



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



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SAYISAL DEVRELERİN LİNEER OLMAYAN DEVRE
ELEMENLARI İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Şeyma Muteber ÇAPRAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Fırat KAÇAR**

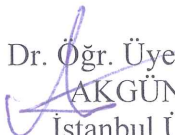
Temmuz, 2018

İSTANBUL

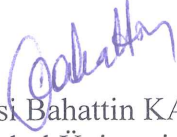
Bu çalışma, 4.07.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

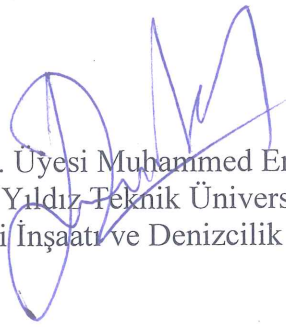
Tez Jürisi


Prof. Dr. Fırat KAÇAR (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahim
AKGÜNDOĞDU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Cengiz Polat UZUNOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Bahattin KARAKAYA
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin BAŞAK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

İstanbul Üniversitesinde lisans ve yüksek lisans eğitimim sürecinde göstermiş olduğu anlayış ve yardımlarından dolayı, tez çalışmamda rehberliğini ve değerli zamanını benden esirgemeyerek çalışmamı yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Fırat KAÇAR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen hocam Dr. Öğr. Üyesi Yunus BABACAN'a emeklerinden dolayı en içten saygı ve sevgilerimi sunarım. Son olarak, çok sevgili arkadaşlarım İsmail KALKAN ve Merve ALİOĞLU'na desteklerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2018

Şeyma Muteber ÇAPRAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. MANTIK KAPILARI	3
2.1.1. Ve Kapısı (AND).....	3
2.1.2. Veya Kapısı (OR)	4
2.1.3. Değil Kapısı (NOT).....	5
2.1.4. Ve Değil Kapısı (NAND).....	6
2.1.5. Veya Değil Kapısı (NOR)	7
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	9
3.1. BİYOLOJİK SİSTEMLER	9
3.1.1. İmpuls Oluşumu ve İletimi	10
3.1.1.1. İyon Kanallarının Açılması ve Kapanmasının Hücre Zarı Potansiyelindeki Değişimler	12
3.2. NÖRONLARIN ELEKTRONİK GEÇMİŞİ	17
3.2.1. Hodgkin Huxley Modeli	18
3.2.2. Integrate And Fire Modeli	20
3.2.3. Hindmarsh-Rose Nöron Modeli	22
3.2.4. Wijekoon –Dudek Modeli	26
3.3. ÖNERİLEN MODELLERİN KİYASLAMASI	31
4. BULGULAR.....	33
4.1. ÖNERİLEN NÖRON DEVRESİ.....	33
4.1.1. Önerilen Nöron Devresine Ait Memristör Devresinin İç Yapısı.....	38
4.2. NÖRON TABANLI SAYISAL DEVRELER	42

4.2.1. Ve Kapısı	42
4.2.2. Veya Kapısı	45
4.2.3. Değil Kapısı	48
4.3. NÖRON TABANLI SAYISAL DEVRE KARAKTERİSTİKLERİ.....	49
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	56



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Ve kapısı sembolü.....	4
Şekil 2.2: Ve kapısı elektrik eşdeğer devresi	4
Şekil 2.3: Veya kapısı sembolü.....	5
Şekil 2.4: Veya kapısı elektrik eşdeğer devresi	5
Şekil 2.5: Değil kapısı sembolü	6
Şekil 2.6: Değil kapısı elektrik eşdeğer devresi	6
Şekil 2.7: Ve değil kapısı sembolü.....	7
Şekil 2.8: Ve değil kapısı elektrik eşdeğer devresi	7
Şekil 2.9: Veya değil kapısı sembolü.....	8
Şekil 2.10: Veya değil kapısı elektrik eşdeğer devresi	8
Şekil 3.1: Sinir hücresi genel yapısı.....	10
Şekil 3.2: Hücre içi ve hücre dışı sıvı arası potansiyel fark	11
Şekil 3.3: Nöron plazma hücre zarındaki iyon kanalları [6].	12
Şekil 3.4: Hücre zarında depolarizasyon ve hiperpolarizasyon [6].....	14
Şekil 3.5: Tipik bir omurgalı nöronunda dinlenme potansiyeli [6].....	15
Şekil 3.6: Ranvier düğümlerindeki aksiyon potansiyeli rejenerasyonu [6].	16
Şekil 3.7: Aksiyon potansiyelinin zamanla değişimi	16
Şekil 3.8: Hodgkin-Huxley modeline göre hücre zarının elektriksel modeli [17].....	19
Şekil 3.9: Integrate and fire nöron devre şeması [18].	21
Şekil 3.10: Bir spikeın şeklini gösteren ölçüm verileri [18].	22
Şekil 3.11: Hindmarsh-Rose Nöron Devresi [19].	23
Şekil 3.12: Faz düzlemi [19].	24
Şekil 3.13: $X(t)$; X değişkeni [19].....	25

Şekil 3.14: $Y(t)$; Y değişkeni [19].....	25
Şekil 3.15: $Z(t)$; Z değişkeni [19].....	26
Şekil 3.16: Wijekoon-Dudek Nöron Modeli [20].	27
Şekil 3.17: Zar Potansiyeli Devresi [20]	28
Şekil 3.18: Yavaş değişken devresi [20]	29
Şekil 3.19: CH, IB, FS, LTS ve RS nöron yanıtları. (Her bölge, önerilen devrenin bir $I = 0.1\mu A$ adımına göre voltaj cevabını gösterir [20].	30
Şekil 3.20: Nöron modellerinin performans durumları [17].	31
Şekil 4.1: Memristör tabanlı nöron devresi [3].	33
Şekil 4.2: Önerilen devrenin gerilim tepkileri, V_B voltaj kaynağının 0,05 V'luk adım gerilimleri ile 0,1V'dan 0,5V'a değiştirilmesiyle elde edilir. Alt eğri DC giriş akımını gösterir. [3].....	37
Şekil 4.3: V_B parametresinin değişimi ile elde edilen spike modellerinin sıralaması (RS: Regular spike , IB: Intrinsic bursting, CH: Chattering, FS: Fast spiking [3].....	38
Şekil 4.4: Nöron devresinde kullanılan memristör taklit devresi [3].	39
Şekil 4.5: Çeşitli frekanslarda giriş sinyalleri için memristor taklit devresinin osiloskop görüntüleri a) 1 kHz b) 3 kHz c) 12 kHz. [3].....	41
Şekil 4.6: 2 Girişli ve kapısı devre sembolü	42
Şekil 4.7: 2 girişli ve kapısına ait giriş ve çıkış sinyalleri.....	43
Şekil 4.8: 3 Girişli Ve Kapısı devre sembolü.....	44
Şekil 4.9: 3 girişli ve kapısına ait giriş akımı ve çıkış gerilimi analizi	44
Şekil 4.10: 2 girişli veya kapısı devre sembolü	45
Şekil 4.11: 2 girişli Veya Kapısı akım giriş akımları ve çıkış gerilimi analizi	46
Şekil 4.12: 3 girişli veya kapısı devre sembolü	47
Şekil 4.13: 3 girişli veya kapısına ait giriş akımları ve çıkış gerilimi analizi	47
Şekil 4.14: Değil kapısı devre şeması	48
Şekil 4.15: Değil kapısına ait giriş akımı ve çıkış gerilimi analizi	49

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Ve kapısı doğruluk tablosu.....	4
Tablo 2.2: Veya kapısı doğruluk tablosu	5
Tablo 2.3: Değil kapısı doğruluk tablosu	6
Tablo 2.4: Ve değil kapısı doğruluk tablosu.....	7
Tablo 2.5: Veya değil kapısı doğruluk tablosu.....	8
Tablo 3.1: Nöron Modellerinin kıyaslama tablosu [3]	32
Tablo 4.1: Ve kapısı ve veya kapısı değişkenler	46
Tablo 4.2: Değil ve nöron devreleri parametre bilgileri	48
Tablo 4.3: CMOS ve Memristör Tabanlı Devre Güç Tüketimi Karşılaştırması	50

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

C	: Kapasite (Farad)
C_{ox}	: Oksit kapasitesi
E_K	: Potasyum kanalı eşik gerilimi
E_L	: Sızıntı kanalı eşik gerilimi
E_{Na}	: Sodyum kanalı eşik gerilimi
g_m	: OTA'nın geçiş iletkenliği
i	: Akım değişkeni (Amper)
I_A	: OTA kuyruk akımı
I_D	: MOS transistörün savak (drain) akımı
I_{D0}	: MOS transistörün sızıntı savak (drain) akımı
M	: Memristör
R	: Direnç değeri(Ohm)
v	: Gerilim değişkeni (Volt)
V_{DS}	: MOS transistörün savak-kaynak (drain-source)
V_{GS}	: MOS transistörün geçit-kaynak (gate-source) gerilimi
V_T	: Eşik gerilim
X	: Zar potansiyeli
X₁	: Adaptasyon olmaksızın nöron modelinin en sol denge noktası
Y	: Nöronun geri dönüş akımı
Z	: Nöronun adaptasyon akımı

Kısaltmalar

Açıklama

CH	: Chattering
FS	: Fast Spiking
IB	: Intrinsic Bursting
HH	: Hudgkin-Huxley
MOS	: Metal-Oksit Semiconductor

OTA : Operational Transconductance Amplifier
RS : Regular Spikes



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAYISAL DEVRELERİN LİNEER OLMAYAN DEVRE ELEMANLARI İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Şeyma Muteber ÇAPRAZ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Sayısal devreler son dönemlerde üzerinde yoğunlaşarak geliştirilmeye çalışılan bir alandır. Devre tasarımcıları ilgili konularda, kompleks yapıları daha basit devre yapılarına indirgeyerek, daha verimli, daha düşük maliyetli ve daha az yer kaplayan tasarımlar üzerinde çalışmaktadırlar. Sonuç olarak hem uygulamada sağladığı uyumluluk ve esneklik hem de uygulama sağlanabilecek oldukça geniş bir alana sahip olması ile bu çalışmalar, uygulayıcıların taleplerine yüksek oranda cevap vermektedirler.

Bu çalışmada pasif devre elemanlarının doğrusal olmayan devre özelliğinden faydalanarak daha basit yapıda, çalışma parametreleri ihtiyaca göre ayarlanabilen, yeni sayısal devreler tasarlanmıştır. Tasarlanmış olan devrelerde, öncelikle nöron taklit devresi araştırılması yapılmış olup, sonraki aşamalarda en uygun benzetim devresi ile dijital kapılar gerçekleştirilmiştir. Önerilen devrelerin performanslarını göstermek için SPICE programı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Temmuz 2018, 69 sayfa.

Anahtar kelimeler: Nöron modelleri, Aksiyon potansiyeli, Memristör, Sayısal kapı devreleri

SUMMARY

M.Sc. THESIS

REALIZATION OF DIGITAL CIRCUITS WITH NONLINEAR CIRCUIT ELEMENTS

Şeyma Muteber ÇAPRAZ

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Digital circuits are a branch that is tried to be developed in recent years. Circuit designers are working on more efficient, less costly and space-saving designs by reducing complex structures to simpler circuit structures. As a result, these studies provide compatibility and flexibility due to the large area of practise that makes respond to the demands of the practitioners at a high rate.

In this study, new digital circuits designed in a simpler structure, which can be adjusted according to the need, by utilizing the nonlinear circuit characteristic of passive circuit elements. In the designed circuits, the neuron simulation circuit was investigated firstly and in the following stages, the digital gates were realized with the most suitable simulation circuit. Results were obtained using the SPICE program to demonstrate the performance of the proposed circuits.

July 2018, 69 pages.

Keywords: Neuron models, Action potential, Memristor, Digital gate circuits

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin artan bir ivmeyle gelişmesi, elektronik devrelerde yapıların işlevselliğini artırmış ancak daha karmaşık uygulamalar sağlaması, sistemlerin karmaşıklığını artırmıştır. İhtiyaçların bu sistemler üzerine artması ile de yeni birtakım problemler meydana çıkmaktadır. Lojik kapıların bir dijital devrede kullanılma adetleri ortalama 20000 ile 100000 arasında değişmektedir. Bu nedenle en temel elemanda yapılabilecek en ufak alan tasarrufu veya güç tasarrufu büyük sistemler içinde ciddi kazançlar sağlayacaktır.

İnsan beyni çok fazla sayıda nöron yapısından oluşmakta olup, bu nöronlar birbirleri arasında bağlantı noktalarına sahiptirler. Tıpkı sayısal devrelerin mantığında olduğu gibi bir eleman üzerinde yapılabilecek enerji tasarrufu veya boyut değişikliği büyük sistemde çok ciddi sonuçlara neden olacaktır. Bu yaklaşım ile dijital kapılar ve nöron devreleri benzetimi düşünülmüş olup, çalışmaya bu şekilde yön verilmiştir.

Literatürde nöron davranışı sergileyen birçok devre yapısı bulunmasına rağmen, bu devrelerin kararlılık, kullanılan malzeme sayısı ve çıkış karakteristikleri anlamında tam olarak yeterlilik sağlayamadıkları söylenebilir [3]. Çalışmaların farklı uygulamalarda farklı avantajlar sağlayabilmesi, nöron devre yapılarının tasarımlarda esneklik sağlama avantajını kanıtlamaktadır. Ayrıca bu çalışmalar bu alanın geliştirilmeye çok açık olduğunu, teknik avantajlarından kaynaklanarak, yapılabilecek her türlü taklit devresinde yenilikçi bir yapı ortaya koyulabileceğini göstermektedir.

Teorik olarak Leon chua tarafından [1-2] sunulduktan 37 yıl sonra uygulaması yapılan memristör, araştırmacıların oldukça fazla dikkatini çekmiştir. Memristör etkisinin sadece nano boyutlarda çalışması, lineer olmayan direnç özelliği göstermesi, hem aktif hem de pasif devre elemanı gibi davranabilmesi, hafızalı olma özelliği göstermesi gibi birçok özelliği barındırması uygulama konusunda çok geniş bir alanda kullanılabileceğini göstermektedir. Üretimin nano boyutlarda olmasından kaynaklanarak mevcut teknoloji ile memristör üretmek çok kolay değildir. Bu nedenle devre tasarımcıları memristör gibi çıkış karakteristikleri sergileyen ve düşük güç tüketen taklit devreleri geliştirmişlerdir.

Tez kapsamında literatürde bulunan nöron taklit devreleri incelenerek, birbirlerine göre üstün özellikleri belirtilecektir. Sayısal devreler için en uygun olan devre yapısı seçilerek yani en az eleman ile en düşük güç tüketimi sağlayan devre yapısı ile temel kapı devreleri tasarlanacaktır. Hem memristör hem de nöron devre yapılarının fonksiyonelliğinden kaynaklanarak çalışmamız için en uygun devre memristör tabanlı nöron devre yapısı olarak uygun görülmüştür [3]. İlgili devre ile tasarlanan yeni kapı devrelerinde kullanılacak olan devre yapıları tamamen aynı olup tek bir harici parametre değişimi ile farklı çalışma yapılarına sahip sayısal devreler elde edilmiştir.



2. GENEL KISIMLAR

Uygulama alanlarının genişliği bakımından sayısal tabanlı devreler elektronik piyasasının en önemli öğeleri haline gelmiştir. Rahat öğrenilebilmesi ve kavranabilmesi, devre tasarımlarının pratik ve esnek yapıda olması, bambaşka işlerde ve çözümlerde aynı fonksiyonları çalıştırabilen birçok tasarım yapılabilmesi sayısal elektroniği önemli ölçüde ön plana çıkaran özelliklerdendir.

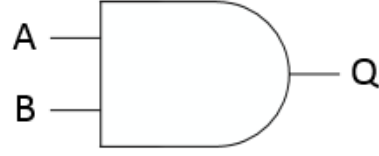
Son zamanlarda sayısal tabanlı devrelerin uygulama alanları düşünüldüğünde hayatımızın birçok yerinde karşımıza çıktığı söylenebilir. Daha uygun bir şekilde dile getirmek gerekirse sayısal tabanlı devreler bilgisayar uygulamalarının yapı taşını oluşturmaktadır. Bilgisayar dili 1 ve 0'lerden meydana gelmektedir. Bilgisayar ortamında oluşturulan verilerin işlenerek uygulamaya geçirilmesi de sayısal elektroniğin alanıdır. Yalnızca bilgisayar tabanlı uygulamalar değil elektronik tabanlı birçok uygulamada da sayısal elektronik kullanılmaktadır.

2.1. MANTIK KAPILARI

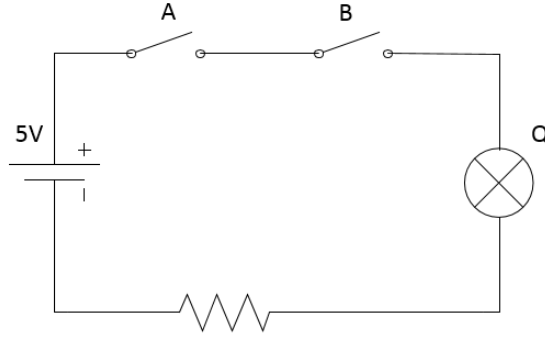
Sayısal devrelerin en basit tasarım birimi olarak adlandırabileceğimiz yapılar mantık kapılarıdır. Mantık kapılarının çalışma parametreleri tek çıkış ancak birden fazla giriş yapısı ile sağlanmaktadır. Girişlerde oluşturulabilecek farklı varyasyonlardaki sinyallerin durumuna göre çıkış sinyalinin durumu belli olur. Çıkışta oluşabilecek iki farklı durum lojik-1 veya lojik-2 şeklindedir. Giriş ve çıkış durumlarının gösterildiği, giriş hattının durumuna göre çıkış hattında meydana gelecek sinyalin gösterildiği tablo doğruluk tablosu (truth table) diye adlandırılır. En temel mantık kapıları ve (and), veya (or), değil (not), ve değil (nand), veya değil (nor) şeklinde söylenebilir.

2.1.1. Ve Kapısı (AND)

Ve mantık kapısında tek bir çıkış, minimum iki veya daha fazla sayıda giriş noktaları bulunmaktadır. İki giriş bir çıkış noktasına sahip olan ve kapısı simge gösterimi ile elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de, aynı sistemin doğruluk tablosu Tablo 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1: Ve kapısı sembolü.



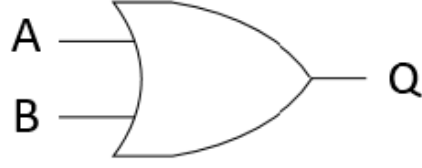
Şekil 2.2: Ve kapısı elektrik eşdeğer devresi.

Tablo 2.1: Ve kapısı doğruluk tablosu.

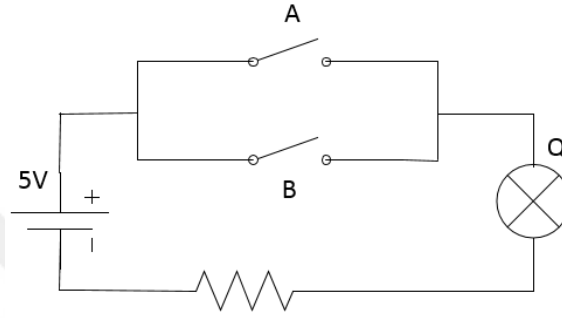
GİRİŞLER		ÇIKIŞ
A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

2.1.2. Veya Kapısı (OR)

Veya mantık kapısında tek bir çıkış, minimum iki veya daha fazla sayıda giriş noktaları bulunmaktadır. İki giriş bir çıkış noktasına sahip olan ve kapısı simge gösterimi ile elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de, aynı sistemin doğruluk tablosu Tablo 2.2’ de verilmiştir.



