



KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İŞİTSEL UYARTIMLARIN NÖRON MODELİ
CEVAPLARINA ETKİLERİNİN ALTERNATİF
ELEKTRONİK DONANIMLARLA GÖZLEMLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS
TEZİ**

MUSTAFA MOLU

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. NİMET KORKMAZ**



2025

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

**İŞİTSEL UYARTIMLARIN NÖRON MODELİ CEVAPLARINA
ETKİLERİNİN ALTERNATİF ELEKTRONİK DONANIMLARLA
GÖZLEMLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Mustafa MOLU**

**Danışman
Doç. Dr. Nimet KORKMAZ**

**Jüri Üyeleri
Doç. Dr. Ekin ASLAN
Doç. Dr. Nimet KORKMAZ
Doç. Dr. Şerife GENGEÇ BENLİ**

**Şubat 2025
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.

Mustafa MOLU





TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU

Doküman No	FR-287
İlk Yayın Tarihi	8/02/2022
Revizyon Tarihi	-
Revizyon No	0
Sayfa No	1/1

ii

T.C.
Kayseri Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Program Adı : Yüksek Lisans

Tez Başlığı : İşitsel Uyarımların Nöron Modeli Cevaplarına Etkilerinin Alternatif Elektronik Donanımlarla Gözlemlenmesi

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 63 sayfalık kısmına ilişkin 18/02/2025 tarihinde **Turnitin** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı: **% 15**'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Giriş dahil
- 2- Ana Bölümler dahil
- 3- Sonuç dahil
- 4- Alıntılar dahil
- 5- Kapak hariç
- 6- Önsöz ve Teşekkür hariç
- 7- İçindekiler hariç
- 8- Kaynakça hariç
- 9- Özet hariç
- 10- Yedi (7) kelimedenden 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./...../20.....

Danışman

Doç. Dr. Nimet KORKMAZ

Öğrenci

Mustafa MOLU

Hazırlayan
BKK

Onaylayan
KASGEM

KILAVUZA UYGUNLUK

“İşitsel Uyarımların Nöron Modeli Cevaplarına Etkilerinin Alternatif Elektronik Donanımlarla Gözlemlenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Mustafa MOLU

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Nimet KORKMAZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Doç. Dr. Ali DURMUŞ

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Nimet KORKMAZ danışmanlığında Mustafa MOLU tarafından hazırlanan “İşitsel Uyartımların Nöron Modeli Cevaplarına Etkilerinin Alternatif Elektronik Donanımlarla Gözlemlenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

24 / 01 / 2025

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Nimet KORKMAZ

Üye : Doç. Dr. Şerife GENGEÇ BENLİ

Üye : Doç. Dr. Ekin ASLAN

ONAY:

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

..... / /

Doç. Dr. Ahmet TERZİ

Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ / TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, çalışmalarımın sonuçlanmasında en büyük katkı sahibi olan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nimet KORKMAZ'a teşekkürlerimi bir borç olarak bilirim.

Araştırmalarım ve çalışmalarım sırasında vermiş olduğu desteklerden dolayı aileme, yöneticilerime teşekkür ederim.

Mustafa MOLU, Kayseri, 2025

İŞİTSEL UYARTIMLARIN NÖRON MODELİ CEVAPLARINA ETKİLERİNİN ALTERNATİF ELEKTRONİK DONANIMLARLA GÖZLEMLENMESİ

Mustafa MOLU

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2025
Danışman: Doç. Dr. Nimet KORKMAZ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, matematiksel modellenmesi literatürde mevcut olan ve işitme nöronlarını modelleyen bir sistem, çeşitli elektronik donanımlarla gerçekleştirilmektedir. Kullanılan donanımların uyaran dinamiklerini en doğru şekilde yakalama ve tatbik edilen bu uyarılara cevap vermede etkinliklerinin kıyaslanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, piezoelektrik seramiklerdeki titreşimleri FitzHugh–Nagumo nöron modeline adapte ederek modelleyen bir sistemin; voltaj geribeslemeli işlemsel kuvvetlendiricilerle, işlemsel geçişiletkenliği kuvvetlendiricileriyle, akım geribeslemeli işlemsel kuvvetlendiricilerle ve alan programlanabilir analog dizileri ile gerçekleştirimi başarılı bir şekilde yapılmıştır. Burada işitme nöronlarını modelleyen bu sistemdeki harici giriş uyartım işareti yerine, notaları bir mikrodenetleyicide kodlanan “İstiklal Marşı” eseri için ölçülen elektriksel işaret kullanılmıştır. Emülatör devrelerine uygulanan uyartım işaretinin tepe noktaları ile nöronal devre çıkışlarında ölçülen dinamik cevapların ateşlenme anları eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Tetiklenme işareti ve nöronların ateşleme desenlerinin tepe noktaları arasındaki zaman farkları “Dinamik Zaman Yer Değiştirme” algoritması ile belirlenerek, bu farklar grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Böylece tez çalışması kapsamında tasarlanan emülatörlerin harici uyartımları yakalama performansları kıyaslanabilmiştir. Ayrıca burada, tasarımı yapılan emülatör devreleri için donanım kullanım maliyeti gibi sonuçlar da paylaşılmıştır. Böylece işitme nöronları için emülatör devre tasarımı yapmanın yanı sıra, emülatör devrelerinin bir performans kıyaslaması da literatüre sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: FitzHugh–Nagumo nöron modeli, voltaj geribeslemeli işlemsel kuvvetlendirici (VOA), işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA), akım geri beslemeli işlemsel kuvvetlendirici (CFOA), dinamik zaman yer değiştirme (DTW).

THE OBSERVATION OF THE EFFECTS OF AUDITORY STIMULI ON NEURON MODEL RESPONSES WITH ALTERNATIVE ELECTRONIC HARDWARE

Mustafa MOLU

Kayseri University Institute of Graduate Education
Master Thesis, February 2025
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nimet KORKMAZ

ABSTRACT

In this study, a system, which is mathematically modeled in literature and models auditory neurons, is implemented with various electronic hardware. The aim is to compare the efficiency of used hardware in terms of capturing the stimulus dynamics in the most accurate way and responding to these applied stimuli. In this context, a system that models vibrations in piezoelectric ceramics by adapting them to the FitzHugh–Nagumo neuron model is successfully implemented with voltage-feedback, operational transconductance, current feedback operational amplifiers and field programmable analog arrays. Here, the electrical signal measured for the piece “İstiklal Marşı”, the notes of which are coded in a microcontroller, is used instead of external input excitation signal in this system modeling auditory neurons. The peaks of excitation signal applied to emulator circuits and the firing moments of their dynamic responses measured at the neuronal circuit outputs were recorded simultaneously. Time differences between trigger signal and peaks of neurons’ firing patterns of are determined with the “Dynamic Time Warping” algorithm and these differences are visualized graphically. Thus, the performance of emulators designed within scope of this thesis study in capturing external stimuli could be compared. Additionally, results such as hardware usage cost are shared for designed emulator circuits. Therefore, in addition to designing emulator circuits for auditory neurons, a performance comparison of the emulator circuits is also presented to literature.

Keywords: FitzHugh–Nagumo neuron model, voltage feedback operational amplifier (VOA), operational transconductance amplifier (OTA), current feedback operational amplifier (CFOA), dynamic time warping (DTW).

İÇİNDEKİLER

İŞİTSEL UYARTIMLARIN NÖRON MODELİ CEVAPLARINA ETKİLERİNİN ALTERNATİF ELEKTRONİK DONANIMLARLA GÖZLEMLENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	i
TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU.....	ii
KILAVUZA UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

İŞİTSEL NÖRON MODELİ VE KULLANILAN EKİPMANLARIN AÇIKLAMALARI

1.1. İşitsel Nöron Modeli Tanımlaması	7
1.2. Kullanılan Ekipmanlar	11
1.2.1. Voltaj Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici (VOA)	11
1.2.2. İşlemsel Geçişiletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA)	12
1.2.3. Akım Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici (CFOA)	14
1.2.4. Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA)	16

İKİNCİ BÖLÜM

DONANIM DOĞRULAMA SÜRECİNİN AYRINTILI AÇIKLAMASI

2.1. Devre Tasarımlarına Dair Detaylar	18
2.2. İşitme Nöronuna Uygulanan Uyarım İşaretinin Elde Edilmesi ve Emülatör Devrelerine Tatbik Edilmesi	24
2.3. Dinamik Zaman Yer Değiştirme Analizi ile Performans Kıyası	26
2.4. İşitsel Nöron Modelinin FPAA Tabanlı Emülasyonu ve Performans Çıktısı	31

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇ

3. SONUÇ	44
KAYNAKÇA	55
TEZ İNTİHAL RAPORU	60
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Kisaltmalar

CFOA	: Akım Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendiricisi
DTW	: Dinamik Zaman Yer Değiştirme
FHN	: Fitzhugh-Nagumo Nöron Modeli
FPAA	: Alan Programlanabilir Analog Dizi (Field Programmable Analog Array)
FTFN	: Dört terminalli yüzen nullor
OPAMP	: İşlemsel Kuvvetlendirici
OTA	: İşlemsel Geçişiletkenliği Kuvvetlendiricisi
VOA	: Voltaj Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendiricisi

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. <i>Modele uyartım olarak tatbik edilen deseni üretmek için kullanılan notalar ve frekansları.....</i>	25
Tablo 2.2. <i>Akustik uyartımın uygulandığı nöron modelinin VOA, OTA ve CFOA tabanlı devre simülasyonları sonucu ölçülen cevapların kıyaslanması için Denklem 2.6 ile hesaplanan mesafe matrisi sonuçları.....</i>	31
Tablo 2.3. <i>İşitme nöronlarını modelleyen sistemin FPAA elemanı ile gerçekleştirimi için tasarlanan devrede kullanılan CAM bloklarının listesi, kullanım amaçları ve parametre ayarları.....</i>	35
Tablo 2.4. <i>Akustik uyartımın uygulandığı nöron modelinin FPAA tabanlı gerçekleştirimleri sonucu ölçülen cevapların kıyaslanması için Denklem 2.6 ile hesaplanan mesafe matrisi sonuçları.....</i>	41
Tablo 2.5. <i>Akustik uyartımın uygulandığı nöron modelinin FPAA tabanlı gerçekleştirimleri sonucu ölçülen ölçeklendirilmiş cevapların kıyaslanması için Denklem 2.6 ile hesaplanan mesafe matrisi sonuçları.....</i>	43
Tablo 2.6. <i>FPAA elemanındaki CAB kullanım miktarları.....</i>	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Çalışmada ayırık donanım doğrulaması sürecinde takip edilen süreci özetleyen bir gösterim.....	6
Şekil 1.2. Kulağın içyapısı ve işitme nöronlarını temsilen oluşturulan yapay işitme nöron eşdeğer devresi.....	7
Şekil 1.3. İşitme nöron modelinin (a) $f=0.001$ Hz, (b) $f=0.002$ Hz için yapılan nümerik simülasyon sonuçları.....	10
Şekil 1.4. VOA yapılarının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modelleri.....	12
Şekil 1.5. OTA yapılarının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modelleri.....	13
Şekil 1.6. CFOA yapılarının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modelleri.....	15
Şekil 1.7. Çalışmada FPAA ile gerçekleştirim ve ölçüm sürecinde takip edilen süreci özetleyen bir gösterim.....	17
Şekil 2.1. Ayırık donanım tabanlı tasarımlarda kullanılan integratör devresi ve çıkış gerilimi hesabı.....	19
Şekil 2.2. (a) x ve (b) y durum değişkenleri için tasarlanan toplayıcı devreler ve bu devrelerin çıkış denklemi hesaplamaları.....	19
Şekil 2.3. Durum değişkenlerindeki evrilmenin elde edilebileceği devre yapısı.....	20
Şekil 2.4. Nöron modeli tanımlamasının x durum değişkeninde bulunan üçüncü dereceden polinomal ifadeyi elde etmek için kullanılan komponent.....	21
Şekil 2.5. VOA, OTA ve CFOA elemanları kullanılarak tasarlanabilecek devre yapısının nihai durumuna ait bir gösterim	22
Şekil 2.6. (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA tabanlı devre yapılarına ait zaman domaini ve faz çekerlerini içeren devre simülasyon sonuçları.....	22

Şekil 2.7. Mikrodenetleyici üzerinden ölçülen ve devrelere uyarım işareti olarak tatbik edilen işaret.....	25
Şekil 2.8. Uyarım işaretinin tatbik edildiği (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA tabanlı devre yapılarına ait devre simülasyon sonuçları	27
Şekil 2.9. (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA için çizdirilen mesafe matrisinin her bir işlemsel kuvvetlendiricideki hataların görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar.....	32
Şekil 2.10. İşitme nöronlarını modelleyen sistemin FPAA elemanı ile gerçekleştirimi için tasarlanan (a) devre şeması, (b) ANADIGIM DESIGNER2 programındaki simülasyon sonucu.....	34
Şekil 2.11. İşitme nöronlarını modelleyen sistemin FPAA elemanı ile gerçekleştirimi sonuçları: (a) zaman domaini, (b) faz domaini gösterimi	38
Şekil 2.12. Uyarım işaretinin tatbik edildiği FPAA tabanlı devre gerçekleştirimi sonucu elde edilen a) time/div=200ms, b) time/div=50ms için cevap işaretleri.....	40
Şekil 2.13. FPAA için çizdirilen mesafe matrisinin hatalarının görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar	42
Şekil 2.14. Ölçeklendirilmiş FPAA sonuçları için çizdirilen mesafe matrisinin hatalarının görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar	42
Şekil 3.1. (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA tabanlı tasarlanan devre yapılarına ait AC analiz sonuçları.....	45

GİRİŞ

Sesin dış kulakta algılanıp beyinde bulunan işitme korteksine iletilme sürecinde karşılaşılan aksaklıklar işitme kayıplarına neden olabilir. Kulağın dış yapısında oluşan ve işitme kaybına neden olan sebeplere; orta kulak enfeksiyonları, eustachian tüpü sorunları, kulak zarı hasarı, otoskleroz ve akustik travma gibi etkenler sebep olabilmektedir. Erken teşhis ve müdahale ile bu tür problemler çoğu zaman tedavi edilebilmekte veya yönetilebilmektedir. İşitme sürecinde karşılaşılan aksaklıklara sesin kulakta algılanıp, elektriksel sinyaller şeklinde beyne iletilmesi ve beyinde işlenmesi sürecinde görevli olan işitme nöronları ve saç hücrelerinin zarar görmesi de sebep olabilmektedir. Yüksek sese maruz kalan saç hücrelerinin tüy benzeri uzantıları (stereosilya) aşınarak işitme kaybına neden olabilmektedir. Yüksek sese maruz kalma durumunda işitme nöronları da hasar görür ve beyinde sesin algılanma süreci zorlaşır. Yaşlandıkça (Presbiakuzi), kohleadaki saç hücreleri doğal olarak yavaşça zarar görür. Yaşlanmaya bağlı olarak işitme nöronları da daha az aktif hale gelir ve zamanla sayıları azalabilir. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı seslerin algılanmasında zorluklara sebep olabilmektedir. İlaç kullanımı gibi kimyasal etkenler ve metabolik hastalıklar da saç hücrelerinin zarar görmelerine ve dolayısı ile işitme kayıplarına neden olabilmektedir. "Usher Sendromu" gibi bazı kalıtsal hastalıklar hem saç hücrelerinin hem de işitme sinirinin zarar görmesine sebep olmakta ve işitme kayıpları yaşanabilmektedir [1, 2].

İşitme kayıplarının fonksiyonel bozukluklarını tedavi etmek için biyologlar, insan embriyonik kök hücrelerinin kısmi işitme fonksiyonunun onarılması çalışmalarında kullanılabileceği [3], otik progenitör hücre naklinin kaybolan kohlear spiral ganglion neurons'larını yerine koymak için potansiyel bir strateji olabileceği gibi [4] öneriler sunmaktadır. İşitme kayıplarının tedavilerinde etkin kohlear implant tasarımları da dikkat çeken yöntemler arasında yer almaktadır. Kohlear implantlar ses dalgalarının hasar görmüş saç hücrelerini atlayarak sesin işitme sinirlerine iletilmesini sağlarlar [5-9]. Shintaku ve diğerleri [5], akustik/elektriksel dönüşüm sağlayan, frekans seçici özelliğe

sahip olan ve harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymayan bir piezoelektrik yapay kohlea tanıtmışlardır. Saadatzi ve diğerleri [8], insan kohleasından ilham alarak bir kohlear implant elektrot dizisi tasarlamış ve yapay bir baziler membran yapısı önermişlerdir. Bununla birlikte işitsel nöronların tedavisi ve iyileşmesi ile ilgili konular da araştırmacıların işitme kaybının telafisi için dikkate alacağı alanlar arasında yer almaktadır. Bazı yapay sensörler ve işlemciler aracılığı ile işitme sürecini kontrol eden sistemlerin tasarımının yapılması bu alanlar arasındadır. Çeşitli nöronal ateşleme desenleri üreten ve bu desenleri canlılardaki yüksek mertebeli duyu merkezlerine tatbik ederek işitme fonksiyonunun yeniden kazanılmasına yardım sağlayabilecek donamların tasarımı, bu alandaki en önemli hedeflerden birisidir. Bu düşünceden hareketle, işitme kaybını onarmak için biyolojik nöron modellerinden yararlanılarak spiral ganglion nöronlarının benzer fonksiyonel transkripsiyonunu yeniden üretmek amacıyla çeşitli çalışmalar literatüre sunulmuştur [10]. Biyofiziksel deneylerde nöronların dinamik cevaplarını inceleyen çalışmalarda, termistörler [11, 12], Josephson kavşakları [13-15], memristörler [16, 17] ve fototüpler [18, 19] gibi donanımların matematiksel tanımları sinir hücrelerini birleştirmek için kullanılmıştır. İşitme kaybını onarmak için önerilen biyolojik nöron modellerinin modifikasyonunu ele alan çalışmalarda ise, piezoelektrik seramiklerin akusto-elektrik dönüşüm özelliğinden yararlanılmıştır. Bu çalışmalarda biyolojik nöron modelleri çeşitlendirilerek bu modellerin dinamik cevaplarının işitme fonksiyonunun yeniden kazanılmasında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarda piezoelektrik seramikler üzerindeki zamanla değişen akım, biyolojik nöron modellerine harici bir uyaran olarak tatbik edilmiş [20-24] ve bu uyarıların tetiklediği aksiyon potansiyelinin işitme merkezinde kullanılabilirliği ile ilgili çıkarımlar kaydedilmiştir. Referans çalışmalarda gürültüsüz ve gürültülü koşullarda doğru sinyal algılama ve ayırt etme için senkronizasyon kararlılığı durumları da incelenmiştir.

Elde edilen bu yapay aksiyon potansiyeli işaretlerinin canlı vücutlarındaki yüksek mertebeli kontrol merkezlerinde uyaran olarak kullanılabilirdiği yorumları yapılmaktadır. Ayrıca birçok uygulama için elektronik donanım tanımları nöral sistem tanımlarına adapte edilmektedir [25-29]. Uyaran olarak kullanılabilirdiği işaret üreticilerinin donanım gerçekleştirmelerinin yapılması araştırmalara yeni bakış açıları kazandıracaktır. Özellikle işitme sürecinde sesin tonunun ve frekansının analizinin doğru algılama için önemli bir kriter olduğu düşünülürse; geniş frekans sahasında çalışabilen, uyaran dinamiklerini en

doğru şekilde yakalayan ve tatbik edilen bu uyanarlara cevap vermede etkin olan donanımların tercihi de önemli bir kriter olacaktır. Donanım tercihlerinde arzu edilen çıktıları sağlayacak komponentlerin tercih edilmesi gerekir. Örneğin, donanım uygulamaları dengeli bias akımları, düşük gürültü ile çalışma ve iyi bir DC performansı gerektiriyorsa voltaj geribeslemeli işlemsel kuvvetlendiriciler ile yapılan tasarımlar tercih edilebilir. Öte yandan bu uygulamalar yüksek değişim hızı, düşük distorsiyon, kazanç-bandgenişliği bağımsızlığı gibi performanslar gerektiriyorsa akım geribeslemeli işlemsel kuvvetlendiriciler ile yapılan tasarımların tercihi söz konusu olabilir. Dahası, bu tasarımlar prototip bir gerçekleştirimin performans değerlendirmesi içinse yapılmışsa, yeniden yapılandırılabilir bir platformun kullanımı da mümkün olabilir. Piezoelektrik seramikler üzerindeki zamanla değişen akımın, biyolojik nöron modellerinde harici bir uyanan olarak modellendikten sonra, elde edilen yapay aksiyon potansiyelinin işitme merkezinde bir tetikleyici olarak kullanılabileceği bir sistemin de elektronik donanımlarla gerçekleştirimi yapılabilir. Bu sistem elektronik donanımlarla gerçekleştirilirken, bahsedilen bu donanım performans özelliklerinin dikkate alınması önemlidir.

Bu çalışmada, matematiksel modellemesi literatürde mevcut olan ve işitme nöronlarını modelleyen bir sistem, çeşitli elektronik donanımlarla gerçekleştirilmektedir. Kullanılan donanımların uyanan dinamiklerini en doğru şekilde yakalama ve tatbik edilen bu uyanarlara cevap vermede etkinliklerinin kıyaslanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda piezoelektrik seramiklerdeki titreşimleri FHN nöron modeline adapte ederek modelleyen bir sistemin; opamplarla (VOA), işlemsel geçişiletkenliği kuvvetlendiricileriyle (OTA), akım geribeslemeli işlemsel kuvvetlendiricilerle (CFOA) ile ve alan programlanabilir analog dizileri ile (FPAA) gerçekleştirimi başarılı bir şekilde yapılmıştır. Gerçekleştirimlerle elde edilen sonuçlar modelin nümerik benzetimleri ile oldukça benzerdir. Burada işitme nöronlarını modelleyen bu sistemdeki harici uyartım işareti yerine, notaları ATmega328 mikrodenetleyicisinde kodlanan “İstiklal Marşı” eseri için ölçülen elektriksel işaret kullanılmıştır. Bahsedilen işlemsel kuvvetlendiricilerle ve programlanabilir donanımla gerçeken işitme nöronu emülatör devrelerine, giriş uyartımı olarak bu elektriksel işaret tatbik edilmiştir. Emülatör devrelerinde çıkış dinamiği olarak ise, nöron modellemesinde membran potansiyelini temsil eden durum değişkeni üzerinden yapılan ölçümler kaydedilmiştir.

