

# Gyűjtemény a fizika interdiszciplináris szemléletű tanításához



**Dr. Rajkovits Zsuzsanna**

2015

# Tartalom

1. Bevezetés .....	3
2. A fák és a fizika .....	7
2.1. A fák magassága .....	7
2.2. A fák vízforgalma .....	18
2.3. A fa növekedésének folyamata .....	25
2.4. A fakérgék mintázata .....	26
2.5. A nyírfák, a kémia és a néprajz.....	32
2.6. Miért rezeg a nyárfalevél?.....	34
2.7. Egy csodálatos anyag: a parafa .....	37
3. Tavak, tengerek, folyók élővilága és a fizikai törvények .....	44
3.1. Rovarok a tavak felszínén .....	44
3.2. Arkhimédész törvénye a természetben .....	47
3.3 A földigiliszta és a „hidrosztatikai váz”.....	58
3.4 A csigaházás polip és a fizika .....	61
3.5. A Tündérrózsák királynője .....	68
3.6. Áramlások az élővilágban.....	70
3.7. Kapilláris jelenségek az természetben .....	78
3.8. Miért vannak buborékok zivatar idején egyes tócsák felszínén?.....	80
4. Mitől színes az élővilág? .....	84
4.1 A színek .....	84
4.2 Hogyan állíthatunk elő színeket? .....	85
4.3 Festékek a növény- és állatvilágban.....	88
4.4. Szerkezeti színek az élővilágban .....	91
5. Alkalmazkodás különleges körülményekhez .....	111
5.1 Párolgás, lecsapódás .....	111

5.2. Olvadás, fagyás .....	117
5.3 Szélsőséges hőmérsékletekhez való alkalmazkodás módjai .....	118
6. Irodalom.....	126
7. Ábra-hivatkozások.....	129

# 1. Bevezetés

A természettudományok különböző ágai mind az anyaggal, annak tulajdonságaival és váltoásaival foglalkoznak, de mindegyik más-más szempontból. Az egyes tudományok összefüggéseiből, tárgyi kapcsolataiból következik, hogy az egyik tudomány a másikat szervesen alátámasztja. Míg a 19.–20. század fordulóján a természettudományok differenciálódása volt a jellemző folyamat, a 20. század utolsó évtizedeiben a résztudományok integrálódása figyelhető meg (pl. a biofizika, a molekuláris biológia stb. kialakulása). A természet egységes egészet alkot, a különböző mozgásformák törvényszerűen kapcsolódnak egymáshoz. Bizonyos mozgásformák alaposabban csak más mozgásformák ismerete birtokában érthetők meg. Az anyag minden megnyilvánulási formáját csak a többi megnyilvánulási formákkal való kölcsönhatásban ismerhetjük meg igazán.

Az iskolai oktatásban ugyanakkor - célszerűségi okokból -, 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 földrajz órán elsajátított ismeretek segítségével próbálnak eligazodni. Könnyebbé tehetjük e folyamatot, 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 fizika órán**

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 „észrevesszük” a fizikát a körülöttünk lévő élő természetben. Minden korosztály számára érdekes lehet és mindkét tantárgy szempontjából hasznos is, ha az élővilágot "meghívjuk" a fizika órára.

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 azután, magát az élővilág jelenségeit is mélyebben megérthetjük.

A tantárgyak nem csak egymás számára lehetnek hasznosak. A találkozási pontok felkutatása, az elméleti és gyakorlati ismeretek összekapcsolása mindennapi világunk, épített környezetünk

kialakításában is hasznunkra lehet. Felhívhatjuk a figyelmet arra is, hogy például a növények, az állatok felépítésének, működésének alapos vizsgálatával (biomimetika) éppen az élővilág "adhat tanácsot" akár egy-egy műszaki feladat megoldásához (bionika) is. Közismert, hogy a madarak repülésének megismerése a repülőgépek tervezéséhez, a delfinbőr szerkezetének felderítésével szerzett tapasztalatok az úszó testek burkolatának megváltoztatásával sebességük fokozásához járult hozzá. Az úszók ruhájának készítésekor is alkalmazták az ismereteket, de ma már versenyeken betiltották az ehhez hasonló sebességnövelő fogásokat. A fa, a parafa, az úgynevezett természetes celluláris szerkezetek felépítése és tulajdonságai közötti kapcsolat felkutatása jó mintául szolgált az ipar számára fontos könnyűszerkezetek, habszerű, új tulajdonságú anyagok fémekből (fémhabok), kerámiákból történő tervezéséhez, gyártásához.

### **Kapcsolódási pontok keresése**

A biológia és a fizika kapcsolata sem az alapfokú, sem a középfokú oktatásban nem jelenik meg szembetűnően annak ellenére, hogy a határtudomány, a biofizika már régen önálló tudományággá vált. Az alap- és középfokú oktatásban természetesen nem a biofizika szisztematikus oktatására gondolunk, hanem arra, hogy a fizika törvényeinek tanításához a biológia órán megszerzett ismeretek tanári demonstrációs lehetőségként jól használhatók.

Megváltozott a világ. Manapság nem csak az iskola oktat, nem csak a pedagógus az ismeretek fő forrása. Számos egyéb lehetőség kínálkozik arra, hogy a diákokat a médiából folyamatosan érő információ-áradat eredményét a fizika órán okosan felhasználjuk. A fizika törvényeire épülő, a minden tudományágban használatos egyre tökéletesedő vizsgálati technikákkal (nanotechnológia) az élővilág eddig nem ismert finom részletei is feltáruznak. Az új eredményekről diákjaink számtalan, igen igényesen illusztrált népszerűsítő könyvből, természetfilmből, de az internetről is, ma már a felfedezést követően szinte azonnal tudomást szerezhetnek. Manapság a természettudományok egyes területei közötti kölcsönhatásnak köszönhetően, az újabb felfedezések eredményeit szinte a diákok szeme láttára kell beépíteni egy-egy tantárgy korábban "változtathatatlan" hittananyagába. Ennek lehetünk tanúi a közelmúltban, amikor például a szén módosulatainak tanításakor, a fullerének bekerültek a tananyagba a szén módosulatai közé.

### **Az integráció nevelési értéke**

Ha tanítási munkánk során élünk az integrációs lehetőségekkel, mutatunk néhány konkrét példát a kapcsolódási pontok felismerésére, kialakíthatjuk a tanulóknál azokat a képességeket,

készségeket, amelyek szükségesek az ilyen irányú önálló tudásszerzéshez, ismereteiknek – a megszokottól kissé eltérő módszerrel történő – rendszerezéséhez.

A nevelés során az alkalmazható tudás elsajátítása a cél. E két tárgy említett integrációja példa lehet arra is, hogy megmutassuk, az élő természet jelenségei és a fizikai törvények kapcsolatának feltárása kapcsán az absztrakt formalizmusnak a konkrétal való kapcsolatát is. Nem csak egy-egy fizikai törvény tanításához „vehetünk” példát az élővilágból, vihetünk be biológiai ismereteket a fizika órára, hanem 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 biológia órán is. A természettudományokat oktató tanároknak tantárgyaik érdekes tanítása érdekében érdemes konzultálniuk egymással, hogy tanmenetük kialakításakor ezeket a szempontokat is figyelembe vegyék.

Az iskolai természettudományos nevelés eredményességét feltáró attitűd vizsgálatok szerint a tantárgyak elutasítottságát illetően a biológia a fizikánál kedvezőbb helyzetben van [1]. Ha egyre több találkozási pontot találunk a két tárgy között, akkor a biológia esetleg motivációs jelentőséggel jelenhet meg a fizika tanításakor, szolgálhatja akár a fizika iránti nagyobb érdeklődés felkeltését is, miközben rávilágíthatunk a fizika kulcsszerepére a természeti jelenségek megértésében.

***„A természet egyszerre nagyszerű művész, kreatív tudós és rendkívül ügyes kezű kézműves.”***

*(Kurt Nassau)*

Az idézet igazáról mi magunk is könnyen meggyőződhetünk, ha nyitott szemmel járunk a világban. Gondos, hosszan tartó, körültekintő munkával a fizika szinte minden területéhez találhatunk megfelelő, az élővilágból vett példát. A biológiai példák a fiatalabb korosztály számára ugyan néha csak figyelemfelkeltő jelleggel használhatók, de a diákok fizikai ismeretanyagának bővülésével, a felsőbb osztályokban már, az élővilág jelenségeinek mélyebb elemzésére is szolgálhatnak.

### **Nehézségek**

A tantárgyi koncentráció megvalósulását a gyakorlatban megnehezíti az a tény, hogy a tanárok a főiskolán illetve egyetemen, többnyire csak két szakon kapnak alapos képzést, ezért a természettudományos szakos tanároknak nincsenek meg a szükséges ismereteik a 4 közül a

másik két természettudomány területéről. Másrészt a tudományok eredményei és az ismeretek gyakorlati alkalmazása olyan ütemben fejlődnek, hogy a mindennapi tanári munka mellett ezt nyomon követni szinte lehetetlen. Hisszük, hogy az alábbi néhány részletesen kidolgozott anyag módszert mutathat más jelenségek hasonló feldolgozásához, segítséget adhat a tanárok önképzéséhez illetve továbbképzéséhez. A könyvben említett szemelvények sem fizikából, sem biológiából nem minden esetben kapcsolódnak az általános- és középiskolai tananyaghoz. A mindennapi tanári gyakorlatban a hiányzó ismeretek gyűjtéséhez a nagy internetes gyakorlattal rendelkező tanulókat feltétlenül érdemes bevonni. Az így előálló ismeretanyagból tanári segítséggel azután kiválaszthatjuk a szakmailag helyes és a számunkra megfelelő részleteket. A diák érezheti, hogy kutató munkájával nemcsak, mint egyik alanya, de a tanári munka segítőjeként is aktív részesévé válik a tanítási folyamatnak.

Ez a részmunka, az „együtt-tanulás” egyben jó lehetőség a tanár-diák kapcsolat építésére, jobbítására.

A Gyűjtemény megírásával az volt a cél, hogy a fizika egyes területeihez kapcsolódó szemelvényeken keresztül mintát mutassunk a természettudományok kapcsolódási pontjainak keresésére, egyes témák felhasználására a mindennapi tanítási gyakorlatban, a tanórákon, szakköri foglalkozásokon. A fizikatanárok mellett szeretnénk megszólítani a tanárjelölteket is. A más tudományterületekről viszonylag sok új ismeretet tartalmazó fejezetek miatt a könyv esetleg tanártovábbképzésekhez is hasznos segédeszköznek bizonyulhat.

A tanárképzésben speciálkollégiumi foglalkozásokon már hosszú évek óta sok egyetemi hallgató megismerkedett az itt érintett problémák nagy részével, sőt maguk is készítettek hasonló jelenségeket feldolgozó bemutatókat. A hallgatók általában szívesen foglalkoztak az élő természetből vett „problémákkal”, mert ekkor „észrevették”, a megszokottnak tűnő hétköznapi jelenségeket. Újabb lehetőség kínálkozott számukra arra is, hogyan hasznosíthatók meglévő fizikai ismereteik. Nem utolsó sorban elemzéseikkel maguk számára is érthetőbbé váltak az élő világ dolgai.

## 2. A fák és a fizika

A fák termelik az élővilág számára nélkülözhetetlen oxigén nagy részét (fotoszintézis). Egy hatalmas fa tiszteletet parancsoló látványt nyújt. Mindennapos jelenlétükkel és a környezetükbe vonzott sokféle madárral, rovarral is színesítik életünket. Kivételes szerkezetük és tulajdonságaik folytán az emberiségnek kezdetektől fogva jó szolgálatot tesznek. A fa a legősibb, de még ma is a legszélesebb körben alkalmazott szerkezeti anyag. Több mint 5000 éves épületek, hajók szolgálnak erre bizonyítékul. Még ma is kb. ugyanakkora mennyiséget használnak fel fából a világon, mint acélból.

Érdeemes megismerni e csodálatos képződményeket közelebbről, megpróbálni megérteni tulajdonságaikat, viselkedésüket. A legjobb lehetőség erre az iskola. A különböző tanórákon szerzett ismeretek szintézisével erre teszünk kísérletet, természetesen szűk keretek között a következő fejezetekben.

