

FIZIKA AZ ÉLŐ TERMÉSZETBEN

Rajkovits Zsuzsanna
ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék

Az iskolai oktatásban – célszerűségi megfontolásokból – a természet egészére vonatkozó ismereteket részekre bontva, egymástól elválasztva szervezzük tantárgyi tartalmakká. Az élő és élettelen természet bonyolultnak tűnő világában a diákok a hosszú idő óta elfogadott, akadémiai módon felosztott tantárgyszerkezetnek megfelelően a fizika-, a kémia-, a biológia- és a földrajzórán elsajátított ismeretek segítségével próbálnak eligazodni. E folyamatot könnyebbé tehetjük, ha felhívjuk a figyelmet e tárgyak kapcsolódási pontjaira. A továbbiakban a fizika és az élővilágból vett jelenségek kapcsolatát keressük, de hasonló vizsgálatot végezhetünk más tudományterületek között is.

Biológia a fizikaórán

Manapság, amikor a természettudományok népszerűsége egyre csökken, mérlegelnünk kell azt is, hogy tanításunk során a tantárgyakat diákjaink számára még érdekesebbé, még vonzóbbá tegyük. A sok kínálkozó lehetőség közül egy módszer, ha például „észrevevessük” a fizikát a körülöttünk lévő élő természetben. Minden korosztály számára érdekes lehet és mindkét tantárgy szempontjából hasznos is, ha „meghívjuk” az élővilágot a fizikaórára.

Tehetjük ezt például a fizika néhány törvényének tanítása során azzal, hogy a tanórai fizikai kísérletek mellett „demonstrációként” ismert biológiai jelenségeket is bevezetünk. A segítségükkel megismert fizikai törvények birtokában az élővilág jelenségeit is mélyebben megérthetjük.

Megváltozott a világ. Manapság nem csak az iskola oktat, nem csak a pedagógus az ismeretek fő forrása. A diákot a médiából folyamatosan információáradat éri, amelynek egyes elemeit okosan felhasználhatjuk a fizikaórán. A fizika törvényeire épülő, a minden

tudományágban használatos egyre tökéletesedő vizsgálati technikákkal (nanotechnológia) az élővilág eddig nem ismert finom részletei is feltáruulnak. Az új eredményekről diákjaink számtalan, igen igényesen illusztrált népszerűsítő könyvből, természetfilmből, de ma már az internetről is, a felfedezést követően szinte azonnal tudomást szerezhetnek. Napjainkban – a természettudományok egyes területei közötti kölcsönhatásnak köszönhetően – az újabb felfedezések eredményeit szinte a diákok szeme láttára kell beépíteni egy-egy tantárgy korábban „változtathatatlanak” hitt tananyagába. Ennek lehetünk tanúi a közelmúltban, például amikor a szén módosulatainak tanításakor a fullerének bekerültek a tananyagba.

Nem csak egy-egy fizikai törvény tanításához „vehetünk” példát az élővilágból. Egy-egy élőlény felépítésén, életterének bemutatásán keresztül rávilágíthatunk azokra a fizikai jelenségekre is, amelyek az evolúció folyamatában hozzájárultak ahhoz, hogy az élőlények éppen az adott formában fejlődtek ki. Így lehet a fizika hasznos „vendég” a biológiaórán is.

A biológiai példák a fiatalabb korosztály számára néha csak figyelemfelkeltő jelleggel használhatók, de később, a diákok fizikai ismeretanyagának bővülésével, a felsőbb osztályokban az élővilág jelenségeinek mélyebb elemzésére is sort keríthetünk.

A mindennapi tanári gyakorlatban a hiányzó ismeretek gyűjtéséhez a nagy internetes tapasztalattal rendelkező tanulókat feltétlenül érdemes bevonni. Az így előálló ismeretanyagból tanári segítséggel választhatjuk ki a szakmailag helyes, és a számunkra megfelelő részleteket. A diák érezheti, hogy kutatómunkájával nem csak, mint egyik alanya, de a tanári munka segítőjeként aktív részese is lesz a tanítási folyamatnak. Ez a részmunka, az „együtt-tanulás” egyben jó lehetőség a tanár-diák kapcsolat építésére, jobbítására.

Az alábbiakban a hidrosztatika témaköréhez kapcsolódóan szeretnék mintát mutatni a természettudományok kapcsolódási pontjainak keresésére, s arra, miként használható e módszer a mindennapi tanítási gyakorlatban, a tanórákon, szakköri foglalkozásokon. A témakör először az általános iskolában kerül elő, számos, az alábbiakban ismertetett részlet a hetedik osztályos korosztálynak változatlanul tanítható.

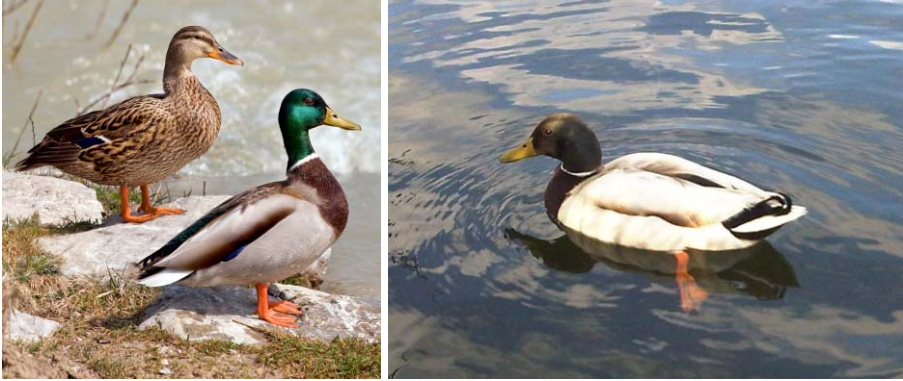
Arkhimédész törvénye az élővilágban

Vízben élnek a Föld legnagyobb testű élőlényei. A kacska a földön totyogva nehézkes madár benyomását kelti. Nem így a vízben! A vízfelszínen könnyedén siklik (1. ábra).

