دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق– گرایش الکترونیک

بهره گیری از مدارات ترکیبی NANO/CMOS برای پیاده سازی شبکه های عصبی مصنوعی

نگارش:

رضا مهدیه نجف آبادی

استاد راهنما:

دکتر پرویز کشاورزی

مهر ۱۳۹۰

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست.

تقدیم به خانواده عزیزم

سپاس گذاری

پس از حمد خداوند متعال که با اتکال به آن توانستم با روحیه ای سرشار از امید، این پروژه را به ثمر برسانم؛ از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر کشاورزی که زحمات بی شائبه ای را در پیشبرد این پروژه برای اینجانب مبذول داشتند تشکر می نمایم و از دوست و همراه همیشگی این پروژه جناب آقای دکتر عبدالحسین رضایی تشکر ویژه می نمایم. همچنین از کارمندان مجموعه نفیر که اینجانب را در اتمام این پروژه یاری رساندند بخصوص جناب آقای منتظری، ملکی و خانم ها سلیمانی، آهنین جگر، محمدی، آسیابانی و اسدی تشکر می نمایم. از دوستان عزیز دیگرم که همچون دوست واقعی اینجانب را همراهی نمودند آقایان فاضل، حمله داری، یمانی، ایزدی نیز سپاس گذاری می نمایم. امید است با کمک خداوند متعال بتوانیم آینده ای روشن را برای کشور عزیزمان ایران رقم بزنیم.

چکیده

پتانسیل بسیار بالای تکنولوژی نانو، امکان پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی مغز را که آرزوی دیرین بشر بوده؛ فراهم می‌آورد. در این میان تکنولوژی نانوالکترونیک ترکیبی به دلیل همگونی با تکنولوژهای قبل و قابلیت‌های مناسب آن به نظر می رسد؛ تکنولوژی مناسبی از بین طرح های پیشنهادی برای ادامه روند صنعت الکترونیک باشد. این پایان نامه نیز در راستای تحقیقات مبتنی بر پیاده سازی شبکه های عصبی در نانوالکترونیک ترکیبی Nano/CMOS تهیه گردیده است؛ که پس از ارائه مدل های مختلف شبکه های عصبی، به معرفی تکنولوژی نانوالکترونیک ترکیبی Nano/CMOS که برای تکنولوژی نسل بعد پیشنهاد گردیده؛ می پردازد و پس از ارائه روش های مختلف، برای پیاده‌سازی شبکه های عصبی در نانوالکترونیک، طرحی را نیز ارائه می دهد. در این طرح از نانوسیم ها برای پیاده‌سازی دندریت‌ها و آکسون‌ها و از قسمت CMOS برای قسمت هسته سلول نرونی و از نانوافزاره‌ها به عنوان سیناپس استفاده می شود. همچنین برای پیاده‌سازی وزن ها از یک نانوافزاره استفاده شده که از مشخصه غیرخطی ولتاژ–جریان آن استفاده گردیده است. این طرح با کاهش تعداد نانوافزاره‌ها امکان کاهش مساحت و توان مصرفی را به میزان زیادی ارائه می دهد و همچنین امکان آموزش شبکه نیز به طور دینامیکی فراهم می گردد. در انتها نیز با رویکردی بر نانوافزاره ی جدید، ممریستور، به بررسی مقدماتی طرحی پرداخته شده که به Spiking معروف بوده و در آن نرون ها با استفاده از پالس هایی به یکدیگر مرتبط می شوند. در این قسمت اثر پالس های مختلف را بر روی ممریستور بررسی شده تا بتوان مناسبترین پالس را برای ارتباط نرون ها در این روش انتخاب نمود.

کلیدواژه: نانوالکترونیک ترکیبی، پیاده سازی شبکه های عصبی، ممریستور، نـانوافزاره، پیـاده سـازی وزن ها

