بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

ارائه مدل محاسباتی بازشناسی اشیاء مبتنی بر یافته های زمان پردازش در سیستم بینایی

نگارش

امین میرزایی

استاد راهنما: دکتر رضا ابراهیم پور

استاد مشاور: دکتر سید مهدی خلیق رضوی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق–الکترونیک

آذر ۹۱

تقدیم به:

پدر و مادر مهربان و دلسوزم و همسر عزیز و فداکارم که یاری او را همواره در کنار خودم احساس کردم.

و با تشکر فراوان از:

استاد عزیزم جناب آقای دکتر ابراهیم پور که با راهنمایی های خود دریچه ای جدید از دانش را به رویم گشود.

چکیده

زمان پردازش نواحی مختلف قشر بینایی مغز انسان ابزاری برای مطالعه لایه های مختلف قشر بینایی، و پی بردن به سلسله مراتب نواحی مختلف مغز است. در چند سال اخیر پارامتر های آماری تصاویر طبیعی و بحث وابستگی زمان پردازش در قشر بینایی مغز به آن ها مورد توجه قرار گرفته است. زمان پاسخ‌دهی نواحی مختلف مغز به نوع محرکی که آنها را تحریک می‌کند وابسته است. در این پایان نامه، به بررسی اثر ویژگی های آماری تصاویر و اثر آن ها در زمان پاسخ دهی نواحی مختلف قشر بینایی مغز پرداخته خواهد شد. همچنین یک مدل محاسباتی ارائه خواهد شد که در آن با استفاده از اطلاعات آماری تصاویر، به پیش بینی زمان پاسخ دهی مغز پرداخته خواهد شد و نشان داده خواهد شد که با ترکیبی از ویژگی های آماری استخراج شده از تصاویر طبیعی می توان زمان پاسخ دهی به تصاویر طبیعی را تخمین زد.

با توجه به نتایج به دست آمده، مدل محاسباتی ارائه شده قادر است با دقت بالایی زمان پاسخ دهی شرکت کننده ها را تخمین بزند. برای بدست آوردن زمان پاسخ دهی یک آزمایش سایکوفیزیک طراحی گردید و تعداد چهل نفر در این آزمایش شرکت کردند. وظیفه آنها این بود که با دیدن تصاویر طبیعی برای مدت زمان کوتاه (۱۲/۵ میلی ثانیه) تصمیم بگیرند که تصویر دیده شده حیوان بوده است یا غیر حیوان. شرکت کننده ها با زدن کلید روی صفحه کلید رایانه پاسخ خود را اعلام می کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است که به طور متوسط زمان پاسخ دهی ۷۲٪ از تصاویر را با درصد خطای قابل قبول ۵٪ تخمین بزند.

کلمات کلیدی: قشر بینایی مغز، سایکو فیزیک، آنتروپی، توزیع ویبول، تخمین زمان پاسخ دهی

