

Opr. Dr. Nurten Küçük

Gelişim Üniversitesi Odyoloji

Anabilim dalı

İŞİTME ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ

Ses: İşitme organını uyarıp, beyinde ses duyumu oluşturabilen nitelik ve nicelikteki fizik etkenlere “ses enerjisi- akustik enerji ” denir. Ses enerjisi bir enerji kaynağından üretilen, maddeden oluşan bir ortamda (katı-sıvı-gaz) yayılan, mekanik bir titreşim dalgasıdır.

Ses dalgası

Ses dalgasının en basit şeklinin, sabit bir yüksekliği (amplitüd) ve tek bir frekansı vardır. Bu dalgaya “sinüs dalgası” adı verilir.

Frekans

Bir saniyede oluşan siklusların sayısı olarak ifade edilir. Birimi Hertz (Hz) dir.
Frekans arttıkça ses tizleşir (ince ses), frekans düştükçe ses pesleşir (kalın ses).

İnsan kulağı 16 ile 20.000 Hz. arası frekansları duyar. Frekansı 16 Hz. Den düşük olan seslere subsonik sesler, 20.000 Hz. Den yüksek olan seslere de ultrasonik sesler denir.

Konuşma sesleri ; 500 – 2000 Hz. Arasındadır.

Ses hızı: Ses titreşimlerinin bir ortamda ilerleme hızına 'ses hızı ' denir. Birimi m/sn. ses farklı ortamlarda (katı- sıvı- gaz) farklı hızlarla hareket eder.

21 derece havada 344m/sn, suda 1480m/sn sesin hızı, ses kaynağına olan uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azalır.

Ses dalgalarının ilerlemesi sırasında karşısına çıkan engellerin özelliklerine bağlı olarak, bir kısmı yansır, bir kısmı emilir, bir kısmı da iletilir.

Bu ilerde anlatılacak olan impedansmetrenin çalışma prensiplerinden biridir.

Şiddet

Sesle ilgili bir başka kavram, şiddet – yeğinlikdir. Şiddet ses enerjisinin sıkışma ve gevşemeler sırasında birim yüzeye yaptığı basınç, nesnel olarak ölçülebilir ve bir birimle, dyn/cm kare ile belirlenebilir.

Desibel : Db

İnsan kulağının işitebildiği en düşük ses şiddeti olarak tanımlanabilir.

Klinik olarak 1 bell'in 1/10'u olan dB kullanılır.

- Fısıltı sesi 30 dB
- Konuşma sesi 40-60 dB
- Bağırma sesi 80-90 dB
- Uçak kalkış sesi 120-140 dB
- Tüfek sesi 130 dB civarındadır

Gürültü

Subjektif olarak istenmeyen rahatsız edici sesler olarak tarif edilir.

İşitme sistemi yapıları

Periferik işitme yolları

- ✓ Kulak kepçesi (Aurikula , Pinna)
- ✓ Dış kulak yolu (External Auditory Meatus)
- ✓ Kulak zarı (Tympanic membrane)
- ✓ Orta kulak yapıları
- ✓ İç kulak yapıları

Santral işitme yolları:

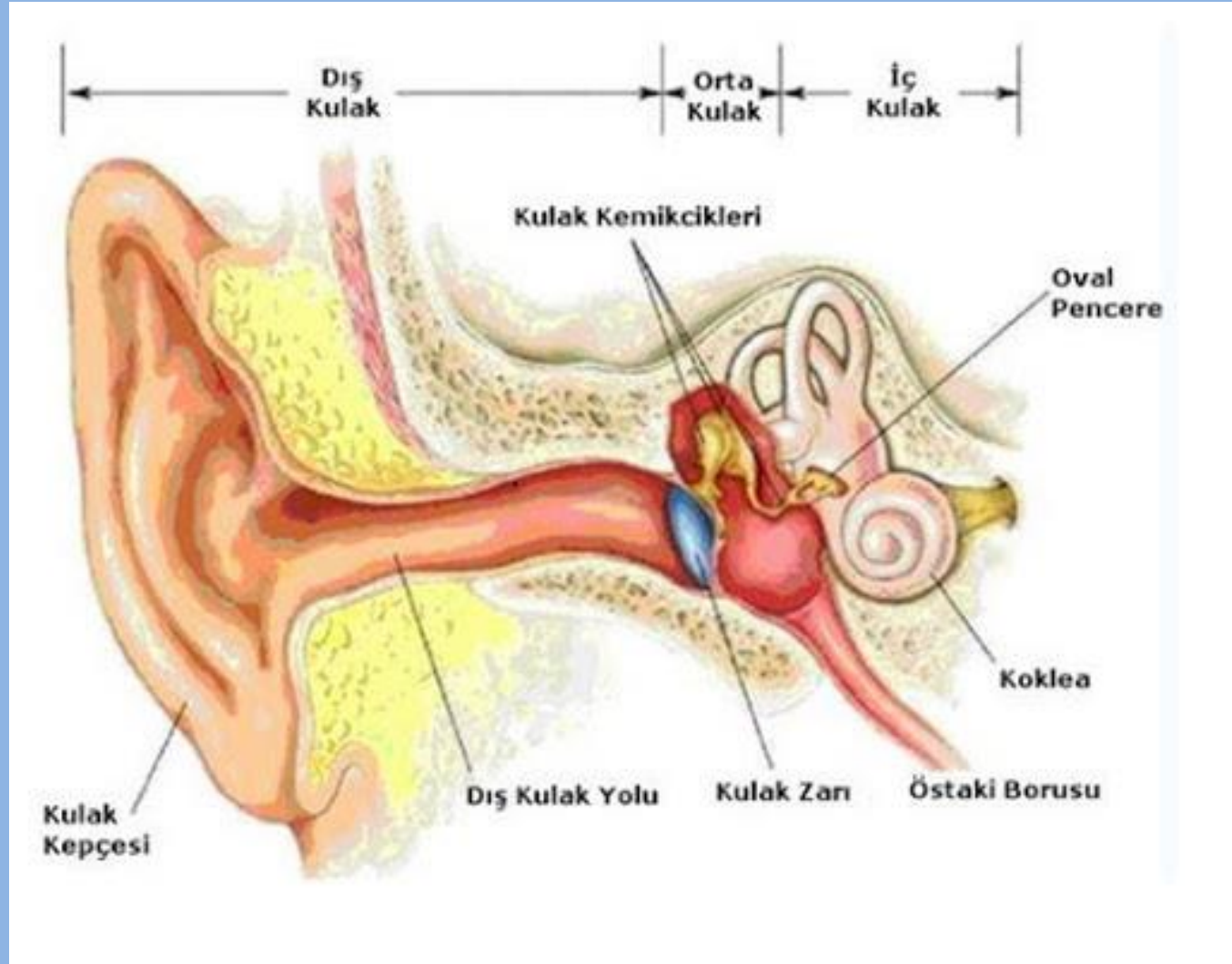
- ✓ Sekizinci sinir (Auditory nerve)
- ✓ Koklear çekirdekler (Cochlear nucleus)
- ✓ Süperior olivary kompleks (Superior olivary complex)
- ✓ Lateral lemniscus
- ✓ Inferior colliculus
- ✓ Medial genikulat cisim (Medial geniculate body)
- ✓ İşitme Korteksi (Auditory cortex)

Kulak anatomisi

Dış kulak- 1) Aurikula
2) Dış kulak yolu

Orta kulak- 1) Timpanik membran
2) Östaki
3) Orta kulak boşluğu

İç kulak- 1) Koklea



Dış kulak yolu

- **Kulak kepçesi (Aurikula, pinna):** dış ortamdaki ses dalgalarını toplayıp dış kulak yoluna ileterek sesin kulak zarına iletilmesini sağlar.
- **Dış kulak yolu (dky, Eksterna I Auditory Meatus):** yaklaşık olarak 2-2.5 cm boy ve 7 mm çapta olan DKY kulak kepçesinin topladığı ses dalgalarını kulak zarına ileterek kulak zarında titreşimi sağlar. Hem kulak kepçesinin hemde DKY nun yapısından dolayı dışardan toplanan ses dalgaları şiddetleri arttırılarak orta kulağa iletilir. Bu artış yaklaşık olarak 12 db civarındır. Ayrıca DKY de salgılanan kulak kirinin koruyucu özelliği bulunmaktadır.

Orta kulak boşluğu

Orta kulak bir boşluk şeklindedir.

- ☐ Dış duvarında, tympanik membrane bulunur.
- ☐ İç duvarında iç kulağın kemik duvarı vardır. Bu duvarda yukarda oval pencere aşağıda yuvarlak yer alır.
- ☐ Arkada da, mastoidin hava hücreleri
- ☐ Önde duvarda, timpan boşluğu ile nazofarinks arasında bağlantıyı sağlayan östaki tüpü bulunur.

Tympanic membran;

Dış kulak yolu ve orta kulak boşluğunu ayıran 8-10 mm çaplı fibroz yapıdır.

Dış kulak yolundan kendisine iletilen ses enerjisi sayesinde titreşip timpanic zarla bağlantılı olan orta kulaktaki malleus kemikçliğini titreştirerek diğer kemiklerinde titreşimini sağlar, böylece dış kulak yolundan orta kulakta ki kemikçik sisteme iletilen ses enerjisi en son stapes aracılığı ile oval pencereye iletilerek iç kulağa gönderilmiş olur.

Timpanic membrane normal kulakta saydam şeffaf olup kulak muayenelerinde renk ve şekil değişikliklerine göre tanımıyı koymamızı sağlar

Orta kulak kemikçikleri:

- Malleus (çekiç)
- Incus (örs)
- Stapes (üzengi)

- Malleus, timpanik membrane ile bağlantı halindedir.
- Stapesin tabanı kemik labirentteki oval penceresine (fenestra vestibuli) oturur.
- Kaldıraç benzeri hareket yaparak dış kulaktan ve kulak zarından alınan ses dalgalarının şiddetini arttırarak mekanik titreşimler halinde iç kulaktaki sıvıya iletirler.
- Ses dalgaları büyük alanlı kulak zarından küçük bir alana sahip olan üzengeye (stapes) geldiğinde yoğunlaşır ve ses yaklaşık 15-20 defa büyütülerek iletilir (kaldıraç teorisi)

Östaki Tüpü: Orta kulak boşluğunun ön duvarından nazofarinkse uzanan yassı bir kanaldır. Östaki borusu orta kulağın havalanmasını ve kulak zarının her iki tarafında aynı derece basınç olmasını sağlar.

