

İşitme Sistemi 8

Tuğba Ural¹

Özet

İşitme sistemi, bireylerin çevresel sesleri algılamasını, anlamlandırmasını ve iletişim kurmasını sağlayan en temel duyuşal sistemlerden biridir. İnsan yaşamında özellikle dil gelişimi, sosyal etkileşim ve öğrenme süreçleri açısından kritik bir rol oynar. İşitme sisteminin sağlıklı çalışması, bireyin yalnızca çevre ile etkileşimini değil aynı zamanda bilişsel işlevlerini de doğrudan etkilemektedir (Moore, 2012).

İşitme sistemi genel olarak periferik işitme sistemi (dış kulak, orta kulak, iç kulak ve işitme siniri) ve santral işitme sistemi (koklear nükleus, süperior olivary kompleks, lateral lemniscus, inferior kollikulus ve medial genikulat body) olarak iki ana bölümde incelenmektedir. Ses dalgalarının kulaktan beyindeki işitsel kortekse kadar uzanan yolculuğu, kompleks anatomik ve fizyolojik süreçlerin sonucudur. Bu süreçlerin detaylı olarak incelenmesi hem normal işitmenin anlaşılmasına hem de patolojik durumların değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Pickles, 2013). İşitsel sistemi sadece anatomik ve fizyolojik olarak düşünmekle kalmayıp, aynı zamanda konuşma ayrımı, yön bulma, işitsel dikkat, bellek ve işitsel biliş gibi üst düzey işitsel işleme süreçlerini de düzenler. Bu nedenle işitme sistemi, yalnızca anatomik bir yapıdan ibaret olmayıp dil gelişimi, iletişim, sosyal katılım ve bilişsel işlevler üzerinde derin etkileri olan bütüncül bir nörosensöriyel ağ olarak değerlendirilmelidir.

İşitme tarama programlarının önemi, işitme kayıplarının erken dönemde tanımlanabilmesine dayanmaktadır. Çünkü işitme sisteminde meydana gelen bozukluklar, özellikle çocukluk döneminde dil gelişimini ve akademik başarıyı olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Yoshinaga-Itano, 2003). Bu nedenle işitme sisteminin yapısının ve işleyişinin anlaşılması hem klinik uygulamalarda hem de multidisipliner işitme tarama programlarının geliştirilmesinde temel bir basamaktır.

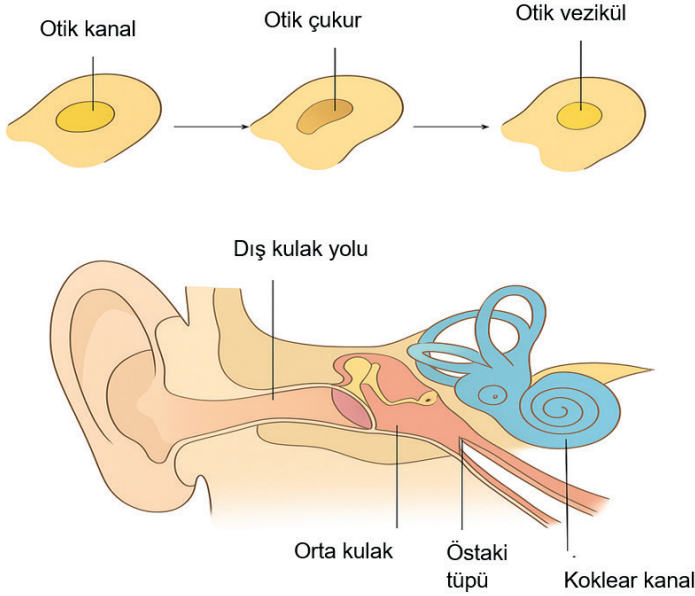
1 Öğr. Gör., Karabük Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Odyometri Programı, Karabük, Türkiye. tugba.ural@karabuk.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6936-6479

Bu bölümde işitme sisteminin anatomisi, fizyolojisi, gelişimsel özellikleri ve işitme fizyolojisine ilişkin temel mekanizmalar ele alınacaktır. Böylece, işitme tarama programlarında multidisipliner yaklaşımların bilimsel temeli ortaya konulacaktır.

1.1. İŞİTME SİSTEMİ

1.1.1. İşitme Sisteminin Gelişimi-Embriyolojisi

İşitme sistemi embriyonik dönemde oldukça erken evrelerde gelişmeye başlar ve prenatal süreç boyunca karmaşık bir farklılaşma süreci geçirir. Kulak yapılarının gelişimi hem ektodermal hem endodermal, hem de mezodermal kökenli hücrelerin etkileşimiyle şekillenir. Bu süreç, dış kulaktan santral işitsel yapılara kadar uzanan geniş bir anatomik organizasyonu içerir (Larsen, 2017).



Şekil 1. Kulak embriyolojisi görseli.

Not: Moore, K. L., Persaud, T. V. N., & Torchia, M. G. (2020). *The developing human: Clinically oriented embryology* (11th ed.). Philadelphia: Elsevier.

1.1.1.1. Dış ve Orta Kulak Gelişimi

Dış kulak yapıları, embriyonun yaklaşık 5. haftasında ilk faringeal arkların çevresinde gelişmeye başlar. Kulak kepçesi, birinci ve ikinci faringeal arkların

etrafında şekillenen altı küçük şişkinlikten (auriküler hillock) köken alır. Bu yapıların birleşmesiyle erişkin dönemdeki kulak kepçesi formu ortaya çıkar (Sadler, 2019). Dış kulak yolu ise ilk faringeal yarığın invajinasyonu ile oluşur.

Orta kulak boşluğu ve östaki tüpü, endoderm kökenli olan ilk faringeal keseden gelişir. Kemikçikler (malleus, incus, stapes) ise farklı embriyonik kökenlere sahiptir: malleus ve incus birinci ark kıvrımdan, stapes ise ikinci ark kıvrımdan gelişir (Moore vd., 2020). Bu kemikçikler gebeliğin yaklaşık 8–10. haftalarında belirginleşir ve ilerleyen süreçte işitme fonksiyonu için gerekli olan iletim mekanizmasının temelini oluşturur.