### 2.1. A fák magassága

#### „Miért nem nőnek a fák az égig?”

Senkit nem lep meg az a kijelentés, hogy nincsenek 1 km magas fák. Nehéz elképzelni azt a fát is, amelyik nagyon magas és egyben vékony is, vagy amely kicsi és egyben nagyon „kövér”.

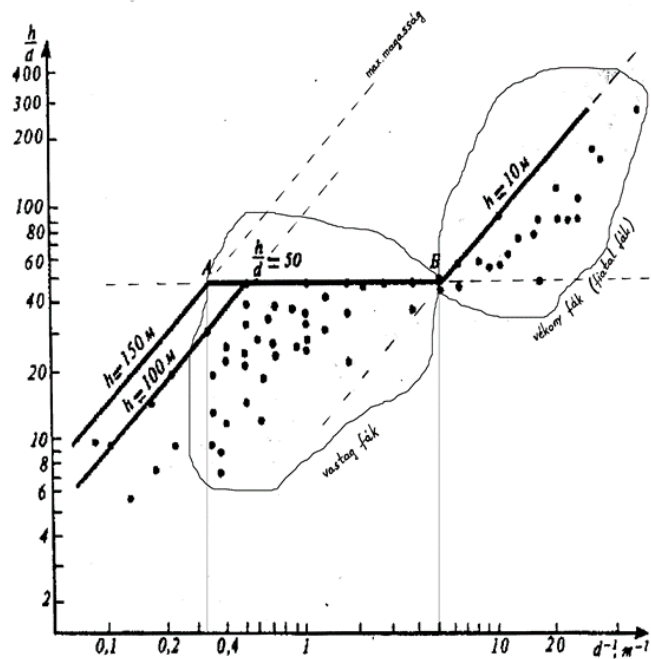
Mitől függhet a fák magassága? Mi szab határt a fák magasságának?

Manapság, az egyre szélesebb körben elterjedő internet világában könnyű adatokat gyűjteni bármiről. De korábban is lejegyezték az élővilágban megfigyelt szembetűnő, nem hétköznapi jelenségeket. Ezekből a megfigyelésekből születtek az élővilág rekordjait feldolgozó könyvek. Sok tapasztalat gyűjthető kísérleti úton is a fák méretéről. Ha ismerjük a különböző méretű és életterű fák  $h$  magasság és  $d$  átmérő adatait, már ebből sok érdekes kapcsolatot felfedezhetünk. Képezzük például a  $h/d$  arányt és ábrázoljuk az  $1/d$  függvényében.

Azt gondolhatnánk, hogy a fák méretarányai a különböző előfordulási helyeken, fajtánként más és más értéket szolgáltatnak. Ennek vizsgálatára meghatározták a  $h$  magasság és a  $d$  átmérő arányt különböző helyeken élő eltérő típusú fák esetén, s a hányadost ábrázolták a faátmérő reciprokának függvényében [2]!

Érdekes eredményre jutottak.





2.1. ábra A  $h/d - 1/d$  grafikon [2].

A fenti ábra alapján megállapíthatjuk:

- Vannak *kövér fák*, ahol  $d > 0,4-0,5$  m (a B ponttól balra), itt a  $h/d$  felső határa  $(h/d)_{\max} = 50$ .
- Vannak *vékony fák* ( $d < 0,2$  m), itt a  $h/d$  nagyobb, mint 50, de a fák magassága itt sem haladja meg a 10-20 métert.
- És végül látható, hogy a *Föld legmagasabb fája* se nagyobb 100-150 m-nél.

Manapság az internet segítségével könnyű meggyőződni az élővilág rekordjairól. Megtalálhatjuk a legmagasabb élő fát, a legöregebb fát, a legnagyobb átmérőjű fát, s a legnagyobb kiterjedésűt is. A teljesség igénye nélkül közöljük az alábbi adatokat néhány korábbi rekorderről.

a fa neve	előfordulása	magassága		átmérője		térfogata	
		(m)	(láb)	(m)	(láb)	(m <sup>3</sup> )	(láb <sup>3</sup> )
<u>General Sherman</u>	Giant Forest	83.79	274.9	31.27	102.6	1486.9	52,508
<u>General Grant</u>	Grant Grove	81.72	268.1	32.77	107.5	1319.8	46,608
President	Giant Forest	73.43	240.9	28.35	93.0	1278.4	45,148
Lincoln	Giant Forest	77.97	255.8	29.96	98.3	1259.3	44,471
Stagg	Alder Creek	74.07	243.0	33.22	109.0	1205.0	42,557



2.2. ábra Óriás mamutfenyők a Kaliforniai Sequoia Nemzeti Parkban.

Jellemző, hogy a tudósok kutató tevékenységének eredményeképpen újabb és újabb rekorderekről szerezhettünk manapság is tudomást. A legutóbbi felfedezés 2006-ban született. A kaliforniai Redwood Nemzeti Parkban találtak rá a 115,55 méter magas mamutfenyőre (*Sequoia Sempervirens*), amelynek a tradíció szerint nevet is adtak, a Hyperion (Hüperion) elnevezéssel illették. Közléseiknek megfelelően egyébként ezen a területen legalább száz olyan mamutfenyő létezik, amelyek magassága meghaladja a 100 métert. Az e helyről készült pontos leírás titkos, védik őket, ezzel megakadályozzák, hogy illetéktelenek kerülhessenek e fák közelébe. A rekorder fák nevét az internet keresőkbe írva, sok érdekes fénykép és video is található a témában.

Mindezek után pusztán fizikai megfontolásokkal próbáljuk értelmezni az 2.1. ábrán látható adatokat. Könnyen rájöhetünk magunk is arra a felismerésre, hogy ha a fa magasságának és átmérőjének aránya túl nagy, akkor a fa nem bírja el a saját súlyát, az alapjára nehezedő terhelést.

Vizsgáljuk meg, hogy milyen fizikai paraméterek szükségesek a fák méretének értelmezéséhez?

A fa  $\rho$  sűrűségének,  $\sigma$  szakítószilárdságának (törési szilárdság) ismerete, mint fizikai adat, első közelítésben egyszerű becslésekhez elegendő. Sokféle fa létezik, melyek fizikai paraméterei általában különbözők. Modell-számításainkhoz az alábbi táblázatban feltüntetett néhány konkrét sűrűség- és szilárdság adatból kiválaszthatunk egy-egy értéket. Ismerve a tény, hogy a

fa szerkezetét tekintve anizotróp, nem meglepő, hogy a források a fizikai paraméterek értékére is egy-egy tartományt jelölnek meg.[3]

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (MPa)
tölgy	580	97 - 52
fenyő	400-700	89 - 47
kőris	670	116 - 53
balsafa	200	

2.1. táblázat

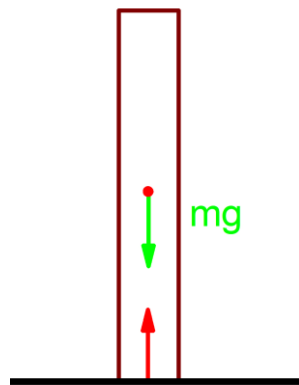
Nem követünk el túl nagy hibát, ha a táblázatban látható számértékek alapján számításainkhoz a sűrűsége és a szilárdságra az alábbi értékeket választjuk:

$$\rho = 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad \sigma_{max} \approx 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

### Függőleges fák

Milyen magas is lehet a „szigorúan” függőlegesen növény fa?

Legegyszerűbb modellünk a földbe szúrt  $A$  alapterületű, henger alakú,  $m$  tömegű,  $h$  magasságú pálca.



2.3. ábra Függőleges „pálca-modell”

A fa talajjal érintkező felületén, a fa tövében a teljes súlyból ébredő maximális feszültség:

$$\sigma_{max} = \frac{mg}{A} = \rho gh_{max}$$

Az említett sűrűség- és szilárdság értékek felhasználásával, a fa maximális magasságára

$$h_{max} = 2000 \text{ m}$$

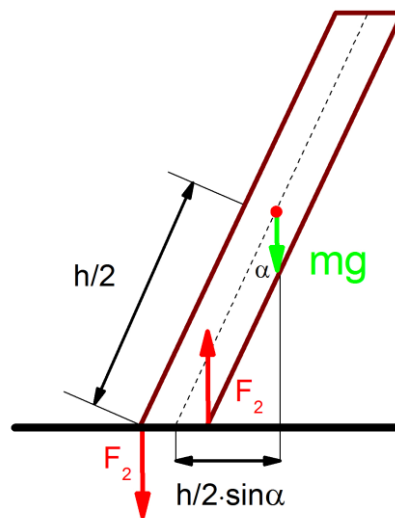
adódik. Ilyen magas fa már pedig nincs a természetben! Hol lehet a tévedés?

A fák nem nőnek szigorúan függőlegesen. Finomítsunk feltételeinken, végezzünk számítást “ferde” fák esetére!

### Ferde fák

Ha a fa ferdén nő, akkor a fára ható  $mg$  nehézségi erőnek forgató hatása is van. A fában, a talajjal érintkező keresztmetszetben **erők** ébrednek, melyek forgató hatásai a nehézségi erő forgatónyomatékát ellensúlyozzák.

Az alábbi ábra segítségével számítsuk ki az említett forgatónyomatékokat.



2.4. ábra Ferde „pálca-modell”.

A nehézségi erő forgatónyomatéka:

$$M_1 = mg \frac{h}{2} \sin \alpha .$$

A fa  $m$  tömegét felírhatjuk a térfogat és sűrűség szorzataként,

$$m = \rho h \frac{d^2}{4} \pi$$

s a forgatónyomaték formulájába helyettesítve, a következő kifejezés adódik:

$$M_1 = \rho h \frac{d^2}{4} \pi g \frac{h}{2} \sin \alpha .$$

A 2.4. ábrán bejelölt  $F_2$  erő forgatónyomatékát középiskolai ismeretek alapján a következő megfontolásokkal csak becsülni tudjuk:

A fatörzs talajjal érintkező felületében különböző helyeken különböző  $\sigma$  feszültség ébred. Emiatt az átmérő mentén különböző erőhatásokkal kell számolni. Mivel az erő a feszültség és a keresztmetszet szorzata, az erő közelíthető az

$$F_2 \approx \sigma d^2 ,$$

s az erő forgatónyomatéka pedig

$$M_2 = F_2 d \approx \sigma d^3$$

kifejezéssel. A pontos számításokat egy  $h$  hosszúságú rúd lehajlási deformációjának itt nem elvégzett részletes elemzésével kapjuk, mely szerint az  $M_2$  forgatónyomaték pontos kifejezése:

$$M_2 = \frac{\pi}{32} \sigma d^3 .$$

Egyensúly esetén az  $M_1 = M_2$ , ezért

$$\rho h \frac{d^2}{4} \pi g \frac{h}{2} \sin \alpha = \frac{\pi}{32} \sigma d^3$$

ahonnan a  $h$  magasság és a  $d$  átmérő arányára a

$$\frac{h}{d} = \frac{\sigma}{4\rho g h \sin \alpha}$$

összefüggést kapjuk. Ha ebbe a kifejezésbe is beírjuk a megfelelő fizikai mennyiségek már korábban említett értékeit, akkor a fa magasság-átmérő arányára a

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{max} = \frac{500}{h \sin \alpha} = \frac{22}{\sqrt{d \sin \alpha}}$$

adódik.

Mit olvashatunk ki ebből az eredményből?

A fák növekedésekor a fa méreteire a függőleges iránytól való eltérés tehát határt szab.

Ha visszatérünk az 2.1. ábra grafikonjához, a vízszintes szakasz mentén a magasság-átmérő arányt

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{max} \approx 50$$

értékkel számolva, a fa magassága az alábbiak szerint alakul:

$$h \sin \alpha = 10$$

Ha a fa magasságát például 100 méternek választjuk, akkor a  $\sin \alpha = 0,1$  miatt a függőlegestől mért szögre  $\alpha \cong 3^\circ$  adódik. Ez olyan kis szögérték, hogy szabad szemmel szinte nem is látszik eltérésnek. Mindenesetre megállapíthatjuk, hogy a nagyon magas fák többnyire függőlegesek. Az ausztráliai eukaliptuszok ilyenek, valóban szinte függőlegesen nőnek.



