

বায়োফিজিক্সে মেমব্রেন সমীকরণ: নিউরনের বিদ্যুৎ সংকেত ও এর গাণিতিক ভিত্তি

বায়োফিজিক্সে **মেমব্রেন সমীকরণ** এমন কিছু গাণিতিক সূত্র, যা ব্যাখ্যা করে কীভাবে **নিউরন ও পেশি কোষের** মতো জীবন্ত কোষে বৈদ্যুতিক সংকেত প্রবাহিত হয়। এই সমীকরণগুলো মূলত কোষের ঝিল্লির (membrane) মধ্য দিয়ে **আয়নের** (Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{2+}) **চলাচল** বোঝার জন্য ব্যবহৃত হয়। এগুলো **অ্যাকশন পটেনশিয়াল** (action potential), **সিন্যাপটিক ট্রান্সমিশন** (synaptic transmission) এবং **নিউরাল প্রসেসিং** বুঝতে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ।

১. মূল ধারণা: আয়নের গতি ও কোষের বৈদ্যুতিক ধর্ম

প্রত্যেক জীবন্ত কোষের চারপাশে একটি **ফসফোলিপিড দ্বিস্তর** (phospholipid bilayer) দ্বারা গঠিত মেমব্রেন থাকে, যা কোষের অভ্যন্তরীণ ও বাহ্যিক পরিবেশকে আলাদা রাখে। তবে, এই মেমব্রেনের মধ্যে **আয়ন চ্যানেল** (ion channels) নামে ক্ষুদ্র ছিদ্র থাকে, যা আয়নদের নির্দিষ্ট নিয়মে প্রবাহিত হতে সাহায্য করে। এই আয়নের গতি কোষের বৈদ্যুতিক সম্ভাবনা তৈরি করে।

- মেমব্রেন পটেনশিয়াল (V):** কোষের ভেতরের ও বাইরের পরিবেশের মধ্যে **ভোল্টেজ পার্থক্য**।
- রেস্টিং পটেনশিয়াল:** কোষের সাধারণ অবস্থা, যা নিউরনের ক্ষেত্রে প্রায় -90 mV ।
- অ্যাকশন পটেনশিয়াল:** বৈদ্যুতিক সংকেত পাঠানোর সময় **তাত্ক্ষণিক ভোল্টেজ পরিবর্তন**, যা নিউরনের মধ্যে বার্তা পাঠায়।

২. নের্নস্ট সমীকরণ (একটি আয়নের সমতুল্য পটেনশিয়াল নির্ণয়)

নের্নস্ট সমীকরণ ব্যাখ্যা করে কীভাবে একটি নির্দিষ্ট আয়নের অভ্যন্তরীণ ও বাহ্যিক ঘনত্ব তার বৈদ্যুতিক সমীকরণ তৈরি করে:

$$E_{\text{ion}} = \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{[\text{ion}]_{\text{out}}}{[\text{ion}]_{\text{in}}} \right)$$

যেখানে,

- E_{ion} = নির্দিষ্ট আয়নের সমতুল্য বৈদ্যুতিক সম্ভাবনা
- (R) = গ্যাস ধ্রুবক ($8.314\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$)
- (T) = তাপমাত্রা (কেলভিন)
- (z) = আয়নের চার্জ (Na^+ এর জন্য +1, Cl^- এর জন্য -1)
- (F) = ফারাডে ধ্রুবক ($96,485\text{ C/mol}$)
- $[\text{ion}]_{\text{out}}$, $[\text{ion}]_{\text{in}}$ = বাইরের ও ভিতরের আয়নের ঘনত্ব

এই সমীকরণ বোঝায় কেন নির্দিষ্ট আয়নগুলো কোষের ভিতরে-বাইরে প্রবাহিত হয় এবং কীভাবে তারা **রেস্টিং মেমব্রেন পটেনশিয়াল** তৈরি করে।

৩. গোল্ডম্যান-হজকিন-কাটজ (GHK) সমীকরণ: কোষের সামগ্রিক মেমব্রেন পটেনশিয়াল

নের্নস্ট সমীকরণ কেবল একক আয়নের জন্য কাজ করে, তবে GHK **সমীকরণ** একাধিক আয়নের প্রভাব বিবেচনায় নেয় এবং কোষের **মোট মেমব্রেন পটেনশিয়াল** গণনা করে:

$$V_m = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{P_{K^+}[K^+]_{\text{out}} + P_{Na^+}[Na^+]_{\text{out}} + P_{Cl^-}[Cl^-]_{\text{in}}}{P_{K^+}[K^+]_{\text{in}} + P_{Na^+}[Na^+]_{\text{in}} + P_{Cl^-}[Cl^-]_{\text{out}}} \right)$$