Az írás a szerző azonos című könyve (ismertetve folyóiratunk idei februári számában) alapján készült.



Rajkovits Zsuzsanna PhD, ny. egyetemi docens. Az ELTE kémia-fizika szakán végzett, ahol az Anyagfizikai Tanszék *fémfizikai kutatásaiban* vett részt. Az *oktatáskutatásba* a tehetséggondozás új módszereinek bevezetésével, új típusú tanulmányi versenyekkel kapcsolódott be. 1994-ben *nemzetközi versenyt alapított* (ICYS), amelynek azóta is elnöke. Általános és középiskolásoknak írt újszerű fizika tankönyvek társszerzője, interdiszciplináris szemléletű internetes gyűjtemény összeállítója.



1. ábra. Szárazföldön suta, de a vizen könnyedén sikló tőkés récék.

Mi okozza ezt a különbséget? A testek a vízben könnyebbek, és mozgásukat a víz sem fékezi annyira, mint ha a talajon sűrűlnének. A kisebb *sűrűdés* és a testekre a vízben ható *felhajtóerő* jelentősen befolyásolta a vízi élőlények felépítését, viselkedését. Miért, hogyan?

A válaszhoz először eleveintsük fel az ide vonatkozó fizikai ismereteinket.

A nyugvó folyadékok tulajdonságait a *hidrosztatika* törvényeivel írhatjuk le. A nyugvó folyadékok felszíne a Földön vízszintes, a nehézségi erőre merőleges. A folyadékban egy adott mélységben a nyomás, a *hidrosztatikai nyomás*, a h mélységgel egyenesen arányosan nő,

$$p = \rho g h,$$

ahol ρ a folyadék sűrűsége, g a nehézségi gyorsulás értéke azon a helyen. A levegő nyomásával – *Torricelli* kísérlete szerint – 76 cm magas higanyoszlop hidrosztatikai nyomása tart egyensúlyt. A légnyomás értéke a fenti összefüggésből könnyen kiszámítható,

$$p = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}.$$

Hasonló módon győződhetünk meg arról, hogy a vízben közelítőleg 10 méter mélyen ugyanekkora a nyomás. Az ott tartózkodó testekre tehát a légköri nyomás kétszerese, körülbelül 200 kPa nehezedik. Minden újabb 10 méter a nyomást 100 kPa-lal növeli.

A hidrosztatikai nyomás következménye a testekre ható *felhajtóerő*, értéke a test folyadékba merülő térfogatának megfelelő térfogatú víz súlya:

$$F = V_{\text{test}} \rho_v g.$$

Úszáskor a testekre ható erők eredője nulla, a nehézségi erőt a felhajtóerő kiegyenlíti. Számítással győződjön meg mindenki maga arról, hogy igazak az alábbi kijelentések:

2. ábra. Az úszóhólyag és helye a hal belsejében.



1. a víznél kisebb sűrűségű testek úsznak a víz felszínén,
2. ha a test sűrűsége megegyezik a víz sűrűségével, akkor a test bármely mélységben egyensúlyban van, lebeg,
3. a víznél nagyobb sűrűségű, tömör testek elmerülnek a vízben,
4. a víznél nagyobb sűrűségű anyagból készült üreges testek úsznak a víz felszínén, ha ezek átlagos sűrűsége kisebb a víz sűrűségénél.

Víziállatok egyedülálló merülési „praktikái”

A tengerek, óceánok, tavak élővilága igen gazdag, egy-egy vízi élőlény élettere sokszor a vízfelszíntől kezdve több száz méter mély térségekre is kiterjed. Ahhoz, hogy az állat energiáját a leggazdaságosabban használja, a megélhetéséhez szükséges cselekedetekre fordítsa, minden mélységben valamilyen „trükkkel” biztosítania kell – szakirodalmi elnevezéssel – a „semleges úszóképesség” állapotát, ami nem más, mint a mindenkori mélységnek megfelelő lebegés beállítása. A vízmélységgel nő a nyomás, csökken a hőmérséklet, s e körülményekhez minden víziállatnak alkalmazkodnia kellett. Minden tartózkodási helyükön az állatra ható nehézségi erőnek egyensúlyt kell tartania a felhajtóerővel, s ehhez a szabályozáshoz bizonyos fortélyokra van szükség. A víziállatok merülése és felszínre emelkedése gyors folyamat, de a kívánt mélységekben való huzamosabb tartózkodáshoz szükségesek azok a fortélyok, amelyek többnyire az állat átlagsűrűségének változtatásával valósulnak meg.

Vajon a vízben élő állatok milyen fogásokat alkalmaznak átlagsűrűségük változtatására?

A csontos halak

A vízben élő állatok átlagos sűrűsége a vízával közel azonos, ezért a rájuk ható felhajtóerő a nehézségi erőt teljesen kiegyenlíti, lebegnek. Ez a körülmény felépítésükben úgy tükröződik, hogy a csontvázuk tömege a teljes testtömegnek csupán néhány százalékát teszi ki, nincsen szükség olyan masszív tartó szerkezetre, mint amilyen a szárazföldön élő társaiknál tapasztalható.

Míg a halak csontváza a teljes testtömegük körülbelül 8%-a, a vízi és szárazföldi életet is élő békáké körülbelül 11%, addig a nyúlénál ez az érték már a 15%-ot is eléri.

A csontos halak érdekes szerve az *úszás* mélységét finoman szabályzó *úszóhólyag* (2. ábra).

