

# NÖRONLARIN İLETİŞİMİNDE SEZGİSEL SENKRONİZASYON

Muhammet UZUNTARLA<sup>1</sup>

Mahmut ÖZER<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi 67100, İncivez, Zonguldak

<sup>1</sup>e-posta: [muzuntarla@yahoo.com](mailto:muzuntarla@yahoo.com)

<sup>2</sup>e-posta: mahmutozer2002@yahoo.com

Anahtar sözcükler: Nöron Modelleme, Sezgisel Senkronizasyon, FitzHugh-Nagumo

## ABSTRACT

*This study presents neuronal synchronization mechanism by using a coupled master-slave configuration based on the FitzHugh-Nagumo neuronal model. We show that the slave neuron can anticipate the master neuron's dynamics earlier in time than the master neuron under exposing to the same random external forcing. We quantify the degree of synchronization by using the anticipating time and delayed feedback parameters.*

## 1. GİRİŞ

Biyolojik nöronlar arası iletişimde senkronizasyon son yıllarda giderek üzerinde çalışmalar yapılan bir konu haline gelmiştir. Nöronal sistemlerde uygun bir master-slave konfigürasyonunda slave sistemin master sisteme ait dinamikleri daha önceden sezebildiği ortaya konmuştur [1,2]. Slave sistemin varlığı master sistemin dinamiklerini etkilememesine rağmen slave sistem master sistemin davranışlarını izleyebilmektedir.

Beyin kabuğu üzerinde gerçekleşen proseslerde senkronize nöronal osilasyonlar pek çok araştırmaya konu olmuş ve bazı yapıların uygulanan uyarımları birkaç milisaniye önceden tahmin edebildiği ortaya konmuştur [3,4]. Bu noktadan yola çıkarak bu çalışmada nöronlardaki senkronize tahmin edebilme yeteneği, dinamik sistemlerdeki sezgileme mekanizması kullanılarak incelenmiştir. Bunun için iki nöron master-slave konfigürasyonunda bağlanmış, aynı uyarım altında slave nöronun master nöron ile sezgisel senkronizasyonun hangi koşullar altında gerçekleştiği araştırılmıştır.

Nöron modellemede yaygın olarak kullanılan modellerden biri FitzHugh-Nagumo (FHN) nöron modelidir [5,6]. FHN modeli, nöron dinamiğini tanımlamada dört adet birinci dereceden diferansiyel denklemden oluşan Hodgkin-Huxley (H-H) modelinin iki boyuta indirgenmiş bir modelini oluşturmaktadır. Bu sebeple nöronlarla ilgili incelemelerde hesaplama

yükünün azlığı nedeni ile tercih edilen bir modeldir. Ayrıca H-H modeli deterministik bir model olup stokastik etkileri içerecek şekilde genişletilmiş modelleri hem karmaşık hem de işlem yükü olarak ağırdır. Bununla birlikte FHN modeli deterministik ve stokastik modellemede hem daha basit bir yaklaşım sağlamakta, hem de daha az işlem yükü gerektirmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada FHN nöron modeli kullanılmıştır.

## 2. FHN NÖRON MODELİ

H-H modelinin geliştirilmesinde yapılan deneysel çalışmalarda hücredeki sodyum ve potasyum iletkenlikleri ölçülmüş ve elde edilen verilerden iletkenliklere ait eğriler uydurulmuştur. Sodyum eğrisi kübik bir fonksiyon ve potasyum eğrisi 4.dereceden bir fonksiyon olarak bulunmuştur. Nöron dinamiklerini tanımlamak üzere iletkenliğe dayalı olarak geliştirdikleri model dört diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Diferansiyel denklemlerden biri membran gerilimindeki değişimleri, ikisi sodyum kanalını ve bir denklemden potasyum kanalını modellemektedir.

