



دانشگاه صنعتی سهند  
دانشکده مهندسی برق

# پردازش سیگنال‌های پزشکی

## فصل دوم

۲ - منشاء سیگنال‌های بیولوژی (پتانسیل بیوالکتریک)

دکتر سینا شامخی

تابستان ۱۳۹۵

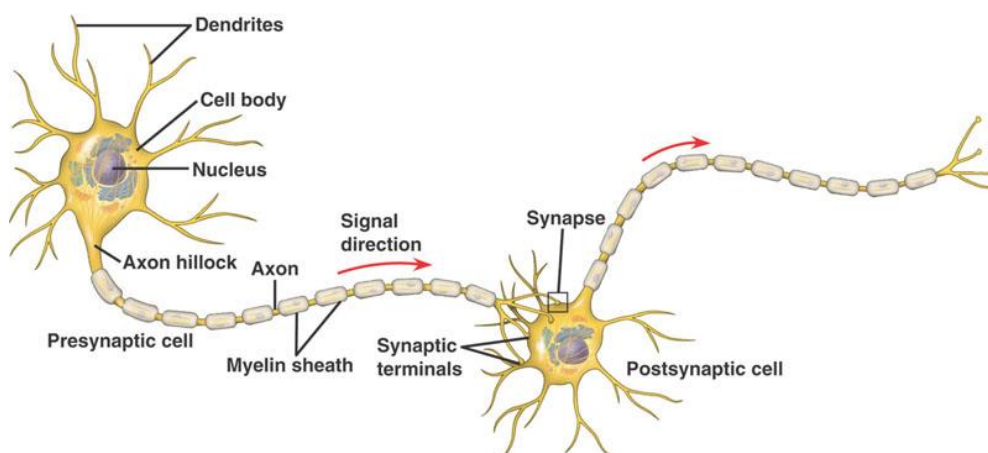


## ۲- ۱- مقدمه

پتانسیل‌ها و یا سیگنال‌های بیوالکتریک نتایج اندازه‌گیری الکتریکی صورت‌گرفته از فعالیت‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی صورت‌گرفته در یک سلول و یا جمع آثار گروهی از سلول‌ها است. در تولید این پتانسیل‌ها سلول‌های تحریک‌پذیر موثر هستند. این سلول‌ها عبارتند از سلول‌های عصبی و ماهیچه‌ای. در حقیقت منشاء اصلی تولید سیگنال‌های بیوالکتریکی سلول‌های عصبی یا ماهیچه‌ای است. این سلول‌ها در گروه‌های بزرگ تحریک‌شده و سیگنال‌های بیوالکتریکی مورد بحث را تولید می‌کنند. جمع آثار کلیه سلول‌های تحریک‌شده‌ی مجاور، هم یک میدان الکتریکی تولید می‌کند که در رسانای حجمی (Volume conductor) که شامل بافت‌های گوناگونی از بدن می‌باشد انتشار می‌یابد. به این ترتیب فعالیت یک ماهیچه و یا مجموعه‌ای از نورون‌ها به‌صورت غیر مستقیم اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. اینگونه اخذ سیگنال‌ها در حال حاضر به‌کمک ابزار پیشرفته‌ی موجود به‌سادگی صورت می‌گیرد (قرار گیری الکترودها بر روی پوست). اما از آنجاییکه سیگنال‌های اخذ شده جمع آثار فعالیت‌های نورون‌ها و ماهیچه‌های متعددی است که از یک محیط واسط ناهمگن عبور کرده و به الکتروود ثبت سیگنال رسیده است، تحلیل این نوع از داده‌ها فرآیندی دشوار است. با این وجود تحلیل این سیگنال‌ها اهمیت کلینیکی و فیزیولوژیکی فراوانی دارد که برای تشخیص وضعیت و بیماری در بافت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲- ۲- سلول عصبی

واحد پردازشی پایه در یک سیستم نوروفیزیولوژیکی سلول عصبی و یا نورون است. وظایف نورون، دریافت، پردازش، انتقال اطلاعات است. همچنان‌که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است قسمت‌های اصلی یک سلول عصبی جسم سلول (Cell body, Soma)، دندریت‌ها و آکسون می‌باشد. در انتهای آکسون سیناپس قرار گرفته است که پایانه‌ی تبادل اطلاعات با بخش‌های دیگر همچون دیگر نورون‌ها است. قطر آکسون می‌تواند از  $0.5$  میکرومتر تا  $1$  میلی‌متر باشد. سیناپس می‌تواند دامنه‌ی ولتاژ در عرض غشاء را افزایش و یا کاهش دهد. عملکرد سلول مبتنی بر جمع آثار این تغییر پتانسیل‌هاست. برخی از انواع آکسون‌ها با لایه‌های میلین (Myelin Sheath) پوشیده شده‌اند که سرعت انتقال داده را افزایش می‌دهد.