فهرست

۱- طرح مسئله ۱

۱-۱- مفهوم زمان پردازش در قشر بینایی مغز..... ۲

۱-۲- پارامترهای آماری..... ۵

۱-۳- اهداف پایان نامه..... ۶

۱-۴- مرور کلی بر پایان نامه..... ۶

۲- دستگاه بینایی..... ۸

۲-۱- مقدمه..... ۹

۲-۲- ساختمان نورون..... ۱۰

۲-۳- مفهوم پتانسیل فعال سازی..... ۱۲

۲-۴- انواع نورون ها..... ۱۲

۲-۵- ممنوع سازی جانبی..... ۱۳

۲-۶- آشنایی اولیه با مسیر های بینایی در مغز انسان..... ۱۴

۲-۷- سلول های گنگلیون..... ۱۸

۲-۸- ساختار و عملکرد سلول ساده..... ۲۳

۲-۹- ساختار و عملکرد سلول پیچیده..... ۲۵

۲-۱۰- درک حرکت در سیستم بینایی..... ۲۸

۲-۱۱- بررسی سلسله مراتب قشر بینایی از نظر زمان پردازش..... ۲۹

۳- زمان پردازش در قشر بینایی مغز..... ۳۲

۳-۱- مقدمه..... ۳۳

۳-۲- مطالعات قبلی..... ۳۳

۴- مدل پیشنهادی و آزمایش های انجام شده..... ۴۳

۴-۱- مقدمه..... ۴۴

۴-۲- مدل پیشنهادی..... ۴۴

۴-۲-۱- روش محاسبه آنتروپی..... ۴۴

۴-۲-۲- روش محاسبه پارامتر های توزیع ویبول..... ۴۷

۴-۲-۳- آزمایش سایکوفیزیک..... ۵۱

۴-۳- همبستگی بین پارامترهای آماری و زمان پاسخ دهی..... ۵۲

۴-۴- ساختار مدل..... ۵۴

۴-۵- دور ریختن پاسخ های نامطلوب..... ۵۶

۴-۶- نتایج..... ۵۶

۵- جمع بندی و کارهای آینده..... ۵۹

۵-۱- مقدمه..... ۶۰

۵-۲- جمع بندی فصول..... ۶۰

۵-۳- نتیجه گیری..... ۶۱

۵-۴- کارهای آینده..... ۶۲

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقایسه سلول های مخروطی و استوانه ای..... ۱۷

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱-مسیرهای بالایی و پایینی در قشر بینایی مغز..... ۳
شکل ۱-۲- نواحی مختلف مسیر های بالایی و پایینی در قشر بینایی..... ۳
شکل ۱-۳- ناحیه MT در قشر بینایی مغز..... ۴
شکل ۱-۴- زمان های پاسخ دهی در مسیر بینایی برای نیم کره سمت چپ و راست..... ۴
شکل ۲-۱- ساختار یک نورون..... ۱۰
شکل ۲-۲ شکاف سیناپسی ۱۱
شکل ۲-۳. یک شبکه از نورون های مغز که شامل تعداد زیادی نورون است ۱۱
شکل ۲-۴. پتانسیل فعال سازی یک نورون..... ۱۲
شکل ۲-۵ ساختمان انواع نورون ها ۱۳
شکل ۲-۶ انواع مسیر های بازدارنده در ساختمان نورون ها..... ۱۴
شکل ۲-۷ شبکیه چشم به عنوان درگاه سیستم بینایی..... ۱۵
شکل ۲-۸ نورون های موجود در شبکیه..... ۱۶
شکل ۲-۹ ساختمان سلول های مخروطی و استوانه ای..... ۱۸
شکل ۲-۱۰ دو نوع سلول گنگلیون که از نظر حساسیت به مرکز و حساسیت به زمینه متفاوت هستند..... ۱۹
شکل ۲-۱۱ مقایسه پاسخ دهی دو نوع سلول گنگلیون حساس به مرکز و حساس به زمینه..... ۱۹
شکل ۲-۱۲ نورون های دو قطبی که به صورت موازی قرار دارند..... ۲۱

