

A vázrendszer fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

Készítette: Német Anikó, ELTE TTK fizika

Helyszín: Budapest

Dátum: 2014.04.20.

Tartalom

1. Bevezető	3
2. Egysejtűektől a mai emberig	4
3. Modern tárgyalásmódok	7
4. Külsőtől a belső védelemig.....	8
5. Kihívások.....	9
6. A következő lépések a csont evolúciójában a védőpajzstól az enchondrális csontosodásig	10
7. Csontfejlődés: a kövületektől a génhálózatig.....	11
8. Összefoglaló.....	13
9. Irodalomjegyzék	15
10. Ábrajegyzék.....	15

1. Bevezető

Az élővilágot kialakító és formáló jelenségek hátterében az örökítőanyag és a nukleinsavak megváltozása áll. Az evolúció általános törvényei sajátos, teljesen megismételhetetlen jelenségek, mivel a törvények nagyszámú lehetőség közötti választást is magukba foglalják. A földi bioszférában a fajok kialakulása egy páratlan értékű eseménysor.

Az élet eredetét vizsgálva, az ősök láncán 3,5-4 milliárd évvel korábbra tekintünk vissza. Ez a visszpillantás nehéz, mert nincs sok emlékün, melyben az akkori generációknak nyomuk maradhatott volna, és az akkori környezetről is csak homályos képünk van. Ennek ellenére a természet gondoskodott némi tájékoztató jellegről, a kőületekről.

A csont a gerincesekre jellemző, elmeszesedés a torok és bőr hártái körül, segít a fog alakú képződmények növekedésében és az állatoknál védőpajzsként jelenik meg, porcféle, belső váz formájában. A tudásunkat a csontok evolúciójáról a fosszilis váz és a genetikai információ gazdagította. A mai emberekben is hasonlóság van a bőr elemei és a csontok molekuláris szerkezetében. Ezen munkám, rálátást ad a fő fordulópontokra a váz evolúciójában. Néhány molekuláris szerkezet maga után vont a genetikai hálózat magját és a kölcsönhatásukat két féle módon, régi teóriaként és modern genetikai közelítésben, is tárgyalom. Írásomban röviden tárgyalom az egysejtűektől, egészen az emberig, a törzsfajlás során a külső váz átváltozását belső vázzá, majd ismertetek néhány elképzelést a csontok kialakulásáról.

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

2. Egysejtűektől a mai emberig

A paleontológusoknak két nehézséggel is meg kell küzdeniük, elsősorban lemondanak arról, hogy az egykoron élt fajok genetikai önállóságát kísérleti úton mutassák be, másrészt pedig meg kell elégedjenek a rendelkezésre álló anyaggal, ez esetben a vázzal. Viszont a morfológiai elkülönülésre alapozott faj, nem mindig tükörképe a biológiaiainak, hiszen például a szaporodás szempontjából elkülönült faj populációk nem mutatnak alaki eltérést. Mivel mindössze az egykoron élt fajok egy százalékát ismerjük a fossziliákból, ezért az összegyűjtött ismereteink valóban nem adnak teljes képet, de nagy vonalakban rögzíthettük a fontosabb eseményeket az élővilág múltjáról.

A prekambrium és kambrium határán a gerinctelen tengeri szervezetek megjelenését egyes szerzők robbanásszerű evolúciónak tekintették. Mások azt állították, hogy a gerinctelenek váz nélküli csoportjai már a prekambriumban kialakultak, de a szilárd váz minden törzsben egyidejűleg jelent meg. A szilárd vázat elválasztó szervek már a prekambriumban jelentkeztek, de csak fokozatosan alakult ki különböző csoportoknál. Mivel magyarázták az állattörzsek és a szilárd váz megjelenését? Egyesek a légkör oxigéntartalmának növekedésével, a prekambriumi jégkorszakot követő felmelegedéssel, vírusos fertőzéssel, mások a hegységszerkezet megváltozásának tulajdonították ezt a jelenséget, mely megsemmisítette a kőzetekben az ősi élet nyomait.

Az *Ediacara-fauna* megismerése az 1960-as években, teljesen új megvilágításba helyezte a többsejtűek keletkezését. Valamennyi fajának közös jellemvonása a szilárd, mészvagy kovaváz hiánya. A maradványok elég jól megmutatták, hogy kitinrétege sokkal vastagabb és ellenállóbb volt a ma élő rokonainál.