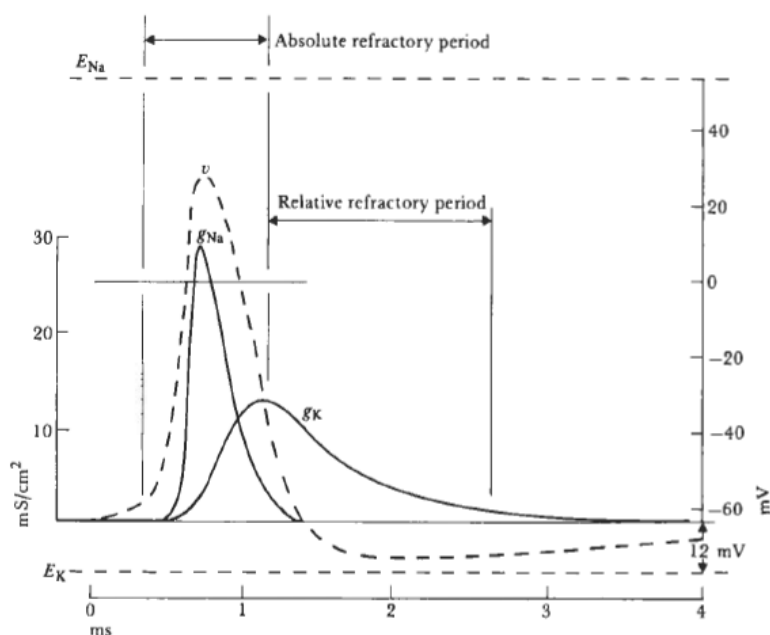
شکل ۱-۲- سلول عصبی

## ۲-۲-۱- غشاء تحریک پذیر

غشاء سلول واسط جداکننده‌ی مایعات خارج و داخل سلول است. این مایعات دارای غلظت‌های یونی مختلف هستند. این غشاء نسبت به یون‌های موجود در مایعات دارای قابلیت‌های نفوذپذیری متفاوتی هستند. جابجایی یون‌ها که توسط انتشار و دیگر مکانیزم‌ها ممکن می‌گردد ولتاژی در عرض غشاء تولید می‌گردد. با در نظر گرفتن نقش یون‌های اصلی (پتاسیم  $[K^+]$ ، سدیم  $[Na^+]$  و کلر  $[Cl^-]$ )، پتانسیل غشا براساس رابطه‌ی نرنست به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$E = \frac{RT}{F} \ln \left\{ \frac{P_K[K^+]_o + P_{Na}[Na^+]_o + P_{Cl}[Cl^-]_i}{P_K[K^+]_i + P_{Na}[Na^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_o} \right\} \quad (1-2)$$

در این رابطه  $R$ ،  $T$  و  $F$  ثابت جهانی گاز، دمای مطلق و ثابت فرادی هستند و  $P_X$  هم قابلیت نفوذپذیری یون  $X$  در حالت استراحت می‌باشد.  $[X]_i$  و  $[X]_o$  هم غلظت یون  $X$  در مایع خارج و داخل سلول است. ولتاژ استراحت داخل سلول نسبت به خارج آن تقریباً  $-80$  میلی ولت است. برخی از سلول‌ها دارای ویژگی‌های تحریک‌پذیری هستند. در حقیقت با تحریک این سلول‌ها به وسیله‌ی محرک‌های الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی، نفوذپذیری غشاء به یون‌های مختلف دچار تغییرات می‌گردد. این تغییرات موجب افزایش اختلاف پتانسیل غشا از سطح استراحت شده و موجب می‌گردد این ولتاژ برای دوره زمانی کوتاهی مثبت شود که با این وضعیت غیرقطبی شدن (Depolarization) گویند و این مجموعه تغییرات ولتاژ پتانسیل عمل (Action potential) نام دارد.



