

مقاله‌ای حالت ماندگار غشاء سلولی:

- روابط پایه زیست فیزیک:

دو ابزار (قانون) پایه‌ای زیست-فیزیک و یک رابطی برای تعین پتانسیل استراحت دوسوی غشای سلولی استفاده می‌نماییم. این راهکارها در پی توضیح کمی اثر گرا دیان (نرخ تغییرات بر حسب مکان یا زمان) یونی و میدان الکتریکی هستند.

- تکمیل مطالب درس

قانون اول: قانون انتشار Fick:

جریان ذرات ناشی از انتشار (diffusion) همواره با اختلاف غلظت بوده و ذرات از نواحی دارای غلظت بالا به نواحی دارای غلظت پایین حرکت می‌کنند. در دوسوی یک غشای نیمه تراوا، غلظت دوسوی در جهت تصادفی غلظت‌ها حرکت می‌کنند. جریان یون‌ها در دوسوی غشا عبارتند از:

$$\text{غلظت } I \rightarrow \frac{d[I]}{dx} = -D \cdot j \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

که j جریان یونی حاصل از پدیده‌ی انتشار (diffusion) غلظت یونی $[I]$ و dx ضخامت غشاء و D ثابت نفوذ بر حسب هستند. علامت منفی معکوس نیز نمایانگر این است که جریان یون‌ها از سمت غلظت‌های بالاتر به غلظت‌های پایین‌تر است. $\frac{d[I]}{dx}$ نیز گرا دیان (نرخ تغییرات نسبت به جهت خاص) غلظت را می‌نمایاند. البته قانون Fick فو از حالت فوق بوده و به قدرت یک معادله دیفرانسیل درجه اول بیان می‌شود. اما ما در اینجا صرفاً به حالت ماندگار آن می‌پردازیم.

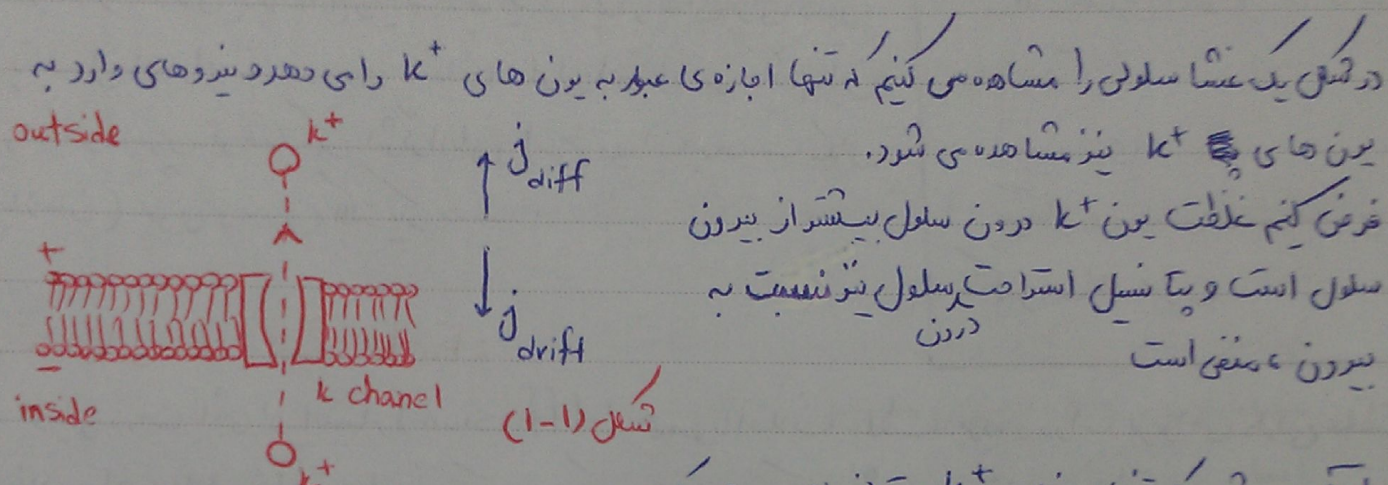
قانون دوم: قانون اهم:

بر ذرات باردار حرکت مطلوب، نیرویی بوجود آمده از الکتروذرات دارای بار + یا - و میدان‌های الکتریکی وارد می‌آید. جریان یون‌ها در غشا بر اساس قانون اهم (نیروی رانش) عبارتست از:

$$j(\text{drift}) = -\mu Z [I] \frac{dv}{dx} \quad \text{رابطه (۲-۱)}$$

که j جریان یون‌ها ناشی از نیروی رانش (drift) در یک میدان الکتریکی، μ ثابت تحرک بر حسب $\frac{m^2}{sv}$ و Z ظرفیت یونی و $[I]$ غلظت یونی، v اختلاف پتانسیل دوسوی غشاء و $\frac{dv}{dx}$ نیز عبارتست از $-E$.

توجه داشته باشید که Z برای یون های مثبت و عدد مثبت، مثلاً: $Z=1$ برای K^+ و $Z=2$ برای Ca^{2+} و برای یون های منفی و عددی منفی، مثلاً: $Z=-1$ برای Cl^-



با آ در می شود که تنها یونهای K^+ می توان از دریچه عبور کرده و سایر یونها (Na^+ ، Cl^- و ...) نمی توانند از آن بگذرند. چرا که کانال ویژه ی آنها وجود ندارد. بسته به غلظت و پتانسیل حقیقی غشا، یون پتاسیم + از غشا عبور می کند تا زمانی که نیروهای حاصل از انتشار و رانش به تعادل برسند. نیروی شیمیایی حاصل از انتشار با حرکت یون پتاسیم مثبت از درون به بیرون سلول کاهش می یابد و نیروی الکتریکی با افزایش شدن K^+ در بیرون افزایش می یابد تا زمانی که این دو نیرو به تعادل برسند.

رابطه ی اینستین:

این رابطه در سال ۱۹۰۵ میلادی رابطه ی بین حرکت (رانس) ذرات در یک میدان الکتریکی و تحت فشار اسمزی را به صورت زیر بیان کرد.

$$D = \frac{kT\mu}{q} \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

که در آن D به ترتیب ثابت نفوذ و تحرک، k ثابت بولتسمن (Boltzmann)، T دمای مطلق (بر حسب کلوین) و q نیز مقدار مطلق بار الکتریکی 1.6×10^{-19} است.

پتانسیل استراحت غشا سلولی نفوذپذیر نسبت به یون:

حرکت یونها در پاسخ به اختلاف غلظت با عبور از نشی یون ها توسط غشا سلول و میدان الکتریکی حاصل محدود شده است، چنانچه گفته شد یون ها از کانال هایی می گذرند که تنها ویژه ی عبور خود آنها هستند. برای روشن تر شدن موضوع و سادگی کار، ابتدا حالتی را در نظر می گیریم که غشا و سلول صرفاً به یک یون اجازه ی عبور می دهد.

قابل توجه آنکه سلول های **neuroglia** که برای سلول های عصبی، نقش حمایتی را دارند، تنها یون های K^+ اجازه ی عبوری دهند. در حالیکه سلول های عصبی برای هر سه یون K^+ ، Na^+ و Cl^- نفوذ پذیر هستند.

در غشاء سلولی شکل (۱-۱) که تنها برای یون مثبت پواسیم نفوذ پذیر است، فرض کنید غلظت یون پواسیم + در مایع درون سلولی، بالاتر است از مایع بیرون سلول. در این حالت جریان حاصل از انتشار در پتان است که یون K^+ به سمت خارج سلول هدایت شود و مقدار آن عبارتست از:

$$j_k(\text{diff}) = -D \frac{d[K^+]}{dx} \quad (\text{رابطه ی ۱-۴})$$

و جریان ناشی از رانش (میدان الکتریکی) نیز در پس آنست که یونهای K^+ به درون سلول هدایت شوند و مقدار آن:

$$j_k(\text{drift}) = -\mu z [K^+] \frac{dV}{dx} \quad (\text{رابطه ی ۱-۵})$$

و جریان برآیند کلی نیز عبارتست از:

$$j_k = j_k(\text{drift}) + j_k(\text{diff}) = -D \frac{d[K^+]}{dx} - \mu z [K^+] \frac{dV}{dx} \quad (\text{رابطه ی ۱-۶})$$

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

بر اساس رابطه ی اینشتین داریم:

$$\Rightarrow j_k = \frac{-kT}{q} \mu \frac{d[K^+]}{dx} - \mu z [K^+] \frac{dV}{dx} \quad (\text{رابطه ی ۱-۷})$$

از رابطه گافون، جریان یون K^+ در هر زمان و با توجه شرایط اولیه داده شده و قابل محاسبه است.

