

Izhikevich Sinir Hücresi Modelinin Raspberry Pi Kullanılarak Gerçekleştirilmesi

Vedat Burak YÜCEDAĞ^{1+*} and İlker DALKIRAN¹

¹Electrical-Electronics Engineering, Erciyes University, Kayseri, Turkey

* Corresponding author: vedatburakyucedag@erciyes.edu.tr

+ Speaker: vedatburakyucedag@erciyes.edu.tr

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

Özet – Canlılar koşma, yürüme ve emekleme gibi temel hareketlerini gerçekleştirmek için Merkezi Desen Üreteçleri olarak isimlendirilen ritmik desenler üreten sinir hücreleri topluluğuna sahiptir. Merkezi Desen Üreteçleri, canlıların bu temel hareketlerine ek olarak kalp atışı, solunum gibi ritmik olayları gerçekleştirmek için de görev alırlar. Merkezi Desen Üreteçleri'nin en temel birimi olan sinir hücrelerinin yapılarını ve görevlerini anlayabilmek için literatüre çeşitli sinir hücresi modelleri sunulmuştur (R. FitzHugh & J. Nagumo 1961, C. Morris & H. Lecar 1981, Matsuoka 1987, Izhikevich 2003). Hodgkin – Huxley Sinir Hücresi Modeli, literatüre sunulan ilk modellerdendir ve sinir hücresinin kimyasal olarak sahip olduğu özellikleri daha doğru bir şekilde ifade etmektedir (A. L. Hodgkin & A. F. Huxley 1952). Bu matematiksel model, dört adet lineer olmayan denklemle ifade edilmektedir. Denklemlerin çokluğu, karmaşıklığı artırmakta bunun sonucu olarak matematiksel modelin anlaşılması güç hale gelmektedir. Öte yandan Izhikevich' in modeli, Hodgkin-Huxley Sinir Hücresi Modeli gibi kimyasal doğruluğa oldukça yakındır ve Hodgkin-Huxley Sinir Hücresi Modeli'nden farklı olarak, matematiksel karmaşıklığı çok daha azdır. Bu çalışmada, Izhikevich' in sunmuş olduğu matematiksel modelin MATLAB ortamında sayısal analizi yapılmış, ayrıca Python programı kullanılarak Raspberry Pi üzerinde fiziksel gerçekleştirimi tamamlanmıştır. Daha sonra sayısal analiz ile Raspberry Pi üzerindeki gerçekleştirim sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda görülmüştür ki; standart bir yapıya sahip Raspberry Pi mini bilgisayarın da Izhikevich Sinir Hücresi Modeli' nin gerçekleştirmesinde çözüm olabilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Merkezi Desen Üreteci, Izhikevich, Python, Raspberry Pi, Sinir Hücresi Modeli

I. GİRİŞ

Genel olarak insan ve hayvan beyninin nasıl çalıştığını anlamak, daha detaylı olarak beyinde üretilen sinyallerin organlara iletimini sağlayan sinir hücrelerinin davranışlarını ve aktivitelerini anlamak amacıyla birçok biyolojik sinir hücresi modelleri geliştirilmiş ve çeşitli matematiksel eşitliklerle ifade edilmiştir [1-8].

Sinir sistemini oluşturan sinir hücrelerinin en temel görevi, bilgiyi ağırlıklandırarak iletmektir. Kimyasal olarak sinir hücrelerine uyarıcı akım uygulandığında zar yüzeyindeki iyon akışı değişir, bunun sonucu olarak aksiyon potansiyeli meydana gelir. Aksiyon potansiyeli, sinir hücrelerinin taşıdığı bilgiyi ifade eder. Biyolojik sinir hücreleri faz aksiyon potansiyeli (phasic spike), faz patlamalı aksiyon potansiyeli (phasic burst), sürekli aksiyon potansiyeli (tonic spike), sürekli patlamalı aksiyon potansiyeli (tonic burst) gibi çok farklı yapılar da aksiyon potansiyeli üretebilirler [2].