شکل ۲-۱۳مسیر بینایی از چشم به تالاموس و به مرحله اول کورتکس بینایی..... ۲۲
شکل ۲-۱۴ بررسی نحوه پاسخ دهی یک سلول ساده..... ۲۳
شکل ۲-۱۵ یک سلول ساده پاسخ های سلول های گنگلیون را با هم جمع می کند..... ۲۴
شکل ۲-۱۶ یک خط با جهت ۴۵ درجه که یک سلول ساده به آن پاسخ میدهد..... ۲۵
شکل ۲- ۱۷یک سلول پیچیده از ورودی های خود که از یک سلول ساده هستند ماکزیمم می گیرد..... ۲۵
شکل ۲-۱۸ افزایش حوزه بینایی در سلول های پیچیده همراه با ایجاد استقلال از مکان..... ۲۶
شکل ۲-۱۹ برش یک ستون در ناحیه ابتدایی بینایی کورتکس..... ۲۷
شکل ۲-۲۰ درک حرکت توسط چشم..... ۲۸
شکل ۲-۲۱ کل مسیر بینایی در مغز میمون همراه با زمان مورد نیاز برای انجام هر مرحله..... ۲۹
شکل۲-۲۲ انواع اتصالات موجود در مسیر بینایی..... ۳۰
شکل ۲-۲۳ پاسخ دهی یک نورون در ناحیه کورتکس گیجگاهی تحتانی به محرک های پیچیده تر نظیر چهره..... ۳۱
شکل ۳-۱- محل الکترود ها در استاندارد ۱۰-۲۰..... ۳۴
شکل ۳-۲- سیگنال های مربوط به تصاویر هدف و غیر هدف به تفکیک الکترود..... ۳۶
شکل ۳-۳- سیگنال تفاضلی..... ۳۶
شکل ۳-۴- سیگنال تفاضلی به تفکیک شرکت کننده ها..... ۳۷
شکل ۳-۵- توزیع زمان های پاسخ دهی.. ..... ۳۸
شکل ۳-۶- سیگنال های مغزی ثبت شده، میانگین هفت الکترود جلویی سر..... ۳۹
شکل ۳-۷- آزمایش ماسک بازگشتی..... ۴۰
شکل ۳-۸- دقت پاسخ دهی برحسب زمان بین تصویر و ماسک..... ۴۱
شکل ۳-۹- تعداد پاسخ های صحیح به تصاویر حیوان بر حسب زمان پاسخ دهی..... ۴۲
شکل ۳-۱۰- سیگنال تفاضلی حیوان از غیر حیوان در الکترود PO۸..... ۴۲
شکل ۴-۱ استخراج پنجره از تصاویر..... ۴۵

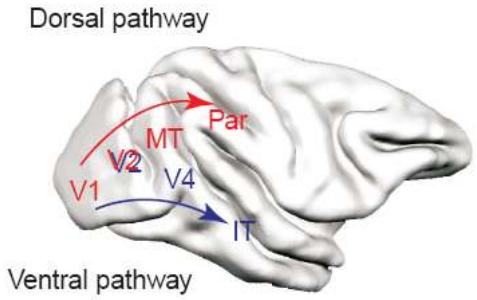
شکل ۴-۲ نحوه محاسبه آنتروپی..... ۴۷
شکل ۴-۳ فیلتر کردن تصاویر و توزیع ویبول منطبق شده بر هیستوگرام لبه ها..... ۴۸
شکل ۴-۴ همبستگی بین پارامتر های بتا و گامای ویبول..... ۵۰
شکل ۴-۵- نحوه استخراج پارامتر های ویبول..... ۵۰
شکل ۴-۶ آزمایش سایکوفیزیک طراحی شده..... ۵۲
شکل ۴-۷ همبستگی بین پارامتر های آماری استخراج شده و زمان های پاسخ دهی..... ۵۳
شکل ۴-۸- ماتریس همبستگی..... ۵۳
شکل ۴-۹- ساختار مدل پیشنهاد شده..... ۵۵
شکل ۴-۱۰ نحوه دور ریختن پاسخ های غیر قابل قبول..... ۵۶
شکل ۴-۱۱ مقایسه عملکرد مدل در حالت های مختلف..... ۵۸