فهرست مطالب

مقدمه ۱

۱-۱ تاریخچه و پیشرفت ها ۲

۱-۲ ساختار پروژه ۳

شبکه های عصبی ۴

۲-۱ معرفی و تاریخچه شبکههای عصبی ۴

۲-۲ شبکه عصبی بیولوژیکی (مغز انسان) ۶

۲-۳ شبکه عصبی مصنوعی ۸

۲-۴ مدل ریاضی شبکه های عصبی مصنوعی ۹

۲-۵ ساختارهای شبکه های عصبی مصنوعی ۱۰

۲-۵-۱ پرسپترون تک لایه ۱۱

۲-۵-۲ پرسپترون چند لایه ۱۲

۲-۵-۳ شبکه Hopfield ۱۳

۲-۶ آموزش شبکه های عصبی مصنوعی ۱۴

۲-۶-۱ روش پس انتشار خطا ۱۶

۲-۷ پیاده سازی سخت افزار ۱۸

نانوالکترونیک ۲۰

۳-۱ نانوالکترونیک ۲۰

۳-۲ مدارات ترکیبی Nano/CMOS ۲۵

۳-۲-۱ مدارات ترکیبی CMOL ۲۷

۳-۲-۲ مدارات 3D CMOL ۲۸
۳-۲-۲ مدارات FPNI ۲۹
۳-۳ نانوسیم ها ۳۰
۳-۴ اتصال نانو به CMOS ۳۱
۳-۵ نانوافزاره ها ۳۲
۳-۵-۱ نانوسوئیچ های تک الکترونی ۳۳
۳-۵-۲ ممریستور ۳۵
۳-۵ شبکه های Neuromorphic ۳۸
شبکه های عصبی در نانوالکترونیک ۴۰
۴-۱ Crossnet ۴۰
۴-۲ شبکه های عصبی در Nano/ CMOS ۴۰
۴-۲-۱ نرون ۴۲
۴-۲-۲ سیناپس ۴۳
۴-۳ ساختارهای پیاده سازی شبکه های عصبی ۴۴
۴-۳-۱ ساختارFlossbar ۴۵
۴-۳-۲ ساختارInbar ۴۵
۴-۴ چالشهای پیاده سازی شبکه عصبی ۴۶
۴-۴-۱ سیناپس های چند مقداری ۴۷
۴-۴-۲ وارد کردن وزن ها ۴۹
۴-۴-۳ آموزش داخلی: ۵۱
۴-۵ پیاده سازی وزن ها با استفاده از یک نانوسوئیچ ۵۴

۶-۴ شبکه های عصبی ضربانی ۵۵
طرح پیشنهادی برای کاهش تعداد نانوافزاره ها در پیاده سازی شبکه های عصبی ۵۷
۵-۱ مقدمه ۵۷
۵-۲ طرح پیشنهادی ۵۸
۵-۲-۱ تنظیم ولتاژ نانوافزاره ۶۱
۵-۲-۲ یادگیری ۶۱
۵-۳ ارزیابی طرح ۶۲
۵-۳-۱ بررسی تاخیر قسمت نانو ۶۲
۵-۳-۲ محاسبه مساحت در قسمت نانو ۶۴
۵-۳-۳ محاسبه توان در قسمت نانو ۶۴
۵-۳-۴ حساسیت به نقوص ۶۷
روش ضربانی ۷۰
۶-۱ مقدمه ۷۰
۶-۲ روش ضربانی بر مبنای ممریستور ۷۲
جمع بندی و پیشنهادات ۷۵
۷-۱جمع بندی ۷۵
۷-۲ نتیجه گیری ۷۵
۷-۳ پیشنهادات ۷۶
مراجع: ۷۸

کلمات اختصاری

CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
CMOL	Circuit Molecular
FPNI	Field Programmable Nanowire Interconnect
ANN	Artificial Neural Network
SLP	Single Layer Perceptrons
MLP	Multi Layer Perceptrons
VLSI	Very large scale integration
DSP	Digital Signal Processing
STM	Scanning tunneling microscope
I&F	Integrate & Fire
SET	Single Electron Transistor
DNA	Deoxyribo Nucleic Acid
STDP	Spike Timing Dependent Plasticity
EPSP	Excitatory Post Synaptic Potentials
BPAP	Back Propagating Action Potentials

فهرست اشکال و تصاویر

عنوان	صفحه
۲-۱ معرفی ساختار نرون طبیعی انسان و اجزا مختلف آن	۷
۲-۲ ساختار یک نرون مصنوعی	۸
۲-۳ مدل ریاضی ساده شده عصب واقعی	۱۰
۲-۴ ساختار شبکه پرسپترون	۱۱
۲-۵ شمای ساختار پرسپترون	۱۳
۲-۶ شمای شبکه هاپفیلد	۱۴
۲-۷ نمودار تابع سیگموئید	۱۷
۳-۱ نمودار مور برای کاهش ابعاد ترانزیستور بر حسب زمان	۲۱
۳-۲ ساختار یک نانولوله کربنی و کاربرد آن	۲۳
۳-۳ یک حلقه بنزنی برای استفاده در تکنولوژی نانو	۲۴
۳-۴ ساختار تکنولوژی CMOS/Nano	۲۶
۳-۵ شمایی از مدار CMOL	۲۸
۳-۶ مدل ساختار 3D CMOL	۲۹
۳-۷ طرح کلی مدارات FPNI و مقایسه آن با CMOL	۳۰
۳-۸ روش nano-imprint برای ساخت نانوسیم ها	۳۱
۳-۹ شکل های مختلف اتصال بین لایه نانو و CMOS	۳۲
۳-۱۰ ساختار سوئیچ لچ شونده تک الکترونی	۳۳
۳-۱۱ منحنی مشخصه ولتاژ- جریان نانوسوئیچ	۳۴
۳-۱۲ یک نما از نانوافزاره CuO_X که به وسیله میکروسکوپ الکترونی گرفته شده	۳۵
۳-۱۳ منحنی مشخصه الکتریکی نانوافزاره CuOX	۳۵