1.1.1.2. İç Kulak (Koklea ve Vestibüler Sistem) Gelişimi

İç kulak, işitme sisteminin en erken farklılaşan bölümlerinden biridir. Üçüncü haftada otik plak adı verilen kalınlaşmış ektodermal bir alan oluşur. Bu plak invajine olarak otik çukurcuğu ve ardından otik vezikülü meydana getirir. Otik vezikül, ilerleyen süreçte işitme ve denge organlarının temelini oluşturur. İşitme ile ilgili olan koklear yapılar otik vezikülün ventral kısmından gelişirken, vestibüler yapılar dorsal kısımdan şekillenir (Fritzsche vd., 2015). Şekil 1’de bu yapılar görülmektedir.

Koklear kanal yaklaşık 6. haftada kıvrılmaya başlar ve 8. haftada iki tur, 10. haftada ise erişkinlerde görülen 2,5 turluk yapısına ulaşır. Kokleanın iç yapılarından olan Corti organı ise gebeliğin 10–12. haftaları arasında farklılaşmaya başlar. Duyu hücrelerinin ve destek hücrelerinin gelişimi doğuma kadar devam eder (Kelly & Chen, 2009).

1.1.1.3. İşitme Siniri ve Santral Yapılar

Sekizinci kraniyal sinir (n. vestibulokohlearis), otik vezikülden farklılaşan nöral hücrelerin göçü ile oluşur. Spiral ganglion hücreleri kokleadaki duyu hücreleri ile santral işitsel yapılar arasında bağlantı sağlar. Beyin sapı düzeyinde işitme yolları da embriyonik dönemde gelişmeye başlamakta ve doğum sonrası dönemde olgunlaşmasını sürdürmektedir.

İşitme sisteminin embriyolojik gelişimi, işitme tarama programları açısından kritik öneme sahiptir. Kulak ve işitme yollarındaki gelişimsel anomaliler, konjenital işitme kayıplarının en sık nedenlerinden biridir. Örneğin, dış kulak atrezisi, orta kulak ossiküler malformasyonları veya koklear aplazi gibi durumlar, yenidoğan işitme taramalarında erken tanı konulması gereken patolojiler arasındadır (Jackler & Luxford, 1987). Bu nedenle işitme sisteminin normal gelişim basamaklarının bilinmesi, tarama

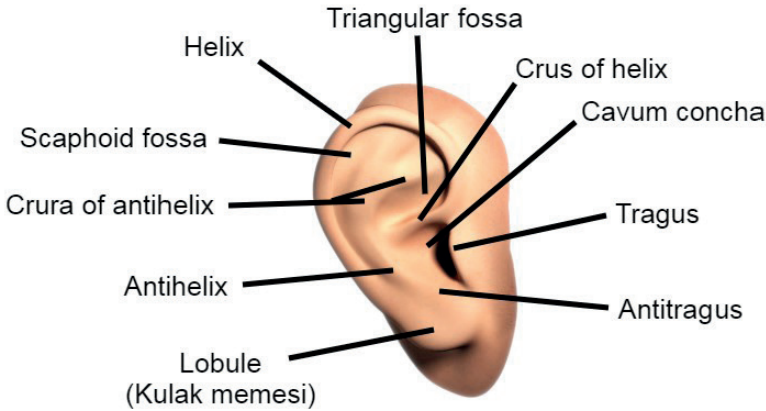
sonuçlarının doğru yorumlanması ve erken müdahalenin planlanması açısından hayati bir önem taşır.

1.1.2. Periferik İşitsel Sistem Anatomisi ve Fizyolojisi

1.1.2.1. Dış Kulak

Dış kulak, işitme sisteminin en dış kısmını oluşturarak çevreden gelen ses dalgalarının toplanması ve orta kulağa iletilmesinde kritik rol oynar. İki temel bölümden oluşur: kulak kepçesi (aurikula/pinna) ve dış kulak yolu (external auditory canal).

Kulak kepçesi, elastik kıkırdaktan oluşmuş ve ince bir deri tabakası ile kaplanmıştır. Helix, antihelix, konka tragus, anti tragus ve lobul gibi kulak kepçesinin kısımları vardır (Şekil 2). Dışarıdan gelen ses dalgalarının ilk temas ettiği yapı kulak kepçesidir ve dış kulak yoluna iletmeye yarar. Anatomik yapısındaki kıvrım ve çıkıntılar, özellikle yüksek frekanslı seslerin yönsel ipuçlarını sağlamasına yardımcı olur. Bu nedenle kulak kepçesinin şekli, bireyin ses kaynağını lokalize etmesinde ve seslere odaklanmasında önemli bir işlev görür (Hunter & Margolis, 1997). Buna ek olarak, yapısal özellikleri sayesinde sesin seçici olarak filtrelenmesi ve güçlendirilmesinde de rol oynar. Kulak kepçesinin sesi 6 dB'e kadar yükseltme özelliği vardır (Scottish Sensory Centre, 2025).



Şekil 2. Kulak kepçesi kısımları.

Not. Audio Archive. (2020, 31 Aralık). Periferik işitme sistemi. Audio Archive Blog. <https://audioarchive1.blogspot.com/2020/12/periferik-isitme-sistemi.html>

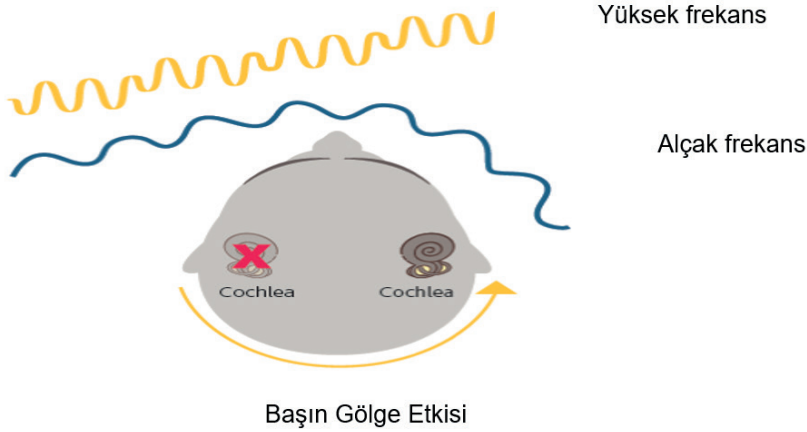
Dış kulak yolu, çapı ortalama 7 mm, uzunluğu ise konkadan itibaren ölçüldüğünde ortalama 2,5-2,7 cm olan S şeklinde kıvrımlı bir boru yapısındadır. Dış kulak yolunun, girişteki (lateraldeki, dıştaki) 1/3'lük bölümü (yaklaşık 8.8 mm) kıkırdak dokudan, geri kalan (medialdeki, iç kısımdaki) 2/3'lük iç bölümü ise kemik dokudan oluşmuştur. Kulak yolunun kıkırdak kısmında serumen (kulak kiri) salgılayan bezler bulunur. Serumen, kulak yolunu nemlendirmenin yanı sıra antibakteriyel özellik göstererek koruyucu bir işlev görür. Ayrıca dış kulak yolunun kıvrımlı yapısı yabancı cisimlerin ve toz partiküllerinin doğrudan orta kulağa ulaşmasını engeller (Pickles, 2013).

