

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI BAĞLANTI MODELLERİ İÇİN HALKA BAĞLI SİNİR AĞLARININ
SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Huriye Nur DEĞİRMENCİOĞLU

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI BAĞLANTI MODELLERİ İÇİN HALKA BAĞLI SİNİR AĞLARININ
SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Huriye Nur DEĞİRMENCİOĞLU
(504091245)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Haziran 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091245 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Huriye Nur DEĞİRMENCİOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“FARKLI BAĞLANTI MODELLERİ İÇİN HALKA BAĞLI SİNİR AĞLARININ SAYISAL İNCELENMESİ ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İ. Serdar ÖZOĞUZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Osman Kaan EROL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Özkan KARABACAK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **07 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **08 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezi almamda ve hazırlamamda yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Serdar ÖZOĞUZ'a, her türlü desteği sunan ve sorularımı bıkmadan cevaplayan değerli hocam Arş. Gör. Ahmet Şamil DEMİRKOL'a, tez içerisindeki desenlerle ilgili görüşlerini veren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Özkan KARABACAK'a, desteklerini ve cesaretlendirici davranışlarını esirgemeyen annem Zeliha DEĞİRMENCİOĞLU, babam Emin DEĞİRMENCİOĞLU, ablam Şerife DEĞİRMENCİOĞLU ve ev arkadaşım Selin KAYA'ya teşekkür ederim.

Mayıs 2012

Huriye Nur DEĞİRMENCİOĞLU
(Elektronik ve Haberleşme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	23
1.1 Tezin Amacı	24
1.2 Hipotez	25
2. VAN DER POL OSİLATÖRÜ VE BAŞLICA SİNİR HÜCRESİ MODELLERİ.....	27
2.1 Van der Pol Osilatörü.....	28
2.2 Hodgkin–Huxley Sinir Hücresi Modeli	28
2.3 FitzHugh–Nagumo Sinir Hücresi Modeli (Bonhoeffer–Van der Pol Modeli).	30
2.4 Hindmarsh Rose Sinir Hücresi Modeli	30
2.5 Morris Lecar Sinir Hücresi Modeli	31
2.6 I&F Sinir Hücresi Modeli	31
2.7 Üstel Uyarlanabilir I&F Sinir Hücresi Modeli.....	32
3. HALKA BAĞLI SİNİR AĞLARI	33
3.1 Merkezi Örüntü Üreteçleri	33
3.2 Senkronizasyon	34
3.2.1 Eş-faz senkronizasyonu.....	35
3.2.2 Zıt-faz senkronizasyonu	36
3.2.3 N-faz senkronizasyonu.....	36
3.3 Halka Bağlantı.....	37
4. FARKLI SİNAPTİK BAĞLANTILAR İÇİN HALKA BAĞLI AĞLARIN İNCELENMESİ	39
4.1 Harici Kare Darbe Kuplaj Kaynağı ile Halka Bağlı Van Der Pol Ağı.....	39
4.2 Kare Dalga Kuplaj Kaynağı İle Halka Bağlı Van Der Pol Ağı.....	44
4.3 Tanh Kuplaj kaynağı İle Halka Bağlı Van Der Pol Ağı.....	49
4.4 Tanh Kuplaj Kaynağı İle Halka Bağlı Hindmarsh Rose Ağı	53
4.5 Tanh Kuplaj kaynağı İle Uyarlanabilir Üstel I&F Sinir Hücresi	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
5.1 Çalışmanın Devam Ettirilebileceği Alanlar	60
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

AdEx	: Adaptive Exponential
CPG	: Central Pattern Generator
H-H	: Hodgkin-Huxley
I&F	: Integrate and Fire
N-N	: Neural Networks

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Harici kare dalga ile kuple edilmiş Van der Pol ağı için kullanılan parametreler.....	59
Çizelge 5.2 : Kare dalga ile kuple edilmiş Van der Pol ağı desen parametreleri.	59
Çizelge 5.3 : Tanh ile kuple edilmiş Van der Pol ağı desen parametreleri.....	60
Çizelge 5.4 : Tanh ile kuple edilmiş AdEx ağı desen parametreleri.	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : CPG çalışmasında desen geçişleri [20].	34
Şekil 3.2 : Osilasyon-fazının tanımı [21].	35
Şekil 3.3 : Eş-faz senkronizasyonu.	36
Şekil 3.4 : Zıt-faz senkronizasyonu.	36
Şekil 3.5 : N-faz senkronizasyonu [5].	37
Şekil 3.6 : Çift yönlü halka bağ.	37
Şekil 4.1 : Harici kare darbe kuplaj kaynağı ile halka bağlı osilatör ağı [5].	40
Şekil 4.2 : Eş-faz karakteristiği.	41
Şekil 4.3 : Eş-faz, komşu hücrelerin-faz farkı sıfırdır.	41
Şekil 4.4 : Zıt-faz karakteristiği.	42
Şekil 4.5 : Zıt-faz, komşu hücrelerin-faz farkı 180 derecedir.	43
Şekil 4.6 : N-faz karakteristiği.	43
Şekil 4.7 : N-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	44
Şekil 4.8 : Eş-faz karakteristiği.	45
Şekil 4.9 : Eş-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	45
Şekil 4.10 : Zıt-faz karakteristiği.	46
Şekil 4.11 : Zıt-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	46
Şekil 4.12 : N-faz karakteristiği.	47
Şekil 4.13 : N-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	47
Şekil 4.14 : Sönümlenmiş dalga deseni $\varepsilon=0.03$ ve $\gamma=0.02$.	48
Şekil 4.15 : Öbeklenme deseni $\varepsilon=0.75$ ve $\gamma=0.03$.	48
Şekil 4.16 : $N=8$ için eş-faz karakteristiği.	50
Şekil 4.17 : Eş-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	50
Şekil 4.18 : Zıt-faz karakteristiği.	51
Şekil 4.19 : Zıt-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	51
Şekil 4.20 : $N=8$ için n-faz karakteristiği.	52
Şekil 4.21 : N-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.	52
Şekil 4.22 : Sönümlenmiş dalga deseni $\varepsilon=0.02$ ve $\gamma=0.050$.	53
Şekil 4.23 : Öbeklenme deseni $\varepsilon=0.20$ ve $\gamma=0.05$.	53
Şekil 4.24 : $x(t)$ gerilim grafiği (burst karakteristiği).	54
Şekil 4.25 : $y(t)$ gerilim grafiği (burst karakteristiği).	54
Şekil 4.26 : $I_b = 10$ için zıt-faz karakteristiği.	55
Şekil 4.27 : Öbeklenme deseni-1.	56
Şekil 4.28 : Öbeklenme deseni-2.	56
Şekil 4.29 : Öbeklenme deseni-3.	57
Şekil 4.30 : Öbeklenme deseni-4.	57
Şekil A.1 : Eş-faz senkronizasyonu	66
Şekil A.2 : Zıt-faz senkronizasyonu	67
Şekil A.3 : Geçici N-faz senkronizasyonu	68

FARKLI BAĞLANTI MODELLERİ İÇİN HALKA BAĞLI SİNİR AĞLARININ SAYISAL İNCELENMESİ

ÖZET

Hayvanların avcılarından kaçabilmeleri, eş bulabilmeleri, yiyecek bulabilmeleri kısaca yaşamlarını sürdürebilmeleri için hareket edebilmeleri gerekmektedir. Bu nedenle hayvanların morfolojik özellikleri ve merkezi sinir sistemi özellikleri hareket etmelerini sağlayacak biçimde şekil almıştır. Aynı şekilde robot tasarımcıları için de robotların çeşitli ortamlarda hareket edebilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle robot tasarımlarında, hayvanların morfolojisinden, hareket stillerinden ve kontrol mekanizmalarından esinlenilmiştir. Örneğin yılan robotlar, dört ayaklı robotlar hayvanların biyolojik özelliklerinin incelenmesi sonucu tasarlanan robotlardır.

İnsanlar da dahil, memeli hayvanların hareketleri omuriliklerindeki sinir hücrelerinin aktivitesinden kaynaklanmaktadır. Bu sinir hücrelerine merkezi örüntü üreteçleri ya da kısaca CPG denilmektedir. CPG'ler, çeşitli kaynaklardan aldıkları çevre koşullarına dikkat ederek, basit hareket ritimleri üretirler.

CPG çalışmalarının çoğunda dalga propagasyonu, gezici dalga ya da n-faz senkronizasyonu olarak adlandırılan desenler bulunmaya çalışılmıştır. N-faz senkronizasyonunun elde edilmesi için kullanılan temel bağlantı şekli ise halka bağlantı şeklindedir. Halka bağlantı, bir kuplaj kaynağıyla ard arda bağlanan sinir hücrelerinin birincisi ile sonuncusunun birbirlerine bağlanması ile elde edilen bağlantı şeklindedir.

Aynı frekansta ya da birbirine çok yakın frekanslarda salınım yapan iki osilatörün aynı anda veya sabit bir faz farkıyla birlikte hareket etme durumuna senkronizasyon denir. Faz farkının olmadığı durum eş-faz, faz farkının osilasyon periyodunun yarısı kadar olduğu durum zıt-faz, n tane osilatör için-faz farkının $2\pi/n$ olduğu duruma da n-faz senkronizasyonu denmektedir. Tez çalışmasında incelenen bağlantı şekli halka bağlantı, elde edilmek istenen senkronizasyon n-faz senkronizasyonudur. Bu senkronizasyonlar ile canlıların hareket etme özellikleri modellenmektedir.

Çalışmaya ilk olarak Van der Pol osilatörleri ile başlanmıştır. Tek sayıda ve çift sayıda Van der Pol osilatöründen oluşan halka bağlı yapıda önce kuplaj kaynağı olarak zamanla değişen direnç yani kare dalga kullanılmıştır. Bağlantı yapısı ise bir hücreyi kendisinden önceki ve kendisinden sonraki hücre etkileyecek şekilde çift yönlü halka şeklindedir. Bu bağlantı şeklinde denklemlerin başlangıç koşullarının değiştirilmesi ve uygun parametrelerin kullanılması ile eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları elde edilmiştir.

İkinci olarak, kuplaj kaynağı olarak harici kare dalga yerine sinir ağının kendi doğrusal olmayan özellikleri ile elde edilmiş kare dalga kullanılırsa senkronizasyonun nasıl değişeceği konusu ele alınmıştır. Kuplaj kaynağı dışında sistem aynı kalacak şekilde parametre taratılmasına devam edilmiştir. Hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için başlangıç koşullarının değiştirilmesi ve uygun

parametrelerin kullanılmasıyla eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ile öbeklenme deseni ve sönümlenmiş dalga deseni elde edilmiştir.

Üçüncü aşamada, kuplaj kaynağı sinir ağının kendi doğrusal olmayan özellikleriyle oluşturulan tanh olarak değiştirilmiştir. Kuplaj kaynağı dışında sistem aynı kalacak şekilde parametre taratılmasına devam edilmiştir. Hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için başlangıç koşullarının değiştirilmesi ve uygun parametrelerin kullanılmasıyla eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ile öbeklenme deseni elde edilmiştir.

Dördüncü aşamada, Van der Pol osilatörü yerine Hindmarsh Rose sinir hücresi kullanılmıştır. Halka bağlantı tek yönlü yapılarak senkronizasyonlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu zıt-faz senkronizasyonu elde edilmiştir. Üç tane Hindmarsh-Rose hücresiyle kurulmuş ağda ise öbeklenme deseninin gözlendiği gösterilmektedir.

Son aşamada çift yönlü halka bağlı AdEx sinir hücreleri birbirlerine kendi doğrusal olmayan özellikleriyle oluşturulmuş tanh ile bağlanmışlardır. Bu sinir ağında da başlangıç koşullarının değişiminden senkronizasyonlar çok fazla etkilenmemişlerdir. Parametre taratılmasıyla hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları elde edilmiştir.

Böylece herhangi bir osilatör ya da sinir hücresi için, kuplaj kaynağı hücrenin kendi doğrusal olmayan özelliklerinden kaynaklı tanh kuplaj kaynağı ile oluşturulmuştur. Çift yönlü halka bağlı modelde parametre taratılması yöntemiyle CPG çalışmalarında kullanılabilecek eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları elde edilmiştir. Tek yönlü halka bağlı modelde ise zıt-faz ve öbeklenme deseninin gözlendiği gösterilmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde tez konusunun çıkış noktası ve bu çalışmanın neden yapıldığı anlatılmaya çalışılmış ve tez çalışmasında ortaya atılan hipotez verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde kısaca ve denklemsel olarak Van der Pol osilatörü ve başlıca sinir hücrelerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde CPG çalışmalarından ve halka bağlantının ne olduğundan, CPG çalışmalarıyla halka bağlantı arasındaki ilişkiden, senkronizasyon tanımından ve halka bağlantı ile elde edilmek istenen senkronizasyonlardan referanslar verilerek bahsedilmeye çalışılmıştır. Dördüncü bölümde ise yapılan çalışma detaylı olarak anlatılmaya çalışılmıştır. Son bölümde, çalışma kısaca değerlendirilmiş ve tez çalışması böylelikle sonlandırılmıştır.

NUMERICAL ANALYSIS OF RING MODEL NEURAL NETWORKS WITH DIFFERENT CONNECTION MODELS

SUMMARY

The ability to move is such an important thing for animals to avoid predators, to look for food, and to find mates for reproduction. Because of these animals' morphologies and central nervous systems have been shaped by constraints related to locomotor skills. In the same way designing moving robots is a very important concept for robotics. The robotics is taking inspiration from biology in terms of morphologies, modes of locomotion, and/or control mechanisms. Many robot structures are directly inspired by animal morphologies such as snake robots and quadruped robots.

Locomotion in mammals, including humans, is based on the activity of neuronal networks within the spinal cord. There is a neuronal network, in the spinal cord and it is called Central Pattern Generators (CPG). The spinal cord generates rhythmic and sequential activations to the locomotion muscles. CPG selects appropriate afferent information according to the external requirement. The interesting point is CPG manages locomotion rhythms without orders of brain.

N-phase synchronization patterns are most desired patterns in the CPG studies. The ring model is the fundamental connection model to get patterns such n-phase synchronization. In the ring model, neurons are connected to each others sequentially by a synaps connection. To complete the ring, the first neuron is connected to the last neuron by the same connection model.

Synchronization is the process by which two or more neurons or oscillators tend to oscillate with a repeating sequence of relative phase angles in the same or almost same frequency. In this thesis in phase, anti phase and n phase synchronizations are target synchronizations. With these synchronizations animal's locomotion is modelled in robotics studies.

Connected oscillatory networks provide simple models for describing high-dimensional nonlinear phenomenas. Synchronization is one of the most important features that can be described and explored with the help of oscillators.

First of all, Van der Pol oscillators are connected to each others with an external pulse wave connection model. The connection model is bidirectional ring model as mentioned before. Because of that one neuron is affected with it's previous and after neighbour neurons. Without ruining this connection odd numbers of neurons and even numbers of neurons are used. By changing boundry conditions of differential equations and finding appropriate parameter values by numerical analysis, synchronization patterns such as in phase, anti phase and n phase have been found for both odd number and even number connections. The boundry conditions of this system is very sensitive. It changes it's synchronization mainly due to it's boundry condition.

Secondly, the connection model is changed. A pulse wave, generated with Van der Pol oscillator's own nonlinearity, is used. To further explain of this connection model, the pulse wave takes nonlinearity of Van der Pol oscillators and generates an internal pulse wave connection model. With using this new connection model and bidirectional ring model in-phase, anti-phase, n-phase synchronizations, clustering synchronization parameters are found for odd number and even number of neurons. As it can be referred, this connection model is also sensitive to the boundry conditions.

Thirdly, instead of pulse wave, a tangent hyperbolic generated with Van der Pol oscillator's own nonlinearity, is used. To further explain of this, tangent hyperbolic connection model takes nonlinearity of Van der Pol oscillators as parameters into the tangent hyperbolic function. With using this new connection model and bidirectional ring model in-phase, anti-phase, n-phase synchronizations, clustering synchronization parameters are found for odd number and even number of neurons. As it can be referred, this connection model is sensitive to the boundry conditions too just like first two models.

Finally, Van der Pol oscillators are cut from the system and Hindmarsh-Rose neurons are applied instead of them. Hindmarsh-Rose neurons are affected by themselves and by the next neighbour neuron. Connection model is nonlinear tangent hyperbolic wave as it was previous system. This model is not sensitive to boundary conditions of equations as much as the models with Van der Pol oscillators. The numerical analysis for odd numbers of neurons and even numbers of neurons is made. For even and odd numbers of neurons anti phase synchronization and clustering synchronization patterns are found. All these synchronizations are found by changing the amplitude of the connection model.

In the last step, Adaptive Exponential Integrate and Fire neurons are applied. The connection type is bidirectional ring as it was in Van der Pol ring systems and the connection model is also nonlinear tangent hyperbolic wave. This model is not sensitive to boundary conditions of equations as much as the models with Van der Pol oscillators just like Hindmarsh-Rose model. The numerical analysis for odd numbers of neurons and even numbers of neurons is made. For both systems; odd numbers and even numbers of neurons; in phase, anti phase and n phase synchronization is found by changing the parameter of the neurons. But n-phase synchronization is not a stable synchronization for this network. It is a temporary situation after a time n-phase synchronization is disappeared.

As a result, the in-phase, anti-phase, n-phase, clustering synchronizations and some more can be found in the ring of neurons or oscillators by numerical parameter analyzing, no matter which oscillation model or neuron model is used. These synchronization patterns can be used in modelling robot movements such as swimming, walking, and crawling. May be if experiments are made deeply, changing movements from one to another one for example (walking to crawling or walking to swimming) can be possible by using the appropriate parameters and boundary conditions for ring of neurons or oscillators.

The organization of this paper is as follows; the first section explains the scope of this study and the requirements to the subject. Then gives the aim of the thesis and the hypothesis of the thesis. The aim of the thesis is to find appropriate parameters to gather various synchronization patterns by using different nonlinear couplings and different neurons in a nonlinearly coupled ring network. The desired synchronization

patterns are in-phase, anti-phase, n-phase and clustering synchronizations. The presented hypothesis of this thesis is by using appropriate parameters, it is possible to gather various synchronization patterns from different nonlinearly coupled networks that are using bidirectional different nonlinear couplings. And it is possible to get in-phase, anti-phase and n-phase synchronizations no matter the count of the neurons are even or odd.

In the second section; after some brief introduction to the Neural-Networks, Van der Pol oscillator and some basic neuron models (Hodgkin-Huxley neuron model, Fitz-Hugh Naguma (Bonhoeffer Van der Pol) neuron model, Hindmarsh Rose neuron model, Morris-Lecar neuron model, integrate and fire neuron model and adaptive exponential integrate and fire neuron model) are represented with their differential equations. And some of these neuron models are used in the fourth section such as Van der Pol oscillator, Hindmarsh-Rose neuron model and Adaptive Exponential Integrate and Fire neuron model.

In the third section, the definition of central pattern generator is represented and the research areas of central pattern generator researchers are given. Also ring model is represented, bidirectional ring model is explained and the scope of application is represented by references. The term synchronization is defined. In-phase synchronization, anti-phase synchronization and n-phase synchronization is explained by the examples. The other synchronization patterns which can be seen by using ring model is represented by examples from references.

