

## رویکردی بر فیزیک کاربردی در تحلیل عملکرد مغز و اعصاب و سامانه های نورونی

علیرضا محمدیان پورطالاری

استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد صوفیان، دانشگاه آزاد اسلامی، صوفیان، ایران

\*amp\_pprc@yahoo.com

ارسال: تیر ماه ۱۴۰۰ پذیرش: مرداد ماه ۱۴۰۰

### چکیده

فیزیک مغز و اعصاب شاخه ای در حال رشد از بیو فیزیک، فیزیک پزشکی و علوم اعصاب شناختی است که به مطالعه دستگاه اعصاب مرکزی شامل مغز، نخاع و اعصاب از دیدگاه فیزیک می پردازد و به دنبال کشف اساس فیزیکی عملکرد مغز و درک فرآیند شناخت است. این شاخه از فیزیک، طیف وسیعی از پدیده ها، از سازوکارهای سلولی و مولکولی گرفته تا فناوری های مربوط به اندازه گیری و تحریک های الکتریکی و مغناطیسی مغز و نیز نظریه های عملکرد مغز را در بر می گیرد. در این مقاله، نوروفیزیک به عنوان راهی به سوی علوم اعصاب شناختی بر پایه قوانین طبیعت و اصول فیزیکی حاکم بر عملکرد مغز در رایانش، پردازش اطلاعات، یادگیری و درک فرآیند شناخت معرفی شده است. نتایج نشان می دهند که در شرایط فیزیولوژیکی، حرکت یونها تحت تأثیر هردو عامل میدان الکتریکی و گرادیان غلظت (پتانسیلهای الکترو شیمیایی) است. برای این منظور، جریان الکتریکی گذرنده از عرض غشاء، پتانسیل غشاء، پتانسیل تعادل یون های نفوذپذیر و رابطه بین جریان و ولتاژ غشاء (جریان یونی) در سامانه های نورونی محاسبه شده است. انتظار می رود که نتایج بدست آمده بتوانند مهارت های تحلیلی لازم را برای فیزیک پیشگان و پژوهشگران علوم بین رشته ای به ارمغان بیاورند و به عنوان راهکارهایی از علوم پایه و به خصوص فیزیک در بررسی سامانه های نورونی مورد استفاده قرار بگیرند.

کلمات کلیدی: فیزیک مغز و اعصاب، علوم اعصاب شناختی، نورون، مغز، حافظه

### ۱- مقدمه

امروزه فیزیک به یک علم کاربردی روزمره تبدیل شده است و در کمتر جایی فیزیک صرفاً به صورت یک رشته محض بدون کاربرد مشخص تدریس می شود. علت این امر به واسطه مهارت های تحلیلی فیزیک پیشگان و راهکارهایی است که رشته فیزیک برای پژوهشگران علوم بین رشته ای به ارمغان آورده است. در سال های اخیر، خصوصاً با توسعه روش های ثبت و تصویر برداری های پیشرفته با استفاده از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی، درک ما از ساختار و عملکرد مغز عمیق تر شده است. اهداف و ضرورت تحقیق در فیزیک مغز و اعصاب را می توان شناخت کامل مغز، درک بهتر کارکردها و ساختارهای شناختی آن دانست.

از اولین معادله دیفرانسیل ارائه شده برای پتانسیل عمل نورون های مغز و اعصاب توسط هاجکین و هاگسلی [۱] گرفته تا پیشنهاد نانو فناوری توسط فاینمن [۲] همه راهکارهایی است که علوم پایه و به خصوص فیزیک به جامعه پزشکی، صنعت و پژوهشگران رشته های مختلف ارائه داده است.

بعد از مدل فیزیکی - ریاضی هاجکین و هاگسلی علوم اعصاب شناختی با شتاب زیادی رشد کرده و به عنوان یکی از وسیع ترین علوم بین رشته ای درآمد. علوم اعصاب که تا آن زمان بیشتر به صورت شاخه ای از روانشناسی بحث می شد [۳-۴]، شکل بنیادی تری همراه با اندازه گیری و محاسبات به خود گرفت. در این بین نورو فیزیک خود به گرایش های مختلفی اعم از نورو فیزیک تجربی، نورو فیزیک محاسباتی، آماری و فلسفی تقسیم شده است [۵-۶].

چون بدن و مغز انسان قسمت هایی از یک دنیای فیزیکی هستند، بنابراین باید یک نظریه کامل وجود داشته باشد که بتواند بدن و مغز را در غالب یک نظریه فیزیکی توضیح دهد. ساختار این نظریه فیزیکی به جنبه هایی از عملکرد مغز، درک فرآیند شناخت و بازخوردهای تجربی آن بستگی خواهد داشت [۷].

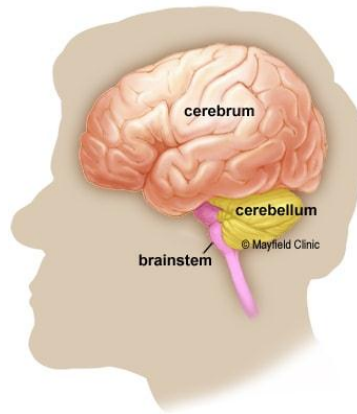
مهندسی اعصاب (Neuroengineering) شاخه بین رشته ای در حال رشد از مهندسی پزشکی است که با استفاده از تکنیک های مهندسی و اصول فیزیکی بنیادی مغز و اعصاب به مطالعه، تعمیر، جایگزینی و ارتقاء عملکرد دستگاه اعصاب می پردازد. به عبارت دیگر مهندسان اعصاب قابلیت حل مشکلات و یا طراحی مربوط به ارتباط بین بافت های عصبی زنده و دستگاه های غیر زنده را دارند. نورو مهندسی از مهارت ها و فناوری های مهندسی برق، کامپیوتر، مواد، مکانیک، رباتیک، نانو فناوری برای طراحی سیستم های تشخیصی، نظارتی و درمانی بیماری های عصبی استفاده می کند. امروزه پژوهش های فراوانی بر درک گدها و پردازش اطلاعات در دستگاه های حسی و حرکتی انجام می گیرد و محاسبه و اندازه گیری اختلال ایجاد شده در پردازش این اطلاعات در حالت پاتولوژیکی می پردازد تا بتواند یک تشخیص درست از آسیب ایجاد شده به دست آورند. همچنین با استفاده از رابط های مغز و کامپیوتر و ساخت پروتزهای عصبی می توان در راستای تعمیر عملکرد عصبی و حتی جایگزینی یک قسمتی از مغز و اعصاب عمل کرد [۸-۹].

علوم اعصاب محاسباتی (Computational Neuroscience) نیز شاخه بین رشته ای دیگری است که برای نخستین بار توسط شوارتر معرفی شد، وی کنفرانسی را در همین زمینه در سال ۱۹۸۵ در کالیفرنیا ترتیب داد [۱۰]. این کنفرانس به درخواست بنیاد توسعه سیستم جهت تهیه خلاصه ای از وضعیت کنونی رشته ای که تا آن زمان با اسامی گوناگونی مانند مدل سازی عصبی، نظریه مغز، بیوفیزیک و شبکه عصبی شناخته می شد، برگزار گردید. نخستین نشست عمومی بین المللی نیز با تمرکز بر موضوع علوم اعصاب محاسباتی، توسط باوئر و میلر در سال ۱۹۸۹ در سان فرانسیسکو ترتیب داده شد [۱۱]. علوم اعصاب محاسباتی به مطالعه عملکرد مغز در پردازش اطلاعات ساختاری موجود در سیستم عصبی می پردازد و شاخه های علمی متنوعی همچون علوم اعصاب، علوم شناختی، روانشناسی، علوم رایانه، فیزیک، نظریه اطلاعات و ریاضیات کاربردی را به همدیگر پیوند می دهد [۱۲].

