

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MİKROİŞLEMCİ MİMARİSİ KULLANARAK MERKEZİ
DESEN ÜRETİCİ YAPILARININ İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Vedat Burak YÜCEDAĞ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2019
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MİKROİŞLEMCİ MİMARİSİ KULLANARAK MERKEZİ
DESEN ÜRETİCİ YAPILARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Vedat Burak YÜCEDAĞ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN**

**Temmuz 2019
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Vedat Burak YÜCEDAĞ

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Mikroişlemci Mimarisi Kullanarak Merkezi Desen Üretici Yapılarının İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan

Vedat Burak YÜCEDAĞ



Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN

Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR



Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN danışmanlığında **Vedat Burak YÜCEDAĞ** tarafından hazırlanan “**Mikroişlemci Mimarisi Kullanarak Merkezi Desen Üretici Yapılarının İncelenmesi** ” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik – Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

01.07.2019

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN

Üye : Doç. Dr. Enis GÜNAY

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BİLİM

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 02/07/2019 tarih ve 2019/33-17 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Mehmet Akkurt
02 / 07 / 2019

Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN' a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU, Tekniker Şevket GENÇTÜRK' e, teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen değerli eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Vedat Burak YÜCEDAĞ
Kayseri, Haziran 2019

MİKROİŞLEMCİ MİMARİSİ KULLANARAK MERKEZİ DESEN ÜRETİCİ YAPILARININ İNCELENMESİ

Vedat Burak YÜCEDAĞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlker DALKIRAN

ÖZET

Merkezi Desen Üreteçleri (MDÜ); emekleme, nefes alma, yürüme, koşma gibi ritmik olayların kontrolünü sağlayan, biyolojik sinir hücrelerinin kuplajlanması ile meydana gelen sinirsel ağ yapılarıdır. Canlıların hareketlerini taklit edebilen robotlar, MDÜ temelleri üzerine kurulmuştur. Literatürde MDÜ' ler, FPGA (Field Programmable Gate Array), FPAA (Field Programmable Analog Array) platformları ile yeniden programlanabilir olarak gerçekleştirilmiş ve çeşitli donanım çözümleri ortaya konmuştur. Ancak sunulan donanım çözümleri, uygulamaya özel olarak tasarlanmakta ve çeşitli yapay sinir hücresi modellerin benzetimi maliyetli olmaktadır. Bu bağlamda, standart bir yapıya sahip mikroişlemci mimarisi ile oluşturulmuş, düşük maliyetli Raspberry Pi mini bilgisayarların MDÜ' lerin FPGA veya FPAA benzeri donanım çözümlerine alternatif olabileceği düşünülmüştür.

Bu tez çalışmasında, öncelikli olarak sinir hücrelerinin elektro – fizyolojik özellikleri hakkında; yapısı, zar potansiyelinin oluşumu ve sinir hücreleri arasındaki bilgi iletimi gibi genel bilgiler sunulmuş ve literatür taraması yapılmıştır. Bilim dünyası tarafından kabul görmüş çeşitli sinir hücresi modellerinin matematiksel alt yapıları incelenmiş ve nümerik olarak benzetimleri yapılmıştır. MDÜ' ler hakkında, literatür taraması yapıldıktan sonra MDÜ ağ yapısının sahip olduğu elektriksel ve kimyasal bağ çeşitleri incelenip, Hudgkin – Huxley (HH), FitzHugh – Nagumo (FHN), Morris – Lecar (ML), Hindmarsh – Rose (HR), Izhikevich (IZ) sinir hücreleri ve Matsuoka (MOs) osilatörü ile senkronizasyon davranışı benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Tamamlanan benzetim çalışmalarından sonra bahsedilen MDÜ modelleri Raspberry Pi üzerinde donanımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak sayısal benzetim sonuçları ile deneysel gerçekleştirim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Raspberry Pi, Merkezi Desen Üreteçleri (MDÜ), Senkronizasyon, Robotik



INVESTIGATION OF CENTRAL PATTERN GENERATOR STRUCTURES USING MICROPROCESSOR ARCHITECTURE

Vedat Burak YÜCEDAĞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, July 2019

Supervisor: Dr. İlker DALKIRAN

ABSTRACT

Central Pattern Generators (CPG); are neural network structures formed by coupling of biological nerve cells that control the rhythmic events such as crawling, breathing, walking and running. Robots that can simulate the movements of living things are built on the foundations of CPG. In the literature, CPGs have been implemented as reprogrammable with FPGA (Field Programmable Gate Array), FPAA (Field Programmable Analog Array) platforms and various hardware solutions have been presented. The hardware solutions are application - specific and costly to simulate various models. In this context, it is aimed to prove that the low cost Raspberry Pi mini computers, which has a standard structure and built with microprocessor architecture, can be an alternative to FPGA or FPAA - based hardware solutions.

In this thesis, firstly a general knowlage about the electro - physiological properties of nerve cells; such as structure, formation of membrane potential and transmission of information between neurons are presented and literature review is done. Mathematical basics of various nerve cell models which are accepted by the scientific world have been examined and numerically simulated. After searching literature on CPGs, the coupling types of CPG network structure are examined and Hudgkin - Huxley (HH), FitzHugh – Nagumo (FHN), Morris - Lecar (ML), Hindmarsh - Rose (HR), Izhikevich (IZ) nerve cells and Matsuoka (MOs) oscillator synchronization behavior was simulated.

After completing simulations the hardware realization of mentioned CPG models are implemented. Finally the results of both simulations and hardware implementations are compared each other.

Keywords: Raspberry Pi, Central Pattern Generators (CPG), Synchronization, Robotics



İÇİNDEKİLER

MİKROİŞLEMCİ MİMARİSİ KULLANARAK MERKEZİ DESEN ÜRETİCİ YAPILARININ İNCELENMESİ

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
TABLolar LİSTESİ.....	xxiii
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM GENEL BİLGİLER

1.1. Literatür Taraması.....	3
1.2. Biyolojik Sinir Hücresinin Elektro – Fizyolojik Özellikleri	4
1.2.1. Biyolojik Sinir Hücresinin Yapısı.....	4
1.2.2. Biyolojik Sinir Hücresi Üzerinde Zar Potansiyelinin Oluşumu	6
1.2.3. Biyolojik Sinir Hücreleri Arasında Bilgi İletimi.....	8

2. BÖLÜM BİYOLOJİK SİNİR HÜCRELERİNİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELENMESİ

2.1. Hudgkin – Huxley (HH) Sinir Hücresi Modeli	10
2.2. FitzHugh – Nagumo (FHN) Sinir Hücresi Modeli	14

2.3. Morris – Lecar (ML) Sinir Hücresi Modeli	18
2.4. Hindmarsh – Rose Sinir Hücresi Modeli (HR).....	21
2.5. Izhikevich (IZ) Sinir Hücresi Modeli.....	24
2.6. Osilatör Modellerinin Matematiksel Olarak İncelenmesi	25
2.6.1. Balthasar Van der Pol (BVP) Osilatörü	25
2.6.2. Matsuoka (MOs) Osilatör	27

3. BÖLÜM

SİNİR HÜCRELERİN KUPLAJLANMASI VE MDÜ AĞ YAPILARI

3.1. HH Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve HH Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları	33
3.2. FHN Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve FHN Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları	38
3.3. ML Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve ML Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları	40
3.4. HR Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve HR Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları	48
3.5. IZ Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve IZ Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları	55
3.6. Matsuoka Osilatörü ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları	63

4. BÖLÜM

BİYOLOJİK SİNİR HÜCRESİ MODELLERİNİN RASPBERRY PI ÜZERİNDE GERÇEKLEŞTİRİMİ

4.1. HH Sinir Hücresinin ve HH Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi	66
4.2. FHN Sinir Hücresinin ve FHN Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi	70
4.3. ML Sinir Hücresinin ve ML Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi	71

4.4. HR Sinir Hücresinin ve HR Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi.....	78
4.5. IZ Sinir Hücresinin ve IZ Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi.....	79
4.6. MOs Osilatör'ün ve MOs Osilatör ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi	89
4.7. BVP Osilatör' ün Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi	90

5. BÖLÜM

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA	93
ÖZGEÇMİŞ.....	101

KISALTMALAR VE SİMGELER

MDÜ	Merkezi Desen Üreteci
CPG	Central Pattern Generator
FPGA	Field Programmeble Gate Array
FPAA	Field Programmeble Analog Array
HH	Hodgkin – Huxley
HR	Hindmarsh – Rose
FHN	Fitzhugh – Nagumo
IZ	Izhikevich
ML	Morris – Lecar
MOs	Matsuoka
BVP	Balthasar Van der Pol
DAC	Digital Analog Convertor
Na	Sodyum
K	Potasyum
Ca	Kalsiyum
Cl	Klor

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

- Şekil 1.1. Merkezi Sinir Sistemi' ni gösteren temsili görsel. 1. Beyin, 2. Merkezi Sinir Sistemi, 3. Omurilik 5
- Şekil 1.2. Soma, dentrit, axon, miyelin kılıf ve termina buton bileşenlerine sahip sinir hücresi yapısı 5
- Şekil 1.3. Aksiyon Potansiyeli' nin evrelerini özetleyen bir şema. 8
- Şekil 1.4. Presinaptik ve postsinaptik yapılarca gerçekleştirilen, sinir hücreleri arasında meydana gelen bilgi iletimi şematik gösterimi 8
- Şekil 2.1. HH Sinir Hücresi Modeli' nin a) $I = 10$, b) $I = 25$, c) $I = 50$ için hücre zarı potansiyeli benzetim sonucu. 13
- Şekil 2.2. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.8. kullanılarak $a=0.7$, $b=0.8$, $I=0.34$ parametreleri seçildiğinde a) $c=5$ için hücre zarı potansiyeli, b) v-u faz portresi c) $c=10$ için hücre zarı potansiyeli, d) v-u faz portresi, e) $c=15$ için hücre zarı potansiyeli f) v-u faz portresi benzetim sonuçları. 16
- Şekil 2.3. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.9. kullanılarak $\alpha=-0.008$, $\gamma=0.008$ parametreleri seçildiğinde a) $\varepsilon=0.002$ için hücre zarı potansiyeli, b) v-u faz portresi c) $\varepsilon=0.004$ için hücre zarı potansiyeli, d) v-u faz portresi, e) $\varepsilon=0.006$ için hücre zarı potansiyeli f) v-u faz portresi benzetim sonuçları. 17
- Şekil 2.4. ML Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.18. kullanılarak a) $\varepsilon = 0.003$, $V_0 = 20$ b) $\varepsilon = 0.005$, $V_0 = 20$ c) $\varepsilon = 0.003$, $V_0 = 15$ d) 0.005 , $V_0 = 15$ için benzetim sonuçları..... 20
- Şekil 2.5. ML Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.18. kullanılarak a) $\lambda N = 3$, b) $\lambda N = 4$, için patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları..... 21
- Şekil 2.6. HR Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.17. kullanılarak a) $\varepsilon = 0.001$ için dört adet spike bulunan patlamalı aksiyon potansiyeli b) bu durumda x-y-z faz portreleri gösterimi, c) $\varepsilon = 0.003$, için iki spike bulunan patlamalı aksiyon potansiyeli d) bu durumda x-y-z faz portreleri e) $\varepsilon = 0.007$ için aksiyon potansiyeli, f) bu durumda x-y-z faz portlerinin benzetim sonuçları. 23

- Şekil 2.7. IZ Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.10. kullanılarak a) Fast Spike, b) v-u faz portresi, c) Chattering, d) v-u faz portresi, e) Intrinsically Burst, f) v-u faz portresi, g) Regular Spike, h) v-u faz portresi desenlerinin benzetim sonuçları.26
- Şekil 2.8. BVP Osilatör' ün Denklem 2.20 kullanılarak $\epsilon = 1$ parametresi seçildiğinde a) $p2 = 1$ ve $g2 = 1$, b) v-u faz portresi, c) $p2 = 2$ ve $g2 = 1$, d) v-u faz portresi, e) $p2 = 1$ ve $g2 = 2$, f) v-u faz portresi için benzetim sonuçları.28
- Şekil 2.9. Matsuoka Osilatör' ün Denklem 2.21. kullanılarak $\tau r = 6$, $\tau a = 12$, $b = 5$, $s = 8$ parametreleri seçildiğinde a) $wij = 1.5$ için osilatör çıkış deseni, b) v-u faz portresi, c) $wij = 2.5$ için osilatör desenleri, d) v-u faz portresi benzetim sonuçları.....30
- Şekil 3.1. Dört adet sinir hücresi ile oluşturulmuş ağ yapıda a) Trot, b) Gallop yürüyüş modellerinin her bir sinir hücresi için faz sıraları gösterimi.32
- Şekil 3.2. İki adet sinir hücresi ile oluşturulan ağ yapının sinaptik bağlantı yapısı gösterimi32
- Şekil 3.3. İki adet HH sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $gij = 0.2$ için asenkron faz, b) $v1 - v2$ faz portreleri, c) $gij = -0.2$ için senkron faz, d) $v1 - v2$ faz portreleri olmak üzere model benzetim sonuçları.35
- Şekil 3.4. İki adet HH sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $gij = 0.1$ için asenkron faz, b) $v1 - v2$ faz portreleri, c) $gij = -0.1$ için senkron faz, d) $v1 - v2$ faz portreleri olmak üzere model benzetim sonuçları.35
- Şekil 3.5. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $gij = 0.2$ için hücrelerin zar potansiyelleri benzetim sonuçları.36
- Şekil 3.6. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $gij = 0.2$ için hücrelerin zar potansiyelleri benzetim sonuçları.....36
- Şekil 3.7. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $gij = 0.2$ için hücrelerin zar potansiyelleri benzetim sonuçları.....37

- Şekil 3.8. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $g_{ij} = 0.2$ için hücrelerin zar benzetim sonuçları..... 37
- Şekil 3.9. İki adet FHN sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.086$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V1 - V2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = -0.086$ için senkron çıkış desenleri, d) $V1 - V2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları. 38
- Şekil 3.10. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet FHN sinir hücresi ile oluşturulan elektriksel kuplaj özelliğine sahip MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi..... 39
- Şekil 3.11. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet FHN sinir hücresi ile oluşturulan elektriksel kuplaj özelliğine sahip MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi..... 39
- Şekil 3.12. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.018$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V1 - V2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.018$ için senkron çıkış desenleri, d) $V1 - V2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları. 42
- Şekil 3.13. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.018$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V1 - V2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.018$ için senkron çıkış desenleri, d) $V1 - V2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.... 42
- Şekil 3.14. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.012$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V1 - V2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.012$ için senkron çıkış desenleri, d) $V1 - V2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları. 43
- Şekil 3.15. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.012$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V1 - V2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.012$ için senkron çıkış desenleri, d) $V1 - V2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.... 43

- Şekil 3.16. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.01$, $E_{Ca} = 70mV$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.01$, $E_{Ca} = 110mV$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.....44
- Şekil 3.17. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.012$, $E_{Ca} = 80mV$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.012$, $E_{Ca} = 100mV$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.....45
- Şekil 3.18. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $E_{Ca} = 80$ ve $g_{ij} = -0.012$ seçilmesi durumunda patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $E_{Ca} = 100$ ve $g_{ij} = -0.008$ seçilmesi durumunda aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.....46
- Şekil 3.19. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $E_{Ca} = 80$ ve $g_{ij} = -0.012$ seçilmesi durumunda patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $E_{Ca} = 100$ ve $g_{ij} = -0.004$ seçilmesi durumunda aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.....47
- Şekil 3.20. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.2$ için asenkron davranışı, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.2$ için senkron davranışı, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.49
- Şekil 3.21. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.2$ için asenkron çıkış desenleri, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.2$ için senkron çıkış desenleri, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.....49
- Şekil 3.22. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.05$ için asenkron çıkış desenleri, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.05$ için senkron çıkış desenleri, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.....50

- Şekil 3.23. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş elektirksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.05$ için asenkron çıkış desenleri, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.05$ için senkron çıkış desenleri, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.....50
- Şekil 3.24. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.2$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.2$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.....51
- Şekil 3.25. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.2$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.2$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.....52
- Şekil 3.26. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektirksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = 0.0055$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = 0.0055$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.53
- Şekil 3.27. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektirksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = 0.0055$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = 0.0055$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.54
- Şekil 3.28. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.1$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.1$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.56
- Şekil 3.29. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.04$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.04$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları....57
- Şekil 3.30. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektirksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.1$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.1$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.57

- Şekil 3.31. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.04$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V1 - V2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.04$ için senkron çıkış desenleri, d) $V1 - V2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları....58
- Şekil 3.32. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.04$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.59
- Şekil 3.33. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.04$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.60
- Şekil 3.34. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.01$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.61
- Şekil 3.35. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.01$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.62
- Şekil 3.36. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.....63
- Şekil 3.37. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.....64
- Şekil 3.38. Çeşitli şekillerde gerçekleştirilen senkronizasyonda çıkış desenleri elde etmek amacıyla oluşturulan modelin a) kuplaj bağlantıları b) faz sıralarının, c) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.64
- Şekil 3.39 Çeşitli şekillerde gerçekleştirilen senkronizasyonda çıkış desenleri elde etmek amacıyla oluşturulan modelin a) kuplaj bağlantıları b) faz sıralarının, c) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.65

- Şekil 4.1. HH Sinir Hücresi Modeli' nin a) $I = 10$, b) $I = 25$, c) $I = 50$ için hücre zarı potansiyelinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonucu.67
- Şekil 4.2. İki adet HH sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplajlanan MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, olmak üzere Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları..... 67
- Şekil 4.3. İki adet HH sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplajlanan MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, olmak üzere Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.67
- Şekil 4.4. Kimyasal kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, $g_{ij} = 0.2$ seçildiğinde a) Gallop yürüyüş deseni, b) Trot yürüyüş deseni, olmak üzere hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.68
- Şekil 4.5. Elektriksel kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, $g_{ij} = 0.2$ seçildiğinde a) Gallop yürüyüş deseni, b) Trot yürüyüş deseni, olmak üzere hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları. 69
- Şekil 4.6. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.8. kullanılarak Raspberry Pi üzerinde gerçekleştiriminde a) $c=5$, b) $c=10$, c) $c=15$ için hücre zarı potansiyeli benzetim sonuçları.70
- Şekil 4.7. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.9. kullanılarak Raspberry Pi üzerinde a) $\varepsilon=0.002$, b) $\varepsilon=0.004$, c) $\varepsilon=0.006$ için hücre zarı potansiyeli benzetim sonuçları..... 70
- Şekil 4.8. İki adet FHN sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, olmak üzere Raspberry Pi üzerinde model gerçekleştirim sonuçları. 71
- Şekil 4.9. ML sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde a) $\lambda N = 3$, b) $\lambda N = 5$ için gerçekleştirim sonuçları.71
- Şekil 4.10. Elektriksel kuplajlanan dört adet FHN sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) Gallop yürüyüş deseni, b) Trot yürüyüş deseni, olmak üzere hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.72

- Şekil 4.11. ML sinir hücreleri ile oluşturulmuş, Kimyasal kuplaj özelliği sergileyen, iki sinir hücresi ile yapıp Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilen modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları....73
- Şekil 4.12. ML sinir hücreleri ile oluşturulmuş, Elektriksel kuplaj özelliği sergileyen, iki sinir hücresi ile yapıp Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilen modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları....73
- Şekil 4.13. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....74
- Şekil 4.14. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....75
- Şekil 4.15. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....76
- Şekil 4.16. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....77
- Şekil 4.17. HR sinir hücresi modelinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait a) 4 adet spike içeren patlamalı aksiyon potansiyeli b) 2 adet spike içeren patlamalı aksiyon potansiyeli c) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....78
- Şekil 4.18. Kimyasal kuplaj özelliğine sahip iki adet HR sinir hücresinden oluşan ağ yapısının a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....78
- Şekil 4.19. Elektriksel kuplaj özelliğine sahip iki adet HR sinir hücreisnden oluşan ağ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.....79

- Şekil 4.20. Iz sinir hücresi modelinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait a) patlamalı aksiyon potansiyeli b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri..... 79
- Şekil 4.21. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri. 80
- Şekil 4.22. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri. 81
- Şekil 4.23. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri. 82
- Şekil 4.24. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri. 83
- Şekil 4.25. İki adet Iz sinir hücresi ile oluşturulmuş, Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan kimyasal kuplaj özelliğine sahip modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları. 84
- Şekil 4.26. İki adet Iz sinir hücresi ile oluşturulmuş, Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan elektriksel kuplaj özelliğine sahip modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları. 84
- Şekil 4.27. Gallop yürüyüşü için dört adet Iz sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu. 85
- Şekil 4.28. Trot yürüyüşü için 4 adet Iz sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu. 86

- Şekil 4.29. Gallop yürüyüşü için dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu. 87
- Şekil 4.30. Trot yürüyüşü için 4 adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu. 88
- Şekil 4.31. Matsuoka Osilatör' ün Denklem 2.21. kullanılarak $\tau r = 6$, $\tau a = 12$, $b = 5$, $s = 8$ parametreleri seçildiğinde a) $w_{ij} = 1.5$ b) $w_{ij} = 2.5$ için Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim osilatör desenleri. 89
- Şekil 4.32. Dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının $g_{ij} = 1.5$ için Gallop yürüyüş deseni için hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları. 89
- Şekil 4.33. Dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının $g_{ij} = 1.5$ için Trot yürüyüş deseni için hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları. 90
- Şekil 4.34. Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan BVP Osilatör' ün $\epsilon = 1$ parametresi seçildiğinde a) $p_2 = 1$ ve $g_2 = 1$, b) $p_2 = 2$ ve $g_2 = 1$, c) $p_2 = 1$ ve $g_2 = 2$ için osilatör deseni gerçekleştirme sonuçları. 90

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatüre sunulan çalışmada kullanılan parametreler.	13
Tablo 2.2. Bilinen zar potansiyeli çeşidi için Izhikevich sınır hücresi model parametreleri.	25



GİRİŞ

Canlılar yaşamların her anında emekleme, yürüme, nefes alıp verme, çiğneme, irkilme gibi bir çok ritmik hareketler gerçekleştirmektedir. Oluşan ritmik hareketler omurgalı canlılarda omurilik tarafından, omurgasız canlılarda ise ganglion tarafından kontrol edilmektedir. Ganglionlar, omurgasız canlıların sinirsel aktivitelerini kontrol eden özel sinirsel ağ yapılarıdır. Sinir hücrelerinin özelleşmiş kimyasal veya elektriksel bağlar ile bir araya geldiği ağ yapılarına Merkezi Desen Üreteçleri, MDÜ (Central Pattern Generator, CPG) adı verilir. MDÜ' ler, sensör veya karmaşık kontrol merkezlerinden alınacak geri besleme bilgilerine ihtiyaç duymadan sıralı, kendini tekrar eden sinyaller üretebilirler. MDÜ yapılarının biyolojik özelliklerini saptamak, canlılarda gerçekleşen karmaşık sinirsel aktivitelerin anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.

MDÜ' lerin çalışma prensiplerinin anlaşılması, mikro seviyelerde bulunan sinir hücrelerinin bireysel davranışlarının bilinmesine dayanmaktadır. Bu davranışları anlayabilmek için maliyeti yüksek, gerçekleştirimi güç, özel ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Bu zorlukları gidermek ve sinir hücrelerinde meydana gelen değişimleri daha uygun bir biçimde anlayabilmek amacıyla nümerik modellerin oluşturulması oldukça önemli bir hal almaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, sinir hücrelerinin matematiksel modellerinin oluşturulması ve fonksiyon parametrelerin belirlenmesi üzerine olmaktadır. Literatürdeki sunulan çalışmalarda; matematiksel modellerin biyolojik sinir hücresinin üretebildiği desen çeşitliliğini kapsayan bir yapıya sahip olması, biyolojik sinir hücresine yakın sonuç vermesinin ve hesaplanabilirliği kolay olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, desen çeşitliliği arasında farklılık gösteren biyolojik doğrulukları farklı ve hesaplama gücü farklı zorluklarda olan bir takım sinir hücresi modelleri mevcuttur. Modellerin gerçekleştirilmesinde, uygulamaya özel olarak tasarlanmış donanımsal çözümler, FPGA (Field Programmable Gate Array) ve (FPAA Field Programmable Analog Array) kullanarak oluşturulmuş çok sayıda çalışma mevcuttur.

Uygulamaya özel olarak tasarlanan devreler, sadece belirlenmiş model için kullanılabilmekte ancak başka bir model için kullanılamamaktadır. Bu durum modellerin aynı donanım üzerinde gerçekleştirim sonuçlarının karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Uygulamadaki böyle bir eksikliği gidermek amacıyla bu tez çalışmasında; standart bir yapıya sahip, yeniden programlanabilmesi oldukça kolay, çevre şartlarından en az derecede etkilenen, üretim – benzetim maliyetleri oldukça düşük bir donanım çözümünün ortaya konması amaçlanmıştır. Hesaplama gücü yüksek Raspberry Pi mini bilgisayar, problemin çözümünde kullanılacak etkili yöntemlerden biridir. Raspberry Pi çok çekirdekli, yüksek çalışma frekansına sahip bir mikroişlemciye, çok sayıda giriş – çıkış ara birime ve standart bir donanıma sahip olması ve kompakt boyutlarda üretilmesinden dolayı profesyonel çalışmalarda son zamanlarda yaygın olarak tercih edilen bir araçtır. Açık kaynak kodlu olması sebebi ile sürekli artan bir ilgi vardır. Hava istasyonlarında hava durumunda oluşan değişimleri belirlemede, herhangi bir ortamda multimedya aracı olarak kullanımlarda, hobi devrelerde, matematiksel denklem veya fonksiyonların analizinde, karmaşık görüntü işleme algoritmalarının gerçekleştirimi gibi geniş bir yelpazede tercih edilen bir donanım çözümü haline gelmiştir. Matematiksel işlem gücünün yüksek olması sayesinde sistemlerin çalışması hızlı olmaktadır. Bu bağlamda sinir hücrelerinin analizi ve MDÜ ağ yapılarının gerçekleştirilmesi aşamasında tercih sebebi olmuştur.

Bu tez çalışmasında, sinir hücrelerinin ve sinirsel ağ yapılarının literatürde mevcut olan matematiksel modellerinin ve donanımsal çözüm önerilerinin incelenmesi, bilim dünyası tarafından kabul görmüş sinir hücresi modellerinin benzetiminin gerçekleştirilmesi, bu modeller ile oluşturulmuş ağ yapılarının analizlerinin yapılması ve Raspberry Pi üzerinde örnek gerçekleştirimlerin sağlanması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmanın ilk adımını sinir hücrelerinin elektro – fizyolojik özelliklerinin incelenmesi oluşturmaktadır. İkinci adımda sinir hücreleri ne ait matematiksel modellerinin anlaşılması için literatür taraması yapılmıştır. Çeşitli sinir hücresi ve osilatör modellerin nümerik benzetimleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Ardından aralarında elektriksel ve kimyasal özel bağlar ile oluşturulan sinirsel ağların senkronizasyon çeşitleri incelenmiş ve nümerik benzetimleri yapılmıştır. Son adımda, parametreleri belirlenen sinir hücresi modellerinin ve MDÜ ağ yapılarının senkronizasyon çalışmaları, Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Literatür Taraması

Canlıların beyin morfolojisini anlamak amacıyla literatüre birçok sinir hücresi modeli sunulmuştur. İlk klasik sinir hücresi modeli McCullach ve Pits tarafından 1943 yılında oluşturulmuştur. Model, en basit şekilde sinir hücresini tanımlamaktadır. “ Ya hep, ya hiç” prensibine göre hücrenin aksiyon potansiyeli ürettiğini açıklayan, sinaptik gecikmenin önemli olduğunu ifade eden, matematiksel olarak benzetimi oldukça kolay olan bir modeldir ve bu modelden sonra sunulan tüm modellerin temelini oluşturmaktadır [1]. 1952’de Hudgkin – Huxley (HH) modeli, sinir hücresinin biyolojik özelliklerini detaylı ve doğru bir şekilde açıklayan ve bu sebeple bilimsel çalışmalarda yaygın bir şekilde araştırma konusu olarak belirlenen bir modeldir. Bu modelde, sinir hücresinde oluşan iyonik akımların başlangıcı ve yayılımı ile ilgilenilmiştir. Kapsamlı bir model olması sebebi ile modelin bağımlı olduğu pek çok parametre vardır. HH sinir hücresi modelinin hesaplama zorluklarını azaltmak amacıyla 1961’ de Fitzhugh – Nagumo (FHN) modeli geliştirilmiştir. Biyolojik olarak doğruluğu zayıf olan model iki adet değişkene sahip olması sebebiyle benzetimi oldukça kolaydır [2]. 1981’ de iyon kanallarını iletkenlik tabanlı bir sistem ile örnekleyen Morris – Lecar (ML) modeli literatüre sunulmuştur. Bu modellerin ardından, üç adet birinci dereceden diferansiyel denklem takımı ile tanımlanan, biyolojik sinir hücresinin üretebildiği aksiyon potansiyeli çeşitliliğine sahip yeni bir model 1984’ de geliştirilmiştir [3]. Hızlı hesaplanabilirlik ve biyolojik doğruluğu yüksek olan sinir hücresi modeli 2003’ te Izhikevich tarafından literatüre sunulmuştur. Çeşitli açılardan incelenmiş benzetimleri ve gerçeklemeleri yapılmıştır [4 – 7].

Canlıların yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerçekleştirdiği hareketleri anlayabilmek amacıyla canlı morfolojisi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda memeli hayvanlar hareketlerini, omuriliklerinde bulunan sinirsel ağ yapıları vasıtası ile sağladığı anlaşılmaktadır. Omurgalı canlıların omuriliğinde bulunan Merkezi Desen Üreteçleri (MDÜ); yürüme, koşma, yüzme, çiğneme, nefes alma gibi ritmik hareketleri gerçekleştirmekle görevli karmaşık sinirsel ağ yapılarıdır [8]. Ritmik desen şekilleri üretebilmeleri için her hangi bir geri besleme kaynağına ihtiyaçları olmadığı için “Merkezi” olarak isimlendirilirler. MDÜ’ ler hem omurgalı hem de omurgasız canlılarda bulunabilirler. MDÜ’ ler, karmaşık bir şekilde birbirlerine sinaptik olarak bağlı olan binlerce beyin fonksiyonlarına göre nispeten daha kolay anlaşılmaktadır. Ayrıca canlılardan esinlenerek oluşturulan, onların hareketlerini taklit edebilen robot morfolojisi üzerine son yıllarda literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır [9 – 12]. Sensör geri beslemesine gerek kalmadan sıralı desen şekilleri üretebilmeleri sayesinde MDÜ’ ler robotik modellerin temelini oluşturmaktadır. Bu iki büyük avantajı sebebi ile bilim dünyasında çalışma ve araştırma konusu olarak MDÜ’ ler sıklıkla yer almaktadır [13 – 16].

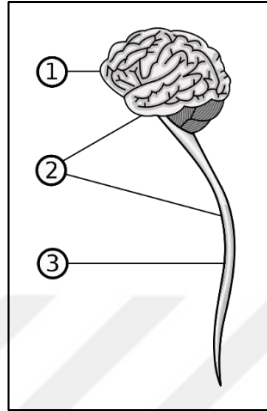
Raspberry Pi, diğer mikroişlemci mimarili sistemlere kıyasla yüksek işlem gücüne, kompakt bir yapıya ve geniş açık kaynak kod erişim imkanına sahiptir. Sabit bir donanıma sahip olması sebebi ile geniş bir alanda araştırmalarda, projelerde kullanılmaktadır. Yüz tanıma sistemleri, metin okuma araçları, hava olaylarını önceden tahmin eden sistemler, hava-kara araçlar gibi sistemlerin işlem yükünü taşıyan mikroişlemci tabanlı platformdur [17 – 20].

1.2. Biyolojik Sinir Hücresinin Elektro – Fizyolojik Özellikleri

1.2.1. Biyolojik Sinir Hücresinin Yapısı

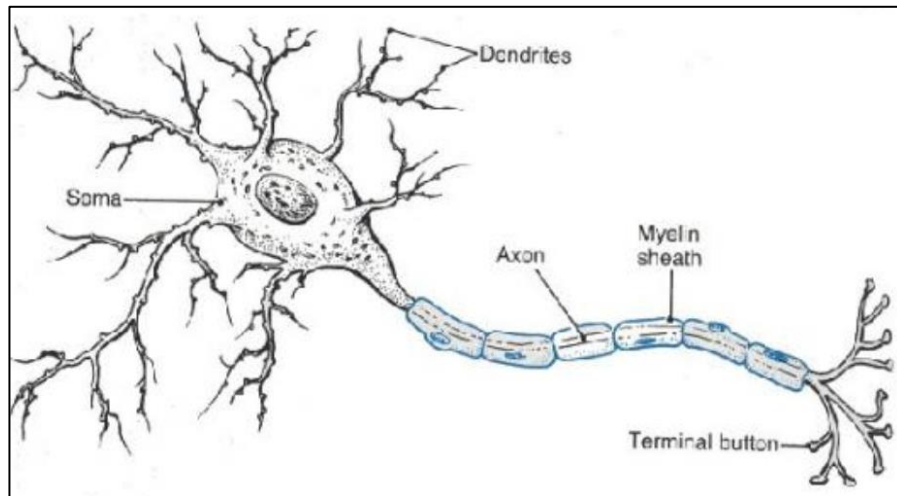
Canlılar, yaşanılan ortama uyum sağlamasından ve çeşitli organların işbirliği içinde çalışmasından sorumlu olan, Sinir sistemi olarak isimlendirilen bir yapıya sahiptir. Sinir sistemi, temel olarak iki gruba ayrılır. Bunlardan birincisi Merkezi Sinir Sistemi ikincisi ise Çevresel Sinir Sistemi’dir. Çevresel Sinir Sistemi, canlılarda bulunan çeşitli alıcılar aracılığı ile alınan bilgileri (dokunma, tat, ağrı, ısı vb.) Merkezi Sinir Sistemi’ne taşıyan ve Merkezi Sinir Sistemi’ nin üretmiş olduğu emirleri ise salgı bezleri ve kas gibi ilgili

yerlere ileten yapılardır. Merkezi Sinir Sistemi ise beyin ve omurilikten oluşan, Çevresel Sinir Sistemi'nden gelen bilgileri yorumlayan, gerekli organları yöneten yapılardır. Merkezi Sinir Sistemi'ni tanımlayan görsel Şekil 1.1' de ifade edilmektedir.



Şekil 1.1. Merkezi Sinir Sistemi'ni gösteren temsili görsel. 1. Beyin, 2. Merkezi Sinir Sistemi, 3. Omurilik [21].

Merkezi Sinir Sistemi'nin yapılarından biri olan omurilik, Merkezi Desen Üreteçleri – MDÜ (Central Pattern Generator – CPG) olarak isimlendirilen özel sinirsel ağlara sahiptir. Canlılarda refleks hareketlerinden, koşma, yürüme, çiğneme gibi ritmik hareketlerin kontrolünden MDÜ'ler sorumludur [22]. MDÜ'lerin temel elemanı sinir hücresidir (nöron). Örnek bir biyolojik sinir hücresinin temel yapı birimleri Şekil 1.2' de sunulmaktadır.



Şekil 1.2. Soma, dentrit, axon, miyelin kılıf ve terminal buton bileşenlerine sahip sinir hücresi yapısı [23].

Bir sinir hücresi, soma (hücre gövdesi), dentritler ve aksonlar olmak üzere üç temel bileşenden meydana gelir. Soma bölgesinde çekirdek, golgi kompleksi, mitokondri, lizozom gibi hücrenin yaşamsal işlevlerini sağlayan yapılar bulunur. Sinir hücresindeki bilgi iletimi Soma' da kontrol edilir. Dentritler, başka bir sinir hücresinden gelen bilgileri almak ile görevlidir. Aksonlar, miyelin kılıf ile kaplı, uzun, ince bir tüp şeklindedir ve görevleri bilgileri somadan alıp akson uçlarına taşımaktır [24].

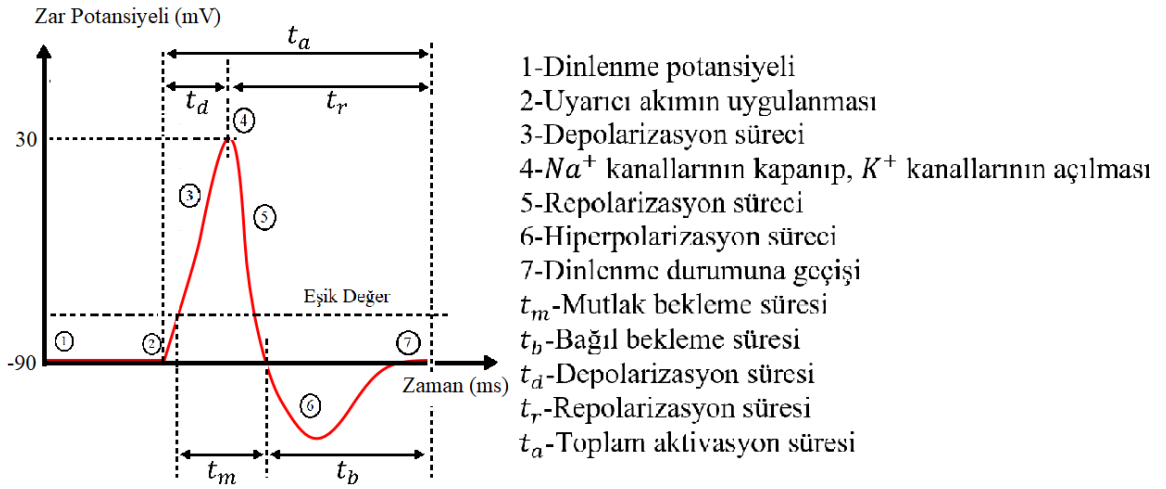
1.2.2. Biyolojik Sinir Hücresi Üzerinde Zar Potansiyelinin Oluşumu

Sinir hücrelerinin iç ve dış ortamlarında çeşitli iyonlar bulunmaktadır. Bu iyonlar hücre içi ile hücre dışı arasında bir potansiyel fark oluştururlar. Potansiyel farkın oluşumunda etkin bir role sahip dört adet iyon vardır; sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^+) ve klor (Cl^-). Hücre dışında sodyum ve klor, hücre içinde ise potasyum ve kalsiyum iyonları daha yüksek miktarda bulunmaktadır. İyonların genel dengesi incelendiğinde hücre içinin, hücre dışına kıyasla daha negatif olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle hücre zarı yüzeyinde negatif bir potansiyel meydana gelir. Harici bir elektriksel uyarıcının olmadığı denge durumunda, oluşan potansiyele dinlenme potansiyeli adı verilir (örnek bir sinir hücresi için dinlenme potansiyeli $-90mV$ civarı bir değer olabilir). Dinlenme Potansiyeli, normal koşullarda her daim korunmaktadır. Hücre dışının kimyasal yapısı, bazı destek hücrelerince korunurken, hücre içi kimyasal yapısı ise hücre zarında bulunan voltaj – bağımlı iyon kanalları ile korunmaktadır. Hücre zarı yüzeyine harici bir akım uyguladığımız zaman sodyum voltaj – bağımlı iyon kanalları hızlı bir şekilde açılır, hücre dışında bulunan sodyum iyonları, bu kanallardan hücre içerisine doğru geçer ve hücre içi hücre dışına göre daha pozitif bir değer alır. Bu sürece, depolarizasyon adı verilmektedir (örnek bir sinir hücresi için depolarizasyon sonucunda zar potansiyeli, $+30mV$ civarına kadar ulaşabilir). Depolarizasyon süreci meydana gelirken dinlenme potansiyeli pozitif değerlere doğru artar. Zar potansiyelinin, hücre zarının eşik değeri (threshold) olarak isimlendirilen potansiyel değerini aşması durumunda aksiyon potansiyeli (spike) üretilmiş olur (örnek bir sinir hücresi için eşik değeri $-40mV$ ile $-65mV$ arasında değişebilir). Zar potansiyelinin, bu eşik değerinin altında kalması durumunda aksiyon potansiyeli üretilemez ve hücre zarı potansiyeli yeniden dinlenme potansiyeli değerine geri döner. Bu durum “ya hep – ya hiç” prensibi olarak adlandırılır [25].

Zar potansiyeli, belirli bir değere ulaştığında (örneğin, $+30mV$) potasyum voltaj – bağımlı iyon kanalları, hızlı bir şekilde açılmaya başlar ve hücre dışına potasyum iyon geçişi meydana gelir. Depolarizasyon sürecinde açılmış olan sodyum voltaj – bağımlı iyon kanalları, kapanmaya başlar ve bir süre sonra tüm kanallar kapanır. Potasyum iyonlarının hücre dışına atılmasının devam etmesi ve sodyum iyonlarının hücre içine alınmasının durması, hücre içerisindeki pozitif iyonların kaybı demektir. Sinir hücresi içerisindeki pozitif iyonların kaybı, hücre zarı potansiyeli eşik değere ulaşana kadar devam eder. Eşik değere yaklaşan hücrenin potasyum voltaj – bağımlı iyon kanalları, kapanmaya başlar. Bu sürece repolarizasyon adı verilmektedir [25].

Potasyum voltaj – bağımlı iyon kanallarının kapanması, sodyum voltaj – bağımlı iyon kanallarının kapanmasına kıyasla geç ve yavaş olmaktadır. Bu durumun sonucunda hücre dışına olması gerekenden fazla miktarda potasyum iyonu çıkışı meydana gelmektedir ve hücre potansiyeli, dinlenme potansiyelinden daha küçük bir değere kadar düşer. Sinir hücresi aşırı polarize hale gelmiş olur. Bu sürece hiperpolarizasyon adı verilmektedir [25].

Hiperpolarizasyon olayı meydana geldiğinde hücrenin iyon dengesi bozulmuş olur. Hücre içi ve dışındaki iyon dengesini sağlayan bir çeşit hücresel pompa (Sodyum – Potasyum Pompası), hücrenin bozulan iyon dengesini yeniden sağlamada etkin rol oynamaktadır. Hücresel pompalar, dengeyi sağlarken oldukça yavaş çalışmaktadır. Bu sebeple hücrede iyon akışı oldukça yavaş olmakta ve herhangi bir aksiyon potansiyeli üretilmemektedir. Hücrenin bu dengeyi sağlaması için geçen zamana, bağıl bekleme süresi adı verilir. Hücre potansiyeli eşik değeri geçmesi ile başlayıp, depolarizasyon işleminin gerçekleşmesi, ardından repolarizasyon sürecinin tamamlanması ile son bulan süreye mutlak bekleme süresi adı verilir. Mutlak bekleme süresinde sinir hücresi, tahrip edilecek kadar büyük bir değerde uyarana maruz kalsa bile aksiyon potansiyeli üretemez. Hücre dinlenme durumunda iken, ilk uyarıcı girişe maruz kalması ile başlayan ve bağıl bekleme süresi sonuna kadar geçen süreye ise toplam aktivasyon süresi adı verilir [25]. Aksiyon potansiyelinin oluşumunu özetleyen şema Şekil 1.3' te sunulmaktadır [24].

