

بررسی عملکرد و بهبود نورون مصنوعی و پیاده‌سازی آن برروی FPGA

بنیامین کاکاوند/ گروه الکترونیک/ واحد شهرقدس/ دانشگاه آزاد اسلامی/تهران– ایران/ b.kakavand@gmail.com

مژده مهدوی/ گروه الکترونیک/ واحد شهر قدس/ دانشگاه آزاد اسلامی/ تهران– ایران/ m.mahdavi@qodsiau.ac.ir

مهدی زارع/ گروه الکترونیک/ واحد شهر قدس/ دانشگاه آزاد اسلامی/ تهران– ایران/ m.zare@gmail.com

چکیده

در این مقاله با هدف شبیه‌سازی رفتار تک نورون، به پیاده‌سازی سخت‌افزاری یک نورون زیستی طبق مدل Hodgkin-Huxley پرداخته شده است که این مدل بیشترین شباهت را به نورون واقعی دارد و پیاده‌سازی آن بسیار دشوار است، ولی به کمک استفاده از قابلیت پیکربندی دوباره و اجرای دستورات به‌صورت موازی، طراحی سخت‌افزاری سیستم نورونی بهینه‌شده، مبتنی بر FPGA انجام شده است. برای این‌منظور در پیاده‌سازی تک نورون، از ایده‌های سخت افزاری گوناگونی، بهره گرفته‌ایم تا بهترین نوع از نورون کامل را بر اساس سرعت بالا، حجم‌کم، دقت بالا و قابلیت توسعه‌پذیری، طراحی کنیم. برخی از ایده‌ها در طراحی و پیاده‌سازی عبارتند از انجام محاسبات دیجیتال با بیت محدود، ساده‌سازی توابع ریاضی و تبدیل عملیات ممیز شناور به ممیز ثابت، که علی‌رغم بهینه بودن و کاهش سخت‌افزار مصرفی، از ویژگی بیشینه موازی‌سازی و دقت کافی در تولید سیگنال خروجی نیز برخوردار باشد. مدل ارایه شده در این مقاله برای بسیاری از دانشمندان در حوزه علوم اعصاب شناختی، اهمیت فراوان دارد.

کلمات کلیدی: نورون زیستی، باز پیکربندی، مدل Hodgkin-Huxley، کاهش پیچیدگی.

Evaluation, improvement and implementation of an artificial neuron on FPGA

Benyamin Kakavand/ Department of Electronics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran./ b.kakavand@gmail.com

Mojdeh Mahdavi/ Department of Electronics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran/ m.mahdavi@qodsiau.ac.ir

Mahdi Zare/ Department of Electronics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran/ m.zare@gmail.com

ABSTRACT

In this paper, simulation the behavior of a single neuron, and the implementation of the hardware of a biochemical neuron according to the Hodgkin-Huxley model is investigated, that is closely resembles the real neuron, and its implementation is very difficult, But with the help of re-configuration and implementation on parallel, the FPGA-based hardware design of the optimized neuronal system was performed. For this purpose, we have been using a variety of hardware ideas for the implementation of single-neurons to design the best type of complete neuron based on high speed, compactness, high precision and expandability. Some of the ideas in design and implementation include doing limited digital calculations, simplifying mathematical functions, and converting floating-point operations to fixed-point, which have the optimization and reduction of consumable hardware, have the maximum parallelism and the precision of the production of the output signals. The model presented in this paper is very important for many scientists in the field of cognitive neuroscience.

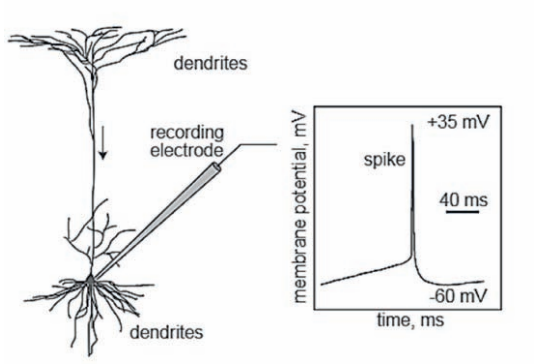
Keywords: Bio-neuron, reconfiguration, Hodgkin-Huxley model, reduced complexity.

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

۱- مقدمه

نورون‌هـا سلول‌های تحریکی و مهاری هستنـد که سیگنال‌ها را از نورون‌هـای دیگر دریافت نموده، داده‌هـا را پردازش کرده و آنها را به کمک یک فرآیند پیچیده الکتروشیمیایی منتقل می‌کنند. سازماندهی مغـز و فعل و انفعالات بین نورون‌ها بر اساس تابعیت نورون‌ها و محل آناتومیک آن‌هـا تغییر می‌کند. در یک شبکـه نورونی هزاران نورون به‌صـورت موازی با یکدیگـر در ارتباط هستنـد[۱]. در دهه کنونی، شبیه‌سـازی رفتار نورون، در یک شبکه نورونـی بزرگ به یک علاقه خاص تبدیل شده اسـت؛ به‌طوری‌که در سال‌های اخیر از شبکه‌های نورونی در زمینه‌های مختلف پزشکی مانند بررسی اثر بیماری اتیسم و یا تاثیر آن بر سیستم درک انسان استفاده شده است [۴-۱]. تعامل پویـا بین نورون‌ها در عملکرد شبکـه نورونی بسیار مهم است. چنین تعاملـی در سیستم با ماهیت سریال، قابـل شبیه‌سازی و پیاده‌سازی نیسـت، بنابراین مدل‌سازی مـوازی، برای تعامـلات پویای نورون‌ها ضروری بـوده و پیاده‌سازی یک سیستم نورونی زیستی در یک بستر مـوازی به‌منظور دست‌یابی به یک شبکه با تعـداد نورون‌های زیاد و زمان اجـرای کم قابل اجرا اسـت[۵]. ویژگی اجرای موازی نورون‌ها در یک شبکه نورونی بر روی نرم‌افزار ناممکن است[۶]. از بیـن روش‌های پیاده‌سازی سخت‌افزار، پیاده‌سـازی دیجیتال ترجیح داده می‌شود زیـرا ویژگی‌هایی چون سیگنال به نویـز کمتر، تکرارپذیری راحت‌تـر، انعطاف‌پذیـری زیـاد و قابلیـت تست راحت‌تـر نسبت به پیاده‌سازی آنالـوگ را داراست[۵]. به‌علاوه، زمان تولید نمونه اولیه و هزینه مهندسی طراحی دیجیتال کمتر است[۷]. پیاده‌سازی به کمک پردازنده‌هـای خاص منظوره به‌دلیـل ویژگی اجرای ترتیبی آن روش مناسبـی برای مدل کردن رفتار موازی نورون‌ها در یک شبکه نورونی نیست. پیاده‌سازی‌های مبتنی بر ASIC علیرغم سرعت مناسب اجرا، تـوان مصرفی پاییـن و هزینه تولید نهایی انـدک، قابلیت پیکربندی دوبـاره را ندارد [۸]. طرح‌های مبتنی بر FPGA دارای مزایای قابلیت پیکربنـدی دوباره و پردازش موازی اسـت و بدین جهت، سخت‌افزار بهینه بـرای پیاده‌سازی شبکه نورونی به‌شمار مـی‌رود [۵]. از جمله مزایای پیاده‌سازی بر روی FPGA این مزیـت است که کد طراحی شده با HDL، مختص یک نوعFPGA خاص نیست و به راحتی قابل انتقال از یک نوع تراشه به نوع دیگر است[۹].