Şekil 2.3: Veya kapısı sembolü.



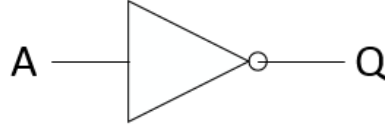
Şekil 2.4: Veya kapısı elektrik eşdeğer devresi.

Tablo 2.2: Veya kapısı doğruluk tablosu.

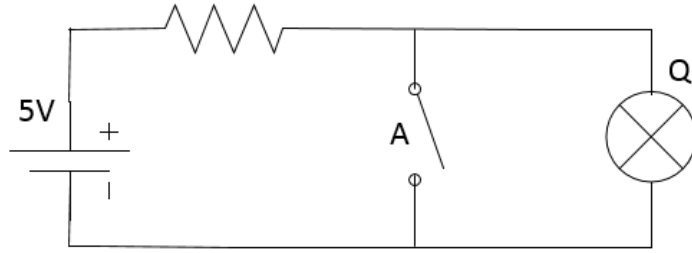
GİRİŞLER		ÇIKIŞ
A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

2.1.3. Değil Kapısı (NOT)

Değil mantık kapısında tek bir çıkış ve bir giriş noktası bulunmaktadır. Girişte uygulanan sinyalin tersi (değili, tümleyeni) çıkışta meydana gelir. Değil kapısı simge gösterimi ile elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’de, aynı sistemin doğruluk tablosu Tablo 2.3’ de verilmiştir.



Şekil 2.5: Değil kapısı sembolü.



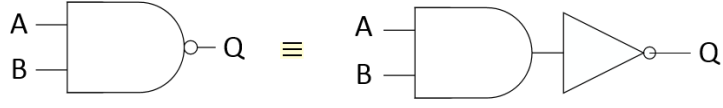
Şekil 2.6: Değil kapısı elektrik eşdeğer devresi.

Tablo 2.3: Değil kapısı doğruluk tablosu.

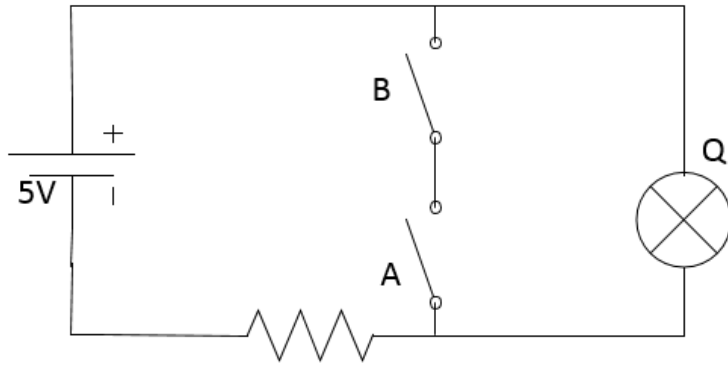
GİRİŞ	ÇIKIŞ
A	Q
0	1
1	0

2.1.4. Ve Değil Kapısı (NAND)

Ve değil mantık kapısında tek bir çıkış, minimum iki veya daha fazla sayıda giriş noktaları bulunmaktadır. İki giriş bir çıkış noktasına sahip olan ve değil kapısı simge gösterimi ile elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de, aynı sistemin doğruluk tablosu Tablo 2.4’ de verilmiştir.



Şekil 2.7: Ve değil kapısı sembolü.



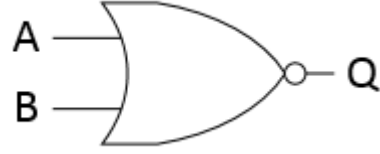
Şekil 2.8: Ve değil kapısı elektrik eşdeğer devresi.

Tablo 2.4: Ve değil kapısı doğruluk tablosu.

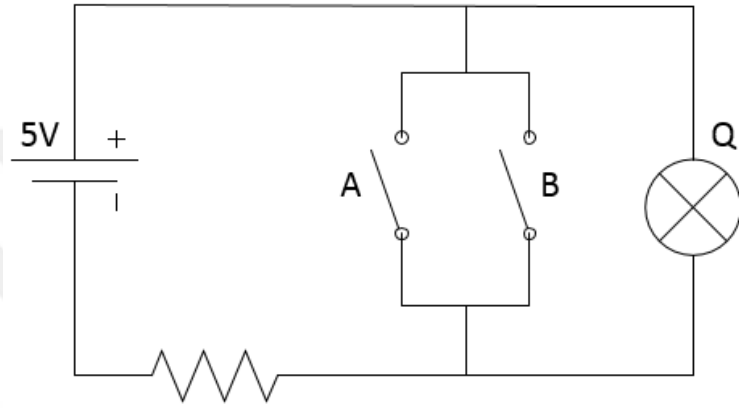
GİRİŞLER		ÇIKIŞ
A	B	Q
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

2.1.5. Veya Değil Kapısı (NOR)

Veya değil mantık kapısında tek bir çıkış, minimum iki veya daha fazla sayıda giriş noktaları bulunmaktadır. İki giriş bir çıkış noktasına sahip olan veya değil kapısı simge gösterimi ile elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'de, aynı sistemin doğruluk tablosu Tablo 2.5' de verilmiştir.



Şekil 2.9: Veya değil kapısı sembolü.



Şekil 2.10: Veya değil kapısı elektrik eşdeğer devresi.

Tablo 2.5: Veya değil kapısı doğruluk tablosu.

GİRİŞLER		ÇIKIŞ
A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

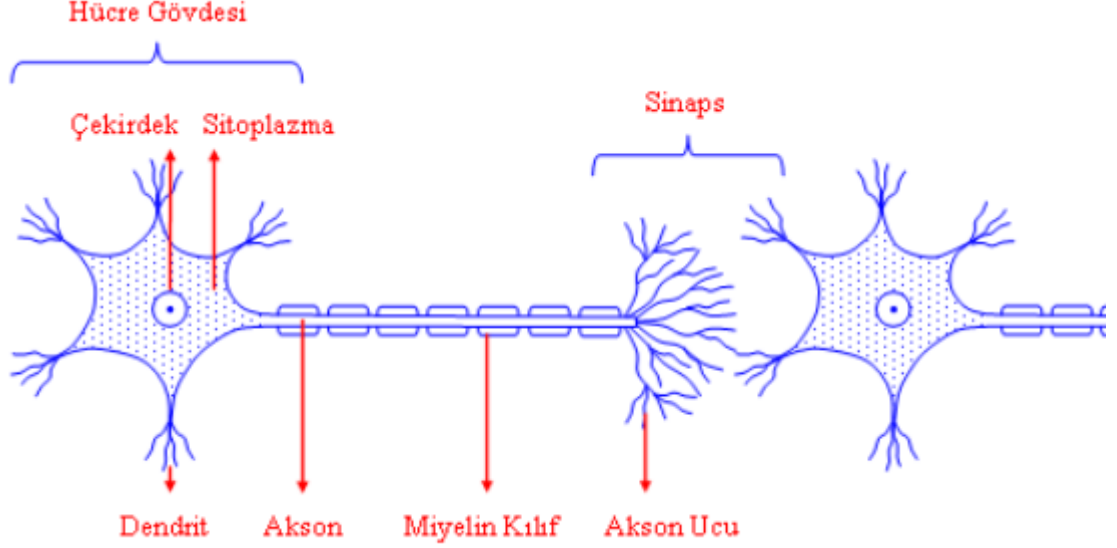
3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalarda elektriksel eşdeğer devreleri tasarlanan, sinir sistemi bölümlerinin kimyasal ve biyolojik olarak çalışma yapılarından bahsedilmiştir.

3.1.BİYOLOJİK SİSTEMLER

İnsan biyolojisinde sinirsel sistemler büyük bir rol oynamaktadır. Sinir sistemi, içeride ve dışarıda oluşan durumları algılar ve buna istinaden uyarı oluşturur. Duyu organları oluşan bu uyarıları algılamak görevini üstlenirken, merkezi sinir sistemi olarak çalışan sisteme, nöronlardan oluşan ağ ile uyarılar iletilir [4]. Nöronların birbirlerine bağlanması ise sinir sistemi meydana gelmektedir. Bu sistem içerisindeki bağlantı noktalarına sinaps, nöronların gövde hücresi üzerinde bulunan kısa uzantılarına dendrit ve uzun bölgesi olarak tanımlanabilecek bölgeye ise akson adı verilmektedir. Sinir sistemi içerisinde oluşan örüntü sayısının miktarına göre bilginin işlenme süresi belirlenmekte olup, örüntü sayısının miktarı ile bu süre doğru orantılıdır. Bir nöronun gövde hücresinde bulunan dendritler ile diğer sinir hücresinin yani nöronun akson bölgesinde bulunan dendritlerin arasında oluşan elektriksel akım ile bilgi iletilerek, tüm etkinlikler ve hafızanın oluşmasını sağlamaktadır. Bilgi nöronların arasında elektrik akımı şeklinde ilerler. [5]. Sistemsel olarak nöronların iletkenlik kabiliyetleri çok iyi değildir. Fakat zar hücreleri arasında yük değişimleri yaparak elektriksel sistem meydana getirirler ve iletirler. Sinirsel akım olarak adlandırılan bu yapıdaki akım normal metallerdeki elektriksel akım ile benzerdir. Nöronlar, impuls denilen voltaj farklarını ileten özel hücreler olarak tanımlanabilir. Sinir hücresi herhangi bir bölgeden uyarılarak oluşan impuls merkezi sinir sistemine iletilir. İmpulsun oluşması zar hücresi üzerinde oluşan gerilim farkları ile sağlanır. Aksonun iç yapısı ile dış yapısının elektriksel yükleri farklı değerlerde olduğu için iyon alışverişi sırasında gerilim farkı oluşur. Oluşan bu gerilim aksiyon potansiyeli adı verilir ve bu potansiyel zarın tüm noktalarına iletilir. Oluşan potansiyeller hem iç bölgede hem de dış bölgede oluşabilir ve farklı sistemlerle saklanabilir. İyonların çok yoğun olduğu bölgeden az yoğun olduğu bölgeye geçmesi ile geçiş bölgesinde elektriksel yüklerinin kopması durumunda elektriksel potansiyel fark oluşabilir. Potansiyel farkın oluşabilmesi için iyonların sürekli olarak bir bölgeden diğer bölgeye geçmesi gerekmektedir. Ayrıca zar bölgesinin iç ve dış taraflarında iyon yükleri birbirinden farklı

yapılar mevcutsa ve zardan geçiş yapamayan iyonlar mevcutsa, aynı şekilde bir potansiyel fark ortaya çıkabilir.

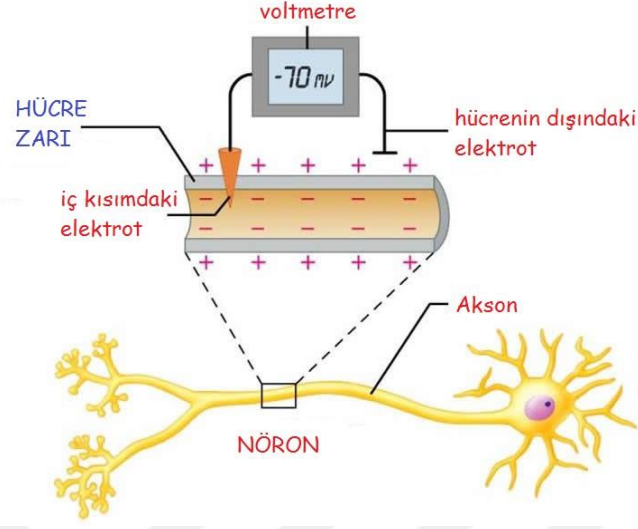


Şekil 3.1: Sinir hücresi genel yapısı.

Nöron dinlenme durumunda kutuplaşmış bir konumda bulunur. Hücre zarının dışı pozitif yükler ile yüklü olup, içi negatif yükler ile yüklüdür. Uyarılar sonucunda sodyum iyonlarının sinir hücresinin iç bölgesine gitmesi ile polarize durumdan depolarize duruma geçer. Farklı şekilde söylemek gerekirse kutuplaşma bozulur. Tüm bu iyon hareketleri sonucunda sistemin tekrar aynı durumuna geçmesi olayına repolarizasyon denir. Nöronun uyarı gelen noktasının depolarize olması ile iç ve dış kısımdaki potansiyeller yer değiştirmiştir. Uyarı gelmiş ve gelmemiş noktalar arasındaki yük farkından kaynaklı olarak oluşan elektrik akımı tüm sinir hücresi ve bu hücrelerin oluşturduğu sistem içinde devam eder ve impuls iletilir. Bu iletim esnasında nöronlar arasında bulunan sinaps olarak adlandırılan bölgelerde elektriksel iletim söz konusu olur.

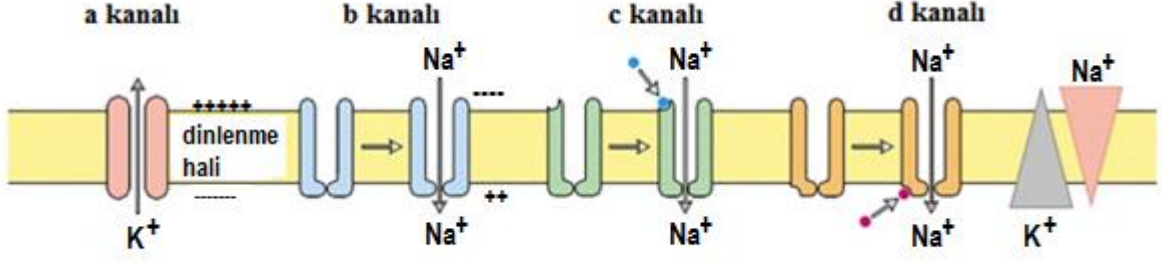
3.1.1. İmpuls Oluşumu ve İletimi

Tüm hücrelerin hücre zarı boyunca elektrik potansiyeli olarak da adlandırılan bir voltaj farkı vardır. Büyük hücrelerin, hücre zarı üzerindeki elektrik potansiyeli, hücrenin içine yerleştirilmiş bir mikro elektrot ve hücre dışı sıvıya yerleştirilmiş bir referans elektrot ile ölçülebilir. Şekil 3.2’de bu voltaj farkını ölçümünü gösteren sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Hücre içi ve hücre dışı sıvı arası potansiyel fark.

Hemen hemen tüm durumlarda, hücre zarının içi, dışarıya göre negatiftir. Hücre zarı potansiyelleri genellikle -30 ile -70 mV arasındadır. Çoğu hayvan hücresinin hücre zarı boyunca potansiyel farkı genellikle zamanla değişmez. Tersine, nöronlar ve kas hücreleri (Elektriksel olarak aktif hücrelerin başlıca tipleri), hücre zarı potansiyellerinde kontrollü değişikliklere uğrarlar. Nöronların elektriksel aktiviteleri (elektrik sinyallerini iletme ve alma yetenekleri), nöron plazma hücre zarının belirli iyon kanalı proteinlerinin açılmasından ve kapanmasından kaynaklanır (Şekil 3.3). Her bir açık kanal, zarın bir tarafından diğerine hareket eden az miktarda iyonla izin verir, ancak bu iyon hareketleri, hücre zarı potansiyelinde önemli değişikliklere neden olur.



Şekil 3.3: Nöron plazma hücre zarındaki iyon kanalları [6].

Her kanal nöronların elektriksel aktivitesinde spesifik bir fonksiyona sahiptir. Bunlar aşağıdaki şekilde belirtilebilir.

- Dinlenme halinde K^+ kanalları, zar boyunca dinlenme potansiyelini oluşturmaktan sorumludur.
- Voltaj kapılı kanallar aksonal hücre zarı boyunca aksiyon potansiyellerini yaymaktan sorumludur.
- Dendritlerde ve hücre gövdelerinde, c ve d iyon kanalı postsinaptik hücrelerde elektrik sinyallerinin üretilmesinden sorumludur.

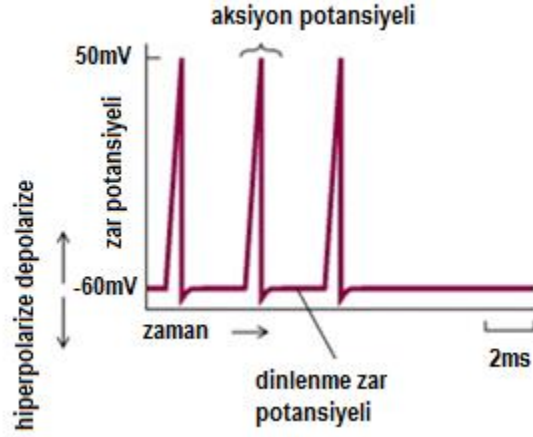
3.1.1.1. İyon Kanallarının Açılması ve Kapanmasının Hücre Zarı Potansiyelindeki Değişimler

Çeşitli kanalların açılması ve kapanması nedeniyle öngörülen değişiklikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Na^+ kanallarının açılması (P_{Na} 'nın artırılması) zarın depolarizasyonuna neden olur; Hücre zarı potansiyeli daha az negatif olur ve eğer P_{Na} 'daki artış yeterince büyük olursa, potansiyel E_{Na} 'ya yaklaşarak içeride pozitif olabilir. Na^+ iyonları hücre dışı ortamdan içeriye doğru hareket etme eğilimindedirler. Bu sebeple konsantrasyon gradyanları azalır, zarın dış yüzeyinde fazla negatif iyonlar bırakır ve yüzey üzerinde daha fazla pozitif iyonlar oluşturur. Aksine, Na^+ kanallarının kapatılması, P_{Na} 'nın azalması, hücre zarı hiperpolarizasyonuna neden olur ve daha negatif bir potansiyel oluşturur.

2. K^+ kanallarının açılması (P_K 'nin arttırılması) zarın hiperpolarizasyonuna neden olur; hücre zarı potansiyeli E_K ' ye yaklaştıkça daha negatif olur. Bu daha fazla K^+ iyonları, iç sıvıdan, konsantrasyon gradyanlarından aşağı doğru akar, zarın yüzeyi üzerinde fazla negatif iyonlar bırakarak ve dış yüzeyde daha pozitif olanları ortaya çıkarır. Aksine, K^+ kanallarının kapanması, P_K 'nin azalması, zarın depolarizasyonuna ve daha negatif bir potansiyele neden olur.
3. Na^+ ve K^+ 'yı eşit olarak kabul eden “nonspesifik” katyon kanallarının açılması da hücre zarı depolarizasyonuna neden olur. Bu kanallar, K^+ iyonlarının, iç sıvıdan ve Na^+ iyonlarından içeriye doğru akmasını neden olur ve bu hücre zarı potansiyelini sıfıra doğru yaklaştırmaktadır.
4. Cl^- kanallarının açılması (artan P_{Cl}), hücre zarının hiperpolarizasyonuna ve potansiyel yaklaşımlara neden olur. Cl^- iyonları, hücre dışı ortamdan içeriye doğru akma eğilimi gösterirler ve konsantrasyon gradyanlarını düşürürler, zarın dış yüzeyinde fazla pozitif iyonlar bırakırlar ve yüzey üzerinde daha fazla negatif iyon oluştururlar. Kas hücrelerinde, dinlenme halinde Cl^- kanalları ve dinlenme halinde olmayan K^+ kanalları, iç negatif dinlenme potansiyelinin temel belirleyicileridir. Aksine, Cl^- kanallarının kapanması, P_{Cl} 'nin azalması, depolarizasyona ve daha az negatif bir potansiyele neden olur.