যেখানে P_{ion} প্রতিটি আয়নের **পারমিয়েবিলিটি** (permeability) বা প্রবাহের ক্ষমতা প্রকাশ করে।

- রেস্টিং অবস্থায় K^+ এর **পারমিয়েবিলিটি সবচেয়ে বেশি**, তাই নিউরনের **রেস্টিং পটেনশিয়াল** মূলত E_K ($\sim -90\text{ mV}$) এর কাছাকাছি থাকে।
- যখন **অ্যাকশন পটেনশিয়াল** তৈরি হয়, তখন Na^+ **প্রবাহ বেড়ে যায়**, যা E_{Na} ($\sim +60\text{ mV}$) এর দিকে ভোল্টেজ পরিবর্তন ঘটায়।

৪. হজকিন-হাক্সলি মডেল (নিউরনের বৈদ্যুতিক কার্যকলাপ)

হজকিন ও হাক্সলি নিউরনের **অ্যাকশন পটেনশিয়াল** ব্যাখ্যা করতে একটি গাণিতিক মডেল তৈরি করেন, যেখানে কোষের মেমব্রেনকে **একটি বৈদ্যুতিক বর্তনী** হিসেবে দেখা হয়।

$$C_m \frac{dV}{dt} = -(g_K(V - E_K) + g_{Na}(V - E_{Na}) + g_L(V - E_L)) + I_{\text{ext}}$$

এখানে,

- C_m = মেমব্রেনের ধারকত্ব (capacitance)
- g_K, g_{Na}, g_L = K^+ , Na^+ , ও লিক (leak) চ্যানেলের পরিবাহিতা
- E_K, E_{Na}, E_L = সংশ্লিষ্ট আয়নের বৈদ্যুতিক সম্ভাবনা
- I_{ext} = বাহ্যিক ইলেকট্রিক কারেন্ট (যেমন, নিউরনের ইনপুট সিগন্যাল)

এই সমীকরণ ব্যাখ্যা করে কীভাবে **নিউরনে স্পাইক বা অ্যাকশন পটেনশিয়াল তৈরি হয়** এবং সংকেত কেমনভাবে ছড়িয়ে পড়ে।

৫. কেবল সমীকরণ (নিউরনের সিগন্যাল পরিবহন)

নিউরনের **ডেনড্রাইট** বা **অ্যাকসনের মধ্যে বৈদ্যুতিক সংকেতের ছড়িয়ে পড়া** বোঝাতে **কেবল সমীকরণ** ব্যবহার করা হয়: $\tau \frac{\partial V}{\partial t} = \lambda^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - V$

যেখানে,

- $\tau = R_m C_m$ = মেমব্রেনের **সময় ধ্রুবক** (যা সংকেত পরিবর্তনের গতি নির্দেশ করে)
- $\lambda = \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$ = **স্থান ধ্রুবক** (সংকেত কতদূর ছড়াবে তা নির্ধারণ করে)
- R_m = মেমব্রেন প্রতিরোধ, C_m = ধারকত্ব, R_i = কোষের অভ্যন্তরীণ প্রতিরোধ

এই সমীকরণ ব্যাখ্যা করে **কেন সংকেত দূরত্বের সাথে দুর্বল হয়** এবং **অ্যাকশন পটেনশিয়ালের প্রয়োজন হয় সংকেত বজায় রাখতে**।

বায়োফিজিক্স ও কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তার সংযোগ

এই সমীকরণগুলো শুধু **নিউরোসায়েন্স** নয়, বরং **মেশিন লার্নিং ও এআই** গবেষণার ক্ষেত্রেও গুরুত্বপূর্ণ।

- ✔ **নিউরোসায়েন্স:** নিউরনের অ্যাকশন পটেনশিয়াল, স্মৃতি গঠন ও মস্তিষ্কের কার্যপ্রণালী বুঝতে।
- ✔ **বায়োমেডিক্যাল ইঞ্জিনিয়ারিং:** **ব্রেইন-কম্পিউটার ইন্টারফেস** (BCI), **নিউরোমোডুলেশন** ডিভাইস উন্নয়নে।
- ✔ **মেশিন লার্নিং ও এআই:** **স্পাইকিং নিউরাল নেটওয়ার্ক** (SNN) তৈরি, যা বাস্তব নিউরনের কাজ অনুকরণ করে।
- ✔ **ওষুধ ও চিকিৎসা:** নিউরনের কার্যকারিতা বুঝে **মানসিক রোগ ও স্নায়বিক অসুস্থতা চিকিৎসায়** প্রয়োগ করা হয়।