

Başkent Üniversitesi Tıp Fakültesi
Fizyoloji Anabilim Dalı

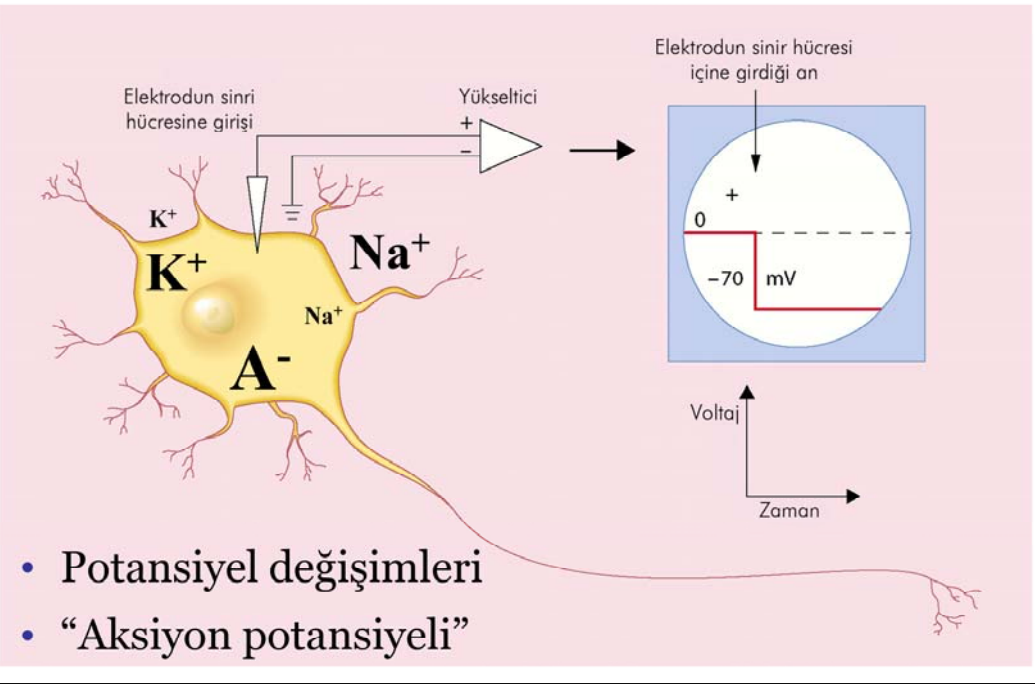


BİYOELEKTRİK POTANSİYELLER

Dr. Sinan Canan
sinancanan@gmail.com

Bu derste, canlı tüm hücrelerin temel ortak özelliklerinden birisi olan hücresel elektrik potansiyellerinin oluşumunu ve bu potansiyellerle yapılan hücresel haberleşmenin temellerini inceleyeceğiz.

Zar Potansiyeli: Yaşamın Temel Şartı!



Bütün canlı hücrelerde, hücrenin içi ve dışı arasında, iyon dağılımı farklılıklarından ötürü bir elektriksel yük farkı bulunur. Bu fark, hücre zarının iki yanı arasında elektriksel bir potansiyel oluşturduğundan, bu potansiyele zar potansiyeli adını veriyoruz.

Herhangi canlı bir hücrenin içine, iç ve dış ortam arasındaki yük farkını ölçebilecek bir kayıt elektrodu yerleştirecek olursanız hücrenin iç kısmının dışına göre daha fazla negatif yüklü olduğunu görebilirsiniz. Bu negatifliğin temel nedenleri:

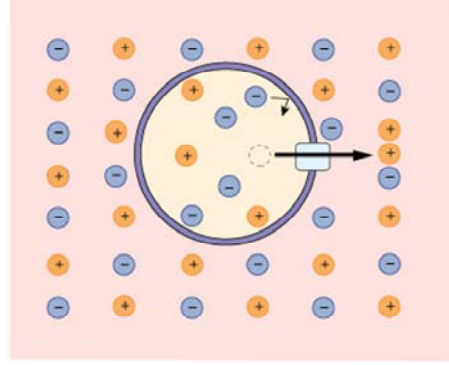
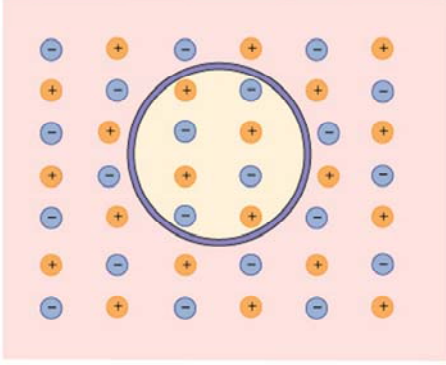
1. Hücrenin içinde sentezlenen ve hücreden dışarı çıkamayan negatif yüklü proteinlerin varlığı
2. Hücrenin iç ve dışı arasındaki anorganik iyon dağılımlarındaki eşitsizlik (Hücre içinde potasyum iyonu miktarı dışarıya göre çok yüksekken, sodyum iyonları tersine hücre içinde dışarıya göre çok daha azdır.

İşte bu nedenlerden ötürü canlı bir hücrenin içi her zaman dışarıya göre daha negatif bir değerdedir. Bu potansiyel farkı tüm hücrelerde bulunurken, bazı hücreler bizzat bu potansiyellerini değiştirerek diğer hücrelerle elektriksel olarak haberleşebilmektedir. Biz bu tip hücrelere **uyarılabilir hücreler** adını veriyoruz (Sinir ve kas hücreleri gibi)

Hücrede Yük Dağılımı

Elektriksel ve kimyasal denge durumu

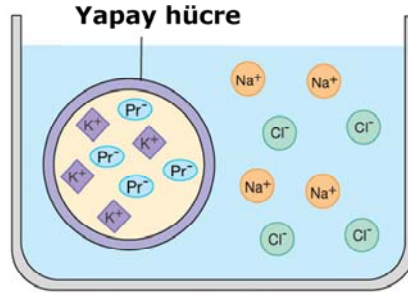
Elektriksel ve kimyasal dengesizlik



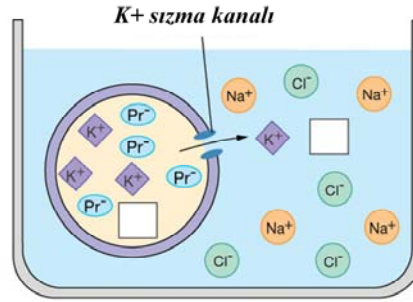
Bu şemanın sol tarafında içi ve dışı elektriksel olarak nötr bir tuz çözeltisiyle dolu bir yapay hücre görülüyor. Eğer bu yapay hücrenin zarına pozitif yükleri dışarı atacak bir pompalama mekanizması yerleştirilirse, sonuçta hücrenin içi, dışına göre daha negatif yüklü bir hale gelir. İşte canlı hücrelerdeki zar potansiyeli de buna benzer bir elektrojenik (elektriksel yük farkı üreten) mekanizma ile gerçekleşir.