2.5. ábra Ausztráliai eukaliptuszok

Ha most a szöveget rögzítjük, legyen például  $\alpha = 20^\circ$ , akkor a fa magassága  $h \approx 30$  m-nek adódik. Ha a fák törzse a függőlegetől jelentősen eltér, akkor magasságuk többnyire nem haladja meg a 30 métert.

A tartósan ferde fák esetén is van korlát a magasság-átmérő adatokra. Ha a fatörzs a függőlegeshez 20-30 fokban hajlik, akkor a szög szinusza  $0,3 \leq \sin\alpha \leq 0,5$  tartományban változhat. Ilyen esetekben a magasság-átmérő összefüggésre a

$$(h)_{max} \approx (30 - 40)d^{1/2}$$

adódik. Ennek megfelelően például a 2-3 méter átmérőjű „kövér” tölgyfák nem nőnek 40-50 méternél magasabbra. Ha valamilyen oknál fogva a vékony törzsű fák mégis magasabbak, akkor a fa stabilitásának biztosítása érdekében - a megfelelő  $h/d$  arány beállításához - a fa a talajjal érintkező keresztmetszetét **támpillérek** növesztésével megnöveli. A tropikus klímájú vidékeken, ahol a fény és a csapadék is rendelkezésre áll, számos példa látható erre a megoldásra.



2.6. ábra Trópusi fa támpillére

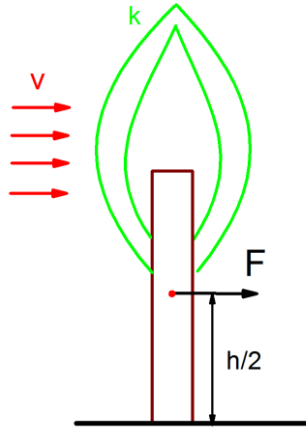
### **A fák és a szél**

Nem ritkán látni olyan erdő részleteket, amelyekben a fák ferdén nőnek, jelentős részük többnyire azonos irányban dőlt. A látvány olyan területekhez kapcsolódik, melyeken gyakran fúj erősen a szél, s a fákat a szél miatt szinte mindig egy meghatározott irányból éri jelentős igénybevétel.



2.7. ábra Mediterrán tengerparti fenyves

A fák méretének, alakjának kialakulásában jelentős szerepet jut az őket érő külső hatásoknak, így pl. a szélnek. A fák törzsének dőléséből az ott uralkodó szélirányra következtethetünk. Bővítsük „pálca” modellünket az alábbi ábrának megfelelően „lombkoronával”.

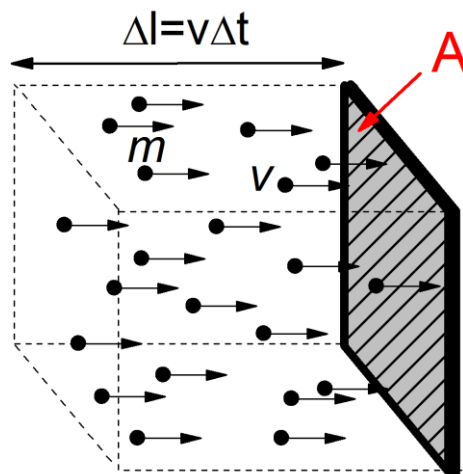


2.8. ábra „Pálca-modell” lombkoronával.

A szél a fa koronájába „kapaszkodva” igyekszik a fát felborítani, e hatásnak a fa ellenáll. A talajjal érintkező felületében ébredő erők forgatónyomatéka tart egyensúlyt a szél hatásával. Az  $F$  erő erőtvényét és a forgatónyomatékát egyszerű gondolatmenettel meghatározhatjuk. Ehhez segítségül hívjuk az ideális gáz kinetikus gázmodelljének elemzésekor használt megfontolásokat.

Vajon mekkora erőt fejt ki a  $v$  sebességgel mozgó részecskeáram az áramlás sebességére merőleges felületre? Mivel ez a témakör nem tartozik a középiskolai tananyaghoz, a válaszhoz tegyünk egy kis kitérőt! A diákok már meglévő ismereteire támaszkodva néhány egyszerű feladat megoldásán keresztül segíthetünk eljutni a közegellenállási erő erőtvényéhez.

Számítsuk ki először, hogy a  $v$  sebességgel mozgó,  $m$  tömegű részecskékből álló részecskeáram mekkora erőt fejt ki a részecskék méreténél sokkal nagyobb tömegű és kiterjedésű, az áramlás sebességére merőlegesen álló felületre (2.9. ábra).



2.9. ábra. Az 'A' felületű lapot  $\Delta t$  idő alatt elérő részecskék.



A falon észlelhető erőhatást az egyes részecskék ütközése idézi elő. Ütközéskor – a kölcsönhatás törvénye miatt –, a fal is erőt gyakorol a részecskékre, emiatt mozgásmennyiségük, impulzusuk megváltozik. A falra (illetve a részecskére) ható erő nagysága attól függ, hogy a részecske ütközése rugalmas vagy rugalmatlan.

Okozza egy részecske impulzusváltozását  $F'$  erő a fallal történő kölcsönhatás során. Ekkor a fal által a részecskének  $\Delta t$  idő alatt átadott erőlkés megegyezik a részecske mozgásmennyiségének  $\Delta I$  megváltozásával, azaz

$$F' \Delta t = \Delta I .$$

Ha a fal merőleges az  $m$  tömegű részecske  $v$  sebességére, ekkor a részecske impulzusváltozása a fallal történő tökéletesen rugalmas ütközése (visszapattanása) során  $\Delta I_{rug} = -2mv$ , tökéletesen rugalmatlan ütközéskor, (ha nem pattan vissza, hanem ott leesik) pedig csak

$$\Delta I_{rtlan} = -mv$$

Határozzuk meg a falat érő összes részecske együttes hatását!

Jelölje  $n$  az egységnyi térfogatban lévő részecskék számát, a részecskesűrűséget. Mindazok a részecskék eléri a falat és ütköznek az  $A$  területű fallal, amelyek a fal előtti  $V = Av\Delta t$  térfogatban találhatóak, azaz az ilyen részecskék száma:

$$N = nV = nAv\Delta t .$$

A  $N$  számú részecske által a falra kifejtett erőre az  $F = -NF'$  miatt az

$$F = -nAv\Delta t \frac{\Delta I}{\Delta t} = -nAv\Delta I$$

adódik. Ha ezután az impulzusváltozás helyére beírjuk a tökéletesen rugalmas ütközés esetét, akkor az

$$F_{rug} = 2nmAv^2 ,$$

a tökéletesen rugalmatlan ütközésre pedig az

$$F_{rtlan} = nmAv^2 ,$$

azaz az előző érték fele adódik.

A levegőáram hatása a rugalmatlan ütközés esetével értelmezhető. Helyettesítsük az  $F_{rtlan}$  erő kifejezésében a térfogategységben lévő anyag tömegét, az anyagsűrűséget kifejező  $nm$  helyébe, az áramló közeg  $\rho$  sűrűségét.

A falba  $v$  sebességgel ütköző  $\rho$  sűrűségű levegőáram a falra

$$F = \rho Av^2$$

erőt gyakorol.

A fa homloklfelületén a szél nyomása:

$$p = \frac{F}{A} = \rho v^2.$$

Ekkora kitérő után visszakanyarodhatunk az eredeti problémához.

Kiszámíthatjuk tehát a fát „kifordítani” törekvő  $F$  erőt és annak  $M_{sz}$  forgatónyomatékát a talajjal érintkező felület középpontjára vonatkoztatva a 2.8. ábra alapján:

Az erő erőtvénye az

$$F = A\rho v^2$$

ahol  $A$  az ún. homlokfelület, a  $v$  sebességre merőleges felület területe. Esetünkben, a pálcamodellben,  $A = kdh$ , itt  $k$ -val vesszük figyelembe a fa lombkoronájának alakját. Kis koronájú fáknál  $0,5 < k < 1$ , míg nagy koronájúnál a  $k > 1$  értékekkel közelíthetünk.

A szél okozta forgatónyomatékra

$$M_{sz} = F \frac{h}{2} = \rho A v^2 \frac{h}{2} = \frac{1}{2} \rho k d h^2 v^2.$$

Ha most csupán a szél hatását vesszük figyelembe, akkor a szél hatása miatt ébrednek a fában erők, amelyek  $M$  forgatónyomatékáról már az előző fejtegetéseink során szót ejtettünk,

$$M_{sz} = M,$$

$$\frac{1}{2} \rho k d h^2 v^2 = \frac{\pi}{32} d^3 \sigma$$

ahonnan

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{\pi}{16k}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho v^2}}.$$

Helyettesítsünk be a fenti képletbe a paraméterek valóságos eseteknek megfelelő értékeit: a levegő sűrűsége  $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\sigma = 10^7 \text{ N/m}^2$ , és válasszunk egy elég erős szelet, pl. a kb. 100 km/h sebességűt, ekkor

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{max} \approx \frac{40}{\sqrt{k}}.$$

Látható, hogy a szél a fák alakját jellemző  $k$  paraméteren keresztül van hatással a fák méretének alakításában. A fenti arány is a 2.1. ábra platójának megfelelő  $h/d \cong 50$  értéket erősíti.

A továbbiakban modellünket módosítjuk, figyelembe vesszük, hogy a **fa élő** képződmény.

Támaszkodhatunk a diákok középiskolában a fákról tanult biológiai ismereteire, amelyeket „Az élőlények teste, életműködése és környezete” témakörben a fás szár szerkezetéről tanultak.

## 2.2. A fák vízforgalma

A hajtásos növények vízforgalma bonyolult, testükbe a víz túlnyomó része rendszerint a gyökéren át jut be, s a leveleken át gáz alakban távozik. Így van ez a fák esetében is, bennük *vízfelvétel*ből, hosszú távú *vízszállítás*ból és *vízleadás*ból álló irányított mozgás folyik. Vizsgáljuk meg milyen fizikai folyamatokkal elemezhető a folyadéktranszport.

A hajtásos növényekben a víz spontán mozgásának törvényeként emlegetik az alábbi, az elektromosságban megismert, Ohm-törvényhez hasonló kifejezést:

$$I = \frac{\text{vízpotenciál - különbség}}{\text{vízforgalmi ellenállások}}$$

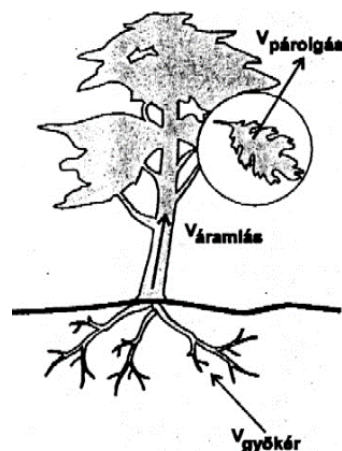
Mit jelentenek az egyes elnevezések? Milyen paraméterektől függ a „vízforgalmi ellenállás”?

Megpróbálunk fizikai ismereteink segítségével a fenti kérdésekre válaszolni.

A valóságban az élő fában bonyolult biológiai folyamatok játszódnak le, megfontolásaink leegyszerűsítettek, becsléseink során a részfolyamatok mögött álló mechanizmusok közül csak a dominánsra támaszkodunk. Kiderül, hogy még ilyen durva közelítéssel is a fák méretét, felépítését illetően érdekes, s a valósággal összhangban lévő következtetésekhez juthatunk.

Becsüljük meg a vízmozgás sebességét a folyadéktranszport egyes folyamataiban.

A hajtásos növények vízfelvétele a gyökerek hajszálerein keresztül *diffúzióval*, a hosszú távú vízszállítás a fa törzsében lévő kapilláriscsövekben *áramlással* történik, a *párolgás* helyei döntően a levelek felületén található gázcsere nyílások. Megfontolásainkban azzal a feltevéssel élünk, hogy a gyökereken keresztül a fába jutott víz teljes mennyisége átfolyik a fa törzsén, s veszteség nélkül jut el a levelekhez, a víz összes tömege megmarad [4]. Határozzuk meg a vízmozgás sebességét az egyes részfolyamatokban, s vegyük figyelembe a folytonossági törvényt (2.10. ábra). Kezdjük elemzésünket a lombkoronától a gyökérzet felé haladva.



