

# İşitme Biyofiziği

**Yrd. Doç. Dr. Aslı AYKAÇ**  
YDÜ Tıp Fakültesi  
Biyofizik AD

# SES

- Ses terimi öznel anlamda insanın işitme sınırı uyarıldığında algıladığı duyumu tanımlamak için kullanılır.
- Nesnel anlamda ise ses akustik sinirimizi uyarabilen hava basıncı dalgalarıdır.

# *İşitme Duyusunun Temeli*

- Ses olarak adlandırdığımız maddesel titreşim dalgalarının insan ve hayvanlarda özelleşmiş bazı reseptörlerce algılanmasına dayalıdır.

# İşitmenin Fiziksel Yönleri



- Mekanik titreşimlerin işitme duyusunu oluşturabilmesi için frekanslarının 20 – 20.000 Hz arasında olması gerekir.
  - İnsanın işitebildiği ses frekansı aralığı kişiye, yaşa ve sesin şiddetine göre değişir.
- Kulağın en duyarlı olduğu frekans aralığı 1000-4000 Hz'dir



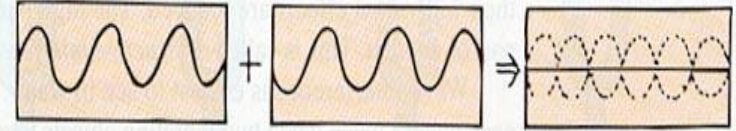
- İşitme frekans aralığı görmeye göre daha geniştir
- Daha düşük frekanslar değİ (dokunma) reseptörleri (mechanoreceptors) ile, daha yüksek frekanslar ise ağrı, ısı (nosiceptors, thermoreceptors) gibi dolaylı etkiler ile algılanabilir.

# Ses Dalgalarının Özellikleri

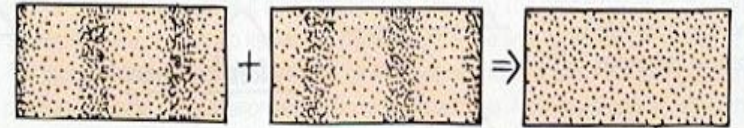
## Ses Dalgaları

Longitudinal (boyuna) dalgalar,

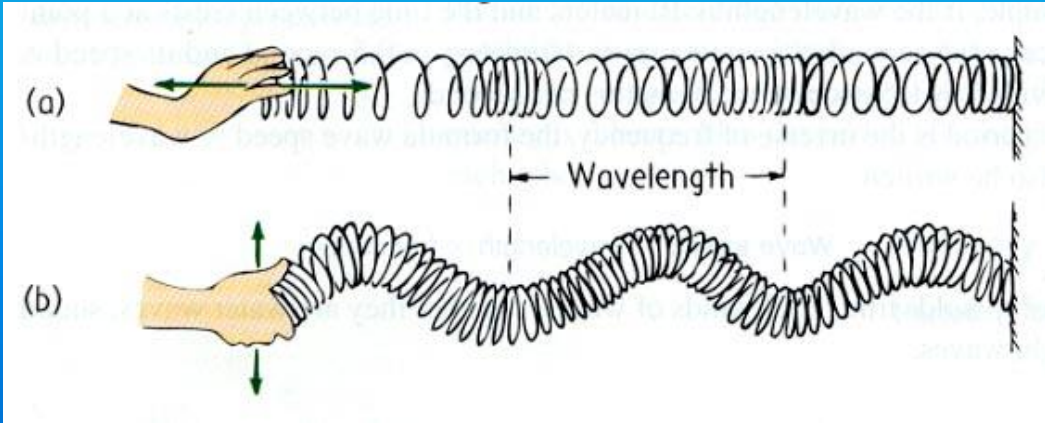
Parçacıkların hareket yönüne paralel salınımı olan boyuna dalgalar

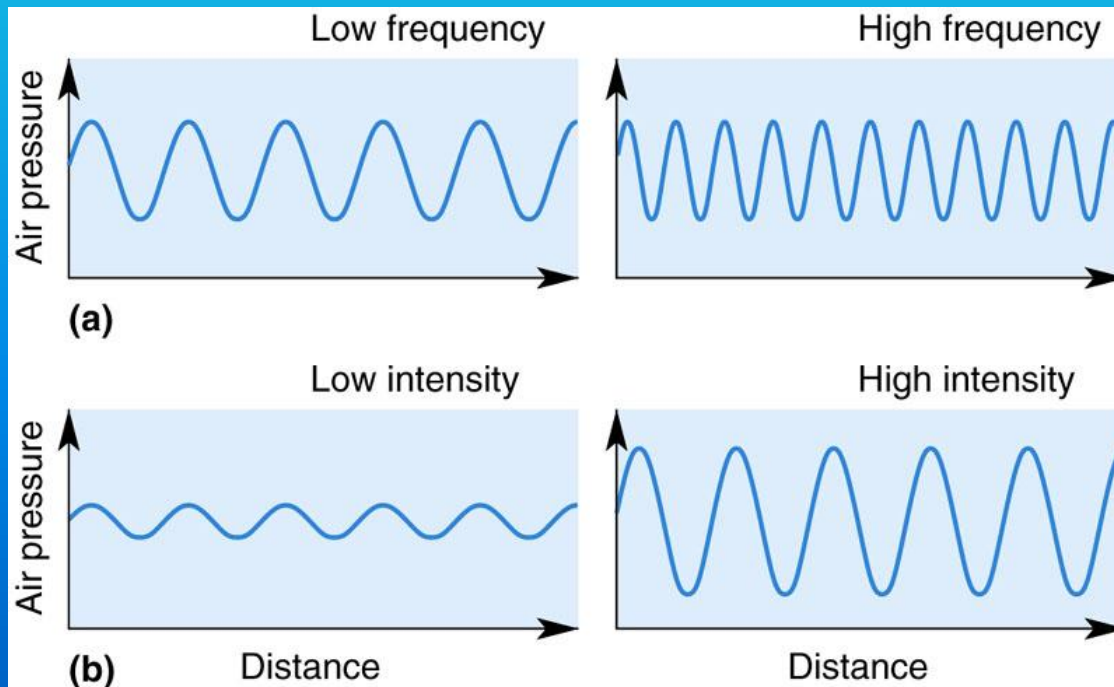
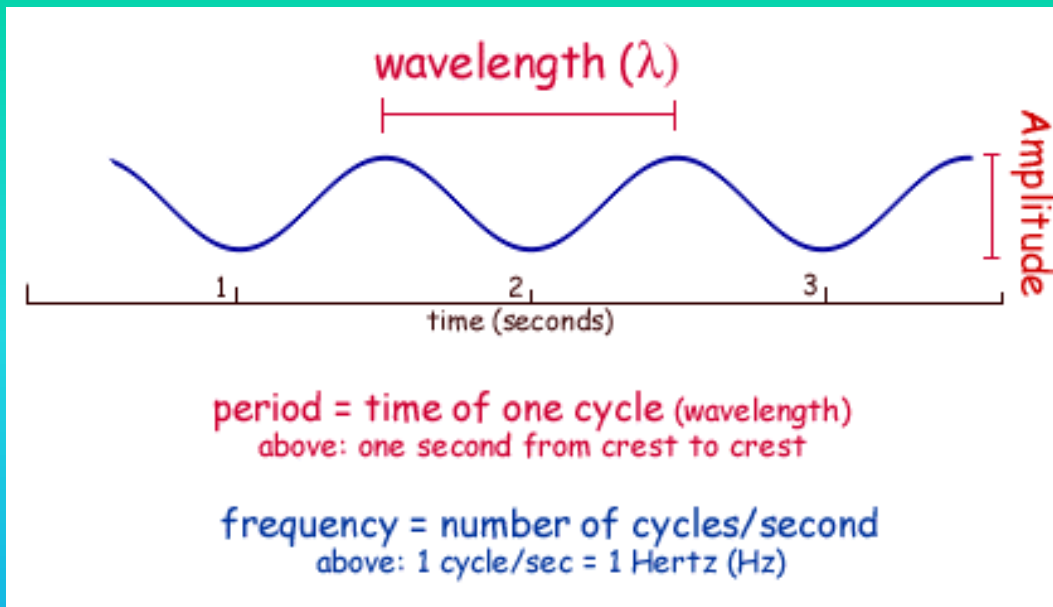