Az egysejtűek (*Protozoa*) közül csak azokról tudunk többet, melyeknek fosszilizálódásra alkalmas vázuk volt, mely kalcit, aragonit, szilícium-dioxid, stroncium-szulfát anyagú, viszont ha az állat meszes, vasas vagy kovás kötőanyagába idegen szemcséket épített be, akkor agglutinált vázat választott el. Az egysejtűek közül főképp a meszes és az agglutináltokról van ismeretünk, melyek már az alsó kambriumban megjelentek feltehetően a prekambriumi szerves vázú ősöktől származhattak. Ezen ősök mészvázai kalcitanyagú és gyakran mikroszemcsés szerkezetű, mely utóbbi formák a triászban kihaltak. A plankton *Foraminiferáknak* aragonit anyagú, nagy likacsokkal áttört vékony vázuk van, a lebegés könnyítésére. A gyökérlábúak egy ismert csoportja kovavázat választ el. Szivacsoknak

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

általában belső, de kivételesen külső vázuk is van, ahol a szerves váz halogén aminosavakat tartalmazó szkleroprotein, ami nem fosszilizálódik. A szilárd váz mész- vagy kovaanyagú tükből áll. A csalánozók közül a korallok mészvázának fejlődését ismerjük legjobban. A kőkorallok ősei feltehetően a *Rugosák* voltak. Tülok alakú vázzal rendelkeztek, mely oldalsó részével rögzült a talajhoz. A váz tömött, lemezszerű elemekből állt. A bordásmedúzák nem választanak el szilárd vázat, s hozzájuk hasonlóan a koponyátlanok, zsinórférgék, sünférgék, hengeresférgék és az előgyűrűsférgék sem. A legfejlettebb gyűrűs férgék, nádályok fosszilizisan a karbontól ismertek. Habár a hengeresférgék nem választanak ki szilárd vázat, kutikulájuk fejlett, s az előgyűrűsférgék kutikulája pedig vastag. A kutikulát kémiaiilag kollagén, kitin, keratinszerű anyagok és basophil proteinek építik fel, jellemző fizikai sajátsága a nagyfokú szilárdság és rugalmasság. Igen elterjedt védőréteg a gerinctelen állatok testfelületén, nagy vastagság esetén ellenálló a mechanikai és kémiai behatásokkal szemben. Az ízeltlábúakat a kiszáradástól védi, melyek kutikuláját a hypodermis sejtjei hozzák létre, felépítő anyagai: 2/3-a chinonnal „cserjezett” fehérje, 1/3-a kitin, ami nitrogén tartalmú mucopoliszacharid. A kutikula felületén vékony, csak fehérjéket tartalmazó epikutikula húzódik, alatta exokutikula, majd a fő réteget képző mesokutikula, végül közvetlenül a hypodermis felett, három réteg kitin tartalmú, lemezes felépítésű endokutikula.

A puhatestűek héjának felépítése: legkívül héjhártya, periostracum, szerves anyag, amit cochin vagy conochin alkot; közepén oszlop vagy porcelánréteg, ostracum, mészoszlopok, amit aragonit vagy kalcit épít fel; legbelül gyöngyházréteg, hypostracum. Csigaházat általában periostracum és ostracum alkotja. Periostracumot a köpenyszegély mirigysejtek termelik.

A fejlábúak esetén az agyat porcos tok védi, emellett négy vagy két pár kopoltyúval lélegeznek. Az *ammonitáknál* az elsődleges külső váz, belső vázzá alakult, ahogy az állat kitüremkedett házából, a ház hátsó részét vastag mészréteg burkolta. A ma élők esetén a belső váz módosult formában maradt meg és a legfejlettebbeknél már el is tűnt. Medveállatkák kutikulája kitint nem tartalmaz, ezért nem fosszilizálódtak. Az ízeltlábúak kitines külső vázzal rendelkeznek, melyeknél a kitinpáncél az epidermiszből keletkezett. A kétrétegű kutikula vékony, külső része kitin nélküli, a belső fő réteg külső része különösen szilárd és gyakran elmeszesedik. A tapogatószakállasok hosszú, csőszerű protein és β -kitin anyagú vázat választanak el. A tüskésbőrűek váza kalcitkristályokból összetett lemezekből épült fel, melyek mozgathatók vagy szilárdan összenőtt tokot alkotnak. A zsákállatok fejletlen gerinchúrosok, gerinchúrjuk rugalmas, pálcikaszerű képződmény, a test