Zar Potansiyelleri: Difüzyonun Etkisi

Elektriksel olarak nötr



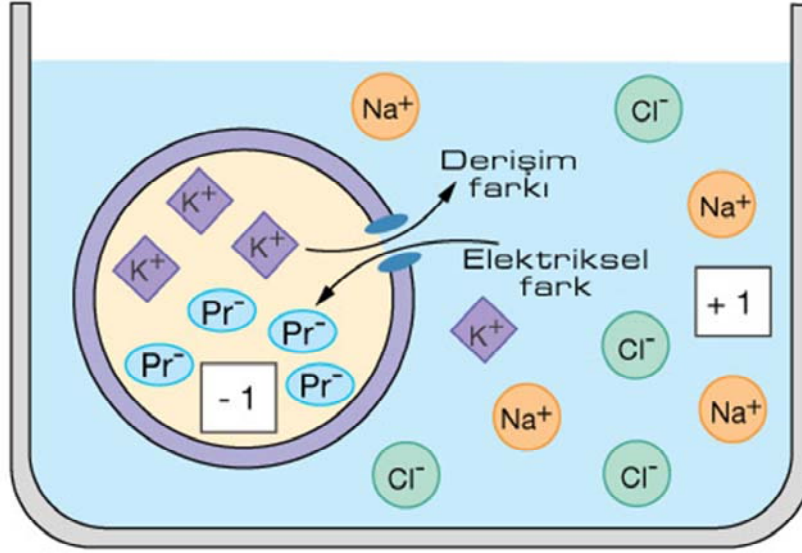
*K⁺ un
konsantrasyon farkı
nedeniyle dışarı
çıkışı*



Örneğimizi gerçek bir hücreye biraz daha benzeyecek şekilde geliştirecek;
Şeklin üst kısmında içi ve dışı birbirine göre elektriksel olarak yüksüz (nötr) bir yapay hücremiz var. Fakat burada hücre içinde birbirini dengeleyen artı yüklü potasyum iyonlarıyla eksi yüklü proteinler; dışında ise eşit miktarda birbirine zıt yüklü sodyum ve klor iyonları var (tuz çözeltisi).

Eğer bu hücrenin zarına sadece potasyumu geçirecek bir kanal açılırsa (altta), potasyum, difüzyon kuralları gereği, çok bulunduğu hücre içi ortamdan hiç bulunmadığı hücre dışı ortama hareket edecektir. Fakat bu durumda yük farkı ortadan kalkıp hücre içi gittikçe negatifleşeceği için, hücre içindeki oluşan negatiflik, pozitif yüklü K iyonlarını çekerek onların dışarı difüze olmasını engelleyecektir. Bu durumda potasyum iyonu nasıl bir hareket sergiler?

Zar Potansiyelleri: Difüzyonun Etkisi



Bu durumda, potasyum iyonlarının hareketi iki farklı kuvvetin etkisindedir: Derişim farkı K iyonlarını dışarı çıkmaya zorlarken, elektriksel fark içeride tutmaya çalışır. İşte K iyonları, bu iki kuvvetin birbirine denk olacağı bir denge noktasına kadar net olarak dışarıya sızar ve sonra iki kuvvetin eşitlenmesi ile bir denge noktasına ulaşır. Bu denge, elektokimyasal denge denen dinamik bir dengedir ve hücreye girip hücreden çıkan potasyumlar birbirine eşit olduğundan K iyonlarının net difüzyonu sıfır olur. Bu durumda hücre içi ve dışı arasında meydana gelen potansiyel farkı ise "potasyumun denge potansiyeli"ne eşit olacaktır (denge durumunda hücre içi artık dışarıya göre daha negatiftir).

Difüzyon Potansiyeli ile Derişim farkının ilişkisi: Nernst Denklemi

- İyonun zardan net difüzyonunu önleyebilecek potansiyel farkı-**Nernst potansiyeli**

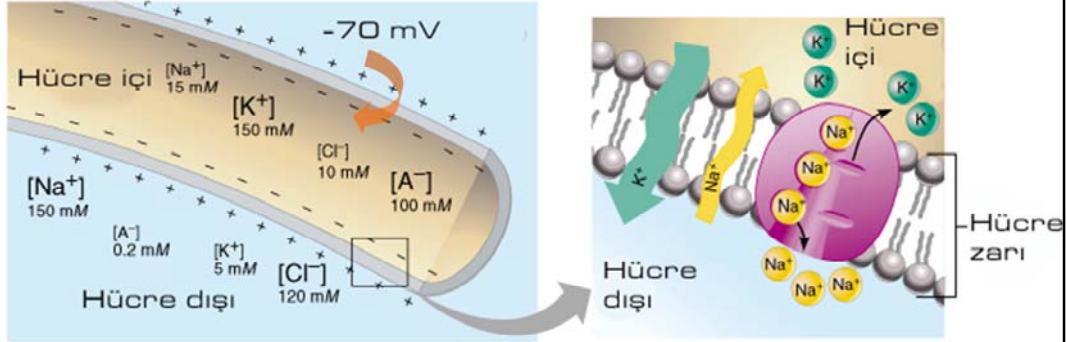
$$EMF(mV) = \pm 61 \cdot \log \frac{Konsantrasyon_{iç}}{Konsantrasyon_{dış}}$$

- İşaret (-) yüklü iyon için “+”; (+) yüklü iyon için “-”

$$\begin{aligned} K^+ \text{ için denge potansiyeli} &= -90 \text{ mV} \\ Na^+ \text{ için denge potansiyeli} &= +60 \text{ mV} \end{aligned}$$

Nernst denklemi, hücrelerdeki iç ve dış iyon derişimlerinden yola çıkarak iyonların denge potansiyellerini hesaplayabilmemizi sağlar. Bu denklemi canlı bir hücrede uyguladığımızda, derişim değerleri bize K iyonları için -90 mV'luk; Na iyonları için ise +60 mV'luk bir denge potansiyeli verir. Yani bir hücrenin zarında sadece K iyonları serbestçe içeri-dışarı hareket ederse, K iyonlarının difüzyonu, hücre içi -90 mV olana kadar devam eder. Fakat aynı durum Na için söz konusu olursa bu durumda hücre içi +60mV daha pozitif olana kadar Na hücre içine difüze olacaktır (*Na iyonlarının hücre dışında, K iyonlarının ise içinde fazla miktarda bulunduğunu hatırlayınız*)

Zar Dinlenim Potansiyeli



- **Donan dengesi**
 - Na⁺, K⁺ difüzyonu
 - Na⁺- K⁺ ATPaz pompası
 - Anyonların (A⁻) katkısı

Bu tip bir denge, kimyada Donan dengesi olarak bilinir. Bu mantığı temel alan bir mekanizma ile canlı hücrelerin içi ve dışı arasında bir potansiyel farkı meydana gelir. Bu farkın üç önemli bileşeni sodyum ile potasyumun difüzyonu, sodyum-potasyum ATPaz pompası ve hücre içi negatif yüklü anyonların varlığıdır.