۳ ۱۴	ارتباط بین چهار کمیت اصلی در الکترونیک	۳۶
۳ ۱۵	ساختار ممریستور به همراه ساختار معادل آن	۳۷
۳ ۱۶	مشخصه جریان ولتاژ ممریستور و نمایش وابستگی آن به فرکانس	۳۸
۴ ۱	ساختار پایه Crossnetها	۴۲
۴ ۲	ارتباط بین سلول‌های نرونی از طریق نانوافزاره‌ها	۴۲
۴ ۳	تقویت کننده های عملیاتی به عنوان سلول نرونی	۴۳
۴ ۴	اتصال سلول های somatic و سلول های سیناپسی از طریق پایانه های مثبت و منفی	۴۴
۴ ۵	ساختارFlossbar برای پیاده سازی شبکه‌های عصبی	۴۵
۴ ۶	ساختار Inbar برای پیاده سازی شبکه‌های عصبی	۴۶
۴ ۷	پیاده سازی یک وزن بوسیله یک آرایه n×n	۴۷
۴ ۸	تقریب وزن ها به n^2+1 مقدار	۴۹
۴ ۹	وابستگی خطا به مقدار L	۴۹
۴ ۱۰	وارد کردن وزن ها به صورت موازی	۵۰
۴ ۱۱	به روز کردن داخلی وزن ها	۵۰
۴ ۱۲	بروز رسانی وزن به روش داخلی	۵۲
۴ ۱۳	استفاده از پالس های زمانی برای ارتباط بین نرونی	۵۶
۴ ۱۴	یک شبکه ساده ۳ لایه قابل پیاده سازی در CMOL	۵۶
۵ ۱	نمونه ای از استاندارد MNIST	۵۸
۵ ۲	نمودار خطای شبکه ی عصبی همزمان با افزایش نقوص نانوافزاره ها	۵۹
۵ ۳	مقایسه نمودار خطای شبکه‌ی عصبی به روش تک نانوافزاره	۶۰
۵ ۴	۵-۴ نمودار تاخیر بر حسب تعداد نانوافزاره‌ها	۶۳
۵ ۵	مساحت مصرفی در قسمت نانو به ازای تعداد نانوافزاره‌ها	۶۴
۵ ۶	نمودار توان مصرفی در حالت کار برحسب تعداد نانوافزاره ها	۶۵
۵ ۷	نمونه های از استاندارد MNIST	۶۸

۵ ۸	نمودار خطای شبکه ی عصبی همزمان با افزایش نقوص نانوافزاره ها	۶۹
۵ ۹	مقایسه نمودار خطای شبکه‌ی عصبی به روش تک نانوافزاره و چند نانوافزاره همزمان با افزایش نقوص	۶۹
۶ ۱	اولین پیشنهاد برای ارتباط بین نرون ها بوسیله پالس	۷۱
۶ ۲	رفتار ممریستور نسبت به ولتاژ مربعی و مثلثی در فرکانس ۴۰ هرتز	۷۲
۶ ۳	رفتار ممریستور نسبت به ولتاژ سینوسی با دو دامنه مختلف در فرکانس ۱ هرتز	۷۳
۶ ۴	شمای طرح استفاده از یک نانوافزاره به روش ضربانی	۷۳

فصل اول

مقدمه

شبکه‌های عصبی مصنوعی از مباحث جدیدی است؛ که دانشمندان علوم کامپیوتر به آن علاقمند شده‌اند و برای پیشرفت هرچه بیشتر علوم کامپیوتر وقت و هزینه بسیاری را صرف آن کرده و می‌کنند. همانطور که گفته شد؛ این موضوع با ایده گرفتن از سیستم عصبی بدن انسان و با هدف شبیه‌سازی هرچه بیشتر کامپیوتر به انسان شکل گرفت و تاکنون به خوبی پیش رفته است[۱].