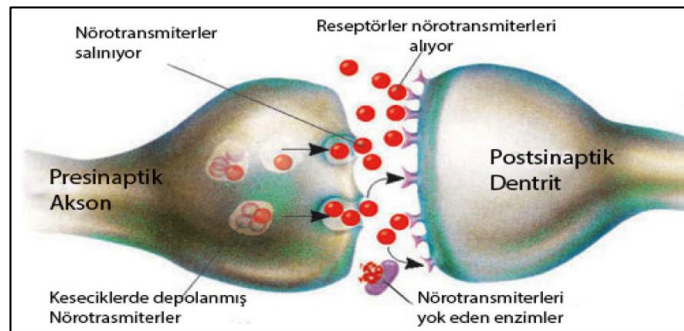


Şekil 1.3. Aksiyon Potansiyeli'nin evrelerini özetleyen bir şema [24].

1.2.3. Biyolojik Sinir Hücreleri Arasında Bilgi İletimi

Merkezi Sinir Sistemi ve Çevresel Sinir Sistemi'nden bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Canlılardaki sinir sistemlerinde üretilen bilgilerin organlara iletimi veya duyu organları ile alınan bilgilerin sinir sistemlerine iletimi görevini gerçekleştiren yapı sinir hücreleridir.

İki sinir hücresi arasında bulunan özelleşmiş bağlantı bölgelerine sinaps adı verilir. Bilgiyi ileten sinir hücresinin akson ucu Presinaptik, bilgiyi alan sinir hücresinin dentrit ucu ise Postsinaptik olarak adlandırılır. Presinaptik bölüme bilgi ulaştığı zaman, sinir hücresi Nörotransmitter olarak isimlendirilen bir çeşit kimyasal madde salgılar. Nörotransmitterler, diğer sinir hücresinin reseptörleri tarafından algılanır ve bu yöntemle gelen bilgi, diğer sinir hücresinin postsinaptik bölümüne aktarılmış olur [25].



Şekil 1.4. Presinaptik ve postsinaptik yapılarca gerçekleştirilen, sinir hücreleri arasında meydana gelen bilgi iletimi şematik gösterimi [26].

Sinapslar yaklaşık olarak 25 nanometre genişliğindeki açıklıklardır ve sinapslarda bilgi iletimi, elektriksel iletim ve kimyasal iletim olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Elektriksel iletimin gerçekleşmesi sırasında, sinir hücresinin kalsiyum iyonlarını salgılaması ile sinapslar arasındaki boşluk 2 nanometreye kadar düşer [25]. Birbirlerine neredeyse değecek kadar yaklaşan sinir hücrelerinin üzerinde sinaptik kavşak (gap) olarak isimlendirilen boşluklar oluşur ve sinaptik kavşaklardan ağırlığı 1000 Dalton' dan daha düşük olan tüm maddeler geçebilir ($1 \text{ Dalton} = 1,660538782(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$). Elektriksel iletimde bilgide kayıplar oluşabilir. Elektriksel iletim çift yönlüdür ayrıca refleks hareketleri gibi hızlı iletme ihtiyacı duyulan durumlarda meydana gelmektedir. Bu sebeple Elektriksel iletim, kimyasal iletimden daha hızlıdır [25].

Kimyasal İletim' de sinapslar arasındaki boşluk 40 nanometre kadardır. Sinir hücresine ulaşan bilgiler, kalsiyum kanallarını aktif hale getirirler. Sinir hücresi içerisinden dışarıya doğru nörotransmitter madde akışı meydana gelir. Nörotransmitterler, presinaptik bölümden gelen bilginin birebir aynısını alıcı sinir hücresinin postsinaptik bölümünde meydana getirir. Salgılanan bu nörotransmitter madde bilginin oluşumunu kolaylaştırıyorsa uyarıcı (excitatory), zorlaştırıyorsa bastırıcı (inhibitory) olarak isimlendirilir. Kimyasal iletimde sinir hücreleri arasında iyonik bir akış olmaz [25].

2. BÖLÜM

BİYOLOJİK SİNİR HÜCRELERİNİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

Canlılar, yaşamlarının her anında milyonlarca sayıda sinirsel aktiviteler gerçekleştirmektedirler. Bu aktivitelerin bir bölümü, bilinçli bir şekilde, bir kısmı ise kendi iradeleri dışında olmaktadır. Bilim insanları, canlılarda meydana gelen sinirsel olayları anlayabilmek, yorumlayabilmek ve beynin nasıl çalıştığını anlayabilmek amacıyla canlılar üzerinde bir takım deneyler gerçekleştirmektedir. Deneylerin sonuçlarının anlaşılması, çoğu zaman nümerik benzetimler neticesinde olmaktadır. Bu bağlamda sinir hücreleri üzerine çok sayıda çalışmalar yapılmış ve sinir hücrelerinin çeşitli matematiksel modelleri literatüre sunulmuştur. Tezin bu bölümünde bilim dünyası tarafından büyük oranda kabul görmüş beş adet sinir hücresinin matematiksel modeli incelenmiş ve bilgisayar ortamında nümerik benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

2.1. Hudgkin – Huxley (HH) Sinir Hücresi Modeli

Hudgkin – Huxley Sinir Hücresi Modeli; sinir hücresinin doğrusal olmayan elektriksel davranışlarını detaylı olarak inceleyen, aksiyon potansiyelinin oluşumunu açıklamada doğru sonuçlar veren bir sinir hücresi modelidir. Alan Lloyd Hodgkin ve Andrew Fielding Huxley isimli iki bilim insanı, mürekkep balığının dev aksonları ile yapmış oldukları elektro – fizyolojik çalışmalar sonucunda, aksiyon potansiyelinin başlaması ve yayılmasının temelindeki iyonik mekanizmayı açıklayan matematiksel modeli 1952’ de literatüre sunmuşlardır [27]. HH modeli, sinir hücresinin elektriksel davranışını, sodyum aktivasyon, sodyum inaktivasyon ve potasyum aktivasyonu ile açıklar. Hodgkin ve Huxley tarafından sunulan “Kapı Kavramı”, sinir hücresinin elektro – fizyolojik yapısının temelini oluşturmaktadır [27]. Hodgkin ve Huxley, bu çalışmalarlarıyla 1963 yılında

fizyoloji ve tıp alanında Nobel Bilim ödülüne layık bulunmuşlardır. HH sinir hücresi modeli, Denklem 2.1' de verilmiştir [27].

$$C_M \frac{dV}{dt} = I_{input} - \bar{g}_k n^4 (V - E_K) - \bar{g}_{Na} m^3 h (V - E_{Na}) - \bar{g}_L (V - E_L) \quad (2.1)$$

Eşitlikte geçen C_M hücre zarının kapasitesini ($\mu F/cm^2$), I_{input} uygulanan harici akımı ($\mu A/cm^2$) ve V hücre zarı potansiyelini (mV) ifade etmektedir. \bar{g}_k ve \bar{g}_{Na} (mS/cm^2) sırasıyla potasyum ve sodyum iyon kanallarının en büyük iletkenlik değerleridir. \bar{g}_L (mS/cm^2) ise çoğunun klor iyonlarının oluşturduğu, klor ve kalsiyum iyonlarının meydana getirdiği sızıntı iyonlarına ait iletkenlik değeridir. Bu iletkenlik, hücre zarı üzerinde bulunan ve hücre içerisi ile dışarısı arasındaki iyon geçişlerini sağlayan sodyum ve potasyum kanallarının tümü açık olduğu durumda, hücre zarının sodyum ve potasyum iyonlarına karşı göstereceği en büyük elektriksel iletkenlik olarak ifade edilmektedir [27]. n ve m aktivasyon kapılarının açık olma olasılığını, h ise inaktivasyon kapısının açık olma olasılığını ifade etmektedir. Hodgkin ve Huxley, literatüre sunmuş oldukları sinir hücresi modelinde potasyum iyon kanalının iletkenliğini dört özdeş kapıyla ve sodyum iyon kanalının iletkenliğini ise üç adet aktivasyon bir adet inaktivasyon kapı ile modellemişlerdir [27]. Bu modele göre potasyum kanalının açık olma olasılığı n^4 , sodyum kanalının açık olma olasılığı $m^3 h$ olarak ifade edilir. Bu durumda sodyum ve potasyum akımları ile kaçak akımlar, Denklem 2.2' de görüldüğü gibi olur [27].

$$\begin{aligned} I_K &= \bar{g}_k n^4 (V - E_K) \\ I_{Na} &= \bar{g}_{Na} m^3 h (V - E_{Na}) \\ I_L &= \bar{g}_L (V - E_L) \end{aligned} \quad (2.2)$$

E_K, E_{Na} ve E_L sırasıyla potasyum iyonlarının, sodyum iyonlarının ve kaçak iyonların dinlenme potansiyellerini ifade etmektedir ve Denklem 2.3 ile hesaplanır [28].

$$E_{ion} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[Ion]_{out}}{[Ion]_{in}} \quad (2.3)$$

Burada $[Ion]_{in}$ ve $[Ion]_{out}$ sırayla sinir hücrenin içindeki ve dışındaki iyonların yoğunluğunu (mM), R evrensel gaz sabitini ($mJ/(K^0.Mol)$), T Kelvin cinsinden sinir hücresi sıcaklığını ($K^0 = 273.16 + 37^0$), F faraday sabitini ($96.480\ coulombs/Mol$), z iyon birleşme değerini (K^+ ve Na^+ için $z = 1$) ifade eder [28].

n, m, h parametreleri zamana bağlı diferansiyel denklem takımı ile tanımlanır ve Denklem 2.4' de ifade edilmiştir [27].

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= a_n(V)(1 - n) - \beta_n(V)n \\ \frac{dm}{dt} &= a_m(V)(1 - m) - \beta_m(V)m \\ \frac{dh}{dt} &= a_h(V)(1 - h) - \beta_h(V)h\end{aligned}\tag{2.4}$$

Eşitliklerde yer alan $a_n(V)$, $a_m(V)$ ve $a_h(V)$ ifadeleri, iyon kanal kapılarının kapalı durumdan açık duruma; $\beta_n(V)$, $\beta_m(V)$ ve $\beta_h(V)$ ifadeleri ise iyon kanal kapılarının açık durumdan kapalı duruma geçişini belirleyen hız fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar, hücre zarının potansiyeline bağlı olarak değişirler ve deneysel olarak elde edilen fonksiyonlardır. İyon kanal kapılarının kapalı durumdan açık duruma geçiş hızını belirleyen denklem takımı Denklem 2.5' de ifade edilmiştir [29].

$$\begin{aligned}a_n(V) &= \frac{0.01(10 - V)}{e^{(10-V)/10} - 1} \\ a_m(V) &= \frac{0.1(25 - V)}{e^{(25-V)/10} - 1} \\ a_h(V) &= 0.07e^{-V/20}\end{aligned}\tag{2.5}$$

İyon kanal kapılarının açık durumdan kapalı duruma geçişini belirleyen hız fonksiyonu ise Denklem 2.6 ile tanımlanmaktadır [29].

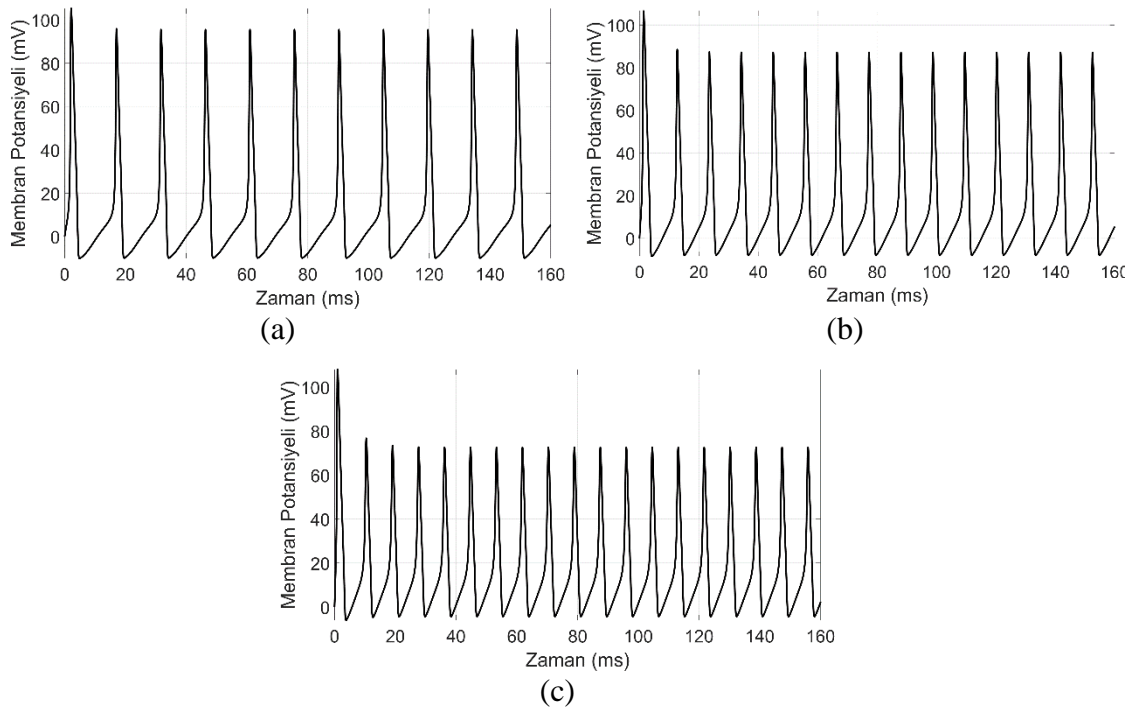
$$\begin{aligned}\beta_n(V) &= 0.125e^{-V/80} \\ \beta_m(V) &= 4e^{-V/18} \\ \beta_h(V) &= \frac{1}{e^{(30-V)/10} + 1}\end{aligned}\tag{2.6}$$

HH modelin nümerik benzetimini bilgisayar ortamında gerçekleştirmek için parametreler, daha önce literatüre sunulan bir çalışmadan alınmıştır [29]. Seçilen parametreler, Tablo 2.1’ de ifade edilmektedir. Ayrıca $C_M = 1 \mu F/cm^2$ olarak seçilmiş ve farklı uyarıcı akım değerlerinde gerçekleştirilmiş benzetim sonuçları Şekil 2.1’ de verilmektedir.

Tablo 2.1. Literatüre sunulan çalışmada kullanılan parametreler.

\bar{g}_k	\bar{g}_{Na}	\bar{g}_L
$36 mS/cm^2$	$120 mS/cm^2$	$0.3 mS/cm^2$
E_K	E_{Na}	E_L
$-12 mV$	$115 mV$	$10.6 mV$

Sayısal analiz sonucu, harici uyarıcı akımı tanımlayan I parametresinin, aksiyon potansiyelinin frekansını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Uyarıcı akımın sayısal değerinin artması, üretilen aksiyon potansiyelinin frekansını da arttırmaktadır.



Şekil 2.1. HH Sinir Hücresi Modeli’ nin a) $I = 10$, b) $I = 25$, c) $I = 50$ için hücre zarı potansiyeli benzetim sonucu.

2.2. FitzHugh – Nagumo (FHN) Sinir Hücresi Modeli

Richard FitzHugh isimli bilim adamı 1950' li yıllarda, Hudgkin – Huxley sinir hücresi modelinin matematiksel ifadesini sadeleştirmek için bir takım çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Richard FitzHugh, HH modelinde var olan n ve h parametrelerinin m parametresine göre daha yavaş bir kinetik sergilediğini ve $n + h$ ifadesinin değerinin yaklaşık olarak 0.8 olduğunu göstermiştir. Bu durumun sonucunda dört değişkenli HH modeli, Denklem 2.7' de gösterildiği gibi iki değişkene indirgenmiştir ve hızlı-yavaş faz eksen modeli olarak adlandırılmıştır [30].

$$\begin{aligned}
 C_M \frac{dV}{dt} &= I_{input} - \bar{g}_k n^4 (V - E_K) - \bar{g}_{Na} m_\infty^3(V) h (0.8 - n) (V - E_{Na}) \\
 &\quad - \bar{g}_L (V - E_L) \\
 n_w(V) \frac{dn}{dt} &= n_\infty(V) - n
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

FitzHugh, çalışmalarında Balthasar Van der Pol (BVP) Osilatörü'nün, tıpkı Hudgkin – Huxley sinir hücresi modelinin sahip olduğu uyarılabilir-osilatör sınıfının özelliklerini taşıdığını göstermiştir. Daha önceki çalışmaları sonucunda elde ettiği Denklem 2.7' yi BVP Osilatörü ile yeniden düzenlemiştir ve Denklem 2.8' yi literatüre sunmuştur [2].

$$\begin{aligned}
 \frac{dv}{dt} &= c(v - u + I - \frac{v^3}{3}) \\
 \frac{du}{dt} &= \frac{v - bu + a}{c}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Burada v sinir hücresinin zar potansiyelini, u toparlanma parametresini, I hücre zarına uygulanan harici akımı temsil etmektedir. $1 - 2b/3 < a < 1, 0 < b < 1, b < c^2$ olmak üzere a, b, c parametreleri sabit değerlere sahiptirler [2]. Denklem 2.8 için parametreler $I = 0.34, a = 0.7, b = 0.8$ olarak literatürde yer alan bir çalışma esas alınarak seçilmiştir [2,30]. c değişkeni, 5, 10, 15 olmak üzere üç farklı değerde seçilip model benzetim sonuçları Şekil 2.2' de paylaşılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde c parametresinin çıkış deseninin periyodunu doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır.

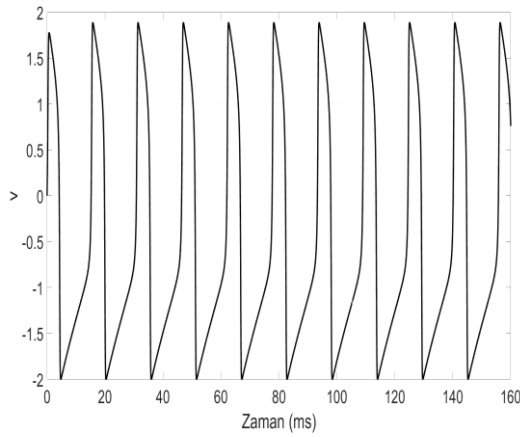
FitzHugh, çalışmalarını gerçekleştirdiği 1961 yılında Nagumo ve arkadaşları da literatüre sinir aksonundaki bilgi iletiminin benzetimini tünel diyotlar üzerinde gerçekleştirmişlerdir [31]. 1962 yılında ise Nagumo ve arkadaşları çalışmaları sonucunda sinir aksonun matematiksel modelini literatüre sunmuşlardır [32]. Bilim dünyasına yapılan bu katkı, aynı zamanda FitzHugh' in çalışmaları sonucunda elde ettiği Denklem 2.8' in deneysel kanıtı özelliğini taşımaktadır. Bu iki bilim insanının gerçekleştirdiği eşit katkılarından dolayı Denklem 2.8, FitzHugh – Nagumo sinir hücresi modeli ismini almıştır.

FitzHugh – Nagumo sinir hücresi modeli, HH modele kıyasla daha az sayıda değişkene ve parametreye sahip olması sayesinde matemaiksel gerçekleştirimi oldukça kolaydır. Bu sebepten dolayı FHN modeli üzerine yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Bunlardan biri de J. Keener ve J. Sneyd' in 1998 yılında literatüre sunmuş oldukları çalışmadır [33]. Bu çalışma, V ' nin kübik bir fonksiyon ve n değişkeninin yaklaşık olarak doğrusal değiştiğini kabul ederek polinomlarla yeniden düzenlenmesidir. Bu durum Denklem 2.9' da ifade edilmiştir [33].

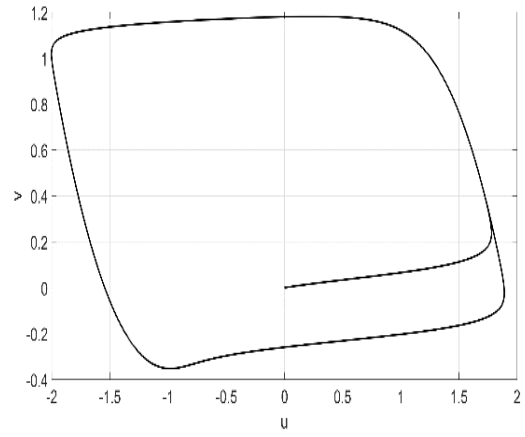
$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= v(v - a)(1 - v) - w + I \\ \frac{dw}{dt} &= \varepsilon(v - \gamma w) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Burada v sinir hücresinin zar potansiyelini, w toparlanma parametresini, I hücre zarına uygulanan harici akımı temsil etmektedir. a , ε ve γ sabit değerli katsayılardır. Modelin elektro-fizyolojik olarak doğru olabilmesi için a değeri genellikle sıfırdan büyük seçilir ($0 < a < 0.5$ veya $0 < a < 1$). Bazı özel durumlarda a değeri sıfırdan küçük seçilmektedir [34].

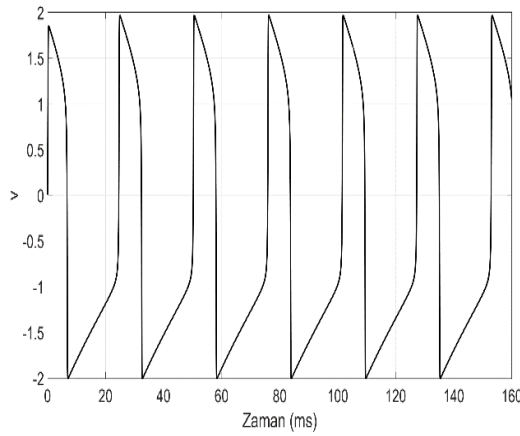
Denklem 2.9 için parametreler ise $a = -0.008$, $\gamma = 0.008$ olarak literatürde yer alan örnek bir çalışmadan seçilmiştir [35, 36]. Farklı ε değerleri için model benzetim sonuçları Şekil 2.3' de sunulmuştur.



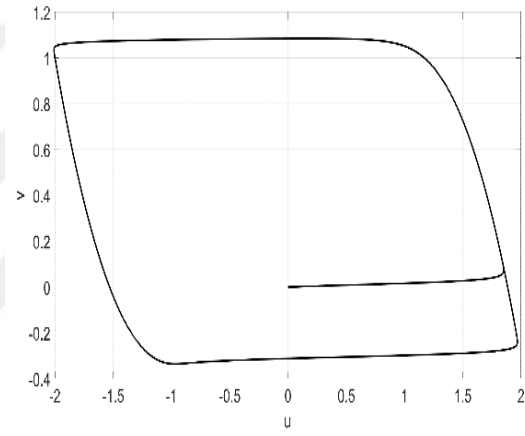
(a)



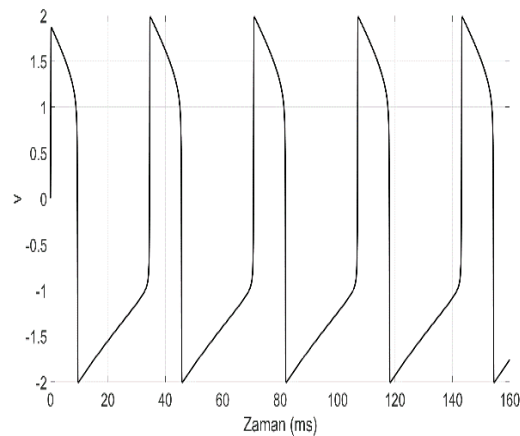
(b)



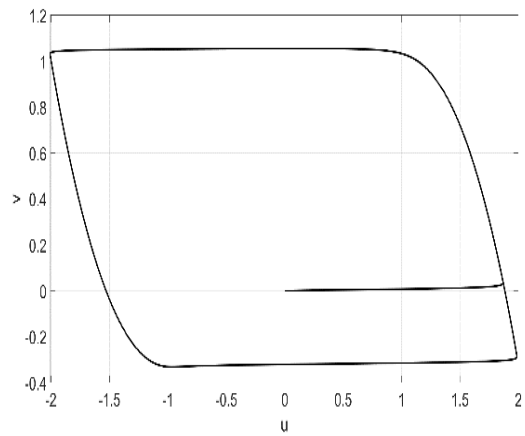
(c)



(d)

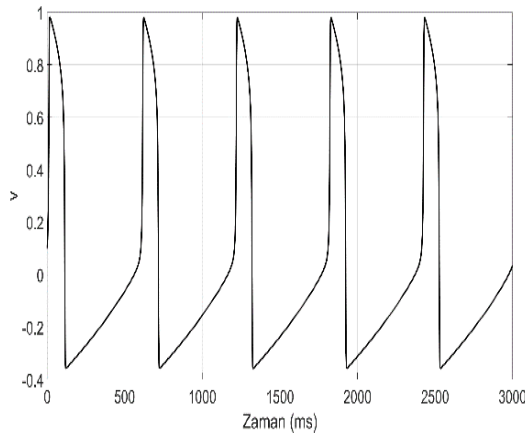


(e)

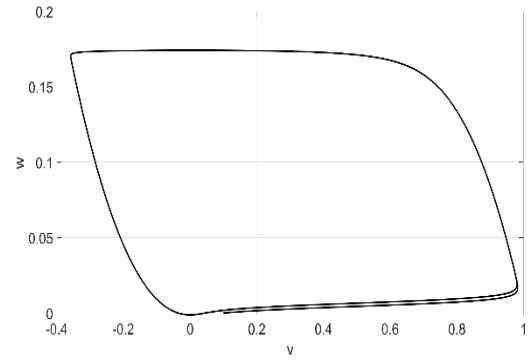


(f)

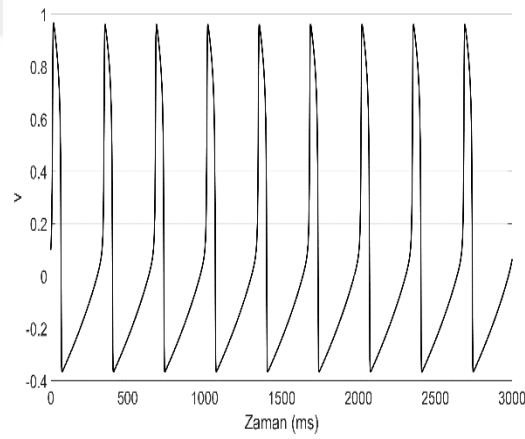
Şekil 2.2. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.8. kullanılarak $a=0.7$, $b=0.8$, $I=0.34$ parametreleri seçildiğinde a) $c=5$ için hücre zarı potansiyeli, b) $v-u$ faz portresi c) $c=10$ için hücre zarı potansiyeli, d) $v-u$ faz portresi, e) $c=15$ için hücre zarı potansiyeli f) $v-u$ faz portresi benzetim sonuçları.



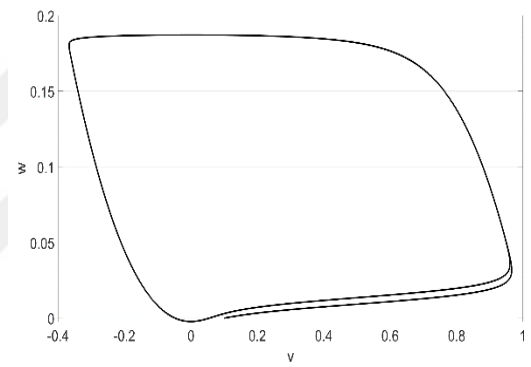
(a)



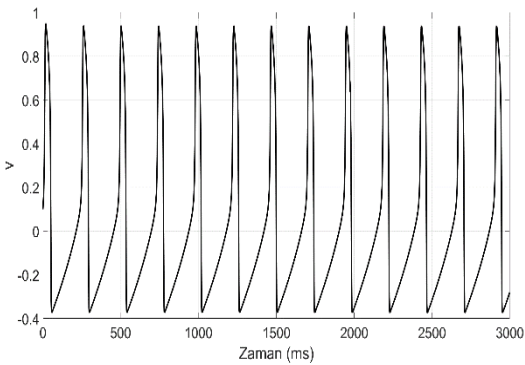
(b)



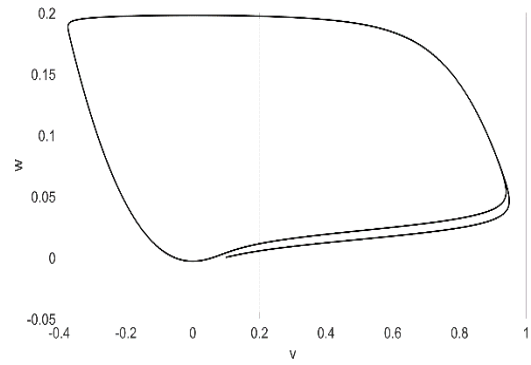
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.3. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.9. kullanılarak $\alpha=-0.008$, $\gamma=0.008$ parametreleri seçildiğinde a) $\epsilon=0.002$ için hücre zarı potansiyeli, b) v-u faz portresi c) $\epsilon=0.004$ için hücre zarı potansiyeli, d) v-u faz portresi, e) $\epsilon=0.006$ için hücre zarı potansiyeli f) v-u faz portresi benzetim sonuçları.

2.3. Morris – Lecar (ML) Sinir Hücresi Modeli

Catherine Morris ve Harold Lecar isimli iki bilim insanı, eklem bacaklı ailesine ait olan dev bir kaya midyesinin kas dokuları üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda kaya midyesi kas dokularını, HH modeli ile benzer şekilde iletkenlik tabanlı bir sistem olarak modellemişlerdir. Üç adet değişkene sahip, Kalsiyum ve Potasyum iyonları ile açıklanan model, Denklem 2.10' de ifade edilmektedir [37].

$$\begin{aligned}
 C \frac{dV}{dt} &= I_{input} - I_K - I_{Ca} - I_L \\
 \frac{dM}{dt} &= \lambda_M(V)[M_\infty(V) - M] \\
 \frac{dN}{dt} &= \lambda_N(V)[N_\infty(V) - N]
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Burada $\lambda_M(V)$ ve $\lambda_N(V)$ sırasıyla M ve N değişkenlerinin zaman ölçeklemesini tanımlar. I_{input} uyarıcı akımları açıklayan parametredir. I_K potasyum iyon akımlarını, I_{Ca} kalsiyum iyon akımlarını ve I_L kanallarda oluşan sızıntı akımlarını tanımlamaktadır. Modelin iyon akımları, Denklem 2.11' de ifade edilmektedir [37].

$$\begin{aligned}
 I_K &= g_K N(V - V_K) \\
 I_{Ca} &= g_{Ca} M(V - V_{Ca}) \\
 I_L &= g_L(V - V_L)
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Denklem 2.14 incelendiğinde g_K , potasyum iyon kanalının en büyük iletkenliğini, g_{Ca} , kalsiyum iyon kanalının en büyük iletkenliğini ve g_L ise sızıntı akımları iyon kanallarının en büyük iletkenliğini belirleyen parametrelerdir. V hücre zarı potansiyelini, M kalsiyum iyon kanallarının açık olma olasılığı, N potasyum iyon kanallarının açık olma olasılığını açıklayan değişkenlerdir. V_K , V_{Ca} ve V_L sırasıyla potasyum, kalsiyum ve sızıntı iyon kanallarının denge potansiyelleridir [37]. ML model bu değişkenlere sahip olması ve iletkenlik tabanlı bir sistem ile ifade edilmesi sebebiyle HH model ile benzerlik göstermektedir.

Ayrıca $M_\infty(V)$, $N_\infty(V)$, $\lambda_M(V)$ ve $\lambda_N(V)$ fonksiyonları hiperboliktir ve Denklem 2.12' deki gibi tanımlanmaktadır [37].

$$\begin{aligned}
 M_\infty(V) &= 0.5[1 + \tanh(\frac{V - V_1}{V_2})] \\
 \lambda_M(V) &= \bar{\lambda}_M \cosh(\frac{V - V_1}{2V_2}) \\
 N_\infty(V) &= 0.5[1 + \tanh(\frac{V - V_3}{V_4})] \\
 \lambda_N(V) &= \bar{\lambda}_N \cosh(\frac{V - V_3}{2V_4})
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Moris ve Lecar ilerleyen çalışmalarında üç değişkenli diferansiyel denklem takımının sadeleştirilmesini amaçlamıştır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen uygulamalarda, kalsiyum iyon kanallarının dinamikleri potasyum iyon kanallarının dinamiklerine kıyasla daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Bunun sonucunda kalsiyum kanalının iletkenliği her zaman sürekli durumda olacaktır ve $M = M_\infty(V)$ eşitliği yazılabilir. Netice itibarıyla Denklem 2.10 yeniden düzenlenmiştir ve iki değişkenli diferansiyel denklem takımı ile tanımlanan Morris – Lecar Sinir Hücresi Modeli 1981 yılında Denklem 2.13. ile literatüre sunulmuştur [37]. ML model V - N faz modelinde olması ve patlamalı aksiyon potansiyeli davranışını sergileyememesi sebebiyle FHN model ile benzerlik göstermektedir.

$$\begin{aligned}
 C \frac{dV}{dt} &= I - g_{Ca} M_\infty(V)(V - E_{Ca}) - g_K N(V - E_K) - g_L(V - E_{Leak}) \\
 \frac{dN}{dt} &= \lambda_N(V)[N_\infty(V) - N]
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

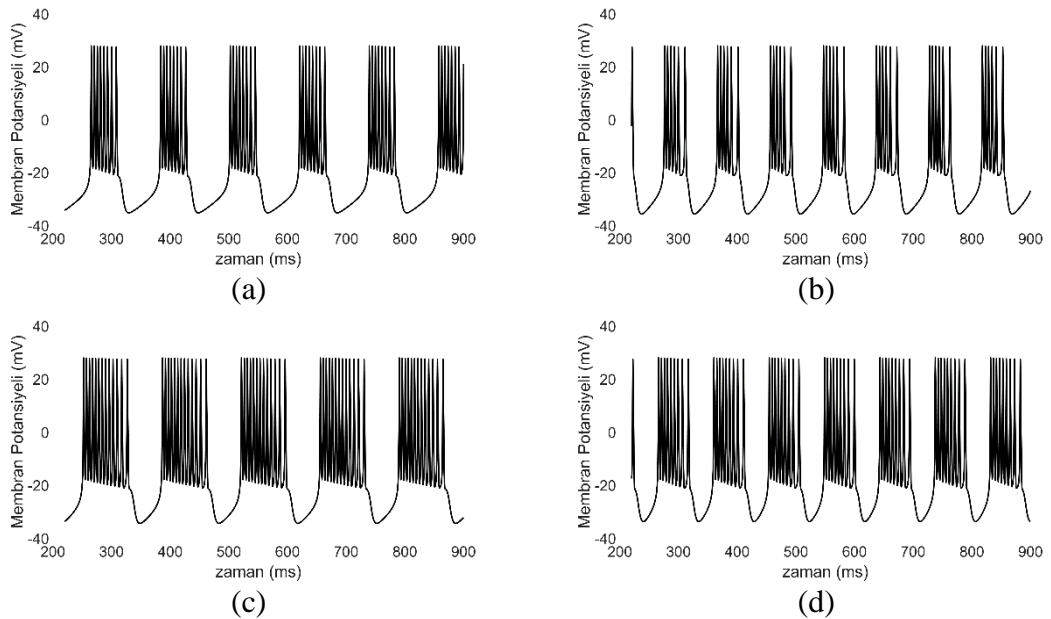
Fonksiyonda yer alan $M_\infty(V)$, $N_\infty(V)$ ve $\lambda_N(V)$ değişkenleri Denklem 2.14 ile tanımlanmaktadır [37]

$$\begin{aligned}
 M_\infty(V) &= 0.5[1 + \tanh(\frac{V - V_1}{V_2})] \\
 N_\infty(V) &= 0.5[1 + \tanh(\frac{V - V_3}{V_4})] \\
 \lambda_N(V) &= \bar{\lambda}_N \cosh(\frac{V - V_3}{2V_4})
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

ML sinir hücresi modelinin, patlamalı aksiyon potansiyeli deseni üretebilmesi için hızlı ve yavaş dinamiklere sahip olması gerekir [38]. Bu bağlamda ML sinir hücresi modeline üçüncü bir değişken eklenerek patlamalı aksiyon potansiyeli üretebilmesi sağlanmıştır. Denklem 2.15' de üçüncü değişkene sahip ML model verilmiştir [39,40].

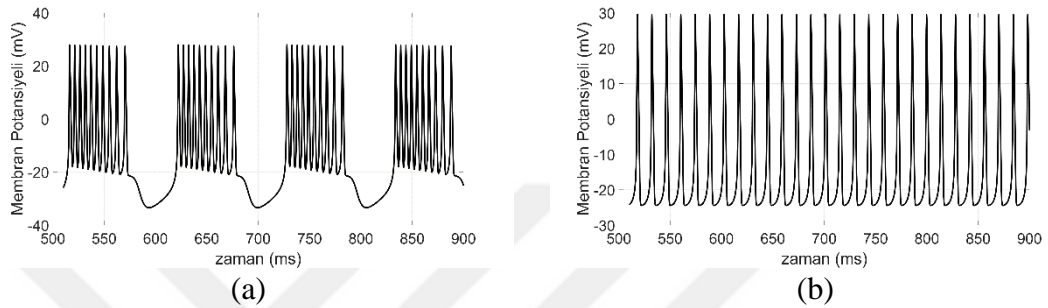
$$\begin{aligned}
 C \frac{dV}{dt} &= I - g_{Ca} M_{\infty}(V)(V - E_{Ca}) - g_K N(V - E_K) - g_L(V - E_{Leak}) \\
 \frac{dN}{dt} &= \lambda_N(V)[N_{\infty}(V) - N] \\
 \frac{dI}{dt} &= -\varepsilon(V + V_0)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Burada I patlamalı aksiyon potansiyelini düzenlemek için eklenen değişkendir. ε patlamalı aksiyon potansiyelinin zaman ölçeklemesini gerçekleştiren parametredir. Farklı yapılar da patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri, iyon kanallarının denge potansiyelleri V_{Ca} ve V_K 'nin çeşitli değerleri ile elde edilebilir. ML sinir hücresi modelinde parametreler $E_{Ca} = 100$, $E_K = -70$, $E_{Leak} = -50$, $g_{Ca} = 1.2$, $g_K = 2$, $g_L = 0.5$, $V_1 = -1$, $V_2 = 15$, $V_3 = 10$, $V_4 = 5$, olarak belirlenmiştir [40]. Bu durumda Aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli dinamiklerinin, farklı ε ve V_0 değerleri için nümerik benzetim sonuçları Şekil 2.4' de verilmiştir.



Şekil 2.4. ML Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.18. kullanılarak a) $\varepsilon = 0.003$, $V_0 = 20$ b) $\varepsilon = 0.005$, $V_0 = 20$ c) $\varepsilon = 0.003$, $V_0 = 15$ d) $\varepsilon = 0.005$, $V_0 = 15$ için benzetim sonuçları.

Benzetim sonuçları dikkate alındığında ε parametresinin değışimi, üretilen desenin frekansını doğrudan etkilemektedir. V_0 parametresi ise üretilen patlamalı aksiyon potansiyelindeki her bir spike sayısını değıştirmektedir. $\bar{\lambda}_N$ parametresi, sinir hücresinde üretilen zar potansiyelinin çeşidini belirler. $\bar{\lambda}_N$ parametresindeki değışim sonucunda oluşan zar potansiyeli desen çeşitlerinin benzetim sonuçları Şekil 2.5’ de sunulmuştur.



Şekil 2.5. ML Sinir Hücresi Modeli’ nin Denklem 2.18. kullanılarak a) $\bar{\lambda}_N = 3$, b) $\bar{\lambda}_N = 4$, için patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

2.4. Hindmarsh – Rose Sinir Hücresi Modeli (HR)

Hindmarsh ve Rose isimli iki bilim insanı çalışmalarında, FitzHugh – Nagumo sinir hücresi modeli üzerinde bir takım değışiklikler yaparak 1982 yılında literatüre iki değışkene sahip yeni bir model sundular [30]. Bu modeli FHN modelinden farklı yapan tek özellik, toparlanma parametresi u ’ nun doğrusal değil parabolik olmasıdır. Model Denklem 2.16’ de ifade edilmektedir [41].

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= u - av^3 - bv^2 + I \\ \frac{du}{dt} &= c - dv^2 - u \end{aligned} \quad (2.16)$$

Burada v zar potansiyelini ve u toparlanma parametresi temsil etmektedir. Toparlanma parametresi u , aksiyon potansiyeli değışkeni olarak da adlandırılır ve sodyum - potasyum iyonlarının hızlı iyon kanalları vasıtasıyla taşınma hızını temsil etmektedir. a, b, c ve d sabit değerli katsayılarıdır, I parametresi ise uyarıcı akımları temsil etmektedir. Model sinirsel ateşlemeyi daha doğru bir şekilde açıklar fakat patlamalı aksiyon potansiyeli (bursting) ve adaptasyon gibi elektro – fizyolojik özelliklere sahip değildir [41].

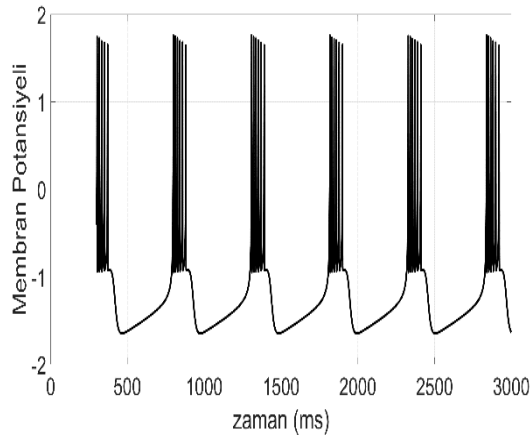
1984 yılında Hindmarsh ve Rose modellerini geliştirerek üçüncü bir durum değişkeni eklemiştirler. Bu değişken, patlamalı aksiyon potansiyeli değişkeni olarak da ifade edilir. Bu değişken sayesinde Hindmarsh – Rose sinir hücresi modeli, biyolojik sinir hücresinin sahip olduğu özellikleri sergilemektedir. HR modelinin matematiksel ifadesi Denklem 2.17 ile tanımlanmaktadır [3].

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= y - ax^3 - bx - z + I \\ \frac{dy}{dt} &= c - dx^2 - y \\ \frac{dz}{dt} &= \varepsilon(s(x - x_{rest}) - z)\end{aligned}\tag{2.17}$$

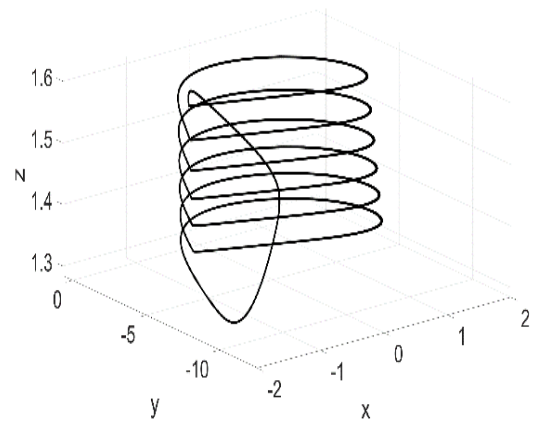
Burada x zar potansiyelini, y toparlanma parametresini (hızlı) ve z adaptasyon akımını (yavaş) temsil etmektedir. b patlamalı aksiyon potansiyeli – aksiyon potansiyeli arasında ki geçiş kontrolünü ve aksiyon potansiyelinin frekansını düzenleyen, ε aksiyon potansiyelinin frekansını ve patlamalı aksiyon potansiyeli davranışındaki her bir aksiyon potansiyeli sayının kontrolünü, s adaptasyonu sağlayan parametrelerdir. x_{rest} sistemin dinlenme potansiyelini ve I parametresi ise uyarıcı akımları temsil etmektedir [3].