The fourth section represents detailed explanation of the simulations and the progress steps of the thesis. This section divided into five sub groups. The titles of the sub groups are Van der Pol oscillator with an internal pulse wave connection, Van der Pol oscillator with internal pulse wave connection, Van der Pol oscillator with internal tangent hyperbolic wave connection, Hindmarsh Rose neuron with internal tangent hyperbolic wave connection and adaptive exponential integrate and fire neuron with internal tangent hyperbolic wave connection.

The fifth section is the final section. In this section the thesis is reviewed shortly, the main points of the work are highlighted and the results are evaluated. To sum up these, Van der Pol Network is highly sensitive to boundary conditions of differential equations and in-phase, anti-phase, n-phase synchronizations are gathered by changing the boundary conditions. But clustering synchronization is gathered by changing parameters of differential equations while the boundary conditions of differential equations are random. In opposite to Van der Pol Network, Hindmarsh Rose Network and Adaptive Exponential Integrate and Fire Network are not sensitive to the boundary conditions of differential equations as much as Van Der Pol Network. And the other important thing is, it is possible to get in-phase, anti-phase and n-phase synchronizations no matter the count of the neurons are even or odd. For Hindmarsh-Rose one-directional coupled network only anti-phase and clustering synchronizations could be gathered. For Adaptive Exponential Integrate and Fire network in-phase, anti-phase and n-phase synchronizations are gathered. But n-phase synchronization is not a stable synchronization for this network. It is a temporary situation after a time n-phase synchronization is disappeared.

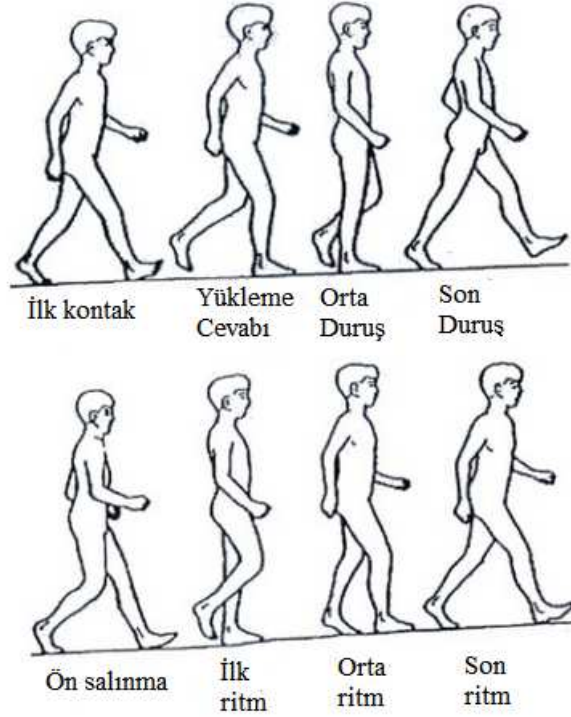
1. GİRİŞ

Canlıların yaşamlarını sürdürebilmeleri için hareket etmeleri gerekmektedir. Bitkiler, fotosentez yapabilmek ve tozlaşmak için, hayvanlar avcılarından kaçabilmek, eş bulabilmek, yiyecek bulabilmek için hareket ederler. Robot tasarımcıları için de robotların çeşitli ortamlarda hareket edebilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle robot tasarımlarında, hayvanların morfolojisinden, hareket stillerinden ve kontrol mekanizmalarından esinlenilmiştir. Örneğin yılan robotlar, dört ayaklı robotlar hayvanların biyolojik özelliklerinin incelenmesi sonucu tasarlanan robotlardır.

İnsanlar da dahil, memeli hayvanların hareketleri omuriliklerindeki sinir hücrelerinin aktivitesinden kaynaklanmaktadır. Buradaki sinir hücrelerine merkezi örüntü üreteçleri ya da kısaca CPG denilmektedir. CPG'ler, çeşitli kaynaklardan aldıkları çevre koşullarına uygun hareket ritimleri üretirler. CPG çalışmaları hem hayvanların hareket etme mekanizmasının anlaşılması hem de sinir ağlarının belirli bir bölümünün anlaşılması açısından önemlidir. Doğadan esinlenilerek üretilen ve gerçek organlar gibi hareket etme kabiliyetine sahip robot dizayn etme çalışmaları da CPG çalışmaları altında sürdürülmektedir. Bu nedenle de CPG çalışmaları oldukça önemlidir [1].

CPG mimarisinin anlaşılması için yürüme fazı gibi yürüme hareketi özelliklerinden yararlanılmıştır. Ayağın zemine değme ve zeminden çekilme gibi hareketleri Şekil 1.1'deki gibi çeşitli fazlara ayrılarak incelenmiştir. Bu yürüme fazlarından hareketle dinamik desenlerin oluşturulması ve yürüyüşler arasındaki geçişlerin modellenmesi için osilatörlerden oluşmuş sinir hücreleri kullanılması fikri üzerinde durulmuştur. Bir çok hayvanın hareketlerinin simetri gibi özellikleri aslında halka bağlı osilatörlerde gözlenen özelliklerle aynı olduğu düşünülmüştür [1]. Hareket modelleyen n-faz senkronizasyonu deseni CPG çalışmalarında bulunmaya çalışılmıştır. N-faz senkronizasyon deseninin elde edilmesi için kullanılan temel bağlantı şekli ise halka bağlantı şeklidir. Halka bağlantı, bir kuplaj kaynağıyla ard arda bağlanan sinir hücrelerinin birincisi ile sonuncusunun birbirlerine bağlanması ile

elde edilen bağlantı şeklidir. Bu nedenle hayvan hareketlerinin modellenmesi için halka bağlı osilatörlerle çeşitli çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 1.1 : Yürüyüş fazları [2].

Güney Asya'daki ağaçlarda binlerce erkek ateş böceği aynı anda, senkronize bir şekilde yanıp sönmeye kabiliyetine sahiptir. Bunu, yakında gezmekte olan dişi ateş böceklerine kendilerini seçtirmek için yaparlar. Bu senkronizasyonu gerçekleştirmek için hiçbir koordinatör karaktere ihtiyaç yoktur. Gayet basit bir şekilde bir böcek kendine en yakın böceğin yanıp sönmüşüne bakar. Eğer bu yanıp sönmüş kendi frekasından daha fazla ise, o böcek kendi frekansını artırır. Yavaş ise yavaşlatır. Diğer böcekler aynı algoritmayı takip ederler. Bu ufak algoritmaların birleşimi ise, bir süre sonra aynı yanıp sönmüşe doğru yaklaşır [3]. Buna senkronizasyon denir. Bu çalışmada elde edilmek istenen senkronizasyonlar eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonlarıdır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada amaç, belirli sayıda hücre ya da osilatörlerden oluşmuş ve birbirlerine doğrusal olmayan bağlantı modelleriyle halka şeklinde bağlanmış sinir hücresi ağının, belirli parametrelerinin sayısal olarak taranması sonucunda sistemin çeşitli senkronizasyon davranışlarının elde edilmesidir. Elde edilmek istenen

senkronizasyonlar eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ve öbeklenme desenidir.

Bu çalışmaya öncelikle [4] ve [5]'teki harici kare dalga kuplaj kaynağıyla halka şeklinde bağlı Van der Pol osilatörlerinin senkronizasyonunun incelenmesiyle başlanmıştır. Daha sonra harici kare dalga yerine sinir ağının kendi doğrusal olmayan özellikleriyle oluşturulmuş kare dalga kullanılarak senkronizasyon desenlerinin elde edilmesi çalışmalarına devam edilmiştir. Literatürde sıkça kullanılan ve gerçeklemesi bakımından kare dalgaya göre daha kolay olan tanh kuplaj kaynağı kare dalga yerine kullanılmaya başlanmış ve bu bağlantıyla da senkronizasyonlar elde edilmeye başlanmıştır.

Van der Pol osilatörü yerine gerçek bir sinir hücresi modeli olan Hindmarsh-Rose sinir hücresi kullanılmış ve parametre taratılması yöntemiyle senkronizasyonlar elde edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra ise yakın zamanda önerilmiş, deneysel I&F modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olan AdEx sinir hücresiyle aynı çalışmalar yapılmıştır.

1.2 Hipotez

Farklı bağlantı modelleriyle halka bağlanmış farklı sinir hücresi ağlarında, uygun parametre takımlarıyla eş-faz, zıt-faz, n-faz ve öbeklenme desenleri elde edilebilmektedir. Uygun parametre takımlarıyla hem tek sayıda hem de çift sayıda sinir hücresinden oluşmuş çift yönlü halka bağlı sinir hücresi ağlarında bu üç senkronizasyonun hepsini görmek mümkündür.

2. VAN DER POL OSİLATÖRÜ VE BAŞLICA SİNİR HÜCRESİ MODELLERİ

Yapay sinir ağları (N-N); insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. En genel anlamda bir N-N yapay olarak basit işlemcilerin birbirlerine değişik etki seviyeleri ile bağlanması sonucu oluşan bir sistem olarak düşünülebilir. Önceleri temel tıp birimlerinde insan beynindeki sinir hücrelerini matematiksel modelleme çabaları ile başlayan çalışmalar, günümüzde fizik, matematik, mühendislik gibi çok farklı bilim dallarında araştırma konusu haline gelmiştir. Mühendislik uygulamalarında N-N geniş çaplı kullanılmaktadır, bunun en önemli nedeni, klasik tekniklerle çözümü zor problemler için etkin bir alternatif oluşturmastır. Çünkü bilgisayarlar insanın beyinsel yeteneğinin en zayıf olduğu çarpma, bölme gibi matematiksel ve algoritmik hesaplama işlemlerinde hız ve doğruluk açısından yüzlerce kat başarılı olmalarına rağmen insan beyninin öğrenme ve tanıma gibi işlevlerini hala yeteri kadar gerçekleştirememektedir [6].

Sinir sisteminin en basit yapısı sinir hücreleridir. Dendrit tarafından alınan işaretler hücrede birleştirilerek bir çıkış darbesi üretilip üretilmeyeceğine karar verilir. Eğer bir iş yapılacaksa üretilen çıkış darbesi aksonlar tarafından taşınarak diğer sinir hücreleriyle olan bağlantılara veya terminal organlara iletilir [6].

Sinir hücresi matematiksel modelinde dendritlerden toplanan x_i girişlerinin, w_{ij} sinaptik ağırlıklarıyla çarpılıp birbirleriyle toplandıktan sonra belli bir ϕ aktivasyon fonksiyonuyla hücre çıkışını belirlendiği gözlenmektedir. (2.1) denklemi bu modelin denklemini göstermektedir. Bu gösterim şekli Hodgkin-Huxley modelinin hakimiyetine kadar ilk biyolojik modellerde yer bulmuştur.

$$y_j = \phi \left(\sum_i w_{ij} x_i \right) \quad (2.1)$$

Beyin fonksiyonlarının nasıl çalıştığını daha iyi anlamak için araştırmacılar insan ve hayvan sinir sistemi üzerinde geniş ölçekli beyin modellemeleri yapıp benzetimlerinden yararlanmışlardır. Fakat modelleri yapmak için bir sinir hücresinin iki temel özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bunlardan birincisi, bir sinir hücresi modeli hesaplama açısından basit olmalı ve ikincisi gerçek biyolojik sinir hücresi gibi ateşleme karakteristikleri gösterecek zengin bir yapıya sahip olmalıdır. Bu nedenle çeşitli deneysel ve gerçek sinir hücresi modellemeleri yapılmıştır. Ayrıca sinir hücreleri yerine incelemelerde osilatörlerin de kullanıldığı gözlenmektedir. Aşağıda Van der Pol osilatörü, Hodgkin–Huxley, Fitz-Hugh Nagumo, Hindmarsh-Rose, Morris-Lecar, I&F ve üstel uyarlanabilir I&F sinir hücresi modellerinden kısaca bahsedilmiştir.

2.1 Van der Pol Osilatörü

Matematiksel olarak bir Van der Pol osilatörünün genel formülü (2.2) eşitliğinde gösterilmiştir. Burada ε ve α sabit, $u(t)$ ise t 'ye bağımlı durumu ifade etmektedir.

$$\frac{d^2u}{dt^2} - \varepsilon(\alpha - u^2)u + u = 0 \quad (2.2)$$

Bu eşitlik aşağıdaki gibi (2.3) ve (2.4) eşitlikleri ile de yazılabilir.

$$\frac{dx}{dt} = y \quad (2.3)$$

$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon(\alpha - x^2)y - x \quad (2.4)$$

2.2 Hodgkin–Huxley Sinir Hücresi Modeli

20.yy'ın başından beri mürekkepbalığı dev aksonları elektrofizyolojik araştırmalarda sinir hücresi zarının doğrusal olmayan davranışlarını açıklamakta çok geniş kullanım alanına sahiptirler. 1952'de Hodgkin ve A.F. Huxley mürekkepbalığı dev aksonlarıyla kendi yaptıkları elektrofizyolojik çalışmalarla Hodgkin-Huxley eşitliği olarak bilinen matematiksel modeli sunarlar. Böylece, sinir hücresi zarının doğrusal olmayan davranışı teorik olarak Hodgkin-Huxley eşitliği ile, deneysel olarak da mürekkepbalığı dev aksonları ile derinlemesine incelenmiş olur [7]. En başarılı ve

yaygın olarak kullanılan sinir hücresi modelleri Hodgkin ve Huxley'in 1952'deki mürekkepbalığı dev aksonlarındaki verilerinden elde ettikleri model üzerinden türetilmiştir [8].

Model aşağıdaki (2.5) ve (2.6) eşitlikleri ile tanımlanmaktadır.

$$I_{ion} = \sum_i G_i (V - E_i) \quad (2.5)$$

$$C_m \frac{dV}{dt} + I_{ion} = I_{uyg} \quad (2.6)$$

Eşitliklerde geçen C_m ve I_{uyg} sırasıyla hücre zarı kapasitesini ve dışarıdan uygulanan akımı göstermektedir. Hücre zarındaki gerilim değişimi ise (2.7) eşitliğinde tanımlanmaktadır [9].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C_m} [I_{inject} - I_{ion}] = \frac{I_{total}}{C_m} \quad (2.7)$$

Gerilim-kontrollü iyon kanallarının iletkenliği ise model tarafından (2.8) eşitliğindeki gibi modellenmektedir. Burada m ve h sırasıyla aktivasyon ve inaktivasyon kapılarının gerilime bağlı açık durumda bulunma olasılıklarını, V membran gerilimini, $g_{max,i}$ iyon kanalında tüm kapılar açık durumda iken iyon kanalının maksimum iletkenliğini, p aktivasyon kapılarının sayısını ve q inaktivasyon kapılarının sayısını göstermektedir. Aktivasyon ve inaktivasyon kapılarının zamana bağlı açık olma olasılıkları, birinci dereceden diferansiyel denklem ile modellenmektedir [9].

$$G_i(V, t) = g_{max,i} m^p(V, t) h^q(V, t) \quad (2.8)$$

x ; m , h ya da n olmak üzere $\alpha_x(V)$ ve $\beta_x(V)$ hız fonksiyonları membran gerilimine bağlıdır. Bu durum eşitlik (2.9)'da modellenmektedir. Sinir hücresi modelinde hızlı soydum kanal iletkenliği eşitlik (2.10)'daki gibi, potasyum kanalının iletkenliği ise (2.11)'daki gibi modellenmektedir.

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_x(V)(1 - x) - \beta_x(V)x \quad (2.9)$$

$$G_{Na} = g_{\max,Na} m^3 h \quad (2.10)$$

$$G_K = g_{\max,K} n^4 \quad (2.11)$$

2.3 FitzHugh–Nagumo Sinir Hücresi Modeli (Bonhoeffer–Van der Pol Modeli)

Bu model H-H modelinden türetilmiş ve onunla aynı davranışı gösteren alternatif bir modeldir. Model eşitlikleri (2.12) ve (2.13)'de verilmiştir.

$$\frac{dv}{dt} = c \left(v - \frac{v^3}{3} - u + I_{dış} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{du}{dt} = (v - bu + a) / c \quad (2.13)$$

Eşitliklerde geçen v hücre zarı potansiyelini, u kanal değişimlerini, $I_{dış}$ ise dışarıdan uygulanan uyarıcı akımı göstermektedir [10].

2.4 Hindmarsh Rose Sinir Hücresi Modeli

Hindmarsh ve Rose, Fitz Hugh-Naguma modelinin oluşturulmasından esinlenerek Hindmarsh Rose sinir hücresi modelini oluşturmuşlardır. Bu model de H-H sinir hücresi modelinden üretilen bir modeldir. Model üç tane diferansiyel denklemle ifade edilmektedir.

$$\frac{dx}{dt} = y + 3x^2 - x^3 - z + I \quad (2.14)$$

$$\frac{dy}{dt} = 1 - 5x^2 - y \quad (2.15)$$

$$\frac{dz}{dt} = r \left(4 \left(x + \frac{8}{5} \right) - z \right) \quad (2.16)$$

Hindmarsh Rose modelinin kontrolü için genellikle I parametresi kullanılmaktadır.

2.5 Morris Lecar Sinir Hücresi Modeli

1981 yılında Morris ve Lecar Hodgkin-Huxley ve Fitz Hugh-Naguma modellerini gecikmeli doğrultucu potasyum kanalı ile gerilim kontrollü kalsiyum kanalında modellemişlerdir. Model aşağıdaki eşitliklerle matematiksel olarak ifade edilmektedir [10].

$$F(v, w) = -g_{ca} m_{\infty}(v)(v - v_{ca}) - g_k w(v - v_k) - g_l(v - v_l) + I_{uyg} \quad (2.17)$$

$$G(v, w) = \phi \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{v - v_3}{v_4}\right)(w_{\infty} - w) \quad (2.18)$$

$$m_{\infty}(v) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{v - v_1}{v_2}\right) \quad (2.19)$$

$$w_{\infty} = (1 + \tanh\left(\frac{v - v_3}{2v_4}\right)) \quad (2.20)$$

2.6 I&F Sinir Hücresi Modeli

Bu modelde hücre zarı potansiyeli belli bir V_{th} eşik gerilimine geldiğinde, hücrenin spike yaptığı var sayılmaktadır. Ateşleme anından sonra hücre gerilimi eşik geriliminden küçük bir gerilime eşitlenmektedir. Pratik olarak kullanımı ve donanımsal olarak gerçekleştirilmesi kolay bir modeldir. I&F deneysel sinir hücresi modeli aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmaktadır.

$$C_m \frac{dv(t)}{dt} = I_{kacak}(t) + I_S(t) + I_{uyg}(t) \quad (2.21)$$

$$I_{kacak}(t) = -\frac{C_m}{\tau_m} [v(t) - V_0] \quad (2.22)$$

$$I_S(t) = C_m \left[\frac{dv(t)}{dt} \right]_{v=V_{th}}^{-1} (V_r - V_{th}) \delta[v(t) - V_{th}] \quad (2.23)$$

Bu eşitliklerde geçen C_m zar kapasitesini, I_{kacak} kacak akımını göstermektedir. Eşitlikte geçen τ_m zar kapasitesi ile zar direncinin çarpımına eşittir [11].