می‌دانیم که حتی ساده‌ترین مغزهای جانوری هم قادر به حل مسائلی هستند که اگر نگوییم که کامپیوترهای امروزی از حل آنها عاجز هستند، حداقل در حل آنها دچار مشکل می‌شوند. به عنوان مثال، مسائل مختلف شناسایی الگو، نمونه‌ای از مواردی هستند؛ که روش‌های معمول محاسباتی برای حل آنها به نتیجه مطلوب نمی‌رسند. درحالی‌که مغز ساده‌ترین جانوران به‌راحتی از عهده چنین مسائلی بر می‌آید. تصور عموم کارشناسان IT بر آن است که مدل‌های جدید محاسباتی که بر اساس شبکه‌های عصبی بنا می‌شوند، جهش بعدی صنعت IT را شکل می‌دهند[۲].

دانشمندان با رویکرد بهره‌گیری از خلقت و آفرینش بشر شاخه جدیدی را در علم کامپیوتر به نام هوش مصنوعی ایجاد نمودند و سعی در بهبود روش موجود نمودند. یکی از شاخه‌های هوش مصنوعی، شبکه های عصبی مصنوعی می‌باشد که با بهره‌گیری از شبکه عصبی مغز، برای حل معادلات و محاسباتی که برای کامپیوترها بسیار مشکل می‌باشد ارائه گردیده است[۱].

شبکه‌های عصبی را می‌توان با اغماض، مدل‌های الکترونیکی از ساختار عصبی مغز انسان نامید. مکانیسم فراگیری و آموزش مغز اساساً بر تجربه استوار است. مدل‌های مصنوعی شبکه‌های عصبی

طبیعی نیز بر اساس همین الگو بنا شده‌اند و روش برخورد چنین مدل‌هایی با مسائل، با روش‌های محاسباتی که به‌طور معمول توسط سیستم‌های کامپیوتری در پیش گرفته شده‌اند؛ تفاوت دارد[۲]. تحقیقات در این زمینه نشان داده است؛ که مغز، اطلاعات را همانند الگوها ذخیره می‌کند. فرآیند ذخیره‌سازی اطلاعات به‌صورت الگو و تجزیه و تحلیل آن الگو، اساس روش نوین محاسباتی را تشکیل می‌دهند. این حوزه از دانش محاسباتی به هیچ وجه از روش‌های برنامه‌نویسی سنتی استفاده نمی‌کند و به‌جای آن از شبکه‌های بزرگی که به‌صورت موازی آرایش شده‌اند و تعلیم یافته‌اند؛ بهره می‌جوید[۳].

۱-۱ تاریخچه و پیشرفت ها

اما در جهت پیاده سازی شبکه های عصبی مصنوعی و استفاده از مزایای بسیار زیاد آن، نیاز به ساخت تراشه هایی برای این امر احساس می‌شود. تاکنون تراشه های مختلفی برای این کار پیشنهاد گردیده اند اما به دلیل عدم توانایی داشتن پتانسیل مناسب برای این مورد تنها برای یک کاربرد خاص و یا در یک مقطع زمانی خاصی به کار رفته اند[۴]. با رشد سریع الکترونیک و کاهش ابعاد ترانزیستور و همچنین افزایش تعداد ترانزیستورها در یک تراشه، امیدها نیز روز به روز برای ساخت تراشه های عصبی بیشتر گردید. اما افزایش تعداد ترانزیستورها در تراشه با کاهش ابعاد ترانزیستور تا حدی ممکن خواهد بود و پس از آن به دلیل مشکلات کوانتومی پدید آمده این امر دیگر امکان پذیر نخواهد بود. به همین دلیل دانشمندان با رویکرد جدیدی مبتنی بر تکنولوژی نانوالکترونیک روند افزایش تعداد ترانزیستورها را همچنان ادامه می‌دهند[۳و۴].

ظهور تکنولوژی جدید در صنعت الکترونیک، که به انقلاب نانو مشهور است موجب شد تحقیقات بر روی ساخت تراشه‌های عصبی با قاطعیت خاصی پیش برود؛ چرا که دیگر پتانسیل های لازم برای ساخت این تراشه ها فراهم بود و تنها دانشمندان بایستی از بتوانند از این پتانسیل ها در جهت مناسب برای پیاده‌سازی استفاده نمایند. به همین سبب تکنولوژی های مختلفی نیز برای این امر پیشنهاد گردیده است؛ اما تا کنون هیچ یک به طور قاطع برای تکنولوژی نسل آینده انتخاب نشده اند. در این میان تکنولوژی نانوالکترونیک ترکیبی که از ترکیب فن‌آوری نانوالکترونیک در کنار تکنولوژی CMOS و از مزایای هر دو استفاده می‌کند از شانس بیشتری برخوردار می‌باشند[۴].