هر نورون از یک هسته و بدنه نورون تشکیل شده است. نورون‌ها اطلاعات را از طریق شاخه‌هایـی به‌نام دندریت دریافت کرده و آن‌ها را به بدنه منتقل می‌کنند. این اطلاعات از آکسون به پایانه آکسون رسیده و به نورون‌های دیگر منتقل می‌شود. به این ترتیب، نورون‌ها اطلاعات را تا فاصله‌های دور منتقل می‌کننـد[۱۰]. فعالیت الکتریکی نورون‌ها از طریق نقل و انتقال یون‌ها صورت می‌گیرد[۱۰]. اگر نورون توسط یک جریان خارجی و یا توسط نورون‌های دیگر تحریک شود، تعادل یون‌هـا به‌هم ریخته و جریان‌های یونی از داخل به خارج غشاء و برعکس برقرار می‌شود. در اثر این تحریک، پتانسیل نورون به یک مقدار مثبت افزایش پیدا می‌کند و بعد از مدت کوتاهی به مقدار حالت استراحت خود بر می‌گردد. در این حالت گویند که نورون آتش کرده است و یا اسپایک زده است، شکل (۱) نمودار آتش کردن نورون را در اثـر تحریـک نشان می‌دهد. در طراحـی نـورون هر چه به سمت مدل‌های انتزاعـی پیش برویم، بهره‌وری محاسباتی افزایش می‌یابد، نمونه‌هایی از مدل انتزاعی در مراجع [۱۴-۱۱] مورد استفاده قـرار گرفته است. اگرچه این نوع شبکه‌ها در کاربردهای خاص، چون تشخیص الگو و . . . بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی نمی‌توان از آن انتظار رفتار یک نورون زیستی را داشت.



شکل ۱: تغییرات سطح ولتاژ نورون در یک اسپایک بر حسب زمان[۱۰]

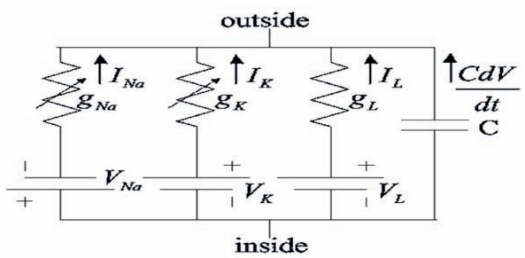
مدل نورونی H-H کامل‌ترین مدل نورونی زیستی است و رفتارهای یک نورون واقعی را از خود نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان مدل مناسب برای شبیه‌سازی رفتارهای مغز استفاده کرد. از آن جملـه می‌توان به مقاله[۱۵] اشاره کرد که در آن نویسنده، شبکه نورونـی از نورون های مـدل Hodgkin-Huxley (H-H) را با استفاده از ASIC پیاده‌سـازی کرده اسـت، اگرچه پیاده‌سازی خاص منظوره می‌تواند مزایای خود را داشته باشد، ولی در این حالت بعد از ساخت، امکان تغییر سیستم وجود ندارد. در[۱۶]، گرس و همکارانش نورون مدل H-H را بر روی FPGA پیاده‌سازی کرده‌اند. برای پیاده‌سازی این مدل، ابتدا مدل را در محیـط Simulink شبیه‌سازی کرده و توسط مولد سیستم مدل را به کد قابل انتقال بر روی FPGA تبدیل کرده‌اند. اگرچه در این روش، پیاده‌سازی راحت‌تر و دارای زمان کمی است، اما واضح است که سیستمی که با روش مبتنی بر HDL طراحی شود، انعطاف‌پذیری بیشتری در بهبـود طراحی و پیاده‌سازی بر روی انـواع تراشه‌هـای FPGA خواهد داشـت. پورهاج و تنگ در [۱۷] به پیاده‌سازی نورون مدل H-H پرداخته‌اند. آن‌ها برای پیاده‌سازی این مدل، از همان مرحله نخسـت به تبدیل و گسسته‌سازی معادلات مربوطه با استفاده از روش اویلر پرداختند. اگرچه این نوع پیاده‌سازی مصرف منابع سخت‌افزاری پایینی دارد و دارای سرعت اجرایی بالا است، ولی دقـت کمی دارد در حالی‌کـه در کاربردهای پزشکی دقت مهمترین معیار است. در [۲۰-۱۸] یک شبکه نورونی زیستی بر مبنای نورون‌های مدل H-H پیاده‌سازی شده‌است. در این پیاده‌سازی‌هـا از چندین مدار مجتمع آنالوگ که محاسبات مربوط به هر نورون در این مدارهای مجتمع انجام می‌شود، استفاده شده است. در این سیستم‌ها، به دلیل پیاده‌سازی نورون با مدارهای مجتمع، امکان تغییر مدل و یا تغییر اتصالات بعد از ساخت وجود ندارد. گریسیا و همکارانش در [۲۱] شبکه نورونی پیاده‌سازی شده در [۲۰] را برای بررسی رفتارهای مختلف نورون‌ها در شبکه نورونی استفاده کرده‌اند. آن‌ها به‌منظور کم‌کردن سخت‌افزار مصرفی، ثابت زمانی موجود در معادلات H-H را به‌صورت یک مقدار ثابت فرض کردند. اگرچه این کار باعث کم شدن فضای مصرفی می‌شود، ولی در مصارفی که نیاز به دانستن تغییرات این ثابت زمانی باشد، پاسخ‌گو نیست. مدل Izhikevich را می‌توان بین مدل‌های نورون زیستی و انتزاعی بـا سخت‌افـزار بـالا و دقـت متوسـط قرار داد، که در مقالات [۲۴-۲۲] به پیاده‌سازی این مدل پرداخته شده است. از بیـن تمامـی مدل‌هـای ارایه شده برای نورون، مدل H-H به‌عنوان یک مدل مناسب و کامل برای شبیه‌سازی رفتار نورون انتخاب شده اسـت [۲۱-۱۶]. تاکنـون تمایل کمتری به پیاده‌سازی مدل H-H به دلیل پیچیدگی پیاده‌سازی و فضای مصرفی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

زیاد آن وجود داشتــه اســت [۲۵]. قابلیت پیکربندی دوباره و اجرای موازی برای پیاده‌سازی شبکه‌های نورونی در انتخاب سخت‌افزار مناسب بسیار حائز اهمیت است. در بین بسترهــای موجود برای طراحی دیجیتال، FPGA هر دو ویژگی را دارد. بنابراین به‌عنوان بستر مناسب برای این پژوهش انتخاب شده است. از مدل تک نورون بهبود یافته در این مقاله می‌توان در راستای ساخت یک بستر سخت‌افزاری مناسب برای یک نورون با کانال‌های ورودی و خروجی فراوان استفاده کــرد که بــا الهام از ساختار مغــز بتواند قابلیت‌هــای مغز نظیر حجم کوچــک، سرعت پردازش زیاد، مصــرف توان کم و قابلیت تشخیص و استنتــاج چشمگیری را در خود داشته باشد. در ادامه و در بخش دوم مدل نــورون مذکور بیان می‌شود. در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی بــرای بهینه‌سازی هرکدام از اجزای موردنیاز توضیح داده می‌شود، در بخــش چهارم نتایج شبیه‌سازی، در بخش پنجم گزارش پیاده‌سازی و در انتها نیز نتیجه مقاله آمده است.

