

Hücre Membranının Elektriksel Modeli

Yrd. Doç. Dr. Aslı AYKAÇ
Yakın Doğu Üniversitesi
Tıp Fakültesi
Biyofizik AD

- Goldman tarafından yapılan kabullerde, membranın içindeki elektrik alanın hemen hemen her yerde sabit olduğu düşünölmüş ve E_m 'nin değerini veren bir formöl çıkartılmıştır
 - E_m yavaş değişiyorsa **kapasitif akımı sıfır** kabul edebiliriz
 - Toplam iyonik akımların da membran boyunca sıfır olduğu düşünölürse
 - Membranda akım taşıyan iyonlar için $I_{Na} + I_K + I_{Cl} = 0$ olmalıdır

Goldman-Hodgkin-Katz Denklemi

- Membranda akım taşıyan iyonların E_m 'ye etkisi
 - iyonların dıştaki ve içteki konsantrasyonlarının oranı
 - İyonun membran üzerindeki permeabilitesi ilebelirlenmektedir

$$E_m = \frac{-RT}{zF} \ln \frac{P_K [K]_{\text{dış}} + P_{Na} [Na]_{\text{dış}} + P_{Cl} [Cl]_{\text{iç}}}{P_K [K]_{\text{iç}} + P_{Na} [Na]_{\text{iç}} + P_{Cl} [Cl]_{\text{dış}}}$$

Goldman-Hodgkin-Katz Denklemi

- Nernst denkleminin modifikasyonu olan Goldman-Hodgkin-Katz Denklemi membran ***birden fazla iyona geçirgen*** olduğunda E_m 'yi hesaplamada kullanılmaktadır

$$E_m = \frac{-RT}{zF} \ln \frac{P_K [K]_{\text{dış}} + P_{Na} [Na]_{\text{dış}} + P_{Cl} [Cl]_{\text{iç}}}{P_K [K]_{\text{iç}} + P_{Na} [Na]_{\text{iç}} + P_{Cl} [Cl]_{\text{dış}}}$$

$$E_m = \frac{-RT}{zF} \ln \frac{P_K [K]_{\text{dış}} + P_{Na} [Na]_{\text{dış}} + P_{Cl} [Cl]_{\text{iç}}}{P_K [K]_{\text{iç}} + P_{Na} [Na]_{\text{iç}} + P_{Cl} [Cl]_{\text{dış}}}$$

E_m: Membran potansiyeli

R : Gaz sabiti [8314.9 J/(kg mol K)]

T : Mutlak sıcaklık (Kelvin)

F : Faraday sabiti (96.500 C/mol)

ln : e tabanında logaritma

P_K, P_{Na}, and P_{Cl}: Membranın K, Na, ve Cl iyonlarına geçirgenliği

K_{dış}, Na_{dış}, and Cl_{dış} : K, Na, ve Cl iyonlarının h.dışı konsantrasyonları

K_{iç}, Na_{iç}, and Cl_{iç} : K, Na, ve Cl iyonlarının h.içi konsantrasyonları

- Membran K, Na, ve Cl iyonlarına geçirgen olduğu zaman membran potansiyeli (E_m) 3 faktöre bağlı olarak değişir:
 - İyonların elektriksel yükü
 - Membranın bu iyonlara [P_i (i: K, Na, ya da Cl)] geçirgenliği
 - İyonların h.içi ve h.dışı konsantrasyonları [$C_{iç}$], [$C_{dış}$]

$$E_m = 60\text{mV} \log \frac{P_K [K]_{dış} + P_{Na} [Na]_{dış} + P_{Cl} [Cl]_{iç}}{P_K [K]_{iç} + P_{Na} [Na]_{iç} + P_{Cl} [Cl]_{dış}}$$

- Dinlemin membran potansiyeli hesaplanırken Goldman Denkleminde bazı kısaltmalar yapılabilir
 - Na⁺/K⁺ pompası nötral çalışıyorsa ve
 - Cl⁻'un dengede olduğu düşünülürse I_{Cl}=0 alınabilir
 - I_{Cl}=0 ise P_{Cl}=0 dir

$$E_m = \frac{-RT}{zF} \ln \frac{P_{K/P_K} [K]_{dış} + P_{Na/PK} [Na]_{dış}}{P_{K/P_K} [K]_{iç} + P_{Na/PK} [Na]_{iç}}$$

Örnek

$$[K]_{iç} = 155 \text{ mM}$$

$$[Na]_{iç} = 12 \text{ mM}$$

$$T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$[K]_{dış} = 4 \text{ mM}$$

$$[Na]_{dış} = 145 \text{ mM}$$

$$RT/F = 26.7 \text{ mV}$$

$$P_K : P_{Na} = 100 : 1$$

$$P_{Na} / P_K = 1/100$$

$$E_m = 26.7 \times 2.3 \log \frac{4 + 1/100 (145)}{155 + 1/100 (12)}$$

$$E_m = -89 \text{ mV}$$

Bir iyonun permeabilitesi diğer iyona göre çok yüksek ise- K^+ için

- Hücrenin K^+ iyonuna geçirgenliği çok yüksek ise

$$P_K \gg P_{Na}, P_{Cl}$$

$$E_m = \frac{-RT}{zF} \ln \frac{P_K [K]_{dış} + P_{Na} [Na]_{dış} + P_{Cl} [Cl]_{iç}}{P_K [K]_{iç} + P_{Na} [Na]_{iç} + P_{Cl} [Cl]_{dış}}$$

$$V_m = E_m = \frac{-RT}{F} \ln \frac{[K]_{dış}}{[K]_{iç}}$$

Bir iyonun permeabilitesi diğer iyona göre çok yüksek ise- Na^+ için

- Hücrenin Na^+ iyonuna geçirgenliği çok yüksek ise

$$P_{\text{Na}} \gg P_{\text{K}}, P_{\text{Cl}}$$

$$E_m = \frac{-RT}{zF} \ln \frac{P_K [K]_{\text{dış}} + P_{\text{Na}} [\text{Na}]_{\text{dış}} + P_{\text{Cl}} [\text{Cl}]_{\text{iç}}}{P_K [K]_{\text{iç}} + P_{\text{Na}} [\text{Na}]_{\text{iç}} + P_{\text{Cl}} [\text{Cl}]_{\text{dış}}}$$

$$V_m = E_m = \frac{-RT}{F} \ln \frac{[\text{Na}]_{\text{dış}}}{[\text{Na}]_{\text{iç}}}$$