2.7 Üstel Uyarlanabilir I&F Sinir Hücresi Modeli

Üstel uyarlanabilir I&F sinir hücresi modeli spike yapan sinir hücresi modelidir, AdEx olarak adlandırılır. İlk eşitlik zar potansiyelinin dinamikleri ve üstel gerilimine bağlı aktivasyon terimi içermektedir. Gerilim adaptasyonunu ifade eden ikinci eşitliğe bağlanmıştır. Adaptasyona ve üstel potansiyeline bağımlılığın kombinasyonu bu modele ismini vermektedir. Model eşitlikleri aşağıdaki gibidir;

$$C \frac{dV}{dt} = -g_L(V - E_L) + g_L \Delta_T \exp\left(\frac{V - V_T}{\Delta_T}\right) - w + I \quad (2.24)$$

$$\tau_w \frac{dw}{dt} = a(V - E_L) - w \quad (2.25)$$

Buradaki eşitliklerde V hücre zarı potansiyelini, I giriş akımını, C hücre zarı kapasitesini, g_L kaçak iletkenliği, E_L kaçak ters potansiyeli, V_T eşik gelirimini, Δ_T eğim faktörünü, a adaptasyon faktörünü, τ_w ise adaptasyon zaman sabitini göstermektedir [12].

Eğer $V > 0\text{mV}$ ise

$$\begin{cases} V \rightarrow V_r \\ w \rightarrow w_r = w + b \end{cases} \quad (2.26)$$

Eşitlik (2.26)'dan da görüldüğü üzere hücre zarı potansiyeli pozitif değerlere geçtiğinde değeri V_r değerine sabitlenmekte, w da b sabiti ile w_r değerine sabitlenmektedir. Bu nedenle adaptasyon değeri w , spike treni boyunca toplanabilirken voltaj değeri toplanmaz [12].

3. HALKA BAĞLI SİNİR AĞLARI

3.1 Merkezi Örüntü Üreteçleri

Merkezi örüntü üreteçleri yani CPG'ler hayvanların omuriliğinde yer alan ve yüzme, yürüme, koşma, emekleme gibi hareketleri yöneten sinir gruplarıdır. Günümüzde robotların yüzme, yürüme, koşma, emekleme gibi hareketlerinin programlanması açısından bu üreteçlerin yapısı incelenmektedir. CPG'ler bu hareketlerin oluşumu için kasları uyarmaktadır. Bu uyarılar kasların ritmik biçimde kasılmalarına neden olmakta ve yürüme, yüzme, koşma, emekleme gibi hareketlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu komutlar için doğrudan beyne gereksinim olmamasına karşın hareket tipleri arasındaki geçişlerde beyinden merkezi örüntü üreteçlerine komutlar gelmektedir.

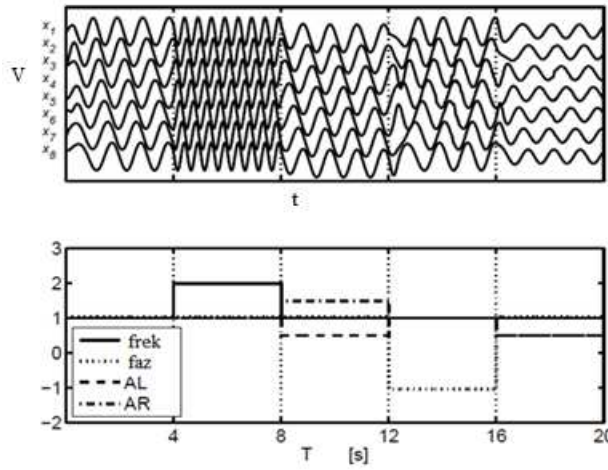
Robot araştırmacıları, canlılarda hareket tipleri arasındaki yumuşak geçişleri taklit etme girişimleri içindeyken, biyologlar da işleyiş hakkında giderek daha fazla bilgi sahibi olmaktadır. Örneğin, semender beyninin büyük kısmının çıkarılıp omuriliğine elektrik uyarıları verildiğinde, hayvanın yüzer gibi hareket ettiği, uyarıların şiddeti azaltıldığında yürüme hareketine geçtiği gözlenmiştir. İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü araştırmacılarıysa hareketleri tıpkı canlı düzenekteki gibi olan yapay bir omurilik ve CPG'lerle düzenlenen, bir metre uzunluğunda bir semender robotu üretmişlerdir. Robot, suya girdiğinde yürüme hareketinden yüzme hareketine geçiş yapabilmektedir. Karada mı suda mı olduğunu anlamasına yarayan algılayıcılara sahip değildir; bu nedenle geçişler uzaktan kumandayla sağlanmaktadır. Kablosuz olarak gönderilen sinyaller ise canlı hayvanda beyinden omuriliğe gönderilen sinyallere eşdeğer özelliktedir. Bu yeni omurilikli robota, hareketleri yakında yapay bir sinir sistemiyle denetlenecek olan robotların öncüsü gözüyle bakılmaktadır [13].

CPG'lerin dizaynları ve yöntemlerine bakacak olursak, incelenen desene göre detaylı biyofiziksel modeller, bağlantılı modeller ve soyut modeller gibi çeşitli seviyelerde CPG'ler dizayn edilmektedir. Detaylı biyofiziksel modeller H-H sinir hücresi modeli

üzerinden kurulmaktadır. Bunlara örnek olarak [14] ve [15] verilebilir. Çalışmaların çoğunda n-faz senkronizasyonu bulunmaya çalışılmıştır. Bunlara kaynak [14] ve [16] makaleleri örnek olarak verilebilir.

CPG modelleri robot araştırmalarında da sıkça kullanılmaktadır. Bir kuplaj kaynağıyla bağlanmış osilatörlerler kullanarak robot araştırmalarına katkıda bulunan çalışmalara örnek kaynak [17], [18], [19] ve [20] olarak verilebilir.

Şekil 3.1’de kaynak [20]’deki çalışmadan alınmış bir desen gösterilmektedir. Bu çalışmada model parametrelerinin değiştirilmesiyle şekildeki desen geçişleri elde edilmiştir. Şeklin üstündeki desenler belirli noktalardaki sinyallerin, şeklin altındakiler ise kontrol parametrelerinin değişimini göstermektedir.



Şekil 3.1 : CPG çalışmasında desen geçişleri [20].

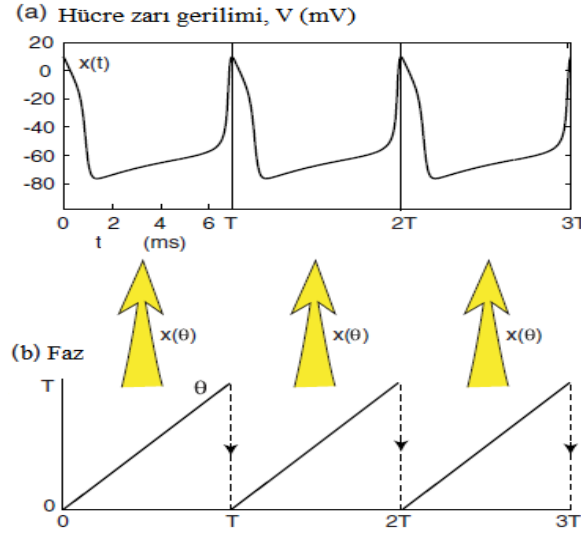
3.2 Senkronizasyon

Senkronizasyon konusu fizik, kimya, mühendislik, biyoloji ve hatta sosyal bilimler dallarında incelenme alanına sahip önemli bir kavramdır. Örneğin, korteks ağlarında kısmi senkronizasyon ile değişik beyin osilasyonlarının üretildiğine inanılmaktadır. Arttırılmış senkronizasyonla epilepsi gibi hastalık işaretleri oluşabilmektedir. Eş güdümlü senkronizasyon ise balıklarda yüzme deseninin ve hareket etme desenlerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır [21].

Güney Asya'daki ağaçlarda binlerce erkek ateş böceği aynı anda, senkronize bir şekilde yanıp sönmeye kabiliyetine sahiptir. Bunu, yakında gezmekte olan dişi ateş böceklerine kendilerini seçtirmek için yaparlar. Bu senkronizasyonu gerçekleştirmek

için hiçbir koordinatör karaktere ihtiyaç yoktur. Gayet basit bir şekilde bir böcek kendine en yakın böceğin yanıp sönuşüne bakar. Eğer bu yanıp sönuş kendi frekasından daha fazla ise, o böcek kendi frekansını artırır. Yavaş ise yavaşlatır. Diğer böcekler aynı algoritmayı takip ederler. Bu ufak algoritmaların birleşimi ise, bir süre sonra aynı yanıp sönuşe doğru yaklaşır [3]. Buna senkronizasyon denir. Bu çalışmada elde edilmek istenen senkronizasyonlar eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonlarıdır.

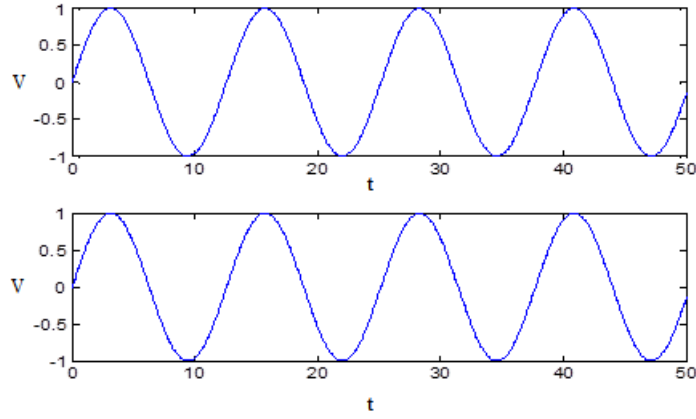
Şekil 3.2’de hücre zarı gerilim osilasyonunun zamana göre davranışıyla, fazının zamana göre davranışı arasındaki ilişki gösterilmektedir [21]. Çok çeşitli senkronizasyon karakteristikleri bulunmaktadır. Aşağıda bu çalışmada elde edilmek istenen asıl senkronizasyon desenleri eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ile ilgili tanımlar yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Osilasyon-fazının tanımı [21].

3.2.1 Eş-faz senkronizasyonu

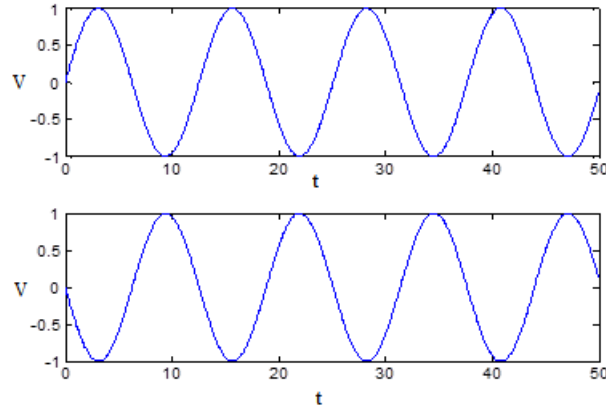
Birbiriyle bir kuplaj kaynağı içindeki tüm hücreler veya osilatörler aynı fazda osilasyon yaptıklarında elde edilen senkronizasyon eş-faz senkronizasyonu olmaktadır. Şekil 3.3’te iki hücre için eş-faz senkronizasyonu gösterilmektedir. Eş-faz senkronizasyonunda komşu iki hücre arasındaki faz farkı sıfırdır.



Şekil 3.3 : Eş-faz senkronizasyonu.

3.2.2 Zıt-faz senkronizasyonu

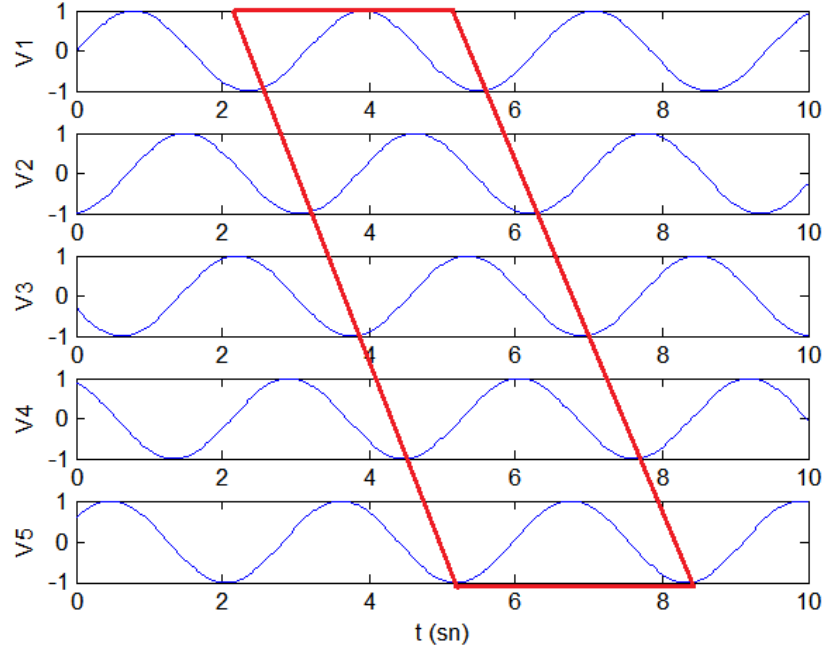
Birbiriyle bir kuplaj kaynağı içindeki tüm hücreler veya osilatörler zıt-fazda osilasyon yaptıklarında elde edilen senkronizasyon zıt-faz senkronizasyonu olmaktadır. Şekil 3.4'te iki hücre için zıt-faz senkronizasyonu gösterilmektedir. Zıt-faz senkronizasyonunda komşu iki hücre arasındaki faz farkı π kadardır.



Şekil 3.4 : Zıt-faz senkronizasyonu.

3.2.3 N-faz senkronizasyonu

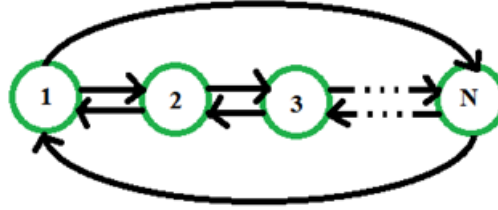
N-faz senkronizasyonunda ise komşu iki hücre arasındaki faz farkı $2\pi/N$ kadardır. Şekil 3.5 kaynak [5]'ten alınmıştır. Burada 15 tane birbirine bağlı sinir hücresi için N-faz senkronizasyonu gözlenmektedir. Kutucuğun içine bakılırsa dalgaının sağa doğru $2\pi/N$ aralıklarla kaydığı görülecektir.



Şekil 3.5 : N-faz senkronizasyonu [5].

3.3 Halka Bağlantı

Halka bağ, birbirleriyle ardarda bağlı hücrelerin en sonuncusu ile birincisinin birbirleriyle bağlanması ile elde edilen bağlantı şeklidir. Halka bağlantı yöntemlerinden biri çift yönlü bağlantıdır. Çift yönlü bağlantıda bir hücreyi hem kendisinden önceki hem de kendisinden sonraki hücre etkilemektedir.



Şekil 3.6 : Çift yönlü halka bağ.

Şekil 3.6’da N sayıda hücrenin birbirlerine çift yönlü halka bağlantısı gösterilmiştir. Dairelerin her biri bir hücreyi ya da osilatörü temsil etmektedir.

4. FARKLI SİNAPTİK BAĞLANTILAR İÇİN HALKA BAĞLI AĞLARIN İNCELENMESİ

Sinir hücresi ve osilatör modellerinin birbirine doğrusal olmayan bir kuplaj kaynağı ile bağlanarak oluşturdukları senkronizasyon desenlerinin incelenmesi çalışmalarına ilk olarak kaynak [5]'teki makaleden yola çıkılarak başlanmıştır. Bu makalede, kuplaj kaynağı olarak zamanla değişen direnç kullanılmıştır. Zamanla değişen direnç kare dalga karakteristiği göstermektedir. Kare dalga kuplaj kaynağı ile çift yönlü halka bağlı Van der Pol osilatörlerinden oluşan sinir ağındaki parametrelerin taratılmasıyla hücrelerin eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında kuplaj kaynağı olarak harici kare dalga yerine, sinir ağının kendi doğrusal olmayan özellikleriyle elde edilen kare dalga kullanılmıştır. Bu yeni kuplaj kaynağıyla oluşturulmuş çift yönlü halka bağlı Van der Pol ağı ile eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ile öbeklenme deseni elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde kuplaj kaynağı olarak sinir ağının kendi doğrusal olmayan özellikleriyle elde edilmiş tanh kuplaj kaynağı kullanılmıştır. Senkronizasyon ve senkronizasyon desenleri bu yeni ağ için de incelenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde Van-der Pol osilatörü yerine Hindmarsh-Rose sinir hücresi modeli kullanılmıştır. Kuplaj kaynağı, hücrenin kendi doğrusal olmayan özelliklerinden elde edilen tanh modelidir. Bu bölümde kullanılan halka bağ tek yönlüdür. Hücreler sadece kendisinden sonraki hücrelerden etkilenecek şekilde bağlanmışlardır. Tek yönlü halka bağlı Hindmarsh-Rose ağı parametreleriyle yapılan sayısal analizle senkronizasyonlar incelenmiş ve çeşitli desenler elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın beşinci ve son bölümünde tanh bağıyla çift yönlü halka bağlı AdEx ağı için eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları incelenmiştir.