در این مقاله مروری، بررسی نسبتا جامع و کاربردی از اصول فیزیکی شناخته شده در عملکرد مغز و اعصاب، شامل قانون فیک (شار پخش یونها)، قانون اهم (شار سوق یونها)، رابطه اینشتین بین پخش و تحرک یونها و اصل جدایی بارها در سیستم های زیستی انجام شده است. سعی بر اینست که معادلات بنیادی در این زمینه، شامل معادله نرنست - پلانک (NPE)، معادله نرنست (NE)، معادله دونان (DE) و معادله گلدمن - هاجکین - کتز (GHKE) به دانشجویان و پژوهشگران علوم بین رشته ای معرفی شود تا اهمیت همراه شدن با جامعه جهانی مطابق با کاربردهای روز روشن تر گردد.

## ۲- دستگاه مغز و اعصاب

مغز انسان یک عضو شگفت انگیز بدن است که تمامی عملکردهای آنرا کنترل می کند. مغز اطلاعات را از دنیای بیرون دریافت و پردازش کرده و ماهیت ذهن و روان را به تصویر می کشد. هوش، خلاقیت، احساسات و حافظه برخی از مواردی است که توسط مغز ایجاد می شوند. مغز انسان تشکیل شده از مخ، مخچه و بصل النخاع است که توسط استخوان جمجمه حفاظت می شوند:



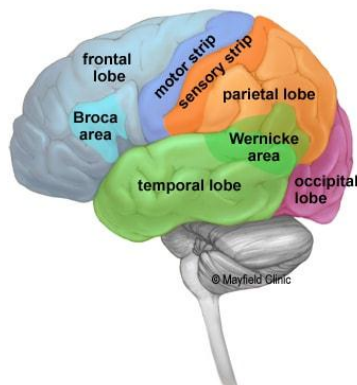
شکل ۱- سه بخش اصلی مغز شامل مخ، مخچه و بصل النخاع

مخ (Cerebrum) بزرگ‌ترین بخش مغز است که از دو نیمکره چپ و راست تشکیل شده است. مخ عملکردهایی نظیر پردازش لامسه، بینایی، شنوایی، گفتار، استدلال، احساسات، یادگیری و کنترل دقیق حرکات را بر عهده دارد. مخچه (Cerebellum) در زیر مخ قرار گرفته و عملکرد آن، هماهنگی در حرکات ماهیچه‌ها و حفظ وضعیت و تعادل بدن است. بصل النخاع (Brainstem) به عنوان مرکز کنترل اتصالات مخ، مخچه و نخاع است. این بخش در بسیاری از عملکردهای غیر ارادی نظیر تنفس، ضربان قلب، درجه حرارت بدن، بیداری و چرخه خواب، گوارش و هضم غذا، عطسه و سرفه دخالت دارد [۱۳].

مغز انسان به دو قسمت عمده نیمکره راست و چپ تقسیم می‌شود. این دو نیمکره توسط مجموعه‌ای از رشته‌ها و الیاف عصبی به نام جسم پینه‌ای (Corpus Callosum) که پیام‌ها را از نیمکره‌ای به نیمکره دیگر منتقل می‌کند به یکدیگر اتصال پیدا می‌کنند [۱۴]. هر نیمکره کنترل بخش مخالف خود در بدن را بر عهده دارد. نیمکره چپ، بخش راست بدن و نیمکره راست بخش چپ بدن را کنترل می‌کند. هر نیمکره مغز (Hemisphere) شامل چهار لوب است [۱۵]:

- لوب پیشانی (Frontal lobe)
- لوب آهیانه‌ای (Parietal lobe)
- لوب گیجگاهی (Temporal lobe)
- لوب پس سری (Occipital lobe)

هر لوب ممکن است به مناطق دیگری که عملکردهای ویژه‌ای را کنترل می‌کند تقسیم شود. میان لوب‌های مغزی و نیم کره‌های مغز ارتباط بسیار پیچیده‌ای وجود دارد:



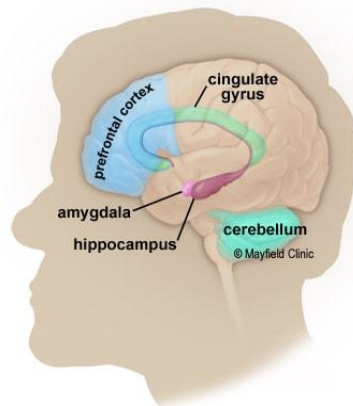
شکل ۲- چهار لوب پیشانی، آهیانه، گیجگاهی و پس سری مغز

#### لوب پیشانی

- شخصیت، رفتار، احساسات

- قضاوت، برنامه ریزی، حل مسئله
- ایجاد حرکت جهت تولید نوشتار و گفتار
- حرکات بدن
- هوش، تمرکز، خود آگاهی
- **لوب آهیانه‌ای**
- تفسیر زبان و کلمات
- حواسی نظیر لامسه، درد، درک حرارت بدن
- تفسیر سیگنال های بینایی، شنوایی، حرکتی، حسی و حافظه
- درک فضایی و بصری
- **لوب پس سری**
- تفسیر بینایی (رنگ، نور، حرکت)
- **لوب گیجگاهی**
- درک زبان
- حافظه
- شنوایی

ساختار دستگاه لیمبیک در شکل گیری حافظه دخیل است. این بخش مرکز احساسات، یادگیری و حافظه است. این دستگاه شامل هیپوتالاموس (Cingulate)، واکنش های احساسی (Amygdala) و حافظه (Hippocampus) است [۱۶]:



شکل ۳- ساختار دستگاه لیمبیک

کار اصلی دستگاه اعصاب برقرای ارتباط و تحلیل اطلاعات است. اعصاب مغزی که از مغز خارج می شوند از طریق حفره هایی به نام فورامینا از جمجمه خارج می شوند. جمجمه به سه قسمت دهانه ی قدام، شکاف میانی، قسمت خلفی تقسیم می شود. مغز توسط ۳۱ جفت عصب نخاعی با نخاع و ۱۲ جفت عصب مغزی با سراسر بدن ارتباط برقرار می کند. مغز ۱۰ تا از ۱۲ جفت عصب مغزی از جمله شنوایی، حرکت چشم، احساس در صورت، حواس چشایی، بلعیدن و حرکات ماهیچه های صورت و گردن و شانه و زبان را کنترل می کند [۱۷]:

جدول ۱- اسامی و عملکرد ۱۲ جفت عصب مغزی

شماره عصب	نام عصب	عملکرد عصب
۱	حس بویایی	بویدن
۲	حس بینایی	دیدن
۳	عصب چشم	حرکت مردمک
۴	Trochlear	حرکت کره چشم

۵	اعصاب سه گانه	حواس صورت
۶	عصب عضله	حرکت کره چشم
۷	عصب صورت	حرکت صورت
۸	عصب شنوایی و تعادل	شنیدن و تعادل
۹	عصب چشایی	چشایی و بلعیدن
۱۰	عصب دهم مغز (واگوس)	ضربان قلب و گوارش
۱۱	عصب جانبی فرعی	حرکت سر و گردن
۱۲	عصب زبانی	حرکت زبان

### ۳- نورون

مغز، مرکز دستگاه عصبی بدن است. مغز، نخاع و اعصاب محیطی از سلول‌های عصبی میکروسکوپی به نام نورون ساخته شده‌اند.