Orta kulak

1- Dış duvar –TM: 8-9 mm çapında
annulus- Fibröz parça
pars tensa- gergin
pars flaccida – gevşek
manibrium mallei

3 tabaka ;	cift epitel fibröz tabaka mukoza tabakası	sirküler pars tensa radyal
------------	---	----------------------------------

innervasyonu V., VII ve X dış yüz
IX iç yüz

Orta kulak

2- Alt duvar

- Hypotimpanum parçasının tabanı
- N. Tympanicus
- Bulbus vena jugulara ince kortikal bir kemikle ayrılır.

3- Ön duvar

- Tuba östaki
- M. Tensor tympani kanalı

4- Üst duvar

- Tegmen tympani
- Orta kafa çukuru

Orta kulak

5- İç duvar

- promontoryum kabarıklık , koklea basal kıvrımı
- promontoryum arka alt ve üstte iki delik;
 - ✓ Oval ve yuvarlak pencere
 - ✓ Oval pencere üstünde fasiyal sinir

6- Arka duvar

Aditus ad antrum vasıtası ile mastid hücrelere geçilir.

Orta kulak kemikçikleri

➤ Malleus

➤ İnkus

➤ Stapes

Malleus

- 7.5- 9 mm
- manibrium mallei
- capitulum mallei

İnkusla – inkudo malleolar eklem

İnkus

6 mm uzunluğunda



gövde (corpus)



uzun kol – crus longus



kısa kol –crus brevis

stapesle- inkudostapedial eklem

Stapes

3 – 3.5 mm

- baş (capitum)
- iki bacak (cruslar)
- taban (footplate)

oval pencere

angular ligaman

Muscle Tensor timpani

22 mm

malleus mallei kısmına yapışır

processus cochleoriformis'e ve sfenoid büyük kanadına yapışır.

v. Sinir

Muscle Stapedius

stapes boynu ile pyramidal eminense arası

N. Stapedius- VII sinir

stapesi arkaya çekerek tabanı tespit eder.

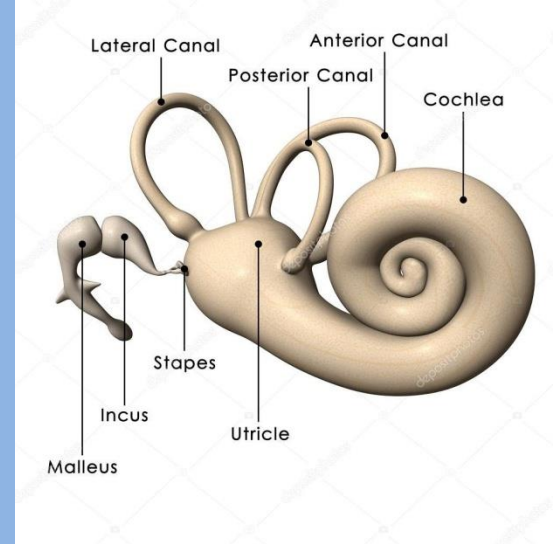
yüksek seslerin iç kulağa girişini önler.

bu anlamda yüksek seslere karşı koruyucu görevi var

İç kulak yapıları

İç kulak koklea ve labirenter sistemden oluşur. İşitme ile ilgili olan bölüm koklea'dır. Denge organı vestibul ve yarım daire kanallarıdır.

- **Kemik** labirent: Kemik labirent içinde perilenf denilen sıvı vardır, Na konsantrasyonu yüksek, K⁺ konsantrasyonu düşüktür; bu özelliği ile ekstraselüler sıvı içeriğine benzer. Kemik labirent üç parçadan oluşur. Kemik labirenti;
 - Koklea
 - Vestibül
 - Yarım daire kanalları