Two identical transverse waves that are out of phase destroy each other when they are superimposed.



Two identical longitudinal waves that are out of phase destroy each other when they are superimposed.





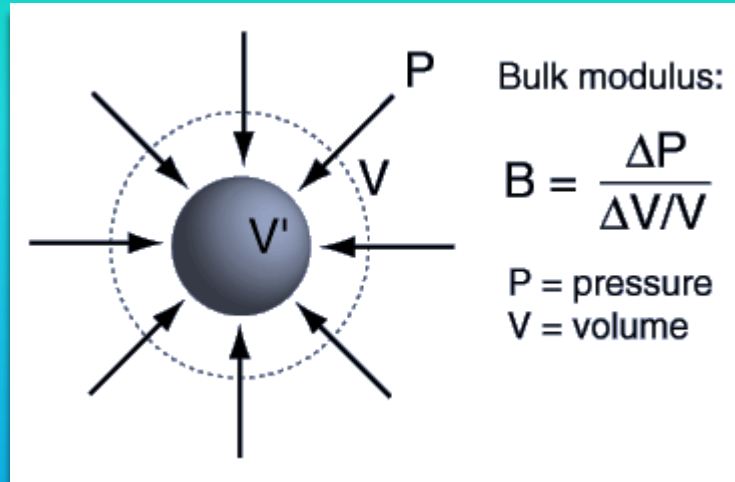
# SES

- **Ses** sıkışma ya da genleşme dalgalarının havada (ya da başka bir esnek ortam boyunca) yayılmasıyla oluşur
- ***Ses dalgalarının hızı*** ortamın sıkışma esneklik modülü  $B$  ve ortam yoğunluğuna  $\rho$  bağlı olarak

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$



# Ses Dalgalarının Yayılma Hızları



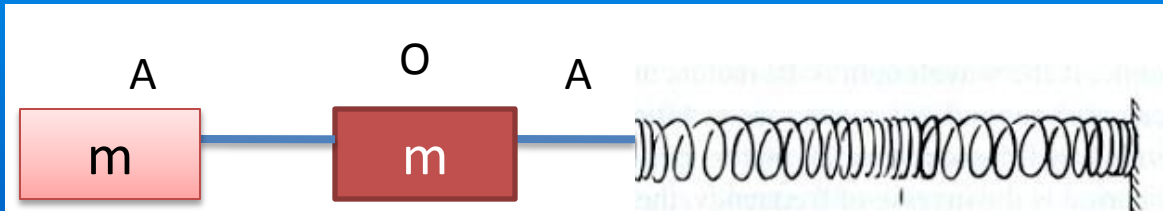
- Havada  $\cong 340$  m/s
- Su ve biyolojik dokularda  $\cong 1500$  m/s

- Ses dalgalarının ***yayılması*** ortam içerisinde ***basınç ve yoğunluk*** değişimine yol açar.
- Sesin duyulması da basınç değişimlerinin şiddetine (fiziksel şiddet) bağlıdır.
  - Basınç değişimlerinin şiddeti ise sesin frekansına bağlıdır

- \*\* Sesin hızı farklı yoğunluktaki bir ortama geçerken değişir
- **Sesin hızı**
  - hareket ettiği ortam tarafından belirlenir
  - atmosfer basıncı, frekans ve genlikten bağımsızdır
- Hız  $0^{\circ}\text{C}$  de  $331,5\text{m/s}$  ve her bir derece Celsiusda yaklaşık  $0,6\text{m/s}$  artar
- Katı ve sıvıların içinde ses hızı havadakinden daha büyüktür

# Basit Armonik Hareket

- Yay normal uzunluğundayken kütlenin  $x$  eksenini doğrultusundaki konumunu  $0$  olsun
- Kütleyi  $F$  kuvveti ile sağa doğru  $0$ 'dan  $A$  mesafesi kadar sağa çekip bırakalım
- Kütle yayın uyguladığı zıt kuvvetle sola doğru hareket etmeye başlar
- $0$  noktasından geçer ve sol tarafta  $A$  mesafesi kadar ilerler
- Yay sıkışmış olacağı için kütleyi tekrar sağa doğru itecektir
- Bu geliş-gidişler belli bir frekansla hiç durmadan devam eder. Bu bir titreşim hareketi ya da basit armonik harekettir.



- Kütle  $x$  kadar uzaklaştığında yay kütleyle  $F=-kx$  kadar kuvvet uygular

$$F = -kx = ma \text{ ise } a = -kx/m$$

$V = dx/dt$  ve  $a = dV/dt$  olduğundan  $a = d^2x/dt^2$

$$a + kx/m = d^2x/dt^2 + kx/m = 0$$

denklemin  $x$  için çözümü  $x = A \cos \theta = A \cos \omega t$

$$\omega = 2\pi f$$

# *Dalga Hareketi*

- Yatay bir düzlemde uzun bir ipin bir ucu armonik hareket ile sallandığında hareket ip boyunca diğer noktalara doğru yayılır. Bu bir dalga hareketidir.

$$V = \lambda f$$

- Dalga üzerindeki noktaların düşey doğrultudan sapmaları ( $y$ ), yatay mesafenin ( $x$ ) sinüsoidal bir fonksiyonu ile ifade edilir.