#### ۳-۱- آشنایی با نورون

نورون یا همان سلول عصبی از اصلی‌ترین اجزای تشکیل دهنده سیستم عصبی انسان هستند. این سلول‌ها با یکدیگر در ارتباط بوده و اطلاعات را با سرعتی باورنکردنی در بدن انتقال می‌دهند. شکل، ساختار، سرعت انتقال پیام، عملکرد و ... سبب شده تا این سلول‌های کوچک، پیشرفته‌ترین ماشین بیولوژیک جهان یعنی مغز را بسازند و خودشان در رده متمایزترین سلول‌ها قرار بگیرند. نورون‌ها تقسیم میتوزی نداشته و از بدو تولد تا لحظه مرگ تعدادشان بجز آنهایی که در مناطق خاصی از مغز مثل قسمتی در هیپوکامپوس (Hippocampus) قرار دارند رو به زوال است. این موضوع به دلیل غیرفعال بودن ژن‌هایی در نورون است که عمل تقسیم سلولی را کد می‌کنند.

#### ۳-۱-۱- نورون از دیدگاه زیست‌شناسی

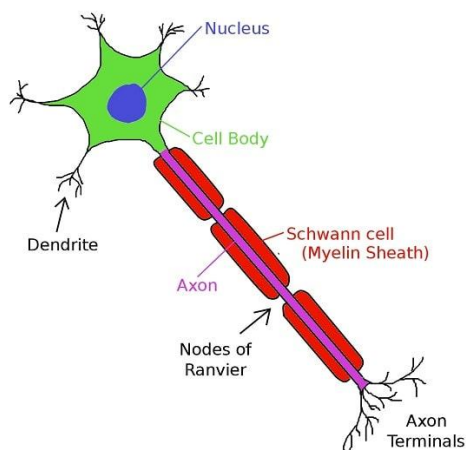
بدن انسان از میلیاردها سلول ساخته شده است. سلول‌های سیستم عصبی که با نام یاخته‌های عصبی یا نورون شناخته می‌شوند، برای انتقال پیام‌ها طی یک پروسه‌ی الکتروشیمیایی اختصاص یافته‌اند. مغز انسان حدوداً دارای ۸۶ میلیارد سلولی عصبی می‌باشد.

#### ۳-۱-۲- نورون از دیدگاه مهندسی

اگر بدن را یک ساختمان در نظر بگیریم نورون‌های آن با تشکیل شبکه‌های عصبی نقش سیم‌کشی این سازه را بازی می‌کنند. در واقع این نورون‌ها هستند که پیام الکتریکی ایجاد شده توسط محرک را دریافت کرده، به مراکز عصبی می‌رسانند و پاسخ مربوطه را انتقال می‌دهند. از دیدگاه مهندسان برق، نورون‌ها نقش مولد الکتریسیته را در بدن بازی می‌کنند.

#### ۳-۲- اجزای تشکیل دهنده نورون‌ها

در دستگاه عصبی، میلیاردها نورون وجود دارند که پیام‌های عصبی را به صورت پالس‌های الکتریکی ملایم منتقل می‌سازند، اما پیام‌های عصبی فقط از یک نورون به نورون دیگر منتقل نمی‌شوند. مطابق شکل (۴)، هر نورون از سه قسمت عمده تشکیل شده است. نخستین قسمت تنه است که به تنه سایر انواع سلول‌ها بی‌شابهت نیست. نورون حاوی هسته و سایر ساختارهایی است که معمولاً در سلول‌ها یافت می‌شوند. دومین قسمت نورون، از زائده‌های کوتاه و چند شاخه‌ای تشکیل می‌شود که از تنه یاخته بیرون زده‌اند و دندریتها نامیده می‌شوند. سومین قسمت، زائده دراز و باریکی است که آکسون نام دارد. آکسون شبیه سیم پیچی هر نورون است. آکسون پیام‌های الکتریکی عصب را در طول مسیر خود انتقال می‌دهد و نورون را به نورون دیگر یا به یکی از ماهیچه‌ها متصل می‌نماید.

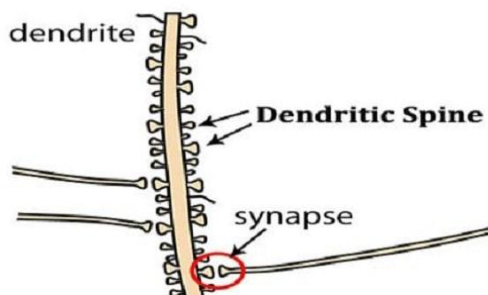


شکل ۴- اجزای تشکیل دهنده نورون

۳-۲-۱- دندریت (Dendrite)

دندریت ها زائده‌هایی هستند که از جسم سلولی منشا گرفته و معمولاً به صورت منشعب و چندتایی هستند. وظیفه این زائده‌ها دریافت پیام الکتریکی از نورون پیش سیناپسی است به طوری که پس از دریافت، آن را به سمت دیگر اجزای سلول عصبی سوق می‌دهند. خار دندریتی محل تشکیل سیناپس در نورون هدف با دیگر نورون ها است.

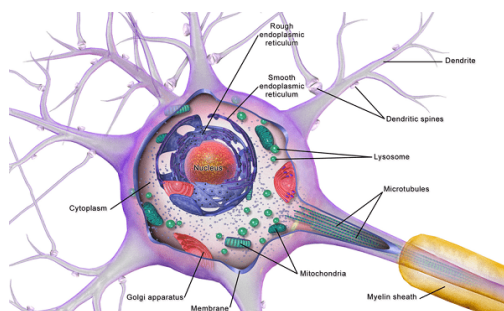
به زائده‌هایی از جنس پروتئین اکتین که بر روی دندریت ها وجود داشته و به صورت برآمدگی‌هایی از آن بیرون زده است، خار دندریتی (Dendritic spines) می‌گویند. بیشترین پیوند با آکسون‌ها در محل خار های دندریتی ایجاد می‌شود. نکته‌ای که حائز اهمیت است، تاثیر خارهای دندریتی در قدرت انتقال پیام است به گونه‌ای که هر چقدر خارهای دندریتی بزرگتر باشند، قدرت انتقال پیام الکتریکی بیشتر خواهد بود:



شکل ۵- دندریت و خار دندریتی

۳-۲-۲- جسم سلولی (Soma)

جسم سلولی در برگیرنده هسته در نورون ها است. یکی دیگر از اجزای اصلی نورون جسم سلولی یا پریکاریون است. این قسمت هسته و اندامک‌ها را در خود جای داده است و به نوعی مرکز فرماندهی سلول عصبی می‌باشد. برای حفظ شکل جسم سلولی و آکسون در نورون ها، رشته‌هایی به نام نوروفیلانمان وجود دارند که اجزای اصلی اسکلت سلولی را تشکیل می‌دهند:

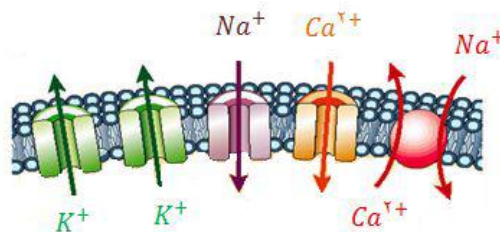


شکل ۶- اجزای اصلی جسم سلولی

برخی از مهمترین اندامک‌های موجود در جسم سلولی عبارتند از:

- هسته (Nucleus): دارای ماده‌ی ژنتیکی (کروموزوم‌ها) می‌باشد که این ماده اطلاعات برای رشد سلولی و سنتز پروتئین‌های مورد نیاز برای حیات سلول را شامل می‌شود و دارای غشای مخصوص و روزنه است.
- هسته‌ک (Nucleolus): ریبوزوم‌ها را تولید می‌کند که این ریبوزوم‌ها برای ترجمه اطلاعات ژنتیکی به پروتئین‌ها ضروری می‌باشند.
- دستگاه گلژی (Golgi Apparatus): ساختارهایی متصل به غشاء که در بسته‌بندی پپتیدها و پروتئین‌ها در وزیکول‌ها نقش دارند.
- میتوکندری (Mitochondria): انرژی مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های سلولی را تامین می‌کند (تنفس سلولی).

علاوه بر اندامک‌های معمولی سیتوپلاسم که نام برده شد، جسم سلولی نورون دارای ذرات بازوفیلیک به نام نیسل (Nissl Bodies) می‌باشد. نیسل همان شبکه آندوپلاسمی زبر در نورون‌ها است. اجسام سلولی نورون‌ها معمولاً در گانگلیون‌ها (Ganglion) دیده می‌شوند. گانگلیون‌ها نیز در سیستم عصبی مرکزی (CNS) و دستگاه عصبی محیطی (PNS) وجود دارند. در سراسر این غشاء کانال‌های یونی وجود دارد. کانال‌های یونی از پروتئین‌هایی تشکیل شده‌اند که درون و بیرون نورون را به هم مرتبط می‌کند. این کانالها فقط به یونهای خاصی اجازه عبور میدهند که به آن نفوذپذیری غشاء نسبت به آن یون خاص گفته می‌شود. در غشای نورون پمپ‌های یونی وجود دارند که با صرف انرژی ناشی از آدنوزین تری فسفات (ATP) یونها را به سمت موردنظر میرانند. تحقیقات تجربی و محاسباتی گسترده‌ای در حال حاضر برای کشف معادلات غیرخطی حاکم بر نحوه عملکرد این پروتئینها در حال انجام است [۱۷]. سازوکار باز و بسته شدن این کانالها به پارامترهای زیادی از جمله پتانسیل غشاء بستگی دارد:



شکل ۷- کانالهای یونی واقع در غشای نورون

### ۳-۲-۳- آکسون (Axon)

پس از این که پیام عصبی در جسم سلولی نورون پردازش گردید، توسط یک رشته بلند که از سمت دیگر سلولی عصبی بیرون زده است، به سلول بعدی (نورون- ماهیچه- غده) می‌رسد. نام این رشته آکسون بوده و ریشه‌ای یونانی به معنای محور دارد. هنگامی که پیام الکتریکی به انتهای آکسون می‌رسد، این پیام الکتریکی از طریق محل‌هایی به نام پایانه آکسون یا ترمینال به سلول بعدی منتقل می‌گردد و سبب بوجود آمدن تغییر در فعالیت آن می‌شود.

### ۳-۳- انواع نورون‌ها

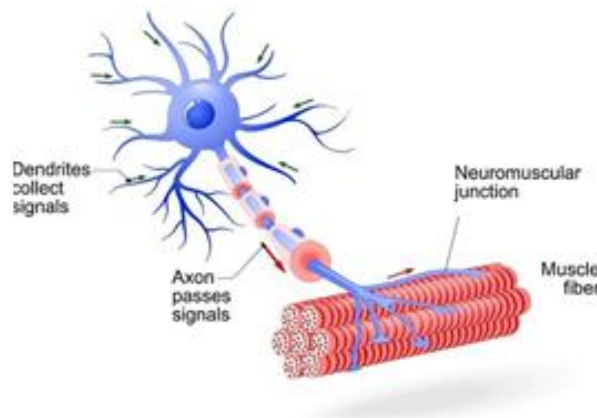
نورون‌ها از سه لحاظ به انواع گوناگونی تقسیم می‌شوند:

#### ۳-۳-۱- تقسیم بندی نورون‌ها از لحاظ عملکرد

نورون‌ها از لحاظ عملکرد به سه دسته نورون حرکتی، نورون حسی و نورون رابط تقسیم می‌شوند:

### نورون حرکتی (Motor neuron):

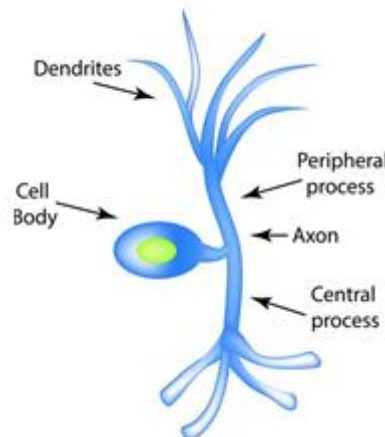
به آن دسته از نورونهایی گفته می‌شود که دستورات صادر شده از سوی مغز و نخاع را به اندام‌های عملکردی مثل عضلات، غدد و... می‌برند. این نورونها معمولا دارای آکسون بلند و دندریت کوتاه هستند. نورونهای حرکتی دستور صادر شده از سیستم عصبی مرکزی را به اندامهای عملکردی می‌برد:



شکل ۸- نورون حرکتی

### نورون حسی (Sensory neuron):

سلولهایی عصبی با دندریت‌های بلند و آکسون به نسبت کوتاهی هستند که اطلاعات را از اندام‌های حسی به مراکز عصبی (مغز و نخاع) می‌برند. نورونهای حسی پیام دریافتی از اندام‌های حسی را به مغز و نخاع انتقال می‌دهند:

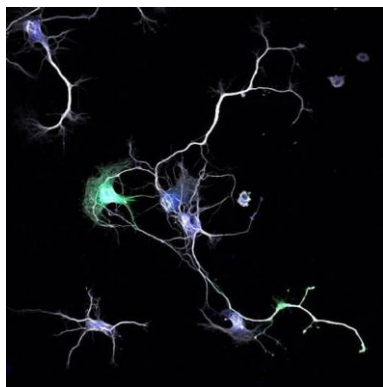


شکل ۹- نورون حسی

### نورون رابط یا واسطه (Internuncial neuron):

این نورونها خود به دو دسته تقسیم می‌شوند. آن دسته از نورونهایی که ارتباطات را در ماده خاکستری برقرار می‌کنند و آکسونشان هرگز این ناحیه را ترک نکرده و فاقد غلاف میلین می‌باشند. به این سلولها نورون رابط ناحیه‌ای گویند. نورونهایی که همانند نورونهای حرکتی پیام را در دستگاه عصبی مرکزی از جایی به جای دیگر می‌برند. به این دسته از نورونهای رابط، فرافکن گفته می‌شود. نورونهای واسطه ارتباط بین نورونهای حرکتی و نورونهای حسی را میسر می‌سازند. در واقع این نورونها وظیفه انتقال اطلاعات بین نورونهای مختلف را به عهده دارند. انتقال این پیامها از طریق اتصالات مخصوص بین نورونها به نام سیناپس انجام می‌گیرد. تعدادی از این نورونها میتوانند با همدیگر مرتبط شده و تشکیل یک شبکه عصبی دهند:



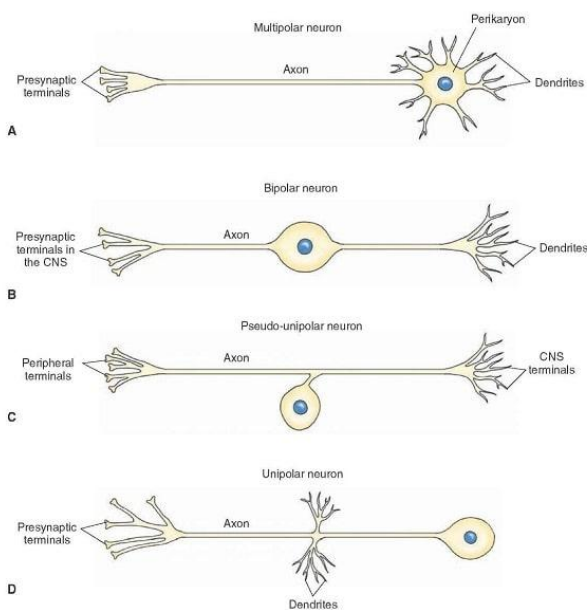


شکل ۱۰- نورون رابط

۳-۳-۲- تقسیم بندی نورون ها از لحاظ ظاهر

نورون ها از نظر ظاهری به چهار دسته تقسیم می شوند. سلول های عصبی را بر اساس شکل شان به چهار دسته تقسیم بندی می کنند:

- تک قطبی (Unipolar)
- تک قطبی کاذب (Pseudounipolar)
- دو قطبی (Bipolar)
- چند قطبی (Multipolar)



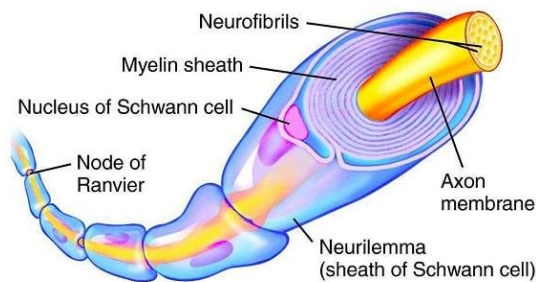
شکل ۱۱- نورون ها از لحاظ ظاهری

سلول عصبی تک قطبی، نورونی است که یک شاخه از آن خارج شده و به چند شاخه منشعب می گردد. زمانی به یک سلول، نورون تک قطبی کاذب می گویند که قسمت خارج شده از سلول به دو شاخه تقسیم شده و شکل T مانند به خود می گیرد. در نورون دو قطبی، دندریت و آکسون از دو سمت جسم سلولی خارج می شوند و نورونهای چند قطبی نیز سلولهایی هستند که از آنها چندین شاخه بیرون می زند.

۳-۳-۳- تقسیم بندی نورون ها از لحاظ غلاف میلین

غلاف میلین تولید شده توسط سلول های پشتیبان به تسریع حرکت پیام الکتریکی در طول نورون ها کمک میکند. یاخته های عصبی از نظر قطرشان به سه دسته و با حروف انگلیسی A-B-C نمایش داده می شوند به طوری که گروه A بالاترین قطر را داشته و

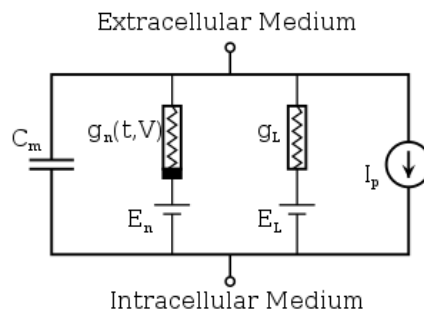
بنابراین بیشترین سرعت انتقال پیام را دارد. گروه‌های B و C نیز به ترتیب قطر متوسط و قطر کم را دارند و سرعت انتقال پیامشان کمتر می‌باشد:



شکل ۱۲- نورون ها از لحاظ قطر و غلاف میلین

#### ۴- مدل فیزیکی- ریاضی هاجکین و هاگسلی

اجزای سازنده مدل هاجکین و هاگسلی در شکل روبرو نشان داده شده‌است. هر یک از اجزای یک سلول تحریک پذیر با یک مولفه فیزیکی نشان داده شده‌است. لایه لیپیدی به صورت یک خازن  $C_m$  نشان داده شده‌است. کانال ولتاژی (یونی) با یک رسانای غیر خطی  $g_n(t, V)$  مشخص شده‌است که به این معنی است که رسانایی وابسته به زمان و ولتاژ است، که بعداً نشان داده شد که به‌طور غیرمستقیم با پروتئین‌های کانال‌های گیت‌دار ولتاژی که احتمال باز شدن هر کدام متناسب با ولتاژ است، نسبت دارد. کانال‌های نشتی با یک رسانایی خطی  $g_L$  نشان داده شده‌اند. گرا دیان الکتروشیمیایی که باعث برقرار شدن جریان در یون می‌شود با یک باتری  $E_L$  و یک پمپ یونی با یک منبع جریان  $I_p$  نشان داده شده است [۱]:



شکل ۱۳- اجزای اصلی مدل هاجکین و هاگسلی

جریانی که از کانال‌های یون می‌گذرد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_i = g_i (V_m - V_i) \quad (1)$$

که در آن  $V_i$  پتانسیل بازگشتی کانال یون است و  $V_m$  پتانسیل غشاء است که با توجه به پتانسیل استراحت غشاء اندازه‌گیری شده‌است. کل جریان گذرنده از غشاء برابر است با:

$$I = C_m \frac{dV_m}{dt} + g_K (V_m - V_K) + g_{Na} (V_m - V_{Na}) + g_i (V_m - V_i) \quad (2)$$

که در آن  $I$  مقدار کل جریان غشا بر واحد سطح،  $C_m$  ظرفیت خازنی غشاء در واحد سطح،  $g_{Na}$  و  $g_K$  رسانایی پتاسیم و سدیم در واحد سطح  $V_m$  و  $V_{Na}$  پتانسیل بازگشتی سدیم و پتاسیم،  $g_i$  و  $V_i$  رسانایی نشتی در واحد سطح و پتانسیل بازگشتی هستند.