K^+ Geçirgenliği (P_K / g_K)

- K^+ iyonları h.içi ve h.dışında farklı konsantrasyonlara sahip olması nedeniyle, membran üzerinden K^+ iyonları kimyasal konsantrasyonları doğrultusunda hareket eder. Bu hareket K^+ iyonları ve membran arasında bir etkileşim oluşturur
- Akış yönü ise Nernst denklemi ile elde edilirken
 - İyon ve membran arasındaki etkileşim direnç ile
 - İyonların membrandan akışı (tıpkı elektronların akışı gibi) batarya-pil ile temsil edilebilir

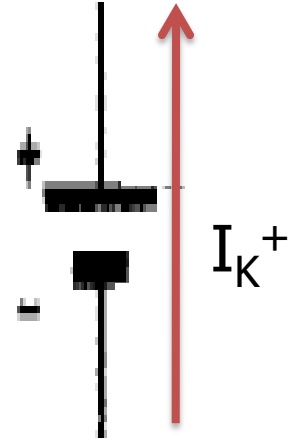
K^+ iyonları hücre içinden dışarı doğru hareket ettiği için pilin – kutbu h.içine, + kutbu ise h.dışına doğru olacaktır

İletkenlik [$g = 1/R$ (direnç)]

Hücre içi ve dışı arasındaki potansiyel fark: $E_m - E_K$

$V = I \cdot R$ ise $I = V/R$ ve $I = V \cdot g$

$$I_K = g_K (E_m - E_K)$$

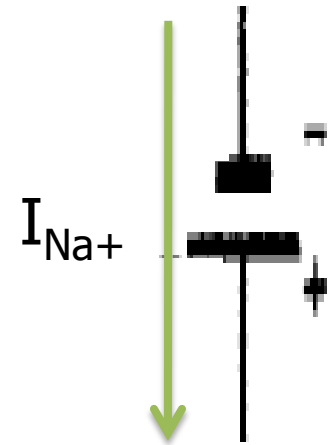


Na⁺ Geçirgenliği (P_k / g_k)

Pilin + kutbu h.içine, - kutbu ise h.dışına doğru olacaktır

Pil-batarya üzerinden geçen akım, baterinin potansiyeline ve membran potansiyel farkına bağlı olarak

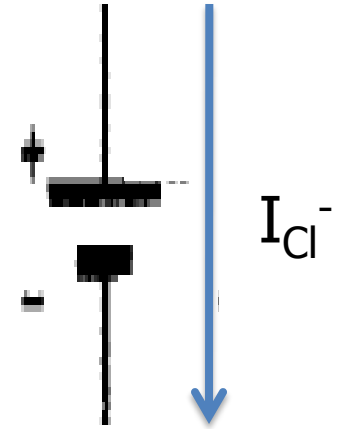
$$I_{Na} = g_{Na}(E_m - E_{Na})$$



Cl⁻ Geçirgenliği (P_K / g_K)

- Pilin – kutbu h.içine, + kutbu ise h.dışına doğru olacaktır

$$I_{Cl} = g_{Cl}(E_m - E_{Cl})$$



Pasif akım için genel ifade

$$I_i = g_i(E_m - E_i)$$

i: spesifik bir iyon

I_i, iyonik akımı

g_i, iletkenliği

E_i, iyonun denge potansiyeli

E_m, membran potansiyeli

$$E_K = -81.4 \text{ mV}$$

$$E_{Na} = +60 \text{ mV}$$

$$E_{Cl} = -72.6 \text{ mV}$$

$$g_{Na} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ Siemens/cm}^2$$

$$g_K = 12 \times 10^{-6} \text{ Siemens/cm}^2$$

- Pasif akım için genel denklem

$$I_i = g_i (E_m - E_i)$$

$$\mathbf{E_m = -72.6mV}$$

Pasif K⁺ akımı

$$I_K = g_K(E_m - E_K)$$

$$E_m = -72.6 \text{ mV} = -72.6 \times 10^{-3} \text{ V}$$

$$g_K = 12 \times 10^{-6} \text{ Siemens/cm}^2$$

$$I_K = 12 \times \frac{10^{-6} \text{ S}}{\text{cm}^2} \times [-72.6 \times 10^{-3} \text{ V} - (-81.4 \times 10^{-3} \text{ V})]$$

$$I_K = 105.6 \times \frac{10^{-9} \text{ A}}{\text{cm}^2} = 105.6 \times \frac{10^{-9} \text{ C}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

$$1 \text{ mole} = 96500 \text{ C} \quad (\text{Siemens/cm}^2) \times \text{Volt} = (\text{Amper/cm}^2) = \text{Coulomb}/(\text{s} \times \text{cm}^2)$$

$$I_K = 105.6 \times \frac{\frac{10^{-9} \text{ A}}{\text{cm}^2}}{\frac{96500 \text{ C}}{\text{mole}}} = 1.06 \times 10^{-12} \frac{\text{mole}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Membran dinlenim potansiyelinde, pasif K akımı pozitiftir ve h.dışına doğrudur

Pasif Na⁺ akımı

$$I_{Na} = g_{Na}(E_m - E_{Na}) \quad E_m = -72.6 \text{ mV} = -72.6 \times 10^{-3} \text{ V}$$

$$I_{Na} = 1.2 \times \frac{10^{-6} \text{ S}}{\text{cm}^2} \times [-72.6 \times 10^{-3} \text{ V} - (+60 \times 10^{-3} \text{ V})]$$

$$I_{Na} = -159 \times \frac{10^{-9} \text{ A}}{\text{cm}^2} = -159 \times \frac{10^{-9} \text{ C}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

$$1 \text{ mole} = 96500 \text{ C} \quad (\text{Siemens/cm}^2) \times \text{Volt} = (\text{Amper/cm}^2) = \text{Coulomb}/(\text{s} \times \text{cm}^2)$$

$$I_{Na} = -159 \times \frac{\frac{10^{-9} \text{ A}}{\text{cm}^2}}{\frac{96500 \text{ C}}{\text{mole}}} = -159 \times 10^{-12} \frac{\text{mole}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Membran dinlemin potansiyelinde, pasif Na akımı negatiftir ve h.içine doğrudur