H-H modelinde çeşitli indirgemeler yapılarak elde edilen FitzHugh-Nagumo modeli dört diferansiyel denklem yerine iki diferansiyel denkleme ifade edilmektedir. Model denklemleri:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -v(v-a)(v-1) - w \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \varepsilon(v - bw) \quad (2)$$

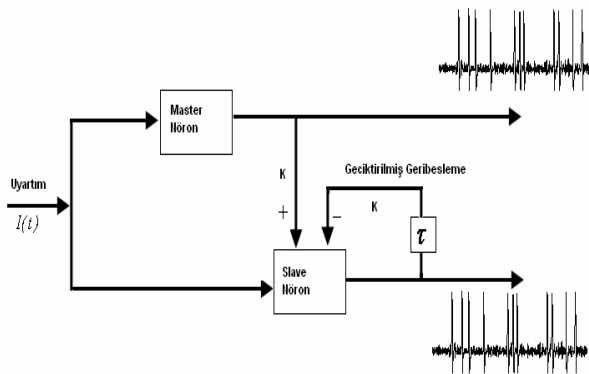
olarak verilmektedir. Modelde;  $v$  membran potansiyelini (hızlı değişken),  $w$  kanal (recovery, yavaş değişken) değişimlerini ifade etmektedir.  $\varepsilon$ ; iki değişken arasında hız ölçeklemesi yapan küçük değere

sahip ( $\varepsilon < 1$ ) bir sabittir. Diğer parametreler  $a$  ve  $b$  ise nonlinear sistemin dinamikleri ile ilgili sabitlerdir.

Nöronlardaki gerilim-kapılı iyon kanalları, aksiyon potansiyellerinin üretilmesi ve yayılmasında çok önemli bileşenlerdir. İyon kanalları stokastik olarak açılmakta ve kapanmaktadır. Bu nedenle, rasgele kanal olayları, sisteme kanal gürültüsü katmaktadır. Kanal gürültüsünü FHN nöron modeline ilave etmek için membran potansiyeli değişkenine beyaz Gauss gürültüsü ilave edilmektedir. Böylece nöronlarda gerçekleşen stokastik dinamikler sistem dahil edilmektedir.

### 3. SEZGİSEL SENKRONİZASYON

Nöronlar arası iletişimde oluşan sezgisel senkronizasyon davranışını incelemek için iki nöron hücresi master-slave konfigürasyonunda bağlanmış ve aynı uyartım altında slave nöronun master nöron ile sezgisel senkronizasyonu incelenmiştir. Senkronize tahmin yeteneğini incelemek için Şekil 1 de verilen blok diyagram kullanılmıştır.



Şekil 1 Aynı uyartım altındaki iki nöronun master-slave konfigürasyonu.

Şekil 1 de verilen blok diyagramdaki master ve slave nöronları matematiksel olarak modellemede FitzHugh-Nagumo nöron modeli kullanılmıştır. Buna göre sistem aşağıdaki denklem takımı ile ifade edilmiştir:

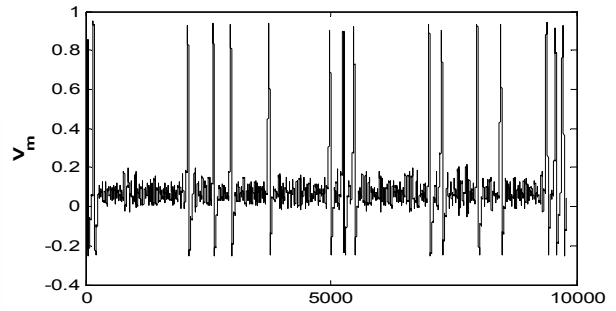
$$\frac{\partial v_m}{\partial t} = -v_m(v_m - a)(v_m - 1) - w_m + I(t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_m}{\partial t} = \varepsilon(v_m - bw_m) \quad (4)$$

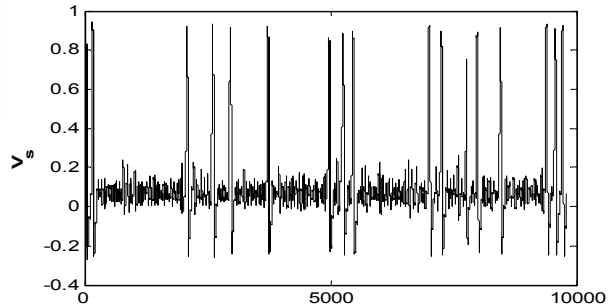
$$\frac{\partial v_s}{\partial t} = -v_s(v_s - a)(v_s - 1) - w_s + I(t) + K[v_m(t) - v_s(t - \tau)] \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \varepsilon(v_s - bw_s) \quad (6)$$