Zar Potansiyeli

- Zar potansiyel değişimi
 - Zarın iyonlara geçirgenliğinin değişmesi
 - Zardan geğen iyon derişimlerinin değişmesi
- **Sinyal tipleri:**
 - Dereceli potansiyeller
 - Aksiyon potansiyeli

Bazı canlı hücreler hücre zarlarının iki yanındaki bu potansiyel değişimlerini ihtiyaca veya gelen uyarımlara göre değiştirebilme yeteneğne sahiptir. Bu şekilde davranan ve elektriksel potansiyel değişiklikleri ile fizyolojik işlevlerini yerine getiren hücrelere uyarılabilir hücreler diyoruz.

Bu elektriksel değişikler hücre zarının sodyum, potasyum, klor gibi iyonlara olan geçirgenliğinin değiştirilmesi ile gerçekleşir. Dereceli potansiyeller ve aksiyon potansiyeli olmak üzere iki başlık altında incelenebilirler.

Zar Potansiyeli Değişimleri

- **DERECELİ POTANSİYELLER**
 - **Depolarizasyon**
 - **Repolarizasyon**
 - **Hiperpolarizasyon**

Hücre zarında meydana gelen potansiyel değişiklikleri üç ana olayı içerir:

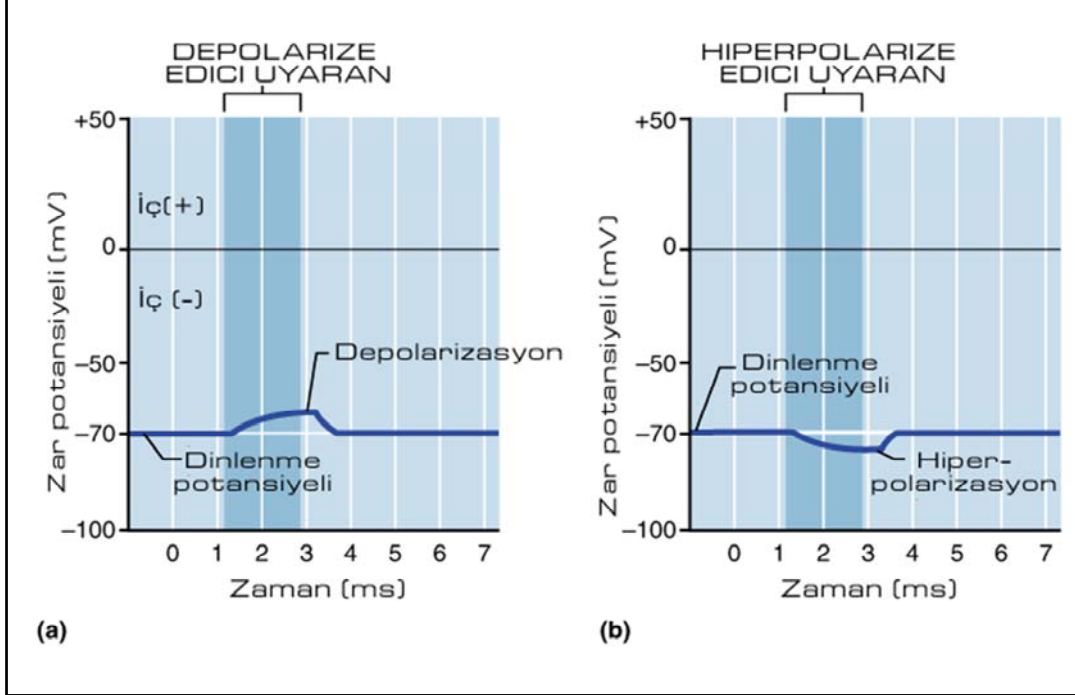
Depolarizasyon: Hücre zarının iki yanı arasındaki potansiyel farkının (kutuplaşmanın-polarizasyonun) azalması durumuna verilen addır.

Depolarizasyon, bir hücrenin elektirksel olarak uyarılması anlamına gelir.

Repolarizasyon: Kutuplaşmanın tekrar dinlenme halindeki değerine dönmesi, zar potansiyelinin tekrar sağlanması sürecidir.

Hiperpolarizasyon: kutuplaşmanın yahut polarizasyonun, hücrenin içi ve dışı arasındaki farkı artıracak şekilde artmasıdır. Hiperpolarizasyon hücre içinin dışına göre, dinlenme durumuna nazaran daha fazla negatif olmasıyla sonuçlanır.

Dereceli Potansiyeller



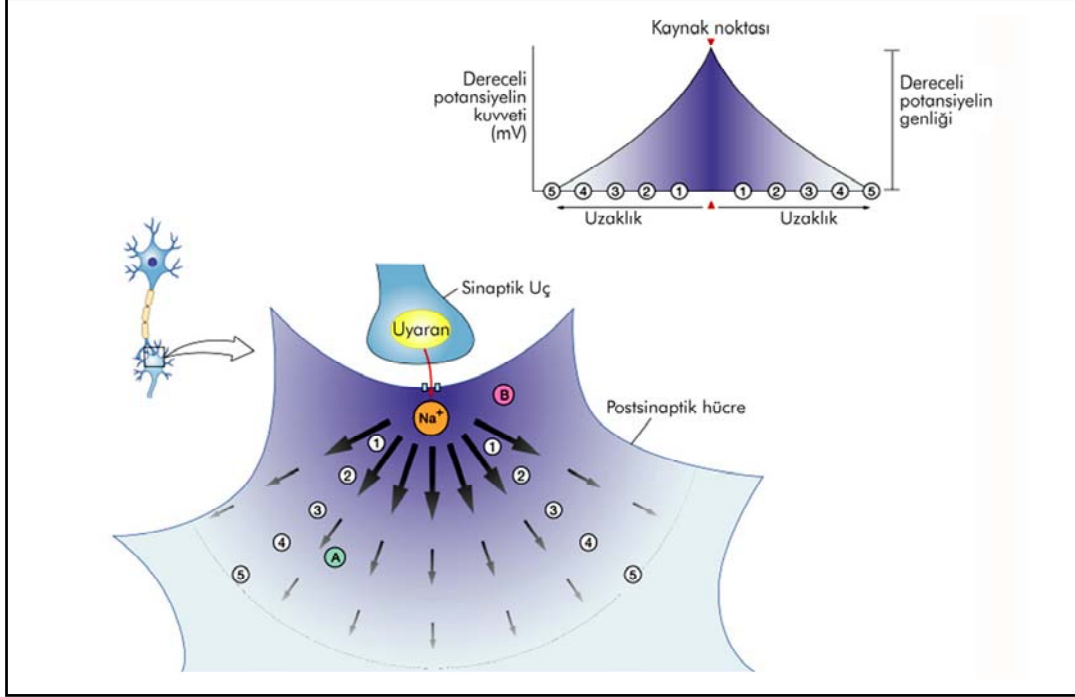
Soldaki voltaj-zaman grafiği bir uyarana bağlı olarak zarda meydana gelen depolarizasyonu; sağdaki ise hiperpolarizasyonu gstermektedir. Uyarım kesildiğinde potansiyellerin hemen eski dinlenme durumuna dnduğüne dikkat edin. Bu canlı hcrenin önemli bir özelliğidir ve en büyük sebebi hücre zarında sürekli çalışan Na/K-ATPaz pompalarının faaliyetidir.