فصل اول

طرح مسئله

مفهوم زمان پردازش در قشر بینایی مغز

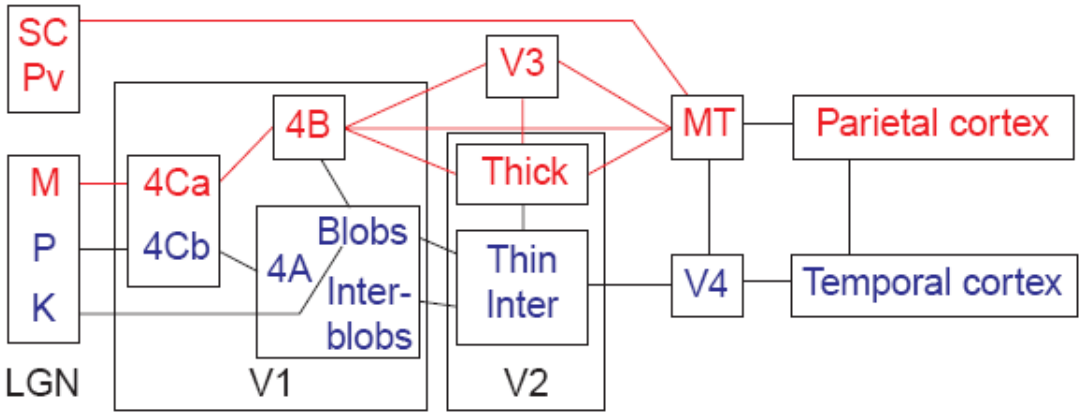
پس از مشاهده یک تصویر طبیعی، اطلاعات مربوط به تصویر در مسیر مربوط به بینایی در مغز شروع به بالا رفتن از طبقات مختلف قشر بینایی مغز می کنند. این پدیده همان چیزی است که تحت عنوان پردازش مستقیم اطلاعات در مغز می شناسیم. فعالیت های نورونی در مسیر قشر بینایی مغز از نواحی پایین تر شروع به بالا رفتن به نواحی بالاتر می کند. از نظر سلسله مراتب پردازش اطلاعات در قشر بینایی مغز، ناحیه V۱ اولین ناحیه ایست که اطلاعات به آن می رسد [۱]. بنابراین، از نظر زمان پردازش اطلاعات، کمترین تاخیر را ناحیه V۱ دارد [۲]. به عبارت دیگر، ناحیه V۱ دارای کمترین تاخیر در زمان پاسخ دهی نسبت به بقیه نواحی است. زمان های پردازش مختلفی برای این ناحیه ذکر شده است. متوسط تاخیر در پاسخ دهی ناحیه V۱ حدود ۳۵ میلی ثانیه است. پس از V۱ جریان پردازش اطلاعات به دو شاخه تقسیم می گردد. مسیر پشتی[1] (بالایی) و مسیر زیرین[2] (پایینی). شکل ۱-۱ نشان دهنده این دو مسیر در مغز می باشد [۳].



شکل ۱-۱ مسیرهای بالایی و پایینی در قشر بینایی مغز [۳].

همچنین شکل ۱-۲ نشان دهنده این دو مسیر به تفکیک نواحی متعلق به هر مسیر و اتصالات بین آن هاست [۳].

1- Dorsal Pathway
2- Ventral Pathway



شکل ۱-۲ نواحی مختلف مسیر های بالایی و پایینی در قشر بینایی [۳].

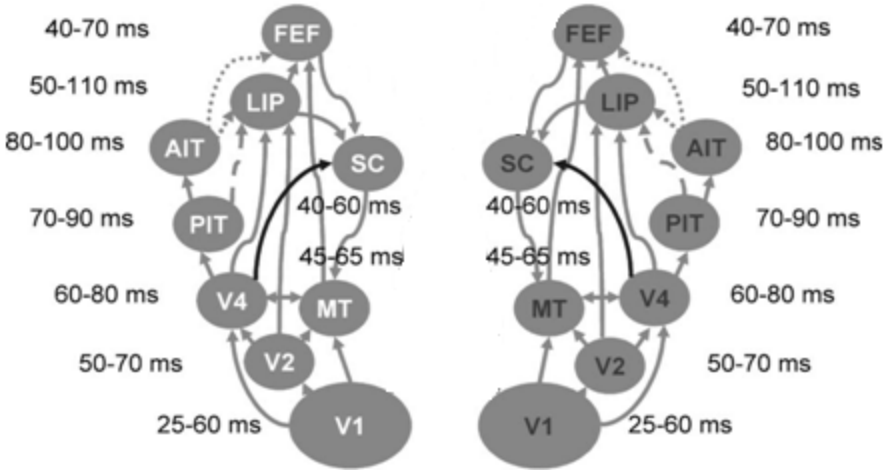
پس از ناحیه V۱ نواحی از قشر بینایی که دارای سریع ترین پاسخ ها هستند عبارتند از نواحی MT و FEF. ناحیه MT ناحیه ای است که در مسیر بالایی پردازش اطلاعات قرار دارد و به عنوان ناحیه درک حرکت شناسایی شده است. نورون های موجود در این ناحیه به حرکت حساس هستند و در مقابل حرکت بیشترین پاسخ را میدهند. متوسط زمان تاخیر در پردازش اطلاعات در این ناحیه برابر با ۳۹ میلی ثانیه است. در شکل ۱-۳ محل این ناحیه با رنگ قرمز در مغز نشان داده شده است [۳، ۴].