A: düşey doğrultuda max sapma

$$y = A \sin 2\pi f t = A \sin 2\pi (v / \lambda) t$$

$$y = A \sin 2\pi (x / \lambda)$$

# Şiddet

- Şiddet, birim zamanda birim yüzeyden geçen enerji miktarıdır

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

P: ortalama güç

$4\pi r^2$  : kesit alanı

- Standart kabul edilen 1kHz'de minimum ses şiddeti

$$I_0 = 10^{-12} \text{ w/m}^2$$

## *Şiddetin mesafe ile değişimi*

- Ses kaynakları noktasal, çizgisel veya düzlemsel olabilir. Bir düzlem üzerine yayılmış ses kaynakları bile düzlemden çok uzaklaştığında bir nokta kaynak gibi davranır.
  - Kaynağın boyutları kaynaktan olan uzaklığa kıyasla çok küçük ise nokta kaynakta söz edilir
  - r uzaklıkta kaynak enerjisinin geçtiği toplam alan r yarıçaplı kürenin yüzey alanıdır,  $4\pi r^2$

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$



# *Akustik empedans*

- Bir ortamdaki ses hızı ile ortamın özkütlesinin çarpımına ortamın karakteristik akustik empedansı denir

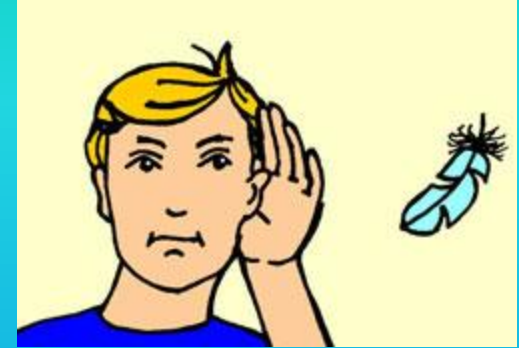
$$Z = \rho \cdot V$$

- Sesin bir ortamdan diğerine geçerken enerji kaybetmeden geçmesi için iki ortamın karakteristik akustik empedanslarının ***eşit*** olması gerekir

# *İşitme Eşiği*

- Normal insan kulağı her frekanstaki sesi aynı şiddette algılayamaz. 1000Hz frekanslı sesin normal insanlar tarafından işitilebilen en düşük şiddeti  $10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup> kadardır ve bu değere ***1000Hz'deki işitme eşiği ses şiddeti*** denir.

- **İşitme eşiği** 0.000000000001 watt/m<sup>2</sup> (10<sup>-12</sup> watt/m<sup>2</sup> )
- **Ağrı eşiği** yaklaşık 10 watt/m<sup>2</sup>
- **İşitme aralığı:**  
10<sup>-12</sup> watts/m<sup>2</sup> – 10 watts/m<sup>2</sup>



## *decibel or dB (deci = onda bir)*

Pratikte duyarlılığı frekansa bağımlı olarak belirtmekten kaçınmak için ses şiddeti düzeyi denen ölçek geliştirilmiştir. Bu ölçekte herhangi bir sesin şiddeti ( $I$ ), kulağın 1000Hz'deki işitme eşiği  $I_0$  baz alınarak belirtilir.

$$dB = 10 \log (I/I_0)$$

$I$  = ses yoğunluğu watt/m<sup>2</sup>

$I_0$  = referans yoğunluk=  $10^{-12}$  watts/m<sup>2</sup> (duyma eşiği)

- Ses basıncı düzeyini hesaplamakta kullanılan bağıntı ise

$$\text{dB} = 20 \log (P/P_0)$$

- Bir odada şiddet düzeyi 70dB olan bir ses kaynağı açıkken, şiddet düzeyi 85 dB olan ikinci bir ses kaynağı açılırsa iki kaynağın birden şiddet düzeyi ne olur?
- $I_1=70 \text{ dB}$      $70= 10 \log (I_1/I_0)$      $\log (I_1/I_0)=7$      $I_1/I_0=10^7$   
 $I_1=10^7 I_0$
- $I_2=85 \text{ dB}$  ise  $\log I_2/I_0=8.5$      $I_2=31,6 \times 10^7 I_0$
- $I_{\text{toplam}}=I_1+I_2=(1+31,6) 10^7 I_0= 32,6 \times 10^7 I_0$
- $\text{dB}=10 \log (32,6 \times 10^7 I_0)/ I_0= 85.13 \text{ dB}$

# *Ses Gürlüğü ( Loudness)*

- İnsanın işittiği ses şiddeti “ ses gürlüğü (loudness) ” olarak tanımlanmıştır
- Ses gürlüğü sesin fiziksel şiddeti ile bağlantılıdır
- Çok geniş aralıkta değişen ses şiddetlerini karşılaştırmak için mutlak şiddetler yerine logaritmaları kullanılmaktadır
  - Şiddetin gürlüğünde 2 kat artış aslında enerji bakımından 100 kat artış demektir

- $I_0 = 10^{-12} \text{ w/m}^2$  1 kHz'de minimum ses şiddeti referans alınarak

Şiddet düzeyi  $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$

- Duyabildiğimiz düzeyler **0-160 dB** aralığındadır
- Ses basınç düzeyi benzer bir ifade ile

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0}$$



- Örneğin basıncın 2 kat değiştiği bir durumda

$$L = 20 \log_{10} 2 = 6 \text{ dB}$$

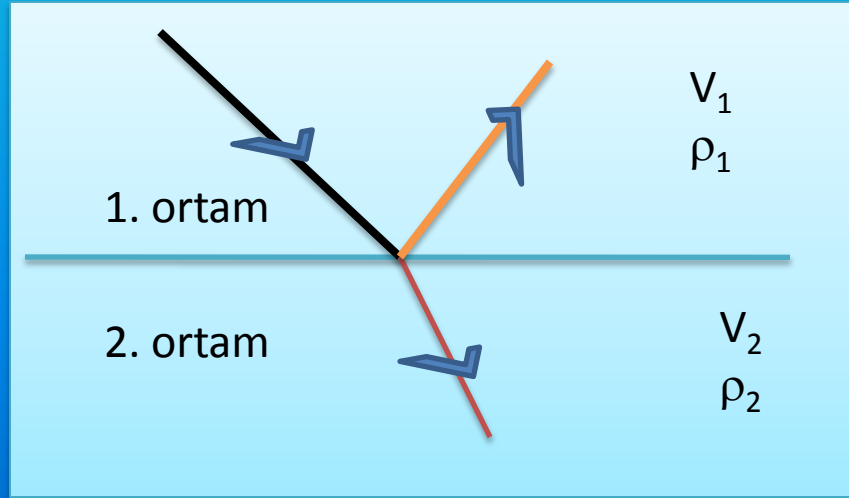
Kulağın acı çekmeden işitebildiği en yüksek ses 120 dB' dir.

Bu da,

$$I/I_0 = 10^{12} \quad P/P_0 = 10^6 \text{ 'lık değişim demek}$$

# Sesin Sınırlardan Yansımaları

- Ses dalgaları da diğer dalgalar gibi bir ortamdan diğerine geçtiğinde hızını değiştirir
  - Bir kısmı kırılırken
  - bir kısmı yansır



- Yansımaya katsayısı

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) = A_r / A_i$$

1. ve 2. ortamın Akustik empedansları

$$Z_1 = V_1 \cdot \rho_1$$

$$Z_2 = V_2 \cdot \rho_2$$

**$Z_1 \cong Z_2$  ise**

- Yansıyan dalga yok.
- Ortamların karakteristik empedansları eşit
- Enerjinin çoğu 2. ortama geçer