Bir nörona harici olarak tatbik edilen uyartımlar, nöronların aksiyon potansiyeli

tetiklenmesine neden olmaktadır. Bu uyarımlar yeterli seviyede değilse, nöronun ‘ya hep ya hiç’ çalışma prensibi gereği nöral bir cevap kaydetmek de mümkün değildir. Dolayısı ile farklı donanımlarla gerçekleştirilen işitme nöronu emülatör devrelerinin giriş uyarımlarına verdiği membran potansiyeli cevaplarının uyumluluğu, bu donanımların performans kıyaslamaları için oldukça önemli bir ölçüttür. Burada ilgili donanımlarla gerçekleştirilen işitme nöronu emülatörlerinin performans kıyaslamalarının yapılabilmesi için şöyle bir süreç takip edilmiştir: Donanım gerçekleştirimlerine uygulanan uyarım işaretinin tepe noktaları ile nöronal devre çıkışlarında ölçülen dinamik cevapların ateşlenme anları eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Tetiklenme işareti ve nöronların ateşleme desenlerinin tepe noktaları arasındaki zaman farkları belirlenerek, bu farklar grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Böylece emülatörlerin uyarımları yakalama performansları kıyaslanabilmiştir. Ayrıca burada, tasarımı yapılan emülatör devreleri için donanım kullanım maliyeti gibi sonuçlar da paylaşılmıştır. Bu çalışmada işitme nöronları için emülatör devre tasarımı yapmanın yanı sıra, emülatör devrelerinin bir performans kıyaslaması da literatüre sunulmaktadır.

Bu kapsamda FHN nöron modeli ile tanımlanan işitme nöronunun üzerine hazırlanan bu test çalışmasında takip edilen süreç aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i. FHN nöron modeli ile tanımlanan işitme nöronunun nümerik simülasyonlar yinelenmektedir.
- ii. FHN nöron modeli ile tanımlanan işitme nöronunun VOA, OTA ve CFOA tabanlı gerçekleştirimleri yapılarak İlgili işitsel nöron modeli tanımlamasının devre simülasyon sonuçları elde edilmektedir.
- iii. ‘İstiklal Marşı’ eserinin ilk iki kıtasının notaları mikrodenetleyicide 1 ve 2 oktav frekansları kullanılarak kodlanmaktadır.
- iv. Mikrodenetleyici çıkışında eserin nota cevabı kaydedilmektedir.
- v. Kaydedilen işaret ikinci adımda tasarlanan VOA, OTA ve CFOA tabanlı devrelere giriş işareti olarak takip edilmektedir.
- vi. Tatbik edilen işaretin tepe noktaları ile VOA, OTA ve CFOA tabanlı devre gerçekleştirimleri ile elde edilen cevapların tepe noktaları arasındaki fark “Dinamik

Zaman Yer Değiştirme (Dynamic Time Warping - DTW) algoritması yöntemi ile hesaplanarak devrelerin tepe noktalarını yakalama performansları değerlendirilmektedir.

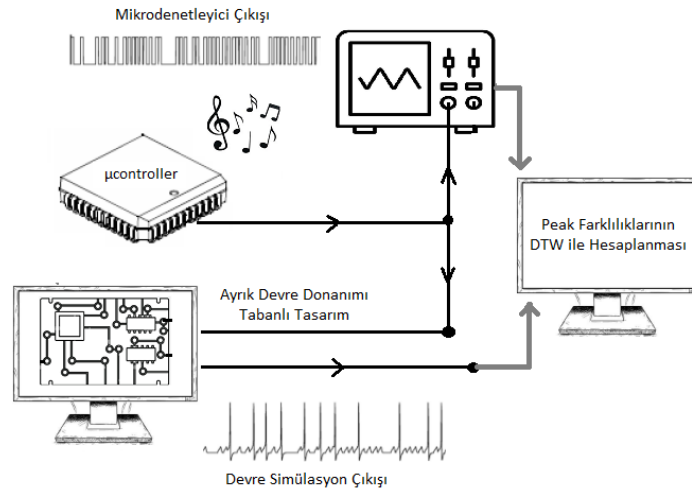
- vii. İlgili işitme nöron modelinin yeniden yapılandırılabilir analog FPAA elemanı ile gerçekleştirme yapılmaktadır.
- viii. Dördüncü aşamada kaydedilen mikrodenetleyici çıkışından alınan işaret FPAA üzerinde gerçeklenen işitme nöronuna emülatör devresine tatbik edilmektedir.
- ix. Devrede llen gerçek elektriksel işaretlerle mikrodenetleyiciden elde edilen giriş işaretlerin tepe genlikleri arasındaki fark da DTW ile hesaplanmaktadır.
- x. Yapılan devre simülasyon sonuçları ve devre gerçekleştirim sonuçları ile ilgili devrelerin tepe noktalarını yakalama performansı ve devre simülasyon süreci ile ilgili genel çıkarımlar paylaşılmaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

İŞİTSEL NÖRON MODELİ VE KULLANILAN EKİPMANLARIN AÇIKLAMALARI

Çalışmanın bu bölümünde piezoelektrik seramiklerdeki titreşimleri bir nöron modeline adapte ederek modelleyen bir sistemin; ayırık elektriksel donanımlarla gerçekleştirimi aşaması ele alınmaktadır. İşitme nöronlarını modelleyen ilgili sistemdeki harici uyartım işareti yerine, notaları mikrodenetleyicide kodlanan bir eser için ölçülen elektriksel işaret kullanılmıştır. İşlemsel kuvvetlendirici ve ayırık devre elemanları ile gerçekleştirilen işitme nöronu emülatör devrelerine, giriş uyartımı olarak bu elektriksel işaret tatbik edilmiştir. Emülatör devrelerinde çıkış dinamiği olarak ise, nöron modellemesinde hücre zarı potansiyelini temsil eden durum değişkeni üzerinden yapılan ölçümler kaydedilmiştir. Tetiklenme işareti ve nöronların ateşleme desenlerinin tepe noktaları arasındaki zaman farkları belirlenerek emülatörlerin uyartımları yakalama performansları kıyaslanmıştır. Bu süreci özetleyen bir gösterim Şekil 1.1’de sunulmaktadır.

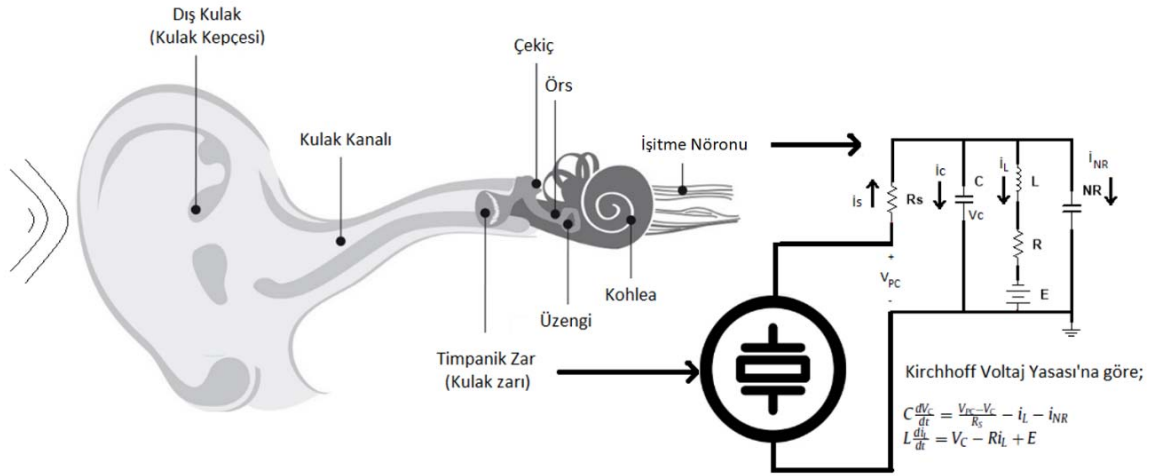
Şekil 1.1. Çalışmada ayırık donanım doğrulaması sürecinde takip edilen süreci özetleyen bir gösterim



1.1. İşitsel Nöron Modeli Tanımlaması

Sesin elektriksel sinyallere dönüştürülüp beyne iletilmesi sürecinde işitme nöronları kritik bir rol oynar. Ses dalgalarının dış kulak yolundan girerek kulak zarına ulaşmasının ardından kulak zarı titreşir. Ses dalgaları orta kulakta kuvvetlendirilerek iç kulağa iletilir. Kuvvetlendirilen ses dalgaları iç kulakta bulunan salyangoz vasıtası ile basınç dalgalarına dönüştürülerek saç hücrelerinin titreşimine neden olur. Saç hücreleri sesin frekansına duyarlıdır ve basınç dalgalanmalarına bağlı olarak hareket ederler. Saç hücrelerinin hareketleri iyon kanallarının açılıp kapanmalarını sağlayarak hücreler üzerinde elektriksel potansiyel farkının oluşumuna neden olur. Oluşan bu elektriksel sinyal saç hücrelerinden çıkan sinir lifleri ile işitme nöronlarına iletilirler. Kohlea içerisinde bulunan sinir uçlarına ulaşan sinyaller beyinde bulunan işitme korteksine iletilir. Beyinde sesin şiddeti, tonu, frekansı ve yönü gibi bilgiler analiz edip işleyerek sesin algılanmasını sağlar [30-32].

Şekil 1.2. *Kulağın içyapısı ve işitme nöronlarını temsilen oluşturulan yapay işitme nöron eşdeğer devresi*



İşitsel biyofiziksel mekanizmadan esinlenerek, Şekil 1.2’de görülen yapay sinir hücresi eşdeğer devre modeli literatüre sunulmuştur. Bu devrede basınç dalgalarına dönüştürülerek saç hücrelerinin titreşimine neden olan ses dalgaları piezoelektrik seramikle temsil edilmiştir. Piezoelektrik; bazı kristal yapıdaki malzemelerin mekanik basınç altında, elektrik yükündeki değişimlerden kaynaklı potansiyel üretebilme yeteneğine sahip malzemedir. Bu potansiyel farkı üretiminin temeli, piezo kristallerdeki simetrik olmayan hücrelerin mekanik deformasyon ile pozitif ve negatif elektrik yüklerine ayrılmasına dayanmaktadır. Piezoelektrik malzeme seçiminde kuvars gibi

yapılar kullanılmakta ve malzeme seçimi verimliliği artırmaktadır. Malzeme üzerine uygulanan mekanik basınç, malzemenin şeklini değiştirir ve malzeme uçları arasında bir gerilim indüklenir. Piezo teknolojisinin kullanım alanlarına basınç ölçümü ve malzeme testlerinin yapıldığı endüstriyel sektörler; hoparlör, mikrofonlar ve ultrasonik cihazlar gibi akustik uygulamalar; tıbbi teşhis süreçleri; enerji dönüşümü; mikroelektronik uygulamalar ve telekomünikasyon cihazlarında kullanımları gibi alanlar örnek verilebilir. Literatürde işitme nöronları üzerine yapılan çalışmalarda, piezoelektrik seramiğin akustik dalgaları elektriksel sinyallere dönüştürerek nöron hücrelerini harici bir uyartım olarak tetiklediği düşünülmüştür. Örneğin Referans [21]'deki çalışmada özellikle işitme cihazları ve koklear implantlar gibi teknolojilerde kullanılan elektriksel uyartımların, işitme sinirine nasıl etki ettiği ele alınmakta ve işitme sinirlerinin elektriksel uyartımlara verdiği yanıtlar modellenmeye çalışılmaktadır. Referans [22]'deki çalışmada mekanik stres veya gerilmeye tepki olarak elektriksel sinyal üreten materyaller olan piezoelektrik sensörlerle, çevresel etkileşimlere, özellikle de mekanik uyartımlara karşı duyarlı olan, nöronlar üzerinde durulmaktadır. Piezoelektrik özelliklere sahip nöronların ses dalgalarını algılayıp, tepki vermesi için önemli olabileceği, belirli bir rezonans frekansında senkronizasyon davranışı sergileyerek güçlü bir tepki verebileceği dolayısı ile bu sürecin ses işleme ve algılamada oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. Referans [23]'teki çalışmada gürültüye maruz kalan piezoelektrik işitme nöronlarının akustik dalgaları nasıl ayırt edebileceği ele alınmaktadır. Gürültüye maruz kalan akustik dalgaların karmaşıklaşabileceğine, dahası gürültü işaretinin rastgele ve istenmeyen frekanslarda olabileceğine, dolayısı ile doğru algılamamanın zorlaşabileceğine dikkat çekilmektedir. İlgili çalışmada piezoelektrik nöronların dışsal akustik dalgaları, gürültü altında doğru bir şekilde ayırt edebilmek için sinyal işleme tekniklerini ve rezonans mekanizmalarını kullanabileceğini vurgulamaktadır. İşitme sistemlerindeki osilasyonların ve bu osilasyonların olası işlevleri Referans [24]'teki çalışmada detaylı olarak incelenmiş ve derlenmiştir. Burada işitsel osilasyonlar ve bu osilasyonların frekans, fonksiyon ve rolleri hakkında bilgiler sunulmaktadır. Nöral senkronizasyon durumunun özellikle sesin işlenmesinde, farklı beyin bölgeleri arasında koordinasyonu artırarak, daha doğru ve hızlı ses algısını mümkün kılacağı ya da bu sistemlerdeki bozuklukların nörolojik hastalıklarla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Referans [30]'daki çalışmada kısa süreli işitsel uyartımların daha uzun süreli seslere göre daha hızlı ve kısa bir süre içinde algılanmaya ihtiyaç duymasından dolayı işitme sisteminde özel bir

şekilde işlendiği bu durumun ise sesin analiz edilerek, algılama ve tepki verme süreçlerini etkilediği üzerinde durulmaktadır. Nöronlar arasındaki senkronizasyon ve farklı frekanslara tepki gösterme kapasitesinin kısa süreli seslerin algılanmasını etkileyen temel faktörler olduğu ve kısa süreli seslerin algılanma sürecinde işitsel korteks ve beyindeki diğer yapılar arasındaki etkileşimlerin nasıl organize olduğu konuları üzerinde durulmaktadır.

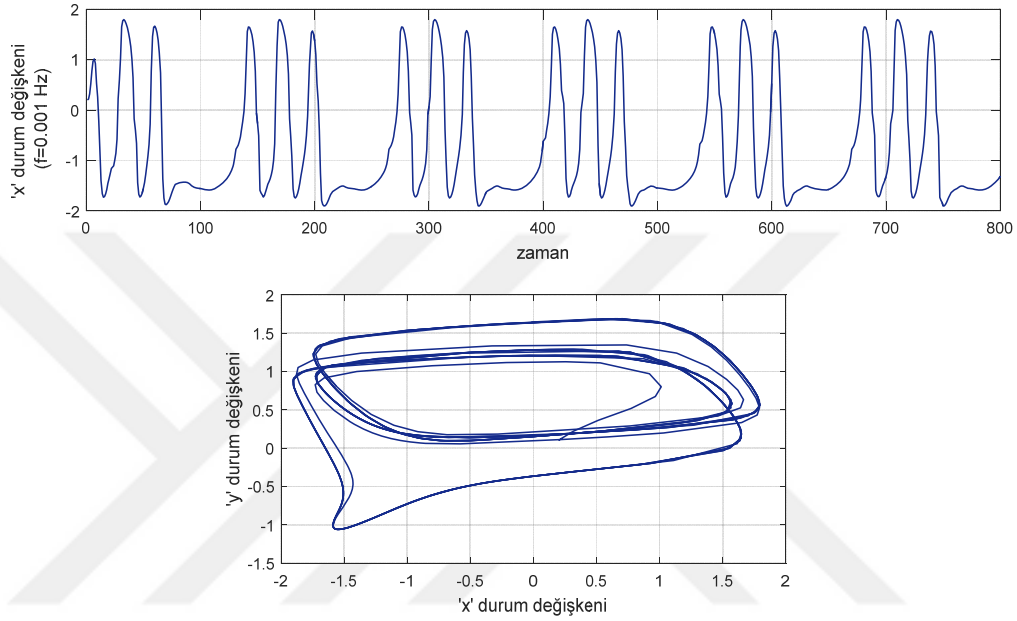
Yukarıda özetlenen çalışmalardan yola çıkılarak, işitme nöronlarına tatbik edilen uyarımların nöron yapılarında çeşitli ateşleme modları ürettiği ve bu ateşleme modlarının canlı vücudundaki yüksek mertebeli kontrol merkezlerini uyardığı sonucu çıkarılabilir. Literatürde mevcut çalışmalarda da ses uyarımını piezoelektrik seramiklerle elektriksel işaretlere dönüştüren ve elektriksel uyarımları nöron modellerine tatbik eden çalışmalar önerilmiştir [23, 31-33]. Bu çalışmalarda piezoelektrik seramiğin çıkışı; nöron yapılarında çeşitli ateşleme modları üretir ve canlı vücudundaki yüksek mertebeli kontrol merkezleri uyarılır. Piezoelektrik seramiğin çıkış voltajı $V_{PC} = \frac{F d}{S \epsilon} h$ ile hesaplanmaktadır. Burada d piezoelektrik seramiğin üretildiği malzemeye bağlı bir sabittir. F harici kuvvettir. ϵ dielektrik sabitidir. h ve S sırasıyla piezoseramiğin kalınlığı ve çapraz yüzey alanıdır. Literatürde piezoelektrik seramik tanımlamasında ve nöron eşdeğer devre temsiline yapılan skala dönüşümünün ardından, Denklem 1.1'deki fonksiyonel nöron osilatör tanımlaması elde edilmiştir [20, 23, 32, 33].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x(1 - \epsilon) - \frac{1}{3}x^3 - y - \epsilon u_c \\ \dot{y} &= c(x + a - by) \end{aligned} \quad (1.1)$$

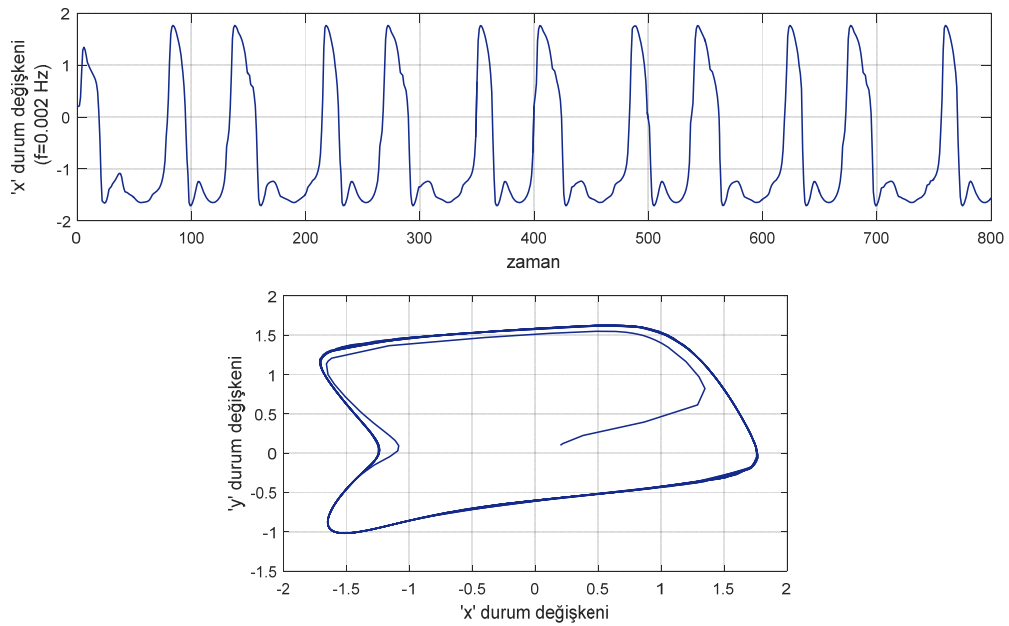
Burada x kapasitör voltajının çıkış voltajına oranıdır. y indüktör akımının çıkış voltajına oranıdır. uc piezoelektrik seramiğin oluşturduğu voltajın çıkış voltajına oranıdır ve $\epsilon uc = A \sin 2\pi ft$ 'ye eşittir. ϵ ve b direnç değerlerinin oranını temsil eden bir sabittir. a devredeki sabit voltaj kaynağının çıkış voltajına oranıdır. c devredeki kapasitör değerinin, indüktör değerine oranı ile ilişkili bir sabittir. Denklem 1.1'deki tanımlamanın kararlılık analizlerini ve bu sistemin uygulanan harici piezoelektrik seramiği temsili eden kaynağın genliğine ve frekansına bağlılığını gösteren pek çok çalışma literatürde sunulmuştur [20, 23, 32, 33]. Model parametrelerinin $\alpha = 0.7$, $b = 0.8$, $c = 0.1$, $\epsilon = 0.15$, $A = 1$, $f = 0.001$ (Şekil

1.3a) ve $f = 0.002$ (Şekil 1.3b) için yapılan nümerik simülasyon sonuçları bu çalışmada da tekrarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 1.3'te sunulmuştur.

Şekil 1.3. *İşitme nöron modelinin (a) $f=0.001$ Hz, (b) $f=0.002$ Hz için yapılan nümerik simülasyon sonuçları*



(a)



(b)

1.2. Kullanılan Ekipmanlar

Elektronik devrelerin temel yapı taşlarından olan işlemsel kuvvetlendiriciler lineer ve lineer olmayan devrelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tüm devreler içerilerinde birçok transistör ve FET gibi aktif elemanlar kullanılarak tasarlanmıştır. İşlemsel kuvvetlendiriciler üretim süreçlerinde takip edilen tasarım tekniklerine göre birbirlerinden farklı karakteristik özellikler göstermektedir.