4.1 Harici Kare Darbe Kuplaj Kaynağı ile Halka Bağlı Van Der Pol Ağı

Bu bölüm tez konusunun oluşturulması ve neler yapılabileceği ile ilgili bir adım niteliğindedir. Harici kare dalga kuplaj kaynağı ile bağlanmış halka bağlı N osilatör

için genel normalize sistem eşitlikleri aşağıdaki gibidir. Bu eşitliklerdeki $\Gamma(T)$ denklemi normalize edilmiş kare dalga karakteristiğidir.

$$\frac{dx_k}{d\tau} = \varepsilon x_k (1 - x_k^2) - (y_{ak} + y_{bk}) \quad (4.1)$$

$$\frac{dy_{ak}}{d\tau} = \frac{1}{2} x_k - \eta y_{ak} - \Gamma(\tau)(y_{ak} + y_{b(k-1)}) \quad (4.2)$$

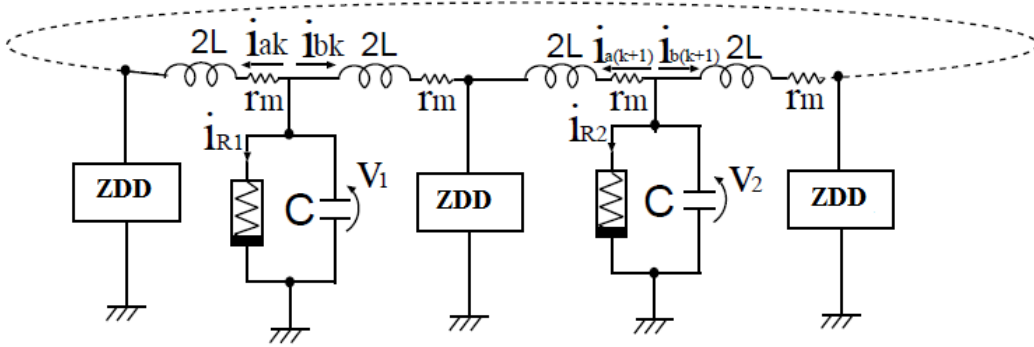
$$\frac{dy_{bk}}{d\tau} = \frac{1}{2} x_k - \eta y_{bk} - \Gamma(\tau)(y_{a(k+1)} + y_b) \quad (4.3)$$

$$\Gamma(\tau) = -g \cdot \text{sign}(\sin(w \cdot t)) \quad (4.4)$$

Halka şeklindeki bağlantının tamamlanması için birinci ve sonuncu hücreler birbirlerine (4.5) ve (4.6) eşitliklerindeki gibi bağlanmışlardır.

$$y_{b(0)} = y_{bN} \quad (4.5)$$

$$y_{a(N+1)} = y_{a0} \quad (4.6)$$

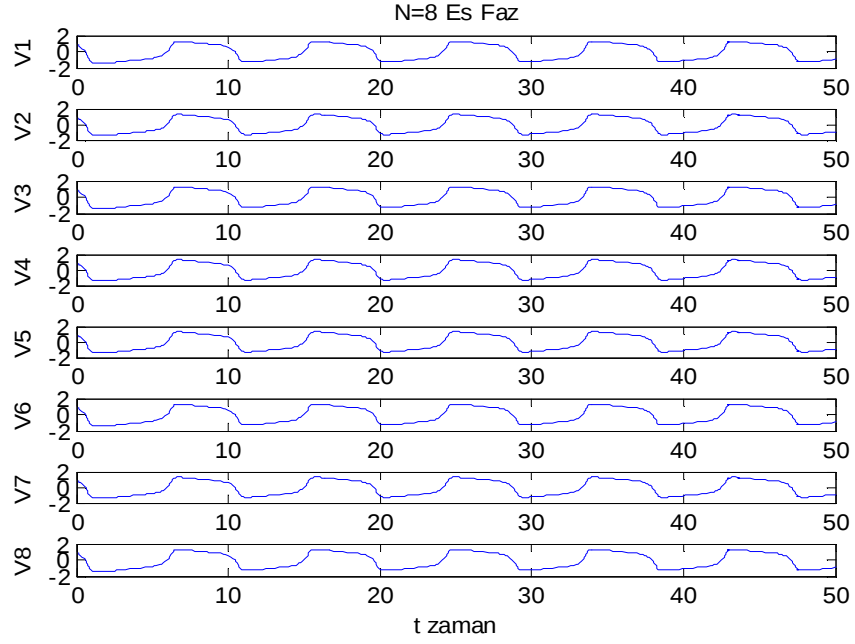


Şekil 4.1 : Harici kare darbe kuplaj kaynağı ile halka bağlı osilatör ağı [5].

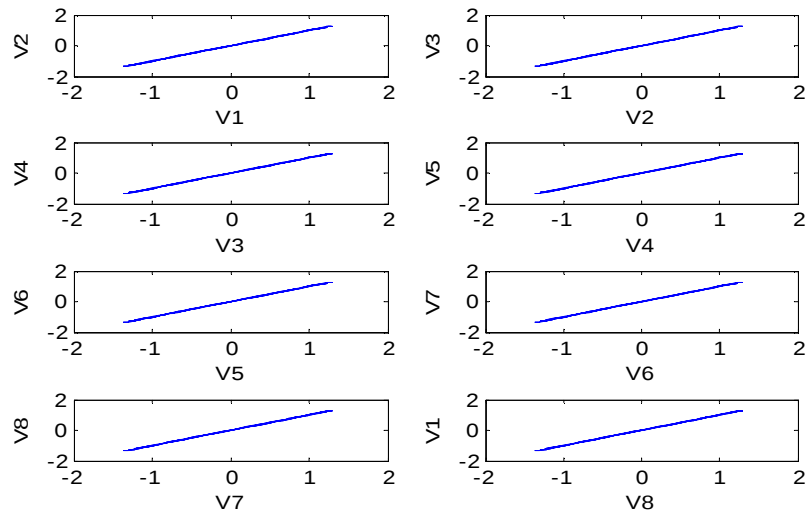
Kaynak [5]'ten alınmış olan şekil 4.1'de, kuplaj kaynağıyla zamanla değişen direnç olan halka bağlı osilatör ağı gösterilmektedir. Harici kare dalga, sistemdeki doğrusal olmayan özelliklerden elde edilen kare dalga tanjant hiperbolik olarak değiştirilip senkronizasyon ve senkronizasyon desenleri incelenmiştir.

Kaynak [5]'teki makalede eş-faz karakteristiği için belirlenen değerler $N=14$, $\varepsilon=2.6$, $w=1.37$, $\gamma=0.2$, $\eta=0.01$ olarak belirlenmiştir. Bu makale doğrultusunda yapılan çalışmada $\varepsilon=2.6$, $w=1.37$, $\eta=0.01$, $\gamma=0.05$ değerleriyle eş-faz karakteristiği elde

edilmiştir. Şekil 4.2’de 8 hücreli Van der Pol ağından elde edilmiş eş-faz karakteristiği gösterilmektedir. Şekil 4.3’te ise komşu hücrelerin birbirlerine göre durumları çizdirilerek faz farkları gözlenmiştir. Burada komşu hücreler arasındaki faz farkı sıfır derecedir. Eş faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=1.0$ $y_{a1}=1.0$ $y_{b1}=1.0$ $x_2=1.0$ $y_{a2}=1.0$ $y_{b2}=1.0$ $x_3=1.0$ $y_{a3}=1.0$ $y_{b3}=1.0$ $x_4=1.0$ $y_{a4}=1.0$ $y_{b4}=1.0$ $x_5=1.0$ $y_{a5}=1.0$ $y_{b5}=1.0$ $x_6=1.0$ $y_{a6}=1.0$ $y_{b6}=1.0$ $x_7=1.0$ $y_{a7}=1.0$ $y_{b7}=1.0$ $x_8=1.0$ $y_{a8}=1.0$ $y_{b8}=1.0$.



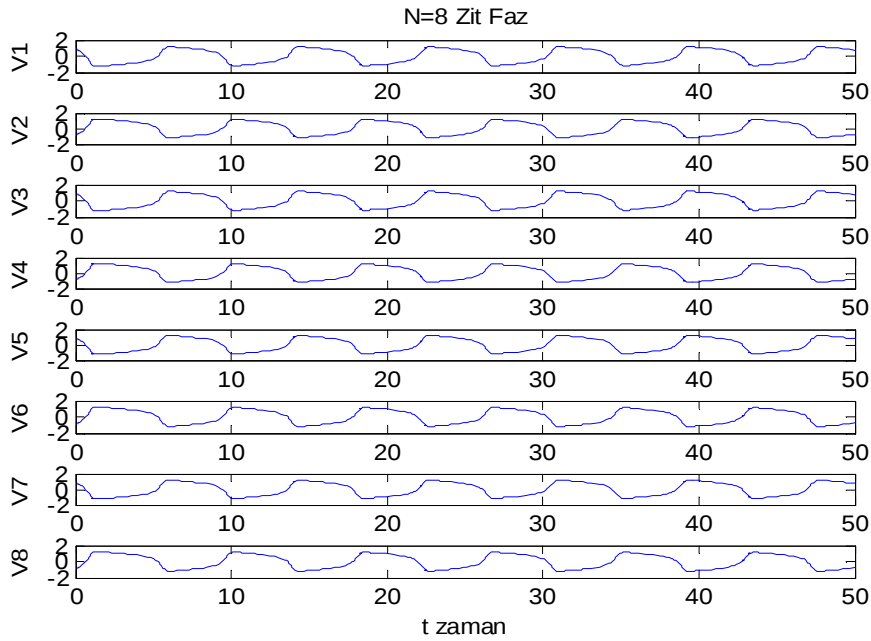
Şekil 4.2 : Eş-faz karakteristiği.



Şekil 4.3 : Eş-faz, komşu hücrelerin-faz farkı sıfırdır.

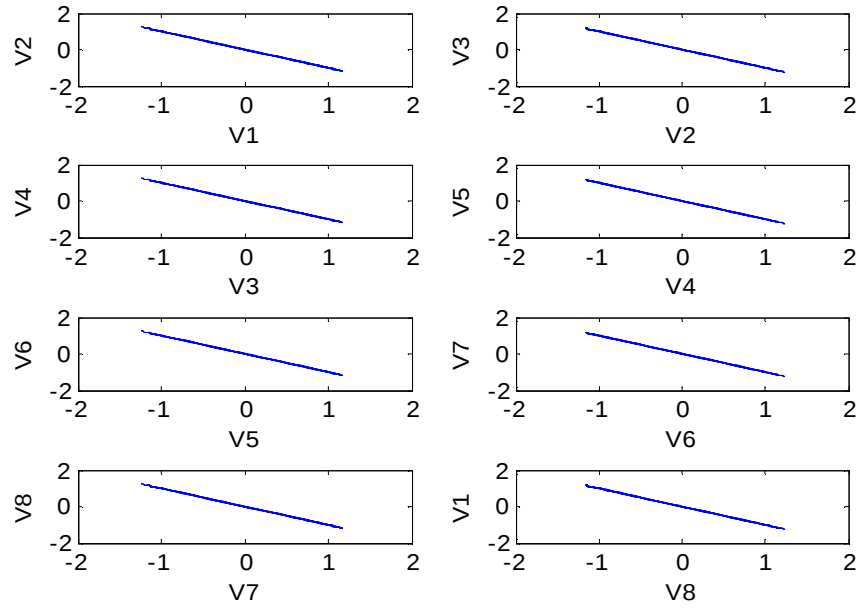
Başlangıç koşullarının değiştirilmesiyle zıt-faz karakteristiği elde edilmektedir. Burada $\gamma = 0.01$ olarak alınmıştır. Şekil 4.4'te 8 tane hücreden oluşmuş Van der Pol ağı için elde edilen zıt-faz karakteristiği gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere zıt-faz karakteristiğinde komşu iki hücre birbirlerinden 180 derece kadar farklı hareket etmektedirler. Zıt faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=1.0$ $y_{a1}=1.0$ $y_{b1}=1.0$ $x_2=-1.0$ $y_{a2}=-1.0$ $y_{b2}=-1.0$ $x_3=1.0$ $y_{a3}=1.0$ $y_{b3}=1.0$ $x_4=-1.0$ $y_{a4}=-1.0$ $y_{b4}=-1.0$ $x_5=1.0$ $y_{a5}=1.0$ $y_{b5}=1.0$ $x_6=-1.0$ $y_{a6}=-1.0$ $y_{b6}=-1.0$ $x_7=1.0$ $y_{a7}=1.0$ $y_{b7}=1.0$ $x_8=-1.0$ $y_{a8}=-1.0$ $y_{b8}=-1.0$.

Şekil 4.5'te komşu hücrelerin birbirlerine göre çizdirilmesiyle faz farkı grafiği gözlenmektedir. Burada komşu hücreler arasındaki faz farkının 180 derece olduğu gözlenmektedir.

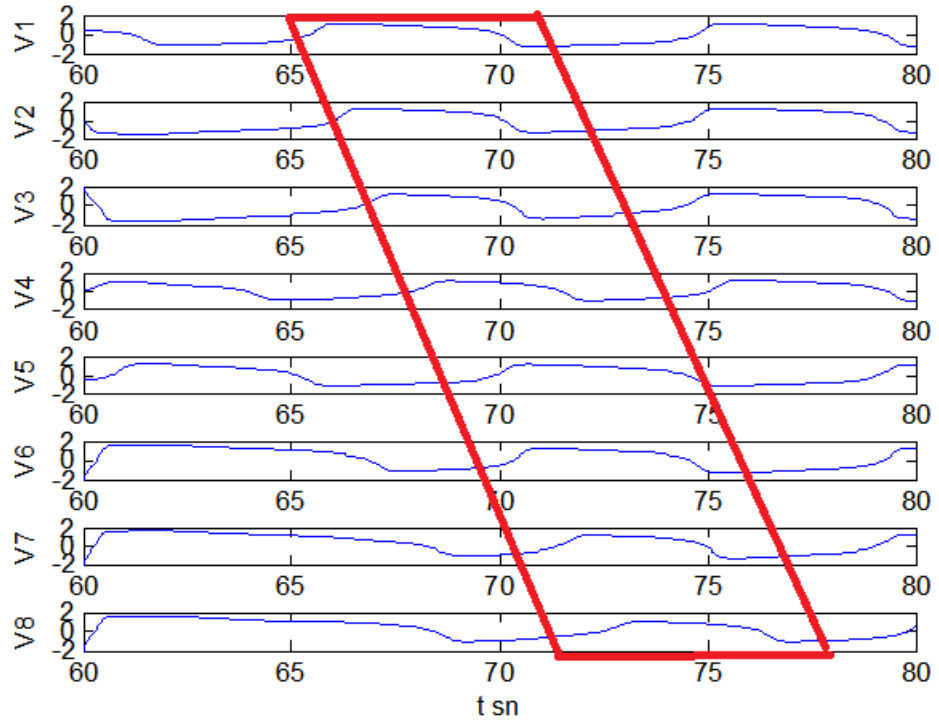


Şekil 4.4 : Zıt-faz karakteristiği.

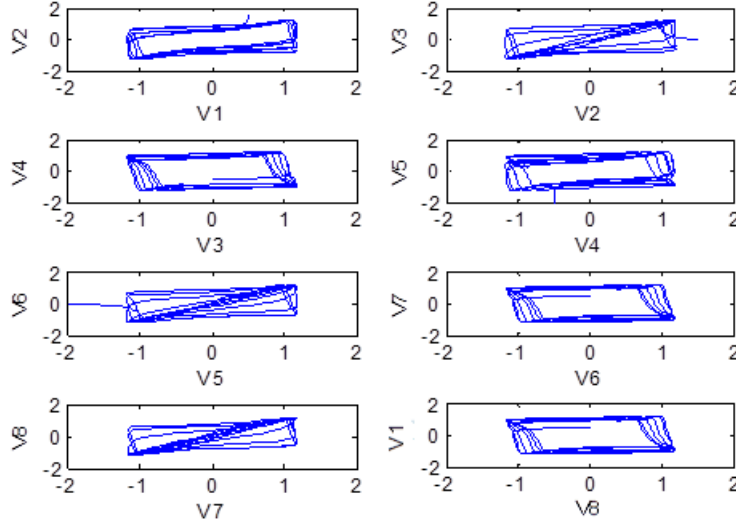
Ağ denklemlerinin başlangıç koşullarının değiştirilmesiyle Şekil 4.6'daki gibi 7 hücre için n-faz senkronizasyonu gözlenmektedir. Burada komşu iki hücre arasındaki faz farkı $2\pi/N$ kadar olacak şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.7'de ise komşu hücrelerin-faz farkı gözlenmektedir. N faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=0.5$ $y_{a1}=0.5$ $y_{b1}=0.5$ $x_2=0$ $y_{a2}=2.0$ $y_{b2}=2.0$ $x_3=2.0$ $y_{a3}=2.0$ $y_{b3}=2.5$ $x_4=0$ $y_{a4}=0$ $y_{b4}=-1.0$ $x_5=-0.5$ $y_{a5}=-0.5$ $y_{b5}=-0.5$ $x_6=-2.0$ $y_{a6}=-3.0$ $y_{b6}=-2.0$ $x_7=-2.0$ $y_{a7}=-2.0$ $y_{b7}=-3.6$ $x_8=-2.0$ $y_{a8}=-2.0$ $y_{b8}=-3.5$.



Şekil 4.5 : Zıt-faz, komşu hücrelerin-faz farkı 180 derecedir.



Şekil 4.6 : N-faz karakteristiği.



Şekil 4.7 : N-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.

4.2 Kare Dalga Kuplaj Kaynağı İle Halka Bağlı Van Der Pol Ağı

Bu bölümde sistemin doğrusal olmayan özellikleri ile elde edilmiş kare dalga eşitlik (4.10) ile ifade edilerek kuplaj kaynağı olarak kullanılmıştır. Model denklemleri aşağıdaki gibidir. Dikkat edilirse bir önceki bölüme göre sadece kuplaj kaynağı değiştirilmiştir.

$$\frac{dx_k}{d\tau} = \varepsilon x_k (1 - x_k^2) - (y_{ak} + y_{bk}) \quad (4.7)$$

$$\frac{dy_{ak}}{d\tau} = \frac{1}{2} x_k - \eta y_{ak} - \Gamma_k(\tau)(y_{ak} + y_{b(k-1)}) \quad (4.8)$$

$$\frac{dy_{bk}}{d\tau} = \frac{1}{2} x_k - \eta y_{bk} - \Gamma_{k+1}(\tau)(y_{a(k+1)} + y_b) \quad (4.9)$$

$$\Gamma_k(\tau) = -\gamma \text{sign}(y_{ak} + y_{b(k-1)}) \quad (4.10)$$

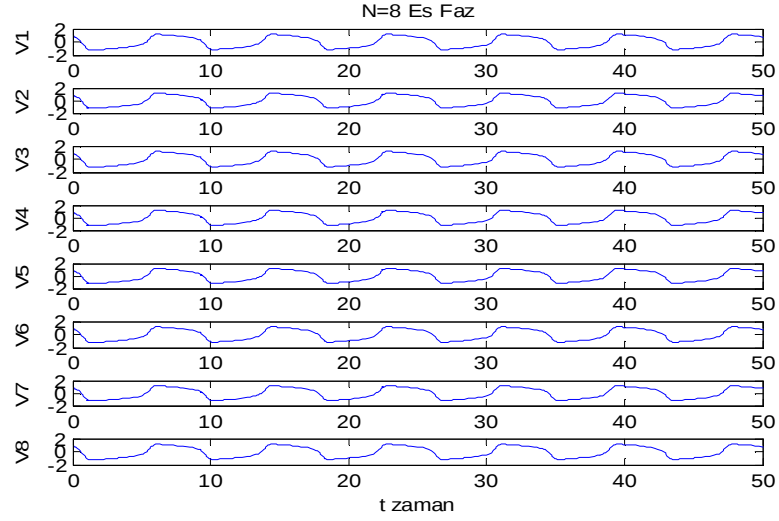
Halka bağlantının tamamlanması için (4.11) ve (4.12) eşitlikleri kullanılmıştır.

$$y_{b(0)} = y_{bN} \quad (4.11)$$

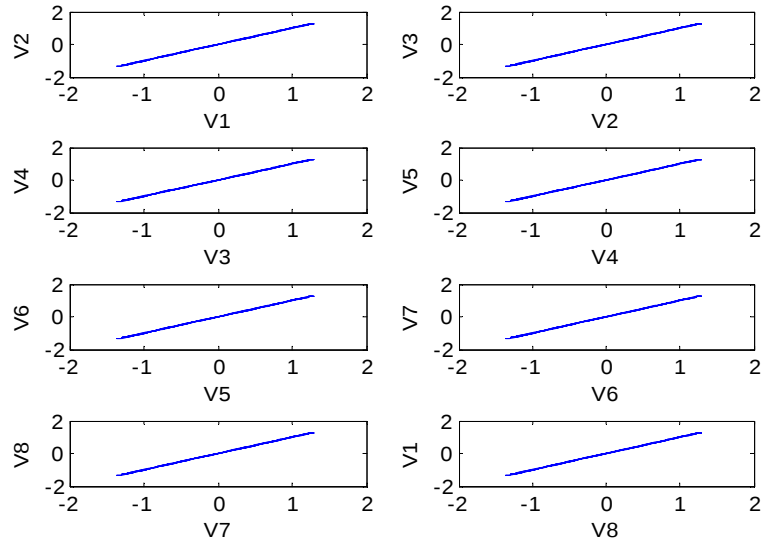
$$y_{a(N+1)} = y_{a0} \quad (4.12)$$

Eş-faz karakteristiği hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için $\varepsilon=2.6$, $w=1.37$, $\gamma=0.01$, $\eta=0.01$ değerleri ile elde edilmiştir. Şekil 4.8’de çift sayıda hücre için elde edilmiş olan eş-faz karakteristiği gözlenmektedir. Şekil 4.9’da ise komşu hücrelerin birbirleriyle faz farkı gösterilmektedir. Eş faz için kullanılan başlangıç değerleri

sırasıyla şu şekildedir; $x_1=1.0$ $y_{a1}=1.0$ $y_{b1}=1.0$ $x_2=1.0$ $y_{a2}=1.0$ $y_{b2}=1.0$ $x_3=1.0$ $y_{a3}=1.0$ $y_{b3}=1.0$ $x_4=1.0$ $y_{a4}=1.0$ $y_{b4}=1.0$ $x_5=1.0$ $y_{a5}=1.0$ $y_{b5}=1.0$ $x_6=1.0$ $y_{a6}=1.0$ $y_{b6}=1.0$ $x_7=1.0$ $y_{a7}=1.0$ $y_{b7}=1.0$ $x_8=1.0$ $y_{a8}=1.0$ $y_{b8}=1.0$.



