



مهندسی الکترونیک برای علوم اعصاب

اثر: دکتر حسین باهر

استاد بازنشسته مهندسی الکترونیک

پیشتر در دانشگاه فناوری دوبلین (TUD)، دوبلین، ایرلند

مترجم:

«مهندس علی پولادی»

کارشناس مهندسی تجهیزات پزشکی

کارشناس مهندسی الکترونیک کاربردی

فهرست مطالب

۱- دیدگاه الکترونیکی از مغز	۹
۱.۱ مقدمه	۱۱
۱.۲ مغز انسان	۱۱
۱.۳ قشر مخ	۱۳
۱.۴ ماهیت الکترونیکی مغز	۱۴
۱.۵ مدلسازی سیستم‌های زیستی با استفاده از مدارهای الکترونیکی	۱۷
۱.۶ منطق سنتز	۱۹
۱.۷ نظریه میدان الکتریکی	۱۹
۱.۷.۱ ظرفیت خازنی	۲۱
۱.۷.۲ جریان الکتریکی و چگالی جریان	۲۳
۱.۷.۳ جابجایی جریان	۲۳
۱.۸ ترانزیستورهای MOS و مدارهای میکروالکترونیکی	۲۵
۱.۹ نتیجه‌گیری	۲۸
منابع	۲۸
۲- مغز به عنوان یک پردازشگر سیگنال	۲۹
۲.۱ مقدمه	۳۱
۲.۲ سیگنال‌ها و سیستم‌ها	۳۱
۲.۳ تحلیل طیف	۳۲
۲.۳.۱ توابع همبستگی	۳۵
۲.۳.۲ سیگنال‌های تناوبی	۳۶
۲.۴ مدل‌سازی مغز	۳۶
۲.۵ دسترسی به فعالیت مغز	۳۹
۲.۵.۱ الکتروانسفالوگرافی (EEG)	۳۹
۲.۵.۲ ایمپلنت‌ها	۳۹
۲.۵.۳ الکتروکورتیکوگرافی (ECoG)	۴۰
۲.۶ رابط مغز-ماشین و نقشه‌برداری از کورتکس	۴۰
۲.۷ نتیجه‌گیری	۴۳
منابع	۴۳
۳- پردازش سیگنال عصبی	۴۵
۳.۱ مقدمه	۴۷
۳.۲ سیگنال‌های عصبی	۴۷
۳.۳ فیلترها و سیستم‌های با انتخاب‌پذیری فرکانسی	۴۸
۳.۴ دیجیتال‌سازی سیگنال‌های آنالوگ	۴۹
۳.۵ فیلترهای دیجیتال	۵۲

فهرست مطالب

۳.۶	سیگنال‌های تصادفی (استوکاستیک).....	۵۳
۳.۶.۱	تابع توزیع احتمال.....	۵۴
۳.۶.۲	فرآیندهای ایستا.....	۶۰
۳.۷	طیف توان سیگنال‌های تصادفی.....	۶۰
۳.۷.۱	طیف توان متقاطع.....	۶۱
۳.۷.۲	نویز سفید.....	۶۲
۳.۸	تخمین طیف توان.....	۶۲
۳.۹	نتیجه‌گیری.....	۶۴
	منابع.....	۶۴
۴-	روان‌پزشکی الکترونیکی.....	۶۵
۴.۱	مقدمه.....	۶۷
۴.۲	میدان‌های مغناطیسی و نظریه میدان الکترومغناطیسی.....	۶۸
۴.۲.۱	قانون بیوت-سوار (قاعده لاپلاس).....	۶۸
۴.۲.۲	قانون آمپر (قانون مدار آمپر).....	۶۹
۴.۲.۳	قضیه استوکس.....	۶۹
۴.۲.۴	چگالی شار مغناطیسی.....	۷۰
۴.۲.۵	قضیه گاوس.....	۷۰
۴.۳	تحریک عصب واگ (VNS).....	۷۲
۴.۴	تحریک مغناطیسی مغز به روش تکرارشونده (rTMS).....	۷۴
۴.۵	درمان تشنج مغناطیسی.....	۷۵
۴.۶	تحریک مستقیم جریان مستقیم فراجمله‌ای (tDCS).....	۷۵
۴.۷	تحریک عمقی مغز (DBS).....	۷۶
۴.۸	روان‌پزشکی دیجیتال.....	۷۸
۴.۹	نتیجه‌گیری.....	۷۹
	منابع.....	۷۹
۵-	مهندسی عصب: ادغام علوم اعصاب با مهندسی.....	۸۱
۵.۱	مقدمه.....	۸۳
۵.۲	تکنیک‌های اسکن و تصویربرداری.....	۸۳
۵.۳	تابش الکترومغناطیسی و انتشار موج.....	۸۴
۵.۴	تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI).....	۸۵
۵.۴.۱	رزونانس.....	۸۵
۵.۴.۲	دوقطبی‌ها.....	۸۵
۵.۵	اسکن‌های اولتراسوند داپلر برای تأمین خون.....	۸۹
۵.۶	تعامل میدان‌های الکتریکی با بافت عصبی.....	۹۰