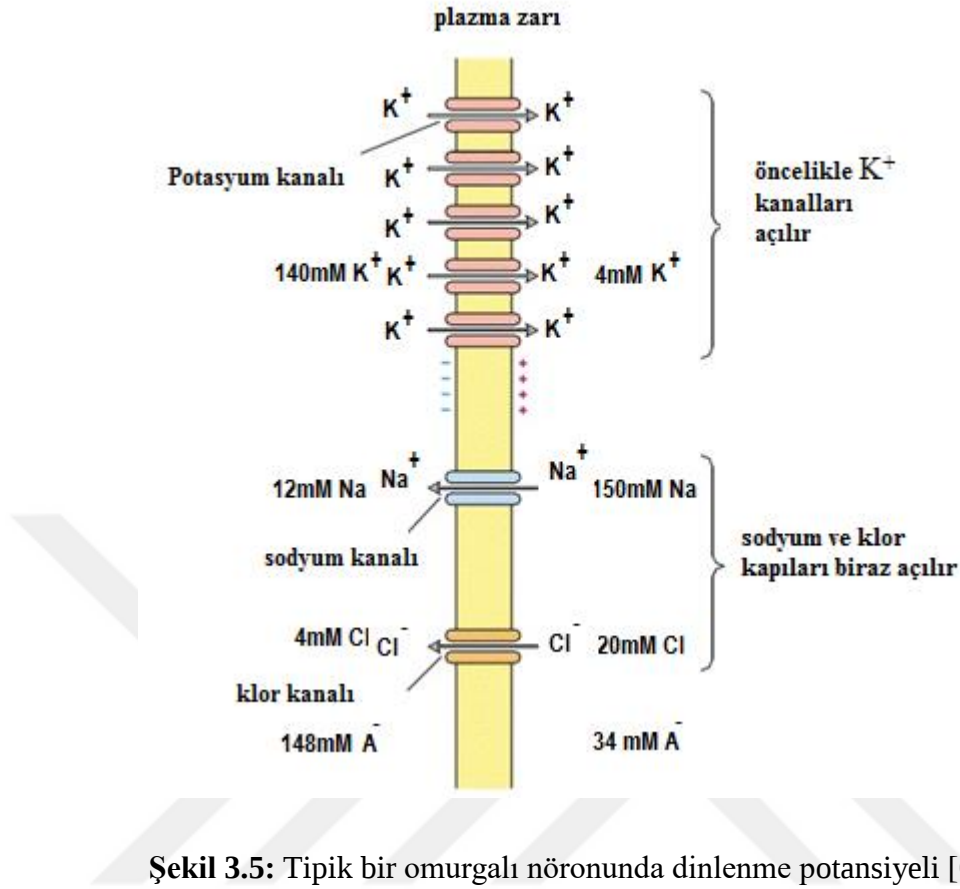
Dinlenme potansiyelinde, voltaj kapılı iyon kanalları hiçbir iyonun geçemeyeceği şekilde kapalıdır. Bununla birlikte, plazma hücre zarının bir bölgesi az miktarda depolarize edildiğinde, kısa bir süre için voltajlı Na^+ kanalları açılarak, bir aksiyon potansiyeline bağlı ani ve geçici depolarizasyona neden olan Na^+ iyonlarının geçişine izin verir. Voltaj kapılı Na^+ kanallarının bir aksiyon potansiyeli sırasında açılmasının ve kapanmasının ardından, voltaj kapılı K^+ kanallarının geçici olarak açılması, hücre zarı potansiyelinin dinlenme durumuna dönmesine ve hatta kısa bir süre için daha negatif (hiperpolarize) olmasına neden olur (Şekil 3.4). Aksonların uzun mesafeler boyunca aksiyon potansiyelleri gerçekleştirme kabiliyeti, voltaj kapılı Na^+ ve K^+ kanallarının kontrollü açılmasına ve kapanmasına bağlıdır (Şekil 3.3).



Şekil 3.4: Hücre zarında depolarizasyon ve hiperpolarizasyon [6].

Özetle, tüm zarlı organelleri bulunan hücrelerin plazma hücre zarı boyunca bir elektrik potansiyeli vardır, çünkü hücre sıvısı ve hücre dışı sıvının iyon bileşimleri, plazma hücre zarının ana hücresel iyonlara olan geçirgenlikleri gibi Na^+ , K^+ , Cl^- ve Ca_2^+ 'da farklılık gösterir.

Çoğu sinir ve kas hücresinde, dinlenme membranı potansiyeli yaklaşık 60 mV'tur, potansiyel iç kısımda negatiftir; esas olarak, hücre zarındaki nispeten çok sayıda açık K^+ kanalından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.5).

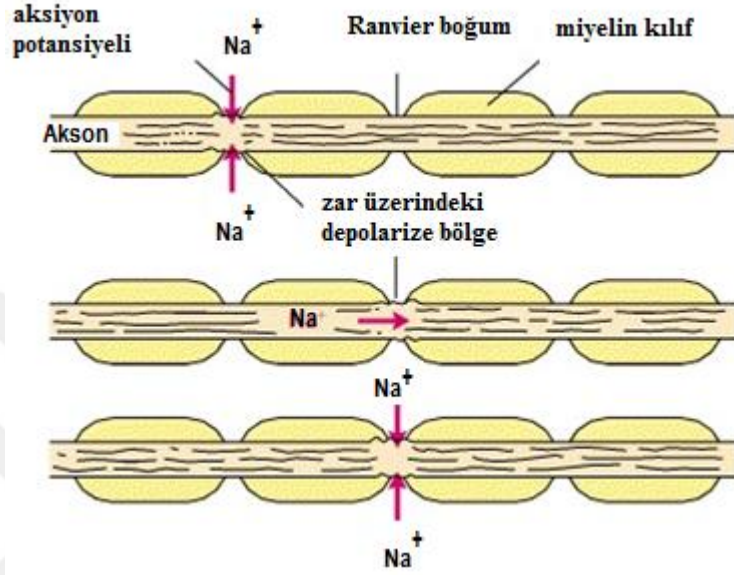


Şekil 3.5: Tipik bir omurgalı nöronunda dinlenme potansiyeli [6].

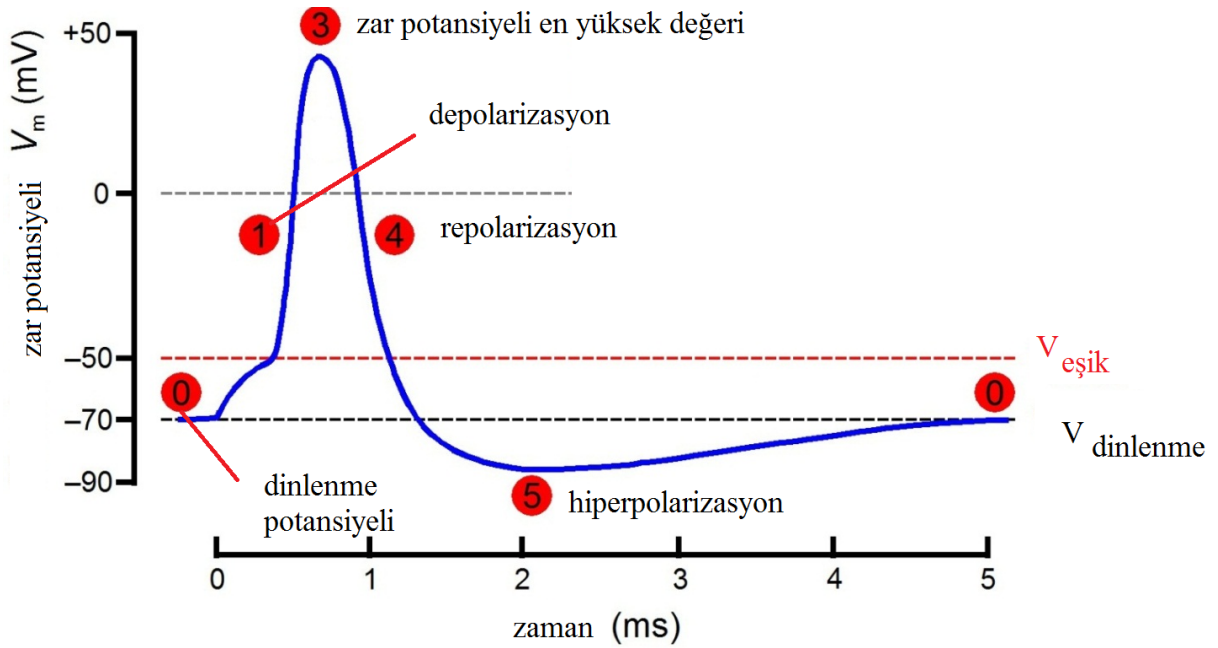
Bir aksiyon potansiyeli, voltaj kapılı katyon kanallarının ardışık açılmasından ve kapanmasından kaynaklanır. İlk olarak, Na^+ kanallarının açılması yaklaşık 1 ms için Na^+ iyonlarının akmasına izin verir ve bu da hücre zarının depolarizasyonuna neden olur. Kanal daha sonra Na^+ akışını engelleyerek birkaç milisaniye için kapanır ve kapatılamaz hale gelir

K^+ kanallarının aksiyon potansiyeli olarak açılması, başlangıçta hücre zarını hiperpolarize eden K^+ iyonlarının en yüksek akış seviyesine ulaşmasına neden olur. Bu kanallar kapanırken, zar dinlenme potansiyeline geri döner. Bir akson boyunca bir noktada oluşturulan bir aksiyon potansiyeli ile ilişkili depolarizasyon, bitişik segmente pasif olarak yayılır, burada voltaj kapılı Na^+ kanallarının açılmasına neden olur ve dolayısıyla başka bir eylem potansiyelini tetikler. Aksiyon potansiyelinin yayılması, sadece Na^+ kanallarının kısa inaktif periyodu ve K^+ akışından kaynaklanan kısa hiperpolarizasyon nedeniyle bir yönde gerçekleşir. Kalın nöronlar impuls iletimini ince olanlardan daha hızlı yaparlar. Miyelinasyon, impuls iletiminin oranını yüz katına kadar artırır. Miyelinli nöronlarda, voltaj-kapılı Na^+ kanalları ranvier

düğümünde yoğunlaşmaktadır. Bir düğümdeki depolarizasyon, bir sonraki düğüme hızla yayılır, böylece aksiyon potansiyeli, düğümünden düğüme atlar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Ranvier düğümlerindeki aksiyon potansiyeli rejenerasyonu [6].



Şekil 3.7: Aksiyon potansiyelinin zamanla değişimi.

Hücre dışından içinde giren yüklü iyonların oluşturduğu ilk potansiyel etkileşimi ile hücre zarı üzerinde bir sonraki noktada da farklı bir aksiyon potansiyeli oluşur. Bu potansiyel meydana geldikten sonra nöronun akson bölgesinde peş peşe devam eder. Sonuç olarak, bilgi iletimi potansiyellerin peş peşe tekrarlaması sayesinde olmaktadır.

3.2. NÖRONLARIN ELEKTRONİK GEÇMİŞİ

Canlıların davranışlarını anlayabilmek ve bu davranışlar gerçekleştirebilecek yapay modeller geliştirmek için öncelikle sinir sisteminin temel yapıtaşı olarak görülebilecek nöronları modellemek, hücre zarı üzerinde oluşan iyon akışlarının matematiksel modellerini oluşturmak, nöronların çalışma mekanizmalarına benzer mekanizmalar oluşturarak taklit devreleri ile bu sistemlerin benzetimini yapmak ve insan beyninin çalışma şeklini kavrayabilmek için farklı türde nöron tipleri modellenmiş ve matematiksel denklemleri literatüre sunulmuştur. Mc Cullach ve Pitts tarafından 1943'te literatüre sunulan klasik nöron modelinde, nöronların çalışma şekillerinin “ya hep ya hiç” ilkesine dayandığı, nörolojik sistemlerde oluşan sistemsel en önemli gecikmenin sinaptik gecikmeler olduğu, hücre zarı yapısının zamanla değişime uğramadığı gibi çalışmalarda ciddi kolaylıklar sağlayacak önemli fiziksel durumlar kabul edilmiştir [7]. Bu kabullerin elde edildiği nöron modeli esas alınarak farklı modeller literatüre sunulmuş ve bu alanda çalışmaları hızlandırmıştır. 1952'de sunulan Hudgkin Huxley [HH] nöron modeli bu çalışmalardan en önemlilerinden biri olup, nörolojik çalışmalara büyük katkı sağlamıştır [8]. Hodgkin –Huxley nöron modeli sonrasında yapılan çalışmalardan ilklerinde biri de HH modelinden bağımsız bir şekilde tasarlanılarak, sunulan FitzHugh-Nagumo nöron modelidir. Bu model daha az elemanla yapılmış ancak sistem dışarıdan bir akım kaynağı ile tasarlanmıştır [9]. 70'li yılların başlarında matematiksel denklemler ile ifade edilerek sunulan nöron modelleri tanımlanmış olup Nagumo ve Sato lineer olmayan denklemleri bunlardan biridir [10]. 1981'de matematiksel yöntemlerle ifade edilen ancak kondüktans temelli Moris-Lecar modeli tanıtılmıştır. [11]

Daha önce yapılan matematiksel tanımlamalarda 2 adet boyutsuz matematiksel ifade ile temsil edilen nöron modellerine 1984 yılında Hindmarsh-Rose modeli 3 adet birinci mertebeden diferansiyel denklem ile farklı bir tasarım sunmuştur [12]. Daha sonra bu çalışma elektronik alt yapı ile simüle edilerek faaliyete geçirilmiştir [19]. Integrate and-Fire, Integrate-and-Fire with Adapt gibi benzer olarak sunulan nöron yapıları oldukça fazla akademik çalışmanın temelini oluşturarak bu alanda çalışma yapan araştırmacılara referans olmuştur [13].

Izhikevich nöron modeli 2003 yılında literatüre sunulmuştur [14]. Nöron tabanlı yapılan çalışmalarda nöronların farklı frekanslarda farklı çıkışlara sahip olması ve birden fazla çıkış parametresi oluşturması bakımından her devrenin uygunluk sağlayabileceği farklı yapılar olduğu söylenebilir. Örnek vermek gerekirse hesaplama bakımından göz önüne alındığında integrate and fire nöron modeli daha avantajlı olmasına rağmen, çıkış parametreleri incelendiğinde hudgkin- huxley modeli, integrate and fire modelinden daha fazla nöron davranışı sergilemektedir.

İnsan vücudunda bulunan, canlının yapıtaşı olan hücrelerin ürettiği sinyalleri fiziksel anlamda ölçmek ancak özel laboratuvar koşulları sağlanması durumunda mümkün kılınmaktadır. Yapılan çalışmalar çoğunlukla matematiksel ifadeler ile temsil edilmiş olup fiziksel olarak bu çalışmaları modellemek oldukça fazla önem arz etmektedir. Bu bağlamda nöronların taklit devreleri ile bu sistemleri inceleme olanağı artmaktadır ve bu sistemleri meydana getirecek farklı elektronik donanım elemanları sunulmuştur. Sunulan veriler üzerinden gelişmeler de devam etmektedir [15, 16]. Matematiksel ifadeler tabanlı olarak literatürde bulunan farklı nöron modellerini taklit yeteğine sahip fiziksel olarak gerçekleştirilmiş devrelerden bazıları aşağıdaki gibidir;

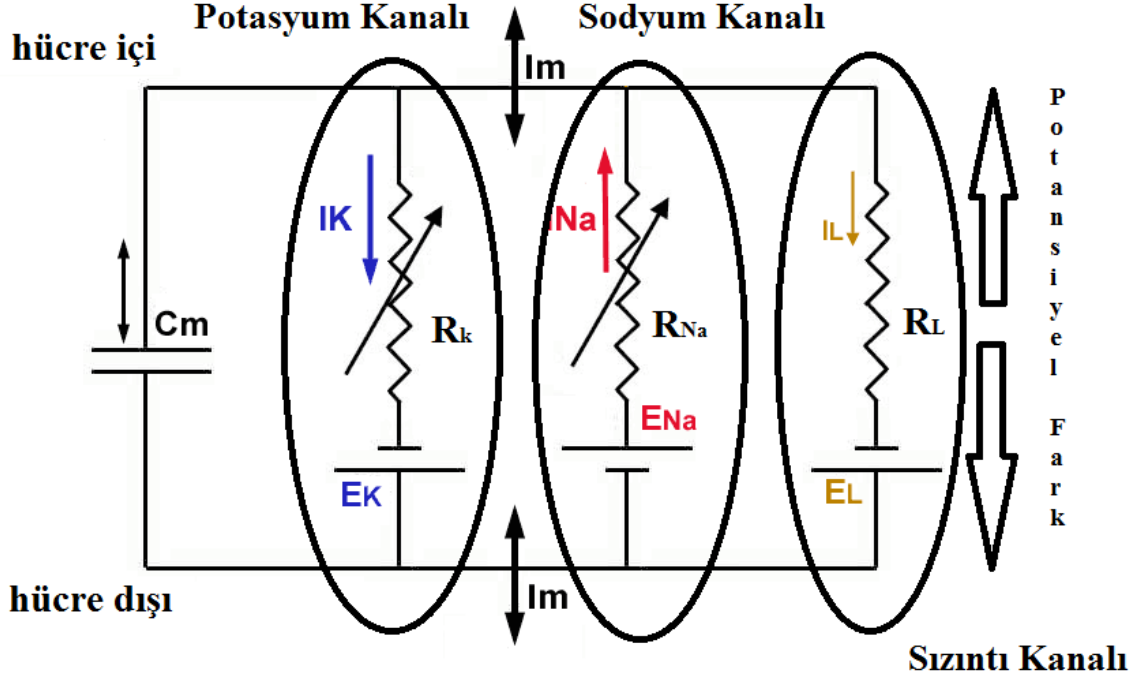
- 1- Hodgkin Huxley Modeli.
- 2- Integrate ve Fire Modeli
- 3- Hindmarsh-Rose Nöron Modeli
- 4- Wijekoon –Dudek Modeli

Seçilen bu devreler, uygulanabilirliği ve nöron davranışı göstermesi bakımında en avantajlı devre yapılarıdır. Bu çalışmada kullanılan nöron modeli ile kıyaslamaları çalışma içerisinde yapılarak sunulmuştur.

3.2.1. Hodgkin Huxley Modeli

Bu yapıda, sinir hücresi uzantılarındaki aksiyon potansiyelinin oluşmasındaki ve sürdürülmesindeki yapı iyonik bir sistemle açıklanmıştır. Hücre zarı üzerinde oluşan elektriksel akımın iyonik yapılar arasındaki akış sebebi ile oluşmuş olduğunu ve bu sistemin

detaylı ve açıklayıcı bir model olması sebebi ile modelin bağlı olduğu çok fazla sayıda değişken bulunmaktadır.



Şekil 3.8: Hodgkin-Huxley modeline göre hücre zarının elektriksel modeli [17].

Nöron yapısının elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3.8’de sunulmuştur. Hücre zarı üzerinde oluşan iyonik akımlar, bataryalar ve paralel iletkenlikler ile temsil edilmektedir. Sistemin üzerinde durulan özelliği olan aksiyon potansiyelinin meydana gelmesinde etkin rol oynayan 3 iyon etkisi bulunmaktadır. Bu iyonlar sodyum, potasyum ve klorürdür. Bu iyonlar hücre zarı proteini olarak adlandırılan proteinlerden oluşmuş kanallar arasında içeri ve dışarı hareket etmektedirler. Kanallar üzerinde oluşan gerilim durumuna bağlı olarak bu kanallar açık veya kapalı durumda bulunabilirler.