Pasif Cl⁻ akımı

$$I_{Cl} = g_{Cl}(E_m - E_{Cl})$$

Hücre dinlenim halindeyken $E_{Cl} = E_m$

$$E_m = -72.6 \text{ mV} = E_{Cl}$$

$$I_{Cl} = g_{Cl}(72.6 - 72.6)$$

$$I_{Cl} = 0$$

Hücre dinlemin zar potansiyeline sahipken ,Cl dengede olduğu için pasif Cl akımı sıfırdır

$E_M = -80 \text{ mV}$, ve $[\text{Cl}^-]_{\text{dış}} = 100 \text{ mM}$ ise $[\text{Cl}^-]_{\text{iç}} = ?$

$$E_{\text{Cl}} = E_m$$

$$E_m = +61 \text{ mV} \log \frac{[\text{Cl}^-]_i}{[\text{Cl}^-]_o}$$

$$= -61 \text{ mV} \log \frac{[\text{Cl}^-]_o}{[\text{Cl}^-]_i}$$

$$\frac{-80 \text{ mV}}{-61 \text{ mV}} = \log \frac{100 \text{ mM}}{[\text{Cl}^-]_i}$$

$$\frac{100 \text{ mM}}{[\text{Cl}^-]_i} = \text{antilog} \frac{-80 \text{ mV}}{-61 \text{ mV}} = \text{antilog } 1.31 = 20.5$$

$$[\text{Cl}^-]_i = \frac{100 \text{ mM}}{20.5} = 4.88 \text{ mM}$$

- Bazı düz kaslarda $[\text{Cl}^-]_{iç}$ konsantrasyonu pasif dağılım ile hesaplanan değerden (12.5 mM) daha yüksektir (ör. 30mM)

$$E_{\text{Cl}} = E_m = -55 \text{ mV}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{Cl}^-]_i &= \frac{[\text{Cl}^-]_o}{\text{antilog} \frac{E_m}{-61 \text{ mV}}} \\
 &= \frac{100 \text{ mM}}{\text{antilog} \frac{-55 \text{ mV}}{-61 \text{ mV}}} \\
 &= \frac{100}{7.973} \\
 &= 12.5 \text{ mM}
 \end{aligned}$$

- Ancak bu pasif akımlar nedeni ile kısa bir süre sonra hücre içinde ve dışında bulunan Na^+ ve K^+ konsantrasyonları değişecektir
- Na^+ / K^+ ATPazı bu iyonları konsantrasyonlarının tersi yönde pompalayarak hücredeki dengeyi korumayı sürdürür

$$g_{\text{Na}}/g_{\text{K}} = 1/10 \quad \text{iletkenlik oranı}$$

$$I_{\text{Na}} = -1.59 \times 10^{-12} \text{ moles/s.cm}^2$$

$$I_{\text{K}} = -1.06 \times 10^{-12} \text{ moles/s.cm}^2$$

$$I_{\text{Na}} = -(3/2) I_{\text{K}}$$

- K^+ iyonunun membrandan geçişi Na^+ iyonuna göre çok daha kolaydır. Bu nedenle, membranın K^+ iyonu için iletkenliği Na^+ iyonunununkinden 10 kat daha büyüktür
- K^+ iyonu için sürücü kuvveti 8.8 mV
- Na^+ iyonu için sürücü kuvveti 132.6mV (zardan geçebilmesi için daha büyük kuvvete ihtiyaç var)
- Potansiyel fark: sürücü kuvvet

Kararlı Durum

- Canlı hücrelerde membranın iki tarafı arasındaki konsantrasyonun gradiyentinin sabit kalması için her iyonun taşıdığı toplam akımın sıfıra eşit olması gerekir
 - Denge durumunda: moleküllere etkiyen net kuvvet sıfırdır
 - Kararlı durum: iyonun taşıdığı net akım sıfırdır
$$I_{\text{pasif}} + I_{\text{aktif}} = 0$$

Aktif akımlar

- Toplam akım $I_{\text{Top}} = I_a + I_p$
- **Kararlı durumda**, aktif ve pasif akımların toplamı sıfır olmalıdır

$$I_{\text{Na}} = I_{a,\text{Na}} + I_{p,\text{Na}} = 0 \quad ; \quad I_{a,\text{Na}} = - I_{p,\text{Na}}$$

$$I_{\text{K}} = I_{a,\text{K}} + I_{p,\text{K}} = 0 \quad ; \quad I_{a,\text{K}} = - I_{p,\text{K}}$$

Elektronötral pompa için

- 1Na^+ dışarı, 1K^+ içeri
- Kararlı durum şartlarında, pasif akımın taşıdığı net yük sıfır olmalıdır

Dinlemin durumunda $\sum I_i = 0$ veya $I_{\text{Na}} + I_{\text{K}} + I_{\text{Cl}} = 0$

$$I_{\text{Na}} = g_{\text{Na}} (E_m - E_{\text{Na}}) \quad ; \quad I_{\text{K}} = g_{\text{K}} (E_m - E_{\text{K}});$$

$$I_{\text{Cl}} = g_{\text{Cl}} (E_m - E_{\text{Cl}})$$

$$g_{\text{Na}} (E_m - E_{\text{Na}}) + g_{\text{K}} (E_m - E_{\text{K}}) + g_{\text{Cl}} (E_m - E_{\text{Cl}}) = 0$$

$I_{\text{Cl}} = 0$ olduğu zaman

$$g_{\text{Na}} (E_m - E_{\text{Na}}) + g_{\text{K}} (E_m - E_{\text{K}}) = 0$$

$$g_{\text{Na}} (E_m - E_{\text{Na}}) = - g_{\text{K}} (E_m - E_{\text{K}})$$

Elektronötral pompa

- Membranın her iki tarafı arasında net yük taşımamaktadır
- Nötral pompanın net akıma etkisi yoktur
- E_m potansiyelini etkilemez
- Membranın her iki tarafında K^+ ve Na^+ iyonlarının konsantrasyon gradientinin kurulmasından sorumlu
- Bu gradientler K^+ ve Na^+ denge potansiyelini belirler

Giriş

- Sinir ve kas elektriksel aktivitesi üzerinde etkili terapötik ilaçlar, toksik maddeler, nörotransmitter, hormonlar ve plazma elektrolitlerinin anlaşılması için, dinlenim ve uyarı sırasında ortaya çıkan elektriksel özelliklerin ve hücre zarının davranışının araştırılması gereklidir