**۵- قوانین فیزیکی حاکم بر نورون ها**

با وجود تنوع فراوان در انواع نورونها و شکل و عملکرد آنها به نظر میرسد که توجیح تمام این نتایج در غالب چند قانون فیزیکی غیر ممکن باشد. ولی با چند قانون فیزیکی نسبتاً ساده می توان بخش مهمی از ویژگیها و عملکرد نورونها را توضیح داد:

**۵-۱- قانون فیک (شار پخش یونها)**

تمام پیامهای الکتریکی در دستگاه مغز و اعصاب انسان و حیوانات توسط یونهای مجزای  $Cl^-$  و  $K^+$  و  $Ca^{2+}$  و  $Na^+$  حمل می شود. در سلول های تحریک پذیر، حرکت این یونها سبب ایجاد تغییر پتانسیل الکتریکی در عرض پلاسمای غشاء می شود. این تغییر پتانسیل ها همان علامت هایی هستند که پیامهای بیولوژیکی را از یک نقطه سلول به نقطه دیگر، یا از یک سلول به سلول دیگر و یا از یک قسمت بدن به قسمت دیگر بدن حمل می کنند. غلظت این یونها در درون و بیرون نورونها یکسان نیست، این اختلاف غلظت، منجر به گرادیان غلظت می شود، که آنرا پتانسیل شیمیایی می نامند. بر اساس اصول ترمودینامیک، یونها از ناحیه ای با غلظت بالا به ناحیه ای با غلظت پایین می روند که به آن پدیده پخش پخش فیک، اولین قانون فیزیک مغز و اعصاب است.

اگر  $J_D$  شار پخش با یکای  $\left[ \frac{\text{molecules}}{s \cdot \text{cm}^2} \right]$ ،  $D$  ضریب پخش با یکای  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{s} \right]$  و  $C$  غلظت یون با یکای  $\left[ \frac{\text{molecules}}{\text{cm}^3} \right]$  باشد، داریم:

$$J_D = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (۳)$$

علت علامت منفی اینست که جریان یونها از غلظت بالا به غلظت پایین انجام می گیرد. بر اساس این قانون، گرادیان غلظت در هر مکانی مستقیماً متناسب با اندازه آن گرادیان با ضریب تناسب  $D$  است. این قانون مربوط به پخش یونها در اثر اختلاف غلظت (پتانسیل شیمیایی) است.

**۵-۲- قانون اهم (شار سوق یونها)**

اگر حرکت یونها از میان کانالهای یونی را یک بعدی (در راستای محور  $x$ ) در نظر بگیریم، در اینصورت بر هم کنش بین بار الکتریکی یونها و میدان الکتریکی موجود در عرض غشاء باعث وارد شدن نیروی الکتریکی بر یونها می شود. اگر  $J_d$  شار سوق با یکای  $\left[ \frac{\text{molecules}}{s \cdot \text{cm}^2} \right]$ ،  $K_{el}$  رسانندگی ویژه غشاء با یکای  $\left[ \frac{\text{molecules}}{V \cdot s \cdot \text{cm}} \right]$  و  $E$  میدان الکتریکی با یکای  $\left[ \frac{V}{\text{cm}} \right]$  باشد، داریم:

$$J_d = K_{el} E = -\mu z C \frac{\partial V}{\partial x} \quad (۴)$$

که در آن  $V$  شار پخش با یکای  $[V]$ ،  $\mu$  تحرک پذیری یون با یکای  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{V \cdot s} \right]$ ،  $z$  ظرفیت یون (بدون یکا) و  $C$  غلظت یون با یکای  $\left[ \frac{\text{molecules}}{\text{cm}^3} \right]$  است. علت علامت منفی نیز اینست که یونها به سمت پایین گرادیان پتانسیل الکتریکی سوق می یابند. این سوق یونها در هر مکانی مستقیماً متناسب با اندازه آن گرادیان با ضریب تناسب  $\mu z C$  است. این قانون، مربوط به سوق یونها در اثر اختلاف پتانسیل الکتریکی است.

**۵-۳- رابطه اینشتین (رابطه بین پخش و تحرک یونها در سیستم های زیستی)**

این قانون، مربوط به ارتباط بین ضرایب تناسب دو قانون قبلی در سیستم های زیستی است. اینشتین در سال ۱۹۰۵ پخش را به صورت یک فرآیند تصادفی در نظر گرفت و نشان داد که مقاومت اصطکاکی که توسط یک محیط سیال در فرآیند سوق ایجاد می شود، همانند مقاومتی است که در تعادل حرارتی برای فرآیند پخش اتفاق می افتد و ضریب پخش  $D$  و ضریب تحرک سوق  $\mu$  به وسیله رابطه زیر با یکدیگر در ارتباط هستند:

$$D = \frac{kT}{q} \mu$$

(۵)

که در آن  $k$  ثابت بولتزمن  $\left[1.38 \times 10^{-23} \frac{joule}{K}\right]$ ،  $T$  دمای مطلق با یکای  $[K]$  و  $q$  بار الکتریکی مولکولی با یکای  $[C]$  است. بر اساس این رابطه، فرآیندهای پخش و سوق در یک محیط با یکدیگر قابل جمع شدن هستند، زیرا مقاومت های ناشی از هر دو فرآیند از یک جنس هستند. این رابطه، کار را برای توصیف ریاضی حرکت یونها در سیستم های زیستی بسیار ساده تر می کند.

#### ۵-۴- اصل خنثی بودن بار - فضا (اصل جدایی بارها در سیستم های زیستی)

این قانون، اصل جدایی بارها در سیستم های زیستی است و بر اساس آن در یک حجم معین، کل بار آنیون ها با کل بار کاتیون ها تقریباً با هم برابر است:

$$\sum z_i^c e C_i = \sum z_j^A e C_j \quad (6)$$

که در آن  $z_i^c$  ظرفیت کاتیون های نوع  $i$ ،  $z_j^A$  ظرفیت آنیون های نوع  $j$  بار الکتریکی یک یون تک ظرفیتی،  $C_i$  و  $C_j$  نیز غلظت یونهای مختلف هستند.

به کمک این قوانین می توان معادلات بنیادی فیزیک مغز و اعصاب، مانند معادله نرنست-پلانک (Nernst-Planck)، معادله نرنست (Nernst)، معادله دونان (Donnan) و معادله گلدمن-هاجکین-کتر (Goldman-Hodgkin-Katz) را بدست آورد.

#### ۶- معادلات فیزیکی حاکم بر سامانه های نورونی

از آنجا که هنوز توافق خاصی برای معادلات بنیادی فیزیک مغز و اعصاب وجود ندارد و هر روز در حال تکمیل شدن هستند، لذا در این مقاله از معادلات زیر به عنوان معادلات فیزیکی حاکم بر سامانه های نورونی نام برده می شود:

#### ۶-۱- معادله نرنست-پلانک (NPE)

در شرایط فیزیولوژیکی، حرکت یونها تحت تأثیر هردو عامل میدان الکتریکی و گرادیان غلظت (پتانسیلهای الکترو شیمیایی) است. با توجه به رابطه اینشتین می توان شار یونی را با ترکیب هر دو عامل چنین نوشت:

$$\begin{aligned} J &= J_d + J_D = -\mu z C \frac{\partial V}{\partial x} - D \frac{\partial C}{\partial x} \\ &= -\left[ \mu z C \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\mu k T}{q} \frac{\partial C}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

با تقسیم  $J$  بر عدد آووگادرو می توان شکل مولی معادله NPE را بدست آورد:

$$j = \frac{J}{N_A} = -\left[ u z C \frac{\partial V}{\partial x} + u \frac{RT}{F} \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (8)$$

که در آن  $J$  بر حسب  $\left[\frac{mol}{s \cdot cm^2}\right]$  بیان می شود.  $N_A$  عدد آووگادرو،  $R$  ثابت جهانی گازها  $\left[1.98 \frac{Cal}{K \cdot mol}\right]$ ،  $F$  ثابت فاراده  $\left[96480 \frac{C}{mol}\right]$  و  $u = \frac{\mu}{N_A}$  حرکت مولی یون در بار الکتریکی مولی کل آن هستند. چگالی جریان معادله NPE را می توان به شکل زیر نیز نوشت:

$$I = J z F = -\left[ u z^2 F C \frac{\partial V}{\partial x} + u z RT \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (9)$$

که در آن  $I$  بر حسب  $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$  است. این معادله بیشترین استفاده را در محاسبات شار یونی در فیزیولوژی اعصاب دارد. چندین معادله اساسی توصیف کننده جریان الکتریکی گذرنده از عرض غشاء با استفاده از این معادله به دست می آید.