2.10. ábra A fa vízforgalmát mutató sematikus ábra

## Párolgás

A vízszállítás fő mozgatója a párolgás. A Nap melegítő hatása állandó, a fa a túlmelegedéstől levelein keresztül történő párolgással védekezik. Gyenge szellő esetén az elpárolgott víz a levelek felszínének közvetlen közeléből gyorsabban távozik el, felgyorsítva ezzel a párolgást. A párolgáshoz szükséges hőt a Nap sugárzás útján szolgáltatja. A párolgási sebesség alsó határát (a szélcsendes időben jellemző sebességet) megbecsülhetjük, ha a két folyamatot külön-külön leíró hőt összehasonlítjuk. Végezzünk számítást!

Ha a Naptól a Föld felületegységére időegység (s) alatt érkező közepes hőáram  $q$ , jelentse  $\alpha$  ( $\alpha \approx 0,2 - 0,3$ ) a hőáramnak, a besugárzott felület által elnyelt hányadát, s jelölje  $A_l$  levelek összes felületét. Ekkor a párolgásra fordított hő

$$Q_1 = \alpha q A_l$$

Az időegység (s) alatt elpárolgott víz  $\rho_v v_p$  tömegét a  $L_p$  párolgáshővel szorozva adódik a párolgás hőigénye. A két folyamat összehasonlításának eredményeként a

$$\alpha q A_l = L_p \rho_v v_p A_l$$

egyenlőségből a párolgás sebességére a

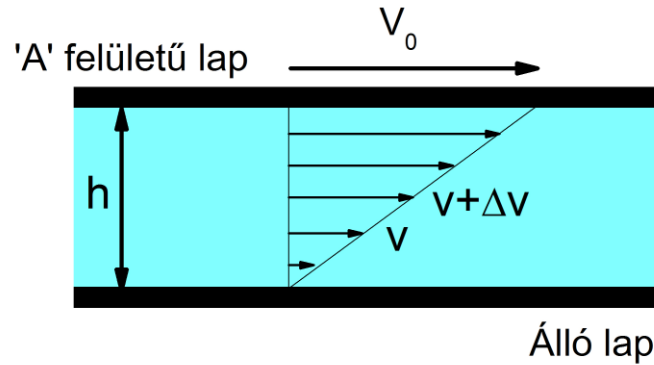
$$v_p = \frac{\alpha q}{L_p \rho_v}$$

kapjuk. Helyettesítsük be a kifejezésbe a paraméterek megfelelő értékeit, ( $L_p = 2 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ ,  $\rho_v = 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $q = 10^3 \text{ W/m}^2$ ), ekkor a sebesség alsó határára a  $v_p \approx 10^{-7} \text{ m/s}$  érték adódik.

## Vízáramlás a fatörzsben

A fa törzsében a víz a gyökértől a fa lombja irányába a valaha élt sejtek vázaiból keletkezett, vékony csatornában, kapillárisokban áramlik. A csatornák átmérője a tűlevelű fák esetén körülbelül  $10^{-5} \text{ m}$ , a lombos fáknál néhányszor  $10^{-4} \text{ m}$ . A vékony csőben lassan áramló folyadékot a cső fala lassítja, de az egyes folyadékrétegek egymás mozgását is befolyásolják. Emiatt a folyadék sebessége a cső teljes keresztmetszetében más és más értéket mutat. Jól ismert tény, hogy például a kajakosok a folyó különböző helyein tapasztalt eltérő áramlási sebességét kihasználják. Energiájukkal takarékoskodnak, ezért a folyón felfelé a parthoz közel evezve közlekednek, míg lefelé mozgáskor, a gyorsabb áramlás miatt, a folyó közepét választják. Csőben mozgó folyadék esetén is hasonló a helyzet, az áramlás a csőfállal történő súrlódás miatt szinte zérus sebességűre csökken, s a cső közepén éri el a legnagyobb értéket. Kvantitatív megfontolások érdekében képzeljünk el először síklapok között megvalósuló folyadékáramlást. Rögzítsük az egyik lapot, s mozgassuk  $v_0$  sebességgel a másikat. Legyen az

egyek lapok felülete elég nagy a közöttük lévő távolsághoz képest. Osszuk egyenlő részekre a két lap közötti távolságot. Az egyes rétegek egymás mozgását befolyásolják, sebességük a mozgó lappal érintkező réteg  $v_0$  sebességéről egyenletesen csökken az álló lap zérus sebességére (2.11. ábra).



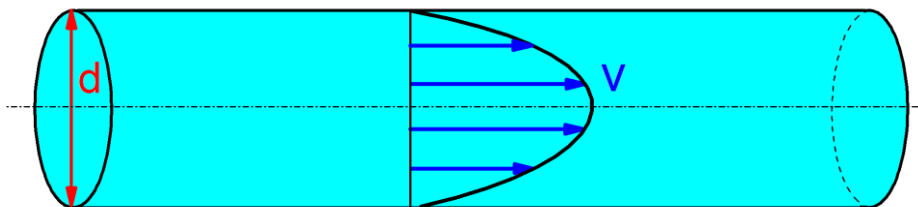
2.11. ábra Sebesség-profil 'A' felületű lapok között.

A rétegek között belső súrlódás, (viszkózitás) működik, melynek erőtvényét,

$$F = \eta A \frac{v}{h}$$

Newton-féle súrlódási törvénynek nevezzük. Az  $A$  az egymástól  $h$  távolságra lévő lapok felületének területe,  $\eta$  a belső súrlódási, viszkózitási együttható,  $v/h$  a sebesség változása (sebesség-gradiens) a függőleges irányban (2.11. ábra).

Csőben történő áramláskor a rétegek szintén cső alakúak, az egyes csőszerű rétegek egymás mozgását a cső palástja mentén súrlódva akadályozzák. A  $d$  átmérőjű, igen vékony vízszintes csőben áramló folyadék sebessége a faltól a sugár mentén a cső közepéig  $v$  értékre a 2.12. ábrán feltüntetett módon nő,



2.12. ábra Sebesség-profil csőben.

az  $F$  belső súrlódási erőt a  $v$  sebességgel kifejezve az

$$F = \eta l d \frac{v}{h} = \eta v l$$

formulával közelíthetjük.

A súrlódási veszteségek pótlásához, ahhoz, hogy a folyadék a csőben **egyenletesen** áramoljon, a cső két vége között  $\Delta p$  nyomáskülönbséget kell biztosítani. A nyomáskülönbség jelenléte miatt a folyadékoszlopra

$$F = \Delta p \frac{\pi d^2}{4}$$

erő hat, amely kompenzálja a viszkozitás miatti veszteséget. A két erő egyenlőségéből

$$\Delta p \frac{\pi d^2}{4} \approx \eta \nu l$$

a  $\Delta p$  nyomáskülönbségre a ( $\frac{\pi}{4} \approx 1$ )

$$\Delta p \approx \frac{\eta \nu l}{d^2}$$

összefüggés adódik. A súrlódásos áramlásra vonatkozó pontosabb számítások szerint (Hagen-Poiseuille törvény) a fenti közelítő formula a

$$\Delta p = \frac{32\eta \nu l}{d^2}$$

kifejezésre módosul.

Itt kaphatunk választ arra a kérdésre, hogy mit jelentenek a víz mozgására vonatkozó „Ohm-törvényben” az egyes kifejezések. Határozzuk meg a cső keresztmetszetén időegység alatt átáramlott folyadék mennyiségét, amit *hozamnak* vagy az áramlás *intenzitásának* is szoktak nevezni. Alkalmazzuk a cső keresztmetszetében a valóságban tapasztalható ún. parabolikus sebességprofil, ekkor az intenzitásra adódik

$$I = \frac{\pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} \frac{d^4}{2^4}$$

A fenti kifejezést megfelelő módon átrendezve, azonnal látható a magyarázat!

A vízpotenciál-különbség nem más, mint az  $l$  hosszúságú szakaszon fennálló nyomáskülönbség, a nyomásesés, vagy nyomásgradiens

$$I = \frac{\Delta p / l}{X}$$

és a nevezőben lévő  $X$  jelenti a „vízforgalmi ellenállásokat”:

$$X = \frac{8\eta 2^4}{\pi d^4}$$

Látható, hogy az ellenállást a cső átmérője és az áramló folyadék dinamikai viszkozitása határozza meg. Egyszerűen azt mondhatjuk, hogy az ellenállás jelentősen lecsökken, ha a cső átmérője csak kevéssel változik! Ez a törvényszerűség másféle csövekben történő áramlásra is igaz. Például ha a véráramlást az emberi szervezetben ezzel a törvénnyel közelítjük, akkor már

érthető, hogy egyes érrendszeri betegségekben már kismértékű értágítás is érezhető vérellátás javítást eredményez.

Az elmondottak vízszintes csőben történő áramlásra vonatkoztak.

A fa törzsében a kapillárisok többnyire függőlegesek. A függőlegesen felfelé áramló víz esetén a víz  $h$  magasságra történő emelésére is szükség van. Ezért a fent számított  $\Delta p$  nyomáskülönbség a hidrosztatikai nyomással kiegészül a

$$\Delta p' = \rho_v g h + \frac{32\eta h v}{d^2} (*)$$

módon. Bevezetve az áramló közegek sajátságait néha jobban jellemző  $\nu$  (nú görög betű) kinematikai viszkozitást,  $\nu = \eta/\rho_v$  a fenti összefüggés a

$$\Delta p' = \rho_v h \left( g + \frac{32\nu v}{d^2} \right)$$

alakot ölti.

Ahhoz, hogy a víz áramlásának egy jellemző áramlási sebességértékéhez juthassunk, határozzuk meg a (\*) jelölt függvény töréspontjához tartozó sebességet, amely a

$$v_{krit} = \frac{g d_{krit}^2}{32\nu}$$

kifejezéssel egyenlő. Ha a képletbe a korábban már említett megfelelő paramétereket helyettesítjük, akkor a sebesség  $m/s$  egységben kapott értékére

$$v_{krit} \approx 3 \cdot 10^5 d_{krit}^2$$

adódik. Az áramlás sebessége tülevelű- és lombos fákra vonatkozóan a vizet szállító kapillárisok eltérő átmérője miatt különbözik, tülevelű- és lombos fák esetén külön-külön  $v_{tü} \approx 10^{-5} m/s$ , illetve  $v_{lo} \approx 10^{-3} m/s$  értékekkel jellemezhető. A sebességeket a hétköznapi használathoz közelebb álló, szemléletesebb egységekben kifejezve a kapott értékek, tülevelű fáknál a  $v \approx 10 cm/h$ , lombos fák esetén pedig  $v \sim 10 m/h$ , amelyek jobban érzékeltetik a jelentős különbséget a két esetben. Vártuk is, hogy a lombos fák nagyobb párolgási vízvesztése folyamatosan csak sokkal (két nagyságrenddel) nagyobb fatörzsbeli áramlási sebességgel pótolható.

A megfontolásainkban alkalmazott durva becslés ellenére a kapott értékek az irodalomban talált, mért értékekkel jó egyezést adnak [4].

Az áramlási sebesség  $v_{krit}$  kritikus értékét behelyettesítve a (\*) egyenletbe, a fa törzsének két vége között a folyamatos áramláshoz szükséges  $\Delta p$  nyomáskülönbségre a

$$\Delta p \approx 2\rho g h$$

adódik. A nyomáskülönbség a fatörzs mentén a trópusi esőerdőkben található 100 méternél is magasabb fák esetén közel 30 atmoszféra is lehet. Arról e helyen csak annyit jegyeznénk meg, hogy a fa a leveleinek fonákján található, gázcsere-nyílásain át történő párologtatásával teremti meg a levelek sejtjeiben, szöveteiben azt az oldatkonzentrációt, amelynek a féligáteresztő falakon át történő hígulása okozza az ozmózisnyomást. Így teremődik a folyamatos áramláshoz szükséges, a fatörzs teljes hossza mentén fellépő, a 20-30 atmoszférát is kitevő nagy nyomáskülönbség.