Az úszóhólyag fala figyelemre méltó, rugalmas tulajdonságokkal rendelkezik. A hal az úszóhólyagjával „állítja be” a mindenkori mélységnek megfelelő átlagos sűrűségét. A zárt úszóhólyagot gázzal tölti meg, ha a térfogat növelésére van szükség, ha viszont mélyebbre kerül, az ott uralkodó nagyobb nyomás miatt az úszóhólyag összenyomódik, az állat átlagsűrűsége nő. A hólyag méretével változik a hal térfogata, emiatt *átlagsűrűsége* is.

Akár a gáztörvények tanításánál is használhatjuk a halak merülési szokásait. Hangozzék a feladat a következőképpen: körülbelül 50 méter mélységben a hal úszóhólyagjának térfogata a teljes testtérfogat 5 százaléka legyen. Hányszorosára változik az úszóhólyag térfogata 300 méter mélységben? (A víz hőmérséklet-változásától számításainkban tekintsünk el!)

Az állandó hőmérséklet feltételezése miatt a Boyle–Mariotte-törvény felhasználásával adhatjuk meg a választ. A nyomás 50 méter mélyen 6 atmoszféra, 300 méter mélyen pedig 31 atmoszféra.

$$V_0 \cdot 6 \text{ atm} = V \cdot 31 \text{ atm},$$

$$\frac{V_0}{V} \approx 5.$$

Az úszóhólyag térfogata 300 méter mélységben ötödére csökken. Ezzel a hal átlagsűrűsége az 50 méteres mélységbeli átlagsűrűséghez viszonyítva megnő, különös erőfeszítés nélkül folyamatosan tartózkodhat 300 méter mélyen [1]. A gáztörvények tanításakor ilyen jellegű egyszerű feladatokkal változatosabbá tehetjük a tanítást, mert egyúttal feleleveníthetünk más témákhoz, illetve más tudományterületekhez kapcsolódó ismereteket is.

A cápák

A cápák (3. *ábra*) porcos halak, nincsen úszóhólyagjuk. Más merülési praktikához kell folyamodniuk. Vázuk már azzal könnyebbé válik, hogy csont helyett porcból áll. De átlagsűrűségük változtatására más lehetőségük is van.

A *cápmáj*a mindenkori átlagos sűrűség beállításához használt szervük, amely az állat teljes testtömegének akár 25-30 százaléka is lehet (emlősnöknél csak 5 százalék). A cápmáj körülbelül 70 százalékban a tengervíz-nél kisebb sűrűségű olajokat és egyéb szerves anyagokat (squalene) tartalmaz. A cápa a tartózkodási helyének megfelelő átlagsűrűségét a máját alkotó anyagok térfogati hányadának változtatásával állítja be. A tengervíz sűrűsége $\rho_t = 1,026 \text{ g/cm}^3$, az olajok sűrűsége $\rho_o = 0,90\text{--}0,92 \text{ g/cm}^3$, a squalene sűrűsége pedig $\rho_s = 0,855 \text{ g/cm}^3$. Mivel a cápák mája, mint sűrűség szabályozó



3. *ábra*. Porcos halak képviselője, a cápa.

nem annyira hatékony szerv, mint az úszóhólyag a csontos halaknál, a cápák állandóan mozgásban vannak, hogy elkerüljék az elmerülést.

A tintahal

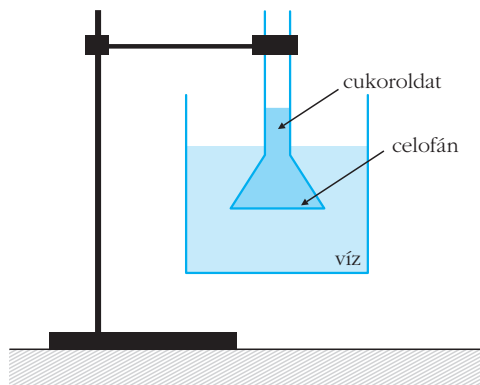
A tintahal vagy szépia nevével ellentétben nem hal, hanem puhatestű, lábasfejű (más néven fejlábú), a polipok rokona. Merüléskor a szabályozást a szépiacsonttal oldja meg, amely a teljes testtérfogat közel 10 százalékát (9,3%) teszi ki (4. *ábra*).

A szépiacsont celluláris anyag, lemezes szerkezetű, a CaCO_3 aragonit kristályaiából épül fel. Az aragonitlemezek szerveződését ilyenné egy szerves molekula (kitin) irányítja. Az állatból frissen kivett csont átlagsűrűsége a $\rho = 0,57\text{--}0,64 \text{ g/cm}^3$ tartományban mozog. Elég könnyű, az állat átlagsűrűségét csökkenti, és kiváló mechanikai tulajdonságai is vannak, így jól ellenáll a mélységváltozás okozta nagy nyomásváltozásnak is. Védi az állat létfontosságú szerveit, például kiugró fejlettségű idegrendszerét. A szépiacsont másik fontos feladata a semleges úszóképesség beállítása, amelyet a tintahal a csont víztartalmának változtatásával valósít meg. A víztartalom változtatása – más tengeri állatokhoz hasonlóan, – az úgynevezett ozmoregulációs folyamattal történik [1].

Az ozmózis részletes ismertetése a középiskolás tantervekbe sem mindig kerül be, pedig az élővilág gyakran előforduló jelensége. Itt csupán egy kísérlettel mutatjuk be a jelenséget, a kvantitatív elemzést elkerüljük.

4. *ábra*. A fejlábúakhoz tartozó közönséges tintahal és a szépiacsont.





5. ábra. Kísérlet az ozmózisnyomás demonstrálására.

Az ozmózis jelensége

Ozmózisnak nevezzük az olyan „egyirányú” diffúziót, amely oldat és oldószer között jelentkezik, ha ezeket féligáteresztő (más néven szemipermeabilis) fal (hártya) választja el. Féligáteresztő az olyan fal, amely az oldószer molekuláit átengedi, de az oldott anyag molekuláit nem. Az ozmózis az oldat hígulásával jár együtt. Ha az oldat zárt edényben hígul, akkor nyomása megnő. A nyomás sok esetben tekintélyes lehet.