### ۶-۲- معادله نرنست (NE)

سلولها در اکثر زمانها در حالت استراحت هستند، به این معنی که تحریک خاصی به آنها وارد نمی شود. شرط لازم برای حالت استراحت سلول اینست که جریان خالص گذراننده از عرض غشاء برابر صفر باشد (پتانسیل تعادل یون). اگر چگالی جریان را در معادله NPE برابر صفر قرار دهیم ( $I = 0$ )، در اینصورت شرط موردنظر بدست می آید:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{RT}{zFC} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (10)$$

با انتگرال گیری از این معادله داریم:

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = -\frac{RT}{zF} \Rightarrow V_2 - V_1 = -\frac{RT}{zF} \ln \frac{C_2}{C_1} \quad (11)$$

اگر پتانسیل غشاء را به صورت  $V_m = V_{in} - V_{out}$  تعریف کنیم، در اینصورت با توجه به پتانسیل تعادل داریم:

$$E_i = V_m (I_i = 0) = V_{in} - V_{out} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (12)$$

که در آن  $I_i$  چگالی جریان یون  $i$  ام می باشد.

### ۶-۳- معادله دونان (DE)

اکثر غشاهای زیستی برای یونهای کوچکی مانند  $K^+$  و  $Cl^-$  نفوذپذیر هستند. بنابراین اگر ساز و کاری برای نگهداری پتانسیل غشاء نباشد، در اینصورت بعد از مدتی غلظت یونها در درون و بیرون سلول با هم برابر شده و پتانسیل غشاء از بین می رود. در سلولهای زنده دو سازوکار برای حفظ پتانسیل غشاء وجود دارد، یکی انتقال فعال یونها (پمپهای یونی) و دیگری توزیع غیر فعال یونها به دمنده های یونی، ولی توزیع غیر فعال یونی به دلیل عبور انتخابی غشاء برای یونهای بزرگتری مانند  $Na^+$  و  $Ca^{2+}$  و یا برای آنیون های نفوذ ناپذیری مانند  $SO_4^{2-}$  و پروتئینهای باردار کوچک درون سلول است. توزیع غیر فعال یونی نیازی به انرژی ندارد. تا زمانی که در یک سلول، انتقال فعال یونی وجود نداشته باشد، توزیع غیر فعال یونی مسئول ایجاد پتانسیل غشاء است. در اینصورت اگر  $C^{+m}$  کاتیون با ظرفیت  $m$  و  $A^{-n}$  آنیون با ظرفیت  $n$  باشد، می توان پتانسیل تعادل هر یون نفوذپذیر را به کمک معادله (۱۰) نوشت و معادله تعادل DE را به شکل زیر بدست آورد:

$$\left[ \frac{C_{out}^{+m}}{C_{in}^{+m}} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[ \frac{A_{in}^{-n}}{A_{out}^{-n}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

چون تعداد زیادی از مولکولهایی با بار منفی (پروتئین های  $A^-$ ) در سیتوپلاسم سلول وجود دارند و قابلیت عبور از غشاء را ندارند، می توان نوشت:

$$[K^+]_{out} = [Cl^-]_{out} \quad (14)$$

$$[K^+]_{in} = [Cl^-]_{in} + [A^-]_{in} \quad (15)$$

با کمک این دو رابطه و معادله دونان DE برای  $K^+$  و  $Cl^-$  می توان نشان داد که حتی بدون انتقال فعال یونی می توان اختلاف غلظت و در نتیجه پتانسیل غشاء داشت :

$$\begin{aligned} [K^+]_{in}^2 &= [K^+]_{out}^2 + [A^-]_{in} [K^+]_{in} \\ \Rightarrow \begin{cases} [K^+]_{in} > [K^+]_{out} \\ [Cl^-]_{out} > [Cl^-]_{in} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

#### ۴-۶- معادله گلدمن-هاجکین-کتر (GHKE)

معادله NPE برای کانالهای یونی ساده رقیق آبدار به خوبی پتانسیل تعادل یونی را محاسبه می کند. برای حالت هایی که در آن کانال های یونی با سدهای انرژی پیچیده و محل های مسدود کننده حرکت یونها وجود داشته باشند، این معادله پتانسیل غشاء را به درستی محاسبه نمی کند. برای حل این مشکل مدلی توسط گلدمن-هاجکین-کتر پیشنهاد شد که بر اساس آن معادله NPE همچنان در این غشاء برقرار است و میدان الکتریکی آن نیز ثابت است. این مدل توانست بعضی از خواص الکتریکی غشاهای تحریک پذیر و برخی از جریان های یونی را به درستی محاسبه کند، ولی برای محاسبه سایر خواص غشاء مناسب نیست، زیرا یا میدان الکتریکی موجود در این غشاها ثابت نیست و یا معادله NPE در آنها برقرار نیست. سه فرض اصلی برای مدل GHK میدان ثابت وجود دارد که عبارتند از :

۱- حرکت یونها در عرض غشاء از معادله NPE تبعیت می کند.

۲- یونها در عرض غشاء بر همکنش ندارند و به طور مستقل از یکدیگر عبور می کنند.

۳- میدان الکتریکی در عرض غشاء ثابت است.

با استفاده از این سه فرض و حل معادله دیفرانسیل مربوطه میتوان جریان عبوری از عرض غشاء را محاسبه کرد:

$$I = \frac{u^* z^2 F V \beta}{l} \left[ \frac{C_{out} \cdot e^{-\frac{z F V}{RT}} C_{in}}{e^{-\frac{z F V}{RT}} - 1} \right] \quad (17)$$

این معادله، به معادله جریان GHK معروف است و رابطه بین جریان و ولتاژ غشاء یا همان جریان یونی را ارائه می دهد و در