Sinir hücresi modellerinde matematiksel karmaşıklık arttıkça göstermiş oldukları dinamik davranışların çeşitliliği de artar. Kaotik davranışlara da sahip olan HR modelinin matematiksel karmaşıklığı az olmasına rağmen sahip olduğu aksiyon potansiyeli çeşitliği oldukça fazladır [29].

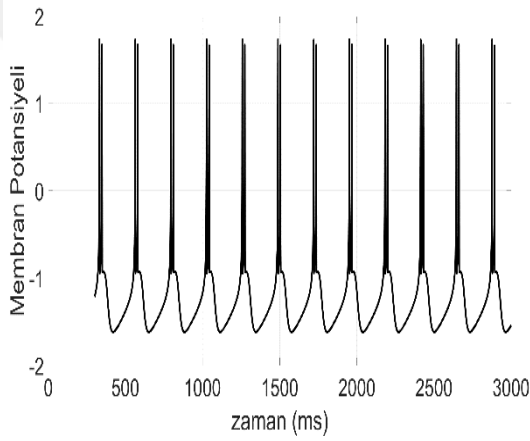
HR sinir hücresi modelinin nümerik benzetimini yapabilmek için parametreler literatüre sunulan orijinal modelden alınmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında a, b, c, d ve s parametreleri sabit değerlerde seçilmiştir. $a = 1, b = 3, c = 1, d = 5, s = 4, I = 1.5, x_{rest} = -1.6$ olarak belirlenmiştir [3]. ε parametresi ise değişken değerler almaktadır. Bu şartlarda oluşan zar potansiyeli desenleri Şekil 2.6' de verilmiştir.



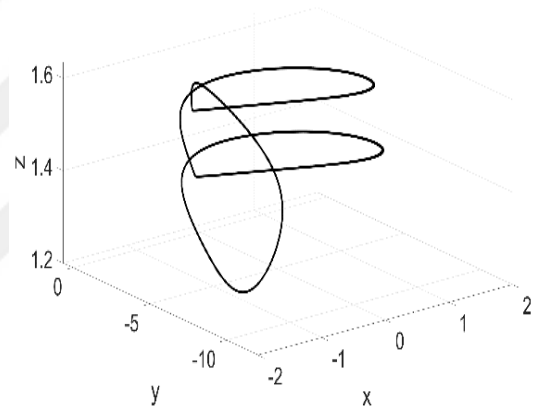
(a)



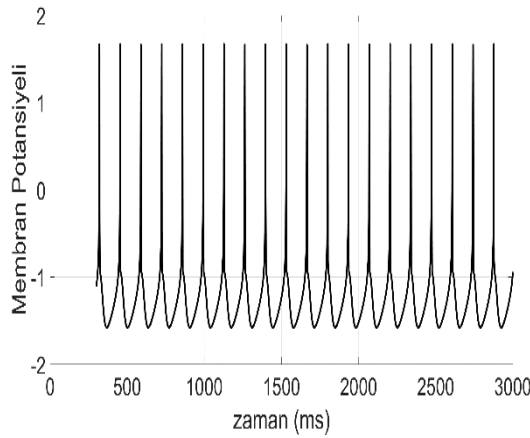
(b)



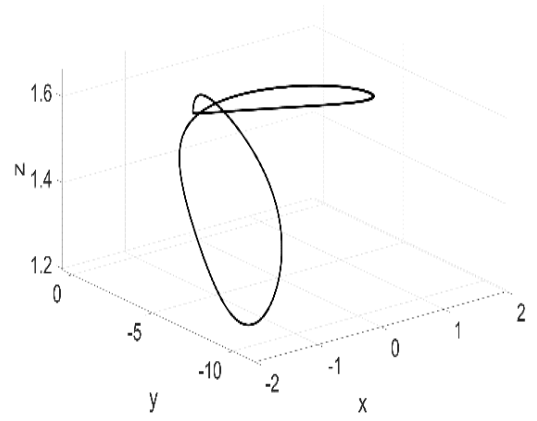
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.6. HR Sınır Hücre Modeli' nin Denklem 2.17. kullanılarak a) $\varepsilon = 0.001$ için dört adet spike bulunan patlamalı aksiyon potansiyeli b) bu durumda x-y-z faz portreleri gösterimi, c) $\varepsilon = 0.003$, için iki spike bulunan patlamalı aksiyon potansiyeli d) bu durumda x-y-z faz portreleri e) $\varepsilon = 0.007$ için aksiyon potansiyeli, f) bu durumda x-y-z faz portrelerinin benzetim sonuçları.

2.5. Izhikevich (IZ) Sinir Hücresi Modeli

Canlıların beyin davranışlarının anlaşılması için sinir hücreleri üzerine yapılan birçok çalışmada ulaşılmak istenen ortak hedeflerden ikisi; bilim dünyasına sunulacak matematiksel modelin, gerçek bir sinir hücresinin sahip olduğu tüm aksiyon potansiyeli desenlerini üretebilmesi ve benzetiminin düşük maliyetli olmasıdır [42, 43]. Bu kapsamda literatüre 2003 yılında Eugene Izhikevich tarafından sunulan model, biyolojik sinir hücresinin üretmiş olduğu en bilinen 20 farklı desen şeklini gerçekleştirebilmekte ve sadece iki değişkene sahip olması sebebiyle gerçekleştirimi oldukça kolay olmaktadır. Izhikevich sinir hücresi modeli Denklem 2.18' de ifade edilmektedir [42, 43].

$$\begin{aligned}
 \frac{dv}{dt} &= 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \\
 \frac{du}{dt} &= a(bv - u) \\
 v \geq 30mV &\Rightarrow \quad v \leftarrow c \\
 &\quad \quad \quad u \leftarrow u + d
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Burada v sinir hücresinin zar potansiyelini, u Na^+ iyonik akımının aktivasyonunu ve K^+ iyonik akımının inaktivasyonunu temsil eden toparlanma değişkenidir. a toparlanma değişkenin zaman ölçeklemesini tanımlar ve düşük değerlerde toparlanma yavaş olmaktadır, b toparlanma değişkeni u' nun hassasiyeti ile zar potansiyeli v' nin eşik seviyesi dalgalanmalarını tanımlamaktadır. b' nin büyük değerlerinde IZ sinir hücresi modeli eşikaltı salınım ve düşük-eşik aksiyon potansiyeli dinamikleri sergiler. c hızlı yüksek-eşik seviyeli K^+ iletkenliğinin sebep olduğu zar potansiyelinin, aksiyon potansiyeli sonrası sıfırlama değeri olarak tanımlanır. d yavaş yüksek-eşik seviyeli Na^+ ve K^+ iletkenliklerinin sebep olduğu toparlanma değişkeni u' nun aksiyon potansiyeli sonrası sıfırlama parametresi olarak tanımlanır. I parametresi ise harici uyarıcı akımları ifade etmektedir [42, 43]. Izhikevich Sinir Hücresi Modeli'nin sahip olduğu elektro-fizyolojik özelliklerden yedisi için parametreler Tablo 2.2' de verilmiştir [42, 43].

Tablo 2.2. Bilinen zar potansiyeli çeşidi için Izhikevich sinir hücresi model parametreleri.

	a	b	c	d	I
Regular Spike	0.02	0.2	- 65	8	14
Intrinsically Burst	0.02	0.2	- 55	4	14
Chattering	0.02	0.2	- 50	2	14
Fast Spike	0.1	0.2	- 65	2	14
Low-Trehshold Spike	0.02	0.25	- 65	2	14
Thalamo-Cortical	0.02	0.25	- 65	0.05	14
Rezonator	0.1	0.25	- 65	2	14

Tablo 2.2’ de yer alan parametreler kullanılarak gerçekleştirilen örnek dört çeşit zar potansiyeli deseni için nümerik benzetim sonuçları ise Şekil 2.4’ de sunulmuştur.

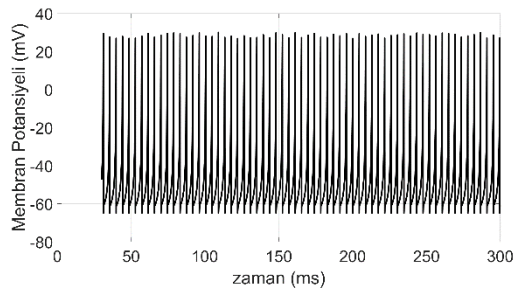
2.6. Osilatör Modellerinin Matematiksel Olarak İncelenmesi

2.6.1. Balthasar Van der Pol (BVP) Osilatörü

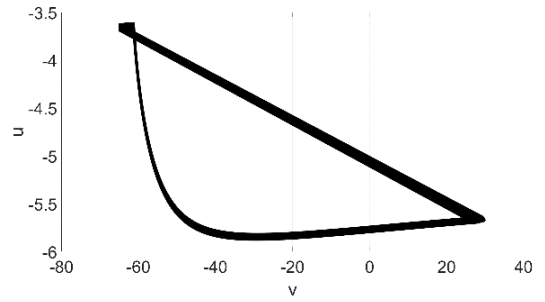
Triod olarak isimlendirilen, bir vakum tüp içinde üç aktif elektrodan oluşan elektriksel yükselteç devresini tanımlamak için, Balthasar van der Pol tarafından 1920 yılında literatüre sunulmuş bir osilatördür. Denklem 2.19’ da ifade edilmiştir [44].

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \epsilon(1 - x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (2.19)$$

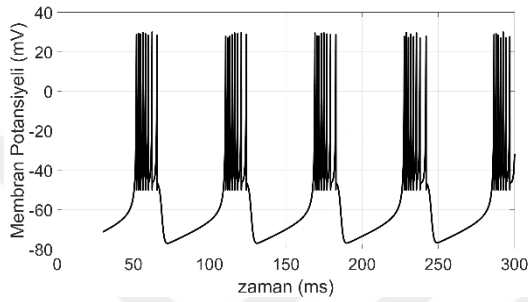
1926 senesinde Balthasar van der Pol (BVP), Denklem 2.19 ile ifade edilen kübik-doğrusal olmayan diferansiyel denklem takımını R ve r olmak üzere iki adet direnç, bir adet kapasite, bir adet indüktans ve bir adet tetrode (dört adet aktif elektrodu bulunan vakum tüp) ile elektriksel devresini gerçekleştirmiştir [45]. Devrenin osilasyonu $\epsilon = RC$ eşitliği ile ifade edilmektedir (Direnç ve kapasite elemanları ile oluşturulan bir elektriksel devrenin gevşeme salınımı “relaxation oscillation” zaman sabiti $t = RC$ eşitliği ile elde edilir.). BVP Osilatörü matematiksel ifadesinde $\epsilon \gg 1$ olduğu durumlarda devre gevşeme salınımı dinamiği göstermektedir [45].



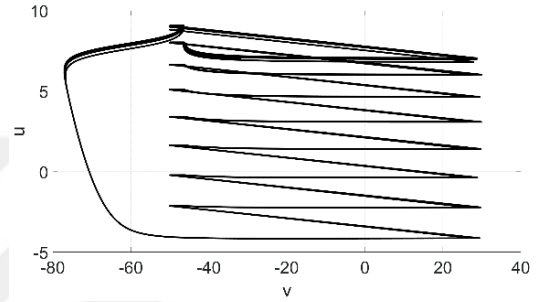
(a)



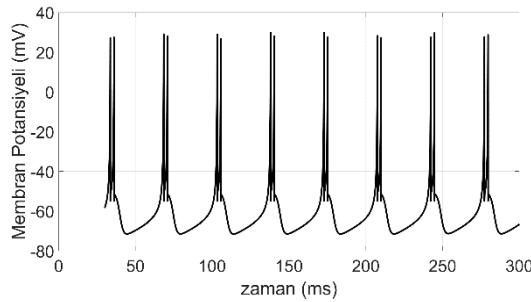
(b)



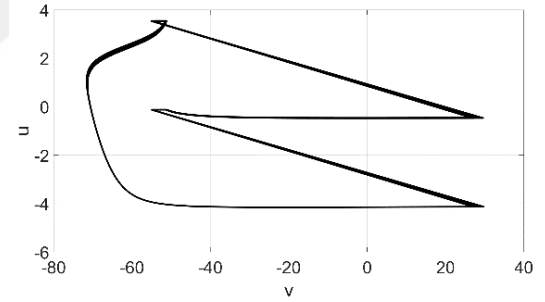
(c)



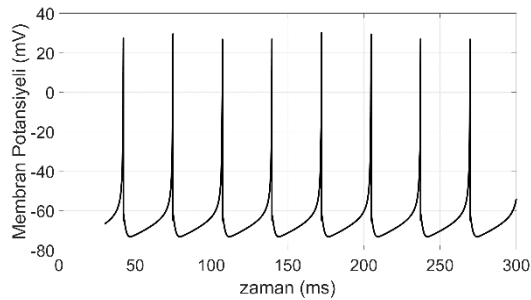
(d)



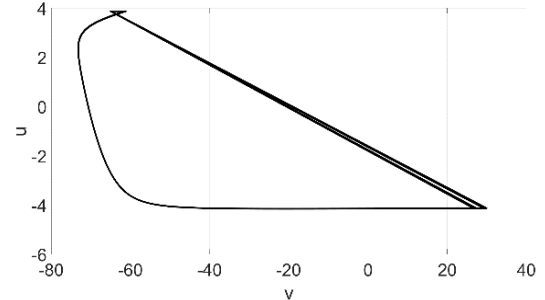
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 2.7. IZ Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.10. kullanılarak a) Fast Spike, b) v-u faz portresi, c) Chattering, d) v-u faz portresi, e) Intrinsicly Burst, f) v-u faz portresi, g) Regular Spike, h) v-u faz portresi desenlerinin benzetim sonuçları.

Bundan dolayı “Gevşeme Salınımı” olarak da isimlendirilen BVP Osilatörü, canlıların kalp atış dinamiklerini açıklamada öncü olmuştur ve 1928 yılında gevşeme salınımına dayanan kalp atışının matematiksel denklemini literatüre sunmuşlardır [46].

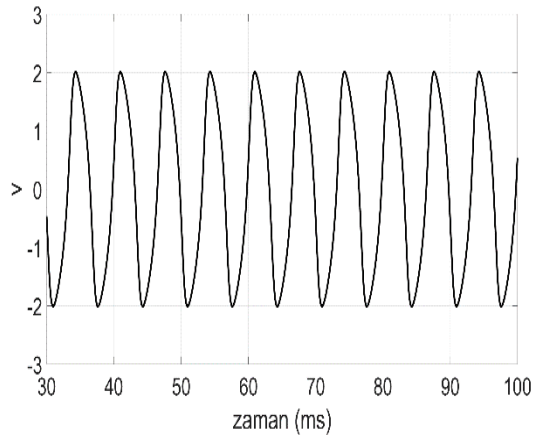
Denklem 2.19 ile sunulan BVP Osilatör matematiksel modeli, yeniden düzenlenir ve bazı yaklaşımlar yapılırsa Denklem 2.20. elde edilebilir [47].

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y \\ \frac{dy}{dt} &= \varepsilon(p^2 - x^2) - g^2x \end{aligned} \quad (2.20)$$

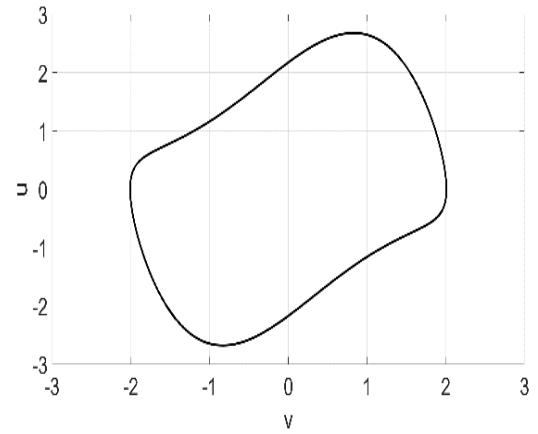
Burada ε desen şeklini belirleyen bir parametredir. p^2 desen şeklinin genliğini belirleyen ve g^2 ise desen şeklinin frekansını belirleyen parametredir. $\varepsilon = 1$ ve farklı p^2 , g^2 değerlerinde oluşan ritmik desenler Şekil 2.8’ de verilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde p^2 ’ nin artışında, oluşan ritmik desenin genliğinde bir artış ve g^2 ’ nin artışında ise oluşan ritmik desenin frekansında bir artış meydana geldiği anlaşılmaktadır.

2.6.2. Matsuoka (MOs) Osilatör

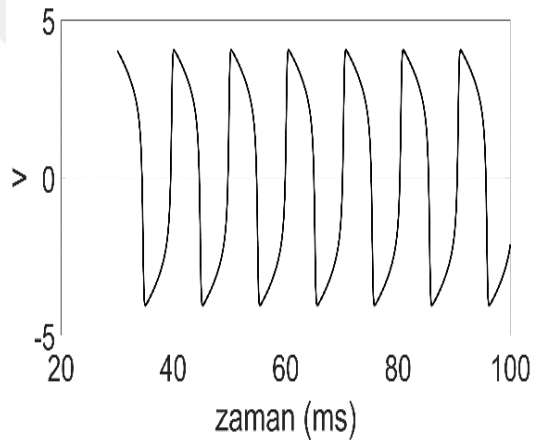
Canlıların nefes alıp vermeleri ve kalp atışları ritmik olarak gerçekleşen olaylardır. Ayrıca bacaklı canlıların hareketi, uçabilen canlıların kanat çırpmaları ve balıkların yüzme hareketleri de ritmik olarak gerçekleşen olaylara örnek olarak gösterilebilir. Canlıların gerçekleştirdiği bu hareketlerin anlayabilmek ve benzetimini gerçekleştirebilmek için ritmik sinyaller üretebilen osilatörler literatüre sunulmuştur [46, 48, 49]. Bunlardan biri de Kiyotoshi Matsuoka’ nın 1985 de bilim dünyasına kazandırdığı, karşılıklı engelleyen sinirsel ağ (mutual inhibition neural network) olarak da bilinen modeldir [50]. Harici bir uyarıcı akıma veya bir sensör bilgisine ihtiyaç duymadan periyodik sinyal üretebilen Matsuoka Model, robotik çalışmalarda benzetimin gerçekleştirilmesinde oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [51 – 53].



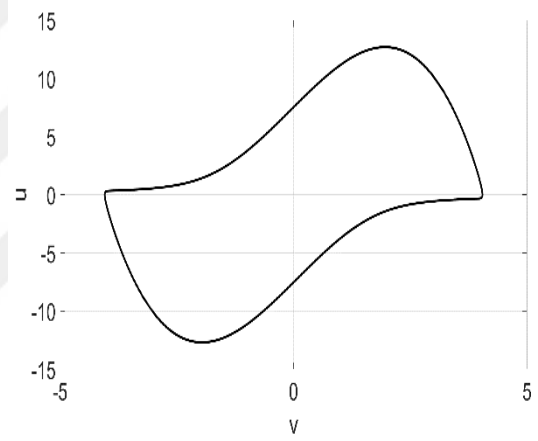
(a)



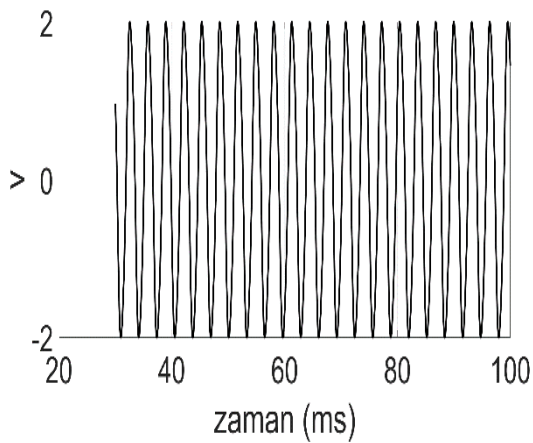
(b)



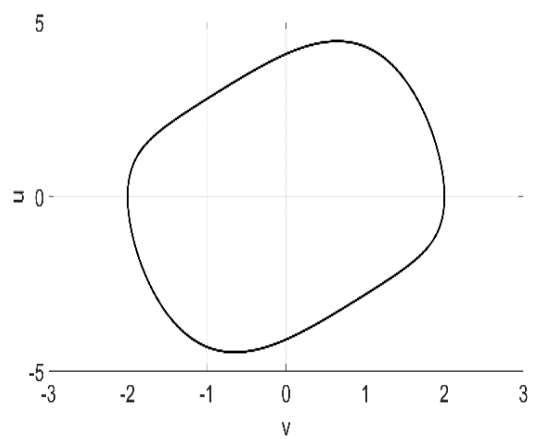
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.8. BVP Osilatör' ün Denklem 2.20 kullanılarak $\epsilon = 1$ parametresi seçildiğinde a) $p^2 = 1$ ve $g^2 = 1$, b) v-u faz portresi, c) $p^2 = 2$ ve $g^2 = 1$, d) v-u faz portresi, e) $p^2 = 1$ ve $g^2 = 2$, f) v-u faz portresi için benzetim sonuçları.

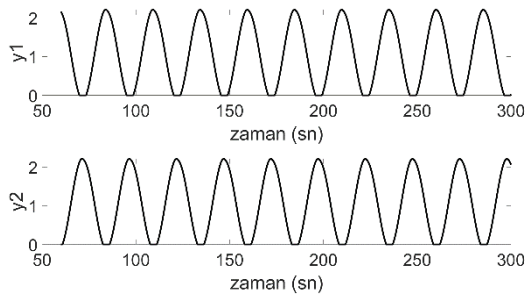
Biyolojik sinir hücrelerinin elektro – fizyolojik olarak üretebildiği desen şekillerini gerçekleştiremeyen bu model, iki adet değişkene sahiptir ve gerici – bükücü sinir hücresi benzetimi ile açıklanmaktadır. Bu sebeple model, en az iki sinir hücresine sahip iken ritmik desenler üretebilir, tek bir sinir hücresi ritmik desenler üretemez. MOs model matematiksel ifadesi Denklem 2.21 ile tanımlanmaktadır [50].

$$\begin{aligned}\tau_r \frac{dx_i}{dt} &= -x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N w_{ij} y_j + s_i - b f_i + feed_i \\ \tau_a \frac{df_i}{dt} &= -f_i + y_i \\ y_i &= \max(0, x_i)\end{aligned}\tag{2.21}$$

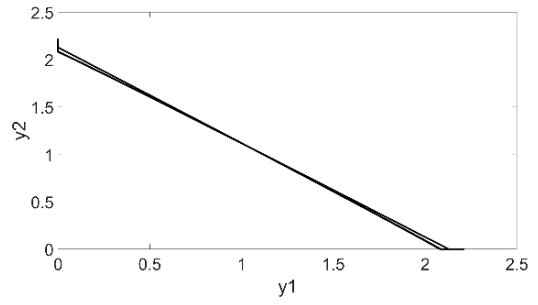
Burada i ve j indisleri sinir hücrelerinin nummarasını belirtir. x sinir hücrelerinin zar potansiyelini, y yanma oranı olarak da bilinen sinir hücrelerinin çıkışını ve f sinir hücrelerinin adaptasyonunu belirleyen değişkenlerdir. τ_r ve τ_a sırasıyla zar potansiyeli zaman sabiti ve adaptasyon zaman sabitidir. s uyarıcı giriş oranını, b sabit giriş için sürekli durum yanma oranını tanımlayan parametrelerdir. w_{ij} j ' ninci sinir hücresinden i ' ninci sinir hücresine doğru olan bağlantının sinaptik ağırlığını belirleyen parametredir. $feed_i$ ise geri besleme sinyalini temsil etmektedir [50].

Bu çalışmalardan iki yıl sonra 1987' de ise Kiyotoshi Matsuoka, çeşitli şekillerde oluşturulan sinaptik bağlantılar kullanarak farklı sayılarda meydana gelen ağ yapılarını incelemiştir [54]. Matsuoka modelini, diğer modeller ile kıyasla avantajlı yapan özelliklerden biri, sinir hücreleri arasındaki sinaptik ağırlıklarının birbirleri ile eşit olmasına gerek yoktur. Bu sayede ritmik desenler arasındaki çeşitli senronizasyonların gerçekleştirilmesi kolay olmaktadır. Ayrıca Matsuoka Model geri besleme sinyaline ihtiyaç duymadan ritmik desenler üretebilmesi ve çeşitli ağ yapılarının gerçekleştiriminin oldukça kolay olması sayesinde robotik uygulamaların genelinde tercih edilmektedir [53, 55].

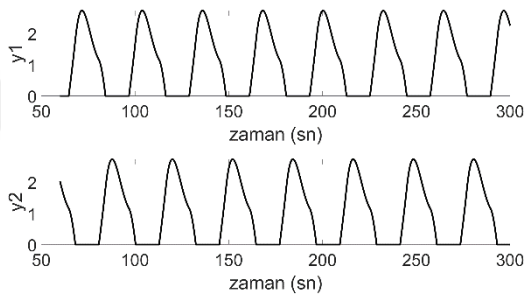
Parametreler literatüre sunulan çeşitli bildirilerden alınmıştır. $\tau_r = 6$, $\tau_a = 12$, $b = 5$, $s = 8$ parametreleri için farklı sinaptik ağırlıklar seçilmesi [54] durumunda nümerik benzetim sonuçları Şekil 2.9' de verilmiştir.



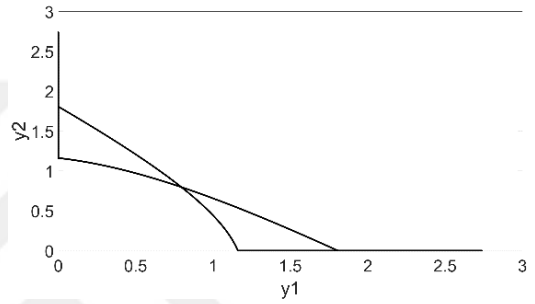
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.9. Matsuoaka Osilatör' ün Denklem 2.21. kullanılarak $\tau_r = 6$, $\tau_a = 12$, $b = 5$, $s = 8$ parametreleri seçildiğinde a) $w_{ij} = 1.5$ için osilatör çıkış deseni, b) v-u faz portresi, c) $w_{ij} = 2.5$ için osilatör desenleri, d) v-u faz portresi benzetim sonuçları.

3. BÖLÜM

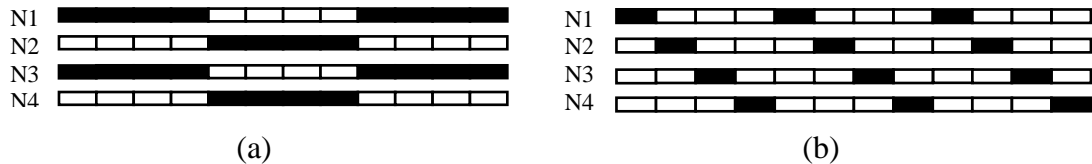
SİNİR HÜCRELERİNİN KUPLAJLANMASI VE MDÜ AĞ YAPILARI

Sinir hücreleri arasında senkronizasyon; canlıların beyinde farklı yapılarda osilasyonların üretilmesinde, epilepsi gibi hastalık işaretlerinin ortaya çıkmasında, balıkların yüzme desenlerinin üretilmesinde ya da iki, dört, altı vb. bacaklı canlıların hareket desenlerinin üretilmesinde önemli rol oynamaktadır [28]. Senkronizasyon' un gerçekleşebilmesi için sinir hücrelerinin birbirleri ile farklı bağlantı şekillerinde kuplajlanması gerekmektedir. Bu durumun sonucunda sinir hücreleri senkron ya da asenkron davranışlar sergilemektedirler [56 - 59].

MDÜ' lerin elektro – fizyolojik özelliklerini saptayabilmek, senkronizasyonu etkileyen parametreleri belirleyebilmek ve kuplajlanma yöntemlerinin benzetimini yapabilmek için biyolojik sinir hücresi modellerinden yararlanılır. Literatürde sinir hücreleri modelleri kullanılarak oluşturulan MDÜ ağ yapıları mevcuttur. Dhanya ve Sunitha isimli bilim insanları, iki adet HH sinir hücresi kullanarak oluşturdukları, elektriksel kuplaj özelliğine sahip bir MDÜ ağ yapısını modellemişler ve gerçekleştirimini tamamlamışlardır [60]. HH sinir hücresi kullanılarak kimyasal kuplaj özelliği taşıyan bir model de literatürde mevcuttur [61]. Biyolojik bir sinir hücrenin üretebildiği desen çeşitliliğine sahip, HR sinir hücresi modeli kullanılarak oluşturulan, elektriksel ve kimyasal kuplaj özelliği taşıyan modeller de literatürde yer almaktadır [62 - 64]. Basit matematiksel denklemler ile benzetimi kolay olması ile beraber biyolojik doğruluğu yüksek olan IZ sinir hücreleri ile oluşturulan örnek bir MDÜ ağ yapısı, elektriksel kuplaj özelliği taşımakta ve patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desen şekillerini üretebilmektedir [65]. Literatürde yer alan diğer bir çalışmada ise IZ sinir hücreleri ile oluşturulan, zaman gecikmeli senkronizasyona sahip bir ağ yapısı modellenmiş ve benzetimleri

tamamlanmıştır [5]. ML sinir hücresi kullanılarak gerçekleştirilen MDÜ yapılar da kimyasal ve elektriksel kuplaj parametreleri belirlenmiş, benzetimler yapılmış ve çatalanma analizleri gerçekleştirilmiştir [66, 67]. Robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen, senkronizasyonu kolay gerçekleştirebilen Matsuoka osilatör modeli kullanılarak oluşturulan çeşitli ağ yapılar da literatürde mevcuttur [54, 55]. MDÜ ağ yapılarında sıklıkla tercih edilen bu modeller dışında; FHN, BVP, Wilson-Cowan gibi çeşitli sinir hücresi modelleri kullanılarak kuplajlanmış MDÜ ağ yapıları da mevcuttur [68 – 72].

HH, FHN, ML, HR, IZ sinir hücreleri ve MOs osilatörü ile oluşturulmuş MDÜ ağ yapılarının matematiksel ifadeleri elde edilirken, her bir sinir hücresi modelinin matematiksel ifadeleri temel alınmıştır. İfadelerdeki sabit parametreler, ağ yapıda bulunan her bir sinir hücresi için aynı olup değişkenler i indisi ile tanımlanmaktadır. Dört adet sinir hücresi ile oluşturulan ağ yapıda, gallop ve trot yürüyüş modellerini elde edebilmek amacıyla sinaptik bağlar farklı yapılarda oluşturulmuştur. Trot ve gallop yürüyüş deseni için her bir sinir hücrenin zar potansiyelleri faz sıraları Şekil 3.1’ de gösterilmektedir. Ayrıca zar potansiyelini ifade eden değişken, tüm modellerin benzetim çalışmalarında, V sembolü ile ifade edilmektedir. V_1, V_2, V_3 ve V_4 sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü sinir hücrenin zar potansiyelini ifade eden değişkendir.



Şekil 3.1. Dört adet sinir hücresi ile oluşturulmuş ağ yapıda a) Trot, b) Gallop yürüyüş modellerinin her bir sinir hücresi için faz sıraları gösterimi.

İki adet sinir hücresi ile oluşturulan ağ yapının sinaptik bağlantı yapısı Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İki adet sinir hücresi ile oluşturulan ağ yapının sinaptik bağlantı yapısı gösterimi

3.1. HH Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve HH Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları

N adet HH sinir hücresi kullanılarak oluşturulan MDÜ ağ yapısının i . sinir hücresinde oluşan zar potansiyeli Denklem 3.1' de sunulmuştur.

$$C_M^i \frac{dV_i}{dt} = I_{Na}^i + I_K^i + I_{Leak}^i + I_{input}^i + I_{syn}^i \quad (3.1)$$

Burada i . sinir hücresinde oluşan sodyum, potasyum ve sızıntı iyon akımları Denklem 3.2 ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} I_{Na}^i &= \overline{g_{Na}} m_i^3 h_i (E_{Na} - V_i) \\ I_K^i &= \overline{g_K} n_i^4 (E_K - V_i) \\ I_{Leak}^i &= \overline{g_L} (E_L - V_i) \end{aligned} \quad (3.2)$$

i . Sinir hücresi için iyon kanallarının açık olma olasılıkları birinci dereceden diferansiyel eşitlikle Denklem 3.3' de ki tanımlanır.

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} &= a_n^i(V_i)(1 - n_i) - \beta_n^i(V_i)n_i \\ \frac{dm_i}{dt} &= a_m^i(V_i)(1 - m_i) - \beta_m^i(V_i)m_i \\ \frac{dh_i}{dt} &= a_h^i(V_i)(1 - h_i) - \beta_h^i(V_i)h_i \end{aligned} \quad (3.3)$$

İyon kanal kapılarının kapalı durumdan açık duruma geçiş hızını belirleyen denklem takımı i . sinir hücresi için Denklem 3.4' de ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} a_n^i(V_i) &= \frac{0.01(10 - V_i)}{e^{(10-V_i)/10} - 1} \\ a_m^i(V_i) &= \frac{0.1(25 - V_i)}{e^{(25-V_i)/10} - 1} \\ a_h^i(V_i) &= 0.07e^{-V_i/20} \end{aligned} \quad (3.4)$$

İyon kanal kapılarının açık durumdan kapalı duruma geçiş hızını belirleyen denklem takımı i . Sinir hücresi için Denklem 3.5' de ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}\beta_n^i(V_i) &= 0.125e^{-V_i/80} \\ \beta_m^i(V_i) &= 4e^{-V_i/18} \\ \beta_h^i(V_i) &= \frac{1}{e^{(30-V_i)/10} + 1}\end{aligned}\tag{3.5}$$

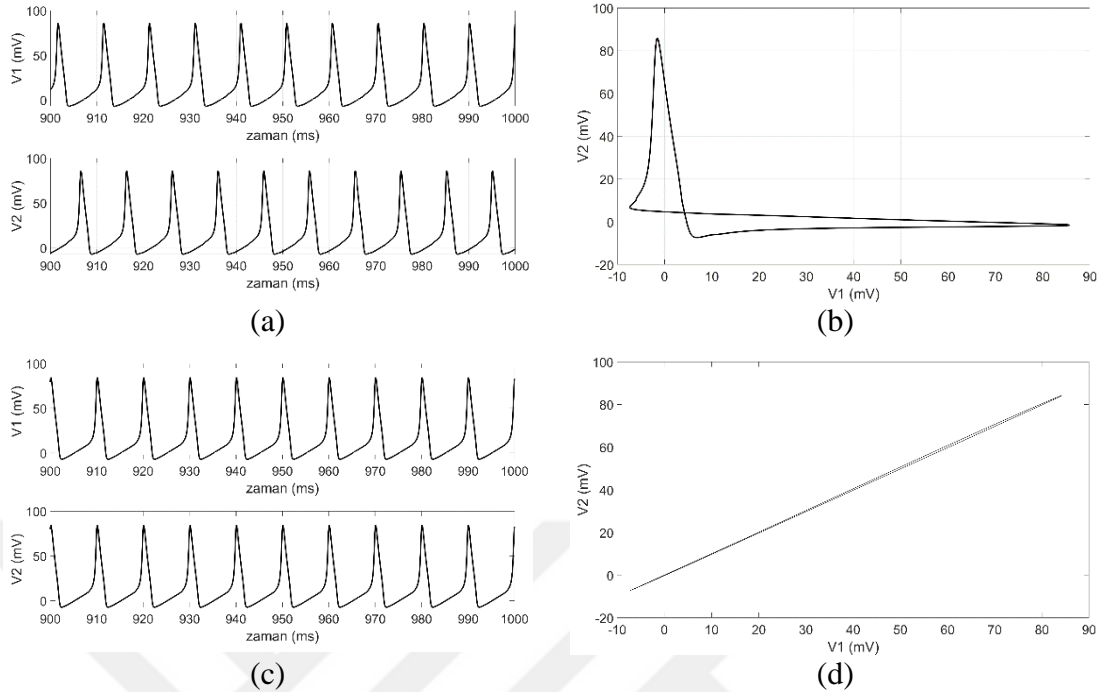
Sinirsel ağ yapının i . sinir hücresinin senkronizasyon akımı, I_{syn}^i , eğer kimyasal kuplaj özelliği taşıyor ise Denklem 3.6. ile tanımlanmaktadır [73].

$$\begin{aligned}I_{syn}^i &= \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij} (S - V_i) \Gamma(V_j) \\ \Gamma(V_j) &= \frac{1}{1 + e^{-\lambda(V_j - \theta)}}\end{aligned}\tag{3.6}$$

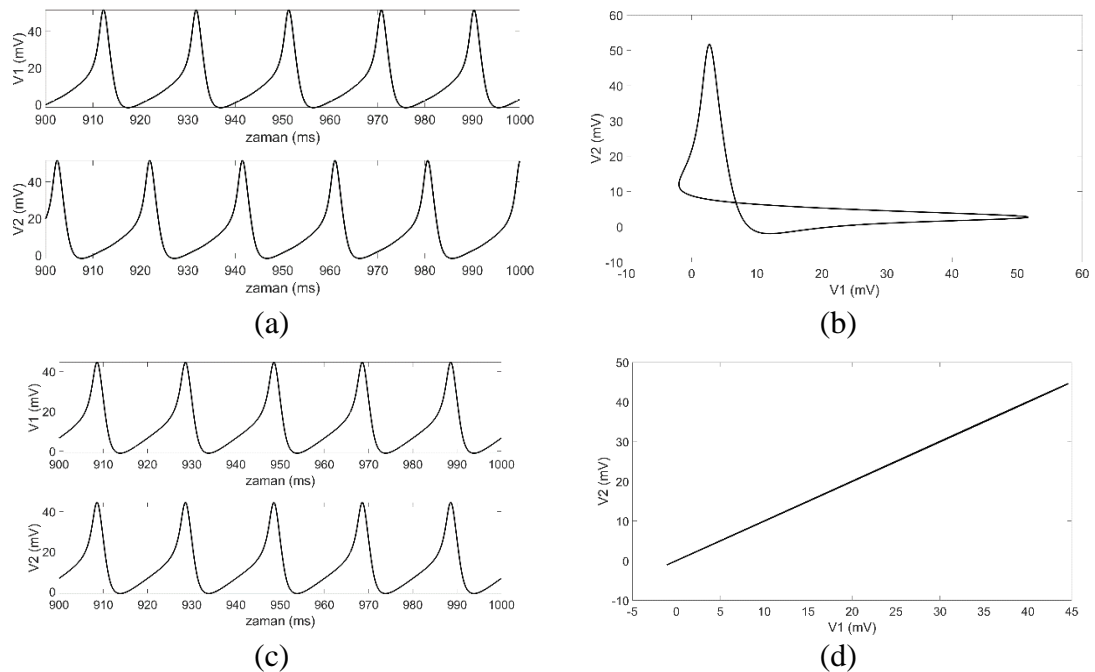
Sinirsel ağ yapısı, elektriksel kuplaj özelliği taşıyorsa senkronizasyon akımı Denklem 3.7. ile tanımlanmaktadır [73].

$$I_{syn}^i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij} (V_j - V_i)\tag{3.7}$$

Nümerik benzetim çalışmaları, iki adet ve dört adet sinir hücresinden oluşan ağ yapıları üzerinedir. Ağ yapılarda hem kimyasal kuplaj hem de elektriksel kuplaj yöntemleri kullanılmıştır. Çeşitli yapılarda senkronizasyon sonuçları elde edebilmek için sinir hücreleri arasındaki sinaptik ağırlıklar (kupaajlama parametresi, g_{ij}) farklılık göstermektedir. Örneğin bir sinir hücre ile diğer bir sinir hücre arasında sinaptik bir bağ var ise g_{ij} sıfırdan farklı bir değer alırken, sinaptik bağ yok ise g_{ij} sıfır değerini alır. Bu durumlar göz önüne alındığında, daha önce verilen parametreler seçildiği durumda [29], $S = 30, \lambda = 5, \theta = 10$ ve farklı g_{ij} değerleri için MDÜ ağ yapısı oluşturulmuştur [73]. İki HH sinir hücreden oluşan ağ yapısında hem kimyasal ve hem de elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin benzetim sonuçları.Şekil 3.3 ve Şekil 3.4' de sunulmaktadır.

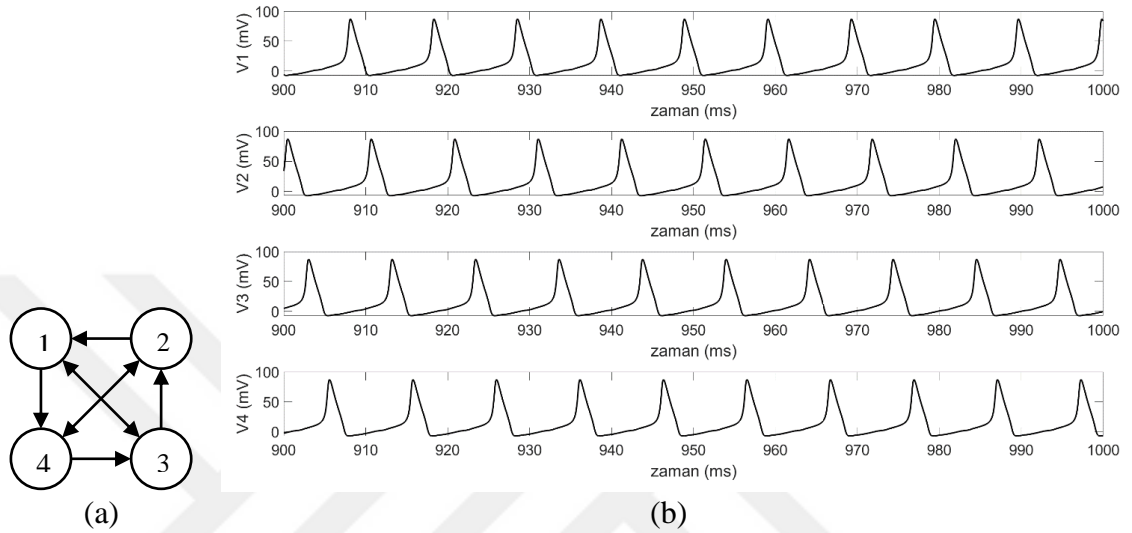


Şekil 3.3. İki adet HH sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.2$ için asenkron faz, b) $v_1 - v_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = -0.2$ için senkron faz, d) $v_1 - v_2$ faz portreleri olmak üzere model benzetim sonuçları.