Egyszerű kísérlettel magunk is előállíthatjuk a jelenséget.

Ragasszunk celofánhártyát egy körülbelül 3-4 cm átmérőjű, hosszúnyakú üvegtölcsérre! A ragasztást úgynevezett akváriumragasztóval könnyen elvégezhetjük. A tölcserbe töltünk cukoroldatot, és a tölcser szárán jelöljük meg az oldat szintjét. A tölcser állványba fogva, a 5. ábrán látható módon helyezzük vízzel telt főzőpohárba úgy, hogy az oldat és a víz szintje egy magasságban legyen.

A víz diffúziója a féligáteresztő hártyán keresztül rövidesen mindkét irányban megindul, de az oldat felőli diffúzió kisebb mértékű. A folyamat végeredményeként az oldat hígul, térfogata nő, a tölcser szárán emelkedik a folyadékszint. A szintkülönbségnek megfelelő nyomás addig nő, amíg a nyomás a víz további oldatba hatolását már megakadályozza. Ezt a nyomást az oldat ozmózisnyomásának nevezzük. Az oldatok ozmózisnyomása meglepően nagy,

például az 1%-os cukoroldat ozmózisnyomása a légköri nyomás körülbelül 2/3 része, amely majdnem 7 méter magas vízoszlop nyomásának felel meg. A celofánhártya ekkora nyomást nem bír ki, a demonstráció már néhány deciméteres emelkedés után kényeszerű véget ér. A nagy ozmózisnyomás teszi lehetővé például azt, hogy a talaj nedvessége a fák koronájába is eljusson.

A szépiacsonthoz visszatérve, ezután már megérthetjük a tintahal átlagsűrűség-beállító folyamatát. A szabályozás nagy körvonalakban abban áll, hogy az állat a szépiacsontban lévő folyadék-gáz arányt képes változtatni. Nagyobb gázhányad könnyebb csont, kisebb arány mellett viszont nehezebb csont áll elő, s így változik az állat átlagsűrűsége is. Az ozmózisnyomásnak a csontbeli folyadék mozgásában van szerepe. Kutatók kimutatták, hogy a szépiacsontnak az állat lágy részeihez csatlakozó felületén található lemezek között mindig található folyadék, amely a tengervízhez hasonlóan főleg oldott NaCl-ot tartalmaz. Ha a csonttal érintkező testfolyadékok nagyobb az ionkoncentráció, akkor olyan folyamat indul meg a féligáteresztő szövet- és sejhártyákon keresztül, amely hígítja a nagyobb koncentrációjú tartományt, azaz víz kerül a csontból a testbe. A folyamat teljes részletezését e helyen mellőzzük, itt csak az ozmózis szerepére kívántuk felhívni a figyelmet [2].

A csigaházazas polip

A *Nautilus pompilius* vagy csigaházazas polip a lábfejűek közé tartozik (6. ábra). A mintegy 20 cm-re megnövő, gyöngyházazas Nautilus ma is élő faja azon puhatestűeknek, amelyek már 550 millió évvel ezelőtt megjelentek. „A csigáspolip élő fosszília” – szokták mondani. A polipok közül az egyetlen, amely házat növeszt.

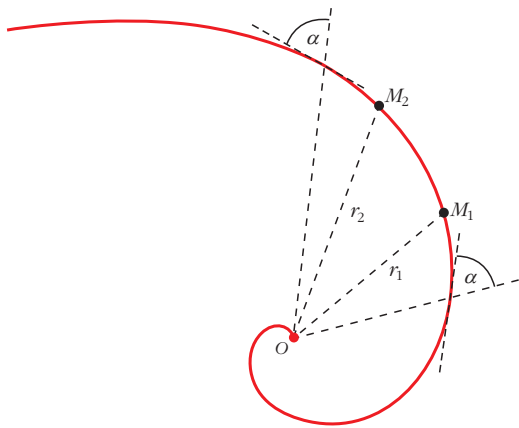
A csigáspolip a házat szigorú rend szerint építi. A lapos, szinte egy síkban készült építmény *logaritmikus spirál*¹ (7. ábra) módjára tekeredik. Házának belsejében *kamrák* vannak, az állat a legkülső kamrában lakik.

Házát szinte szakadatlanul építi, nagyobbítja, a már „kinőtt” helyiséget lefalazza. A lezárt ház térfogata arányos megnövekedett testtömegével, így biztosítja úszóképességét. Az állat a spirál kezdőpontjánál lévő kamrához csatlakozó *szifóján* keresztül áll összeköttetésben a kamráival (8. ábra) [3]. A kamrák gázt tartalmaznak, csak a néhány frissen „lefalazott”, legkülső kamrában van egy kevés tengervíz.

6. ábra. A csigaházazas polip és házának hosszanti metszete.



¹ A görbe úgy képződik, hogy a kiinduló O pontból a görbe M_i pontjába húzott egyenes és az M_i ponthoz tartozó érintő által bezárt α ($< 90^\circ$) szög állandó, ekkor az $OM_i = r_i$ távolság logaritmikusan nő.



7. ábra. A logaritmikus spirál görbéje.