شکل ۲-۲- پتانسیل عمل و مراحل و عوامل شکل‌گیری

تحریک غشا فقط زمانی رخ می‌دهد که تحریک اعمالی از یک آستانه‌ی مشخص برای آن غشاء افزایش یابد. با تحقق شرایط پتانسیل عمل در قالب یک سیگنال قطعی که داری طول ۱ تا ۲ میلی ثانیه است رخ می‌دهد. این بازه زمانی دوره بازیابی مطلق و یا کامل (Absolute or total refractory period) نامیده می‌شود و تحریک جدیدی توسط غشا پذیرفته نمی‌گردد. در بازه‌ی زمانی که ولتاژ شروع به کاهش می‌کند می‌توان تحریک جدیدی به سلول اعمال کرد. به این بازه دوره بازیابی نسبی (Relative refractory period) گویند.

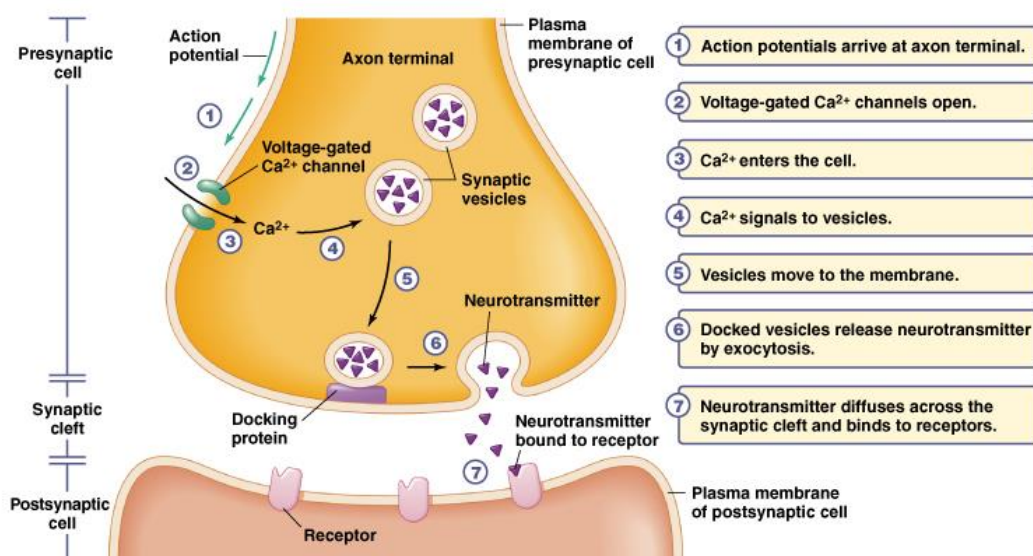
## ۲-۲-۲- آغاز و انتشار پتانسیل عمل

اینکه یک چه زمانی نوروپتانسیل عمل را تولید کند، تابعی از تابعی از ورودی‌های خارجی است که دریافت می‌کند. به طور کلی در نوروپتانسیل عمل از ورودی‌های مذکور از انتهای نوروپتانسیل عمل دریافت می‌گردد. هر سیناپس می‌تواند تاثیر ناچیزی در افزایش یا کاهش پتانسیل غشا در حالت استراحت بگذارد. پتانسیل غشا توسط جمع آثار زمانی و مکانی کلیه سیناپس‌ها تعیین می‌گردد. زمانی که این مجموع به حد آستانه رسید یک پتانسیل عمل تولید می‌گردد.

ساختار غشاء انتشار پتانسیل را از جسم سلولی در طول آکسون به سمت انتها تضمین می‌کند. در حقیقت مکان‌های تحریک شده به صورت رو به جلو نواحی همسایه‌ی خود را تحریک می‌کنند. از آنجایی که مکان‌هایی که به تازگی فعال بوده‌اند، دارای ولتاژهای بالایی هستند دیگر قادر به تحریک در یک فاصله‌ی زمانی بسیار کوتاه نمی‌باشد، پتانسیل عمل در یک جهت انتشار می‌یابد. در طی این انتشار پتانسیل عمل در هر بخش به صورت مداوم در حال بازتولید است. یک نوروپتانسیل عمل را می‌توان به صورت یک مبدل تحریک به فرکانس در نظر گرفت. در بسیاری از مطالعات پتانسیل عمل‌های یک نوروپتانسیل عمل مورد بررسی قرار نمی‌گیرد بلکه پتانسیل‌های تولید توسط یک مجموعه فیبرها مورد بررسی قرار می‌گیرد و دامنه و فرکانس سیگنال وابسته به این فعالیت عصبی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲-۳- سیناپس