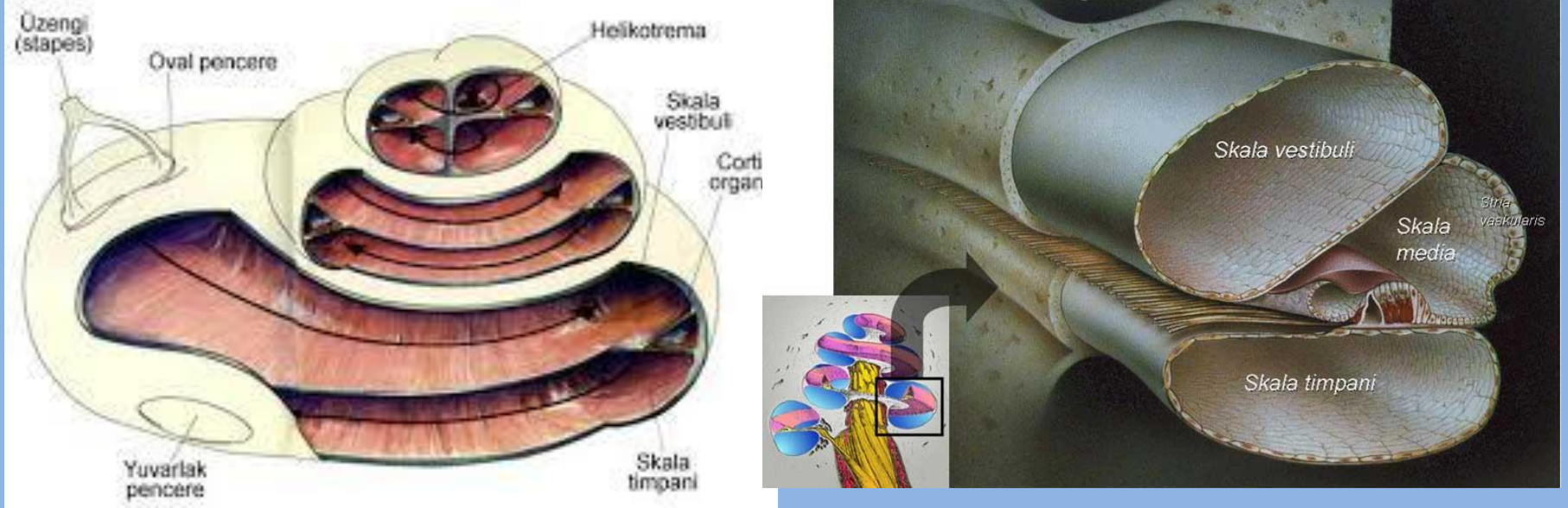
- Membranöz labirent: Endolenfatik sıvı içerir, yani K⁺ oranı yüksek, Na oranı düşüktür. Membranöz labirent perilenf sıvısının içine yerleşmiştir.

İÇ KULAK

Koklea :

- İç kulağın ön kısmında bulunan ve şekli salyangoza benzeyen organ.
- 30 mm uzunluğunda $2 \frac{3}{4}$ tur yapar
- Apikal, medial, basal

KOKLEA (COCHLEA)



Kokleanın boyuna kesiti: Şekilde kokleanın üçlü kanal sistemi ve sarmal yapısı net olarak görülmektedir. Skala vestibuli (3) ile skala timpani (4) arasında yer alan skala media (2) ve içindeki Corti organına bağlı sinirler, tüm koklea boyunca 'spiral ganglion' (1) adı verilen ganglionlarla kokleadan ayrılırlar. Bu ganglionların uzantıları daha sonra kokleanın orta kısmında sarı renkte kalın bir sinir lifi demeti olan koklear siniri (işitme sinirini) (6) oluştururlar. Bu sinir, hem kokleadan gelen gelen sese bağlı duyu sinyallerini beyin ve ilişkili merkezlere taşır, hem de koklea aktivitesini düzenlemek üzere merkezi sinir sisteminden gönderilen sinyalleri merkezden kokleaya iletmekle görevli sinir liflerini içerir.

Kokleanın tepe kısmı 'helikotrema' adını alır ve skala timapani ile skala vestibuli bu kısımda birbirleri ile birleşirler. Skala media ise kapalı bir uç halinde helikotremada sonlanır

Koklea

- Kendi üzerine yaklaşık 3 defa kıvrılıp kör olarak sonlanan çapı giderek azalan bir sarmal kemik sistemidir. Üzeri ince bir laminar kemik tabakası ile örtülüdür. Koklea temporal kemiğin petroza kısmı içine yerleşmiş durumdadır.
- Apeksine kupula denir, apeksi öne ve yana yöneliktir. Çapı bazalde 9mm, yüksekliği ise 5mm'dir.
- Skala media, stria vaskülaris denen özel damar ağının aktivitesine bağlı olarak sentezlenip salgılanan, potasyum derişimi oldukça yüksek bir sıvıyla ("endolenf" sıvısı ile) doludur. Skala media ile skala vestibuli'yi 'Reissner zarı' ayırır. Skala timpani ile skala media'yı ise "baziler zar" ayırır. Skala timpani ve skala vestibüli, perilenf sıvısı ile doludur. Endolenf ve perilenf sıvıları birbirlerine karışmaz. Baziler zar oldukça kompleks bir yapıdır ve üzerinde "Corti organı"nı taşır. Corti organı baziler membranın skala media yüzünde yer alan, duyu (tüy) ve destek hücrelerinden oluşan reseptör organıdır. Corti organındaki tüy hücreleri üst kısımlarından 'tektoryal zar' denilen bir yapı ile ilişki içindedir.