در این نوشتار قصد داریم که درباره پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی را در تکنولوژی نانوالکترونیک ترکیبی Nano/CMOS صحبت نماییم و خواننده را با دو مبحث شبکه‌های عصبی و نانوالکترونیک ترکیبی آشنا نماییم و با معرفی یک ساختار جدید برای پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی در نانوالکترونیک برخی مشکلات پیش روی آن را رفع نموده و مشخصه‌های اصلی آن همچون مساحت و سرعت و... را بهبود بخشیم. بدین جهت با مطالعه بر روی پروژه‌های مختلف کارشناسی ارشد و دکترا در دانشگاه-های مختلف جهان و مقالات ارائه شده در این بخش سعی شده که مطالب به طور مختصر و قابل فهم تهیه و بیان شود. همچنین این مطلب قابل بیان است؛ که این پروژه در تحقیقات جهانی به عنوان یکی از مباحث داغ روز بوده و شرکت‌های مختلف سخت‌افزاری و الکترونیکی بر روی این پروژه فعالیت می‌نمایند. از فعالان نامدار این عرصه که نسبت به دیگر رقبای خود پیشتاز می‌باشد؛ شرکت معروف HP می‌باشد که سرمایه‌گذاری هنگفتی را نیز در این بخش انجام داده است[۲].

۱-۲ ساختار پروژه

بدین جهت در ابتدا در فصل دوم با مرور شبکه‌های عصبی و انواع ساختارهای پیشنهادی خواننده را این مبحث آشنا نموده و سپس به بیان نحوه آموزش‌های لازم برای شبکه‌ی عصبی و چگونگی تست و آزمایش شبکه می‌پردازیم. درفصل سوم ابتدا به معرفی تکنولوژی‌های مورد بحث برای نانوالکترونیک می‌پردازیم و سپس درباره تکنولوژی نانوالکترونیک ترکیبی به عنوان یکی از تکنولوژی‌های پرامید برای نسل آینده صحبت خواهیم نمود و برخی ساختارهای که برای تکنولوژی نسل بعد تاکنون پیشنهاد گردیده؛ همچون ساختار CMOL و FPNI را معرفی خواهیم کرد و در مورد هر یک از المان‌های موجود در این ساختارها صحبت خواهیم نمود. در فصل چهارم ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و تکنولوژی نانوالکترونیک ترکیبی را بررسی می‌کنیم و روش‌های مختلف پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی را برای خواننده شرح خواهیم داد و ساختار پیشنهادی مورد بحث در این پروژه را به طور کامل معرفی خواهیم نمود. در نهایت در فصل پنجم با معرفی معیارهای مقایسه ساختارها همچون سرعت و مساحت و ... توانایی ساختار پیشنهادی را برای رقابت با دیگر ساختارها بررسی خواهیم نمود و ارزیابی و نتایج گرفته شده را به طور جامع بیان خواهیم نمود.

فصل دوم

شبکه های عصبی

۲-۱ معرفی و تاریخچه شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از مباحث جدیدی است؛ که دانشمندان علوم کامپیوتر به آن علاقمند شده‌اند و برای پیشرفت هرچه بیشتر علوم کامپیوتر وقت و هزینه بسیاری را صرف آن کرده و می‌کنند. این موضوع با ایده گرفتن از سیستم عصبی بدن انسان و با هدف شبیه‌سازی هرچه بیشتر کامپیوتر به انسان شکل گرفت و تا به حال پیشرفت خوبی داشته است. از جمله کاربردهای این بحث را می‌توان از شناسایی الگوها، پردازش صوت و تصویر، هوش مصنوعی، کنترل رباتها و موارد بسیار دیگر نام برد[۴].

اولین کارهای مربوط به شبکه‌های عصبی به سال ۱۹۴۳ برمی‌گردد. زمانی که یک فیزیولوژیست اعصاب به نام McCulloch و یک ریاضیدان به نام Pitts از دانشگاه MIT رساله‌شان را درباره نحوه عملکرد احتمالی نرون‌ها به نام:

"A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity"

منتشر نمودند. در این رساله آن‌ها نشان دادند که میتوان یک شبکه عصبی را فقط با استفاده از ریاضیات و الگوریتم پیاده‌سازی نمود. آنها برای توضیح حدس‌شان از نحوه کار نرون‌ها در مغز، مدل ساده‌ای از شبکه عصبی با مدارهای الکتریکی ساختند. تفسیر آنها از شبکه عصبی آن بود؛ که از اتصال مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیری باینری، می‌توان شبکه‌ای با قابلیت حل هر مساله محاسباتی ایجاد نمود[۵].