### A vízfelvétel

Mint ismeretes, a tápanyagfelvétel bonyolult folyamata a gyökereken keresztül történik. Egyszerűsítsük le e folyamatot a hajszálgökök féligáteresztő sejtfalain keresztül történő diffúzióra. E folyamat karakterisztikus sebességét becsüljük egyszerűen abból, hogy a víz molekuláinak a talajból a közel  $10^{-8}$  méter vastagságú falon diffúzióval kell átjutniuk. A folyamat részletes elemzése nélkül közöljük, - nem követünk el túl nagy hibát -, ha a diffúzió sebességét hasonló nagyságrendben, azaz  $v_d \approx 10^{-8} \text{ m/s}$  -nak választjuk [4].

Az alábbi idézet alátámasztja, hogy a hajszálgökök „munkája”, mert igen gazdagon hálózódik be a talajt igen hatékony.

„A gyökerek összterfoglata bámulatra méltó. Egy elszánt kutató egyszer megállapította, hogy egyetlen rozsnyvénynek 13 815 762 gyökere volt, ezek hosszúsága összesen 619 kilométert tett ki. E vékony gyökerek teljes felülete 237 négyzetméter – egy kosárlabdapálya területének több mint a fele. A növény gyökereinek napi növekményét 5 kilométerre becsülték. A gyökereken 14 milliárd, összesen mintegy 2000 méternyi gyökérszőr volt.” (A természet ABC-je, Válogatás, Reader's Digest Kiadó Kft. Budapest, 1995, 110.)

Ismerve most már a vízmozgás sebességének közelítő értékeit a fa vízforgalmának három részfolyamatában, megbecsülhetjük a fa egyes részeinek kiterjedését. A tömegmegmaradás törvénye miatt a hajszálgökök összes felületén át a fába jutott vízmennyiség vándorol a fa törzsén keresztül, s az összes víz eljut a levelek felületére. A párolgás a víz nagy részét érinti, a fa a felvett vízmennyiség mintegy 90 százalékát elpárologtatja. A fa felépítésére, az egyes részeinek arányaira jó becslést kaphatunk a folytonossági törvény segítségével.

A folytonossági (kontinuitási) törvénynek megfelelően ugyanis az egyes folyamatokban szereplő egységek, - a gyökér  $A_{gy}$ , a fa törzsének  $A_t$ , a falevelek  $A_l$  – összes területe a megfelelő folyamatok jellegzetes sebességeivel szorozva állandó értéket adnak, azaz

$$v_p A_l = v_a A_t = v_d A_{gy}$$



Ha a fenti képletbe a megfelelő sebességértékeket behelyettesítjük, akkor

$$10^{-7}A_l = 10^{-5}A_t = 10^{-8}A_{gy}$$

arányosságot kapjuk. Válasszuk egységnyinek a fatörzs összes olyan kapillárisának keresztmetszetét (területét), amelyek érintettek a víz szállításában, akkor a fentiek miatt a levelek összes felszínére ennek kb. 100-szorosa, a hajszálgyökerek összes felszínére pedig 1000-szeres érték adódik [4].

A fenti, a fa vízforgalmáról szóló, pusztán fizikai alapokra támaszkodó egyszerű eszmefuttatás lehetővé tette a fák felépítésének értelmezését. A kép természetesen igen leegyszerűsített, arra azonban jó, hogy észrevegyük a fizikai törvények fontosságát, ismeretük hasznosságát mindenütt. Szükségét érezzük annak, hogy meggyőződjünk magunk is leegyszerűsített számításaink eredményeinek valóságtartalmáról. Segíthet ebben a biológiai szakirodalom. A fizikai alapokon nyugvó elemzéseink után az alábbi szövegeket olvasva már magunk is „kitalálhatjuk” a leírtak háttérében lévő fizikai tartalmakat.

#### **A becslés eredményét megerősítő szemelvények biológiai szakirodalomból:**

1. *A szívóerő, amely a fában 40 bar-t is elér, 1-150 m/h sebességgel emeli a gyökerekig lenyúló vezetékeket megtöltő összefüggő vízoszlopot. A kb. 1 bar külső légnyomás, amely 10 méter magas vízoszloppal tart egyensúlyt, nem elegendő a szállításához.”*

(SH-Atlasz, Biológia, Springer Hungarica, 1992 291.o.)

2. *...A számítások szerint egy 100 méter magas fában csak akkor lehet folyamatos a vízszállítás, ha a szívóerő legalább 2 megapaszkál, a légköri nyomás hússzorosa.*

*...A vízmozgás sebességét mindig az a részfolyamat szabja meg, amelynek az ellenállása a legnagyobb, így a sebesség az egyes növényi részekben a vízpotenciál-különbség és az ellenállás hányadosként adható meg....*

*A vízszállításban csak az utolsó 1-2 évben képződött faelemek vesznek részt.*

*...Az átlagos csapadék mennyiségéből kiindulva készítettünk közelítő becslést a vízszállításra... (amelyből), percenként 0.4-1.3 méteres vízszállítási sebesség adódik.”*

Béres Csilla: „Mi van a fatörzsben? I. A fák vízforgalma”,

Élet és Tudomány, **50-51.** (1999)

E két idézet is jól mutatja, hogy egy kis fizikai megfontolás után a biológiában megszokott fogalmak (pl. szívóerő, amely nyomáskülönbség) gazdagabb tartalommal töltődnek meg.

### 2.3. A fa növekedésének folyamata

A fa növekedésének üteme az idő múlásával lelassul. A kaliforniai mamutfenyők kb. 3000 évesek, de magasságuk nem éri el a 90 métert.

Milyen biológiai megszorítás érvényesül a fák növekedésének lassításakor?

A folyamat megértéséhez további biológiai ismereteket kell szereznünk a fák életműködéséről. Ezeknek megfelelően a számításainkhoz korábban használt modellt, „a földbe szúrt pálca” képhez képest ismét új ismeret beépítésével még tovább kell fejleszteni.

A mérsékelt égövi fák növekedési irányára merőleges metszetén látható szerkezetben találhatók az évgűrűk. A kéreg közelében lévő, általában világosabb terület a **szíjács**. A belső, sötétebb évgűrűket tartalmazó rész a **geszt**. A két tartományt a kambium választja el. A geszt a már elhalt sejtekből álló, a gyökér felől történő vízzállító kapillárisokból áll, s főleg tartó szerepe van. A kambiumtól a kéregig terjedő szíjács tartalmazza az élő sejteket, a növekedés ebben a tartományban történik. Itt található az a kapillárisok, melyekben a levelek felől a gyökerek irányába történik a tápláló oldat szállítása.



2.13. ábra. Évgűrűk.

A következőkben megbecsüljük a fa növekedésének időbeni változását. Ehhez használjuk az újonnan szerzett biológiai ismereteinket.

Az évgűrűk az idő múlásával keskenyednek, kerületük nő, területük állandó

$$A_{\text{évgy}}(t) \approx \text{állandó} .$$

A vízzállításban a kéreghez közeli **kevés** évgűrű vesz részt:

$$N_{\text{szállít}} < N_{\text{max}} .$$

A vízzállításban résztvevő fatörzsfelület területe:

$$A(t) = A_{\text{évgy}}(t) \cdot N_{\text{szállít}}$$

Az egy év alatt szállított víz mennyisége, a víz tömege:

$$M(t) = \rho_v v \cdot A(t) \cdot t_{ev} ,$$

ahol  $t_{ev}$  a szállítás tiszta ideje, éjszaka a fa pihen, nem történik szállítás.

A növény nem fordítja fotoszintézisre a szállított víz teljes mennyiségét. A fotoszintézisre fordított  $\Delta m(t)$  hányad, amely az évenkénti szállított víz  $M(t)$  tömegének egy hányada, fordítódik a fa tömegének növekedésére. Irodalmi adatokból ismeretes, hogy ez a hányad időben állandó [4],

$$k = \frac{\Delta m(t)}{M(t)} \approx \text{állandó} .$$

A fa évenkénti tömegnövekedése:

$$\Delta m(t) = kM(t) = k\rho_v v A(t) \cdot t_{ev}$$

ahonnan látható, hogy az évente előálló tömegnövekedés

$$\Delta m(t) \approx \text{állandó} .$$

Ennek megfelelően a fa  $m(t)$  tömege az időnek lineáris függvénye, azaz

$$m(t) \approx t$$

Másrészt a fa tömegének változása,  $m(t) = \rho_{fa} V(t)$  amelyből a fa adatait felhasználva:

$$V(t) \approx d^2 h(t)$$

továbbá alkalmazva a korábbi fejtegetéseinkből megismert

$$\frac{h}{d} \approx 50$$

adódik a fa tömegére az

$$m(t) \approx h^3(t)$$

Ezek után már a fenti egyenletekből megkaphatjuk, hogy a fa magassága az idő múlásával a

$$h(t) \sim t^{1/3}$$

módon változik, amely függvényből egyértelmű a növekedés lassulása [4].

## 2.4. A fakérgék mintázata

Erdőben, parkokban sétálgatva az érdeklődő szemlélőnek egyebek mellett az is feltűnik, hogy milyen rendkívül gazdag színe és mintázata van a fatörzseknek. Egy nyírfaliget belsejében például még azt is észrevehetjük, hogy ott világosabb is van, mint más erdőkben.



2.14. ábra. Fatörzsek.

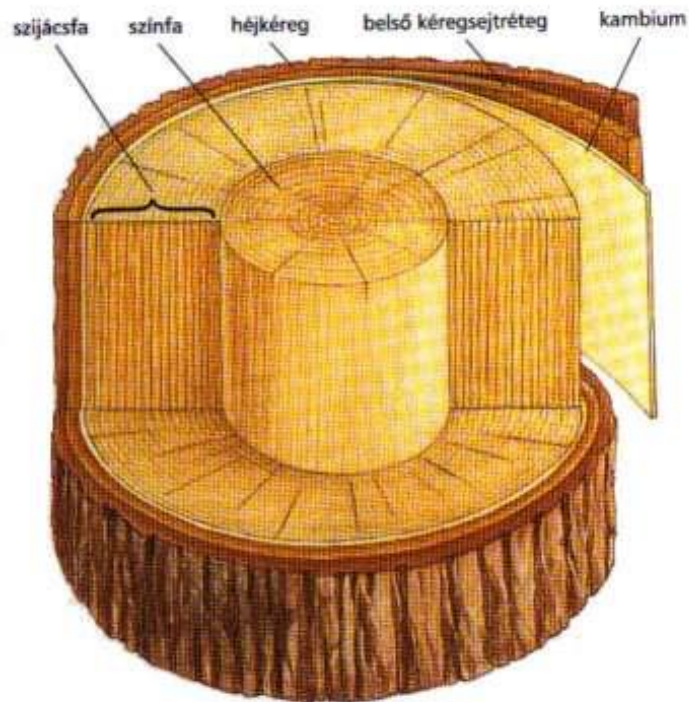
Különböző kérdések merülhetnek fel bennünk. Vajon miért repedezett a fák kérge? Mi határozza meg azt a változatosságot a kéreg színében, mintázatában, amelyet megfigyelhetünk? Ismerünk vastagabb kérgű fákat, némelyek kérge olyan vékony, hogy „papírként” is használható. Mások kérge könnyen leválik, s vannak olyan fák is, mint például a paratölgy, amelyek kérge, ha lehántják, újra kialakul.

Ezúttal már a középiskolában szerzett fizikai és biológiai ismereteink együtt segítenek a megértésben. A továbbiakban e kérdéskör vizsgálatakor kivételesen teljes részletességgel, *módszertani útmutatásokat* is téve szeretnénk bemutatni a diákokkal végezhető munkának minden lépését. A „Gyűjtemény” összes fejezetében erre a részletességre nem nyílik mód a véges terjedelem miatt, de nem is lenne mindig indokolt a hasonló tárgyalásmód.

Az évgyűrűs fatörzs-szerkezet mindenki számára jól ismert, a fa növekedésének mechanizmusa, a fa belső szerkezetének ismertetése a 9. osztályos biológia tantárgy tananyaga, amely a „A növények teste és életműködései” fejezetben található.

A fatörzs átmérője évről évre nő, benne folyamatos sejtosztódás történik. Gondoljuk végig, hogyan történik a növekedés.