Ses enerjisi dış kulak yolunda ilerlerken amplifiye edilerek kulak zarına iletilir. Yani dış kulak yolu rezonatör görevi görür. Kulak yolunun rezonans frekansı 2-4 kHz'dir. Bu frekanslarda amplifikasyon en yüksek düzeye ulaşır. (Özellikle 4 kHz'de 12 dB'e kadar yükselebilir.) Bu durum ise sese karakter verir. Bu frekans aralığı insan konuşmasının en kritik bileşenlerini içerdiğinden, dış kulağın rezonans özelliği konuşmanın anlaşılabilirliğine önemli katkı sunar (Moore, 2012).

İç kulakta yer alan Corti organına sesin ulaşması sırasında; baş ve vücut yapıları engelleyici bir rol üstlenirken, kulak kepçesi ve dış kulak yolu sesi yönlendirmekte, orta kulak ise iletilen sesi güçlendirmektedir (Zheng vd., 2022).

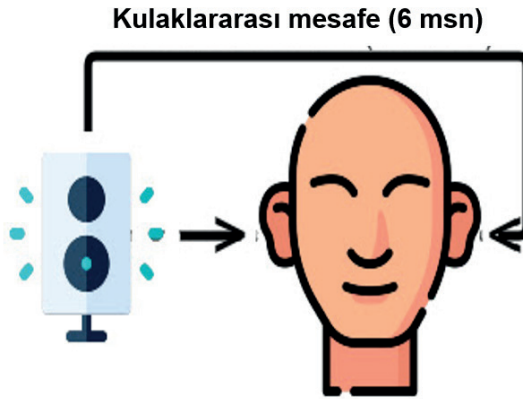
Engelleyici etkiler:

- Başın Gölge Etkisi (Shadow Effect)
- İnteraural Mesafe
- Başın Gölge Etkisi; Sesin geliş yönünün zıt tarafındaki kulakta, başın oluşturduğu engelleme sonucunda ses basıncı azalır. Bu gölge etkisi, sesin frekansı ve dalga boyuna göre farklılık gösterir. Yüksek frekanslarda başın engelleyici rolü daha güçlü olup, düşük frekanslara kıyasla daha fazla basınç azalması gözlenir (Goupell, 2022). Şekil 3'te görseli görülmektedir.



Şekil 3. Başın Gölge Etkisi.

Not. Hurley P. *Hearing from the Other Side: Understanding the Candidacy for SSD and Treatment Options* 2017 [Available from: <https://www.audiologyonline.com/articles/hearing-from-other-side-understanding-21327>].



Şekil 4. Kulaklararası Mesafe

Not. Best, V., Baltzell, L. S., & Colburn, H. S. (2022). Effects of hearing loss on interaural time difference sensitivity at low and high frequencies. *Trends in Hearing*, 26, 1-14. <https://doi.org/10.1177/23312165221095357>

- İnteraural Mesafe; Başın ses dalgalarını engelleme düzeyi, başın genişliği ile ilişkilidir. İki kulak arasındaki mesafe (interaural mesafe), bu engelleyici etkinin ortaya çıkmasında belirleyici bir unsurdur (JASA, 2022). Ses, yakın kulağa ulaştıktan yaklaşık 0,6 msn sonra diğer kulağa erişmektedir. İnteraural mesafe alçak frekanslarda daha fazla gözüktür (Best vd., 2022). Şekil 4'te görülmektedir.

Sonuç olarak dış kulak, işitmenin başlangıç basamağı olarak hem mekanik koruma hem de akustik kazanç sağlayan yapısıyla işitsel sistemin bütünlüğü için vazgeçilmezdir.

1.1.2.2. Orta Kulak

Orta kulak, temporal kemiğin içinde dış kulak ile iç kulak arasında yer alan ve ses dalgalarının hava ortamından sıvı dolu kokleaya etkin şekilde aktarılmasını sağlayan bir iletim sistemidir. Bu bölüm; kulak zarı (timpanik membran), orta kulak boşluğu, kemikçikler (malleus, incus, stapes), östaki tüpü, iki kas ve dört ligamenti kapsayan, işitme fizyolojisinde sesin iletimi ve güçlendirilmesinde rol alan bir yapıdır.

Orta kulağın ilk anatomik bölgesi kulak zarı (tympanic membrane, ear drum)'dir. Kulak zarının kalınlığı ortalama 0,1 mm, uzunluğu 10-11 mm ve genişliği 8-9 mmdir. Timpanik membran, dış ve orta kulağı birbirinden ayırmakla görevlidir ve 3 tabakalı yarı saydam yapıdadır. En dıştaki tabaka epitel, ortadaki fibroelastik tabaka ve en içteki mukozal tabakadır. Gelen ses dalgalarını mekanik titreşimlere dönüştürerek orta kulak kemikçiklerine iletir (Standing, 2016).

Kulak zarının alt kısmında yer alan ve alanın yaklaşık dörtte üçünü oluşturan gergin bölüm pars tensa olarak adlandırılır. Daha küçük ve gevşek yapılı olan üst bölüm ise pars flaccida ismini taşır. Otoskop muayenesinde ışığın yansıdığı alan ışık konisi (light reflex/cone of light) olarak tanımlanır. Ortalama 1 cm² büyüklüğe sahip kulak zarının titreşimden sorumlu bölümü yaklaşık 55 mm²'dir ve bu bölge pars tensayı kapsar. Kulak zarının her iki yüzeyi atmosfer basıncıyla dengelenmiş durumdadır. Zarın iç kısmındaki basınç ise östaki tüpü aracılığıyla farinksten gelen hava ile dengelenerek, kulak zarının içe doğru çökmesi önlenir (StatPearls, 2023).