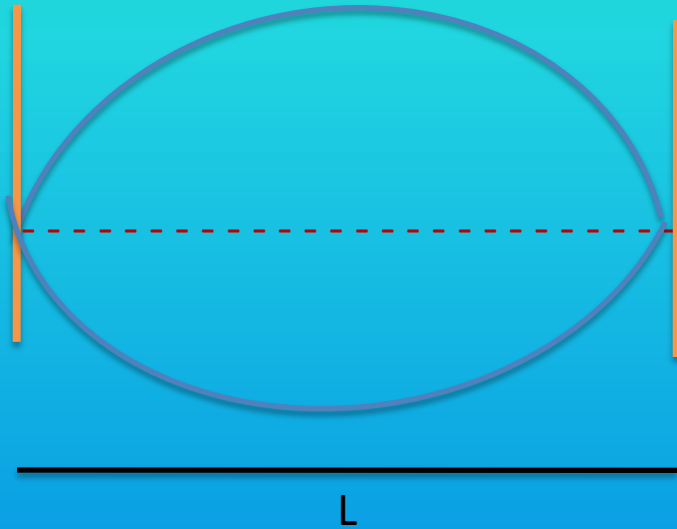
- Sesin yansımalarına örnek

- Havuz kıyısında havuzun içinde arkadaşımızla yaptığımız konuşmada sesin neredeyse %99'u su yüzeyinden yansır.
- Çünkü su ve hava arasındaki akustik empedans uyumsuzluğu büyüktür.
- Sesin yalnızca %0.1'i suya iletilir.
- Yani, havadan suya girişte 30dB'lik bir azalma olur

- Nerde akustik empedans çoksa orada yansımada çoktur
  - Kalp sesleri göğüs duvarından iyi iletilmez

- Aynı kaynaktan aynı frekansta çıkan iki dalga girişim yaptıklarında sürekli belli bir dalga formunda titreşen, yani belli noktaları hep max genlikte titreşen, belli noktaları hiç titreşmeyen kararlı (durağan) dalgalar oluşur
  - İki ucu kapalı bir boruda ya da iki ucu sabitlenmiş bir ipten farklı modlarda salınım yapan duran dalgalar oluşacaktır.

# Temel Frekans



- $L = \lambda/2$
- $\lambda \cdot f = V ; \lambda = 2L$
- *Temel frekans*  
 $f = V / 2L$
- *Temel frekansı  $f_0$  ile gösterirsek daha yüksek frekansları ( $2 f_0$ ,  $3 f_0 \dots$ ) bu temel sesin armonikleri*

- İnsan dış kulak kanalı bir ucu kapalı silindirik bir boruya benzetilebilir
- Eğer ipin bir ucu serbest ya da borunun bir ucu açıksa ise temel frekans

$$L = \lambda/2, f_0 = v/2L \text{ olur}$$



# Vuru Frekansı

- Frekansları birbirinden biraz farklı iki dalganın girişimi sonucu, genliği periyodik olarak değişen bir titreşim gözlenir ki bu olaya **vuru** denir.
- Vuru frekansı  $f_v = f_2 - f_1$
- Bir saniyede 33 titreşim yapan dalga ile 30 titreşim yapan dalga üst üste geldiği zaman vuru frekansı  $f_v = 33 - 30 = 3$  Hz
- Genlikleri  $y_1 = \sin 2\pi 33t$  ve  $y_2 = \sin 2\pi 30t$  toplam genlik  $Y = Y_1 + Y_2$

- Doğada karşılaştığımız sesler basit armonik sinüzoidal titreşimler olmayıp genellikle temel frekansla armoniklerinin üst üste gelmesiyle oluşur.
  - Böyle kompleks dalga bileşimlerinde hangi frekansların, hangi genliklerde bulunduğu saptanması **Fourier Analizi** ile yapılır.

# *Sesin Duyusal Özellikleri*

- Duyusal olarak sesleri birbirinden 3 ayrı karakteristiği ile ayırabiliriz
  1. Gürlük (loudness)
  2. Ton (tone)
  3. Tını (resonance, timber)

# Gürlük ve Ton

- Sesler relatif şiddet seviyelerine göre şiddetli ya da zayıf olarak tanımlanabilir.
- Sesleri ince (tiz) ya da kalın (pes) olarak ayırabiliriz. Ses tonu sesin frekansı ile ilişkilidir.
  - Frekansı yüksek sesleri ince, frekansı düşük olan sesleri kalın olarak algılarız.
- Birleşik seslerde ton temel frekansa bağlı olarak algılanır.

# *Tını*

- İki sesin şiddetleri ve frekansları aynı olduğunda bile, eğer sesler arasında armonikler ve bağıl genlikler bakımından farklılıklar varsa, kulak-beyin sistemi bu farklılıkları algılayabilmektedir. Bu sistem bir bakıma seslerin Fourier analizine tabii tutmaktadır.

# Konuşma

- Normal konuşma sesi dışarı soluk verirken havanın modüle edilmesi ile gerçekleşir.
- Hava akciğerlerden ağza olan yolculuğunda bir çok cavity ve vocal cords'lardan geçerek modüle edilir.
  - Burada üretilen ses *nl sesleri* ağzda çıkarılan kısım ise *nsz sesleri* oluşturur.

# Konuşma

- Normal solum sırasında cordlar birbirinden ayrıktır. Konuşma sırasında kaslar tarafından birbirlerine yaklaşırlar.
- Yakınlaşma-uzaklaşmayı düzenleyen döngü:
  - Havayı dışarı verdiğimizde vocal cordların hemen altındaki basınç yükselir
  - cordlar uzaklaşır
  - Hava geçişi hızlanır
  - Lateral basınç düşeceği için kaslardaki elastik kuvvet cordları birbirine yaklaştırarak geçişi bloke eder
  - Hız düşmesi bu kez basıncı arttırır
  - Cordlar yine açılır

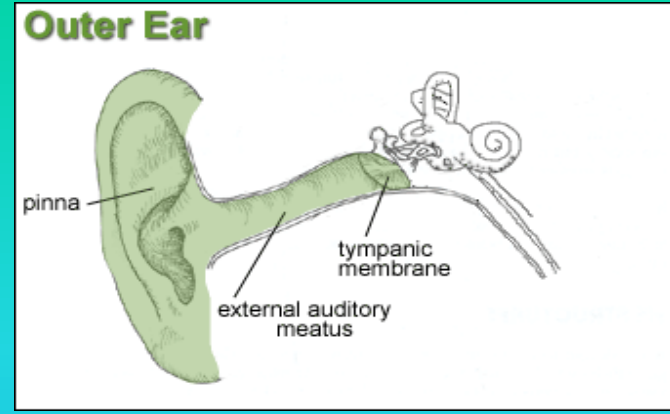
# *Kulak*

- Rezonans

- Doğada her nesnenin kendine özgü bir titreşim frekansı vardır. Eğer salınım yapan bir dalga çarptığı nesnenin doğal frekansına eş frekansa sahip ise bütün enerjisini buraya aktarabilir. Bu durumda genlik her iki dalganın genliğinin toplamı kadar olur.