در سال ۱۹۴۹ دونالد هب کتابی با عنوان" سازماندهی رفتار "منتشر نمود و آموزش را درشبکه های عصبی (فقط از نظر روانشناسی) معرفی نمود. او در این کتاب به مفاهیم نحوه یادگیری در انسان پرداخته و اشاره نموده است که وقتی نرونی توسط نرون دیگری که به آن متصل است تحریک می شود، اتصالشان قویتر می شود و در نتیجه احتمال اینکه این دو نرون دوباره تحریک شوند بیشتر می شود[۶].

در سال ۱۹۵۸ فرانک روزنبلات از طریق آنالیز ریاضی و شبیه سازی کامپیوتری، نشان داد؛ که نوعی شبکه های عصبی موسوم به پرسپترون را می توان برای حل مسئله طبقه بندی الگوها آموزش داد. نرون ها در این شبکه، شبیه نرون هایی بودند که McCulloch و Pitts ارائه داده بودند. کار مهم روزنبلات در معرفی این شبکه ها نبود؛ بلکه ابداع قانون یادگیری برای شبکه پرسپترون[1] بود. او به کار بر روی سیستم بینایی مگس علاقه مند بود و عقیده داشت که بیشتر پردازشهایی که مگس برای فرار انجام می دهد؛ در چشمانش اتفاق می افتد. پرسپترونی که از تحقیقات رزنبلات بیرون آمد؛ به صورت سخت افزاری ساخته شد و قدیمیترین شبکه عصبی محسوب می شود؛ که هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد[۷].

سال ۱۹۶۹ آغاز افول موقت شبکه های عصبی شد. زیرا عدم توانایی شبکه های عصبی در حل مسائل غیر خطی آشکار شد. ANN های آن زمان فقط قادر به حل مسائلی بودند که میتوانستند پاسخهای آن مسئله را توسط یک خط در محور مختصات از هم جدا کنند. در ۱۹۸۲ هاپفیلد با معرفی شبکه های چند لایه و الگوریتمهای یادگیری دارای فیدبک ، راه حلی برای حل موارد غیر خطی ارائه کرد. در این زمان بود که شبکه های بازگشتی، خودسازمانده ، Autoregressive ، RBF و روش یادگیری Hebbian مطرح شد. از نیمه دهه نود، نسل سوم ANN ها مطرح شدند که عبارت بودند از : تعیین محدودیتهای تئوری و عملی شبکه، عمومیت و حدود آن ، ترکیب ANNها و الگوریتمهای ژنتیکی و منطق فازی[۸].

با رشد استفاده از شبکه های عصبی، ایده پیاده سازی مغز انسان بیشتر قوت گرفت و حتی تراشه های مختلفی نیز با تکیه بر روش شبکه های عصبی ساخته شدند ولی موفقیت چندانی کسب نکردند اما با مطرح شدن تکنولوژی نانوالکترونیک طرح پیاده سازی آن به یکباره دچار انقلاب گردید و به صورت یک پروژه عملی هم اکنون در حال پیگیری است. در اولین قدم از این پروژه هدف ساخت پردازشگرهایی است که بتواند همانند مغز پردازش نمایند و مشکل پردازشگرهای فعلی، که قابلیت

[1] Perceptron

موازی شدن زیاد ندارند، را برطرف نمایند[۸]. در این فصل ابتدا مروری کلی به شبکه های عصبی مغز انسان پرداخته و سپس شبکه های عصبی مصنوعی را بررسی می کنیم و پس از آن به معرفی روش ها و الگوریتم های یادگیری آن می پردازیم و در نهایت انواع سخت افزارهای عصبی که تاکنون ساخته شده اند را معرفی می کنیم تا با دیدی بهتر در فصل های آینده به تفاوت سخت افزارهای عصبی در نانوالکترونیک و CMOS پی ببریم.

۲-۲ شبکه عصبی بیولوژیکی (مغز انسان)

در سالیان اخیر شاهد حرکتی مستمر از تحقیقات صرفاً تئوری به تحقیقات کاربردی بخصوص در زمینه پردازش اطلاعات برای مسائلی که برای آنها راه حلی موجود نیست و یا براحتی قابل حل نیستند بوده ایم. با عنایت به این امر، علاقه ی فزآینده ای در توسعه پردازشگرهای محاسباتی ایجاد شده است. ANN ها جزء آن دسته از سیستمهای محاسباتی- پردازشی قرار دارند که با پردازش روی داده های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده ها را به ساختار شبکه منتقل می کنند. به همین خاطر به این سیستم ها **هوشمند** گفته می شود ، زیرا بر اساس محاسبات، روی داده های عددی یا مثال ها ، قوانین کلی را فرا می گیرند. این سیستم ها در مدلسازی ساختار نرو-سیناپتیکی مغز بشر می کوشند[۲].