آکسون یک نوروپتانسیل عمل با پیوندی به دیگر نوروپتانسیل‌ها و ماهیچه‌ها پایان می‌پذیرد. یک آکسون با پیوندهایی که اشاره‌شد می‌تواند به نوروپتانسیل‌ها و ماهیچه‌های متعدد متصل شود. سیناپس محل پیوند انتهای یک آکسون از یک نوروپتانسیل عمل به دندریت و یا جسم سلولی یک نوروپتانسیل عمل دیگر است. ناحیه پیش‌سیناپس (Presynaptic) انتهای آکسون است. این ناحیه عملاً دندریت و یا جسم سلول بعدی را لمس نمی‌کند. در حقیقت یک فاصله‌ی ۲۰۰ آنگسترومی که با نام شکاف سیناپسی (Synaptic cleft) خوانده می‌شود وجود دارد. ناحیه‌ای که در دندریت و یا جسم سلولی در طرف مقابل قرار دارد نیز ناحیه‌ی پس‌سیناپسی (Postsynaptic) نام دارد.



Copyright © 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

شکل ۲-۳- سیناپس و نواحی مرتبط (<http://www.zoology.ubc.ca/>)

وقتی یک پتانسیل عمل به ناحیه‌ی پیش‌سیناپسی می‌رسد، موجب تغییر مشخصات غشاء می‌گردد که موجب افزایش قابلیت موارد شیمیایی و انتشار از ناحیه‌ی پیش‌سیناپسی به شکاف سیناپسی می‌گردد. موارد عبور کرده توسط ریسپتورها در ناحیه‌ی وس‌سیناپسی دریافت شده و موجب ایجاد تغییر پتانسیل (تحریکی و یا بازدارنده) می‌گردد. مجموعه‌ی این فرآیند تاحدودی کند بوده و از مرتبه‌ی ۰/۵ میلی‌ثانیه است. در حقیقت درمقایسه با سیستم‌های الکترونیکی کند بوده و در مقابل مکانیزم‌های دیگر بیولوژیکی سریع است.

## ۲-۳- ماهیچه

### ۲-۳-۱- ساختار

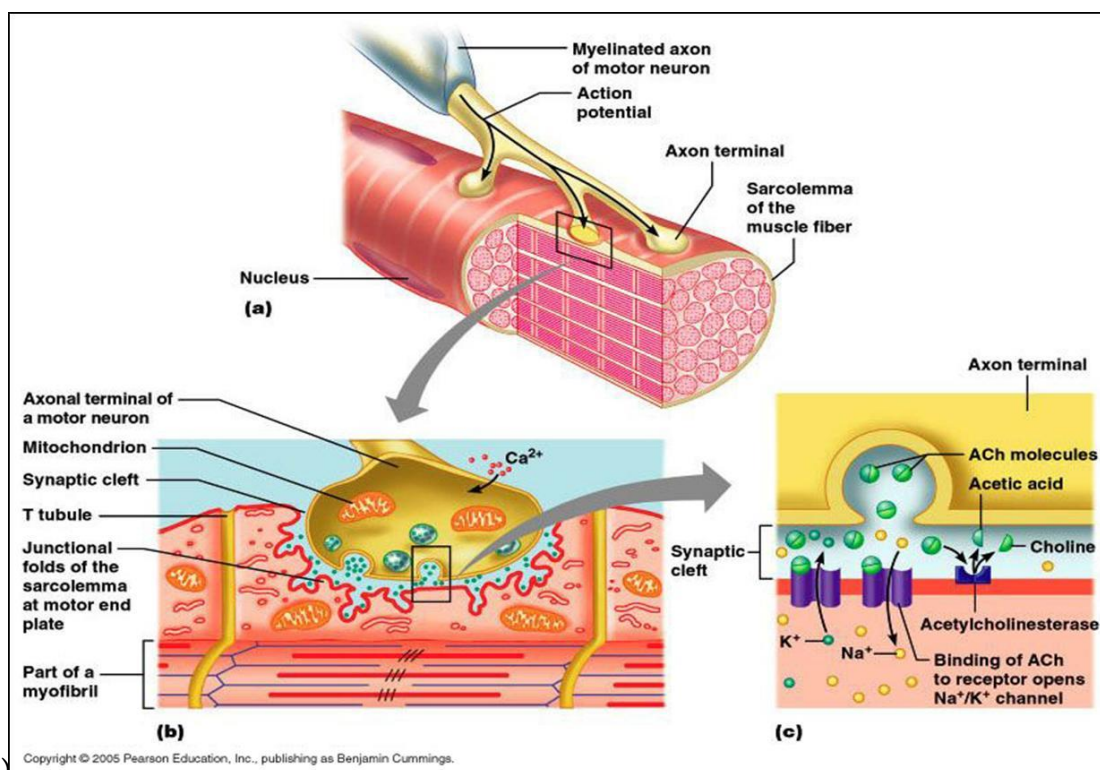
ماهیچه‌های اسکلتی از سلول‌هایی تشکیل شده‌اند که دارای غشاء تحریک‌پذیرند. این غشاء از نظر اصول اولیه مشابه غشاء سلول‌های عصبی است. اما از نظر کاربرد برای انتقال و یا پردازش اطلاعات ساخته نشده و برای ایجاد کشش و انقباض طراحی شده است. ماهیچه از تعداد زیادی فیبر ماهیچه‌ای تشکیل شده است. این فیبرها از دو نوع فیلامان پروتئینی به نام‌های اکتین (Actin) و میوسین (Myosin) تشکیل شده‌اند. این فیلامان‌ها در لایه‌هایی به هم تابیده و موازی مرتب شده‌اند با لغزش روی هم طول فیبر را کم می‌کنند. محرک اصلی این لغزش و حرکت واکنش‌های شیمیایی است. زمانی که غشاء فیبر تحریک شد تولید حرکت و یا نیرو آغاز می‌گردد و این پتانسیل غشاء در طول سطح غشاء فیبر به انتشار می‌یابد و واکنش‌های شیمیایی را موجب می‌گردد که در نهایت موجب انقباض ماهیچه می‌شود. زمانی که فیبر ماهیچه‌ای منقبض شد پتانسل‌های عمل میدان الکتریکی را تولید می‌کند که توسط الکترودهای سطحی (پوستی) قابل پایش است. این سیگنال نوار ماهیچه (EMG) نام دارد که یک سیگنال تصادفی با مشخصات آماری وابسته به عملکرد ماهیچه است.