Orta kulak kavitesi; Temporal kemiğin içerisinde yer alan mukoza ile örtülü içi hava dolu boşluktur. Orta kulak boşluğunun altı tane duvarı vardır; medial duvar, lateral duvar, posterior duvar, anterior duvar, süperior duvar, inferior duvardır. Bunların belli anatomik bölgelere komşulukları vardır.

Orta kulakta, kulak zarı ile iç kulak arasında yer alan, membrana tympanica'yı iç kulaktaki reseptör yapılarına bağlayan ve bir zincir oluşturarak ses enerjisinin kulak zarından iç kulağa iletilmesini sağlayan 3 kemikçik bulunur: malleus, incus ve stapes (Pickles, 2013). Bu üç kemikçik vücudumuzun en küçük kemik yapılarıdır. Malleus; üç kemikçik arasında en büyük olanıdır ve kulak zarına ve incusa tutunur. Incus, orta kulaktaki kemik zincirinin 2. kemiğidir. Malleus ve stapesi birbirine bağlar. Stapes, en küçük kemikçiktir ve iç kulakta kokleanın oval penceresine bağlıdır. Bu kemikçikler,

sesin yaklaşık 20–30 dB oranında yükseltilmesine katkıda bulunur. Böylece havadaki ses dalgaları, sıvı dolu kokleaya daha etkin bir şekilde iletilebilir (Pickles, 2013).

Orta kulak kemikçiklerini sabitleyen dört adet ligament ve iki kas bulunur. Ligamentler, kemik zincirdeki kemiklerin orta kulak boşluğundaki duvarlara tutunmasını sağlar. Orta kulak kasları musculus tensor tympani ve musculus stapedius olarak adlandırılır. Musculus tensor tympani, malleusa tutunarak kulak zarının gerilmesini veya gevşemesini sağlar; bu sayede kulak zarı seslere karşı daha hassas veya daha az duyarlı hale gelir. Kas kasıldığında timpanik membran gerilir ve bu kas, N. trigeminus'un (V. sinir) mandibuler dalı tarafından innerve edilir. Musculus stapedius ise normal kulaklarda 70–90 dB şiddetindeki seslere yanıt olarak kasılır ve stapes tabanını orta kulağa doğru çekerek iç kulağı yüksek seslerden korur. Bu kas, N. facialis'in (VII. sinir) stapedia dalı tarafından innerve edilir. Stapedius kasının kasılması, stapes'in hareketini kısıtlayarak kokleaya iletilen enerjiyi azaltır; bu mekanizma akustik refleks olarak adlandırılır (Carlos vd, 1993; Keseroğlu & Bayir, 2016; Moore, 2012).

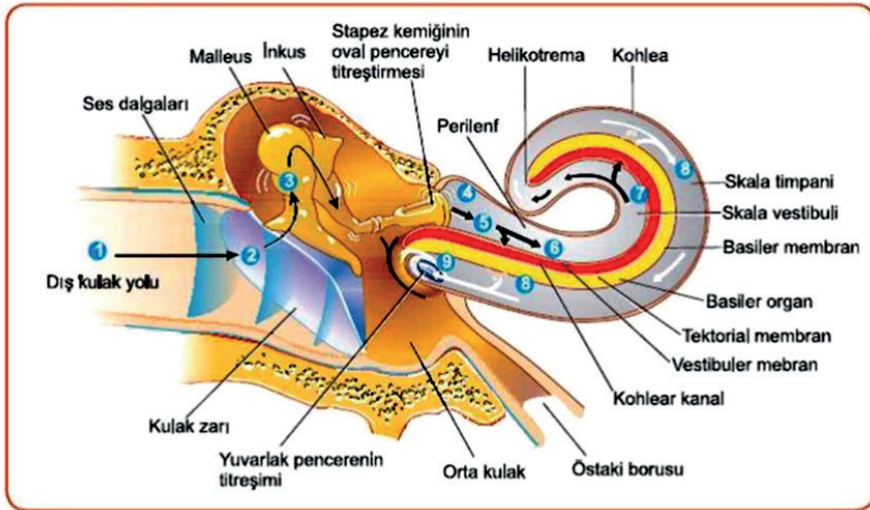
Östaki tüpü, orta kulak boşluğunu nazofarenkse bağlayan bir kanaldır. 1/3 timpanik kısmı kemik, 2/3faringeal kısmı kıkırdaktır. Erişkinlerde ortalama uzunluğu 37 mm'dir ve yaklaşık 45 derecelik açıyla konumlanmıştır. Bebek ve çocuklarda östaki tüpünün yerleşimi daha yatay konumlanmıştır. Bu tüp, orta kulak basıncını atmosfer basıncı ile dengeleyerek timpanik membranın sağlıklı titreşimini sağlar. Ayrıca mukosilier yapısıyla orta kulak boşluğunun drenajını kolaylaştırır ve enfeksiyonlara karşı koruyucu rol üstlenir (Bluestone & Doyle, 2015).

Orta kulak, havadaki ses enerjisinin sıvı dolu iç kulağa verimli biçimde aktarılmasını sağlayan bir mekanik dönüştürücüdür. Ses enerjisi, gaz ortamından sıvı ortama aktarılırken belirli bir oranda kayba uğrar ve bu kayıp yaklaşık 30 dB'e kadar ulaşabilmektedir. Kulak zarı ile orta kulak kemikçiklerinin temel görevi, havadan sıvıya geçişte ortaya çıkan ve iç kulak sıvılarının akustik direncinden kaynaklanan enerji kaybını dengelemektir. Bu işlev üç ana mekanizma sayesinde gerçekleşir: (1) incudomallear eklem kaldiraç etkisi; malleus ve incus arasındaki eklem kaldiraç gibi çalışarak, malleus kolunda bulunan işitsel enerjinin incus koluna yaklaşık 1,3 kat daha güçlü aktarılmasına olanak tanır. (2) kulak zarı ile stapes tabanı arasındaki yüzey farkı; kulak zarının titreşime katılan alanı ile stapes tabanı arasında yapılan çalışmalarda 1/15 ile 1/20 arasında değişen bir oran bildirilmektedir (örneğin, zarın titreşen yüzeyi yaklaşık 55 mm² iken, stapes tabanı 3.2 mm²dir). (3) timpanik membranın yüzey geometrisi (buckling/kısmi

kıvrılma) nedeniyle oluşan basınç yoğunlaşması; bu mekanizma da sesin sıvı ortama daha etkin şekilde iletilmesini sağlar. Bu üç mekanizma bir arada çalışarak, havadaki ses basıncını stapes aracılığıyla kokleanın perilemf sıvısına daha yüksek bir basınç olarak iletir; böylece akustik enerjinin büyük kısmı iç kulağa aktarılır ve yansıma/enerji kaybı minimize edilir (Moore, 2012; Pickles, 2013).