Günümüze kadar olan süreçte, çalışmalarını literatüre sunan bilim insanlarının ortak hedefleri, biyolojik sinir hücrelerinin ürettiği aksiyon potansiyeli çeşitliliğine en yakın ve en doğru yaklaşımı gerçekleştirmektir. Bu bağlamda 1952' de Alan Lloyd Hodgkin ve Andrew Fielding Huxley ortak çalışmaları olan sinir hücresi modelini literatüre sunmuşlardır [2]. Bu modelde sinir hücresinin iyonik mekanizması açıklanmıştır. Bu iyonik akışın zar yüzeyinde meydana getirdiği elektrik akımı ile ilgilenilmiştir. Biyolojik sinir hücresinin göstermiş olduğu davranışları son derece doğru bir şekilde ifade eden bu model, kapsamlı (4-boyutlu) olması

sebebi ile pek çok parametreye bağlıdır. Hodgkin-Huxley Model' inin (HH) sadeleşmiş hali 1972' de FitzHugh-Nagumo Model' i, (FHN) olarak ifade edilmiştir [1]. FHN, gevşeme osilatörünün bir örneğidir ve harici bir uyarıcı girişe sahiptir. 2 boyutlu olan bu model patlamalı aksiyon potansiyeli üretemez. Bir diğer iki boyutlu sinir hücresi modeli, Cathy Morris ve Harold Lecar tarafından 1981' de literatüre sunulmuştur [4]. Model, kalsiyum (Ca^{2+}) ve potasyum (K) iyon kanallarını kullanarak aksiyon potansiyelini matematiksel olarak ortaya koymuştur. Morris-Lecar Modeli, iletkenlik-tabanlı model olarak nöroloji ile ilgili çalışmalar yapan bilim insanları arasında popüler hale gelmiştir. Aksiyon Potansiyeli-Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (spike-burst) ile çalışmalar yapan J. L. Hindmarsh ve R. M. Rose, 3 adet diferansiyel denklem ile 1984' de sinir hücresinin modellenmesi üzerine [5]. Hindmarsh-Rose Modeli üzerine çatalanma analizi, senkronizasyon, kaos, donanımsal çözümler gibi çalışmalar literatürde mevcuttur [9-11].

Bir sinir hücresinin matematiksel modelinde aranan en temel özelliklerden biri kolay hesaplanabilirlik ve doğru bir aksiyon potansiyeli çeşitliliğine sahip olmasıdır. 2003' te Eugene M. Izhikevich, Hodgkin-Huxley Model' inin Aksiyon Potansiyeli çeşitliliğine sahip, aynı zamanda hesaplama kolaylığı açısından en iyilerden olan bir sinir hücresi modelini literatüre sunmuştur [7].

Bu çalışmada, Raspberry Pi mini bilgisayar üzerinde Izhikevich Sinir Hücresi Modeli fiziksel olarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu modelin sahip olduğu Aksiyon Potansiyeli çeşitliliğinin Raspberry Pi üzerinde de

gerçekleştirebildiği anlaşılmıştır. Çalışmamız, FPGA ve FPAA gibi “uygulamaya özel” tasarlanan yapılara karşın standart bir donanıma sahip olan Raspberry Pi’ nin de çözüm olabileceğini göstermektedir.

Izhikevich Sinir Hücresi Modeli’ ne dair esaslar ikinci bölümde ifade edilirken, modelin MATLAB ortamında benzetimi ve Raspberry Pi üzerinde gerçekleştirimi üçüncü bölümde sunulmuştur. Dördüncü bölümde sonuçlar açıklanmış ve beşinci bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır.