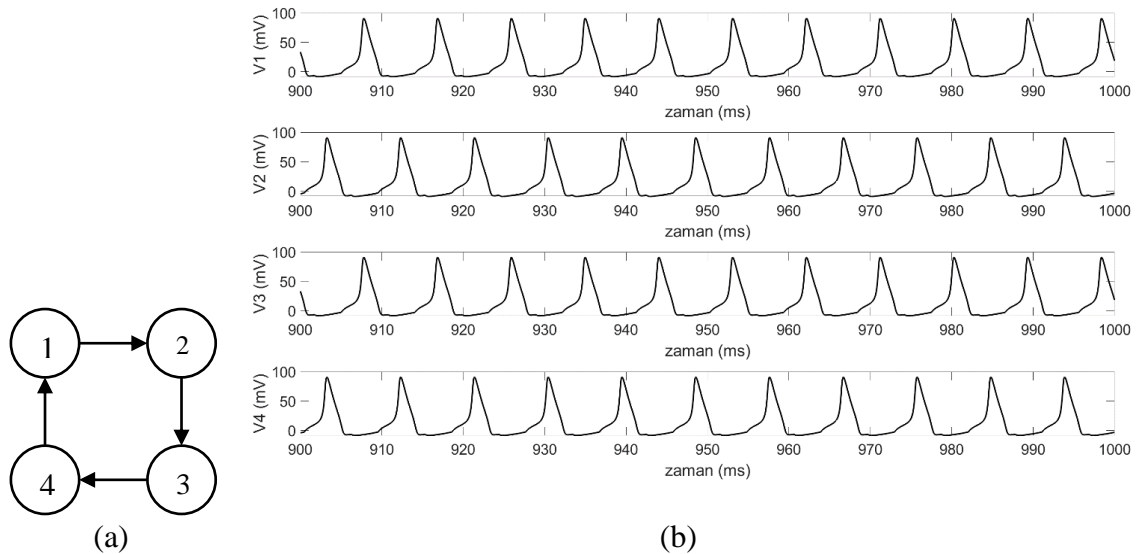


Şekil 3.4. İki adet HH sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $v_1 - v_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, d) $v_1 - v_2$ faz portreleri olmak üzere model benzetim sonuçları.

Dört adet HH sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin zar potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’ da sunulmaktadır.

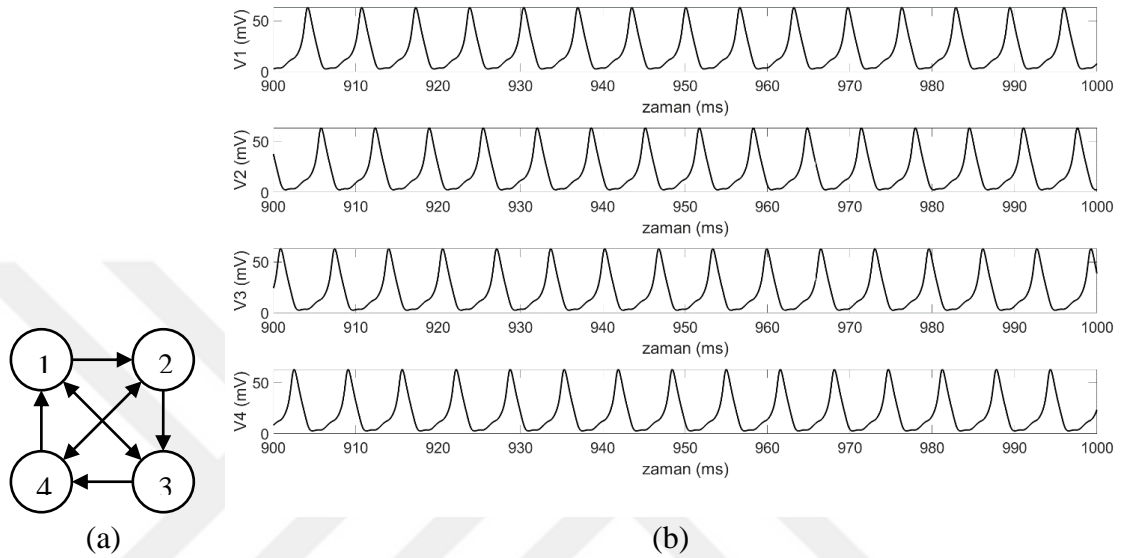


Şekil 3.5. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $g_{ij} = 0.2$ için hücrelerin zar potansiyelleri benzetim sonuçları.

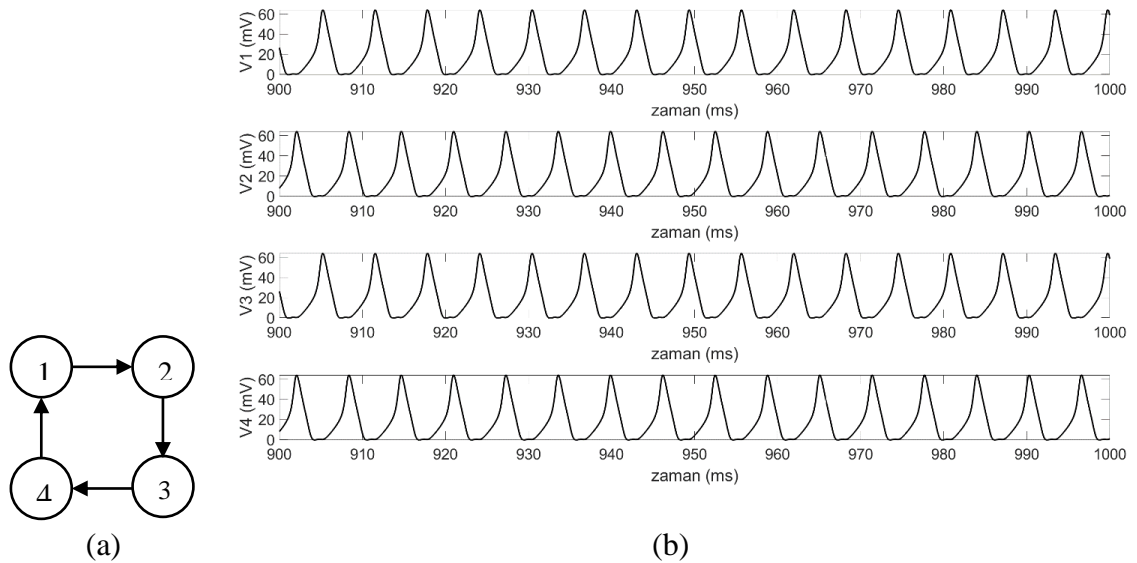


Şekil 3.6. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $g_{ij} = 0.2$ için hücrelerin zar potansiyelleri benzetim sonuçları.

Dört adet HH sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin zar potansiyeli desenleri ne ait benzetim sonuçları Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’ de sunulmaktadır.



Şekil 3.7. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $g_{ij} = 0.2$ için hücrelerin zar potansiyelleri benzetim sonuçları.



Şekil 3.8. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) kuplaj bağlantıları, b) $g_{ij} = 0.2$ için hücrelerin zar benzetim sonuçları.

3.2. FHN Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve FHN Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları

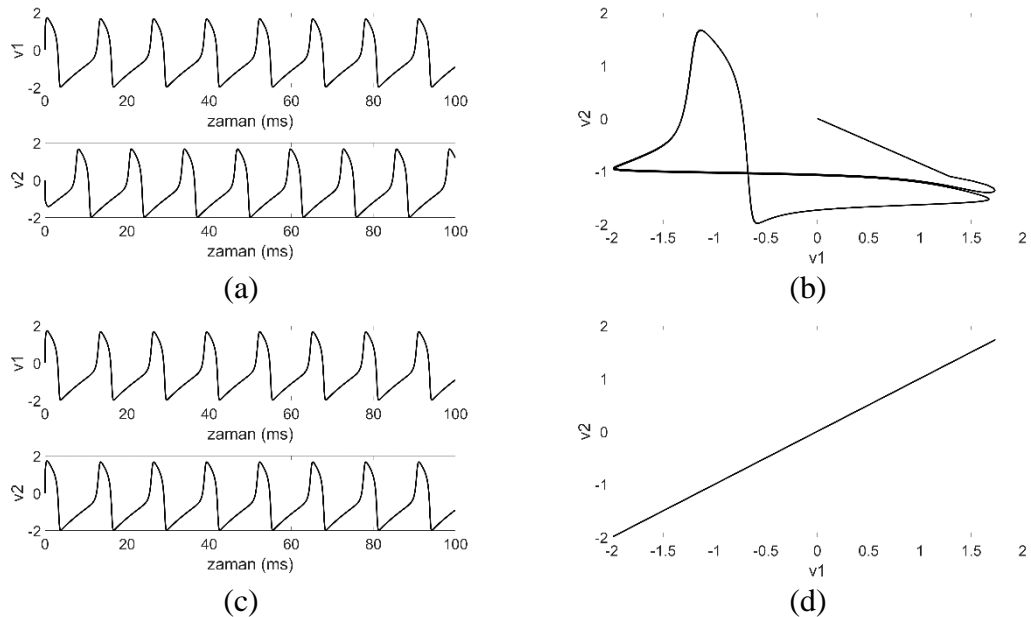
N adet FHN sinir hücresi kullanılarak oluşturulan MDÜ ağ yapısının i . sinir hücresinde oluşan zar potansiyeli Denklem 3.20' de sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} &= c \left(v_i - u_i + I_{input} - \frac{v_i^3}{3} \right) + I_i^{syn} \\ \frac{du_i}{dt} &= \frac{v_i - bu_i + a}{c} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Sinirsel ağ yapının i . sinir hücresinin senkronizasyon akımı, I_i^{syn} , elektriksel kuplaj özelliği taşıması durumunda Denklem 3.21 ile tanımlanmaktadır [59, 68].

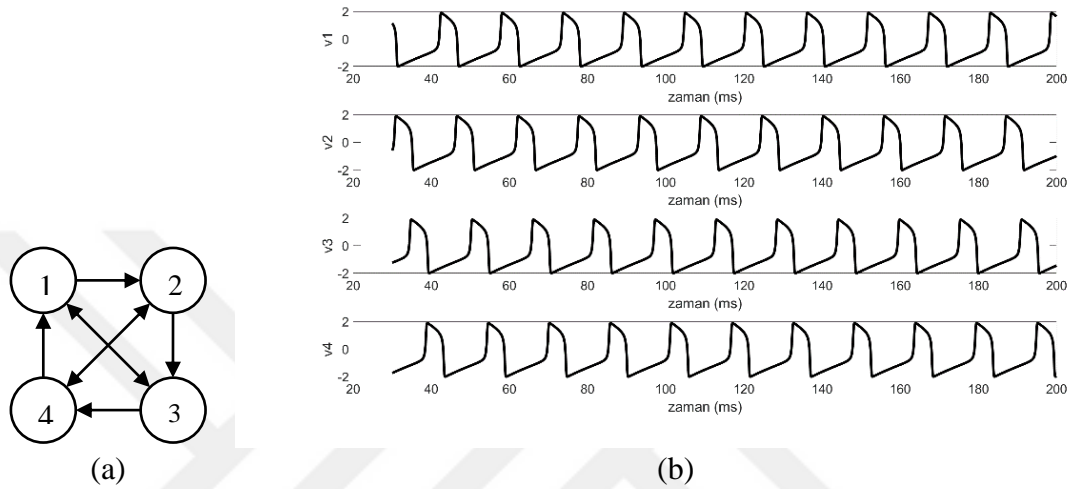
$$I_i^{syn} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij}(v_j - v_i) \quad (3.21)$$

İki adet FHN sinir hücreleri kullanılarak oluşturulan, elektriksel kuplaj özelliğine sahip model parametreleri $a = 0.7$, $b = 0.8$, $c = 5$, $I = 0.34$ olarak seçilmiştir [30]. Belirlenen parametreler sonucunda MDÜ ağ yapı benzetim sonuçları Şekil 3.9' da sunulmaktadır.

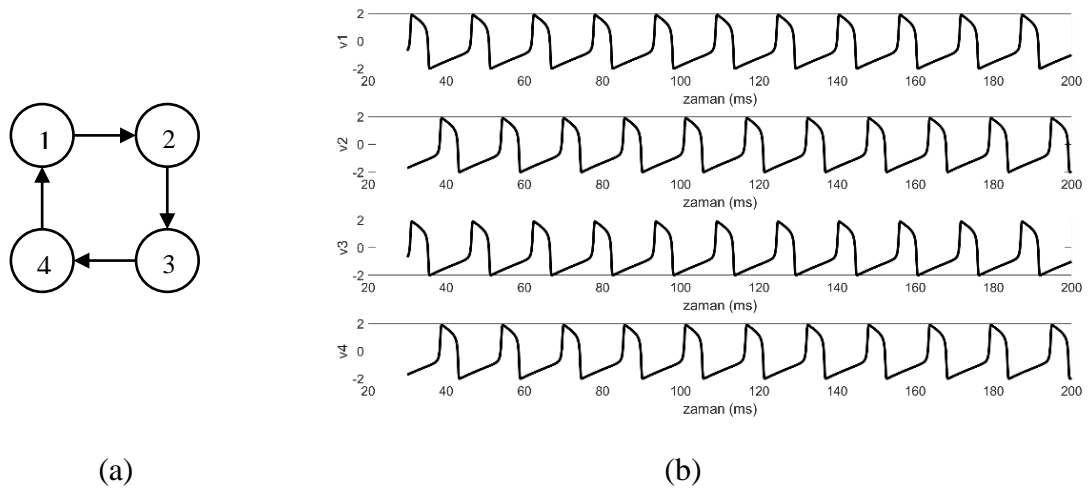


Şekil 3.9. İki adet FHN sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.086$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = -0.086$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

Dört adet FHN sinir hücreleri kullanılarak oluşturulan, elektriksel kuplaj özelliğine sahip model parametreleri $a = 0.7$, $b = 0.8$, $c = 5$, $I = 0.34$, $g_{ij} = 0.5$ olarak seçilmiştir [30]. Belirlenen parametreler sonucunda Gallop ve Trot yürüyüş desenleri benzetim sonuçları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 ile sunulmaktadır.



Şekil 3.10. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet FHN sinir hücresi ile oluşturulan elektriksel kuplaj özelliğine sahip MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.



Şekil 3.11. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet FHN sinir hücresi ile oluşturulan elektriksel kuplaj özelliğine sahip MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.

3.3. ML Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve ML Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları

N adet ML sinir hücresi kullanılarak oluşturulan MDÜ ağ yapısının i . sinir hücresinde oluşan zar potansiyeli Denklem 3.8' de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 C_M^i \frac{dV_i}{dt} &= I_{Ca}^i + I_K^i + I_{Leak}^i + I_{input}^i + I_{syn}^i + I_i \\
 \frac{dw_i}{dt} &= \phi \frac{[w_\infty(V_i) - w_i]}{\tau_\infty(V_i)} \\
 \frac{dI_i}{dt} &= -\varepsilon(V_i + V_0)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Burada i . sinir hücresinde oluşan sodyum, potasyum ve sızıntı iyon akımları Denklem 3.9 ile tanımlanır.

$$\begin{aligned}
 I_{Ca}^i &= \bar{g}_{Ca} m_\infty(V_i) (E_{Ca} - V_i) \\
 I_K^i &= \bar{g}_K w_i (E_K - V_i) \\
 I_{Leak}^i &= \bar{g}_L (E_{Leak} - V_i)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

i . sinir hücresi için $m_\infty(V_i)$, $w_\infty(V_i)$ ve $\tau_\infty(V_i)$ fonksiyonları ise Denklem 3.10 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 m_\infty(V_i) &= 0.5 \left[1 + \tanh\left(\frac{V_i - V_a}{V_b}\right) \right] \\
 w_\infty(V_i) &= 0.5 \left[1 + \tanh\left(\frac{V_i - V_c}{V_d}\right) \right] \\
 \tau_\infty(V_i) &= \frac{1}{\cosh\left(\frac{V_i - V_c}{2V_d}\right)}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Sinirsel ağ yapının i . sinir hücresinin senkronizasyon akımı, I_{syn}^i , kimyasal kuplaj özelliği taşınması durumunda Denklem 3.11 ile tanımlanmaktadır [74, 75]. Yapılan çalışmalarda kimyasal kuplaj, zar potansiyelinde oluşan zaman gecikmesi ile ilişkilendirilmiştir.

$$\begin{aligned}
I_{syn}^i &= \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij} (V_i - E_s) r_j \\
\frac{dr_j}{dt} &= a |T_j| (1 - r_j) - \beta r_j \\
|T_j| &= \frac{T_m}{1 + e^{(V_p - V_j)/K_p}}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

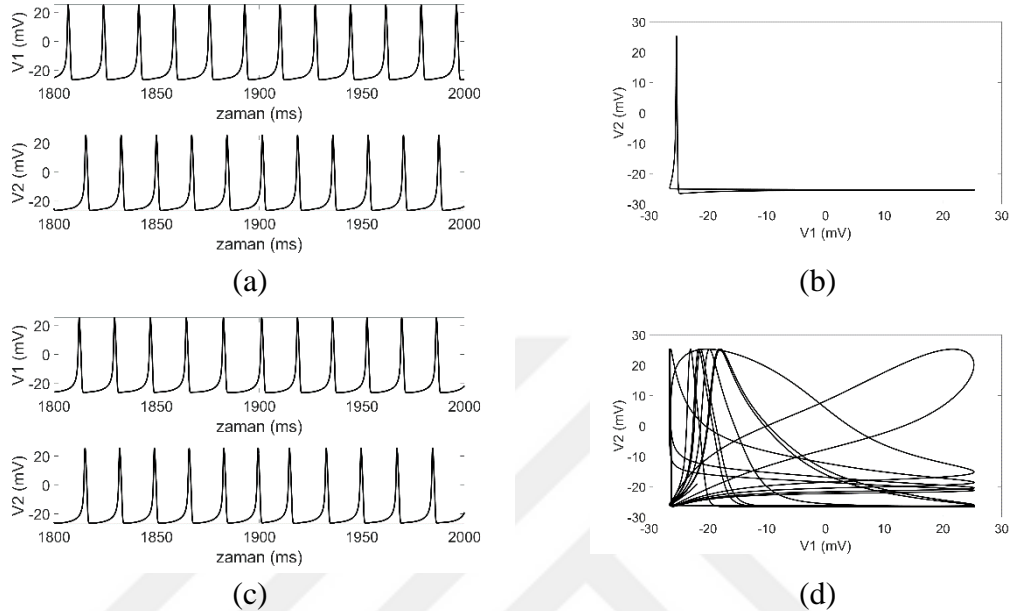
Sinirsel ağ yapısı elektriksel kuplaj özelliği taşıması durumunda senkronizasyon akımı Denklem 3.12. ile tanımlanmaktadır [76].

$$I_{syn}^i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij} (V_j - V_i) \tag{3.12}$$

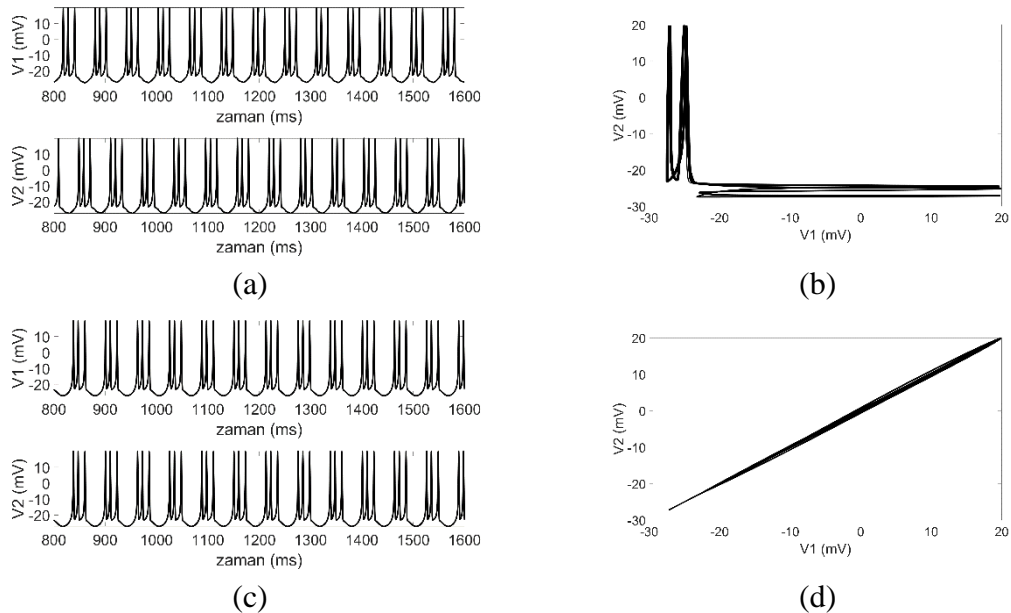
Sinir hücreleri arasındaki sinaptik ağırlığı tanımlayan g_{ij} parametresi, sinirsel ağ yapısının kimyasal kuplajlanmasına ve elektriksel kuplajlanmasına bağlı olarak, senkron ya da asenkron davranışına göre farklı değerler alabilmektedir. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş ağ yapısında parametreler, $C = 1$, $E_{Ca} = 100$, $E_K = -70$, $E_{Leak} = -50$, $g_{Ca} = 1.2$, $g_K = 2$, $g_L = 0.5$, $V_a = -1$, $V_b = 15$, $V_c = 10$, $V_d = 5$, $\varepsilon = 0.005$, $V_0 = 20$ olarak belirlenmiştir [76]. Sinir hücrelerinin kimyasal kuplajlanması için kullanılan fonksiyonun parametreleri ise $E_s = 0$, $V_p = 2$, $K_p = 5$, $T_m = 1$, $a = 2$ ve $\beta = 1$ olarak seçilmiştir [77].

Ayrıca dört adet sinir hücresi ile oluşturulmuş ağ yapının, kuplaj yapısı, senkronizasyon özellikleri, patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desen sonuçları için benzetimler gerçekleştirilmiştir. ML sinir hücreleri ile oluşturulmuş ağ yapıda parametreler, $C = 1$, $E_{Ca} = 100$, $E_K = -70$, $E_{Leak} = -50$, $g_{Ca} = 1.2$, $g_K = 2$, $g_L = 0.5$, $V_a = -1$, $V_b = 15$, $V_c = 10$, $V_d = 5$, $\varepsilon = 0.005$, $V_0 = 20$, $E_s = 0$, $V_p = 2$, $K_p = 5$, $T_m = 1$, $a = 2$ ve $\beta = 1$ olarak seçilmiştir [76, 77]. Belirlenen parametreler sonucunda farklı sinaptik ağırlıklar için oluşan benzetim sonuçları da Şekil 3.14 – Şekil.3.17 aralığında paylaşılmaktadır.

İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının benzetim sonuçları Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’ de gösterilmiştir.

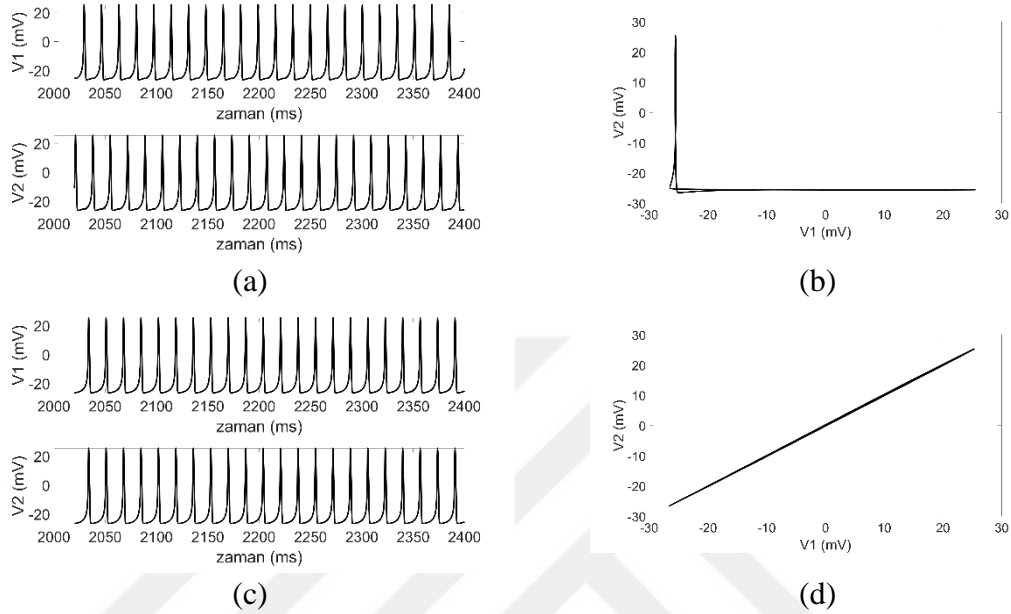


Şekil 3.12. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.018$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.018$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

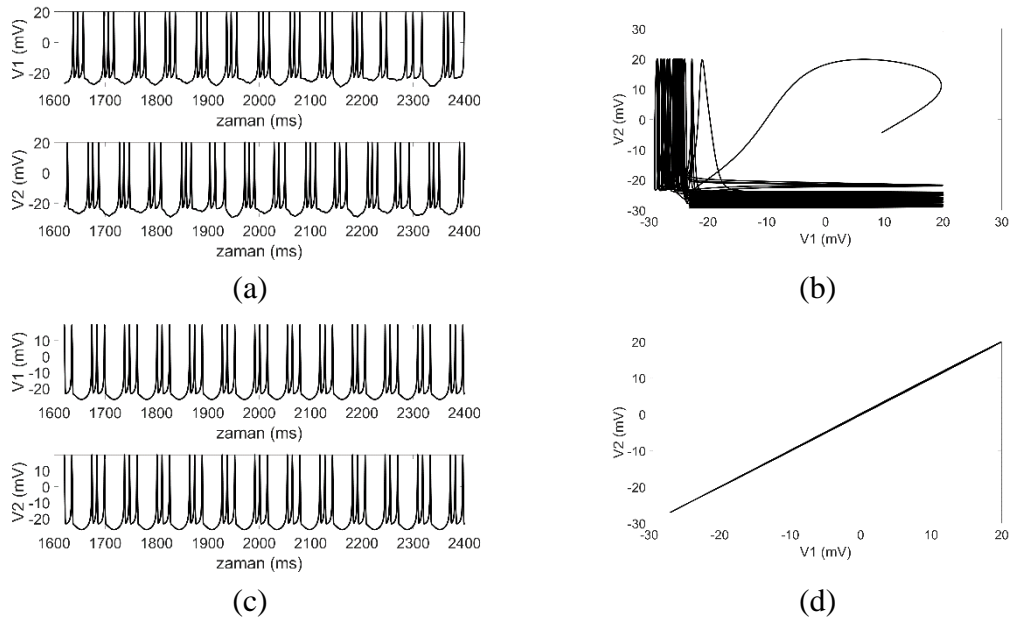


Şekil 3.13. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.018$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.018$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının benzetim sonuçları Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’ de gösterilmiştir.

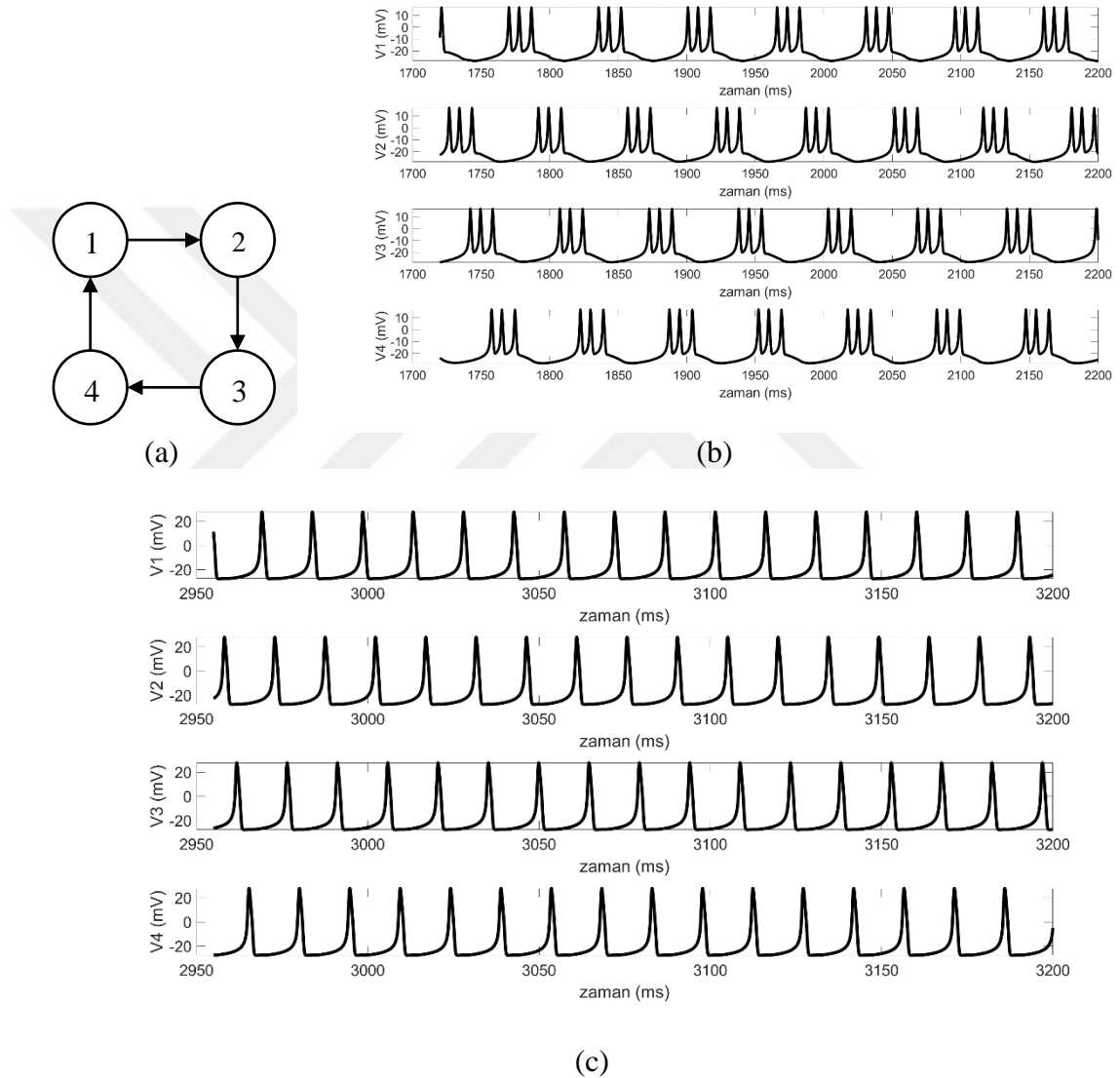


Şekil 3.14. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.012$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.012$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.



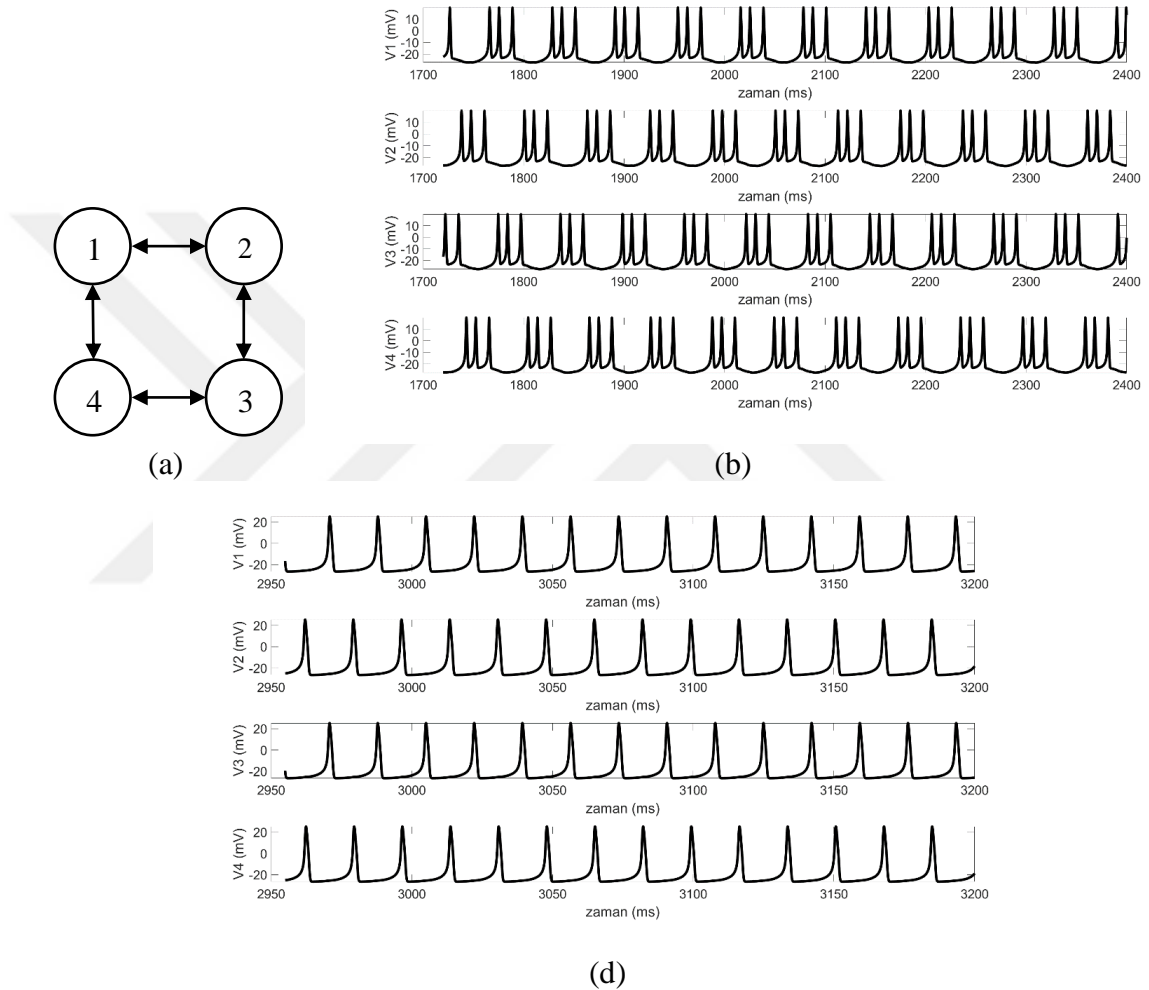
Şekil 3.15. İki adet ML sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.012$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.012$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.16’da sunulmaktadır.



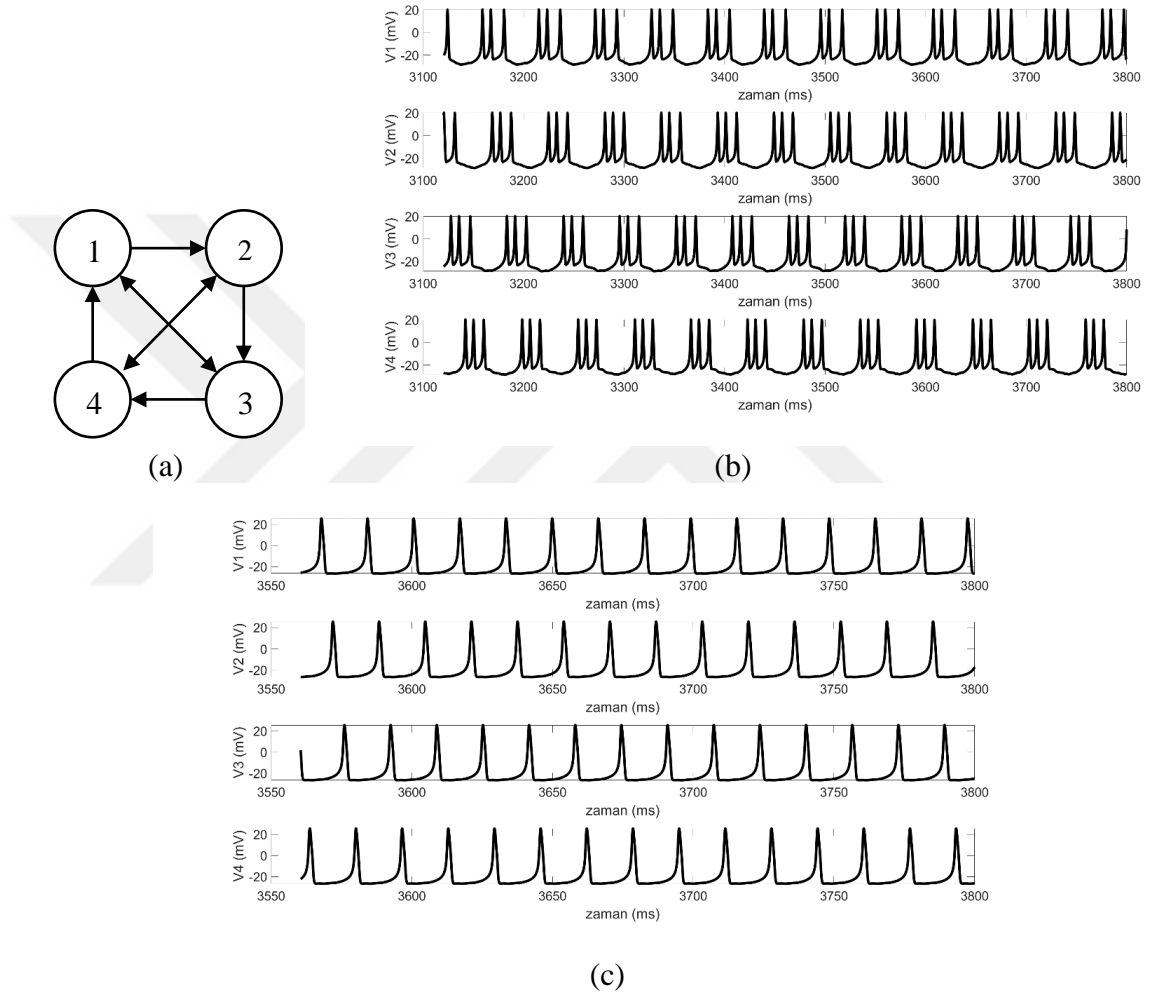
Şekil 3.16. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.01$, $E_{Ca} = 70mV$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.01$, $E_{Ca} = 110mV$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.17’de sunulmaktadır.



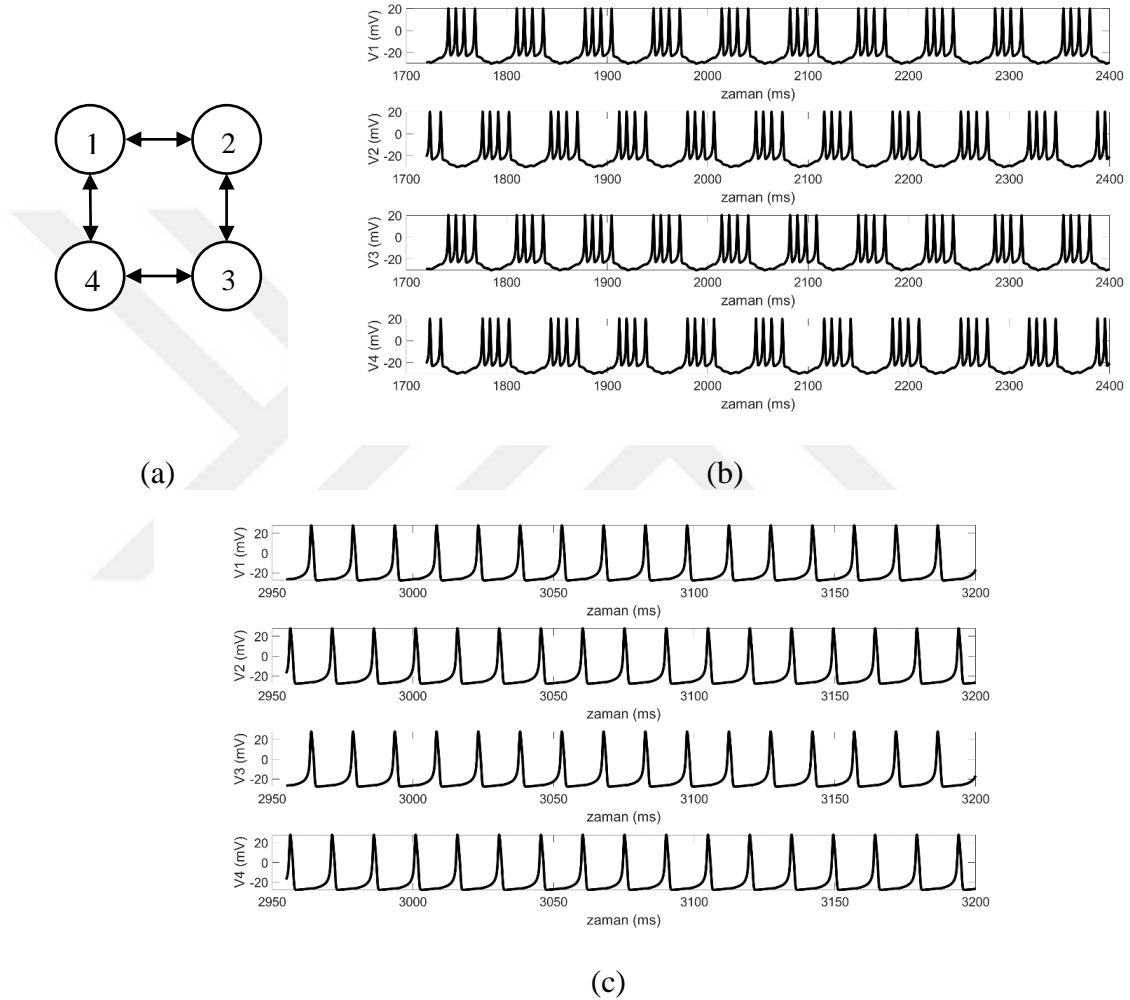
Şekil 3.17. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.012$, $E_{Ca} = 80mV$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.012$, $E_{Ca} = 100mV$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.18’de sunulmaktadır.



Şekil 3.18. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $E_{Ca} = 80$ ve $g_{ij} = -0.012$ seçilmesi durumunda patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $E_{Ca} = 100$ ve $g_{ij} = -0.008$ seçilmesi durumunda aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.19’da sunulmaktadır.



Şekil 3.19. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $E_{Ca} = 80$ ve $g_{ij} = -0.012$ seçilmesi durumunda patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $E_{Ca} = 100$ ve $g_{ij} = -0.004$ seçilmesi durumunda aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

3.4. HR Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve HR Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları

N adet HR sinir hücresi kullanılarak oluşturulan MDÜ ağ yapısının genel matematiksel ifadeleri Denklem 3.13' de sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= y - x_i^3 - bx_i - z_i + I - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \check{c}_k g_s \sigma(x_i) \gamma(x_i, x_j) \\ \frac{dy_i}{dt} &= 1 - 5x_i^2 - y_i \\ \frac{dz_i}{dt} &= \varepsilon(s(x_i - x_{rest}) - z_i) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13 ile tanımlanan fonksiyonda \check{c}_k parametresi, sinir hücreleri arasında gerçekleştirilen sinaptik kuplajın olup olmadığını belirler. Eğer sinaptik bağlantı var ise $\check{c}_k = 1$, yok ise $\check{c}_k = 0$ değerini almaktadır. HR sinir hücreleri ile oluşturulan ağ yapı kimyasal kuplaj özelliği taşıması durumunda $\sigma(x_i)$ ve $\gamma(x_i, x_j)$ parametreleri Denklem 3.14. ile tanımlanmaktadır [70, 80, 81].