دانشمندان هرچه بیشتر در مورد مغز بشر تحقیق می کنند و می آموزند، بیشتر در می یابند؛ که مغز بشر دست نیافتنی است. در حقیقت در مورد مغز و ساختار سیستم عصبی انسان اطلاعات زیادی بدست آمده است. ولی پیاده سازی ساختاری با پیچیدگی مغز انسان بر اساس تکنولوژی و اطلاعاتی که امروزه وجود دارد غیر ممکن می بود. اما پس از ظهور تکنولوژی نانوالکترونیک، به دلیل ویژگی-های بسیار مناسب آن شامل چگالی و سرعت بالا، بحث پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی یا ANN ها یکباره متحول گردید و به عنوان یکی از اصلی‌ترین مباحث سخت افزارهای محاسباتی مطرح گردید. در ابتدا برای آنکه بتوانیم مدل مصنوعی مغز را پیاده سازی کنیم؛ لازم است نگاهی به مغز موجودات زنده و اجزای اصلی آن بیاندازیم و با مروری مختصر بر نحوه کارکرد مغز، شبکه‌های عصبی را مدل-سازی نماییم.

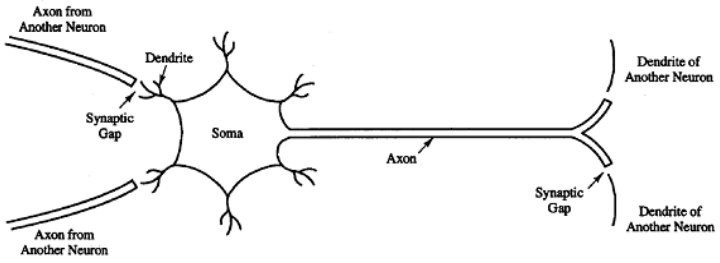
همانطور که می دانید مغز هر موجود زنده از قسمت های کوچکی به نام نرون تشکیل شده است؛ که هر نرون نیز همچون شکل ۲-۱ دارای سه قسمت اصلی می باشد[۵]:

۱ -بدنه سلول *(Soma)*

۲ -دندریت*(Dendrite)*

۳ -آکسون*(Axon)*

۴ -*سیناپس (Synapse)*



شکل۲-۱ ساختار نرون طبیعی انسان و اجزا مختلف آن

دندریت‌ها به عنوان مناطق دریافت‌کننده سیگنال‌های الکتریکی، شبکه‌هایی تشکیل‌یافته از فیبرهای سلولی هستند که دارای سطح نامنظم و شاخه‌های انشعابی بی‌شمار می باشند. دندریتها سیگنال‌های الکتریکی را به هسته‌ی سلول منتقل می کنند. بدنه‌ی سلول انرژی لازم را برای فعالیت نرون فراهم کرده و برروی سیگنال‌های دریافتی عمل می کند، که با یک عمل ساده جمع و مقایسه با یک سطح آستانه مدل می‌گردد. آکسون‌ها بر خلاف دندریت‌ها از سطحی هموارتر و تعداد شاخه های کمتری برخوردار می‌باشند. آکسون طول بیشتری دارد و سیگنال‌های الکتروشیمیایی دریافتی از هسته‌ی سلول را به نرون‌های دیگر منتقل می‌کند. محل تلاقی یک آکسون از یک سلول به دندریت‌های سلول‌های دیگر را سیناپس می گویند. توسط سیناپس‌ها ارتباطات مابین نرون ها برقرار می‌شود. همچنین به فضای مابین آکسون و دندریت‌ها فضای سیناپسی می‌گویند[۵].

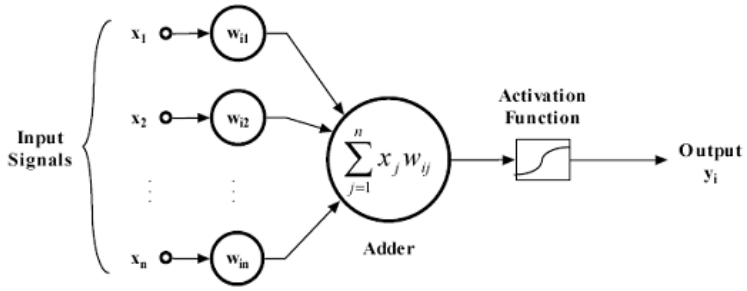
در حقیقت دندریت‌ها به عنوان ورودی نرون و آکسون به عنوان خروجی و فضای سیناپسی محلِ اتصال این دو می‌باشد. زمانی که سیگنال عصبی از آکسون به نرونها و یا عناصر دیگر بدن مثل ماهیچه