۲-مدل نورون H-H

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، مدل H-H برای نورون توسط Hodgkin-Huxley پــس از آزمایشات بسیار ارایــه گردید که با این توصیــف، توانستند جایزه نوبــل را از آن خود کنند. مهمترین ویژگی این مــدل، الهام گرفتن از ساختار بیولوژیکی نورون واقعی است. غشا نــورون مانند یک سد، یون‌های داخل نــورون را از مایع خارجی جدا می‌کنــد. این عمل می‌تواند توسط یک خــازن در مدارهای الکتریکی جایگزیــن شود. بنابراین یک خازن با ظرفیــت C می‌تواند نقش غشا سلول را برای مدل‌سازی بازی کند. مدل نورونی استفاده شده در این پیاده‌سازی، مــدل مرتبه چهار است. دو نوع نورون تحریکی و مهاری در شبکــه وجود دارد که ساختار مدل نــورون برای هر دو نوع نورون تحریکی و مهاری یکسان است. مدار شکل (۲) برای مدل‌سازی روابط نورون توسط هاجکین و هاکسلی معرفی شده است [۲۶].



شکل ۲: مدار پیشنهادی توسط هاجکین و هاکسلی در یک اسپایک [۲۶]

بــا توجه بــه [۱۰] و [۲۶،۲۷] رابطه بین پتانسیل غشاء و جریان‌های یونی و جریان تحریکی در معادله (۱) نشان داده شده است.

$$\frac{CdV}{dt} = I - I_{Na} - I_K - I_L \qquad (۱)$$

در عبــارت (۱) I_{Na} نشان‌دهنده جریان یونــی مربوط به سدیم است. ایــن جریان تحت تاثیر دو متغیر دریچــه فعال‌ساز (m) وغیرفعال‌ساز (h) اســت. فعال‌ساز ایــن دریچه از سه پره تشکیــل شده است که با توان ســه در m اثر می‌گذارد و سرعت باز شدن این دریچه بیشتر از سرعت بسته‌شدن دریچه توسط h است. رابطه (۲) نشان دهنده این جریان یونی است.

$$I_{Na} = \bar{g}_{Na} m^3 h (V - V_{Na}) \qquad (۲)$$

جریان پتاسیمی ناشی از حرکت یون های پتاسیم در رابطه (۳) نشان داده شــده است. دریچه مربوط به کانال این یون از چهار پره تشکیل شده است که با توان چهار در متغیر n نشان داده می‌شود.

$$I_K = \bar{g}_K n^4 (V - V_K) \qquad (۳)$$

در مدل H-H جریان‌هــای ناشی از سایر یون‌ها، از جمله یون کلسیم به‌صــورت یک جریان نشتی (IL) نشــان داده می‌شود. این جریان در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$I_L = g_L (V - V_L) \qquad (۴)$$

مقادیــر پارامترهای مربوط به دریچه‌هــای کانال‌های یونی با استفاده از معــادلات (۵) تــا (۱۳) بدســت می‌آیــد[۲۷]. روابــط (۵) تا (۷) نشان‌دهنده معادلات مربوط به پارامتر m است.

$$\alpha_m = \frac{0.182(V-35)}{1-e^{\frac{V+35}{9}}} \qquad (۵)$$

$$\alpha_h = 0.25e^{(-\frac{V+90}{12})} \qquad (۶)$$

$$\alpha_N = \frac{0.02(V-25)}{1-e^{-(\frac{V-25}{9})}} \qquad (۷)$$

روابط (۸) تــا (۱۰) نشان‌دهنده معادله مربوط به دریچه غیرفعال‌ساز کانــال یون سدیم است. با صرف‌نظر کردن از دینامیک h ، روابط H-H از مرتبه چهار به مرتبه دو کاهش یافته است.

$$\beta_h = \frac{0.25e^{\frac{V+62}{6}}}{e^{\frac{V+90}{12}}} \qquad (۸)$$

$$\beta_m = \frac{0.125(-(V+35))}{1-e^{\frac{V+35}{9}}} \qquad (۹)$$

$$\beta_N = \frac{0.002(-(V-25))}{1-e^{\frac{V-25}{9}}} \qquad (۱۰)$$

روابط مربوط به پارامتر کانال پتاسیمی در روابط (۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده است.

$$dn/dt = \alpha_n(1-n) - \beta_n n \qquad (۱۱)$$

$$dh/dt = \alpha_h(1-h) - \beta_h h \qquad (۱۲)$$

$$dm/dt = \alpha_m(1-m) - \beta_m h \qquad (۱۳)$$

پارامترهــای V،C ،T ،I و g بــه ترتیــب نشان‌دهنده چگالی خازنی، ولتــاژ، زمان، جریــان تحریکی و چگالــی رسانایی اســت. واحدهای استفاده شده برای این پارامترها برابر است با:

$\mu A/cm^2$ ،ms ،mV ،$\mu F/Cm^2$ و ms/sm^2

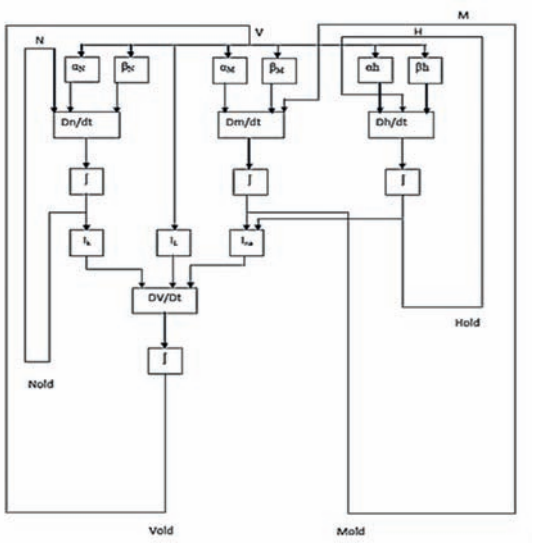
مقادیــر پارامترهای مورد استفاده در معــادلات بیان شده، برابر است بــا C=1 ،g Na =100 ،V Na = 50، g K =80 ، V K = -100 ، g L = 1.0 و VL = -67. ایــن مقادیــر همانند مقادیر استفاده شده در [۲۸،۲۷] است.