VIII. Sinir N. Statoakustikus



Nerves Koklearis



Nerves vestibularis

Santral işitme yolları

- **Sekizinci sinir:** birkaç daldan oluşur; superior vestibüler sinir, sakküler sinir, inferior vestibüler sinir ve koklear sinir. Bu sinirler otik kapsülü değişik kanallardan geçerek iç kulak yoluna girerler ve buradan Nervus facialis ve Nervus intermedius ile birlikte seyrederler. Koklear ve vestibüler sinirlerin yaptığı olukta, fasiyal sinirle bu sinirler arasına yerleşmiştir.
- **Koklear çekirdekler:** Koklear çekirdekler bütün işitme sinir lifleri için ilk konaktır. Çekirdekler pontomedüller kavşakta bulunurlar ve simetrikler. [8]
- **Süperior olivary kompleks ve olivokoklear demet:** Superior olivary kompleks, ponsun gri cevherinin hemen arkasında ve ponsun alt kısmında yerleşmiştir.

Santral işitme yolları

- **Lateral lemniscus;** En önemli çıkan yoldur. Beyin sapının yan tarafında bulunur. Koklear çekirdekler superior olivary kompleksi inferior kollikulusa bağlar.
- **İnferior kollikulus:** İki taraflıdır ve mezensefalonda yerleşmiştir. Beyin sapının tavanının bir kısmını yapar. Çıkan işitme lifleri için başlıca konağı oluşturur ve akustik bilgileri hazırlar. Alt beyin sapından gelenleri üst kısımdaki medial genikulat cisme ve işitme korteksine gönderir.
- **Medial genikulat cisim:** Talamusta bulunur. İnferior kollikulus ile işitme korteksi arasında bir ara istasyondur.

Santral işitme yolları

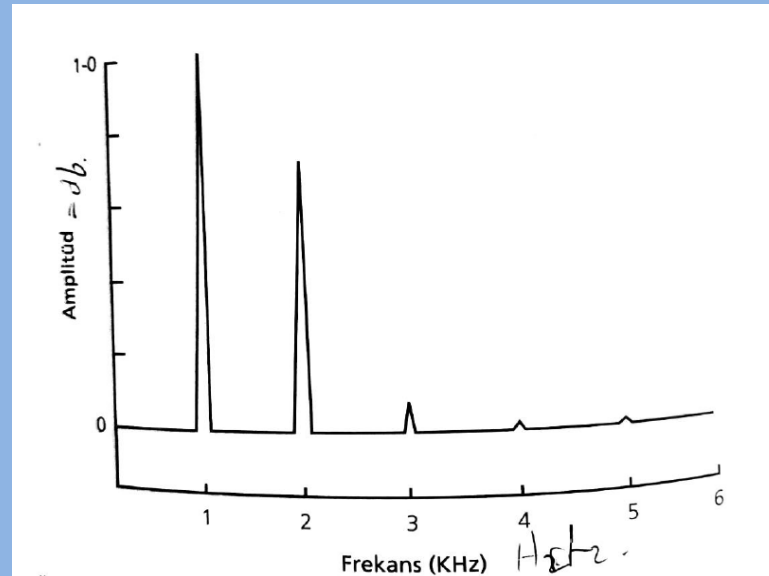
- **İşitme Korteksi:** Primer işitme korteksi ve ilişkili sahalar olmak üzere iki kısma ayrılır. İlişkili sahalar hem akustik hem de diğer duysal girdileri alırlar. Primer işitme korteksi ***Brodmann sahası*** adını alır ve 41-42 diye numaralandırılmıştır. Temporal lobun üst kısmında yerleşmiştir. Spesifik ve nonspesifik ilişkili sahalar ile çevrelenmiştir. Korti organında oluşan uyarılar ganglion spiraledeki (Corti gaglionu) sinir hücrelerinin dendritleri tarafından algılanır. Bu sinir hücrelerinin aksonları Nervus cochlearis adını alarak bu uyarıları ponttaki koklear çekirdeklere götürür.
- **Koklear nukleuslar,** ventral nukleus (VN) ve dorsal nukleus (DN) olmak üzere iki gruptur. Ventral nukleuslar da, anteroventral koklear nukleus (AVKN) ve posterolateral koklear nukleus (PVCN) olarak ikiye ayrılır. Koklear nukleuslardan çıkan nöronlar işitme yollarının ikinci nöronunu oluştururlar. Bunların çoğu çaprazlaşarak karşı taraf superior olivary kompleksine giderler ve az sayıda lifler ise ipsilateral superior olivary komplekse ulaşırlar.

İŞİTME FİZYOLOJİSİ

- **İşitme:** Dışardan gelen ses dalgalarının kulak kepçesi tarafından toplanması sonrası bu dalgaların dış kulak yolundan kulak zarına değerek kulak zarını titreştirmesi sonrası orta kulaktaki kemikçik sisteme iletilen enerjinin iç kulakta elektiriksel enerjiye dönüşüp aksiyon potansiyelleri halinde beyne gönderilip burada ses halinde algılanması olayına “ işitme ” diyoruz.

