



Biyolojik Nöral Ağlarda Sinaptik Heterojenliğin Vibrasyonel Rezonansa Etkileri Effects of Synaptic Heterogeneity on Vibrational Resonance in Biological Neural Networks

Şükriye Nihal Ağaoglu¹, Ali Çalım², Mahmut Özer³, Muhammet Uzuntarla²

¹Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Turhal Meslek Yüksekokulu, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Turhal/Tokat, Türkiye
nihal_agaoglu@yahoo.com

²Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Bülent Ecevit Üniversitesi, 67100 İncivez/Zonguldak, Türkiye
ali.calim@hotmail.com, muzuntarla@yahoo.com

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bülent Ecevit Üniversitesi, 67100 İncivez/Zonguldak, Türkiye
mahmutozer2002@yahoo.com

Özetçe—*Bu çalışmada, uyarılabilir nöral sistemde vibrasyonel (titreşimsel) rezonans konusu, ölçeksiz (scale-free) ağ topolojisi ile ele alınmıştır. Nöral ağlarda sinaptik iletkenliklerin ağırlıklandırılmasıyla ortaya çıkan heterojenliğin, zayıf sinyalin algılanma performansına etkisi araştırılmıştır. Uyarılabilir sistem olarak, elektriksel kuplaja sahip FitzHugh-Nagumo nöron modeli kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda görülmüştür ki; ölçeksiz ağırlıklandırılmamış veya ağırlıklı olması, sinaptik iletkenlik ve ortalama bağlantı derecesi nöron popülasyonunun vibrasyonel rezonansa dayalı bilgi kodlama performansını belirlemede etkin rol oynamaktadır.*

Anahtar Kelimeler — *FitzHugh-Nagumo; vibrasyonel rezonans; ağırlıklı ağ.*

Abstract—*In this study, vibrational resonance phenomena is investigated for topologies of scale-free network in excitable neural system. Effect of heterogeneity which emerges from weighting synaptic conductivity in neural network on performance of weak signal detection is studied. FitzHugh-Nagumo neuron model with electrical coupling is used as excitable system. In the result of numerical simulations; it is seen that the state of the scale-free network being unweighted or weighted, synaptic conductivity and average connectivity degree play a crucial role for determining performance of information coding of neuron population based on vibrational resonance.*

Keywords — *FitzHugh-Nagumo; vibrational resonance; weighted network.*

I. GİRİŞ

Fizikte rezonans kavramı; bir sistemin iç veya dış dinamiklerin etkisiyle bazı frekanslarda diğerlerine göre daha büyük genliklerde salınım göstermesi olarak

tanımlanır. Rezonans olayından mekanik, elektronik, optik ve tıp gibi farklı alanlarda faydalanılmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar doğal sistemlerin gürültü ile optimize edilebilir olduklarını göstermiştir [1]. Bu gerçekten yola çıkarak uyum rezonansı ve stokastik rezonans adı altında nöral sistemlerde gürültünün etkilerini araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır [2-8].

İki farklı frekansa sahip sinyallerin; lazer fiziği [9], meteoroloji mühendisliği [10], akustik [11] ve akışkanlar mekaniği [12] gibi birçok farklı alanlarda kullanımı oldukça yaygındır. Yakın zamanda yapılan çalışmalarda, doğrusal olmayan bir sistemdeki alçak frekanslı zayıf sinyalin, belirli bir genlikteki yüksek frekanslı bir sinyal ile geliştirilebilir olduğu ortaya konulmuştur. Stokastik rezonansa benzer olan bu olgu vibrasyonel rezonans olarak isimlendirilmiştir [13]. Literatürde yapılan çalışmalarda, vibrasyonel rezonans konusu uyarılabilir sistem olarak hem tek nöron hem de farklı topolojilere sahip nöral ağlar için incelenmiştir [14-21].