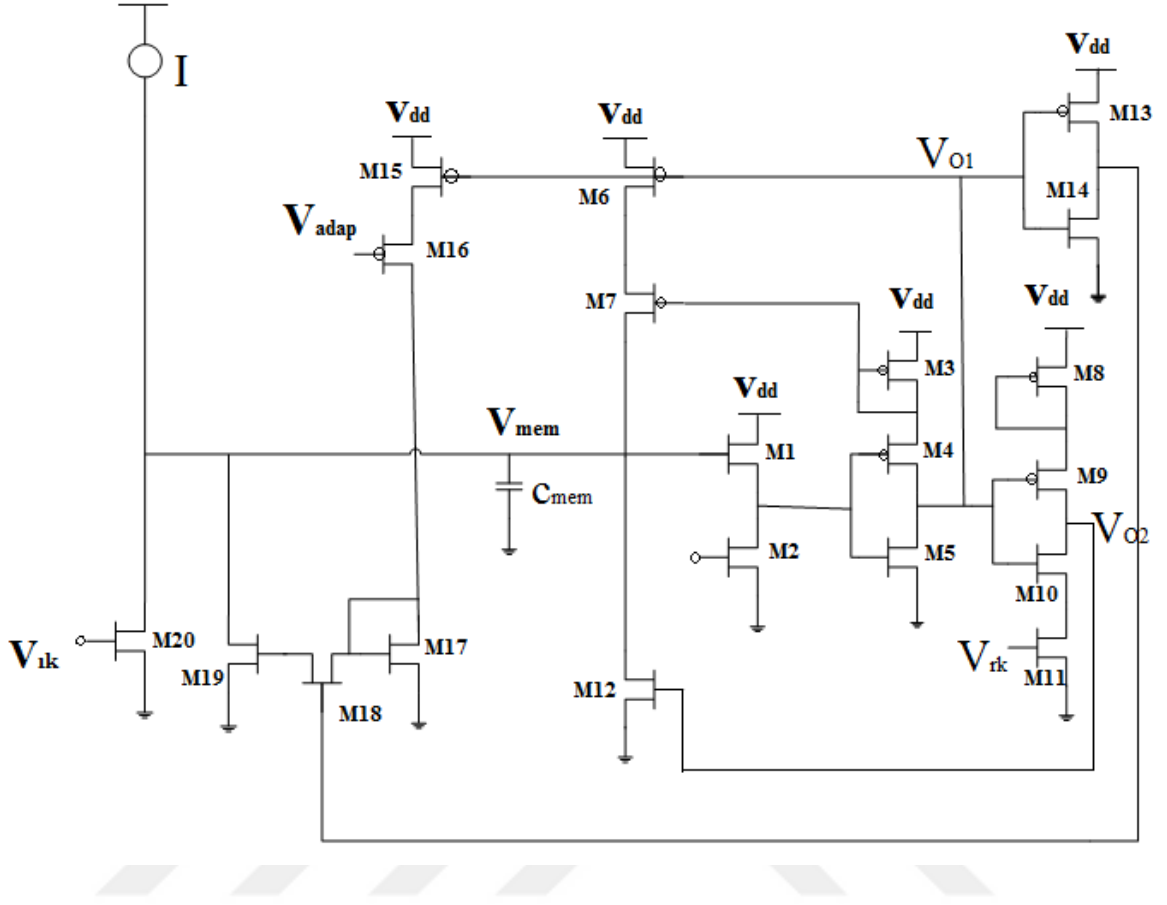
Sistemde bulunan her bir iyonun sahip olduğu iletkenlik değeri, o iyonun sahip olduğu kanalların ne kadar açık veya kapalı olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca hareket eden bu iyonların içeride ve dışarda yoğunlukları farklı olması sebebi ile her kanal kendi içinde Şekil 3.8’de tanımlanmış olan batarya şeklinde ifade edilmiş bir denge potansiyeli bulunmaktadır. Hücre zarı geriliminin bu üç iyondan birinin denge potansiyeli ile aynı olması durumunda, o iyonun sahip olduğu hücre içinden veya dışından hareket eden iyon akımı sıfıra eşit

olmaktadır. Bu uygulamada C_m hücre zarı kapasitansını ifade etmektedir ve değeri $1\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ye yakın değerlerdedir. Sodyum, potasyum ve sızıntı iletkenlikleri R_{Na} , R_K ve R_L ile ifade edilmiş olup, E_{Na} , E_K ve E_L ise sodyum, potasyum ve sızıntı denge potansiyellerini göstermektedir. Bu değerler $E_{Na}=50\text{mV}$, $E_K=-77\text{mV}$ ve $E_L=-54.4\text{mV}$ şeklindedir.

3.2.2. Integrate Ve Fire Modeli

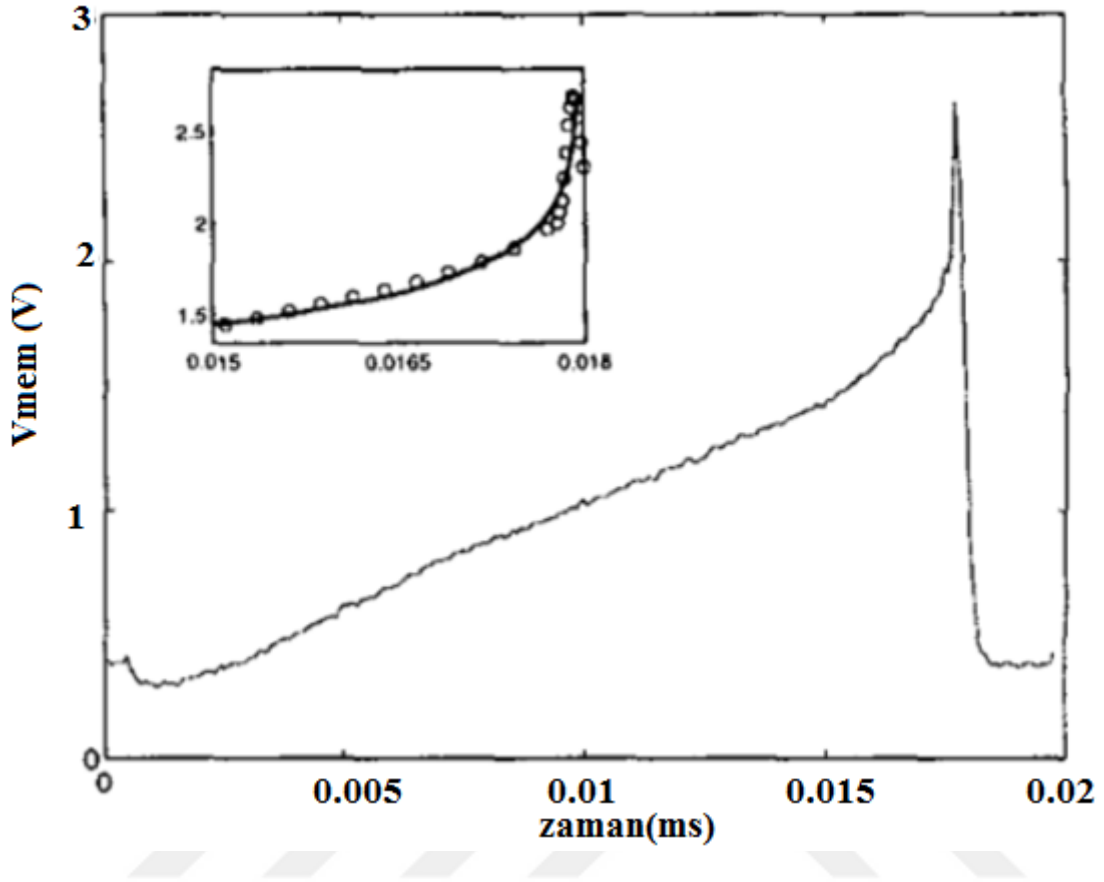
Integrate ve fire nöronlarının modellerini uygulayan nöromorfik devreler, yavaşça değişen analog voltajlardan hızlı dijital darbeler ürettiklerinden doğuştan karma modlu devrelerdir.

Integrate ve fire (I&F) devreleri tipik olarak bir eşik değerine ulaşılan kadar küçük akımları bir kapasitör üzerine entegre eder. Kondansatör üzerindeki voltaj eşik değerini aştığından, bir spike veya olayın meydana gelme durumunu bildirmek için hızlı bir dijital sinyal üretilir ve kapasitör sıfırlanır. Bu devreler genel olarak büyük dizilere, spike nöronların ağlarını uygulayan nöromorfik cihazlara veya diğer nöromorfik işleme elemanlarına duyusal sinyalleri iletmek için aksiyon potansiyeli (spike) davranışı gösteren elemanlar kullanır.



Şekil 3.9: Integrate ve fire nöron devre şeması [18].

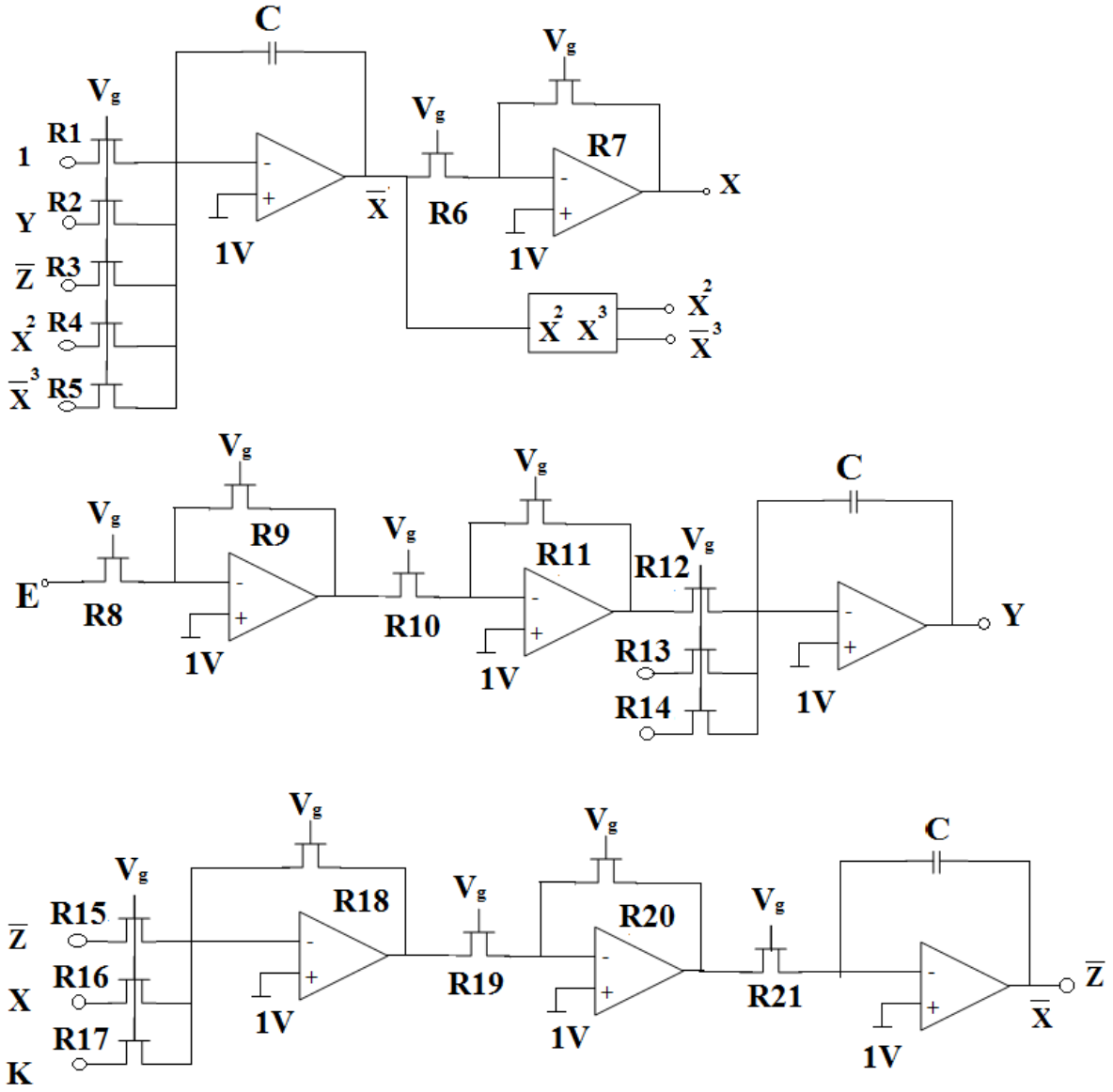
Sızıntılı I & F nöron modelini uygulayan düşük güç devresi Şekil 3.9' da gösterilmiştir. Yirmi transistör ve bir (açık) kapasitörden oluşur. V_{O2} ve V_{ca} düğümlerinde iki ek kapalı kondansatör kullanılmaktadır. Devre altı ana blokta alt bölümlere ayrılabilir: lineer entegrasyon aralığını arttırmak ve nöronun eski voltajını modüle etmek için bir kaynak takipçisi M1-M2; pozitif geri besleme M3-M7 ile bir invertör, girişteki kısa devre akımlarını azaltmak için; için kontrol edilebilir slew rate ile bir invertör M8-M11; bir spike oluşumuna işaret eden hızlı dijital darbeyi üretmek için M13- M14 dijital invertörü; ani frekans uyarlama mekanizmasının uygulanması için bir geçici akım-aynası entegratörü M15-M19 ve sabit bir sızıntı akımı uygulamak için minimum boyut bir transistör; M20.



Şekil 3.10: Bir aksiyon potansiyelinin şeklini gösteren ölçüm verileri [18].

3.2.3. Hindmarsh-Rose Nöron Modeli

Bu model, büyük donanım boyutlarında da ve önemli seviyede güç tüketimi olan ayırık devre elemanları kullanılarak tasarlanmıştır. Hindmarsh Rose nöron devresi ile hassas ve düşük güçlü bir VLSI uygulaması sunulmaktadır. Bu devre ile elektronik nöronların çıkış patlamaları değişen giriş voltajı seviyeleri ile dinamik olarak modüle edilebilir.



Şekil 3.11: Hindmarsh-Rose Nöron Devresi [19].

$$\frac{dx}{dt} = y - ax^3 + bx^2 - z + I \quad (3.1)$$

$$\frac{dy}{dt} = c - dx^2 - y \quad (3.2)$$

$$\frac{dz}{dt} = r (s (x - x_1) - z) \quad (3.3)$$

X: Zar potansiyeli

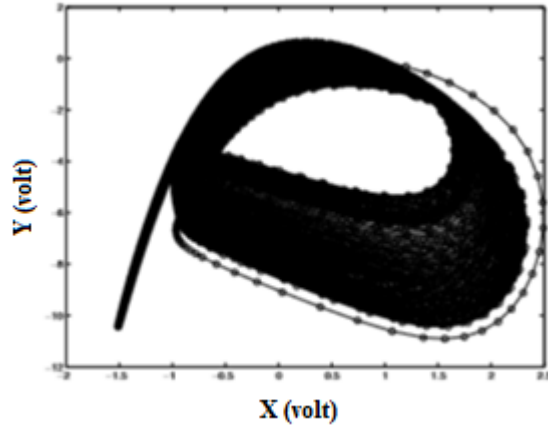
Y: Nöronun geri dönüş akımı

Z: Nöronun adaptasyon akımı

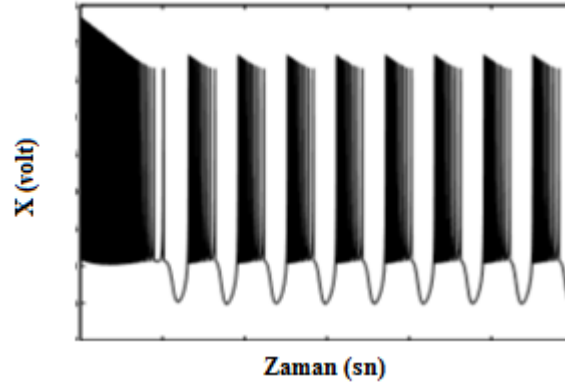
I: Uygulanan akım

X_1 : Adaptasyon olmaksızın nöron modelinin en sol denge noktası

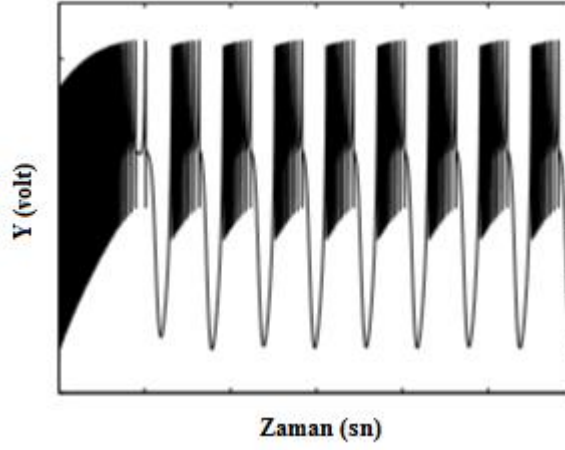
Verilen katsayılı denklemler, biyolojik nöronun aksiyon potansiyelinin davranışını tanımlamak için kullanılır. Bu davranışsal simülasyon, elektronik nöron devresini tasarlamak için bir referans sağlar.



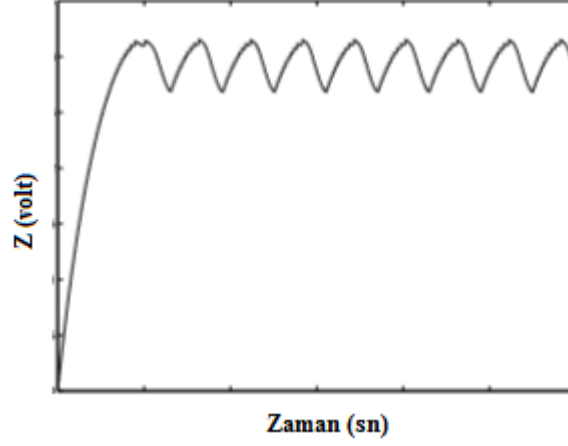
Şekil 3.12: Faz düzlemi [19].



Şekil 3.13: $X(t)$; X değişkeni [19].



Şekil 3.14: $Y(t)$; Y değişkeni [19].



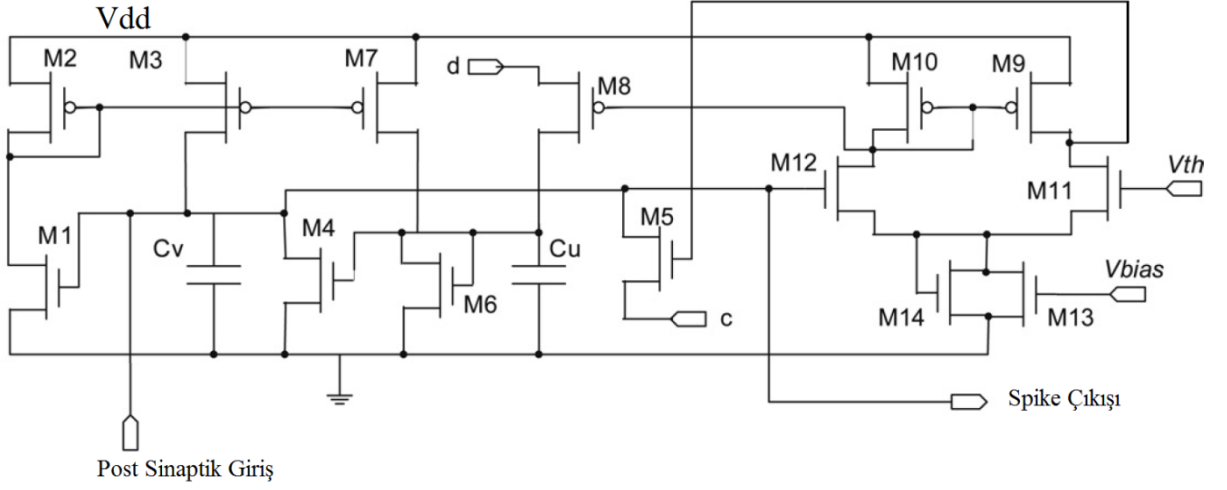
Şekil 3.15: $Z(t)$; Z değişkeni [19].