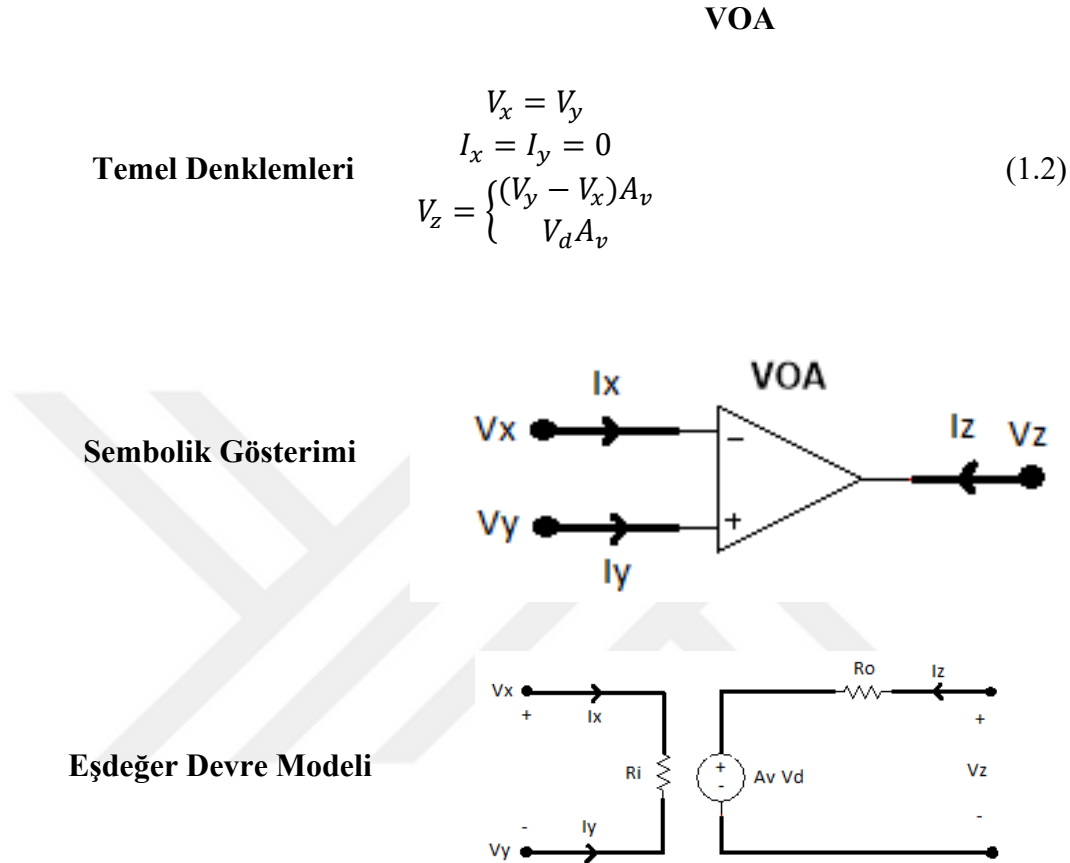
1.2.1. Voltaj Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici (VOA)

Çok yönlü analog yapı bloklarından oluşan ve kolay kullanıma sahip voltaj geri beslemeli işlemsel kuvvetlendirici (VOA) elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. VOA'nın sonsuz giriş empedanslı iki giriş terminali vardır, bu iki terminal arasındaki gerilim farkı, Denklem 1.2'deki gibi idealde sonsuz olan açık döngü kazancı ile çarpılır ve çıkışa verilir. Giriş empedansları idealde sonsuz kabul edildiğinden girişten akan akımlar da yaklaşık olarak sıfır kabul edilir (Denklem 1.2). Gerçek bir VOA'nın temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Giriş empedansları çok yüksektir.
- Kazançları çok yüksektir.
- Çıkış empedansları çok küçüktür.
- Çıkış dirençlerinin küçük olmasından dolayı çıkış akımları yüksek olur.
- Band genişlikleri 1 MHz civarındadır.
- Besleme tek veya iki kaynaktan yapılabilir.
- Çıkış gerilimleri, $V_{out} = A(V_2 - V_1)$ olur.
- Girişe 0V uygulandığında çıkışta yaklaşık 0V elde edilir.

VOA yapısı; diferansiyel long-tail çifti, ortak modlu işaretleri bastırmada çok iyi olan yüksek giriş empedans bölgesi gibi birçok çekici özelliğe sahiptir. Öte yandan, VOA yapıları sabit kazanç-bandgenişliği oranı ve sınırlı değişim hızı gibi kendi yapısında var olan sınırlamalar sunar. Temel bir voltaj geribeslemeli işlemsel kuvvetlendirici yapısının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modeli Şekil 1.4'te sunulmaktadır [34].

Şekil 1.4. VOA yapılarının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modelleri



1.2.2. İşlemsel Geçişiletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA)

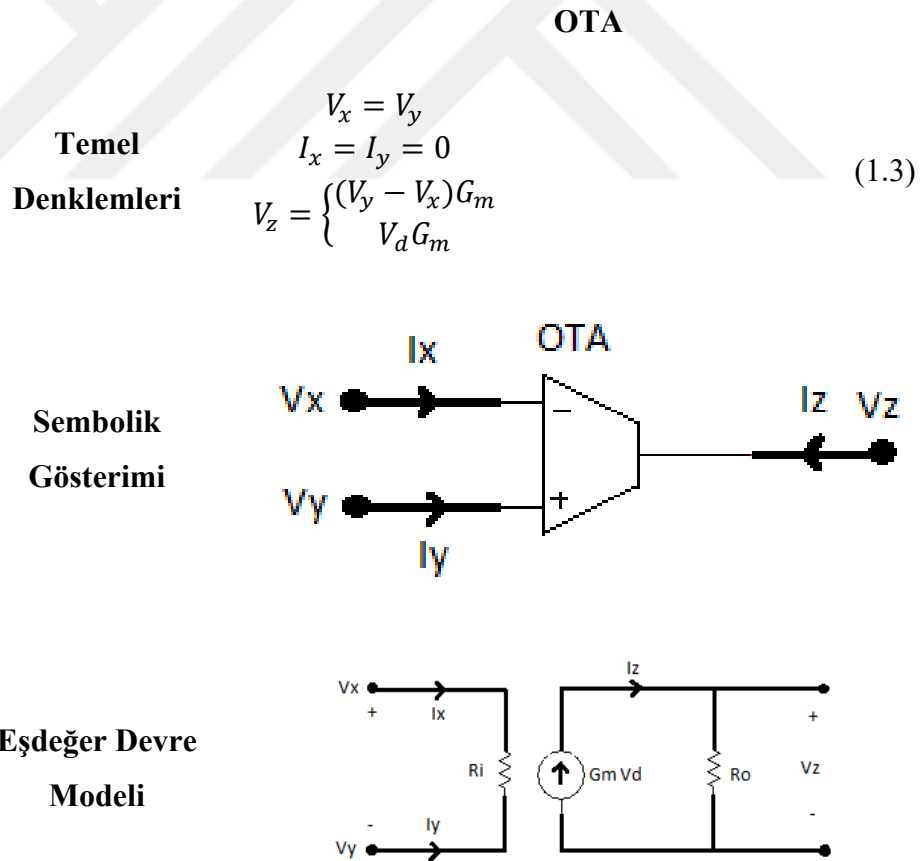
İşlemsel geçişiletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) de elektronik devre uygulamalarında önemli bir yeri olan bir başka kuvvetlendiricidir. Girişteki voltaj farkını Denklem 1.3'teki gibi transkondüktans kadar kuvvetlendirip çıkışa yansıtan elemandır. Giriş empedansları yüksektir, dolayısı ile giriş kutuplama akımları sıfır olarak kabul edilir. Gerçek bir OTA'nın temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- OTA' ya ait etkin tüm parametreler I_{abc} kontrol akımına bağlıdır ve I_{abc} ile ayarlanabilir.
- Maksimum çıkış akımı (çıkış kısa devre) I_{abc} değerine eşittir.
- OTA' nın toplam akım tüketimi, yani OTA' nın kaynaktan çektiği akım $2 \times I_{abc}$ civarındadır ve bu değer $I_{abc} = 0.1 \mu A$ olarak ayarlanarak çok az güç tüketimli bir

OTA yapılabilir.

- OTA'nın giriş akım değerleri tipik olarak $I_{abc}/200$ civarındadır.
- OTA'nın giriş ve çıkış direnç değerleri I_{abc} ile değişen bir yapıdadır. Bunun için entegrenin katalog bilgilerinden yararlanılabilir. Örnek olarak +15V ve -15V besleme ile beslenen, oda sıcaklığındaki bir OTA'ya $I_{abc}=10\mu A$ değerinde bir kontrol akımı uyguladığımızda giriş direnci 800k ve çıkış direnci 700M olacaktır. Eğer $I_{abc}=1mA$ değerinde bir kontrol akımı uygularsak giriş direnci 15k ve çıkış direnci 7M olacaktır. I_{abc} arttıkça giriş ve çıkış dirençleri küçülmektedir.

Şekil 1.5. OTA yapılarının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modelleri



Çıkıştan akım alınması sebebiyle çıkış direnci yüksektir. Genel olarak OTA tasarımları basitlik, düşük komponent kullanım sayısı, yüksek frekans performansı ve opamp devrelerine göre daha geniş ayarlanabilirlik sahası gibi avantajlar sunar. Temel bir işlemsel geçişiletkenliği kuvvetlendiricisi yapısının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modeli Şekil 1.5'te sunulmaktadır [35].

1.2.3. Akım Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici (CFOA)

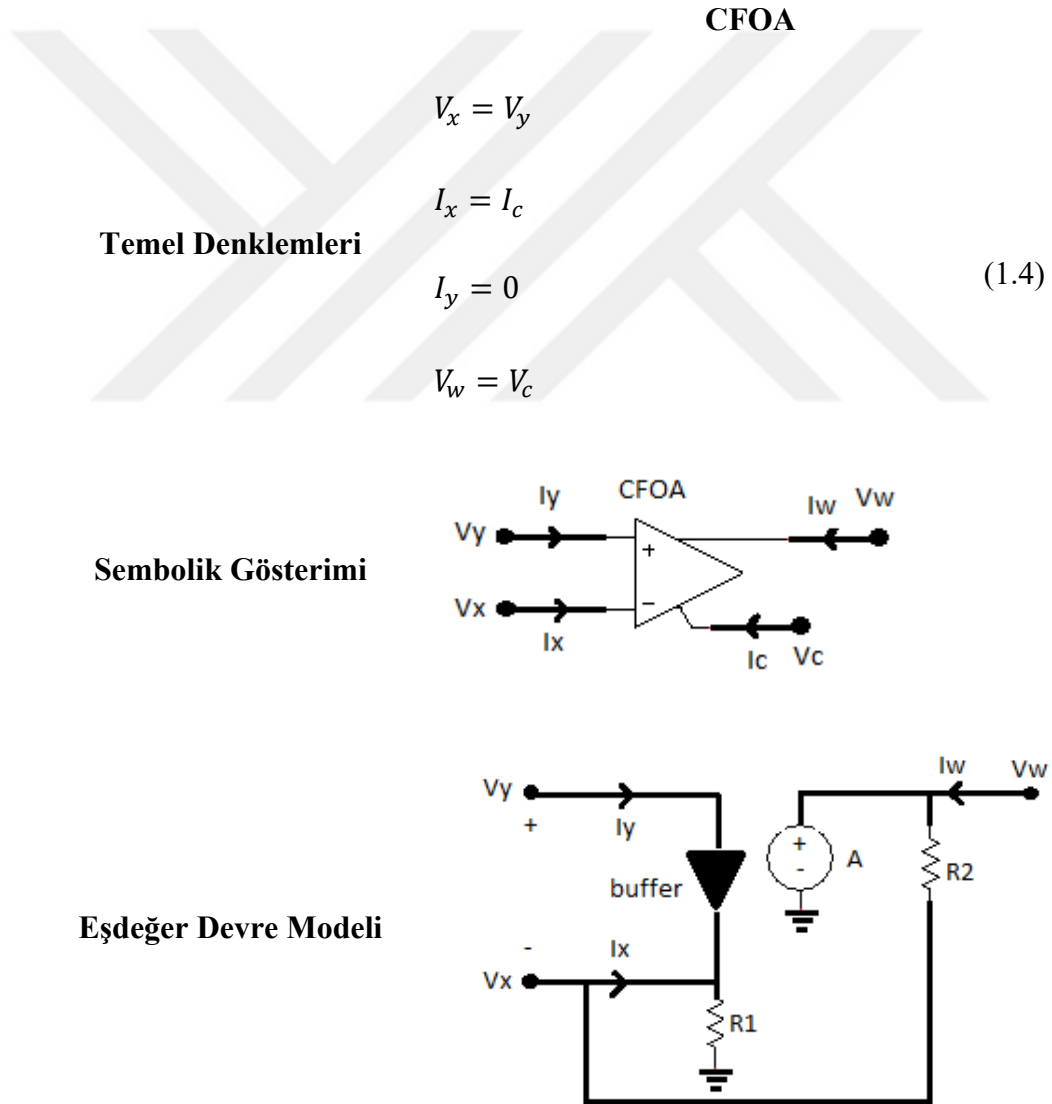
Bir devrenin giriş çıkış karakteristikleri ortaya konurken; kritik kısımlarda yapılan hesaplamalarda, aktif değişken olarak voltaj yerine akım parametreleri tercih ediliyorsa bu devre yapısı akım modludur. Akım modlu devrelerin düşük güç tüketimi, geniş sahada bantgenişliği kullanım avantajı ve kuvvetlendirici kazancının yüksek olması gibi avantajları vardır. Voltaj geribeslemeli opampların frekans sınırlamalarını aşmak için tasarlanan işlemsel kuvvetlendirici yapılarına bir örnek de akım geri beslemeli işlemsel kuvvetlendiricilerdir (CFOA) [31]. Gerçek bir CFOA'nın temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- CFOA'ların çıkış direnci genellikle düşük olup, bu da onları düşük empedanslı yükleri sürme konusunda etkili kılar.
- Genellikle yüksek frekanslarda iyi performans sergiler.
- CFOA'lar genellikle hızlı tepki veren amplifikatörlerdir, yani slew rate (değişim hızı) yüksektir.
- CFOA'lar, özellikle yüksek frekanslı uygulamalar için geniş bir bandgenişliği sunar.

CFOA'lar yüksek çıkış akımı sağlama kapasitesine sahiptir, bu da onları düşük empedanslı yükleri sürme konusunda uygun hale getirir. Fonksiyonel anlamda opampa eşdeğer olarak tasarlanmasına rağmen, tasarım mimarisi açısından farklıdır. VOA ile CFOA arasında iki farklılık göze çarpmaktadır: Bunlardan ilki CFOA'nın asimetrik bir düzende olmasıdır, yani girişlerden birisinin düşük empedans diğerinin yüksek empedans sahasında olmasıdır. İkinci önemli faktör ise giriş çıkış arasındaki ilişkinin geçiş empedansının fonksiyonu olmasıdır. Bu iki özellik CFOA'nın kazançtan hemen hemen bağımsız bir bandgenişliğine sahip olmasını sağlar. CFOA'nın diğer önemli özelliği ise

yüksek empedans noktasına giriş akımının bir kısmını geri besleyen bir giriş katının kullanılması sebebiyle VOA'daki değişim hızı sınırlanmasının olmamasıdır. Temel bir akım geri beslemeli işlemsel kuvvetlendirici yapısının temel denklemleri (Denklemler 1.4), sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modeli Şekil 1.6'da sunulmaktadır. Burada CFOA'nın çıkış katındaki V_c ucu açık bırakılırsa bir VOA gibi davranır. CFOA'nın V_w ucu açık bırakılırsa ikinci nesil bir current conveyor gibi davranır [36].

Şekil 1.6. CFOA yapılarının temel denklemleri, sembolik gösterimi ve eşdeğer devre modelleri

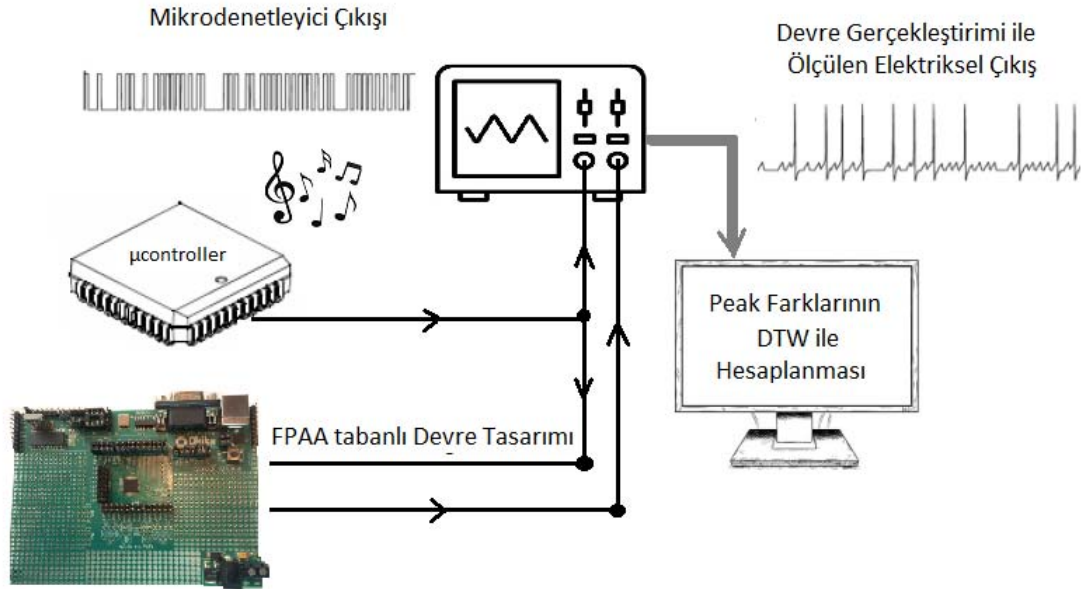


1.2.4. Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA)

Ayrık donanım kullanılarak tasarlanan analog sistemlerde; tasarım esnekliğinin az olması, çeşitli harici elemanlara ihtiyaç duyulması, devre modellemelerinin yüksek doğruluklarla yapılması gerekliliği gibi dezavantajlı durumlarla karşılaşmaktadır. Öte yandan Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA) platformu esnek mimari, yüksek hata toleransı, sıcaklığa karşı kararlılık, devre karmaşasının ortadan kaldırılma ve en önemlisi yeniden programlanabilme özellikleri ile son zamanlarda sıklıkla tercih edilen analog devre boardları arasında yer almaktadır [37]. Temel FPAA çiplerinden olan AN231E04 için bazı özellikler şu şekilde özetlenebilir:

- Çalışma gerilimi 3.3V ve 5V arasındadır.
- Tipik olarak, 1 MHz veya daha yüksek frekanslarda iyi performans gösterir. Yüksek frekanslarda bile hızlı ve doğrusal yanıtlar sağlar.
- Yüksek çıkış akımı sağlayabilir, bu da düşük empedanslı yüklerin sürülmesini mümkün kılar.
- 24-pin QFN (Quad Flat No-lead) paketinde sunulmaktadır.
- Düşük güç tüketimi sunar, tipik olarak cihazın güç tüketimi uygulamaya bağlı olarak değişir, ancak genellikle mikroampere kadar düşebilir.
- Yüksek slew rate'e sahiptir (yaklaşık 10V/μs), bu da cihazın hızlı sinyal değişimlerine hızlı tepki vermesini sağlar.
- Düşük giriş direnci sunar (genellikle birkaç kΩ civarındadır)
- Genellikle -40°C ile +85°C arasında çalışabilir.
- Yüksek çıkış akımı kapasitesine sahip olup, düşük empedanslı yükleri sürmek için uygundur.

Şekil 1.7. Çalışmada FPAA ile gerçekleştirim ve ölçüm sürecinde takip edilen süreci özetleyen bir gösterim



Ön değerlendirme yapılmak istenilen bir sistemin FPAA donanımı üzerinde oluşturulması sürecinde ilave komponentlere ihtiyaç duyulmadan kısa sürede tasarım yapılarak hızlı bir prototip sonucu elde edilmesi bu donanımın öne çıkan en önemli özelliğidir. Bu çalışmada da mikrodenetleyici vasıtası ile üretilen ve notalara karşılık gelen bir uyartım işaretinin, işitme nöronlarını temsil eden nöron modeline tatbik edilmesi ile nöron emülatör devresi çıkışında ölçülen elektriksel işaretler FPAA donanımı üzerinden kaydedilmiştir. Şekil 1.1'deki bu çalışmada ayrı donanımlarla yapılan doğrulama sürecini özetleyen gösterim, programlanabilir analog eleman için Şekil 1.7'deki gibi güncellenebilir.

İKİNCİ BÖLÜM

DONANIM DOĞRULAMA SÜRECİNİN AYRINTILI AÇIKLAMASI

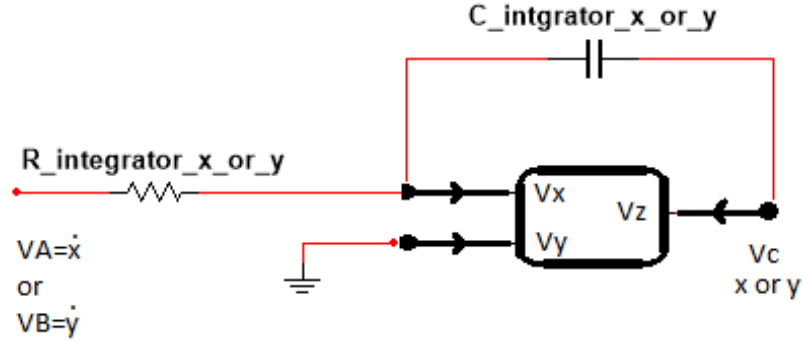
Çalışmanın bu aşamasında işitme nöronu için literatüre sunulan osilatör tanımlamasının VOA, OTA ve CFOA elemanları kullanılarak ayırık donanımlarla tasarım aşamaları ele alınacaktır. Bu elemanlar kullanılarak oluşturulan devre yapılarının çıkışlarında ölçülen membran potansiyeline ait ölçüm sonuçları paylaşılacaktır. Ardından bu devre yapılarının girişlerine uygulanan ‘İstiklal Marşı’ eseri notalarının kodlanması ile mikrodenetleyici çıkışında kaydedilen uyartım işareti, nöron emülatör devrelerine giriş uyartım işareti olarak tatbik edilecektir. Devre çıkışlarında ölçülen hücre zarı potansiyeli cevapları paylaşılacaktır. Son olarak giriş uyartımını yakalama performansını ölçmek adına uyartım tepe noktaları ile ölçüm tepe noktaları arasındaki farkın hesaplanması ile oluşturulan fark grafikleri paylaşılacaktır.

2.1.Devre Tasarımlarına Dair Detaylar

Denklem 1.1’deki işitme nöronu osilatör modeli incelendiğinde modelin iki adet adi diferansiyel denklemden oluştuğu görülmektedir. Bu diferansiyel denklem yapısının elektronik donanımlarla çözümü için integral alıcı devreden yararlanmak gerekmektedir [38]. Modeldeki iki adet diferansiyel denklem için iki adet integratör devre yapısı kullanılmıştır. Bu devre yapısına ait bir gösterim ve çıkış gerilimi hesabı Şekil 2.1’de sunulmaktadır.

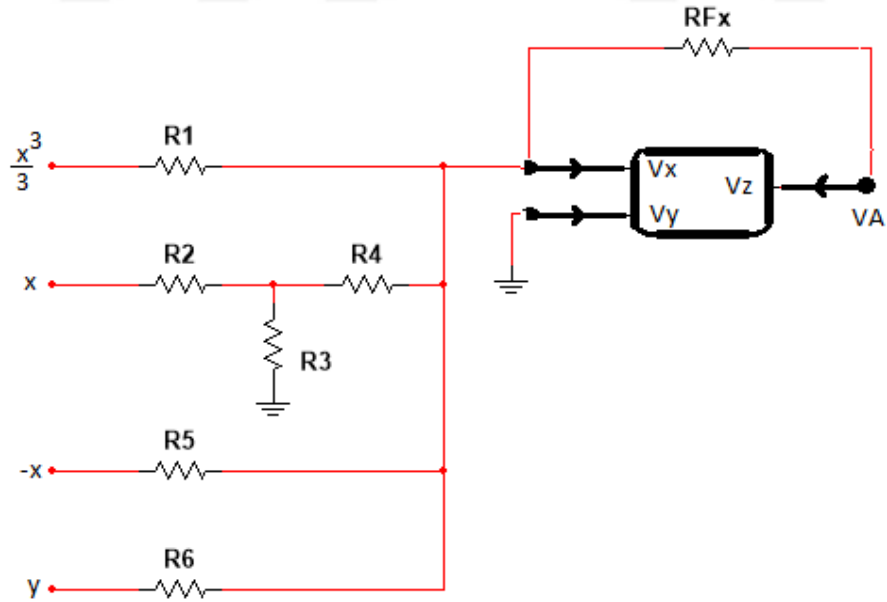
Durum denklemi eşitliklerinin sağ tarafları incelendiğinde toplama işlemleri ile eşitliklerin elde edilebileceği görülmektedir. Buna göre x ve y durum değişkenleri için tasarlanan toplayıcı devreler ve bu devrelerin çıkış denklemi hesaplamaları Şekil 2.2’de sunulmaktadır.