### ۲-۳-۲- انقباض ماهیچه

نورونی که ماهیچه را منقبض می‌کند عصب حرکتی (Motor nerve) نام دارد. انتهای آکسون این عصب حرکتی از طریق سیناپس با فیبر ماهیچه در پیوند است. محل این پیوند اتصال عصبی-ماهیچه‌ای (Neuromuscular junction) و یا صفحه‌ی پایانی (End plate) نامیده می‌شود. مواد شیمیایی که در صفحه‌ی پایانی همانند یک انتقال دهنده عمل می‌نمایند استیل کولین (Acetylcholine) است. این ماده با رسیدن پتانسیل عمل در انتهای آکسون عصب حرکتی آزاد می‌شود و توسط ریسپتورهای غشاء سلول حرکتی جذب شده موجب تغییر پتانسیل غشاء سلول ماهیچه می‌گردد. زمانی که تحریک به حدی از آستانه برسد پتانسیل عمل تولید شده و در طول غشاء سلول ماهیچه انتشار می‌یابد. مجموعه‌ی فرآیند بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌ثانیه به طول می‌انجامد. وجود تاخیر اضافی در انقباض به دلیل ویژگی‌های دینامیکی ماهیچه می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۲-۴- صفحه پایانی و فیبر ماهیچه (الف) نمونه‌ی واقعی و (ب) شماتیک

## ۲-۴ - رسانا (هادی) حجمی (Volume Conductors)

منشاء سیگنال‌های بیولوژیکی پتانسیل‌های عمل تولید شده توسط تک نورون‌ها و فیبرهای ماهیچه‌ای است. چگالی جریان تولید شده توسط فعالیت‌های غشاء موجب تغییر جریان در واسط‌های اطراف می‌شود. بافت‌های اطراف و احاطه‌کننده (Surrounding tissues) که تغییر جریان در آنها رخ می‌دهد رسانای حجمی (Volume conductor) نامیده می‌شود. در بیشتر کاربردهای کلینیکی و بسیاری از کاربردهای نوروفیزیولوژیک میدان رسانای حجمی پایش می‌گردد نه منشأ و منبع اصلی سیگنال. از نمونه‌های اصلی این نوع از پایش‌ها بکارگیری الکترودهای سطحی در پایش قلب و فعالیت‌های مغزی است. در برخی از مطالعات نوروفیزیولوژیکی با بکارگیری الکترودهای که وارد بافت می‌شوند تاثیر رسانایی حجمی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حقیقت حذف تاثیر رسانای حجمی در بسیاری از موارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در عین حال فرآیندی بسیار پیچیده می‌باشد. در برخی از موارد از مدل‌های شارش جریان در رسانای حجمی با مرتبه‌های مختلف برای انجام این هدف استفاده می‌گردد.