فهرست مطالب

۵.۷	کاربرد در صرع	۹۱
۵.۸	الکترونیک برای از کار افتادگی (فلج)	۹۲
۵.۹	شبکه مصنوعی سیلیکونی	۹۳
۵.۱۰	کاشت حلزونی	۹۴
۵.۱۱	پوست الکترونیکی	۹۵
۵.۱۲	بازیابی حس لامسه	۹۶
۵.۱۳	جراح رباتیک	۹۶
۵.۱۴	درمان‌های الکترو-اپتیک مغز	۹۶
۵.۱۵	پروتزهای عصبی	۹۷
۵.۱۶	درمان طولانی مدت کووید با استفاده از تحریک الکتریکی	۹۸
۵.۱۷	استراق سمع از مغز	۹۸
۵.۱۸	مگنتوانسفالوگرافی (MEG) با استفاده از حسگرهای کوانتومی	۹۹
۵.۱۹	نتیجه‌گیری	۹۹
	منابع	۱۰۰

فصل اول

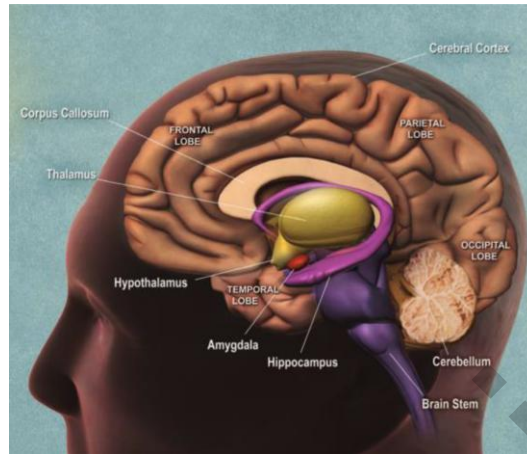
۱- دیدگاه الکترونیکی از مغز

۱.۱ مقدمه

این فصل با معرفی مغز انسان به خواننده عمومی آغاز شده و سپس به ماهیت الکترونیکی مغز می‌پردازد. این فصل برخی مفاهیم پایه‌ای مهندسی الکترونیک را که برای مطالعه مغز ضروری هستند، معرفی می‌کند. این مفاهیم برای توضیح اصطلاحات مورد استفاده در سراسر کتاب و همچنین ایده‌های اصلی مهندسی الکترونیک در کنار علوم اعصاب، مهم هستند و بدین ترتیب یک زبان مشترک ایجاد می‌کنند. ایده مدل‌سازی سیستم‌های زیستی به کمک مدارهای الکترونیکی به طور کلی با در نظر گرفتن مدلی از بخش‌هایی از سیستم شنوایی که محتوای عصبی سنگینی دارد، برجسته می‌شود. سپس، مهندسی الکترونیک به عنوان یک رشته علمی طراحی محور مورد بحث قرار می‌گیرد که بر ترکیب اجزا برای ایجاد یک سیستم عملکردی بر اساس مشخصات داده‌شده به منظور انجام یک وظیفه خاص تکیه دارد. برای متخصصان پزشکی که به دنبال درک عمیق از مبانی مهندسی برق و الکترونیک هستند، بخش‌های مربوط به نظریه میدان الکتریکی و مدارهای میکروالکترونیک می‌توانند مفید باشند.