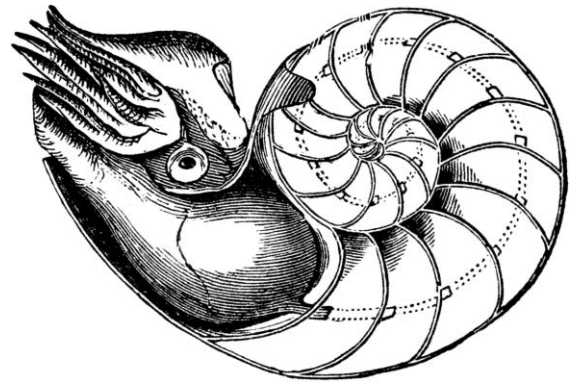
Azt is szokták mondani, hogy a Nautilus „élő tengeraltjáró”. A Nautilus 50 és 500 méteres mélységben is előfordul. Ekkora mélységbeli különbségek igen nagy *nyomás- és hőmérséklet-változásokkal* járnak. Az állatnak tehát alkalmazkodnia kellett e szélsőséges körülményekhez. A csigáspolip nappal általában a tengerfenéken él, csak éjszaka merészkedik magasabbra. Ilyenkor néhány tíz méter mélységben, a melegebb vízrétegben tartózkodik. Tojásait – amelyek bőrrel borított kapszulákhoz hasonlítanak – is ide rakja, általában kemény felületre, sziklákra vagy korallokra. Szaporodását még most is titok övezi. Élő embrióit először – akváriumi körülmények között – csak 1985-ben figyeltek meg [4].

A csigaházaspolip nagyon rövid idő alatt több száz méter mélyre tud süllyedni, s onnan felemelkedni.

A mélytengeri expedícióknak köszönhetően sok film készült a csigaházaspolip életéről. Jellegzetes „himbálódzó” mozgásáról az állat messziről megismerhető. E mozgás a *lebegés* jelenségével kapcsolatos, amely állapotot az állat minden mélységben saját módszerrel maga állítja be. Mivel a ház és a puhatestű állat együttes térfogata – és emiatt a rá ható felhajtóerő is – a mélységtől függetlenül mindig ugyanakkora, az egyes eltérő mélységekben *tömegét* kell szabályoznia.

A frissen lezárt kamrák tengervizet is tartalmaznak. Egy adott mélységben a lebegését a csigáspolip is úgynevezett ozmoregulációval biztosítja. A víz a kamrából ozmotikus úton – a szifó szövetein, sejtein keresztül –, a testnedvek ozmózisnyomását megfelelően beállítva tűnik el. Ezzel csökken az állat átlagsűrűsége, így a csigáspolipra ható nehézségi erő is, és az állat a felhajtóerőnek köszönhetően magasabb vízrétegekben lebeghet. Ha mélyebbre kerül, akkor néhány hátsó kamrájába ismét – a szifószövetei, sejteji membránjain keresztül – folyadékot juttat, megnövelve ezzel az átlagsűrűségét, így állapota a mélyebb vizekben, a nagyobb nyomású helyeken stabilizálódik.

Házában túlnyomásnak kell lennie, amely néhány száz méter mélyen már jelentős, ellenkező esetben gyöngyházból készült háza a nagy külső nyomás miatt összeroppanna. A csigáspolip tökéletesebb,



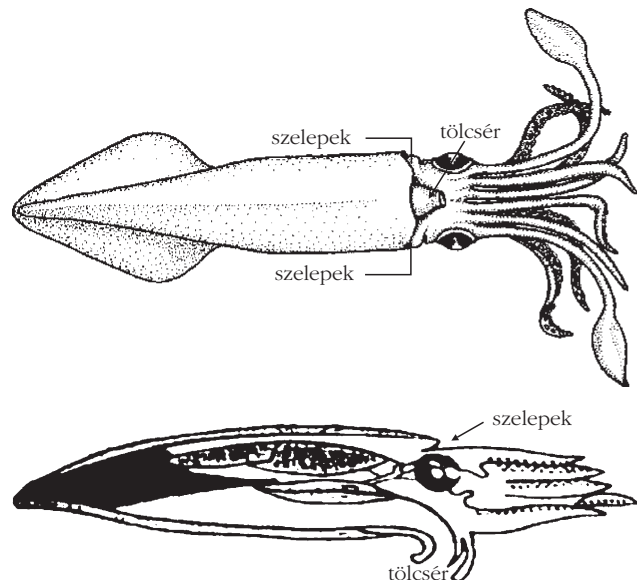
8. ábra. A szifó spirálisa.

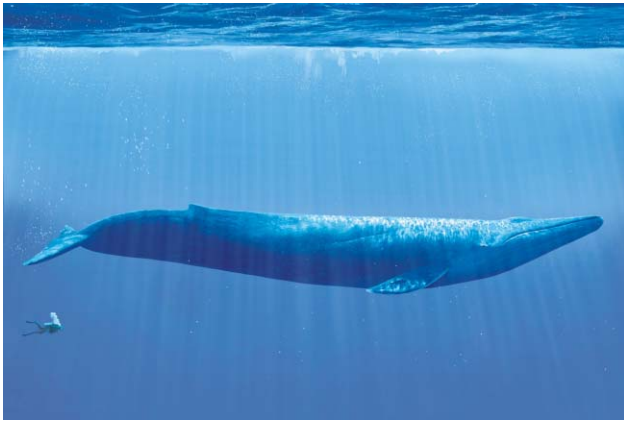
mint a hasonló elven működő tengeraltjáró, mert a tengeraltjáró a víz kiszorításához használt levegőt többsúlyként viszi magával.

Fejlábúak helyváltoztatása

A Nautilus, puhatestű társaihoz hasonlóan, *vízszugárhajtással* halad. A rakétameghajtást *Ciolkovszkij* a 19. század végén írta le. Mint ismeretes, a rakétákat a magukkal vitt üzemanyag elégetésekor keletkező gázok kiáramlásánál fellépő reakcióerő hajtja előre. A polipok, kalmárok, tintahalak, amelyek igen aktív vadászok, helyváltoztatáshoz a *vízszugárhajtást* már sokkal régebben használják. Meneküléskor (és vadászatkor) a testük nagy hányadát elfoglaló *köpenyüregbe* vizet szivattyúznak, s a tölcsérré alakult szervükön keresztül azt kilövellik, amitől – az impulzusmegmaradás törvényének megfelelően – ők az ellenkező irányba mozognak el. A veszélyt érzékelő állat hirtelen megnöveli a köpenyüreg térfogatát, benne a nyomás lecsökken, s az előálló nyomáskülönbségnek köszönhetően a testfelszín *megfelelő helyén* található szelepeken keresztül a tengerből víz áramlik a köpeny belsejébe. Az elvet a kalmár sematikus ábráján mutatjuk be (9. ábra), mert

9. ábra. A „vívízszugárhajtású” kalmár sematikus rajza.