Şekil 2.1. *Ayrık donanım tabanlı tasarımlarda kullanılan integratör devresi ve çıkış gerilimi hesabı*



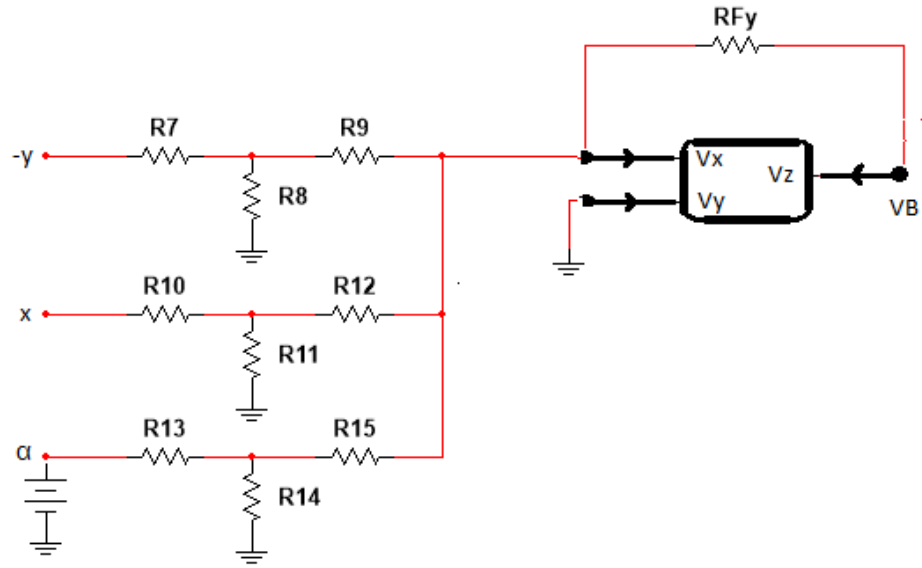
$$V_c = -\frac{1}{RC} \int V_A \text{ or } V_B dt \quad (2.1)$$

Şekil 2.2. *(a) x ve (b) y durum değişkenleri için tasarlanan toplayıcı devreler ve bu devrelerin çıkış denklemi hesaplamaları*



$$V_A = -\frac{x^3}{3} \frac{R_{Fx}}{R_1} - x \frac{R_3}{R_2+R_3} \frac{R_{Fx}}{R_4} \quad (2.2)$$

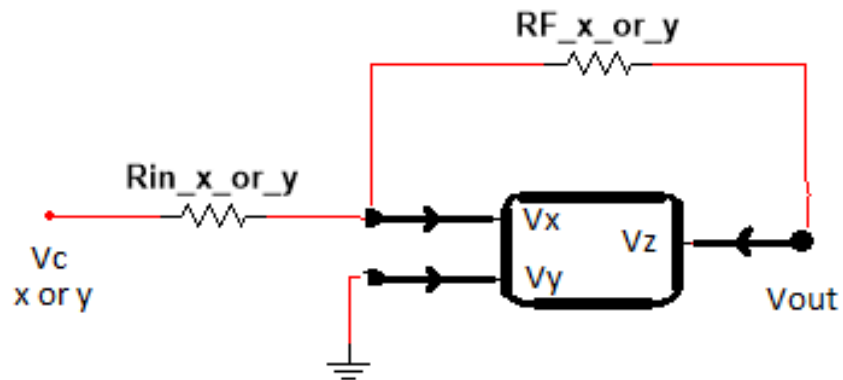
(a)



$$V_A = y \frac{R_8}{R_7+R_8} \frac{R_{Fy}}{R_9} - x \frac{R_{11}}{R_{10}+R_{11}} \frac{R_{Fy}}{R_{12}} - \alpha \frac{R_{14}}{R_{13}+R_{14}} \frac{R_{Fy}}{R_{15}} \quad (2.3)$$

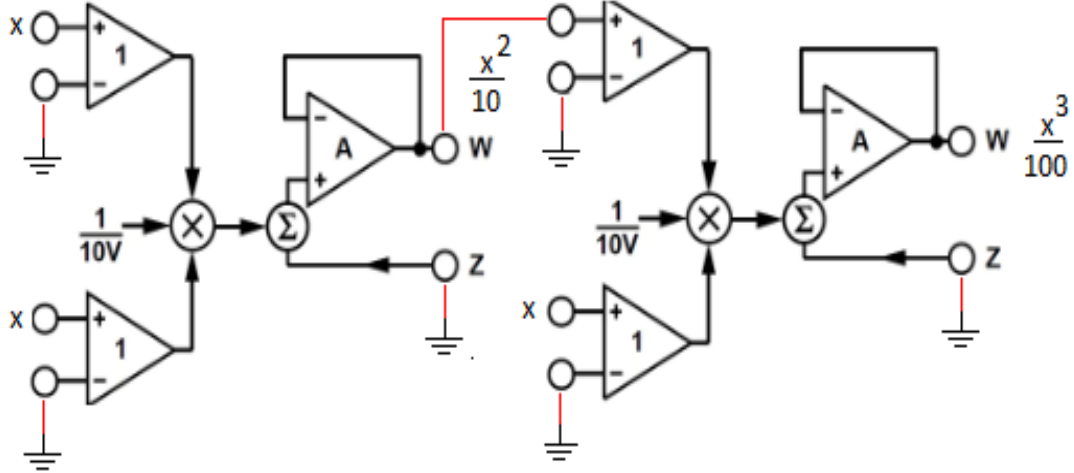
(b)

Şekil 2.3. Durum değişkenlerindeki evrilmenin elde edilebileceği devre yapısı



$$V_{out} = -\frac{R_F}{R_{in}} V_c \quad (2.4)$$

Şekil 2.4. Nöron modeli tanımlamasının x durum değişkeninde bulunan üçüncü dereceden polinomal ifadeyi elde etmek için kullanılan komponent



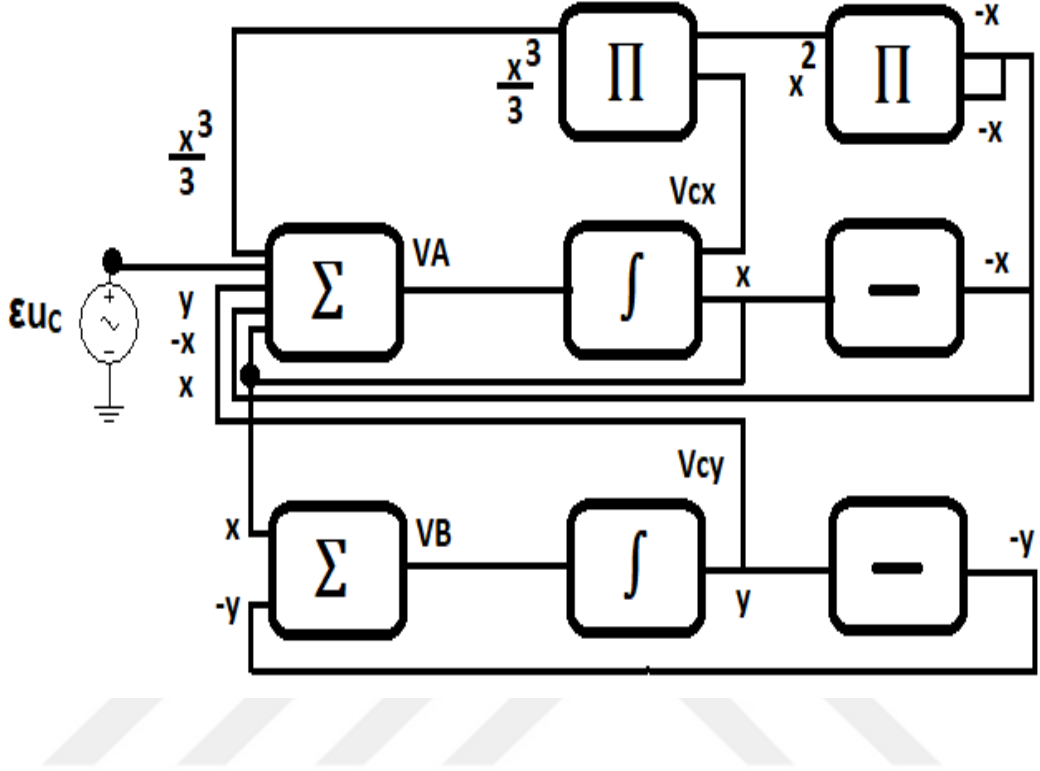
Durum denklemi eşitliklerinin sağ tarafındaki değişkenlerin işaretleri incelendiğinde bazı terimlerin evirildiği görülmektedir. Bunun için tasarlanabilecek eviren kuvvetlendirici yapısı Şekil 2.3'te sunulmaktadır.

Denklem 1.1'deki işitme nöron modeli tanımlamasının x durum değişkeninde bulunan üçüncü dereceden polinomal ifadeyi elde etmek için Şekil 2.4'teki AD633 çarpıcı entegresinin kullanımı tercih edilmiştir.

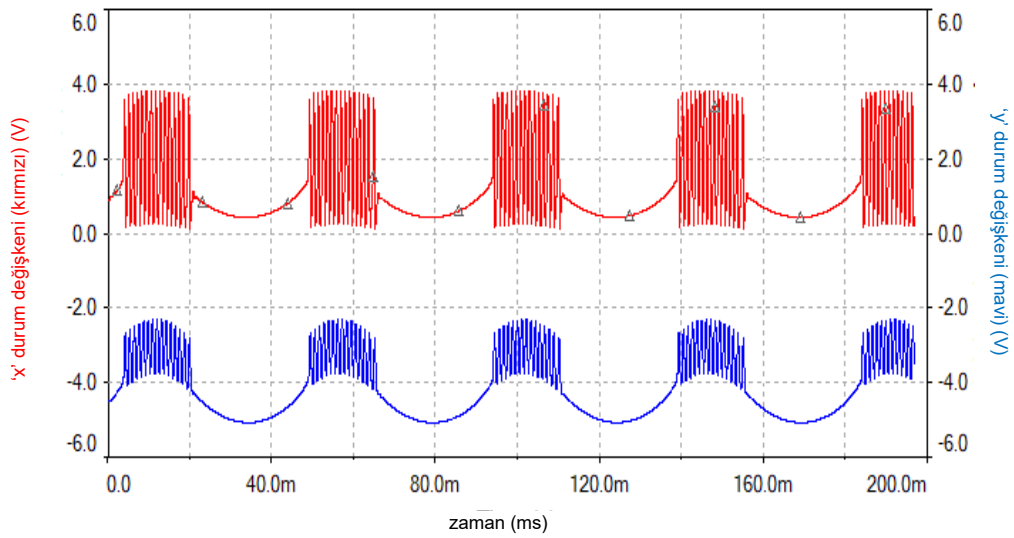
Bütün devre parçalarının birleştirildiği nihai tasarıma ait bir gösterim, Şekil 2.5'te sunulmaktadır. Burada Şekil 2.3, 2.4 ve 2.5'de gösterilen kuvvetlendirici temsillerine yerine VOA, OTA ve CFOA elemanları kullanılarak tasarımlar yapılabilir. Bu tasarımlarda ϵ_{uc} için $A \sin 2\pi ft$ tanımlamalı bir sinüs işaret üretici kullanılabilir. VOA, OTA ve CFOA elemanları kullanılarak oluşturulan devre yapılarına ait simülasyonlarda bu kaynağın tepe genlik değerleri sırasıyla $A=1V$, $A=1.3V$ ve $A=0.7V$ ve frekans değerleri $f=22.5HZ$ seçilmiştir.

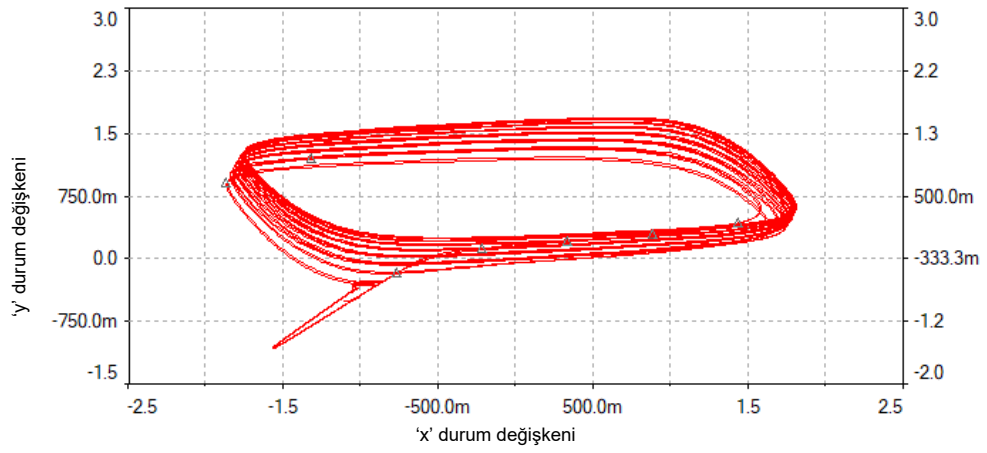
VOA, OTA ve CFOA tabanlı devre yapılarına ait devre simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 2.6 a-c de sunulmaktadır. Bu şekillerde soldaki pencere x (kırmızı renkli ve 'y' ekseninde '+1' seviyesine ötelenerek çizdirilen) ve y (mavi renkli ve 'y' ekseninde '-2' seviyesine ötelenerek çizdirilen) değişkenlerinin zaman domaini gösterimine, alttaki pencere faz domaini gösterimlerine aittir.

Şekil 2.5. VOA, OTA ve CFOA elemanları kullanılarak tasarlanabilecek devre yapısının nihai durumuna ait bir gösterim

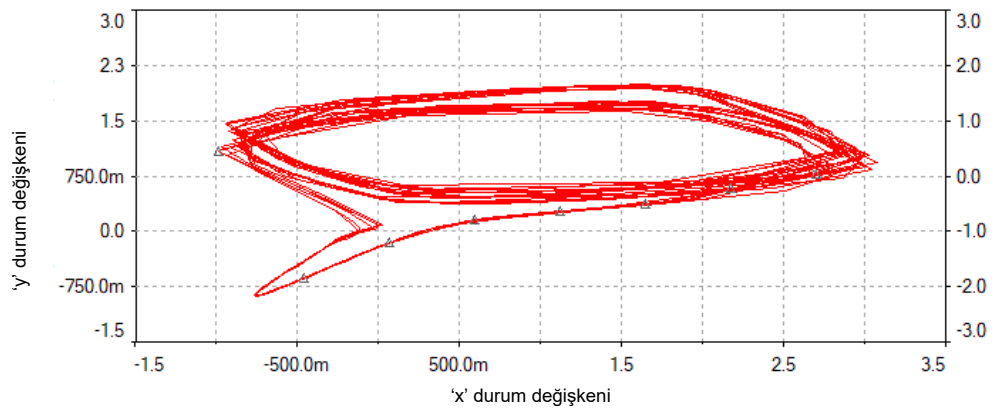
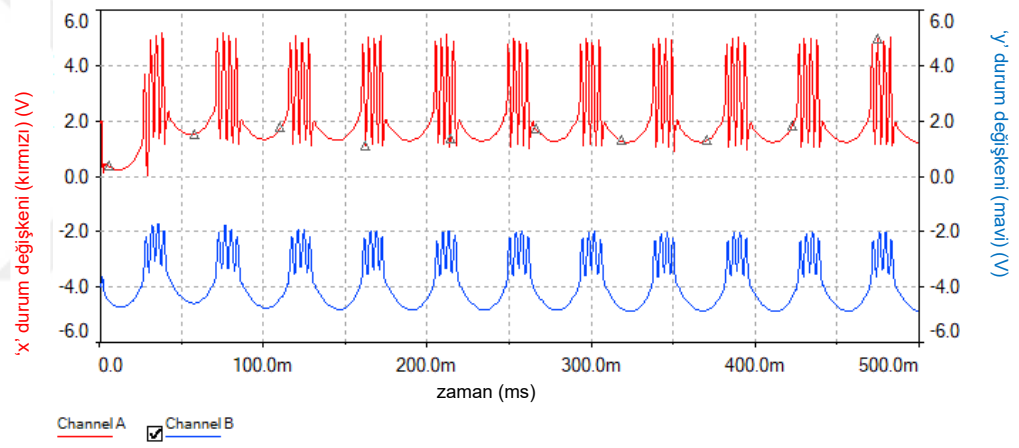


Şekil 2.6. (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA tabanlı devre yapılarına ait zaman domaini ve faz çekerlerini içeren devre simülasyon sonuçları

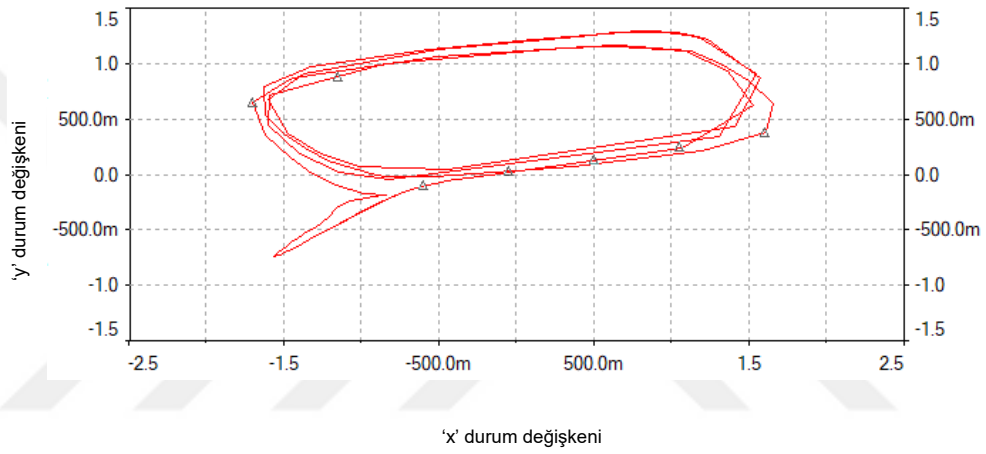
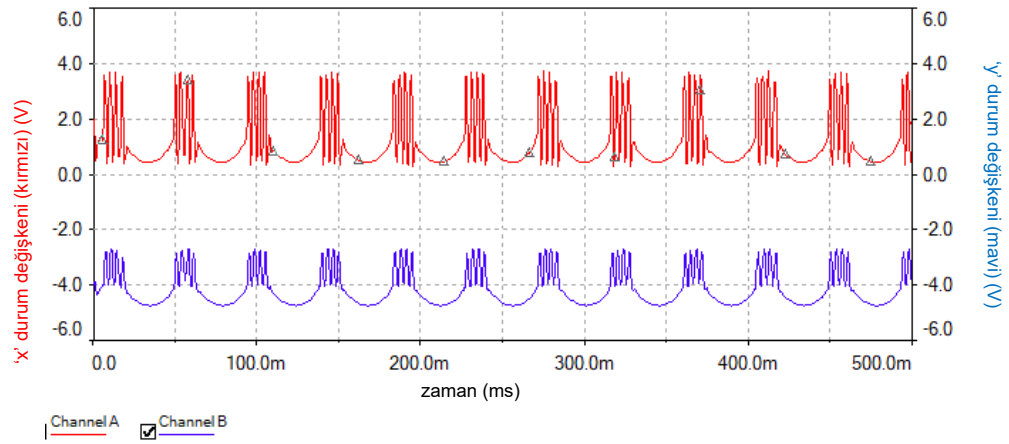




(a)



(b)



(c)

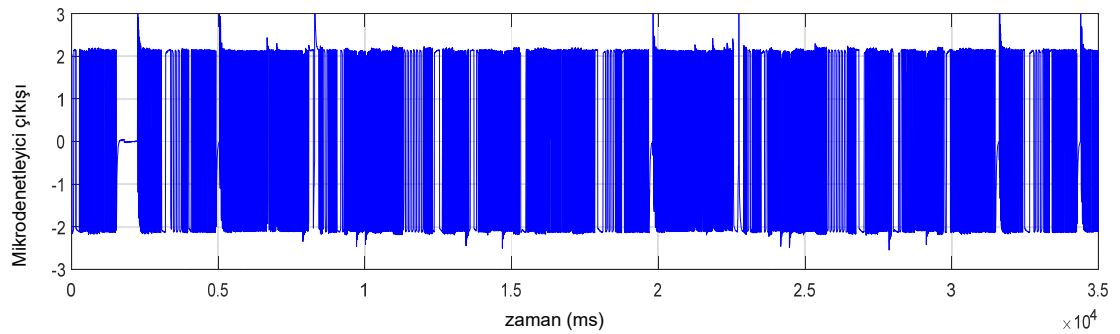
2.2. İşitme Nöronuna Uygulanan Uyartım İşaretinin Elde Edilmesi ve Emülatör Devrelerine Tatbik Edilmesi

Şekil 2.5'teki genel devre şeması gösteriminin yapıldığı tasarımda ϵuC 'yi temsil eden gerilim kaynağı yerine mikrodenetleyici çıkışından ölçülen işaretin nöron modeli emülatörlerine uygulandığından bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında üretimi için 'İstiklal Marşı' eserinin ilk iki kıtasına ait birinci ve ikinci oktavdan kodlanan notaların frekans değerleri Tablo 2.1'de sunulmaktadır [39]. İşitme nöronlarına, kohleaya ya da saç hücrelerine haricen uygulanan bir uyartım işaretinin nöron cevap desenlerini etkilediğine dair sonuçlar sunan pek çok çalışma literatürde mevcuttur [40-43]. Şekil 2.7'de devrelere uyartım işareti olarak tatbik edilecek olan giriş işareti verilmektedir.

