



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 -70 mV ।
- অ্যাকশন পটেনশিয়াল: বৈদ্যুতিক সংকেত পাঠানোর সময় তাৎক্ষণিক 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 C/mol)
- $[ion]_{out}, [ion]_{in}$ = 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:

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

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 (~ -90 mV) এর কাছাকাছি থাকে।
- যখন **অ্যাকশন পটেনশিয়াল** তৈরি হয়, তখন Na^+ প্রবাহ বেড়ে যায়, যা E_{Na} ($\sim +60$ 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।

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

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।
- ✓ **ঔষধ ও চিকিৎসা:** নিউরনের কার্যকারিতা বুঝে মানসিক রোগ ও স্নায়বিক অসুস্থতা চিকিৎসায় প্রয়োগ করা হয়।