A **fakéreg** a fa testének külső, a külvilággal érintkező része. A fatörzs „bundája”, *hőszigetelő* sajátosságú, megakadályozza a fa kiszáradását, s védi a fát a környezeti hatásoktól. A kéreg külső, elhalt pararétegből és a belső rostrétegből áll. A kéreg belső részén lévő, rostos, nem fás szövet a **háncs**. Mint már említettük, itt találhatóak azok a kapillárisok, amelyek szállítják a levelekben előállított szerves anyagokat oda, ahol a fa felhasználja vagy raktározza azokat. A **kambium** a fás szárú növényekben összefüggő hengerpalást, osztódó sejtekből áll, amely kifelé a háncs, befelé a fatest sejteit hozza létre körkörös rétegekben. A mérsékelt égövi fáknál a kambium évszakonként eltérő ütemben osztódik, emiatt lesz az ilyen fák szerkezete évgyűrűs.



2.15. ábra A fatörzs felépítése

A fák kérge a fa növekedése során nem követi azonnal a fa keresztmetszeti méretváltozását, ezért megrepedezik. Milyen paraméterek határozzák meg a kéreg mintázatát, a repedések morfológiáját?

A válaszhoz kétféle úton juthatunk el.

1) Ha a problémát a fenti megfogalmazásban tesszük közzé, s ún. nyíltvégű problémaként kezeljük, akkor versenyfeladatot adtunk diákjainknak. A feladat megoldásához szükséges minden paraméter kiválasztását, s a hiányzóknak vélt ismeretek pótlását is rájuk bízuk. A diákok kutatómunkát végezhetnek a természetben a kérgek mintázatának méreteit felderítendő, s keresniük kell segítséget abban is, hogy szakmailag elfogadható elméleti, akár kvantitatív magyarázatot fogalmazzanak meg a kéregminta elemeinek méretét illetően. Egyáltalán nem könnyű feladat, ezért is szerepelhet a probléma akár nemzetközi versenyfeladatként is. (szerzői megjegyzés: az IYPT verseny problémái hasonló jellegű feladatok!)

2) A másik út középiskolában is járható. Egyes lépcsőfokai önálló feladatokként a megfelelő témákkal foglalkozó tanórákon is szerepelhetnek. A kéregrepedés kvantitatív elemzését viszont feltétlenül szakköri probléma megoldásaként javasoljuk.

Jól előkészített, szisztematikusan választott feladatsorok megoldásával óráról órára (mert ez is időigényes munka) juthatunk előre a kérdések megválaszolásában. Erre szeretnénk egy mintát mutatni, amely módszer, érdeklődő diákokkal középiskolában is követhető.

A diákok biológiai ismeretei a már említett 9. osztályos tananyagból adóttak.

„Az élőlények teste, életműködése és környezete” fejezetén belül a „A növények teste és életműködései” illetve „A fás szár szerkezete” alfejezetek tartalmaiként juthatnak a tanulók a megfelelő biológiai ismeretekhez. A fizika órákon tanultakból pedig 8. és 9. osztályos fizika könyvekből a „Szilárd testek alakváltozásai” témakörből a rugalmas alakváltozás, feszültség, deformáció, a deformáció során tárolt energia fogalmak megbeszélésével illetve a „Folyadékok fizikája” témából a nyomás, Pascal törvény, felületi feszültség, görbületi nyomás fogalmak tisztázásával kerülhetünk közelebb a megoldáshoz.

Kezdjük először egy első látásra nem ide illő feladat, a „virslitörvényként” ismert jelenség elemzésével. Konyhai tapasztalatainkból tudjuk, hogy ha virsli főzés közben hosszabb ideig tartózkodik a vízben, gyakran megreped. Mindig hosszanti irányú repedések keletkeznek rajta. Vajon miért? Mi is történik főzés során? A virsli héja féligáteresztő hártya, a külső vizes oldat hígabb, mint a virsli belsejében lévő, ezért, ha idő van rá, a víz molekulái a virsli belsejébe diffundálva ott megnövelik a nyomást. A bőrborítás ugyan mindenütt azonos a virsli felülete mentén, s így annak fizikai paraméterei is azonosak, mégis hosszanti, s nem haránt repedés alakul ki.

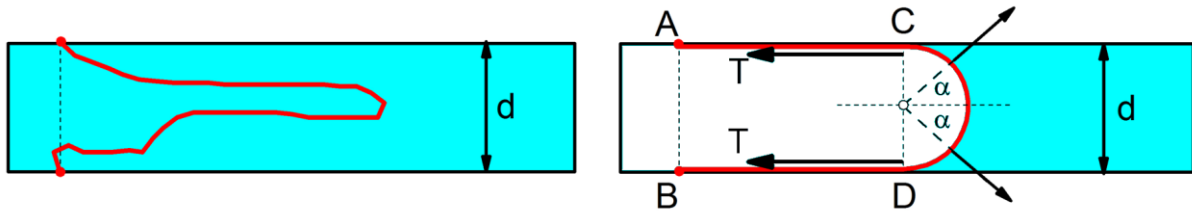
Számításainkhoz modellt használunk. A virsli modellje lehet egy folyadékkal töltött olyan henger alakú  $h$  falvastagságú ballon, amelynek  $l$  hosszanti mérete az  $r$  sugárnál nagyobb.

A virsli belsejében mindenütt azonos  $p$  nyomás feszíti a héjat. Mekkora feszültség ébred a héjban?

Hasonló, de kissé egyszerűbbnek tűnő problémával állunk szemben, ha azonos paraméterekkel, de egyszerűbb geometriával rendelkező, vízzel teli tartály (egyszerűség kedvéért a súlytalanság állapotában) belsejében megfagyó víz hatását vizsgáljuk. A víz térfogat-növekedéssel járó fagyása miatt a tartály elreped. Hosszanti vagy haránt irányú repedés keletkezik-e rajta? Határozzuk meg a tartály falában ébredő  $\sigma$  **feszültségeket** a henger palástjában az alkotó (hosszanti) és a kerület (haránt) mentén. A számítás lépéseit a mellékelt ábrák (2.16, 2.17.) segítségével próbáltuk érthetőbbé tenni. A hosszanti feszültség meghatározása nehezebb, mert a palástra merőleges, a palást pontjaiban ható erők  $F_1$  eredőjének számítása nem magától értetődő.

Ehhez is lehet a felületi feszültség tanítása kapcsán egy egyszerűbb esetet, egy újabb feladatot elemezni, amely a következőképpen fogalmazható meg.

Feszítsünk, szappanhártyát hosszú és keskeny téglalap alakú keretre, amelynek két szemközti pontjára hosszú cérnát kötöttünk. A cérna hossza sokkal nagyobb, mint a téglalap kisebb oldala,  $l \gg d$ . Lyukasszuk ki a szappanhártyát a cérna egyik oldalán, a cérna kifeszül. Mekkora  $T$  erő feszíti ekkor a cérnát. A szappanoldat felületi feszültsége  $\sigma$ . Végezzük is el a kísérletet!



2.16. ábra. Szappanhártya kereten

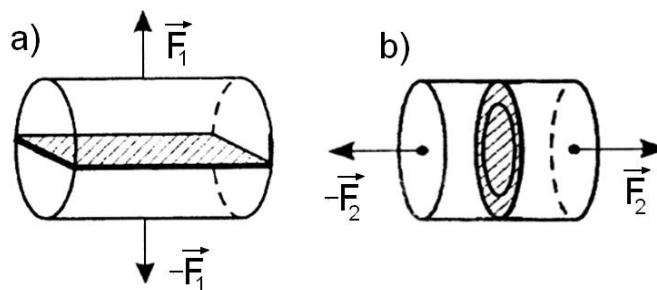
A fenti ábra alapján:

$$2T = \sum \sigma \Delta l_i \cos \alpha = \sigma \sum \Delta l_i \cos \alpha = \sigma d$$

ahonnan:

$$T = \sigma \frac{d}{2}$$

(A tartálynál a probléma a szappanhártyás esethez képest egy dimenzióval nagyobb esetet jelent, ahol az ábrák alapján látható, hogy  $F_1$  megfelel  $2T$ -nek).



2. 17. ábra a.) hosszanti repedés, b.) haránt repedés.

Csupán a feszültség definícióját felhasználva az alábbi összefüggésekhez juthatunk:

Hosszanti repedést okozó feszültség:	Haránt repedést okozó feszültség:
$F_1 = p2rl$	$F_2 = pr^2\pi$
$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{p2rl}{(2l + 4r)h}$	$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{pr^2\pi}{2r\pi h}$
$\sigma_1 = \frac{r}{(1 + 2\frac{r}{l})h} p$	$\sigma_2 = \frac{r}{2h} p$

ha az  $l \gg r$  közelítéssel élünk, akkor

$$\sigma_1 \approx \frac{r}{h} p$$

és a hosszanti irányban tapasztalt feszültség kétszerese a haránt irányúnak, azaz

$$\sigma_1 \cong 2\sigma_2 .$$

Azt a meglepő eredményt kaptuk, hogy azonos belső nyomás esetén a tartály falában, hosszanti irányban kétszer nagyobb feszültség ébred, mint haránt irányban. Ha a körülmények úgy alakulnak, akkor a falban ébredő feszültség a tartály (virslis) falának szakítószilárdságát előbb az alkotó menti helyen éri.

Ennyi előkészítés után térjünk vissza a fatörzs-repedés problémájához.

Most már elég, ha párhuzamot vonunk a virslis és a fakéreg repedése között.

A virslis és a fakéreg különbözik egymástól. Amíg a héj a virslis minden egyes pontjában azonos tulajdonságokkal rendelkezik, a fakéreg anizotróp, paraméterei irányfüggőek. Ezért a kérgen kialakulhatnak csak hosszanti vagy csak haránt repedések is. A virslinél a héj csak egyszer reped, ekkor a belseje „kibuggyan”. Nem így a fánál. A fa kéreg alatti tartományának képlékenysége (alakíthatósága) nagyobb, mint a kéregé, ezért a kéreg felületén nem csak egy, hanem több repedés kialakulására is van lehetőség. A fakéreg mintázata egyszerűbb szerkezetű, ha a kéreg nem, vagy csak igen gyengén tapad a törzshöz. Ilyenkor a kéreg repedésakor elválik a törzstől. Ilyen, a kérgüket ledobó fák főleg a trópusokon élnek.

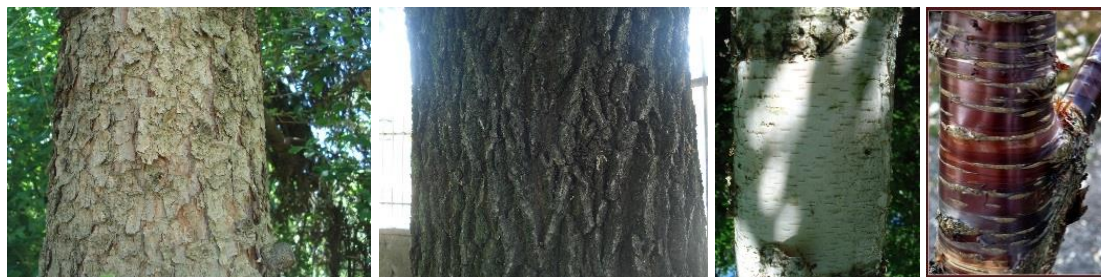
Ha a kéreg erősen tapad a törzshöz, akkor a törzs „hízása” során a kéreg sokféle repedést szenvedhet el. Ebben az esetben a repedések keletkezése hasonlítható ahhoz a jelenséghez, amely a száradó agyagfelületen alakítja a repedések szerkezetét, a felület mintázatát. Az agyag száradásakor a repedések kialakulása éppen a térfogat csökkenésével kapcsolatos. A vízvesztés miatt a felületi réteg ugyanis összehúzódik, s az alatta lévő, nedves réteggel érintkezve a közeghatáron megjelenő feszültségek relaxációjaként a száraz rétegben repedések jelennek. A fakéreg esetében a növekedő fatörzs feszíti a hozzá rögzült kérget, s az megreped.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a fakéreg mintázatának változatossága kapcsolatos:

- a kéreg mechanikai sajátságaival (rugalmas paraméterek, szakítási szilárdság),
- a kéreg-paraméterek anizotrópiájával függőleges- és vízszintes irányban,
- a kéregnek a törzsfelülethez való kapcsolódásában tapasztalható különbségekkel,
- a kérget alkotó szövetek, sejtek felépítésével.