# Kulak



## Dış Kulak: Kulak kepçesi, dış kulak kanalı ve kulak zarı

### – Kulak kanalı

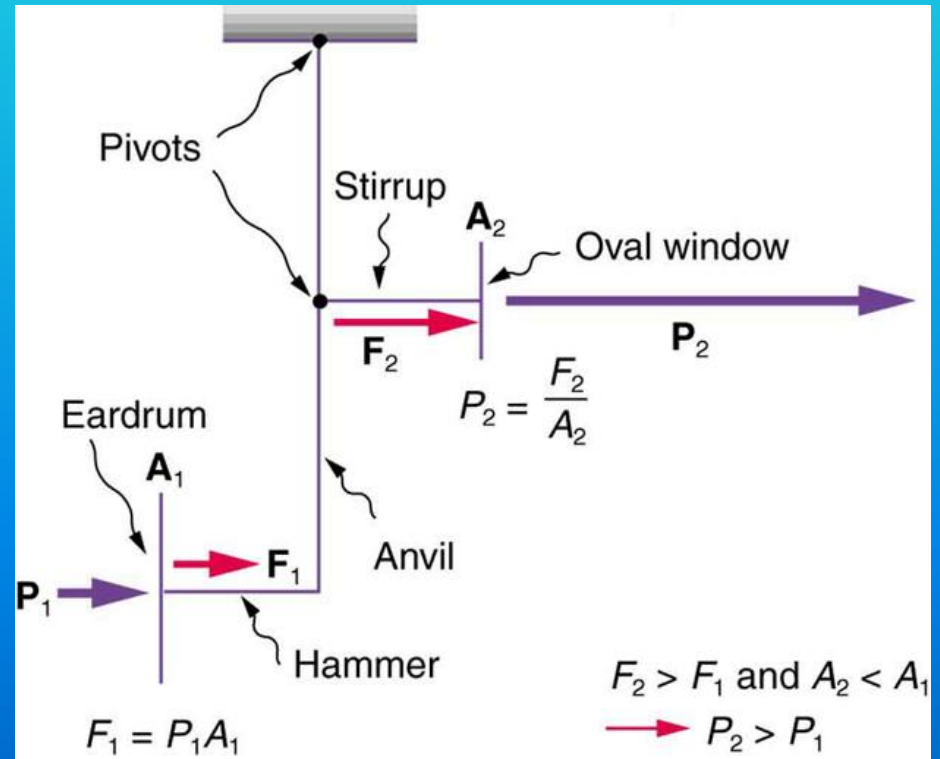
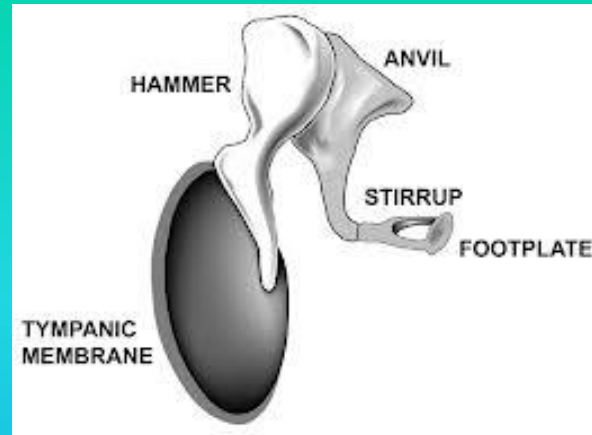
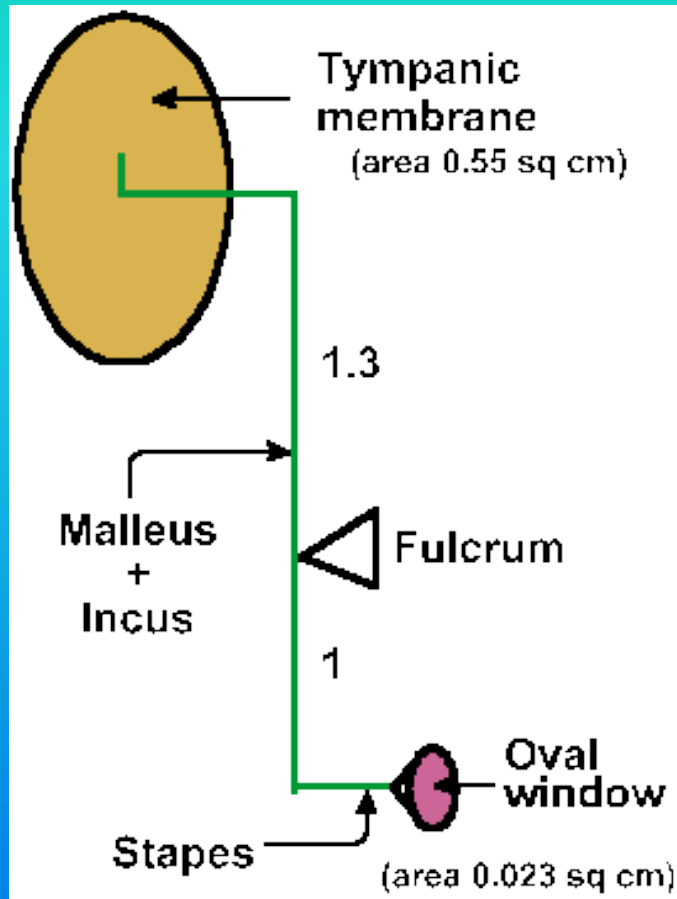
- Kulak sıvısını barındırır
- Kulak duyarlılığını 3000-4000 Hz'e yükseltir
- Bir ucu açıktır
- Rezonans frekansı 8300 Hz ( $\lambda=10$  cm)
- Eğer dış kulak bazı frekansları iletirken rezonansa girerse 10 dB kadar kazanç sağlayabilir
  - Şiddet 10x artar

# *Kulak*

- Kulak zarı
  - 0.1 mm kalınlığa
  - 65mm<sup>2</sup> alana sahiptir
  - Çekiç timpanik zara kenardan tutunduğu için kulak zarı titreşimi simetrik (lineer) değildir
  - Rezonans dışındaki frekanslarda kulak zarının titreşim genliği hava molekülleri ile aynıdır
  - 1kHz de (0 dB de ya da 10<sup>-12</sup> w/m<sup>2</sup>) duyulabilen en düşük frekansta zarın titreşim genliği 10<sup>-7</sup> cm'e genişleyebilir.
  - 3kHz'de bu titreşim 10<sup>-9</sup> cm (10<sup>-11</sup>m) kadar yani neredeyse atom boyutundadır

# *Kulak*

- Orta Kulak
  - En önemli elemanları ossicles’lardır.
    - Bu kemikler henüz çocuk doğmadan bir yetişkindeki ölçülere ulaşır
  - Bu kemikçiklerin en önemli görevi kulak zarı ile iç kulak sıvısı arasındaki empedans uyumunu sağlamaktır
  - Sesleri en etkin şekilde iletirler



- $F_m \cdot L_m = F_0 \cdot L_0$
- $P_m \cdot A_m \cdot L_m = P_0 \cdot A_0 \cdot L_0$
- $P_m / P_0 = (A_m / A_0) \cdot (L_m / L_0)$

- Alan farkı basınç etkisini 15X
- Kaldıraç sistemi kuvveti 1.3X büyültür

# Kulak

- Kulak zarındaki ses basıncı, kulak kemikleri tarafından bir kaldıraç sistemi benzeri yükseltilir
- Kulak zarına  $P_m$  basıncı etkiyorsa, kulak zarı alanı  $55 \text{ mm}^2$  olduğundan buraya  $F_m = 55 \cdot P_m$  Newton kuvvet etki eder
- Kemikçikler  $1 \text{ kHz}$  civarı salınımlarda bir kaldıraç gibi davranıp  $1.3X$  kazanç sağladıklarından üzengi çıkışı bu kuvvet  $F = 1,3 \cdot 55 \cdot P_m$  olur
- Oval pencere alanını  $3.2 \text{ mm}^2$  aldığımızda  
$$P_0 = (1.3) (55) P_m / 3.2$$
$$P_0 / P_m = 22 \text{ kat arttırılmış olur}$$