II. IZHKEVICH SİNİR HÜCRESİ MODELİ

Izhikevich Sinir Hücresi Modeli, aşağıda verilen 3 adet diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir [8]:

$$\frac{dv}{dt} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = a(bv - u) \quad (2)$$

$$v \geq 30 \text{ mV} \quad \begin{array}{l} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{array} \quad (3)$$

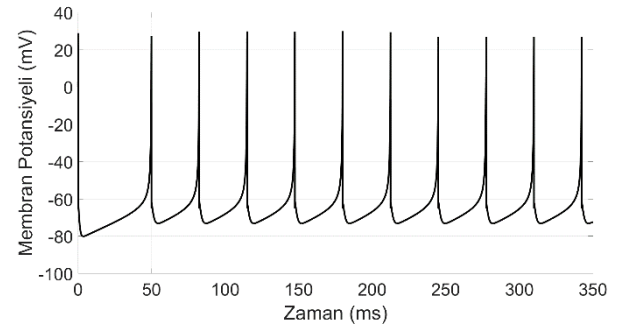
Burada v , sinir hücresinin membran potansiyelini, u , sodyum (Na^+) iyonik akımının aktivasyonunu ve potasyum (K^+) iyonik akımının inaktivasyonunu açıklamak için tanımlanan membran toparlanma değişkenini ifade etmektedir. a parametresi, membran toparlanma değişkeninin zaman ölçeğini tanımlar. Küçük a değerlerinde toparlanma süresi daha yavaş olup tipik değeri $a = 0.02$ ’ dir. b parametresi, toparlanma değişkeninin hassasiyetini ve membran potansiyelin eşik seviyesi dalgalanmalarını tanımlar. Tipik olarak $b = 0.2$ ’ dir. c parametresi, membran potansiyelinin aksiyon potansiyeli (spike) oluşturmasından sonra sıfırlama parametresi olarak tanımlanır ve tipik değeri $c = -65 \text{ mV}$ ’ dir. d parametresi ise membran toparlanma değişkeninin sıfırlama parametresi olarak tanımlanır ve tipik değeri $d = 2$ ’ dir. I ise uyarıcı akımı ifade etmektedir.

Sinir hücrelerine uyarıcı akım uygulanmadığı durumlarda hücre, denge durumundadır. Hücre zarı yüzeyinde net iyon akışı sıfırdır. Uyarıcı akım uygulanmaya başladığı andan itibaren hücre zarı yüzeyindeki net iyon akımı, değişmeye başlar ve eşik değeri (threshold) geçtiği anda o sinir hücresi, aksiyon potansiyeli üretmeye başlar [2].

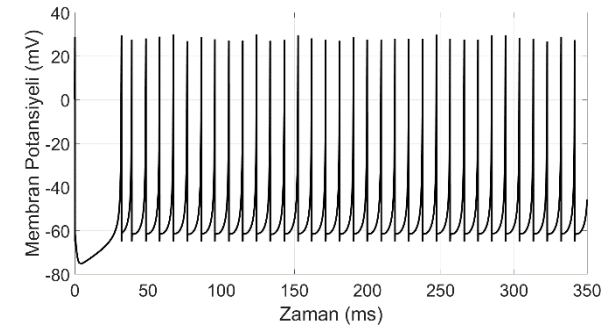
Sinir Hücresi Modeli’ nin MATLAB ortamında benzetimini yapmak için Izhikevich’ in daha önceki başka bir çalışmasındaki parametre değerleri kullanılmıştır [6-7]. Fiziksel gerçekleştirim sırasında Membran toparlanma değişkeninin zaman ölçeğini tanımlayan $a = 0.02$, toparlanma değişkeninin hassasiyetini belirleyen $b = 0.2$, ve uyarıcı akım $I = 14$ olarak belirlenmiştir. Buna karşın membran potansiyelinin aksiyon potansiyeli (spike) oluşturmasından sonra sıfırlama parametresi olarak tanımlanan c ve membran toparlanma değişkeninin sıfırlama parametresi olarak tanımlanan d parametreleri gerçekleştirim süresince farklı değerlerde seçilmiştir.