در حالت خاص حالت ماندگار، یعنی حالتی که جریان K^+ به درون سلول با جریان یونهای خارج سلول دقیقاً به تعادل رسیده است و به عبارت دیگر داریم:

$$j_k = 0 \Rightarrow 0 = \frac{-kT}{q} \mu \frac{d[K^+]}{dx} - \mu z [K^+] \frac{dV}{dx} \quad (\text{رابطه ی ۱-۸})$$

برای K^+ داریم $\Delta \psi = - \frac{kT}{q} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_o}$ (رابطه ۹-۱)

با استرال گیری از بیرون تا درون سلول خواهیم داشت:

$$\int_{\psi_o}^{\psi_i} d\psi = - \frac{kT}{q} \int_{[K^+]_o}^{[K^+]_i} \frac{d[K^+]}{[K^+]}$$
 (رابطه ۱۰-۱)

که ψ_i و ψ_o ولتاژ بیرون و درون سلول بوده و $[K^+]_i$ و $[K^+]_o$ نیز غلظت K^+ در خارج و داخل سلول هستند. بنابراین

$$\psi_i - \psi_o = - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{[K^+]_i}{[K^+]_o} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} \right)$$
 (رابطه ۱۱-۱)

معادله ی فوق به معادله ی نرنست (Nernst)، و نیز یک شیمی دان آلمانی معروف است و $E_K = \psi_i - \psi_o$ نیز به اختلاف پتانسیل نرنست شناخته می شود.

در دمای اتاق $\frac{kT}{q} = 26 mV$ و معادله ی نرنست به قدرت زیر خواهد آمد:

$$E_K = \psi_i - \psi_o = 26 \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} mV$$
 (رابطه ۱۲-۱)

همچنین رابطه ی فوق را برای یونهای K^+ نوشته ایم، ولی می توان به سادگی آنرا برای هر یون قابل عبور دیگری نیز بدست آورد. در دمای اتاق برای یون Na^+ داریم،

$$E_{Na} = \psi_i - \psi_o = 26 \ln \frac{[Na^+]_o}{[Na^+]_i}$$
 (رابطه ۱۳-۱)

و ولتاژ نرنست برای Cl^- نیز عبارتست از:

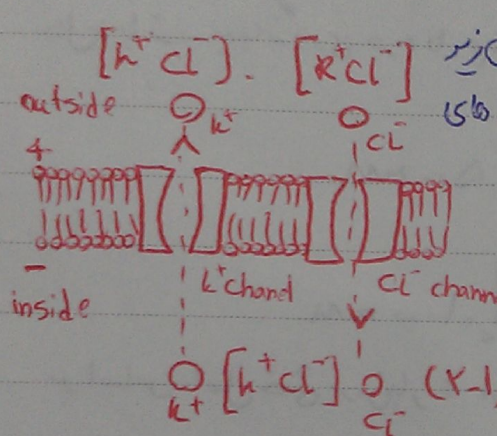
$$E_{Cl} = \psi_i - \psi_o = -26 \ln \frac{[Cl^-]_o}{[Cl^-]_i} = 26 \ln \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o}$$
 (رابطه ۱۴-۱)

زیرا χ برای Cl^- برابر ۱- است.