A tölgy és a fenyő dominánsan függőleges irányú repedéseket alakít ki, míg a nyírfákon, cseresznyefákon többnyire vízszintes repedések figyelhetők meg.





2.18. ábra Fenyő, tölgy, nyír és cseresznye kérge

A viszonylag vékony nyírfakéreg a fatörzs hízásakor jól ellenáll, jól tágul, de erre merőlegesen viszont kisebb szilárdsággal rendelkezik. Emiatt a nyírfákon többnyire vízszintes repedések keletkeznek. A törzsének mintázatát a körülmény is befolyásolja, hogy a nyír a gyorsan növekvő fák közé tartozik. Gyakran figyelhető meg rajta deltoidhoz hasonló repedés-mintázat, különösen idősebb egyedeken, a talajhoz közeli fatörzs területeken. Ez lehet kapcsolatos a gyors növekedéssel, amikor is egy vízszintes repedés egyszerűen függőleges irányban „kinyílik”.

A valóságban az említett eseteknél sokkal összetettebb, csodálatosabb, „parkettaszerű” kéreg mintázatokkal is találkozhatunk szerte a világban.[5]

Megjegyezzük, hogy a valóság azért is sokkal színesebb, mint példáink voltak, mert a repedés kialakulása után gyógyulásként benne ún. parásodási folyamat indul meg, ami lokálisan újabb mechanikai paraméterekkel rendelkező kéregtartományokat teremt, amelyek növelik a kéreg már meglévő paramétereinek számát. Figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy a fatörzs nem henger alakú, keresztmetszete a törzs magasabban lévő helyein kisebb. nem azonos módon reagál a törzs változására. Ez is hozzájárul a mintázat, s a kéregvastagság változatosságához.

## 2.5. A nyírfák, a kémia és a néprajz

Az egyik legismertebb és legnépszerűbb fa a mérsékelt égövi és északi vidékeken a nyír. Leggyakoribb a közönséges vagy bibircses nyír, latin nevén *Betula Pendula*.



2.19. ábra Nyírfaliget.

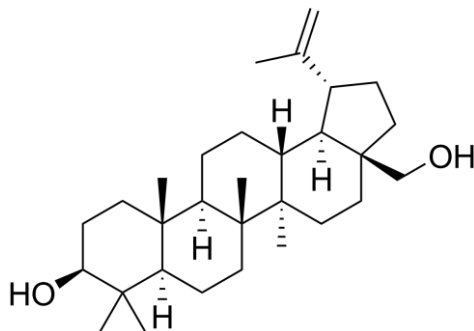
A nyírfa dekoratív voltát elsősorban a **fehér kéreg**nek köszönheti, melynek nem csak *színe*, hanem *mintázata* is jelentősen különbözik a többi fától. Földrajzi határok is kapcsolódnak a fákhhoz, a vizek is határokat szabnak az élővilágnak. A tavasz és a tél kezdete fontos fordulópontok, számos néphagyomány kötődik ezekhez az időpontokhoz, amelyekben a nyírfa is fontos szerepet kapott. Számos északi népcsoportnak valamilyen legendája kapcsolódik a nyírfához. Irodalomból és néprajzi leírásokból ismeretes, hogy a nyír a finnugor népek szent fája (Kalevala), a „hétágú nyír”, az égben gyökerező a Föld felé növő fa, a szibériai tatárok világfája. Angliában is népszerű fa, egy költőjük, Coleridge (1772-1834) a nyírfát „Lady of Woods”-nak nevezte. A nyírfa az orosz irodalomban és népművészetben kiemelkedő szerepet játszik a mai napig is, szinte az orosz vidék szimbólumává vált.

A nyírfa minden alkatrésze felhasználható, nem véletlen tehát a népszerűsége.

A fában, a szállítóedényekben a folyadékok mozgása a lombhullatás után leáll, a fa pihen.

Az áramlás tavasszal, a fák közül először a nyírfában indul be, – a télen a gyökérben tárolt folyadék – a gyökértől felfelé áramlik a kéreghez közeli szállítóedényekben. Ha a nyírfák törzsén *hozzáértő kezek* ekkor *megfelelő helyen* „léket” vágnak, a folyadék kiserken. Folyamatos csapolással jutnak a csupán kb. 3 hét időtartam alatt hozzáférhető **nyír nedvé**hez, amit a Föld északi féltékén élő népek előszeretettel gyűjtenek is. Nem véletlen a nedv népszerűsége. Különösen nagy hasznát vették az emberek ennek a mindig rendelkezésre álló *természetes vitaminforrás*nak a háborús és az azt követő nehéz időszakokban. A nyírkéreg megcsapolásával kapott vitamindús **nyírszörp**nek, magas a C-vitamin tartalma, szerves savakat és ásványi anyagokat tartalmaz (Ca, K, Fe, Cu), így az embereknek tél végén különösen jó szolgálatot tesz. Egy nyírfából napi 5-6 liter folyadék nyerhető, amely egy szezonban akár 120-130 litert is kitesz. Manapság a gyógyszer- és a kozmetikai ipar is sokat használ belőle [6].

A **kéreg** a **színét** a  $C_{30}H_{50}O_2$  összetételű **betulin** elnevezésű triterpénnek köszönheti, melyet *nyírkámfornak* is hívnak. A betulin csak kevéssé oldódik vízben. Szublimáló vegyület, a sejttöregekben szemcsés állapotú betulin halmozódik fel, s ettől fehér a nyírkéreg.



2.20. ábra Betulin

A gyógyszeripar a nyírfakérget magas csersav tartalmának köszönhetően bőrgyógyászati problémák kezelésére alkalmas szerek készítéséhez használja. A kéreg száraz lepárlásával **nyírfaolaj**hoz juthatunk, melyet a különböző helyen élő népek más-más névvel illettek. Ismert elnevezései: Oleum Betulinum, Oleum Rusci, Oil of Birch Tar. A finomított Oleum Rusci a szobahőmérsékleten mért viszonylag nagy törésmutatójánál ( $n=1,515$ ) fogva, immerziós olajként helyettesíthette a cédrus olajat az optikai mikroszkópiában. Manapság szintetikus olajat használnak, mert ezzel kiküszöbölik a természetes olajak kedvezőtlen hatásait (keményednek, nehezen eltávolíthatók az objektívról, stb..).

A fák télen, a rájuk fagyott jégborítás súlya következtében meggörbülnek, néha el is törnek. Megfigyelték, hogy a görbe nyírfák idővel „maguktól kiegyenesednek”. Egy meggörbült fában a feszültségállapot a közel függőleges esethez képest átrendeződik. A fa lehajlott törzsében a törzs felső felében húzófeszültség, az alsó felében nyomófeszültség ébred. A törzs felső fele nyúlik, az alsó összenyomódik. Ha a fa növekedése nem egyenletes, a fa **növekedése függ a belsejében kialakult feszültségállapottól**, akkor érdekes változások állnak elő. Nem minden fára jellemző e viselkedés, de a nyírfa itt is kivétel. Amennyiben az összenyomott tartományban a sejtosztódás intenzívebb, mint a nyújtott részben, akkor az összenyomott rész növekedése időben „lehagyhatja” a nyújtottat, a fatörzs kezd kiegyenesedni. Ez a folyamat felelős a görbe nyírfák kiegyenesedéséért.[7]

A nyírfa törzsében más mérsékelt égövi fától eltérően, nincsenek évgyűrűk. A nyírfából készült használati tárgyak, bútorok rajzolata ezért más fából készült tárgyakétól különbözik.

## 2.6. Miért rezeget a nyárfalevél?

Mindenki számára ismerős a népi mondás, "Rezeget, mint a nyárfalevél". Mint minden népi mondás, ez is évek hosszú során történt megfigyelésen alapul.

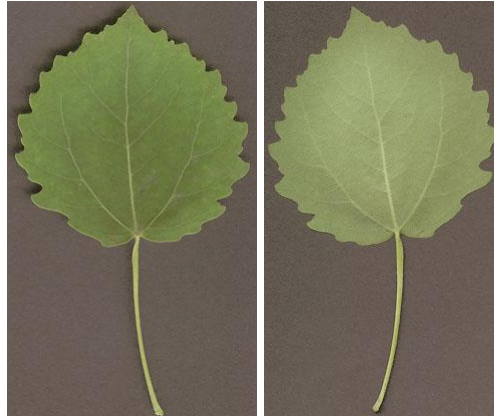
Valóban, a nyírfa levelei még teljesen szélcsendes időben is, amikor minden fa levele nyugalomban van, mozognak.



2.21. ábra Rezgő nyár

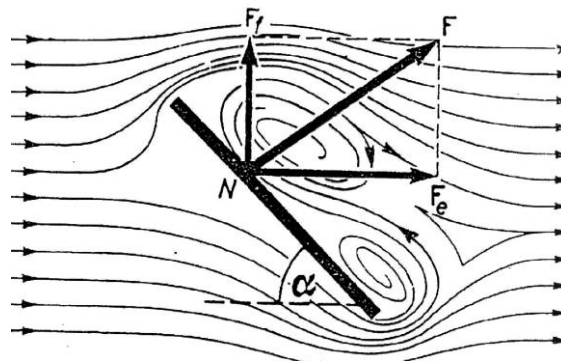
A fa latin elnevezése, *Populus tremula*, is utal e tulajdonságra, tartalmazza a rezgő jelzőt. Ahhoz, hogy kiderítsük a rezgés „okát”, vegyük szemügyre a nyárfalevél minden részletét, s hasonlítsuk össze olyan falevelekkel, amelyek e jenséget nem mutatják. Mi különböztetheti meg a nyárfa leveleit a többi falevéltől?

Megfigyelhetjük, hogy a nyárfalevél hosszú, vékony szára kissé csavarodott, s a levélhez illeszkedő rész ellapított (2.22. ábra). Emiatt a levél könnyen hajolhat, könnyen elfordulhat, a levelet mozgásában a szár szinte alig akadályozza.



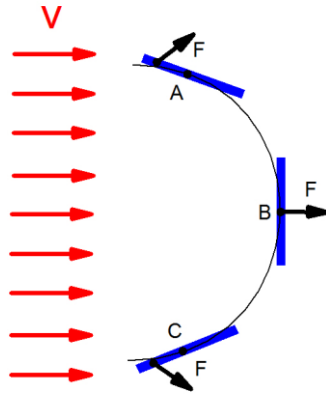
2.22. ábra A rezgő nyár levele

A levél emiatt jól modellezhető a súlypontjában felfüggesztett kemény papírlappal. Helyezzük ventillátor levegőáramába a felfüggesztett lapot, s figyeljük meg mozgását! Ha a lap síkja a levegőáramlás irányához képest egészen kicsi szögben hajlik, a lap felső és alsó szélénél különböző mértékben eltérülő levegő **erőt** gyakorol a lapra. A lapra ható  $F$  erő vízszintes összetevője az  $F_e$  közegellenállási erő, a függőleges az  $F_f$  aerodinamikai emelőerő, amely a lapot kissé felemeli. Alaposabb megfigyelés után azt is észrevehetjük, hogy a közegellenállási erő támadáspontja nem esik a lap súlypontjába (2.23. ábra).



2.23. ábra Levegőáramba "ferdén" behelyezett lapra ható erők

Így az  $F$  erőnek a lap súlypontjára vonatkozó forgatónyomatéka a lapot az áramlási sebességre merőleges irányba forgatja. A lap azonban e helyzetben túllendül, s átkerül az ellenkező oldalra, a kezdeti helyzetéhez képest szimmetrikus helyzetbe. Innen ismét túllendülve cik-cak mozgást végez, a lap periodikus mozgásba jön. A közegellenállási erő fent említett hatása annál kifejezőbb, minél nagyobb szögben ( $\alpha$  állásszög) hajlik a lap az áramlási sebességhez képest.