Membranın Pasif Elektriksel Özellikleri

- Membran kompozisyonu
- Membran kapasitansı
- Membranın direnci

Membran Kompozisyonu

- Membran lipid tabakadan oluşmuştur
 - İyonlar lipid tabakadan direk geçemezler
 - Kanallardan nüfus edebilirler
- Lipid tabakanın kalınlığı $\cong 50-70 \text{ \AA}$

* $1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$

Dinlenim potansiyeli & İyon dağılımı

- Membran potansiyeli hücrenin tipine göre çeşitlilik gösterir
 - sinir hücresinde dinlenim potansiyeli $\cong -70\text{mV}$

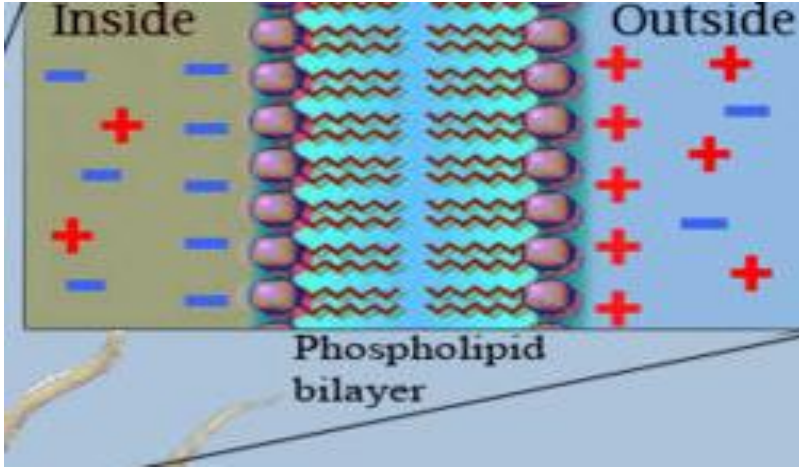
Hücre tipi	Dinlenim Potansiyeli (mV)
Sinir	-70
İskelet kası	-80
Kalp kası	-80
Purkinje lifleri	-90
Atrioventricular node (AV düğümleri)	-65
Sinoatrial nodal (SA)	-55
Küs kas	-55

İyon dağılımları ve denge potansiyelleri

İyon	Hücre içi dağılım (mM)	Hücre dışı dağılım (mM)	Denge Potansiyeli (mV)
Na⁺	15	145	60
Cl⁻	5	100	-80
K⁺	150	4.5	-94
Ca²⁺	0.0001	1.8	130
H⁺	0.0002	0.0001	-18

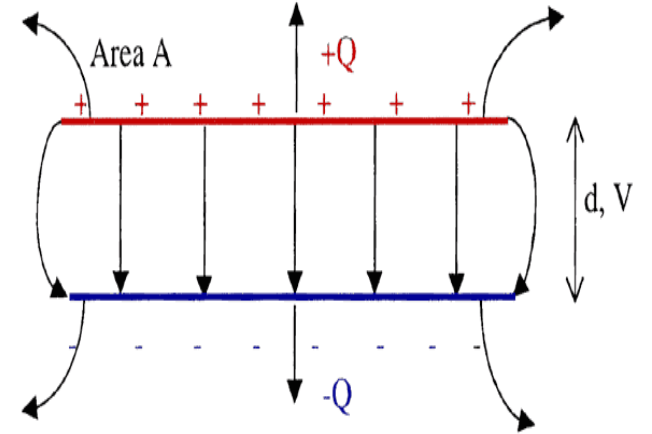
Membran Kapasitansı

- Lipid bilayer
 - İki iletkeni ayıran bir yalıtkan gibi davranır
 1. Hücre içi sıvı
 2. Hücre dışı sıvı
 - spesifik membran kapasitansına sahiptir (C_M)
 - $C_M \cong 0.4-1.0 \mu\text{F}/\text{cm}^2$



Bir kapasitör olarak
membran

- İyonlar membranı direk geçemezler
- Bu nedenle negatif yükleri membranın dış yüzünde, pozitif yükleri membranın iç yüzünde biriktiren bir kapasitör görevi görür



Membran kapasitansı

- Bu özelliği nedeni ile fosfolipidler zar boyunca yük ayrılmasına izin veren membran (C_m) kapasitif özelliğini sağlar (C_m)
- Her bir plaka sabit potansiyele sahip bir iletken
- Plakalar arasındaki potansiyel farkı V

- Voltaj farkı, membran boyunca yük ayrışımı sonucu kurulur
- Hücre membranı çok incedir-paralel plakalı bir kapasitör gibi davranır
- Bir kondansatörün plakası üzerindeki voltaj ve tabakalarına toplanan yük arasındaki ilişki

$$Q = C_m \times E_m$$

Membranın kapasitif özellikleri

- $C_m = 1\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ($1\mu\text{F} = 1 \times 10^{-6} \text{ F}$)
- $E_m = -72\text{mV}$
- $Q = C_m \times E_m$
- $Q = 1 \times 10^{-6} \text{ F}/\text{cm}^2 \times 72 \times 10^{-3} \text{ V}$
 $Q = 72 \times 10^{-9} \text{ C}/\text{cm}^2$

- Transmembran voltajını değiştirmenin tek yolu membran boyunca yük dağılımını değiştirmektir
- Membranda biriken yükler zamanla değiştiğinde (dQ/dt), membran potansiyeli de zamanla değişir (dE_m/dt)
- **Zamanla yükteki değişim kapasitif akımı olarak tanımlanır (I_c)**

$$Q = C_m \times E_m$$

$$I_c = dQ/dt = C_m(dE/dt)$$

- $E_m = -80\text{mV}$, membranın kalınlığı 60\AA ise membran voltaj gradienti 133.000 V/cm
 - Hücre membranı çok büyük voltaj gradientlerini bile tolare edebilir