Nöron devresinin tasarlanmasındaki ana konular, adaptif otonom robot kontrolörün batarya çalışması nedeniyle alan ve güç tüketimidir. Elektronik nöron devresi birkaç entegratörden oluştuğu için, düşük güç operasyonel amplifikatörlerine kuvvetle ihtiyaç duyulmaktadır. Akım kaynağı, opampın eşik altı çalışmasına izin vermek için eşik altı bölgesinde eğilimlidir.

Elektronik nöron gerçek zaman uyumluluk ile gerçek biyolojik nöronların davranışını taklit edebiliyor. Nöron devresi için her yapı bloğu, düşük güç ve küçük silikon alanı için tasarlanmıştır. Simüle edilmiş sonuçlar elektronik nöronun çıkış patlamasının farklı giriş seviyeleri için dinamik olarak değiştiğini göstermektedir. Bu nöron devresi, otonom robotlar için adaptif bir analog kontrolör oluşturmak için kullanılmaktadır.

3.2.4. Wijekoon –Dudek Modeli

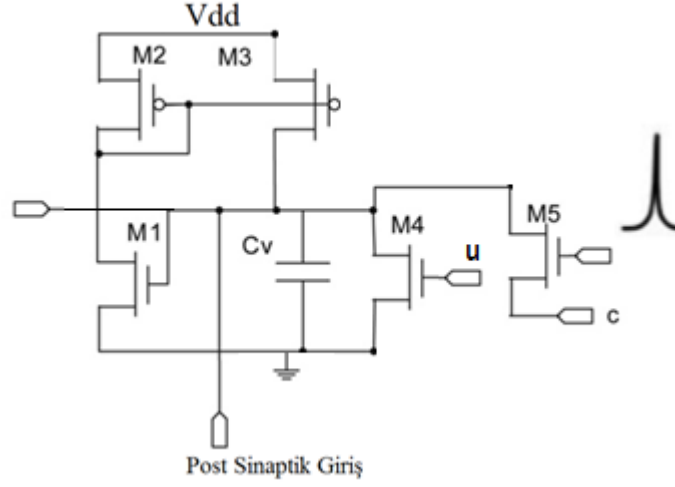
Bu modelde, sadece 14 MOSFET kullanarak, kortikal nöronların spike ve bursting fire modellerini yeniden üreten yeni bir analog VLSI devresi sunulmaktadır. Tek bir silikon çipte birçok nöronun uygulanmasına olanak verirken, sadece ön gerilim voltajını ayarlayarak farklı salınım yapan nöron davranışlarının elde edilmesinde esneklik sağlar. MOS transistörlerin doğrusal olmayan karakteristiklerinden faydalanılır. Devrenin verdiği aksiyon potansiyeli (spike) şekli ile devre gerçek sinapslara benzemektedir.



Şekil 3.16: Wijekoon-Dudek Nöron Modeli [20].

Wijekoon Dudek nöron modeli model şekil 3.16’da sunulmuştur. Uygulanan modeli, C_v ve C_u kapasitörleri arasındaki gerilimler ile iki durum değişkeni temsil eder. Biri zar potansiyel (V) diğeri düşük değer (U) dur. [20]. Bu iki durum değişkeni V_1 ve V_2 parametreleriyle kontrol edilerek spike davranışları ve patlama çeşitliliği elde etmek için kullanılır.

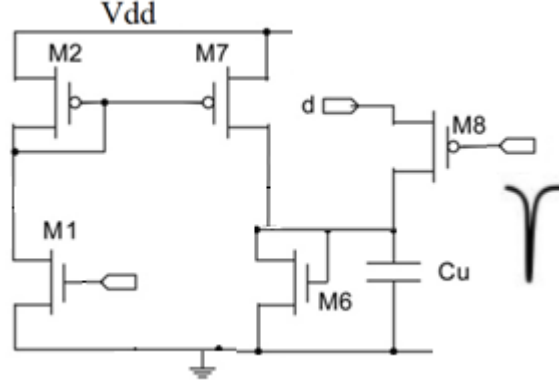
Devre 3 fonksiyonel bloktan oluşur. Uyarıcı zar potansiyeli ve zar potansiyeline ait resetleme yapısı, (M_1 - M_5), yavaş değişken yapı ve yavaş değişken devresine ait resetleme devresi (M_1 - M_2 , ve M_6 - M_8) ve karşılaştırma devresidir(M_9 - M_{14}).



Şekil 3.17: Zar Potansiyeli Devresi [20].

Şekil 3.17’ de verilen zar potansiyeli devresinde gerilim V , post sinaptik giriş akımı tarafından sağlanan akım (kapasitör C_v üzerinde) entegrasyonu ile elde edilir. Transistör M_3 tarafından sağlanan artı zar potansiyelinin fonksiyon alanı ve üretilen spike ile geri bildirim sağlar. Transistör M_4 tarafından çizilen eksi akım, hem yavaş değişken U ile hemde zar potansiyeli V ile ilişkilidir.

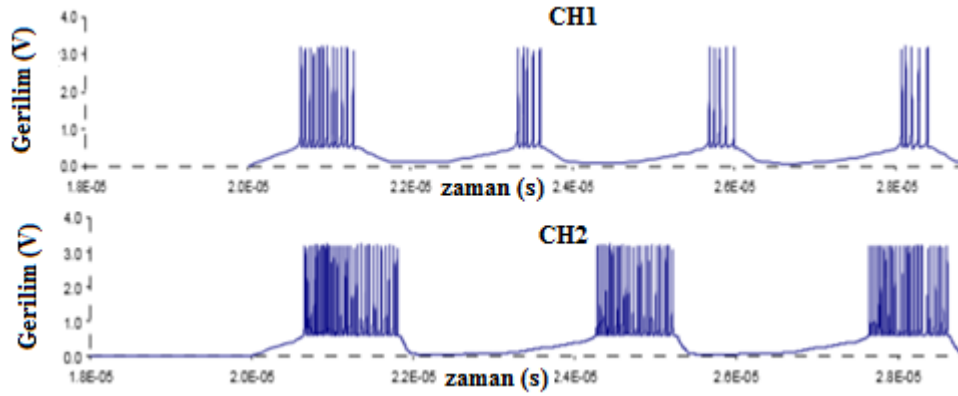
Zar potansiyeli V_{th} eşik gerilimine ulaştığında, karşılaştırmacı devre, c noktasındaki gerilim tarafından belirlenen değerde M_5 tranzistörü ile zar potansiyelini sıfırlayan bir darbe üretir. [20]



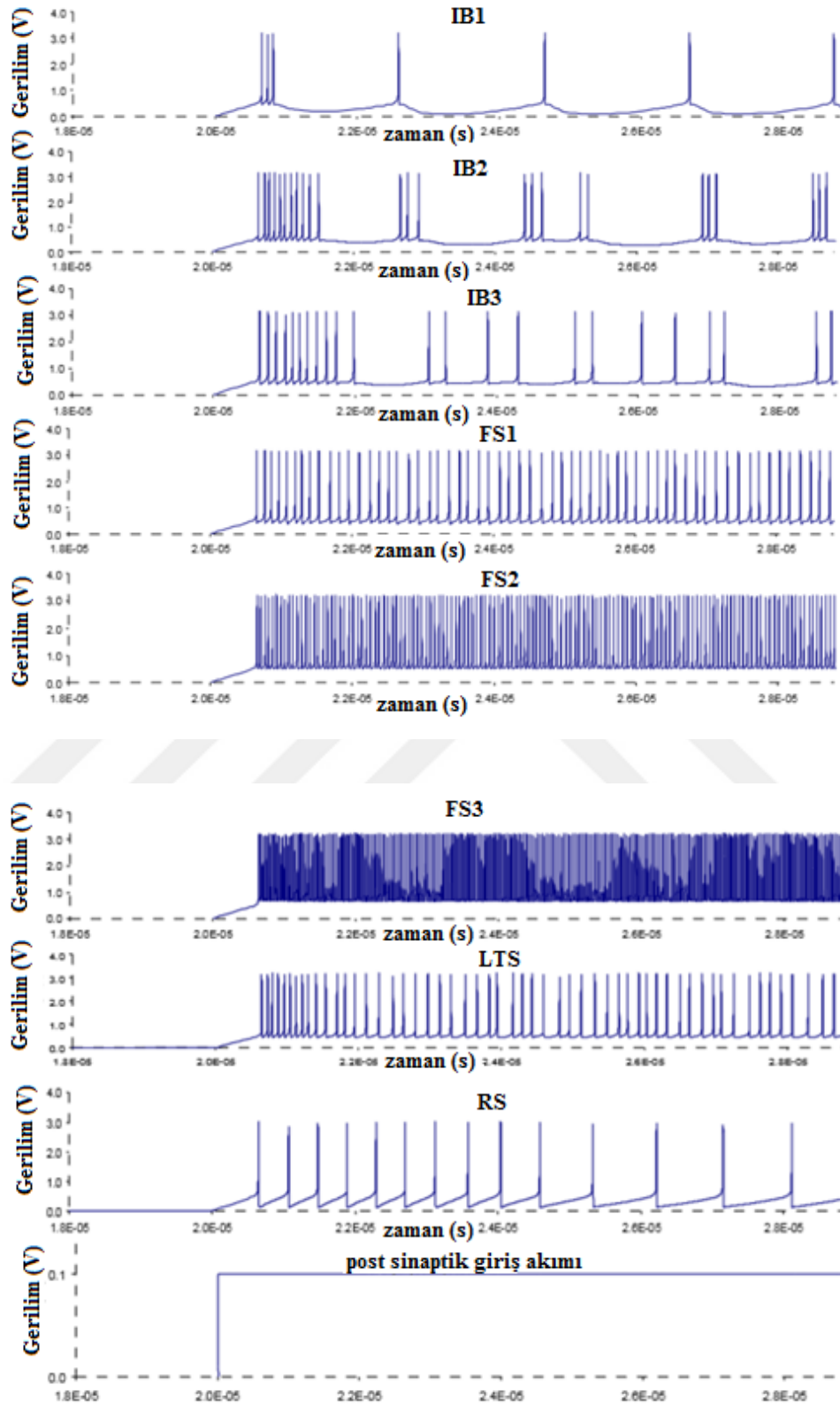
Şekil 3.18: Yavaş değişken devresi [20].

Şekil 3.18’ de verilen yavaş değişken potansiyel devresidir. Gerilim U , M7 tarafından sağlanan akımın (zar potansiyeli fonksiyon alanı) M6 tarafından çizilen eksi akım (yavaş değişken potansiyeli kendisinin de bir fonksiyonudur.) entegrasyonu ile kapasitör C_v üzerinde elde edilir.

Zar potansiyeli salınımı sırasında karşılaştırmacı çıkış bir darbe üretir. Sonuç olarak yavaş değişken potansiyeli M8 ile ekstra yük miktarı artırılır. Artış miktarı d noktasındaki gerilim tarafından belirlenir.



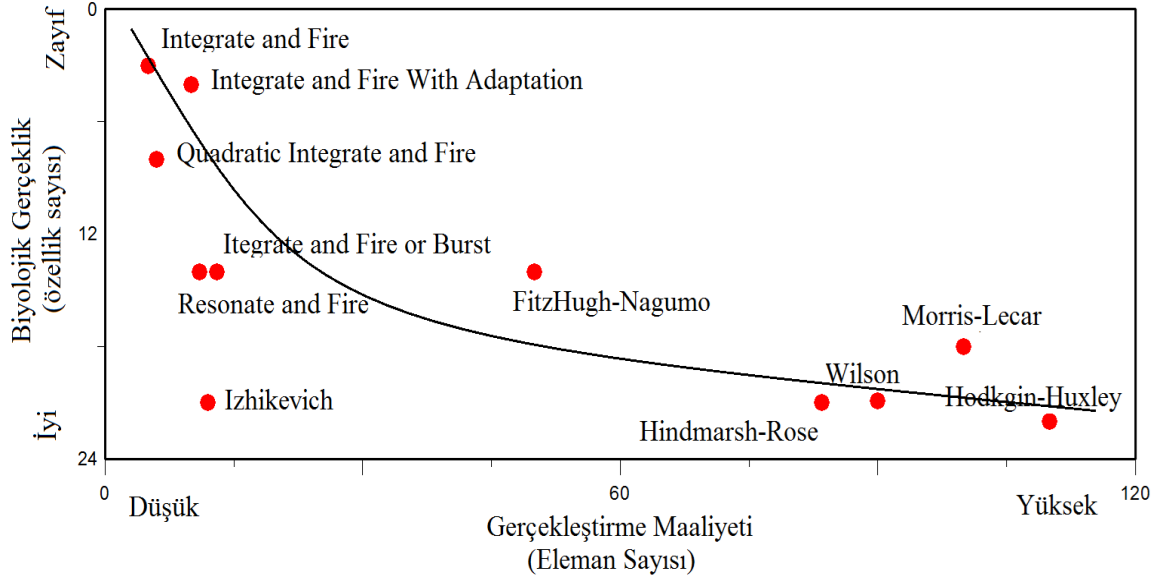
Şekil 3.19: CH, IB, FS, LTS ve RS nöron yanıtları. (Her bölge, önerilen devrenin bir $I = 0.1\mu A$ adımına göre voltaj cevabını gösterir [20].)



Şekil 3.19 (devam): CH, IB, FS, LTS ve RS nöron yanıtları. (Her bölge, önerilen devrenin bir $I = 0.1\mu A$ adımına göre voltaj cevabını gösterir [20].)

3.3. ÖNERİLEN MODELLERİN KIYASLAMASI

Nöron çalışmaları yapılırken üzerinde durulması gereken birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden en fazla uygun özelliği gösteren yapı ideale en yakın yapı olarak düşünülebilir. Ancak şekil incelendiğinde birçok parametreyi sağlayan yapıların daha kompleks oldukları, daha fazla elemanla gerçekleştirildikleri görülmektedir. Fakat nöron çalışmalarında asıl üzerinde durulması gereken konu da daha fazla özelliği daha sade bir devre ile elde edebilmektir. Bu da yoğun çalışmalar gerektiren ciddi bir çalışma anlamına gelmektedir. Nöron modelleri sağlamış oldukları nöron özellikleri ve maliyetleri açısından yapılmış analiz Şekil 3.20 'de verilmektedir.



Şekil 3.20: Nöron modellerinin performans durumları [17].

Nöronlar birbirleri ile karşılaştırılırken, devrenin sade olmasının öneminin yanında üzerinde en fazla durulan konulardan biride elde edilen spike türlerinin çeşitliliğidir. Tablo 3.1 'de önerilen nöron devreleri kullanılan transistör sayısı, güç tüketimi ve elde edilen spike türleri açısından kıyaslanmaktadır.

Tablo 3.1: Nöron Modellerinin kıyaslama tablosu [3].

Nöron Modeli	Kullanılan Transistor Sayısı	Spike Türü	Tüketilen Güç (μW)
Integrate-ve-fire	18–20	Simple spiking	0.3–1.5
Morris–Lecar	22	Oscillatory	-
Hindmarsh–Rose	90	Bursting (CH)	163.4
Wijekoon–Dudek	14	Tüm Çeşitler	8–40
<i>1 memristor</i>			
<i>Kullanılacak olan nöron devresi</i>	+	Tüm Çeşitler	60–110*
	<i>3 transistor</i>		

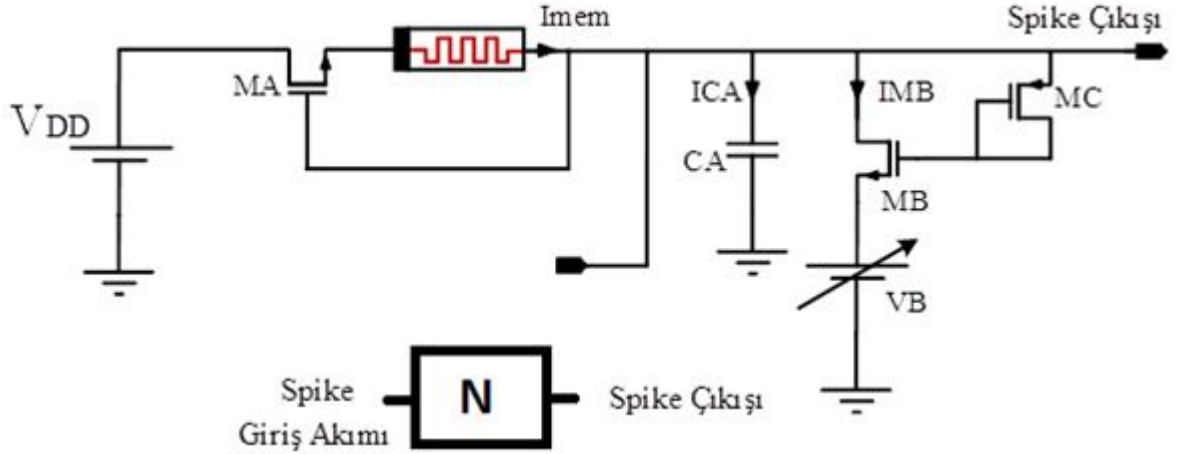
*Güç tüketiminin fazla çıkması memristör taklit devresinin farklı elemanlardan oluşmasından kaynaklanmaktadır. Fiziksel olarak gerçekleştirilen bir memristör kullanıldığı zaman güç tüketiminin çok daha az olacağı öngörülmektedir.

4. BULGULAR

4.1. ÖNERİLEN NÖRON DEVRESİ

Kullanılacak olan nöron devresi, biyolojik olarak gerçekçi bir spike şekli sağlayan ve dışarıdan verilecek olan harici bir akım çıkışta oluşabilecek tüm spike şekillerini elde edebileceğimiz bir nöron devresidir.

Kullanılacak olan nöron devresi, memristör tabanlı bir devre olup kompakt nöromorfik uygulamalarda, memristörün non-linear çalışma özelliği sayesinde ideal bir devre olma özelliği göstermektedir. Şekil 4.1' de verilen nöron devresinde 1 memristör 1 kapasitör ve 3 transistör kullanılmakta olup bir sinaps tarafından harici bir giriş akımı sağlamaktadır.



Şekil 4.1: Memristör tabanlı nöron devresi [3].

Post sinaptik giriş akımı, CA kondansatörü ile doğrusal olarak çalışmaktadır. MA, MB ve MC, CA voltajıyla sürülür. Kapasitör voltajı MA' nın eşik voltajından daha büyük olduğunda, akım, VDD' den memristöre doğru akar. MC transistörü yüksek direnç olarak hareket eder ve MB transistörünü çalıştırır. CA kondansatörü MB transistörü ile boşalır. VB voltaj kaynağını değiştirerek MB transistörünün VGS ve VDS' lerini ayarlayabiliriz.