Tablo 2.1. *Modele uyartım olarak tatbik edilen deseni üretmek için kullanılan notalar ve frekansları.*

LA		LA DİYEZ		Sİ	
A1	A2	AD1	AD2	B1	B2
55 HZ	110 HZ	58 HZ	117 HZ	62 HZ	123 HZ
DO		DO DİYEZ		RE	
C1	C2	CD1	CD1	D1	D2
65 HZ	131 HZ	69 HZ	139 HZ	73 HZ	147 HZ
RE DİYEZ		Mİ		FA	
DD1	DD2	E1	E2	F1	F2
78 HZ	156 HZ	82 HZ	165 HZ	87 HZ	175 HZ
FA DİYEZ		SOL		SOL DİYEZ	
FD1	FD2	G1	G2	GD1	GD2
92 HZ	185 HZ	98 HZ	196 HZ	104 HZ	208 HZ

Şekil 2.7 *Mikrodenetleyici üzerinden ölçülen ve devrelere uyartım işareti olarak tatbik edilen işaret.*

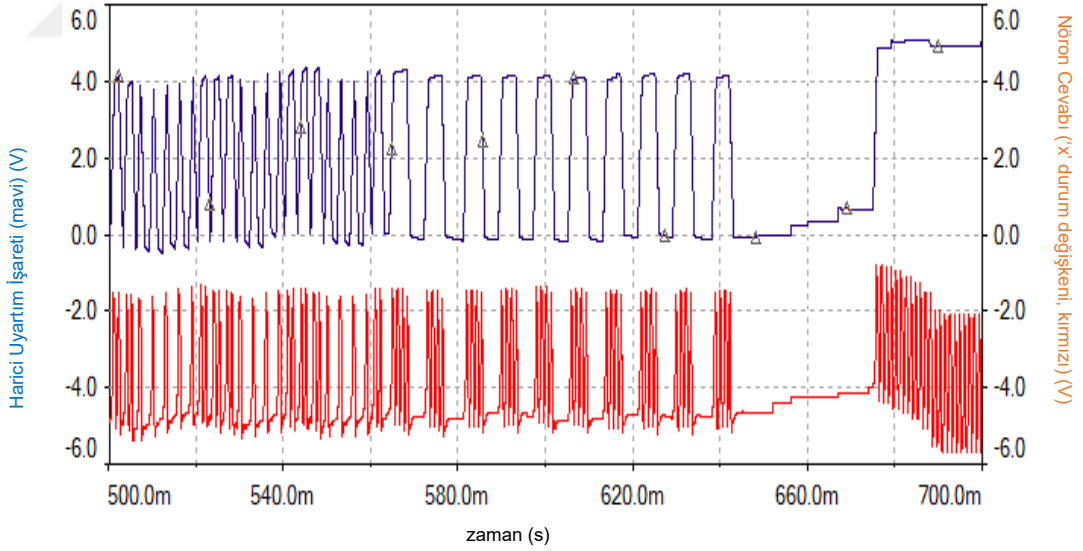
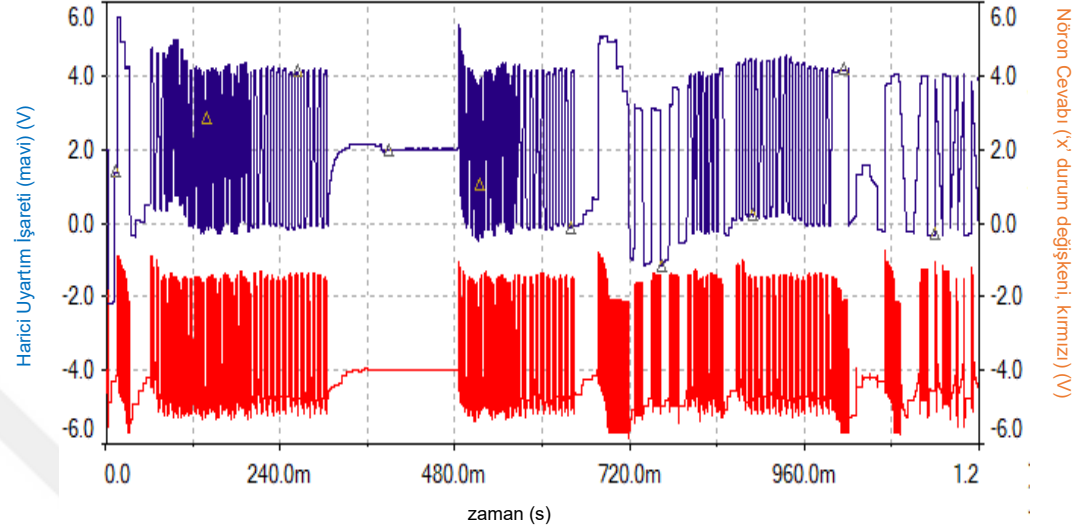


Şekil 2.7'deki uyartım işaretinin (Şekil 2.8'de üst taraftaki 'y' ekseninde '+1' seviyesine ötelenerek çizdirilen mavi işaret) VOA, OTA ve CFOA tabanlı elemanlarla gerçekleştirilen devre yapılarına uygulanması ile elde edilen devre çıkış işaretleri (Şekil 2.8'de alt taraftaki 'y' ekseninde '-2' seviyesine ötelenerek çizdirilen kırmızı işaret) sırasıyla Şekil 2.8 a-c'de sunulmaktadır. Bu şekillerde üst taraftaki figürler time/div oranı yüksekken alınmış görüntüleri, alt taraftaki figürler ise daha düşük bir time/div değeri için alınan görüntüleri içerir. Bu görüntülerden tasarlanan nöron emülatörü devre yapılarının uyartım işaretini takip ettiği görülmektedir. Referans 44'teki nöral kütle modellerindeki piramit hücrelerinin hücre zarı potansiyellerini gösteren cevaplar incelenebilir. İlgili çalışmadaki cevaplar thalamus, işitme korteksi, prefrontal korteks ve thalamic reticular nucleustaki inhibitör hücrelerine 0 ve 0.5 saniyede tatbik edilen uyartımlara karşın elde edilen cevapları gözlemlemek için çizdirilmiştir. Sonuçlardaki işitme korteksinin cevabına odaklanıldığında ilgili çalışmada gözlemlenen cevap deseni ile bu tez çalışmasında elde edilen uyartım deseni cevap desenlerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Referans 45'teki çalışmada ise işitme sinir fiberlerini elektriksel olarak uyarılmış birleşik aksiyon potansiyeli (ECAP) ölçümleri üzerinde durulmaktadır. İlgili çalışmanın ilk şeklinde sunulan sinir sinisoidal biçimli uyartımlara karşın, ECAP cevapları incelendiğinde; ilgili çalışmada sunulan cevap desenlerinin, buradaki emülatör devre cevapları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Dolayısı ile emülatör çıkışlarında elde edilen desenler literatürde mevcut cevaplarla uyumludur [44, 45].

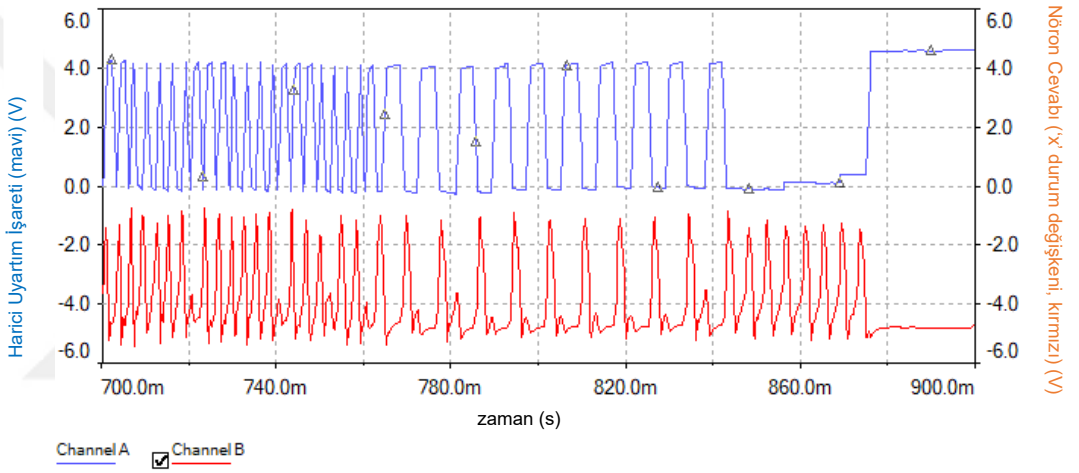
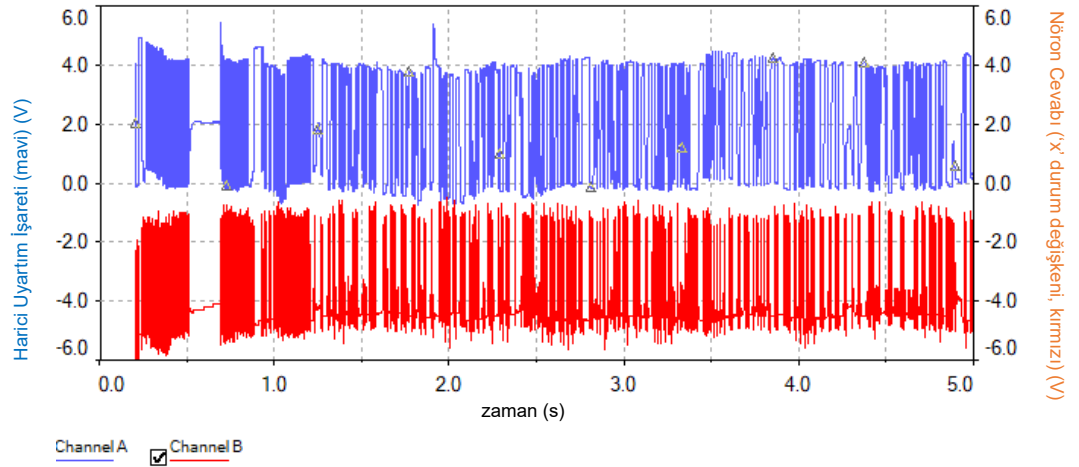
2.3.Dinamik Zaman Yer Değiştirme Analizi ile Performans Kıyası

Bu kısımda, yukarıda sunulan gerçekleştirimlerden hangisinin uyartım işaretinin tepe değerlerini daha etkin yakaladığı konusu üzerinde durulacaktır. Bu kıyaslamayı yapabilmek adına mikrodenetleyici çıkışından Şekil 2.7'de ölçülen çıkış işareti ile devre çıkışlarından ölçülen Şekil 2.8'deki cevap işaretleri arasında bir fark hesabı yapılmıştır. Bu hesapta 'Dinamik Zaman Yer Değiştirme (Dynamic Time Warping - DTW)' algoritmasından yararlanılmıştır [46-48].

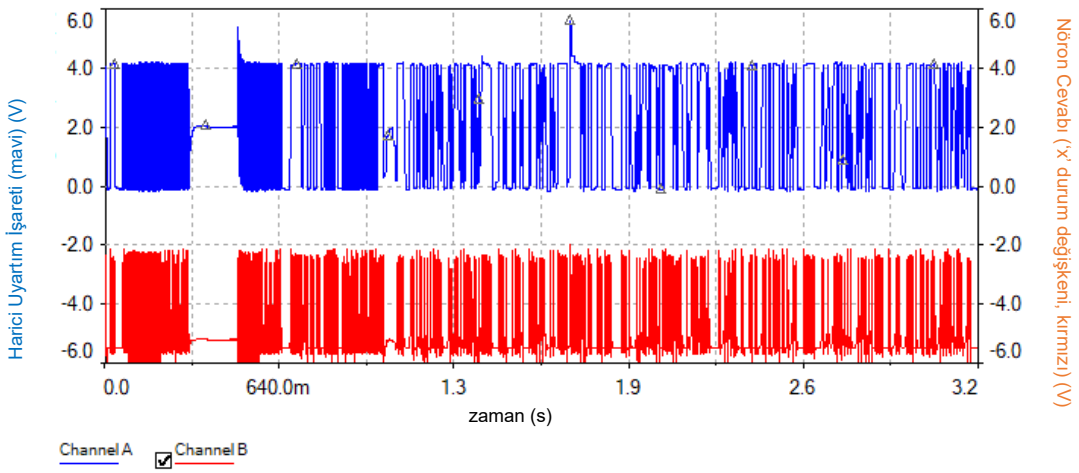
Şekil 2.8. Uyartım işaretinin tatbik edildiği (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA tabanlı devre yapılarına ait devre simülasyon sonuçları

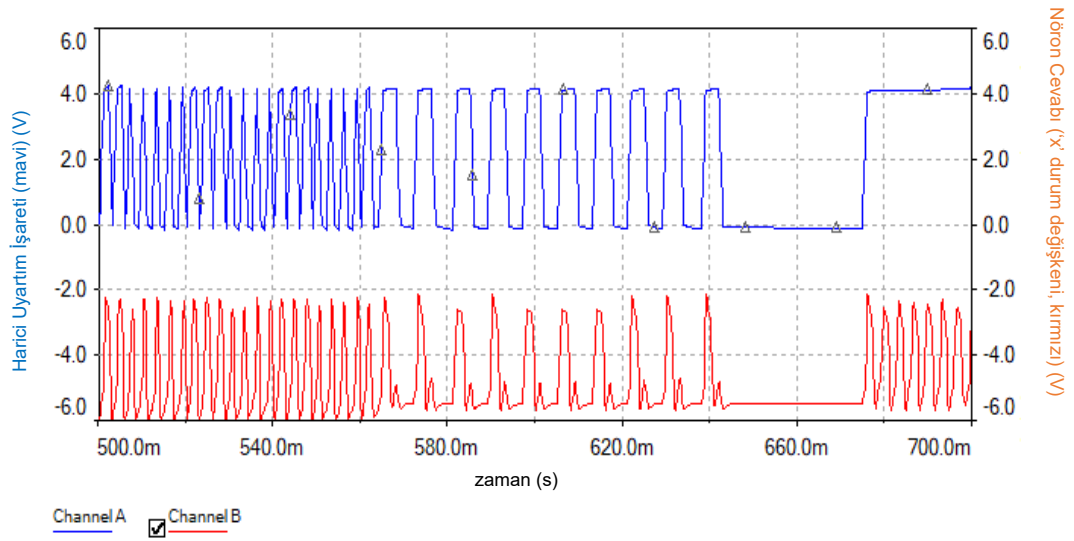


(a)



(b)





(c)

Literatürde Referans [46]'daki çalışma DTW algoritmasının ses tanıma ve işleme alanlarındaki kullanımını inceleyen bir derleme çalışmasıdır. DTW algoritmasının temel prensiplerini açıklamayı ve sesle ilgili uygulamalardaki rolünü değerlendirmeyi amaçlar. Ses verilerinin doğruluğu, zamanlama ve hız farklılıkları gibi faktörlere bağlı olarak değişebildiğinden, DTW algoritmasının farklı hızlarda söylenen kelimeleri veya sesleri doğru şekilde karşılaştırmaya olanak sağladığına dikkat çekilmektedir. Referans [47]'deki çalışma DTW algoritmasının zamanlama esnekliği sağlayarak, farklı hızlarda kaydedilmiş ve zaman içinde değişen verilerin karşılaştırılmasında etkili bir yöntem olarak tanımlamakta ve benzerlik ölçümü, tanıma ve eşleşme görevlerinde kullanılabilmesine dikkat çekmektedir. Referans [48]'deki çalışma ise konuşma tanıma sistemlerinin zamanlama esnekliklerini göz önünde bulundurarak, DTW algoritmasını kullanmaktadır. DTW algoritmasını, konuşma örneklerinin hız farklılıklarını ve zamanlama hatalarını telafi ederek, düşük maliyetli ve doğru bir konuşma tanıma sisteminin geliştirilmesine olanak tanıyan bir algoritma olarak tanıtmaktadır.

Örnek çalışmalardan görüldüğü gibi DTW algoritması iki zaman serisi arasında ilişki kurmak için kullanılabilir bir yaklaşımdır. DTW algoritması zaman serilerinin şekilleri arasındaki benzerlikleri belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bir zaman serisinin diğerine göre hızlı ya da yavaş değişen bölümlerini hizalamayı amaçlar. Genellikle farklı uzunluktaki iki zaman dizisini hizalamak ve aralarındaki benzerlik miktarını ölçmek için

kullanılır. DTW, iki dizideki noktalar arasında, bunları zaman alanında bükerek karşılıklı ilişkileri bulur. Bir mesafe ölçüsü verildiğinde, DTW diziler arasındaki kümülatif mesafeyi en aza indiren noktalara karşılık gelen ilişkiler kümesini hesaplar. Hata hesaplama sürecinde zaman serisinin önceki, şimdiki ve sonraki terimlerini gözetildiği için zaman serileri arasında kayma durumunda hata miktarının azaltılması esas alınır. Geleneksel korelasyon yöntemlerinden farklı olan bu yöntemde, seriler arasındaki farklılıklar ya da zamanlama hataları gibi durumlar da göz önünde bulundurulur. Buna göre, $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ ve $Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_M)$ şeklinde tanımlanan zaman serileri olsun. Burada x_i ve y_j sırasıyla X ve Y zaman serilerinin i 'inci ve j 'inci değerleri iken, N ve M bu serilerin uzunluklarıdır. DTW algoritması iki zaman serisi arasındaki en küçük mesafeyi bulmayı amaçlar ve aşağıdaki gibi bir mesafe matrisi ' D ' oluşturulur:

$$D(i, j) = \text{dist}(x_i, y_j) = |x_i - y_j| \quad (2.5)$$

Bu tanımlamaya alternatif olarak Euclidean mesafe hesabı kullanımı da mümkündür. DTW ile minimum mesafe hesaplanırken, dinamik programlama yaklaşımı ile minimum mesafenin hesaplanması sağlanır. Temel yaklaşım zaman serileri arasındaki en iyi eşleşmeyi bulmaktır. Burada $D_{N \times M}$ boyutunda bir mesafe matrisi oluşturulduktan sonra, bu matrisin her bir elemanındaki toplam mesafe hesabı için Denklem 2.6 kullanılır:

$$\begin{aligned} D_{1,1} &= \text{dist}(x_1, y_1) \\ D_{i,1} &= D_{i-1,1} + \text{dist}(x_i, y_1), i = 2, \dots, N \\ D_{1,j} &= D_{1,j-1} + \text{dist}(x_1, y_j), i = 2, \dots, M \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$D(i, j) = \text{dist}(x_i, y_j) + \min \begin{cases} D(i-1, j) \\ D(i, j-1) \\ D(i-1, j-1) \end{cases}$$

Bu formülizasyon ile bir adım yukarı, bir adım sola ve diyagonal hareketle karşılaştırma imkânı sağlanır. Sonuç olarak oluşturulan matrisin $D(N, M)$ elemanı zaman serilerinin DTW mesafesini verir. Bu değer ne kadar küçükse, seriler o kadar benzer demektir. Ayrıca bu algorithma geri izleme yöntemi ile $D(i, j)$ matrisi üzerinde minimum noktaları referans alarak geri gidilerek optimum hizalama yolu da bulunabilir. Bu çalışmada hesaplanan mesafe matrisi sonuçları Tablo 2.2'de özetlenmiştir.

Tablo 2.2. Akustik uyarımın uygulandığı nöron modelinin VOA, OTA ve CFOA tabanlı devre simülasyonları sonucu ölçülen cevapların kıyaslanması için Denklem 2.6 ile hesaplanan mesafe matrisi sonuçları.

Kullanılan Donanım	Mesafe Matrisi Boyutu	Hesaplanan Toplam Hücre Zarı Potansiyeli Hatası
VOA	$D(3531,3531)$	2419.43
OTA	$D(3500,3500)$	1407.36
CFOA	$D(4000,4000)$	2281.06

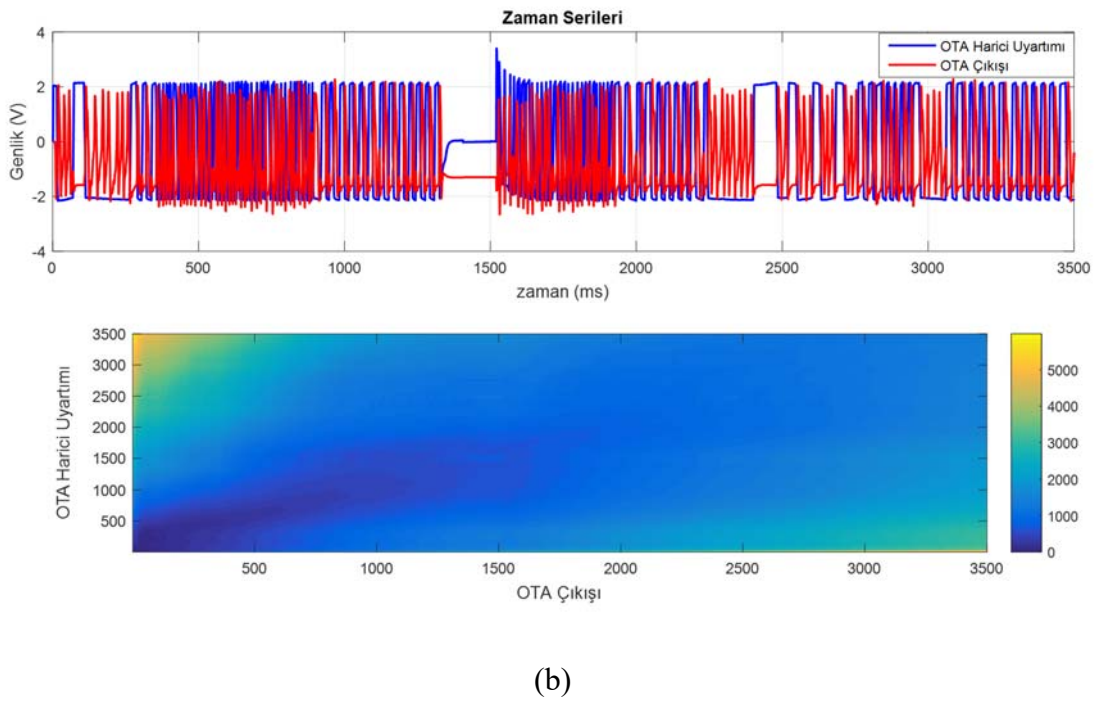
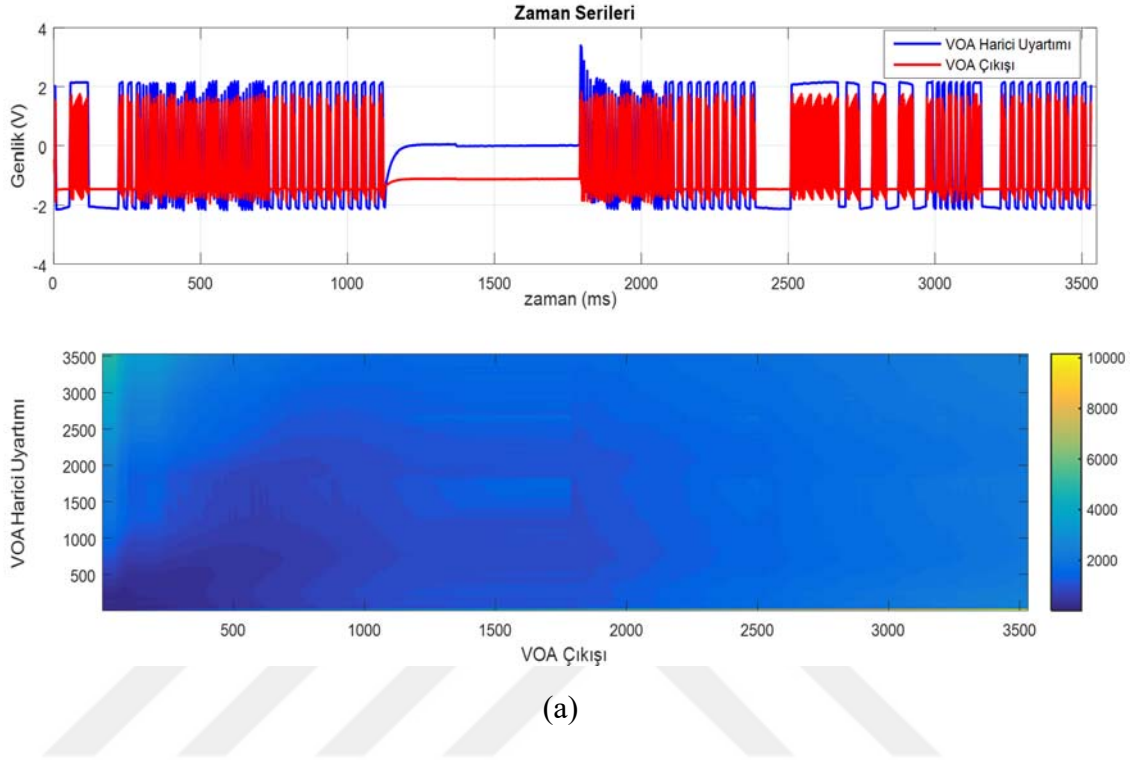
Bu sonuçlara göre VOA ve OTA tabanlı gerçekleştirimler sonucunda kullanılan veri sayıları birbirlerine oldukça yakındır. Bununa birlikte OTA tabanlı gerçekleştirimde daha düşük bir hata yakalandığı görülmektedir. Veri sayısı VOA tabanlı gerçekleştirimden daha fazla olmasına rağmen, CFOA tabanlı gerçekleştirimde de daha düşük bir hata değeri hesaplanmıştır. Mesafe matrisinin her bir elemanındaki hataların görselleştirilmesi adına bir renk çubuğu grafiği de çizdirilmiştir. Buna göre VOA, OTA ve CFOA için çizdirilen mesafe matrisinin her bir elemanındaki hataların görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar sırasıyla Şekil 2.9 a-c’de sunulmaktadır.