حالت تعادل دانی (Donnan)

غشای سلولی را در نظر بگیرید که در حالت پایدار به بیس از یک یون، همچون K^+ ، Na^+ و Cl^- اجازه عبور می دهد. پتانسیل خرد نیست برای هر یون، توسط روابط فوق قابل محاسبه است. اختلاف پتانسیل غشای $V_m = V_i - V_o$ نیز ناشی از همی یونها و تحت تأثیر غلظت و نفوذپذیری هر یون خواهد بود. ابتدا حالتی را

در نظر می گیریم که تنها در یون اجازه عبور داشته باشد. همچون شکل زیر



غشای را در نظر بگیرید که برای در یون K^+ و Cl^- نفوذپذیر و برای کاتیون های بزرگ R^+ غیر قابل عبور باشد. در حالت ماندگار پتانسیل خرد نیست برای هر دو یون K^+ و Cl^- باید برابر باشد یعنی:

$$E_K = E_{Cl} \quad \text{رابطه (۱-۱۵)}$$

شکل (۱-۲)

$$E_K = \frac{kT}{q} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = \frac{kT}{q} \ln \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o} \quad \text{رابطه (۱-۱۶)}$$

$$\frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o} \quad \text{رابطه (۱-۱۷)}$$

و با استفاده از ساده سازی داریم:

این رابطه و به حالت تعادل دانی معروف است.

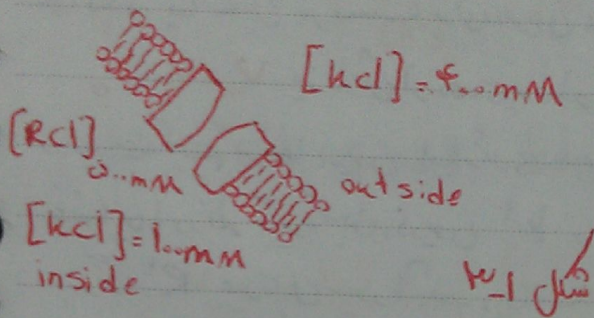
اصل تأیید کننده این رابطه نیز، اصل خنثی بودن بار در فضا است که بیان می دارد:

تعداد کاتیون های موجود در یک حجم با تعداد آنیون ها برابر است.

بنابراین هر چند در حالت ماندگار یون ها کماکان در دوسوی غشای جابجایی شوند، اما هر یون عبوری K^+ با یک یون Cl^- همراهی می شود تا اصل خنثی بودن بار در فضا برقرار بماند. چنانچه کاتیون های R^+ وجود نداشته باشند

در حالت ماندگاری غلظت $[K^+]$ و $[Cl^-]$ در دوسری عشا برابر بود. اما با وجود کاتیونهای مثبت R^+ غلظت $[KCl]$ در دوسری عشا متفاوت است.

مثال ۱-۱: در عشا شکل زیر برای K^+ و Cl^- نفوذپذیر و برای R^+ نفوذناپذیر است. غلظت در شرایط ماندگار را با توجه به شرایط اولیه داده شده محاسبه کنید.



حل: با توجه به ماندگاری جرم داریم: (در حالت اولیه)

$$[K^+]_i + [K^+]_o = 5.0 \text{ mM}$$

$$[Cl^-]_i + [Cl^-]_o = 1.0 \text{ mM}$$

بر اساس اصل خنثی بودن بار: در حالت ماندگاری:

$$\begin{cases} [K^+]_i + [R^+]_i = [Cl^-]_i \\ [K^+]_o = [Cl^-]_o \end{cases}$$

همچنین بر اساس حالت ماندگار داریم:

$$\frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o}$$

با جایگذاری $[K^+]_o$ و $[Cl^-]_o$ از رابطه‌های قبلی در معادله‌ی دانی فون داریم:

$$\frac{5.0 - [K^+]_i}{[K^+]_i} = \frac{[Cl^-]_i}{1.0 - [Cl^-]_i}$$

که با حذف $[Cl^-]_i$ از رابطه خنثی بودن بار در طرفین:

$$\frac{5.0 - [K^+]_i}{[K^+]_i} = \frac{[K^+]_i + 5.0}{1.0 - [K^+]_i - 5.0}$$

که نتیجه می‌دهد:

Subject:

Year: Month: Date: ()

$$[K^+]_i = 145 \text{ mM} \Rightarrow [K^+]_o = 4.4 \text{ mM}, [Cl^-]_i = 4 \text{ mM}, [Cl^-]_o = 110 \text{ mM}$$