Enerji kaybını karşılama konusunda diğer bir görüş ise Helmholtz'un "Konik Kaldıraç Hipotezi" dir. Timpanik membranın titreşimi, gelen ses dalgasının frekansına bağlı olarak farklı bölgelerde farklı genlikte hareket üretir. Bu teoriye göre sirküler ve radial liflerden oluşan kulak zarı üzerine çarpan sesler Umbo'da toplanıp, burada 30 dB'lik bir amplifikasyona neden olur, bu şekilde kemikçik sisteme iletilir (Pickles, 2013; Standing, 2016).

Son olarak, orta kulak fizyolojisi, işitme tarama programları açısından pratik çıkarımlar sağlar: yenidoğan taramalarında veya tarama sonrası yapılan tanısal olgularda orta kulak durumunun (efüzyon, sekresyon, negatif basınç) ayrıştırılması, gerçek sensörinöral kaybın iletim tipi nedenlerden ayrılmasında kritiktir. Bu nedenle tarama protokollerinde timpanometri veya otoakustik emisyonların yorumlanması gibi orta kulak değerlendirmelerini içeren adımların bulunması önerilir (Pickles, 2013). Periferik işitme sistemi yapıları Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Periferik işitme bölümleri.

Not. Tanbek, A. T. (2020). *Kemiğe implante işitme cihazı kullanan hastalarda işitme sonuçlarının ve yaşam kalitesinin değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi)*. İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

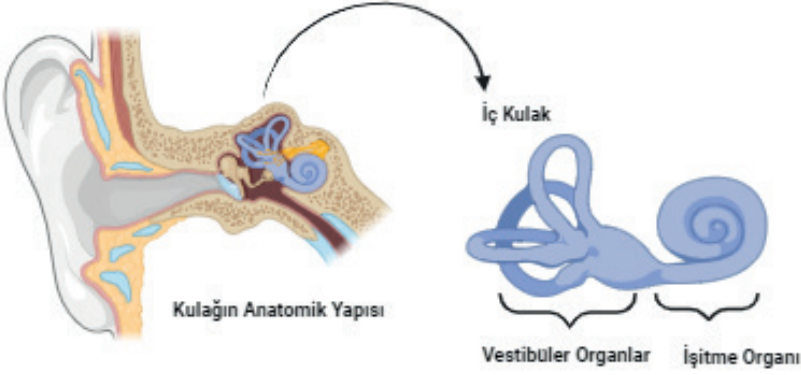
1.1.2.3. İç Kulak

İç kulak, temporal kemiğin petröz kısmında yer alan ve kemik labirent ile zar labirentten oluşan karmaşık bir yapıdır. Yuvarlak ve oval pencereler yolu ile orta kulak ile, koklear ve vestibüler aquaduktuslar yolu ile de kafa içi ile bağlantılıdır. Fonksiyonel olarak iki ana bileşene ayrılır: koklea, işitmeden sorumludur; vestibüler sistem ise dengeden sorumlu organdır. Şekil 6'da bu yapılar görülmektedir.

Koklea, iç kulağın primer işitme organıdır. Giderek azalan çapı ile kendi üzerinde yaklaşık 2,5- 2,75kere sarılan ve apekte sonlanan spiral bir kanaldır. Koklea; skala vestibüli, skala timpani ve skala media olmak üzere üç tübüler kompartmandan oluşur. Scala vestibuli ve Scala timpani tepe kısmında, helikotrema adı verilen bölgede birbirleriyle birleşir. Scala vestibuli'nin diğer ucu vestibüle açılır. Scala timpani'nin diğer ucu yuvarlak pencere ile sonlanır. Skala media, kapalı uçlu bir yapı olarak helikotremada son bulur ve iki tübül arasında yer alır. Üçgen biçimindeki bu bölüm, skala vestibuli'den Reissner zarı ile, skala timpani'den ise baziler zar aracılığıyla ayrılır. Skala timpani ve skala vestibuli perilenf sıvısı içerirken, skala media endolenf sıvısı ile doludur ve bu iki sıvı birbirleriyle karışmaz. Yaklaşık 34 mm uzunluğa sahip baziler membran, bazal uçta dar ve sert, apikal uçta ise daha geniş ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu zar üzerinde işitmenin gerçekleştiği korti organı yerleşmiştir. Kortik organının görevi, baziler membranın titreşim hareketlerini nöral uyarılara çevirmektir. Burada duyu ve destek hücreleri vardır. Duyu hücreleri, dış ve iç tüylü hücreler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kortik organındaki tüylü hücrelerin üst kısmı, tektorial zar olarak adlandırılan yapıyla temas halindedir. Baziler membranın hareketi sırasında bu tüylü hücreler tektorial zar ile etkileşime girer ve mekanik enerjiyi elektrokimyasal enerjiye dönüştürür. Oluşan sinir impulsları, işitme sinirine ve buradan işitme merkezine iletilir. Bu yapı, frekansların tonotopik olarak kodlanmasını sağlar (Hudspeth, 2014; Kandel vd., 1992; Pickles, 2013).

Kokleadaki bu işitme olayı özetle şu şekilde gerçekleşir: Ses dalgaları stapes'in oval pencereye yaptığı basınç hareketiyle perilenf içinde dalgalanmalar oluşturur. Bu dalgalar, kokleanın baziler membranı boyunca ilerleyen dalga hareketi (traveling wave) şeklinde yayılır. Baziler membranın yapısı bazaldan apikale doğru değişir: bazal kısım dar ve sert olduğundan yüksek frekansları, apikal kısım geniş ve daha yumuşak olduğundan düşük frekansları kodlar. Bu tonotopik organizasyon, frekans ayrımının temelini oluşturur (Robles & Ruggero, 2001). Baziler membranın hareketi, Kortik organındaki tüylü hücrelerin stereosilyalarının eğilmesine yol açar. Bu eğilme, iyon kanallarının açılıp kapanmasına neden olur; potasyum iyonlarının hücre

içine girişi ile depolarizasyon gerçekleşir. İç tüylü hücrelerin depolarizasyonu sonucunda nörotransmitterler salınır ve işitme sinirinin afferent liflerinde aksiyon potansiyelleri başlatılır (Dallos, 1992).