# *Kulak*

- Gerçekte bu değer yaklaşık 17 kattır
- 25 dB lik kazanca denk gelir
  - $20 \log 20 \cong 20 \cdot 1,3 = 26 \text{ dB}$
- Bu olay kulağın işitme etkinliğini ve hassasiyetini önemli ölçüde arttırır
- Kemiklerde bu yükselme olmasa sesin büyük kısmı iç kulak sıvısından yansıyıp geri dönecek ve yalnızca %1'i kullanılacaktı. Bu durumda 26 dB' lik kazanç yerine 30 dB'lik bir şiddet kaybı söz konusu olacaktı

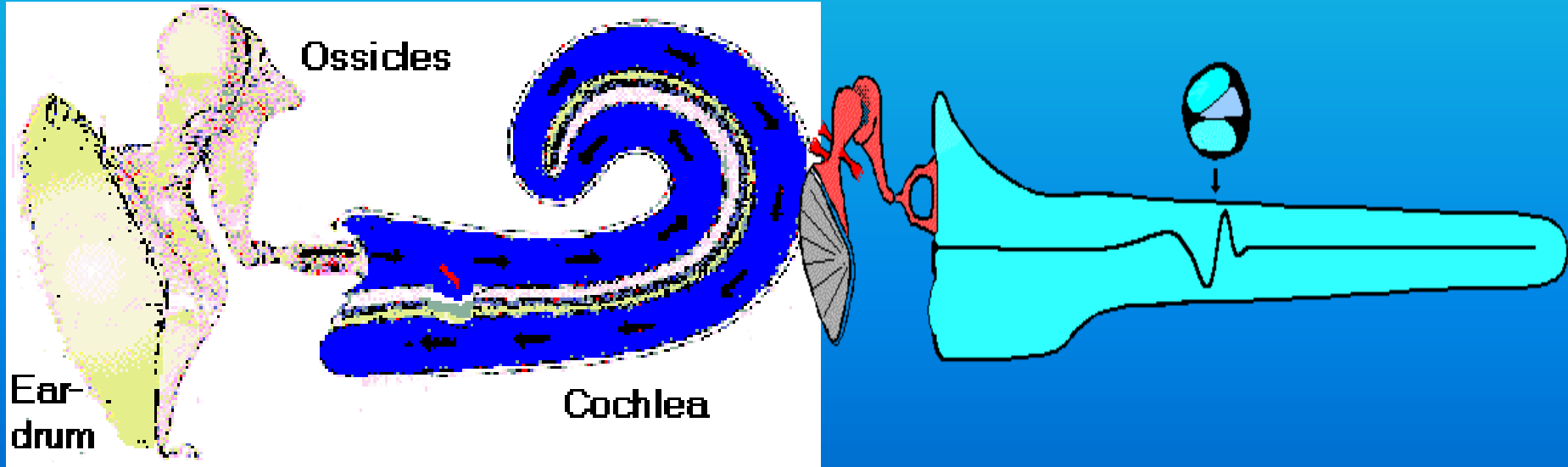
# *Kulak*

- Öztaki borusu
  - İç kulak basıncı ile atmosfer basıncını dengelemek için zaman zaman çok kısa açılır, bunun dışında genellikle kapalıdır
    - Bu dengeleme özellikle asansörde çok yüksek katlara çıktığımızda ya da uçak kalkışlarında gerçekleşir ve anlık olarak bir ses duymamıza neden olur



# Kulak

- İç kulak
  - Mekanik enerjinin elektriksel enerjiye dönüştürüldüğü yerdir
  - Bir anlamda basınç çeviricidir



- Timpanik kanal referans seçilirse (0 mV)
  - Vestibüler kanalda +5 mV. Koklear kanalda +80 mV potansiyel saptanır
- Ses dalgalarına karşılık gelen basınç dalgaları oval pencereden iç kulağa girince vestibüler ve timpanik kanallardaki sıvı dalgalanır. Bu dalgalar basınç dalgalarına ek hidrodinamik dalgalanmalar oluşturur. Hidrolik enerjinin bir kısmı bazilar zara ve corti organına iletilir.

- Bazılar ve tektoriyal zarlardaki yer değiştirmelerin oluşturduğu makaslama kuvvetleri tüy hücrelerindeki ciliaları harekete geçirir. Eğer bu hareket en uzun cilianın bulunduğu yöne doğruysa depolarizasyon, ters yöne doğru ise hiperpolarizasyon oluşur.

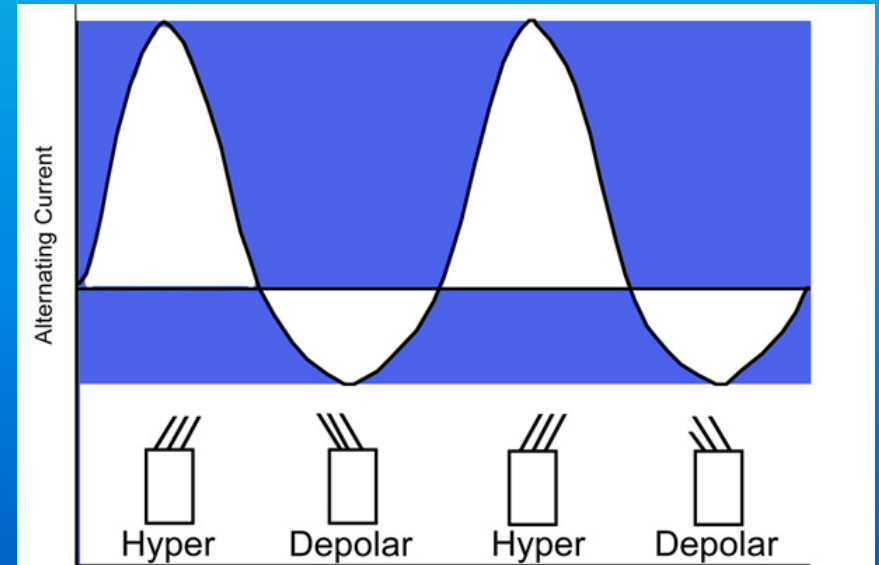
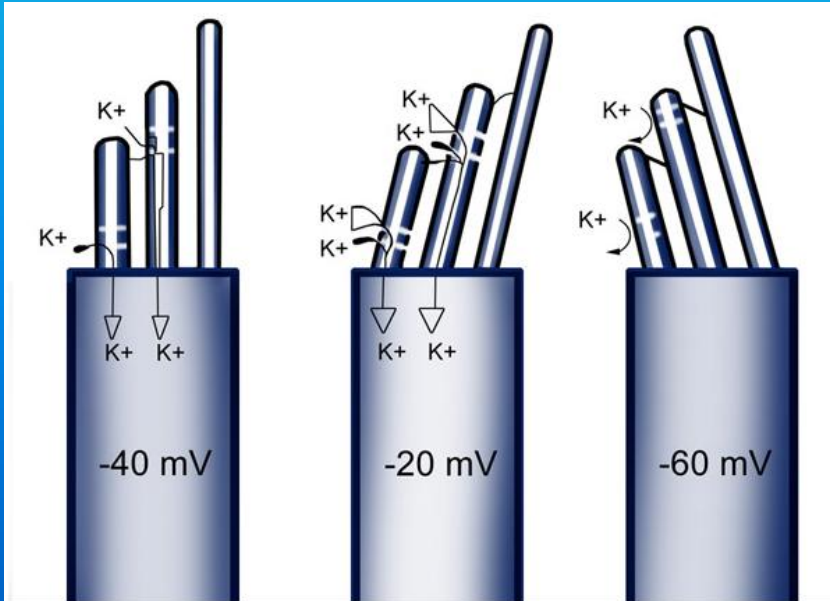
- Basilar zarın yer değiştirmelerine bağlı olarak tüy hücrelerinde eğilme olur. Bunun sonucunda reseptör hücre zarında geçirgenlik değişimi meydana gelir. Tüy hücrelerinin apikal membranında katyon iletim değişikleri olur ve membran potansiyeli değişir.