شکل ۱-۳ ناحیه MT در قشر بینایی مغز [۳].

ناحیه FEF ناحیه ایست که نورون های موجود در این ناحیه به شش ماهیچه اطراف چشم برای حرکت کردن فرمان میدهند و باعث حرکت دادن چشم ها به سمت محل مطلوب می گردند. متوسط

زمان پاسخ دهی در این ناحیه ۴۳ میلی ثانیه است. این ناحیه نیز ازجمله سریع ترین نواحی در قشر بینایی مغز می باشد [۳].

شکل ۱-۴ نشان دهنده نواحی مختلف قشر بینایی مغز و زمان های متناظر هر ناحیه است برای نیمکره سمت راست و چپ.



شکل ۱-۴ زمان های پاسخ دهی در مسیر بینایی برای نیم کره سمت چپ و راست [۵].

همچنان که توضیح داده شد، پس از V۱ مسیر بینایی به دوشاخه تقسیم می گردد. این تقسیم شدن در ناحیه V۲ صورت می گیرد [۶]. به عبارت دیگر مسیر بالایی دارای ناحیه V۲ متناظر با خود و مسیر پایینی داری V۲ متناظر با خود است. از نظر سلسله مراتب بینایی V۲ ناحیه پس از V۱ شناخته می شود. متوسط زمان پاسخ دهی در این ناحیه ۵۴ میلی ثانیه می باشد. در مسیر پایینی قشر بینایی مغز، ناحیه بعدی V۴ است. متوسط زمان پاسخ دهی در این ناحیه ۶۱ میلی ثانیه می باشد. در مسیر بالایی قشر بینایی مغز ناحیه پس از V۲ ناحیه V۳ می باشد. متوسط زمانی که برای این ناحیه گزارش شده است در حدود ۵۰ میلی ثانیه می باشد [۷]. برای ناحیه IT که مخصوص دریافت درک سطح بالا از اشیاء می باشد [۸] زمان هایی از ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی ثانیه ذکر شده است [۳، ۹]. این امر قبلاً اثبات شده است یک سیستم کاهش آنتروپی از شبکیه چشم تا ناحیه V۱ وجود دارد [۱۰]. همچنین مقدار اطلاعات که

در هر گیرنده بینایی در شبکیه وجود دارد و همچنین همبستگی بین گیرنده‌های مجاور ممکن است مرتبط با آنتروپی[۳] محرک ورودی باشد [۱۱].

