPORU

%4	%4	%0	%0
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	%4

Alıntıları çıkart	üzerinde	Eşleşmeleri çıkar	< 7 words
Bibliyografyayı Çıkart	üzerinde		