Membran Direnci

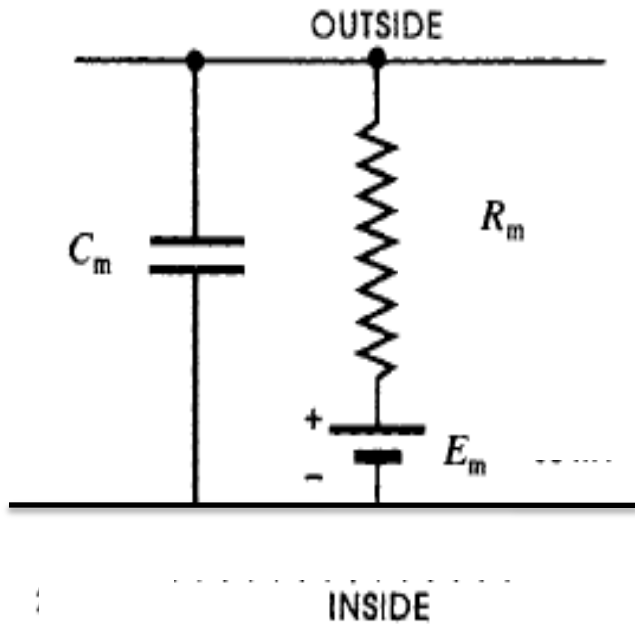
- Hücre zarında mozaik dağılım gösteren proteinlerin varlığı membrana az da olsa bir direnç kazandırmaktadır ve hücre zarının özelliklerinden bahsederken direnci de hesaba katmak gerekir:
- Yapay lipid bilayer membranının
 - spesifik rezistansı yaklaşık (R_M) 10^6 - $10^9 \Omega \text{ cm}^2$

- Kapasitans lipid tabakanın matrisine bağlıdır
- İletkenlik lipid tabakaya gömülü proteinlerden kaynaklanmaktadır

Denge Potansiyelleri

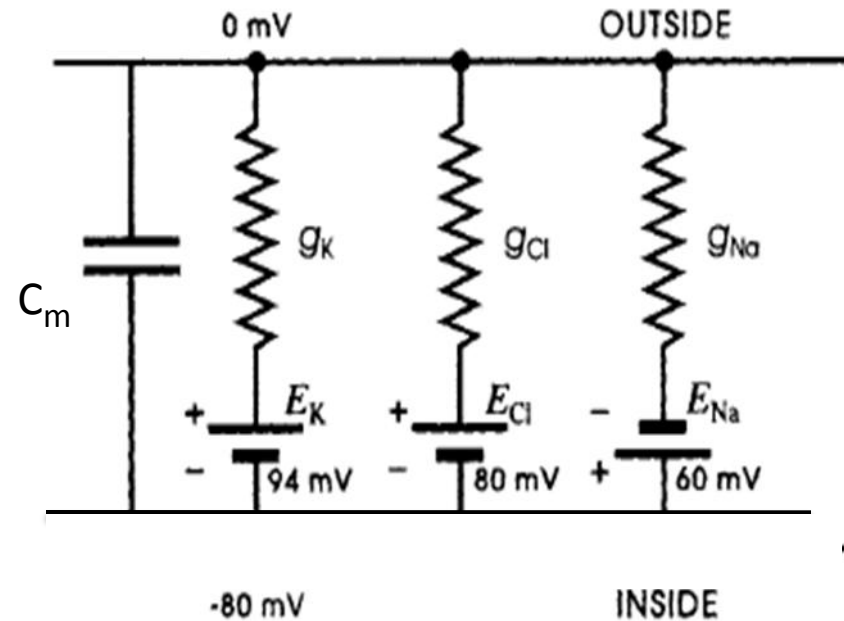
- Elektriksel Eşdeğer Devre
- Nernst Denklemi

Elektriksel Eşdeğer Devre



- Dinlenme halinde bir hücrenin temsili eş değer devresi
 - Membrana paralel bağlı bir direnç (R_M) ve kondansatör (C_M) ile temsil edilmiştir

- Dinlenimdeki membran için eşdeğer devresi 3 ana bileşenden oluşmaktadır:
- K, Na ve Cl iyonlarının her biri membran iletkenliğini sağlamaktadır
- Bu iyonların geçirgenlikleri g_K , g_{Cl} ve g_{Na}
- Pillerin yönleri iyonların konsantrasyon gradientlerine ve yüküne dayanmaktadır



Nernst Denklemi

- İyonlar hücre membranı boyunca eşit olmayan bir şekilde dağılmış olduğundan, denge potansiyeli Nernst denkleminde herhangi bir iyon türü için hesaplanabilir

$$E_i = -\frac{RT}{zF} \ln \frac{C_{dış}}{C_{iç}}$$

- C_i iyonun hücre içi konsantrasyonu
- C_o iyonun hücre dışı konsantrasyonu
- R gaz sabiti (8.3 J/mol.K),
- T mutlak sıcaklık ($K = 273 + ^\circ C$)
- F Faraday sabiti (96 500 C/eq),
- z valans elektronu

$$E_i = -\frac{RT}{zF} \ln \frac{C_{dış}}{C_{iç}}$$

$$E_i = \frac{-61 \text{ mV}}{z} \log \frac{C_{dış}}{C_{iç}}$$

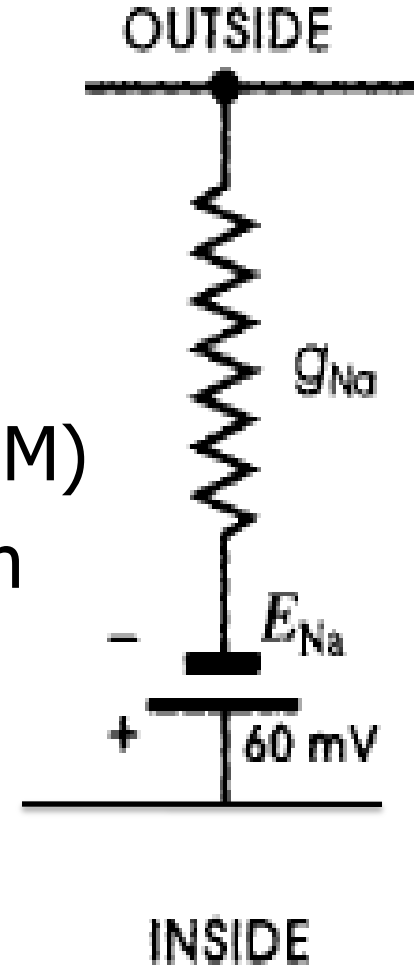
- Çok büyük bir potansiyel fark oluşturmak için sadece küçük bir yük ayrışması gereklidir