۱-۱- پارامتر های آماری

تصاویر طبیعی (از نظر ویژگی‌های آمار تصاویر) بین تصاویری صاف و همگون (تصاویر با آنتروپی کم) و نویز سفید (تصاویری با آنتروپی بالا) قرار می‌گیرند. تصاویر نویز سفید[۴] تصاویری هستند که در آنها پیکسل‌های مجاور نا همبسته هستند [۱۱]. محاسبه دقیق مقدار آنتروپی یک تصویر طبیعی بسیار مشکل است و از نظر امکان پیاده‌سازی غیرقابل پیاده‌سازی است اما آقای کرستن[۵] یک روشی برای محاسبه کردن بالای آنتروبی پیشنهاد دادند. در روشی که آقای کرستن پیشنهاد دادند شرکت‌کننده‌ها می‌بایست پیکسل‌های حذف شده از یک تصویر را حدس بزنند [۱۲]. چندلر[۶] و فیلد[۷] یک روش تخمین آنتروپی بر پایه توزیع ارائه دادند و ادعا کردند که روش آنها تخمین دقیقی از آنتروپی تصاویر طبیعی می‌دهد [۱۳].

همچنین پیش از این نشان داده شده است که هستیوگرام لبه‌های[۸] یک تصویر طبیعی دارای توزیع ویبول[۹] هستند [۱۴]. دوپارامتر مهم در این توزیع پارامترهای بتا و گاما هستند [۱۴]. اسکولته[۱۰] و همکارانش در نتایج خود نشان دادند که پارامترهای بتا و گاما در تصاویر شلوغ‌تر بالاتر هستند. تصاویر با بتا و گامای پائین‌تر تصاویر آسان‌تری هستند بنابراین این تصاویر سریع‌تر درک می‌شوند.

۱-۲- اهداف پایان نامه

در این پایان‌نامه یکی از مباحثی که به آن پرداخته خواهد شد این است که آیا آنتروپی تصاویر طبیعی پارامتر موثری در تخمین زمان پاسخ‌دهی شرکت کننده‌ها هست یا خیر. در این پایان‌نامه از آنتروپی [۱۳] به عنوان یکی از پارامتر های مهم آماری در تصاویر طبیعی استفاده شده است. همچنین

1- Entropy
2- White noise
3- Kersten
4- Chandler
5- Field
6- Edge Histogram
7- Weibull distribution
8- Scholte

برای تخمین بتا و گاما در این پایان‌نامه از توزیع ویبول [۱۴] منطبق شده بر هیستوگرام هر تصویر فیلتر شده منطبق شده است. برای فیلتر کردن تصاویر نیز از فیلتر گاوسین که در فصل چهارم و در بخش محاسبه پارامتر های توزیع ویبول توضیح داده خواهد شد استفاده شده است.

دراین پایان نامه یک آزمایش سایکوفیزیک[۱۱] طراحی گردید که در آن از شرکت‌کننده‌ها خواسته می‌شد که با دیدن سریع یک تصویر تصمیم بگیرند که آیا تصویر دیده شده تصویر حیوان است یا غیرحیوان. بر پایه خواص آماری تصاویر طبیعی از قبیل آنتروپی و پارامترهای بتا و گامای ویبول در این پایان‌نامه یک مدل محاسباتی ارائه شده است که قادر است زمان پاسخ‌دهی شرکت‌کننده‌ها در دسته‌بندی سریع تصاویر تخمین بزند. یک همبستگی قوی بین زمان پاسخ‌دهی و آنتروپی و بتا و گاما در یک تصویر به دست آمد. برای تخمین زمان پاسخ‌دهی این سه پارامتر به عنوان یک بردار ویژگی در نظر گرفته شد. مدل پیشنهادی در حقیقت تخمین زمان پاسخ‌دهی با استفاده از این سه پارامتر است. به عبارت دیگر مدل محاسباتی که در این پایان نامه ارائه شده است نگاشتی است از پارامتر های آماری ذکر شده به زمان های پاسخ دهی شرکت کننده هادر آزمایش سایکو فیزیک. نتایج این مدل نمایش می‌دهد که زمان پاسخ‌دهی شرکت‌کننده‌ها را می‌توان با ترکیب این سه پارامتر با دقت بالایی تخمین زد.