Şekil 6. İç Kulağın Anatomik Yapısı.

Not. Ural, T. (2024). Tıp ve sağlık bilimlerinde multidisipliner bakış-V: İşitsel ve vestibüler rehabilitasyona bütüncül yaklaşım. Ankara: İKSAD Yayınevi.

Vestibüler sistem ise utrikül, sakkül ve üç yarım daire kanalı (semisirküler kanallar) ile temsil edilir. Utrikül ve sakkül yerçekimi ve doğrusal hareketleri algılamak; yarım daire kanalları açısız ivmeyi algılar. Vestibüler reseptörler, vestibüler sinir aracılığıyla santral yapılara iletilen sinyallerle dengeyi ve göz hareketlerinin koordinasyonunu düzenler (Goldberg vd., 2012).

Her ne kadar vestibüler sistemin temel işlevi denge olsa da iç kulakta koklea ile yakın anatomik birlikteliği ve ortak sıvı sistemini paylaşması (perilenf ve endolenf) nedeniyle klinik açıdan önem taşır. Vestibüler bozuklukların eşlik ettiği durumlarda işitme de etkilenebilir. Bu nedenle iç kulağın bir bütün olarak anlaşılması hem işitme hem de denge sistemlerinin değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir.

1.1.2.4. İşitme Siniri

İşitme siniri, vestibulokoklear sinirin koklear komponentidir. Spiral ganglion hücrelerinden çıkan aksonların birleşmesiyle oluşur ve iç akustik kanal yoluyla beyin sapına ulaşır. Sinir liflerinin yaklaşık %90'ı iç tüylü hücrelerden, geri kalanı dış tüylü hücrelerden kaynaklanır. Bu organizasyon, sinirin esas olarak frekans ve şiddet bilgilerini merkezi işitsel yapılara iletmesini sağlar (Spoendlin, 1972).

İşitme sinirinin lifleri de kokleanın tonotopik organizasyonunu yansıtır: bazal kokleadan gelen lifler yüksek frekanslara, apikal kokleadan gelen lifler düşük frekanslara duyarlıdır. Böylece periferik kodlama, merkezi işitsel sistemde frekans çözümlemesinin temelini oluşturur (Liberman, 1982). İşitme siniri yalnızca frekansı değil, aynı zamanda sesin şiddetini ve temporal özelliklerini de kodlar (Joris vd., 2004).

Sonuç olarak işitme siniri, kokleadan gelen mekanik enerjinin elektriksel sinyallere dönüştürüldüğü ilk aşamadan itibaren, işitmenin merkezi yollarında işlenecek olan frekans, şiddet ve zamanlama gibi işitsel bilgiler sinir lifleri tarafından taşınır, işitsel yolu takip ederek birçok durağa uğrarlar. Santral işitsel sistemde işitsel kortekse iletilmek üzere her iki kulaktan gelen sinyaller eşleştirilerek bilgi işitsel kortekse kadar iletilmektedir.

1.1.3. Santral İşitsel Sistem Anatomisi ve Fizyolojisi

Santral işitsel sistem, kokleadan çıkan sinir impulslarının beyin sapından başlayarak serebral kortekse kadar iletilmesini ve işlenmesini sağlayan karmaşık bir ağıdır. Bu sistem, yalnızca sesin duyulmasını değil; aynı zamanda frekans ayrımı, konuşmayı anlama, yön tayini ve gürültülü ortamlarda iletişim gibi üst düzey işitsel becerilerin gerçekleşmesini sağlar (Moore, 2012).

1.1.3.1. Koklear Nükleus

Santral işitsel sistemin ilk uğrak noktasıdır ve işitme sinirinden gelen bilgileri taşır. Bu çekirdekler, anterior ventral nükleuslar (AVN), posterior ventral (PVN) nükleuslar ve dorsal nükleuslar olmak üzere üç kısma ayrılır. Bu kısımlar; sesin tanınmasında, zamansal verinin kodlanmasında ve lokalizasyonunda görevlidir. Koklear çekirdekler, kokleadan gelen tonotopik organizasyonu koruyarak frekans bilgisini üst santral bölgelere aktarır (Pickles, 2013). Tonotopik organizasyon kapsamında; dorsal bölüm alçak frekans, ventral kısım ise yüksek frekans bilgisinden sorumludur. (Moller, 2000).

1.1.3.2. Superior Olivary Complex

Koklear çekirdeklerden çıkan liflerin önemli bir kısmı, beyin sapında bulunan superior olivary complex'te sonlanır. Superior Olivary Complex'in en önemli özelliği; sağ ve sol kulaktan gelen akustik girdi ilk kez burada birleşir. Böylelikle iki kulaktan gelen sinyaller arasındaki zaman farkı (interaural time difference, ITD) ve şiddet farklarını (interaural level difference, ILD) karşılaştırarak sesin yönünü belirlemede temel rol oynar. Binaural işitme ve

ses lokalizasyonu santral sistemin erken aşamalarında gerçekleşmeye başlar (Grothe vd., 2010).

1.1.4. Lateral Lemniscus ve Inferior Colliculus

Superior olivary complex'ten çıkan lifler, lateral lemniscus üzerinden orta beyinde yer alan inferior kolliculus'a ulaşır. Lateral lemniscus; temporal çözünürlüğe hassas yapısıyla işitsel uyarının işlenmesine yardımcı olan yol olarak bilinmektedir (Şahlı, 2015). Inferior kolliculus, işitme yolunun önemli bir entegrasyon merkezidir ve ses lokalizasyon bilgileri inferior colliculusta bütünleşmektedir (Liu ve ark., 2024). Inferior kolliculus refleksif baş ve göz hareketleri gibi işitsel- motor yanıtların koordinasyonunda da görev alır (Winer & Schreiner, 2005).