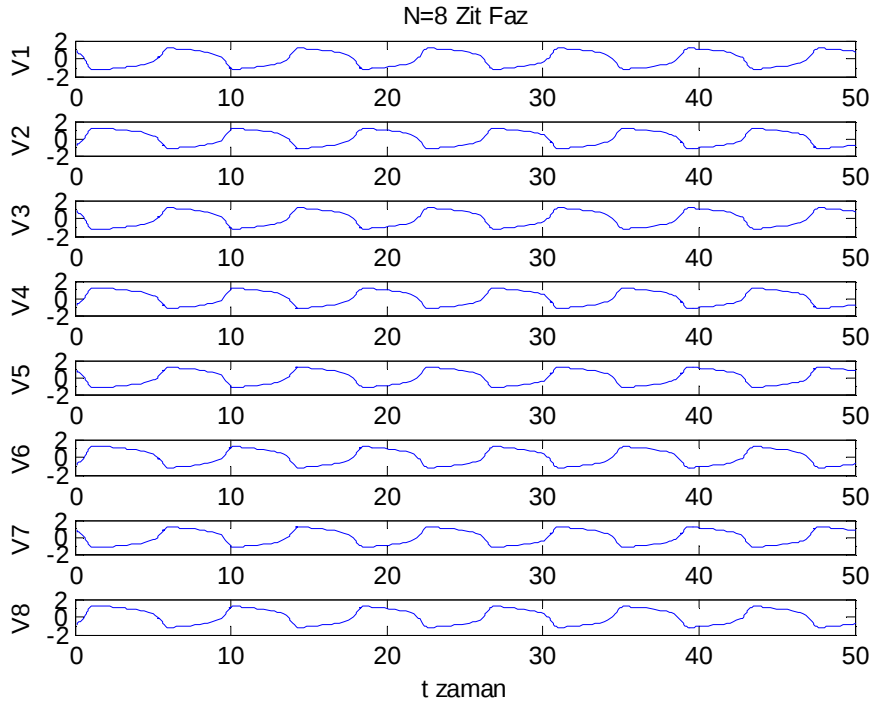
Şekil 4.8 : Eş-faz karakteristiği.



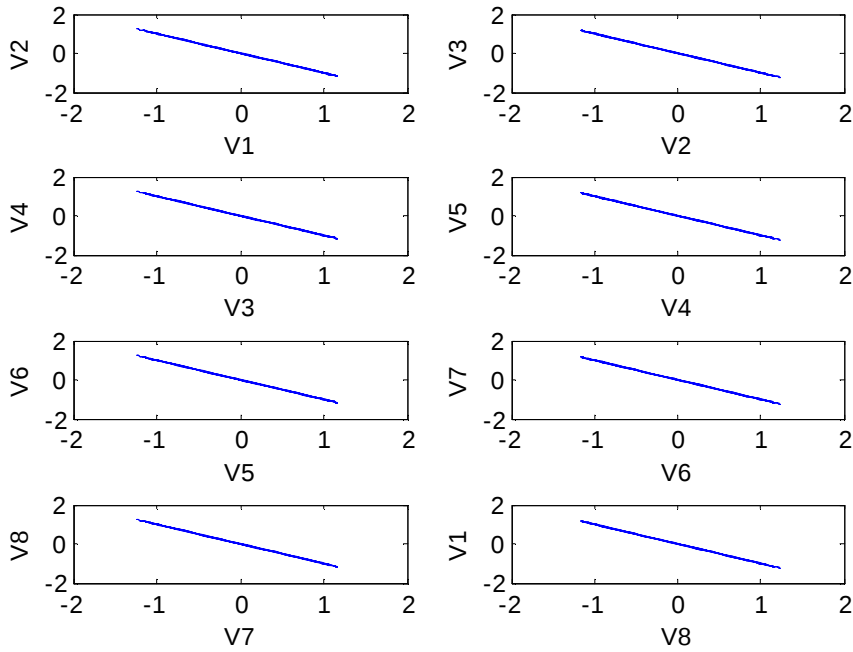
Şekil 4.9 : Eş-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.

Eş-faz parametreleri aynen kullanılıp başlangıç koşulları değiştirildiğinde hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için zıt-faz karakteristiği elde edilmektedir. Şekil 4.10'da zıt-faz karakteristiği çift sayıda hücre için gösterilmektedir. Şekil 4.11'de komşu hücreler birbirlerine göre çizdirilerek aralarında 180 derecelik faz farkı olduğu gösterilmiştir. Zıt faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=1.0$ $y_{a1}=1.0$ $y_{b1}=1.0$ $x_2=-1.0$ $y_{a2}=-1.0$ $y_{b2}=-1.0$ $x_3=1.0$ $y_{a3}=1.0$ $y_{b3}=1.0$

$x_4=-1.0$ $y_{a4}=-1.0$ $y_{b4}=-1.0$ $x_5=1.0$ $y_{a5}=1.0$ $y_{b5}=1.0$ $x_6=-1.0$ $y_{a6}=-1.0$ $y_{b6}=-1.0$ $x_7=1.0$
 $y_{a7}=1.0$ $y_{b7}=1.0$ $x_8=-1.0$ $y_{a8}=-1.0$ $y_{b8}=-1.0$.

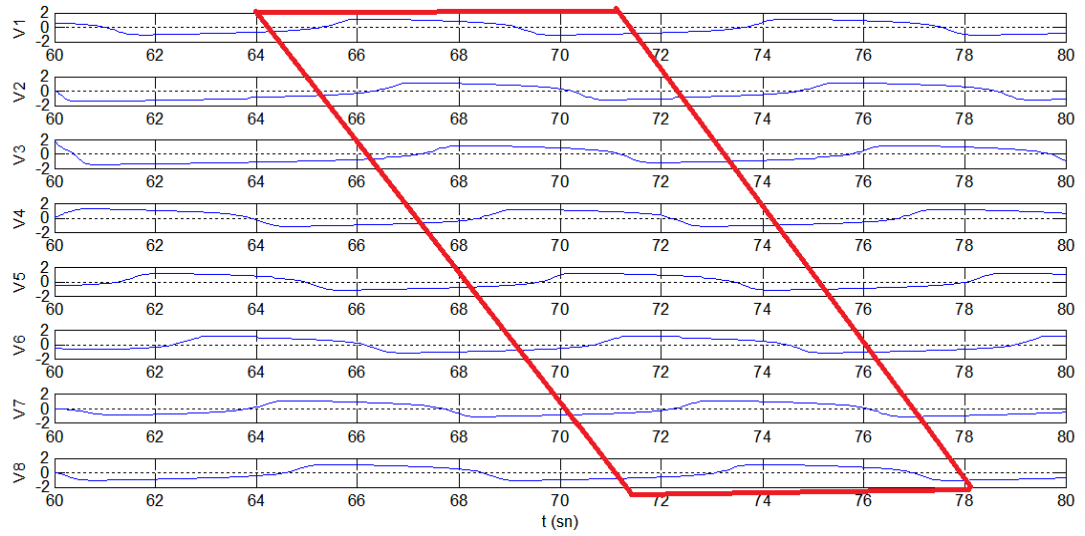


Şekil 4.10 : Zıt-faz karakteristiği.

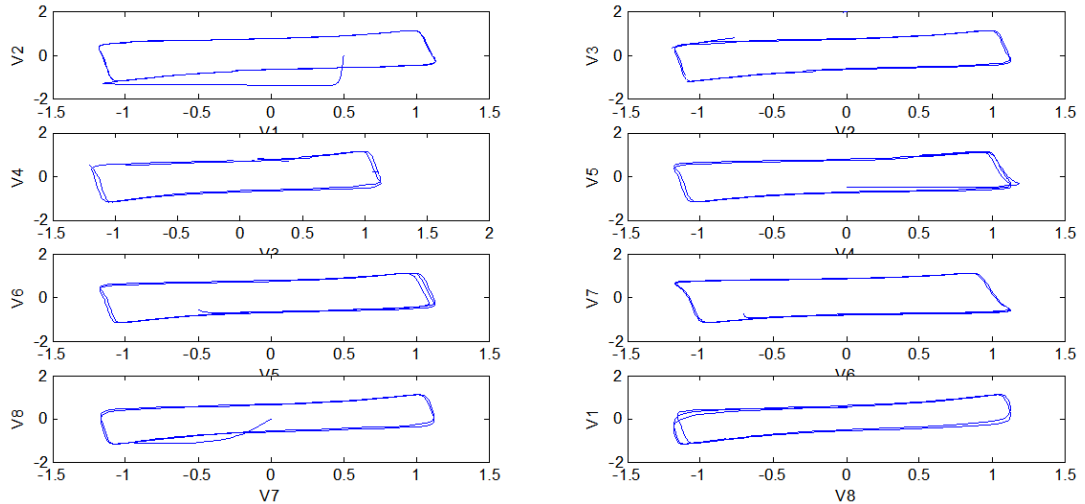


Şekil 4.11 : Zıt-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.

Tıpkı zıt-faz karakteristiğinde olduğu gibi başlangıç koşullarının uygun seçilmesiyle hem çift sayıda hem de tek sayıda sinir hücresiyle oluşturulmuş halka bağlı modelde n-faz karakteristiği gözlenmektedir. Şekil 4.12’de 8 tane hücrenin n-faz karakteristiğinde oldukları gözlenmektedir. Komşu iki hücre arasındaki faz farkı $2\pi/N$ kadardır. Şekil 4.13’te komşu hücrelerin faz farkı çizilmiştir. N faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=0.5$ $y_{a1}=0.5$ $y_{b1}=0.5$ $x_2=0$ $y_{a2}=2.0$ $y_{b2}=2.0$ $x_3=2.0$ $y_{a3}=2.0$ $y_{b3}=2.5$ $x_4=0$ $y_{a4}=-0.5$ $y_{b4}=-1.5$ $x_5=-0.5$ $y_{a5}=-0.5$ $y_{b5}=-0.5$ $x_6=-0.5$ $y_{a6}=0$ $y_{b6}=-0.5$ $x_7=0$ $y_{a7}=0.2$ $y_{b7}=0.2$ $x_8=0$ $y_{a8}=0$ $y_{b8}=1.6$.



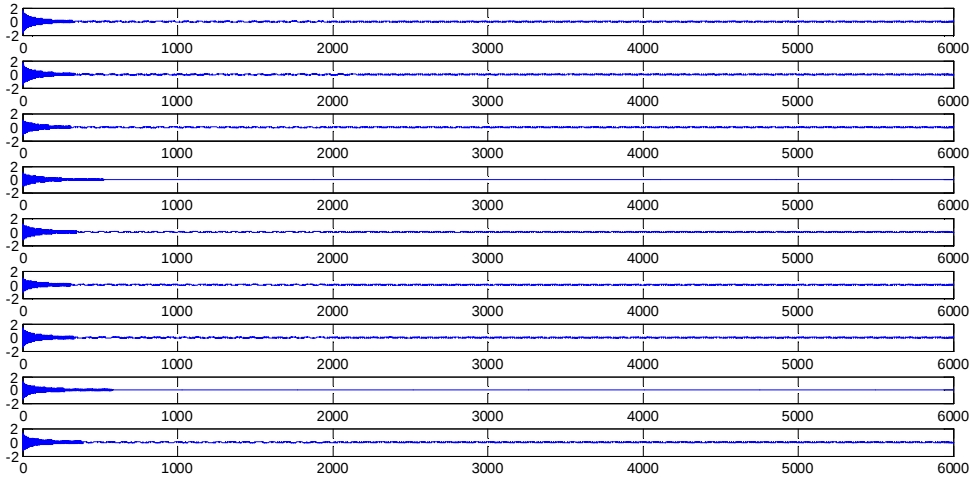
Şekil 4.12 : N-faz karakteristiği.



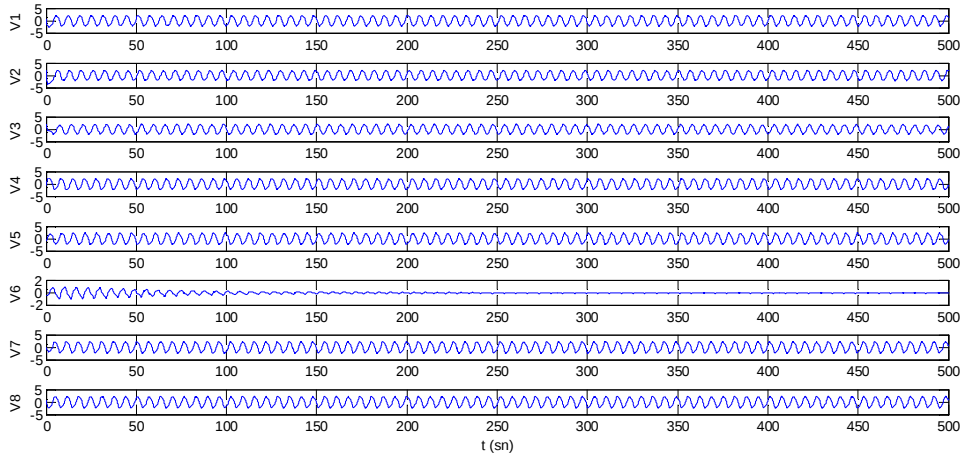
Şekil 4.13 : N-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.

Bu bölümdeki desenler, ilk bölümdeki gibi, komşu iki hücrenin toplamı şeklinde değildir. X eksenı zaman, y eksenı hücrenin gerilimini göstermektedir. Burada ε ve γ parametreleri taratılarak aşğıdaki desenler elde edilmiştir.

Şekil 4.14'te sönümlenmiş dalga deseni $\varepsilon=0.03$ $\gamma=0.02$ değerleri için, Şekil 4.15'te öbeklenme karakteristiğı $\varepsilon=2.30$ $\gamma=0.075$ değerleri için gözlenmiştir. Tüm şekillerde aynı başlangıç koşulları kullanılmıştır. Fakat bu başlangıç koşulları rastgele seçilmişlerdir.



Şekil 4.14 : Sönümlenmiş dalga deseni $\varepsilon=0.03$ ve $\gamma=0.02$.



Şekil 4.15 : Öbeklenme deseni $\varepsilon=0.75$ ve $\gamma=0.03$.

4.3 Tanh Kuplaj kaynağı İle Halka Bağlı Van Der Pol Ağı

Bu bölümde bir önceki bölümdeki kuplaj kaynağı yerine sinir ağının kendi doğrusal olmayan özelliklerine bağlı tanjant hiperbolik ile elde edilmiş senkronizasyonlar tek ve çift sayıdaki halka bağlı sinir hücresi modelleri için incelenmiştir. Bu bölümdeki halka modeli önceki bölümler gibi çift yönlü halka modelidir.