۲-۱- معماری پیشــنهادی برای پیاده‌سازی تک نورون براساس مدل H-H

بــرای پیاده‌سازی تــک نورون معماری شکل (۳) مــورد استفاده قرار گرفته است. هر کدام از بلوک‌های موجود در این معماری، نشان‌دهنده

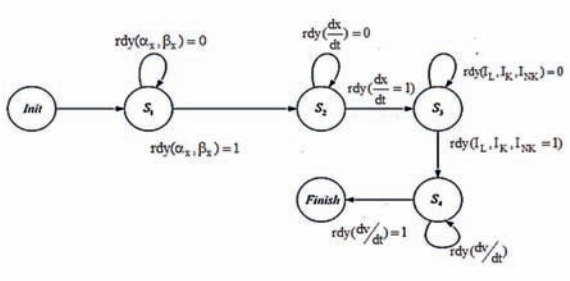
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

معادلات مربوط به تک نورون هستند که در روابط (۱) تا (۱۳) آورده شده است. کنتـرل ارتباط بین این بلوک‌ها، زمـان انتقال ورودی به هـر کدام، زمان آماده شدن خروجـی و تمامی فعالیت‌های مربوط به سیستـم کنترل به‌طوری‌که از درستی انجام عملیات اطمینان حاصل شود، توسط کنترلر انجام می‌شود، که ماشین حالت آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در ابتدا تمام بلوک‌ها ریست می‌شوند و کنترلر به مرحله بعدی، S1 تغییر حالت می‌دهد. در حالت S1 کلاک مربوط بـه بلوک‌هـای α_x و β_x که x شامل پارامترهـای m ,n ,h می‌شود فعـال شده و این مدارهـا کار خود را شروع می‌کننـد و تا زمانی که خروجی آنهـا آماده شود، کنترلر در این حالـت باقی می‌ماند. بعد از آمـاده شدن خروجی ایـن بلوک‌ها، کنترلر با آمـدن کلاک به حالت S2 تغییـر حالت می‌دهد. در حالـت S2 کلاک بلوک‌های dx/dt که x شامل m ,n ,h می‌شود، فعال شده و کنترلر تا زمانی که خروجی آمـاده نشـده، در این حالت باقی می‌مانـد. در S3 کلاک جریان، I_L ، I_{Na} و I_K، فعـال شده و بـا آماده‌شدن خروجی آن‌ها، کنترلر به حالت بعد یعنی S4، تغییر حالت می‌دهد. در S4 ، کلاک dv / dt فعال شده و بـا آماده شدن خروجی، کنترلر بـه حالت Finish رفته و پاسخ یک مرتبـه اجرای نورون آماده می‌شـود. کنترلر شکل (۵) که ارتباط بین بلـوک نورونی و انتگرال‌گیرها را ممکـن می‌سازد، از حالت S_{Init} کار خـود را شروع می‌کند و بـا آمدن کلاک به حالـت S1 تغییر حالت می‌دهـد. در حالت S1 کلاک انتگرال‌گیر فعـال می‌شود که با مقادیر اولیـه مقداردهی شود. در حالت S_{Back} که حالـت بازگشت برای تکرار عملیـات نیز است، کلاک انتگرال‌گیر غیرفعال شده، سپس کنترلر به حالـت S3 می‌رود و تا زمانی که خروجی بلوک نورونی آماده شود، در این حالت باقی می‌ماند.

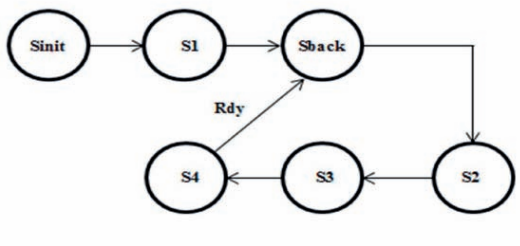


شکل ۳: معماری پیشنهادی برای پیاده‌سازی تک نورون

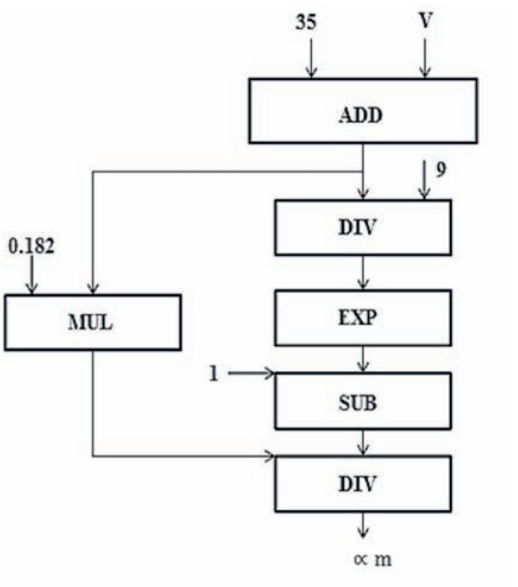
با آماده‌شدن خروجی بلـوک نورونی، کنترلر به حالت S4 منتقل شده و کلاک انتگرال‌گیر فعال می‌شود که داده‌های جدید را دریافت کند. شکـل (۶) بلـوک دیاگرام مـدار پیاده‌سازی شده بـرای معادله α_m را نشـان می‌دهد. با توجه به بلوک دیاگرام شکل (۳) و شکل (۶)، برای پیاده‌سـازی تک نورون و معادلات آن باید در ابتـدا تمام توابع مورد نیـاز، جمع/ تفریق، ضرب/ تقسیم، تابـع نمایی، توان و انتگرال‌گیر، با تعداد بیت مناسب پیاده‌سازی شوند، به‌طوری‌که نتیجه نهایی از دقت مناسـب برخوردار باشد و از طرفی مساحت زیادی را اشغال نکند. در ایـن زمینه ایده‌های مختلفی در پیاده‌سازی توابع در این مقاله به کار گرفتـه شده است، که در ادامه توضیحـات مربوط به آن‌ها شرح داده خواهد شد.



شکل ۴: کنترلر پیشنهادی برای کنترل عملیات بین بلوکها



شکل ۵: کنترلر طراحی شده برای تک نورون



شکل ۶: بلوک دیاگرام مدار پیاده‌سازی شده برای a_m

۳-الگوریتم پیشنهادی

در پیاده‌سازی سخت‌افزاری باید نحوه نمایش داده‌ها و تعداد بیت‌های لازم بـرای نمایش انتخـاب شود. برای تصمیم‌گیـری در مورد تعداد بیت مناسب برای پیاده‌سازی بهینه با دقت بالا، مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

- شبیه‌سـازی تک نورون توسـط Simulink به ازای بازه پیوسته‌ای از ورودی‌ها و بدسـت آوردن بازه تغییر تک‌تک متغیرها، و در نهایت تعییـن تعداد بیت مورد نیاز برای قسمـت اعشار با استفاده از بازه

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

تغییر متغیرها.

- محـدود کردن تعداد ارقام اعشار تمامی پارامترها و عملیات موجود در کد تک نورون شبیه‌سازی شده در Simulink، تغییر تعداد ارقام اعشـار و بررسی تغییرات حاصـل در نتیجه نهایی و فرکانس آتش کـردن نورون‌ها و بدسـت آوردن تعداد بیت‌های مـورد نیاز برای نمایش ارقام در پیاده‌سازی دیجیتال.
- از جملـه توابعی کـه در پیاده‌سازی آن‌هـا از روش‌های محاسبات سخت‌افـزاری برای بهبود پیاده‌سازی استفـاده شده است می‌توان بـه تابع نمایی اشاره کرد که محـدوده ورودی آن با صرف حداقل سخت‌افزار افزایش می‌یابـد. همچنین تابع توان که در پیاده‌سازی آن عـلاوه بر داشتـن دقت کافی، تعداد ماژول‌هـای مورد استفاده کاهش یافـت. معیارهای انتخاب روش پیاده‌سـازی توابع عبارتند از: استفـاده از توابع موردنظر در چند بخش مدار، تعداد ارقام مورد استفاده در عملیات، تعداد کلاک پالس‌هایی که می‌توان برای تولید خروجی بعـد از اعمال ورودی منتظر ماند، اولویت سرعت یا حجم سخت افزاری و بازه تغییرات ورودی. در ادامه به بررسی پیاده‌سازی توابع و ایده‌های ارایه شده می‌پردازیم.