$$E_M = Q / C_M$$

- C_M *membran kapasitansı*

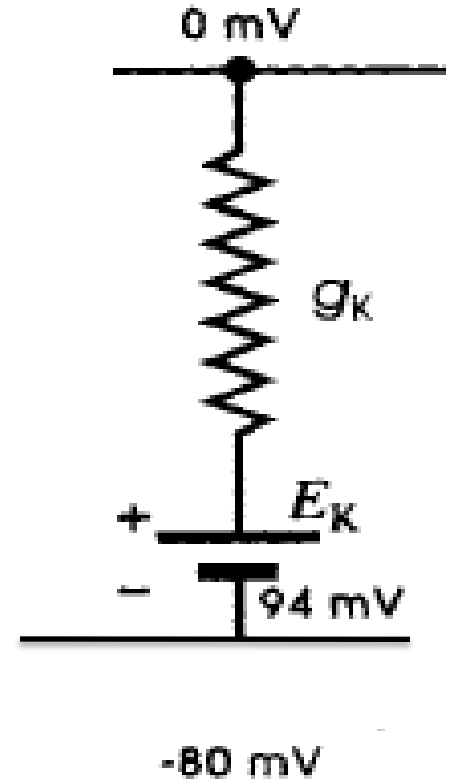
$$E_{Na} = +60 \text{ mV}$$

- Na^+ iyonunun konsantrasyonu h.dışında (145 mM) h.içine (15 mM) göre daha yüksek olduğu için pilin (E_{Na}) pozitif ucu h.içinde yer alır



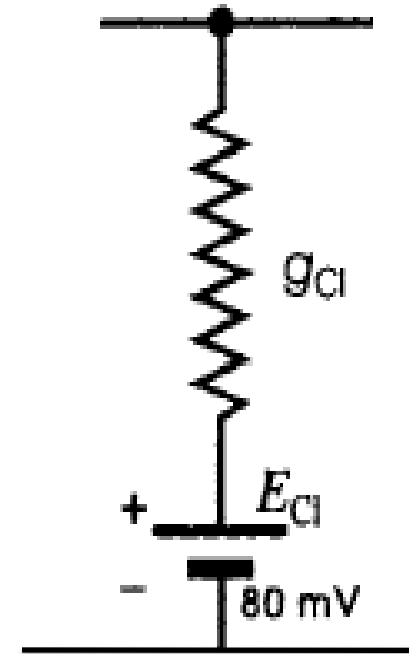
$$E_K = -94 \text{ mV}$$

- K^+ iyonunun konsantrasyonu h.içinde (150 mM) h.dışında (4.5 mM) göre daha yüksek olduğu için pilin (E_{Na}) negatif ucu h.içinde yer alır



$$E_{Cl} = -80 \text{ mV}$$

- Cl^- h.dışında 100 mM h.içinde 5 mM konsantrasyona sahip olduğundan pilin negatif ucu hücre içinde yer alır



Elektrokimyasal Sürücü Kuvvet ve Membran İyonik Akımları

Elektrokimyasal sürücü kuvvet

- Her türlü iyon için elektrokimyasal sürücü kuvvet denge potansiyeli E_i ve membran potansiyeli E_m arasındaki farktır
- Toplam sürücü kuvvet iki kuvvetin toplamıdır:
 - Elektriksel kuvvet
 - Dinlenim halindeki bir hücrede negatif potansiyel pozitif yükleri çekme halinde
 - Difüzyon kuvveti
 - Konsantrasyon gradientine dayalı

$$\text{Sürücü kuvvet} = E_m - E_i$$

- Dinlenme halinde Na^+ iyonu için sürü kuvvet

$$(E_m - E_{\text{Na}}) = -80\text{mV} - (+60\text{mV})$$

$$(E_m - E_{\text{Na}}) = -140\text{mV}$$

- Na^+ için sürücü kuvvetin içe doğru

- Dinlenme halinde K^+ iyonu için sürücü kuvvet

$$(E_m - E_K) = -80 \text{ mV} - (-94 \text{ mV})$$

$$(E_m - E_K) = +14 \text{ mV}$$

K^+ iyonu için sürücü kuvvet daha küçük ve h.dışına doğru

- Dinlenme halinde Cl^- iyonu için sürücü kuvvet neredeyse sıfırdır Cl iyonu pasif olarak dağılır

$$(E_m - E_{\text{Cl}}) = -80 \text{ mV} - (-80 \text{ mV})$$

$$(E_m - E_{\text{Cl}}) = 0$$

Membran İyonik Akımları

- Ohm kanunu

$$I=V/R$$

$$I=V/(1/g)$$

$$I= g.V$$

$$\mathbf{I_i = g_i (E_M - E_i)}$$

- Bu üç iyon için net akım

$$I_{Na} = g_{Na} (E_M - E_{Na})$$

$$I_K = g_K (E_M - E_K)$$

$$I_{Cl} = g_{Cl} (E_M - E_{Cl})$$

- Dinlenme halinde
 - Cl^- akımı ihmal edilebilir
 - Na^+ akımı (içeride)
 - K^+ akımı (dışarıya)
 - sürekli dinlenme potansiyelini korumak için eşit ve zıt olmalı

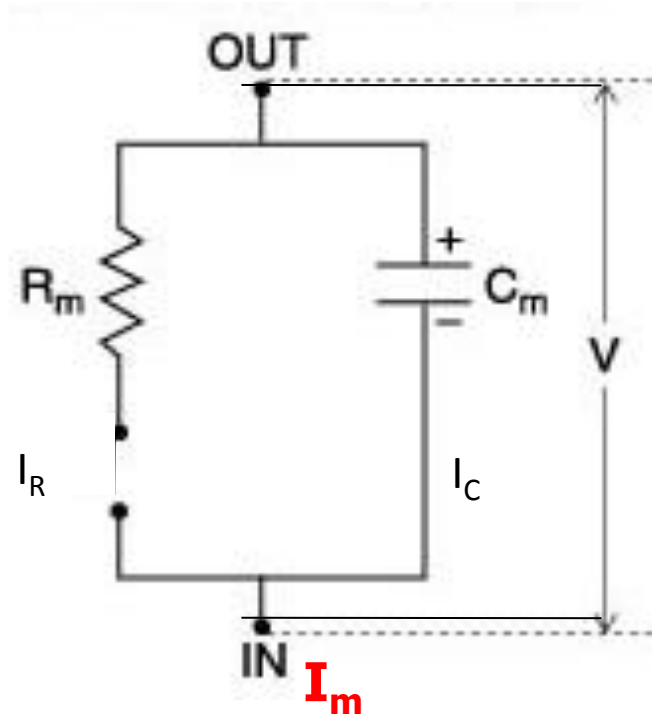
$$I_{\text{K}} = - I_{\text{Na}}$$

$$g_{\text{K}} (E_{\text{M}} - E_{\text{K}}) = g_{\text{Na}} (E_{\text{M}} - E_{\text{Na}})$$