1.1.5. Medial Genikulat Çekirdek

Inferior colliculus'tan gelen sinyaller, talamusta yer alan medial genikulat çekirdek üzerinden serebral kortekse aktarılır. Talamusta yer alır ve dorsal, medial ve ventral olmak üzere üç kısımdan oluşur. Bu bölge; sesin şiddeti, frekansı ve temporal özelliklerinin analiz edildiği bir ara istasyondur. Ayrıca işitsel uyarıların dikkat süreçleriyle entegrasyonunda kritik rol oynar (Malmierca & Hackett, 2010). Akustik girdinin yoğunluk, frekans ve binaural bilgiyi kortekse iletmeden sorumlu olduğu varsayılmaktadır (Moller, 2000).

1.1.6. İşitsel Korteks

İşitme sisteminin en üst düzeydeki merkezini işitsel korteks oluşturmaktadır. Bu yapı, tonotopik organizasyonun devam ettiği bir bölge olup Brodmann'ın 41 ve 42. alanlarını kapsamaktadır. İşitsel korteks genel olarak iki ana bölümde incelenmektedir: primer ve sekonder işitsel korteks. Primer işitsel korteks, işitsel uyarıların tonotopik uzaysal temsiline aracılık eden nöronları barındırmaktadır. Sekonder işitsel korteks ise belirgin bir tonotopik organizasyona sahip olmamakla birlikte, seslerin lokalizasyonu ve kompleks akustik örüntülerin çözümlemesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Bunun yanı sıra, işitsel hafızanın oluşumunda da önemli katkılar sağlamaktadır (Rauschecker & Afsahi, 2023). Sesin tanımlanması, konuşmanın anlaşılması ve müzik algısı gibi yüksek düzey işitsel işlevler kortikal ağlar aracılığıyla gerçekleşir (Kaas & Hackett, 2000).

Santral işitsel sistemin bütünlüğü, konuşmayı gürültüde ayırt etme, yönsel işitme ve kompleks sesleri ayırt etme açısından kritik öneme sahiptir. Bu yapılarda meydana gelen lezyonlar veya gelişimsel bozukluklar, santral işitsel işleme bozuklukları (SİİB) ile sonuçlanabilir. Bu nedenle, işitme

tarama programlarının yanı sıra çocuklarda akademik başarıyı ve yetişkinlerde iletişimi etkileyebilecek işitsel işleme sorunlarının değerlendirilmesinde santral yolların bilinmesi büyük önem taşır (Musiek & Chermak, 2014).

1.1.7. Sonuç

İşitme sistemi, periferik ve santral yapılardan geçerek primer işitsel kortekste sesin algıya dönüşmesini sağlar. Bu nedenle işitmenin değerlendirilmesi yalnızca kulak ve işitme siniri gibi periferik bileşenlerle sınırlı kalmamalı; beyin sapından kortekse kadar uzanan santral işitsel yolların işlevleri de dikkate alınmalıdır. Periferik ve santral yapıların görevlerine bakıldığında; işitme kaybının derecesini belirlemekle birlikte, bireyin günlük yaşamda konuşmayı anlama, gürültüde iletişim kurabilme ve işitsel dikkat gibi üst düzey beceriler üzerindeki etkilerini de kapsamaktadır (Keidser vd., 2020). Bu nedenle işitme, yalnızca periferik bir duyu değil; aynı zamanda bilişsel ve nörolojik süreçlerle de etkileşim halinde olan karmaşık bir işlevdir.

Bu kapsamda yapılan değerlendirmelerde hem objektif hem de davranışsal testler bir arada kullanılmalıdır. Saf ses odyometrisi ve timpanometri gibi temel ölçümler, otoakustik emisyonlar ve işitsel beyin sapı yanıtlarıyla desteklendiğinde periferik sistem hakkında ayrıntılı bilgi elde edilir. Bunun yanında, gürültüde konuşma algısı, işitsel ayırt etme ve temporal işleme testleri gibi santral odaklı ölçümler, bireyin gerçek yaşam koşullarındaki işitsel performansını yansıtır. Böylece işitme sisteminin farklı düzeylerdeki işlevleri bütünsel biçimde değerlendirilebilir (Musiek & Chermak, 2014). Ayrıca işitme sistemi, özellikle gürültülü ortamlarda konuşmayı anlama gibi üst düzey işitsel becerilerde bilişsel mekanizmalarla yakın etkileşim içindedir (Shinn-Cunningham & Best, 2008).

Bütüncül işitme değerlendirmesi yalnızca tanısal açıdan değil, rehabilitasyon planlamasında da kritik rol oynamaktadır. Elde edilen veriler, işitme cihazı veya koklear implant gibi teknolojilerin seçimini yönlendirirken; aynı zamanda işitsel eğitim, iletişim stratejileri ve çevresel düzenlemeler gibi müdahalelerin planlanmasına katkı sağlar. Bu çok boyutlu yaklaşım, bireyin yalnızca işitme eşiğini değil, yaşam kalitesini de merkeze alarak daha etkin ve kişiselleştirilmiş çözümler üretilmesine olanak tanır (WHO, 2021; Chisolm vd., 2007; Keidser vd., 2020).

Sonuç olarak, işitme sisteminin ayrıntılı anatomik ve fizyolojik temellerinin anlaşılması, işitme tarama programlarının bilimsel alt yapısını güçlendirmekte ve toplum sağlığında erken müdahale stratejilerinin etkinliğini artırmaktadır.