Kullanılan transistör akım denklemleri;

$$I_{DS} = 0, \quad |V_{GS}| < |V_T| \quad \text{ise} \quad (\text{kesim bölgesi}) \quad (4.1)$$

$$I_{DS} = \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) ((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2) \quad (4.2)$$

$$|V_{GS}| > |V_T| \text{ ve } |V_{DS}| < |V_{GS} - V_T| \quad \text{iken} \quad (\text{lineer bölge}) \quad (4.3)$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T)^2 \quad (4.4)$$

$$|V_{GS}| > |V_T| \text{ ve } |V_{DS}| \geq |V_{GS} - V_T| \quad \text{iken} \quad (\text{doyum bölgesinde}) \quad (4.5)$$

I_{DS} ; MOS transistörün drain akımı,

V_{GS} ; Gate ile source arasındaki gerilimi,

V_T ; Eşik gerilimi,

μ ; Taşıyıcıların hareket yeteneği

C_{ox} ; Oksit kapasitesi,

V_{DS} ; Drain ile source arasındaki gerilim

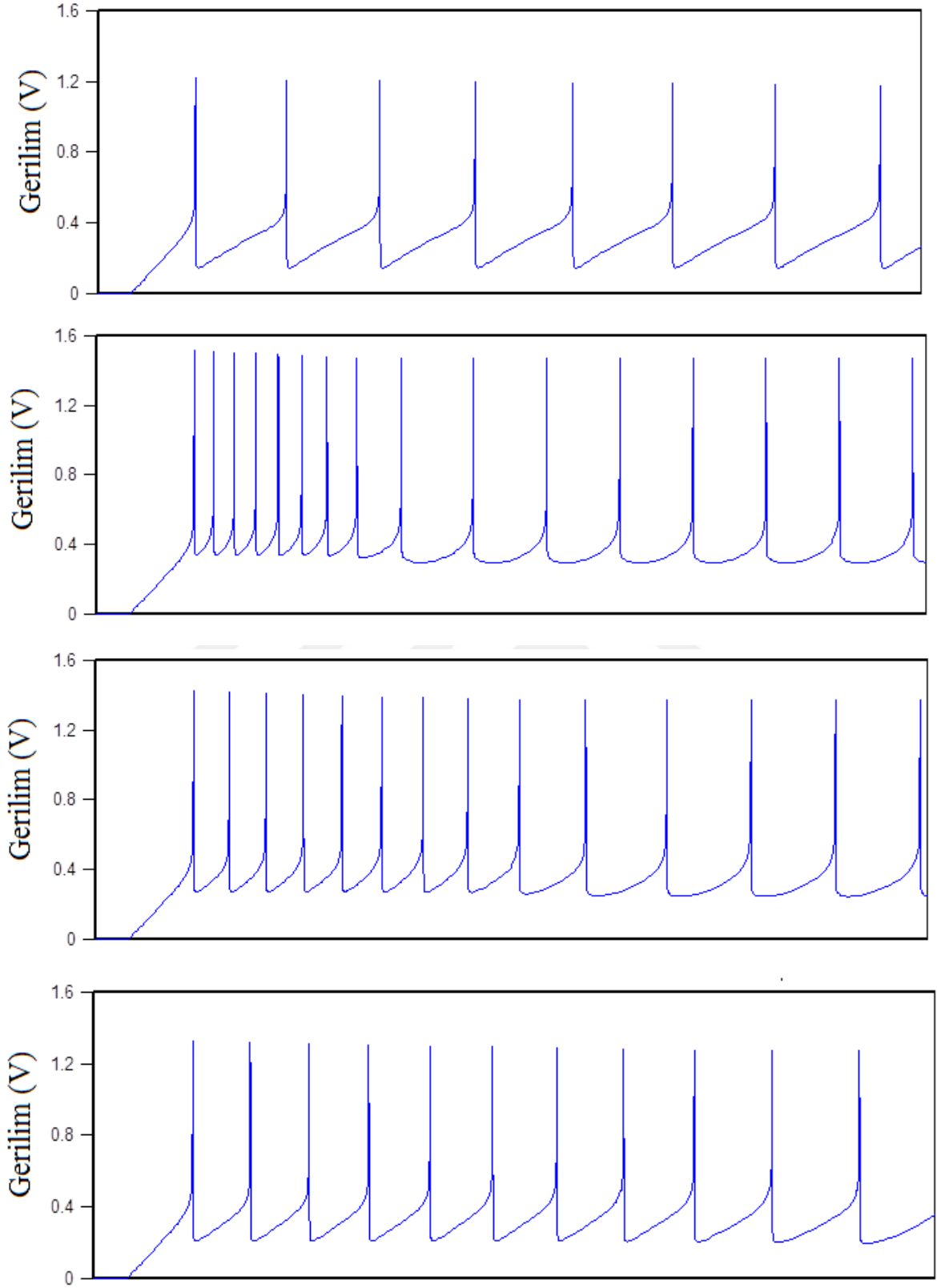
$$I_{mem} + I_{synaptic \text{ giriş}} = I_{CA} + I_{MB} \quad (4.6)$$

$$I_{CA} = C_A \frac{dV_{CA}}{dt} = I_{mem} + I_{sinaptik \text{ giriş}} - I_{MB} \quad (4.7)$$

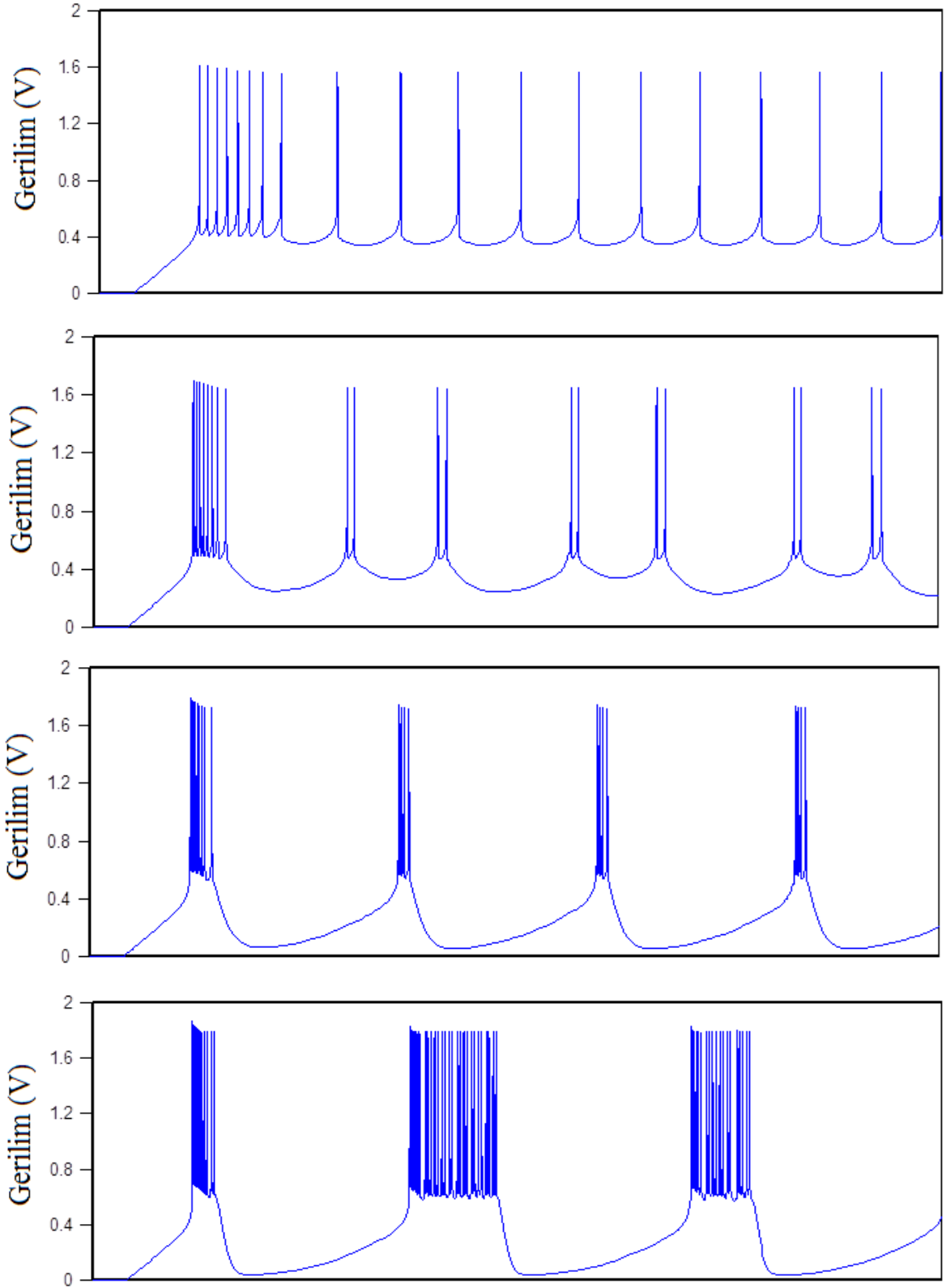
V_{CA} gerilim değeri V_T gerilim değerinden büyük olursa I_{mem} değeri 0'dan büyük olur. Veya V_{CA} değeri V_T eşik gerilimi değerinden küçük olursa, I_{mem} değeri kaçak akım nedeniyle 0'dan küçük olur.

$$V_{CA} \leq V_T, \quad I_{mem} < 0 \quad (4.8)$$

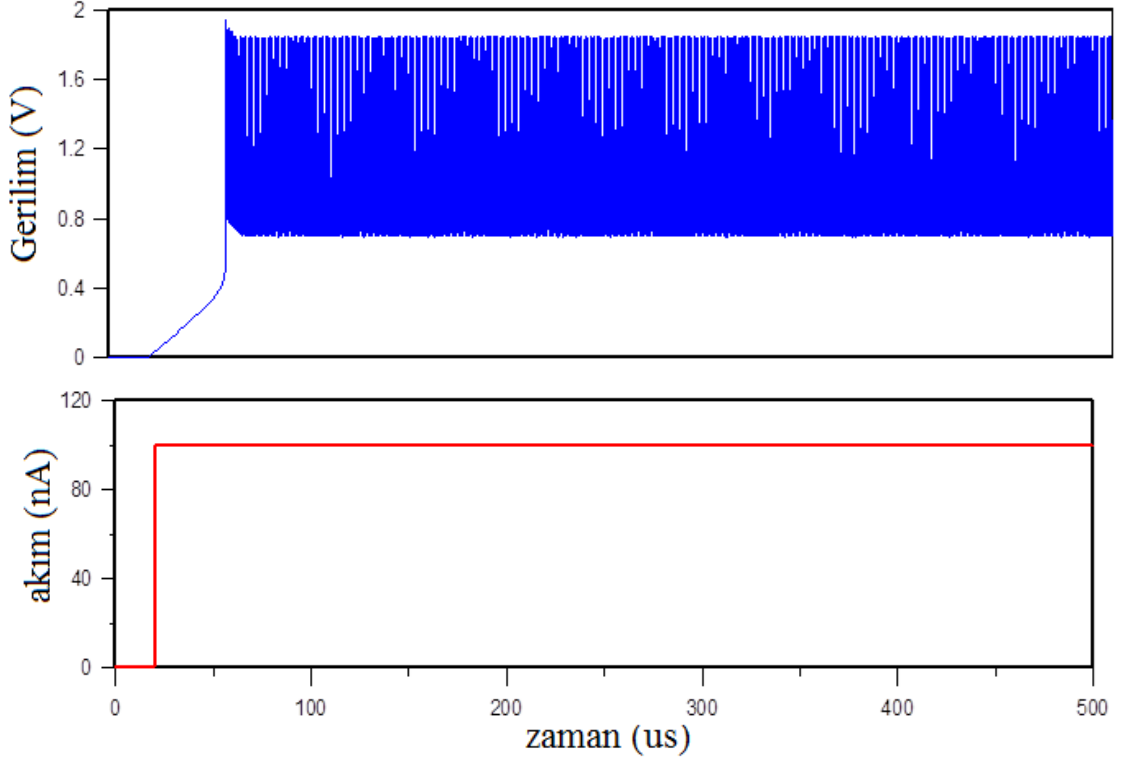
Yukarıdaki denklemlerden, V_B voltaj kaynağı M_B transistörünün V_{GS} ve V_{DS} voltajlarını etkiler. Sonuç olarak, V_B 'yi değiştirerek devrenin çıkış karakteristiğini ayarlayabiliriz.



Şekil 4.2: Önerilen devrenin gerilim tepkileri, VB voltaj kaynağının 0.05V'luk adım gerilimleri ile 0,1V'dan 0,5V'a değiştirilmesiyle elde edilir. Alt eğri DC giriş akımını gösterir. [3].

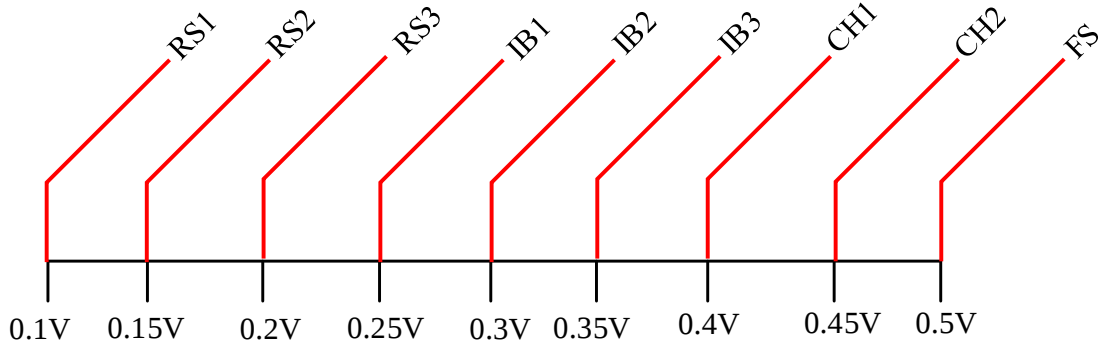


Şekil 4.2 (devam): Önerilen devrenin gerilim tepkileri, VB voltaj kaynağının 0,05 V'luk adım gerilimleri ile 0,1V'dan 0,5V'a değiştirilmesiyle elde edilir. Alt eğri DC giriş akımını gösterir. [3].



Şekil 4.2 (devam): Önerilen devrenin gerilim tepkileri, VB voltaj kaynağının 0,05 V'luk adım gerilimleri ile 0,1V'dan 0,5V'a değiştirilmesiyle elde edilir. Alt eğri DC giriş akımını gösterir. [3].

Bu devre, sadece bir parametre kullanarak farklı şekillerde spiking ve bursting özellikleri üretebilmektedir. (Şekil 4.2) Bu devrede, VB voltaj kaynağının ayarlanması ile düzenli spike (RS), gerçek bursting (IB), chattering ve hızlı spiking gibi spike şekilleri elde edilebilir. Post sinaptik giriş akımı değeri 100 nA ve maksimum çıkış voltajı 2V' dir. V_B voltaj kaynağı 0,1V' dan 0,5V' a değişir. Regular spike denilen düzenli spikeler, VB voltaj kaynağının daha düşük değerleri ile elde edilir, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi VB voltaj kaynağının daha yüksek değerlerinde ise hızlı spike şekilleri elde edilir. (Şekil 4.3)



Şekil 4.3: V_B parametresinin değişimi ile elde edilen spike modellerinin sıralaması (RS: Regular spike , IB: Intrinsic bursting, CH: Chattering, FS: Fast spiking [3]).

4.1.1. Önerilen Nöron Devresine Ait Memristör Devresinin İç Yapısı

Teknik nedenlerden ötürü, memristörlerin piyasada bulunması zordur. Bu nedenle birçok memristor taklit devresi tasarlanmıştır [21-30]. Ancak büyük bir çoğunluğu TiO_2 memristörüne benzetilmiştir. Kullanılmış olan memristörde klasik HP memristöründen farklı yeni bir taklit devresi tasarlanılarak kullanılmıştır. [31]. Bu tasarım, Mott memristor 'e benzer olarak sert anahtarlama özelliğine sahiptir. [32].

Şekil 4.4'de verilen devre için kullanılan işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) temel denklemleri;

$$I_{IN} = g_m (V_P - V_N) \quad (4.9)$$

V_N ; V_{C1} ve V_{C2} çarpımından elde edilir.

$$V_N = 0,1 \times V_{C1} \times V_{C2} \quad (4.10)$$

$$I_{IN} = g_m (V_P - 0,1 \times V_{C1} \times V_{C2}) \quad (4.11)$$

Giriş akımı (I_{IN}), OTA ($I_{IN} = I_{OUT}$) 'nın her çıkış akımına eşittir ve bu nedenle çıkış akımlarından biri, kapasitör ve transistör akımlarının toplamına eşittir.

$$I_{OUT} = I_{C1} + I_{M1} \quad (4.12)$$

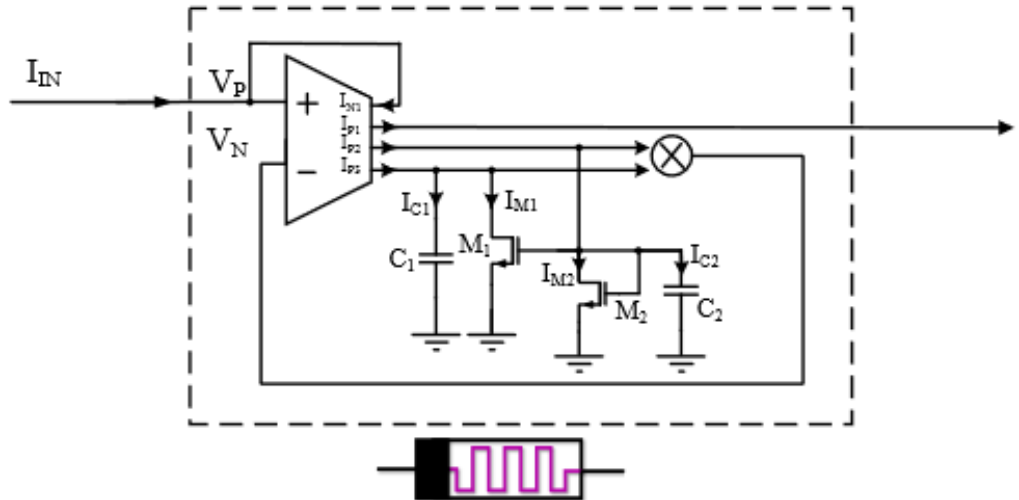
$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = I_{OUT} - I_{M1} \quad (4.13)$$

$$I_{OUT} = I_{C2} + I_{M2} \quad (4.14)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = I_{OUT} - I_{M2} \quad (4.15)$$

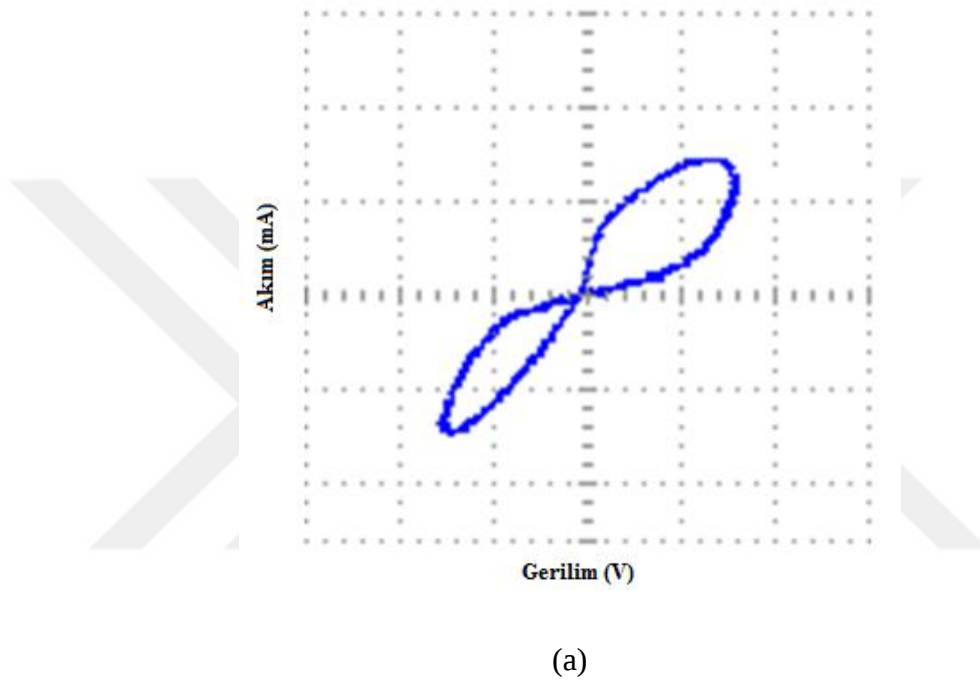
Üst çıkış (I_{N1}), hatırlatmanın sabit başlangıç kısmını sağlamak için kullanılır. İkinci terminal (I_{P1}) önerilen taklit devresinin çıkışıdır. Memristör taklit devresine voltaj uygulandığında, iki kondansatör OTA' nın I_{P2} ve I_{P3} terminalleri tarafından şarj edilir. M_1 ve M_2 transistörleri C_2 kondansatörünün voltajıyla tetiklenir. C_2 kondansatörünün voltajı M_1 ve M_2 ' nin eşik voltajlarından daha büyük olduğunda, transistörlerin akımları drain bacağından source bacağına doğru akar. Transistörlerden deşarj edilen kapasitörler aynı, fakat farklı değerlere sahip oldukları için kapasitörlerin voltajları birbirinden farklıdır. Memristörde gerilim yoksa, kapasitörlerin transistörlerden boşalamayacağı gerçeğinden ötürü, taklit devresinin geçici olmayan (non volatile) özellikleri elde edilebilir.

