دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی الکترونیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک

عنوان پایان‌نامه

ارائه‌ی یک مدل نورونی کم‌هزینه‌ی مبتنی بر نگاشت بدون ضرب کننده و پیاده‌سازی سخت‌افزاری آن

استاد راهنما:
دکتر آرش احمدی

نگارش :
فرناز خانی

مهرماه ۹۳

سپاس‌گزاری

سپاس و ستایش برای خداست، آن نخستین بی آغاز و آن واپسین بی انجام. او که دیده‌های بینندگان از دیدنش فروماند و اندیشه‌های وصف کنندگان ستودنش نتواند؛ و سلام و درود بر محمّد (ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم، آنان که وجودمان وام‌دار وجودشان است.

بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ":

از استاد باکمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر آرش احمدی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پژوهش را بر عهده گرفتند؛

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی چشم‌داشت برای من بوده‌اند؛

از همسر عزیزم، آن که سایبان عشق و آرامش و تکیه‌گاه امن و آسایش و برترین آموزگار خوش بینی و امید من در دوران تحصیل بود،

و از همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند،

نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به :

بانور تو زمین شرف آسمان گرفت — چل روز مصطفی (ص) ثمری بی کران گرفت

پابر زمین گذاشتی و خاک جان گرفت — تاآمدم بگویم زهرا (س) زبان گرفت

گفتم که رخصتی بده بهتر بخوانمت — مهرت اجازه داد که مادر بخوانمت

آن که تو را به جمله ی "لولاک" می شناخت — درک تو را فراتر از ادراک می شناخت

پرواز را چه کس بجز افلاک می شناخت — بانوی آب را پدر خاک می شناخت...

نام پدر همیشه به دنبال مادر است — خیر العمل محبت زهرا (س) و حیدر (ع) است

تقدیم به مادرترین مادران دنیا صدیقه طاهره، حضرت زهرا (س) و پدرترین پدران دنیا، حضرت علی (ع)

و تقدیم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

به امیدبخش ترین نگاه زندگی ام، چشمان مهربان مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشقشان آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانی شان را سپاس نتوانم بگویم. بوسه بر دستان پرمهرشان

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.

چکیده

در سال‌های اخیر سیستم‌های دینامیکی گسسته یا همان نگاشت، در مطالعه‌ی نورون‌ها و شبکه‌های عصبی به طور خاصی مورد توجه قرارگرفته‌اند. می‌توان معادلات دیفرانسیل معمولی را که توصیف‌کننده‌ی رفتار بیولوژیکی نورون هستند، با استفاده از گسسته سازی در زمان به نگاشت تبدیل کرد. مدل‌های نورونی مبتنی بر نگاشت، در مطالعه‌ی رفتار شبکه‌های عصبی در ابعاد واقعی گزینه‌های بسیار مناسبی هستند. به دست آوردن درک صحیحی از رفتار بیولوژیکی تک‌نورون و مطالعه‌ی رفتار دسته‌جمعی نورون‌ها که در شبکه‌های بزرگی پیکربندی شده‌اند، از مطالعات اجتناب‌ناپذیر برای درک عمل کرد مغز به شمار می‌رود. به همین دلیل نوآوری‌های این پژوهش را می‌توان در دو گروه کلی دسته‌بندی کرد:

۱) ارائه‌ی یک مدل بسیار کم هزینه و مبتنی بر نگاشت که به دلیل هزینه‌ی کم، مناسب برای استفاده در شتاب‌دهنده‌های سخت‌افزاری در مطالعه‌ی بیولوژیکی شبکه‌های بسیار بزرگ نورونی در ابعاد واقعی است،

۲) پیاده‌سازی سخت‌افزاری این مدل به طوری که در مقایسه با سایر مدل‌های ارائه‌شده، سریع‌تر (توانایی کار در فرکانس بالاتر) بوده و منابع سخت‌افزاری بسیار کم‌تری را به کار برد.

توانایی کار در فرکانس بالاتر و سرعت بیش‌تر این مدل برای تولید خروجی، نقطه‌ی قوت این مدل به حساب می‌آید که می‌توان از آن برای جبران ضعف زمان طولانی شبیه‌سازی شبکه‌های نورونی به روش نرم‌افزاری استفاده نمود.

تاکنون مدل‌های نرم‌افزاری بسیاری ارائه‌شده‌اند که رفتار شبکه‌های عصبی را توصیف و بررسی می‌کنند، اما پیاده‌سازی سخت‌افزاری تک‌نورون و شبکه‌های عصبی مزیت بیش‌تری نسبت به مدل‌های نرم‌افزاری دارند. در این پژوهش یک مدل نورونی مبتنی بر نگاشت ارائه‌شده و پیاده‌سازی سخت‌افزاری آن مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با در نظر گرفتن محدودیت‌های لازم برای کم‌هزینه بودن مدل و درعین‌حال توانایی آن برای تولید رفتارهای مختلف نورونی، رابطه‌ی ریاضی مدل ارائه‌شده و سپس برای اطمینان از درستی مدل ارائه‌شده، پاسخ مدل در نرم‌افزار MATLAB مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ارزیابی درستی رفتار مدل ارائه‌شده از معیار هم‌بستگی استفاده شده است. محاسبه‌ی تابع هم‌بستگی بین خروجی مدل رالکو و مدل‌های ارائه‌شده مشابهت زیاد بین پاسخ‌های این مدل‌ها را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده‌ی قابل‌قبول بودن مدل‌های ارائه شده است.