۳-۱- پیاده‌سازی دیجیتال تابع نمایی

با توجه به روابط (۵) و (۶)، تابع نمایی از جمله توابع مهم و پرکاربرد در پیاده‌سـازی تـک نورون اسـت و دقت خروجـی آن تاثیر زیادی در دقـت خروجی نهایـی دارد. برای پیاده‌سازی ایـن تابع روش‌های مختلفی چـون پیاده‌سازی با روش اویلر، پیاده‌سازی بر اساس جدول و پیاده‌سـازی با استفـاده از الگوریتم CORDIC وجـود دارد. روش اویلـر به‌دلیل مصـرف سخت‌افزار زیاد و دقت کـم در خروجی روش مناسبـی نیست. ایده به‌کـار رفته در این مقالـه، تلفیقی از دو روش پیاده‌سازی بـر اساس جدول و الگوریتـم CORDIC به‌منظور دست یافتـن بـه پیاده‌سازی بهینـه، سرعت اجرای زیاد و دقـت بالا است. الگوریتـم CORDIC به‌دلیـل بهینه بـودن آن در پیاده‌سازی توابعی چـون؛ هایپربولیک، Sin و ... کاربـرد دارد. اساس کار این الگوریتم بـا استفاده از جمع و شیفت‌هـای پیاپی است که تا رسیدن به جواب مطلوب انجام می‌شـود. بدین‌ترتیب، با حداقل سخت‌افزار، خروجی با دقـت کافی تولید می‌شود[۲۹]. روابط (۱۴) تا (۲۰) نشان‌دهنده این الگوریتم است.

$$x[j+1] = x[j] - \sigma j^{2-j} y[i] \quad (۱۴)$$

$$y[j+1] = y[j] + \sigma j^{2-j} x[j] \quad (۱۵)$$

$$z[j+1] = z[j] - \sigma j^{\tan^{-1}(2^{-j})} \quad (۱۶)$$

$$z[0] = \theta \quad (۱۷)$$

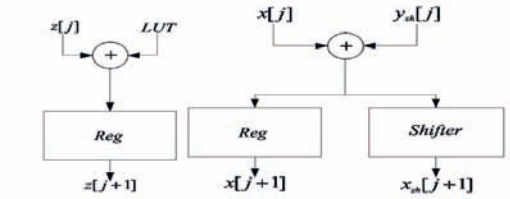
$$x[0] = y[0] = \frac{1}{k_h} \quad (۱۸)$$

$$k_h = 0.82816 \quad (۱۹)$$

$$x[f] = y[f] = e^{\theta} \quad (۲۰)$$

همان‌طور که از روابط (۱۴) تا (۲۰) پیداست، این الگوریتم با استفاده از شیفت‌رجیستر و جمع‌کننده قابل پیاده‌سازی است. برای پیاده‌سازی بخـش $\tan^{-1}$ ، بـا توجه به محـدوده j و مقـدار $\tan^{-1}$ ، مقادیر آن از قبـل محاسبه و ذخیـره شدند. در شکـل (۷) معمـاری به‌کار رفته بـرای پیاده‌سازی این الگوریتم نشان داده شـده است. بیشینه مقدار ورودی برای کارکـرد صحیح این الگوریتم برابر است با θ =1.11817 به‌طوری‌کـه بـه ازای مقادیر بزرگ‌تر از آن خروجـی درستی بدست نمی‌آید[۳۰].

از ایـن‌رو، بنـا به درستی روابـط (۲۱) و (۲۲) ایده دیگری که از آن استفـاده شد، جـدا کردن بخش صحیح از بخش اعشـار ورودی تابع نمایـی، محاسبه جداگانه هر بخـش و در نهایت حاصلضرب دو پاسخ بدست آمده برای محاسبه پاسخ تابع نمایی است.

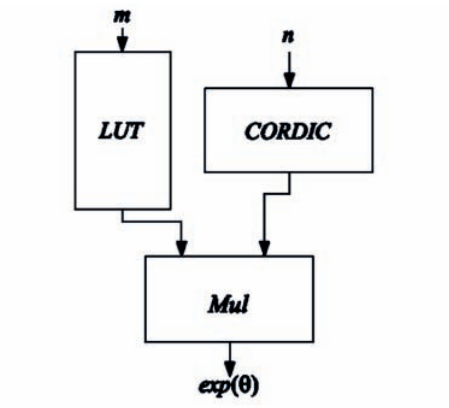


شکل ۷: بلوک دیاگرام پیشنهادی برای پیاده‌سازی الگوریتم CORDIC

$$\exp(\theta) = \exp(m).\exp(n) \quad (۲۱)$$

$$\theta = m + n \quad (۲۲)$$

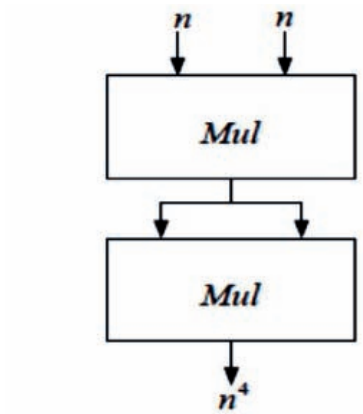
معمـاری پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شـده است. با استفاده از ایـن پیاده‌سازی، پاسخ دقیق تابع نمایـی، در زمان کم و با مصرف کمینه سخت‌افزار بدست آمد.



شکل ۸: بلوک دیاگرام پیشنهادی برای پیاده‌سازی تابع نمایی

۳-۲- پیاده‌سازی دیجیتال تابع توان

با توجه به روابط (۲) و (۳) برای پیاده‌سازی جریان‌ها نیاز به محاسبه توان سه و توان چهار است. برای پیاده‌سازی توان، معماری شکل (۹) در نظـر گرفته شده است. به این‌صـورت تعداد ضرب‌کننده‌ها کاهش یافته و به سرعت بالا و دقت مناسب دست یافتیم.



شکل ۹: بلوک دیاگرام محاسبه‌گر توان

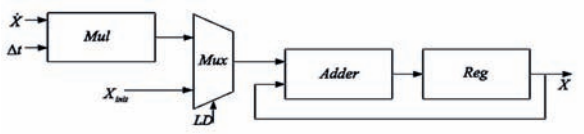
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

۳-۳-پیاده‌سازی دیجیتال تابع انتگرال‌گیر

بـا توجه بـه شکل (۳) در بخش قبل، ابتدا مقادیر n،V، h، m ، باید با مقادیر اولیه مقداردهی شوند و بعد از نخستین اجرا، خروجی انتگرال dv/dt بدسـت آید. برای پیاده‌سازی انتگرال‌گیر از ساده شده روش اویلـر با گام‌هـای زمانی بسیار کوچک که از زمـان آماده شدن پاسخ نورون بدست آمده، استفاده شد. رابطه استفاده شده برای پیاده‌سازی انتگرال‌گیر در عبارت (۲۳) نشان داده شده است.

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \Delta t.\dot{x}(t) \quad (۲۳)$$

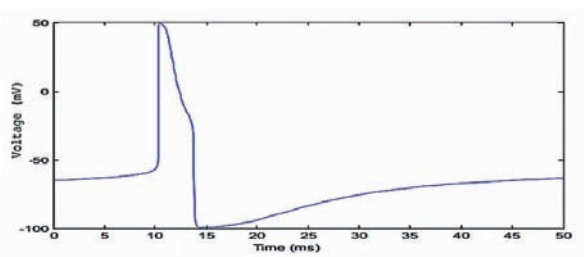
با توجه به رابطه (۲۳) پیاده‌سازی انتگرال‌گیر با استفاده از مدار شکل (۱۰) قابل انجام است.