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

megtámasztására szolgál. A váz foszfátos, törzsfejlődésük a váz anyagának változásával járhat. A gerincesek (*Vertebrata*) a legfejlettebb gerinchúrosok, epidermiszük több rétegű, részben mezodermás eredetű szövettel, porcos és csontos belső vázuk van. Gerincoszlop a gerinchúrból és kötőszövetből alakult ki. A jelenleg élő állkapocsnélküliek váza porcos, őseiknek azonban külső és belső csontpáncéljuk volt. A kétéltűek egyedfejlődésük korai szakaszában kopolyúval lélegeztek, végtagjai fejlettebbek, a medenceöv csontjai szoros kapcsolatba kerültek a gerincoszlop keresztcsigolyáival. A mai kétéltűek koponyája csak tökéletlenül csontosodott el, s több ősi csont redukálódott. Hiányzik a kopolyúfedő és annak csontpáncélja, míg a gerincoszlop különböző módon és méretekben csontosodott el. A hüllők fejlett belső vázzal rendelkeznek, csonttanilag nem tértek el a kétéltűektől, emiatt a paleontológusok pusztán néhány csont alapján nem tudják megkülönböztetni őket. A trópusokon élő hüllők csontja tömött, míg az emlősszerűeké szivacsos. A mai hüllőknél minden évben újabb és újabb réteg borítja az előzőt. Keresztmetszetben tömött és évgyűrűs szerkezetű. A belső hőszabályozású emlősök csontszerkezete a permben szivacsos és üreges volt. A repülőhüllőknek pneumatikus végtagcsontjaik voltak, a *Dinosaurusok* esetében a meleggérőség bizonyítéka a végtagjai csontszerkezete. Madarak esetén a csontüreget velő tölti ki, de vannak tömött csontjaik is, szilárdságuk a csontelemek összeolvadásából jött létre. Az emlősök fogazata tagolódik, állkapcsuk egy elemből áll, három hallócsontjuk, porcos fülkagyló és a csigolyák között még megvan a gerinchúr végső maradványa.

Az embernek hosszú és önálló előtörténete van, de őket is a gerincesekhez sorolhatnánk. A csontváz általában jól tükrözi az élőlény jellegét. A végtagcsontokat csöves csontok alkotják. Külső felszíne változó erősségű rostos burok, csonthártya (*periosteum*) borítja. Az ízületi végeket változó vastagságban (0,5-2 mm) általában üvegporcból álló ízületi porcréteg borítja. A csont diaphysisét kitöltő egységes velőüreg felszínét a csonthártyához hasonló, de jóval vékonyabb kötőszöveti hártya borítja, mikroszkóppal is alig felismerhető finomságú réteggel a csontvégeket kitöltő szivacsos csontállomány elemi velőüregeibe is betérjed. A periosteum a csont külső felszínét, a fentiekben említett ízületi porccal borított részek kivételével mindenhol rostos burok vesz körül. Külső részében a csont fő megterhelési irányainak megfelelően szőtt kollagén rostos kötőszövetből áll, mely ereket és idegeket tartalmaz. Belső rétegét cambiumréteggel is nevezzük, mert orsó alakú, évgyűrűhöz hasonlóan újabb csontállomány rakódik rá a régre, így növekszik a csont vastagsága. Felnőtt korban is sok a differenciálatlan kötőszöveti sejt, de ezek újabb réteget nem képeznek, hanem a csontfelépítő és a csontfelszívódási folyamatok vannak egyensúlyban. A

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

csonthártyához hasonló, de jóval fejletlenebb, kevésbé egységes lemez a csontbelhártya (*endosteum*). Növekedés közben csontleépítő működésű, mert a csont vastagsági növekedésével párhuzamosan a velőüreg is növekszik. Kifejlett állapotban a központi velőüreget határoló laminae generales internae-t építi fel. Szöveti szerkezete hasonlít a periosteuméhoz, azzal a különbséggel, hogy kevesebb rostot és ideget tartalmaz. Az említettek közül látható, hogy a csontot több szövet, ún. csontszövet, csonthártya, porc, sárga és vörös csontvelő építi fel, melyek szoros kapcsolatban vannak egymással és ez nélkül életképtelenek vagy nem teljesek.

3. Modern tárgyalásmódok

Sokáig a csontok evolúciója főképp a ránk maradt fosszilis bizonyítékokon alapult. Kivételesen csak a paleontológia (öslénytan) nyújt némi rálátást ezekre a folyamatokra, melyek elvezettek bennünket az elmeszesedett csontvázakhoz. A rendelkezésünkre álló bizonyítékokból azt feltételezték, hogy a gerincesek, a lándzsahal féle gerinchúrosoktól származnak. Ezeket az állkapocs nélküli, porcos, belső vázúak követték, melyek közönséges angolna vagy orsóhalra emlékeztetnek. A következő fontos esemény az elmeszesedett csontos részek megjelenése volt, ami egy fő evolúciós lépést tárt elénk és vezetett el a gerinchúrosok családfájának fejlődéséhez.

A primitív fosszilis gerinccsontok ritkák és a maradványaik sűrűn szöveteket tartalmaznak. Nehéz őket osztályozni, s a négy csontszövet típusnak (zománc, csont, dentin, porc) kialakulása vitatott. Míg az egyik feltételezés azt mondja, hogy a négy szövet típus még a korai gerincesek kialakulásakor jelent meg, a másik azt feltételezi, hogy sokáig a korai elmeszesedés ideje alatt a szövet képlékeny volt, amit elkülönülés előzött meg és később folytatódott. Több évtizedig az öslénytani adatok felépítését Ernst Haeckel biogenetikus törvényei befolyásolták, az egyedfejlődés ismétli a fejlődéstörténetet, vagyis az ősi felnőtt egyedek csontjairól azt feltételezték, hogy porcból erednek, analóg módon az embrionális csontokhoz.

Manapság, a szövetek elmeszesedésének bizonyítékait sűrűn kötik a specifikus váladékképző kalciumkötő foszfor (SCPP) génekhez, melyek különböző gerincesek családfájában voltak jelen. Elemzések kimutatták az SCPP gének és génkombinációkat, melyeket főképp csontok és dentinben találhatók, míg találtak olyan SCPP variációkat,

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

melyek a zománc struktúráját építik. A jelenlegi kutatások közeli kapcsolatot mutatnak a csont, dentin, és a zománc között, elmeszesedett szövetképződmény értelemben, melyben egykorú fogszövetek alakultak ki, ősi folyamattal végig a családfa különböző módosulásaival.

Végül, több újkeletű beszámoló oly szemszögből néz a csonteredetre, hogy az evolúció különböző génmag hálózatai lényegesek a gerincesek fejlődéstörténetében. Például, egy mai kutatásban, a csontvázfejlesztésben, a molekuláris származás keltette fel a figyelmet a Runt gén családra. RUNX proteinek szabályozzák a fő alkotóelemet, a csontszármazás velejáróját. Runx családdal együttesen különböző újonnan felfedezett gén hálózatok váltak fontossá, hogy megértsük a csont fejlődését.

4. Külsőtől a belső védelemig

Hogy találtak rá első helyen az elmeszesedett szövetre? Milyen alkotóelemek erőltették az első organizmusokat, hogy védőpajzsot alakítsanak ki?

Az erőszakos lépések, a tektonikus mozgások következménye kb 1.5 millárd éve, hogy tömérdek ásványt, beleértve CaCO_3 , sodort óceánba. Ami lehetővé tette lakói számára a nehéz testrészek kutatását, mint például a kagyló vagy a túske. Először az egysejtű szervezeteknek segített legyőzni tömérdek ásványt és megóvni a zúzódásoktól. Ugyancsak egy hirtelen növekedéshez vezetett a különbözőségében a többsejtűeknél kicsivel több, mint 0.5 millió évvel ezelőtt, ami „Kambriumi robbanás” néven ismert. Ráadásul a szilárd külsejű csont megjelenése eredményesen kibővítette a comb hosszát, lehetővé téve a még gyorsabb mozgását több szervezetnek is. Az elmeszesedett testrészek megjelenésére több tudós is úgy tekint, mint egy erő, mely általánosságban megnövelte az állatok evolúciós lépését. Mint ahogy a kitinváz gyorsaságot növelte az állati evolúció során. Ezáltal az állatoknak olyan lehetőséget teremtve, hogy kiterjesszék orsócsontjuk hatékonyságát kalciumos végtagok segítségével és védőpajzssal, ez azonban határokat is szabott, főképp a testméret és a felszíni érzékelő szervek hiányára tekintettel. Ezen kívül a szilárd kagylók és pajzsok nem engedtek nagy mozgásteret, míg a következő nagy csontfejlődési változás az elszarusodott csont, ami a test külső részéről a test belsejébe tevődött át, ez az alkalmazkodás nagyon előnyös lett számukra, főképp az állatok családfájában, ami később lehetővé tette egy teljesen új környezet benépesítését.

5. Kihívások

Más fontos előny az elszarusodott csont felépítése, ami egy csontjellemző kutatása során lényegesen elkülönítette a gerinceseket jóformán minden más többsejtű eukariótától. A szilárd ásványi rész főképp kalcium-karbonátból áll, mely több millió éve mindenféle tengeri kitenyázat alkotott, melyet felváltotta a kalcium-foszfát, főképp kalcium hidroxapatit alakban. Azonban miért váltanak egy teljesen új ásványfelépítést a gerincesek és milyen különleges kalcium hidroxapatit tulajdonság vezetett az egyesülésükhöz? Különböző feltevések léteznek a foszfátalapú csontozat származásáról. Az első, mely a korai gerinceseket elvezette az elkülönült tengeri foszfátokhoz, az a tény, hogy az elérhető foszfátállományok hasznos forrásai az állatok energiájának és javítja az anyagcseréjüket. Habár ez a látásmód a gerincesek egyesített kémiai jellemzőiről nem nyújt olyan hasznot, amely ne lenne ugyanúgy hasznos a gerinctelenek számára. A másik lehetséges előnye ennek az újszerű kémiai kompozíciónak, hogy a kalcium hidroxapatit építő elemek nagyobb kémiai stabilitást biztosítanak. Ez fontos lehet, főleg a savas környezet alkotta robbanás vagy erős fizikai aktivitás periódusában. A következő erős aktivitás, melyet a gerincesek tapasztalnak az extracelluláris folyadékok pH értékének csökkenése, az embereknél 7.41-ről 7.15-re esik. Ez az ösvény ATP generációja a tejsav termékekre vonatkozik és lehetővé teszi a gerinceseknek, hogy megszerezzék az energiát, amit csak oxigénnel (anyagcserével) magával nem lehet. Habár a tejsav felszabadulása és hanyatlása az extracelluláris pH-ban egy biztos fokot ad a csonti elkülönülésben és hiperkalcémiában. A jelentősége ezeknek a folyamatoknak nagymértékben megnő, ha a csontot inkább kalcit, mint foszfát alapúnak tekintik, ami szükségessé tesz egy alacsonyabb átfogó anyagcserét és aktivitást. A hipotéziseket egy élő hal csoporton próbálták ki, ahol kalcit vagy hidroapatit kristályokat ültettek be a test különböző részeibe és az állatok továbbra is ugyanúgy mozogtak. Újabb elemzések a hal szérumokról és beültetésekről azt mutatták, hogy 7.1 pH értéknél (nagy aktivitáson), a kalcium koncentrációja és a beültetés feloldódási aránya észrevehetően nagyobb a halaknál, melyeknek van kalcit implantátumuk. Mindent összevetve, más tulajdonságaik megegyeznek, de a hidroxapatit sokkal stabilabb ásványi elemet épít a csontokban, mint azt kalcit anyagokkal elérhetnék, mely különösképp fontos a pH érték esetén, mely kapcsolatban vannak az erős aktivitással és egy magas energia igényes életmóddal tipikusan a gerinceseknél.

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

6. A következő lépések a csont evolúciójában a védőpajzstól az enchondrális csontosodásig

A korai csont a gerincesek családfáján egy nem kollagén alapú, ásványosodás mentes, porcos belső váz. Főképp a garattal volt kapcsolatban a rendszertani egységekben, mint például orsóhal és angolna. A II-es kollagén fejlődése után, egészen az egyszerű korai kollagéntól már kollagén alapú porc is formálható. Ez ellentétbe állította azokat az állatokat, melyeknek teljesen kollagén mentes vázuk volt. Néhány primitív porcos képes volt csontos részeket kialakítani az enchondrális csontosodás során, ilyenek a cápák, habár a kevés maradvány miatt a pontos származási idő és méret még ma is tisztázatlan.

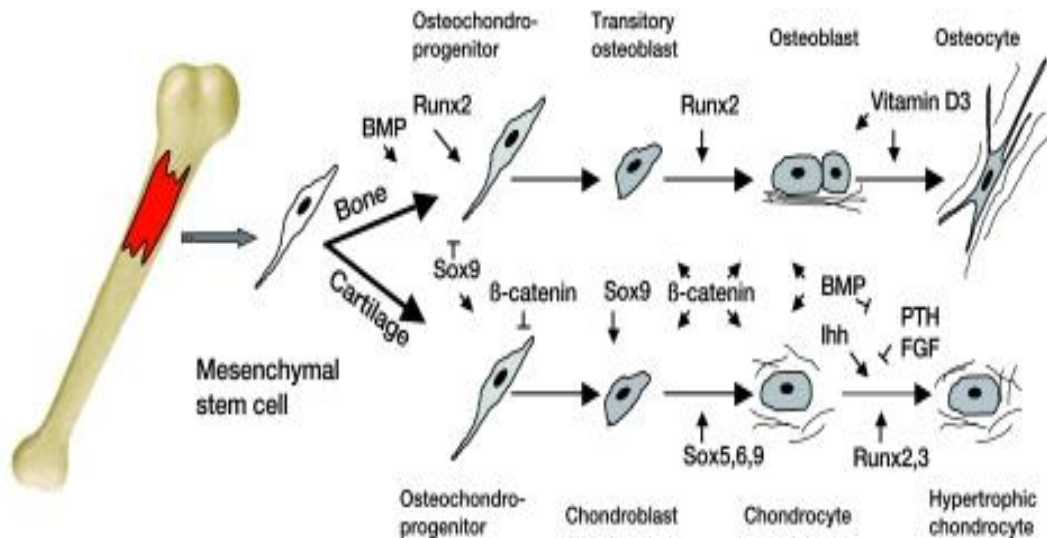
Egy evolúciós szempontból az enchondrális csontosodás a kétfajta csontformálódásból az, ami előbb volt, mert a későbbieknél a bőrcsont belsőhártyás csontosodással alakult. A gerinccsontoknál előfordul a porchelyettesítés. Az enchondrális csontosodás folyamata fokozatosan alakult ki, kezdve a porchártyás csont lerakódásával, a molekuláris eszközöket felhasználva, mely a bőrben levő védőcsont fejlődésével alakult ki. Ez megelőzte azt az evolúciós porc elkopást és az enchondrális csont lerakódását, melyet főképp a cápa csonteredet tanulmányok mutatnak.

A csontoknak, mint szervek, az enchondrális csontosodás nyújt szerkezeti támaszt a gerincesek kutatásában. Habár még mindig vannak viták és bizonytalanságok a halak uszonya és a gerincesek végtagjai közti átmenetet illetően. Vajon a végtagokat először a vízi állatoknál fedezték fel, ami hajlamossá tette őket, hogy a szárazföldön járjanak? Vajon az ujjak a vízben jelentek meg vagy ők igazodtak a szárazföldi környezethez? Mi volt az eredeti száma az ujjaknak? A páros végtagok, melyek először léteztek és még sok apróság az embrionális felfedezésükben vár határozott válaszra. Egy friss tanulmányban azt állítják, hogy főképp az actinodin géncsalád hiánya lehet a magyarázat arra, hogyan váltak a halak négy végtagú gerincesekké. Genetikai kísérletek a zebrahalon kimutatták, hogy talán egy kisszámú géneszteség, ami alakító erő a fejlődésben, beleszámítva a hatalmas evolúciós átalakulását az uszonytól egészen a végtagokig.

A szárazföldi gerincesek megérkezésével, a csontok működése egy új irányba terjedt. Habár a csont még mindig kalcium és foszfor tartály, mely védi a sérülékeny testrészeket, kezd a véresejt termelés helyszínévé válni, emellett mozgás szerkezeti és mechanikai támaszt is nyújt.

7. Csontfejlődés: a kövületektől a génhálózatig

Míg az oszteoblasztok (csontépítő sejtek) és kondrociták (porcsejtek) kötőszöveti őstől származnak, az oszteoklasztok (csontfaló sejtek) vérképzőszervből származnak. A sejt sorsát óriási sor mélyen gyökerező génhálózat szabályozza és mi csak most kezdjük megérteni ezeknek hierarchiáját és egymásra utaltságát.



1. ábra A fő génhálózatok, melyek irányítják a csont fejlődését. A nyilak a pozitív, a vízszintesek a negatív kölcsönhatást mutatják.

Az egyik fő elem, mely lehetővé teszi a csontfejlődést a Runx géncsalád. Például a RUNX funkció központi szerepet tölt be az oszteoblasztok elkülönülésének szabályzásában és a fogak elkülönülésében, azonban ha a RUNX2 génből egy pár is hiányzik, akkor csontrendellenességet okoz. Tudásunk a génhálózat származásáról korlátozott, de kutatások kimutatták, hogy a család egyes tagjai szabályozzák a másoló faktorokat, ami alapvető a csontfejlődés során és fontos a porcérésnél. Egyben vizsgálták az előfordulásukat és működésüket is. Ezek a vizsgálatok a RUNX tagjait különféle alacsonyabb rendű gerinceseknél kimutatták, hogy a gerinchúrosok bordával rendelkező fajai inkább ugyanazon génmásolatot hordoztak és az egész Runx locus megháromszorozódott a gerinchúrosok fejlődése során. A vizsgálatok során a RUNX expressziókat az ősi csontok alkotóelemeiben is megtalálták például a gerinchúrosoknál.

RUNX fehérjét sűrűn a Hedgehog-gal (Hh) emlegetik. Ez egy másik génszabályzó család, amely lényeges a csontfejlődésben és a folyamat szabályzásában, mint például a

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

végtagok növekedésében, porcsejtek elkülönülésében és az enchondrális csontosodásban. A lándzsahalban a RUNX fehérjék közvetlenül tudják kötni és aktiválni a Hh promotert. A primitív gerinchúrosok vázánál a Hh a RUNX-al együtt van emlegetve azokban a szövetekben, melyek arról ismertek, hogy fontosak a porc és csont képződésénél: gerinchúr, velőcső és kopolyúbél.

Máshol fontos a SOX géncsoport, melyet mintegy 6 géncsoport alkot. SOX9 játssza a fő szerepet, kezdve a porcképződéssel és megakadályozza a későbbi érést. Érdekes módon a SOX9 dominál a RUNX2 felett a kötőszöveti sejt elődjében, aminek sorsa a kondrogén ág: ennek működése, hogy közvetlenül kifejezze az aktivitást.

Mai törzsfejlődés vizsgálatnál, melybe bevontak egy ősi gerinces keresztmetszetét, azt gondolják, hogy az előfordulása a nagyskálájú genomális eseményeknek, amilyen egy duplikáció is, közrejátszhatott, mint előfeltétel a fő porc és ásványosodott csont létrejöttében. Az eseményhez való hozzájárulás, hogy létrejöjjön egy ilyen komplexitás, tipikusan a gerinceseknél, még ma is vitatott, de a nagy genetikai hatásokról lehet olyan erejük, hogy létrehozassanak ilyen sajátos komplexitást a genetikai családoknál, mint amilyen a SOX és RUNX. A fő genetikai tulajdonságok lehet, hogy már léteztek az előgerinchúrosoknál és ezt követően megváltozott génduplikációval és más változásokkal a genomban. Ez vezetett az aggrecan (legnagyobb proteoglikán molekula), oszteonektin (fehérje féle), kalciumkötő foszforproteinek (SCPP) és azon gének kialakulásához, melyek kalciumkötésben vesznek részt.

Nem rég egy evolúciós forráskönyvet ajánlottak a molekuláris szerkezetről hatványozva a RUNX és a D3 vitamint (VDR) a gerincesekben. VDR egy nukleáris hormon receptor, a proteinek egy evolúciós családja, ami közbelép az állatok liganduma és génfolyamatok kölcsönhatásánál. D3 vitamin lehetővé teszi a kalcium és foszfát felszívást a bélhámsejtben és hiánya csontrendellenességhez vezet, mint az angolkór és csontlágylás. Egy sor biokémiai kutatásban azt vették észre, hogy a VDR közvetlenül lép kölcsönhatásba a 3 RUNX változattal a patkány sejtmagjában, amit D3 vitaminnal stimuláltak, bemutatva a VDR és a RUNX2 közti kölcsönhatást, hogy mennyire fontos szerepet játszott az emlősök családjában. Követve az expressziójukat a csontkutatásban, a VDR és RUNX2 közti kölcsönhatás kapcsolatba került újabb definíciós tulajdonsággal az emlősök csontozatában.

Végezetül, rengeteg más, járható molekuláris útvonalak vesz részt a gerincesek csontozatának kialakításában és nélkülözhetetlen a képződésében és működésében, mint a

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok

BMI, Wnt, Notch, FGF és számos más anyag, melyek jelentős a plazma membrán részéről és a sejten belüli és kívüli hálózatok egyaránt szabályozzák.

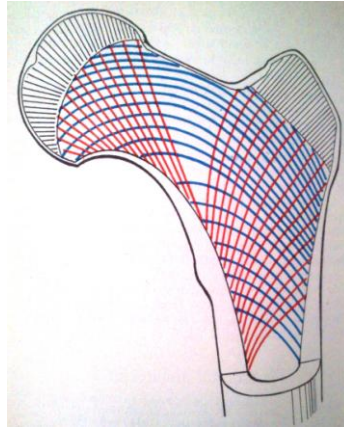
8. Összefoglaló

A gerincesek csontozata nem köthető az egysejtűek, puhatestűek és fejlábúak vázához. Viszont, mint ahogy a gerinceseknél is a csontváz fontos szerepet tölt be a test megtartásában, alakjában, egyensúly érzékelésében, így az egysejtűek, puhatestűeknél is fontos a váz, mint külső hatásoktól való védelem. Gerincesek csont felépítését elég alaposan kifejtettem és különböző elméleteket is hoztam a csontfejlődésük kialakulására valamint ábrával szemléltettem a csont alkotóelemeit. A bevezetőben említetteket, vagyis az élővilágot kialakító és formáló eseményekről, az evolúció általános törvényei sajátos, megismételhetetlen jelenségeiről és a fajok kialakulásának egy páratlan értékű eseménysorát is sikerült alátámasztani a SOX és RUNX géncsaláddal.

Nagy élvezettel készítettem ezt a tanulmányt, hiszen eddig nem is gondoltam volna, hogy mennyire érdekes és milyen sok, apró dolog, gének, receptorok, fehérjék szükségesek ahhoz, hogy egy olyan masszív szerkezet, mint a csont létrejöjjön. A csontfejlődésben úgy tűnik még inkább érvényessé válik a sok kicsi, sokra megy elv. Örülök, hogy behatóbban megismerhettem egy olyan szerv evolúcióját, ami nem csak azért fontos, hogy szilárd vázunk legyen, hanem azért is, mert a vér alakos elemeinek képzésében is jelentős.

Fizikus szemmel is tekintve a dolgot, lenyűgöz a csontban rejlő erő, az a szerkezet, amely olyan tömör és erős, hogy elbírja a súlyt és a ráható elképesztően sokféle mechanikai hatást is és nem roppan vagy törik el, ahogyan felállunk például.

A csontok fejlődése, avagy honnan származnak a csontok



2. ábra A nyomási erővonalak irányába eső csontgerendák pirossal, a húzási vonalakba esők kék színűek

A csontok, az emberi szervezet csodás vívmányai, amit immár, hogy ennyi mindent tudok róla, csontjaimat még inkább óvni és védeni fogom, hogy még sokáig egészségesek és erősek legyenek.

9. Irodalomjegyzék

- Evolúció II. – Az élővilág evolúciója, Erdős Géza, Járainé Komlódi Magda, Géczy Barnabás, Gyenis Gyula, Natura, Budapest, 1982
- Funkcionális anatómia, Szentágothai János, Réthelyi Miklós, Medicina könyvkiadó, Budapest, 1985
- Összehasonlító állatszervezetten II. rész, M. Dr. Odofer Magdolna adjunktus, Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, 1995
- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3237026/#!po=76.0870>, 2014.04.22.

10. Ábrajegyzék

- 3. ábra A fő génhálózatok, melyek irányítják a csont fejlődését. A nyilak a pozitív, a vízszintesek a negatív kölcsönhatást mutatják.- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3237026/#!po=47.9167>, 2014.04.26.
- 4. ábra A nyomási erővonalak irányába eső csontgerendák pirossal, a húzási vonalakba esők kék színűek- Funkcionális anatómia, Szentágothai János, Réthelyi Miklós, Medicina könyvkiadó, Budapest, 1985