در مرحله‌ی بعد، با تبدیل مدل ریاضی به توصیف سخت‌افزاری، عمل کرد مدل در نرم‌افزار Modelsim مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت پس از اطمینان از کارایی مدل، به کمک نرم‌افزار ISE خروجی مدل بر روی FPGA شرکت زایلینکس Virtex II-Pro ارائه شده است. خروجی‌های نشان داده‌شده بر روی اسیلوسکوپ حاکی از توانایی مدل‌های ارائه‌شده در تقلید کامل رفتارهای نورونی مدل رالکو است.

در ارائه‌ی مدل‌های پیشنهادی صرفه‌جویی در استفاده از منابع سخت‌افزاری (مثل ضرب کننده‌ها و جمع کننده‌ها و ...) بسیار مورد توجه قرار داده شده است، زیرا هدف نهایی از ارائه‌ی این مدل، ارائه‌ی ابزاری مناسب برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری شبکه‌های بیولوژیکی در ابعاد واقعی (که نیازمند پیاده‌سازی صدها میلیون نورون می‌باشد) است.

در پیاده‌سازی سخت‌افزاری این مدل از یک بلوک جمع کننده و یک مقایسه‌گر کوچک‌تر یا مساوی ۲۰ بیت استفاده شده است. در بدترین حالت ۱ درصد از فلیپ فلاپ‌های FPGA برای پیاده‌سازی دیجیتال مدل استفاده‌شده‌اند و کم‌ترین فرکانس به دست آمده برابر ۲۳۵ مگاهرتز است که در مقایسه با نمونه مدل‌های پیاده‌سازی شده فرکانس بالاتری دارد.

مقایسه‌ی مدل ارائه‌شده با سایر مدل‌های مبتنی بر نگاشت، نشان می‌دهد که این مدل کم‌هزینه بوده و برای کاربردهایی که سرعت، هزینه، قابلیت اعتماد پذیری و بازده انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است، مناسب می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول، مقدمه ۱

۱-۱ مقایسه‌ی مغز انسان با کامپیوتر ۲

۱-۲ تلاش حوزه‌های مختلف علم برای ادراک و تقلید رفتار و عمل کرد مغز ۴

۱-۳ اهمیت مطالعه‌ی نوروبیولوژی ۷

فصل دوم، مقدمه‌ای بر نورون و شبکه‌های عصبی ۱۰

۲-۱ نورون و اجزای آن ۱۱

۲-۱-۱ جسم سلولی ۱۲

۲-۱-۲ دندریت و آکسون ۱۲

۲-۱-۳ غلاف میلین ۱۳

۲-۱-۴ سلول‌های شوان ۱۳

۲-۲ تقسیم‌بندی نورون‌ها ۱۴

۲-۲-۱ تقسیم‌بندی نورون‌ها از نظر ساختار ۱۴

۲-۲-۲ تقسیم‌بندی نورون‌ها از نظر نوع کار ۱۵

۲-۳ سیناپس ۱۶

۲-۴ انتقال اطلاعات بین نورون‌ها ۱۷

فصل سوم، مروری بر مدل‌های نورونی ارائه‌شده ۱۹

۳-۱ مقدمه ۲۰

۳-۲ مدل‌های مبتنی بر رسانایی ۲۱

۳-۲-۱ مدل هاچکین- هاکسلی ۲۲

۳-۲-۲ مدل موریس- لکار ۲۵

۳-۲-۳ مدل ویلسون ۲۵

۳-۲-۴ مدل فیتز هاگ ۲۶

۳-۲-۵ مدل هیندمارش-رز ۲۶

۳-۲-۶ مدل‌های خانواده‌ی IF ۲۶

۳-۳ مدل‌های نورونی مبتنی بر نگاشت ۳۲

۳-۳-۱ مدل‌های گسسته‌ی به دست آمده از معادلات دیفرانسیل ۳۳

۳-۳-۲ مدل‌های مبتنی بر نگاشت ذاتی ۳۷

۳-۴ مقایسه‌ی مدل‌های مبتنی بر رسانایی و مدل‌های مبتنی بر نگاشت ۵۳

فصل چهارم، روش‌های پیاده‌سازی و مدل‌های پیشنهادی ۵۶

۴-۱ روش‌های شبیه‌سازی و پیاده‌سازی ۵۷

۴-۱-۱ پیاده‌سازی آنالوگ ۵۷

۴-۱-۲ روش‌های نرم‌افزاری ۵۷

۴-۱-۳ سوپر کامپیوترها ۵۸
۴-۱-۴- سیستم‌های مبتنی بر FPGA ۵۸
۴-۱-۵- راه‌حل‌های دیگر ۵۸
۴-۲ مدل کم‌هزینه‌ی ارائه‌شده مبتنی بر نگاشت ۵۹
۴-۲-۱ مدل تکه‌ای- خطی ۶۱
۴-۲-۲ مدل نگاشت بیتی ۶۲
فصل پنجم، پیاده‌سازی سخت‌افزاری ۶۹
۵-۱ چرا پیاده‌سازی سخت‌افزاری؟ ۷۰
۵-۲ مراحل مختلف طراحی دیجیتال ۷۲
۵-۲ نمودارهای زمان‌بندی مدل‌های پیشنهادشده ۷۳
۵-۳ انتخاب تعداد بیت و سیستم ممیز ثابت ۷۸
۵-۴ نتایج پیاده‌سازی بر روی FPGA و مقایسه‌ی نتایج با برخی از مدل‌های ارائه‌شده‌ی دیگر ۸۰