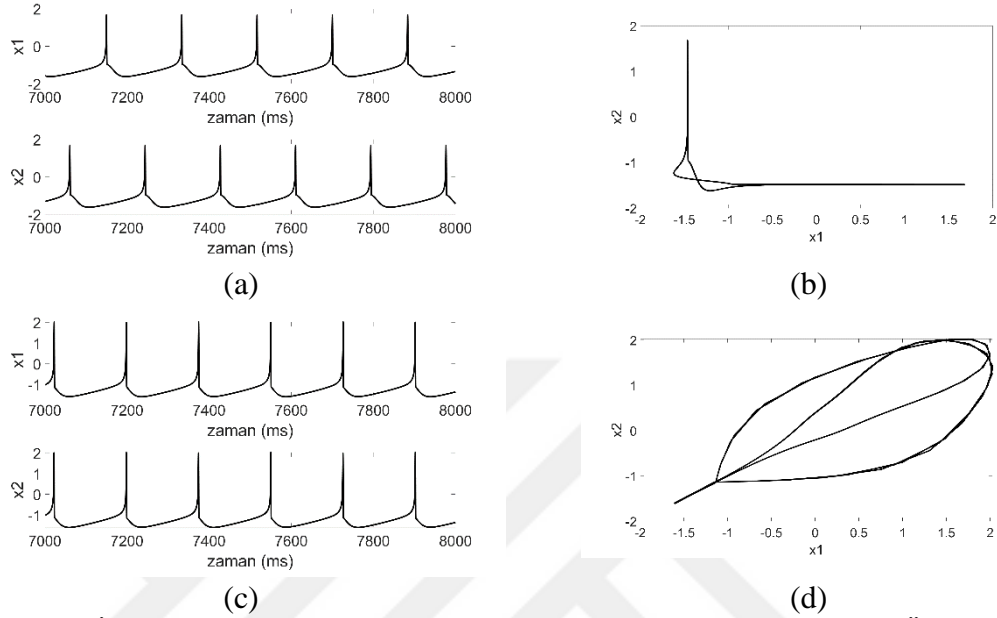
$$\begin{aligned} \gamma(x_i, x_j) &= \gamma_s(x_j) = \frac{1}{1 + e^{-k(v_j - \theta_s)}} \\ \sigma(x_i) &= -(x_i - V_s) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Elektriksel kuplaj özelliği taşıması durumunda ise $\sigma(x_i)$ ve $\gamma(x_i, x_j)$ parametreleri Denklem 3.15. ile tanımlanmaktadır [70, 80, 81].

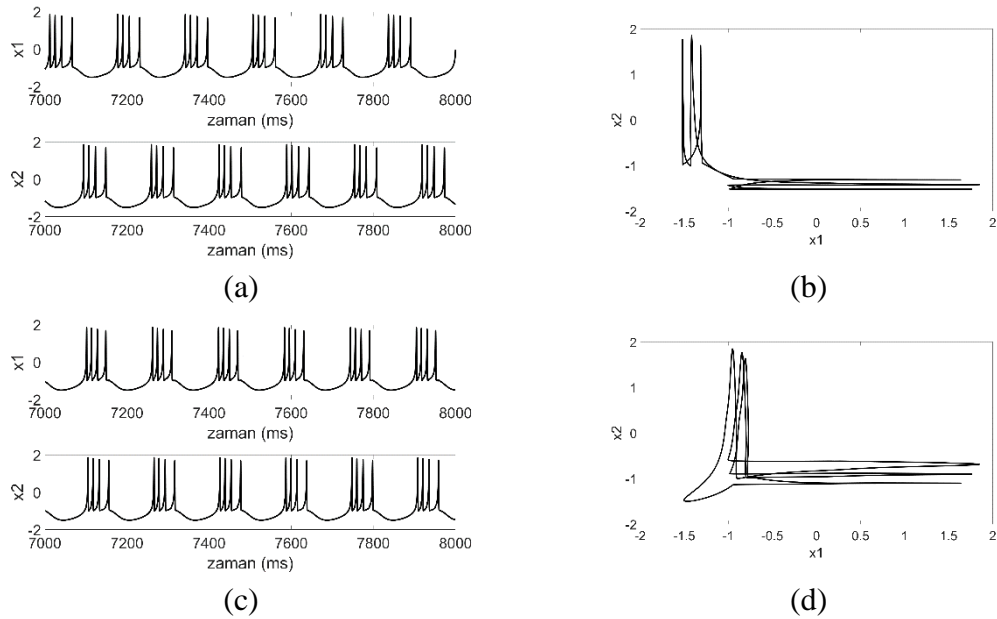
$$\begin{aligned} \gamma(x_i, x_j) &= \gamma_e(x_i, x_j) = (x_j - x_i) \\ \sigma(x_i) &= 1 \end{aligned} \quad (3.15)$$

HR sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal ve elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapıda parametreler, $a = 1$, $b = 3$, $c = 1$, $d = 5$, $s = 4$, $x_{rest} = -1.618$, olarak belirlenmiştir [82]. Eğer ağ yapı patlamalı aksiyon potansiyeli deseni üretiyorsa $I = 2.5$, $\varepsilon = 0.004$, aksiyon potansiyeli deseni üretiyorsa $I = 1.4$, $\varepsilon = 0.005$ olarak seçilmelidir. Sinir hücrelerinin kimyasal kuplajlanması için kullanılan fonksiyonun parametreleri $k = 10$, $\theta_s = 0.28$, $V_s = -2$ olarak seçilmiştir [70, 80, 81]. İki adet HR sinir hücresi ile

oluşturulmuş kimyasal kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının benzetim sonuçları Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’ de gösterilmiştir.

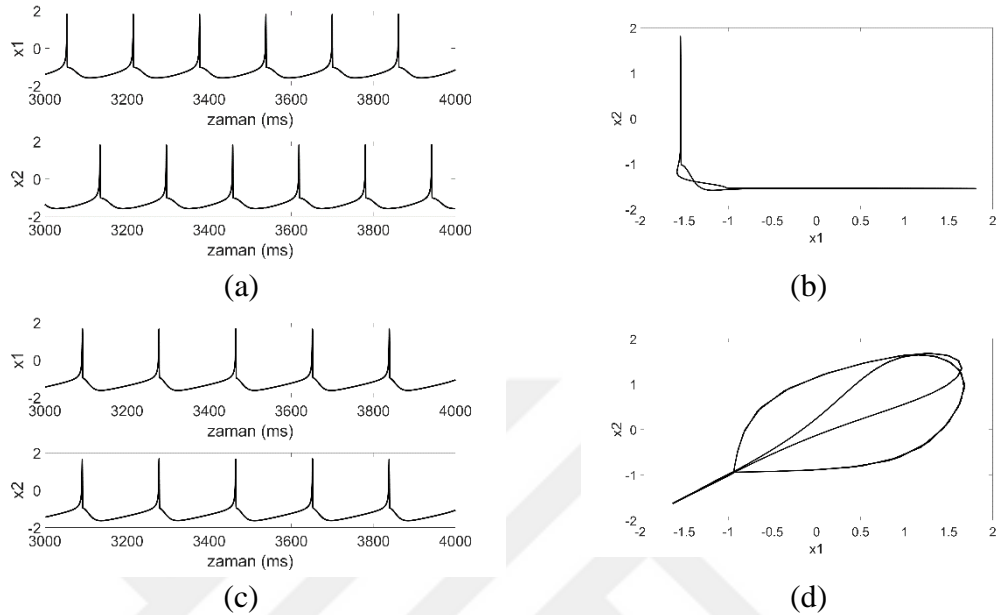


Şekil 3.20. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.2$ için asenkron davranışı, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.2$ için senkron davranışı, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

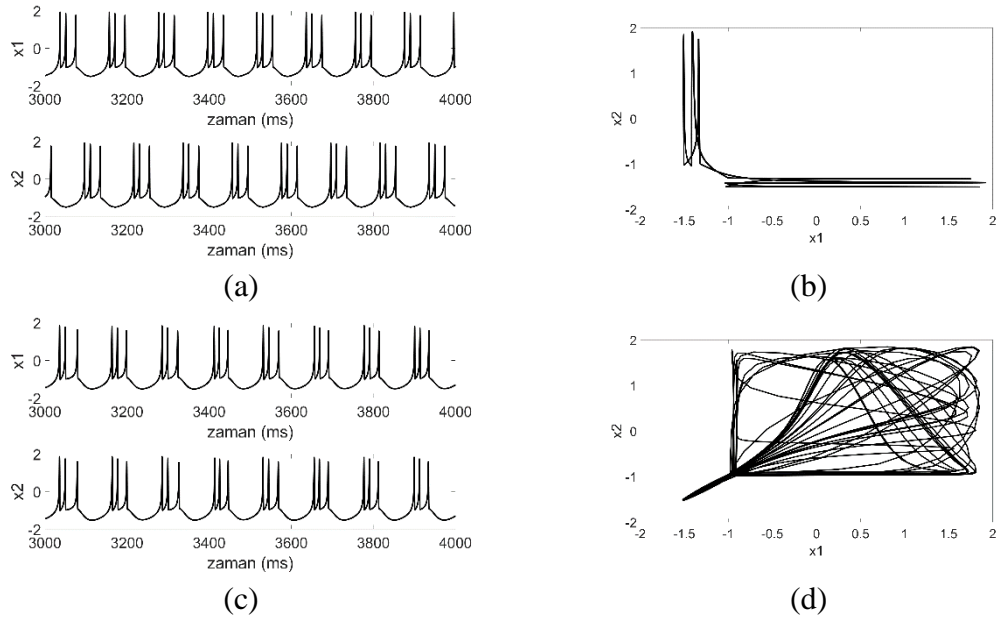


Şekil 3.21. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.2$ için asenkron çıkış desenleri, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.2$ için senkron çıkış desenleri, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının benzetim sonuçları Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’ de gösterilmiştir.

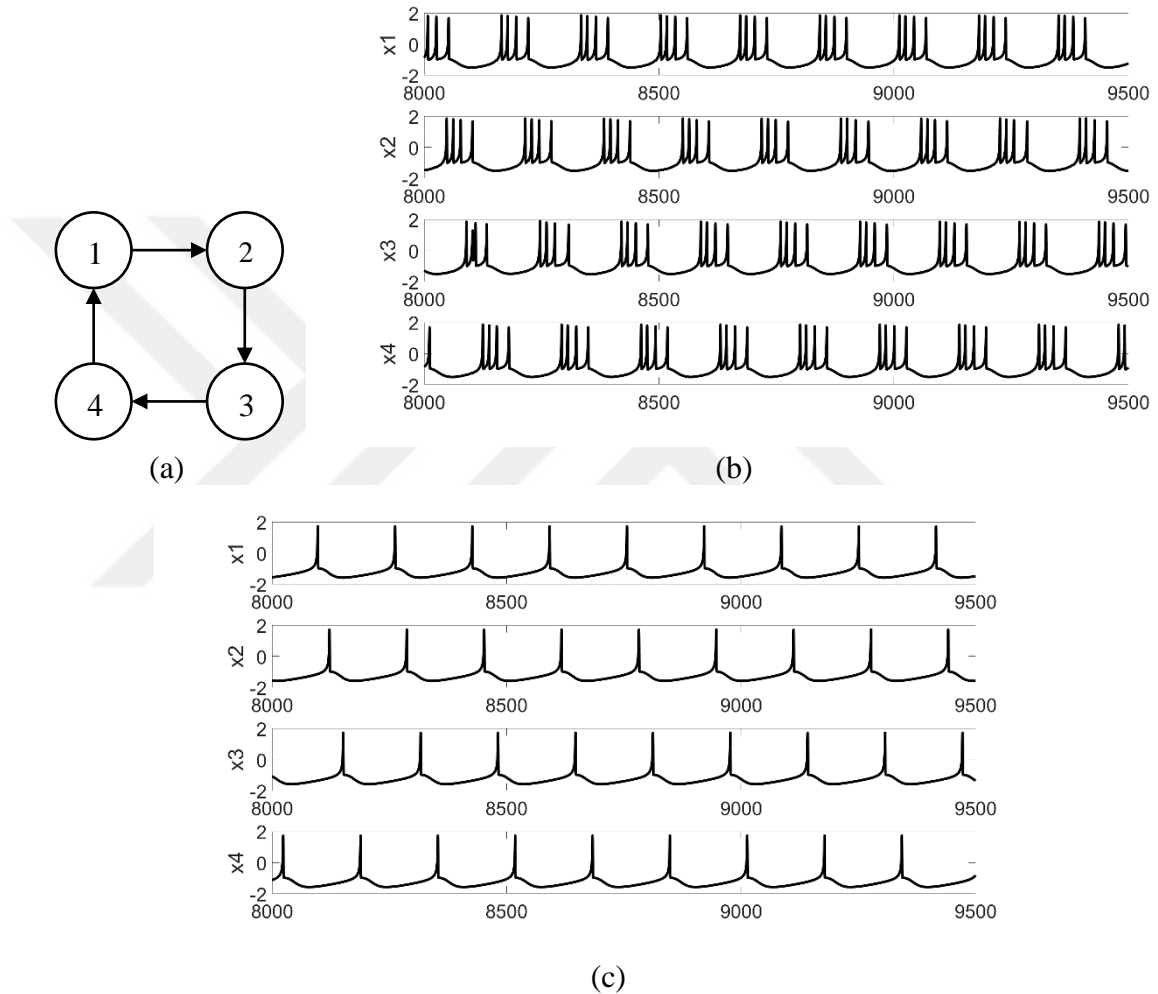


Şekil 3.22. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.05$ için asenkron çıkış desenleri, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.05$ için senkron çıkış desenleri, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.



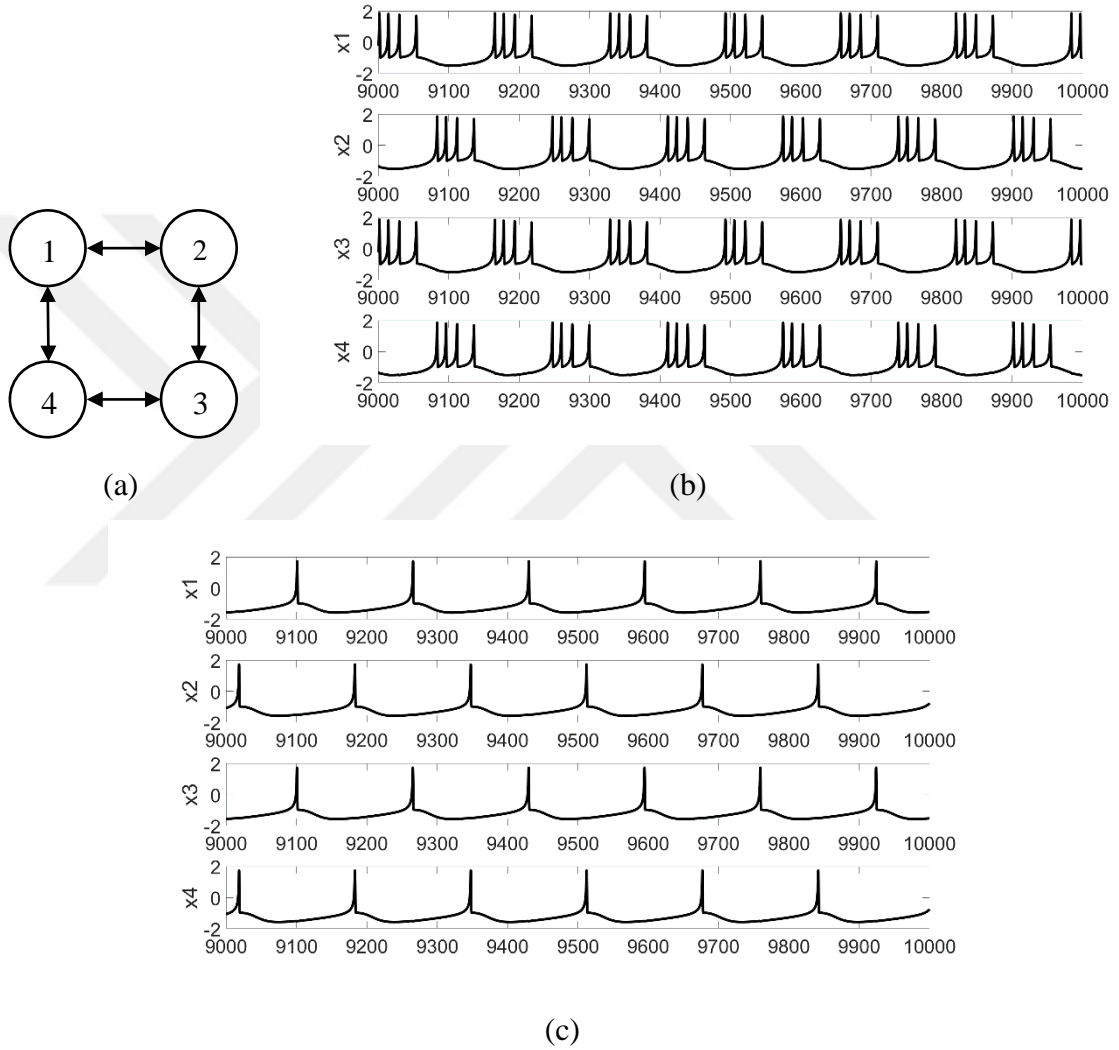
Şekil 3.23. İki adet HR sinir hücresi ile oluşturulmuş elektisksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.05$ için asenkron çıkış desenleri, b) $x_1 - x_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.05$ için senkron çıkış desenleri, d) $x_1 - x_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

Dört adet HR sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.24’ da sunulmaktadır.



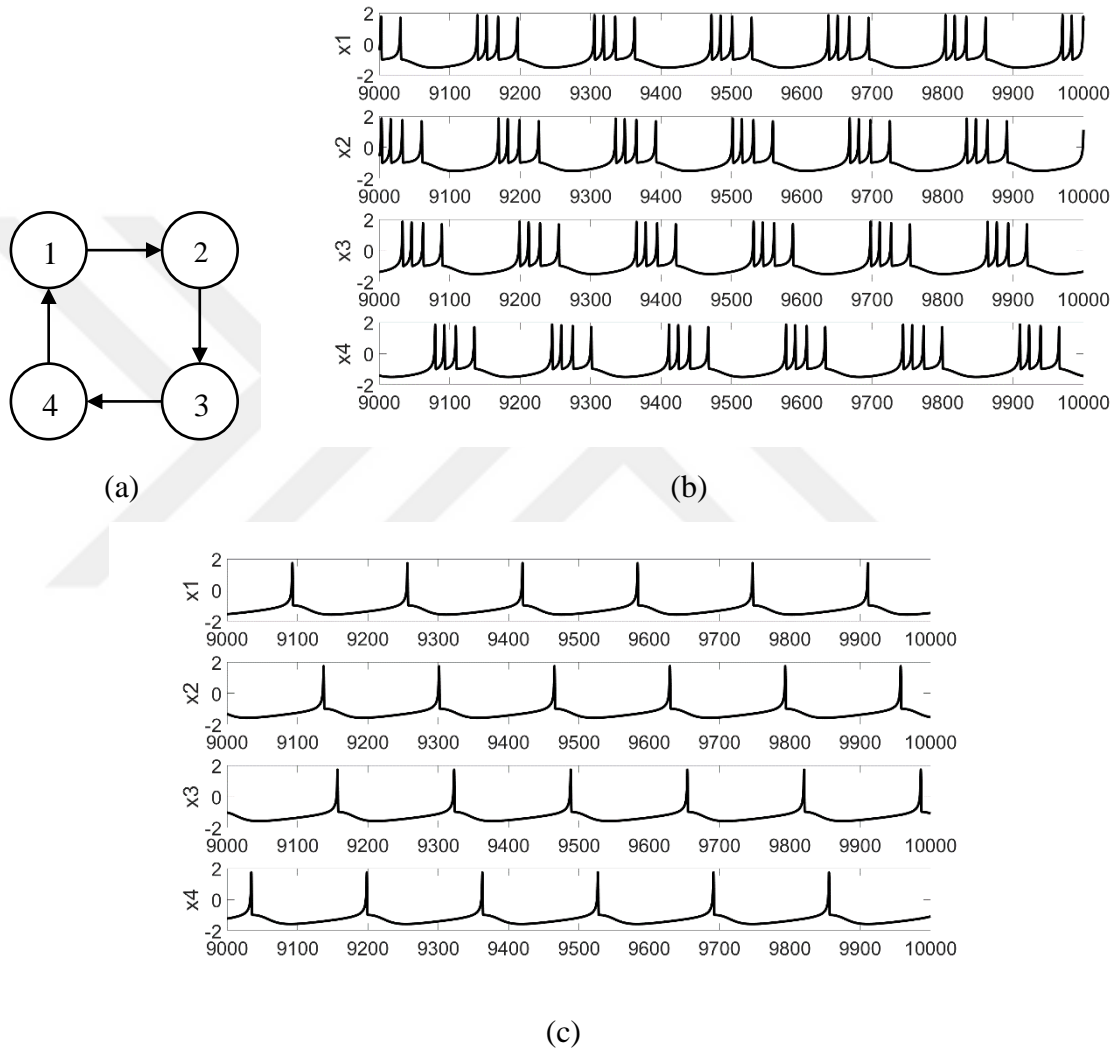
Şekil 3.24. Gallop yürüyüş deseni elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.2$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.2$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.25’de sunulmaktadır.



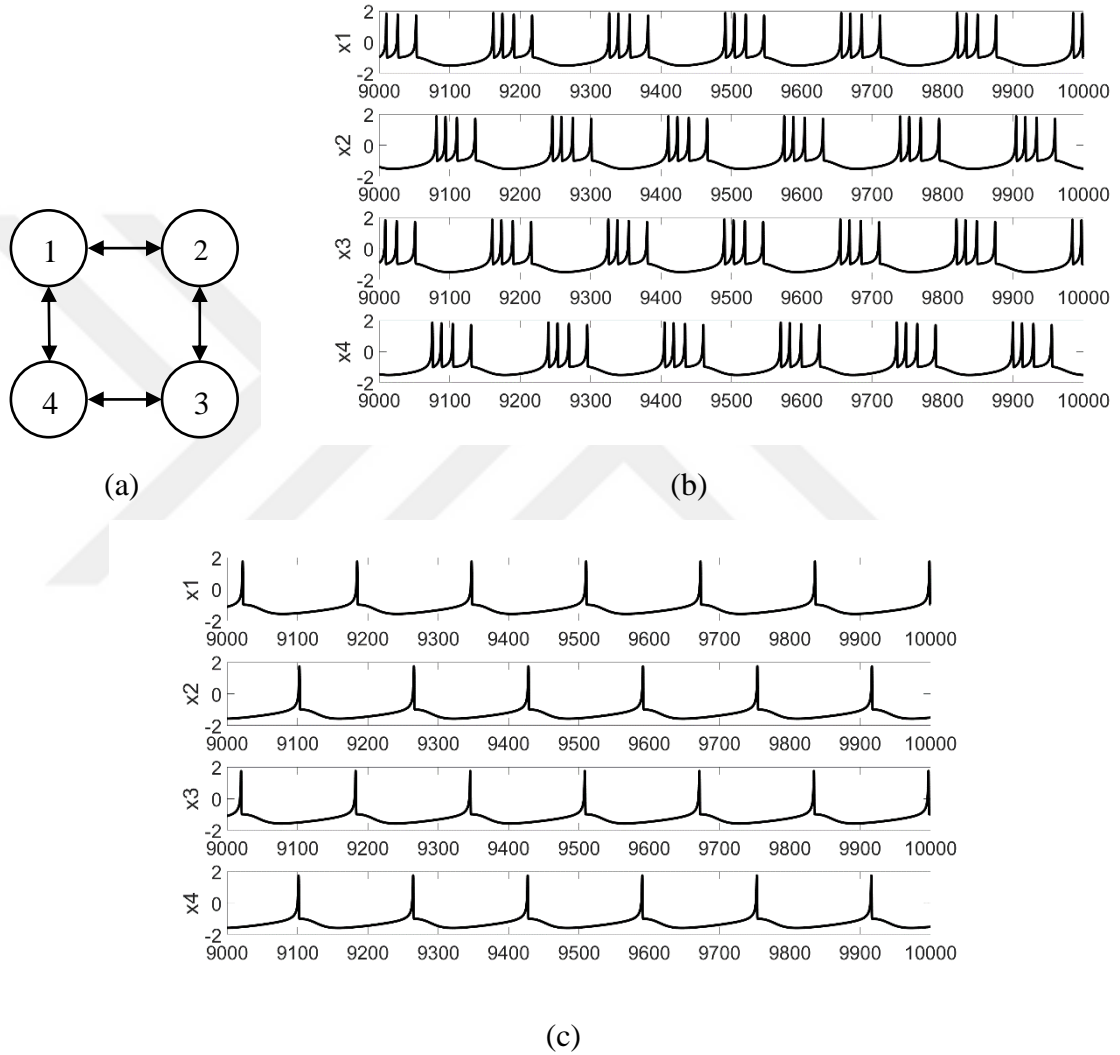
Şekil 3.25. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.2$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.2$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.26’da sunulmaktadır.



Şekil 3.26. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektiriksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = 0.0055$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = 0.0055$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.27’de sunulmaktadır.



Şekil 3.27. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = 0.0055$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = 0.0055$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

3.5. IZ Sinir Hücrelerinin Kuplajlanması ve IZ Sinir Hücreleri ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları

N adet IZ sinir hücresi kullanılarak oluşturulan MDÜ ağ yapısının i . sinir hücresinde oluşan zar potansiyeli Denklem 3.16' de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}\frac{dv_i}{dt} &= 0.04v_i^2 + 5v_i + 140 - u_i + I_{input} + I_i^{syn} \\ \frac{du_i}{dt} &= a(bv_i - u_i) \\ v_i &\geq 30mV \Rightarrow v_i \leftarrow c \\ u_i &\leftarrow u_i + d\end{aligned}\tag{3.16}$$

Sinirsel ağ yapısının i . sinir hücresinin senkronizasyon akımı, I_i^{syn} , kimyasal kuplaj özelliği taşıması durumunda Denklem 3.17 ile tanımlanmaktadır [4 – 6, 83].

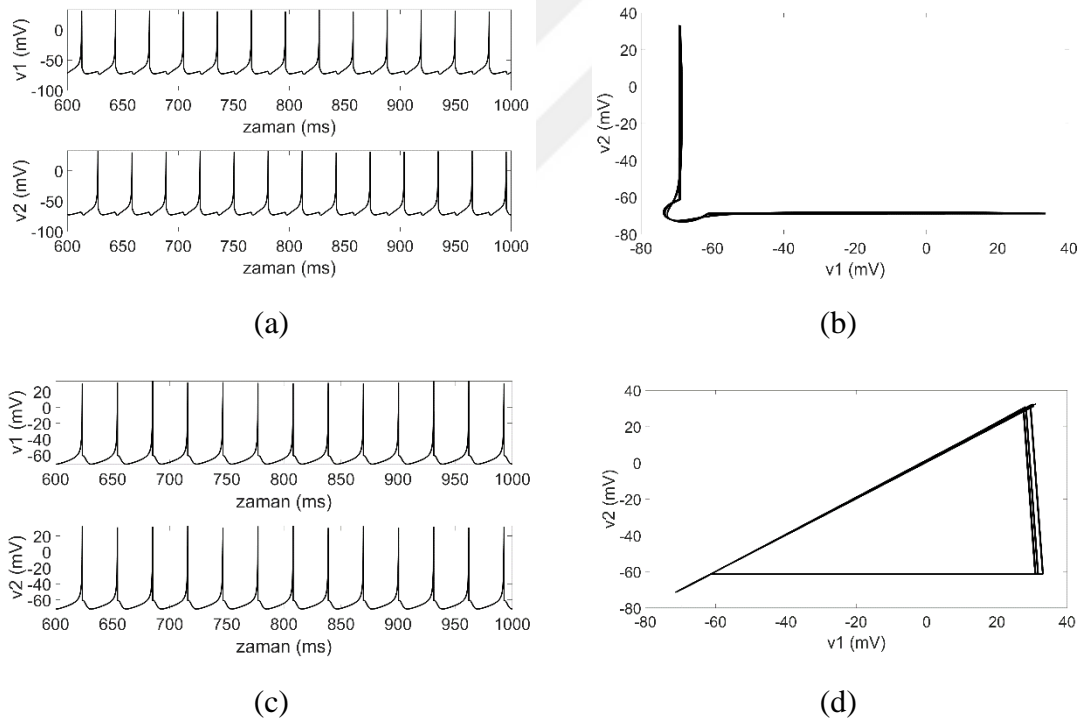
$$\begin{aligned}I_i^{syn} &= \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij} S_j (v_{syn} - v_i) \\ \frac{dS_j}{dt} &= \alpha(v_j)(1 - S_j) - \frac{S_j}{\tau} \\ \alpha(v_j) &= \frac{a_0}{1 + e^{-v_j/v_{shp}}}\end{aligned}\tag{3.17}$$

Sinirsel ağ yapı kimyasal kuplaj özelliği taşıması durumunda $a_0 = 3$, $v_{shp} = 5$, $\tau = 2$, $v_{syn} = 50$ olarak belirlenir [4 – 6, 83]. Ağ yapısı kimyasal kuplaj özelliğinin yanı sıra elektriksel kuplaj özelliği de taşıyabilmektedir. Bu durumda senkronizasyon akımı Denklem 3.18. ile tanımlanmaktadır [4 – 6, 83].

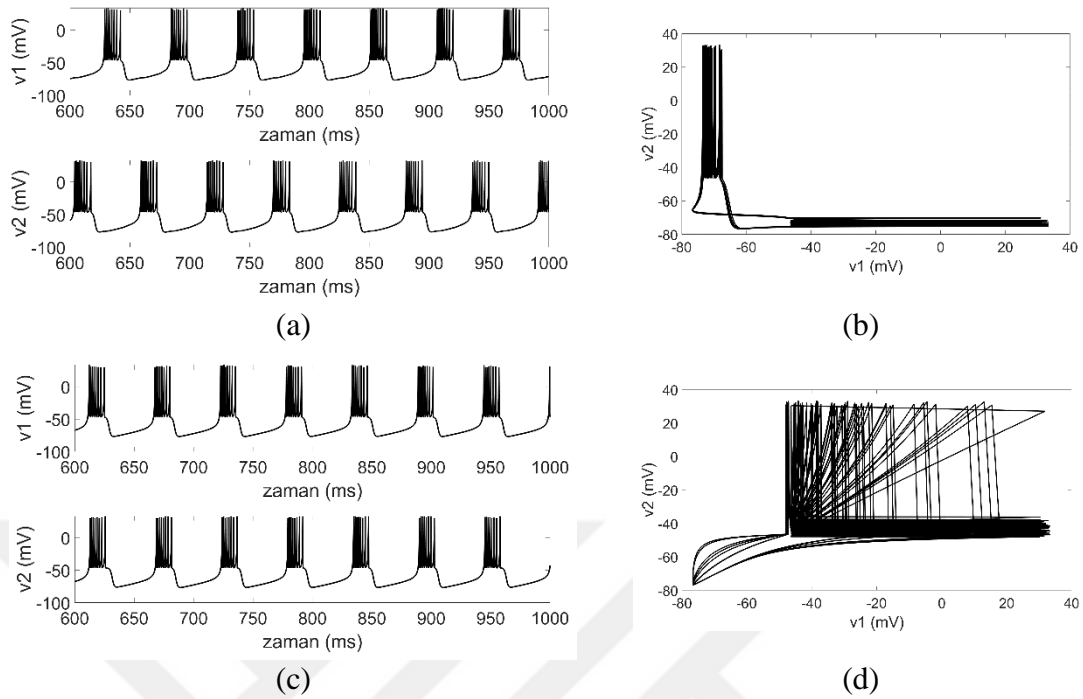
$$I_i^{syn} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N g_{ij} (v_j - v_i)\tag{3.18}$$

Sinir hücreleri arasındaki sinaptik ağırlığı tanımlayan g_{ij} parametresi, sinirsel ağ yapının hem kimyasal kuplajlanmasına hem de elektriksel kuplajlanmasına bağlı olarak, senkron ya da asenkron davranışına göre farklı değerler alabilmektedir.

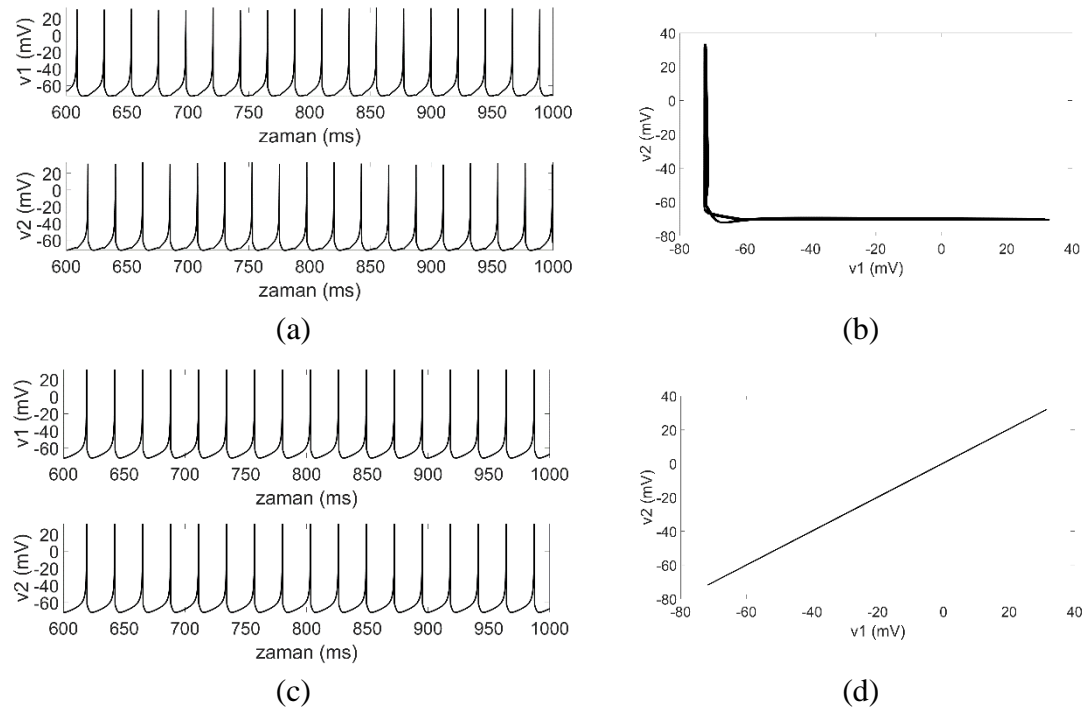
IZ sinir hücresi kullanılarak oluşturulan hem kimyasal hem de elektriksel kuplaj özelliğine sahip model, eğer patlamalı aksiyon potansiyeli üretiyorsa parametreler $a = 0.02$, $b = 0.2$, $c = -50$, $d = 2$, $I = 15$, aksiyon potansiyeli üretiyorsa $a = 0.02$, $b = 0.2$, $c = -65$, $d = 8$, $I = 20$ olarak seçilmelidir [65]. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş hem kimyasal kuplaj hem de elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli desenlerinin benzetim sonuçları Şekil 3.28 - Şekil 3.31 aralığında gösterilmiştir.



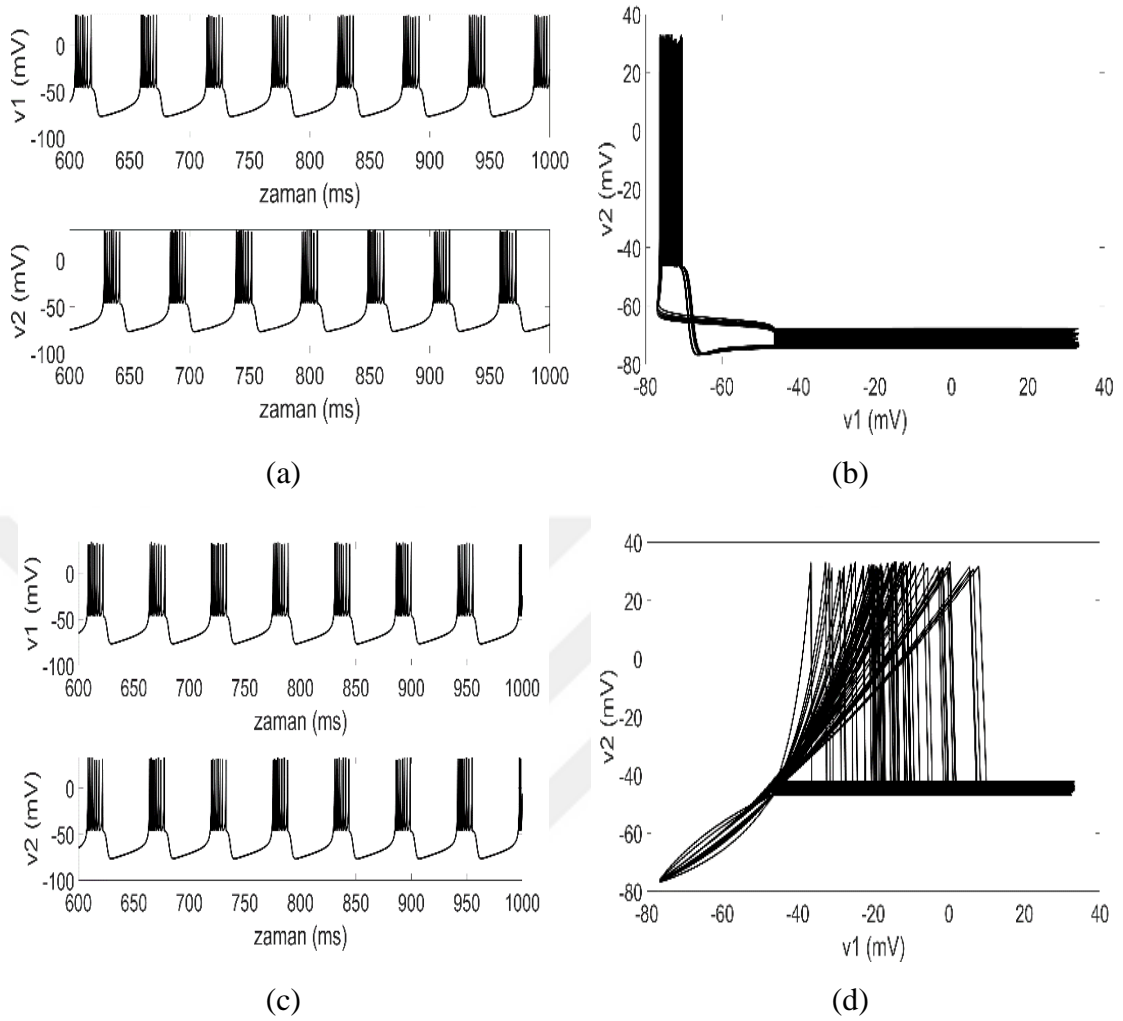
Şekil 3.28. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.1$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.1$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.



Şekil 3.29. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.04$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.04$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.



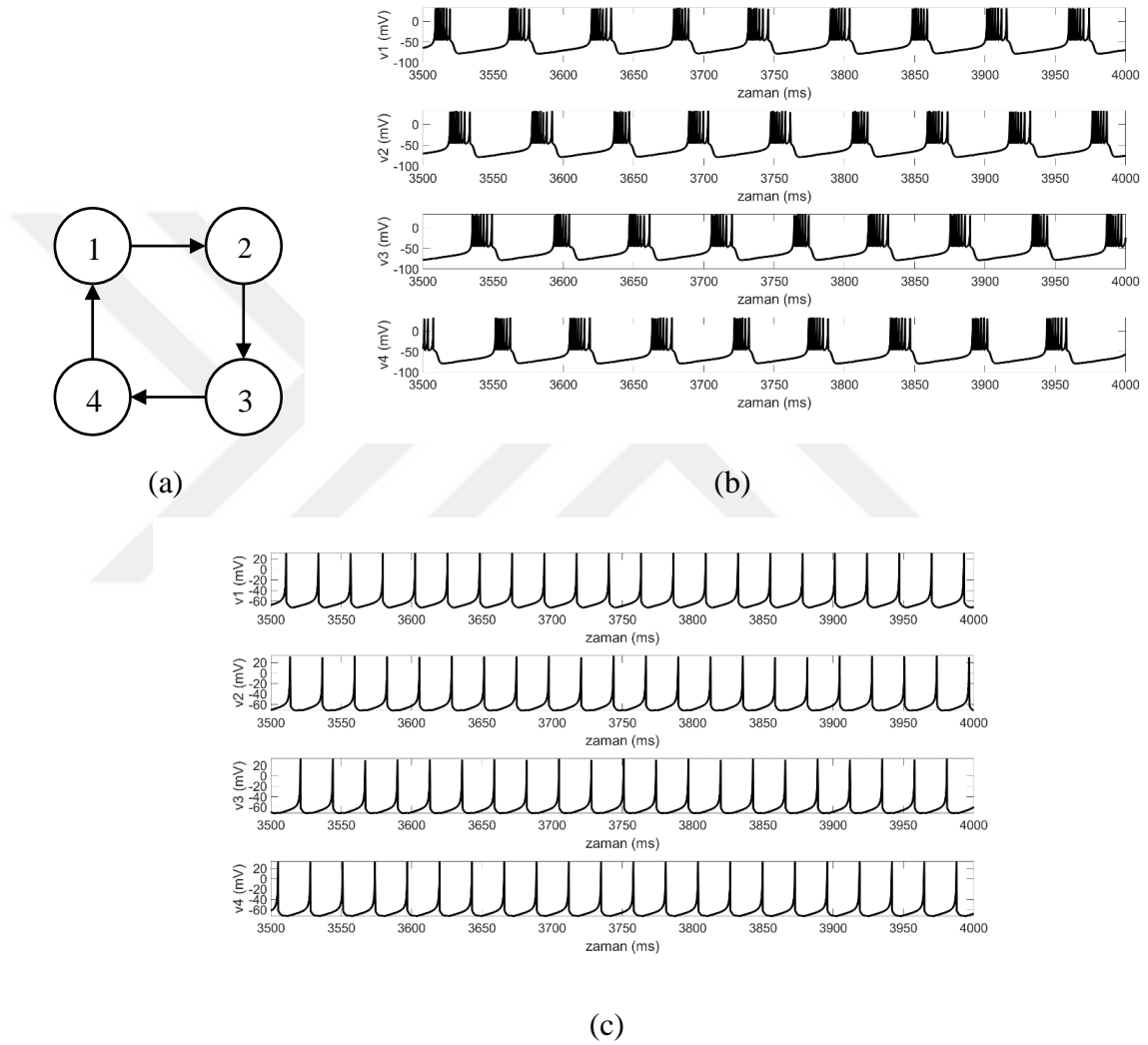
Şekil 3.30. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.1$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.1$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.



Şekil 3.31. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = -0.04$ için asenkron çıkış desenleri, b) $V_1 - V_2$ faz portreleri, c) $g_{ij} = 0.04$ için senkron çıkış desenleri, d) $V_1 - V_2$ için faz portreleri olmak üzere patlamalı aksiyon potansiyeli desenleri benzetim sonuçları.