İŞİTME FİZYOLOJİSİ

- **Ses:** Elastik bir ortamda partikullerin yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan basınç değişimi olarak tanımlanır.
- **Ses frekansı:** Frekans, birim zamandaki (saniye) titreşim sayısı olarak ifade edilir. Frekans birimi Hertz (Hz) olup 1 kilohertz = 1000 Hz 'dir. İnsan kulağı 20-20.000 Hz arası frekansları işitebilir. Frekans, sesin incelik ve kalınlığını tanımlar. Frekansın psikoakustik eşdeğeri perdedir (pitch).
- **Ses şiddeti:** Amplitud, ses dalgasının nötral pozisyondan itibaren maksimum yüksekliğidir. Sesin şiddeti onun kuvvetini gösterir; şiddetin psikoakustik eşdeğeri ise gürültüdür (loudness). Ses şiddetini ifade etmek için desibel (db) kullanılmaktadır.



İşitme Fizyolojisi

- **Sesin farklı ortamlara geçişi:** Hava, sıvıya göre daha hafif ve sıkıştırılabilir bir ortam olduğu için ses dalgaları hava moleküllerinin hareketi ve vibrasyonunu, sıvı moleküllerine göre daha fazla sağlar. Aynı şekilde , aynı ses basıncı, sıvı ortamdaki moleküllerin hareket ve vibrasyonunu katı ortamdaki moleküllere göre daha fazla sağlar. Burada belirleyici olan, ortamın ses dalgalarına göstereceği direnci ve geçirgenliği, diğer bir ifadeyle ortamın moleküllerinin sıklığını ifade eden empedansdır (direnç). Yani ses iletimi en iyi havada, daha sonra sıvı ortamda, en kötüde katı ortamda olur.

İşitme fizyolojisi

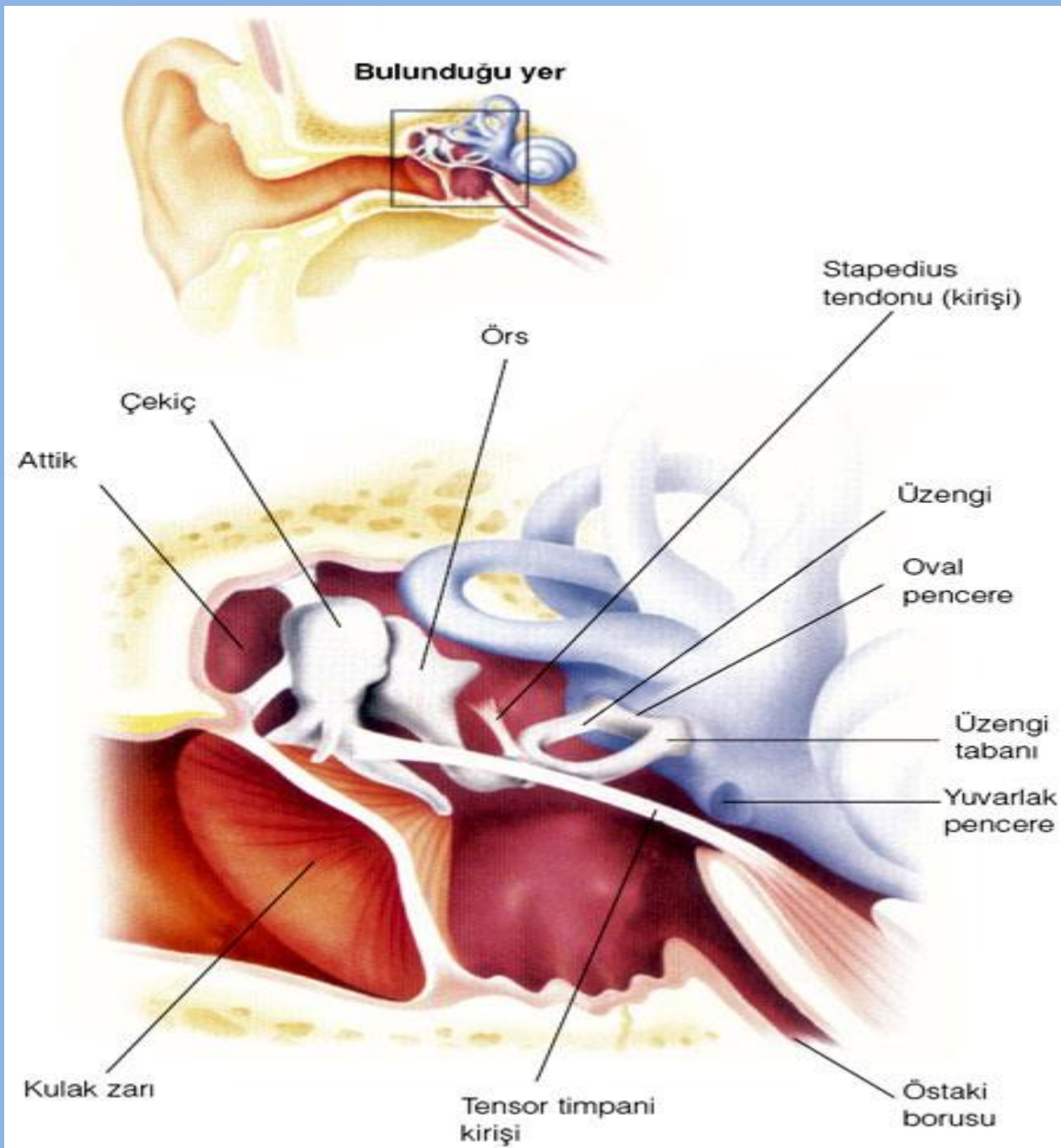
- **İşitme safhaları:**
 - ✓ **İletim (conduction):** sesin dış ortamdan aurikula ve dky tarafından toplanması, TM ve orta kulak kemikçikleri aracılığı ile kokleadaki korti organına iletilmesi safhasıdır.
 - ✓ **Enerji dönüşümü (Transduction):** Corti organında, mekanik ses enerjisinin nöral (elektriksel) enerjiye dönüştürülmesi safhasıdır.
 - ✓ **Sinirsel kodlama ve aktarma (neural coding and relay) :** Corti organında tüylü hücrelerde ortaya çıkan enerjinin sinir liflerine kodlanarak aktarılması safhasıdır.
 - ✓ **Sesin algılanması ve birleştirilmesi (cognition and association):** Sinir lifleri ile santral işitme merkezine gelen bilginin birleştirilmesi ve çözümlenmesi ile sesin anlaşılması safhasıdır.