Eşitliklerde  $(v_m, w_m)$  master nöron ile ilgili değişkenler,  $(v_s, w_s)$  ise slave nöron ile ilgili değişkenlerdir.  $a, b$  ve  $\varepsilon$  ise kullanılan FHN nöron modeli nonlinear denklemlerine ait sabitlerdir.  $K$  iki nöron arasındaki kupa katsayısını ve  $\tau$  ise slave nöronda kullanılan geribesleme döngüsünün gecikme zamanını göstermektedir.  $I(t)$  nöronal gürültüyü modelleyen ortalaması ' $I_0 = 0.03$ ', standart sapması ' $1$ ' ve  $D\delta(t-t')$  otokorelasyonu ile verilen beyaz Gauss gürültüsüdür.  $D$  gürültünün varyansını göstermektedir. Nöronal gürültünün ortalaması  $I_0$ , FHN modeli için eşik seviyesine yakın bir değer seçilmiştir ve böylece oldukça kompleks, düzensiz dinamikler elde edilmiştir. Nöronal gürültü etkisinde master ve slave nöronlarının dinamikleri Şekil 2 de verilmiştir.



(a) Master nörona ait spike treni.

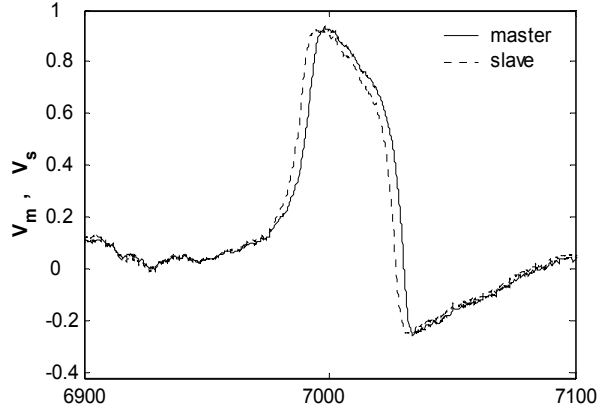


(b) Slave nörona ait spike treni.

Şekil 2 Master ve Slave nörona ait dinamikler:

$$a = 0.139, b = 2.54, \varepsilon = 0.008, K = 0.03, \tau = 2, D = 8e-5$$

Şekil 2'de görüldüğü üzere slave nöron master nöronun oluşturduğu spike zamanlamalarından hemen önce ateşleyerek master'a ait dinamikleri önceden tahmin edebilmektedir. Bunun yanında slave nöron dinamiklerinde master nöronda bulunmayan hata spikelerinin oluştuğu da görülmektedir. Hata spikelerinin fazlalığı sezgisel (anticipated) senkronizasyonun giderek kaybolduğunu göstermektedir. Şekil 3'de slave nöronun master nöronun oluşturduğu bir aksiyon potansiyelini önceden sezinlemesi görülmektedir.

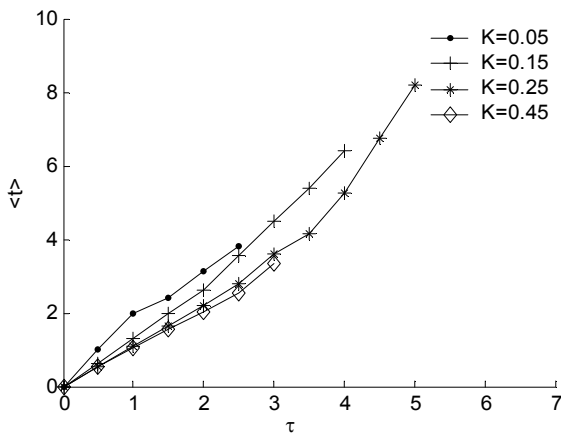


Şekil 3 Slave nöronun master nörona ait bir aksiyon potansiyelinin oluşumunu önceden tahmin etmesi.