Aksiyon Potansiyeli (Spike) üretebilmek için $c = -65$, $d = 8$ (Şek. 1), Hızlı Aksiyon Potansiyeli (Fast Spike) üretebilmek için $c = -65$, $d = 2$ (Şek. 2), Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (Burst, Herbir Burst’ ta 2 Spike) üretebilmek için $c = -55$, $d = 4$ (Şek. 3), Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (Burst, Herbir Burst’ ta 8 Spike) üretebilmek için $c = -50$, $d = 2$ (Şek. 4) olarak belirlenmiştir. MATLAB ortamında benzetimi yapılan sinir hücresi modeli, Izhikevich’ in

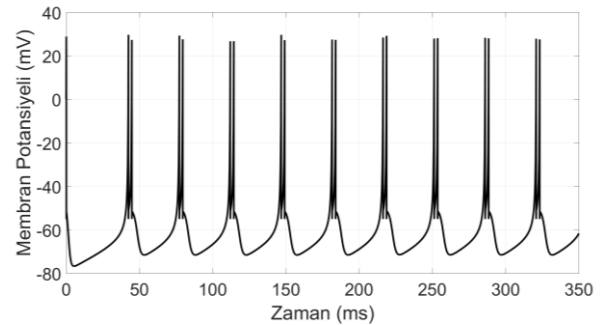
literatüre sunmuş olduğu çalışmasıyla birebir/büyük oranda örtüşmektedir [6-7].



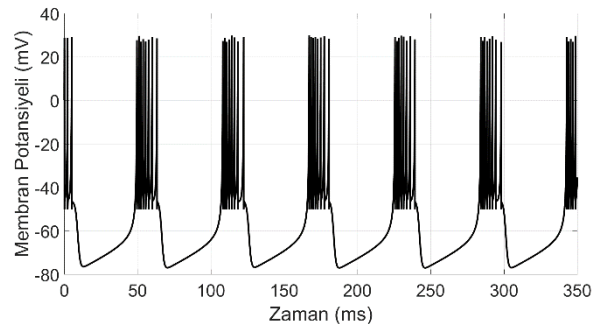
Şek. 1 Aksiyon Potansiyeli (Spike) $c = -65$, $d = 8$



Şek. 2 Hızlı Aksiyon Potansiyeli (Fast Spike) $c = -65$, $d = 2$



Şek. 3 Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (Burst) $c = -55$, $d = 4$



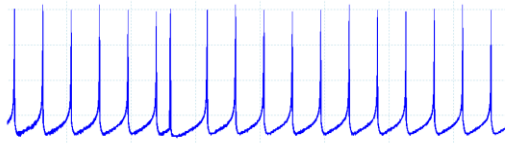
Şek. 4 Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (Burst) $c = -50$, $d = 2$

III. RASPBERRY PI ÜZERİNDE BENZETİM

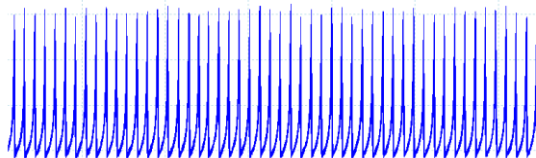
Raspberry Pi (RPI), okullarda temel bilgisayar eğitimi verilmesi için tasarlanıp geliştirilmiştir. İlk çıkış tarihi 29 Şubat 2012’ dir. Yıllar içerisinde farklı modelleri, kullanıma sunulmuştur. Açık kaynak kodlu olması sebebiyle üzerinde uygulama geliştirilmesi oldukça kolay ve hızlı olan RPi, Şubat 2016’ da Raspberry Pi 3 Model B ve Mart 2018’ de güncellenmiş sürümü Raspberry Pi 3 Model B+ kullanıcılara sunulmuştur. Kredi Kartı boyutunda olan RPi 3 Model B+ mini bilgisayar, Broadcom BCM2837BO SoC anakarta ve ARM Cortex-A53 1.4GHz 64bit 4 çekirdekli bir işlemciye sahiptir. 900Mhz çalışma frekansına sahip 1 GB Ram ile işlemlerini gerçekleştiren RPi 3 Model B+, dahili Wi-Fi ve