ها می رسد، باعث تحریک آنها می شود. نرون ها از هریک از اتصالات ورودی خود یک ولتاژ کم دریافت می کنند (توسط سیگنال عصبی ورودی) و آنها را با هم جمع می زنند. اگر این حاصل جمع به یک مقدار آستانه رسید اصطلاحاً نرون آتش می کند و روی آکسون خود یک ولتاژ خروجی ارسال می کند که این ولتاژ به دندریت هایی که به این آکسون متصل هستند، رسیده و باعث یک سری فعل و انفعال های شیمیایی در اتصالات سیناپسی می شود و می تواند باعث آتش کردن نرون های دیگر شود. تمامی فعالیتهای مغزی انسان توسط همین آتش کردن ها انجام می‌شود[۵].

۲-۳ شبکه عصبی مصنوعی

همانگونه که گفته شد ما می توانیم توسط مفاهیم ریاضی یک نرون طبیعی را مدل کنیم. شکل ۲-۲ یک نرون عصبی مصنوعی را نشان میدهد.

سیگنالهای ورودی X_1 تا X_n معادل سیگنالهای عصبی ورودی و وزنهای W_{i1} تا W_{in} معادل مقادیر اتصالات سیناپسی ورودی های نرون میباشند که جمعا ورودی نرون را تشکیل داده است. تابع جمع کننده $\sum_{j=1}^{n} x_i w_{ij}$ تمامی عملیات هسته سلول را انجام می دهد[۹].



شکل ۲-۲ ساختار یک نرون مصنوعی

خروجی نرون نیز توسط تابع زیر مشخص می شود:

در مغز انسان یک ساختار ALU مشخص وجود ندارد. قسمت ALU ، حافظه و کنترل ، همگی در یک ساختار درهم تنیده‌ی شبکه‌ای، از تعداد بسیار زیادی نرون، توزیع و پخش شده است. مغز انسان توسط یک پروسه یادگیری می آموزد که در پاسخ به یک ورودی، چه خروجی را تولید کرده و ارسال کند. این فرآیند یادگیری در حقیقت توسط تنظیم اتصالات سیناپسی در نرونهای طبیعی و معادل آنها در ANN ها، یعنی تنظیم وزنهای (W_{ij}) نرونهای مصنوعی انجام می شود. در حقیقت در طراحی یک نرون مصنوعی فقط کافیست وزنهای W_{ij} را مشخص کنیم تا شبکه عصبی بتواند؛ خروجی مورد نظر را از ورودی خاص تولید کند. روش‌های مختلف یادگیری وجود دارد؛ که می‌تواند بر اساس زوج مرتبهای <خروجی، ورودی> مقدار وزنها را بدست آورد[۹].

۲-۴ مدل ریاضی شبکه های عصبی مصنوعی

به هنگام مدل کردن اعصاب، از پیچیدگی های آن ها صرف نظر می شود و تنها به مفاهیم پایه ای بها داده می شود، چرا که در غیر این صورت رویکرد مدل سازی بسیار دشوار خواهد شد. در یک نگاه ساده، مدل یک عصب باید شامل ورودی هایی باشد که در نقش دندریت انجام وظیفه کنند. این ورودی ها در وزن هایی ضرب می شوند تا قدرت سیگنال را تعیین کنند(وزن ها در نقش سیناپس می باشند). نهایتاً یک عملگر ریاضی تصمیم گیری می کند که آیا نرون فعال شود یا خیر و اگر جواب مثبت باشد، میزان خروجی را مشخص می سازد. بنابراین شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از مدل ساده شده عصب واقعی به پردازش اطلاعات می پردازد. با توجه به این توضیحات، می توان مدل ساده ای برای توصیف یک نرون (یک گره در شبکه عصبی مصنوعی) پیشنهاد کرد. این مدل در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. جدای از ساده سازی های اعمال شده، تفاوت اصلی این مدل با واقعیت در این است که در شبکه واقعی، ورودی ها، سیگنال های زمانی هستند حال آن که در این مدل، اعداد حقیقی ورودی اند[۹].

در مدل ارائه شده در شکل ۲-۳ تنوع های بسیاری وجود دارد. از جمله این که وزن های یک شبکه عصبی، که مقدار خروجی را منتقل می کنند، می توانند مثبت یا منفی باشند. از طرفی، توابع مورد استفاده برای آستانه گذاری می توانند بسیار متنوع باشند. از جمله مشهورترین این توابع می توان به تابع هایی نظیر sigmoid، arctan و arcsin اشاره کرد. این توابع باید پیوسته و هموار بوده و