10. ábra. A hengeralakú közelítőleg leírható kékbálna.

ennél az állatnál szembetűnőbbek a részletek. Az állat izma segítségével még be is görbítheti a tölcéért, így mozgása során *irányváltatásra* is képes.

Tengeri emlősök

A vízben lévő testekre a Föld vonzásán kívül a felhajtóerő is hat, a testek *súlya* éppen ezzel az értékkel kisebb, mint a levegőben. Ez a magyarázata annak, hogy vízben élnek, s könnyen mozognak a világ *legnagyobb tömegű* élőlényei.

Míg az elefánt, 3-5 tonna tömegével a legnagyobb tömegű szárazföldi emlős, addig a kékbálna (10. ábra) tömege a 130 tonnát is eléri.

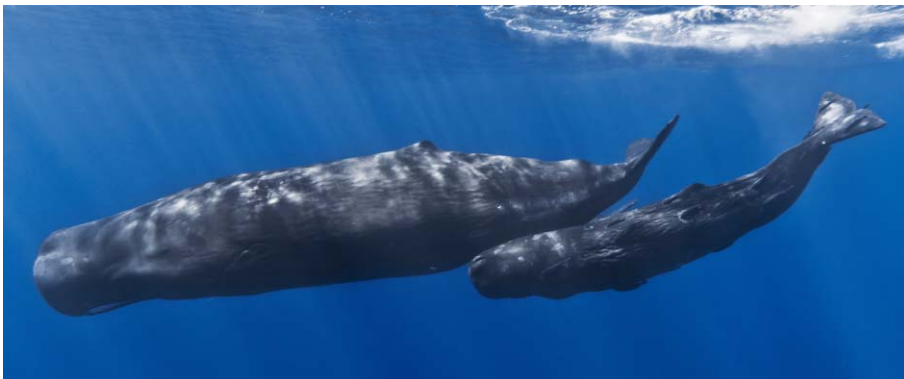
A bálna méreteinek ismeretében az Arkhimédész törvénye segítségével már általános iskolás tanulókkal is megbecsülhetjük a bálna tömegét. Jacques-Yves Cousteau, a közismert Cousteau kapitány tengerkutató mélytengeri megfigyeléseiből tudjuk, hogy egyes kékbálnap példányok hossza a 30 métert is meghaladja, átmérőjük ennek körülbelül a tizedrésze. Durva becsléshez elég, ha az állatot hengeralakúnak feltételezzük. A bálna által kiszorított víz súlya

$$G_{\text{víz}} = V_{\text{bálna}} \rho_{\text{víz}} g.$$

amelyből a térfogatra a

$$V_{\text{bálna}} = \frac{d^2 \pi}{4} h = \frac{h^2}{10^2} \frac{\pi}{4} h = \frac{h^3}{400} \pi$$

11. ábra. A mintegy 500 lóerős ámbráscet és borja.



összefüggést kapjuk. A $h = 30$ méteres hosszát felhasználva a térfogatra 212 m^3 adódik.

A kiszorított víz súlya, a tengervíz sűrűségét $\rho_{\text{víz}} = 1030 \text{ gk/m}^3$ -nek tekintve

$$G_{\text{víz}} = 212 \text{ m}^3 \cdot 1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2,18 \cdot 10^6 \text{ N}.$$

A bálna tömege néhány száz 10^5 kg , azaz néhány száz tonna. (A valóságos tömegnél természetesen nagyobb adódott, mert az egyszerűbb számítás miatti hengeres bálnaalak durva, felső közelítés.)

Ezzel a hatalmas tömeggel akár 30 km/óra sebességgel is képes úszni. (A motorcsónak sebessége körülbelül ekkora.) A 60 tonna tömegű ámbráscet (11. ábra) néhány méter magasra még ki is ugrik a vízből. De a vízi életmódhoz alkalmazkodott csontvázuk a szárazföldön képtelen lenne ekkora terhet megtartani. Érthető, ha ezek az állatok – valamilyen oknál fogva – partra vetődve képtelenek levegőt venni, ekkor tüdejük a hatalmas tömegű izom és zsírpárna súlya alatt szinte teljesen összenyomódik, elpusztulnak.

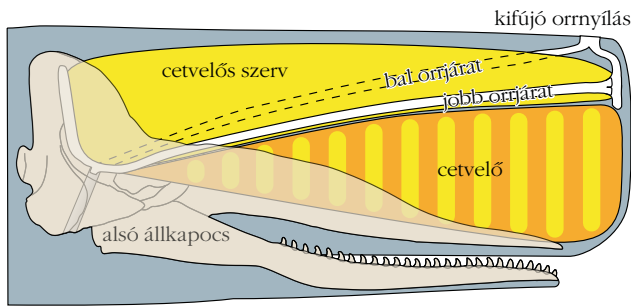
Bálnák merülése

Természetfilmekből ismeretes, hogy ezek az emlősállatok vízszintes, lapátszerű farokuszójukkal – amelynek teljesítménye elérheti az 500 lóerőt , ez egy traktor teljesítményének közel kétszeresével egyenlő, $1 \text{ lóerő} = 736 \text{ watt}$ – csapnak a vízre.