۱-۳- مرور کلی بر پایان نامه

در این پایان نامه زمان پردازش در قشر بینایی مغز به عنوان پارامتری مهم مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم در مورد ساختار قشر بینایی مغز و انواع نورون ها و سلول های عصبی موجود در قشر بینایی مغز توضیح داده شده است. در فصل سوم به مروری در خصوص مقاله های قبلی و کارهای انجام شده در زمینه زمان پردازش در قشر بینایی مغز پرداخته خواهد شد. همچنین در این فصل در خصوص نحوه استخراج پارامترهای آماری تصاویر طبیعی توضیح داده خواهد شد. در فصل چهارم آزمایش های انجام شده و مدل ارائه شده توضیح داده خواهد شد. همچنین در این فصل نتایج به دست آمده نیز تشریح شده اند. در نهایت و در فصل پنجم نتیجه گیری از این پایان نامه ارائه خواهد شد و همچنین در مورد کارهای آینده توضیح داده خواهد شد.

9- Psycophysics

فصل دوم

دستگاه بینایی

۲-۱- مقدمه

ساختمان نورون ها و آشنا شدن با ساختار آن ها اولین قدم در راه مطالعه قشر بینایی مغز می باشد. امروزه دانش علوم اعصاب به عنوان یکی از شاخه های پیشرو در علوم در سطح جهان مطرح است. منطبق ساختن مدل های بازشناسی بر پایه عملکرد قشر بینایی مغز هدفی نهایی بوده است که هنوز تا رسیدن به این هدف راه زیادی در پیش است.

اولین و مهم ترین جزء از مغز نورون نام دارد. آشنا شدن با ساختار و نحوه عملکرد نورون ها کمک بسیاری در درک بهتر مدل های ارائه شده و همچنین سیستم پردازش در مغز خواهد کرد. این جزء به عنوان پایه ای ترین قسمت مغز باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

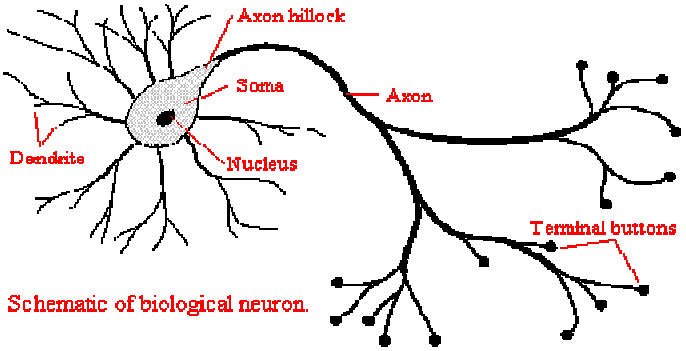
در این فصل به بررسی انواع نورون ها و مفاهیمی همچون پتانسیل فعال سازی[۱۲]، ممنوع سازی جانبی[۱۳]، سلول های گنگلیون[۱۴] خواهیم پرداخت. همچنین در این فصل با مسیر های اولیه در قشر بینایی مغز انسان آشنا خواهیم شد. در این مسیرها اولین مراحل پردازش قشر بینایی مغز انجام می شود. مطالعه این فصل به خواننده کمک خواهد کرد تا با اصول اولیه پردازش در مغز آشنا شود.

نورو بیولوژی[۱۵] را می توان دانش تحلیل و بررسی رفتار نورون ها دانست. در این شاخه از دانش، هدف شبیه سازی فعالیت های نورون ها است. بدین معنا که دانشمندان این عرصه با انجام مطالعات و آزمایش هایی برروی قسمت های مختلف مغز به نتایج عملی دست می یابند و سپس تلاش می کنند که سیستمی را طراحی کنند که اساس عملکرد آن بر اساس نتایج آزمایش ها و بر اساس مدل های بیولوژیکی باشد.

۲-۲- ساختمان نورون:

1- Action Potential
2- Lateral inhibition
3- Ganglion Cells
4- Neurobiology

در ابتدا ساختار یک نورون شرح داده می شود. در شکل ۲-۱ ساختار یک نورون را مشاهده می کنید:



شکل ۲-۱. ساختار یک نورون [۱۵].