Denklemleri ve kuplaj kaynağı aşağıdaki gibidir. Burada sadece kuplaj kaynağının yani eşitlik (4.16)'nın değiştiğini unutmamak gerekir.

$$\frac{dx_k}{d\tau} = \varepsilon x_k(1 - x_k^2) - (y_{ak} + y_{bk}) \quad (4.13)$$

$$\frac{dy_{ak}}{d\tau} = \frac{1}{2} x_k - \eta y_{ak} - \Gamma_k(\tau)(y_{ak} + y_{b(k-1)}) \quad (4.14)$$

$$\frac{dy_{bk}}{d\tau} = \frac{1}{2} x_k - \eta y_{bk} - \Gamma_{k+1}(\tau)(y_{a(k+1)} + y_b) \quad (4.15)$$

$$\Gamma_k(\tau) = -\gamma \tanh(y_{ak} + y_{b(k-1)}) \quad (4.16)$$

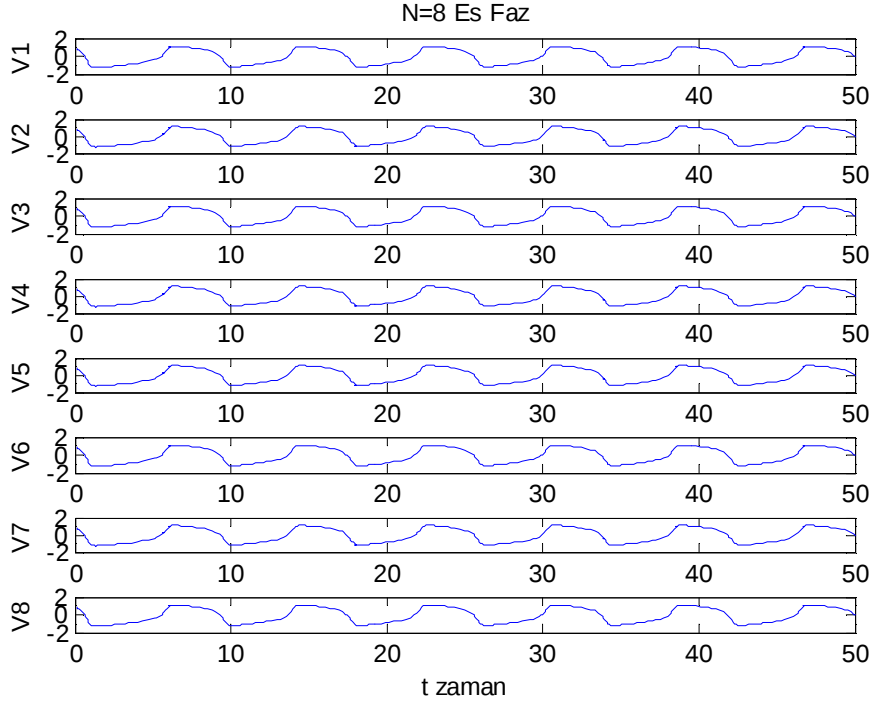
Halkain tamamlanması için (4.17) ve (4.18) eşitliklerinin uygulanmıştır.

$$y_{b(0)} = y_{bN} \quad (4.17)$$

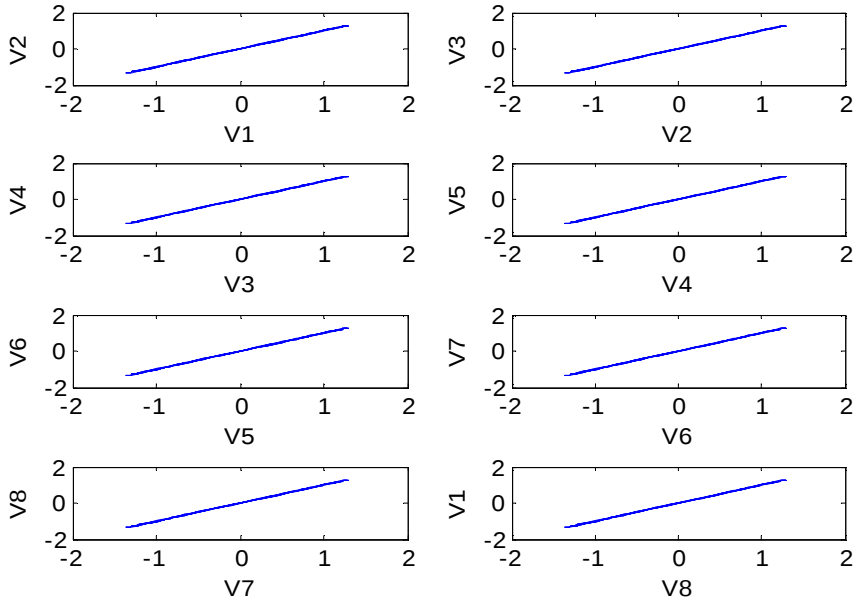
$$y_{a(N+1)} = y_{a0} \quad (4.18)$$

Bu bölümde de bir önceki bölümlerdeki gibi uygun parametre değerleri ve uygun başlangıç koşullarıyla senkronizasyonlar elde edilmektedir. Şekil 4.16'da 8 hücre için her hücrenin eş-faz karakteristiği gösterilmektedir. Şekil 4.17'de ise faz farkları gösterilmektedir. Hücrelerin birbirleriyle faz farkı sıfırdır. Eş faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=1.0$ $y_{a1}=1.0$ $y_{b1}=1.0$ $x_2=1.0$ $y_{a2}=1.0$ $y_{b2}=1.0$ $x_3=1.0$ $y_{a3}=1.0$ $y_{b3}=1.0$ $x_4=1.0$ $y_{a4}=1.0$ $y_{b4}=1.0$ $x_5=1.0$ $y_{a5}=1.0$ $y_{b5}=1.0$ $x_6=1.0$ $y_{a6}=1.0$ $y_{b6}=1.0$ $x_7=1.0$ $y_{a7}=1.0$ $y_{b7}=1.0$ $x_8=1.0$ $y_{a8}=1.0$ $y_{b8}=1.0$.

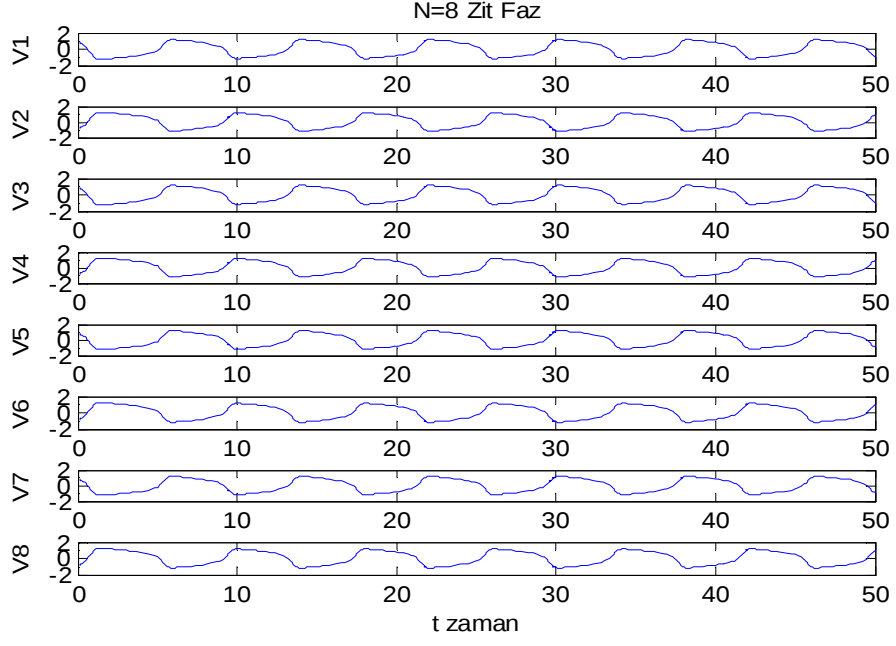
Eş-faz karakteristiğindeki parametreler aynı kalarak fonksiyonun başlangıç koşulları değiştirilerek zıt-faz karakteristiği elde edilmektedir. Zıt-faz karakteristiği 8 hücre için şekil 4.18'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.19'da ise komşu hücrelerin birbirlerine göre faz farkı grafikleri gösterilmektedir. Zıt faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir; $x_1=1.0$ $y_{a1}=1.0$ $y_{b1}=1.0$ $x_2=-1.0$ $y_{a2}=-1.0$ $y_{b2}=-1.0$ $x_3=1.0$ $y_{a3}=1.0$ $y_{b3}=1.0$ $x_4=-1.0$ $y_{a4}=-1.0$ $y_{b4}=-1.0$ $x_5=1.0$ $y_{a5}=1.0$ $y_{b5}=1.0$ $x_6=-1.0$ $y_{a6}=-1.0$ $y_{b6}=-1.0$ $x_7=1.0$ $y_{a7}=1.0$ $y_{b7}=1.0$ $x_8=-1.0$ $y_{a8}=-1.0$ $y_{b8}=-1.0$.



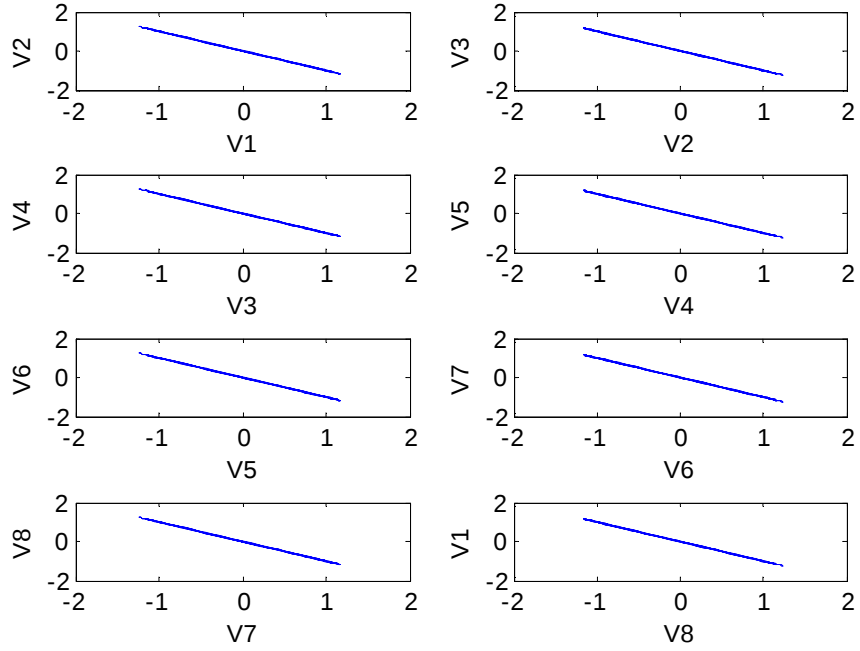
Şekil 4.16 : N=8 için eş-faz karakteristiği.



Şekil 4.17 : Eş-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.



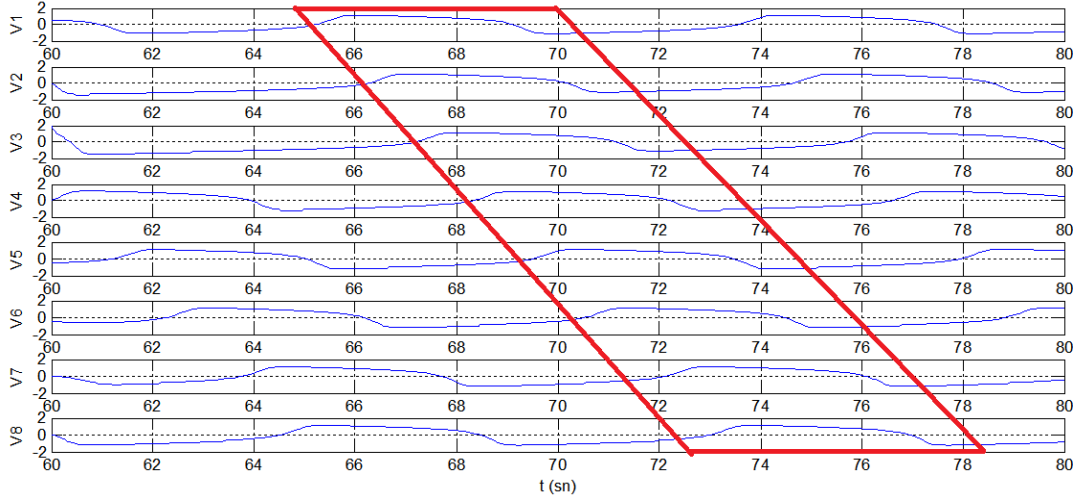
Şekil 4.18 : Zıt-faz karakteristiği.



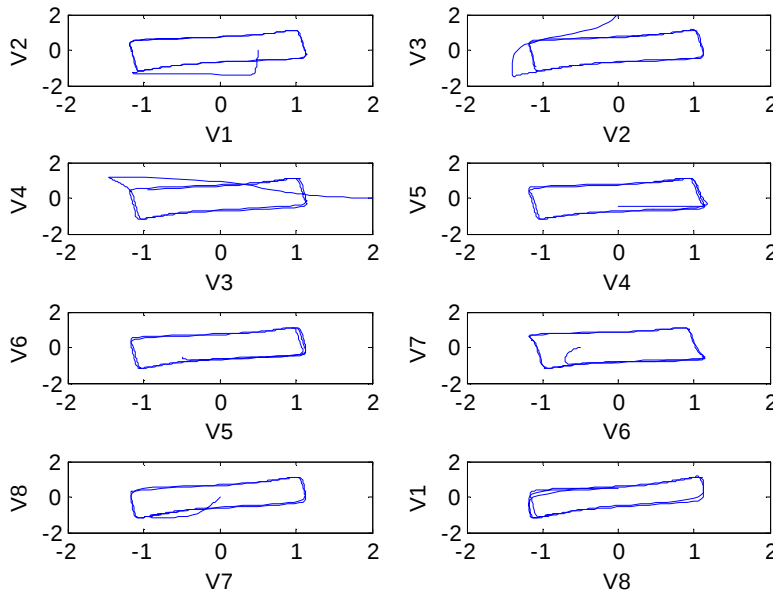
Şekil 4.19 : Zıt-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.

Tekrar başlangıç koşullarının değiştirilmesiyle n-faz karakteristiği şekil 4.20'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.21'de ise komşu hücrelerin faz farkı grafiği gözlenmektedir. N faz için kullanılan başlangıç değerleri sırasıyla şu şekildedir;

$x_1=0.5$ $y_{a1}=0.5$ $y_{b1}=0.5$ $x_2=0$ $y_{a2}=2.0$ $y_{b2}=2.0$ $x_3=2.0$ $y_{a3}=2.0$ $y_{b3}=2.5$ $x_4=0$ $y_{a4}=-0.5$
 $y_{b4}=-1.5$ $x_5=-0.5$ $y_{a5}=-0.5$ $y_{b5}=-0.5$ $x_6=-0.5$ $y_{a6}=0$ $y_{b6}=-0.5$ $x_7=0$ $y_{a7}=0.2$ $y_{b7}=0.2$ $x_8=0$
 $y_{a8}=0$ $y_{b8}=1.6$.

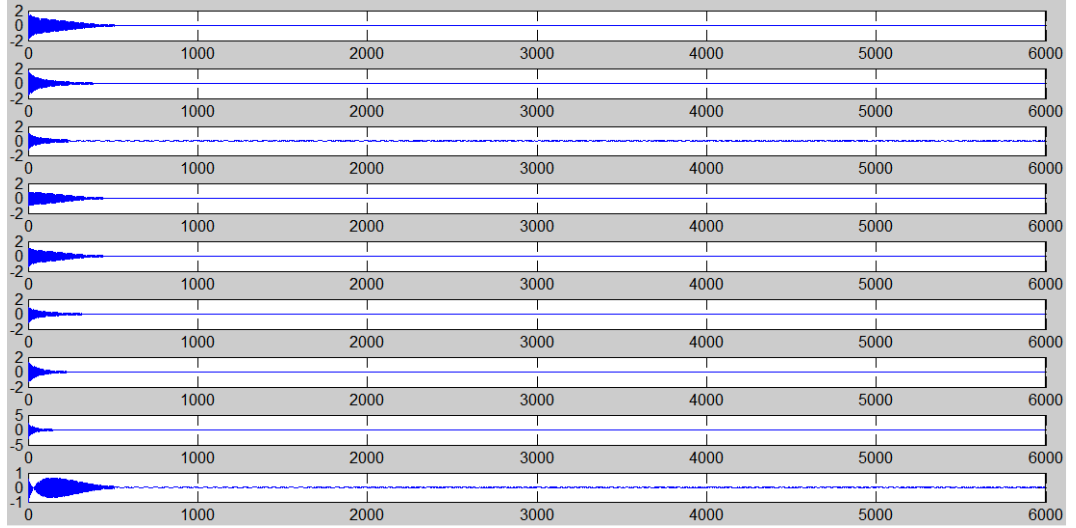


Şekil 4.20 : N=8 için n-faz karakteristiği.

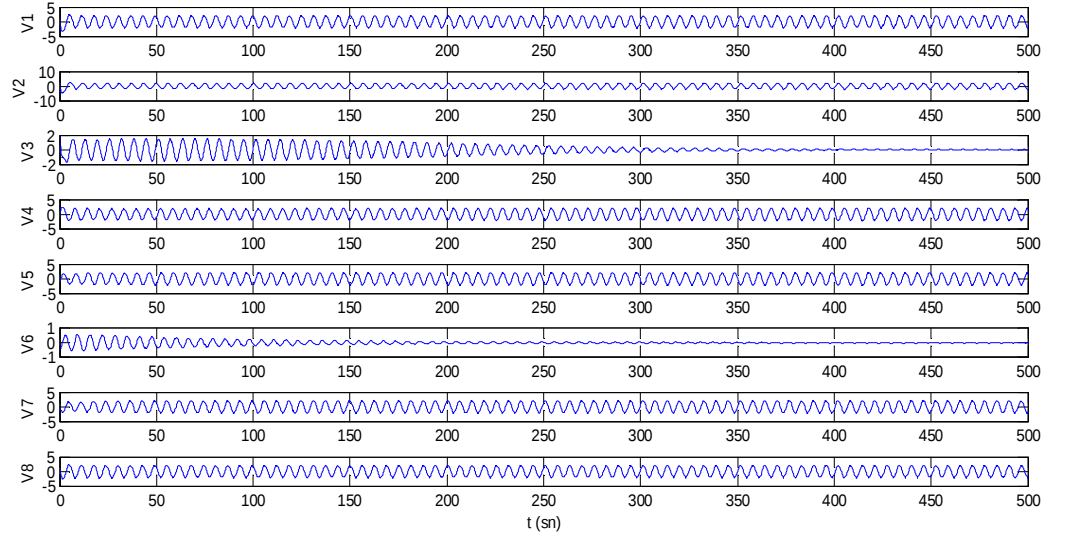


Şekil 4.21 : N-faz, komşu hücrelerin-faz farkı.

Şekil 4.22 ve 4.23 grafiklerinde başlangıç koşulları rastgele seçilmiş fakat denklem parametreleri taratılması sonucu elde edilmiş senkronizasyonlardan örnek verilmiştir. Şekil 4.22’de $\varepsilon=0.02$ ve $\gamma=0.05$ parametre değerleri için öbeklenme deseni gözlenmektedir. Şekil 4.23’de ise $\varepsilon=0.20$ ve $\gamma=0.05$ parametre değerleri için öbeklenme deseni gözlenmektedir.



Şekil 4.22 : Sönümlenmiş dalga deseni $\varepsilon=0.02$ ve $\gamma=0.050$.



Şekil 4.23 : Öbeklenme deseni $\varepsilon=0.20$ ve $\gamma=0.05$.

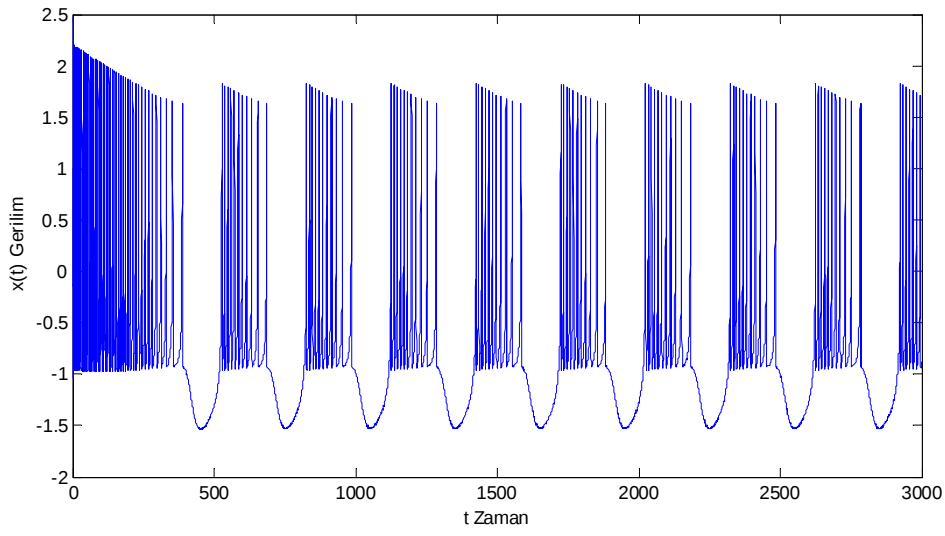
4.4 Tanh Kuplaj Kaynağı İle Halka Bağlı Hindmarsh Rose Ağı

Hindmarsh Rose sinir hücresi aşağıdaki üç eşitlikle tanımlanmaktadır. Kullanılan değerler; $a = 1$, $b = 3$, $I = 3.024$, $c = 1.01$, $d = 5.0128$, $r = 0.0021$, $s = 3.966$, ve $x_1 = 1.605$ olmak üzere alınmışlardır. Bu değerlere göre sinir hücresi karakteristiği aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekil 4.24'te $x(t)$ 'nin zamana bağlı değişimi burst karakteristiği, şekil 4.25'de $y(t)$ 'nin zamana bağlı değişimi burst karakteristiği göstermektedir.