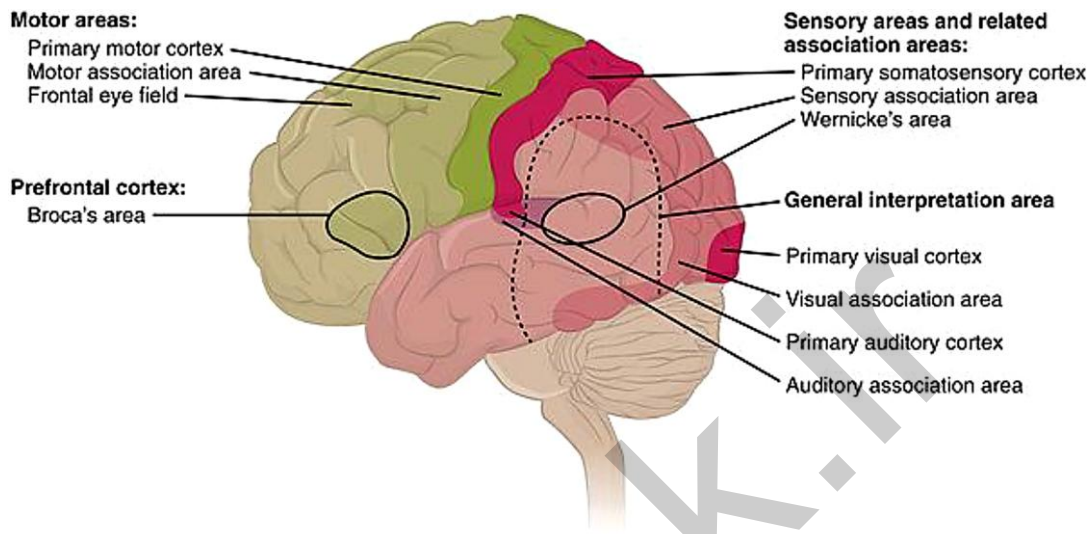
۱.۲ مغز انسان

شکل ۱.۱ نمای مقطعی ساده‌شده‌ای از مغز انسان را نشان می‌دهد که به نیمکره راست نگاه می‌کند [۱]. مغز از مخ، مخچه و ساقه مغز تشکیل شده است. مخ توسط دو نیمکره جفت‌شده که مسئول شخصیت، زبان، رفتار، هوش و احساسات هستند، غالب است. مخچه مسئول تعادل، تن عضلانی و هماهنگی است. ساقه مغز به طناب نخاع منتهی می‌شود که بخش دیگر سیستم عصبی مرکزی (CNS) است. قشر مخ چین‌خورده و پیچ‌وتاب‌هایی به نام چین‌های مغزی (gyri) تشکیل می‌دهد. این قشر چهار لوب دارد: پیشانی، آهیانه‌ای، گیجگاهی و پس‌سری، همان‌طور که در شکل ۱.۱ نشان داده شده است. در ادامه توضیحات مختصری از نواحی نشان‌داده‌شده در شکل ۱.۱ ارائه می‌شود:



شکل ۱.۱. نمای ساده‌شده از نیمکره راست مغز انسان [۱]. منبع: مؤسسه ملی پیری

- الف) کورپوس کالوزوم** (جسم پینه‌ای) دسته‌ای متشکل از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلیون رشته عصبی است که دو نیمکره مغز را به هم متصل می‌کند و ارتباط بین دو طرف مغز را امکان‌پذیر می‌سازد.
- ب) لوب پیشانی** حرکات چشم، رفتارهای اجتماعی، برنامه‌ریزی اقدامات و حرکات ظریف را کنترل می‌کند. لوب پیشانی غالب همراه با لوب گیجگاهی غالب، تولید گفتار را کنترل می‌کند. لوب غالب، لوبی است که در نیمکره‌ای قرار دارد که دست ترجیحی فرد را کنترل می‌کند.
- ج) بخش بیرونی لوب گیجگاهی** همراه با لوب آهیانه‌ای غالب، ورودی گفتار را کنترل می‌کند، در حالی که بخش درونی آن همراه با لوب پیشانی غالب، خروجی گفتار را کنترل می‌کند.
- د) لوب آهیانه‌ای** حس و جهت‌گیری فضایی را کنترل می‌کند. این لوب همراه با لوب گیجگاهی، درک گفتار و چیزی که به آن «گفت‌وگوی درونی» گفته می‌شود را مدیریت می‌کند. گفت‌وگوی درونی، همان «صدای درون سر» است که در دوران کودکی شکل می‌گیرد و به ویژه برای افراد خلاق، به عنوان یک مکالمه با مخاطبی خیالی عمل می‌کند و به حافظه کاری کمک می‌کند.
- ه) لوب پس‌سری** با بینایی سروکار دارد.
- و) آمیگدال** یک ناحیه زیرقشری است که با پاسخ‌های هیجانی و یادگیری مرتبط است. این بخشی از سیستم لیمبیک است.
- ز) هیپوکامپ** یک ناحیه قشری درون سیستم لیمبیک است که در شکل‌گیری حافظه و جهت‌یابی نقش دارد.
- ح) تالاموس** توده‌ای از ماده خاکستری در مرکز مغز است و به عنوان دروازه‌ای به سوی قشر مغز شناخته می‌شود. این بخش به عنوان ایستگاه تقویت‌کننده تکانه‌های حسی به قشر مغز عمل می‌کند.
- ط) هیپوتالاموس** مسئول حفظ محیط داخلی ثابت بدن است. این بخش امیال اولیه مانند گرسنگی و تشنگی را تنظیم می‌کند و فعالیت‌های سیستم غدد درون‌ریز و سیستم عصبی خودمختار را هماهنگ می‌کند.
- ی) قشر مغز** لایه بیرونی مخ است.