Bu çalışmada vibrasyonel rezonans olgusu, FitzHugh-Nagumo (FHN) denklemleri ile modellenen ölçeksiz ağ topolojisine sahip uyarılabilir bir nöral sistemde araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda stokastik rezonans heterojen yapıdaki ağlarda [22] incelenmesine rağmen vibrasyonel rezonans homojen yapıdaki ağlarda incelenmiştir. Sinir sistemini meydana getiren nöronlar büyüklük, şekil, uyarı seçiciliği gibi birçok özellikleri bakımından özdeş değil, heterojendir [23-25]. Bu özelliklerinden biri de nöronlar arasındaki sinaptik iletkenliklerdir. Çalışmada, ölçeksiz ağda nöronlar arasındaki iletkenlikler bağlantı derecesi ve yönlerine göre ağırlıklandırılarak nöral heterojenlik sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar; ölçeksiz ağırlıksız (homojen) olduğu durumda zayıf sinyalin iyileştirilmesi için gerekli



Sistem Modelleme 1

1. Gün / 27 Ekim 2016, Perşembe

enerjinin, ağ topolojisinin ağırlıklı (heterojen) olduğu durumda azaldığını göstermiştir. Bu bağlamda; ağırlıklı ağ ile yapılan bu çalışma nöral sistemde enerjinin etkin biçimde kullanılması altında yatan mekanizma hakkında ipucu vermektedir.

II. MODEL VE METOT

Çalışmada $N = 200$ nörondan oluşan bir popülasyon ele alınmıştır. Ağdaki her bir nöronun dinamikleri FitzHugh-Nagumo [26] denklemleri ile modellenmiştir. FHN modeli iki harmonik sinyalin varlığında aşağıdaki denklemler ile tanımlanmıştır:

$$\epsilon \frac{dv_i}{dt} = v_i - \frac{v_i^3}{3} - w_i + \sum_j g_{ij} (v_j - v_i) \quad (1)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = v_i + a_i + A \cos(\omega t) + B \cos(\Omega t + \varphi_i) \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde v_i nöronun membran potansiyelini temsil etmektedir. w_i ise membranda mevcut olan sodyum ve potasyum kanallarının iletkenliği ile ilgili olup aksiyon potansiyeli hiperpolarizasyon evresinin geri düzelmesini ifade eder. v_j presinaptik ve v_i postsinaptik nöronun membran potansiyelini göstermektedir. g_{ij} , i nörona j nörondan gelen sinaptik bağlantı iletkenliğini gösterir. $A \cos(\omega t)$ ve $B \cos(\Omega t + \varphi_i)$ terimleri; sırasıyla alçak ve yüksek frekans bileşenleridir. Yani A ; zayıf frekanslı sinyal genliğini, B ise; yardımcı yüksek frekanslı sinyal genliğini ifade etmektedir. ϵ ; hızlı değişken v ile yavaş değişken w arasındaki zaman ölçeklemesini gerçekleştiren sabit değerli bir parametredir (Çalışma boyunca $\omega = 0.1$ ve $\Omega = 5$ ve $\epsilon = 0.01$ alınmıştır).

a parametresi, uyarılabilir bir sistem olan nöronun davranışını yani uyarılabilirlik seviyesini belirlemektedir. FHN nöron modeli, $a \geq 1$ için uyarılabilir; $a < 1$ için ise osilasyonlu bir davranış gösterir. Çalışmada a için 1.05 değeri kullanılmıştır. $\varphi_i \in [0 \pi]$ aralığında düzgün dağılımlı faz değerleridir.

Nörona uygulanan zayıf giriş sinyalinin kodlanma performansını ölçmek amacıyla zayıf sinyal frekansı w için Fourier katsayısı (Q) hesaplanmıştır. Q parametresinin yüksek olması, girişteki zayıf sinyal ile nöronun ateşlemeleri arasında daha güçlü faz senkronizasyonu olduğunu gösterir. Buna göre Q parametresi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_{avg}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t) \quad (3)$$

$$Q_{sin} = \frac{w}{2n\pi} \int_0^{2\pi n/w} 2V_{avg}(t) \sin(\omega t) dt \quad (4)$$