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ ساختار یک سلول عصبی (نورون) و بخش‌های مختلف آن ۸۱
شکل ۲-۲ ساختار عصب و غلاف میلین ۱۲
شکل ۲-۳- ارتباط نورون با عصب و ارتباط غلاف میلین با نورون ۱۴
شکل ۲-۴- نورون حرکتی، حسی و میانی ۱۵
شکل ۲-۵- انواع سلول‌های نوروگلیا در سیستم عصبی مرکزی ۱۶
شکل ۲-۴- فضای سیناپسی ۱۷
شکل۳- ۱- مدار معادل ارائه‌شده برای تقلید رفتار نورون توسط هاچکین و هاکسلی ۲۳
شکل ۳-۲- دینامیک m_∞ و h_∞ و n_∞ در مدل هاچکین - هاکسلی ۲۴
شکل۳-۳- مدار معادل مدل IF خطی و غیرخطی ۲۷
شکل۳-۴- پرتره‌ی فاز مدل LIF مربوط به رابطه‌ی (۳-۸) ۲۹
شکل۳-۵- پرتره‌ی فاز مدل QIF مربوط به رابطه‌ی (۳-۹) ۳۱
شکل۳-۶- نگاشت بازگشتی مدل مبتنی بر نگاشت LIF مربوط به رابطه‌ی (۳-۱۰) با گام گسسته سازی ۳۵
شکل۳-۷- نگاشت بازگشتی مدل مبتنی بر نگاشت QIF مربوط به رابطه‌ی (۳-۱۳) و نمودار cobweb برای ۲۰۰ نمونه‌ی نخست چرخه‌ی ۳۷
شکل ۳-۸- نگاشت بازگشتی متغیر x مربوط به مدل آشوب ناک مبتنی بر نگاشت رالکو ۳۸
شکل۳-۹- برخی از رفتارهای نورونی که مدل IF قادر به تولید آن‌ها نیست ۳۹
شکل۳.-۱۰- دینامیک نگاشت سریع به ازای $\alpha = 5.6$ و $y_n = y = -3.75$ ۴۳
شکل۳-۱۱- اسپایک‌زنی و اسپایک-برست تولیدشده توسط نگاشت به ازای مقادیر مختلف پارامترها ۴۴
شکل ۳-۱۲- پاسخ مدل KT به ورودی‌های تحریک اعمال‌شده ۴۸
شکل ۳-۱۳- رفتار اسپایک‌زنی سریع و آشوب ناک ۴۸
شکل ۳-۱۴ تأثیر پارامترهای مختلف مدل KTz بر روی شکل موج خروجی ۵۰
شکل۳-۱۵ مثال‌هایی از رفتار مدل KTz بدون رفتار ورودی ۵۱
شکل ۳-۱۶- رفتارهای تحریک‌پذیر مدل KTz ۵۲
شکل ۳-۱۷- تغییرات پتانسیل غشا بر حسب زمان ۵۴
شکل۴-۱- نمونه‌ای از رفتارهای تولیدشده توسط مدل تقریبی ارائه‌شده به روش PWL ۶۲
شکل۴-۲- شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی استفاده‌شده برای ارائه‌ی مدل‌های پیشنهادی ۶۴
شکل۴-۳- منحنی $2^{1.4375x}$ و تقریب خطی آن ۶۵
شکل۴-۴- خروجی مدل اول رالکو، خروجی مدل پیشنهادی اول و خروجی مدل پیشنهادی دوم ۶۷
شکل ۵-۱- مراحل مختلف یک طراحی دیجیتال ۷۳
شکل۵-۲- نمودار زمان‌بندی مربوط به مدل پیشنهادی اول و دوم ۷۶
شکل۵-۳- نمودار زمانی مربوط به بلوک $m\times$ برای تولید رفتارهای مختلف در مدل پیشنهادی اول ۷۷
شکل۵-۴- نمودار زمانی مربوط به بلوک $\alpha\times$ برای تولید رفتارهای مختلف در مدل پیشنهادی دوم ۷۷
شکل۵-۵- خروجی‌های مربوط به پیاده‌سازی سخت‌افزاری مدل‌های پیشنهادی بر روی XILINX Virtex-II PRO FPGA مشاهده‌شده بر روی اسیلوسکوپ ۸۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقایسه‌ی مغز انسان با کامپیوتر

تفکر در آفرینش انسان و چگونگی عمل کرد ساختار مغز موجودات زنده از دیرباز ذهن انسان‌های متفکر را به خود مشغول داشته است، تا جایی که به نظر می‌رسد این کنجکاوی و کنکاش در فطرت همه‌ی ما نهفته باشد. نقاشی‌های دوران غارنشینی، مجسمه‌سازی انسان‌های نخستین و حتی ساخت بت نیز نتیجه‌ی تفکر در وجود خود و دیگر موجودات زنده بوده و تلاشی برای خلق موجوداتی مشابه هر چند کم شباهت یا بی‌شباهت به اصل تلقی می‌شود.