Master ve slave nöronları arasındaki sezgisel senkronizasyonu incelemek için ortalama sezgi süresi hesaplanmıştır. Ortalama sezgi süresi:

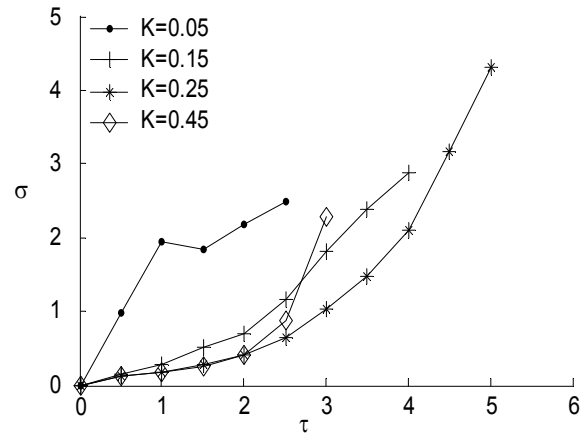
$$\langle t \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^m - t_i^s \quad (7)$$

denklemlerle elde edilmiştir.  $t_i^m$  master nöronun spike oluşturduğu anları,  $t_i^s$  slave nöronun spike oluşturduğu anları göstermektedir.  $N$  ise ortalama sezgi süresi elde edilirken kullanılan master nörona ait spike sayısıdır. Burada slave nöronun oluşturduğu hatalı, master ile senkronize olmayan spikeler dikkate alınmamıştır ve ortalama sezgi süresi master nörona ait  $N=500$  spike üzerinden hesaplanmıştır. Şekil 4 de ortalama sezgi süresinin dört farklı kuplaj katsayısı ( $K$ ) değeri için geribesleme gecikme süresi  $\tau$  ile değişimi verilmiştir.



Şekil 4 Ortalama sezgi süresinin dört farklı kuplaj katsayısı ( $K$ ) için geribesleme gecikme süresi  $\tau$  ile değişimi.

Şekil 4'de  $K$ 'nın büyük değerlerinde, ortalama sezgi süresinin  $\langle t \rangle = \tau$  seviyelerinde olduğu ve belirli bir  $\tau$  değerinden sonra senkronizasyonun kaybolduğu görülmektedir. Öte yandan  $K$ 'nın küçük değerleri için sezgi süresinin  $\tau$ 'dan büyük olduğu bulunmuştur. Bu durum senkronizasyonun zayıf olduğu anlamına gelmemektedir. Sezgi süresinin standart sapmasının dört farklı kuplaj katsayısı  $K$  için geribesleme gecikme süresi  $\tau$  ile değişiminin elde edilerek verildiği Şekil 5'de aynı  $K$  değerleri için ortalama sezgi süresinin standart sapmasına bakıldığında  $\langle t \rangle > \tau$  değerlerinde standart sapmanın arttığı görülmektedir. Bu durumda senkronizasyonun kötü olduğuna işaret etmektedir.



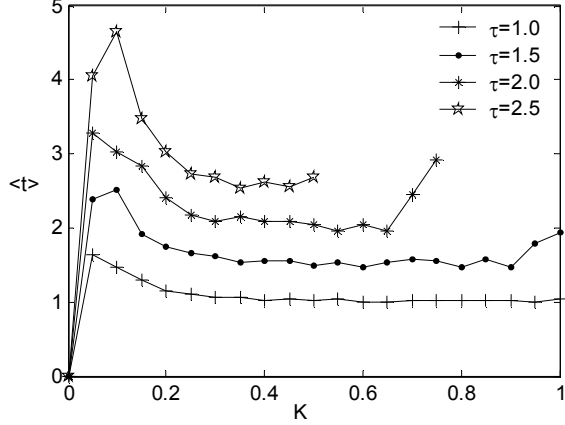
Şekil 5 Sezgi süresinin standart sapmasının dört farklı kuplaj katsayısı  $K$  için geribesleme gecikme süresi  $\tau$  ile değişimi.

Master ve Slave nöronları arasındaki kuplaj katsayısı  $K$ 'nın tüm değerlerinde maksimum bir sezgi süresine ulaşılmaktadır. Başka bir deyişle  $\tau$ 'nun belirli değerlerinden sonra tüm  $K$  katsayısı değerlerinde senkronizasyon kaybolmaktadır.