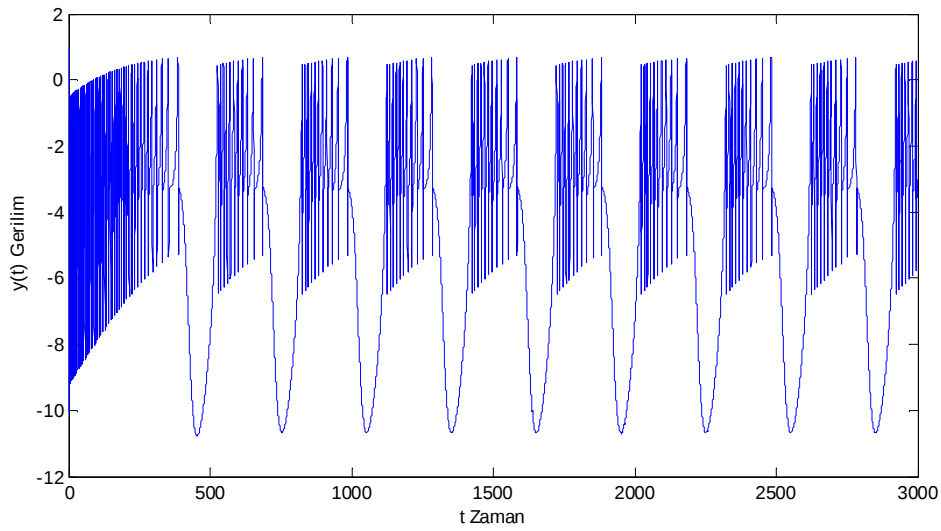
$$\frac{dx}{dt} = y - ax^3 + bx^2 - z + I \quad (4.19)$$

$$\frac{dy}{dt} = c - dx^2 - y \quad (4.20)$$

$$\frac{dz}{dt} = r(s(x - x_1) - z) \quad (4.21)$$



Şekil 4.24 : x(t) gerilim grafiği (burst karakteristiği).



Şekil 4.25 : y(t) gerilim grafiği (burst karakteristiği).

Hindmarsh Rose ile oluşturulmuş halka modelinde Van der Pol modelindeki aksine başlangıç koşulları senkronizasyonu ya da karakteristiği çok fazla etkilememektedir. Burada karakteristiği değiştiren parametre I akımıdır. Hücreler, birbirlerine (4.22) denklemindeki I parametresi üzerinden bağlanmaktadır. Bu bölümde kullanılan kuplaj kaynağının denklemi (4.23)'teki gibidir. Bu denklemden bir hücrenin hem kendisinden hem de kendisinden bir sonraki hücreden etkilendiği gözlenmektedir. Bu şekildeki bağlantı tek yönlü bağlantıdır.

$$\frac{dx_k}{dt} = y_k - ax_k^3 + bx_k^2 - z_k + I_k \quad (4.22)$$

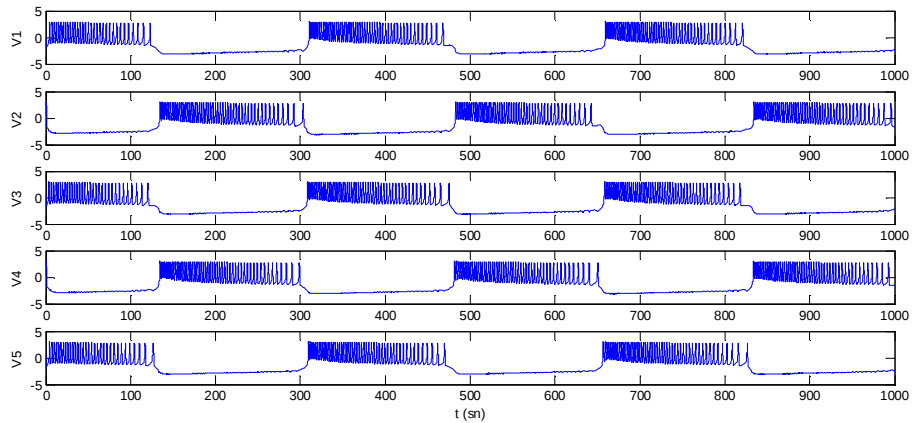
$$\frac{dy_k}{dt} = c - dx_k^2 - y_k \quad (4.23)$$

$$\frac{dz_k}{dt} = r(s(x_k - X_1) - z_k) \quad (4.24)$$

$$I_k = I_{bk} \tanh((x_k(t) - x_{k+1}(t)) * k / 2) \quad (4.25)$$

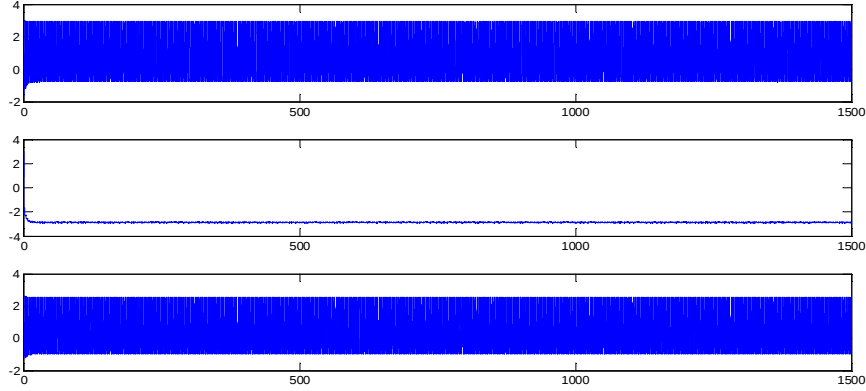
Yukarıdaki (4.25) denklemindeki indis olmayan k değeri 0.8 olarak alınmıştır. I_{bk} parametresinin değiştirilmesi ile tanh kuplaj kaynağı ile elde edilmiş halka bağlı sinir hücresi sisteminin karakteristiği değişmektedir. Bu sistem için elde edilmiş karakteristikler aşağıdaki bölümde çift sayıda hücreden oluşan sistem ve tek sayıda hücreden oluşan sistem için incelenmiştir.

Burada da halka bağlantı için $x_{N+1} = x_0$ şeklinde bağlantı yapılmıştır. Tek yönlü bağlantılı Hindmarsh Rose sinir hücresi ağında sadece çift sayıda hücre için zıt-faz karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 4.26'da $I_b = 10$ değeri için 5 tane hücreden oluşmuş ağın zıt-faz senkronizasyonu gözlenmektedir.

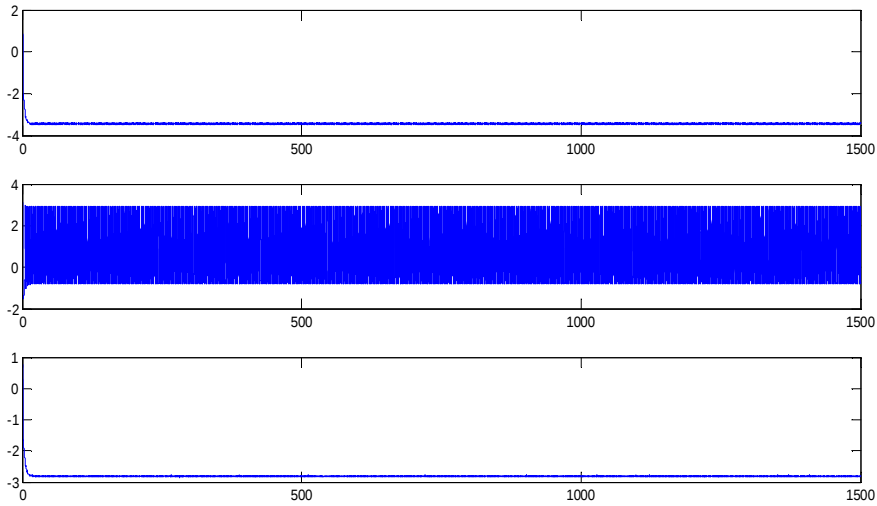


Şekil 4.26 : $I_b = 10$ için zıt-faz karakteristiği.

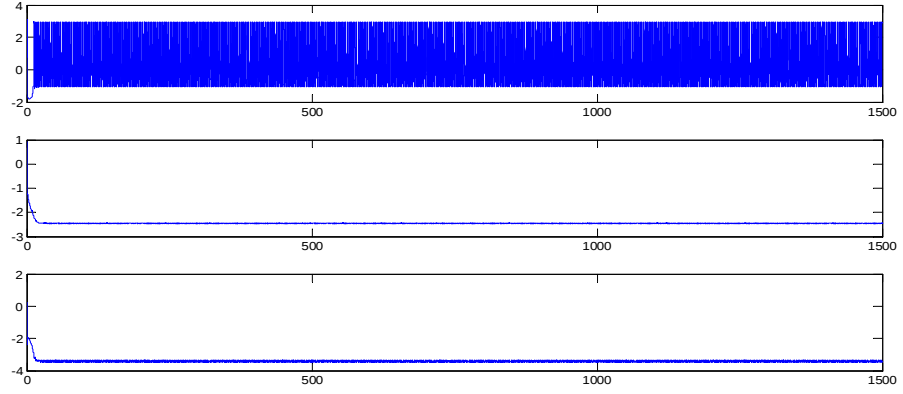
Çalışmaya kaynak [19]'daki desenlerin elde edilmesiyle devam edilmiştir. Üç tane hücre için her hücreye ait Ib değeri değiştirilerek aşağıdaki desenler elde edilmiştir. Bu yayında bir hücre susarken diğer hücrelerin çalışması ya da bir hücre çalışırken diğerlerinin çalışmaması gibi karakteristikler elde edilmeye çalışılmıştır. Bunlarla çeşitli kombinasyonlar elde edilmiştir. Aşağıda bu kombinasyonlardan 4 örnek gösterilmektedir.



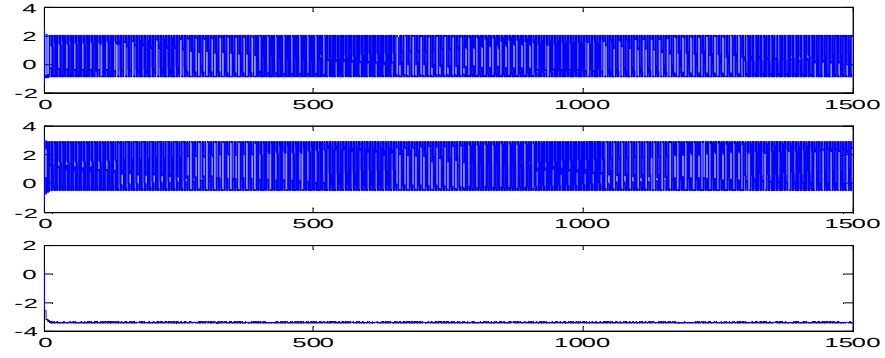
Şekil 4.27 : Öbeklenme deseni-1.



Şekil 4.28 : Öbeklenme deseni-2.



Şekil 4.29 : Öbeklenme deseni-3.



Şekil 4.30 : Öbeklenme deseni-4.

4.5 Tanh Kuplaj kaynağı İle Uyarlanabilir Üstel I&F Sinir Hücresi

Uyarlanabilir üstel I&F (AdEx) modeli, $I(t)$ akımı uygulandığında zar potansiyeli $V(t)$ 'nin gösterdiği davranışı tanımlamaktadır. Sistem aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır.

$$C_v \frac{dV_k}{dt} = -g_L(V_k - E_L) + g_L \Delta_T \exp\left(\frac{V_k - V_T}{\Delta_T}\right) + I_k - w_k \quad (4.23)$$

$$\tau_w \frac{dw_k}{dt} = a(V_k - E_L) - w_k \quad (4.27)$$

Eğer $V > 0\text{mV}$ ise sistem aşağıdaki gibi yeniden kurulur.

$$\begin{cases} V \rightarrow V_r \\ w \rightarrow w_r = w + b \end{cases} \quad (4.28)$$

Eşitlik (4.28)'den de görüldüğü üzere zar potansiyeli pozitif değerlere geçtiğinde değeri V_r yeniden kurulma değerine sabitlenmekte, w da b sabiti ile w_r yeniden kurulma değerine sabitlenmektedir. Bu nedenle adaptasyon değeri w , spike treni boyunca toplanabilirken voltaj değeri toplanmaz.

Sinir hücreleri bu bölümde de akım üzerinden birbirlerine bağlanmışlardır. Burada k . sinir hücresine ait kuplaj kaynağı denklemini (4.29) denklemi tanımlamaktadır.

$$I_k = I_b \tanh(V_{k-1} - V_{k+1}) + I_{o_k} \quad (4.29)$$

Halka modeli sağlamak için (4.30) ve (4.31) eşitlikleriyle birinci ve sonuncu sinir hücrelerine birbirlerine bağlanır.

$$V_0 = V_N \quad (4.30)$$

$$V_{N+1} = V_0 \quad (4.31)$$

Analizlerde kullanılan değerler $C_V=200$, $g_L=10$; $V_T=-50$, $E_L=-50$, $\Delta T=2$, $b=20$, $a=0.7$, $\tau_w=120$, $V_r=-44$, $V_{peak}=20$, $I_b=-150$, ve başlangıç koşulları $V_0=-70$; $w_0=0$ şeklinde belirlenmiştir. Eşitlik (4.29)'daki I_o öteleme parametresinin değiştirilmesiyle senkronizasyonlar gözlenmektedir. Çift sayıda ve tek sayıda hücre için yapılan benzetimler aşağıda verilmektedir. Hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için $I_{ok} = 0$ eklerde Şekil A.1'deki eş-faz karakteristiği gözlenmektedir. AdEx ağının kuplaj kaynağında herhangi bir dc eklenmemiş ve eş faz karakteristiği gözlenmiştir. Hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için eklerde Şekil A.2'deki gibi belli bir gecikmeden sonra zıt-faz karakteristiği gözlenmektedir. Burada tek numaralı hücreler $I_{otek}=0$, değerini alırken çift numaralı hücreler $I_{oçift}=0.01$ değerini almışlardır. Yani çift sayıdaki hücreler 0.01 kadar dc otelenmiştir. Eklerde Şekil A.3'te belli bir toparlanma sürecinden sonra N-faz karakteristiği gözlenmektedir. Fakat buradaki N-faz karakteristiği geçici bir karakteristiktir. İlerleyen zamanda kaybolan bir N-faz karakteristiği vardır. Kullanılan I_o değerleri; $I_{o1}=0$, $I_{ob2}=-0.015$, $I_{ob3}=-0.025$, $I_{ob4}=0.016$, $I_{ob5}=0.009$ şeklindedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmadaki amaç, tek sayıda ve çift sayıda sinir hücrelerinin ya da osilatörlerin birbirlerine doğrusal olmayan bağlantı modelleriyle halka şeklinde bağlanması sonucu hangi parametrelerde hangi senkronizasyon davranışlarının elde edildiğinin gösterilmesidir. Bu amaçla eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları elde edilmiştir. Bunun yanı sıra literatürde geçen ve CPG çalışmalarınca önemli senkronizasyon desenlerinin elde edilmesi de araştırmanın bir diğer önemli konusunu oluşturmuştur.

Çizelge 5.1 : Harici kare dalga ile kuple edilmiş Van der Pol ağı için kullanılan parametreler.

	ε	w	η	γ
Eş-Faz	2.6	1.37	0.01	0.01
Zıt-Faz	2.6	1.37	0.01	0.01
N-Faz	2.6	1.37	0.01	0.01
Öbeklenme	3.8	1.35	0.01	0.01

Bu çalışmada öncelikle halka bağlı Van der Pol ağındaki kuplaj kaynağı değiştirilmiştir. Sistemin parametreleri ve başlangıç koşulları değiştirilerek hem tek sayıda hem de çift sayıda hücreden oluşan Van der Pol ağı için eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonlarının hepsi elde edilmiştir. Senkronizasyonlar için kullanılan parametreler çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Sinir ağının kendi doğrusal olmayan özellikleri ile elde edilen kare dalga ile halka bağlı Van der Pol ağı için elde edilen desenlere karşılık gelen parametre değerleri çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge 5.2’deki desenler elde edilirken sistemin başlangıç koşulları rastgele seçilmiştir. Bu bağlantıda elde edilen eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ise, ε ve γ değerleri sabit tutularak sistemin başlangıç koşullarının değiştirilmesiyle elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kare dalga ile kuple edilmiş Van der Pol ağı desen parametreleri.

	ε	γ
Sönümlenmiş Dalga Deseni	0.03	0.02
Öbeklenme Deseni	0.75	0.03

Sinir ağının kendi doğrusal olmayan özelliklerinden elde edilen tanh ile halka bağlı Van der Pol ağı için elde edilen desenlere karşılık gelen parametre değerleri çizelge 5.3'te verilmiştir. Sistemin başlangıç koşulları rastgele seçilmiştir. Bu bağlantıda elde edilen eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları ise, ε ve γ değerleri sabit tutularak sistemin başlangıç koşullarının değiştirilmesiyle elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 : Tanh ile kuple edilmiş Van der Pol ağı desen parametreleri.

	ε	γ
Sönümlenmiş Dalga Deseni	0.02	0.050
Öbeklenme Deseni	0.20	0.050

Hindmarsh Rose sinir hücresi ile tek yönlü halka bağlantı yapılmıştır. Tek yönlü halka bağlantıda çift sayıda hücre için zıt-faz senkronizasyonu $I_b = 10$ değeri için elde edilmiştir. Hindmarsh Rose sinir hücresi diferansiyel denklem sisteminin başlangıç koşullarının değişmesinden çok fazla etkilenmemektedir. 3 tane Hindmarsh Rose sinir hücresiyle yapılan parametrik incelemelerde bir hücrenin susup diğer ikisinin çalışması ve bir hücrenin çalışması diğer ikisinin susması gibi çeşitli kombinasyonlar gözlenmiştir. Bu desenlerin halka bağlı gerçek bir sinir hücresi modeli ile kurulmuş yapıda gözlenmesi oldukça önemlidir.

DeneySEL bir sinir hücresi modeli olan I&F sinir hücresinden yakın zamanlarda türetilmiş uyarlanabilir üstel I&F sinir hücresi (AdEx) ile yapılan çalışmadaki parametre ve senkronizasyon eşleştirmesi Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Buradaki parametrelerle eş-faz, zıt-faz ve n-faz senkronizasyonları hem tek sayıda hem de çift sayıda hücre için elde edilmiştir.

Çizelge 5.4 : Tanh ile kuple edilmiş AdEx ağı desen parametreleri.