از زمانی که دست انسان در صنعت بازتر شد و پیش‌رفت‌های انفجاری در فناوری به وجود آمد، همه‌ی سعی بشر بر این بوده که برای ارضای خواسته‌های فطری (که گاهی نیز نادرست هستند)، بیش‌ترین نقش را در کنترل جهان به دست داشته باشد و به همه‌ی آرزوهای دیرینه‌اش برسد. در این میان مشابه سازی و بازسازی موجودات زنده و در نهایت انسان، غایت آرزوی او بوده است.

ایده‌ی ساخت کامپیوتر که بعضی آن را مغز مصنوعی یا مغز الکترونیکی می‌نامند، از توانایی‌های مغز انسان گرفته‌شده و به سرعت و روزبه‌روز در حال پیش‌رفت است. بر این اساس انسان امیدوار است که بتواند روزی تمامی توانایی‌های مغز را در کامپیوتر پیاده‌سازی کرده یا حتی از آن پیشی گیرد. در این میان، متفکران و صنعت‌گران و دانشمندان مختلف، دست به دست هم داده‌اند تا شاید بتوانند به این اهداف دست یابند.

کامپیوتر ماشینی است که ورودی ساخت‌یافته را می‌پذیرد، آن را بر طبق قوانین از پیش تعریف‌شده‌ای پردازش می‌کند و نتایج را به عنوان خروجی نمایش می‌دهد. نرم‌افزارهایی مانند سیستم‌های عامل، کار کامپیوتر را کنترل می‌کنند و برنامه‌های کاربردی مانند برنامه‌های واژه‌پردازی صفحات وب و پایگاه داده‌ها، مجموعه دستورالعمل‌هایی هستند که منابع سخت‌افزاری را به کار می‌گیرند. نرم‌افزارهای شبکه باعث ارتباط گروهی از کامپیوترها می‌شود و نرم‌افزار برنامه‌نویسی، ابزارهایی را برای نوشتن برنامه‌ها در اختیار برنامه‌نویسان قرار می‌دهد. انسان دارای مراکزی برای دریافت اطلاعات و پردازش آن می‌باشد. دریافت اطلاعات از طریق حسگر[۱]های حس لمسانی، چشایی، بویایی، بینایی و شنوایی به مغز انسان ارسال می‌گردند. برای مثال سلول‌های شبکیه تصویرهای دریافتی از محیط را به تکانه‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند که از طریق عصب بینایی به مغز می‌روند و در آن جا رمزگشایی شده و بینایی را شکل می‌دهند.

---

[۱] sensor

اطلاعات در حافظه ذخیره می‌شود. حافظه نوعی فعالیت ذهنی است که به ما امکان می‌دهد که حالات خودآگاهی از قبیل لذت‌ها، دردها، خواسته‌ها، احساسات، دریافت‌های حسی، اندیشه‌ها و قضاوت‌ها را حفظ کرده و آن‌ها را دوباره در ذهن خویش بازیابیم. حافظه امکان بازشناسی و مراجعه به گذشته را به ما می‌دهد. دانشمندان معتقدند که مراکز پردازش مغز انسان سلول‌های عصبی هستند که اطلاعات را از سلول‌های دیگر دریافت کرده و محاسبات لازم را انجام می‌دهند. مغز انسان حدود یک‌صد میلیارد سلول عصبی دارد که وظیفه‌ی پردازش و ذخیره کردن اطلاعات را بر عهده دارد. نام این سلول‌ها نورون است و فقط ۱۰ درصد حجم مغز را تشکیل می‌دهند. این صد میلیارد سلول مانند صد میلیارد پردازنده عمل می‌کنند که هر کدام از آنان به چند هزار پردازنده مجاور، مثل شبکه متصل شده‌اند.

این مجموعه را می‌توان با شبکه‌ای از رایانه‌های متصل به اینترنت نیز مقایسه کرد، با این تفاوت که رایانه‌ای که ما با آن کار می‌کنیم هم خیلی سریع‌تر است و هم حجم حافظه‌ی بیش‌تری را در اختیار دارد. این در حالی است که با وجود این که تک‌تک سلول‌های مغز ما از هر کدام از این کامپیوترها بسیار ساده‌تر هستند، ولی در مجموع پردازش موازی اطلاعات را به نحو بسیار قوی‌تری انجام می‌دهند. بسیاری از دانشمندان معتقدند تنها یک شبکه‌ی موازی از کامپیوترها قابلیت این را خواهند داشت که عمل کرد مغز انسان را شبیه‌سازی کنند، ولی این امکان نیز وجود دارد که سرعت پردازش اطلاعات در کامپیوترها آن قدر زیاد شود که در عمل بتوانند همه‌ی کارهایی را که مغز انسان به صورت موازی انجام می‌دهد، به صورت متوالی انجام دهند و از نظر سرعت کمبودی نداشته باشند. برای نمونه، برنامه‌ی شطرنج‌بازی که " کاسپاروف " قهرمان جهان را شکست داد، بیش‌تر حالات ممکن بازی را در هر مرحله به صورت فوق‌العاده سریع محاسبه می‌کرد، درحالی‌که مغز شطرنج‌باز از راهبُرد استفاده می‌کند و دنبال تمام حالت‌ها نمی‌رود. دلیل این امر آن است که در واقع بسیاری از این حالت‌ها بی‌ارزش هستند. استفاده از این راهبُرد کم‌تر وقت شطرنج‌باز را می‌گیرد ولی در مقابل، کامپیوتر چون سرعت پردازش زیادی دارد می‌تواند این اضافه‌کاری را (که در اثر انجام محاسبات بیش‌تر به وجود می‌آید) به راحتی جبران کند و حتی زمان بیش‌تری را نیز در اختیار داشته باشد.