İşitme Fizyolojisi

- Normalde ses dış ortamdan yani havadan iç kulaktaki kokleaya geçerken, sıvı empedansı (direnci) havaya göre daha fazla olduğu için, ses basıncı 20-30 dB enerji kaybına uğrar. Ayrıca oval pencerenin küçük yüzeyi nedeni ile ses enerjisinin yalnızca %3 ü kokleaya geçer. Bu etkiyi minimuma indirmek için, dış ve orta kulaktaki amplifikasyon sistemi enerji kaybını telafi eder.
- Aurikula ve dky dış ortamdaki çarpışan ses dalgalarını toplayarak daha yüksek bir ses basıncı ortamı oluşturur ve TM 'a iletilen ses enerjisinde 15-20 dB'lik kazanç sağlar, buna **baffle etkisi** denir.

- **Orta kulağın ses transformatör mekanizması:** Orta kulağın dky 'daki ses enerjisini kokleanın sıvı ortamına iletmesi 2 yoldan olur. Bunlardan biri TM aracılığı ile orta kulak havasının titreşimi sonucu, oval ve yuvarlak pencereler yolu ile kokleaya iletilir. 2. yol ise TM'dan kemik sistem aracılığı ile oval pencereden perilenfe aktarılması ile olur. Oval pencere içinde stapesin **piston** benzeri titreşimi, oval pencere aracılığı ile scala vestibüliye aktarılan basıncın, yuvarlak pencere yolu ile skala timpaniye aktarılan basınçtan çok daha yüksek olmasını sağlar. İki skala arasındaki bu basınç farkı, koklear yapıların mekanik uyarımı için önemlidir.

Orta kulaktaki transformatör etkide iki şey önemlidir: Temel faktör TM yüzeyinin stapes taban yüzeyinden (oval pencere) daha geniş olması sonucu, uygulanan sabit kuvvetin daha küçük yüzeye sabit olan oval pencereye ulaşan basınç artar. Bu sayede **yüzey farkından** kaynaklanan **22/1** oranında basınç artımı stapes tabanından koklear sıvılara doğru gerçekleşir. İkinci faktör, titreşen kemikçiklerin **kaldıraç etkisidir**. Malleusun uzun ekseninin, inkusun uzun kolundan 1.3 kat daha uzun olması , ses dalgasını kuvvetlendirerek kaldıraç etkisi yapar. Bu yolla ses iletiminde 1.3:1 oranında artış sağlanır.



Transduksiyon(koklea)

- Koklea, orta kulaktan gelen akuistik enerjiyi elektrokimyasal uyarana dönüştürerek santral sinir sistemine iletir (transduksiyon).
- Stapesin tabanı ile skala vestibuliye ardından kohleaya iletilen ses enerjisi ilk olarak perilenfi harekete geçirir. Bu safhadan sonra kohleanın iki önemli görevi başlar. Bunlardan birincisi iletimdir, akustik enerjinin korti organındaki tüy hücrelerine kadar taşınmasıdır. İkincisi ise dönüşümdür, buda korti organındaki tüy hücrelerine gelen mekanik iletim dalgasının kimyasal veya elektriksel gerilimlere dönüştürülüp, işitme sinirine verilmesi hadisesidir. Bu dönüşüm, sesin perdesi, tını, faz ayırımı, şiddeti gibi fiziksel özelliklerinin kaybolmayacağı bir biçimde olur ve ses enerjisindeki bu özellikler, oluşacak elektriksel gerilimlerle şifrelenerek, santral sinir sistemin gönderilirler. Basiller membranın hareketi sırasında üstündeki tüylü hücreler tektorial membrana çarparak mekanik enerjiyi elektrokimyasal enerjiye dönüştürürler. Bu da sinir impulsları ile işitme merkezine iletilir.