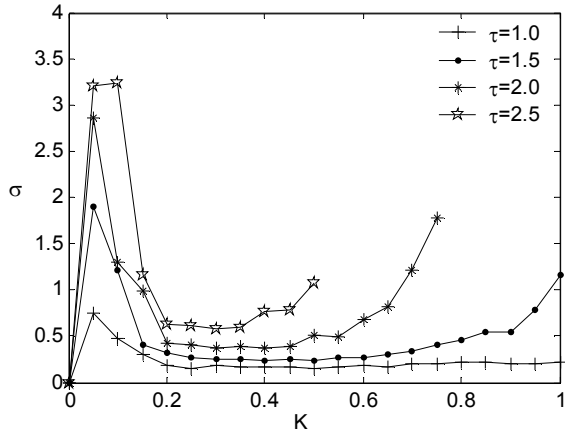
Nöronlardaki sezgisel senkronizasyonu daha ayrıntılı incelemek için ortalama sezgi süresinin farklı geribesleme gecikme sürelerinde, master ve slave nöronları arasındaki kuplaj katsayısı ile değişimi elde edilmiş ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca kuplaj katsayısı  $K$ 'nın sezgisel senkronizasyon üzerindeki etkisini daha açık bir şekilde görmek için ortalama sezgi süresinin standart sapması elde edilmiş ve Şekil 7 de gösterilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi  $\tau$ 'nın tüm değerleri için bir  $K_{min} < K < K_{max}$  aralığı mevcuttur. Bu aralıkta sezgisel senkronizasyonun iyi olduğu söylenebilir.  $K$ 'nın bu değerlerinde ortalama sezgi süresi  $\langle t \rangle \cong \tau$  seviyelerinde değişmektedir.

$K$ 'nın küçük değerleri için,  $K < K_{min}$ ,  $\langle t \rangle \cong 0$  olduğu görülmektedir. Bu iki nöronun tamamen senkronize olduğunu göstermektedir.  $K$ 'nın büyük değerlerinde ise ( $K > K_{max}$ ) iki nöron arasındaki

senkronizasyon slave nöronun kaotik davranışından dolayı kaybolmaktadır. Ayrıca Şekil 7’de kuplaj katsayısı  $K$ ’nın senkronizasyon üzerindeki etkisi standart sapmanın çok küçük değerler aldığı  $K_{\min} < K < K_{\max}$  aralığında daha belirgin görülmektedir.



Şekil 6 Ortalama sezgi süresinin dört farklı  $\tau$  değeri için kuplaj katsayısı ile değişimi.



Şekil 7. Sezgi süresinin standart sapmasının dört farklı  $\tau$  değeri için kuplaj katsayısı ( $K$ ) ile değişimi.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada master-slave konfigürasyonunda birbirine bağlı iki nöronun slave nöronun master nöronun davranışlarını önceden sezebildiği sezgisel senkronizasyon incelenmiştir. Sezgisel senkronizasyonu kontrol eden iki parametrenin senkronizasyon üzerindeki etkisi incelenmiş ve senkronizasyonun sağlanabilmesi için bu

parametrelerin hangi değer aralığında bulunması gerektiği tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Voss H.U., Anticipating chaotic synchronization, PHYS. REV. E, Vol. 61, pp. 5115-5119, 2000.
- [2] Toral R., Masoller C., Mirasso C. R., Cizsak M. and Calvo Q, Characterization of the anticipated synchronization regime in the coupled Fitzhugh-Nagumo Model for neurons, PHYSICA A, Vol. 325, pp. 192-198, 2003.
- [3] Traub R.D., Whittington M.A., Stanford I.M., JeJerys J.G.R., A mechanism for generation of long-range synchronous fast oscillations in the cortex, NATURE, Vol. 383, pp. 621-624, 1996.
- [4] Roelfsema P.R., Engel A.K., König P., Singer W., Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas, NATURE, Vol. 385, pp. 157-161, 1997
- [5] FitzHugh R., Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane, BIOPHYSICAL JOURNAL, Vol. 1, pp. 445-466, 1961.
- [6] Nagumo J., Arimoto S and Yoshizawa S., An active pulse transmission line simulating nerve axon, PROC IREE, Vol.50, pp. 2061, 1962.