ما کارهایی مانند دیدن، شنیدن، لمس کردن، فکر کردن و سایر اعمال را می‌توانیم هم‌زمان انجام دهیم، چون سلول‌های مغز ما به صورت موازی کار می‌کنند و هر کدام وظیفه‌ی خاصی دارند، ولی در انجام همین کارها نیز مغز ما سرعت نامحدود ندارد. همین جاست که به نظر می‌رسد یک پردازشگر سریع خواهد توانست این کارها را به نوبت انجام دهد و در مجموع سرعتی مانند انسان از خود نشان دهد. مثلاً اول ببیند، بعد بشنود، بعد بو کند و... و تمام این کارها را در کسری از ثانیه تمام کند و نتیجه‌ی کار از نظر زمانی، درست مثل همان کارهایی خواهد بود که مغز انسان به صورت موازی انجام می‌دهد.

۱-۲ تلاش حوزه‌های مختلف علم برای ادراک و تقلید رفتار و عمل کرد مغز

برای درک عمل کرد مغز، در زمینه‌های علمی مختلف، کارهای تحقیقاتی گوناگونی انجام‌شده و نظریه‌های مختلفی هم در این زمینه ارائه شده است. علوم اعصاب[۱]، یک روی کرد جزء گونه را برای فهم عمل کرد ذهن به کار می‌گیرد. محاسبات شناختی[۲] شاخه‌ای از علم است که هدف آن ارائه‌ی یک سازوکار جامع و واحد الهام گرفته از توانایی‌های مغز است. اگرچه تلاش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده است اما هدف اصلی، یافتن یک نظریه محاسباتی واحد است؛ علوم اعصاب شناختی[۳] به دنبال جمع‌آوری دانش در زمینه‌ی نظریه فیزیولوژی تجربی و علوم محاسباتی[۴] در سطح اندام است.

با نگاهی دیگر، علوم محاسباتی در سطح سیستم، به دنبال ترکیب اطلاعات تجربی در ابعاد فضایی و زمانی است. هوش مصنوعی یا AI، شاخه‌ای از علم شناخت است که یک روی کرد سطح سیستم را جهت سنتز کردن رایانه‌هایی مانند ذهن به کار می‌گیرد. آلن نیول[۵]، پیش‌گام هوش مصنوعی[۶]، توضیح می‌دهد:

" هدف نهایی ما، ارائه‌ی یک نظریه واحد از شناخت انسان، یک مجموعه‌ی واحد از سازوکار برای "همه رفتارشناسی" است." [۱]

هوش مصنوعی هوش ماشین‌هاست! در واقع هوش مصنوعی به طراحی سیستم‌هایی گفته می‌شود که می‌تواند واکنش‌هایی مثل رفتارهای هوشمند انسان داشته باشد. رفتارهایی مثل درک شرایط پیچیده، حل مسائل مختلف، استدلال و مانند آن در این گروه قرار دارند. سؤال اساسی که در این زمینه مطرح می‌شود این است که آیا کامپیوترها ابزارهای مناسبی برای پیاده‌سازی هوش انسانی هستند؟

بر اساس نوشته "ماروین مینسکی"[۷][۲]، دانشمند آمریکایی در حوزه علوم شناخت، "اگر دستگاه عصبی از قوانین فیزیک و شیمی پیروی کند، که تمام شواهد هم حاکی از این امر است، پس ما باید بتوانیم توسط یک دستگاه فیزیکی، عمل کرد سیستم عصبی را بازسازی کنیم". این بحث برای نخستین بار در سال ۱۹۴۳ مطرح شد و توسط "هانس موراوک"، رئیس انستیتو روباتیک در دانشگاه Carnegie Mellon پنسیلوانیا، در سال ۱۹۸۸ روشن‌تر شد و هم‌اکنون "ری‌کورزول" پیش‌بینی می‌کند که توانایی کامپیوترها به حدی خواهد رسید که می‌توانند مغز کامل یک انسان را شبیه‌سازی کنند. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان از رایانه‌های موجود برای پیاده‌سازی برنامه‌های هوشمند استفاده کرد و اگر چنین شود می‌توان گفت به هوشی متناسب باهوش انسانی دست‌یافته‌ایم. اما یک تفاوت بزرگ بین هوش انسانی و هوش مصنوعی ایجادشده توسط

---

[1] neuroscience
[2] cognitive computing
[3] cognitive neuroscience
[4] Computational neuroscience
[5] Allen newell
[6] Artificial Intelligence(AI)
[7] Marvin lee minsky

کامپیوتر وجود دارد؛ در حقیقت یک تقابل پیچیدگی و سادگی! و آن این که در کامپیوتر یک واحد کاملاً پیچیده (مثل CPU) انجام کلیه‌ی اعمال هوشمندانه را به عهده دارد؛ درحالی‌که بیولوژی[1] (هوش انسانی) از واحدهای کاملاً ساده (به عنوان مثال نورون‌های شبکه عصبی) تشکیل‌شده که با عمل کرد هم‌زمان خود (موازی) و ارتباطشان باهم، رفتار هوشمندانه را سبب می‌شوند.