شکل ۱۰: بلوک دیاگرام معماری پیشنهادی برای پیاده‌سازی انتگرال‌گیر

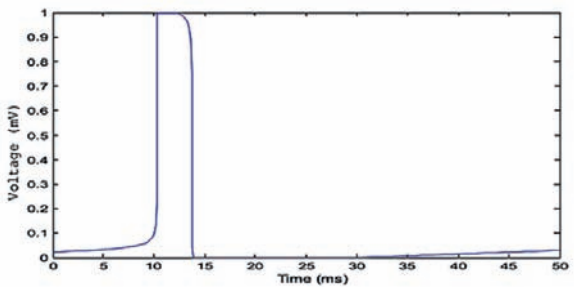
۴-نتایج شبیه‌سازی و پیکربندی محیط آزمایش

برای ارزیابی درستی خروجی نتایج مربوط به شبیه‌سازی پیاده‌سازی دیجیتـال با شبیه‌سازی انجام شده با کمـک نرم‌افزار MATLAB و در محیـط Simulink مقایسه شده است. برای پیاده‌سازی بخش‌های دیجیتـال از نرم‌افـزارXilinx ISE بهـره گرفتـه شده اسـت. کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز در نرم‌افزار Modelsim صورت گرفته است. برای شـروع پیاده‌سازی و بررسی مرحله به مرحله درستی آن، بایـد یک مـدل پایه وجود داشتـه باشد، که بتـوان مقادیر داده‌های پیاده‌سـازی شـده را با مقادیر آن سنجید. به ایـن منظور تک نورون مـدل H-H در Simulink شبیه‌سازی شد. پس از شبیه‌سازی سطح بالای انجام شده، با اعمال ورودی‌های مختلف به این نورون و بررسی تاثیـر تغییرات این ورودی، از درستی عملکرد و شبیه‌سازی اطمینان حاصـل شد. شکل (۱۱) نمودار سطح ولتـاژ غشاء نورون شبیه‌سازی شـده را بـه ازای جریـان ورودی ثابـت $I_{ext} = 0.5\,A$ نشان می‌دهد. نمـودار تغییرات مقادیر دریچه‌هـای m، n و h که سرعت تغییرات ایـن دریچه‌ها را نشان می‌دهد، به ترتیب در شکل (۱۲)، شکل (۱۳) و شکل (۱۴) آورده شده است.

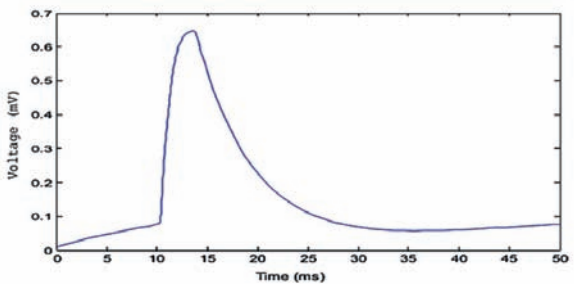


شکل ۱۱: نمودار سطح ولتاژ غشا نورون به ازای جریان خارجی I=۰٫۵mA

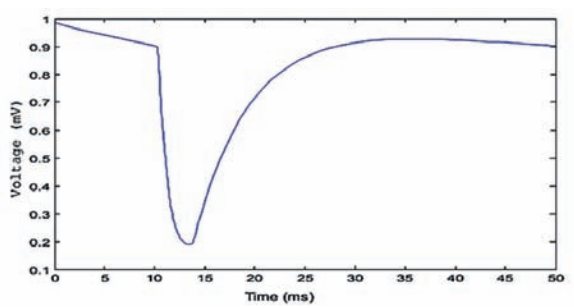
بـا بررسی شکل (۱۱)، شکـل (۱۲)، شکل (۱۳) و شکل (۱۴) معلوم می‌شـود که با اعمـال جریان ورودی، ابتدا دریچـهm با سرعت زیاد فعـال شده و باعث افزایش ولتاژ غشـاء می‌شود. سرعت باز شدن این دریچـه بیشتر از تغییـرات دریچه‌های n و h اسـت. بنابراین قبل از ایـن کـه دریچه‌های n و h بتوانند مانع تغییـرات ناشی از دریچه m شونـد، ولتاژ غشاء نورون به حد آستانه رسیده و نورون آتش می‌کند. سپـس بـا بیشتر شدن مقـدار n و کمتر شدن مقـدارh سطح ولتاژ کاهـش می‌یابد و این عملیات تازمانی که جریان اعمالی وجود داشته باشـد، تکرار می‌شود، نمـودار سطح ولتاژ غشاء نـورون بدون حضور جریان تحریکی در شکـل(۱۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکـل، در زمان‌های اولیه شبیه‌سازی سطح ولتاژ غشاء نورون به‌دلیل مقادیر اولیه و بـرای ایجاد تعادل بین آن‌ها، تغییر کرده، ولی با ثابت شدن مقادیـر پارامترها، ولتاژ غشاء نورون نیز ثابت می‌ماند. در شکل (۱۶) نمـودار سطح ولتاژ غشاء نورون به ازای جریان تحریکی خارجی ثابـت I = 0.7m A و ولتاژ اولیـه V = -65mV و متغیر دریچه اولیه n = 0.01 نشـان داده شده است. به‌ازای جریـان تحریکی اعمال شده، نـورون به‌صورت تکرار شونده آتش می‌کند. بنابراین درستی داده‌های تک نورون ثابت می‌شود.



شکل ۱۲: نمودار تغییرات متغیر دریچه m برحسب زمان به ازای جریان خارجی I=0.5mA



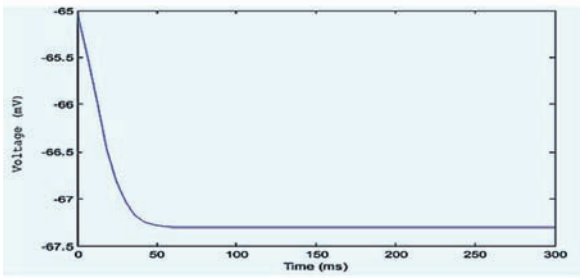
شکل ۱۳: نمودار تغییرات متغیر دریچه n برحسب زمان به ازای جریان خارجی I=0.5mA



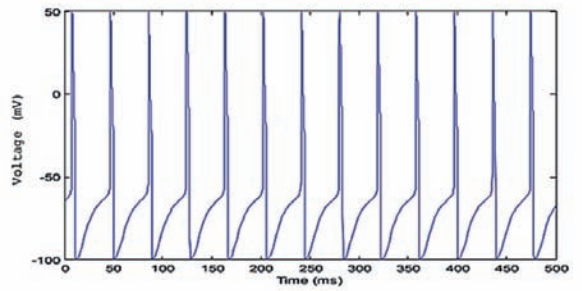
شکل ۱۴: نمودار تغییرات متغیر دریچه h برحسب زمان به ازای جریان خارجی I=0.5mA

در طـول مراحـل پیاده‌سازی، هر کدام از توابـع تشکیل دهنده تک نـورون، به‌طور جداگانه و به ازای بازه‌های ورودی مختلف تست شدند و مقادیرشان با مقادیـر شبیه‌سازی شده مقایسه شد. در شکل(۱۷) شبیه‌سـازی نورون پیشنهـادی با نرم‌افـزار Modelsim آمده است و درستی عملکرد آن بررسی شده است.