Şekil 4.4'de önerilen memristör taklit devresinin şemasını göstermektedir. Bu taklit devresi, nöron devreleri için tasarlanmıştır ve bir adet çoklu çıkışlı geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA), iki kapasitör, iki NMOS ve bir çarpma devresi kullanılmıştır.

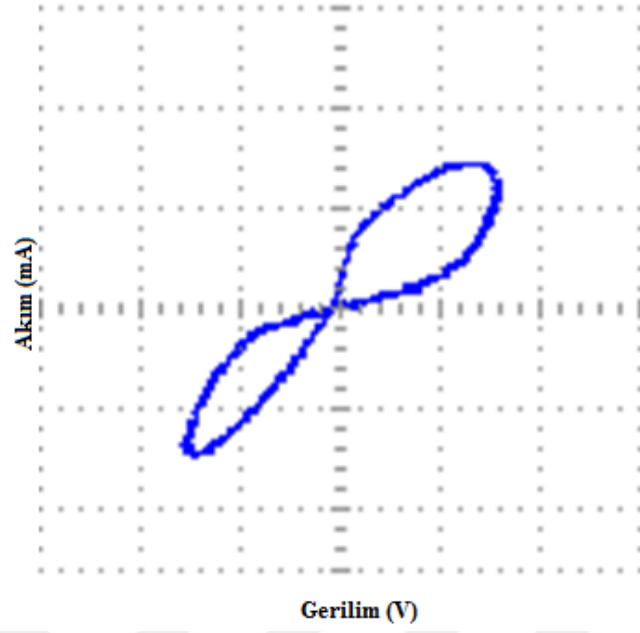


Şekil 4.4: Nöron devresinde kullanılan memristör taklit devresi [3].

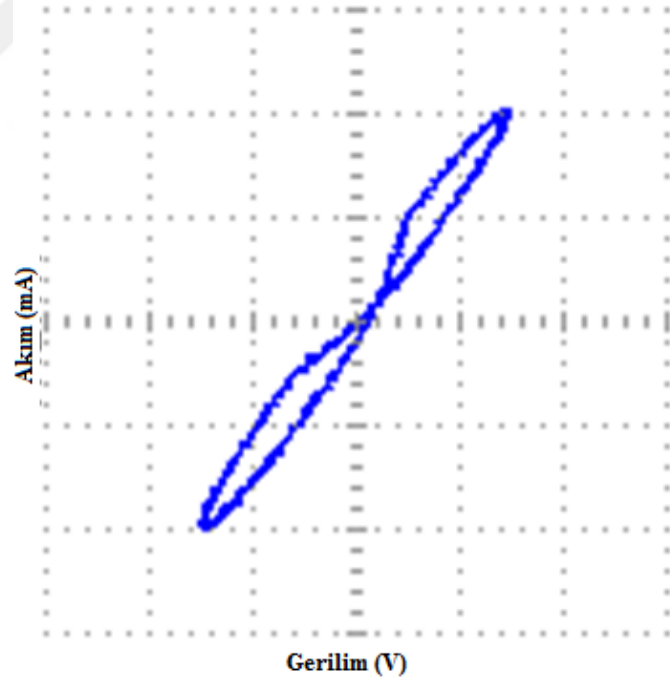
Taklit devresi, VLSI teknolojisine uygun ve diğer uygulamalar için ayrık devre elemanları ile bir breadboard üzerinde çok basit bir şekilde kurulabilir. Giriş sinyalleri 1,2 V_p ile 1, 3, 12 kHz sinüzoidal voltajlardır. Şekil 2, memristörden ölçülen voltaj-akım karakteristiklerinin osiloskop göstergelerini göstermektedir. Memristörün çalışma frekansı aralığı C_1 ve C_2 değerleri değiştirilerek ayarlanabilir. Kondansatörlerin değerleri azaldığında memristörü yüksek frekans aralığında çalıştırabiliriz.



Şekil 4.5: Çeşitli frekanslarda giriş sinyalleri için memristör taklit devresinin osiloskop görüntüleri a) 1 kHz b) 3 kHz c) 12 kHz [3].



(b)



(c)

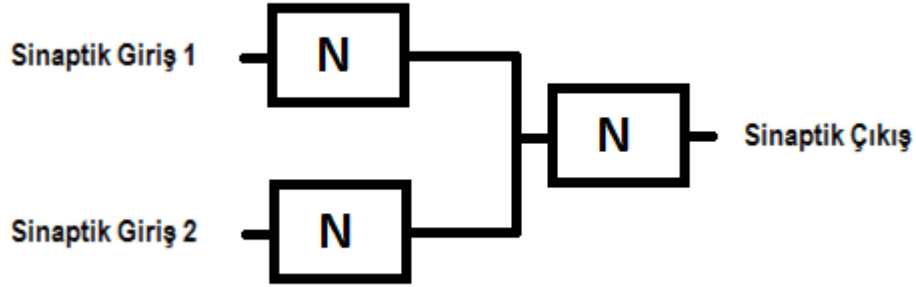
Şekil 4.5 (devam): Çeşitli frekanslarda giriş sinyalleri için memristor taklit devresinin osiloskop görüntüleri a) 1 kHz b) 3 kHz c) 12 kHz [3].

4.2. NÖRON TABANLI SAYISAL DEVRELER

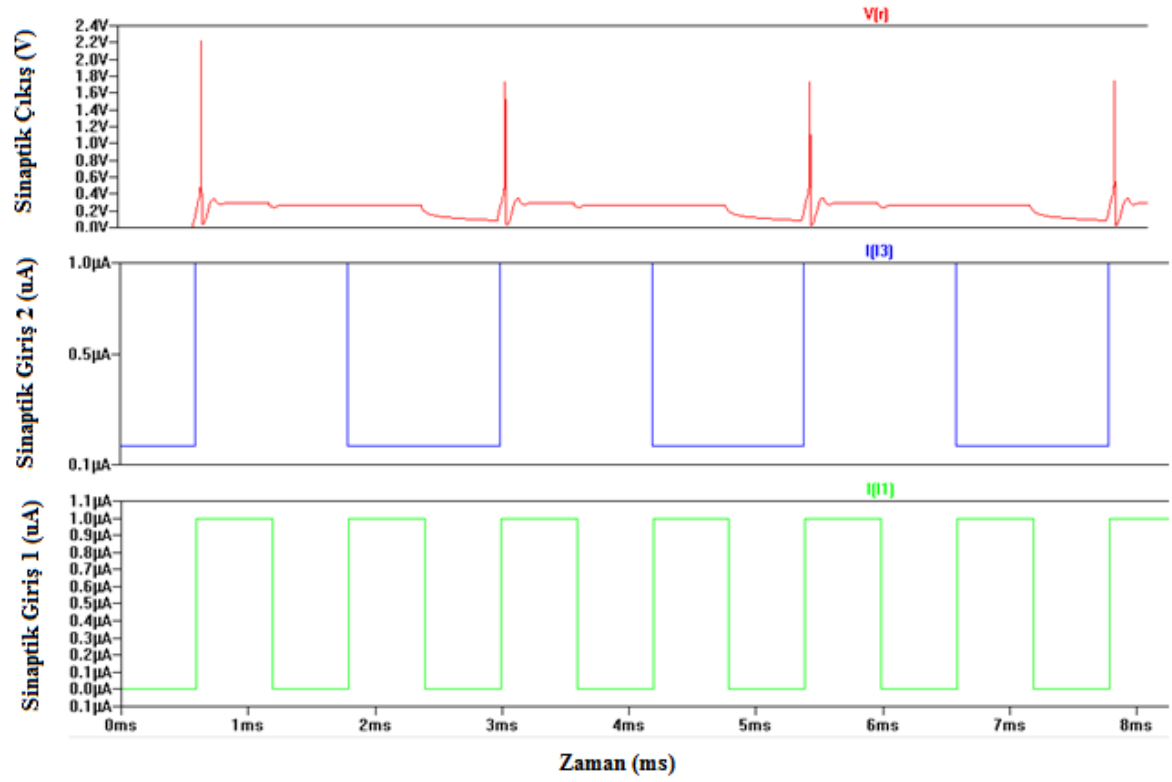
4.2.1. Ve Kapısı

Tez kapsamında önerilen nöron devresi ile ve nöron devrelerinin kendi aralarında oluşturmakta olduğu kombinasyonlarla 2 girişli ve 3 girişli olarak farklı devre şemaları ile ve kapısı gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.7 'de birden fazla nöron devresinin kombinasyonu ile oluşturulmuş 2 girişli ve kapısı devre şeması bulunmaktadır. Burada girişler birer nörona uygulanıp bu nöronların çıkışının farklı bir nöronun girişine uygulanması ile elde edilen sonuç ile ve kapısının çıkışları gerçekleştirilmiş olmaktadır. Gerçekleştirilen devrenin çıkışında, giriş akımları darbe şeklinde verilmesine rağmen çıkışta, nöron çıkışlarına benzer olarak spike, yani değişken karakteristikler sergileyen gerilim şekilleri elde edilmiştir

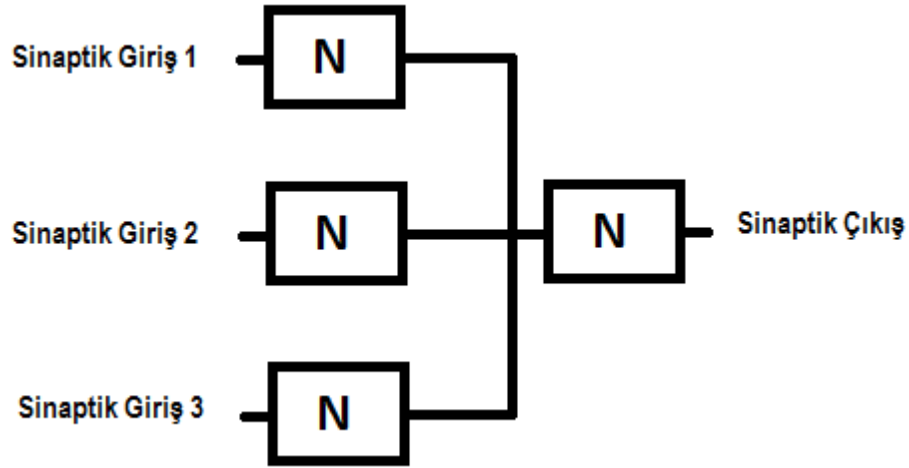


Şekil 4.6: 2 Girişli ve kapısı devre sembolü.

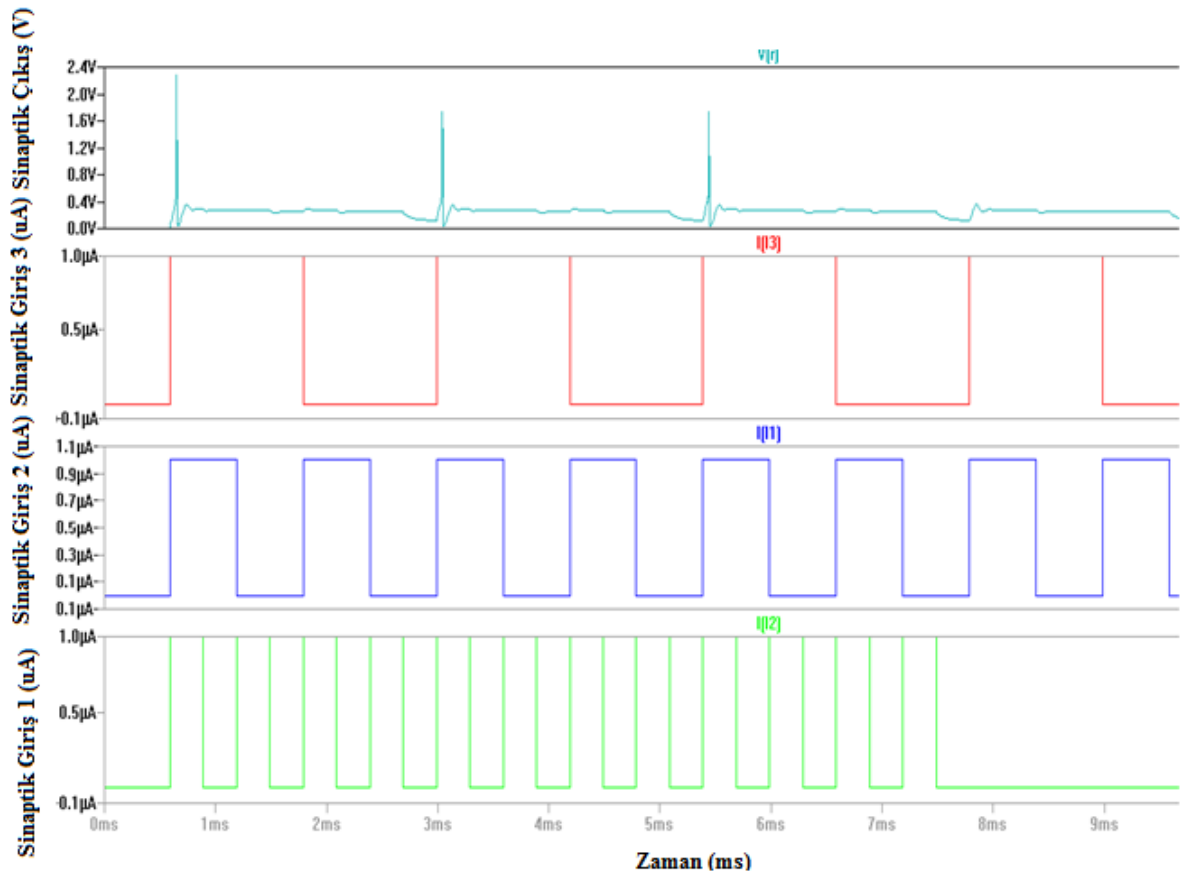


Şekil 4.7: 2 girişli ve kapısına ait giriş ve çıkış sinyalleri.

Aynı şekilde 3 girişli ve kapısı da giriş sinyallerinin yani darbe akımlarının 3 farklı nöronun girişine uygulanması ile bu nöronların tüm çıkışlarının tek bir nöron devresine uygulanması sonucunda elde edilen çıkış sinyalleri ile ve kapısı çıkışları elde edilmektedir.



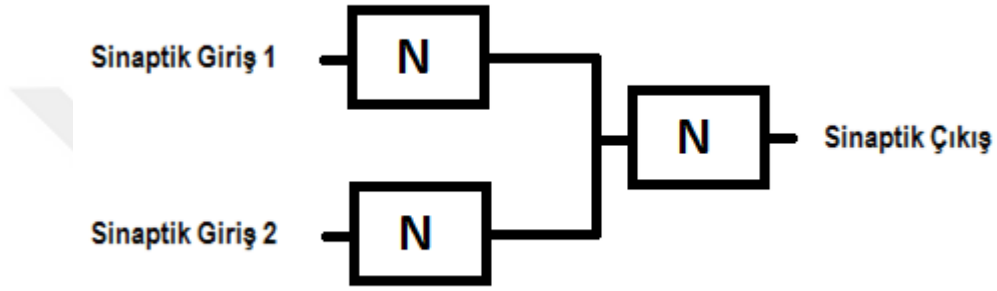
Şekil 4.8: 3 Girişli Ve Kapısı devre sembolü.



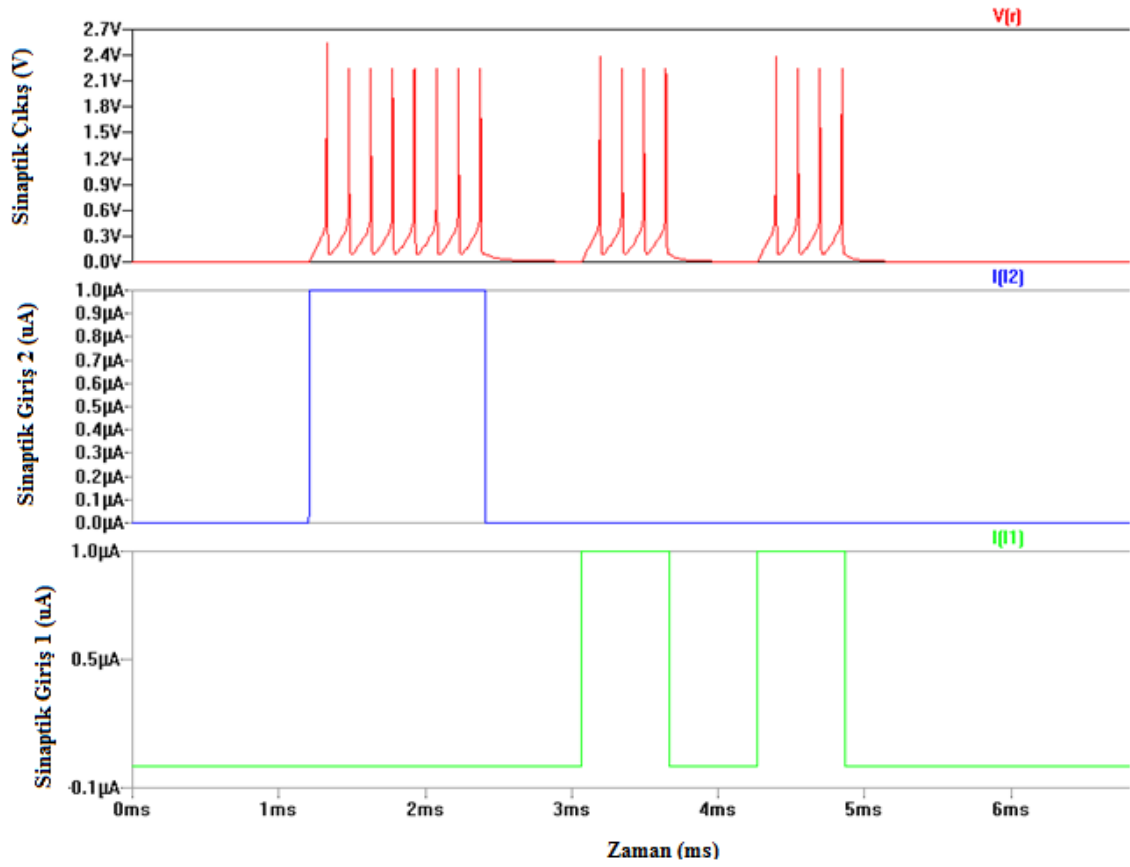
Şekil 4.9: 3 girişli ve kapısına ait giriş akımı ve çıkış gerilimi analizi.

4.2.2. Veya Kapısı

Ve kapısında olduğu gibi veya kapısı da nöronların birbirleri ile bağlantıları sonucunda meydana gelmektedir. İki yapı için de aynı devre kullanılmış olup, nöron devresinin iç yapısında kullanılan OTA (Operational Transconductance Amplifier) nın geçiş iletkenliği katsayısı, C_1 ve C_3 kondansatörleri ve V_{AA} gerilim girişi değerlerini değiştirerek veya kapısı elde edilmiştir.