همان طور که گفته شد شبکه‌های عصبی دارای ماهیت موازی هستند، درحالی‌که رایانه‌های معمول دارای عمل کردی سری هستند. این مسئله دانشمندان را به پیدا کردن راه‌حلی برای تحلیل رفتار شبکه‌های عصبی بزرگ مقیاس واداشت. یکی از این راه‌حل‌ها neuromorphic engineering است، عبارتی که اولین بار توسط کارور مید[2] در اواخر سال ۱۹۸۰ مطرح شد. در حقیقت، neuromorphic engineering به طراحی مدارهای الکترونیکی که بتوانند رفتار مغز را تقلید کنند اطلاق می‌شود. قدم بعدی پس از طراحی چنین مدارهایی، مجتمع سازی تعداد زیادی از این واحدهای محاسباتی(نورون، سیناپس و...) روی تراشه‌های VLSI است. در مقایسه با شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، neuromorphic engineering دارای مزایایی است از جمله این‌که تراشه‌های neuromorphic دارای ماهیت موازی هستند درحالی‌که رایانه‌های معمول دارای ماهیت سری هستند. قطعاتی که برای مدل‌کردن نورون‌ها و سیناپس‌ها (مثل مقاومت و خازن‌ها) در یک طراحی neuromorphic engineering استفاده می‌شوند، می‌توانند مقادیر خیلی کوچکی باشند؛ در نتیجه سیستم‌های طراحی‌شده به وسیله‌ی neuromorphic از نظر مصرف انرژی کارآمدتر، دارای ثوابت زمانی ذاتی کوچک‌تر و در نتیجه سرعت بالاتری نسبت به کامپیوترها هستند به طوری که اگر یک شبیه‌سازی بر روی کامپیوتر به روزها زمان، نیاز داشته باشد می‌تواند در عرض چند ثانیه بر روی یک سیستم neuromorphic انجام شود. مزیت دیگر neuromorphic engineering این است که مشابه مغز انسان این سیستم‌ها دارای تحمل‌پذیری خطا هستند؛ یعنی اگر تعدادی از نورون‌ها و سیناپس‌ها از کار بیافتند سایر بخش‌های تراشه هنوز می‌توانند به کار خود ادامه دهند و این در فرآیند ساخت امروزی یک مزیت بزرگ به حساب می‌آید[۳].

سیستم عصبی قادر به حل مسائل مختلفی از جمله پردازش گفتار و تصویر، یادگیری و... است که دانشمندان و مهندسان از فهم دقیق آن عاجزند. اصول اساسی سیستم عصبی را می‌توانیم از نوروبیولوژی بیاموزیم.

کریس دیوریو[3]، می‌گوید[۴]:" من معتقدم که هیچ‌چیزی در سیستم عصبی وجود ندارد که ما نتوانیم آن را با الکترونیک تقلید کنیم، یک روز ما اصول پردازش اطلاعات نورونی (سیستم عصبی) را خواهیم فهمید.

[1] Biology
[2] Carver Mead
[3] Chris diorio

اگرچه سیستم عصبی مسائلی را که ما نمی‌دانیم چگونه حل می‌شود می‌تواند حل کند، اما آن نیز از ابزارهای فیزیکی استفاده می‌کند که ما آن‌ها را می‌شناسیم و می‌فهمیم".

نمونه‌ی مشابه این ابزارهای فیزیکی، ادوات الکترونیکی نیمه‌هادی هستند که ما آن‌ها را برای ساخت رایانه‌های دیجیتال خود به کار می‌گیریم. در هر دو، مدارات مجتمع و سیستم عصبی، پردازش و دست‌کاری اطلاعات بر اساس انتقال و تبدیل بار الکتریکی است. الکترونیک نیمه‌هادی، سدهای پتانسیل انرژی را با شارژ الکتریکی به وسیله‌ی متفاوت بودن تابع کار سیلیکون و دی اکسید سیلیکون و یا در محل اتصال p-n ایجاد می‌کند و سیستم عصبی چنین سدهای پتانسیلی را به وسیله‌ی غشای چربی در یک محیط آبی ایجاد می‌کند. در هر دو سیستم وقتی ارتفاع سد انرژی به حد مشخصی می‌رسد شار جریان به صورت یک تابع نمایی از ولتاژ اعمالی عمل می‌کند. هر دوی این سیستم‌ها این تابع را با استفاده از وسایلی که توانایی تولید بهره دارند، انجام می‌دهند؛ ترانزیستورها جمعیتی از الکترون‌ها را برای تغییر هدایت کانال خود استفاده می‌کنند و مشابه آن نورون‌ها جمعیتی از یون‌های کانال را برای تغییر هدایت غشای خود به کار می‌برند.