- Koklear kanaldaki endolymph yüksek  $K^+$  derişimi (145 mM) ve düşük  $Na^+$  derişimine (2mM) sahiptir.
  - Yapılan deneyler tüylerdeki 1-2 derecelik hareketin  $K^+$  ve  $Ca^{+2}$  kanallarının %50' sinin açılmasına yol açtığı gösterilmiştir.

	$K^+$	$Na^+$	$Cl^-$
Scala media (fluid <b>endolymph</b> )	140-150mM	1-2mM	130mM

- Endolymphten hücreye K girişi olur
- Hücre depolarize olmaya başlar
- Depolarizasyon V-kapılı Ca kanallarını uyarır
- Ca girişi başlar
- Depolarizasyon artar
- Artan Ca miktarı Ca-bağımlı K kanallarını açarak K'nın bazal bölgeden çıkmasına neden olur
- Bu da repolarizasyona neden olur
- V-bağımlı K kanalları da işin içine karışarak hiperpolarizasyona neden olur

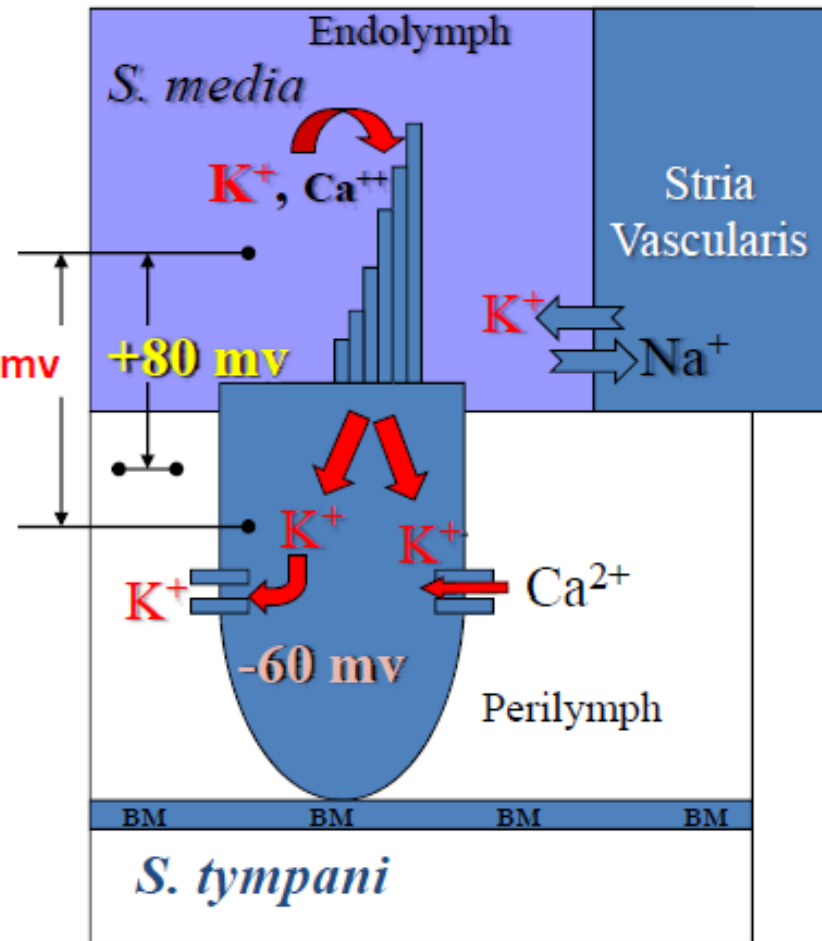
- Uyarı sinaptik iletim ile spinal gangliyon hücrelerine aktarılır. Çoğu gangliyon hücresi tek bir tüy hücrelerini innerve ettiğinden tüy hücrelerinin belirlediği karakteristik frekansa yanıt verilmiş olur.
  - Her bir sinir lifinin karakteristik frekansı olduğu gibi yanıt verdiği şiddet aralığı da farklıdır



# Resting Cochlear Potentials: EP

- **Endocochlear potential (EP)** is a “resting” potential (*steady-state*, or *DC* potential, like a battery); “resting” means it occurs in absence of stimulation.
- **EP**  $\approx$  **+80 mv** endolymph re perilymph.
- Hair cell resting potential: **-40 to -60 mv** re perilymph.
- Therefore, *voltage drop* ( $\Delta V$ ) across hair cell membrane re endolymph is very large:  

$$\Delta V = V_{endo.} - V_{Internal} = 80 - (-60) \text{ mv} = \mathbf{140 \text{ mv}}$$
- Transduction current through hair cell membrane is *amplified* by EP ( $I = V/R$ , Ohm’s law)
- **If EP is abolished:**  
 **$\sim 40 \text{ dB}$  hearing loss.**





# Response to Hair Bundle Deflection

- **Excitation**

- *Transduction:*

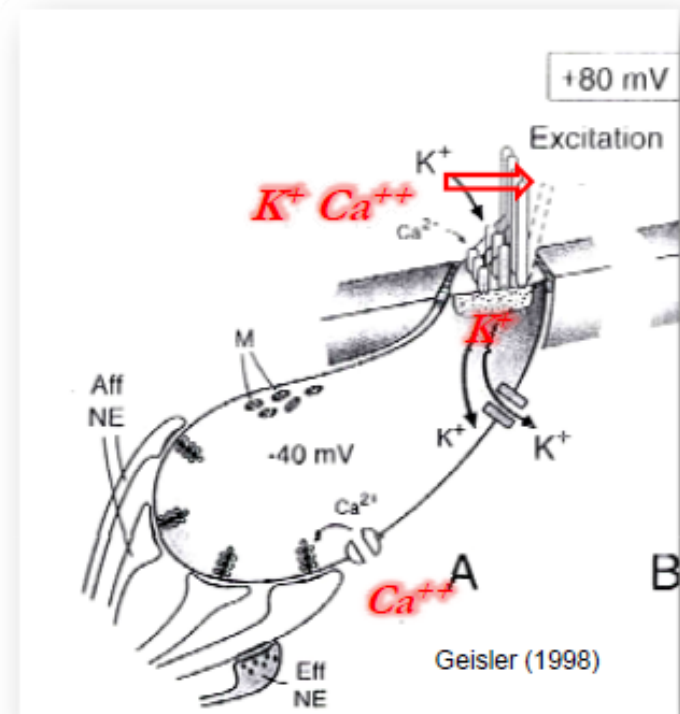
- Deflection of hair bundle *toward longest stereocilia opens* channels.
    - **Transduction currents:** Cations (mainly  $K^+$  and  $Ca^{++}$ ) flow into stereocilia, inward current **depolarizes** hair cell membrane.