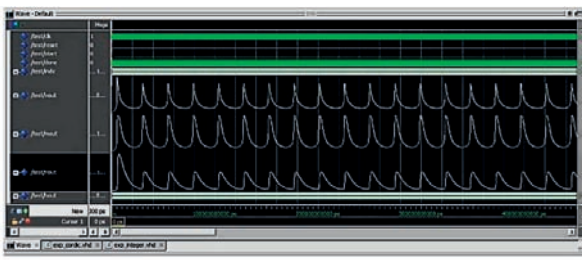
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]



شکل ۱۵: نمودار سطح ولتاژ غشا نورون بدون حضور جریان تحریکی



شکل ۱۶: نمودار سطح ولتاژ غشا نورون در حضور جریان تحریکی ثابت



شکل ۱۷: بخشی از شبیه‌سازی اسپایک‌های نورون پیشنهادی در نرم‌افزار Modelsim

۵- گزارش پیاده‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم برحسب زمان

در ایـن بخش درستی سیستم پیاده‌سازی شده با استفاده از داده‌های معتبر بدست آمده از شبیه‌سازی بخش قبل، مورد بررسی قرار گرفته و به تحلیـل عملکرد سیستـم، تحلیل زمانـی و سخت‌افزار مصرفی پرداختـه شده است. در جـدول (۱) نتایج سنتز مـدل پیشنهادی و منبع سخت‌افزاری قابل دسترس در تراشه موردنظر آمده است.

جدول ۱: گزارش سنتز مدل پیشنهادی

	HH(ARTIX-7)	
	used	available
FF	1700	160000
RAM	700byte	13Mbyte
LUT	5400	215000
DSP BLUK	4	740
MAX SPEED	250MHZ	

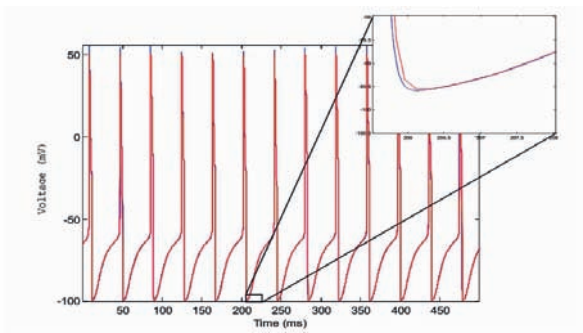
در محاسبـات Matlab بـرای به‌روزرسانی گام‌ها از مـدت زمانی که برابر است بـا ۷ میکروثانیه استفاده می‌شود اما در سخت‌افزار موجود بیشترین کلاک برابر با ۴ نانوثانیه اندازه‌گیری گردید بدون اینکه مدار از مقـدار زمانی که دارد، تخطی کند. در Matlab تمامی محاسبات با سیستم ممیز شناور و با دقت 64 Bit double انجام شده در حالی که برای دقت مورد نظـر 32 bit fix point در نظر گرفته‌ایم که ۱۲ بیت صحیح و ۲۰ بیت اعشار می‌باشد. در جدول (۲) مقایسه زمانی و دقت در نرم‌افزار مطلب و تراشه ARTIX-7 را مشاهده می‌کنید.

جدول ۲: مقایسه زمانی Artix-۷ و Matlab

	Artix-7	Matlab
Speed	4 ns	7 µs
Accuracy	fix point	floating point

در شکـل (۱۸)نمودار سطـح ولتاژ غشاء تک نورون بـه ازای جریان ورودی $I = 0.7m\ A$ و مقـدار اولیه $n = 0.01$ نشان داده شده است. نمودار قرمز رنگ نشان دهنده نتایج حاصل از شبیه‌سازی Matlab و نمـودار آبی رنگ نشان‌دهنده نتایج حاصل از پیاده‌سازی است. همان طـور که در این نمودار مشخص است، هیچ تغییری در فرکانس آتش کردن نورون که از جمله خصوصیات مهم در رفتار نورون است، دیده نمی‌شود.

بـا توجـه به شکل (۱۸) تنهـا اختلاف اندک در دو نمـودار است که آن هـم از خطـای دیجیتال‌سازی ناشی می‌شـود و قابل چشم‌پوشی اسـت. هر چند به علـت محدودیت هـای فضایی مربـوط به تراشه مـورد نظر، امکان موازی‌سازی کامـل در سیستم وجود ندارد ولی در طراحی دیجیتال موردنظر برای پیاده سازی سیستم نورونی، حداکثر موازی‌سـازی به کـار گرفته شد. این موضوع سبـب شده است که با توجـه به فرکانس کاری سیستم دیجیتـال پیاده سازی شده، سرعت عملکرد آن بسیار بیشتر از سرعت اجرای آن بر روی نرم‌افزار باشد. به طوریکه زمان اجرایـی سیستم نزدیک به زمان واقعی است، در حالی که زمان شبیه‌سازی سیستم با استفاده از MATLAB بر روی پردازنده Intel Core i5 2.8GHz برابـر ۷۳۶/۸۱ ثانیه اسـت. در مشابه‌ترین مقاله، تـک نورونـی بـا روش Izhikevich [۳۱] پیاده‌سازی شده اسـت، با توجه به اینکه محاسبات مدل H-H بسیار پیچیده‌تر از سایر مدل‌هـای نورونی بـرای دستیابی به دقت بـالا می‌باشد اما نسبت به مـدل IZH کـه از محاسبات بسیار ساده‌ای برخـوردار است، سرعت محاسبات که ملاک مهمی در عملکرد نورون است، بیشتر است.



شکل ۱۸: نمودار سطح ولتاژ غشا نورون در حضور جریان تحریکی خارجی I=0.7mA و n=0.01 (نتایج حاصل از نرم‌افزار Matlab (قرمز)، نتایج حاصل از پیاده‌سازی (آبی))

همان‌طورکـه در جـدول (۳) مشاهده می‌شـود، استفـاده از تراشه Artix-7 به‌دلیـل برخـورداری از بلوک‌هـای DSP، بالابردن سرعت محاسبات و کاهش سایر منابع سخت‌افزاری، مناسب‌ترین گزینه برای پیاده‌سازی این طرح بـوده است که در معماری‌های جدید نیز به آن تاکید شده است [۳۲،۳۳].