آن  $u^*$  تحرک مولی یون در غشاء با یکای  $\left[ \frac{cm^2}{V.s.mol} \right]$  و  $\beta$  در روابط زیر تعریف می شود :

$$C_{x=0} = \beta C_{in} \quad (18)$$

$$C_{x=l} = \beta C_{out} \quad (19)$$

با فرض:

$$P = \frac{\beta u^* RT}{l F} s \quad (20)$$

$$\xi = \frac{z V F}{RT} \quad (21)$$

با توجه به مستقل بودن حرکت یون ها می توان جریان های ورودی به سلول و خروجی از سلول را به صورت زیر نوشت:

$$I_{in} = -P z F \xi \frac{C_{out} e^{-\xi}}{1 - e^{-\xi}} \quad (22)$$

$$I_{out} = P z F \xi \frac{C_{in}}{1 - e^{-\xi}} \quad (23)$$

## ۷- بحث و نتیجه گیری

کاربرد علم فیزیک در تحلیل مسائل مختلف برکسی پوشیده نیست. مغز پیچیده ترین دستگاه ناشناخته فیزیکی در حال حاضر بوده و علوم اعصاب تبدیل به وسیعترین رشته بین رشته ای شده است. کشف اسرار مغز و اعصاب و مطالعه کارکرد سامانه های نورونی، چه در سطح کلان ( فرآیند های شناختی و شبکه های نورونی ) و چه در سطح خرد ( تک نورونی ) نیاز به ورود افراد زیادی با تخصص های گوناگون دارد. به همین علت، در سال های اخیر مدل های محاسباتی مربوط به عملکرد های مغز رواج فراوانی یافته اند و روز به روز بر اهمیت آنها افزوده می شود. انگیزه ها و دلایل این امر را باید در تولید سریع مجموعه های حجیم داده های تجربی از یک سو و پیشرفت های عمده در حوزه های فناوری و علوم محاسباتی نظیر هوش مصنوعی ، کاوش در داده ها ، پایگاه های داده ها، و ظهور رایانه های سریع و پر قدرت از سوی دیگر جستجو کرد. در این مقاله بعد از توصیف ساده ساختار فیزیکی مغز و اعصاب، قوانین فیزیکی و معادلات ریاضی حاکم بر آن معرفی شد. نتایج نشان می دهند که وقتی یک نورون در حالت استراحت بوده و هیچ تحریکی به آن وارد نمی شود ، در اینصورت پتانسیل غشای آن یک مقدار ثابت است، ولی با رسیدن یک اختلال الکتریکی به دستگاه مغز و اعصاب، واقطیدگی (مثبت تر شدن پتانسیل غشاء) و یا فراقطیدگی (منفی تر شدن پتانسیل غشاء) ایجاد می شود. در صورتی که قطیدگی غشاء از حد آستانه پتانسیل غشاء بیشتر شود، ناگهان غشای نورون به قطبش خود ادامه داده، سپس به طور خیلی سریع به پتانسیل استراحت خود بر می گردد. به این تغییر پتانسیل ناگهانی غشای نورون پتانسیل عمل می گویند، که در مدت زمانی از مرتبه میلی ثانیه اتفاق می افتد. شکل پتانسیل عمل نورونها تقریباً مشابه هم هستند و دامنه و طول زمانی آنها تقریباً یکسان است. چون شکل ظاهری و نوع فعالیت نورون ها اختلاف بسیار زیادی با هم دارند، لذا به نظر می رسد که با وجود تنوع فراوان در انواع نورون ها و شکل و عملکرد آنها توصیف نتایج در غالب چند قانون غیر ممکن باشد. ولی خوشبختانه پس از مطالعات فراوان مشاهده شد که با چند قانون فیزیکی نسبتاً ساده می توان بخش مهمی از ویژگی ها و عملکرد نورون ها را توضیح داد. در واقع همه پیام های الکتریکی در دستگاه مغز و اعصاب انسان و حیوانات توسط یون های مجزای  $K^+$  و  $Cl^-$  و  $Na^+$  و  $Ca^{2+}$  حمل می شوند و حرکت این یون ها در یاخته های تحریک پذیر، باعث ایجاد تغییر پتانسیل الکتریکی در عرض پلاسمای غشاء می شود. از دیدگاه بیوفیزیک، پتانسیل عمل نتیجه عبور جریان از کانال های یونی است. دینامیک تولید پتانسیل عمل برای چندین دهه، ذهن دانشمندان علوم اعصاب را به خود مشغول کرده بود. بر اساس نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی- ریاضی هاکسلی و هاکسلی که اقدام به اندازه گیری عملی این جریان ها کرده اند، مدل پدیده شناسی جالبی برای توضیح دینامیک پتانسیل عمل ارائه شد. هرچند این مدل برای آکسون اسکویید و برای سه نوع کانال یونی بدست آمده است ، ولی یک مسیر مشخص نظری را برای تحلیل هر نوع غشائی ترسیم می نماید. از نتایج بدست آمده می توان برای بررسی دینامیک تولید پتانسیل عمل سایر غشاها ، همانند غشای نورون های کورتکس که دارای انواع بسیار بیشتری از کانال های یونی هستند نیز استفاده نمود، زیرا عملکرد همه آنها در همین چارچوب است.

## ۸- مراجع

- 1.Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F. (1952), A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *The Journal of physiology* 117 (4), 500-544.
- 2.Johnston, D. and Miao-Sin Wu, S. (1997), *Foundations of Cellular Neurophysiology*, MIT Press.
- 3.D Jaidley, D. (1989), *The Physiology of Excitable Cells*, 3<sup>rd</sup> Edition, Cambridge University Press.
- 4.Stapp, H. (2003), *Physics in Neuroscience*, John Benjamins Publishing Co.
5. Alwyn Scott (1977), *Neurophysics*.
- 6.Graben, P.B. (2008), *Foundations of Neurophysics*, Springer
- 7.Thiago T. Varella, (2017), *Theoretical Neuroscience*.
- 8.Kandel, E.R., Schwartz, J.H. and T.M. Jessell, T.M. (1991), *Principles of Neural Science*.
- 9.Churchland, P.S. and T J Sejnowski, T.J. (1992), *The Computational Brain*, MIT Press.
- 10.E.T. Rolls, E.T. (1989), *The Computing Neuron*, Addison Wesley.

11. Schwartz, J.M., H P Stapp, H.P. and Beauregard, M. (2005), Phil. Trans. R. Soc. B 360, 1309.
12. O Bergmann, O., et al. (2012), Neuron 74, 634.
13. Rakic, P. (2002), Nature Rev. Neurosci. 3, 65.
14. D J Aidley, D.J. (1989), The Physiology of Excitable Cells, 3<sup>rd</sup> Edition, Cambridge University Press.
15. Jewett, D.L. and M D Rayner, M.D. (1984), Basic Concepts of Neuronal Function, Little, Brown and Company.
16. J G Nicholls, J.G., Martin, A.R. and Wallace, B.G. (1992), From Neuron to Brain, 3<sup>rd</sup> Edition, Sinauer.
17. H C Tuckwell, H.C. (1988), Introduction to Theoretical Neurobiology, Cambridge University Press.



# **An Approach to Applied Physics on the Analysis of Neurological Function and Neuronal Systems**

**Alireza Mohammadian Pourtalari**

**Department of Physics, Sofian Branch, Islamic Azad University, East Azarbaijan, Iran**

## **Abstract**

Neurophysics is a growing branch of biophysics, medical physics, and cognitive neuroscience that studies the central nervous system including the brain, spinal cord, and neurons from a physics perspective and seeks to discover the physical basis of brain function and understanding of the cognitive process. This branch of physics covers a wide range of phenomena, from cellular and molecular mechanisms to technologies related to measuring and influencing the brain as well as theories of brain function. In this article, in addition to introducing neurophysics as a pathway to cognitive neuroscience based on the laws of nature, a review of the concepts and laws of physics for neural engineering design has been performed. It seeks to introduce a comprehensive and applied view of the physical principles and fundamental equations known in neuroscience through analytical skills, pioneering physics approaches to interdisciplinary science students, and researchers in order to understand the importance of integrating with the international community, make the day's applications clearer.

**Keywords:** Neurophysics, Cognitive Neuroscience, Neuron, Brain, Memory