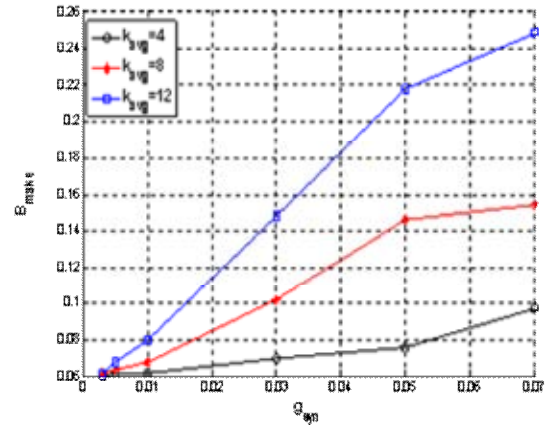
$$Q_{cos} = \frac{w}{2n\pi} \int_0^{2\pi n/w} 2V_{avg}(t) \cos(\omega t) dt \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{Q_{sin}^2 + Q_{cos}^2} \quad (6)$$

Nöron popülasyonu topolojisi için, Barabasi ve Albert [27] tarafından önerilen ve insan beyindeki nöronal ağların özelliklerini yansıtan ölçeksiz ağ modeli kullanılmıştır. Bu modele göre nöral ağ, büyüme (growth) ve tercihli bağlanma (preferential attachment) özelliklerine sahiptir. Ağ topolojisi, ortalama bağlantı derecesi $\langle k_i \rangle = 2m$ ve $P(k_i) \sim k_i^{-3}$ olarak tanımlanan bir güç-yasası dağılımına göre oluşturulmaktadır. Burada k_i , i . nöronun bağlantı derecesini, m ise ağa yeni eklenen bir nöronun yapacağı minimum düğüm sayısını ifade etmektedir. Ağırlıklı ölçeksiz ağda, i . nöron ile j . nöron arasındaki bağlantı ağırlığı $w_{ij} = (k_i k_j)^\alpha$ şeklinde tanımlanmaktadır [28]. Böylece ağırlıklandırılan sinaptik iletkenlik $g_{ij} = w_{ij} g_{ij}$ olur. Buradaki α , ağın ağırlığının ve heterojenlik seviyesinin kontrol edilmesinde anahtar parametredir.

III. SONUÇLAR

Tanımlanan matematiksel modeller ile yapılan simülasyonlarda; Euler metodu kullanılmış ve adım boyutu $\Delta t = 0.001$ alınmıştır. İlk olarak, ağırlıksız (homojen) ağda farklı ortalama bağlantı derecesi (k_{avg}) değerleri ve sinaptik iletkenlik (g_{syn}) için Q değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan Q değerlerinin maksimum olduğu B (B_{maks}) değerleri belirlenmiştir. Üç farklı k_{avg} değeri için g_{syn} ile B_{maks} arasındaki ilişki Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ağırlıksız ağda sinaptik iletkenlik (g_{syn}) ile yüksek frekanslı sinyalin maksimum genliği (B_{maks}) arasındaki ilişki

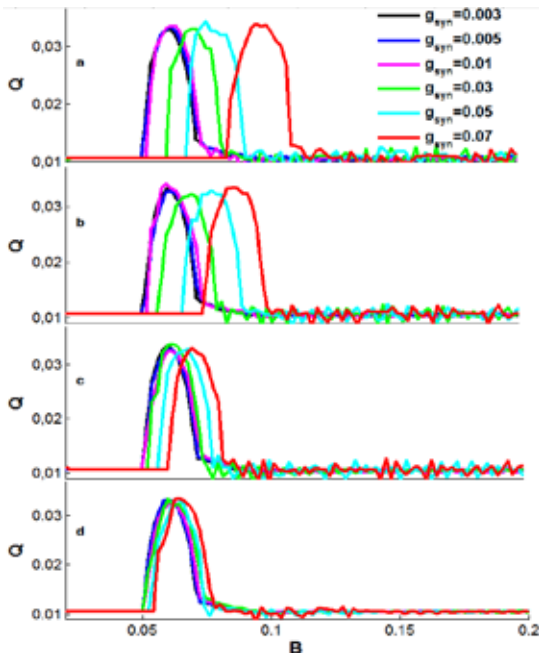
B_{maks} değerleri, küçük g_{syn} değerleri (0.003 ve 0.005) için ortalama bağlantı sayısının tüm değerlerinde hemen hemen aynı seviyededir. Fakat sinaptik iletkenlik arttıkça B 'nin maksimum olduğu değer ortalama bağlantı derecesi ile doğru orantılı olarak artmıştır. Yani; uyarılabilir sistemin rezonans tepelerini algılaması ve zayıf sinyali en