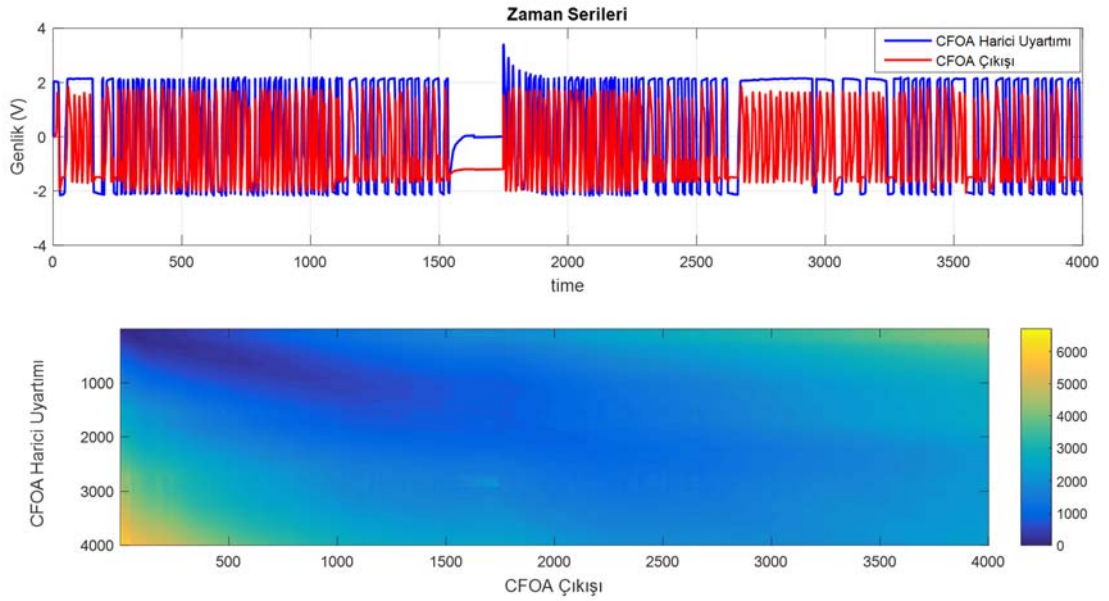
2.4.İşitsel Nöron Modelinin FPAA Tabanlı Emülasyonu ve Performans Çıktısı

Alan Programlanabilir Analog Dizileri (FPAAs), tipik olarak analog işaretleri işlemek için kullanılan, programlanabilir ve esnek bir donanım teknolojisidir. Kullanıcı tarafından istenilen işlemlere programlanabilen sistemlerdir. FPAA’ler, genellikle amplifikatörler, filtreler, osilatörler gibi analog sinyal işleme bileşenlerine sahiptir. Sinyalleri ara bağlantı ağı ile yönlendirilebilir. Sistem bileşenlerin bağlanması ve yeniden yapılandırılması için programlanabilirlik özelliği sunar [37].

Hız ve tepki süresi açısından dijital sistemlerle kıyaslandığında, FPAA’ler, analog sinyalleri doğrudan işleyebildikleri için genellikle daha hızlı tepki verirler. Analog işlemleri doğrudan gerçekleştirdikleri için yanıt süreleri de hızlıdır. Dijital sistemlerde örnekleme gibi yöntemlerle analog sinyalleri dijital verilere dönüştürmek gerekir. Bu da belirli bir gecikmeye yol açar.

Şekil 2.9. (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA için çizdirilen mesafe matrisinin her bir işlemsel kuvvetlendiricideki hataların görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar





(c)

Veri hassasiyeti ve doğruluk açısından dijital sistemlerle kıyaslandığında, sinyal işleme doğrudan yapıldığı için, sinyalin doğruluğu ve hassasiyeti, kullanılan analog bileşenlerin doğruluğuna bağlıdır.

Analog devrelerde gürültü, sıcaklık değişimi ve toleranslar gibi faktörler doğruluğu etkileyebilir. Dijital sistemlerde ise hassasiyet örnekleme oranı ve kullanılan bit sayısına bağlıdır. Bu değerlerin artması daha fazla hesaplama gücü ve bellek gerektirir.

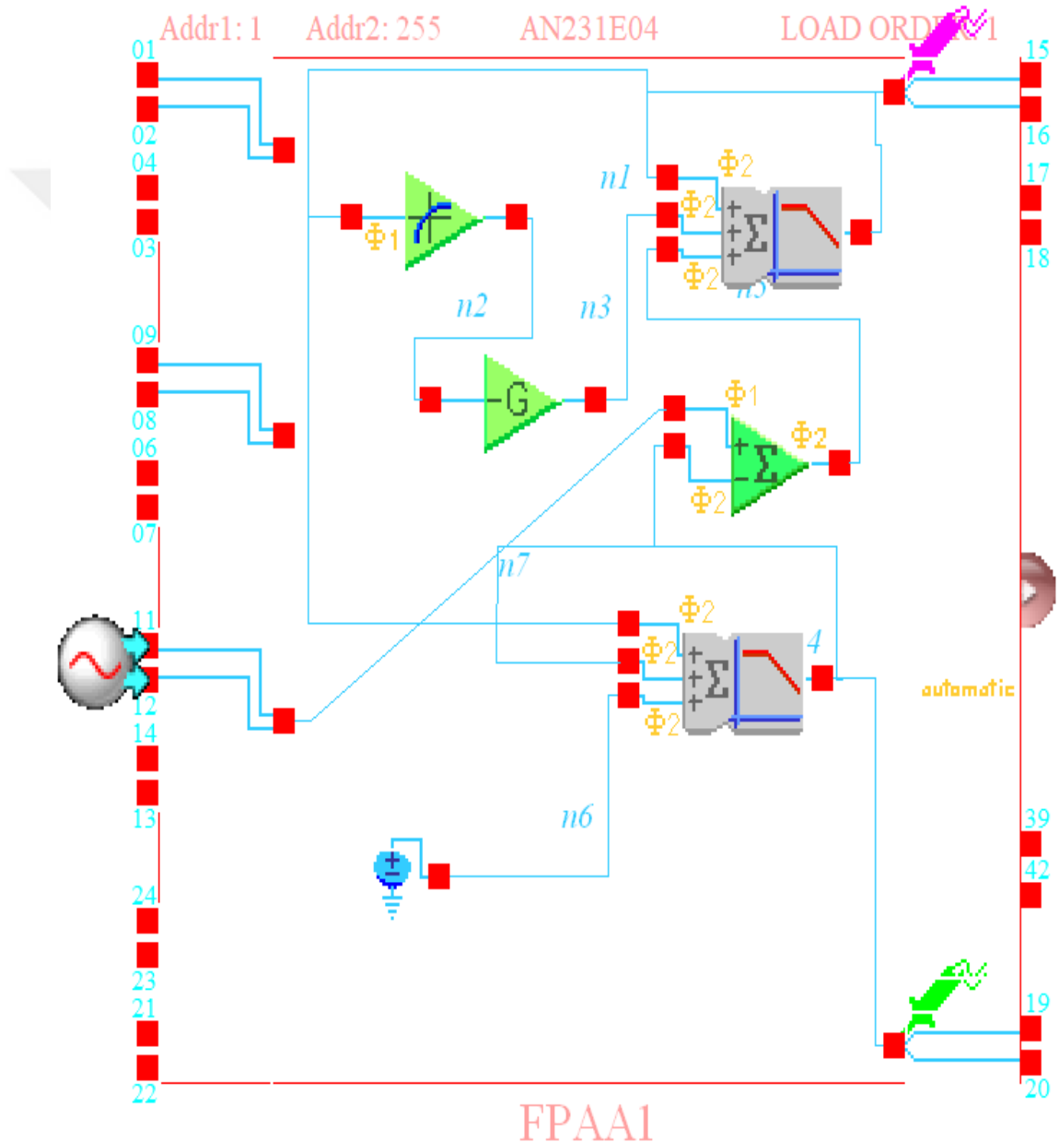
Esneklik açısından dijital sistemlerle kıyaslandığında, analog devreleri programlayabilen ve yeniden yapılandırabilen cihazlar olmalarına rağmen, donanım açısından dijital sistemlere göre genellikle daha sınırlıdır.

Öte yandan, ayrık (discrete) analog donanımlar, genellikle tek bir işlevi yerine getiren, bağımsız bileşenlerden oluşan devre elemanlarıdır. FPAA elemanı esneklik ve programlanabilirlik açısından ayrık devrelerle kıyaslandığında, bir dizi analog bileşeni programlama yoluyla farklı işlevlere dönüştürebilir. Ayrık analog devreler genellikle sabittir; belirli bir işlevi yerine getirecek şekilde tasarlandığından yapılandırmaları sonradan değiştirilemez.

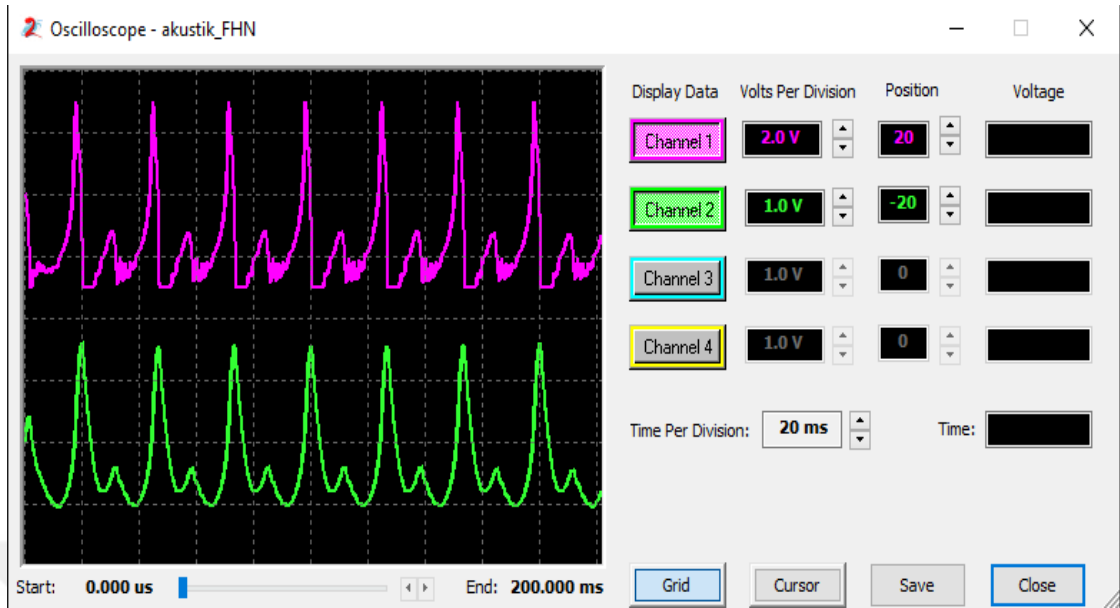
Buna göre FPAA'ler, ayrık analog devrelere göre çok daha esnek bir çözüm sunar. FPAA elemanı zaman ve işlem hızı açısından ayrık devrelerle kıyaslandığında, en az ayrık

donanımlar kadar hızlıdır. Ayrık devreler, doğru ve hızlı bir şekilde analog sinyalleri işleyebilir, ancak tasarımda kullanılan bileşenlerin sınırları vardır.

Şekil 2.10. İşitme nöronlarını modelleyen sistemin FPAA elemanı ile gerçekleştirimi için tasarlanan (a) devre şeması, (b) ANADIGIM DESIGNER2 programındaki simülasyon sonucu

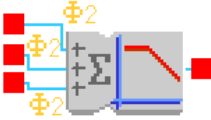


(a)



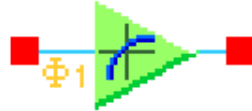
(b)

Tablo 2.3. İşitme nöronlarını modelleyen sistemin FPAA elemanı ile gerçekleştirimi için tasarlanan devrede kullanılan CAM bloklarının listesi, kullanım amaçları ve parametre ayarları.

KULLANILAN ELEMAN	İŞLEVİ
	SUMFILTER
	<p>Bu CAM, tek kutuplu bir alçak geçiren filtredir. Denklem 1.1'deki iki adet durum değişkeninin çözümü için integratör devresi ile toplama çıkarma işlemlerinin gerçekleştirildiği devre eşdeğeri olarak kullanılmıştır. Bloкта üç adet giriş işareti birer kazanç katsayısı ile çarpılarak toplama ya da çıkarma işlemi yapılabilir. Toplam işareti programlanabilir bir köşe frekansına sahip alçak geçiren filtreden geçirilerek çıkışa aktarılır.</p>

PARAMETRE AYARLARI

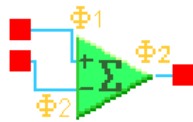
	SUMFILTER (UPPER SIDE)	SUMFILTER (LOWER SIDE)
INPUT1	Non- Inverting 1.85	Non- Inverting 0.1
INPUT2	Non- Inverting 1	Non- Inverting 0.92
INPUT3	Non- Inverting 1	Non- Inverting 0.07
CORNER FREQ.	0.5 kHz	0.5 kHz

TRANSFER FUNCTION

Bu CAM, içerisinde oluşturulan 256 örnekleme adımı ile kullanıcı tarafından tanımlanabilen bir voltaj transfer fonksiyonu gerçekler. Örneklenen giriş voltajı değerini içerisinde tanımlanan fonksiyondan geçirerek bir çıkış cevabı voltajı üretir. Denklem 1.1'deki üstel ifadenin gerçekleştirimi için kullanılmıştır.

PARAMETRE AYARLARI

CLOCK A	5 kHz
CLOCK B	80 kHz

SUMDIFF

Bu CAM, dört girişe kadar toplama ya da çıkarma işlemi yapabilir. Girişler, hem toplamların hem de farkların transfer fonksiyonunu

oluşturabilmek için eviren veya evirmeyen olabilir. Her girişin programlanabilir bir kazancı vardır. Denklem 1.1'deki ilk durum değişkeninde dört adet toplama çıkarma işlemi vardır. SUMFILTER'ın girişleri yeterli gelmediğinden, bu bloğun girişlerini çoğaltmak amacı ile kullanılmıştır.

PARAMETRE AYARLARI

INPUT1	Non-Inverting 0.65
INPUT2	Inverting 1

VOLTAGE



Bu CAM, bir referans ($\pm 2V$) DC voltaj üretir. Burada Denklem 1.1'deki ikinci durum değişkenin ' α ' parametresini karşılamaktadır.

PARAMETRE AYARLARI

Polarity	Positive: 2V
----------	--------------


GAIN



Bu CAM, giriş voltajı programlanabilir kazanç değerine göre evirerek ölçekler. Burada transfer fonksiyonu çıkışını evirmek için kullanılmıştır.

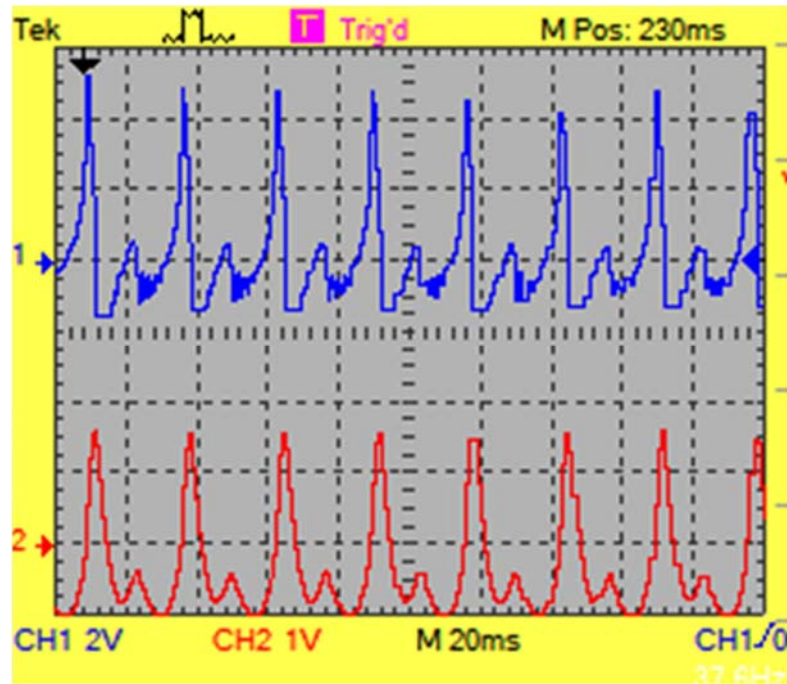
PARAMETRE AYARLARI

Gain	1
------	---

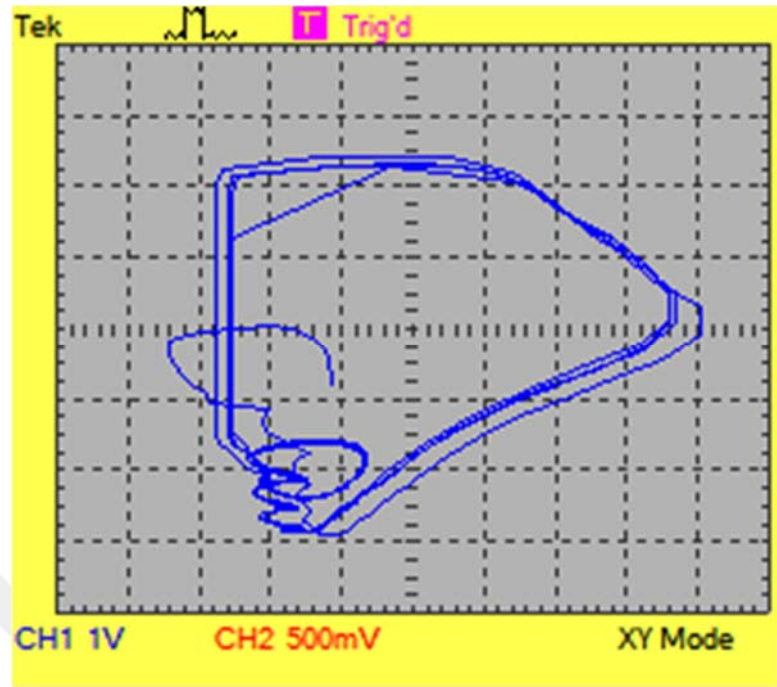
SIGNAL GENERATOR	
	Bu CAM, bir işaret üreticidir. Burada Denklem 1.1'deki $\epsilon_c = A \sin 2\pi f t$ ifadesini gerçeklemek için kullanılmıştır.
PARAMETRE AYARLARI	
Amplitude	1 V
Frequency	75 HZ

FPAA'nın ayırık donanımlara göre sağladığı bu avantajlar göz önünde bulundurularak bu çalışmada da işitme nöronlarını modelleyen sistemin gerçekleştiriminde ayırık donanımlara alternatif olarak FPAA elemanı ile de gerçekleştirimi yapılmıştır. ANADIGIM DESIGNER2 programı kullanılarak yapılan tasarıma ve simülasyon sonucuna ait gösterimler sırasıyla Şekil 2.10 a ve 2.10 b'de sunulmaktadır. Bu gerçekleştirimde kullanılan CAM bloklarının listesi, kullanım amaçları ve parametre ayarları Tablo 2.3'te özetlenmiştir.