تفاوت بین عمل کرد محاسباتی رایانه‌های دیجیتال و آن چه که سیستم عصبی می‌تواند انجام دهد نتیجه‌ی تفاوت فیزیکی نیست، بلکه تفاوت در مدل‌های محاسباتی بر اساس فیزیک مشابه است. متغیرهای حالت در هر دوی این سیستم‌ها آنالوگ هستند. این متغیرها در سیستم‌های الکترونیکی به وسیله شارژ الکتریکی ظاهر می‌شوند و در سیستم‌های عصبی نیز با شارژ الکتریکی یا تمرکز غلظت شیمیایی ظاهر می‌شوند. با این وجود، مکانیزمی که هر سیستم در تعیین متغیرهای حالتش به کار می‌برد متفاوت است. در یک کامپیوتر دیجیتال همه‌ی متغیرهای حالت به دو متغیر دودویی ۰ و ۱ خلاصه می‌شود تا حاشیه نویز امنی داشته باشیم، اما سیستم عصبی در رنج آنالوگ خود باقی می‌ماند و حاشیه امن نویز خود را با تنظیم آشکارسازی آستانه‌ی سیگنال و به صورت وفقی به دست می‌آورد. ماشین‌های دیجیتال ورودی‌های آنالوگ خود را کوانتیزه[1] می‌کنند و از بازیابی[2] منطقی در هر گام محاسباتی استفاده می‌کنند. سیستم عصبی از همان ابتدا محاسبات آنالوگ را استفاده می‌کنند و نتایج محاسبات را کوانتیزه می‌کنند. متأسفانه ما الگوی اولیه‌ی محاسباتی سیستم عصبی (این که آن‌ها چگونه اطلاعات را پردازش می‌کنند) یا اصول سازمان‌دهی آن‌ها را نمی‌دانیم. این در حالی است که چون الکترونیک نیمه‌هادی اجازه مجتمع سازی در سطح بالا (مشابه آن چه در یک سیستم عصبی وجود دارد) را به ما می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که ما باید قادر باشیم این مدارها را برای سازمان‌دهی اصولی که نوروبیولوژی به کار می‌گیرد، به کاربریم. این روی کرد از سوی دیوریو " silicon neuroscience" نامیده شده است که معنای آن توسعه سیستم‌های با قابلیت یادگیری سیلیکونی که از نوروبیولوژی الهام گرفته‌اند می‌باشد. این بررسی‌ها با مدل‌کردن اندام‌های در دسترس سیستم عصبی مثل

[1] Quantize
[2] Restoring

شبکیه چشم، حلزونی گوش و نورون‌ها به عنوان بلوک‌های اولیه سیستم عصبی آغاز گردید. اعتقاد بر این است که اگر اصول اولیه عمل کرد سیستم پردازش اطلاعات بیولوژی را بفهمیم آنگاه می‌توانیم مدارها و سیستم‌هایی بسازیم که به طور طبیعی با اطلاعات جهان واقعی سازگار باشد. برای رسیدن به این هدف، مطالعه اصول عمل کرد سیستم عصبی، مدل کردن و فهم آن اصول در دنیای سیلیکون مورد نیاز است و این همان موضوعی است که neuromorphic engineering به آن می‌پردازد.

۱-۳ اهمیت مطالعه‌ی نوروبیولوژی

همه‌ی ماشین‌های ساخت بشر دارای پایه‌ی ریاضیات یکسانی هستند؛ یعنی از جبر بولی و کلید زنی ترانزیستورها استفاده می‌کنند، اما ما ریاضیات محاسبات نورونی را به طور دقیق دست کم تا به امروز نمی‌دانیم. بنابراین با مطالعه‌ی بیولوژی می‌توانیم بفهمیم مغز چگونه متفاوت عمل می‌کند و ما چگونه می‌توانیم ترانزیستورها را به شکلی متفاوت به کار ببریم! اما چرا متفاوت؟! چرا فقط با تقلید شبکه نورونی در رایانه‌های دیجیتال نمی‌توان به عملکردی مشابه مغز دست یافت؟!

دلیل آن "هزینه" است. برای این کار باید هزینه بالایی بپردازیم؛ هزینه بالایی برای اعتماد پذیری، بازدهی انرژی، عمل کرد در زمان واقعی، هزینه بالای محاسباتی و ...

رایانه‌های دیجیتال از جمع کننده‌ها و ضرب کننده‌ها به عنوان بلوک‌های اولیه برای محاسبات استفاده می‌کنند؛ بیولوژی از پدیده‌های فیزیکی (نورون‌های وفقی) برای تطابق و یادگیری، به عنوان بلوک‌های اولیه استفاده می‌کند. هیچ یک از این دو جز در حوزه‌ی خود برای حوزه‌ی دیگر مناسب نیستند:

- توصیف نورون در ریاضیات وحشتناک است!
- بلوک‌های ضرب کننده و جمع کننده نیز انتخاب‌های ضعیفی برای تطبیق و یادگیری هستند.

دلیل دوم برای این‌که ما باید بیولوژی را مطالعه کنیم، پایان مقیاس بندی نیمه‌هادی‌هاست. طبق قانون مور[1]، روند مجتمع سازی به ازای تقریباً هر ۲ سال، ۲ برابر می‌شود. مهندسان تاکنون توانسته‌اند به طراحی ترانزیستورهایی با حداقل طول کانال ۰/۰۳ میکرون دست یابند، اما می‌توان گفت تا حدی روند مجتمع سازی به انتهای خود رسیده است. پیش‌رفت بیش‌تر در این زمینه با محدودیت‌های فیزیکی روبه‌رو خواهد شد. سؤالی که این جا مطرح می‌شود این است که با پایان مقیاس بندی نیمه‌هادی‌ها چه اتفاقی خواهد افتاد؟

آیا رسیدن به نهایت پیشرفت در این زمینه (مقیاس بندی نیمه‌هادی‌ها)، راهی برای دست‌یابی به ریاضیات و قابلیت‌های فوق‌العاده مشابه مغز پیش روی ما خواهد گذارد؟ آیا با استفاده از سوییچ‌ها می‌توان به یادگیری و تطابق دیجیتالی برای حل مسائل هوش مصنوعی دست یافت؟ متأسفانه پاسخ این سؤال‌ها منفی است؛ با دست‌یابی به نهایت پیش‌رفت فناوری نیمه‌هادی‌ها نیز، سیلیکون دیجیتالی از تقلید رفتار مغز بازخواهد ماند!