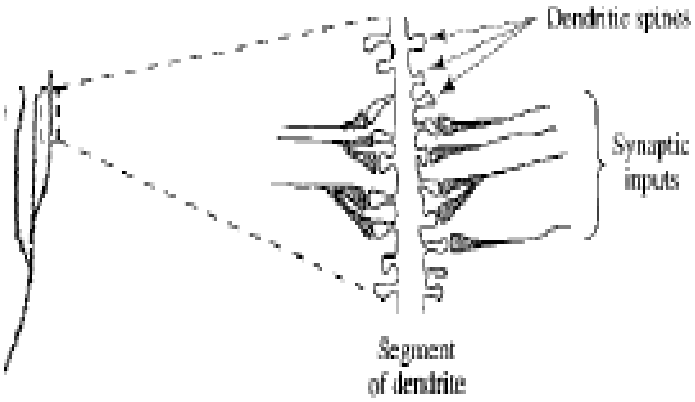
در شکل ۲-۱ قسمت های مختلف یک نورون را از قبیل دندریت ها[۱۶] را مشاهده می کنید. دندریت ها به نورون های دیگر متصل هستند و وظیفه آن ها انتقال سیگنال از نورون های دیگر به هسته[۱۷] است.

در انتهای سوما[۱۸] قسمتی وجود دارد به نام آکسون هیلاک[۱۹] که این قسمت در ابتدای آکسون وجود دارد. زمانی که حجم مواد شیمیایی در درون هسته از یک حد مجاز بیشتر شد، نورون اصطلاحا فعال می گردد. این سیگنال از طریق آکسون ها منتقل می گردد. سیگنال از طریق آکسون ها با استفاده از پالس های الکتریکی که به آن ها پتانسیل تحریک[۲۰] گفته می شود به نورون های دیگر منتقل می گردد. این پالس ها در سیناپس[۲۱] هایی که به نام ترمینال آن ها را می شناسیم جمع می گردد. شکل ۲-۲ را ببینید.

هر پالسی که در سیناپس ها رخ می دهد مقدار کمی از مواد شیمیایی را آزاد می کند که از یک شکاف سیناپسی عبور می کند و سپس توسط گیرنده هایی که آن ها را با نام گیرنده های سیناپسی

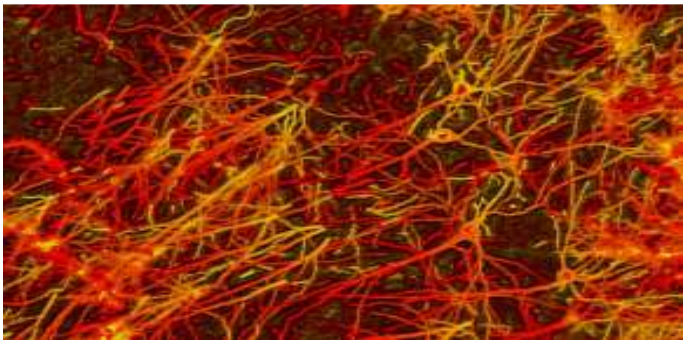
1- Dendrites
2- Nucleus
3- Soma
4- Axon hillock
5- Action potential or Spike
6- Synapses

پسین[۲۲] می شناسیم دریافت می گردد. در اینجا مواد شیمیایی با مولکول های دیگر ترکیب شده و سبب تغییر در پتانسیل دندریت ها می گردد.



شکل ۲-۲ شکاف سیناپسی [۱۵]

در شکل ۲-۳ ساختار یک شبکه نورونی واقعی در مغز را ملاحظه می کنید:



شکل ۲-۳. یک شبکه از نورون های مغز که شامل تعداد زیادی نورون است [۱۶].

تحقیقات به عمل آمده در این زمینه نشان می دهد که تعداد نورون ها در مغز در حدود یکصد میلیارد است. که در شکل فوق یک ساختار واقعی از آن ها را ملاحظه می کنید.

1- Post synaptic receptor