SESİN KOKLEAYA GELİŞİ VE BAZİLER ZARDAKİ DEĞİŞİMLER

Stapes (üzengi) kemiğinin tabanı, kokleanın tabanında bulunan ve kokleanın girişini oluşturan 'yuvarlak pencere' ile temas halindedir. Stapes tabanının oval pencereye doğru hareketi perilenf sıvısını skala vestibuli boyunca hareket ettirir. Bu hareket helikotremanın skala timpaniye geçerek oval pencerenin alt kısmında bulunan yuvarlak pencereyi dışarı doğru iter. Perilenfin bu hareketi hem endolenfin hem de baziler membranın titreşmesine neden olur.

Baziler zar, skala mediayı scala timpani'den ayıran fibröz bir membrandır. Baziler membran oval pencere yakınında dar ve sert iken apikal uçta daha geniş ve esnektir. Zardaki bu değişkenlik ile gelen sesin frekansına göre baziler zarın farklı pozisyonlarda titreşmesi sağlanır.

SESİN KOKLEAYA GELİŞİ VE BAZİLER ZARDAKİ DEĞİŞİMLER

Yüksek frekanslı bir ses dalgası, zarın doğal frekansının yüksek olduğu ilk kısımlarında rezonans oluşturup en yüksek düzeyde titreşime neden olurken; düşük frekanslı sesler de zarın, doğal frekansı düşük olan son (helikotrema) kısmında en fazla titreşimi oluştururlar. Bu mekanik ses ayarı sonucunda kokleanın baş kısmındaki tüy hücreleri ve dolayısıyla sinaps yaptıkları nöronlar yüksek dalga boylu seslerde daha çok uyarılırken; düşük frekanslı seslerde bunun tam tersi söz konusudur.

İşitme fizyolojisi

- I. Orta kulakta ses titreşimleri iç kulak sıvılarına iletilmekte
- II. İç kulakta frekansların periferik analizi yapılmakta (pesler apikal – tizler bazal kıvrım)
- III. Mekanik enerji – silialı hücreler tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmekte

Orta kulak fizyolojisi

Ses enerjisi auriculada toplanıp dış kulak yoluna yönlendirir. Dış kulak yolundan gelen ses enerjisi kulak zarını titreştirir, zara yapışık olan malleusa buradan inkusa iletilir. Malleus ve inkus lineer bir aks üzerinde hareket ederler, bu hareket inkusun uzun kolu vasıtasıyla inkudostapedial ekleme ve stapese, oradan da oval pencereye buradan da iç kulak sıvılarına iletilir.

Orta kulak gaz ortamdır, iç kulak sıvı ortamdır. Gaz ortamdan sıvı ortama geçerken ses enerjisinin bir kısmı yansır, bir kısmı absorbe olur. Böylece ses enerjisinde dB cinsinden yaklaşık 30 dB'lik kayıp ortaya çıkar.

1. Malleus ve inkus bir manivela gibi hareket eder ve sesi $1/1.3$ oranında yaklaşık 2.5 dB arttırır.
2. Kulak zarının titreşen yüzeyi ile oval pencerenin titreşen yüzeyi arasındaki oran farklıdır. TM titreşen bölümü 55 mm^2 dir. $55/3.2 = 17$ kat arttırılarak geçer, buda yaklaşık 25 dB kazanç demektir.

Toplam 27.5 dB kazanç sağlanır.

Pencerelerin rolü

Oval ve yuvarlak pencere arasındaki faz farkı koklea içindeki potansiyellerin optimum olması işitmeyi artırır.

İç kulak fizyolojisi

Koklea içinde sesin iletiminde birçok teori vardır:

1. Helmutz'un yer teorisi; Her Hz için baziller membran üzerinde özel bir nokta vardır, orası titreşir.
2. Rutherford'un telefon teorisi ; Basiller membran tümüyle titreşir. İşitme sinirinde her frekans için aynı sayıda deşerj alır ve sesler beyinde ayırt edilir.
3. Von Bekesy'nin ilerleyen dalga teorisi; bu teoriyle 1943 yılında Nobel almıştır. Ses enerjisi baziller membranı tabandan apekse doğru hareketlendirir. İletim dalgası baziller membran üzerinde teşıdığı frekansa uyan bölgede maksimum amplütüde çıkar fibrilleri uyarır.

Ses enerjisi baziller membranda titreşirken, silialı hücreler tektorial membrana çarpıp ayrılırlar. Böylece mekanik enerji elektrokimyasal enerjiye dönüşür. Bu enerjide sinir impulsları doğurur ve VIII. sinirin akuistik dalı tarafından beyinde temporal lobun Heschl girusunda sonlanır ve ses olarak algılanır.

Koklea → Sekizinci sinir (Auditory nerve) → Koklear çekirdekler → Süperior olivar kompleks → Lateral lemniskus → İnferior kollikulus → Medial genikulat cisim → İşitme korteksi