Dereceli Potansiyeller

- DERECELİ POTANSİYELLER
- Yerel, kısa süreli değişimi
- Mesafeyle etkisi azdır
 - *Potansiyelin yüksekliği, neden olan uyarının şiddeti ile ilişkilidir*
 - *Yeterli şiddete ulaşabilen dereceli potansiyeller aksiyon potansiyelini başlatabilir*

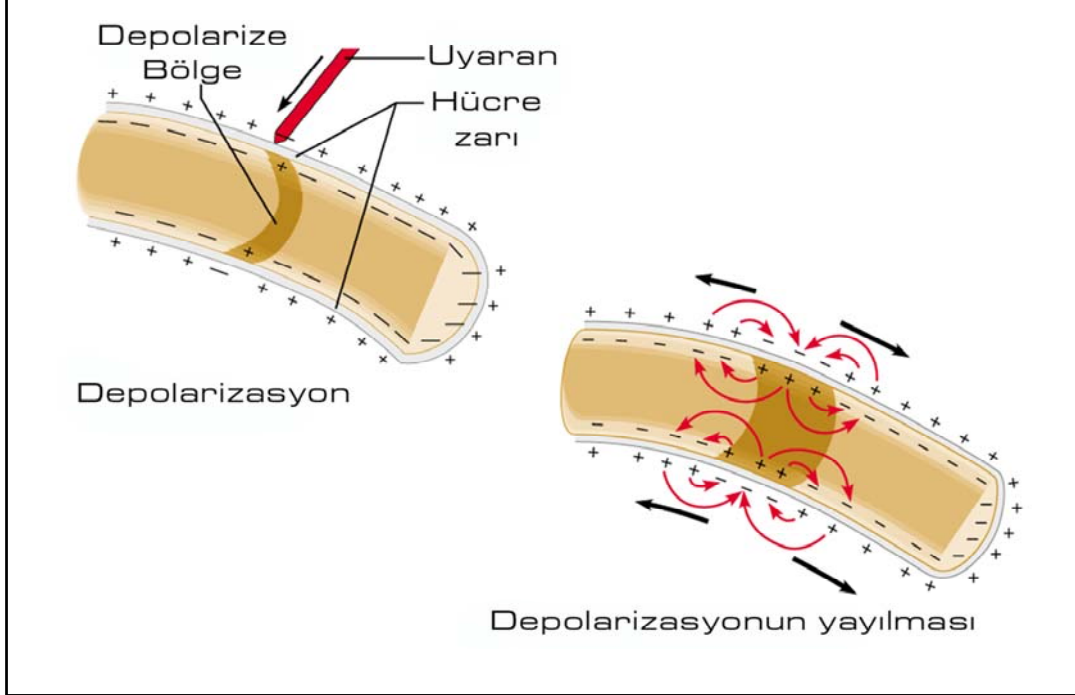
Dereceli potansiyellerin etki mesafesi kısıdır ve şiddetleri uyarının şiddetine göre değişir. Çok uzun mesafelere yayılamayan bu potansiyeller hücreler arası iletişim için de uygun değildirler fakat, aksiyon potansiyelinin temelini oluşturmaları ve hücrenin uyarılabilirlik düzeyini belirlemeleri ağısından önemlidirler.

Dereceli Potansiyeller



Hücrenin bir başka hücreden aldığı mesajla oluşturduğu dereceli potansiyelin şiddeti kaynaktan uzaklaştıkça hızla azalır. Burada, hücre içine sodyum akışı ile meydana gelen ve “eşik altında” kalan (bkz. Aksiyon potansiyeli) bir dereceli potansiyelin mesafeyle zayıflaması görülüyor.

Dereceli Potansiyeller



Dereceli potansiyeller hücrelere yapılan kimyasal, mekanik, elektriksel etkilerle oluşturulabilir. Burada, fiziksel temas yoluyla hücre yüzeyinde pozitif yüklü iyon (örneğin sodyum) kanalları açılan bir hücrede oluşan depolarizasyon ve bunun yayılması şematik olarak görülüyor. Hücre içini artılaştırın depolarizasyon, komşu bölgelere de yük akışı şeklinde dağılır ve kısa bir zaman sınıra sönüme uğrar. Uyaran büyüdükçe, depolarizasyonun (içeri artı yük akışının) büyüklüğü de artar.

AKSİYON POTANSİYELİ

- Kas ve sinir hücrelerinde (uyarılabılır hücreler)
 - Dinlenim potansiyelinin 100 mV kadar değiştirilmesi
 - “Hep ya da hiç” kuralı
 - Sinir iletisi, kas kasılması vs. için gerekli

AKSİYON POTANSİYELİ

Uyarılabilir hücrelerin (sinir ve kas hücreleri gibi) oluşturduğu özel bir potansiyel değişikliğidir. Zarin dinlenme durumundaki voltajı 100mV kadar değişikliğe uğrar (örneğin, -70mV'dan +30mV'a kadar). Başladığı zaman hep tam büyüklüğünde oluşur veya hiç başlamaz; buna hep ya da hiç kuralı adı verilir. Sinir sisteminin uzun mesafelerle iletişim kurabilmesi, hareketlerin gerçekleşebilmesi için gerekli olan bir potansiyeldir.

İyon Kanalları

- İyon kanallarının tipleri:
 - Pasif (sızma) kanalları – her zaman açık
 - Kimyasal (ligand) kapılı kanallar – özgül nörotransmitter bağlanınca açılır
 - Voltaj-kapılı kanallar – membran potansiyeline cevap olarak açılır ya da kapanır

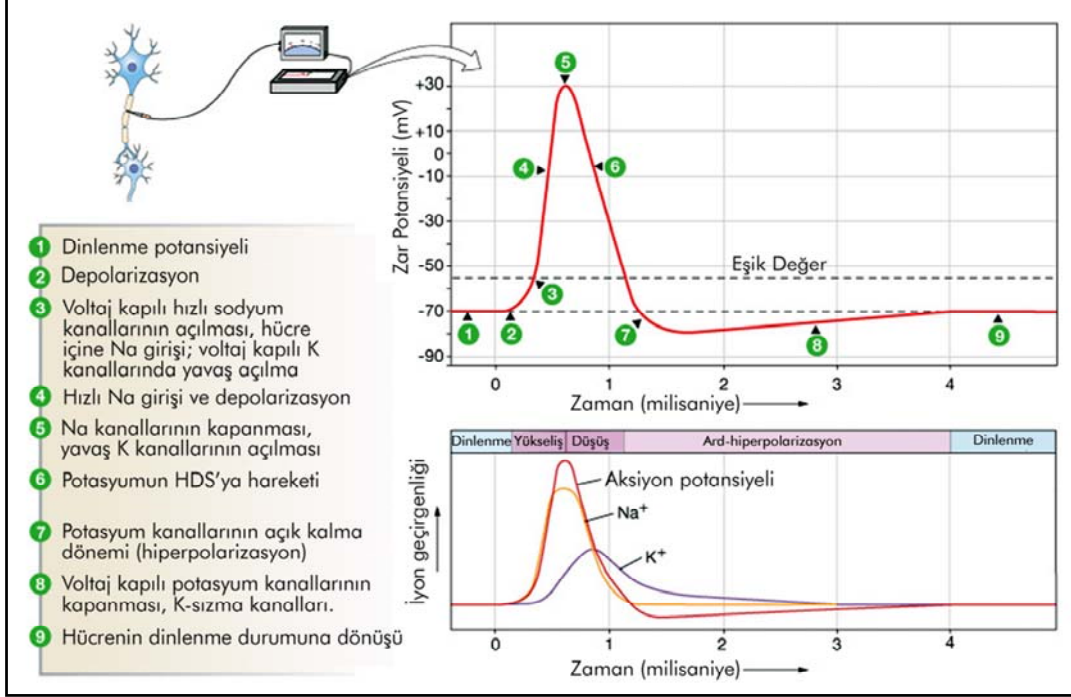
Üç tip önemli iyon kanalını burada bir kez daha hatırlayalım:

Pasif kanallar sürekli açıktır ve iyon sızdırırlar.

Kimyasal kapılı kanallar bir kimyasal maddenin etkisi ile açılıp kapanırlar ve hücre işlevlerinde ve iletişimde önemli yer tutarlar (sinapslarda olduğu gibi)

Voltaj kapılı kanallar ise zar voltajının belli değerlerinde açılıp kapanırlar. Buna bir örnek, yaklaşık -55mV değerinde açılıp $+30\text{mV}$ değerinde kapanan hızlı voltaj kapılı sodyum kanallarıdır ve aksiyon potansiyelinin de temelini oluştururlar.

Sinir Hücresinde Aksiyon Potansiyeli



Aksiyon potansiyelinin oluşumu:

Dinlenme durumundaki (1) bir hücre eğer "eşik değeri" denen bir değere kadar depolarize edilirse (2), hücre zarındaki **voltaj kapılı hızlı sodyum kanalları** açılır ve hücre içine kısa zamanda büyük miktarda sodyum akışı olur (3). Demek ki eşik değeri, hızlı voltaj kapılı Na kanallarının açılması için gereken voltaj değeridir. Bu sırada hücre içinde artı yük miktarı hızla artarak dik bir potansiyel değişimi oluşturur (4). Belli bir noktaya kadar yükselen bu potansiyel değişimi sabit bir noktada durur (5); çünkü bu noktada voltaj kapılı Na kanalları artık kapanır ve daha fazla sodyumun girişine izin vermez. Buna "tepeye vuruş" (overshoot) adı verilir. Potansiyelin yükselmesi sırasında aynı zamanda yavaş potasyum kanalları da açılmaya başlar ve böylece, Na iyonlarının hücre içine girişiyle oluşan potansiyel değişimi tekrar normale dönmeye başlar (6). Potasyum kanalları yavaş olduğundan, voltaja göre kapanmaları biraz daha uzun zaman alır ve bu yüzden potansiyel normalin daha altında bir seviyeye kadar düşer (7). Buna *ard-potansiyel* adı verilir. Daha sonra hem K kanallarının kapanması hem de Na/K-ATPaz pompasının sürekli faaliyetiyle potansiyel normale döner. Bu olayların hepsine birden aksiyon potansiyeli adı verilmektedir.

Aksiyon Potansiyeli ve İyon Kanalları

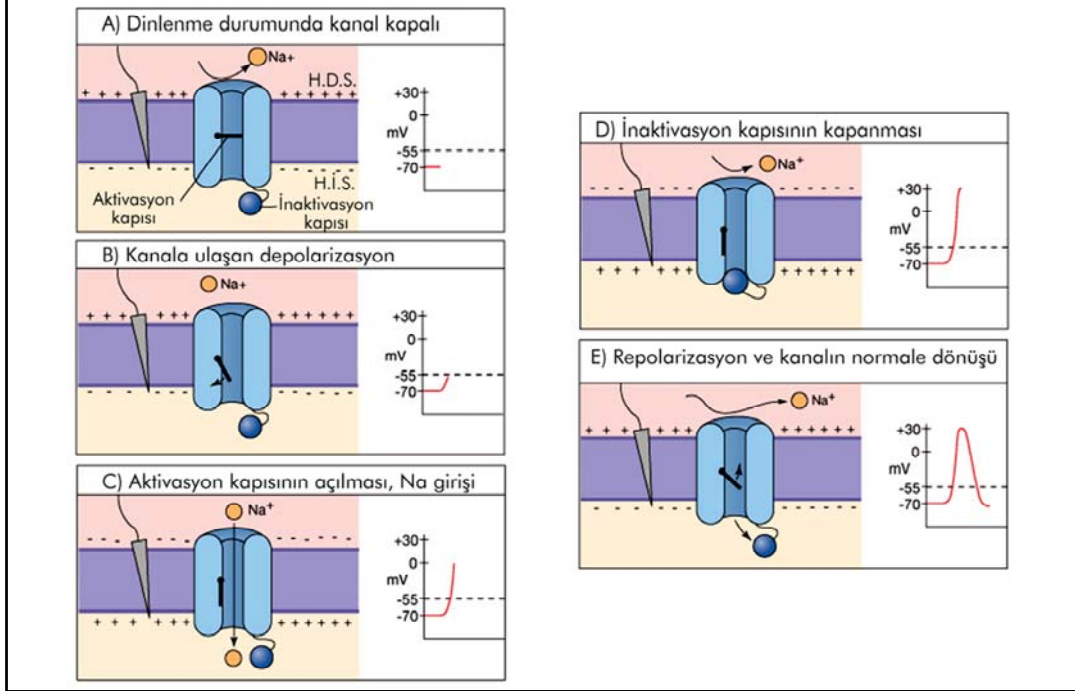
- Aksiyon potansiyelinde en önemli aktörler:
 - Voltaj kapılı Na⁺ kanalları
 - Voltaj kapılı yavaş K⁺ kanalları
 - Na⁺/K⁺ ATPaz pompaları

Özetlersek;

Aksiyon potansiyelinin en önemli üç aktörü

1. Voltaj kapılı hızlı Na kanalları: Eşik değerini, tepe noktasını belirlerler; bunlar olmazsa aksiyon potansiyeli oluşamaz (o yüzden sadece uyarılabilir hücrelerde bulunurlar)
2. Voltaj kapılı yavaş K kanalları: Aksiyon potansiyeli sırasında oluşan yük değişikliklerini nötralize etmekle görevlidirler ve hücre dışına K çıkışına sebep olurlar.
3. Na/K-ATPaz pompaları: Sürekli çalışan bu pompalar, potansiyeli oluşturan süreçlerin bitiminde zarı tekrar dinlenme potansiyeline döndürerek yeni bir aksiyon potansiyeli oluşturabilmek üzere hazır hale getirirler.