A bálna a reakcióerőnek – a víz által az állat 4 méteres vízszintes kiterjedésű farokuszójára ható erőnek – köszönhetően bukik a mélybe, ahol a légköri nyomás $5\text{-}6\text{-szorososa}$ várja. E nyomás hatására tüdeje a lehető legkisebb térfogatúra nyomódik össze, emiatt a bálna teljes testének térfogata csökken. A kisebb térfogat már kevesebb vizet szorít ki, a felhajtóerő lecsökken, tartósan a mélyben maradhat. A felszínre jutva levegőt vesz, tüdeje kitágul, a felhajtóerő megnő. A változatlan nehézségi erő, de a megnövekedett felhajtóerő miatt nem is szükséges teljesen elmerülnie, gyakran látható, hogy a test egy része a vízből kiemelkedve úszik. Azt is mondhatjuk, hogy a bálna változatlan tömege mellett a $\rho = m/V$ átlagsűrűségét *térfogata* változtatásával befolyásolja.

Nem így az ámbráscet!

Hordó alakú feje a testhossz negyedét teszi ki, és a teljes testtömeg harmad része. Fejében és törzsében a gerincoszlop mentén különleges lágy, hőre rendkívül érzékeny anyaggal, cetvelővel töltött kamrák vannak. A fejében található szerve, amely a cetolaj vagy bálnaolaj néven ismert anyagot tartalmazza, felelős a semleges úszóképességért.



12. ábra. Az ábrás cet cetvelőt tartalmazó szerve.

ség biztosításáért (12. ábra). A körülbelül 2000 liter cetolaj – amely viasz-észterek és trigliceridek keveréke – egy „zsákban” helyezkedik el, és rendkívül érdekes termodinamikai tulajdonságokkal rendelkezik. A cetolaj körülbelül 29 °C hőmérsékleten folyadék-szilárd halmazállapot-változáson megy keresztül. 30 °C körül viszonylag kis viszkozitású folyadék, amelynek atmoszférikus nyomáson vett sűrűsége 862 kg/m³, 29 °C alatt térfogatsűrűsége növekedésével járó szilárd viaszra kristályosodik, ekkor sűrűsége 22,5 °C-on 889 kg/m³.

Merüléskor a tengervíz hőmérséklete a mélységgel csökken, eközben a cetvelő lágy állapotból nagyobb sűrűségű szilárd állapotúvá válik. A fentiekből látható, hogy már nagyon kicsi, csupán 1-2 °C hőmérséklet-változás jelentős sűrűségváltozással jár. Mivel a szerv tömege nagy, e módszerrel hatékony tömegnövekedés érhető el. A cetvelő hőmérséklet-szabályozásában a szervén áthaladó érhálózat melegítő hatása és a szervet átvezető orrjáratokon átáramló tengervíz hűtő hatása játszik szerepet [5]. Az állat tömege tehát így változtatható. Az állat térfogata bármely mélységben ugyanakkora, az átlagsűrűség-változtatás ebben az esetben a tömeg csökkentésén, illetve növelésén keresztül történik.

E helyen csak megjegyezzük, hogy ezzel a szervevel valósul meg a bálnák és delfinek ultrahangokkal történő tájékozódása, az echolokáció is. A szerv ekkor „viaszlelencse” módjára viselkedik, amely az állat fejében a megfelelő helyre fókuszálja a bálnák által kibocsátott, a tengervízben a levegőhöz viszonyítva ötször nagyobb sebességgel terjedő hanghullámokat. Ebből is láthatjuk, hogy ez az állat is számos vonatkozásban kapcsolódik a fizikához, érdemes jól megismerni minden tulajdonságát, majd a más tudományterületeken szerzett ismereteink segítségével megpróbálni megérteni a viselkedését.

Miért nem merülnek el a vízi madarak?

A vízi madarak (13. ábra) tollukat zsírozzák, a vízzel nem nedvesedő tollak és a pehelytollak között jelentős mennyiségű levegőt tudnak tárolni. A sok megkötött levegőtől a madarak *átlagsűrűsége* csökken, testüket sajátos „buborék” veszi körül, ezért *úszva* csak térfogatuk kis hányada merül a vízbe.

Ha tolluk víztaszító tulajdonsága megváltozik, például környezetszennyezés miatt, akkor a fogva tartott levegő mennyisége csökken, elmerülnek. Ha a tavak-

ba olyan szennyező anyag (például mosószer) jut, amely csökkentheti a víz felületi feszültségét, akkor a toll jobban nedvesedik, az állat akár vízbe is fulladhat. Látható, hogy a környezetszennyezés az állatot két oldalról is veszélyezteti.

Az úszás munkával jár

Elgondolkozhatunk azon, hogy mekkora teljesítmény szükséges ahhoz, hogy a víznél nagyobb sűrűségű élőlény mozgása során a vízben mégse merüljön el.

Végezzünk számításokat! A V térfogatának f hányadával vízbe merülő ρ sűrűségű állatra ható F_f felhajtóerő:

$$F_f = fV\rho_v g,$$

ahol ρ_v a víz sűrűsége. Az állatnak munkavégzéssel a nehézségi erő és a felhajtóerő

$$F = gV(\rho - f\rho_v)$$

eredőjének megfelelő nagyságú, de azzal ellentétes irányú erőt kell kialakítania ahhoz, hogy el ne merüljön.

Ez az erő előállítható, ha az állat valamely testrészel lefelé mutató irányban a vízre csap. Ekkor ugyanis a víz lefelé gyorsuló mozgást végez, a víz ellenereje hat az állatra, amely a vízfelszínen tartja őt.