Sistem Modelleme 1

1. Gün / 27 Ekim 2016, Perşembe

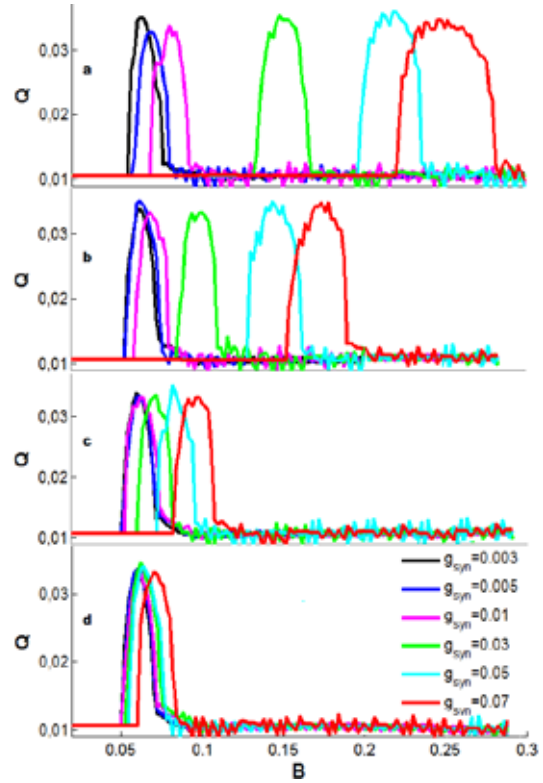
iyi şekilde kodlayabilmesi için ihtiyaç duyduğu enerji miktarı, sinaptik iletkenlik ile birlikte artmıştır. Bu artışın, ağırlıklı ortalama bağlantı derecesinin artması ile daha da belirginleştiği görülmektedir. Bu sonuçlardan; ağdaki bağlantı yoğunluğunu belirleyen k_{avg} 'ninde sistemin zayıf sinyali kodlama performansını belirlemede önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

İkinci olarak, nöron popülasyonunun zayıf sinyali kodlama performansı ağırlıklı ölçeksiz ağa göre incelenmiştir. İlk önce, ortalama bağlantı derecesi $k_{avg} = 4$ olduğu durumda, ölçeksiz ağırlıksız ($\alpha = 0$) veya ağırlıklı ($\alpha = -0.1, -0.3$ ve -0.5) olmasına göre sinaptik iletkenliğin farklı değerleri için Fourier katsayıları nümerik olarak elde edilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 2'de verilmiştir. Tüm grafiklerde, nöral ağırlık alçak frekanslı zayıf sinyale cevabını ölçeklendiği Q değerlerinin maksimum olduğu noktalarda fazla bir değişim olmadığı görülmektedir. Her durumda zayıf sinyalin kodlanma performansının aynı olduğu, ancak gerekli enerji seviyesinin değiştiği anlaşılmaktadır. Şekil 2'de ortalama bağlantı derecesi $k_{avg} = 4$ iken $\alpha = -0.5$ değeri hariç, ağırlıklı durumda sinaptik iletkenliğin $g_{syn} = 0.01$ değerine kadar sistemin davranışını çok etkilemediği, aynı derecede kodlama performansı sergilediği ve aynı derecede enerji gereksinimi olduğu görülmektedir. Fakat g_{syn} değeri arttıkça ($g_{syn} \geq 0.03$) Q'nun maksimum olduğu B değerlerinin sağa doğru kaydığı yani uyarılabilir sistemin ihtiyaç duyduğu enerjinin arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 2 (d)'de ise $\alpha = -0.5$ olduğunda sinaptik iletkenliğin arttığı halde uyarılabilir sistemin, her durumda hemen hemen aynı miktarda enerji ile kodlamayı yapabildiği görülmektedir.