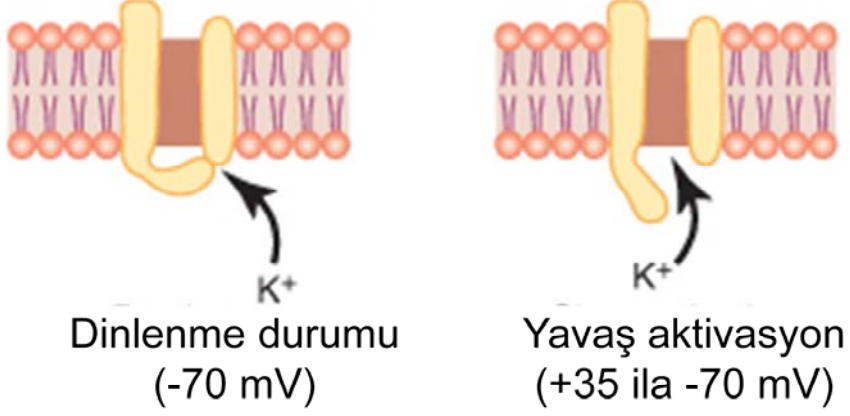
Voltaj Kapılı Sodyum Kanalları



Hızlı voltaj kapılı sodyum kanallarının çalışma prensibi.

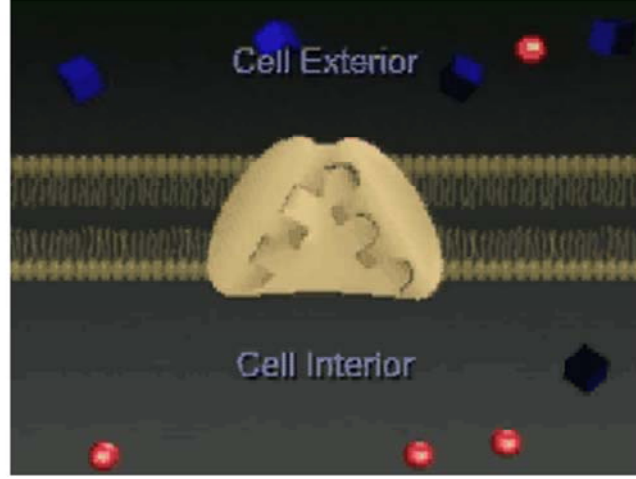
- Hücre zarında bulunan bu kanalların iki kapısı vardır: Kanal içinde yer alan aktivasyon kapısı; hücre içine bakan inaktivasyon kapısı. Hücre dinlenme durumunda iken orta kapak kapalı, iç kapak açıktır.
- Zar voltajı değişerek eşik değerine ulaşırsa, kanal içindeki aktivasyon kapısı açılır; çünkü bu kapı, bu voltaj değerinde açılmaya uygun bir moleküler yapıdadır.
- Açılan kanal boşluğundan sodyum hızla içeri akar ve artık hücrenin içi dışarıya göre pozitif yüklenmeye başlar.
- Hücre içi voltaj değeri dışarıya göre +30mV düzeylerine geldiğinde ise bu kez içteki inaktivasyon kapısı kapanır. Dolayısıyla bu noktada artık bu hücreyi bir daha uyarmak mümkün değildir. Sodyum girişi durur ve potansiyel değişimi sona erer. (*Aksiyon potansiyelinin bu safhasına o yüzden "mutlak duyarsız dönem" adı verilir*)
- Ardından, K⁺ iyonlarının çıkışıyla normale dönen zar potansiyeli dinlenme voltajına ulaştığında kanal tekrar dinlenme duruymundaki haline döner: aktivasyon kapısı kapanır; inaktivasyon kapısı açılır ve hücre yeni bir uyarana için hazır hale gelir.

Voltaj Kapılı Potasyum Kanalları



Voltaj kapılı K kanalları ise sadece tek bir kapağıya sahiptir ve dinlenme durumunda bu kanallar kapalıdır. Görüldüğü gibi depolarizasyon veya aksiyon potansiyeli sırasında geniş bir voltaj aralığında yavaşça açılıp kapanırlar ve böylece repolarizasyonu sağlarlar.

Sodyum Potasyum ATPaz Pompası



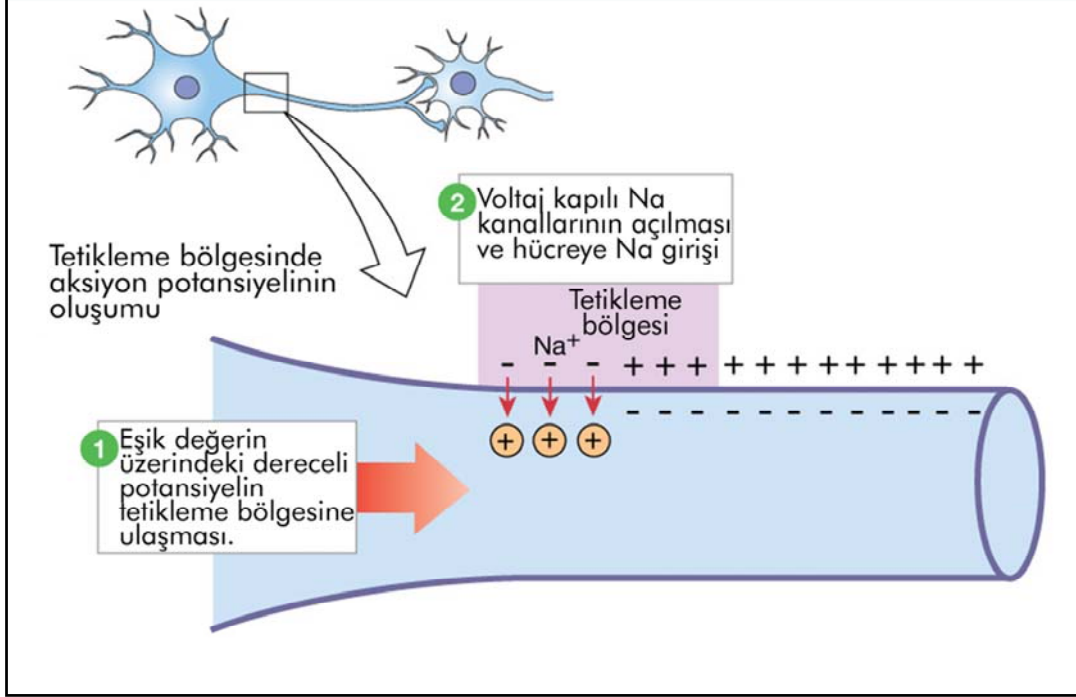
Sodyum-potasyum ATPaz pompası (animasyon):

Hücre zarında bulunan bu pompalar, harcanan bir ATP molekülü başına 3 adet sodyum iyonunu hücre dışına atarken iki adet potasyum iyonunu içeri alırlar. Böylece:

1. Hücreden sürekli +1 yükü dışarı atarak hücre içinin eksiliğine katkı sağlarlar (bu yüzden bu pompaya "elektrik üreten" anlamında "elektrojenik" pompa adı verilmektedir)
2. Hücre içinde dışarıya göre yüksek K ve düşük Na derişimini korurlar.

Bazal metabolizmamızdan elde edilen enerjinin büyük kısmını tüm hücrelerimizde bulunan bu pomapalar harcar ve böylece hücrelerimizin canlı kalmasını sağlarlar.

