

Comparative 3-dimensional visualization of the equine petrosal bone

K. Czeibert^{1*}
G. Baksa²
I. Kozma³
M. Pomsár⁴
B. Rácz⁵
Ö. Petneházy⁶

1. ELTE, Biológiai Intézet,
Etológia Tanszék
H-1117 Budapest,
Pázmány Péter sétány 1/C

*e-mail: czeibertk@gmail.com

2. Semmelweis Egyetem,
Anatómiai, Szövet- és
Fejlődéstan Intézet
Budapest

3. Széchenyi István Egyetem,
Anyagtudományi és
Technológiai Tanszék
Győr

4. PomsarPhotography.hu

5. ÁTE, Anatómiai és Szövettani Tanszék
Budapest

6. Kaposvári Egyetem
Kaposvár

A ló sziklacsonnjának 3D-s összehasonlító megjelenítése

Czeibert Kálmán^{1*}, Baksa Gábor², Kozma István³, Pomsár Miklós⁴, Rácz Bence⁵, Petneházy Örs⁶

ÖSSZEFOGLALÁS

A ló sziklacsonnjának térbeli ábrázolása szerkezeti összetettsége miatt általában nagy kihívást jelent. Tanulmányukban a szerzők egy felnőtt ló bal oldali sziklacsonjából készítették háromdimenziós modelleket. Először CT segítségével digitalizálták a csont szerkezetét, majd ezekből az adatokból létrehozták a sziklacsonnt, a hallócsontláncolat, az arcideg járatának, valamint a belső fülnek a felületi modelljeit. Egymás mellé téve az eredeti csontot és átlátszóvá tett 3D-s modelljét lehetőség nyílt az egyes struktúrák tanulmányozására, ezen kívül rövid animációkon is megmutatták a fontos képleteket. Végül 3D-s nyomtatással elkészítették a belsőfül és a hallócsontok fizikai modelljét is.

SUMMARY

Background: The petrosal bone is one of the smallest and most complex among the bones of the equine skull. Its irregular surface, several projections and channels, and hidden inner structures make its visualization challenging. Textbooks usually show this bone on different drawings and photographs, where the structures' relationship and their spatial organization cannot be properly understood.

Objectives: We wanted to create high-resolution surface models of certain petrosal bone structures in order to study them separately or in connection with the original one.

Materials and methods: First we captured photos from a skull and its left petrosal bone. The isolated bone was scanned with a microfocus CT (FOV: 1024x1024, size of a voxel: 0.06 x 0.06 x 0.06 mm) and DICOM images were exported. Image volume was analysed with FEI Amira 6.0 for LifeSciences software; during segmentation individually labelled fields were generated to the following structures: surface model of the petrosal bone, malleus, incus, os lenticulare, stapes, inner ear and the channel of the facial nerve. 3-dimensional models were made from the label fields, and after refinement STL (stereolithography) models were made.

Results and discussion: Changing the opacity of the surface models gave a unique possibility to compare the inner structure of the same bone seen on photographs and on the 3D-model in different aspects. Enlarging and labelling the inner ear and the auditory ossicles were also performed. In order to show the outer and the inner structure more interactively, three short video animations were created which present the outer aspects, the middle ear cavity, the inner ear and the channel of the facial nerve (like a virtual endoscopy). Finally, the STL-model of the auditory ossicles associated with the inner ear was 3D-printed and colorized according to the surface models. In conclusion, the 3D-visualization (modelling, augmented and virtual reality, 3D-printing) can be an immense aid not only in the educational, but also in clinical and research fields.

A ló sziklacsontjának, belső képleteinek térbeli megjelenítése, összetett szerkezete miatt nagy kihívást jelent a hagyományos nyomtatott könyvek és tanulmányok számára. Ez annak köszönhető, hogy egy rendkívül bonyolult térbeli viszonyt kell bemutatni egy olyan csont esetében, amely az egyik legtömörebb szerkezetű, kiterjedése szabálytalan, a benne található képletek meglehetősen kicsik és sérülékenyek, így még preparatív módszerekkel is nehéz pontosan bemutatni egymáshoz való elhelyezkedésüket. Amennyiben az anatómiai hűség miatt mégis úgy döntenek, hogy preparatív úton tárják fel a csontot, akkor ez a beavatkozás jellege miatt (a környező részek apró marófejjel történő eltávolítása) elkerülhetetlenül az eredeti állapot elvesztéséhez vezet. Az egyes tankönyvek a fentiek következtében általában rajzolt ábrákon keresztül (1–6), vagy pedig boncolás előtti és utáni fényképekkel (1, 4, 6) mutatják meg ezt a tájékot. A célunk éppen ezért az volt, hogy egyszerre tegyük jól összehasonlíthatóvá a külső és a belső anatómiai viszonyokat ugyanazon a csonton, és egyúttal a háromdimenziós (3D-s) modellezés alkalmazásán keresztül új lehetőségeket is bevonjunk a szemléltetésbe.

A ló sziklacsontjának, belső képleteinek térbeli megjelenítése rendkívül nehéz

A preparatív, feltáró beavatkozások az eredeti állapot elvesztéséhez vezetnek

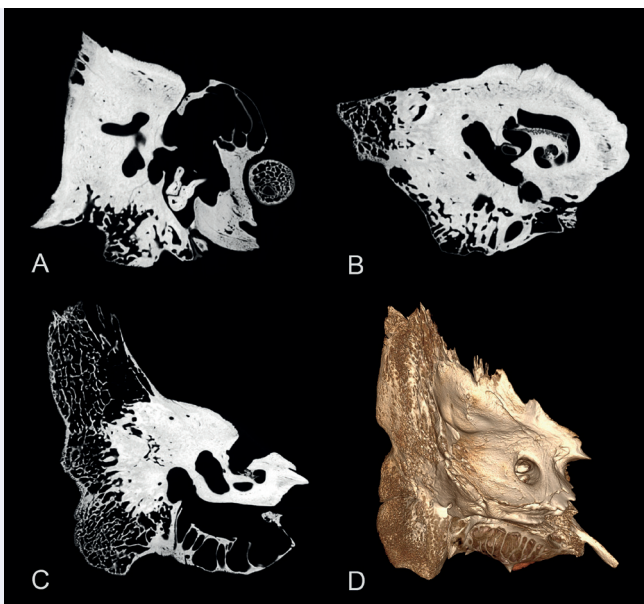
SAJÁT VIZSGÁLAT

ANYAG ÉS MÓDSZER

A szerzők egy 12 éves ló bal oldali sziklacsontjának CT-vizsgálatát és 3D modellezését végezték el

A vizsgálathoz egy 12 éves ló koponyáját és annak bal oldali sziklacsontját használtuk fel.

Először műtermi beállítások mellett nagy felbontású felvételek (RAW/ CR2) készültek mind a koponyáról, mind pedig külön a sziklacsontról, különböző nézetekből. Ezt követően a sziklacsontot computer tomográfiás (CT) képalkotás segítségével digitalizáltuk. Mivel a hagyományos, diagnosztikai orvosi célokra használt CT-gépek térbeli feloldóképessége az ilyen kisméretű struktúrák vizsgálatára már nem elegendő, így a szkennelést mikro CT-vel végeztük (FOV 1024 × 1024, voxel méret 0.06 × 0.06 × 0.06 mm, projekciók száma 1261). A vizsgálatból exportált DICOM-felvételeken a RadiAnt DICOM Viewer nevű programban (<https://www.radiantviewer.com>) rekonstruálni lehetett az alap orthogonális síkokat (MPR, multiplanar reconstruction), ill. a voxeldenzitás alapján létrehozott volumetrikus modellt (1. ábra).



1. ÁBRA. A sziklacsont nagyfelbontású CT-képe az orthogonális síkokban (A–C), valamint a denzitásértéken alapuló térbeli modell (D)

FIGURE 1. High-resolution CT-scan of the petrosal bone in the orthogonal planes (A–C), and the 3D-model generated based on the density of the voxels (D)

A felvételek további elemzése és az egyes anatómiai képletek kijelölése (szegmentálás) a FEI Amira 6.0 for LifeSciences szoftver (<https://www.fei.com/software/amira-3d-for-life-sciences>) segítségével történt. Első lépésként a DICOM-sorozatot importáltuk a programba, majd a "Create New LabelField" modullal egy új szegmentációs alapot hoztunk létre. Ez utóbbin belül külön címkékhez (label) rendeltük hozzá rétegenként a kézi és félautomatikus módon kijelölt képleteket. A szegmentálás végén hét fő anatómiai struktúra került teljes kijelölésre: a sziklacsont (os petrosum) külső és belső folytatódó körvonallal, a kalapács (malleus), az üllő (incus), a lencsecsontocska (os lenticulare), a kengyel (stapes), az arcideg csatornája (canalis facialis), valamint a teljes csontos belsőfül (auris interna) a csigával (cochlea), a félkörös ívjáratokkal (canales semicirculares), a tornáccal (vestibulum) és az elvezető csatornákkal (aqueductus vestibuli, canaliculus cochleae).

A CT-felvételeket számítógépes programok segítségével egyesítették térbeli modellé

A latin elnevezések alapjául a Nomina Anatomica Veterinaria 6. kiadása szolgált alapul (<http://www.wava-amav.org/wava-documents.html>). A kijelölést követően az egyes címkékből a "Generate Surface" modullal felületi rekonstrukciókat hoztunk létre, majd a felületüket alkotó poligonhálót az Amira beépített felületkezelőjével, valamint az Autodesk Meshmixer szoftverrel (<http://www.meshmixer.com>) tovább finomítottuk. Ez magában foglalja a poligonhálót alkotó háromszögek számának régiófüggő növelését vagy csökkentését, a mérésből származó zaj és hibák korrekcióját, valamint a sziklacsontról *szikla részének* (pars petrosa) és *dobúri részének* (pars tympanica) teljes elkülönítését. A kész modelleket STL- (stereolithography) formátumban mentettük el. Végezetül az előzőekben létrehozott STL-modellekből rövid animációkat (és egyfajta "virtuális endoszkópiát"), valamint 3D-nyomatott, színezett, kézbe vehető mintadarabokat készítettünk a komplex bemutatás érdekében.

EREDMÉNYEK

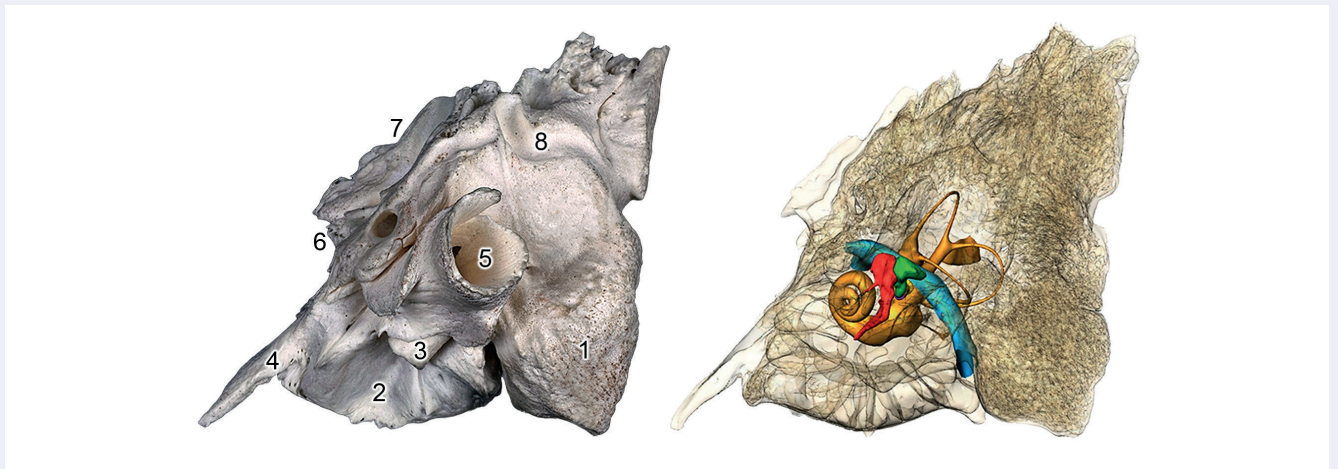
A sziklacsontról az állkapocsízülettől (articulatio temporomandibularis) caudalisan, a rongyos lyuktól (foramen lacerum) lateralisán, a nyakszirtcsont (os occipitale) izomi nyúlványa (processus paracondylaris) előtt helyezkedik el (2. ábra).

2. ÁBRA. Lókoponya, bal oldal-nézetben

A nyíl a sziklacsontra mutat

FIGURE 2. Skull of a horse, from the left side

Arrow shows the petrosal bone



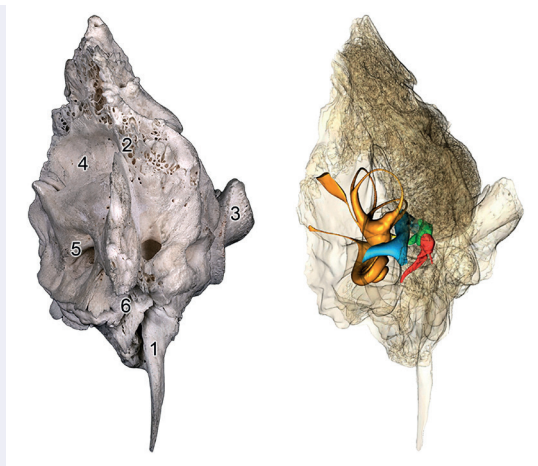
3. ÁBRA. A sziklacsontról fényképe (balra) és az áttetszővé tett 3D-s modellje (jobbra). Lateralis nézet

Számok: 1) Processus mastoideus 2) Bulla tympanica 3) Processus styloideus 4) Processus muscularis 5) Meatus acusticus externus 6) Impressio nervi trigemini 7) Crista partis petrosae 8) Sulcus arteriae meningeeae caudalis
Színek: malleus (piros), incus (zöld), auris interna (narancssárga), canalis facialis (kék)

FIGURE 3. Photographic view (on the left) and the semi-opacity 3D-model (on the right). Lateral view

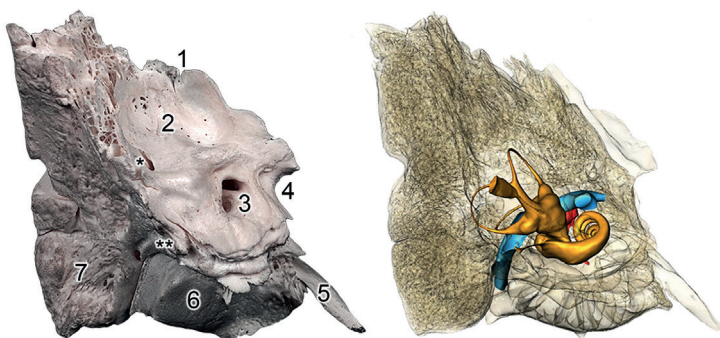
Numbers: 1) Processus mastoideus 2) Bulla tympanica 3) Processus styloideus 4) Processus muscularis 5) Meatus acusticus externus 6) Impressio nervi trigemini 7) Crista partis petrosae 8) Sulcus arteriae meningeeae caudalis
Colours: malleus (red), incus (green), auris interna (orange), canalis facialis (blue)

A digitalizálás után lehetőség nyílt az egyes képletek szelektív virtuális színezésére, ill. a sziklacsont kontúrjának áttetszőségét úgy állítottuk be, hogy egyaránt látszódjanak a belső struktúrák, valamint a sziklacsont körvonala is. Így egymás mellé helyezve az eredeti csontot és a 3D-s modelleket egyértelművé válik, hogy miként helyezkednek el a közép- és belső fül egyes képletei, valamint az arcideg csatornája a csonton belül (3., 4., 5. ábra)



4. ÁBRA. A sziklacsont fényképe (balra) és az áttetszővé tett 3D-s modellje (jobbra). Dorsalis nézet
Számok: 1) Processus muscularis 2) Crista partis petrosae 3) Meatus acusticus externus 4) Fossa cerebellaris 5) Meatus acusticus internus 6) Impressio nervi trigemini
Színek: malleus (piros), incus (zöld), auris interna (narancssárga), canalis facialis (kék)

FIGURE 4. Photographic view (on the left) and the semi-opacity 3D-model (on the right). Dorsal view
Numbers: 1) Processus muscularis 2) Crista partis petrosae 3) Meatus acusticus externus 4) Fossa cerebellaris 5) Meatus acusticus internus 6) Impressio nervi trigemini
Colours: malleus (red), incus (green), auris interna (orange), canalis facialis (blue)



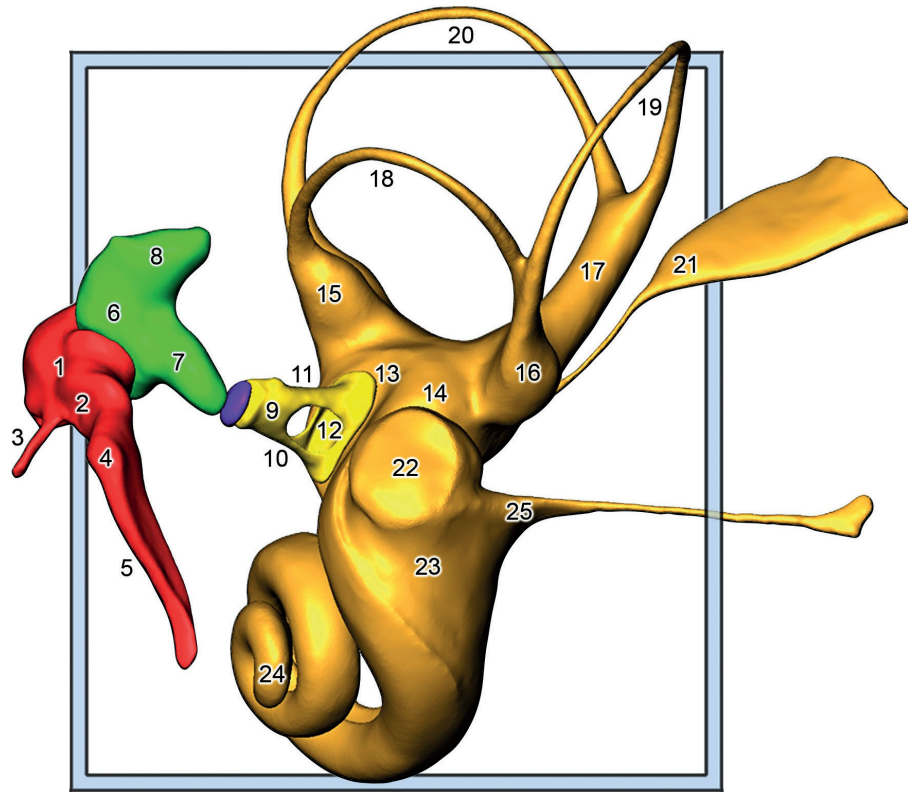
5. ÁBRA. A sziklacsont fényképe (balra) és az áttetszővé tett 3D-s modellje (jobbra). Medialis nézet
Számok: 1) Crista partis petrosae 2) Fossa cerebellaris 3) Meatus acusticus internus 4) Impressio nervi trigemini 5) Processus muscularis 6) Bulla tympanica 7) Processus mastoideus *) Apertura externa aqueductus vestibuli **) Apertura externa canaliculi cochleae
Színek: malleus (piros), auris interna (narancssárga), canalis facialis (kék)

FIGURE 5. Photographic view (on the left) and the semi-opacity 3D-model (on the right). Medial view
Numbers: 1) Crista partis petrosae 2) Fossa cerebellaris 3) Meatus acusticus internus 4) Impressio nervi trigemini 5) Processus muscularis 6) Bulla tympanica 7) Processus mastoideus *) Apertura externa aqueductus vestibuli **) Apertura externa canaliculi cochleae
Colours: malleus (red), auris interna (orange), canalis facialis (blue)

Az áttekintő ábrázolás után kivettük a modelltérből a sziklacsont körvonalát és az arcideg csatornáját, így közelről lehet megvizsgálni a hallócsontláncolatot és a belső fül főbb részeit (6. ábra)

A jobb érthetőség kedvéért a szerzők videoanimációkat is készítettek

Annak érdekében, hogy a modellezés segítségével túl lehessen lépni a síkbeli ábrázolásmódon, és az egyes anatómiai képletek egymással összefüggésben, valamint körbejárható virtuális térben jelenjenek meg, három videoanimációt készítettünk (a felvételek a Youtube-on nézhetőek meg a képek alatt található link beírásával, vagy mobiltelefonon a QR-kód leolvasásával). Az első videó (7. ábra) először kívülről körbejárja a teljes sziklacsontot, miközben megnevezi a főbb részeit, majd a pars petrosa és a pars tympanica szétválasztásával lehetőséget nyújt a középfül (auris media) és a hallócsontok alaposabb vizsgálatára, végezetül pedig körbejárja és bemutatja a belső fület, egyrészt úgy, hogy látszik körülötte a sziklacsont halvány kontúrja, aztán csak a belső fül és a hallócsontok ábrázolódnak.



6. ÁBRA. A hallócsontok és a belsőfül 3D-s modellje. Caudolateralis nézet

Számok: 1) Caput mallei 2) Collum mallei 3) Processus rostralis 4) Processus muscularis 5) Manubrium mallei 6) Corpus incudis 7) Crus longum 8) Crus breve 9) Caput stapedis 10) Crus rostrale 11) Crus caudale 12) Basis stapedis 13) Fenestra vestibuli / ovalis (a 12-es képlet alá is terjedve) 14) Vestibulum 15) Ampulla ossea lateralis 16) Ampulla ossea posterior 17) Crus osseum commune 18) Canalis semicircularis lateralis 19) Canalis semicircularis posterior 20) Canalis semicircularis anterior 21) Aqueductus vestibuli 22) Fenestra cochleae / rotunda 23) Basis cochleae 24) Cupula cochleae 25) Canaliculus cochleae
Színek: malleus (piros), incus (zöld), os lenticulare (lila), stapes (sárga), auris interna (narancssárga)

FIGURE 6. 3D-model of the auditory ossicles and the inner ear. Caudolateral view

Numbers: 1) Caput mallei 2) Collum mallei 3) Processus rostralis 4) Processus muscularis 5) Manubrium mallei 6) Corpus incudis 7) Crus longum 8) Crus breve 9) Caput stapedis 10) Crus rostrale 11) Crus caudale 12) Basis stapedis 13) Fenestra vestibuli / ovalis (also underneath of the 12th structure) 14) Vestibulum 15) Ampulla ossea lateralis 16) Ampulla ossea posterior 17) Crus osseum commune 18) Canalis semicircularis lateralis 19) Canalis semicircularis posterior 20) Canalis semicircularis anterior 21) Aqueductus vestibuli 22) Fenestra cochleae / rotunda 23) Basis cochleae 24) Cupula cochleae 25) Canaliculus cochleae
Colours: malleus (red), incus (green), os lenticulare (purple), stapes (yellow), auris interna (orange)

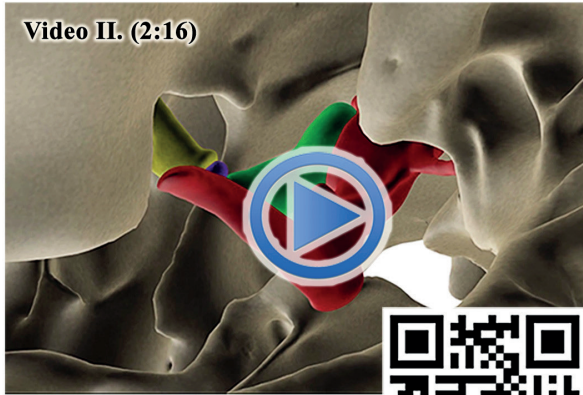
7. ÁBRA. A sziklacsont főbb részei (videóanimáció)

URL: <https://youtu.be/0f14oNCPTyI>

FIGURE 7. Main parts of the petrosal bone (video animation)

Video I. (2:16)

**Os petrosum (Eq):
Aspectus externa et interna**
<https://youtu.be/0f14oNCPTyI>



Os petrosum (Eq):
Auris media

<https://youtu.be/o26Ek-cHyLM>

8. ÁBRA. A középfül ürege (videóanimáció)

URL: <https://youtu.be/o26Ek-cHyLM>

FIGURE 8. The middle ear's cavity (video animation)

10. ÁBRA. A belsőfül és a hallócsontláncolat 3D-nyomtatott, felnagyított modellje

Színek: malleus (piros), incus (zöld), os lenticulare (lila), stapes (sárga), auris interna (narancssárga)

FIGURE 10. 3D-printed enlarged model of the inner ear and the auditory ossicles

Colours: malleus (red), incus (green), os lenticulare (purple), stapes (yellow), auris interna (orange)



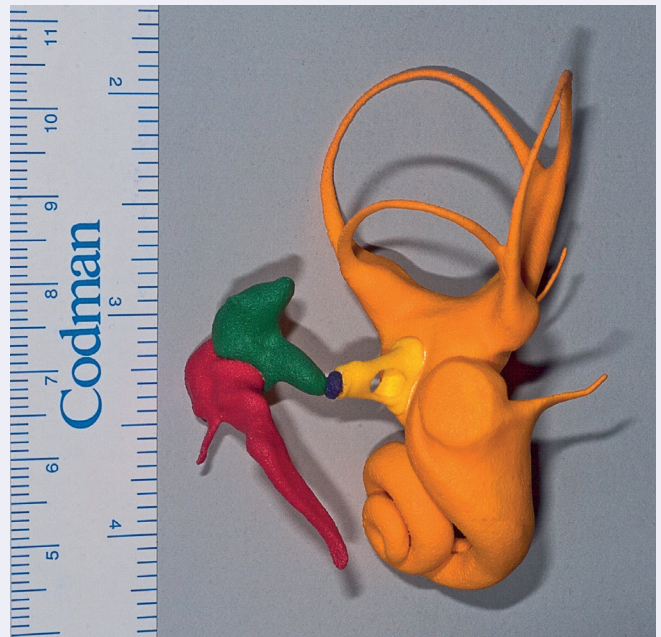
Os petrosum (Eq):
Canalis facialis

<https://youtu.be/EzfTzmeXsGc>

9. ÁBRA. Az arcideg (n. facialis) csatornája (videóanimáció)

URL: <https://youtu.be/EzfTzmeXsGc>

FIGURE 9. The facial nerve's channel (video animation)



A második animáció (8. ábra) egyfajta virtuális endoszkópizálásként a külső hallójáraton keresztül közelíti meg a dobüregget, és mutatja meg a főbb struktúráit (így pl. a hallócsontokat, a cellulae tympanicae-t, ill. a promontorium-ot). A harmadik videófelvétel (9. ábra) pedig azt kívánja szemléltetni, hogy miként halad az arcideg (nervus facialis) csatornája a foramen stylomastoideum-tól befelé a csontban, hol kommunikál a középfül üregével, melyik ponton található a csatorna "térdje" (geniculum canalis facialis). A belső hallójáraton át (meatus acusticus internus) elhagyva az arcideg csatornáját, majd ismét a sziklacsont felé fordulva látható a belső hallójáratban a VII. (nervus facialis) és a VIII. (nervus vestibulocochlearis) agytörzsi idegek részére szolgáló négy kisebb nyílás (area nervi facialis, area vestibularis superior /dorsalis/, area vestibularis inferior /ventralis/, area cochleae). A videó ezt követően rostralis irányból, az impressio nervi trigemini lateralis oldaláról

A teljes térbeli bemutatás jegyében elkészítették a sziklacsont 3D nyomtatott modelljét is

közelíti meg a csontot, ahol az arcideg egyik ága számára található egy nyílás (hiatus canalis nervi petrosi majoris). A n. petrosus major csatornáján végighaladva a geniculum canalis facialis-hoz érkezik a videó, és innentől az arcideg csatornáján visszafelé, a foramen stylomastoideum irányába halad újra végig, hogy aztán visszatérjen az eredeti, lateralis helyzetébe a felvétel.

A teljes térbeli bemutatás jegyében elkészítettük a 6. ábrán látható 3D-s modell kinyomtatott változatát is (10. ábra), amely így alkalmas arra, hogy az eddig csak virtuálisan (a számítógép, tablet vagy mobiltelefon kijelzőjén) forgatható modellt kézzelfogható módon is bemutassa. A 3D-s nyomtatás SLS-eljárással (selective laser sintering) készült poliamid porból, majd akrilfestékkel lett megszínezve.

MEGVITATÁS

Összetettsége révén a humán és az állatorvosi oktatásban is a legnehezebben megérthető csontok közé a koponya, és azon belül is a sziklacsont tartozik. Ez a kihívás a későbbi klinikai gyakorlatban is jelentkezik. Ez rendszerint abból fakad, hogy számtalan struktúra (nyúlvány, kiszögellés, csatorna, lyuk stb.) tarkítja a felszínét, és a csonton belül is még kisebb képletek találhatóak a tér minden irányába rendeződve. A síkbeli (2-dimenziós), papíralapú ábrázolásokhoz képest a jelenlegi technológia már számos lehetőséget kínál, hogy az olvasottakat plasztikusabban is el lehessen képzelni, és ezáltal a tanulás és megértés könnyebbé váljon. Jelenlegi tudomásunk szerint eddig egyetlen más tanulmány sem dolgozott fel a ló sziklacsontját olyan megközelítésből, hogy valódi csont alapján és részletgazdag digitalizálást követően az egyes képleteket külön-külön kijelölve elkészítse a főbb részek élethű 3-dimenziós modelljét. Az így létrehozott modell pedig nemcsak az oktatásban használható fel, hanem a gyakorlatban is segíthet megérteni az egyes kórfolyamatok terjedését és a hozzá társuló tüneteket: így az animációk segítségével pl. jól látható, hogy egy elhúzódó középfülgyulladás miként érintheti az arcideget (mivel a járatok egy szélesebb felületen keresztül kommunikálnak egymással), annak átmeneti vagy teljes bénulásához vezetve. A légzacskót érintő fertőzés pedig az Eustach-féle fülkürtön keresztül feljuthat a dobüregbe, és annak rekeszesettsége miatt (cellulae tympanici) jóval nehezebb a váladék középfülből való eltávolítása. A későbbiekben pedig a 3D-nyomtatás fog egyre nagyobb szerepet játszani azáltal, hogy míg korábban a hosszú preparatív munkát követően elkészített modellből csak korlátozott számú példány volt a múzeumokban, és a sérülékenyséjük miatt óvni kellett őket, ezzel szemben miután valaki elkészített egy STL-modellt, korlátlan számban, méretben és színben ki lehet nyomtatni és kézbe lehet adni őket. A jelenlegi korlátozó tényező egyelőre a 3D-nyomtatás viszonylag jelentős költsége. A technológia szélesebb körű elterjedésével és az alapanyagok árának csökkenésével azonban egyre olcsóbbá válik, ezáltal a nyomtatott modellek is megfizethetőbbek lesznek, és egy hasznos tanulási módszert kínálnak a graduális és a posztgraduális területeken. További lehetőségként említhető a virtuális valóság (virtual reality, VR) és a kiterjesztett valóság (augmented reality, AR) irányában történő fejlesztés: ezekkel a technológiákkal (a megfelelő hardveres és szoftveres háttérrel) lehetőség van a közvetlen környezetünkbe vetíteni a látottakat, így egy mobiltelefon kijelzőjén vagy egy speciális szemüvegen keresztül úgy lehet érzékelni, mintha valójában ott lenne előttünk az asztalon a vizsgált tárgy. A kiterjesztett és a virtuális valóság már jelenleg is használható orvosi célra, mivel interaktív módon és akár távolról is lehetővé tesz bizonyos vizsgálatokat vagy beavatkozásokat.

Ezzel a tanulmánnyal nemcsak egy összetett anatómiai képletet szerettünk volna bemutatni a háromdimenziós modellezésen keresztül, hanem a fentiekben említett lehetőségekre is felhívjuk a figyelmet, az oktatás, a kutatás, és a gyakorlat területére alkalmazhatóan.

A modell nemcsak az oktatásban használható fel, hanem a gyakorlatban is segíthet megérteni az egyes kórfolyamatok terjedését és a hozzá társuló tüneteket

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk FALK Györgynek (Varinex Zrt.) a 3D-nyomtatásban nyújtott szakszerű és minőségi munkájáért, és az elkészített modellekért.

IRODALOM

1. BARONE, R. – SIMOENS, P.: Anatomie comparée des mammifères domestiques, Tome 7, Neurologie II, Système nerveux périphérique, glandes endocrines, esthésiologie. Paris: Vigot, 2010.
 2. BUDRAS, K. D. – SACK, W. O. et al.: Anatomy of the Horse. 6th ed. Hannover, Germany: Schluetersche, 2012.
 3. CONSTANTINESCU, G. – SCHALLER, O.: Illustrated Veterinary Anatomical Nomenclature. 3rd, revised ed. Stuttgart: Thieme, 2011.
 4. KÖNIG, H. E. – LIEBICH, H.-G. et al.: Veterinary Anatomy of Domestic Mammals: Textbook and Colour Atlas. 4th ed. Stuttgart: Schattauer, 2009.
 5. NICKEL, R. – SCHUMMER, A. – SEIFERLE, E.: Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, Band IV: Nervensystem, Sinnesorgane, Endokrine Drüsen. 4. unveränderte Auflage. Berlin u.a.: Enke, 2003.
 6. SINGH, B.: Dyce, Sack, and Wensing's Textbook of Veterinary Anatomy. 5th ed. St. Louis, Missouri: Saunders, 2017.
- Közlésre érke.: 2018. szept. 10.