Ha a mozgó testrészt területe A , a csapással gyorsított víz végsebessége v , akkor a mozgás során időegység alatt gyorsított víztömeg

$$m = Av\rho_v.$$

A víz mv impulzusa pedig éppen az úszó test lendületigénye is. Az *impulzus időegység alatt történő változása* éppen a meglökött víz állatra ható – a testét fenntartó – *reakcióereje*. Egyenletekkel a következő formában adható meg:

$$gV(\rho - f\rho_v) = Av^2\rho_v,$$

ahonnan

$$v^2 = \frac{gV(\rho - f\rho_v)}{A\rho_v}.$$

13. ábra. A víznél sokkal kisebb átlagsűrűségű szárcsa.



A mozgásban lévő testrészek által végzett munka a víz kinetikus energiájává alakul. Így a testrészek teljesítménye éppen a víz egységnyi idő alatt történő mozgásienergia-változásával lesz egyenlő, amely

$$P = \frac{1}{2} A \rho_v v v^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\left[\rho g V \left(1 - \frac{f \rho_v}{\rho} \right) \right]^3}{A \rho_v}}$$

képlettel fejezhető ki [6].

A fenti formula felhasználásával számos érdekes jelenségre kvantitatív magyarázatot adhatunk. Például: kiszámíthatjuk, hogy az 50 kg tömegű úszónőnek ahhoz, hogy az orrát a vízfelszín felett tartsa, mozgó végtagjaival 7,8 watt teljesítményt kell kifejteni.

(A számításához használt további adatok: a test 95 százaléka merül vízbe, a mozgó végtagok teljes területe 600 cm^2 , s legyen $\rho_{\text{úszó}} = \rho_v$.)

Számítással magunk is ellenőrizzük a teljesítmény fenti értékét!

Irodalom

1. Paul Davidovits: *Physics in Biology and Medicine*. 3rd edition, Academic Press, Elsevier Inc. (2008) 93–95.
2. Kundt Schmidt-Nielsen: *Animal Physiology*. 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge (1990) 433–448.
3. Greguss Ferenc: *Eleven találmányok*. Móra Könyvkiadó, Budapest (1976)
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Waikiki_Aquarium
5. M. R. Clarke: Physical properties of spermaceti oil in sperm whales. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 58 (1978) 19–26.
6. Paul Davidovits: *Physics in Biology and Medicine*. 3rd edition, Academic Press, Elsevier Inc. (2008) 82–87.

RELATIVITÁSELMÉLETRŐL KÖZÉPISKOLÁBAN – MÁSKÉNT, KIEGÉSZÍTÉS

Kürti Jenő

ELTE Biológiai Fizika Tanszék

A *Fizikai Szemle* 2018. áprilisi számának *A fizika tanítása* rovatában jelent meg Kiss Miklós remek írása, hogy miként lehet az érdeklődő középiskolások figyelmét fölhívni arra, hogy az elektromos és a mágneses mezők mindig együtt kezelendők. Külön-külön az elektromos mezőnek és a mágneses mezőnek nem csak a nagysága, hanem még a léte vagy nem léte is függ attól, hogy milyen vonatkoztatási rendszerből nézzük. Ez valóban elgondolkodtató lehet az érdeklődő diákoknak.

A konkrét példa két párhuzamos, nagyon („végtelenül”) hosszú, egyenletesen töltött szigetelő egyenes közötti erőhatás vizsgálata volt. A levezetés során azonban egy kis „kegyes család” történt. Az az állítás ugyanis, hogy „A vonatkoztatási rendszertől nem függhet az erő nagysága” nem igaz, ha – amint a cikkben is történt – a klasszikus, úgynevezett hármastól beszélünk. Még akkor sem, ha itt a kölcsönös mozgás irányára merőleges komponensről van szó!

Szerencsére még egy pongyolaság történt, ugyanis a szövegben nem egyetlen ponttöltésre ható erőről van szó, hanem az egységnyi hosszúságú darabra ható erőről. Így a levezetés végül mégis helyes, köszön-

hetően annak, hogy két ellentétes tényező kompenzálja egymást. Mivel ez azonnal nem látható, ezért szeretném ezt kicsit részletesebben kifejteni ebben az írásban.

Válasszunk egy még egyszerűbb esetet, mint amelyet Kiss Miklós írása tárgyal: az egyik töltött egyenes helyett legyen egy q ponttöltésünk. (A két ponttöltés esete fizikailag még egyszerűbb, azonban ott matematikai komplikációk merülnek föl: a töltés-, illetve áramsűrűségeknél az úgynevezett Dirac-deltával kellene dolgoznunk.) A másik töltött egyenes pedig legyen egy vékony, tömör egyenes henger (ennek előnye később világos kell legyen). A mezőket a hengeren kívül vizsgáljuk.

A feladat tehát a következő: egy végtelen hosszú, egyenes, A keresztmetszetű, henger alakú szigetelőt egyenletesen feltöltünk ρ (térfogati!) töltéssűrűséggel. A henger tengelyétől d távolságra egy, a hengerhez képest nyugalomban lévő pontszerű q töltést helyezünk el. Vizsgáljuk a ponttöltésre ható erőt két vonatkoztatási rendszerből:

a) laboratóriumi rendszerből, amelyben minden töltés nyugalomban van és

b) a henger tengelyével párhuzamosan állandó v sebességgel mozgó inerciarendszerből.

A számításokhoz – a jobb áttekinthetőség kedvéért – relativisztikus mértékegységrendszert, vagyis olyat használjunk, amelyben a vákuumbeli fénysebesség

$$c \equiv \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 1,$$

sőt külön az ϵ_0 -t (és ezzel persze automatikusan a μ_0 -t) is válasszuk 1-nek! Hangsúlyozzuk, hogy emiatt



Kürti Jenő (1954) fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszékének professzora. Kutatási területe elsősorban szén nanosztruktúrák elméleti vizsgálata, különös tekintettel azok rezgési spektroszkópiájára. A *Fizika III* egyetemi tankönyv *Relativitáselmélet*, valamint *Atomfizika* részeinek szerzője.