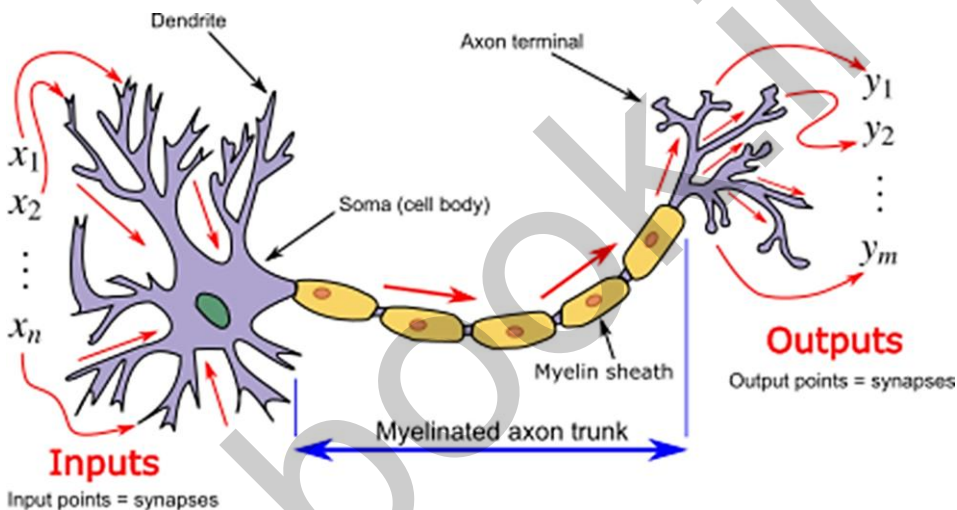
شکل ۱.۲. مناطق اصلی قشر مغز (نیمکره چپ به شکل ساده شده) [۳]. منبع OpenStax College

۱.۳ قشر مخ

بخش‌های پردازش اطلاعات سطح بالا در مغز در نئوکورتکس قرار دارند [۲]. نئوکورتکس بخش عمده‌ای از قشر مخ را تشکیل می‌دهد و شامل تمامی مناطق حسی، حرکتی و ارتباطی اصلی می‌شود. برخی از ویژگی‌های کلیدی قشر مخ در شکل ۱.۲ نشان داده شده‌اند. نئوکورتکس از شش لایه‌ی *laminar* (لایه‌ای) تشکیل شده است که در یک فرد بالغ قابل تشخیص هستند. نوع دوم اصلی قشر مخ، آلوکورتکس است. این بخش نازک‌تر است و شامل سه لایه می‌شود و هیپوکامپ (آرکی کورتکس) و مناطق اولیه‌ی بویایی (پالئوکورتکس) را در بر می‌گیرد. منطقه‌ی انتقالی بین نئوکورتکس و آلوکورتکس، مزوکورتکس نام دارد؛ این منطقه بین سه تا شش لایه دارد و شامل چین‌های سینگولیت و پراهیپوکامپال می‌شود. مناطق غیر نئوکورتکسی نقش‌های احشایی و احساسی دارند و عمدتاً در لوب لیمبیک یا مناطق اولیه‌ی بویایی قرار گرفته‌اند. به طور سنتی تصور می‌شد که ناحیه‌ی بروکا با تولید گفتار و ناحیه‌ی ورنیکه با درک گفتار سر و کار دارند. در واقع، تمایز شدید بین تولید و درک گفتار و زبان اخیراً کنار گذاشته شده و به جای آن عملکرد یکپارچه‌تری مورد توجه قرار گرفته است.

۱.۴ ماهیت الکترونیکی مغز

برای مطالعه‌ی سیستم عصبی، مهندسان الکترونیک از فلسفه‌ی خود در طراحی مدل‌هایی به شکل الکترونیکی پیروی می‌کنند. بنابراین، ما با بلوک‌های ساختمانی پایه‌ای عملکردی و ساختاری شروع می‌کنیم. این بلوک‌ها نورون‌ها در نظر گرفته می‌شوند، سلول‌های عصبی که در شکل ۱.۳ با ویژگی‌های کلی‌شان نشان داده شده‌اند. نورون‌ها با یکدیگر، با فیبرهای عضلانی و با غدد در سیناپس‌ها ارتباط برقرار می‌کنند. اتصال متقابل این نورون‌ها منجر به تشکیل یک شبکه‌ی عصبی می‌شود. سپس سعی می‌کنیم یک نورون منفرد را در نقاط کلیدی توصیف کنیم، به عنوان مثال.