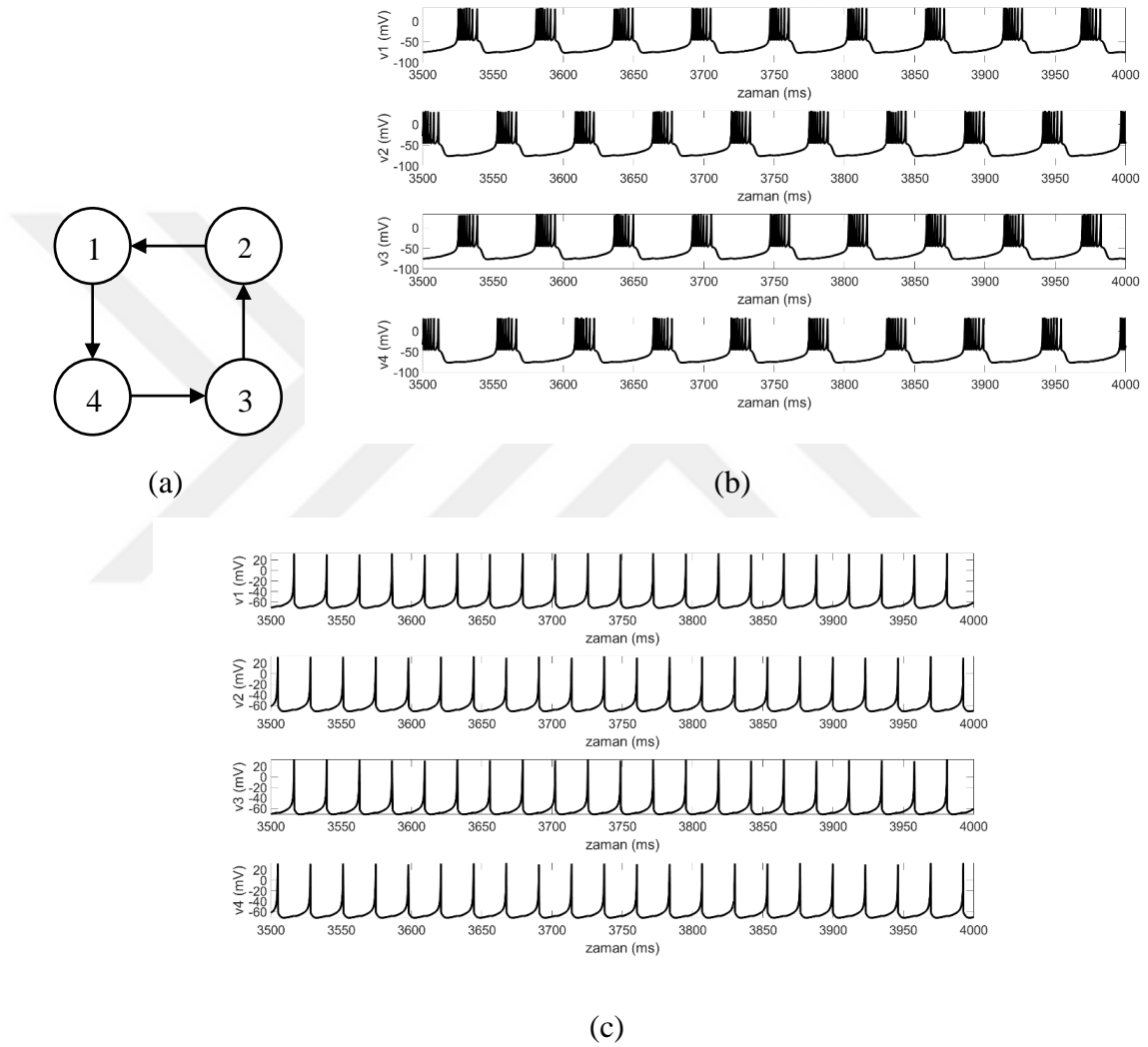
Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.32' de sunulmaktadır.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.32’de sunulmaktadır.



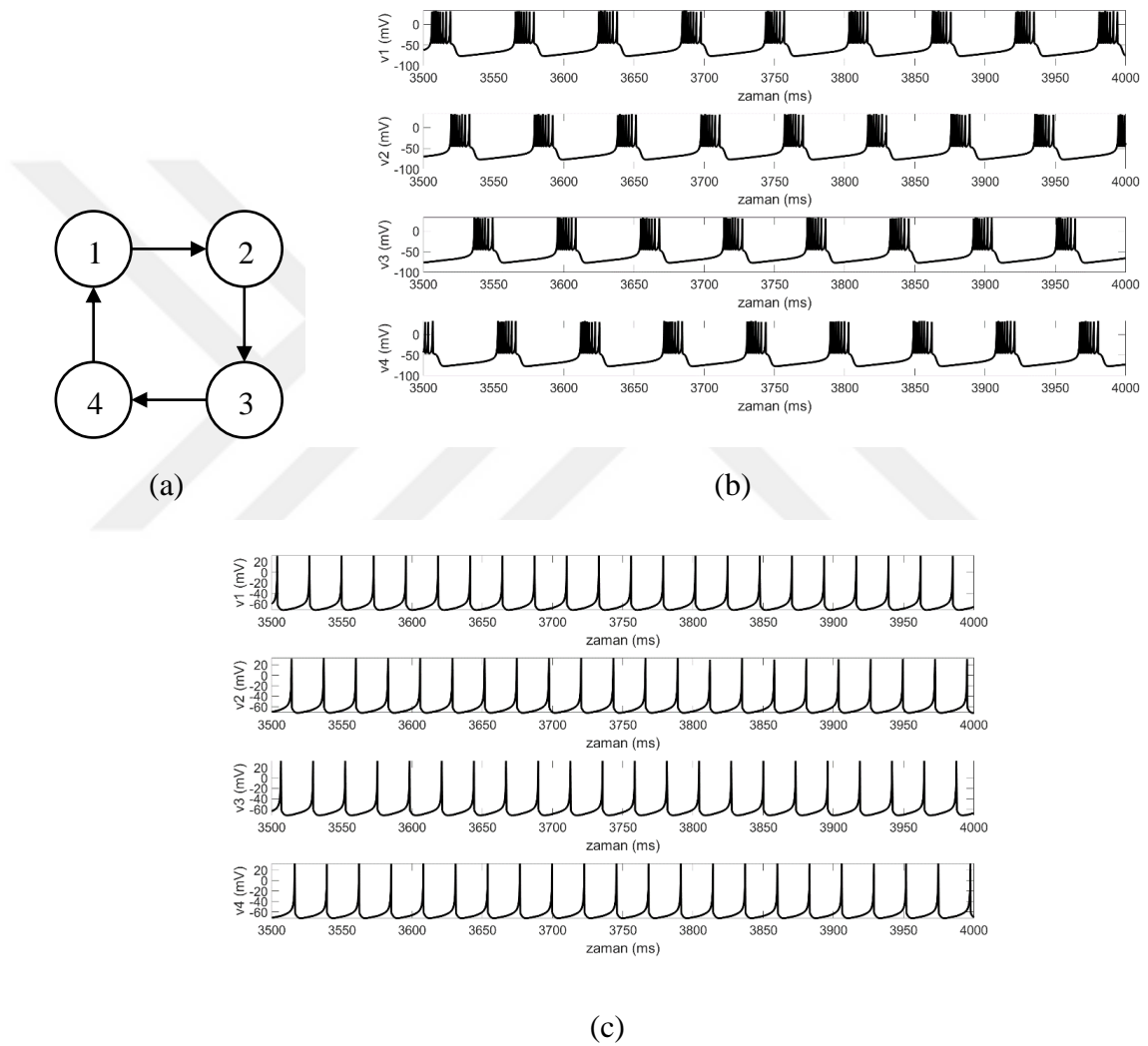
Şekil 3.32. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.04$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.33’ da sunulmaktadır.



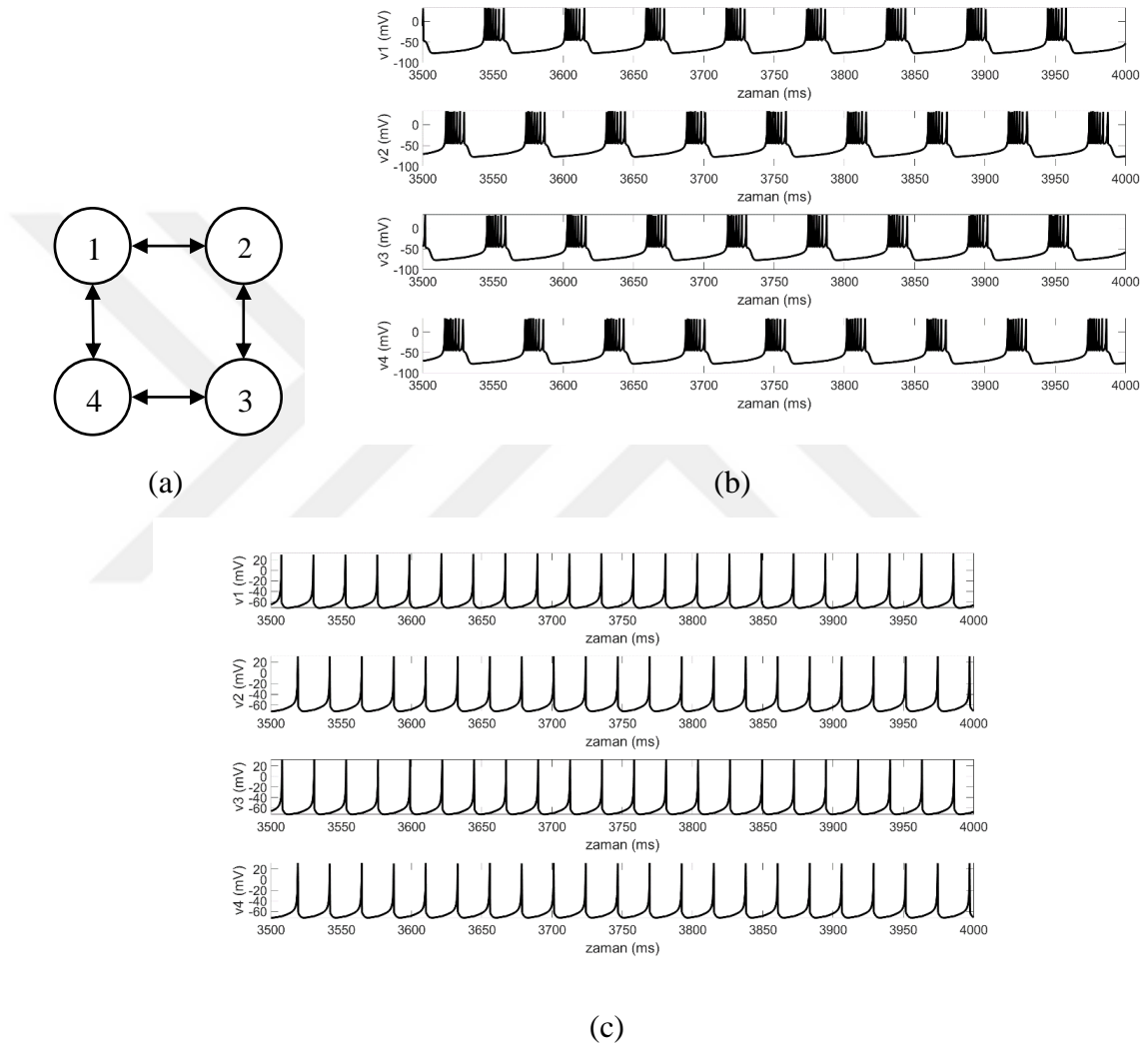
Şekil 3.33. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.04$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektiriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.34’ da sunulmaktadır.



Şekil 3.34. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.01$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektiriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait benzetim sonuçları Şekil 3.35’ da sunulmaktadır.



Şekil 3.35. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kuplaj bağlantıları b) $g_{ij} = -0.01$ için patlamalı aksiyon potansiyeli, c) $g_{ij} = -0.1$ için aksiyon potansiyeli desenlerinin gösterimi.

3.6. Matsuoka Osilatörü ile Oluşturulan MDÜ Ağ Yapıları

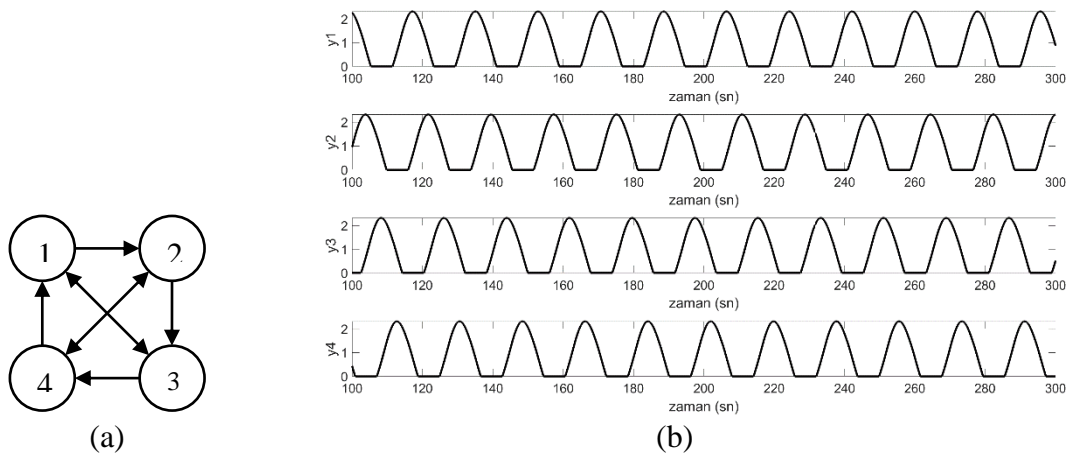
Matsuoka' nın literatüre sunmuş olduğu model önceki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştı. Bu bölümde ise Matsuoka osilatörü ile oluşturulan MDÜ ağ yapıları incelenecektir. Matematiksel ifadesinin kolaylığı, herhangi bir geri besleme sinyaline ihtiyaç duymadan ritmik desenler üretebilmesi, negatif değerlere sahip olmaması gibi avantajlarından dolayı Matsuoka Osilatörü, robotik çalışmalarda yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. İki ve dört adet sinir hücresinden oluşan osilatör yapınının, benzetimi için Denklem 3.19' da yer alan fonksiyon kullanılmıştır [46, 48, 49]. İki sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ ağ yapısının benzetim sonuçları ikinci bölümde Şekil 2.12' de sunulmuştu.

Denklem 3.19 ile ifade edilen fonksiyonun parametreleri $\tau_r = 6$, $\tau_a = 12$, $b = 5$, $s = 8$ ve $w_{ij} = 1.5$, $feed_i = 0$ olarak belirlenmiştir [46, 48 – 50]. Bu durumda benzetimi gerçekleştirilen MDÜ modelin sonuçları Şekil 3.36 - Şekil 3.39 aralığında sunulmaktadır.

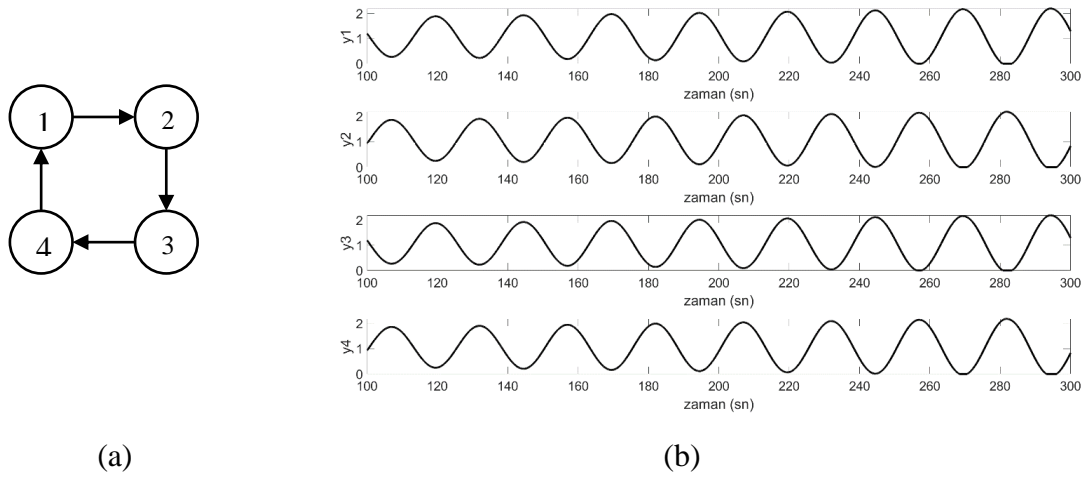
$$\tau_r \frac{dx_i}{dt} = -x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N w_{ij} y_j + s_i - b f_i + feed_i$$

$$\tau_a \frac{df_i}{dt} = -f_i + y_i \quad (3.19)$$

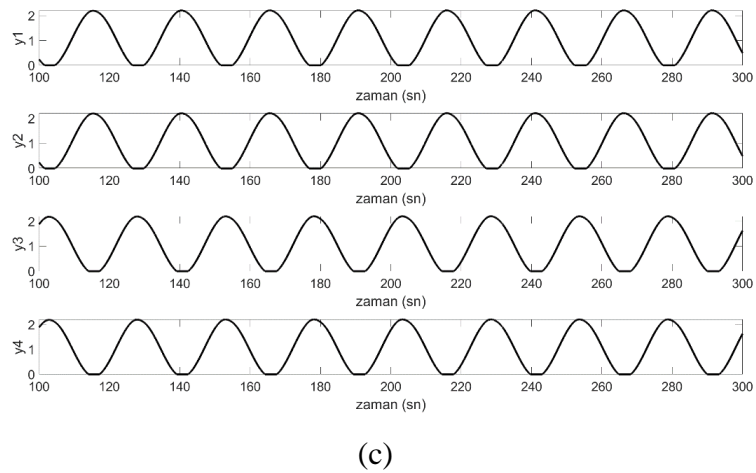
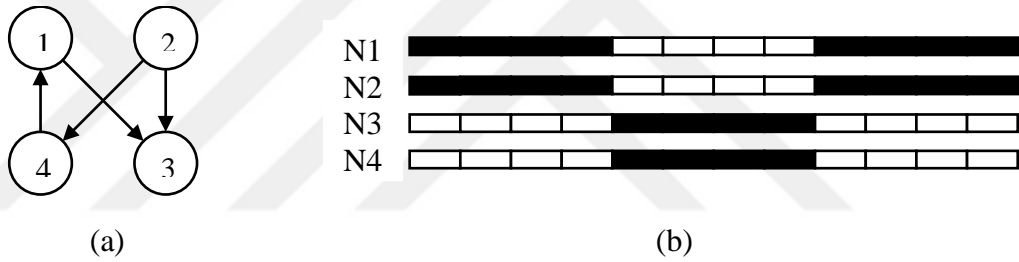
$$y_i = \max(0, x_i)$$



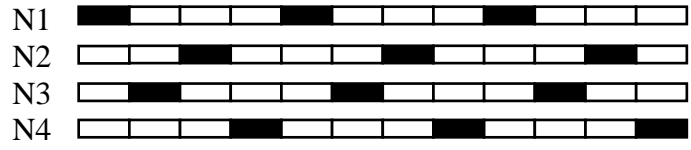
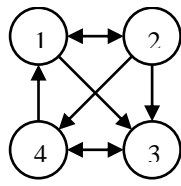
Şekil 3.36. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) kupaaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.



Şekil 3.37. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının a) koplaj bağlantıları b) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.

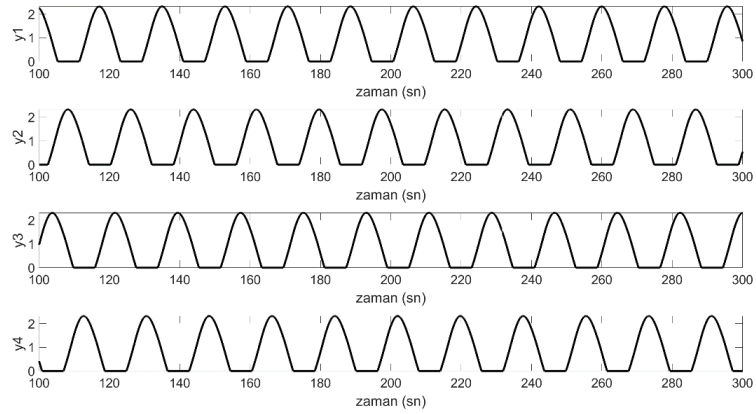


Şekil 3.38. Çeşitli şekillerde gerçekleştirilen senkronizasyonda çıkış desenleri elde etmek amacıyla oluşturulan modelin a) koplaj bağlantıları b) faz sıralarının, c) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.



(a)

(b)



(c)

Şekil 3.39 Çeşitli şekillerde gerçekleştirilen senkronizasyonda çıkış desenleri elde etmek amacıyla oluşturulan modelin a) kuplaj bağlantıları b) faz sıralarının, c) her bir sinir hücresinin çıkış desenlerinin gösterimi.

4. BÖLÜM

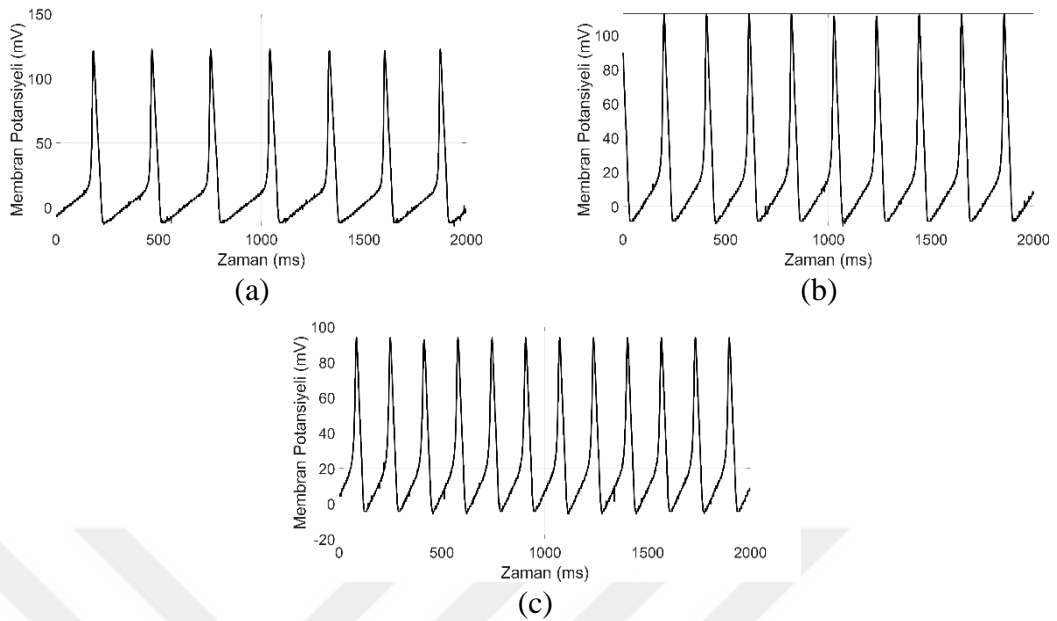
SİNİR HÜCRESİ MODELLERİNİN RASPBERRY PI ÜZERİNDE GERÇEKLEŞTİRİMİ

Tezin bu bölümünde, MATLAB ortamında benzetimi yapılan FHN, HH, HR, ML, IZ sinir hücrelerinin ve MOs, BVP osilatör hücrelerinin ve bu sinir hücreleri ile oluşturulan MDÜ ağ yapılarının Raspberry Pi üzerinde donanımsal gerçekleştirimi tamamlanmış, gerçekleştirim sonuçları paylaşılmıştır. Benzetim ve elde edilen gerçekleştirim sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla, Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan her bir model için seçilen parametreler benzetimleri yapılan modellerin parametreleri ile aynı değerdedir. Raspberry Pi üzerinde diferansiyel denklemlerin çözümlenmesi için 4. Dereceden Runge – Kutta analiz yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirmeler, Python arayüz programında yazılmış kodlar ile sağlanmıştır. Zar potansiyelini ifade eden değişken, tüm modellerin gerçekleştirim çalışmalarında, y sembolü ile ifade edilmektedir. y_1 , y_2 , y_3 ve y_4 sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü sinir hücrenin zar potansiyelini ifade eden değişkendir.

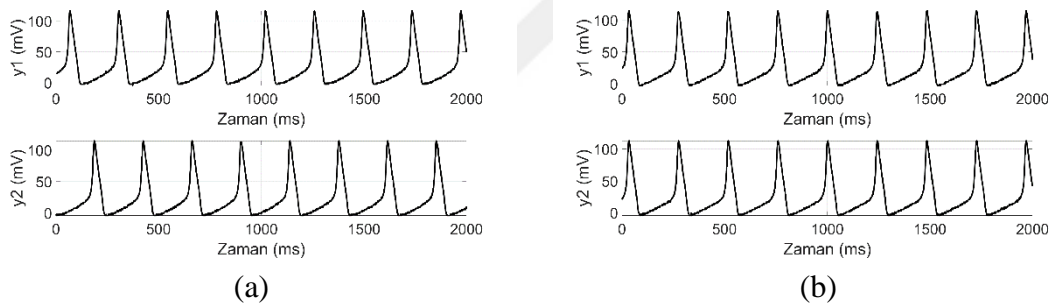
4.1. HH Sinir Hücresinin ve HH Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

Bir adet HH sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde elde edilen donanımsal gerçekleştirimi için ikinci bölümde yer alan Denklem 2.1. kullanılmıştır. Gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.1 ile sunulmaktadır.

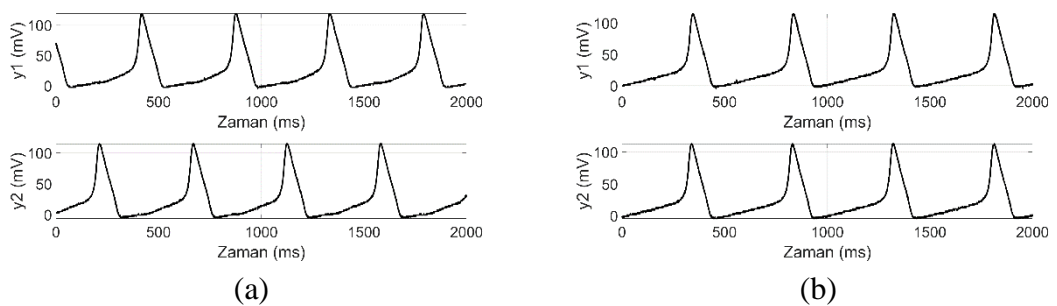
İki HH sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi için üçüncü bölümde yer alan Denklem 3.1. kullanılmıştır. Kimyasal ve elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ile paylaşılmaktadır.



Şekil 4.1. HH Siner Hüresi Modeli' nin a) $I = 10$, b) $I = 25$, c) $I = 50$ için hücre zarı potansiyelinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonucu.

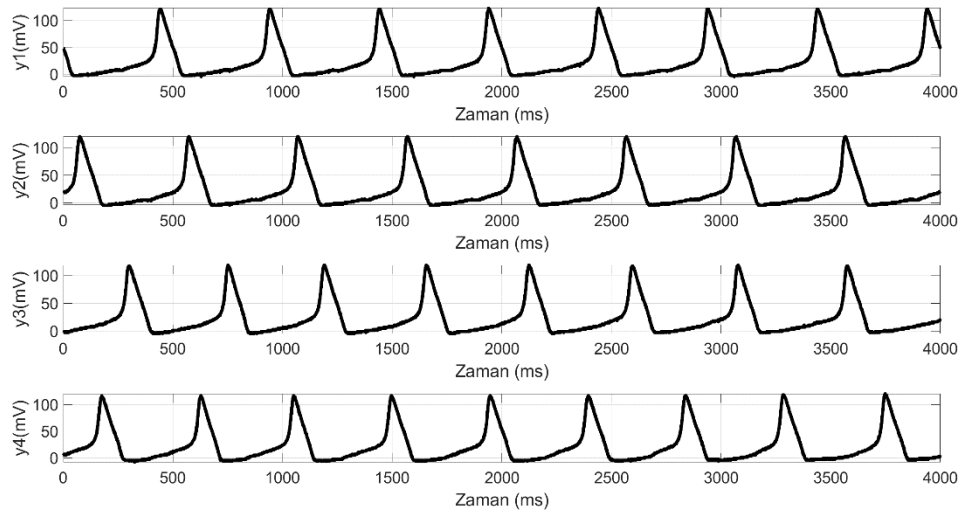


Şekil 4.2. İki adet HH siner hüresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplajlanan MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, olmak üzere Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.

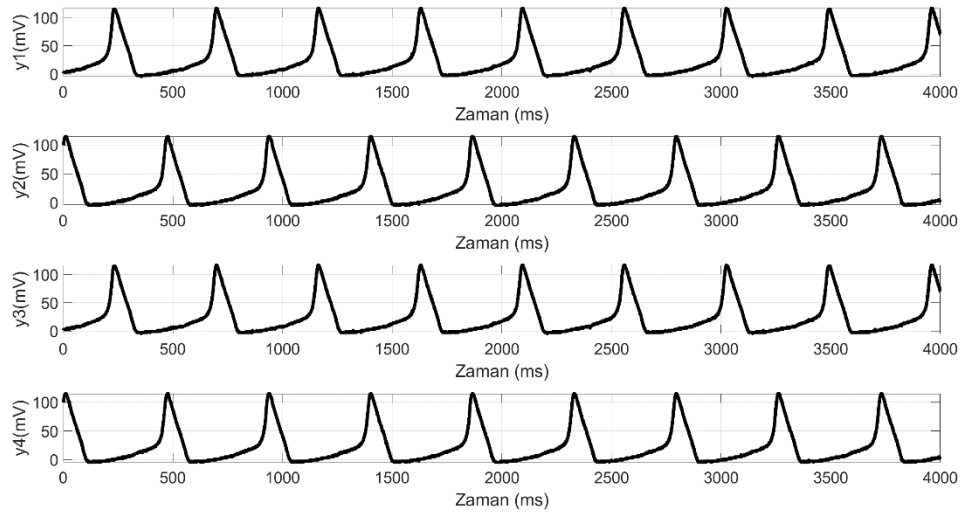


Şekil 4.3. İki adet HH siner hüresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplajlanan MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, olmak üzere Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.

Dört adet HH sinir hücresi kullanılarak oluşturulan, kimyasal kuplaj özelliği taşıyan, ağ yapısının, gallop yürüş deseni ve trot yürüyüş deseni için gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.4' de verilmiştir.



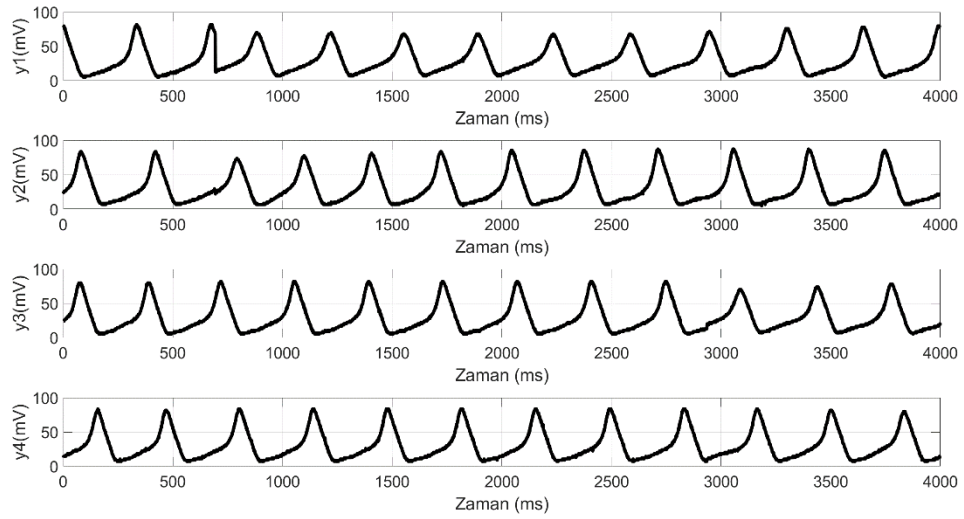
(a)



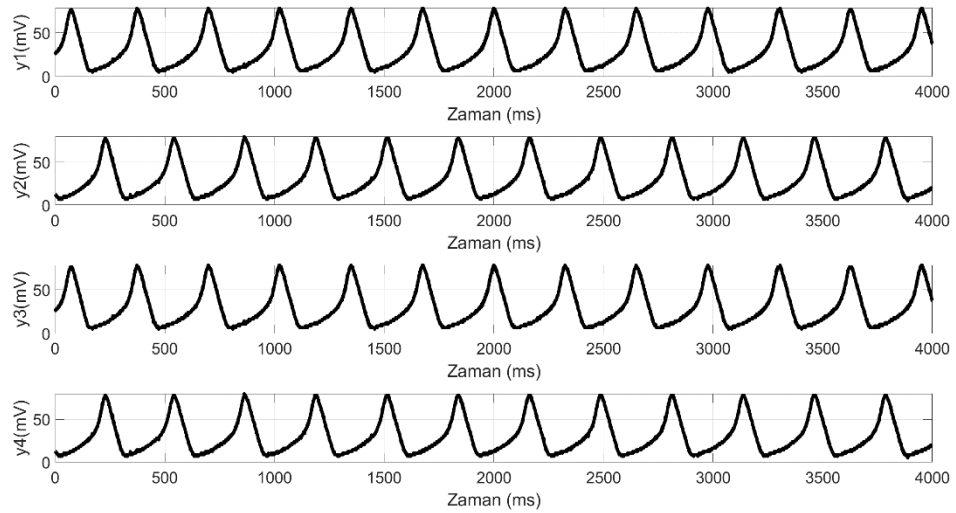
(b)

Şekil 4.4. Kimyasal kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, $g_{ij} = 0.2$ seçildiğinde a) Gallop yürüyüş deseni, b) Trot yürüyüş deseni, olmak üzere hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.

Dört adet HH sinir hücresi kullanılarak oluşturulan, elektriksel kuplaj özelliği taşıyan, ağ yapısının, gallop yürüş deseni ve trot yürüyüş deseni için gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.5' de verilmiştir.



(a)

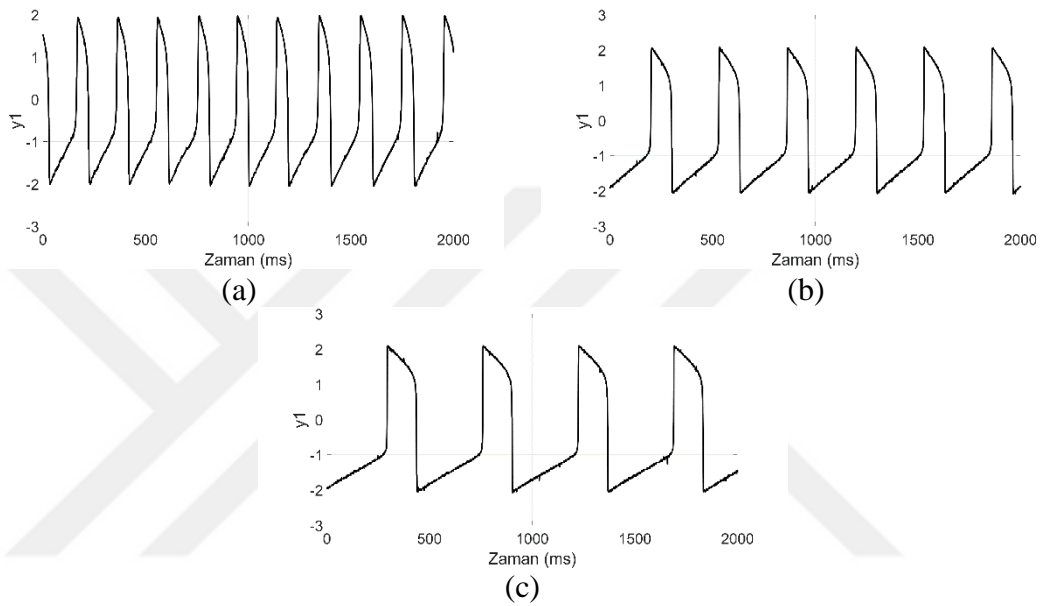


(b)

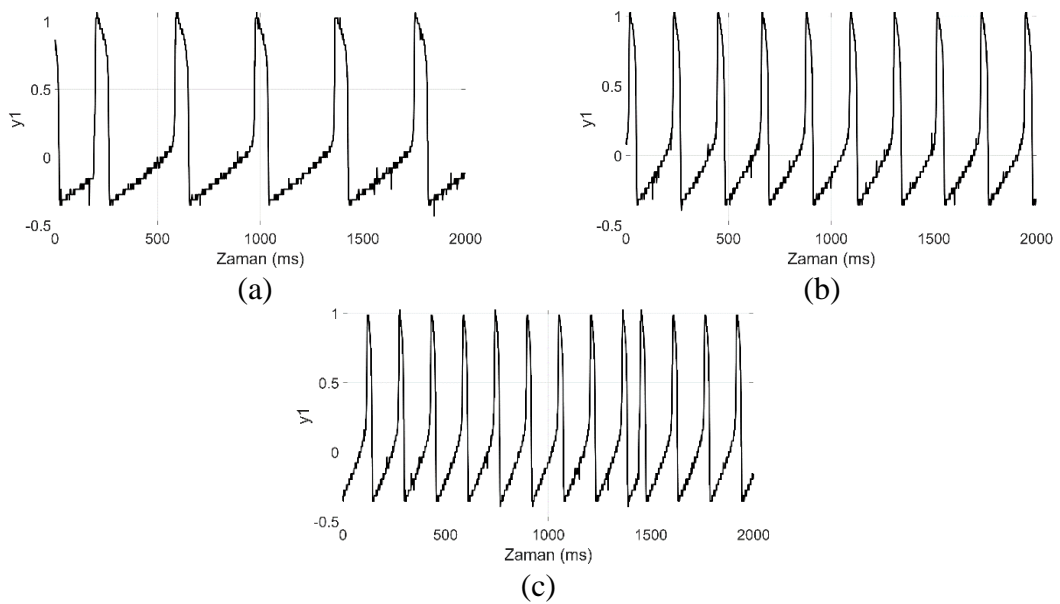
Şekil 4.5. Elektriksel kuplajlanan dört adet HH sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, $g_{ij} = 0.2$ seçildiğinde a) Gallop yürüyüş deseni, b) Trot yürüyüş deseni, olmak üzere hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.

4.2. FHN Sinir Hücresinin ve FHN Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

Bir adet FHN sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi için ikinci bölümde yer alan Denklem 2.8. ve Denklem 2.9 kullanılmıştır. Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ile sunulmaktadır.

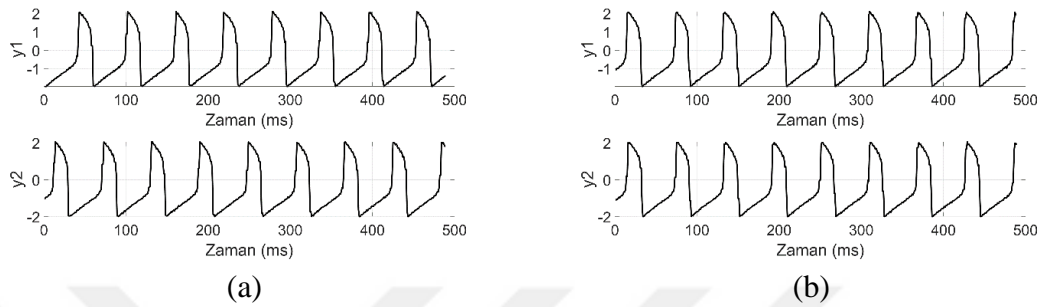


Şekil 4.6. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.8. kullanılarak Raspberry Pi üzerinde gerçekleştiriminde a) $c=5$, b) $c=10$, c) $c=15$ için hücre zarı potansiyeli benzetim sonuçları.



Şekil 4.7. FHN Sinir Hücresi Modeli' nin Denklem 2.9. kullanılarak Raspberry Pi üzerinde a) $\epsilon=0.002$, b) $\epsilon=0.004$, c) $\epsilon=0.006$ için hücre zarı potansiyeli benzetim sonuçları.

İki adet FHN sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi için üçüncü bölümde yer alan Denklem 3.20. kullanılmıştır. Elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.8 ile paylaşılmaktadır.

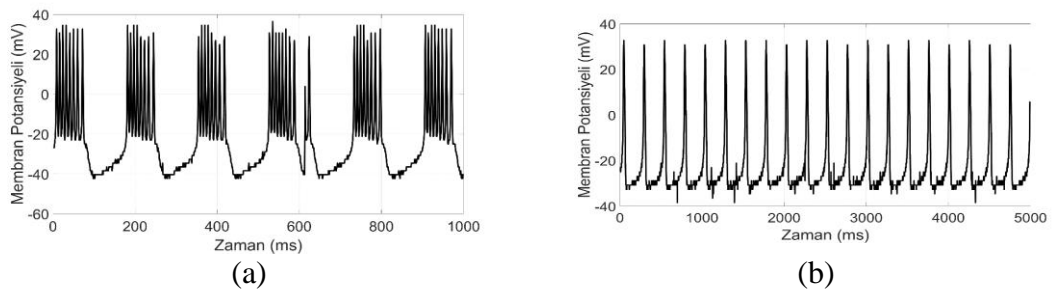


Şekil 4.8. İki adet FHN sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplaj MDÜ yapısının a) $g_{ij} = 0.1$ için asenkron faz, b) $g_{ij} = -0.1$ için senkron faz, olmak üzere Raspberry Pi üzerinde model gerçekleştirim sonuçları.

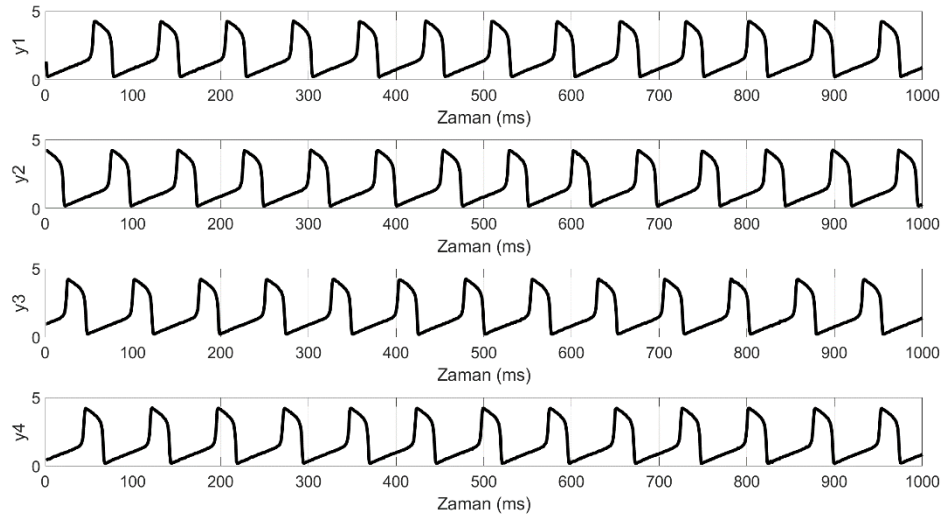
Elektriksel kuplaj özelliği taşıyan, dört adet FHN sinir hücresi kullanılarak oluşturulan ağ yapısının, $a=0.7$, $b=0.8$, $c=5$, $I=0.34$ parametreleri seçildiğinde, gallop yürüş deseni ve trot yürüyüş deseni için gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.10' de verilmiştir.