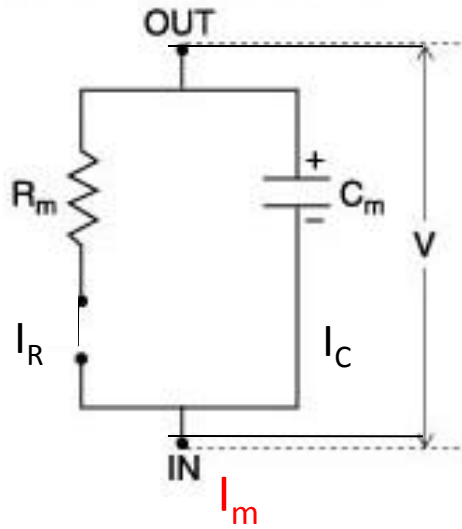
Dinlenme halinde , Na iyonları için sürücü güç K için olandan çok daha büyük, $g_{\text{K}} \gg g_{\text{Na}}$, akımlar eşittir

- ***Dinlemin zar potansiyeli E_{Na} dan çok uzak, E_K ya yakın olma sebebi***
- Sızıntı kanallarından h.dışına K, h.içine Na girişi
- Na^+ iyonunun K^+ iyonunun sürücü kuvvetine oranı 10 (-140 mV/-14 mV),
- İletkenlik oranı (g_{Na}/g_K) 1:10

- İki tip akım
 - kapasitif akım
 - Rezistif akım



- Bir hücre membranının içi ve dışı arasına akım uygulanırsa, akım: rezistif ve kapasitif akım olmak üzere ikiye ayrılır
- R_m membranın Na^+ , K^+ ve Cl^- iyonlarına gösterdiği toplam direnç



$$I_m = I_R + I_C$$

$$I_R = E_m/R_m \quad I_C = C_m \frac{dE_m}{dt}$$

$$I_0 = I_R + I_C$$

$$I_0 = E_m/R_m + \frac{C_m dE_m}{dt}$$

$$\frac{C_m dE_m}{dt} = (I_0 - E_m/R_m)$$

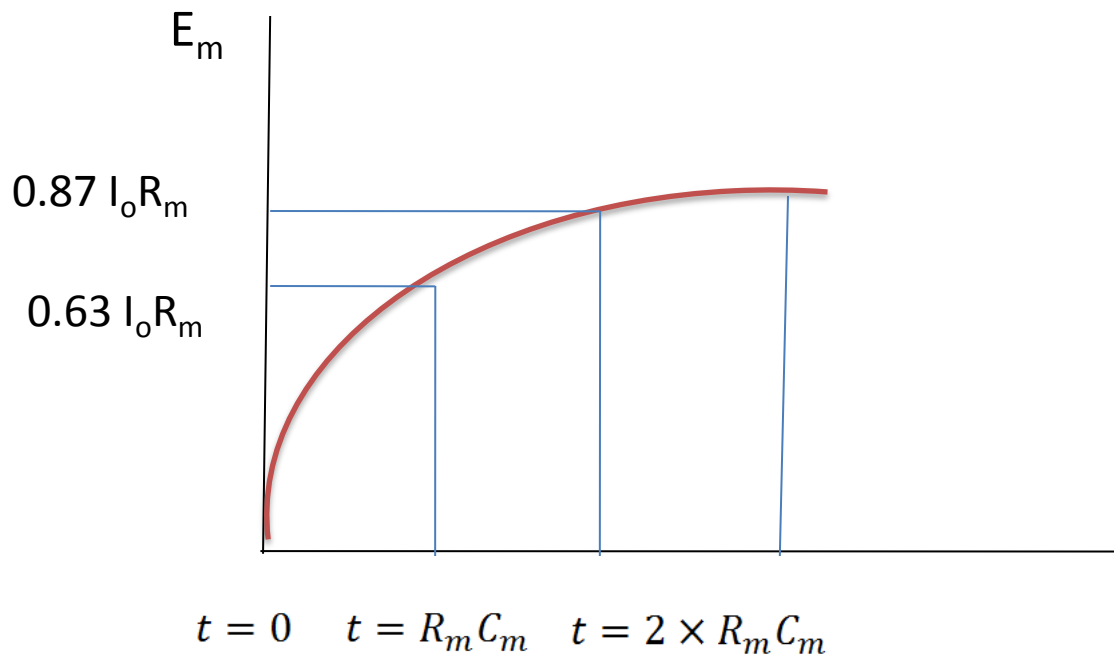
$$\frac{dE_m}{(I_0 - E_m/R_m)} = \frac{dt}{C_m}$$

$$E_m = I_0 R_m (1 - e^{-t/R_m C_m})$$

$$t = 0 \quad E_m = 0 \quad E_m = I_0 R_m (1 - e^{-t/R_m C_m})$$

$$t = R_m C_m \quad E_m = I_0 R_m (1 - e^{-1}) = 0.63 I_0 R_m$$

$$t = 2 \times R_m C_m \quad E_m = I_0 R_m (1 - e^{-2}) = 0.87 I_0 R_m$$



- Akım pulsu kesildiğinde, membran potansiyeli direnç üzerinden kapasitörün boşalması gibi eksponansiyel olarak azalır
- τ , zaman sabiti, devredeki direnç ve kapasitör ile belirlenir
- $\tau = R_m \times C_m$

$$E_m = I_0 R_m \left(1 - e^{-t/R_m C_m} \right)$$

Aktif akımlar

- Elektronötral pompa için

Canlı hücrelerde, sürekli dinlenme zar potansiyelini elde etmemiz için bu pompa olmalıdır