	I_{b1}	I_{b2}	I_{b3}	I_{b4}	I_{b5}
Eş-faz Senk.	0	0	0	0	0
Zıt-faz Senk.	0	0	0.01	0	0.01
N-faz Senk.	0	-0.015	-0.025	0.016	0.009

5.1 Çalışmanın Devam Ettirilebileceği Alanlar

Bu çalışmada Van der Pol osilatörleri için üç tip kuplaj kaynağı denenmiş daha sonra kullanılan üçüncü kuplaj kaynağıyla Van der Pol osilatörü yerine farklı sinir hücreleri kullanılarak senkronizasyonlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar AdEx ve Hindmarsh Rose ile yapılmıştır. Daha farklı sinir hücreleri ile çift yönlü

halka bağ modeli ve tanjat hiperbolik kuplaj kaynağı kullanılarak bu senkronizasyonlar elde edilebilir.

Hindmarsh Rose hücresi için bu çalışmada incelenen yapı tek yönlü halka modelidir. Hindmarsh Rose sinir hücresi için çift yönlü halka bağ modeli ile senkronizasyonlar incelenebilir.

Daha farklı bağlantı modelleriyle çift yönlü halka bağ modeli farklı sinir hücreleriyle sayısal olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

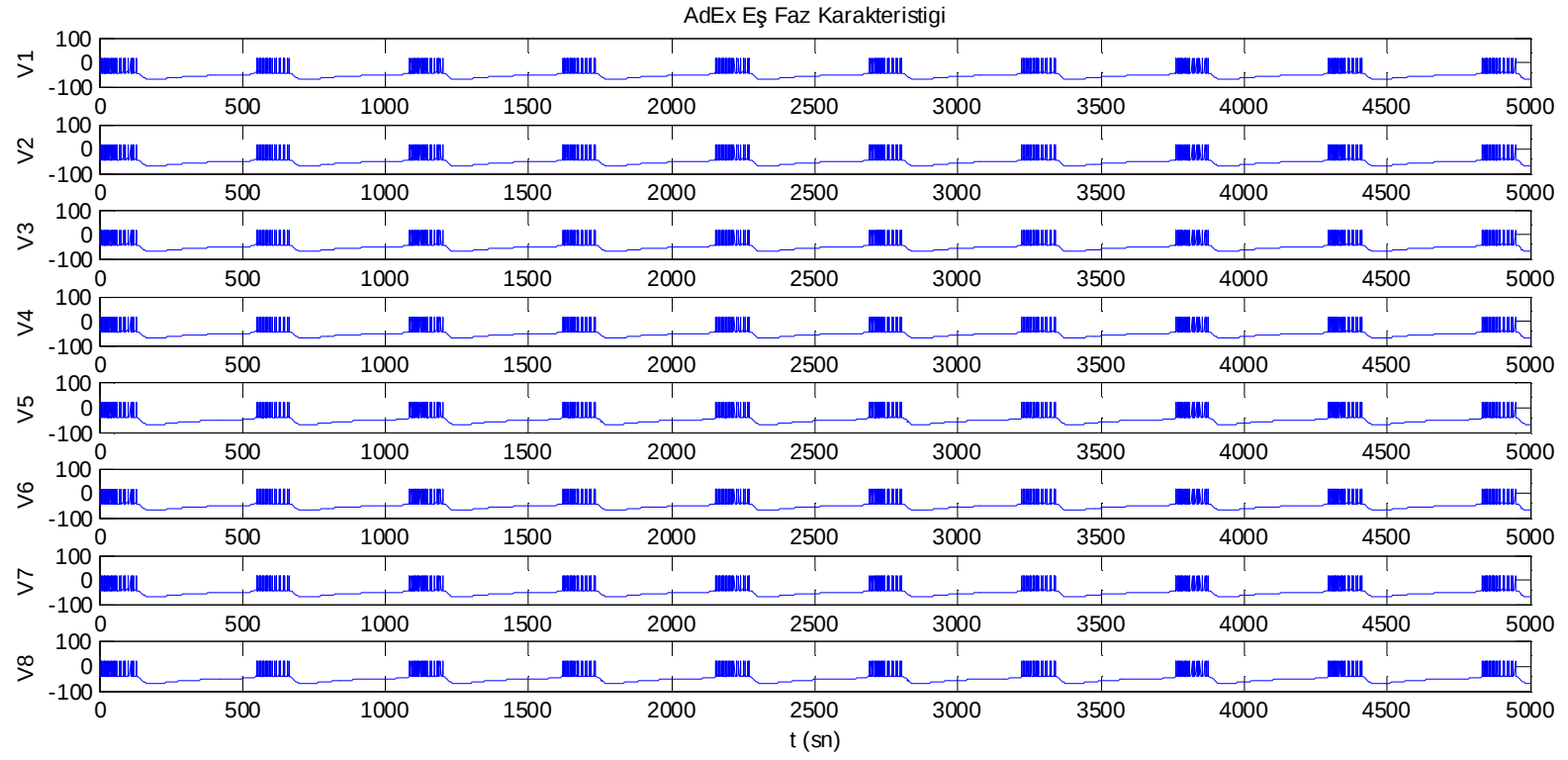
- [1] **Valeri A. Makarov, Ezequiel Del Rio, Manuel G. Bedia, Manuel G. Velarde, and Werner Ebeling** (2006) Central Pattern Generator Incorporating the Actuator Dynamics for a Hexapod, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 15.
- [2] **A Gait Thing to Understand**, (2011) Alındığı tarih: 24.04.2012, adres <http://seanlaceystrengthandconditioning.wordpress.com/2011/03/05/a-gait-thing-to-understand/>
- [3] **Strogatz, Steven H.** (2000). Nonlinear Dynamics and Chaos: With applications to Physics, Chemistry and Engineering. *Wesview Press*.
- [4] **Uwate, Y. ve Nishio, Y.** (2007). Synchronization Phenomena in Van Der Pol Oscillators Coupled By A Time-Varying Resistor. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 17, no. 10 (2007) 3565–3569
- [5] **Uwate, Y., Nishio, Y. ve Stoop, R.** (2009). Complex Pattern in a Ring of Van der Pol Oscillators Coupled By Time-Varying Resistors. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*
- [6] **Yapay Sinir Ağları.** Alındığı tarih 25.04.2012, adres <http://www.yildiz.edu.tr/~gulez/3k1n.pdf>
- [7] **Chaos in neurons.** (2008). *Scholarpedia*. Alındığı tarih 11.03.2012, adres: http://www.scholarpedia.org/article/Chaos_in_neurons
- [8] **Nelson, M.E.** (2004) Electrophysiological Models In: Databasing the Brain: From Data to Knowledge. Wiley, New York. Alındığı tarih 02.04.2012, adres: http://nelson.beckman.illinois.edu/courses/physl317/part1/Lec3_HHsection.pdf
- [9] **Cinal Ş, Emekci N. H. Ve Ezer M.** (t.y.). Stokastik Nöron Modellerinin Simulink ile Benzetimi. Zonguldak Karaelmes Üniversitesi. Alındığı tarih:11.03.2012,
- [10] **Biological Neuron Model.** (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih 11.03.2012, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Biological_neuron_model
- [11] **Integrate and Fire Models Witp XPP** (t.y.). Alındığı tarih: 20.04.2012, adres: <http://www.math.pitt.edu/~bard/classes/compneuro/iaf.html>
- [12] **Chaos in neurons.** (2009). *Scholarpedia*. Alındığı tarih 11.03.2012, adres: http://www.scholarpedia.org/article/Adaptive_exponential_integrate-and-fire_model
- [13] **Bilim ve Teknik Dergisi** (Nisan 2007) Cilt 40, Sayı 473, Sayfa 11.
- [14] **Hellgren, J., Grillner, S., & Lansner, A.** (1992). Computer simulation of the segmental neural network generating locomotion in lamprey by using populations of network interneurons. *Biological Cybernetics*, 68, 1-13.

- [15] **Traven, H., Brodin, L., Lansner, A., Ekeberg, O. , Walle´n, P., & Grillner, S.** (1993). Computer simulations of nmda and non-nmda receptors mediated synaptic drive: sensory and supraspinal modulation of neurons and small networks. *J. of Neurophysiology*, 70(2), 695-709.
- [16] **Wadden, T., Hellgren, J., Lansner, A., & Grillner, S.** (1997). Intersegmental coordination in the lamprey: simulations using a network model without segmental boundaries. *Biological Cybernetics*, 76, 1-9.
- [17] **Kimura, H., Akiyama, S., & Sakurama, K.** (1999). Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillators. *Autonomous Robots*, 7(3), 247-258.
- [18] **Williamson, M. M.** (1998). Neural control of rhythmic arm movements. *Neural Networks*, 11(7-8), 1379–1394.
- [19] **Crespi, A., & Ijspeert, A. J.** (2006). AmphiBot II: An Amphibious Snake Robot that Crawls and Swims using a Central Pattern Generator. In *Proceedings of the 9th International Conference on Climbing*
- [20] **Ijspeert, A. J., Crespi, A., Ryczko, D., & Cabelguen, J. M.** (2007). From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *Science*, 315(5817), 1416 - 1420.
- [21] **Izhikevich, Eugene M.** (2007). Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting. *The MIT Press, Cambridge, Massachusetts*.
- [22] **Igaev, M. P., Dmitrichev, A. S., Nekorkin, V. I. (t.y.).** Anti-Phase Spiking Patterns in a Circular Chain of Morris –Lecar Neurons. *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science*, Ders notları.
- [23] **Komarov, M. A., Osipov G. V., Suykens J. A. K. ve Rabinovich M. I.** (2009). Numerical studies of slow rhythms emergence in neural microcircuits: Bifurcations and stability, *CHAOS* 19, 015107.

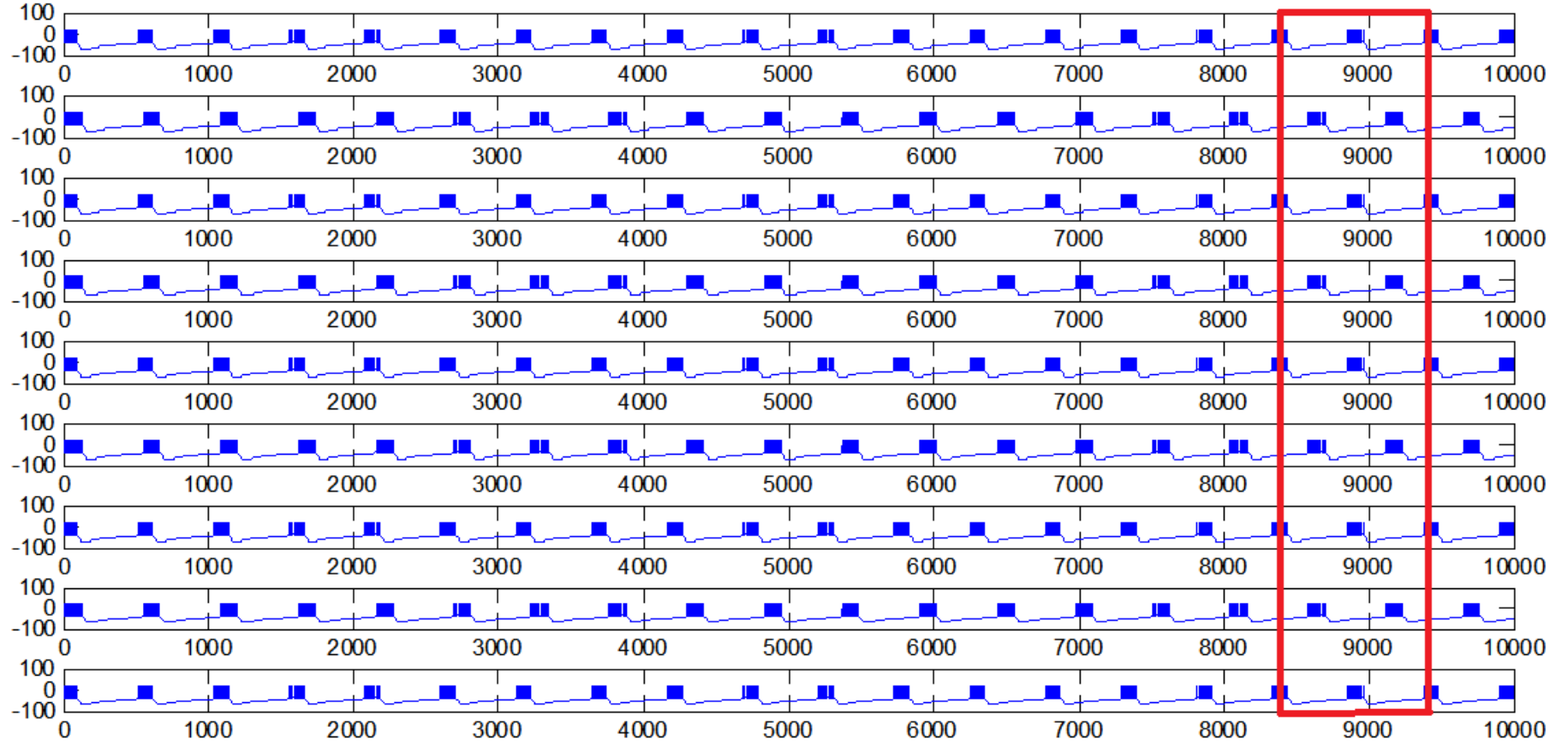
EKLER

EK A: AdEx Sinir Ağıyla Elde Edilmiş Senkronizasyonlar.

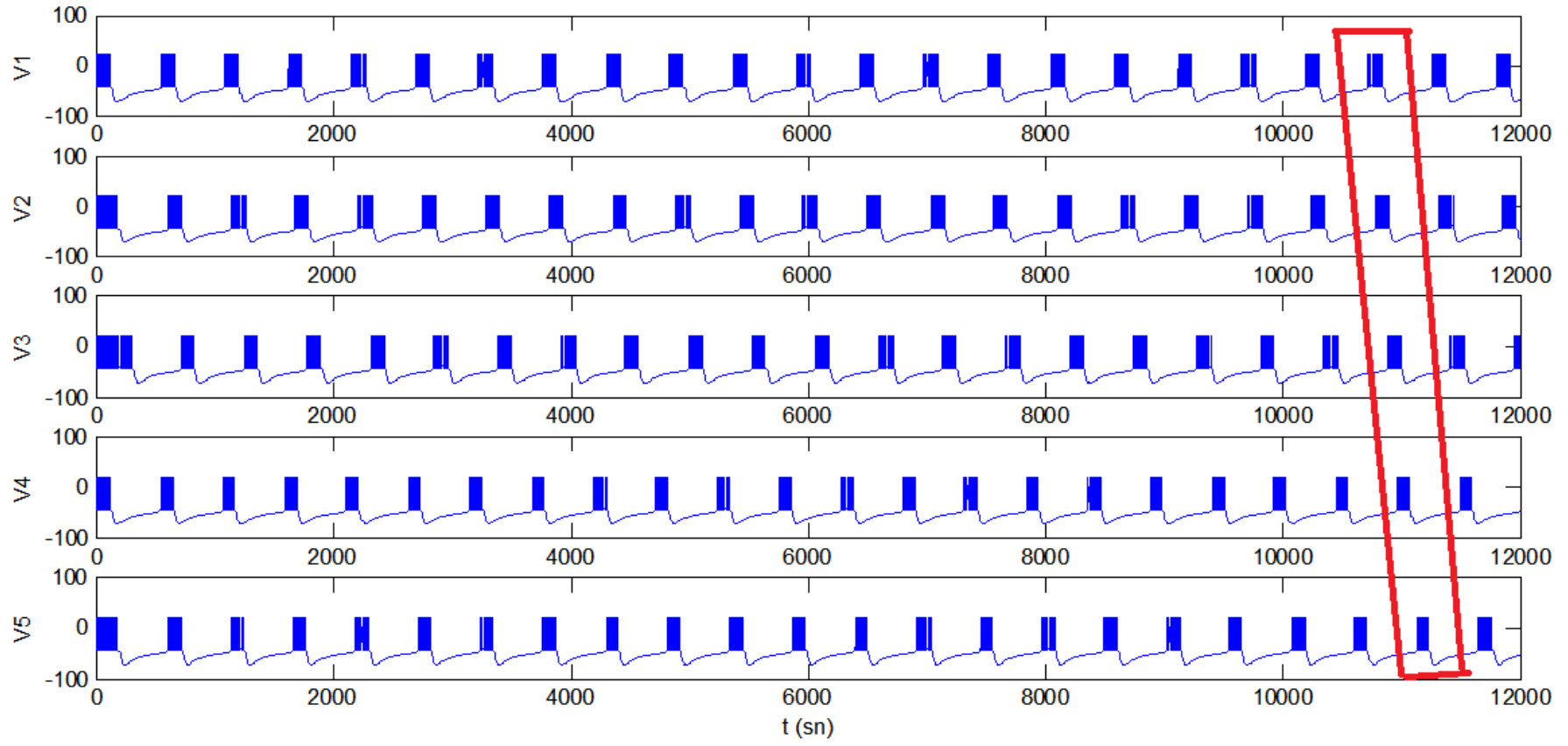
EK A



Şekil A.1 : Eş-faz senkronizasyonu



Şekil A.2 : Zıt-faz senkronizasyonu



Şekil A.3 : Geçici N-faz senkronizasyonu

ÖZGEÇMİŞ

Huriye Nur DEĞİRMENCİOĞLU

KİŞİSEL BİLGİLER:

Doğum Tarihi: 24.07.1987
Doğum Yeri: Finike / ANTALYA
Medeni Hali: Bekar
Ehliyet: B Sınıfı Ehliyet
Adres: Molla Gürani Mah. Erseven Sok. Hasanbey Apt. B Blok No:2
Fatih/İSTANBUL
Telefon: 05434760780
Mail: huriyenurd@gmail.com

AKADEMİK GEÇMİŞ

2005 – 2009 **Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği,**
Yıldız Teknik Üniversitesi, İSTANBUL (AGNO: 3.23/4.00)
2008 **Elektronik Mühendisliği, (ERASMUS Programıyla)**
Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas, LİTVANYA

İŞ TECRÜBESİ

2012 Şub - ... **NETAS Telekomünikasyon,** İstanbul
Global Network Ürünü Destek Mühendisi, GPS.
2009 Eyl -2012 Şub. **ENTES Elektronik A.S.,** İstanbul
Embedded Tasarım Mühendisi (Yazılım ve Donanım), ArGe.
2008 Jun - Aug **Arçelik,** İstanbul
Staj - 6 hafta
2007 Jun - Aug **Türk Telekom,** İstanbul
Staj - 6 hafta

TEKNİK ÖZELLİKLER

Programlama	: Java, C++, C, Embedded C, MATLAB/Simulink
Simülasyon	: PSPICE, Protel Altium, Proteus
Office	: MS Office, MS Project
İşletim Sistemi	: Windows, Linux, Unix

DİLLER

- Türkçe (Ana dil)
- İngilizce (Akıcı)
- Almanca (Başlangıç)

KURSLAR

- "C ve Sistem Programcıları Derneği" C programlama kursu (160 saat)
- Tömer Almanca Kursu (Başlangıç)