Kaynakça

- Audio Archive. (2020, 31 Aralık). Periferik işitme sistemi. Audio Archive Blog. <https://audioarchive1.blogspot.com/2020/12/periferik-isitme-sistemi.html>
- Şahlı, S. A. (2015). Santral işitme sisteminin anatomisi ve fizyolojisi. Belgin, E. (Ed.), *Temel odyoloji*. Ankara: Güneş Tıp Yayınevi.
- Best, V., Baltzell, L. S., & Colburn, H. S. (2022). Effects of hearing loss on interaural time difference sensitivity at low and high frequencies. *Trends in Hearing*, 26, 1–14. <https://doi.org/10.1177/23312165221095357>
- Bluestone, C. D., & Doyle, W. J. (2015). Anatomy and physiology of eustachian tube and middle ear related to otitis media. *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 124(Suppl 1), 6–21. <https://doi.org/10.1177/0003489414563712>
- Chisolm, T. H., Johnson, C. E., Danhauer, J. L., Portz, L. J., Abrams, H. B., Lesner, S., & Newman, C. W. (2007). A systematic review of health-related quality of life and hearing aids: Final report of the American Academy of Audiology Task Force. *Journal of the American Academy of Audiology*, 18(2), 151–183. <https://doi.org/10.3766/jaaa.18.2.7>
- Dallos, P. (1992). The active cochlea. *Journal of Neuroscience*, 12(12), 4575–4585. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.12-12-04575.1992>
- Fritsch, B., Jahan, I., Pan, N., & Elliott, K. L. (2015). Evolving gene regulatory networks into cellular networks guiding morphogenesis of the inner ear. *Annual Review of Neuroscience*, 38, 365–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071714-033828>
- Goldberg, J. M., Wilson, V. J., & Cullen, K. E. (2012). The vestibular system. Kandel, E. R. Schwartz J. H., & Jessell, T. M. (Eds.), *Principles of neural science* (5th ed., pp. 682–705). New York: McGraw-Hill.
- Goupell, M. J. (2022). Age-related changes in interaural-level-difference-based across-frequency binaural interference. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14, 887401. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.887401>
- Grothe, B., Pecka, M., & McAlpine, D. (2010). Mechanisms of sound localization in mammals. *Physiological Reviews*, 90(3), 983–1012. <https://doi.org/10.1152/physrev.00026.2009>
- Hudspeth, A. J. (2014). Integrating the active process of hair cells with cochlear function. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(9), 600–614. <https://doi.org/10.1038/nrn3786>
- Hunter, L. L., & Margolis, R. H. (1997). Multifrequency tympanometry: Current clinical application. *American Journal of Audiology*, 6(3), 33–43. <https://doi.org/10.1044/1059-0889.0603.33>

- Hurley P. (2017). Hearing from the Other Side: Understanding the Candidacy for SSD and Treatment Options. Available from: <https://www.audiologyonline.com/articles/hearing-from-other-side-understanding-21327>.
- Jackler, R. K., & Luxford, W. M. (1987). Congenital malformations of the inner ear: A classification based on embryogenesis. *Laryngoscope*, 97(3), 2–14. <https://doi.org/10.1002/lary.5540971302>
- Kaas, J. H., & Hackett, T. A. (2000). Subdivisions of auditory cortex and processing streams in primates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(22), 11793–11799. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.22.11793>
- Kelly, M. C., & Chen, P. (2009). Development of form and function in the mammalian cochlea. *Current Opinion in Neurobiology*, 19(4), 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2009.07.010>
- Keseroğlu, K., & Bayır, O. (2016). Orta kulağın endoskopik anatomisi [Endoscopic anatomy of the middle ear]. *Türkiye Klinikleri*, 9, 4–11.
- Kandel, E., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (1992). Hearing. In J. P. Kelly (Ed.), *Principles of neural science* (3rd ed., pp. 481–500). East Norwalk, CT: Appleton & Lange.
- Larsen, W. J. (2017). *Human embryology* (5th ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Liberman, M. C. (1982). Single-neuron labeling in the cat auditory nerve. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(5), 1441–1457. <https://doi.org/10.1121/1.388639>
- Liu, M., Wang, Y., Jiang, L., Zhang, X., Wang, C., & Zhang, T. (2024). Research progress of the inferior colliculus: From neuron, neural circuit to auditory disease. *Brain Research*, 1828, 148775. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2024.148775>
- Malmierca, M. S., & Hackett, T. A. (2010). Structural organization of the ascending auditory pathway. In A. Rees & A. Palmer (Eds.), *The Oxford handbook of auditory science: The auditory brain* (pp. 9–41). Oxford: Oxford University Press.
- Moller, A. R. (2000). *Hearing: Its physiology and pathophysiology*. San Diego, CA: Academic Press.
- Moore, D. R. (2012). The neurodevelopmental basis of speech perception in noise. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 13(2), 157–165. <https://doi.org/10.1007/s10162-011-0305-2>
- Moore, K. L., Persaud, T. V. N., & Torchia, M. G. (2020). *The developing human: Clinically oriented embryology* (11th ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Musiek, F. E., & Chermak, G. D. (2014). *Handbook of central auditory processing disorder*. San Diego, CA: Plural Publishing.
- Pickles, J. O. (2013). *An introduction to the physiology of hearing* (4th ed.). Bingley: Emerald Group Publishing.

- Rauschecker, J. P., & Afsahi, R. K. (2023). Anatomy of the auditory cortex then and now. *Journal of Comparative Neurology*, 531(18), 1883–1892.
- Robles, L., & Ruggero, M. A. (2001). Mechanics of the mammalian cochlea. *Physiological Reviews*, 81(3), 1305–1352. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.3.1305>
- Sadler, T. W. (2019). *Langman's medical embryology* (14th ed.). Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Scottish Sensory Centre. (n.d.). Audiology. Retrieved September 30, 2025, from <https://www.ssc.education.ed.ac.uk/courses/deaf/aud2a.html>
- Standring, S. (2016). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice* (41st ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Tanbek, A. T. (2020). Kemiğe implante işitme cihazı kullanan hastalarda işitme sonuçlarının ve yaşam kalitesinin değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ural, T. (2024). Tıp ve sağlık bilimlerinde multidisipliner bakış-V: İşitsel ve vestibüler rehabilitasyona bütüncül yaklaşım. Ankara: İKSAD Yayınevi.
- Winer, J. A., & Schreiner, C. E. (2005). The central auditory system: A functional analysis. In J. A. Winer & C. E. Schreiner (Eds.), *The inferior colliculus* (pp. 1–68). New York: Springer.
- World Health Organization. (2021). *World report on hearing*. Geneva: WHO.
- Yoshinaga-Itano, C. (2003). From screening to early identification and intervention: Discovering predictors to successful outcomes for children with significant hearing loss. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 8(1), 11–30. <https://doi.org/10.1093/deafed/8.1.11>
- Zheng, Y., Swanson, J., Koehnke, J., & Guan, J. (2022). Sound localization of listeners with normal hearing, impaired hearing, hearing aids, bone-anchored hearing instruments, and cochlear implants: A review. *American Journal of Audiology*, 31(3), 630–651. https://doi.org/10.1044/2022_AJA-22-00006