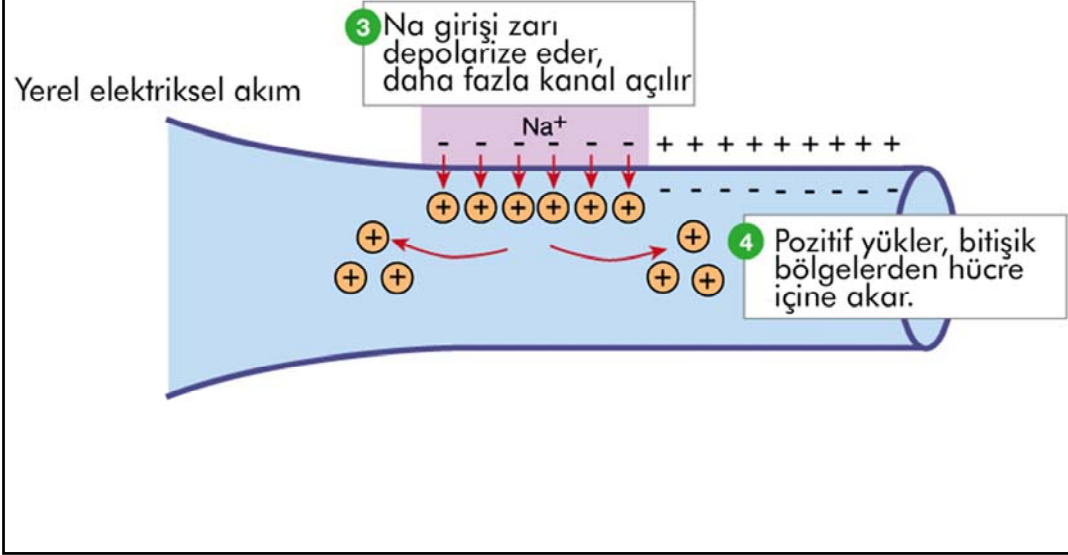
Aksiyon Potansiyelinin İletimi-1



Aksiyon potansiyeli oluşuktan sonra kayıpsız olarak uzak mesafelere iletilebilir. Bunun nedeni, bu özel potansiyelin sürekli aktif olarak yeniden üretilmesi ve o şekilde iletilmesidir.

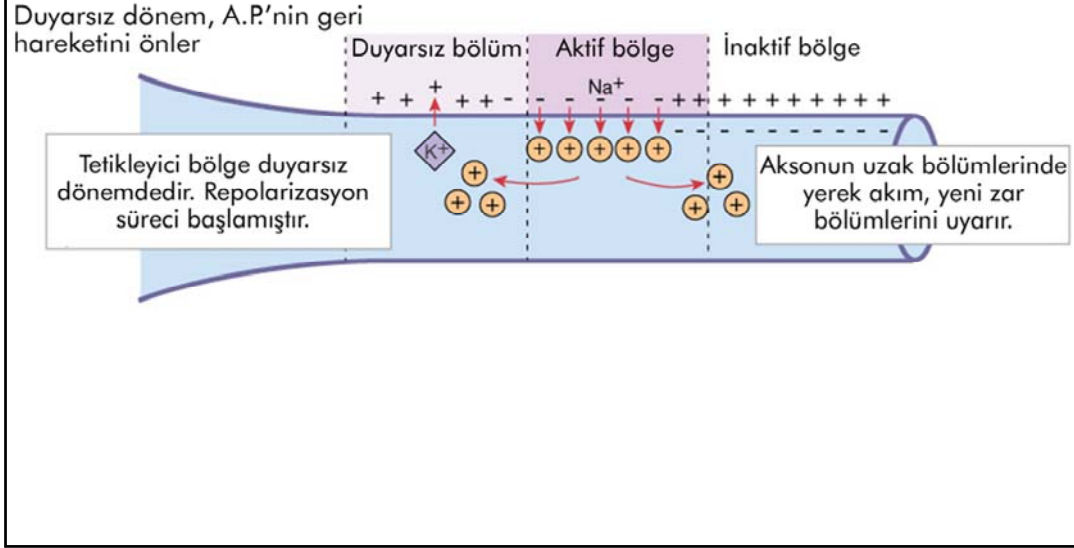
Hücrenin bir noktasında (sinir hücreleri için, tetikleme noktası denen özel bir bölümde) üretilen aksiyon potansiyeli, o bölgede sodyum kanallarının açılmasına bağlı hızlı bir depolarizasyona neden olur.

Aksiyon Potansiyelinin İletimi-2



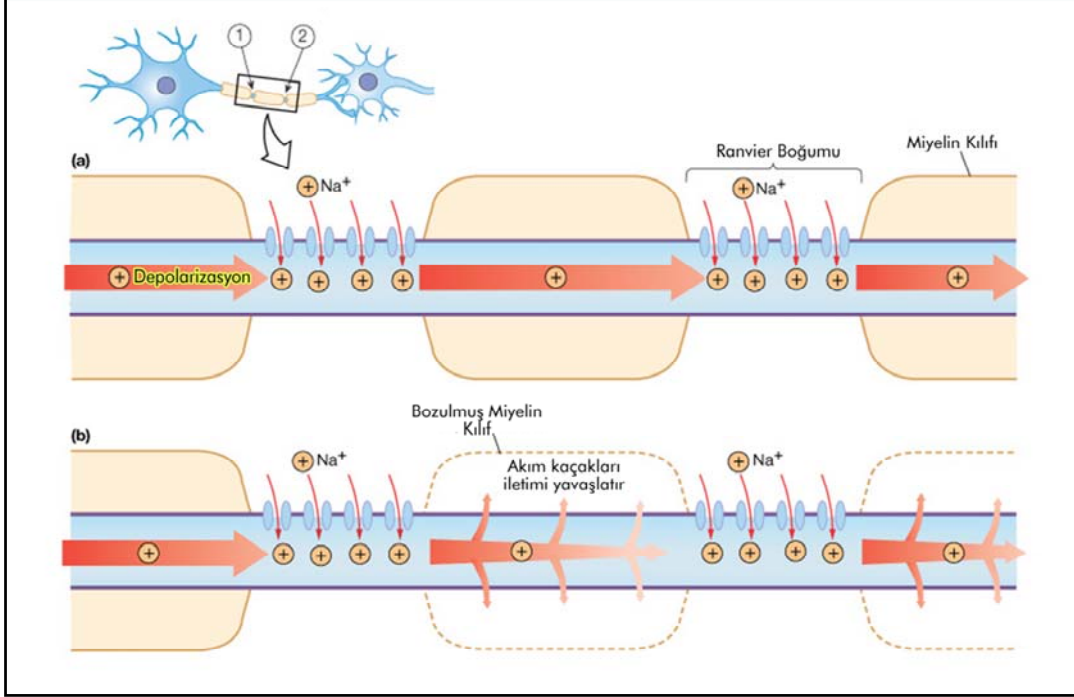
Oluşan yük akışı, komşu bölgelerdeki henüz etkilenmemiş zar bölümlerine yayılarak oraları da depolarize eder. Bu depolarizasyon da eşik seviyesine ulaştığında komşu bölgede bulunan voltaj kapılı hızlı sodyum kanalları açılarak yeni bir aksiyon potansiyeli başlatılmış olur. Aksiyon potansiyeli sırasında oluşan Na girişi hücreyi daha fazla depolarize ederek daha çok Na kanalının açılmasını sağlar. Kısacası aksiyon potansiyeli, kendi kendini artıran süreçlere güzel bir örnektir.