Şekil 2.11. İşitme nöronlarını modelleyen sistemin FPAA elemanı ile gerçekleştirimi sonuçları: (a) zaman domaini, (b) faz domaini gösterimi



(a)

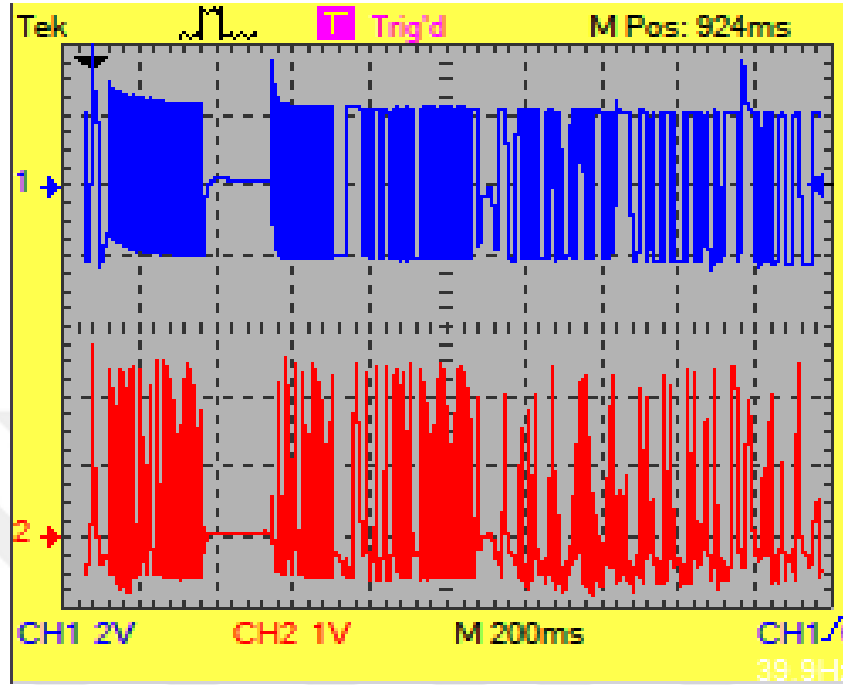


(b)

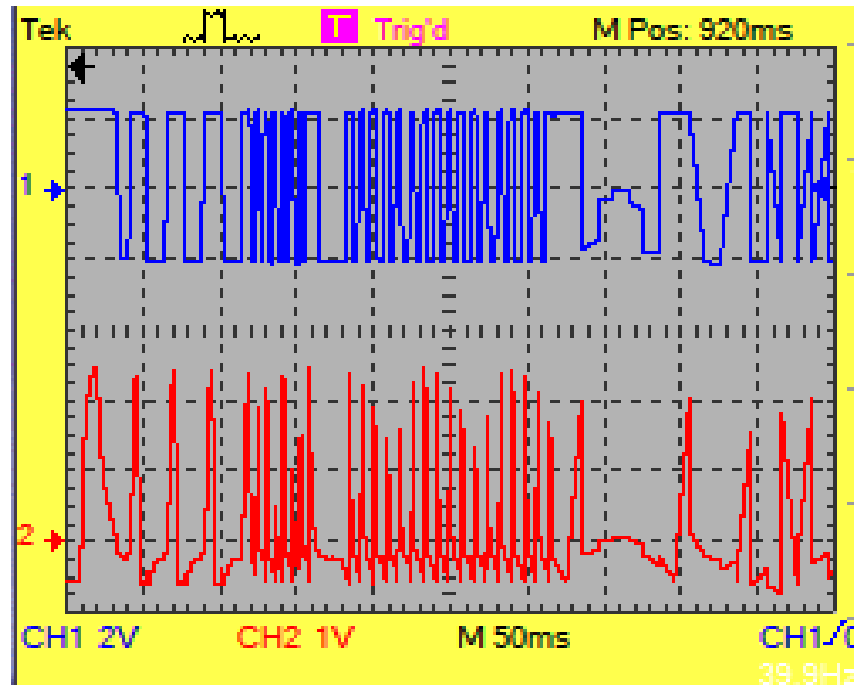
Gerçekleştirim sonucunda kart çıkışından ölçülen elektriksel işaretler ise Şekil 2.11'de sunulmaktadır. Burada Şekil 2.11.a'da üstteki işaret x (mavi) ve alttaki işaret y (kırmızı) değişkenlerinin zaman domaini gösterimine aittir. Şekil 2.11.b ise bu durum değişkenlerinin faz domaini gösterimleri içermektedir.

İşitme nöron modelinin FPAA tabanlı gerçekleştiriminin ardından, modele tatbik edilen harici kaynağın yerine, Şekil 2.7'deki uyartım işaretin uygulama aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada Şekil 2.7'deki uyartım işaretinin (Şekil 2.12'de üst taraftaki mavi işaret) FPAA tabanlı elemanlarla gerçekleştirilen donanım uygulanmasına giriş işareti olarak tatbik edilmiştir. Gerçekleştirim sonucu elde edilen devre çıkış işareti (Şekil 2.12'de alt taraftaki kırmızı işaret) 2.12'de sunulmaktadır. Bu şekilde Şekil 2.12a'da time/div oranı yüksekken alınmış görüntüleri, Şekil 2.12b ise daha düşük bir time/div değeri için alınan görüntüyü içerir. Bu görüntülerden tasarlanan nöron emülatörü devre yapılarının uyartım işaretini takip ettiği görülmektedir.

Şekil 2.12. Uyarım işaretinin tatbik edildiği FPAA tabanlı devre gerçekleştirimi sonucu elde edilen (a) $time/div=200ms$, (b) $time/div=50ms$ için cevap işaretleri



(a)



(b)

Öte yandan, FPAA tabanlı gerçekleştirimin bu uyarımın yakalamadaki etkinliğini ölçmek için de mikrodenetleyici çıkışından Şekil 2,7’de ölçülen çıkış işareti ile devre gerçekleştirimi sonucu ölçülen Şekil 2.12’deki cevap işareti arasında da ‘Dinamik Zaman Ter Değiştirme (Dynamic Time Warping - DWT)’ algoritmasından yararlanılarak bir fark hesabı yapılmıştır. Hesaplanan mesafe matrisi sonuçları Tablo 2.4’te özetlenmiştir.

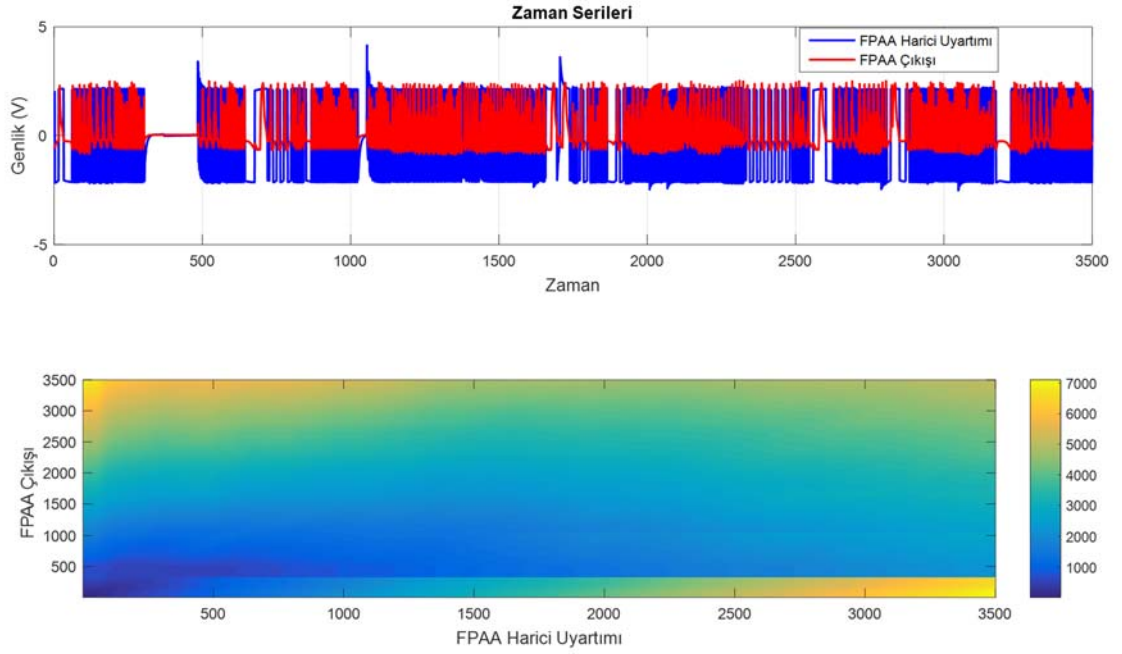
Tablo 2.4. *Akustik uyarımın uygulandığı nöron modelinin FPAA tabanlı gerçekleştirimleri sonucu ölçülen cevapların kıyaslanması için Denklem 2.6 ile hesaplanan mesafe matrisi sonuçları.*

Kullanılan Donanım	Mesafe Matrisi Boyutu	Hesaplanan Toplam Hücre Zarı Potansiyeli Hatası
FPAA	$D(3500,3500)$	5073.04

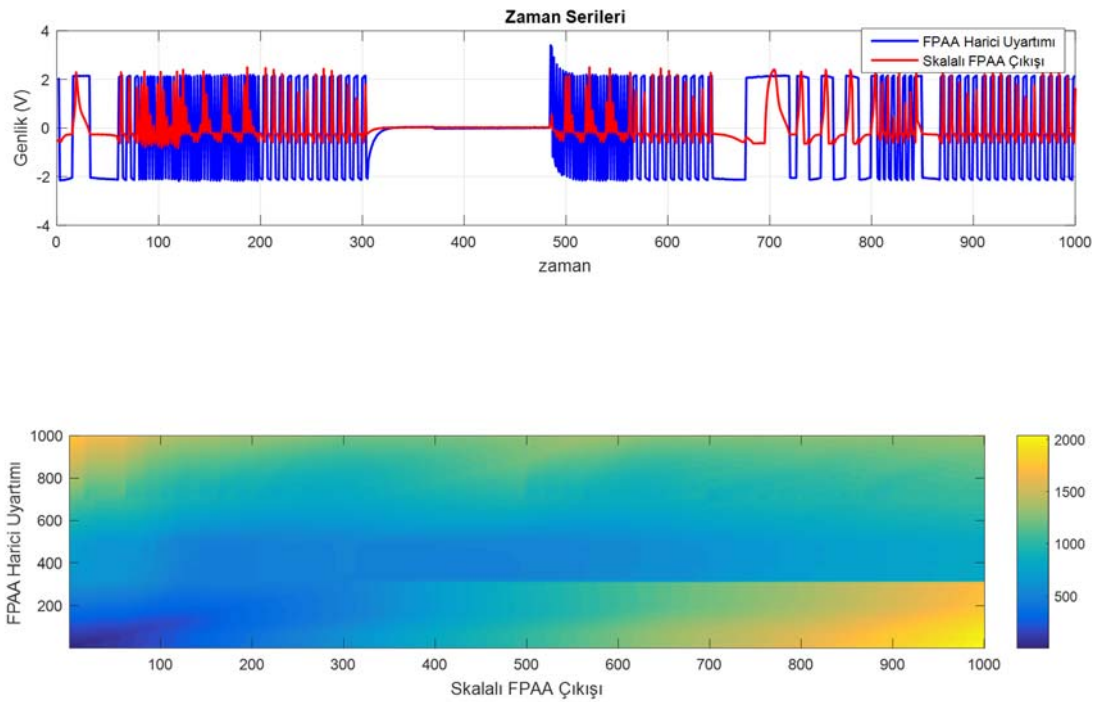
Tablo 2.4’teki sonuç Tablo 2.2’deki sonuçlarla kıyaslandığında en yüksek hatanın FPAA tabanlı gerçekleştirim için hesaplandığı görülmektedir. Bununla birlikte, ayrık donanımlarla elde edilen sonuçların devre simülasyon programları ile elde edilen ölçümlerden yararlanılarak hesaplandığı, FPAA ile yapılan tasarımın ise ölçülen elektriksel işaretlerin kıyaslandığı sonuçlar olduğu göz ardı edilmemelidir. Mesafe matrisinin görselleştirmesi adına çizdirilen renk çubuğu grafiği FPAA tabanlı gerçekleştirim sonucunda elde edilen elektriksel işaretler için de tekrarlanmıştır. Bu grafikler Şekil 2.13’te sunulmaktadır.

Şekil 2.13’te üstteki şekilde verilen zaman serisi cevapları ile Şekil 2.9’da sunulan zaman serisi cevapları incelendiğinde FPAA için yapılan ölçümlerde zaman serisinde kullanılan iterasyon sayısının diğer cevaplarla kıyaslandığında oldukça fazla olduğu dikkat çekmektedir. Dolayısı ile FPAA tabanlı gerçekleştirimde yüksek hata çıkmasının sebebi; zaman serileri arasındaki farkı gözeterek bir hata hesabı yapan DTW algoritmasında, zaman serisinde kullanılan iterasyon sayısının fazla olmasıdır.

Şekil 2.13. *FPAA için çizdirilen mesafe matrisinin hatalarının görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar*



Şekil 2.14. *Ölçeklendirilmiş FPAA sonuçları için çizdirilen mesafe matrisinin hatalarının görselleştirildiği grafiklere ait sonuçlar*



Burada FPAA cevabı için kaydedilen zaman serisi cevabı Şekil 2.9'da verilen zaman serisi cevapları ile yaklaşık olarak aynı bölgede sonlandırılarak DTW algoritması ile bir hata hesabı yapılırsa, hatanın kritik şekilde azaldığı görülecektir. Hata sonucunun azaldığını ve zaman serisi cevaplarının önceki sonuçlarla benzer hale getirildiğini göstermek adına FPAA tabanlı gerçekleştirim için yapılan hata hesabı yinelenmiş ve görseller ise Şekil 2.14'teki gibi güncellenmiştir. Tablo 2.5'te elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, yapılan güncellemelerle elde edilen en düşük hata hesabı FPAA tabanlı gerçekleştirim ile sağlanmıştır.

Tablo 2.5. Akustik uyarımın uygulandığı nöron modelinin FPAA tabanlı gerçekleştirimleri sonucu ölçülen ölçeklendirilmiş cevapların kıyaslanması için Denklem 2.6 ile hesaplanan mesafe matrisi sonuçları.

Kullanılan Donanım	Mesafe Matrisi Boyutu	Hesaplanan Toplam Hücre Zarı Potansiyeli Hatası
FPAA	$D(1000,1000)$	1324,18

Son olarak FPAA tabanlı gerçekleştirimde programlanabilir elemanın donanım kullanım miktarını gösteren bir tabloda aşağıda sunulmaktadır.

Tablo 2.6. FPAA elemanındaki CAB kullanım miktarları.

	CAB 1	CAB 2	CAB 3	CAB 4	Güç Tüketimi
FPAA	8/8	5/8	8/8	5/8	125±37 mW

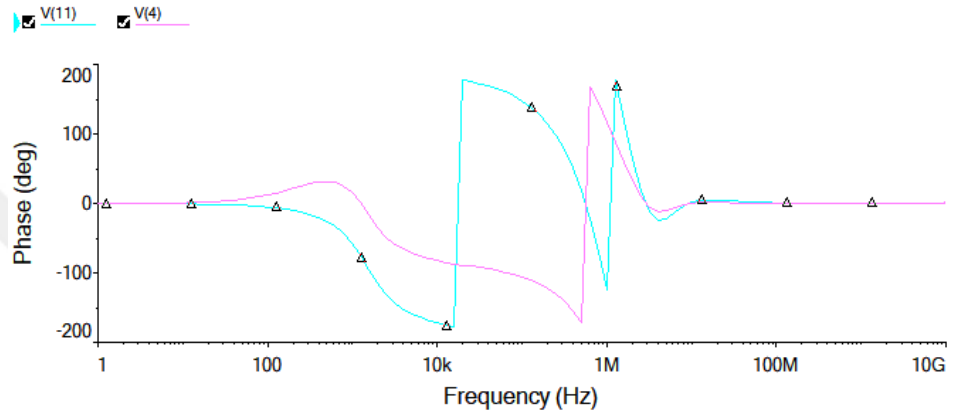
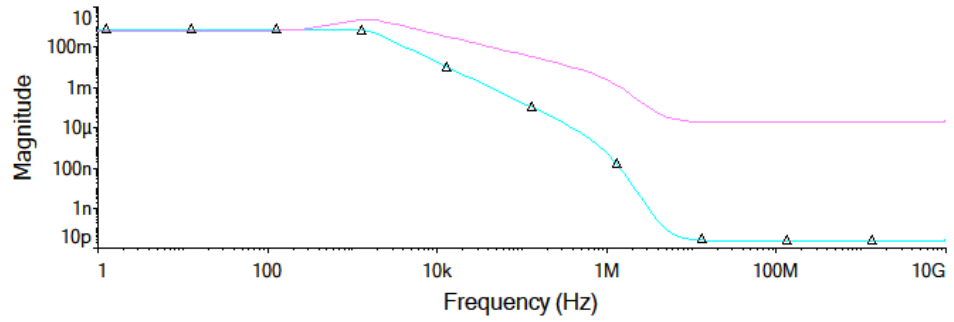
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇ

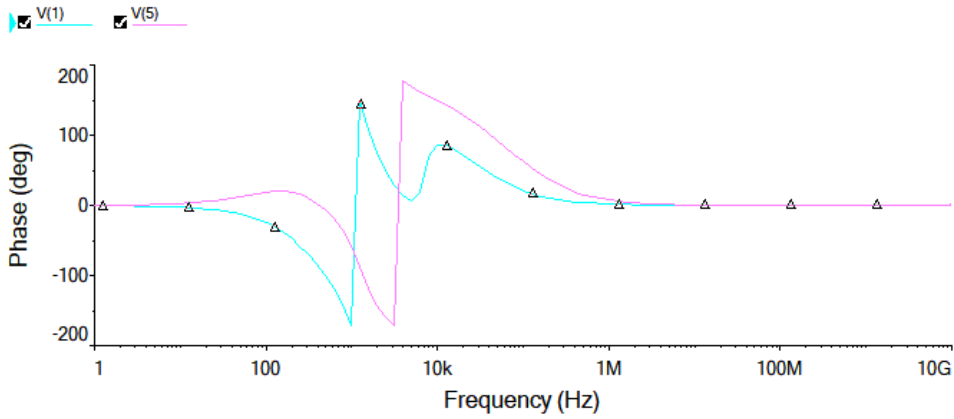
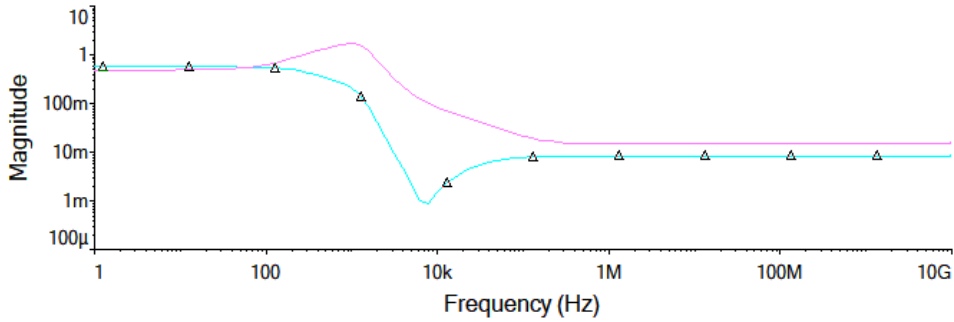
Bu çalışmada, piezoelektrik seramiklerdeki titreşimleri FHN nöron modeline adapte ederek işitme nöronlarını modelleyen bir sistemin; VOA, OTA ve CFOA işlemsel kuvvetlendiricileri ile gerçekleştirimlerinin yapılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda öncelikle literatürde mevcut bu sistemin üretim teknolojisi, giriş/çıkış direnci, bandgenişliği ve frekans cevabı gibi kritik özelliklerde kendilerine özgü karakteristikler sergileyen işlemsel kuvvetlendirici yapıları ile tasarımları yapılmıştır. Ele alınan işitme nöron modelinin üç farklı işlemsel kuvvetlendirici yapısı ile devre tasarımları ortaya konmuş ve bu tasarımlara ait devre simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Modelin nümerik simülasyon sonuçları ile devre simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan devre simülasyon programından elde edilen sentez sonuçları şu şekilde özetlenebilir: VOA, OTA ve CFOA tabanlı devre tasarımlarında sırasıyla 25, 29 ve 35 netlist bağlantısı yapılmıştır, devre tasarımında yine sırasıyla 8/59, 6/60, 6/90 (gerçek/sanal eleman sayısı) olmak üzere komponent kullanımı söz konusudur. Buradan, OTA ve CFOA tabanlı gerçekleştirimlerde daha az işlemsel kuvvetlendirici kullanıldığı sonucu çıkarılabilir. Bu tasarımlar için yapılan AC analiz sonuçları da sırasıyla Şekil 6a-c'de sunulmaktadır. VOA tabanlı tasarımda kullanılan alçak geçiren filtre tasarımına ait sonuçlar incelendiğinde filtrenin cevabı yaklaşık 1MHZ civarında sönümlendiği, OTA tabanlı tasarımındaki alçak geçiren filtrenin cevabı 10kHz civarında sönümlendiği, CFOA tabanlı tasarımın ise alçak geçiren filtrenin cevabı 1MHZ'den yüksek frekanslarda sönümlendiği görülmektedir. Buradan, CFOA tabanlı tasarımın frekans cevabının daha etkin olduğu sonucu çıkarılabilir.