Şekil 2. Sinaptik iletkenliğin farklı değerlerinde nöral sistemin zayıf sinyali algılama performansının yüksek frekanslı sinyal genliği ile değişimi ($N = 200, k_{avg} = 4$, a-d sırasıyla $\alpha = 0, -0.1, -0.3$ ve -0.5)

Daha sonra ortalama bağlantı derecesi $k_{avg} = 12$ için nöral ağırlıklandırıldığı ($\alpha = 0, -0.1, -0.3$ ve -0.5) durumlarda sinaptik iletkenliğin farklı değerleri için Q değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen grafikler Şekil 3'de verilmiştir. Verilen grafikler, ortalama bağlantı derecesi $k_{avg} = 4$ için elde edilen grafikler ile karşılaştırıldığında; bağlantı sayısının artmasıyla birlikte sistemin aynı derece enerji seviyesinde kodlama performansına sahip olmadığı görülmüştür. Yani ortalama bağlantı derecesi ve sinaptik iletkenliğin artmasıyla beraber sistemin zayıf sinyali en iyi şekilde kodlayabilmesi için gerekli enerji miktarı belirgin bir şekilde artmıştır. Nöral sistemin sinaptik heterojenlik seviyesini artırarak bu rezonans tepelerini oluşturması için gerekli olan enerji miktarının her iki ortalama bağlantı derecesi için ($k_{avg} = 4, k_{avg} = 12$) giderek azalabileceği Şekil 2 (b-d) ve Şekil 3 (b-d)'de görülmektedir.



Şekil 3. Sinaptik iletkenliğin farklı değerlerinde nöral sistemin zayıf sinyali algılama performansının yüksek frekanslı sinyal genliği ile değişimi ($N = 200, k_{avg} = 12$, a-d sırasıyla $\alpha = 0, -0.1, -0.3$ ve -0.5)

Elde edilen sonuçlar ışığında; nöron popülasyonunun eşik altı işaret algılama performansının, ağ topolojisi, bağlantı sayısı ve bağlantı kuvvetine göre çok değişmediği anlaşılmaktadır. Ancak ağdaki bağlantı sayısı ve sinaptik iletkenliği arttıkça, sistemin daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Aynı zamanda sistemin ihtiyaç duyduğu bu enerjinin, ağırlıklandırma katsayısı arttıkça belirli bir ölçüde azalma gösterebileceği tespit edilmiştir. Böylece uyarılabilir sistemin alçak frekanslı sinyale cevabının maksimum ve optimal enerji seviyesinde olabilmemesinin, nöral ağırlık büyük ölçüde heterojen bir