4.3. ML Sinir Hücresinin ve ML Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

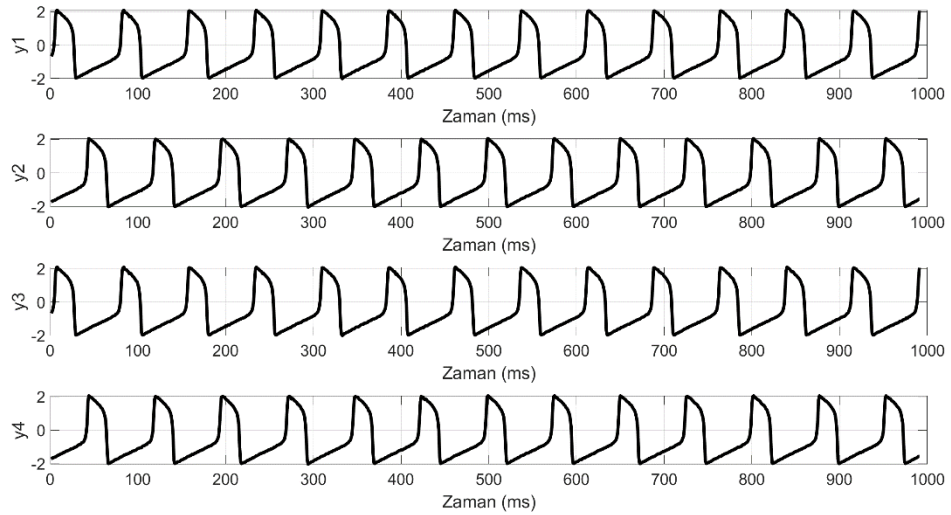
Bir adet ML sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi için ikinci bölümde yer alan Denklem 2.10. kullanılmıştır. Parametreler $E_{Ca} = 100$, $E_K = -70$, $E_{Leak} = -50$, $g_{Ca} = 1.2$, $g_K = 2$, $g_L = 0.5$, $V_1 = -1$, $V_2 = 15$, $V_3 = 10$, $V_4 = 5$, olarak belirlenmiştir [76]. Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.9 ile sunulmaktadır.



Şekil 4.9. ML sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde a) $\bar{\lambda}_N = 3$, b) $\bar{\lambda}_N = 5$ için gerçekleştirim sonuçları.



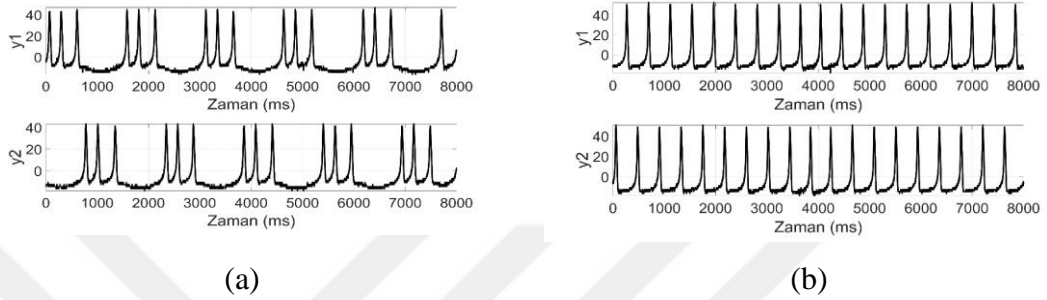
(a)



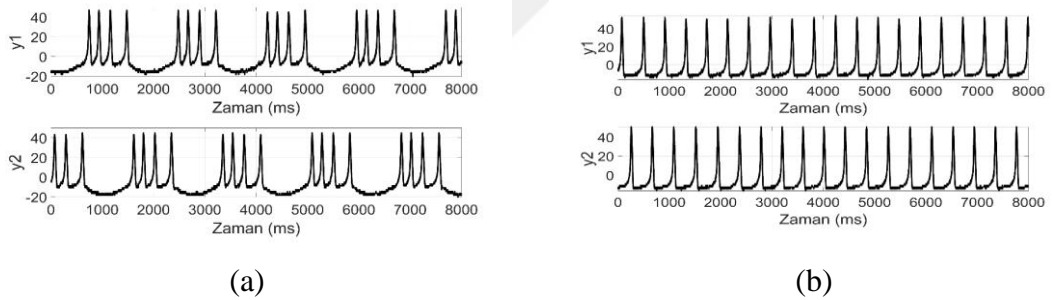
(b)

Şekil 4.10. Elektriksel kuplajlanan dört adet FHN sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının, a) Gallop yürüyüş deseni, b) Trot yürüyüş deseni, olmak üzere hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.

İki adet ML sinir hücresi kullanılarak oluşturulan kimyasal kuplaj ve elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli desenlerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ de sunulmuştur.

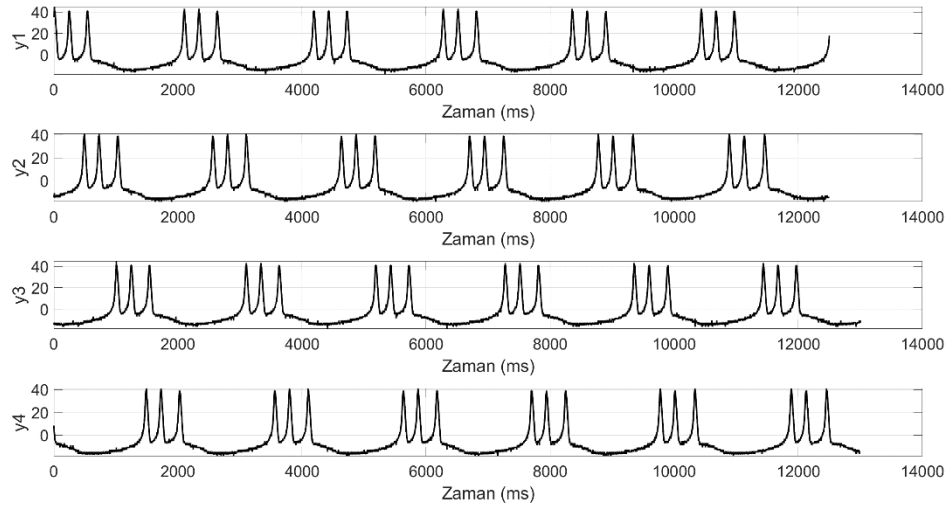


Şekil 4.11. ML sinir hücreleri ile oluşturulmuş, Kimyasal kuplaj özelliği sergileyen, iki sinir hücresi ile yapılp Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilen modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları.

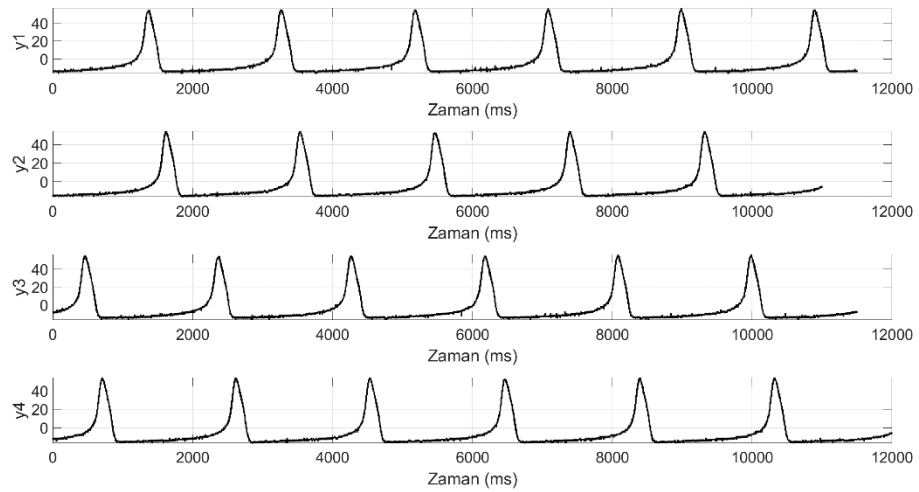


Şekil 4.12. ML sinir hücreleri ile oluşturulmuş, Elektriksel kuplaj özelliği sergileyen, iki sinir hücresi ile yapılp Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilen modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.13’ da sunulmaktadır.



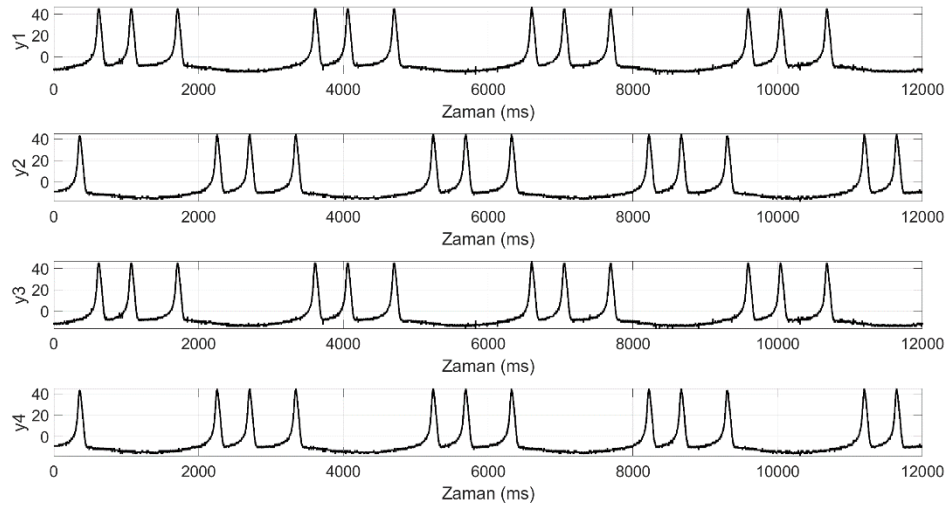
(a)



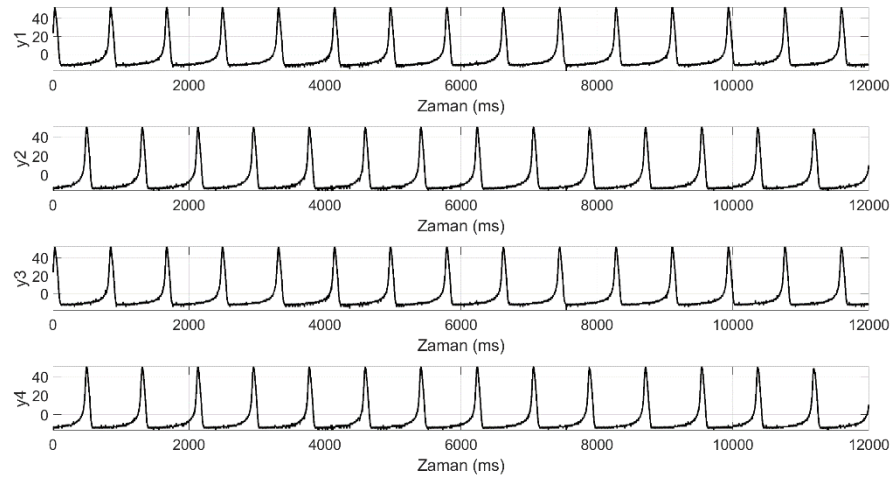
(b)

Şekil 4.13. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.14' da sunulmaktadır.



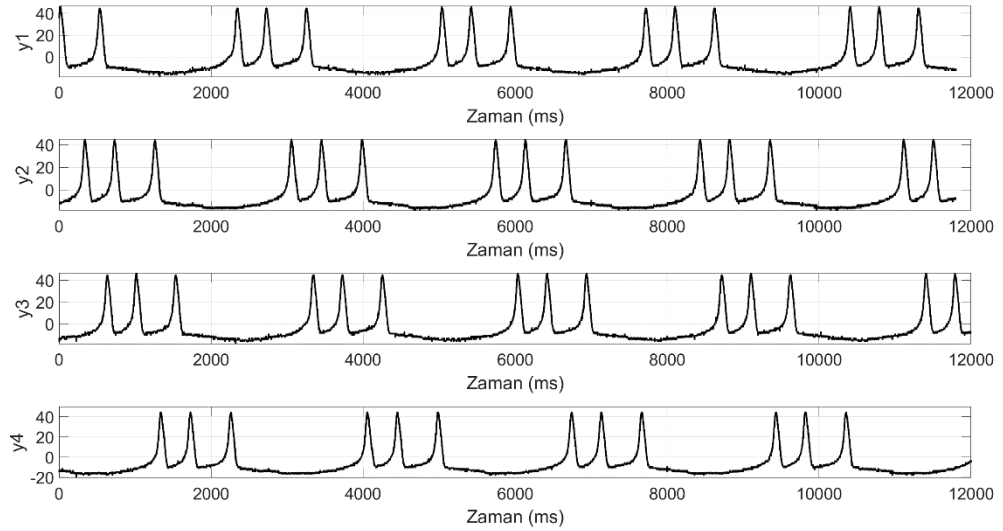
(a)



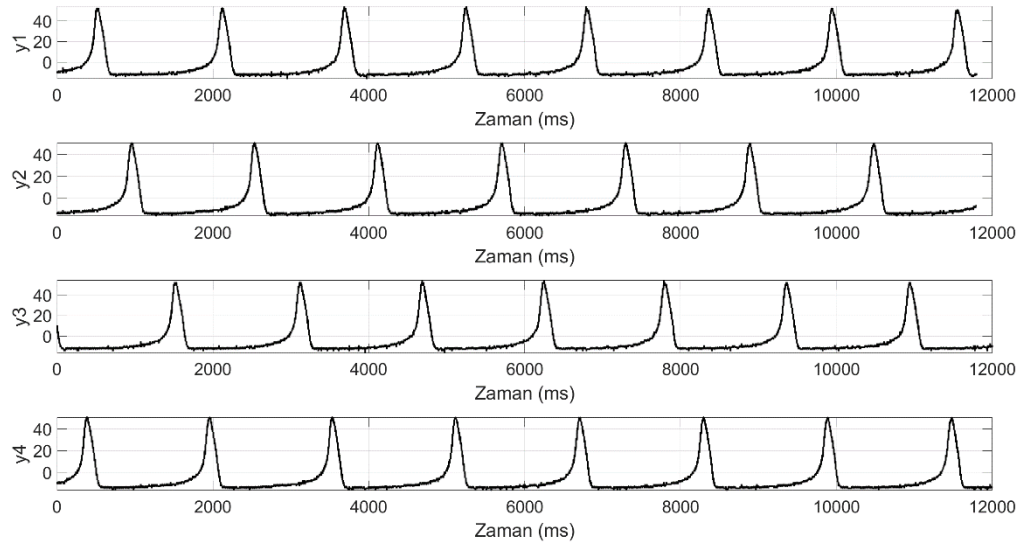
(b)

Şekil 4.14. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.15’ da sunulmaktadır.



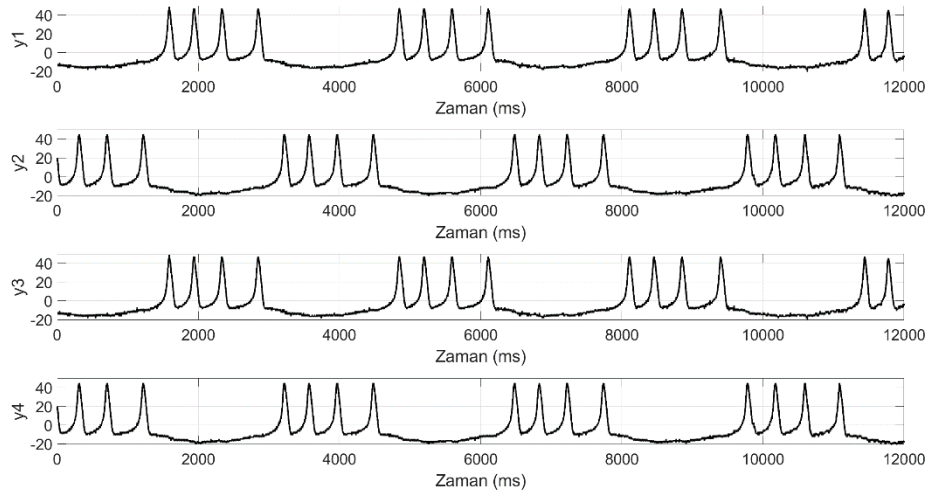
(a)



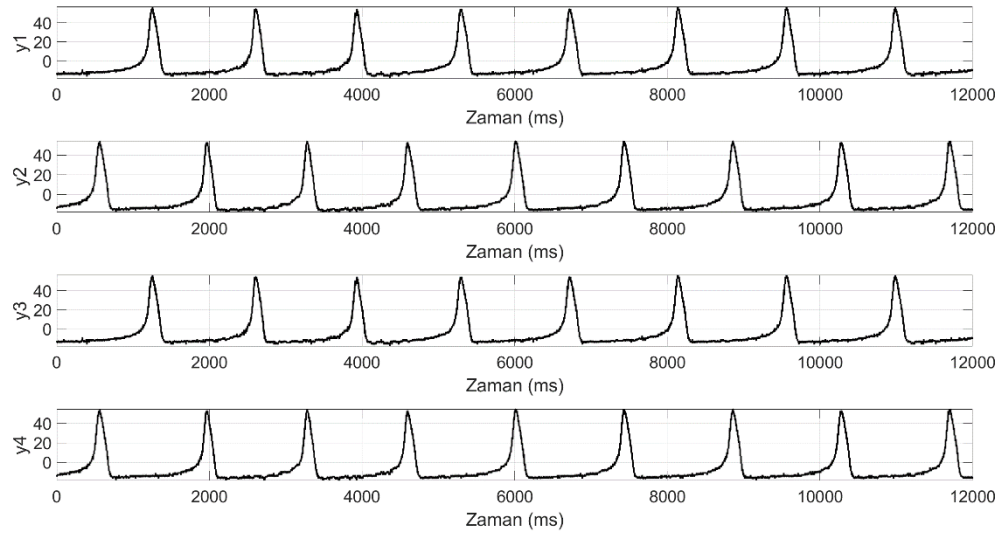
(b)

Şekil 4.15. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet ML sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektiriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.16' da sunulmaktadır.



(a)

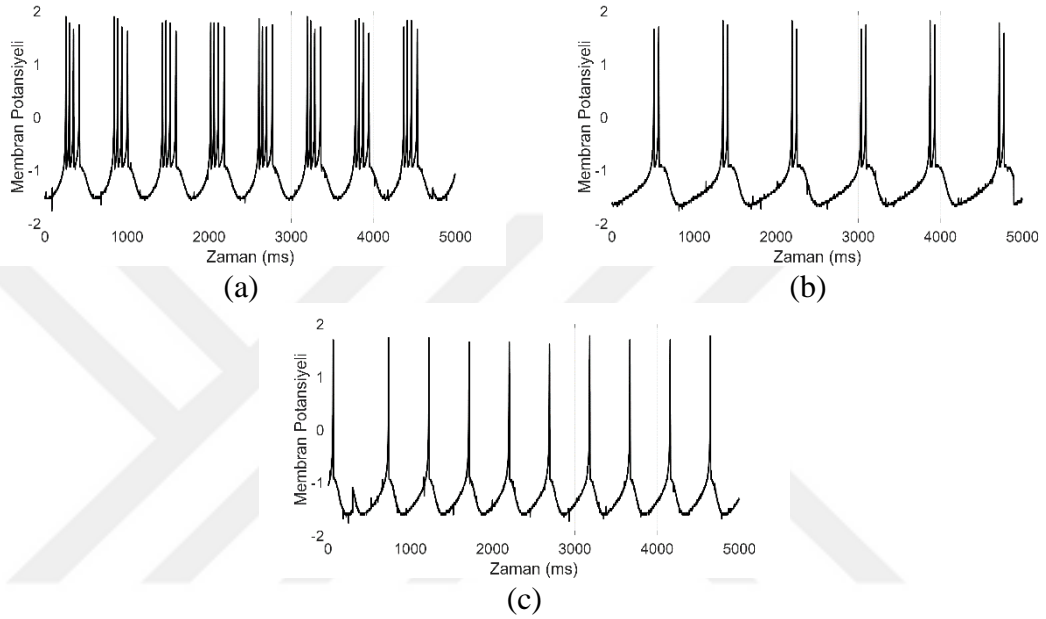


(b)

Şekil 4.16. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektiriksel kuplajlanan dört adet ML sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

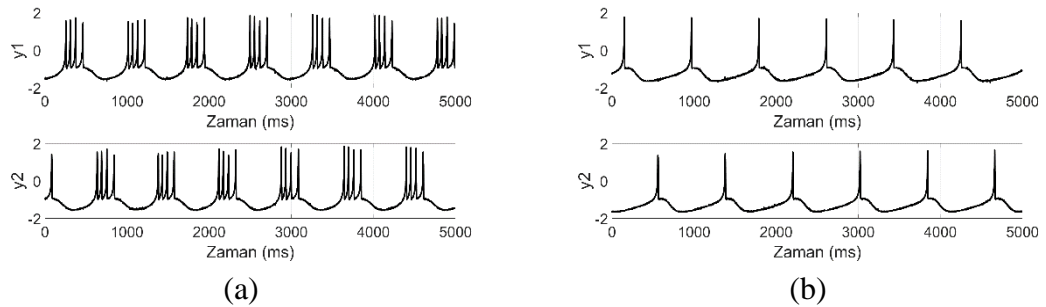
4.4. HR Sinir Hücresinin ve HR Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

Bir adet HR sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi için ikinci bölümde yer alan Denklem 2.17. kullanılmıştır. Gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.17 ile sunulmaktadır.



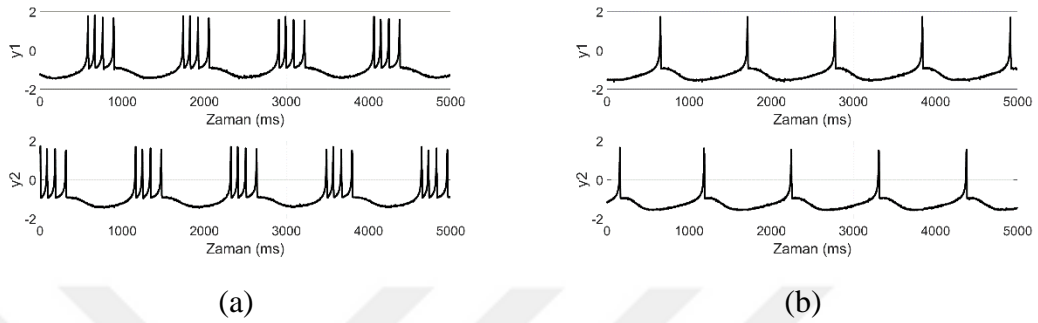
Şekil 4.17. HR sinir hücresi modelinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait a) 4 adet spike içeren patlamalı aksiyon potansiyeli b) 2 adet spike içeren patlamalı aksiyon potansiyeli c) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

İki adet HR sinir hücresi kullanılarak oluşturulan kimyasal kuplaj ve elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli desenlerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.18’ de sunulmuştur.



Şekil 4.18. Kimyasal kuplaj özelliğine sahip iki adet HR sinir hücresinden oluşan ağ yapısının a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

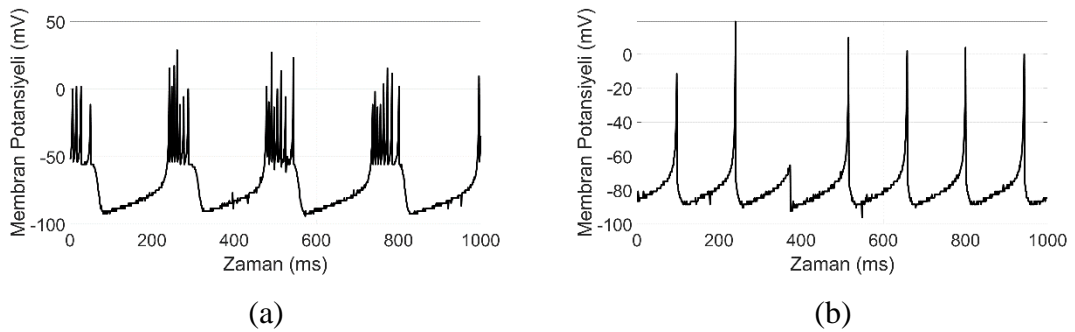
İki adet HR sinir hücresi kullanılarak oluşturulan elektriksel kuplaj ve elektriksel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli desenlerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.19’ da sunulmuştur.



Şekil 4.19. Elektriksel kuplaj özelliğine sahip iki adet HR sinir hücresinden oluşan ağ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

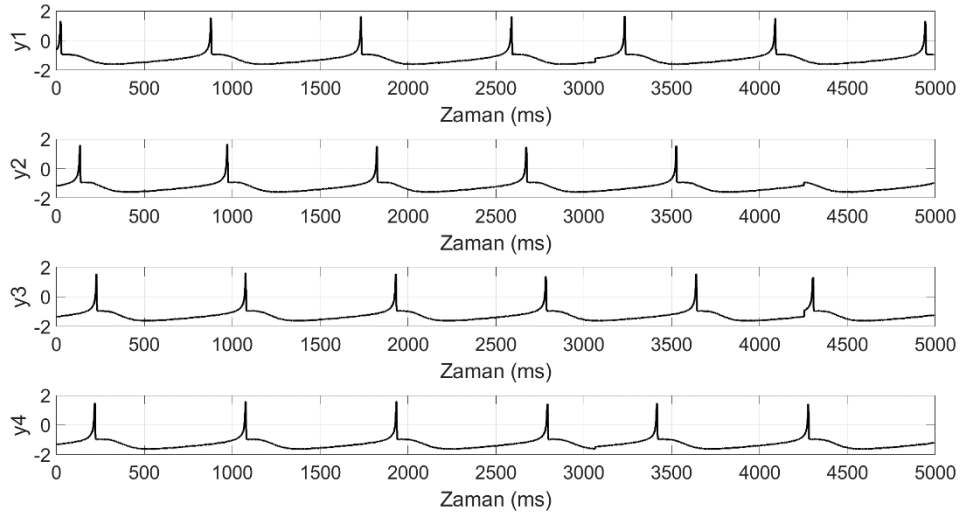
4.5. IZ Sinir Hücresinin ve IZ Sinir Hücreleri ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

Bir adet IZ sinir hücresinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi için ikinci bölümde yer alan Denklem 2.18. kullanılmıştır. Gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.20 ile sunulmaktadır.

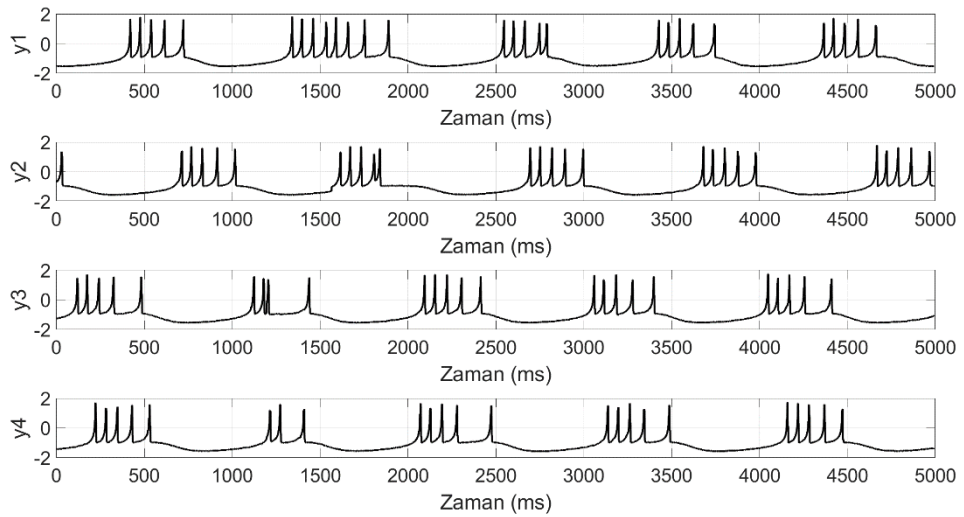


Şekil 4.20. IZ sinir hücresi modelinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait a) patlamalı aksiyon potansiyeli b) aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet HR sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.21' de sunulmaktadır.



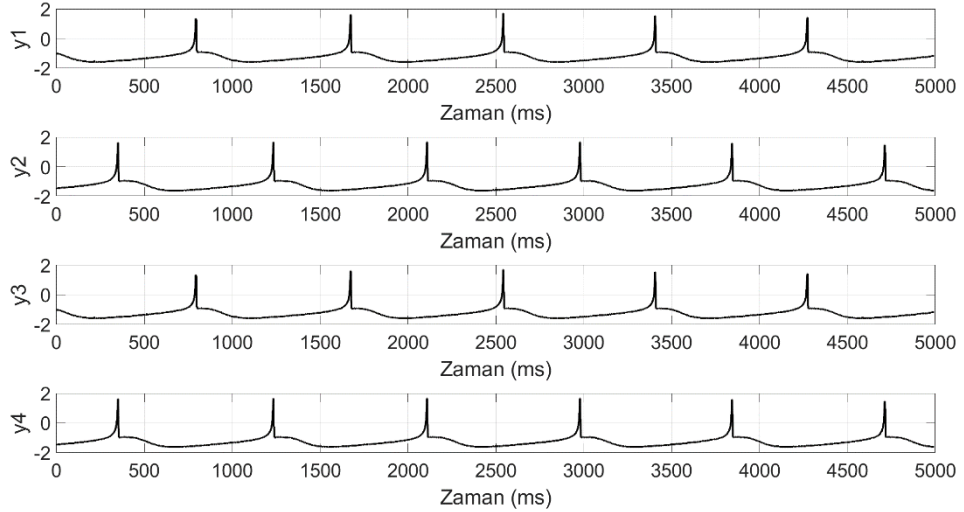
(a)



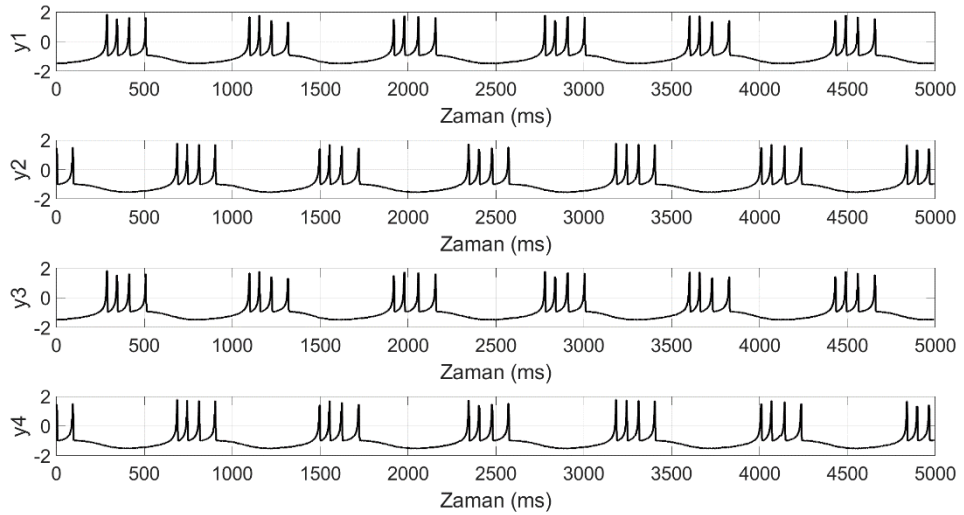
(b)

Şekil 4.21. Gallop yürüyüş deseni elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilme sine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet HR sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.22' d3 sunulmaktadır.



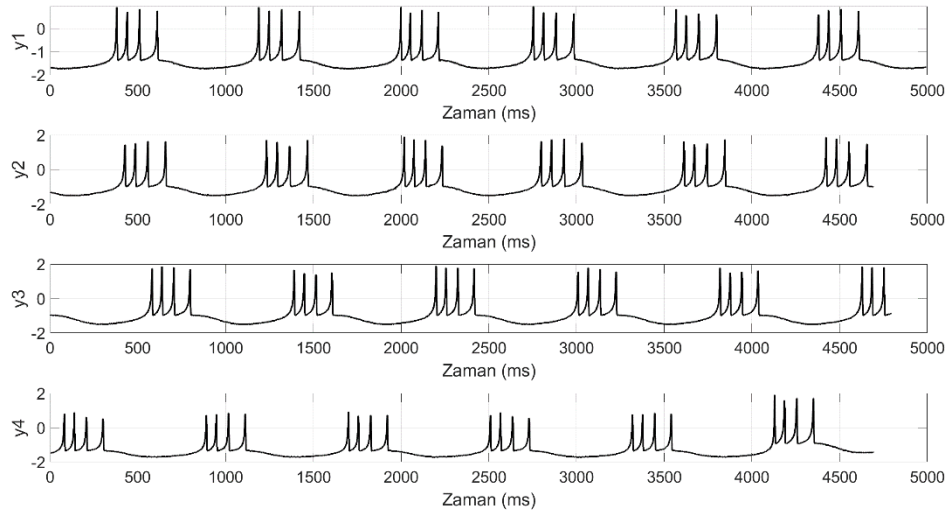
(a)



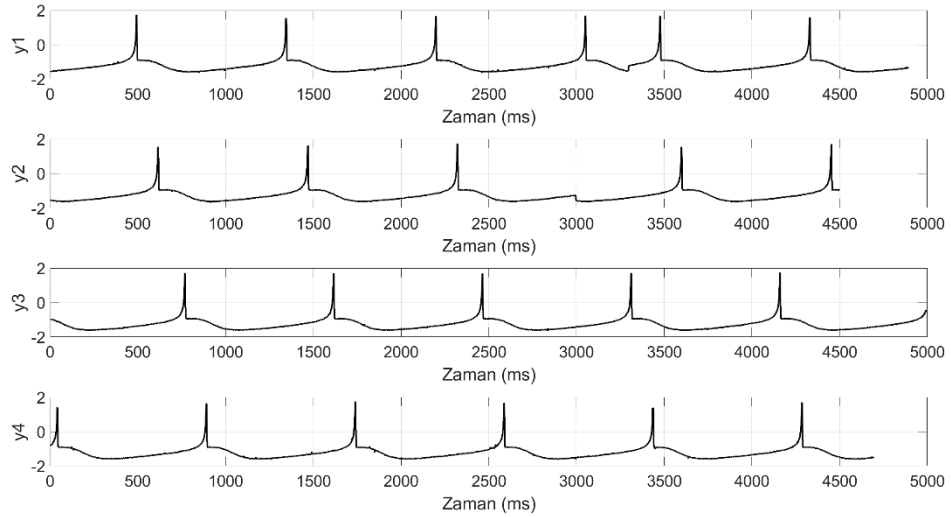
(b)

Şekil 4.22. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla kimyasal kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet HR sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.23' de sunulmaktadır.



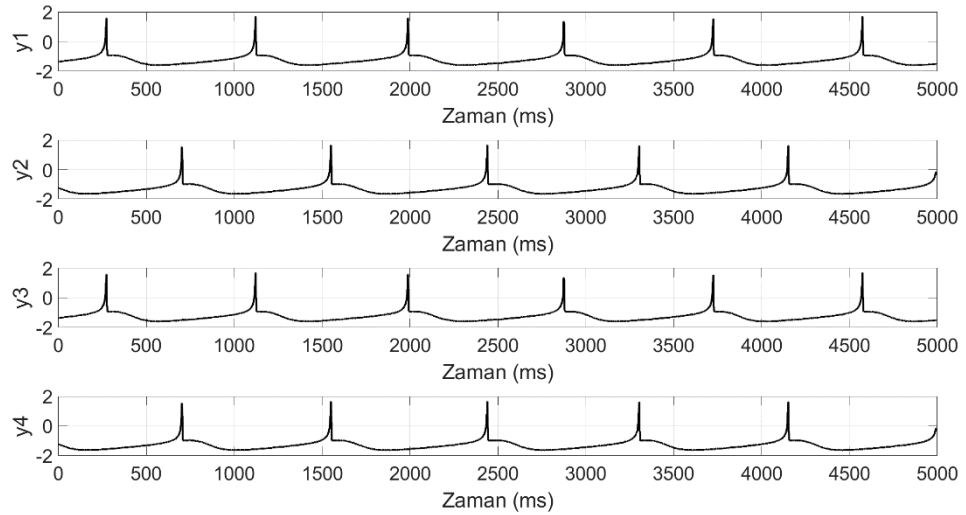
(a)



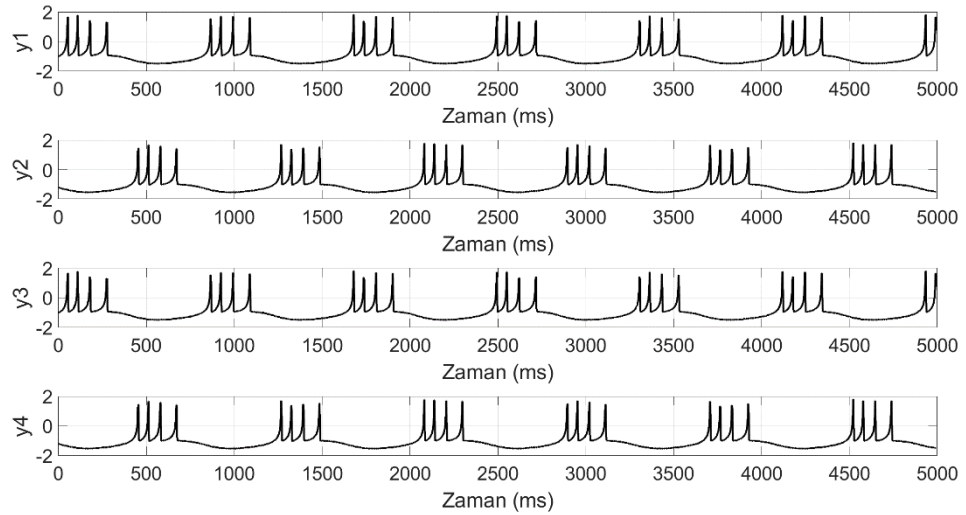
(b)

Şekil 4.23. Gallop yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

Dört adet HR sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.24' de sunulmaktadır.



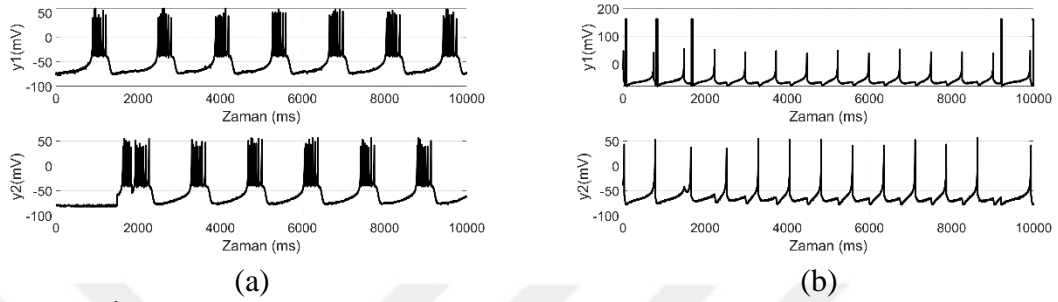
(a)



(b)

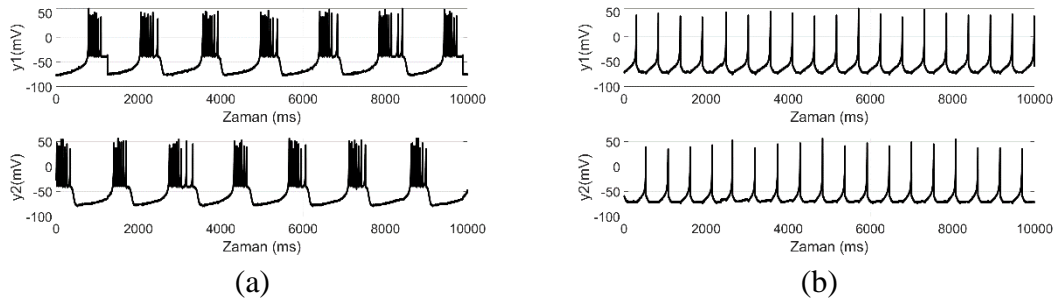
Şekil 4.24. Trot yürüyüş desenini elde etmek amacıyla elektriksel kuplajlanan dört adet HR sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirilmesine ait, a) aksiyon potansiyeli, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen şekilleri.

İki adet IZ sinir hücresi kullanılarak oluşturulan kimyasal kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli desenlerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.25’ de sunulmuştur.



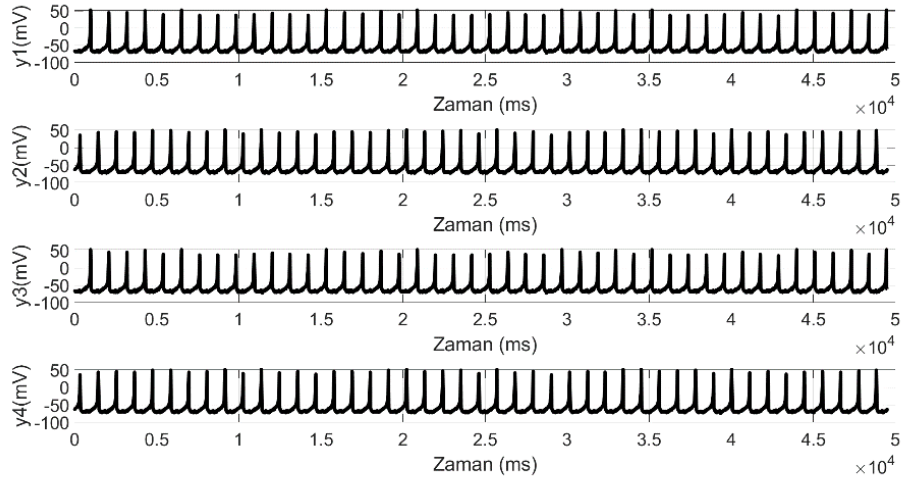
Şekil 4.25. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş, Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan kimyasal kuplaj özelliğine sahip modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları.

İki adet IZ sinir hücresi kullanılarak oluşturulan elektrikselsel kuplaj özelliği taşıyan ağ yapının aksiyon potansiyeli ve patlamalı aksiyon potansiyeli desenlerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.26’ da sunulmuştur.

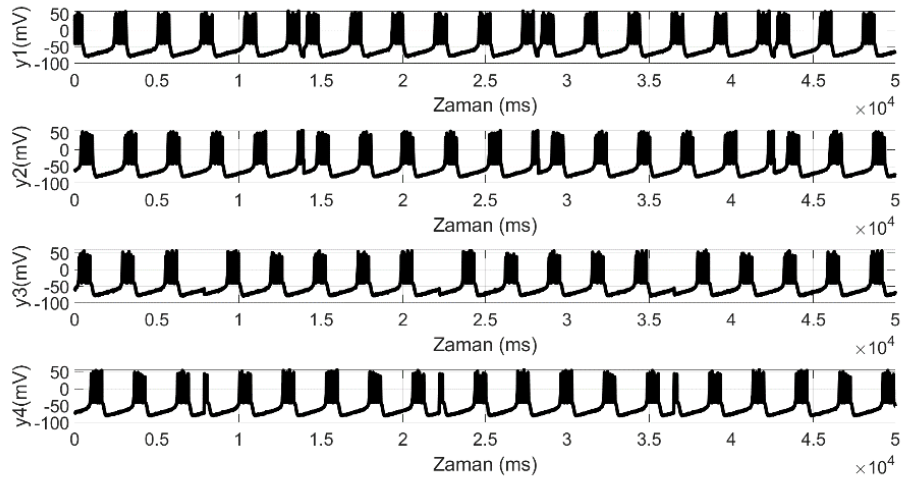


Şekil 4.26. İki adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş, Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan elektrikselsel kuplaj özelliğine sahip modelin a) patlamalı aksiyon potansiyeli, b) aksiyon potansiyeli desen sonuçları.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.27' de sunulmaktadır.