---

[1] Moor law

بر این اساس دو فرضیه مطرح می‌شود:

فرض اول این است که مغز و قطعات دیجیتالی هر دو در محاسبات کارآمد هستند، اما هر کدام فقط در حوزه مربوط به خود این کارآمدی را دارند. به عبارت دیگر:

مغز	قطعات دیجیتال
؟؟؟ برای یادگیری	پایه ریاضیات برای انجام ریاضی

فرض دوم این است که به گونه‌ی ساده‌تری به محاسبات نورونی بنگریم. ساختار مغز یک ساختار ماژولار است، که هر کدام از نواحی آن مسئول انجام توابع خاصی هستند. برای مثال ناحیه‌ی پوسته[1] مغز از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که هر کدام مسئول انجام کار خاصی هستند. مغز از سیگنال‌های نورونی و به صورت موازی استفاده می‌کند. از این دیدگاه، شاید راهی برای پیاده‌سازی سیلیکون نورونی مصنوعی وجود داشته باشد.

نوروبیولوژی مدل‌هایی برای ما فراهم می‌کند که می‌توان امکان پیاده‌سازی آن‌ها را با فیزیک نیمه‌هادی سیلیکون مورد بررسی قرار داد. این ایده اساس neuromorphic engineering است. امروزه "بازسازی پدیده‌های نوروفیزیولوژی برای افزایش دانش ما از سیستم عصبی"را با نام "neuromorphic modeling" و "استفاده از ویژگی‌های نورونی برای ساخت یک نورون به عنوان یک واحد سخت‌افزاری محاسباتی" را با نام "neuromorphic computation" می‌شناسند. در واقع neuromorphic engineering از پردازش سیگنال مغز الهام می‌گیرد و از آن برای طراحی قطعات جدید محاسباتی، روباتیک و... بهره می‌گیرد. ماهیت کم‌توان، منعطف و وفقی سیستم‌های بیولوژیکی مفهوم جامعی برای پیاده‌سازی و طراحی‌های مهندسی فراهم می‌کند[۵]. اصول به دست آمده از بیولوژی می‌تواند در مدل‌های نرم‌افزاری پردازش سنسوری، پیاده‌سازی‌های VLSI از مدارات نورونی و یا روبات‌ها به کار رود. بنابراین بدون مطالعه‌ی بیولوژی نمی‌توانیم سیستم‌هایی الهام گرفته از بیولوژی را طراحی کنیم. به همین دلیل مطالعه‌ی بیولوژی امری اجتناب‌ناپذیر است. بنا بر آن چه گفته شد، تعریف جامع‌تر neuromorphic engineering به صورت زیر خواهد بود:

"neuromorphic engineering"، مهندسی معکوس اطلاعاتی است که در نوروبیولوژی استفاده می‌شود برای توسعه‌ی سیستم‌های مصنوعی که این اطلاعات را در عملکردشان به کار می‌گیرند."

عبارت neuromorphic engineering اولین بار با تحقیقات کارور مید در اواخر سال ۱۹۸۰ مطرح شد. در واقع او اولین کسی بود که توضیح داد چگونه می‌توانیم با استفاده از مدارهای الکترونیکی آنالوگ مدارهای مجتمعی طراحی کنیم که قسمت‌های مختلف مغز مثل نورون‌ها و سیناپس‌ها را تقلید کنند. او در یکی از کتاب‌هایش این مسئله را توضیح می‌دهد که واقعاً چگونه می‌توان چنین اجزایی را با مدارهای

[1] cortex

الکترونیکی ایجاد کرد و یک تراشه ساخت که بتواند رفتار بیولوژیکی را تولید کند[۶]. در آن زمان به دلیل این که فناوری به آن حد از پیش‌رفت نرسیده بود اجازه ساخت چنین شبکه‌های عصبی بزرگ مقیاسی را با مدارات مجتمع نمی‌داد و این موضوع به مدت یک دهه مسکوت باقی ماند. با گذشت سال‌ها neuromorphic engineering بار دیگر توسط Kwabena Boahen و گروهش در دانشگاه استانفورد استارت خورد. هدف این گروه ساخت یک اَبَررایانه با هسته‌هایی که هر کدام از آن‌ها ظرفیت ۲۵۶*۲۵۶ نورون آنالوگ را داشتند، بر اساس سازمان‌دهی مغز انسان بود. این سیستم که معماری محاسباتی جدیدی را ارائه می‌دهد از سوی دانشگاه استانفورد Neurogrid نامیده شد[۱۲].

امروزه افراد زیادی در سراسر جهان در این زمینه پژوهش می‌کنند و پروژه‌های بسیاری در زمینه NE در حال انجام است.

ساخت تراشه‌هایی مثل شبکیه‌ی سیلیکونی[۱]، حلزونی گوش سیلیکونی[۲]، تراشه‌ی بینایی هوشمند[۳]، شبکه‌ی عصبی نورون‌های اسپایکی[۴]، تولیدکننده‌های الگوی مرکزی[۵] نمونه‌هایی از پیش‌رفت این شاخه از علم در سال‌های اخیر است.

[1] Silicon
[2] Silicon cochleas
[3] Smart vision chips
4 Neural networks of spiking neurons
5 Central pattern generators

فصل دوم

مقدمه‌ای در مورد نورون و شبکه‌های عصبی