Sistem Modelleme 1

1. Gün / 27 Ekim 2016, Perşembe

şekilde ağırlıklandırılmış olmasına bağlı olduğu söylenebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Sagues, F., Sancho, J. M., and Garcia-Ojalvo, J., "Spatiotemporal order out of noise", *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 79, 2007, p 829.
- [2] Pikovsky, A. S. and Kurths, J., "Coherence resonance in a noise-driven excitable system", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 78, 1997, p 775.
- [3] Linder, B. and Schimansky-Geier, L., "Coherence and stochastic resonance in a two-state system", *Phys. Rev. E*, Vol. 61, 2000, p 6103.
- [4] Horikawa, Y., "Coherence resonance with multiple peaks in a coupled FitzHugh-Nagumo model", *Phys. Rev.* Vol. 64, 2001, p 031905.
- [5] Linder, B., Garcia-Ojalvo, J., Neiman A., and Schimansky-Geier, L., "Effects of noise in excitable systems", *Phys. Rep.*, Vol. 392, 2004, p 321-324
- [6] Perc, M., "Stochastic resonance on excitable small-world networks via a pacemaker", *Phys. Rev. E*, Vol. 76, 2007, p 066203.
- [7] Ozer, M., Perc, M., and Uzuntarla, M., "Stochastic resonance on Newman-Watts networks of Hodgkin-Huxley neurons with local periodic driving", *Phys. Lett. A*, Vol. 373, 2009, p 964-968.
- [8] Yung, K., Lei, Y. M., and Xu, Y., "Stochastic resonance in the FitzHugh-Nagumo system driven by bounded noise", *Chin. Phys. B*, Vol. 19 (1), 2010, p 010503.
- [9] Su, D. C., Chiu, M. H., and Chen, C. D., "Simple two-frequency laser", *Precis. Eng.*, Vol. 18, 1996, p 161-163.
- [10] Gherm, V. E., Zernov, N. N., Lundborg B., and Vastberg, A., "The two-frequency coherence function for the fluctuating ionosphere: narrow band pulse propagation", *J. Atmos. Solar Terrestrial Phys.*, Vol. 59, 1997, p 1831-1841.
- [11] Ohsaka, K. and Trinh, E. H., "A two-frequency acoustic technique for bubble resonant oscillation studies", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 107, 2000, p 1346-1351.
- [12] Maksimov, O., "On the subharmonic emission of gas bubbles under two-frequency excitation", *Ultrasonics*, Vol. 35, 1997, p 79-86.
- [13] Landa, P. S. and McClintock, P. V. E., "Vibrational resonance", *J. Phys. A. Math Gen.*, Vol. 33, 2000, p 433-438.
- [14] Ullner, A. J., Zaikin, J., Garcia-Ojalvo, J., Bascones, R., and Kurths, J., "Vibrational resonance and vibrational propagation in excitable systems", *Phys. Lett. A*, Vol. 312, 2003, p 348-354.
- [15] Deng, B., Wang, J., and Wei, X., "Effect of chemical synapse on vibrational resonance in coupled neuron", *Chaos*, Vol. 19, 2009, p 1,013117.
- [16] Deng, B., Wang, J., Wei, L., Tsang, K. M., and Chan, W. L., "Vibrational resonance in neuron populations", *Chaos*, Vol. 20, 2010, p 013113.
- [17] Yu, H., Wang, J., Liu, C., Deng, B., and Wei, X., "Vibrational resonance in excitable neuron populations", *Chaos*, Vol. 21, 2011, p 043101.
- [18] Yu, H., Wang, J., Sun, J., and Yu, H., "Effects of hybrid synapses on the vibrational resonance in small-world neuronal networks", *Chaos*, Vol. 22, 2012, p 033105.
- [19] Hu, D., Yang, J., and Liu, X., "Delay-induced vibrational multiresonance in FitzHugh-Nagumo system", *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, Vol. 17, 2012, p 1031-5.
- [20] Xue, M., Wang, J., Deng, B., and Wei, X., "Vibrational resonance in feedforward neuronal network with unreliable synapses", *Eur. Phys. J. B*, Vol. 86, 2013, p 1-9.
- [21] Uzuntarla, M., Yilmaz, E., Wagemakers, A., and Ozer, M., "Vibrational resonance in a heterogeneous scale-free network of neurons", *Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simul.*, Vol. 22, 2015, p 367-374.
- [22] Balenzuele, P., Rue, P., Boccaletti, S., and Garcia-Ojalvo, J., "Collective stochastic coherence and synchronizability in weighted scale-free networks", *New Journal of Physics*, Vol. 16, 2014, p 013036.
- [23] Leao, R. M., Li, S., Doiron B., and Tzounopoulos, T., "Diverse levels of an inwardly rectifying potassium conductance generate heterogeneous neuronal behavior in a population of dorsal cochlear nucleus pyramidal neurons", *J. Neurophysio.*, Vol. 107, 2012, p 3008-3019.
- [24] Liu, Q., Lee, E., and Davis, R. L., "Heterogeneous intrinsic excitability of murine spiral ganglion neurons is determined by Kv1 and HCN channels", *Neuroscience*, Vol. 257, 2014b, p 96-110.
- [25] Harrison, P. M., Badel, L., Wall, M. J., and Richardson M. J., "Experimentally verified parameter sets for modelling heterogeneous neocortical pyramidal-cell populations", *Journal. Pcbi.*, Vol. 11(8), 2015, p 1004165.
- [26] Fitzhugh, R., "Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane", *Biophys. J.*, Vol. 1, 1961, p 445-466.
- [27] Barabasi A. L., and Albert R., "Emergence of scaling in random networks", *Science*, Vol. 286, 1999, p 509-512.
- [28] Wang, W. X., Huang, L., Lai, Y. C., and Chen, G., "Onset of synchronization in weighted scale-free networks", *Chaos*, Vol. 19, 2009, p 013134.