Bluetooth modülleri sayesinde uzaktan erişimi mümkün kılmaktadır. RPi Kart, Full HDMI, audio jak, 4 adet USB port, 1 adet ethernet porta sahip olması sebebiyle normal bir masaüstü bilgisayardan donanımsal olarak eksik hiç bir özelliği yoktur. Ayrıca 40 pin genel amaçlı giriş/çıkış (General Purpose Input/Output, GPIO) terminaline sahip olması ve harici kamera modülü bağlanabilmesi ile çeşitli tasarım projelerin gerçekleştiriminde kullanılmaktadır. SD Kart bağlantısı yapılabilmesi sebebiyle sınırlı hafıza problemi de aşılmıştır. RPi' nin enerjisini 5V-3A' lik bir DC kaynaktan alması tavsiye edilmektedir. Çok sayıda işletim sistemi yelpazesine sahip olan RPi, farklı Linux (Kali, Alpine, Ubuntu, Mint, Gentoo vb.), Android veya Windows 10 tabanlı işletim sistemleri ile çalıştırabilmektedir. Librelec, Pinet, Weather Station gibi özel kullanımlar için geliştirilmiş işletim sistemlerini de destekleyen RPi, resmi olarak Linux tabanlı Raspbian işletim sistemi kullanılmaktadır. Raspbian işletim sistemi, dahili olarak Python 2 ve Python 3 programlarına sahiptir [12].

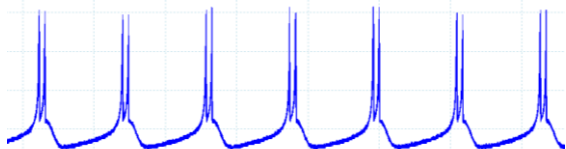
Bu çalışmada, Izhikevich Sinir Hücresi Modeli' nin RPi üzerinde benzetiminde Python 3 programı kullanılmıştır. Fiziksel gerçekleştirim sırasındaki model parametreleri, MATLAB ortamında yapılan benzetimde kullanılan değerler ile aynıdır. RPi üzerindeki gerçekleştirim sonuçları, Aksiyon Potansiyeli için Şek. 5, Hızlı Aksiyon Potansiyeli için Şek. 6, Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (her burst'ta 2 spike) için Şek. 7 ve Şek. 8' de görüldüğü gibidir. Şek. 9 fiziksel gerçekleştirim şemasını ifade etmektedir.



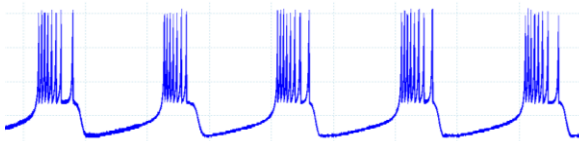
Şek. 5 Aksiyon Potansiyeli (Spike) $c = -65$, $d = 8$



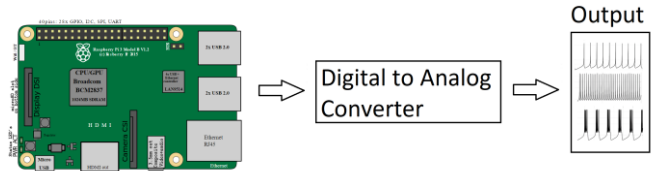
Şek. 6 Hızlı Aksiyon Potansiyeli (Fast Spike) $c = -65$, $d = 2$



Şek. 7 Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (Burst) $c = -55$, $d = 4$



Şek. 8 Patlamalı Aksiyon Potansiyeli (Burst) $c = -50$, $d = 2$



Şek. 9 Fiziksel Gerçekleştirim Şeması

IV. SONUÇLAR

MATLAB ortamındaki benzetim sonuçları ile RPi üzerindeki fiziksel gerçekleştirim sonuçları karşılaştırıldığında, her iki platformda da Membran Potansiyeli desenlerinin benzer olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca RPi mini bilgisayarın, bu çalışmada ele alınan sinir hücresi modeline ait matematiksel ifadeyi gerçek zamanlı olarak çözebildiği görülmektedir.