Aksiyon Potansiyelinin İletimi-3



Komşu bölgede oluşturulan aksiyon potansiyelleri de yine kendi komşu bölgelerine doğru yayılırlar. Fakat bir önce aksiyon potansiyeli oluşturmuş olan nokta, bitişiğindeki bölgenin oluşturduğu daha yeni aksiyon potansiyelinin akımlarından etkilenmez; zira bu nokta o aşamada repolarizasyon safhasındadır ve voltaj kapılı hızlı sodyum kanalları o noktada inaktive olduğu için, geçilen noktada tekrar bir aksiyon potansiyeli oluşturmak mümkün değildir (yani ilk potansiyeli oluşturan bölge artık duyarsız dönemdedir). Böylece aksiyon potansiyeli hep yeni bölgeleri etkileyerek, potansiyel dalgasının sinir boyunca tek bir yöne iletilmesini sağlar (aksiyon potansiyelindeki duyarsız dönemin önemi bu noktada anlaşılmaktadır).

İletim Hızı – Miyelin ve Sıçrayıcı İleti



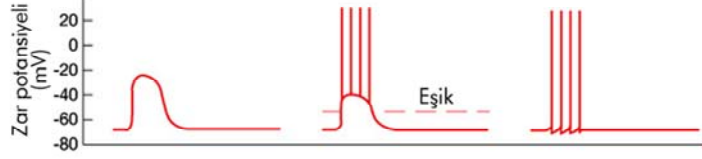
Vücudumuzdaki bazı sinirler ise çok uzak mesafelere hızla sinyal iletmek zorundadır. Örneğin kaslarımıza kasılma emirlerini taşıyan motor sinirler veya tenimizde acıyı duyumsamamızı sağlayan duyu sinirlerinin uzantıları böyledir. Bu sinir kablolarının etrafında miyelin denen özel, yağlı bir kılıf bulunur. Miyelin kılıf, aynı bir elektrik kablosunun etrafındaki yalıtım amaçlı plastik kaplama gibi, sinir uzantıları boyunca iletilen aksiyon potansiyellerinin elektriksel kayıp dolayısıyla zayıflamasını engeller. Kablolardan farklı olarak sinirlerimizdeki miyelin kılıf eşit uzunluklu bölütler (segmentler) halindedir ve aralarında *Ranvier boğumu* denen kısa aralıklar vardır. Bu boğumlarda hücrenin zarı dış ortamla temas halindedir ve bol miktarda voltaj kapılı hızlı sodyum kanalı içerir.

Miyelinli bölgelerde elektriksel kayıp az olduğundan buralarda ilerleyen aksiyon potansiyeli sıçramalar şeklinde hızla yol alır ve bir sonraki Ranvier boğumuna kadar ilerleyebilir. Boğuma geldiğinde buradaki zarı depolarize eden aksiyon potansiyeli dalgası, sodyum kanallarını açarak yeni bir aksiyon potansiyelinin oluşmasını sağlar; oluşan bu potansiyel yine hızla bir sonraki boğuma atlar ve böylece sinirdeki aksiyon potansiyeli iletim hızı, bu sıçramalar sayesinde büyük oranda artırılmış olur. Boğumlar arasında sıçrar tarzda iletilen bu tip sinir iletimie "*sıçrayıcı (saltatorik) ileti*" adı verilmektedir (üstte).

Eğer miyelin kılıfta bir hasar meydana gelirse, bu sinirler artık aksiyon potansiyeli iletemezler ve böylece sinir işlevinde önemli kayıplar meydana gelir (altta)

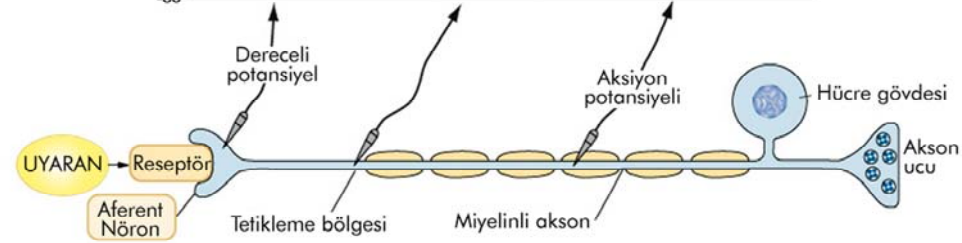
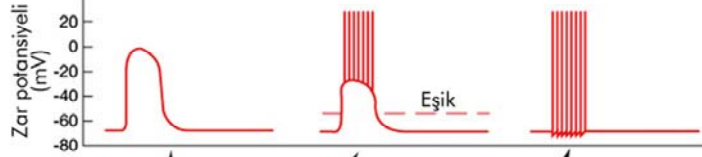
Aksiyon Potansiyelinin Sıklığı

A) Zayıf uyarı, daha az nörotransmitter salınımına neden olur.



Nörotransmitter salınımı

B) Güçlü uyarı, daha fazla aksiyon potansiyeline ve daha fazla salgıya neden olur.



Aksiyon potansiyellerinin büyüklüğü hiç değişmediği halde (hep ya da hiç prensibini hatırlayınız), farklı şiddetlerde uyarılar sinirler tarafından nasıl kodlanır? Sözgelimi parmağımızın ucundaki bir dokunma reseptörü, dokunma duyusunun algılanması için beynimize aksiyon potansiyelleri göndermek zorundadır; fakat bir masanın yüzeyine hafifçe de dokunsak, elimizi sertçe de bastırsak, gidecek olanlar hep aynı büyüklükte aksiyon potansiyelleridir.

İşte bu tip kodlamalar için sinir hücreleri, birim zamanda gönderdiği aksiyon potansiyeli miktarını (yani potansiyellerin frekansını) değiştirir. Şekilde, en altta bir duyu siniri ve ona bağlı reseptör görülüyor. Zayıf bir uyarı verildiğinde, reseptörde oluşan dereceli potansiyel küçüktür ve birim zamanda daha az sayıda aksiyon potansiyeli merkeze iletilir (en üstte). Eğer uyarı şiddetlenirse, reseptörde oluşan dereceli potansiyel büyür ve buna bağlı olarak sinirde iletilen aksiyon potansiyellerinin birim zamadaki sayısı (frekansı) artar. Merkezi sinir sistemi de gelen mesajların sıklığındaki değişimi (adeta Mors alfabesini çözen bir telsizci gibi) çözümleyerek, uyarının şiddeti hakkında bir yorum yapabilmektedir.

Son

Sorularınız için:
sinancanan@gmail.com
adresine mesaj atabilirsiniz