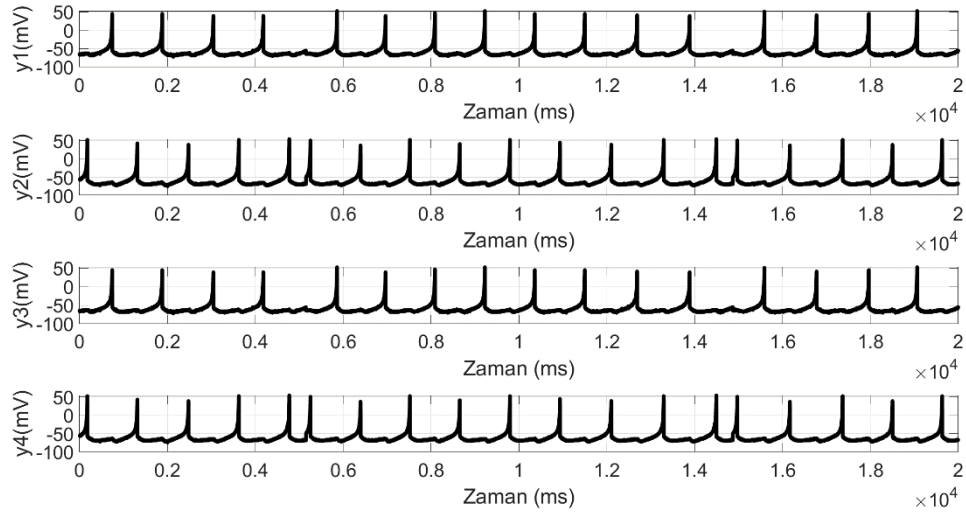
(a)



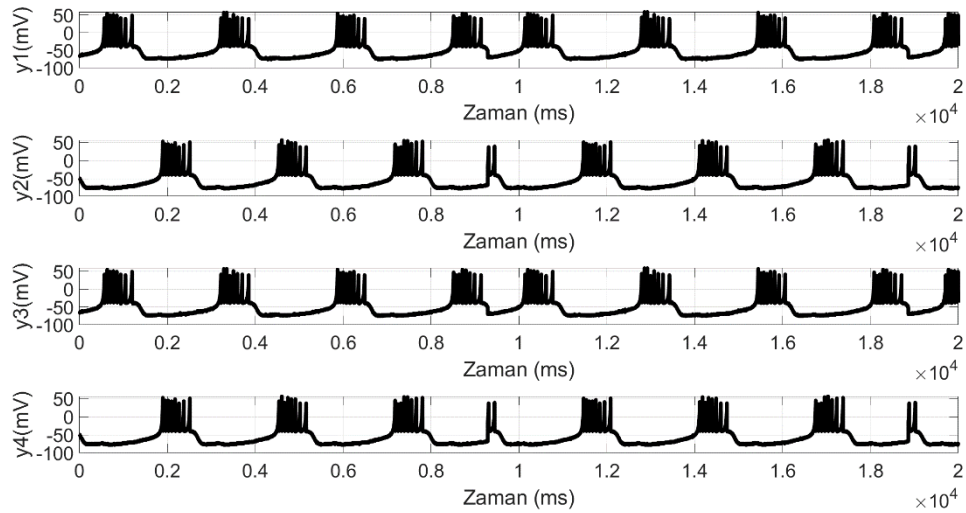
(b)

Şekil 4.27. Gallop yürüyüşü için dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda kimyasal kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.28' de sunulmaktadır.



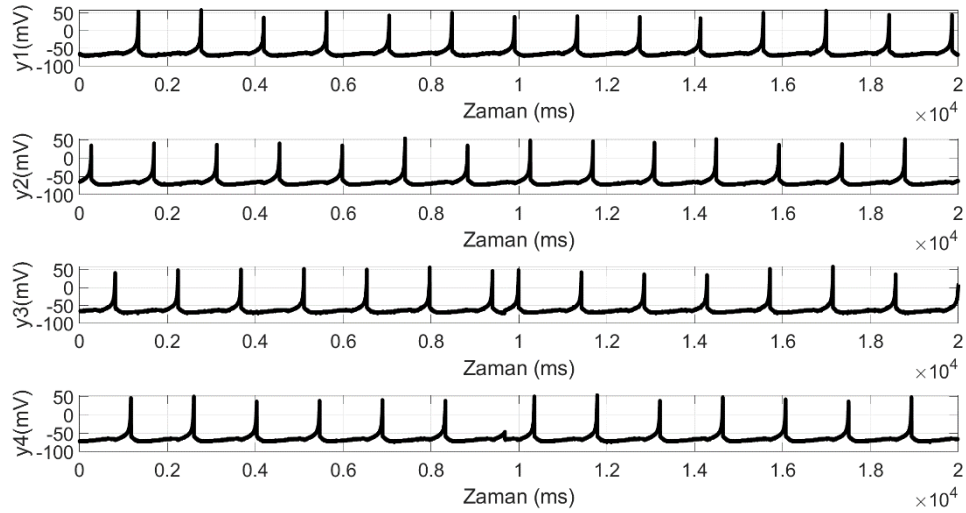
(a)



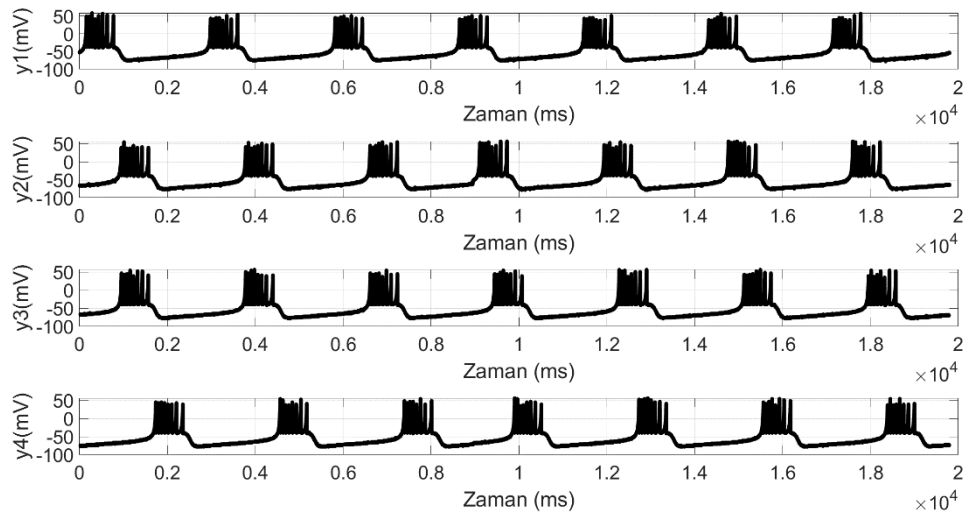
(b)

Şekil 4.28. Trot yürüyüşü için 4 adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş kimyasal kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektiriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin gallop yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.29' da sunulmaktadır.



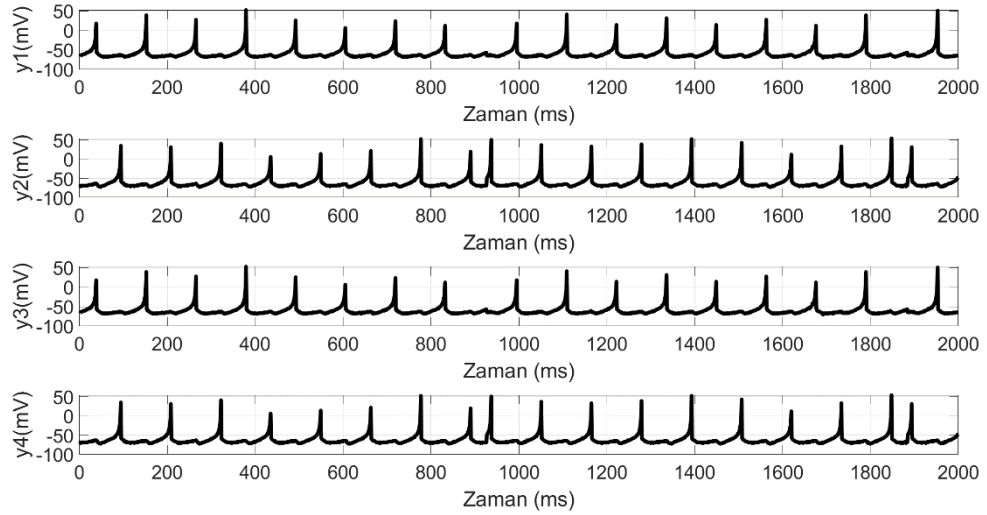
(a)



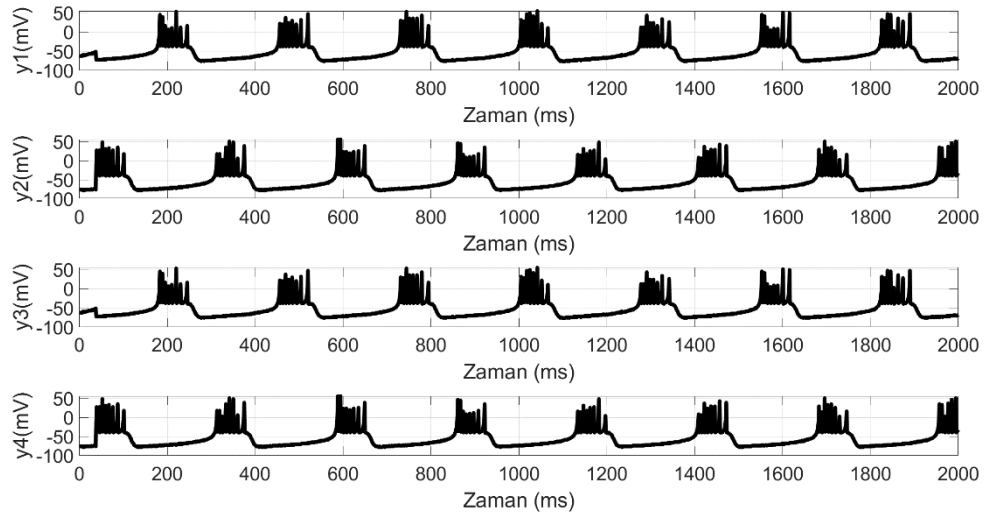
(b)

Şekil 4.29. Gallop yürüyüşü için dört adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektriksel kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu.

Dört adet IZ sinir hücresinin oluşturduğu ağ yapıda elektiriksel kuplaj özelliği taşıyan sistemin trot yürüyüş deseni için kuplaj yapısı ve her bir hücrenin patlamalı aksiyon potansiyeli ve aksiyon potansiyeli desenlerine ait Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.30' da sunulmaktadır.



(a)

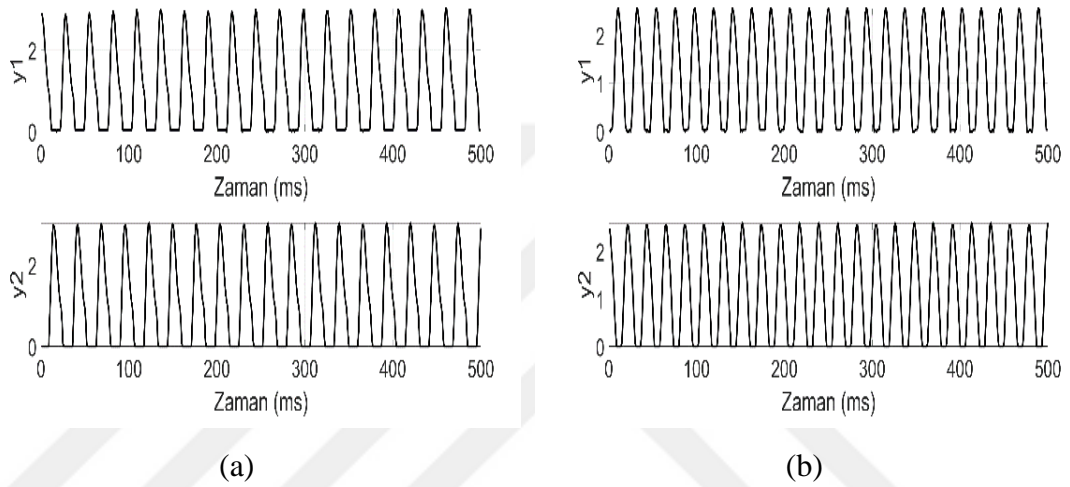


(b)

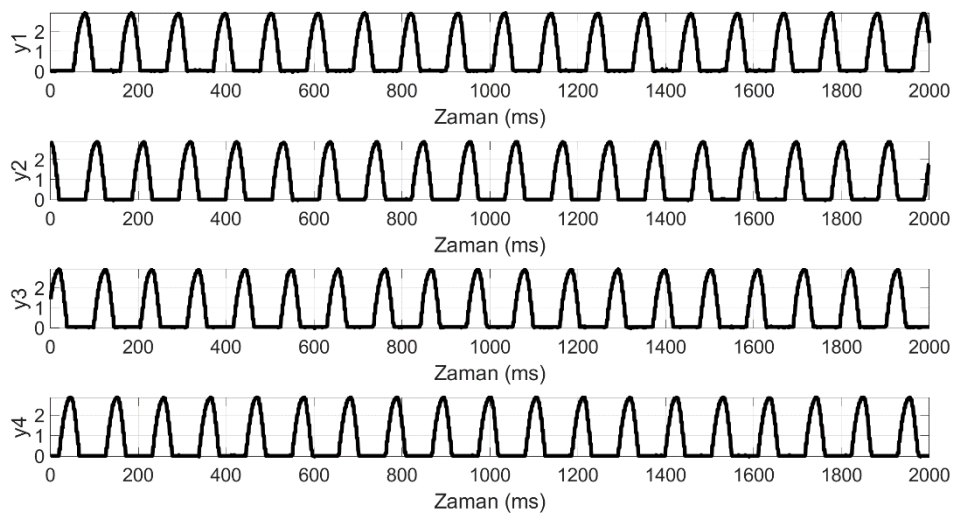
Şekil 4.30. Trot yürüyüşü için 4 adet IZ sinir hücresi ile oluşturulmuş elektiriksel kuplajlı ağ yapının Raspberry Pi üzerinde a) aksiyon potansiyeli desen oluşumu, b) patlamalı aksiyon potansiyeli desen oluşumu.

4.6. MOs Osilatör'ün ve MOs Osilatör ile Oluşturulan Ağ Yapılarının Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

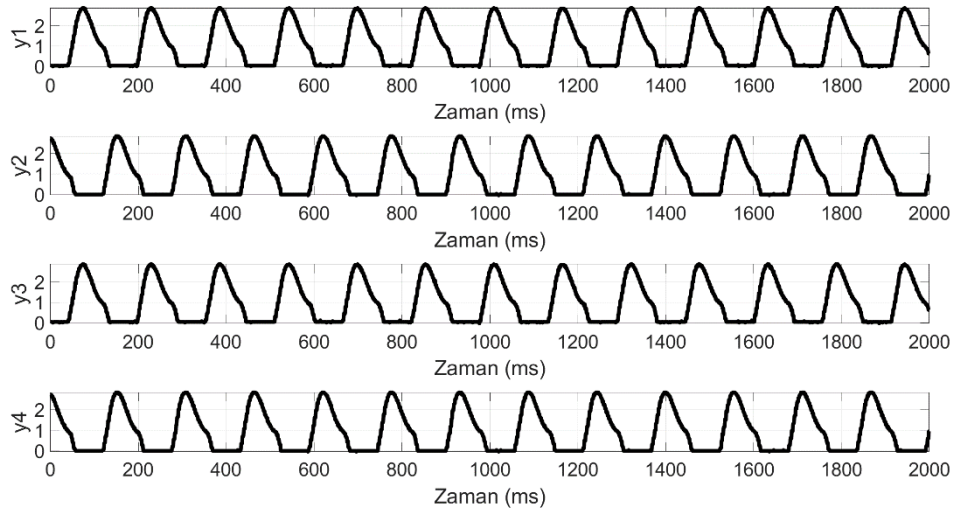
Matsuoka Osilatör için iki sinir hücreli ağ yapısı gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.31' de, gallop ve trot yürüyüş desenleri için ağ yapısı gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.32 ve Şekil 4.33' de sunulmaktadır.



Şekil 4.31. Matsuoka Osilatör' ün Denklem 2.21. kullanılarak $\tau_r = 6$, $\tau_a = 12$, $b = 5$, $s = 8$ parametreleri seçildiğinde a) $w_{ij} = 1.5$ b) $w_{ij} = 2.5$ için Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim osilatör desenleri.



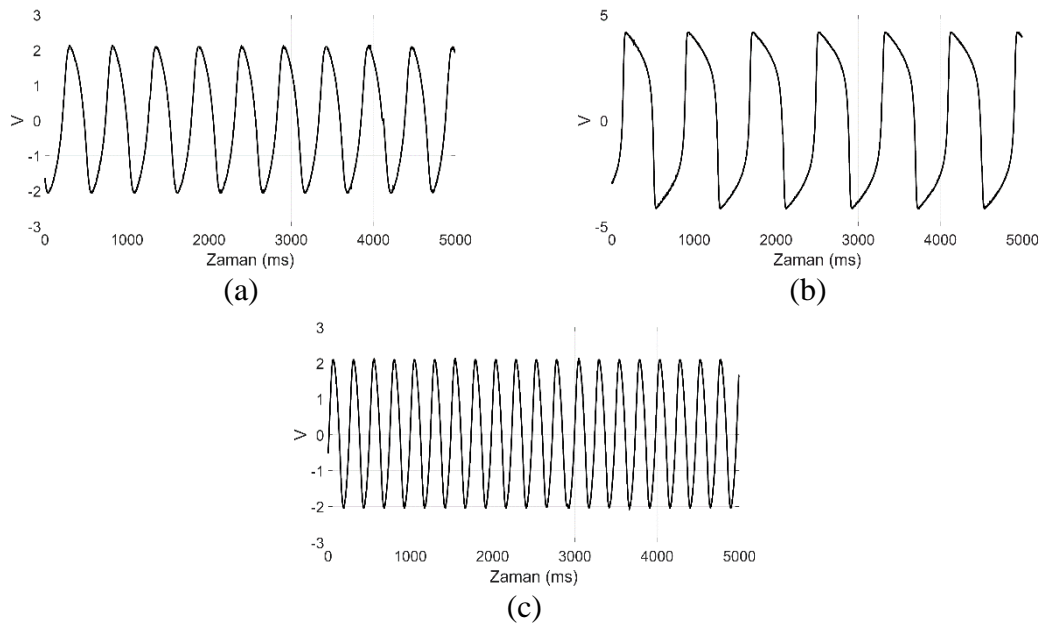
Şekil 4.32. Dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının $g_{ij} = 1.5$ için Gallop yürüyüş deseni için hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.



Şekil 4.33. Dört adet MOs sinir hücresi ile oluşturulan MDÜ yapısının $g_{ij} = 1.5$ için Trot yürüyüş deseni için hücre zar potansiyellerinin Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirim sonuçları.

4.7. BVP Osilatör' ün Raspberry Pi Üzerinde Gerçekleştirimi

Bir adet BVP osilatörün, Raspberry Pi üzerinde elde edilen donanımsal gerçekleştirimi için ikinci bölümde yer alan Denklem 2.20. kullanılmıştır. Gerçekleştirim sonuçları Şekil 4.34 ile sunulmaktadır.



Şekil 4.34. Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan BVP Osilatör' ün $\epsilon = 1$ parametresi seçildiğinde a) $p^2 = 1$ ve $g^2 = 1$, b) $p^2 = 2$ ve $g^2 = 1$, c) $p^2 = 1$ ve $g^2 = 2$ için osilatör deseni gerçekleştirim sonuçları.

5. BÖLÜM

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, literatüre girmiş ve yaygın olarak kullanılan sinir hücreleri ve bu sinir hücreleri ile oluşturulan ağ yapılarının matematiksel modelleri incelenmiş, benzetim programlarından yararlanılarak bu modellerin ürettiği zar potansiyelleri elde edilmiştir. Daha sonra standart bir yapıya sahip olan Raspberry Pi platformu üzerinde, bu modellerin donanımsal gerçekleştirmeleri yapılmış ve buradan elde edilen sonuçlar, benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar yapılırken literatürde mevcut olan FPAA, FPGA veya uygulamaya özel donanımlardan farklı olarak, Raspberry Pi mini bilgisayarın da bu alanda alternatif bir çözüm olabileceği gösterilmiştir.

Öncelikle Merkezi Desen Üreteçleri (MDÜ) hakkında literatür taraması yapılmış, yaygın olarak kullanılan sinir hücresi modelleri incelenmiştir. Hudgkin – Huxley (HH), Izhikevich (IZ), Morris – Lecar (ML), Hindmarsh – Rose (HR) sinir hücresi modelleri bu tez çalışmasında kullanılmak üzere belirlenmiştir. Bu modellerin elektro – fizyolojik özellikleri incelenmiş, bu modellere ait zar potansiyeli, aksiyon potansiyeli, elektriksel ve kimyasal kuplaj yapısı açıklanmıştır. Yukarıda bahsedilen modellere ait benzetimler, MATLAB ortamında yapılmıştır. Robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen ve Matsuoka osilatörü (MOs) ve Balthasar Van der Pol (BVP) osilatör modellerine ilişkin benzetimler yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Ardından HH, IZ, ML, HR sinir hücresi modellerinin kendi aralarında özel bağlar ile oluşturduğu ağ yapıları ve MOs osilatör modeli kullanılarak gerçekleştirilen senkronizasyon yöntemleri incelenmiştir. Sinir hücreleri arasında oluşan sinaptik bağların, örnek yürüyüş desenlerine göre nasıl değiştiği her bir model için ayrıca açıklanmıştır. Elektriksel ve kimyasal kuplaj özelliği taşıyan iki veya dört adet sinir

hücreli ağ yapıları, her bir model için ayrı ayrı tasarlanmış, modellerin parametre değerleri literatürde yer alan çalışmalar esas alınarak seçilmiş ve benzetimleri yapılmıştır.

Matematiksel modelleri incelenen ve MATLAB ortamında benzetimleri gerçekleştirilen sinir hücresi modelleri ve sinir hücreleri ile oluşturulan ağ yapılarının Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi tamamlanmıştır. Donanımsal gerçekleştirmelere ait sonuçlar incelendiğinde, tek bir sinir hücresi modelinin gerçekleştiriminde, iki veya dört adet sinir hücresi ile oluşturulan ağ yapılarının gerçekleştiriminde, Raspberry Pi' nin karmaşık matematiksel denklemlerin çözümünde ve gerçek zamanlı sonuçların üretilmesi aşamasında göz ardı edilemeyecek bir başarısının varlığı söz konusudur.

MATLAB ortamında benzetimi ve Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi yapılan sinir hücresi modellerinin ve ağ yapılarının zar potansiyeli desen şekillerinin birbiri ile uyduğu fakat zaman ekseninin uyuşmadığı görülmektedir. Buna neden olarak Raspberry Pi' nin sürekli zamanda analog bir çıkış üretmediği, ayrık zamandaki sayısal çıkışlarının Sayısal - Analog dönüştürücü (Digital Analog Converter, DAC) kullanılarak analog sinyale dönüştürülmesi düşünülmektedir. Diğer bir deyişle zaman ekseninde ortaya çıkan bu uyuşmazlığın, kullanılan dönüştürücünün örnekleme zamanına bağlı olduğu, Raspberry Pi' nin ürettiği sonuçları DAC elemanının gerek ve yeter bir hızda dönüştüremediği düşünülmektedir.

Sonuç olarak standart bir donanıma sahip, yeniden programlanması oldukça kolay, maliyeti düşük, açık kaynak kodlu, genel amaçlı giriş çıkış arabirimlerine sahip Raspberry Pi mini bilgisayarın, karmaşık matematiksel fonksiyonları çözebildiği, MDÜ ağ yapılarının gerçekleştirimini sağlayabildiği ortaya konmuştur. Sinir hücresi modellerinin donanım tabanlı çözümünde, FPGA, FPAA veya uygulamaya özel donanımların kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çözüm önerilerinden bazılarının, modellerin ayrık zamanlı veya sürekli zamanlı tanımlanmasına bağlı olarak, ağ yapılarının ve sinir hücresi modellerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirimini sağlayamadığı örnekler de mevcuttur. Bu bağlamda Raspberry Pi' nin bu tez çalışmasında incelenen tüm modellerin gerçekleştirimini sağladığı da ifade edilmelidir. Gelecekte Raspberry Pi mini bilgisayarların kullanıldığı geniş kapsamlı MDÜ ağ yapılarının gerçekleştirimi, sinir hücreleri arasındaki sinaptik bağların optimizasyon problemlerinin çözülmesiyle daha gerçekçi hareketlerin robot tarafından yapılması söz konusu olabilir.

KAYNAKÇA

1. McCulloch, W.S., Pits, W.H. 1943. A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. **The Bulletin of Mathematical Biophysics**, **5** (4): 115-133.
2. Fitzhugh, R., 1961. Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane. **Biophysical Journal**, **1** (6): 445-466.
3. Hindmarsh, J.L., Rose, R.M. 1984. A Model of Neural Bursting Using Three Coupled First Order Differential Equations. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, **221** (1222): 87-102
4. Naiki, K., Shimada, Y., Fujiwara, K., Ikeguchi, T., 2016. Synchronization in a Coupled Izhikevich Neuron Model, pp: 257-260. *2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, November 27-30, Yugawara, Japan.
5. Çakır, Y., 2017. Modelling Time Delay-Induced Multiple Synchronization Behavior of Interneuronal Networks with the Izhikevich Neuron Model. **Turkish journal of electrical engineering computer sciences**, **25** (4): 2595-2605.
6. Khoshkhou, M., Montakhab, A., 2018. Beta-Rhythm Oscillations and Synchronization Transition in Network Models of Izhikevich Neurons: Effect of Topology and Synaptic Type. **Frontiers in Computational Neuroscience**, **12** (59): 1-10.
7. Dahasert, N., Öztürk, İ., Kiliç, R., 2012. Izhikevich Nöron Modelinin Alan Programlanabilir Elemanlarla Gerçekleştirimi, pp: 1-4. *SIU 2012 : 20th Signal Processing and Communications Applications Conference*. 18-20 Nisan, 2018, Muğla, Türkiye. The Institute of Electrical and Electronics Engineers
8. Ijspeert, 2008. Central Pattern Generators for Locomotion Control in Animals and Robots: A Review. **Preprint of Neural Networks**, **21** (4): 642-653.
9. Ijspeert, J., Crespi, A., Ryczko, D., Cabelguen, J., 2007. From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model. **Science**, **315** (5817): 1416-1420.
10. Chowdhury, A.R., Panda, S.K., 2015. Finding Answers To Biological Control Methods Using Modulated Patterns: An Application To Bio-Inspired Robotic Fish, pp: 3146-3153. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 26-30 May, 2015, Seattle, WA, USA. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

11. Klaassen, B., Linnemann, R., Spenneberg, D., Kirchner, F., 2002. Biomimetic Walking Robot SCORPION: Control And Modeling, **Robotics and Autonomous Systems**, **41** (2-3): 69-76.
12. Espinal, A., Rostro-Gonzalez, H., Carpio, M., Guerra-Hernandez, H.I., Ornelas-Rodriguez, M., Puga-Soberanes, H.J., Sotelo-Figueroa, M.A., Melin, P., 2016. Quadrupedal Robot Locomotion: A Biologically Inspired Approach and Its Hardware Implementation, **Computational Intelligence and Neuroscience**, **2016**: 1-13
13. Zambrano, J.H., Huitzil, C., Girau, B., 2012. Configurable Embedded CPG-based Control for Robot Locomotion. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, **9** (3): 1-8.
14. Zhifeng, C., Haojun, Z., Xiuli, Z., Liyao, Z., 2003. The CPG-Based Bionic Quadruped System, pp: 1828-1833. *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483)*. 8 October, 2003, Washington, DC, USA. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
15. Ijspeert, A.J., 2001. A Connectionist Central Pattern Generator For The Aquatic And Terrestrial Gaits Of A Simulated Salamander, **Biological Cybernetics**, **84** (5): 331-348.
16. Inada, H., Ishii, K., 2004. Bipedal walk using a Central Pattern Generator, **International Congress Series**, **1269**: 185-188.
17. Rashid, E., 2018. Raspberry Pi ile Gerçek Zamanlı Yüz Tanıma ve Kontrol Sistemi. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 74.
18. Ferdoush, S., Li, X., 2014. Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications, **Procedia Computer Science**, **34** (1): 103 – 110.
19. Perumal V.S.A., Baskaran, K., Rai, S.K., 2017. Implementation Of Effective And Low-Cost Building Monitoring System(Bms) Using Raspberry Pi, **Energy Procedia**, **143** (1): 179 – 185.
20. Jain, S., Vaibhav, A., Goyal, L., 2014. Raspberry Pi based interactive home automation system through E-mail, pp: 277 – 280. *2014 International Conference on Reliability Optimization and Information Technology (ICROIT)*. 6 February, 2014, Faridabad, India. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

- 21.. Wikipedia, 2019. Sinir Sistemi Özellikleri ve Yapıları, ([https://tr.wikipedia.org/wiki/Merkez%C3%AE sinir sistemi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Merkez%C3%AE_sinir_sistemi)), Erişim tarihi: Mart 2019.
22. Delcomyn, F., 1980. Neural Basis For Rhythmic Behaviors in Animals. **Science**, **210**: 492 - 498
23. Evrimağacı, 2014, Sinir Hücreleri, (<https://evrimagaci.org/sinirbilim-ve-beyin-2-sinir-sisteminde-bulunan-hucrelerin-tipleri-311>), Erişim tarihi: Mart 2019.
24. Yazgan, E., Koryürek, M., 1996. Tıp Elektronikği, İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü, Yayın No: 1574, İstanbul, 386 s.
25. Kandel, E.R., Schwartz, J.H., Jessell, T.M., Siegelbaum, S.A., Hudspeth, A.J., 2013. Principles of Neural Science. 5th ed. McGraw-Hill, New York. ISBN 978-0-07-181001-2, 1761s.
26. Wikipedia, 2019. Akson Ucu, https://tr.wikipedia.org/wiki/Akson_ucu, (Erişim tarihi: Ocak 2019).
27. Hodgkin, H., Huxley, A., 1952. A Quantitative Description of Membrane Current and its Application to Conduction and Excitation in Nerve. **The Journal of Physiology**, **117** (4): 500-544.
28. Izhikevich, E.M., 2007. Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, London, 505 s.
29. Dayan, P., Abbott, L.F., 2001. Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems, The MIT Press, London, 468 s.
30. Fitzhugh, R., 1960. Thresholds and Plateaus in the Hodgkin – Huxley Nerve Equations. **The Journal of General Physiology**, **43**: 867-896.
31. Nagumo, J., Shimura, M., 1961. Self-Oscillation in a Transmission Line with a Tunnel Diode. **Proceedings of the IRE**, **49** (8): 1281-1291.
32. Nagumo, J., Arimoto, S., Yoshizawa, S., 1962. An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon. **Proceedings of the IRE**, **50** (10): 2061-2070.
33. Keener, J., Sneyd, J., 1998. Mathematical Physiology. Springer, Verlag, 133pp
34. Xu, B., Binczak, S., Jacquir, S., Pont, O., Yahia, H., 2014. Parameters Analysis of FitzHugh – Nagumo Model for a Reliable Simulation. pp. 1-12. *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*

- Society* 26-30 Aug. 2014, Chicago, USA. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
35. FitzHugh, R., 1969. Mathematical Models for Excitation and Propagation in Nerve. **Biological Engineering**, **1** (1): 1-85
 36. Nagumo, J., Sat, S., 1972. On a Response Characteristics of Mathematical Neuron Model. **Kybernetik**, **10** (3): 155-164
 37. Morris, C., Lecar, H., 1981. Voltage Oscillations in the Barnacle giant Muscle Fiber. **Biophysical Journal**, **35** (1): 193-213.
 38. Wang, G., Jin, W., Hu, C., 2013. The Complete Synchronization Of Morris–Lecar Neurons Influenced By Noise, **Nonlinear Dynamics**, **73** (3): 1715-1719.
 39. Duan, L., Zhai, D., Tang, X., Lu, Q., 2010. Bursting and Mode Transitions in Coupled Nonidentical Modified Morris-Lecar Neurons, pp: 293-296. *2010 International Workshop on Chaos-Fractal Theories and Applications*, 29-31 October, 2010, Kunming, Yunnan, China. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
 40. Shi, M., Wang, Z., 2014. Abundant Bursting Patterns Of A Fractional-Order Morris–Lecar Neuron Model, **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, **19** (6): 1956-1969.
 41. Hindmarsh, J.L. and Rose, R.M. (1982) A model of the nerve impulse using two first-order differential equation. **Nature**, **296**, 162-165.
 42. Izhikevich, E.M. 2003. A Simple Model of Spiking Neurons. **IEEE Transactions on Neural Networks**, **14** (6): 1569-1572.
 43. Izhikevich, E.M. 2004. Which Models to Use for Cortical Spiking Neurons?. **IEEE Transactions on Neural Networks**, **15** (5): 1063-1070.
 44. Van Der Pol, B., 1920. A Theory Of The Amplitude Of Free And Forced Triode Vibrations, **Radio Review**, **1** : 701-710, 754-762.
 45. Van Der Pol, B., 1926. On “relaxation-oscillations”, **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, **7** (2): 978-992.
 46. Van der Pol, B., Van der Mark, J., 1928. The Heartbeat Considered As A Relaxation Oscillation And An Electrical Model Of The Heartbeat. **Philosophical Magazine Series**, **6** (7): 763-775.

47. Jasni, F., Shafie, A.A., 2012. Van Der Pol Central Pattern Generator (VDP-CPG) Model for Quadruped Robot, pp: 167-175. *Download book PDF International Conference on Intelligent Robotics, Automation, and Manufacturing*, 28-30 November, 2012, Kuala Lumpur, Malaysia. Springer.
48. Veskos, P., Demiris, Y., 2006. Experimental Comparison of the Van Der Pol and Rayleigh Nonlinear Oscillators for a Robotics Swinging Task, pp: 197 – 202. *Proceedings of the AISB 2006 Conference, Adaptation in Artificial and Biological Systems*. January, 2006, United Kingdom.
49. Cristiano, J., Puig, D., Garci, M.A., 2017. Generation and Control of Locomotion Patterns for Biped Robots by Using Central Pattern Generators. **The Journal of Physiology Agents**, **8** (1): 40-47
50. Matsuoka, K., 1985. Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation. **Biological Cybernetics**, **52** (6): 367-376.
51. Huang, W., Chew, C.M., Hong, G.S., 2008. Coordination in CPG and its Application on Bipedal Walking, pp: 450-455. *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. 21-24 September, 2008, Chengdu, China. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
52. Wang, M., Yu, J., Tan, M., Zhang, G., 2011. A CPG-Based Sensory Feedback Control Method For Robotic Fish Locomotion, pp: 4115-4120. *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*. 22-24 July, 2011, Yantai, China. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
53. Cristiano, J., Garcia, M.A., Puig, D., 2015. Deterministic Phase Resetting With Predefined Response Time For CPG Networks Based On Matsuoka's Oscillator, **Robotics and Autonomous Systems**, **74** (A): 88-96.
54. Matsuoka, K., 1987. Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators. **Biological Cybernetics**, **56** (5-6): 345-353.
55. Liu, G.L., Habib, M.K., Watanabe, K., Izumi, K., 2008. Central Pattern Generators Based on Matsuoka Oscillator for the Locomotion of Biped Robots. **Artif Life Robotics**, **12**: 264-269
56. Dahasert, N., Öztürk, İ., Kılıç, R., 2012. Experimental Realizations of the HR Neuron Model with Programmable Hardware and Synchronization Applications. **Nonlinear Dynamics**, **70** (4): 2343-2358.

57. Dahasert, N., Öztürk, İ., Kılıç, R., 2016. The Investigation of Chemical Coupling in a HR Neuron Model with Reconfigurable Implementations. *Nonlinear Dynamics*, 86 (3): 1841-1854
58. Pinto, R.D., Varona, P., Volkovskii, A.R., Szücs, A., Abarbanel, H.D.I., Rabinovich, M.I., 2000. Synchronous Behavior Of Two Coupled Electronic Neurons. **Physical Review E**, 62 (2), 2644–2656.
59. Jia, J., Liu, H., Xu, C., Yan, F., 2015. Dynamics effects of time delay on a coupled FitzHugh-Nagumo neural system. **Alexandria Engineering Journal**, 54 (2): 241-250.
60. Dhanya, E., Pradhan, N., Sunitha, R., Sreedevi, A., 2015. Modelling And Implementation Of Two Coupled Hodgkin-Huxley Neuron Model, pp: 66-71. *2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet)*. 16-19 December, 2015, Trivandrum, India. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
61. Han, F., Wang, Z., Du, Y., Sun, X., Zhang, B., 2015. Robust Synchronization of Bursting Hodgkin – Huxley Neuronal Systems Coupled by Delayed Chemical Synapses. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 70: 105 – 111.
62. Shi, Y., Wang, J., Deng, B., Liu, Q., 2009. Chaotic Synchronization of Coupled Hindmarsh – Rose Neurons Using Adaptive Control, pp: 1-5 *2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, October 17-19, 2009, Tianjin, China. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
63. Zhou, F.J., Juang, J., Liang, Y.H., 2012. Multistate and Multistage Synchronization of Hindmarsh – Rose Neurons with Excitatory Chemical and Electrical Synapses. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, 59(6): 1335 – 1346.
64. Checco, P., Righero, M., Kocerev, L., 2006: Information processing in networks of coupled Hindmarsh – Rose neurons, pp. 671 – 674. *NOLTA 2006. In .International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications. Bologna – Italy*.
65. Korkmaz, N., Öztürk, İ., Kalınlı, A., Kılıç, R., 2017. Hardware Verification: Determining The Parameters Of The Modified Izhikevich Neuron Model With Genetic Algorithm, pp: 588-592. *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. 30 November-2 December, 2017, Bursa, Turkey.

66. Perc, M., 2009. Optimal Spatial Synchronization On Scale-Free Networks Via Noisy Chemical Synapses, **Biophysical Chemistry**, **141** (): 175-179.
67. Binczak, S., Behdad, R., Nekorkin, V.I., Dmitrichev, A.S., Rosse, M., Bilbaut, J.M., 2015. Electrical Coupled Morris-Lecar Neurons: From Design To Pattern Analysis, pp: 1-4. *International Conference Of Numerical Analysis And Applied Mathematics 2015 (Icnaam 2015)*, 23-29 September, 2015, Athens, Greece.
68. Uçar, A., Lonngren, K.E., Bai, E.W., 2004. Synchronization Of The Coupled Fitzhugh–Nagumo Systems. **Chaos, Solitons & Fractals**, **20** (5): 1085-1090.
69. Hoff, A., Santos, J.V., Manchein, C., Albuquerque, H.A., 2015. Numerical Bifurcation Analysis Of Two Coupled Fitzhugh-Nagumo Oscillators, **The European Physical Journal B**, **87** (151): 1-9.
70. Campbell, S., Wang, D., 1996. Synchronization and Desynchronization in a Network of Locally Coupled Wilson – Cowan Oscillators. **IEEE Transactions on Neural Networks**, **7** (3): 541 – 554.
71. Ueta, T., Chen, G., 2003. On Synchronization And Control Of Coupled Wilson–Cowan Neural Oscillators. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, **13** (1): 163 – 175.
72. Wilson, H.R., Cowan, J.D., 1972. Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons. *Biophysical Journal*, **12** (1): 1-24.
73. Ambrosio, B., Alaoui, M.A., Balti, A., 2017. Propagation of Bursting Oscillations in Coupled Non-homogeneous Hodgkin–Huxley Reaction–Diffusion Systems, **Differential Equations and Dynamical Systems**, **125**: 1-15.
74. Wang, G., Jin, W., Hu, C., 2013. The Complete Synchronization Of Morris–Lecar Neurons Influenced By Noise, **Nonlinear Dynamics**, **73** (3): 1715-1719.
75. Fink, C.G., Booth, V., Zochowski, M., 2011. Cellularly-Driven Differences in Network Synchronization Propensity are Differentially Modulated by Firing Frequency. **PLOS Computational Biology**, **7**(5): 1 – 15.
76. Liu C., Liu X., Liu S., 2014. Bifurcation Analysis Of A Morris-Lecar Neuron Model. **Biological Cybernetics**, **108** (1): 75-84.
77. Lafranceschina, J., Wackerbauer, R., 2015. Impact of Weak Excitatory Synapses on Chaotic Transients in a Diffusively coupled Morris – Lecar Neuron Network. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science** **25** (1): 013119(1-12)

78. Jhou, F.J., Juang, J., Liang, Y.H., 2012. Multistate and Multistage Synchronization of Hindmarsh – Rose Neurons with Excitatory Chemical and Electrical Synapses. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, **59(6)**: 1335 – 1346.
79. Merlat, L., Silvestre, N., Merckle, J., 1996. A Hindmarsh And Rose-Based Electronic Burster, pp. 39-44. *Proceedings of Fifth International Conference on Microelectronics for Neural Networks*, 12-14 February, Lausanne, Switzerland. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
80. Gotthans, T., Petrzela, J., Hrubos, Z., 2011. Analysis Of Hindmarsh–Rose Neuron Model And Novel Circuitry Realization. pp. 576–580. *Proceedings of the 18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, 16-18 June, 2011, Gliwice, Poland. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
81. Hrg, D., 2013. Synchronization Of Two Hindmarsh–Rose Neurons With Unidirectional Coupling. **Neural Network** **40**: 73–79.
82. Günay, E., Kılıç, R., Dahasert, N., Öztürk, İ., 2012. Merkezi Desen Üreteçleri İçin Donanımsal Çözümler. pp. 332-335. *2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 29 Kasım- 01 Aralık, 2012, Bursa, Türkiye.
83. Kim, S.Y., Limi W., 2013. Coupling-Induced Population Synchronization in An Excitatory Population Of Subthreshold Izhikevich Neurons. **Cognitive Neurodynamics**, **7(6)**: 495 – 503

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Vedat Burak YÜCEDAĞ

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 29 Mart 1992, Konya

Medeni Durumu: Evli

Tel: +90 352 207 66 66

email: vedatburakyucedag@erciyes.edu.tr

Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039 Talas/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	2014
Lise	Süleyman Demirel Milli Piyango Karatay Anadolu Lisesi, Konya	2010

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2016 - Halen	ERÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Yücedağ V.B. ve Dalkıran İ. "Örnek Bir Merkezi Desen Üreticinin Raspberry Pi ile Gerçekleştirilmesi" International Symposium on Industry 4.0 and Applications, Karabük, Türkiye, ss 227-330, (12-14 Ekim 2017)
2. Yücedağ V.B., Dalkıran İ., "Morris-Lecar Sinir Hücresi Modelinin Çeşitli Uyarıcı Akımlarının Uygulanması Sonucunda Zar Potansiyelindeki Değişimin İncelenmesi", Umteb III.Uluslararası Mesleki Ve Teknik Bilimler Kongresi, Gaziantep, Türkiye, ss.823-823, (21-22 Haziran 2018)
3. Yücedağ V.B., Dalkıran I., "Izhikevich Sinir Hücresi Modelinin Raspberry Pi Kullanılarak Gerçekleştirilmesi ", 2. International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, SAMSUN, TÜRKİYE, vol.3, ss.1239-1241 (30 Kasım - 2 Aralık 2018)