V. TARTIŞMA

Literatürde, farklı sinir hücrelerine ait matematiksel modellerin, Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array, FPGA) ve Alan Programlanabilir Analog Dizileri (Field Programmable Analog Array, FPA) üzerinde farklı benzetimleri vardır [13-14]. Bu çalışmada, "uygulamaya özel" tasarlanan FPGA ve FPA benzeri özel donanımların yerine standart yapıya sahip olan, maliyetleri göz önüne alındığında FPGA ve FPA benzeri donanımlara kıyasla çok daha uygun fiyatlı RPi' nin karmaşık denklemlerin çözümünde başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Yazılım tarafı düşünüldüğünde ise açık kaynak kodlu yapıya sahip RPi tabanlı uygulamaların daha kolay ve daha hızlı geliştirilebilir olduğu bir gerçektir.

REFERENCES

- [1] R. FitzHugh, "Mathematical models for excitation and propagation in nerve," *Biological Engineering*, 1969.
- [2] A. L. Hodgkin, A. F. Huxley, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve," *J. Physiol. (Lond)*, 117, pp. 500-544, 1952.
- [3] J. Nagumo, S. Sato, "On a response characteristic of mathematical neuron model," *Kybernetik*, vol. 10, pp. 155-164, 1972.
- [4] C. Morris, H. Lecar, "Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber," *Biophysical J.*, 35, pp. 193-213, 1981.
- [5] J. L. Hindmarsh, R. M. Rose, "A model of neural bursting using three coupled first order differential equations," *Proc. R. Soc. Lond. Biol.* 221, pp. 87-102, 1984.
- [6] E. M. Izhikevich, "Which Model to use for cortical spiking neurons?," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 5, 2004.
- [7] E. M. Izhikevich, "Simple model of spiking neurons," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, no. 6, 2003.
- [8] D. Mishra, A. Yadav, S. Ray, P. K. Kalra, "Exploring Biological Neuron models," *directions, the Research magazine of IIT Kanpur*, vol. 7, no. 3, pp. 13-22, 2006.
- [9] D. Zhang, Q. Zhang, X. Zhu, "Exploring a type of central pattern generator based on hindmarsh-rose model: from theory to application," *International journal of Neural system*, vol. 25, no. 1, pp. 1-15, 2015.
- [10] N. Dahasert, İ. Öztürk, R. Kılıç, "Experimental realizations of the HR neuron model with programmable hardware and synchronization applications," *Nonlinear Dyn.*, vol. 70, pp. 2343 - 2358, 2012.
- [11] M. Storace, D. Linaro, E. de Lange, "The Hindmarsh-Rose neuron model: bifurcation analysis and piecewise-linear approximations," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 18, no. 033128, pp.
- [12] (2018) The Raspberry Pi website. [Online]. Erişim: <https://www.raspberrypi.org/>
- [13] S. Y. Bonabi, H. Asgharian, S. Safari, M.N. Ahmabadi, "FPGA implementation of a biological neural network based on the Hodgkin-Huxley neuron model," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 8, no 379. pp.1-12, 2014.
- [14] N. Korkmaz, İ. Öztürk, R. Kılıç, "the investigation of chemical coupling in a HR neuron model with reconfigurable implementations," *Nonlinear Dyn.* Vol. 86, pp. 1841-1854, 2016