Kararlı durumda, pasif ve aktif akımların toplamı sıfır olmalıdır

$$I_i = I_{i(\text{pasif})} + I_{i(\text{aktif})} = 0$$

$$I_{\text{Na}} = I_{\text{Na}(\text{pasif})} + I_{\text{Na}(\text{aktif})} = 0$$

$$I_{\text{Na}(\text{pasif})} = -I_{\text{Na}(\text{aktif})}$$

Aktif Na^+ akımı, pasif Na akımının büyüklüğüne eşit fakat zıt yönlü

$$I_K = I_{K(\text{pasif})} + I_{K(\text{aktif})} = 0$$

$$I_{K(\text{pasif})} = -I_{K(\text{aktif})}$$

- Elektronötral pompa için
 - Kararlı durumda, pasif akımlardan taşınan net yük sıfır olmalıdır

$$\sum I_i = 0 \quad \text{ya da} \quad \sum I_K + I_{Na} + I_{Cl} = 0$$

$$\begin{array}{l}
 I_K = g_K(E_m - E_K) \\
 I_{Na} = g_{Na}(E_m - E_{Na}) \\
 I_{Cl} = g_{Cl}(E_m - E_{Cl})
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} I_K \\ I_{Na} \\ I_{Cl} \end{array}} \right\} \sum I_K + I_{Na} + I_{Cl} = 0$$

$$g_{Na}(E_m - E_{Na}) + g_K(E_m - E_K) + g_{Cl}(E_m - E_{Cl}) = 0$$

$$I_{Cl}=0 \text{ olduğunda } g_{Na}(E_m - E_{Na}) + g_K(E_m - E_K) = 0$$

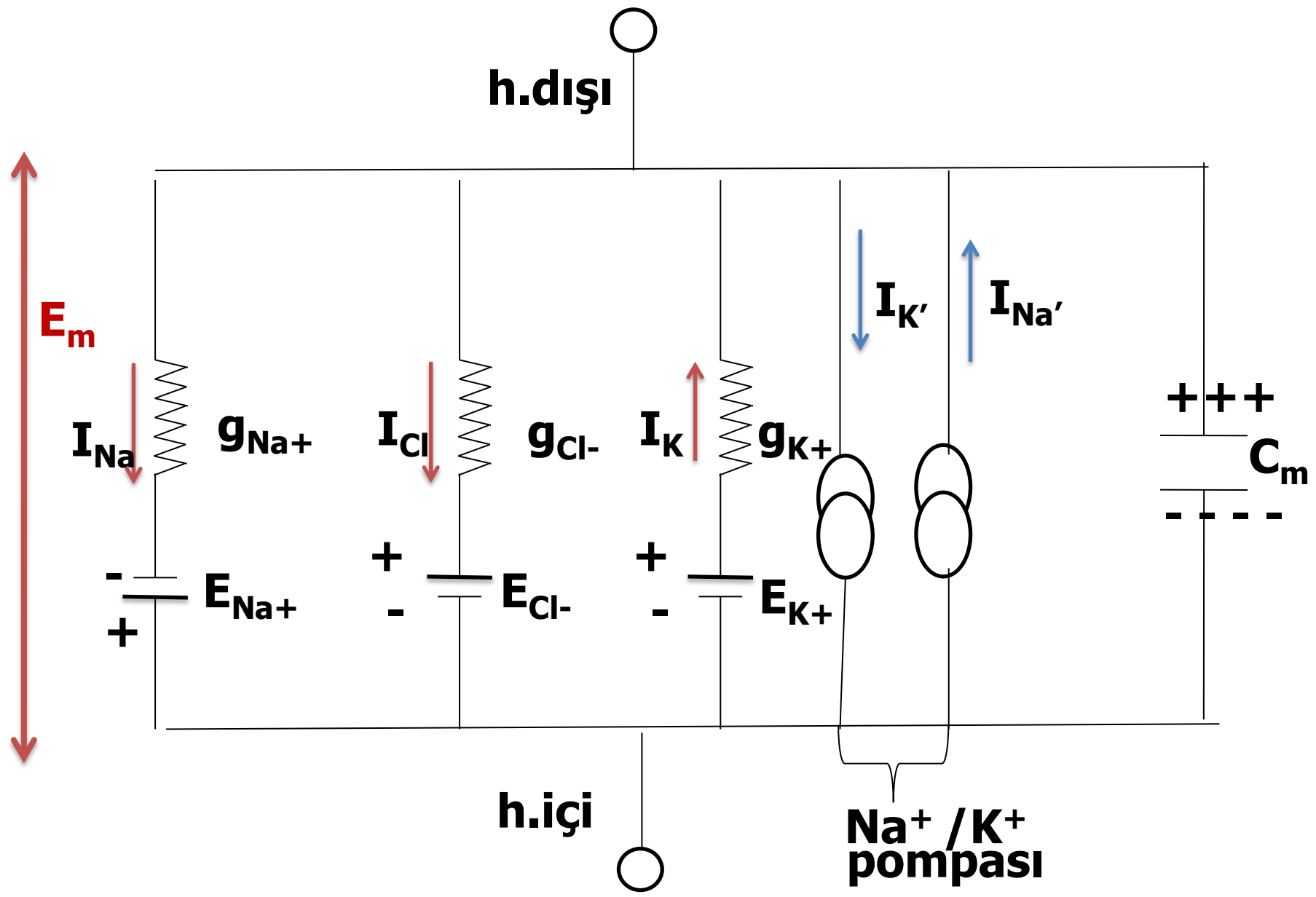
$$g_{Na}(E_m - E_{Na}) = -g_K(E_m - E_K)$$

$$E_m = \frac{E_K + E_{Na} \left(\frac{g_{Na}}{g_K} \right)}{1 + \frac{g_{Na}}{g_K}}$$

Özet

- Hücre zarının yapısal ve kimyasal bileşimi ile membranın rezistif ve kapasitif özelliklerinin ilişkisi
- Hücre içi ve dışı iyon konsantrasyonları
- Net iyonik hareket elektrokimyasal gradient yönüne bağlı olarak, zar üzerinde içe veya dışa doğru olabileceğini

- Cl^- iyonu membran potansiyeline göre zarın iki yüzünde pasif olarak dağıldığını
- Dinlenme haline Na^+/K^+ pompasının katkısı
 - İçeri dışarı pompaladığı Na ve K oranı
 - Pompanın devir hızı
 - Pompa sayısı
 - Membran direncininin büyüklüğü



Elektriksel Sinyalin Esası