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]

جدول ۳: مقایسه سخت‌افزاری و سرعت

	IZH(VIRTIX-II)		HH(ARTIX-7)	
	used	available	used	available
بلوک DSP	----	----	4	740
سرعت ماکزیمم	241MHZ		250MHZ	

۶-نتیجه‌گیری

در ایــن مقاله به پیاده‌سازی یک سیستــم نورونی زیستی مدل H-H مبتنی بر FPGA پرداخته شد. در مقاله حاضر در پیاده‌سازی نورون از روش ساده‌ســازی محاسباتی بهره برده و با ایده‌های دیگر در طراحی، دقت محاسبات را افزایش دادیم. همچنین برای غلبه بر محدودیت‌های عملکرد نرم‌افزاری، طراحی سخت‌افزار با سرعت و با عملکرد بالا انجام شد. بدین منظور نیز ایده‌های مختلفی در طول مراحل پیاده‌سازی در نظــر گرفته شد که با به‌کار گرفتن آنهــا، تک نورون پیاده‌سازی شده دارای سرعــت بسیار بالا و زمــان اجرایی نزدیک به زمان واقعی باشد. از جملــه ویژگی‌های دیگر این طرح، مقیاس‌پذیر و قابل توسعه بودن آن بــرای تعداد بیشتری از نورون‌هــا است. از مدل بهبودیافته در این مقالــه می‌توان برای ساخت یک بستر مناسب کــه با الهام از ساختار مغــز بتواند قابلیت‌های مغز نظیر حجم کوچک، سرعت پردازش زیاد، مصــرف توان کم و قابلیت تشخیص و استنتاج چشمگیری را در خود داشته باشد، استفاده نمود.

مراجع

[1]E. Kandel, J. Schwartz, and T. Jessell, Principles of Neural Science, 4nd edition., McGraw-Hill Medical, 2000.

[2]J. Misra and I. Saha, “Artificial neural networks in hardware: A survey of two decades of progress,” Neurocomputing. Mag., vol. 74, no. 1, pp. 239-255, 2010.

[3]M. A. Cavu, C. Karakuzu, S. Sahin, and M. Yakut, “Neural network training based on FPGA with floating point number format and it’s performance,” Neural computing & applications. Mag., vol. 6, no. 1, pp. 195-202, 2011.

[4]Y. Heo and H. Song, “Circuit modeling and implementation of a biological neuron using a negative resistor for neuron chip,” BioChip J, vol. 92, no. 2, pp. 17-24, 2012.

[5]A. Muthuramalingam, S. Himavathi, and E. Srinivasan, “Neural network implementation using FPGA: issues and application,” International journal of information technology, vol. 4, no. 2, pp. 86-92, 2008.

[6]F. J. Pelayo, E. Ros, X. Arreguit, and A. Prieto, “VLSI Implementation of a Neural Model Using Spikes,” Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 13, no. 1, pp. 111-121, 1997.

[7]L. Gatet, H. Tap-Béteille, and F. Bony, “Comparison between analog and digital neural network implementations for range-finding applications,” Neural Networks, IEEE Transactions, vol. 20, no. 3, pp. 460-470, 2009.

[8]L. Wanhammar, DSP Integrated Circuits, 2nd edition., Academic Press, 1999.

[9]G. Li, V. Talebi, A. Yoonessi, and C. L. Baker Jr, “A FPGA real-time model of single and multiple visual cortex neurons,” J. Neurosci. Methods, vol. 193, no. 1, pp. 62-66, 2010.

[10]E. M. Izhikevich, Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting, 1st ed. MIT press, 2006.

[11]J. A. Bailey, R. Wilcock, P. R. Wilson “Behavioral simulation and synthesis of biological neuron systems using synthesizable VHDL,” Neurocomputing. vol. 74, pp. 2392-2406, 2011.

[12]M. Bahoura and C. W. Park, “FPGA-implementation of dynamic time delay neural network for power amplifier behavioral modeling,” Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 73, no. 3, pp. 819-828, 2012.

[13]F. Khan, M. Uppal, W. C. Song, M. J. Kang, and A. Mirza,” FPGA implementation of a neural network for character recognition,” Advances in Neural Networks Symposium, pp. 1357–1365, China, 2006.

[14]S. Sahin, Y. Becerikli, and S. Yazici,” Neural network implementation in hardware using FPGAs,” in Neural Information Processing, pp. 1105–1112, China, 2016.

[15]Q. Zou, Y. Bornat, J. Tomas, S. Renaud, and A. Destexhe,” Real-time simulations of networks of Hodgkin-Huxley neurons using analog circuits,” presented at the Neurocomput, vol.69, pp 1137–1140, 2006.

[16]E. L. Graas, E. A. Brown, and R. H. Lee,” An FPGA-based approach to high-speed simulation of conductance-based neuron models,” Neuroinformatics, vol. 2, pp. 417-435, 2004.

[17]P. Pourhaj and D. H.-Y. Teng, ” FPGA based pipelined architecture for action potential simulation in biological neural systems, “Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1–4 , Canada, 2010.

[18]Y. Zhang, J. Nunez-Yanez, J. McGeehan, E. Regan, and S. Kelly,” A biophysically accurate floating point somatic neuro processor “,Conference on Field Programmable Logic and Applications, pp. 26–31, Prague, 2009.

[19]S. Saïghi, J. Tomas, Y. Bornat, B. Belhadj, O. Malot, and S. Renaud, “Real-time multi-board architecture for analog spiking neural networks “, Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits, pp. 1939 –1942, France, 2010.

[20]S. Saïghi, T. Levi, B. Belhadj, O. Malot, and J. Tomas, “Hardware system for biologically realistic, plastic, and real-time spiking neural network simulations, “IEEE International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1-7, Spain, 2010.

[21]F. Grassia, T. Lévi, J. Tomas, S. Renaud, and S. Saïghi, ” A neuromimetic spiking neural network for simulating cortical circuits, “ IEEE Information Sciences, pp. 1–6, USA, 2011.

[22]M. Mokhtar, D. Halliday, and A. Tyrrell,” Hippocampus-inspired spiking neural network on FPGA”, Evolvable Systems: From Biology to Hardware, pp. 362–371, Prague, 2008.

[23]K. L. Rice, M. A. Bhuiyan, T. M. Taha, C. N. Vutsinas, and M. C. Smith,” FPGA Implementation of Izhikevich Spiking Neural Networks for Character Recognition, “IEEE in International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, pp. 451–456, Mexico, 2009.

[24]A. Cassidy and A. G. Andreou,” Dynamical digital silicon neurons”, IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, pp. 289 –292, USA, 2008.

[25]E. M. Izhikevich, “Which model to use for cortical spiking neurons?,” IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 15, pp. 1063 –1070, 2004.

[26]A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, “A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve,” The Journal of physiology, vol. 117, pp. 500–544, 1952.

[27]C. Börgers, S. Epstein, and N. J. Kopell, “Background gamma rhythmicity and attention in cortical local circuits: a computational study,” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 102, pp. 7002-7007, 2005.

[28]G. B. Ermentrout and N. Kopell, “Fine structure of neural spiking and synchronization in the presence of conduction delays,” Proceedings of the National Academy of Science., vol. 95, pp. 1259–1264, 1998.

[29]M. D. Ercegovac and T. Lang, Digital arithmetic, Morgan Kaufmann publishes, 2003.

[30]D. R. Llamocca-Obregón and C. P. Agurto-Ríos, “A fixed-point implementation of the expanded hyperbolic CORDIC algorithm,” Latin American applied research, vol. 37, pp. 83–91, 2007.

[31]H. Soleimani, A. Ahmadi. And M. Bavandpour, “Biologically Inspired Spiking Neurons,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers., vol. 59, pp. 2991 - 3004, 2012.

[32]QY. Sun, QX. Wu, X. Wang, L Hou; ”A spiking neural network for extraction of features in color opponent visual pathway and FPGA implementation” Int. J. Neurocomputing, vol 228 ,pp 119-132, 2017.

[33]L Wan, Y Luo,” Efficient neuron architecture for FPGA based spiking neural network” IEEE Signals and Systems, pp. 1-6, UK, 2016.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-16]