- *Transmission:*

- Depolarization **opens  $Ca^{++}$  channels**, triggering...
    - **transmitter release** at base of soma.

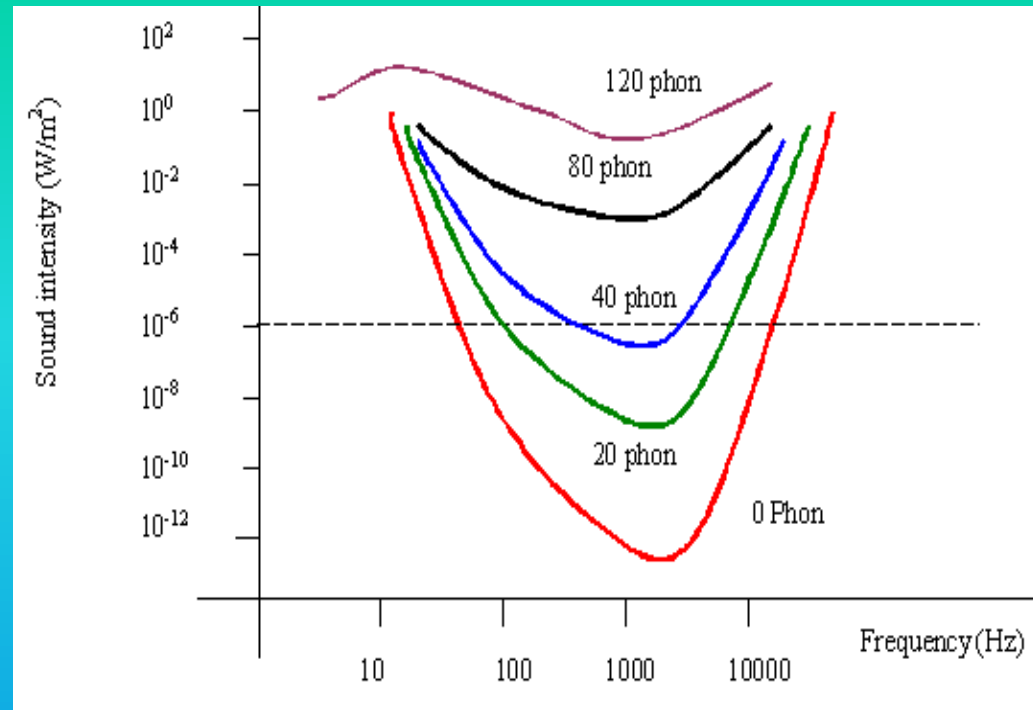
- **Inhibition**

- Deflection *toward shortest stereocilia closes* channels.
  - Resting current *suppressed*, lowering membrane potential (*more negative* than rest).



# Kulak Hassasiyeti

- Kulak tüm işitme aralığı boyunca aynı hassasiyette değildir
- En duyarlı olduğu aralık 2-5 kHz'dir

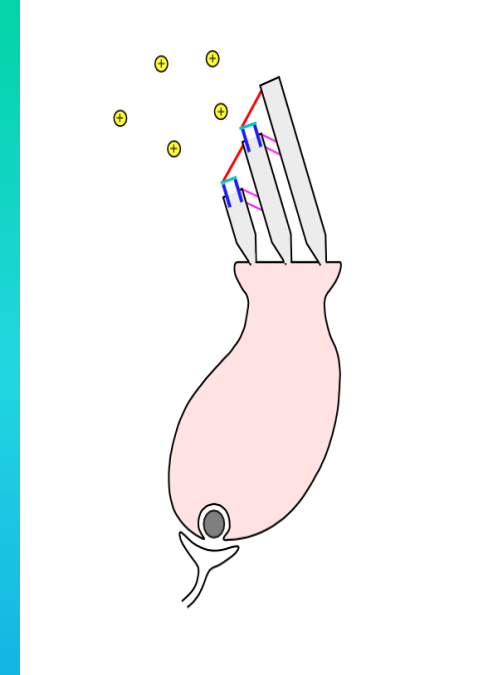
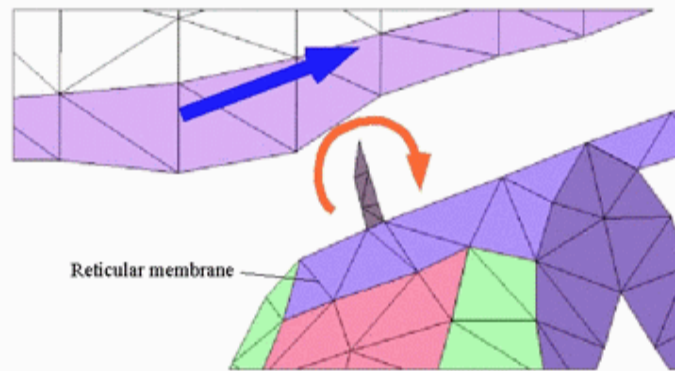
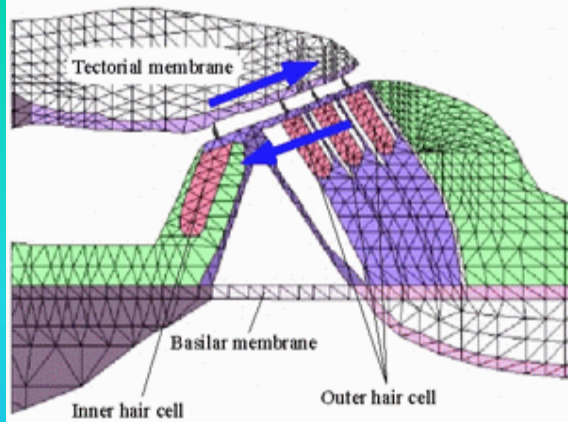


Eğer frekansa göre sesin işitildiği eşik şiddet değerleri grafiğe geçirilirse

- Aynı eğrideki tüm noktalar dB değerleri farklı olsa da aynı şiddette algılanmaktadır
- Loudness arttıkça eğriler düzleşmektedir
- 100 dB civarında neredeyse düz olmaktadır

# *Fon*

- Sesin gürlüğü şiddete verilen mental yanıttır.
- Gürlük için tanımlanan birim fondur.
- 1 fon, 1 kHz' de 1dB' lik şiddet demektir.
  - 10fon 10 dB
  - 20fon 20 dB



## Mechano-electric transduction in the organ of Corti

(a) The vibration of the basilar membrane induced by the acoustic stimuli causes the shear motion between the tectorial membrane and reticular lamina (blue arrows) and induces the lymphatic flow. This fluid force deflects the stereocilia of IHCs. Right panel shows the enlarged view of the stereocilia of IHCs. You can see that the shear motion between the tectorial membrane and reticular lamina leads to the deflection of the stereocilia of IHCs (Orange arrow).

(b) The deflection of the stereocilia causes the opening the ion channels on the top of the stereocilia, allowing ions to enter the cells. Then, the depolarization of the membrane potential is induced, resulting in the generation of spikes to the auditory nerve (red arrow). Finally, we can recognize the sound.