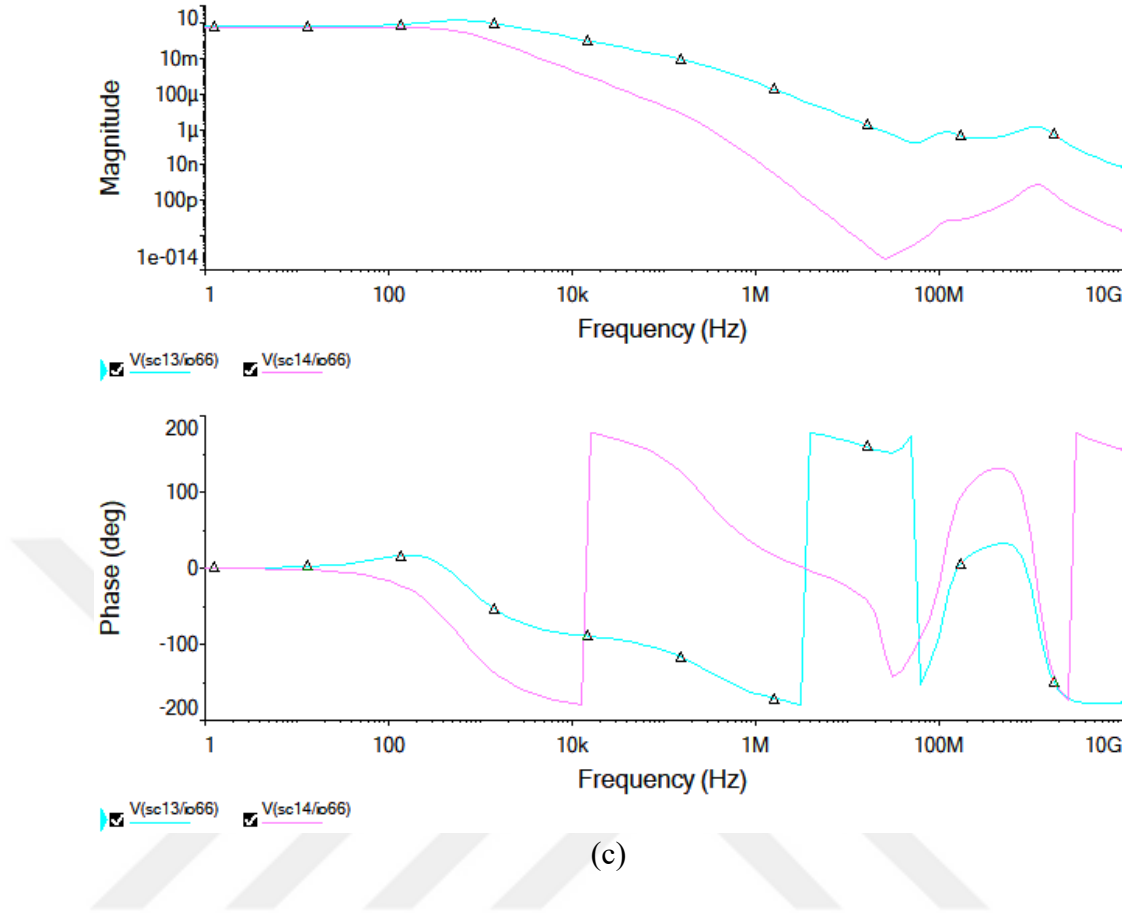
Şekil 3.1. (a) VOA, (b) OTA ve (c) CFOA tabanlı tasarlanan devre yapılarına ait AC analiz sonuçları



(a)



(b)



İşitme nöron modelinin devre emülatörlerinin yapılmasının ardından, ‘İstiklal Marşı’ notaları bir mikrodenetleyicide kodlanmıştır. Ardından mikrodenetleyici çıkısından notalara ait cevap işareti ölçülmüş ve elde edilen işaret nöron modeli emulator devrelerine giriş uyarımı olarak tatbik edilmiştir. Mikrodenetleyicide uyarım işaretini elde etmek için hazırlanan kod aşağıda sunulmaktadır [49, 50]:

```
//İSTİKLAL MARŞI
```

```
//Türkiye Cumhuriyeti İstiklal Marşı
```

```
const int buzzer = 7; // buzzer pin7 ve GND'ye bağlı
```

```
//kullanılacak notalar
```

```
int a, ad, b, c, cd, d, dd, e, f, fd, g, gd, a2, ad2, b2, c2, cd2, d2, dd2, e2, f2, fd2, g2, gd2, a3;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  pinMode(buzzer, OUTPUT);
```

```

////////////////////
// c = do
// cd = do diyez
// d = re
// dd = re diyez
// e = mi
// f = fa
// fd = fa diyez
// g = sol
// gd = sol diyez
// a = la
// ad = la diyez
// b = si
////////////////////

//notalara karşılık gelen frekans değerleri
a=55;
ad=58;
b=62;

c=65;
cd=69;
d=73;
dd=78;
e=82;
f = 87;
fd = 92;
g = 98;
gd = 104;

a2 = 110;
ad2 = 117;
b2 = 123;
c2 = 131;
cd2 = 139;
d2 = 147;
dd2 = 156;
e2 = 165;
f2 = 175;
fd2 = 185;
g2 = 196;
gd2 = 208;
a3 = 220;

}

void loop()
{

```

```

//Korkma Sönmez Bu Şafak
tone(buzzer, c);
delay(800);
tone(buzzer, f);
delay(800);
tone(buzzer, g);
delay(800);
tone(buzzer, gd);
delay(800);
tone(buzzer, e);
delay(400);
tone(buzzer, g);
delay(200);
tone(buzzer, f);
delay(1600);
noTone(buzzer);
delay(300);
//Larda Yüzden Al Sancak
tone(buzzer, f);
delay(800);
tone(buzzer, ad2);
delay(800);
tone(buzzer, c2);
delay(800);
tone(buzzer, cd2);
delay(800);
tone(buzzer, a2);
delay(400);
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, ad2);
delay(1600);
//Sönmeden Yurdumun Üstünde Tüten En Son Ocak O Be
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, ad2);
delay(200);
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(400);
noTone(buzzer);
delay(100);
tone(buzzer, g);
delay(400);
tone(buzzer, ad);
delay(200);
tone(buzzer, gd);

```

```
    delay(400);
    tone(buzzer, e);
    delay(200);
    tone(buzzer, f);
    delay(400);
    tone(buzzer, g);
    delay(200);
    tone(buzzer, gd);
    delay(400);
    tone(buzzer, ad);
    delay(200);
    tone(buzzer, c2);
    delay(400);
    tone(buzzer, cd2);
    delay(200);
    tone(buzzer, dd2);
    delay(400);
    tone(buzzer, f2);
    delay(200);
    tone(buzzer, dd2);
    delay(400);
//Nim Milletimin
    tone(buzzer, dd);
    delay(200);
    tone(buzzer, d);
    delay(200);
    tone(buzzer, dd);
    delay(200);
    tone(buzzer, c2);
    delay(800);
    tone(buzzer, ad);
    delay(800);
    tone(buzzer, gd);
    delay(1600);
// Yıldızdır Parlayacak O benim
    tone(buzzer, c);
    delay(200);
    tone(buzzer, b);
    delay(200);
    tone(buzzer, c);
    delay(200);
    tone(buzzer, g);
    delay(800);
    tone(buzzer, c);
    delay(800);
    tone(buzzer, c2);
    delay(800);
    tone(buzzer, ad);
```

```

delay(200);
tone(buzzer, gd);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(400);
tone(buzzer, gd);
delay(200);
tone(buzzer, f);
delay(800);
//Dir O Benim Milletimindir Ancak
tone(buzzer, f2);
delay(800);
tone(buzzer, dd2);
delay(200);
tone(buzzer, cd2);
delay(400);
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, ad);
delay(400);
tone(buzzer, gd);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(400);
tone(buzzer, f);
delay(200);
tone(buzzer, c2);
delay(400);
tone(buzzer, c);
delay(800);
tone(buzzer, f);
delay(1600);

```

```

//////////ikinci kıt'a

```

```

//Çatma Kurban Olayım
tone(buzzer, c);
delay(800);
tone(buzzer, f);
delay(800);
tone(buzzer, g);
delay(800);
tone(buzzer, gd);
delay(800);
tone(buzzer, e);
delay(400);
tone(buzzer, g);
delay(200);

```

```

tone(buzzer, f);
delay(1600);
noTone(buzzer);
delay(300);
//Çehreni Ey Nazlı Hilal
tone(buzzer, f);
delay(800);
tone(buzzer, ad2);
delay(800);
tone(buzzer, c2);
delay(800);
tone(buzzer, cd2);
delay(400);
tone(buzzer, ad2);
delay(400);
tone(buzzer, a2);
delay(400);
tone(buzzer, c2);
delay(400);
tone(buzzer, ad2);
delay(800);
//Kahraman İrkıma Bir Gül Ne Bu Şiddet Bu Celal Sana
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, ad2);
delay(200);
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(400);
noTone(buzzer);
delay(100);
tone(buzzer, g);
delay(400);
tone(buzzer, ad);
delay(200);
tone(buzzer, gd);
delay(400);
tone(buzzer, e);
delay(200);
tone(buzzer, f);
delay(400);
tone(buzzer, g);
delay(200);
tone(buzzer, gd);
delay(400);
tone(buzzer, ad);
delay(200);

```

```
tone(buzzer, c2);
delay(400);
tone(buzzer, cd2);
delay(200);
tone(buzzer, dd2);
delay(400);
tone(buzzer, f2);
delay(200);
tone(buzzer, dd2);
delay(400);
//Olmaz Dökülen
tone(buzzer, dd);
delay(200);
tone(buzzer, d);
delay(200);
tone(buzzer, dd);
delay(200);
tone(buzzer, c2);
delay(800);
tone(buzzer, ad);
delay(800);
tone(buzzer, gd);
delay(1600);
//Kanlarımız Sonra Helal Hakkıdır
tone(buzzer, c);
delay(200);
tone(buzzer, b);
delay(200);
tone(buzzer, c);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(800);
tone(buzzer, c);
delay(800);
tone(buzzer, c2);
delay(800);
tone(buzzer, ad);
delay(200);
tone(buzzer, gd);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(400);
tone(buzzer, gd);
delay(200);
tone(buzzer, f);
delay(800);
//Hakk'a Tapan Milletimin İstiklal
tone(buzzer, f2);
```

```

delay(800);
tone(buzzer, dd2);
delay(200);
tone(buzzer, cd2);
delay(400);
tone(buzzer, c2);
delay(200);
tone(buzzer, ad);
delay(400);
tone(buzzer, gd);
delay(200);
tone(buzzer, g);
delay(400);
tone(buzzer, f);
delay(200);
tone(buzzer, c2);
delay(400);
tone(buzzer, c);
delay(800);
tone(buzzer, f);
delay(1600);

noTone(buzzer);
delay(300);
Serial.println(buzzer);

```

İlgili kodun mikrodenetleyiciye yüklenip, ölçülen işaretlerin devrelere uygulanmasının ardından, devre çıkışlarında ölçülen işitme nöron modeli cevapları kaydedilmiştir. İşlemsel kuvvetlendiricilerin uyarım işaretini takip etme performanslarının kıyaslanmasının yapılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda uyarım işareti ile ölçülen işaretler arasında dinamik zaman yer değiştirme algoritmasından yararlanılarak bir performans kıyaslaması yapılmıştır. Buna göre üç işlemsel kuvvetlendirici arasında en düşük hata performansı sonucu OTA tabanlı emülatör devresinde elde edilmiştir.

Öte yandan ele alınan işitme nöron modeli, programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog eleman olan FPAA donanımı ile gerçekleştirilmiş ve modelin dinamik cevapları ile mikrodenetleyici çıkışından ölçülen ve çalışmada uyarım işareti olarak kullanılan tetiklemeye karşı verdiği cevap da kaydedilmiştir. Burada önceki kısımda elde edilen sonuçlara kıyasla sağlanan en önemli katkı elde edilen sonucun gerçek zamanlı bir

elektriksel cevap olmasıdır. Önceki kısımda kullanılan donanımın uyarım işaretini takip etmedeki performansını görmek adına yapılan dinamik zaman yer değiştirme algoritması ile hata hesabı bu kısımda da tekrarlanmıştır. Buna göre ayırık donanımlarla yapılan gerçekleştirmelere kıyasla daha düşük bir hata performans sonucu elde edilmiştir.

Son olarak, canlıların işitme sistemleri çok sayıda etkileşimli bileşenden oluşur. İşitme sistemini tam anlamıyla modellemek mümkün olmasa da; saç hücrelerinin ve işitme nöronlarının davranışları bazı temel özelliklerini anlamak amacıyla matematiksel olarak açıklanmaya çalışılmış ve bu tez çalışmasında literatürde mevcut bazı çalışmalar çeşitli elektronik gerçekleştirimlerle desteklenmiştir. Burada ortaya konan devre tasarımları yapay işitme üzerine hazırlanan farklı alanlardaki pek çok çalışmada kullanılmaya elverişlidir.

KAYNAKÇA

- [1] Kujawa, S. G., & Liberman, M. C. (2009). Adding insult to injury: cochlear nerve degeneration after “temporary” noise-induced hearing loss. *Journal of Neuroscience*, 29(45), 14077-14085.
- [2] Sun, S., Babola, T., Pregonig, G., So, K. S., Nguyen, M., Su, S. S. M., ... & Müller, U. (2018). Hair cell mechanotransduction regulates spontaneous activity and spiral ganglion subtype specification in the auditory system. *Cell*, 174(5), 1247-1263.
- [3] Chen, W., Jongkamonwiwat, N., Abbas, L., Eshtan, S. J., Johnson, S. L., Kuhn, S., ... & Rivolta, M. N. (2012). Restoration of auditory evoked responses by human ES-cell-derived otic progenitors. *Nature*, 490(7419), 278-282.
- [4] Song, Z., Jadali, A., Fritsch, B., & Kwan, K. Y. (2017). NEUROG1 regulates CDK2 to promote proliferation in otic progenitors. *Stem Cell Reports*, 9(5), 1516-1529.
- [5] Shintaku, H., Nakagawa, T., Kitagawa, D., Tanujaya, H., Kawano, S., & Ito, J. (2010). Development of piezoelectric acoustic sensor with frequency selectivity for artificial cochlea. *Sensors and Actuators A: Physical*, 158(2), 183-192.
- [6] Zai, A. T., Bhargava, S., Mesgarani, N., & Liu, S. C. (2015). Reconstruction of audio waveforms from spike trains of artificial cochlea models. *Frontiers in neuroscience*, 9, 347.
- [7] Rask-Andersen, H., DeMott, J. E., Bagger-Sjöbäck, D., & Salt, A. N. (1999). Morphological changes of the endolymphatic sac induced by microinjection of artificial endolymph into the cochlea. *Hearing research*, 138(1-2), 81-90.
- [8] Saadatzi, M., Saadatzi, M. N., & Banerjee, S. (2020). Modeling and fabrication of a piezoelectric artificial cochlea electrode array with longitudinal coupling. *IEEE Sensors Journal*, 20(19), 11163-11172.
- [9] Kim, Y., Kim, J. S., & Kim, G. W. (2018). A novel frequency selectivity approach based on travelling wave propagation in mechanoluminescence basilar membrane for artificial cochlea. *Scientific reports*, 8(1), 12023.
- [10] Rubel, E. W., & Fritsch, B. (2002). Auditory system development: primary auditory neurons and their targets. *Annual review of neuroscience*, 25(1), 51-

101.

[11] Xu, Y., Guo, Y., Ren, G., & Ma, J. (2020). Dynamics and stochastic resonance in a thermosensitive neuron. *Applied Mathematics and Computation*, 385, 125427.

[12] Zhang, X., Wang, C., Ma, J., & Ren, G. (2020). Control and synchronization in nonlinear circuits by using a thermistor. *Modern Physics Letters B*, 34(25), 2050267.

[13] Zhang, Y., Xu, Y., Yao, Z., & Ma, J. (2020). A feasible neuron for estimating the magnetic field effect. *Nonlinear Dynamics*, 102(3), 1849-1867.

[14] Zhang, G., Ma, J., Alsaedi, A., Ahmad, B., & Alzahrani, F. (2018). Dynamical behavior and application in Josephson Junction coupled by memristor. *Applied Mathematics and Computation*, 321, 290-299.

[15] Zhang, Y., Wang, C., Tang, J., Ma, J., & Ren, G. (2020). Phase coupling synchronization of FHN neurons connected by a Josephson junction. *Science China Technological Sciences*, 63(11), 2328-2338.

[16] Wang, N., Zhang, G., & Bao, H. (2019). Bursting oscillations and coexisting attractors in a simple memristor-capacitor-based chaotic circuit. *Nonlinear Dynamics*, 97(2), 1477-1494.

[17] Bao, H., Chen, M., Wu, H., & Bao, B. (2020). Memristor initial-boosted coexisting plane bifurcations and its extreme multi-stability reconstitution in two-memristor-based dynamical system. *Science China Technological Sciences*, 63(4), 603-613.

[18] Liu, Y., Xu, W. J., Ma, J., Alzahrani, F., & Hobiny, A. (2020). A new photosensitive neuron model and its dynamics. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 21(9), 1387-1396.

[19] Xu, Y., Liu, M., Zhu, Z., & Ma, J. (2020). Dynamics and coherence resonance in a thermosensitive neuron driven by photocurrent. *Chinese Physics B*, 29(9), 098704.

[20] Z. Liu, C. Wang, W. Jin, J. Ma, "Capacitor coupling induces synchronization between neural circuits," *Nonlinear Dynamics*, vol.97, pp.2661-2673,

2019.

[21] Colombo, J., & Parkins, C. W. (1987). A model of electrical excitation of the mammalian auditory-nerve neuron. *Hearing research*, 31(3), 287-311.

[22] Zhou, P., Yao, Z., Ma, J., & Zhu, Z. (2021). A piezoelectric sensing neuron and resonance synchronization between auditory neurons under stimulus. *Chaos, Solitons & Fractals*, 145, 110751.

[23] Xie, Y., & Ma, J. (2022). How to discern external acoustic waves in a piezoelectric neuron under noise?. *Journal of Biological Physics*, 48(3), 339-353.

[24] Gourévitch, B., Martin, C., Postal, O., & Eggermont, J. J. (2020). Oscillations in the auditory system and their possible role. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 113, 507-528.

[25] L.Parker, E. Chabot, J. Dicecco, S. Koziol, "Implementation and Feedback Control Tuning of an Analog Izhikevich Neuron Circuit," *IEEE Access*, vol.10, pp.67289-67304, 2022.

[26] Korkmaz, N., ÖZTÜRK, İ., & Kilic, R. (2016). Multiple perspectives on the hardware implementations of biological neuron models and programmable design aspects. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1729-1746.

[27] Dahasert, N., Öztürk, İ., & Kiliç, R. (2012). Experimental realizations of the HR neuron model with programmable hardware and synchronization applications. *Nonlinear Dynamics*, 70, 2343-2358.

[28] Korkmaz, N., Öztürk, İ., & Kılıç, R. (2016). The investigation of chemical coupling in a HR neuron model with reconfigurable implementations. *Nonlinear Dynamics*, 86, 1841-1854.

[29] Charles, G., Gordon, C., & Alexander, W. E. (2008, September). An implementation of a biological neural model using analog-digital integrated circuits. In *2008 IEEE international behavioral modeling and simulation workshop* (pp. 78-83). IEEE.

[30] Gerken, G. M. (1993). Alteration of central auditory processing of brief stimuli: a review and a neural model. *The Journal of the Acoustical Society of America*,

93(4), 2038-2049.

[31] Miller, C. A., Abbas, P. J., Robinson, B. K., Nourski, K. V., Zhang, F., & Jeng, F. C. (2009). Auditory nerve fiber responses to combined acoustic and electric stimulation. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 10, 425-445.

[32] Guo, Y., Zhou, P., Yao, Z., & Ma, J. (2021). Biophysical mechanism of signal encoding in an auditory neuron. *Nonlinear Dynamics*, 105(4), 3603-3614.

[33] Huang, G., Zhou, S., Zhu, R., Wang, Y., & Chai, Y. (2024). Stability and complexity evaluation of attractors in a controllable piezoelectric Fitzhugh-Nagumo circuit. *Chaos, Solitons & Fractals*, 182, 114802.

[34] Toumazou, C., Payne, A., & Lidgey, J. (1993, May). Current-feedback versus voltage feedback amplifiers: history, insight and relationships. In *1993 IEEE International Symposium on Circuits and Systems* (pp. 1046-1049). IEEE.

[35] Kuntman, H., & Özenli, D. (2022). Operational transconductance amplifiers (OTAs) and their applications. *Trends in Circuit Design for Analog Signal Processing*, 11-38.

[36] Senani, R., Bhaskar, D. R., Singh, A. K., & Singh, V. K. (2013). *Current feedback operational amplifiers and their applications*. Springer New York.

[37] www.anadigm.com (Erişim Tarihi: 10.01.2025)

[38] A.S. Sedra, K. C. Smith., “ *Microelectronic Circuits*” Oxford Uni. Press, 1998

[39] Ziyagil, H. E. (2021). İlk ve Ortaokul Müzik Derslerinde Arduino Platformunun Nasıl Kullanılacağına İlişkin Değerlendirme ve Örnek Eser Kodlaması. *Yegah Musiki Dergisi*, 4(1), 37-57.

[40] Shepherd, R. K., & Javel, E. (1999). Electrical stimulation of the auditory nerve: II. Effect of stimulus waveshape on single fibre response properties. *Hearing research*, 130(1-2), 171-188.

[41] McAnally, K. I., Clark, G. M., & Syka, J. (1993). Hair cell mediated responses of the auditory nerve to sinusoidal electrical stimulation of the cochlea in the cat. *Hearing research*, 67(1-2), 55-68.

[42] Hu, N., Miller, C. A., Abbas, P. J., Robinson, B. K., & Woo, J. (2010). Changes in auditory nerve responses across the duration of sinusoidally amplitude-modulated electric pulse-train stimuli. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 11, 641-656.

[43] Bruce, I. C., White, M. W., Irlicht, L. S., O'Leary, S. J., Dynes, S., Javel, E., & Clark, G. M. (1999). A stochastic model of the electrically stimulated auditory nerve: single-pulse response. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46(6), 617-629.

[44] Du, X., & Jansen, B. H. (2011). A neural network model of normal and abnormal auditory information processing. *Neural Networks*, 24(6), 568-574.

[45] Runge-Samuels, C. L., Abbas, P. J., Rubinstein, J. T., Miller, C. A., & Robinson, B. K. (2004). Response of the auditory nerve to sinusoidal electrical stimulation: effects of high-rate pulse trains. *Hearing research*, 194(1-2), 1-13.

[46] Yadav, M., & Alam, M. A. (2018). Dynamic time warping (dtw) algorithm in speech: a review. *International Journal of Research in Electronics and Computer Engineering*, 6(1), 524-528.

[47] Müller, M. (2007). Dynamic time warping. *Information retrieval for music and motion*, 69-84.

[48] Permanasari, Y., Harahap, E. H., & Ali, E. P. (2019, November). Speech recognition using dynamic time warping (DTW). In *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1366, No. 1, p. 012091). IOP Publishing.

[49] <https://www.arduino.cc/> (Erişim Tarihi: 10.01.2025)

[50] <https://github.com/coskukoz/Arduino-Turkish-National-Anthem/blob/master/turkish-national-anthem-arduino-code.ino> (Erişim Tarihi: 10.01.2025)

TEZ İNTİHAL RAPORU

İşitsel Uyartımların Nöron Modeli Cevaplarına Etkilerinin
Alternatif Elektronik Donanımlarla Gözlemlenmesi

ORJİNALLİK RAPORU

% 15	% 14	% 5	% 8
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	github.com İnternet Kaynağı	% 7
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	% 2
3	hdl.handle.net İnternet Kaynağı	% 2
4	enstitu.kayseri.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
5	Submitted to Hacettepe University Öğrenci Ödevi	<% 1
6	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<% 1
7	Submitted to University College London Öğrenci Ödevi	<% 1
8	Submitted to Erciyes Üniversitesi Öğrenci Ödevi	<% 1

link.springer.com

9	İnternet Kaynağı	<% 1
10	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<% 1
11	www.astesj.com İnternet Kaynağı	<% 1
12	Li Zhang, Li Xiong, Xinlei An, Qianqian Shi. "Hamilton energy balance and synchronization behaviors of two functional neurons", Cognitive Neurodynamics, 2022 Yayın	<% 1
13	abis-files.kayseri.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
14	waseda.repo.nii.ac.jp İnternet Kaynağı	<% 1
15	Moslem Heidarpur, Arash Ahmadi, Nabeeh Kandalaft. "A digital implementation of 2D Hindmarsh-Rose neuron", Nonlinear Dynamics, 2017 Yayın	<% 1
16	paperzz.com İnternet Kaynağı	<% 1
17	worldwidescience.org İnternet Kaynağı	<% 1
18	acikerisim.nevsehir.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1

		<% 1
19	openaccess.hacettepe.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
20	royalsocietypublishing.org İnternet Kaynağı	<% 1
21	www.slideshare.net İnternet Kaynağı	<% 1
22	www2.law.temple.edu İnternet Kaynağı	<% 1

Alıntılarını çıkart

üzerinde

Eşleşmeleri çıkar

< 7 words

Bibliyografyayı Çıkart

üzerinde

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	MUSTAFA MOLU
-------------------	---------------------

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lisans	Erciyes Üniversitesi	2013
Yüksek Lisans	Kayseri Üniversitesi	-

İŞ DENEYİMLERİ

Derece	Kurum	Görev Süresi
	Karsu Tekstil A.Ş	2013-2014
	Betaş Beton Prefabrik A.Ş	2015-2017
	Kayseri Mimarsinan OSB Müdürlüğü	2017- Halen

YAYINLAR

- 1) Molu, M., & Korkmaz, N., (2024). The Observation of the Effects of Auditory Stimuli on Neuron Model Responses with Alternative Electronic Hardware. 4th International Congress on Scientific Advances (pp.112-118). Balıkesir, Turkey.



Uygulama ve Proje Odaklı, İş Dünyası ile Bütünleşen Üniversite

