

HOGYAN MOZOGHATTAK A DINOSZAURUSZOK?

Ősállatok mozgásának paleo-biomechanikai rekonstrukciója

Horváth Gábor

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Az elefántok köztudottan nem képesek gazellák módjára szökdecselni. Vajon miként mozogtak a sokszor még az elefántnál is jóval nehezebb szárazföldi őssállatok, mint például a nagytestű dinoszauruszok? Az egyik elképzelés szerint túl gyengék lehettek a lábaik ahhoz, hogy roppant súlyukat megtartsák, így a tavakban élhettek, és a testüket a víz fölhajtóereje lebegtette. Mivel ezen őssállatok már réges-régen kihaltak, nem tehetünk mást, mint hogy a mozgásukat a csontmaradványaik és nyomfossziliáik alapján próbáljuk meg rekonstruálni a

1. ábra. Néhány ismertebb dinoszauruszfaj a) *Velociraptor*, b) *Spinosaurus*, c) *Stegosaurus*, d) *Brachiosaurus*, e) *Tyrannosaurus* csontváza, illetve makettje (<http://www.1-800-fossils.com>).



ma élő állatok csontjainak és mozgásának vizsgálatával, a biomechanika alkalmazásával [1–6]. A biomechanika által föltárt tényeket összevetve a fosszilis csontokból és lábnyomokból kiolvasható adatokkal, kirajzolódik a válasz az őssállatok mozgékonyágának kérdésére. Megbecsülhetjük például, hogy a négylábú növényevő *Triceratops* vágázhatott-e, vagy csak cammoghatott, és hogy a kétlábú ragadozó *Tyrannosaurus* képes volt-e utolérni egy menekülő *Triceratops*-ot.

A dinoszauruszok tömegének becslése

A dinoszauruszoknak többnyire csak a csontváza ismert (1. ábra bal oldala), amiből a hajdani magasságuk, hosszúságuk és megközelítő alakjuk határozható meg. A dinoszauruszok élő-tömegének legnagyobb részét a bőrük, izmaik és belső szerveik tették ki, amelyek mára már régen elporladtak. Ezért a testtömegüket csak becsülni lehet, amihez arányosan kicsinyített dinoszaurusz-maketteket használnak a paleontológusok. E makettek olyanok, amilyenek a paleontológusok a kutatásaik eredményeiként a dinoszauruszokat elképzelik (1. ábra jobb oldala). A természettudományi múzeumokban és játékboltokban kapható dinoszaurusz-modellek is e rekonstruált alakok alapján készülnek.

A kicsinyített dinomakettek térfogatát az általuk kiszorított víz térfogatából határozzák meg. Az így kapott értéket megszorozva a kicsinyítési tényező reciprokának köbével,¹ megkapják a vizsgált dinoszaurusz hajdani hozzávetőleges térfogatát. E térfogatot megszorozva a ma élő hullók testének 1000 kg/m^3 átlagsűrűségével, a dinoszauruszok testtömegének közelítő értékéhez jutnak. Ilyen becslések arra vezettek [3, 4], hogy például a húsevő *Tyrannosaurus* kifejlett tömege 7 tonnánál is nagyobb lehetett (egy felnőtt jegesmedve tízszerese), egy felnőtt növényevő *Brachiosaurus* pedig akár 50 tonnát is nyomhatott (tízszer akkorát, mint egy afrikai elefántbika vagy közel akkorát, mint egy ámbráscet).

A testméret és a csontok terhelhetőségének skálázása

A nagytestű szárazföldi állatok mérete, testi ereje és vázszerkezete közti kapcsolat mechanikai problémáját elsőnek Galilei vetette föl az 1600-as évek elején. Ha

¹ A kicsinyítési tényező a test lineáris, egydimenziós kiterjedésére vonatkozik, a térfogat pedig e lineáris méret köbével arányos: ha például a makett 1:20 arányú kicsinyítéssel készült, akkor a makett térfogatát $20^3 = 8000$ -rel kell megszorozni, hogy megkapjuk a valós térfogatot.

két mértanilag hasonló, azaz egy megfelelő mértékű N kicsinyítéssel/nagyítással egymásba vihető alakú állat lineáris méretei különbözőek, és lineáris kiterjedésük (pl. lábhosszuk) aránya $L'/L = N$, akkor a csontjaik keresztmetszetének aránya $N^2 = A'/A$, míg a súlyuké $N^3 = G'/G$. Ez azt jelenti, hogy az $L' = N \cdot L$ lineáris méret N szorzótényezőjének növekedésével a csontokban ébredő $\sigma' = G'/A' = (N^3 \cdot G)/(N^2 \cdot A) = N \cdot G/A = N\sigma$ feszültség N -nel lineárisan nő. Ha tehát egy állat például $N = 2$ -szer magasabb, szélesebb és hosszabb egy hozzá mértanilag hasonló másikinál, akkor 4-szer erősebb (azaz 4-szer nagyobb keresztmetszetű) lábakkal kell 8-szor nagyobb testsúlyt hordozniuk. Galilei ebből arra következtetett, hogy ha egy állat alak hasonlóan növekedne, akkor egy kritikus lineáris méret meghaladása után a saját súlyát már nem tudná megtartani, mert csontjai eltörnének, mikor a csontokban ébredő $\sigma' = N\sigma$ feszültség nagyobb a σ^* törési (összeroppanási) feszültségnél. E megfontoláshoz fontos tudni, hogy a σ^* értéke független a testmérettől, vagyis az N -szer nagyobb állat csontjai is ugyanakkora kritikus σ^* feszültségnél törnek el, mint a kisebb állatéi.

A dinamikai hasonlóság és a Froude-féle szám

Ha egy állat mozgási sebessége u , lábhossza L , a földi nehézségi gyorsulás pedig g , akkor az állat Froude-száma $f = u^2/(gL)$, amit William Froude² (2. ábra) angol hajómérnökről neveztek el. Mint ahogyan a mértani hasonlóság esetén a két test alakja a hossz, szélesség és magasság azonos léptékű (N -szeres) megváltoztatásával egymásba képezhető le, úgy két különböző test mozgása akkor hasonló dinamikailag, ha a Froude-számuk azonos. Ekkor az egyik test lineáris méreteinek és az általa megtett útnak azonos léptékű (N -szeres) megváltozása mellett létrejövő mozgás előidézéséhez szükséges erő a két mozgás Froude-számának megegyezéséből határozható meg, s az ilyen mozgások egymásba dinamikailag átvihetőek. Nézzünk erre egy



2. ábra. William Froude (1810–1879) angol hajómérnök portréja (http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Williams_Froude.jpeg)

² William Froude (1810–1879) angol hajómérnök hajómakettek használatával azt vizsgálta, hogy mekkora tolóerejű motor szükséges egy újonnan tervezett hajó meghajtásához. A víz hajóra kifejtett ellenállása legnagyobb részét a hajóorr előtt tolt víz hullámtól származik. Froude megmutatta, hogy a hajómakettek és a valódi hajókon mért közegellenállási erők átszámításakor a később róla elnevezett Froude-szám játszik fontos szerepet: egy makettet úgy kell megépíteni, hogy Froude-száma megegyezzen a készítenő hajóéval, mert csak ekkor teljesül a dinamikai hasonlóság a makett és a fölépített hajó mozgása között. Ekkor persze L a hajó, illetve a makettjének a hossza.

egyszerű példát: a g nehézségi gyorsulású földi gravitációs térben gyorsítsunk függőlegesen fölfelé egy R sugarú, homogén ρ sűrűségű, $m = 4\pi\rho R^3/3$ tömegű gömböt. Az ehhez szükséges erő

$$F = m \cdot (g + a), \quad (1)$$

ahol a a test fölfelé mutató gyorsulása. Ha a test kezdősebessége nulla, akkor az általa megtett s út és az u sebesség közti összefüggés

$$s = \frac{u^2}{2a}, \quad (2)$$

a test Froude-száma pedig

$$f = \frac{u^2}{gR}. \quad (3)$$

A (1), (2) és (3) fölhasználásával kapjuk:

$$F = mg \cdot \left(1 + \frac{Rf}{2s}\right). \quad (4)$$

Ha ezek után egy ugyancsak ρ sűrűségű, de N -szer nagyobb sugarú másik gömb dinamikailag hasonló mozgását tekintjük, akkor a gömb R' sugara, m' tömege és az általa megtett s' út a lineáris méretek N -szeres skálázása miatt

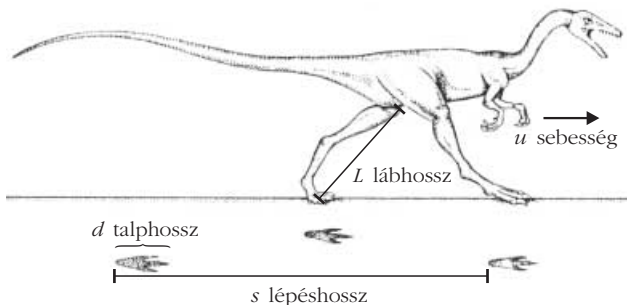
$$\begin{aligned} R' &= N \cdot R, \\ m' &= N^3 \cdot m, \\ s' &= N \cdot s \end{aligned} \quad (5)$$

lesz, az ehhez szükséges erő pedig

$$\begin{aligned} F' &= m' g \cdot \left(1 + \frac{R' f'}{2s'}\right) = N^3 m g \cdot \left(1 + \frac{NRf'}{2Ns}\right) = \\ &= N^3 m g \cdot \left(1 + \frac{Rf}{2s}\right) = N^3 F. \end{aligned} \quad (6)$$

Mivel a dinamikai hasonlóság miatt a két mozgás Froude-száma egyenlő: $f' = f$. Tehát ha a szóban forgó függőlegesen gyorsuló gömb és annak mozgása lineáris méreteit N -szeresére növeljük, akkor a két mozgás akkor lesz egymáshoz dinamikailag hasonló, ha a gyorsításhoz szükséges, fölfelé irányuló erő N^3 -szeresére nő. Annak idején Froude hasonló, bár ennél bonyolultabb számítással határozta meg, hogy mennyivel kell szorozni a hajómakettjein mért tolóerőket, hogy megkapja a valódi méretű hajók valós mozgásaihoz szükséges tolóerőket.

Visszatérve az állatokhoz, két állat mozgása csak akkor lehet dinamikailag hasonló, ha az m tömegű, u átlagsebességű és L hosszúságú lábaik $mu^2/2$ mozgási és $mgL/2$ helyzeti energiájának $u^2/(gL)$ hányadosa azonos, ami nem más, mint éppen az f Froude-szám. Ennek megfelelően két eltérő méretű állat mozgása akkor hasonló dinamikailag, ha a Froude-számuk



3. ábra. A tyúkméretű, kétlábon járó, ragadozó *Compsognathus* dinoszaurusz így járhatott a paleontológusok rekonstrukciói szerint ([4] 68. o. ábrája alapján).

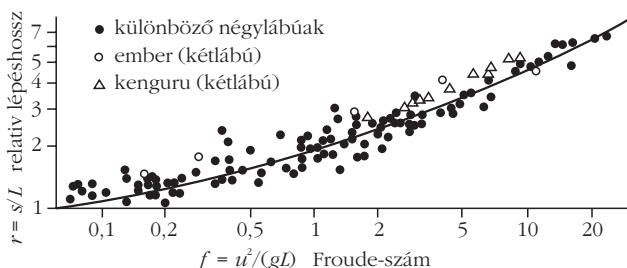
megegyezik. Alexander [2–4] vetette föl először, hogy a különböző méretű állatok járásmódja, mozgása dinamikailag közel hasonló, ha a mozgásuk Froude-számai azonosak. Teljes dinamikai hasonlóság azért nem teljesülhet, mert az eltérő méretű állatok általában alakjukban is különböznek egymástól. Teljes dinamikai hasonlóság csak szigorú geometriai hasonlóság esetén állhat fenn.

Állati mozgások dinamikai hasonlósága a Froude-szám tükrében

Alexander [2–4] elmélete szerint az egyforma Froude-számú, de különböző méretű állatok hasonló módon járnak vagy futnak. Például az $L_{\text{menyét}} = 9$ cm csípőmagasságú menyét $u_{\text{menyét}} = 1,5$ m/s sebességnél vált át ügetésből gyors futásba, mikor is a Froude-száma $f_{\text{menyét}} = 2,55$, míg az $L_{\text{orrszarvú}} = 1,2$ m csípőmagasságú orrszarvú $u_{\text{orrszarvú}} = 5,5$ m/s sebességnél vált poroszkálásból ügetésbe, mikor a Froude-száma $f_{\text{orrszarvú}} = 2,57$. Látható, hogy $f_{\text{menyét}} \approx f_{\text{orrszarvú}}$.

Az elmélet a lépéshosszra, azaz egyazon láb két egymást követő nyomának s távolságára is érvényes (3. ábra). Minél gyorsabban halad egy állat, annál hosszabbakat lép. A különböző méretű, de azonos Froude-számú állatok s lépéshossza és L lábhossza a dinamikai hasonlóság folytán hasonlóképpen aránylik egymáshoz. Ebből következően, ha az $r = s/L$ relatív lépéshosszat az f Froude-szám függvényében ábrázoljuk különféle két- és négylábú állat esetén, akkor mindig ugyanazt a függvényt kapjuk. Ezt szemlélteti a

4. ábra. A házimacsskánál nem kisebb méretű mozgó állatokon mért $r = s/L$ relatív lépéshossz az $f = u^2/(gL)$ Froude-szám függvényében, ahol s a lépéshossz, L a lábhossz, g pedig a földi gravitációs gyorsulás. A folytonos vonal a pontokra illesztett függvényt mutatja ([4] 68. o. ábrája alapján).



4. ábra, ahol az (r, f) paraméterpár számos állaton mért értékei vannak föltüntetve. Látható, hogy az (r, f) koordinátájú pontok halmaza jó közelítéssel ugyanazt az $r(f)$ függvényt követi.

Mindez azonban csak a házimacsskánál nem kisebb méretű állatokra érvényes, mivel a kisebb állatok (pl. az egerek, pockok és patkányok) sajátosan a földhöz lapulva mozognak. Érdekes módon azonban az elmélet érvényes mind a kétlábú, mind a négylábú állatok mozgására. Ez nem is olyan meglepő, ha meggondoljuk, hogy egy négylábú állat lényegében egy mellső és egy hátsó lábpárból és a kettőt összekötő vízszintes törzsből épül föl, amely végtagok megfelelően szinkronizálva, bizonyos fáziskéséssel, de ugyanúgy mozognak, legalábbis a szimmetrikus járásmódok esetében.

Dinoszauruszok sebességének rekonstrukciója a Froude-számtól függő relatív lépéshossz és a megkövült lábnyomok alapján

Az Alexander [2–4] által a ma élő két- és négylábú állatokon tapasztalatilag megállapított $r(f)$ függvény (4. ábra) lehetőséget ad arra, hogy megbecsülhető legyen a réges-régen kihalt dinoszauruszok mozgássebessége a megkövült lábnyomaik alapján. Igen sok dinoszaurusz-lábnyom maradt fenn fosszilizált iszaplenyomatok formájában (5. ábra) [1, 5]. E lábnyomok

5. ábra. Megkövült lábnyomok, amelyeket dinoszauruszok hagytak puha és nedves iszapban (<http://www.unb.br/ig/sigep/sitio026/sitio026english.htm>).



szerint járás közben a dinoszauruszok lába a testüket folyamatosan a magasban tartotta a ma élő emlősök-höz és madarakhoz hasonlóan, s nem úgy, mint a mai hüllőkénél, amelyek lába oldalra nyúlik ki, miáltal törzsük többnyire a földhöz ér. Föltételezve, hogy a mai emlősökre és madarakra megállapított $r(f)$ függvény (4. ábra) érvényes a hozzájuk hasonlóan járó dinoszauruszokra, az utóbbiak mozgássebessége a következő módon becsülhető meg: Alexander [2–4] ugyancsak empirikus úton jutott arra az összefüggésre, hogy az állatok lábának L hossza a talpnyomatuk d átmérőjének közel 4-szerese: $L \approx 4d$. A dinoszauruszok megkövült járásnyomából (5. ábra) egyértelműen meghatározható a lábnyomuk d átmérője és lépésük s hossza (4. ábra), innen pedig az $L \approx 4d$ összefüggésből az L lábhossz is. Az így adódó $r = s/L \approx s/(4d)$ relatív lépéshossz ismeretében az $r(f)$ függvény inverzéből megkapjuk az $f[r \approx s/(4d)] = u^2/(gL) \approx u^2/(4gd)$ Froude-számot, ahonnan végül az

$$u \approx \sqrt{4g \cdot d \cdot f \left(r \approx \frac{s}{4d} \right)} \quad (7)$$

becsült mozgássebességhez jutunk.

Alexander [2–4] ilyen rekonstrukciói szerint a nagytű dinoszauruszok meglehetősen lassan jártak, amikor lábnyomaikat az iszapban hagyták. A négy lábon járó hatalmas szauropodák összes ismert lábnyoma 1 m/s körüli mozgássebességre utal, ami az ember gyaloglás közbeni sebessége. A két lábon járó nagy dinoszauruszok mozgássebessége sem lehetett nagyobb, mint 2,2 m/s, ami az ember szaporázó járásának felel meg. A kistű dinoszauruszok viszont gyorsabban közlekedtek: a legnagyobb sebességet, 12 m/s-ot egy kétlábon járó dinoszaurusz hagyta az iszapban. Ez már gyorsabb mozgás, mint amit a legjobb gyorsfutó emberek el tudnak érni, akik 10 m/s maximális sebességre képesek.

A mozgássebesség megkövült iszaplábnyomok alapján rekonstruált értéke azonban alulbecsüli azt a legnagyobb sebességet, amelynek elérésére a dinoszauruszok képesek lehetnek. Ennek az az oka, hogy a nedves, puha, csuszamlós iszapban nyilván csak kisebb sebességgel közlekedhetnek az állatok, mint a kemény, nem csúszós szárazföldön. Ezért a dinoszauruszok nagyobb sebességű mozgásának vizsgálatához a Froude-számra és a fosszilizálódott lábnyomokra alapuló módszertől eltérő rekonstrukcióhoz kell folyamodni.

A dinoszauruszok mozgásának rekonstrukciója a fosszilis csontjaik erőindikátora alapján

Minél nagyobb sebességgel mozog egy állat, annál nagyobb erőt fejt ki lábával a talajra, ami annál nagyobb erővel hat vissza a lábra. A nagyobb sebesség eléréséhez tehát erősebb lábak szükségesek. A sebesség növekedésével a lábak a teljes lépésidő egyre kisebb részében érintik a talajt. A lépés kiegyensúlyozottsága és a testsúly megtartása érdekében ezen rövid idő alatt a lábaknak nagy erőt kell kifejteniük. Azt

a legnagyobb erőhatást, amely a lábnak a talajjal való érintkezése közben föllép, csúcserőhatásnak nevezik. Az emberi lábon mérhető csúcserőhatás például lassú járás közben megközelítőleg a testsúllyal egyenlő, vágtagzaskor azonban a testsúllynak akár 3,5-szerese is lehet. A gyors futás tehát erősebb csontozatot igényel.

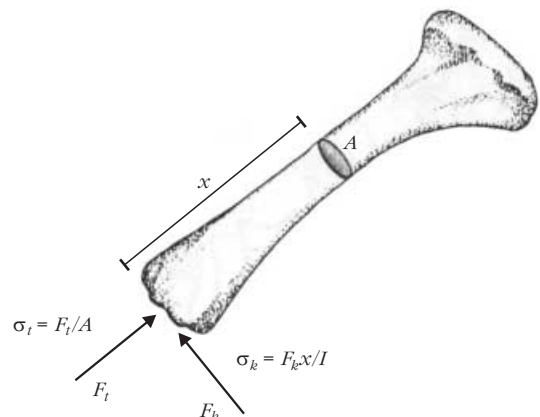
Alexander [2–4] különféle állatok (pl. kutya, birka, ember, kenguru) eltérő mozgásformája (pl. gyaloglás, futás, szökellés) esetén laboratóriumi kísérletekben (miközben az állatok a padlóba ágyazott nyomásérzékítő lemezen mozogtak) meghatározta a lábcsontokban ébredő erőket. A csont két végén, az ízületeknél föllépő erők mechanikai feszültséget keltenek a csontban. Ezen erők két összetevőre bonthatók: a csont hossz tengelyének irányában, a végektől a középpont felé mutató F_t tengelyirányú erőre és az erre merőleges, F_k keresztirányú erőre a 6. ábra szerinti módon. Az F_t erőkomponens a csont A keresztmetszetén $\sigma_t = F_t/A$ nyomófeszültséget hoz létre. Az F_k összetevő a csontvégtől x távolságban $\sigma_k = F_k \cdot x/I$ keresztirányú feszültséget kelt, ahol I a csont keresztmetszetének másodrendű nyomatéka, más néven felületi tehetetlenségi nyomatéka.

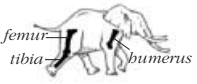

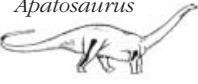
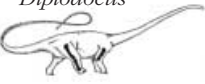


Túláságosan nagy mechanikai feszültségek hatására a csont eltörik, megped. Futó és ugró mozgás közben $\sigma_t \ll \sigma_k$. Tehát mozgás közben a keresztirányú erők a csontokra sokkal veszélyesebbek a tengelyirányúaknál. Ezért a további becslések során csak a σ_k feszültséggel számolunk. A különböző méretű, de dinamikailag hasonló módon futó állatok esetében a csontokra ható erők a G testsúllyal arányosak, hiszen az állat testsúlyát mozgás közben a csontoknak kell megtartaniuk. A szóban forgó x távolság nyilván nem lehet nagyobb, mint a csont L hossza. Tehát $\sigma_k \leq \sigma_k^* \sim aGL/I$, ahol az a tényező azt fejezi ki, hogy a testsúly hányad része jut az adott lábparra. Az

$$\varepsilon \approx \frac{1}{\sigma_k^*} = \frac{I}{aGL} \quad (8)$$

mennyiséget erőindikátornak nevezzük. Alexander [2–4] elmélete szerint, minél nagyobb egy állat csont-

6. ábra. A végétől x távolságra A keresztmetszetű csont végén mozgás közben ébredő erő F_t tengelyirányú és F_k keresztirányú összetevője ([4] 71. o. ábrája alapján)

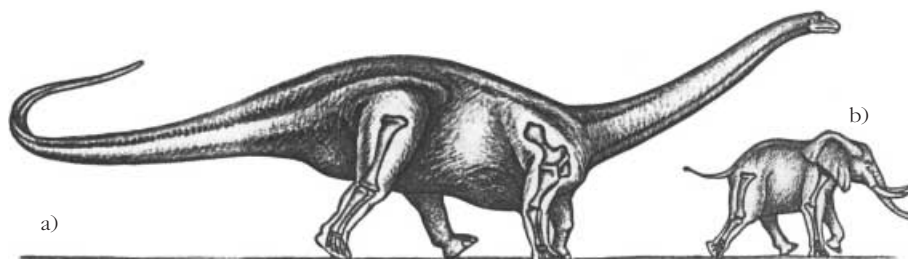


	<i>m</i> (tonna) testtömeg	ϵ erőindikátor		
		<i>femur</i>	<i>tibia</i>	<i>humerus</i>
afrikai elefánt 	2,5	7	9	11
kafferbivaly 	0,5	22	27	21
<i>Apatosaurus</i> 	34	9	6	14
<i>Diplodocus</i> 	12–19	3–5	?	?
<i>Triceratops</i> 	6–9	13–19	?	14–22
<i>Tyrannosaurus</i> 	7,5	9	?	?

7. ábra. Két ma élő nagytestű négylábú (afrikai elefánt és kafferbivaly) és néhány kihalt nagytestű négy-, illetve kétlábú dinoszaurusz *m* testtömege, valamint a *femur*, *tibia* és *humerus* lábcsontjainak ϵ erőindikátora. A rendelkezésre nem álló adatokat ? jelöli (Alexander, [4] 70. o. ábrája alapján).

jainak ϵ erőindikátora, annál mozgékonyabb az állat, vagyis annál nagyobb sebességekre képes, röviden, annál „atletikusabb” mozgású. Ez azzal magyarázható, hogy egy adott csont ϵ erőindikátora akkor nagy, ha az *I* felületi tehetetlenségi nyomatéka nagy és/vagy az *L* hossza kicsi és/vagy a viselendő *aG* súly kicsi. Márpedig egy csont annál jobban ellenáll a mozgás közbeni erőhatásoknak, minél nagyobb az *I*-je. Továbbá minél rövidebb egy csont és minél kisebb erőhatás éri (súly terheli), annál kevésbé hajlik meg. Az ilyen csontokkal rendelkező állatok ezért nagyobb sebességgel, dinamikusabban mozoghatnak, mert csontjaik még az ekkor föllépő nagyobb mechanikai terheléseket is törés nélkül tudják elviselni. Alexander [2–4] meghatározta számos ma élő állat hosszú lábcsontjainak ϵ erőindikátorát és vizsgálta a különféle mozgásformáikat is, és arra a következtetésre jutott, hogy a

8. ábra. A növényevő *Apatosaurus* (a) és az afrikai elefánt (b) lábcsontjai közel egyforma nagyságú ϵ erőindikátorral rendelkeznek, amely biomechanikai hasonlóság arra utal, hogy az *Apatosaurus* az elefánthoz hasonlóan mozoghatott ([4] 71. o. ábrája alapján).



hasonló erőindikátorú csontozattal bíró állatok hasonló mozgásformákra képesek. Ezek után meghatározta a dinoszauruszok fő lábcsontjainak erőindikátorát is. Néhány eredményt a 7. ábra mutat.

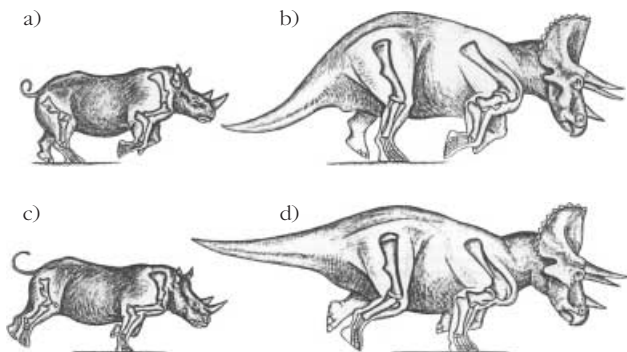
Mindezek alapján – föltéve, hogy a dinoszauruszok csontjai is ugyanakkora mechanikai feszültség elviselésére voltak képesek, mint a mai állatokéi – biomechanikailag alátámasztott becslések tehetők a dinoszauruszok mozgástípusairól. Ehhez persze még föl kell tételni, hogy az evolúció során a különféle állatok csontjaiba ugyanakkora biztonsági faktor épült be. A biztonsági faktor a csont összeroppantásához szükséges erő és a csont rendeltetésszerű használata során föllépő maximális erő hányadosa. A mérnöki gyakorlatban 2-nél nem kisebb biztonsági faktort szokás használni.

Alexander [2–4] megbecsülte különféle dinoszauruszfajokra az *a* paraméter értékét is, vagyis a testsúly mellső és hátsó lábpárok közti megoszlásának mértékét. Ehhez megint a korábban már említett műanyag dinomaketteket használta: a makettekbe a ma élő állatok anatómiája alapján becsült térfogatú tüdő helyén eltávolította a műanyagot (mialtal a helyét levegő töltötte ki), majd cérnára való fölfüggesztésekkel³ meghatározta az így preparált makettek tömegközéppontjának helyét, aminek ismeretében arányos osztással megkapta az *a* paraméter értékét.

Ilyen vizsgálatokkal derült fény például arra, hogy a hatalmas testű növényevő *Apatosaurus* lábcsontjainak $\epsilon_{\text{Apatosaurus}}$ = 6–14 erőindikátora közel esik a jóval kisebb afrikai elefánt lábcsontjainak $\epsilon_{\text{elefánt}}$ = 7–11 erőindikátorához. Következésképpen, a nagyobb testméret ellenére is az *Apatosaurus* mozgékonyasága az elefántéhoz lehetett hasonló (8. ábra). Az elefánt lassú futásra még képes, de vágtni vagy ugrani már nem tud. Valószínűleg ugyanez volt a helyzet az *Apatosaurus* esetében is. Ahhoz, hogy az elefántnál hosszabb lábú *Apatosaurus* mozgása egy 5 m/s sebességgel haladó elefántéval azonos Froude-számú legyen, az *Apatosaurus*-nak 7 m/s-mal kellett volna haladnia.

Az is kiderült, hogy habár a *Diplodocus* száuropoda nem lehetett túl mozgékony állat, mégsem szorult rá a víz fölhajtóerejére, és képes lehetett a szárazföldön is közlekedni, de futni valószínűleg már nem tudott. A *Triceratops* erőindikátor-értékei az elefántéi és a nála is mozgékonyabb kafferbivalyéi közé esnek, ezért a *Triceratops* mozgékonyabb lehetett az elefántnál, valószínűleg képes volt vágtni is, akár a kafferbivaly vagy az orrszarvú (9. ábra). A két lábon járó *Tyrannosaurus* combcsontjának

³ Ha egy makettet két különböző felületi pontjában (például az orránál és a hátánál fogva) cérnára függesztjük és lefénképezzük, akkor a földi nehézségi térben függőleges cérnaszálak egyenesének metszéspontja megadja a tömegközéppont helyét.



9. ábra. A *Triceratops* (b, d) hasonlóan mozoghatott a ma élő fehér orrszarvúhoz (a, c), mivel mindkét négylábú lábcsonthajának közel egyforma az ϵ erőindikátora. Az ábrán az orrszarvú 7 m/s sebességgel üget. A *Triceratops*nak 9 m/s sebességgel kellett volna ügetnie ahhoz, hogy a Froude-száma megegyezzen a 7 m/s-mal ügető orrszarvúéval (l4) 72. o. ábrája alapján).

(*femur*) ϵ erőindikátora kicsi volt, körülbelül az elefánténak felelt meg (7. ábra), következésképpen csak olyan lassan és úgy mozoghatott, mint az elefánt.

Habár a dinoszauruszok mozgásának és mozgékonyágának fönt vázolt paleo-biomechanikai rekonstrukciója becsles jelleget, azt mégis világossá teszi, hogy a dinoszauruszok általában lassan közlekedtek, de néhányuk meglehetősen gyorsan is tudott futni, és egyiküknek sem volt szüksége arra, hogy kihasználja a víz fölhajtóerejét. A dinoszauruszok megkövült lábnyomai-ból úgy tűnik, hogy ha mi emberek már éltünk volna a dinoszauruszok korában, és ha lett volna hozzá bátorságunk, akkor akár sétálgathattunk is volna a mozgó *Apatosaurus*ok vagy *Tyrannosaurus*ok mellett, minden nehézség nélkül lépést is tarthattunk volna velük, sőt futva könnyen el is tudtunk volna menekülni előlük, mivel e nagytetű őshüllők legföljebb csak olyan mozgékonyak lehettek, mint az afrikai elefántok.

A *Jurassic park* című, dinoszauruszokról szóló filmtrilógia paleo-biomechanikai elemzése

Steven Spielberg⁴ *Jurassic park* című híres tudományos fantasztikus filmtrilógiájában számos dinoszaurusz mozgásának számítógépes animációja és szimulációja is látható. E filmekben talán a legizgalmasabbak azok a jelenetek, mikor a főhősöket egy *Tyrannosaurus rex* üldözi. A film szerint a *Tyrannosaurus* még arra is képes, hogy üldözzön és utolérjen egy gyorsuló terepjárót vagy egy viszonylag gyorsan haladó nagyvárosi buszt, arról nem is beszélve, hogy simán el tudja kapni az előle futva menekülő embereket (10.a ábra). Az ebben a fejezetben tárgyalt paleo-biomechanikai tények és rekonstrukciók alapján azonban nyilvánvaló a mozgó *Tyrannosaurus* ilyen ábrázolásának pontatlansága: a *Tyrannosaurus* nemhogy egy nagy sebességű buszt vagy terepjárót nem lett volna képes utolérni, de még az ember is könnyen el tudott volna futni előle. Ha

viszont a filmben így ábrázolták volna e nagytetű, vérengző ragadozó őshüllőket, nyilván nem lett volna a film olyan borzongató.

Hasonlóan hibás például a *Jurassic park II.* azon jelenete is, mikor egy, a kölykét féltő feldühödött *Apatosaurus* utolér egy előle futó embert, aki csak egy korhadt, kidőlt fatörzsbe bújva lel menedéket. Ugyancsak hibás például a *Jurassic park III.* film azon jelenete, amelyben egy *Spinosaurus* egy előle menekülő embercsoportot üldöz (10.b ábra). Az *Apatosaurus* és a *Spinosaurus* a *Tyrannosaurus*hoz hasonlóan nem volt képes még olyan gyorsan sem futni, mint egy rohanó ember.

Habár a *Jurassic park* filmekbeli dinoszauruszok mozgásának tudományos hűsége kívánivalót hagy maga után, ezt részben kompenzálhatja, hogy e dinoszauruszok számítógépes szimulátorai jónéhány tudományos, részben mozgásmechanikai tényt is fölhasználtak, amelyek zömét Alexander és kollégái tárták föl.

Irodalom

1. Mossman, D. J., Sarjeant, W. A. S.: The footprints of extinct animals. *Scientific American* 248/1 (1983) 64–74.
2. Alexander, R. M.: *Dynamics of Dinosaurs and Other Extinct Giants*. Columbia University Press, 1989.
3. Alexander, R. M.: How dinosaurs ran? *Scientific American* 254/4 (1991) 62–68.
4. Alexander, R. M.: Mozgékony dinoszauruszok. *Tudomány* 1991 június (1991) 66–72.
5. Thulborn, T.: *Dinosaur Tracks*. Chapman and Hall, 1990.
6. Horváth G.: *A mechanika biológiai alkalmazása: biomechanika*. (3., bővített kiadás) Egyetemi tankönyv, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2009.

10. ábra. Steven Spielberg *Jurassic park I.*, illetve *Jurassic park III.* című filmjének egy-egy képe, amelyen egy *Tyrannosaurus* a) illetve *Spinosaurus* b) üldöz embereket (http://www.solarnavigator.net/films_movies_actors/steven_spielberg.htm)



⁴ Steven Spielberg (1946–) amerikai filmrendező. Ő volt a *Jurassic park I, II, III* című filmek rendezője, illetve producere 1993, 1997, illetve 2001-ben.