شکل ۱.۳. عناصر اصلی یک نورون [۴].

ورودی و خروجی در طول آن و غیره به صورت الکترونیکی. سپس ویژگی‌های اصلی اتصال دلخواه این بلوک‌های سازنده را در نقاط مورد علاقه تعیین می‌کنیم. این معمولاً یک نمودار مدار است که به آن شبکه الکترونیکی می‌گویند. سپس می‌گوییم که این یک مدل الکترونیکی از شبکه عصبی بیولوژیکی اصلی است. با این حال، در همه موارد، این یک مدل بسیار تقریبی است و تنها می‌تواند به عنوان نقطه شروع برای یک دید جامع‌تر از سیستم عصبی باشد.

از نظر ساختاری، دو نوع اصلی نورون قشری وجود دارد [۳]. این‌ها عبارتند از: (I) نورون‌های دانه‌ای که سلول‌های کوچکی هستند و در مناطق حسی رایج هستند و (II) نورون‌های هرمی که سلول‌های بزرگی هستند و در مناطق حرکتی برجسته‌اند. قشر مغز همچنین شامل سلول‌های پورکنر است که شبیه به نورون‌های هرمی هستند.

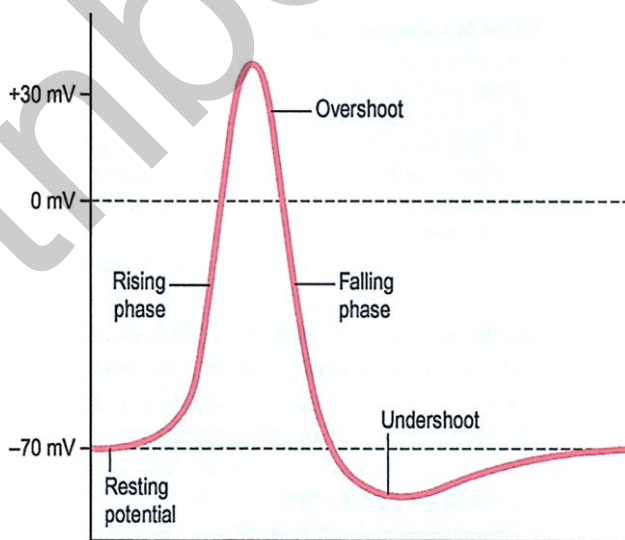
از نظر عملکردی، نورون‌ها به سه نوع تقسیم می‌شوند:

۱. **نورون‌های آوران** که سیگنال‌ها را به سمت مغز یا سیستم عصبی مرکزی (CNS) حمل می‌کنند؛ نورون‌های حسی این تعریف را برآورده می‌کنند.

۲. **نورون‌های وابران** که سیگنال‌ها را از مغز یا CNS دور می‌کنند؛ نورون‌های حرکتی این تعریف را برآورده می‌کنند.

۳. **نورون‌های ارتباطی** (اینترنورون‌ها) که تحریکات حسی را به پاسخ‌های حرکتی تبدیل می‌کنند.

در همه اشکال خود، نورون دارای همان ساختار عملکردی پایه‌ای است که در شکل ۱.۳ نشان داده شده است و از دندریت‌ها، بدنه سلولی، آکسون و پایانه‌های آکسون تشکیل شده است. مکانیسم هدایت سیگنال‌ها در مغز و سیستم عصبی اکنون به طور مختصر با ارجاع به شکل‌های ۱.۳ و ۱.۴ توضیح داده می‌شود. یک نورون دارای ولتاژ استراحت (اختلاف پتانسیل) -70 میلی‌ولت بین داخل و خارج خود است. این نتیجه حضور یون‌ها (به ویژه یون‌های سدیم و پتاسیم) در مجاورت غشای سلولی است که از یک دولایه تشکیل شده است که داخل آن مانند یک دی‌الکتریک (عایق) عمل می‌کند. یک اتم از ماده دارای تعداد مساوی الکترون‌ها (بارهای منفی) و پروتون‌ها (بارهای مثبت) است و بنابراین از نظر الکتریکی خنثی است. اگر یک الکترون از دست بدهد، به یک یون مثبت تبدیل می‌شود و اگر یک الکترون به دست آورد، به یک یون منفی تبدیل می‌شود. همین موضوع در مورد مولکول‌ها نیز صدق می‌کند.



شکل ۱.۴. پتانسیل عمل