

Pap János

# Hang – ember – hang

---

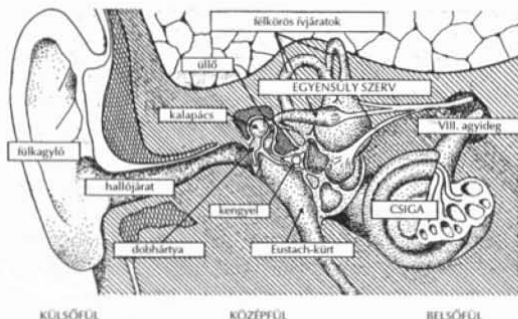
Rendhagyó hangantropológia

## IV. Az emberi hallószerv és a hallás mechanizmusa

„...Békésy oly ügyes és gyakorlott szakértelemmel hatolt be legrejtettebb zugába és állapította meg működési elveit, hogy a modern fül szinte Békésy találmányának tűnik, és nem a természet kiegyensúlyozott fejlődésének.”

S. S. Stevens

Szemünk behunyható, ha valaminek a látványa zavar, és reflexszerűen magától le is csukódik, ha egy tárgy repül felé; ha valami rossz ízű, nem esszük meg; ha kellemetlen szagot érzünk, kicsit később veszünk levegőt, és csak a szánon keresztül; ami szúr vagy vág, azt nem érintjük meg. De mit tehetünk, ha valaki (vagy valami) nyugalmunkat zavarva zajt kelt a közelünkben, és mi éppen, e sorokat olvasván, a hallás mechanizmusának megismerésével szeretnénk foglalkozni. Néhány lehetőség kézenfekvő: egyszerűen rendreutasítjuk vagy megkérjük az illetőt, hogy maradjon csendben, becsukjuk az ajtót, vagy hallótávolságon kívülre megyünk, esetleg befoghatjuk a fülünket (bár akkor leejtjük a könnyvet). De ha mind-



11. ábra. A fül szerkezete

ezt nem tehetjük meg, valóban ki vagyunk szolgáltatva a hangoknak. Mert a fül folytonosan, rendíthetetlenül, elsősorban a veszélyre figyelmeztetve közvetíti a külvilág hangjait. Talán egyszer, valamilyen evolúciós csoda révén ismét képesek leszünk a kis porcos kiemelkedés, a *tragus* (fülcsap) mozgására és lezárhatjuk vele a hallójáratunkat, hogy a környezet hangjai ne gyötörjenek bennünket. Addig viszont a fenti eljárásokhoz kell folyamodnunk, vagy meg kell tanulnunk szelektív módon hallani, vagyis kizárni tudatunkból a külvilág zavaró hangjait (bár e hangok a tudatalattinkra továbbra is hatni fognak, amit a reklámszakma könyörtelenül ki is használ: lásd a IX. fejezetet).

## A fül szerkezete és működése

A fül (11. ábra) legfőbb funkciója a hangforrástól hozzánk érkező hangok kódolása, illetve begyűjtése, felerősítése és irányuk meghatározása. Érzékenységét tekintve atomfizikai műszer, ami önmagában, érzékszervi hasznosságától eltekintve is maga a csoda. Felépítése összetett. Elhelyezkedésük szerint elnevezett, jól elkülöníthető részekből áll: külső-, közép- és belsőfülből.

### A külsőfül

Ha a fülre gondolunk, először a fülkagyló jut az eszünkbe, hiszen ez látható szabad szemmel, húzkodható, esztétikai örömeink és gyakorta bánatunk forrása (gondoljunk csak a plasztikai műtétek nagy számára).

Az ember fülkagylója (valamint az emberszabású majmoké) jócskán eltér a többi emlős fülétől, amelyek kúpos formájúak és izmokkal mozgathatók. Fülkagylónk bőrrel fedett, rugalmas porcból álló szerv, izmai elcsökevényesedtek. Ha tehát valaki mégis mozgatni tudja a fülét (ami azért mégiscsak komoly tudomány), akkor valójában csak a fejbőrét ráncolja.

A külsőfület a fülkagyló és a hallójárat alkotja. A középfültől a dobhártya választja el (lásd 11. ábra).

Ha megvizsgáljuk, hogy a fülkagyló jellegzetes méreteinek (hosszúság, szélesség stb.) arányszámai közül melyik emelkedik ki az embernél a többi emlőseivel összehasonlítva, azt találjuk, hogy ez a *concha* (görögül: kagyló), a hallójárat melletti bemélyedés (12. ábra).

Egyébként a legkisebb fülük a busman nőknek van, a legnagyobb pedig a patagónoknak (Feenstra–van der Lugt, 2000). Idős korban pedig a fül tovább nő, akárcsak az orr. A fülforma tipikus, a családtagokra jellemző, tehát örökölhető, ezért az igazságügyi orvostanban bizonyító erejű. Hogy megnyugtassuk mindazokat, akik őseiktől szép, elálló füleket kaptak, kö-



12. ábra. A külsőfül

zölnünk kell, hogy valamiféle evolúciós előnyt rejt, mert az elálló fülforma dominánsan öröklődik a fejhez simulóhoz képest (Vajda, 1999). A csecsemő füle egyébként ellapítottabb, végső alakja csak két éves kor után formálódik ki.

Az ember annyi butaságot gondolt már története során, így nem meglepő, hogy vannak, akik a fülkagyló formájából a személyiségre vélnek következtetni (Young, 2000). Néhány a sok tudománytalan megállapítás közül: a nagy, hosszú fülű ember bölcs és jó zenei érzéke van; az elálló, kerek fülű kedves és megbízható; a hegyes fülű pedig még akkor sem mond igazat, amikor kérdez stb. Talán csak a debilitás és a torzult fülforma közötti megfeleltetés támasztható alá tényekkel.

A külsőfül rezonanciafrekvenciáinak szabályozásában a concha és a hallójárat ürege tölt be fontos szerepet. Ez utóbbi hossza 2,2–2,3 cm. Egyébként ha a fül dugót csupán a hallójárat külső részébe helyezzük, ahol a bőr alatti rész inkább porcos, mint csontos, hangcsillapító hatása kisebb lesz.

A fülkagyló visszakanyarodó pereme, a *helix* és a mellette lévő hosszanti kiemelkedés, az *anthelix* egybenövése sajátos fülformát, Wolfgang Amadeus Mozart nyomán ún. *Mozart-fület* eredményez. Mozart ezt apai ágon örökölte.

A fülcimpa zsírral töltött, viszonylag érzéketlen, nem véletlen tehát, hogy a fülbevalót általában itt hordjuk.

Meg kell jegyezni, hogy az akupunktúrán belül a fülakupunktúra önálló tudománynak számít, mivel a fülkagylón a teljes emberi test reprezentációs pontjai megtalálhatók. A szem, a látás nevezetes pontja éppen a fülcimpára esik. Az akupresszúra hívei szerint rendszeres dörzsölgetésével javulhat a látásunk (?!).

De mi fülkagylónk, hallójáratunk hallástani funkciója?

Valójában a külsőfül nem vizsgálható önmagában, hiszen ott a fejünk is; összetett antennarendszert alkotnak. A külsőfül elsődrendű feladata, hogy a sérülékeny, érzékeny belső részekhez vezesse a hangot. Ez egyben védőszerep is. A hallójárat szőröcskéi például apróbb rovarok ellen védik a fület. (Ha mégis bemásznak a fülünkbe, vízzel ki kell öblíteni őket, máskülönben fájdalmas dübörgést csapnak a dobhártyánkon.)

A hangok felerősítésében is részt vesz a külsőfül, sőt hangszínszűrő képessége is jelentős. Különösen a magas hangok tartományában számottevő a hatása. Elegendő csak a kezünket a fülünk mögé vagy elé tenni, és máris halljuk a változást. Közelítsünk csak a fülünkhöz egy poharat nyílásával felfelé. A pohár a környezet hangjaiból a csak rá jellemző saját hangokat fogja felerősíteni, azaz módosítja a beérkező hangok hangszínét (kagylóeffektus).

A külsőfül a vízszintes síkból érkező hangok közül, beesési szögtől függetlenül különösen a 2,6 kHz körülieket emeli ki, nem véletlenül, hiszen ez az érték megegyezik egy átlagos fülmodell első rezonanciafrekvenciájával (Shaw, 1997). A concha egészen 5 kHz-ig erősít rezonanciásan. A 10 kHz körüli nagyfokú dinamikaesést, rossz hangenergia-átvitelt szintén a conchában létrejövő, de fázisellentétes, azaz rezgéskioltó visszaverődések hozzák létre.

A külsőfülnek talán legfontosabb szerepe az irányhallásban van. Kőkori elődeinknek sokkal fontosabb volt például az esztétikai ítéletek helyett, hogy gyorsan és könnyedén döntsék el, merre fussanak: a veszélyes hangforrás elől vagy a náluk gyengébb és ehető hangforrás után.

A hátulról jövő hangok a fülkagyló árnyékoló hatása miatt halkabbá és tompábbakká válnak. Külföldi kutatók Tarnóczy (1982) ötlete nyomán elvégeztek egy kísérletet, aminek eredményeként az elől-hátul érzet felcserélődött. (Műfüleket erősítettek apró csövekre, és az ellentétes oldalakon hátrafelé fordították őket.)

A felülről és alulról érkező hangokat már nehezebben tudjuk azonosítani, mivel frekvenciafüggő, hogy a hangforrást hová halljuk.

Az oldalirányú hallásnál nagy előny, hogy két fülünk van. A hangforráshoz közelebbi fül, különösen 3 kHz felett, erősebb hangot hall a fej árnyékoló hatása miatt. Mélyebb frekvenciájú hangoknál pedig nagy segítség, hogy a két fülbe időeltéréssel érkeznek be a jelek; a hangforrással azonos oldaliba kb. 0,5 ms-mal korábban. Ha tehát csak egy fülünk lenne, azt mindenképpen a hangok irányába kellene tudnunk fordítani, és valószínűleg a fejtetőnkön helyezkedne el, ami a szemüveggyártástól a kalapgyártásig számos egyéb problémát is felvetne.

## A középfül

A középfül a dobüregben elhelyezkedő, jellegzetes formájú hallócsontokból (kalapács, üllő, kengyel) és a hozzájuk tapadó izmocskákból (lásd 13. ábra), valamint a garatot a dobüreggel összekötő fülkürtből (*Eustach-kürt*) áll. Ahogy már említettük, a külsőfültől a dobhártya választja el.

A *dobhártya* valójában rugalmatlan, pókhálószerűen rostos, szürkés színű, gyöngyházfényű, rezgéskövető membrán. Nem egyenletesen feszés, megközelítőleg kör alakú, a hangszóró tölcseréhez hasonlóan ívelt felületű. Területe = 1 cm<sup>2</sup>, amelynek aktív része 0,4–0,5 cm<sup>2</sup>.

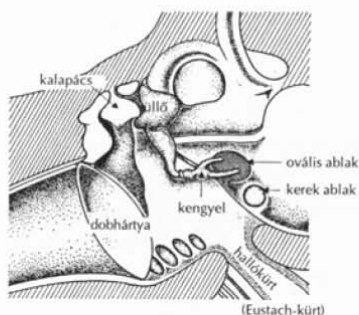
A gyulladásgátló gyógyszerek alkalmazása előtt a csecsemő-kisgyerek-kori betegség, a középfülgyulladás gyógymódja gyakorta okozott halláskárosodást. Ugyanis a gyulladás során keletkező váladékot csak a dobhártya átszúrásával lehetett eltávolítani. Az egy-kétszeri felszúrás még nem veszélyes, de a többszöri beavatkozás már rontja a hallásunkat.

A dobhártyához a *kalapács* középen, belülről illeszkedik, és annak rezgéseit továbbítja a fül belseje felé.

A dobhártya a levegőrezgést membránrezgéssé alakítja át. Ha ez nem történne meg, vagyis a levegő hanghullámai a belsőfül folyadéktömlőit közvetlenül hoznák rezgésbe, a hangenergiának csupán 0,1–1 százaléka jutna be a fülbe a levegő és a folyadék ellenállásának (impedanciájának) jelentős eltérése miatt (Pickles, 1988). A dobhártya tehát rezgésátalakító szerepet tölt be, és ezt a feladatát bizonyos határok között kiválóan látja el, mert impedanciája alig tér el a levegőtől. De csak mélyebb frekvenciákon vezet jól a hangot, magas frekvenciákon ez a képessége fokozatosan elromlik. Sajátrezgésének legelső módusa 1400 Hz körüli (Keidel, 1975).

Mivel a dobhártya feladata a rezgésközvetítés és nem a rezgéskeltés, az ember számára nem előnyös, ha a membrán sajátrezgéseit hozzáadja hangjelekhez. Magasabb hangokon, ahol már a dobhártya viselkedése zavaró, a rezgésközvetítést fokozatosan a koponyacsont veszi át. A dobhártya tehát csak mély frekvenciákon vezet jól a hangot, ezért 1400–1500 Hz alatt légvezetéses hallásról, 3000 Hz felett már a koponyacsontnak köszönhető csontvezetéses hallásról, 1500 Hz és 3000 Hz között pedig a kettő kombinációjáról beszélünk.

A fület a garattal összekötő fülkürt normális körülmények között zárva van. Ha a külső légnyomás változik (ezt hegyvidéken való utazáskor vagy repülés közben a fül „pattogása”, „bedugulása” jelzi), nyeléssel, ásítással nyitjuk meg. Ilyenkor a dobhártya belső oldalán lévő légnyomást tesszük egyenlővé a külső légnyomással. Robbanáskor, hirtelen hangerő-növekedéskor célszerű tehát „elcsodálkozni” és kítítani a szánkát, hogy a dobhártyánk be ne szakadjon.



13. ábra. A középfül

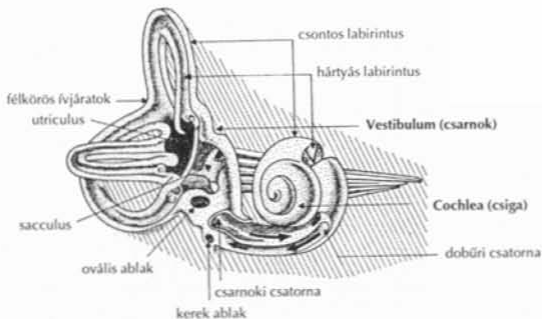
A dobhártyára illeszkedő kalapács mozgása a membrán rezgését követi. A kalapács, az üllő és a kengyel rezgési amplitúdót növelő emelőrendszer, és tovább javítja a rezgésátvitelt a belsőfül folyadékotmlőihez. A kengyel (13. ábra) a csigával érintkezik. Talpa parányi, összesen kb. 0,012 cm<sup>2</sup>. A dobhártya és a kengyeltalp területeinek aránya, valamint a hallócsontok emelő tulajdonságai jelentős nyomásnövekedést, erősítést okoznak.

Tapsoljunk most egy nagyot közvetlenül a fülünk mellett. Hogy a csattanás nem okozott elviselhetetlen fájdalmat, az a hallócsontokhoz tapadó izmok egyik fontos tulajdonságának, a középfülizom reflexének köszönhető. Ilyenkor a kengyelt visszarántják a belsőfülről, illetve megváltoztatják a dobhártya feszességét, hogy a belsőfül érzékelő sejtjei kevésbé sérüljenek meg. Szerepük van a fej mozgatásakor vagy hirtelen megütésekor is. De ezek az izmok nemcsak védenek, hanem a hallócsontrendszer „merevségét” szabályozva módosítani tudják a hangenergia továbbítását is kb. 1–2 kHz-es magasságig.

### A belsőfül

Az atomi szintű mozgásokkal jellemezhető belsőfül mélyen, a halántékcsontról sziklacsonti része mögött, a labirintusban van elrejtve (lásd 11. ábra). A természet (teremtés) erői jól munkálkodtak, mert ennél tökéletesebben aligha lehetne megvédeni ezeket a különleges érzékelőket a külső hatásoktól, rezgésektől. Gondoljunk csak meg: a hidrogénatom átmérőjének századrészével összemérhető kimozdulások is hangingereket keltethetnek benne.

Egyszerre két, mozgásérzékelő feladatot ellátó rendszer is található itt: az egyensúlyozó szerv (*vesztibuláris rendszer*) és a hallószerv.



14. ábra. A belfül – cochleáris és vesztibuláris rendszer (a belfő nyilak a hullámterjedés irányát jelzik)

Az ősbibb egyensúlyozó szervünk nevét a 14. ábrán látható borsónyi méretű tömlőfélérről kapta (*vestibulum* – tornác, előcsarnok). A vestibulumból kiágazó három, egymásra merőleges irányban elhelyezkedő félköríves csatornában történik a fej térbeli helyzetének érzékelése, illetve az *utrículus*ban (jelentése: *tömlő*) a szőrsejtek a fej egyenes vonalú gyorsulását jelzik.

A törzsfajlódás szerint fiatalabb *csiga* (*cochlea*) a hallás szempontjából a fül legfontosabb része. A levegő rezgőmozgását érzékeli, tehát ugyancsak mozgásról informálja az agyat.

Az embrióban az egyensúlyozáshoz, illetve a halláshoz tartozó csontos labirintust *perilympha*, a hártás részeket pedig *endolympa* nevű folyadék tölti ki. A belfül két fő része tehát szövettanilag egységes, és összetartozó, zárt formát mutat, ami azt is eredményezi, hogy korai magzati korban a magzati izomtónusért felelős vesztibuláris rendszer és a magzati hallás összhangban működik (Bagdy, 2000). A két rendszer a fejlődés további fázisaiban azonban működésében egymástól függetlenné válik. A hangoknak a vesztibuláris rendszerre kifejtett hatásáról a VIII. fejezetben szólnunk részletesebben.

A csiga felépítése a 14. ábrán látható. Kívül a *csontos labirintus* található, amelyet úgy kell elképzelni, mint egy visszahajtott, csigavonalban feltekert,  $\text{Na}^+$ -ban gazdag hígabb agyfolyadékkal töltött csontos falú tömlőt. Bemeneti része a csarnoki csatorna az ovális ablaknál rátapadó kengyelrel, kimeneti része a dobéri csatorna, amelyet a hártás kerek ablak zár le. E furcsa tömlőn belül található egy mindkét végén zárt, vékony falú cső, a *hártás labirintus* (*csigacsatorna*) az érzékelő sejtekkel. Ez még sűrűbb,  $\text{K}^+$ -ban gazdag agyfolyadékkal töltött. A kétféle folyadék kb. 150 mV-os potenciálkülönbsége biztosítja a jelfeldolgozás energiáit.







16. ábra. Haladóhullám az alaphártyán

Hermann von Helmholtz (1877) úgy gondolta, hogy az alaphártyán állóhullámok jönnek létre, és minden egyes frekvenciához tartozik egy hely, egy amplitúdómaximum. Teóriája az *állóhullámú helyelmélet* elnevezést kapta. Az alaphártya hely szerinti hangoltsága tény, hiszen a szőrsejtek adott területen történő kiirtásával mindig a megfelelő magasságú hangok érzékelése romlik. Helmholtz feltevése az állóhullám mozgásról azonban helytelennek bizonyult. A probléma egyik megoldásának magyar vonatkozásaira joggal lehetünk büszkék, hiszen 1961-ben Békésy György hallástani munkásságáért, a helyelmélet egy lehetséges korrekciójáért kapott Nobel-díjat. Élettelen belső füléken folyadék-hullámokat áramoltatva keresztül elemezte és értelmezte az alaphártya kimozdulásait. Állóhullámok helyett azonban haladóhullámokat talált az alaphártyán (16. ábra). Ezért nevezzük elméletét *haladóhullámú helyelméletnek*. Az alaphártya anatómiai vizsgálata, ahogy már említettük, a hely szerinti hangoltságra vonatkozó feltételezést igazolták. Békésy mérései alapján világossá vált, hogy az alaphártyán a hang terjedési sebessége a távolság függvényében változik: a bemeneti résznél gyors, a csigacsúcs közelében lelassul, azaz a hullámhossz lerövidül. A bemeneti résznél a frekvenciától függetlenül egyformák a hullámformák, de ahogy mélyül a hang, a hullámmaximumok helye egyre inkább a kerek ablak felé tolódik el (lásd 16. ábra). Ez a frekvenciaterkép az alaphártya sajátossága, és minden terület a rá jellemző *karakterisztikus frekvencián* rezeg legjobban. Békésy elmélete szerint az alaphártya hangoltsága túlságosan durva, amit az agyi gátlás finomít, és hozza létre fülünk különleges frekvenciaélességét.

Az élő cochlea viselkedéséről az utóbbi 25 évben végzett mérésekből kiderült, hogy a cochlea érzékeny a hangerő változásaira, és alacsony dinamikákon egy-egy helyhez tartozó karakterisztikus frekvencián (és csak ott) hatékonyabb a fül. Az alaphártyának ez az éles frekvenciahangoltsága csak az élő szervezet sajátja. A szelektív erősítéshez azonban külső energia szükséges, mivel a csillapodó hullám veszteségeit pótolni kell.

A fül általában akkor módosítja a hangjeleket, ha azok nem a megszokott érzékelési tartományból származnak. Például a túlságosan hangos

szinuszhangokat szubjektív felhangjaikkal együtt halljuk az alaphártya rezgésének nemlinearitása miatt. Hasonló alaphártyai torzítás eredménye a *különbségi (vagy kombinációs) hangok* létrejötte is. Ez utóbbit bizonyítandó füttyüljünk két különböző hangmagasságú, hangos, nem túl nagy hangközű hangot. Ha a két hang magassága  $f_2$  és  $f_1$ , akkor a két hang alaphangjának kombinációival jellemzett rezgéseket ( $f_2 - f_1$ , és  $2f_1 - f_2$ , ha a különbségek pozitív értékek) mély zúgásként hallani fogjuk a füttyhangok mellett.