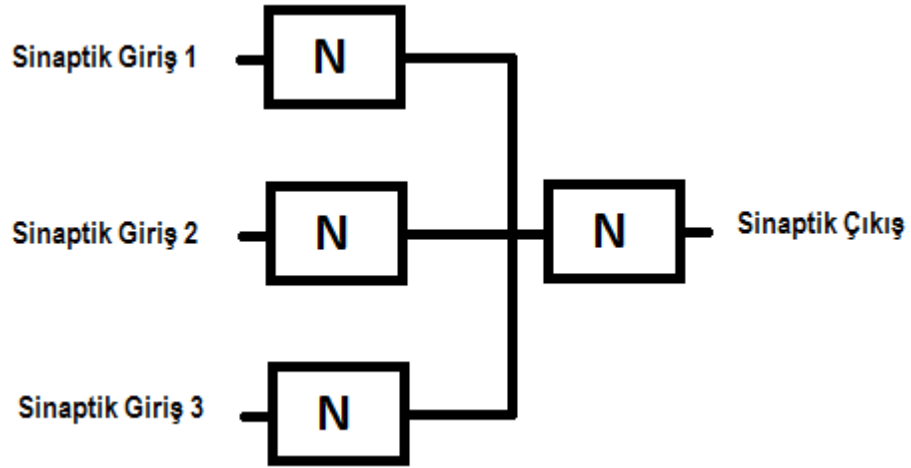
Şekil 4.10: 2 girişli veya kapısı devre sembolü.



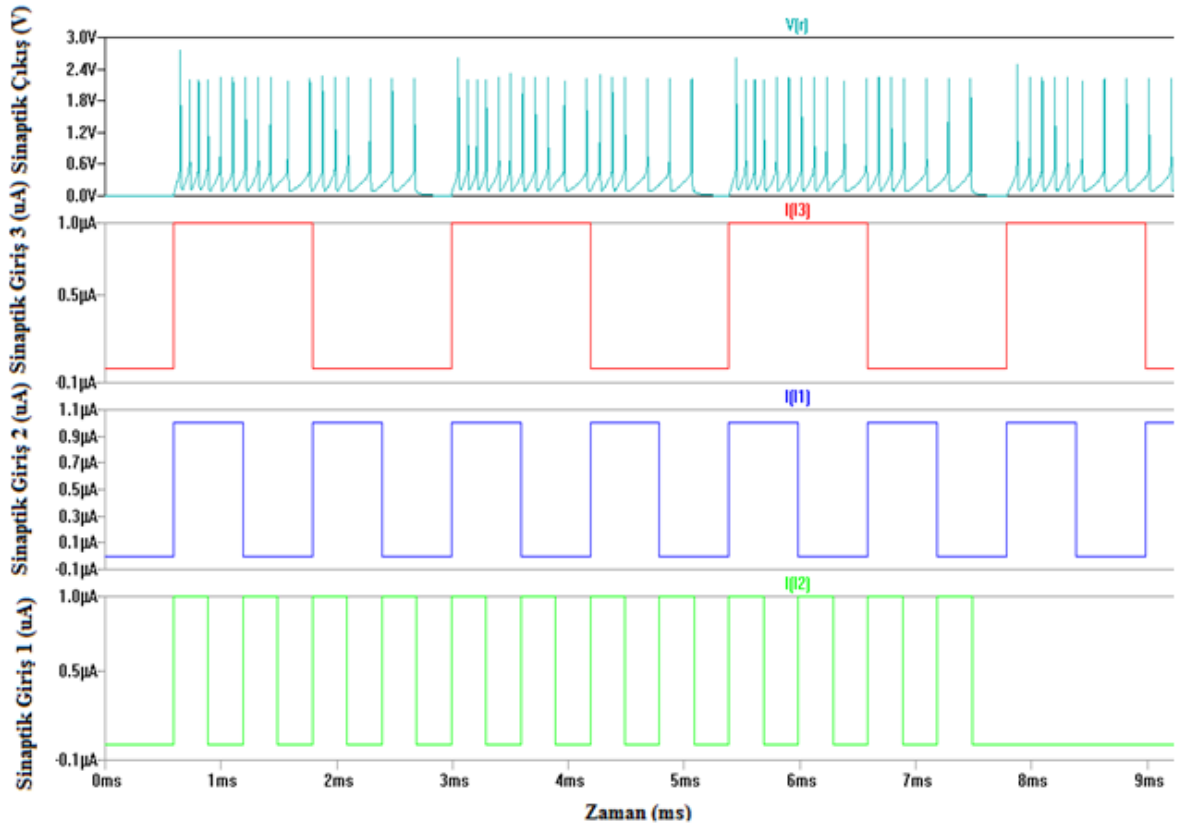
Şekil 4.11: 2 girişli Veya Kapısı akım giriş akımları ve çıkış gerilimi analizi.

Tablo 4.1: Ve kapısı ve veya kapısı değişkenler.

	VE	VEYA
gm	500u	500u
V_B	0	100mV
c1	100pF	100pF
c2	100pF	100pF



Şekil 4.12: 3 girişli veya kapısı devre sembolü.



Şekil 4.13: 3 girişli veya kapısına ait giriş akımları ve çıkış gerilimi analizi.

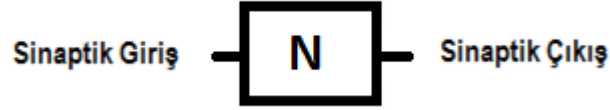
4.2.3. Değil Kapısı

Değil kapısı da diğer kapılarda olduğu gibi devrede bulunan bazı parametreleri değiştirerek elde edilmiştir. Değil kapısı çıkışları, direkt olarak nöron devresinin kendisini kullanarak oluşturulmuştur. Devrede kullanılan kondansatör değerleri, OTA' ya ait geçiş iletkenliği kat sayısı, ve harici gerilim olan V_{AA} değerindeki değişiklikler değil kapısını elde etmemizi sağlamaktadır.

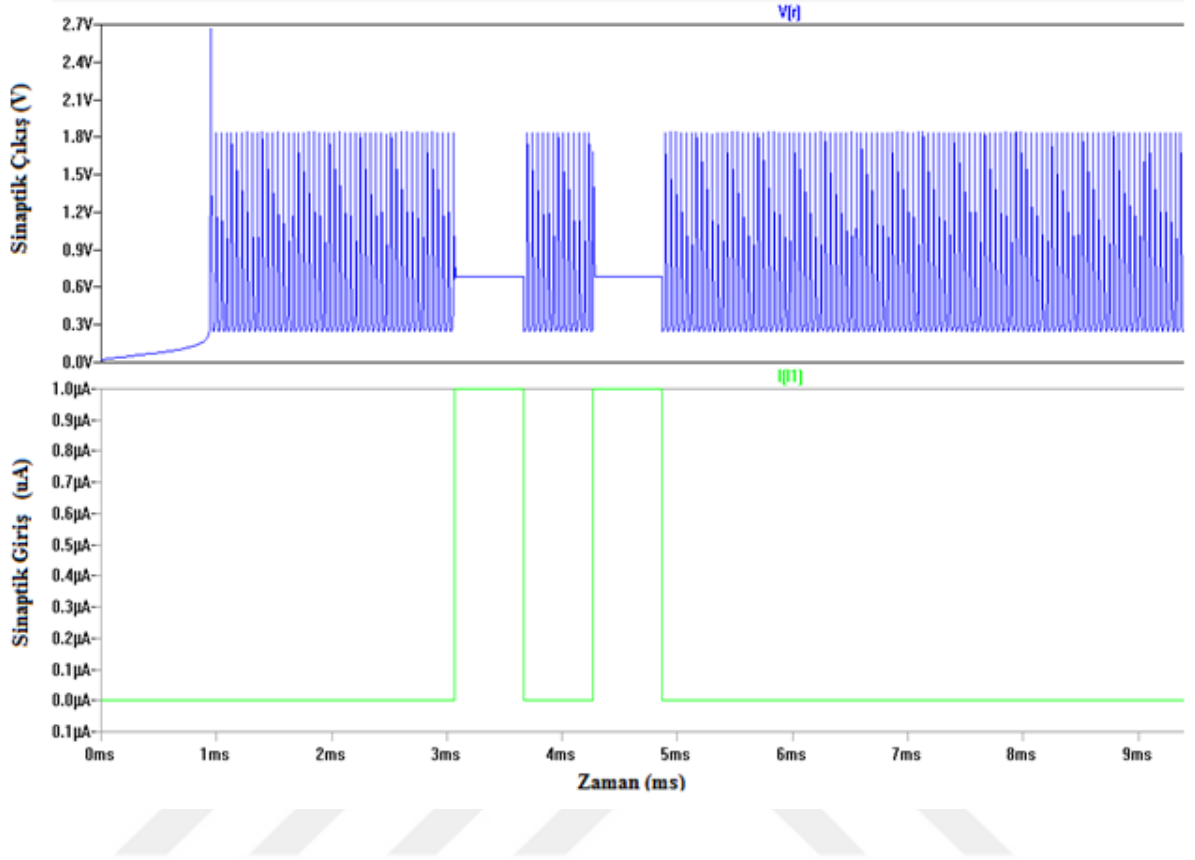
Nöron ve değil kapısı arasındaki farkı gösteren tablo Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: Değil ve nöron devreleri parametre bilgileri.

	NÖRON	DEĞİL
gm	40u	500u
V_B	250mV	100mV
c1	1pF	100pF
c2	1pF	100pF



Şekil 4.14: Değil kapısı devre şeması.



Şekil 4.15: Değil kapısına ait giriş akımı ve çıkış gerilimi analizi.

4.3. NÖRON TABANLI SAYISAL DEVRE KARAKTERİSTİKLERİ

Alan kullanımı Memistörlerin MOSFET'lerden daha küçük olduğu varsayımı için alan kullanımı nöronların kapladığı alanın CMOS' ların kapladığı alandan daha küçük olacağı söylenebilmektedir. Memristörler bir MOSFET'in polisilikon katmanında uygulanabilir, böylece tek bir MOSFET birçok memristör için bir uygulama yeri olabilir.

Nöronların güç tüketiminin, içerisinde bulunan memristörün nano mertebelerde çalışması ve nano boyutlarda güç tüketmesi ile alakalı olarak, çok düşük seviyelerde olduğu söylenebilmektedir. Tablo 4.3 'de bir adet memristörün güç tüketimi baz alınarak hesaplanmış olan nöron devresi güç tüketimi ile CMOS tabanlı sayısal devrelerin güç tüketimlerinin karşılaştırılması bulunmaktadır.

Tablo 4.3: CMOS ve Memristör Tabanlı Devre Güç Tüketimi Karşılaştırması.

Sayısal Eleman	Nöron Tabanlı Devre Güç Tüketimi (μW)	CMOS Tabanlı Devre Güç Tüketimi(μW)
DEĞİL	2.25	5.41
VE	6,75	19.28
VEYA	6,75	19.63

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Nörobilimden etkilenen bakış açıları kullanılarak spike, yani biyolojik olarak potansiyel fark dediğimiz anlık gerilim değişimleri tabanlı sistemler üzerine, çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Kullanılan sistemlerle, kompleks problemleri farklı yöntemlerle çözümlemenin planlanması gibi, çok güçlü bilgisayarların hızlı ve pratik uygulamalarından daha iyi sonuçlar da elde edilebilir. Bunların sonucunda sinir ağı VLSI devreleri tasarımı ve üretimi günümüz teknolojisinde oldukça fazla talep görmektedir. Bu alanda yapılan çeşitli uygulamalardan bir tanesi olan I&F (Integrate ve fire) az devre elemanı ve çip üzerinde kapladığı yer anlamında avantajlar sağladığı için oldukça fazla tercih edilmektedir. Fakat bu devre hedeflenen sonuçlara ulaşmak anlamında yetersiz kalmaktadır. Devrenin çıkış yapıları incelendiğinde bir nöron hücresinden elde edilebilecek çıkış karakteristiklerinden yalnızca bir davranışı, basit aksiyon potansiyeli (spike) davranışını sergilemektedir. İnsan sinir sisteminde taklit edilebilir yapılar, beyin zarı bölgesinde lineer olmayan titreşimli çıkışlardan çok, basit spike davranışı sergilemektedir ve bu I&F devresinden elde edilebilecek sonuçlar ile yapılacak olan çalışmaları belli aşamaya getirilebilir. Ancak araştırmacılar tek bir çipte, boyut ve malzeme sayısını mümkün olduğunca daha az tutarak, farklı tüm kortikal spiking davranışlarını sergileyebilecek devreler ile çalışmanın taklit devrelerinde daha büyük avantajlar sağlayacağı için tercih bu devreler üzerinde yoğunlaşmaktadırlar.

Lineer davranış göstermeyen yani nonlinear olarak çalışan devre elemanları, canlıların hayati aktivitelerini taklit etme konusunda lineer davranış sergileyen geleneksel devrelere göre oldukça avantaj sağlamaktadırlar. Literatürde, tasarlanmış lineer olmayan davranış sergileyen devreler incelendiğinde 1 memristör ve 3 MOS ile tasarlanmış nöron devresi, [3] hem güç tüketimi hem çıkışta elde edilen spike türleri açısından ideal bir devre olarak görülebilir. Bu özelliklerden faydalanılarak dijital devre tasarımında gerek güç tüketimi gerek boyut avantajları nedeniyle nöron tabanlı devrelerden esinlenilmiştir.

Tez kapsamında literatüre sunulmuş ve nöron benzetimi en fazla olan devreler incelenmiştir. İncelenen devrelerin kıyaslamaları yapılarak, tasarlanmış olduğumuz sistemde en fazla avantaj sağlayacak devre seçilerek nöron temelli sayısal devreler sunulmuştur. Devreler, sayısal devre tasarımlarının gelişimi için temel oluşturabilecek niteliktedir. Tasarımda kullanılan nöron

devresinin, iç yapısında kullanılan komponentler bazında incelendiğinde devre tasarımları çok az yer kaplayacak ve güç tüketimi minimum seviyede olacaktır. Ayrıca aynı devre ile tek bir gerilim parametresi değiştirilerek birden fazla sayısal kapı devresi elde edilmektedir. Bu da tasarımlarda esneklik avantajı sağlayacaktır.

Son olarak, yapılan çalışma sayesinde elde edilen veriler konu ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalara katkı sağlayacak, bunun yanında farklı bir bakış açısı getirerek daha farklı veya aynı alanda yapılacak olan çalışmalar için ilham kaynağı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1]. Chua, L., 1971, Memristor-The Missing Circuit Element, *IEEE Transactions On Circuit Theory*, 507-519.
- [2]. Kang, S.M., Chua, L.O., 1976, Memristive devices and systems, *Proceedings of the IEEE*, 209-223.
- [3]. Babacan, Y., Kaçar, F., Gürkan, K., 2016, A spiking and bursting neuron circuit based on memristor, *Neurocomputing*, 86-91
- [4]. Anderson, O., R., 1997, A Neorocognitive Perstpective on Current Learning Theory and Science Instructional Strategies, *Science Education*, 81.
- [5]. Kolb, B., Gibb, R., Robinson, T.E., 2003, Brain Plasticity and Behavior, *Current Directions in Psychological Science*, Vol. 12 Issue 1, (1-5)
- [6]. Lodish, H., Berk, A., Zipursky S.L., 2000, Molecular Cell Biology, W. H. Freeman, New York, USA.
- [7]. McCulloch W.S., Pitts W., 1943, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 115-133
- [8]. Hodgkin, A.L., Huxley, A.F., 1952, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *The Journal of physiology*, 500-544.
- [9]. Fitzhugh, R., 1966, Mathematical Models for Excitation and Propagation in Nerve, *Biological Engineering*. H.P. Schawn (Ed.).
- [10]. Nagumo J., Sato S., 1972, On a response characteristic of mathematical neuron model, *Kybernik*, 155-164.
- [11]. Morris C., Lécarré H., 1981, Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber, *Biophysics*, 193-213.
- [12]. Hindmarsh, J.L., Rose, R.M., 1984, A Model Of Neuronal Bursting Using Three Coupled First Order Differential Equations, *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series B. Biological Sciences*, 87-102.
- [13]. Mishra D., Yadav A., Ray S., Kalra P.K., 2006, Exploring Biological Neuron Models, *Directions, The Research Magazine of IIT Kanpur*, 13-22.
- [14]. Izhikevich, E.M., 2003, Simple Model of Spiking Neurons, *IEEE Transactions On Neural Networks*, 1569-1572.

- [15]. Lewis E.R., 1964, An Electronic Model of The Neuron Based on The Dynamics of Potassium And Sodium Ion Fluxes, *Neural Theory and Modeling Proceedings of the 1962 Ojai Symposium, Stanford*, 427.
- [16]. Roy G., 1972, A simple electronic analog of the squid axon membrane: The neurofet, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 60-63.
- [17]. Izhikevich, E.M., 2004, Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons ?, *IEEE Transactions On Neural Networks*, 1063-1070.
- [18]. Indiveri, G., 2003, A low-power adaptive integrate-and-fire neuron circuit, *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems, ISCAS*, 820-823.
- [19]. Lee, Y.J., Lee, J., Kim, Y.B., Ayers, J., Volkovskii, A., Selverston, A., Abarbanel, H., Rabinovich, M., 2004, Low power real time electronic neuron VLSI design using subthreshold technique, *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, 744-747.
- [20]. Wijekoon, J.H.B, Dudek, P., 2007, Simple analogue VLSI circuit of a cortical neuron, *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 1344–1347.
- [21]. Kvatinisky, S., Friedman, E.G., Kolodny, A., Weiser, U.C., 2012, TEAM: Threshold Adaptive Memristor Model, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 211-221.
- [22]. Shin, S., Zheng L., Weickhardt G., Cho S., 2013 Compact circuit model and hardware emulation for floating memristor devices, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 42-55.
- [23]. Zhang, Y., Zhang, X., Yu, J., 2009, Approximated SPICE model for memristor, *International Conference on Communications, Circuits and Systems, ICCAS*
- [24]. Biolek, D., Biolek, Z., Biolkova, V., 2009, SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems, in Circuit Theory and Design, *European Conference on. IEEE*.
- [25]. Yang,J.J., Strukov, D.B., Stewart, D.R., 2013, Memristive devices for computing, *Nature nanotechnology*, 13-24.
- [26]. Yakopcic, C., Taha, Subramanyam, G., T. M., Pino, R.E., Rogers, S., 2011, A memristor device model, *IEEE electron device letters*, 1436-1438.
- [27]. Yesil, A., Babacan, Y., Kacar, F., 2014, A new DDCC based memristor emulator circuit and its applications," *Microelectronics Journal*, 282-287.
- [28]. Biolek, Z., Biolek, D., Biolkova,V., 2009, Spice model of memristor with nonlinear dopant drift, *Radioengineering*, 210-214.
- [29]. Chen,Y., Wang, X., 2009, Compact modeling and corner analysis of spintronic memristor, *Int. Symp. Nanoscale Architect*, 7–12.

- [30]. Benderli, S., Wey, T.A., 2009, On SPICE macromodelling of TiO₂ memristors, *Electronics letters*, 377-379.
- [31]. Snider, G.S., Steward, D.R., Williams, S.R. Strukov, D.B., 2008, The missing memristor found, *Nature*, 80-83.
- [32]. Pickett, M.D., Medeiros-Ribeiro, G., Williams, S., 2012, A scalable neuristor built with Mott memristors, *Nature Materials*, 114-117.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Şeyma Muteber ÇAPRAZ
Doğum Yeri	İzmir
Doğum Tarihi	06.05.1991
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	+90 555 246 99 82
E-Posta Adresi	caprazseyma@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	30.06.2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı