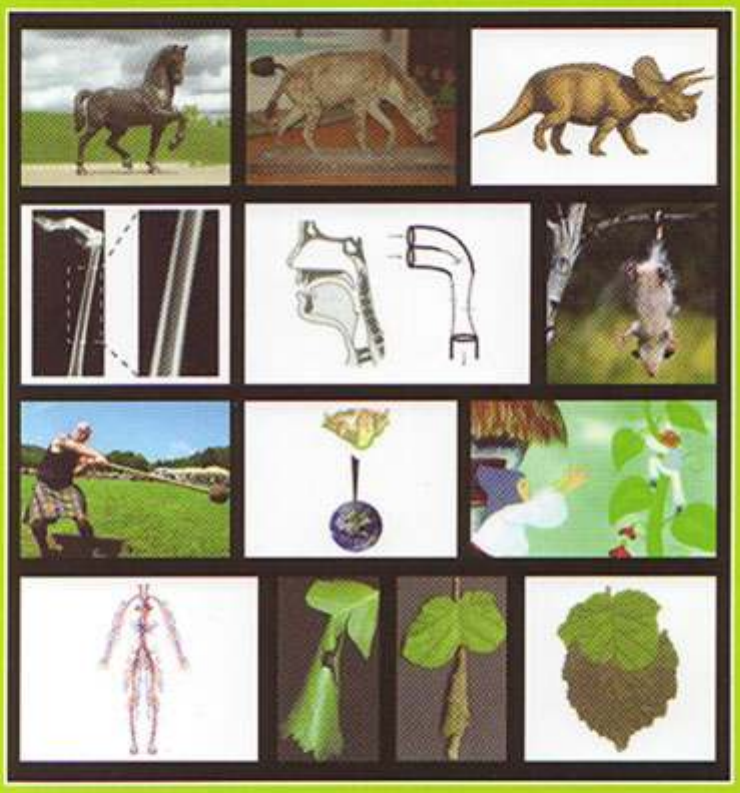
Horváth Gábor

Biomechanika



ELTE EÖTVÖS KIADÓ

Horváth Gábor

Biomechanika

E fizikusoknak, biológusoknak, mérnököknek, orvosoknak, fizika- és biológiatanároknak ajánlott könyvben megismerkedhet az olvasó a biológiai rendszerekben felmerülő néhány mechanikai problémával és azok megoldásaival. Szó esik a négylábú állatok járásmechanikájáról, az optimális lépéssorrendről és a lójárás biomechanikailag hibás képzőművészeti ábrázolásairól. Górcső alá vesszük a múzeumok kitömött emlősállatait, az állatanatómia-tankönyvek négylábú állatillusztrációit és a játék állatfigurákat, s elemezzük azok járásábrázolási hibáit. Megmutatjuk, miként lehet rekonstruálni a dinoszauruszok mozgássebességét és mozgásmódját a megkövült lábnyomaik, valamint a fosszilis csontjaik vizsgálata alapján. Fény derül arra, hogy mekkora falvastagságúnak kell lenniük a gerincesek csöves csontjainak ahhoz, hogy minél kevesebb anyagfelhasználással minél jobban ellenálljanak a mechanikai igénybevételeknek, s hogy miként lehet mérni a falvastagságukat a róluk készült röntgenfelvételek számítógépes kiértékelésével. Megadjuk az emberi horkolás biomechanikai okait, s megmutatjuk, miként küszöbölhető ki az erős horkolás. Vizsgáljuk a csavarvonalban való föltekeredés biomechanikáját a faágakba kapaszkodó szőlőkacsok és állati farkak példáján. Meghatározzuk azon minimális tömegű űrkábel alakját, mely a földi Egyenlítő fölött nagy magasságban húzódó geostacionárius pályán keringő űrállomást köti össze a földfelszínnel, s rámutatunk, hogy mechanikailag hasonló probléma a mesebeli égig érő paszuly alakjának meghatározása. Meghatározzuk, hogy a súlylökésben és a kalapácsvetésben elérhető dobótávot miként módosítja a Föld forgása és más fizikai, meteorológiai tényezők. Megismerjük a lehető legkevesebb anyagfelhasználású olyan véredények optimális vastagságát és elágazási szögét, melyekben a vér a lehető legkisebb súrlódással áramlik. Végül megtudjuk, hogy miként képes az apró nyírfalevélsodró bogár a hozzá képest nagy, merev levéllemezből szinte tökéletes kúp alakú levélsodratot készíteni a lárvái számára. Levezetésre kerül a bogár által vágott, kettősen görbült szabásvonal biomechanikailag optimális alakja, amely megkönnyíti a levél összegöngyölését, s megnehezíti a sodrat kipödrődését.

4 200 Ft

ISBN 978-963-284-252-9

9 789632 840529 >

Írta: **Dr. habil. Horváth Gábor**
(egyetemi docens, az MTA doktora, ELTE TTK Fizikai Intézet)

Lektorálták: **Dr. Radnai Gyula**
(nyugalmazott egyetemi docens, ELTE TTK Fizikai Intézet)
Dr. Zboray Géza
(nyugalmazott egyetemi adjunktus, ELTE TTK Biológiai Intézet)
Dr. Gnädig Péter
(egyetemi docens, ELTE TTK Fizikai intézet)

Az ábrákat készítette: **Dr. Horváth Gábor**

© Horváth Gábor, 2009

Harmadik, átdolgozott kiadás

ISBN 978 963 284 052 9

ELTE EÖTVÖS KIADÓ www.eotvoskiado.hu

Felelős kiadó: Hunyady András, ügyvezető igazgató
Felelős szerkesztő: Pordány Katalin

Nyomdai előkészítés: Scriptor Kft.
Nyomdai munkák: Multiszolg Bt.

Tartalom

Előszó 7

1. A négylábú mozgás biomechanikája 13
- 1.1. Bevezetés 15
- 1.2. Merev testek egyensúlya és állásszilárdsága 16
- 1.3. Az állatok végtagszámának evolúciója 17
- 1.4. A négylábúak osztályozása a tömegközéppont helye szerint 19
- 1.5. A szarvasmarhák lefekvése és fölkelése 20
- 1.6. A négylábúak lassú járásának optimális lépéssorrendje 22
- 1.7. A lassú járás gyorsítása 27
- 1.8. Gyorsabb mozgástípusok 28
- 1.9. A testfölépítés hatása a járásra 33
- 1.10. Művészi ló- és teveábrázolások hibákkal 37
- 1.11. A mozgófilmezés kezdeti története és a lovak járása 41
- 1.12. A szimmetrikus mozgásmódok leírása, összehasonlítása és értelmezése 46
- 1.13. A szimmetrikus mozgásmódok evolúciója és egyedfejlődése 53
- 1.14. Az aszimmetrikus mozgásmódok leírása, összehasonlítása és értelmezése 55

2. Négylábú járásábrázolások biomechanikai elemzése 63
- 2.1. Bevezetés 65
- 2.2. A négylábúak járásmátrixa 66
- 2.3. Négylábú járásábrázolások gyűjtése 70
- 2.4. Négylábú járásábrázolások elemzése és statisztikája 72
- 2.5. Összefoglalás 91

3. Hogyan mozoghattak a dinoszauruszok? 93
- 3.1. Bevezetés 95
- 3.2. A dinoszauruszok tömegének becslése 95
- 3.3. A testméret és a csontok terhelhetőségének skálázása 96
- 3.4. A dinamikai hasonlóság és a Froude-féle szám 97
- 3.5. Állati mozgások dinamikai hasonlósága a Froude-szám tükrében 99
- 3.6. A dinoszauruszok sebességének rekonstrukciója a Froude-számtól függő relatív lépéshossz és a megkövült lábnyomok alapján 101
- 3.7. A dinoszauruszok mozgásának rekonstrukciója a fosszilis csontjaik erőindikátora alapján 102
- 3.8. Steven Spielberg „Jurassic park" című, dinoszauruszokról szóló filmtrilógiájának paleo-biomechanikai hibái 107

4. Hosszú csöves végtagcsontok optimális szerkezete 109
- 4.1. Bevezetés 111
- 4.2. Csontok hajlítási igénybevétele 112
- 4.3. Csöves csontok csavarási igénybevétele 116
- 4.4. Hosszú csöves csontok falvastagság-optimalizációjának egyik módja 117
- 4.5. A madarak légtartalmú csöves végtagcsontjai 120
- 4.6. Fokozatosan elvékonyodó csontok 121
- 4.7. Adott irányban nagy hajlítási szilárdságú csontok 123
- 4.8. A csontfalvastagság optimalizációjának további útjai 125
- 4.9. Hosszú csöves csontok optimális szerkezetének kísérleti vizsgálata 128
  - 4.9.1. Csöves csontok röntgenfelvételei 130
  - 4.9.2. A relatív falvastagság meghatározása számítógépes képfeldolgozással 130
  - 4.9.3. A biomechanikai optimum vizsgálata állati és emberi végtagcsontokon 134

5. A horkolás biomechanikája 149
- 5.1. Bevezetés 151
- 5.2. A horkolásról röviden 153
- 5.3. A horkolás klinikai vizsgálata és két fő típusa 155
- 5.4. A szájpadi horkolás biomechanikai modellje 158
- 5.5. A garati horkolás biomechanikai modellje 161

6. A csavarvonalban föltekeredve kapaszkodás biomechanikája 165

7. Az űrlift kábelének és a mesebeli égig érő paszuly alakjának optimalizációja ... 175
7.1. Az űrlift futurista víziója ... 177
7.2. A mesebeli égig érő paszuly ... 179
7.3. A geostacionárius keringési pálya Egyenlítő fölötti magassága ... 181
7.4. A minimális tömegű terheletlen űrkábel és égig érő paszuly alakja ... 182
7.5. Az ellensúllyal kifeszített terheletlen űrkábel ... 188
7.6. Az űrkábel és az égig érő paszuly terhelhetősége ... 190
7.7. Függelék: Az égig érő paszuly meséje ... 193

8. Dobósportok a forgó Földön ... 195
8.1. Bevezetés ... 197
8.2. Mozgás gyorsuló koordináta-rendszerekben ... 199
8.3. A Föld mint gyorsuló koordináta-rendszer ... 201
8.4. Testek közegellenállás nélküli ferde hajításának kinematikája ... 202
8.4.1. A röppálya ... 202
8.4.2. A maximális dobótáv és a vízszintestől mért optimális dobási szög ... 203
8.5. A Föld forgásából eredő centrifugális erő hatása a dobósportokban ... 207
8.6. A Föld forgása miatt ébredő Coriolis-erő hatása a dobósportokban ... 211
8.7. A fizikai becslések összefoglalása ... 216
8.8. A földforgás befolyása a céllövészetben ... 218
8.9. A súlylökés és kalapácsvetés világranglistáinak alakulása az idő függvényében ... 225
8.10. A földforgás dobótávra kifejtett hatásának számítógépes vizsgálata ... 227
8.10.1. A dobótávot befolyásoló környezeti tényezők ... 227
8.10.2. A súlylökés és a kalapácsvetés számítógépes modellje ... 232
8.10.3. A számítógépes modellezés eredményei ... 235
8.10.4. Hogyan lehetne a jövőben tekintettel lenni a Föld forgására a dobósportokban? ... 250
8.11. A Föld-forgás dobótávokra kifejtett esetleges hatásának statisztikai vizsgálata ... 259
8.12. Összefoglalás ... 266

9. Erek és érelágazások áramlási optimalizációja ... 269
9.1. Bevezetés ... 271
9.2. Folyadékok belső súrlódása ... 271
9.3. Folyadékok csövekbeli réteges áramlása ... 274
9.4. Az áramlás szempontjából optimális érátmérő ... 277
9.5. Az áramlási szempontból optimális érelágazás ... 278
9.6. Áramlási szempontból optimális állati és növényi keringési rendszerek: ér-, légcső- és szállítóedény-hálózatok ... 285
9.7. Turbulens áramlás vérerekben, légcsövekben és szállítóedényekben ... 286
9.8. Függelék: az érelágazás optimalizációjának egy elterjedt, de helytelen megoldása ... 287

10. A nyírfalevélsodrás biomechanikája ... 291
10.1. Bevezetés ... 293
10.2. Az eszelények (Attelabidae) életmódja ... 295
10.2.1. Bordafúró eszelény ... 296
10.2.2. Selymes vagy kakukk eszelény ... 297
10.2.3. Levélsodró eszelények (Rhynchitidae) ... 297
10.3. A nyírfalevélsodró viselkedése, fejlődése, ivadékgondozása és sodrástechnikája ... 304
10.3.1. A nyírfalevélsodró sodrástechnikában fontos morfológiai sajátságai ... 305
10.3.2. A nyírfalevélsodró táplálkozása, tápnövényei és az ivadékbölcső építőanyaga ... 306
10.3.3. Az időjárás levélsodrásra kifejtett mechanikai hatásai ... 307
10.3.4. A nyírfalevélsodró tájékozódása szaglás alapján ... 308
10.3.5. A nyírfalevélsodró nőstény ivadékgondozása ... 308
10.3.6. A nyírfalevélsodró lárváinak fejlődése ... 326
10.4. A nyírfalevélsodró szabásvonalainak alakját és sodrástechnikáját magyarázó korábbi elméletek ... 327
10.4.1. Debey és Heis evolúta-evolvens elmélete ... 329
10.4.2. Buck elmélete ... 332
10.4.3. Rosskothen elmélete ... 333
10.4.4. A legkisebb munkavégzés elvének alkalmazása a levélsodrásra ... 336
10.5. A nyírfalevélsodró szabásvonalainak alakját biomechanikailag magyarázó elmélet ... 349
10.5.1. Az 1. szabásvonal alakjának származtatása ... 350
10.5.2. A 2. szabásvonal alakjának származtatása ... 356
10.5.3. A nyírfalevélsodró szabásvonalainak alakját magyarázó biomechanikai elmélet eredményeinek összefoglalása ... 360
Irodalom ... 363

Előszó

Ezen egyetemi tankönyvben az érdeklődő olvasót bevezetem a biomechanika néhány válogatott fejezetébe. A biomechanika fogalomkörébe olyan biológiai jelenségek tartoznak, melyeknek van valamilyen mechanikai vonatkozása. Számos mechanikai törvényszerűség bukkan föl a biológiai rendszerek makroszkopikus és mikroszkopikus szintjén egyaránt. A biomechanika széles spektrumából csak tíz keskeny sávot választottam makroszkopikus, fenomenologikus szinten. E könyv az ELTE Eötvös Kiadó gondozásában 2001-ben, majd változatlan kiadásban 2004-ben újra megjelent, „*A mechanika biológiai alkalmazása: biomechanika*" című egyetemi tankönyvemre épül, annak jelentős bővítésével: öt teljesen új (2., 3., 5., 6., 7.) fejezetet iktattam be, és a többit is többé-kevésbé bővítettem, frissítettem. E bővítés eredményeként a korábbi 262 oldal 368-ra nőtt.

1. „*A NÉGYLÁBÚ MOZGÁS BIOMECHANIKÁJA – A négylábú állatok optimális lépéssorrendje, avagy a lójárás hibás képzőművészeti ábrázolásai*" című fejezetben, miután röviden fölelevenítjük a merev testek egyensúlyának alapvető fizikai törvényszerűségeit, a négylábú állatok (főleg az emlősök) lassú és gyors mozgásmódjaival foglalkozunk. Magyarázatot keresünk arra a meglepő szabályszerűségre, hogy habár a négylábúak számos csoportba sorolhatóak jelentős testi jegyekbeli eltérésekkel, a leglassúbb járásuk lépéssorrendje mégis mindannyiuknál azonos. A képzőművészetből vett néhány tipikus példán keresztül a lójárás hibás ábrázolásait elemezzük és javítjuk ki. Röviden szólunk a mozgófilmezés kezdeti történetének és a lójárás vizsgálatának szoros kapcsolatáról is. Végül tárgyaljuk a négylábúak gyorsabb mozgástípusait.

2. A „*NÉGYLÁBÚ JÁRÁSÁBRÁZOLÁSOK ELEMZÉSE – Múzeumi kitömött állatok, állatanatómiai tankönyv-illusztrációk és játékállat-figurák járásának hibás ábrázolásai*" című fejezetben górcső alá vesszük a múzeumok kitömött emlősállatait, az állatanatómia-tankönyvek négylábú állatillusztrációit és a kereskedelmi forgalomban kapható játékállat-figurákat, s részletesen elemezzük azok járásábrázolásait. Háromszáznál is több esetet tanulmányozva számszerűsítjük, hogy e járásábrázolások mekkora hányada helyes, valósághű, s hány százaléka helytelen, a valóságtól elrugaszkodott. Arra a meglepő eredményre jutottunk, hogy Muybridge (1887) *Animal Locomotion* című művének megjelenése óta eltelt 120-nál is több év sem volt elegendő ahhoz, hogy a négylábúak tudományos igényű járásábrázolásai manapság már hibátlanok legyenek. Majdnem 50% annak a valószínűsége, hogy jártunkban-keltünkben helytelen, nem valósághű négylábú járásábrázolással találkozunk például a múzeumokban, játékboltokban vagy állatanatómiai tankönyvekben.

3. A „*HOGYAN MOZOGHATTAK A DINOSZAURUSZOK? – Ősállatok mozgásának paleo-biomechanikai rekonstrukciója*" című fejezetben azt taglaljuk, hogy miként mozoghattak a szárazföldi ősállatok, mint például a dinoszauruszok. Mivel ezen ősállatok már régen kihaltak, mozgásukat csak a csontmaradványaik és nyomfosszíliáik alapján lehet többé-kevésbé rekonstruálni a ma élő állatok csontjainak és mozgásának vizsgálatával, a biomechanika törvényeinek alkalmazásával. Miután röviden szólunk a dinoszauruszok tömegének becsléséről, az állatok testméretének és csontjaik terhelhetőségének skálázásával, majd a dinamikai hasonlósággal és a Froude-féle számmal foglalkozunk. Vizsgáljuk az állati mozgások dinamikai hasonlóságát a Froude-szám tükrében. Utána azt tárgyaljuk, hogy miként lehet rekonstruálni a dinoszauruszok sebességét a Froude-számtól függő relatív lépéshosszuk és a megkövült lábnyomaik alapján. Azt is megmutatjuk, hogy miként rekonstruálható a dinoszauruszok mozgása a fosszilis csontjaik erőindikátorának mérésével. Végül Steven Spielberg *Jurassic park* című, dinoszauruszokról szóló filmtrilógiájának paleo-biomechanikai hibáit kritizáljuk. E vizsgálatokkal megbecsülhető például, hogy a négylábú növényevő *Triceratops* vágtázhatott-e, vagy csak cammoghatott, és hogy a kétlábú ragadozó *Tyrannosaurus* tényleg képes lett volna-e utolérni egy menekülő embert, ahogyan az a filmben látható.

4. A „*HOSSZÚ CSÖVES VÉGTAGCSONTOK OPTIMÁLIS SZERKEZETE – Mekkora az optimálisan könnyű és teherbíró csöves csont relatív falvastagsága?*" című fejezetben azt vizsgáljuk, hogy mekkora falvastagságúnak kell lenniük a gerinces állatok végtagjainak vázát képező hosszú csöves csontoknak ahhoz, hogy minél kevesebb anyagfelhasználással minél jobban ellenálljanak a különféle mechanikai igénybevételeknek. Hogy e kérdésre választ kaphassunk, megismerkedünk először a csontok hajlítási és csavarási deformációinak főbb mechanikai törvényszerűségeivel. Ezt követően felírjuk azokat a függvényeket, amelyek minimumának meghatározásával megkapjuk az optimálisan könnyű és teherbíró csöves csont relatív falvastagságát. Suhai Bencével együtt kifejlesztettünk egy olyan képfeldolgozási eljárást, melynek segítségével a csöves csontokról készült röntgenfelvételek számítógépes kiértékelésével roncsolásmentesen mérhető a csontok relatív falvastagsága. Rókák, varjak, szarkák és emberi múmiák végtagcsontjainak kísérleti vizsgálatával ellenőriztük, hogy mennyire teljesülnek az elméleti, csontmechanikai jóslatok.

5. „*A HORKOLÁS BIOMECHANIKÁJA – Miért és hogyan horkolunk, s miként küszöbölhető ki az erős horkolás?*" című fejezetben az emberi horkolás hátterében húzódó felső légút fölépítését tekintjük át, majd két egyszerű biomechanikai modellel rávilágítunk a felső légútban horkoláskor lezajló aerodinamikai folyamatokra. E modellek alapján az is megérthető, hogy a horkolás mely fajtája és miként küszöbölhető ki, illetve csökkenthető sebészetileg.

6. „*A CSAVARVONALBAN FÖLTEKEREDVE KAPASZKODÁS BIOMECHANIKÁJA – Hogyan fogódzik az oposszum a farkával a faágba?*" című fejezetben azt határozzuk meg, hogy mekkora súrlódási erő lép föl a szőlő és más kúszónövények csavarvonalban kapaszkodó kacsai, a fákon élő kuszkuszok, farksodrók és oposszumok csavarvonalban föltekeredő farka, a fákra kúszó kígyók teste, valamint a munkára fogott elefántok ormánya és a faágak között a kacs, farok, kígyótest, illetve ormány föltekeredési szöge függvényében. Mivel e súrlódási erő exponenciálisan nő a föltekeredési szöggel, ezért a szóban forgó kacsoknak, farkaknak, kígyótesteknek és ormányoknak az elegendően erős megkapaszkodáshoz nem kell túl sokszor körbetekeredniük a faágon. E súrlódási erő például még az oposszum és farksodró teljes súlyát is képes megtartani. Ugyanezen mechanikai jelenség a varrásban is fontos, mert ez biztosítja, hogy az összevarrt szövetrészekből ne húzódhasson ki a cérna: mivel varráskor az öltések száma igen nagy, ezért az öltésszámmal exponenciálisan növekvő súrlódási erő olyan hatalmas, hogy nem lehet kihúzni a cérnát a szövetből valamelyikük elszakadása nélkül.

7. „*AZ ŰRLIFT KÁBELÉNEK ÉS A MESEBELI ÉGIG ÉRŐ PASZULY ALAKJÁNAK OPTIMALIZÁCIÓJA*" című fejezetben azzal foglalkozunk, hogy milyen alakúnak kell lennie azon minimális tömegű űrkábelnek, amely Ciolkovszkij eredeti elképzelése szerint a Föld Egyenlítője fölött közel 36 000 km magasságban húzódó geostacionárius körpályán keringő „égi kastélyt", mai szóhasználattal űrállomást köt össze az Egyenlítővel. Mechanikailag teljesen hasonló probléma a mesebeli égig érő paszuly alakjának meghatározása. Először levezetjük a geostacionárius keringési pálya Egyenlítő fölötti magasságát, majd a minimális tömegű terheletlen űrkábel és égig érő paszuly alakját. Utána az ellensúllyal kifeszített terheletlen űrkábel formájával foglalkozunk, végül pedig az űrkábel és az égig érő paszuly terhelhetőségével. Habár a vizsgált probléma ezoterikusnak és futurista víziónak tűnhet, az űrkutatásban és modern anyagtudományban komolyan foglalkoznak az űrlift-kábel megvalósíthatósági terveivel.

8. A „*DOBÓSPORTOK A FORGÓ FÖLDÖN – Hogyan befolyásolja a dobótávot a centrifugális és a Coriolis-erő, valamint egyéb fizikai és meteorológiai tényezők?*" című fejezetben megmutatjuk, hogy a dobósportok eredményeinek hitelesítése során figyelembe kellene venni a Föld forgásából eredő Coriolis- és centrifugális erők, valamint néhány más fizikai és meteorológiai tényező hatását. Elemi fizikai számításokra épülő becslésekkel is bizonyítjuk, hogy a Coriolis- és centrifugális erők legalább egy nagyságrenddel nagyobb mértékben befolyásolják a súlylökésben és kalapácsvetésben elérhető dobótávokat, mint azok mérési pontossága. Meghatározzuk azon földrajzi szélességeket és irányokat, melyeknél a Coriolis- és a centrifugális erő segít a dobónak, illetve amikor hátráltatja őt. Vizsgálataink eredményei alapján javaslatot teszünk azon szabályokra, melyekre a jövőben tekintettel kellene

lenni a dobósportversenyek lebonyolítása során. Részletesen tárgyalunk egy számítógépes programot is, amelyet Mizera Ferenccel együtt abból a célból fejlesztettünk ki, hogy a súlylökésben és a kalapácsvetésben elérhető sportteljesítményeket módosító minden lényeges fizikai befolyásoló tényező figyelembevételével lehessen numerikusan meghatározni a dobótávot. Vizsgáljuk a szél, a légellenállás, a légnyomás, a léghőmérséklet, a tengerszint fölötti magasság, a földrajzi szélesség, a dobásirány és a pályalejtés dobótávra kifejtett hatásait. Olyan hajítási korrekciós térképeket határozunk meg, amelyek segítségével különböző földrajzi szélességeken, eltérő irányokban végzett dobások eredményeit lehet korrekten összehasonlítani úgy, hogy a dobótávokat a Föld forgása miatti megfelelő korrekciós járulékkal módosítjuk.

9. Az „*ERECK ÉS ÉRELÁGAZÁSOK ÁRAMLÁSI OPTIMALIZÁCIÓJA – Milyenek az áramlási szempontból optimális véredényrendszerek?*" című fejezetben abból a feltevésből indulunk ki, hogy az evolúció során azok a vérkeringési rendszerek élvezhettek előnyt s maradhattak fenn, amelyekben egyrészt a test igényeit kielégítő véráramlás fenntartásához a lehető legkisebb mechanikai teljesítményű szívre volt szükség, másrészről pedig a keringési rendszernek az egyedfejlődés során történő kifejlesztése a lehető legkisebb metabolikus energia felhasználását igényelte. Ezen elv alkalmazásával – a folyadékok belső súrlódására vonatkozó Newton-féle súrlódási törvény és a folyadékok csövekbeli réteges áramlását jellemző Hagen–Poiseuille-féle törvény ismeretében – meghatározzuk az erek optimális vastagságát és optimális elágazási szögét. Arról is szólunk, hogy miként ellenőrizhetők kísérletileg ezen elméleti jóslatok. A fejezetben tárgyalt eredmények az állat- és növényfiziológiában általános érvényűek, amennyiben nemcsak az állati véredényrendszerekre, hanem az állati légcsőrendszerekre és talán a növényi szállítóedény-hálózatokra is kiterjeszthetőek.

10. „*A NYÍRFA LEVÉLSODRÁS BIOMECHANIKÁJA – Hogyan képes az apró nyírfalevélsodró bogár (Deporaus betulae) szabályos levéltölcsért sodorni egy nagy levélből?*" című fejezetben először vázlatosan áttekintjük a növényevő ormányosbogarak, az eszelények életmódját. E bogarak petéik lerakásakor megszakítják, vagy csökkentik a kiválasztott növény, illetve növényrész nedvkeringését, így készítvén azt elő a peterakáshoz. Ezután az eszelények közé tartozó levélsodró ormányosbogarakról szólunk röviden. Ezek hasonlóan járnak el, de a levelekből különféle sodratokat hoznak létre, s azokba rakják petéiket, ahol azután a kikelt lárvák védelmet találnak, s ahol a kedvező mikroklíma és a megfelelően előkészített táplálék is rendelkezésükre áll. Számos levélsodró faj a sodrás előtt fajspecifikus vonalak mentén bevágja a levéllemezt. A legösszetettebb szabásvonallal és a legbonyolultabb sodrástechnikával a nyírfalevélsodró (*Deporaus betulae*) dolgozik, aminek eredményeként egy szinte tökéletes kúp alakú levéltölcsér alakul ki. E teljesítményével a nyírfalevélsodró valódi kis „biomatematikus"

és „biomechanikus" a levélsodrók között, de méltán nevezhetnénk a „levélorigami mesterének" is. Elgondolkoztató, hogy ez az apró bogár vajon miként tudja a hozzá képest nagy, merev levéllemezt úgy összesodorni, hogy az ne nyíljon szét. A nyírfalevélsodró fejlődésének, viselkedésének és ivadékgondozásának részletes ismertetése után választ kapunk erre a kérdésre is. A nyírfalevélsodró sodrástechnikájában igazán csodálatra méltó az, hogy az évmilliók során e bogárfaj „kikísérletezte" a levélsodráshoz legjobb két szabásvonalat, amelyek megkönnyítik a levéllemez összegöngyölését és megnehezítik a sodrat kipödrődését. A fejezet végén a szabásvonalak mechanikailag optimális alakját határozzuk meg, miután differenciálgeometriai, illetve variációszámítási módszerekkel megmutatjuk, hogy a szabásvonalak matematikai leírására és mechanikai származtatására korábban kifejlesztett elméletek többé-kevésbé helytelenek voltak. Kevés bogár keltett nagyobb tudományos érdeklődést sajátos ivadékgondozásával, mint a nyírfalevélsodró. Számos matematikai-geometriai fejtegetés látott napvilágot a sodrás előtt a nőstény által a levéllemezbe vágott szabásvonalak alakjáról. Azt a tényt, hogy e szabásvonalakat a tudósok csak a felsőbb matematika segítségével képesek leírni, érvként hozták föl egymással hadakozó filozófiai-teológiai interpretációs viták alkalmával, melyekben a Darwin-féle fejlődéstant vonták kétségbe. A nyírfalevélsodró levéltölcsér-készítési technikáját megpróbálták felhasználni a szerzett tulajdonságok Lamarck-féle átörökítési elméletének az alátámasztására, továbbá Isten létezésének bizonyítására is.

A könyvet a fölhasznált szakirodalom részletes listája zárja.

A könyvben foglalt tananyag megértéséhez szükséges biológiai, fizikai és matematikai ismeretek zömét a megfelelő alfejezetekben foglaltam össze. Ezek az olvasó biológiai, fizikai és matematikai előismereteitől függően sokszor anélkül ugorhatók át, hogy az az eredmények érthetőségének rovására menne. Habár minden fejezet elméleti jellegű, természetesen kísérleti adatok és ismeretek széles bázisára épül. Arra törekedtem, hogy az egyes fejezetek önállóan is használhatóak legyenek az egyetemi és főiskolai oktatásban, elméleti előadás során vagy szemináriumi keretek között.

A könyvet fizikus, biológus, mérnök, biofizikus, orvos, valamint fizika- és biológiatanároknak, illetve az e szakoknak megfelelő egyetemi és főiskolai hallgatóknak szántam. Minden fejezetben a konkrét biológiai jelenséget és kérdéskört helyeztem reflektorfénybe, és csak annyi biológiával, fizikával és matematikával terheltem az olvasót, amennyi az adott biomechanikai probléma megoldásához szükséges. A könyv alapján az olvasó megbizonyosodhat arról, hogy a biológiai rendszerekben fölmerülő számos probléma megoldásában a mechanika hasznos segédeszköz lehet.

A könyv 2. fejezetebeli négylábú állatábrázolások gyűjtéséért és a biomechanikai elemzésükben nyújtott segítségükért hálával tartozom Csapó Adelindának (fizikushallgató, ELTE TTK Fizikai Intézet), Nyeste Annamáriának

(biofizikus hallgató, ELTE TTK Fizikai Intézet), dr. Gerics Balázsnak (Szent István Egyetem, Állatorvos-tudományi Kar, Anatómiai és Szövettani Tanszék), dr. Csorba Gábornak (Magyar Természettudományi Múzeum, Emlősgyűjtemény) és dr. Kriska Györgynek (ELTE TTK Biológiai Intézet). A könyv 4. fejezetében foglalt csontmechanikai kutatási eredmények megszületését az Országos Tudományos Kutatási Alap „*Csöves csontok optimális falvastagságának biomechanikai vizsgálata*" című, T-034982 számú, 2001–2005 futamidejű pályázata támogatta. Köszönöm Suhai Bence volt informatikus hallgatómnak, hogy kifejlesztette a 4. fejetben tárgyalt számítógépes programot, mellyel a csöves csontok falvastagsága határozható meg a röntgenfelvételükből. Hálás vagyok dr. Bernáth Balázs (volt doktoranduszom), dr. Évinger Sándor (Magyar Természettudományi Múzeum, Embertani Gyűjtemény), dr. Gasparik Mihály (Magyar Természettudományi Múzeum, Őslénytani Gyűjtemény), dr. Pap Ildikó (Magyar Természettudományi Múzeum, Embertani Gyűjtemény), dr. Gerics Balázs és dr. Csorba Gábor társszerzőimnek a rókák, madarak és emberi múmiák végtagcsontjainak vizsgálatában nyújtott segítségükért. Lekötelezettje vagyok Mizera Ferenc biofizikusnak, volt diplomanduszomnak a 8. fejezetben tárgyalt számítógépes program kifejlesztéséért. Köszönöm dr. Jánosi Imre fizikus kollégámnak, volt évfolyamtársamnak (ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék) a 8.11. alfejezet megírását. Hálásan köszönöm dr. Radnai Gyula és dr. Gnädig Péter fizikusoknak (ELTE TTK Fizikai Intézet) és dr. Zboray Géza biológusnak (ELTE TTK Biológiai Intézet) a kézirat szakmai lektorálását. Köszönöm Pordány Katalin főszerkesztőnek, az ELTE Eötvös Kiadó munkatársának a könyv szerkesztéséhez és megjelentetéséhez nyújtott áldozatos segítségét. Köszönöm továbbá Sándor Júliának, az ELTE Eötvös Kiadó munkatársának közreműködését a kiadvány nyomdai kivitelezése kapcsán.

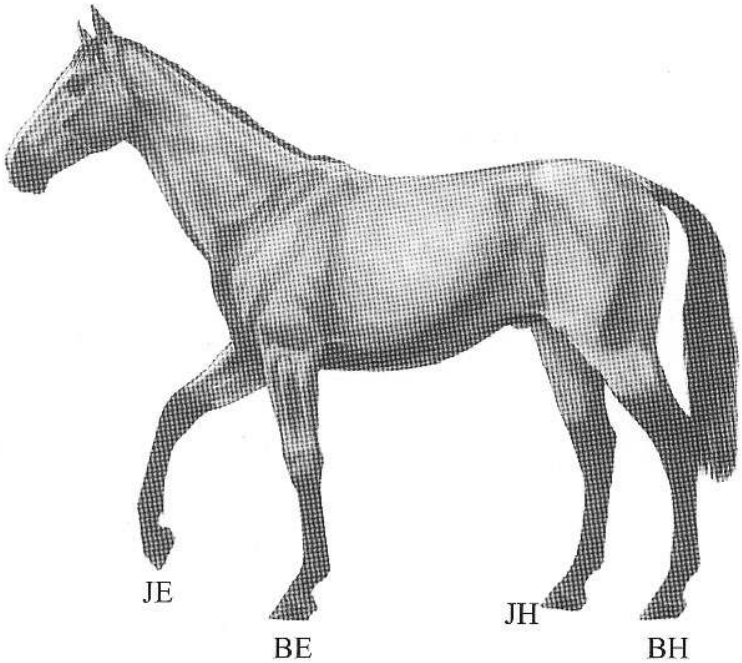
E könyvet szüleimnek, Fischer Máriának és Horváth Jánosnak, a kiskunhalasi Szilády Áron Gimnázium nyugalmazott biológia-földrajz szakos tanárainak ajánlom.

Budapest, 2008. július 1. és Göd, 2008. július 1.

Horváth Gábor

1. A négylábú mozgás biomechanikája

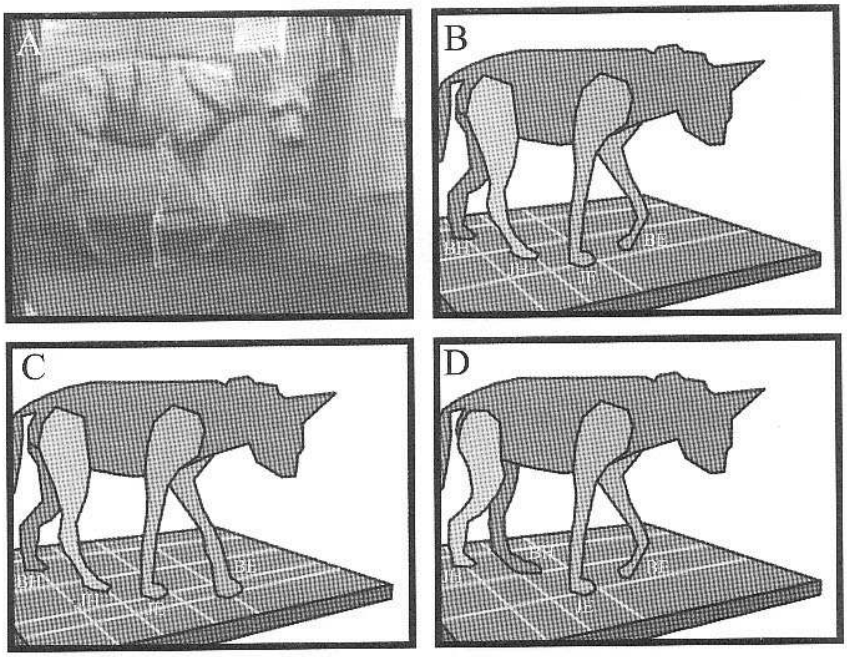
A négylábú állatok optimális lépéssorrendje, avagy a lójárás hibás képzőművészeti ábrázolásai



Szunyoghy András (1991) Művészeti állatanatómia – A ló

2. Négylábú járásábrázolások biomechanikai elemzése

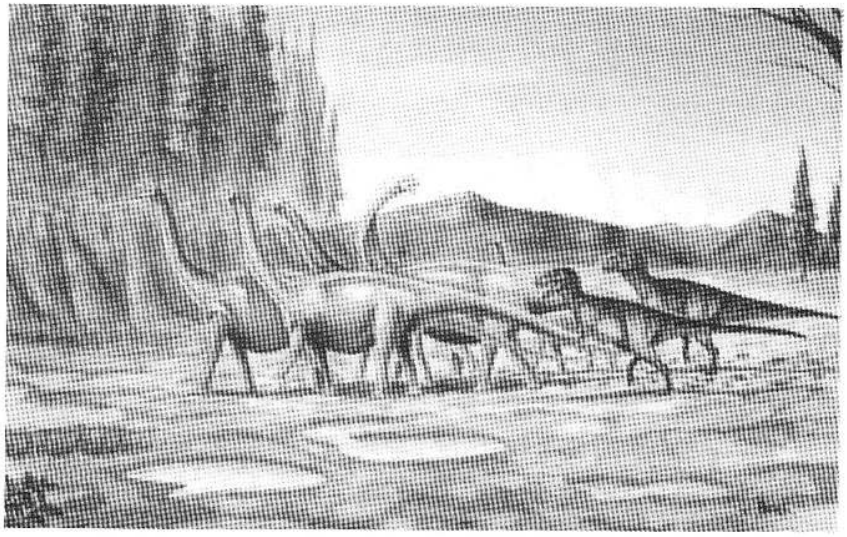
Múzeumi kitömött állatok, állatanatómiai tankönyv-illusztrációk és játékállat-figurák járásának hibás ábrázolásai



Cibethiéna *(Proteles cristatus)* helytelen járásábrázolása (A, B) és lehetséges javításai (C, D)

3. Hogyan mozoghattak a dinoszauruszok?

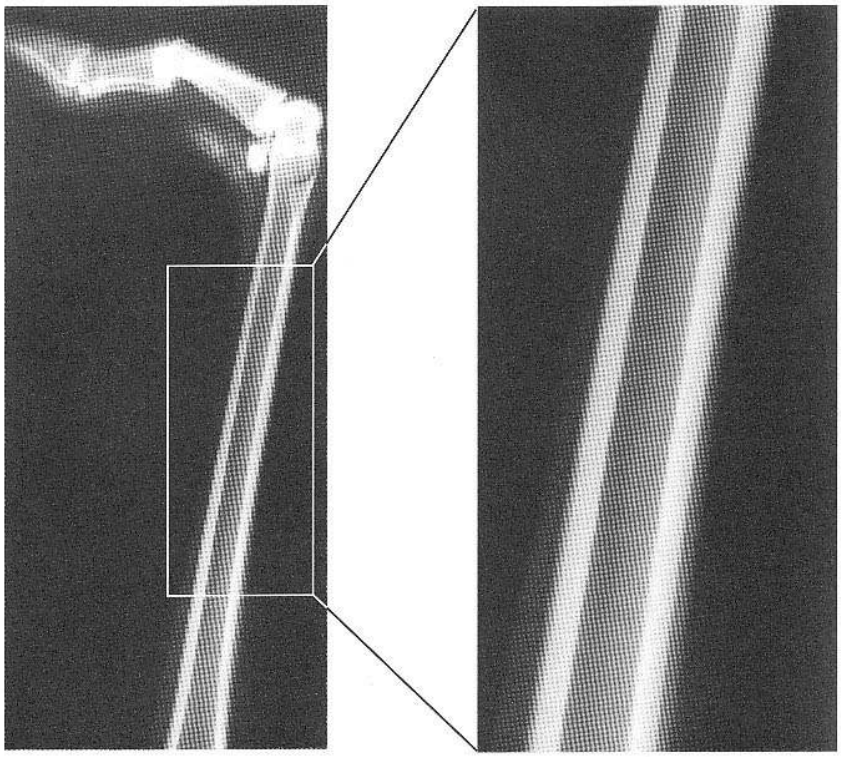
Ősállatok mozgásának paleo-biomechanikai rekonstrukciója



A Sousa-medence paleo-környezetének rekonstrukciója (Ariel Milani Martine festménye, http://www.unb.br/ig/sigep/sitio026/sitio026english.htm)

4. Hosszú csöves végtagcsontok optimális szerkezete

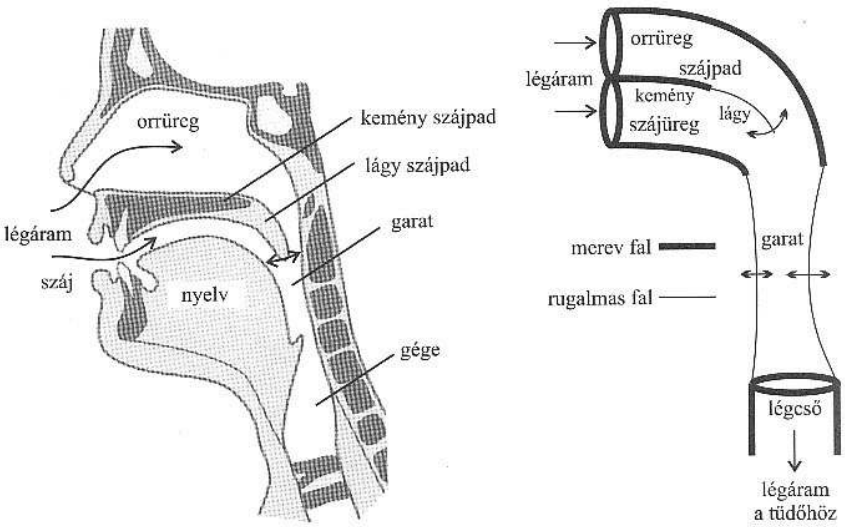
Mekkora az optimálisan könnyű és teherbíró csöves csont relatív falvastagsága?



Egy őz mellső végtagjának hosszú csöves csontjáról készült röntgenfelvétel negatívja (bal) és egy kiválasztott részletének felnagyított képe (jobb)

5. A horkolás biomechanikája

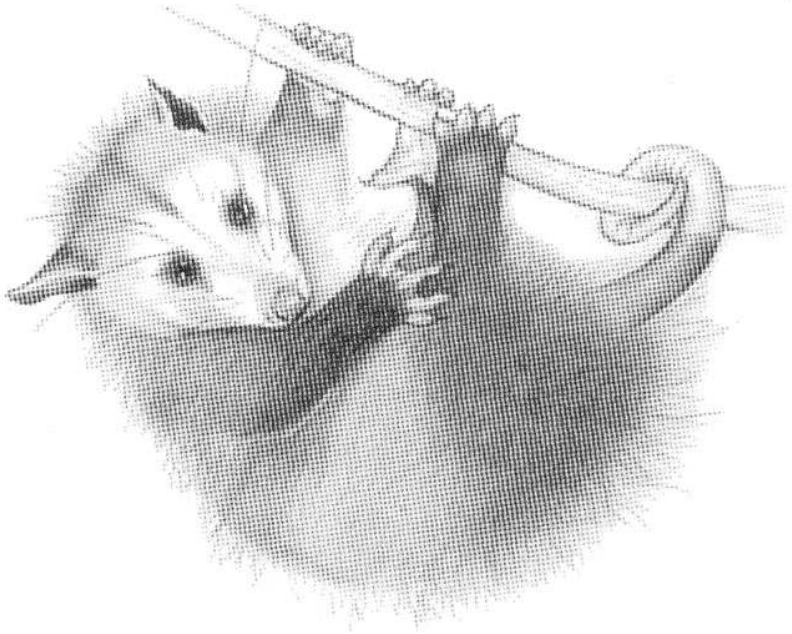
Miért és hogyan horkolunk, s miként küszöbölhető ki az erős horkolás?



Az ember felső légútjának anatómiai vázlata (bal) és biomechanikai modellje (jobb)

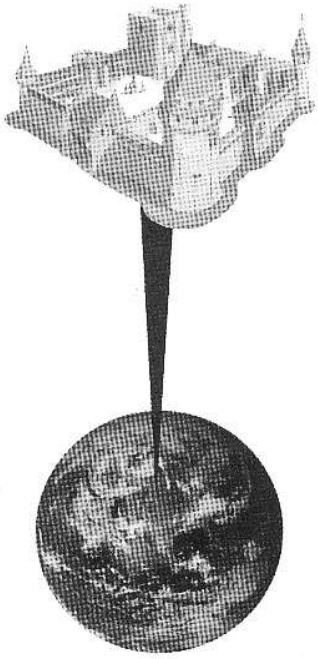
6. A csavarvonalban föltekeredve kapaszkodás biomechanikája

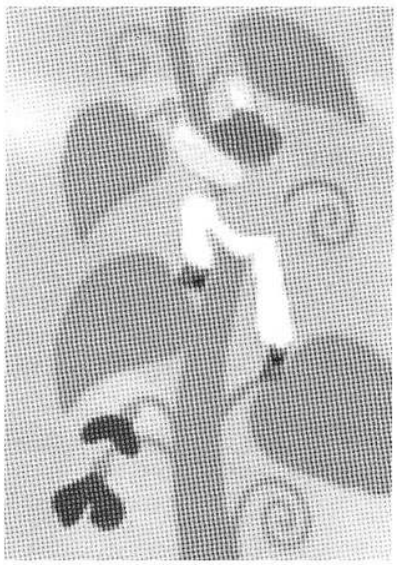
Hogyan fogódzik az oposszum a farkával a faágba?



Faágon lábaival és csavarvonalban föltekeredett farkával kapaszkodó oposszum (http://www.sherpaguides.com/tennessee/lower_cumberland_plateau/south_cumberland_sra.html)

7. Az űrlift kábelének és a mesebeli égig érő paszuly alakjának optimalizációja

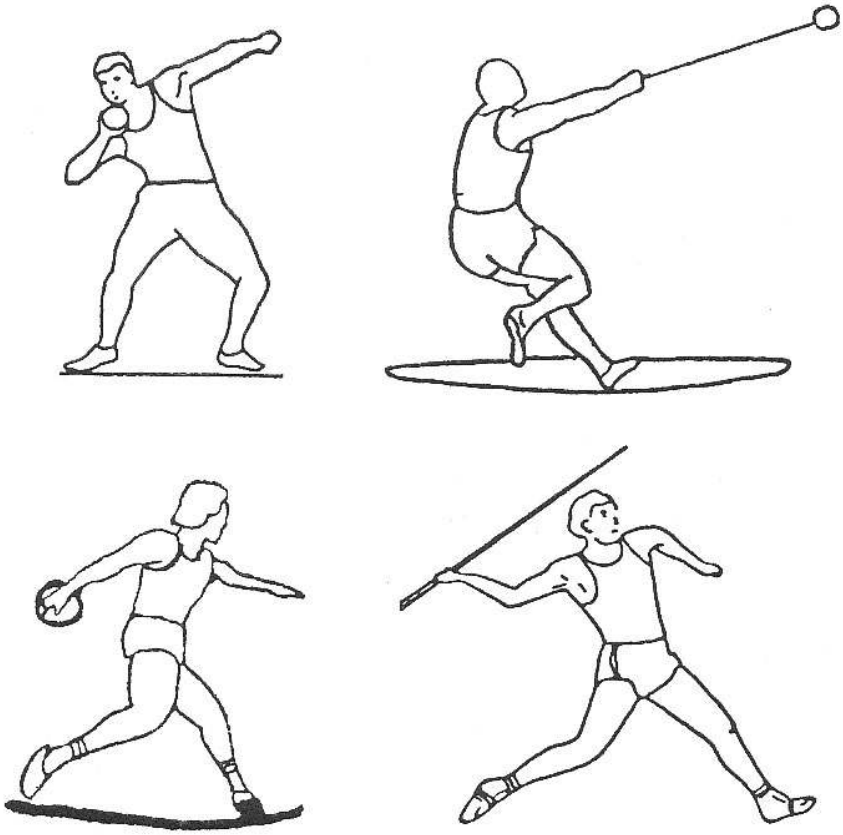




A Ciolkovszkij-féle égi kastély (balra) és a mesebeli égig érő paszuly (jobbra)

8. Dobósportok a forgó Földön

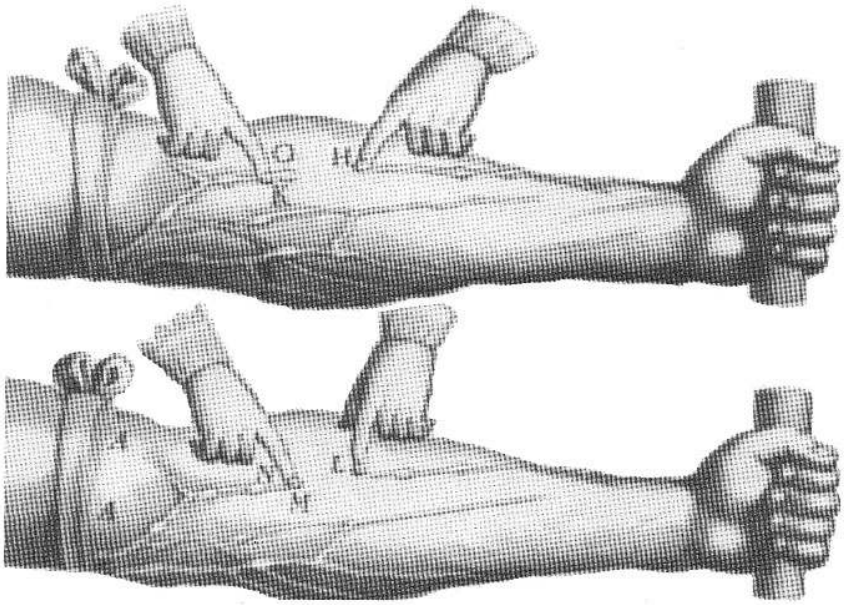
Hogyan befolyásolja a dobótávot a centrifugális és a Coriolis-erő, valamint egyéb fizikai és meteorológiai tényezők?



A négy olimpiai dobósportág: súlylökés, kalapácsvetés, diszkoszvetés és gerelyhajítás (Koltai és Szécsényi, 1998)

9. Erek és érelágazások áramlási optimalizációja

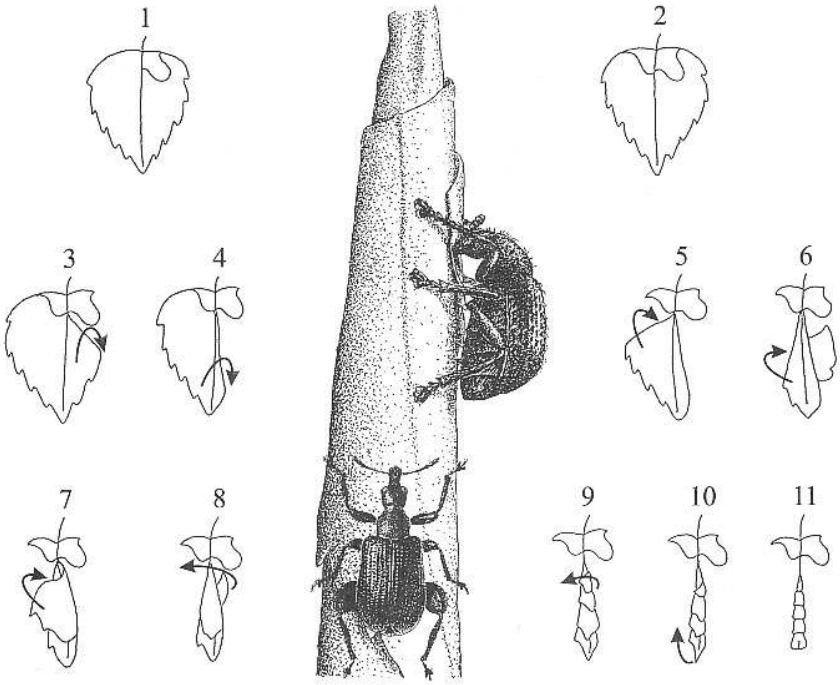
Milyenek az áramlási szempontból optimális véredényrendszerek?



Az emberi alkar ereinek, billentyűinek és érelágazásainak illusztrációja William Harvey (1578–1657) angol orvos „Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus" (Anatómiai értekezés a szív és vér mozgásáról állatokban) című, 1639-ben publikált művéből

10. A nyírfalevélsodrás biomechanikája

Hogyan képes az apró nyírfalevélsodró bogár *(Deporaus betulae)* szabályos levéltölcsért sodorni egy nagy levélből?



A nyírfalevélsodró *(Deporaus betulae)* levéltölcsér-készítésének fázisai (Daanje, 1964)