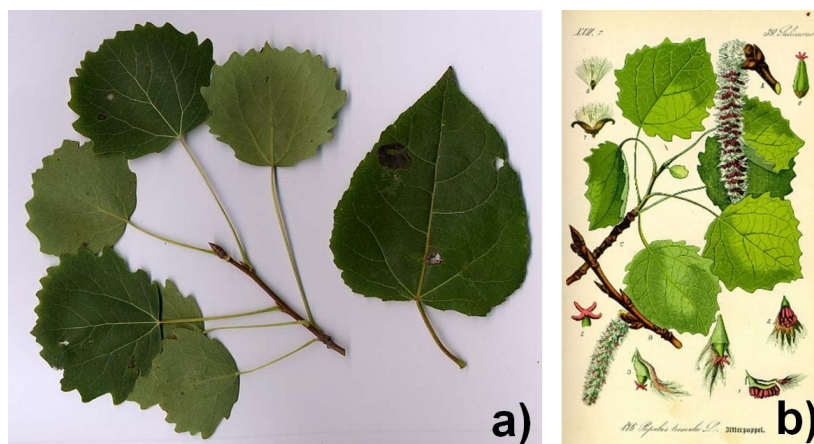


2.24. ábra Síklap mozgása levegőáramban

Részletes számításokból kiderül, hogy az aerodinamikai emelőerő 15 fokos hajlásszög esetén a legnagyobb. Ha a lap kissé hajlított, úgy e hatás még fokozódik. Megjegyezzük, hogy a repülőgépszárny alakja nem véletlenül hajlított (Zsukovszkij-profil).

Hasonlóan kezdődik a nyárfalevél mozgása is. A nyárfán mindig található olyan levél, amely alkalmas helyzetbe kerülve, még a legkisebb levegőáram esetén is mozgásba jön.

Figyeljük meg a levelek elrendezését a fiatal és az idősebb egyedeken! Észrevehetjük, hogy a természet a két esetben különböző rendet hozott létre. Az idősebb nyárfán a szinte azonos méretű levelek egy csoportban találhatók.



2.25. ábra (a) Levelek az idős fa ágán és egy fiatal levél, (b) levelek egy „csokorban”

Ha az egyik lengeni kezd, hamarosan szomszédja is – az azonos méretű csatolt ingákhoz hasonlóan –, átveszi annak mozgását (rezonancia jelenség). Amikor az első megáll egy pillanatra, akkor a második a legnagyobb kitéréssel mozog, majd az is továbbadja energiáját a mellette lévő levélnek, a mozgás átcsatolódik. Így mindig megfigyelhetünk mozgásban lévő leveleket a fán. A levelek – a már említett csavarodott levélnyél miatt – egészen enyhe légáram hatására is könnyen mozgásba jöhetnek. A fiatal egyedeken a levelek elszórtan, nem egy helyen csatlakoznak az ághoz, ezért mozgásuk nem adódik át egyik levélről a másikra.

Vajon miért tesz különbséget a természet a fiatal és az idős egyedek között?

Az idősebb nyárfa törzsében a víz cirkulációját a levelek mozgásakor erőteljesebbé váló **párolgás** segíti. Az erőteljesebb cirkuláció miatt, az egyébként rothadásra hajlamos törzsben, a víz mozgása intenzívebbé válik. A fa így védekezik a rothadással szemben. A rezgő levél ellöki a felületéről a kibocsátott gázokat, ezért a környezettel fokozottabb gázcserére képes. Emiatt a levelekben a fotoszintézis folyamata felgyorsul. Az intenzívebb fotoszintézis következtében kevesebb öreg sejt halmozódik fel a fában. S mert a fiatal fát rothadás nem fenyegeti, azon az idősebb fa leveleitől eltérő alakú levelek magányosan, szétszórva helyezkednek el [8].

## 2.7. Egy csodálatos anyag: a parafa

Kérdezhetné valaki, vajon mit keres ez a téma a fizikával kapcsolatos fejezetben. Ha felderítjük a parafa eredetét, szerkezetét, megismerjük tulajdonságait, talán mi magunk is könnyen válaszolhatunk a kérdésre.

A parafa manapság reneszánszát éli, lépten-nyomon találkozunk vele egészen szokatlan felhasználási területeken is. Az utóbbi néhány évben a természetes anyagok hazánkban is egyre népszerűbbé váltak, egyre több bio-árúkat forgalmazó üzlet, parafa szakbolt nyílt. Érdekes körülnézni egy ilyen szakboltban, láthatjuk, hogy mennyi minden készül parafából. Találunk az egyszerű használati tárgyaink, dísz tárgyaink mellett padló- és falburkolásra alkalmas darabokat, s törékeny áruk, érzékeny műszerek csomagolására használható kisebb-nagyobb dobozokat is. A parafa legnagyobb fogyasztója manapság is a borászat, a legmárkásabb borok, pezsgők palackjainak lezárására ma sem találtak ennél alkalmasabb anyagot. (Egyébként a parafával történő palackozás szabadalma egy 17. századi Bencés-rendi apát tulajdona.) Palackozásra a parafa különleges rugalmas tulajdonágai alapján vált alkalmassá, s nem mellékes szempont az sem, hogy jó kémiai ellenálló képessége miatt a pezsgőt, a bort nem szennyezi.

Horgászúszót, cipőtalpat már időszámításunk előtt készítettek parafából. A felhasználásában folyamatosan mutatókozó egyre nagyobb igény hívta életre a mesterséges parafagyártást (1892), amely abból állt, hogy különböző méretű darabokat tartalmazó parafareszeléket nagy nyomáson ragasztottak össze. A ragasztóanyagot, a *suberint*, egy telítetlen zsírsavat, maga a parafa szolgáltatta. Manapság évi termelése eléri a félmillió tonnát. (1 tonna parafa térfogata 56 tonna acél térfogatának felel meg.)

### Vajon miben rejlik a parafa varázsa?

Széleskörű alkalmazhatósága a parafa figyelemreméltó tulajdonságaival kapcsolatos. A parafa **könnyű, rugalmas, jó hang- és hőszigetelő. Kémiailag ellenálló**, víztaszító, jól **tartja a nedvességet**. Mechanikai terhelésre rugalmas alakváltozással válaszol, olyannal, melynek során a befektetett energia egy része elnyelődik. Nem csúszunk meg, ha parafa burkolatú padlón járunk, sőt minél nehezebbek vagyunk, annál biztonságosabbá válik járásunk. Középiskolai tanulmányainkkal nem éppen összhangban, parafafelületen történő mozgáskor a súrlódási együttható függ a terheléstől. E sokféle jó tulajdonság hátterében a parafa sajátos szerkezete áll.

### Ismerkedjünk meg a természetes parafával!

A közönséges parafa a mediterrán *paratölgy* (*Quercus suber*) kérge, melyet a fatörzsről 8-10 évenként lehántanak (2.26. ábra).

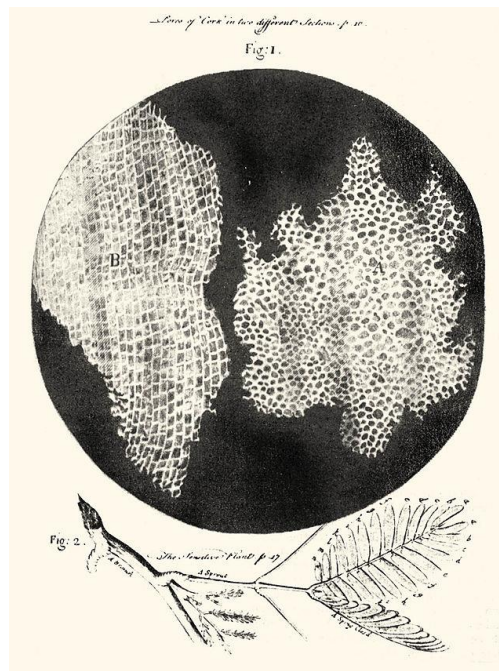
A Portugáliában, Spanyolországban, Algériában, Kaliforniában honos fáról már Pliniustól (iu.77) fennmaradt írásos emlékek említik, hogy a kérge a többi fakéregnél sokkal vastagabb, s a lehántás után újra képződik. Általában megfigyelhetjük, ha egy fa kérge megsérül, akkor az ún. parásodásnak nevezett regenerálódási folyamattal heged be, de a kéreg teljes *újraképződése* csak a paratölgy sajátja.



2.26. ábra Paratölgy és lefejtett parafakérgek

## Egy kis történelem

A parafa speciális szerepet játszott a **mikroszkópia** és **növényanatómia** történetében egyaránt. **Robert Hooke** 1660-ban, hogy tökéletesítse mikroszkópját sokféle anyagot megvizsgált vele. Elsők között szerepelt a parafa. Mikroszkópi fotózás abban az időben nem lévén, Hooke lerajzolta, amit látott (2.27. ábra). A parafa egyik metszetben többnyire hatszöges szerkezetű tartományokat, míg a rá merőleges metszetben a téglafal építéséhez hasonló négyszöges elrendezést mutatott. Ebből a képből született a gondolat a növények felépítésére vonatkozóan is.



2.27. ábra Robert Hooke rajza a parafa szerkezetéről

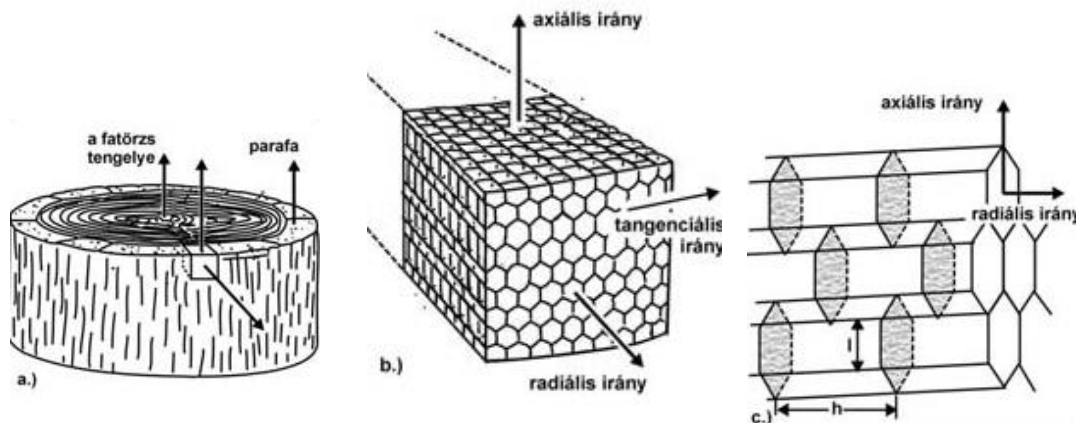
A bennük lévő térbeli szerkezeti egység, a cella (sejt) elnevezés is Robert Hooke-tól származik [9]. Korán rájöttek arra, hogy a cellás szerkezetű anyagok a tömör anyagoktól eltérő, sok érdekes tulajdonsággal rendelkeznek, amely sajátos szerkezetüknek köszönhető. Közös tulajdonságuk, hogy könnyűek, kicsi a sűrűségük. Változatos felépítésűek, egyes anyagokban lehetnek összefüggő üregek, ezeket **nyíltcellás** anyagoknak, másokban zárt, át nem járható apró tartományok vannak, ún. zárt cellás anyagok.

A természetben sok helyen találkozunk cellás szerkezetű anyagokkal, melyekben a **cellaméret** igen széles skálán mozog. Míg a mindennapi kenyérünk milliméteres méretű cellákat, a parafa ennek ezred részénél is kisebb, mikrométeres átlagos méretű cellákat tartalmaz. A korallok nyílt cellás anyagok, a tojásbab zártcellás. A cellák belsejében lehet folyadék, pl. az élő sejt, de lehet gáz is.



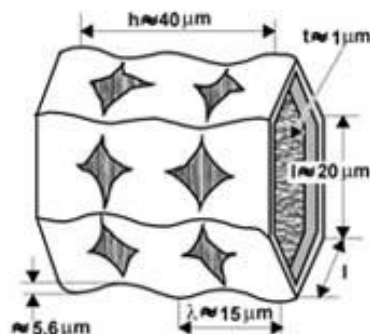
A parafa szerkezetéről a Robert Hooke által megrajzolt képhez szinte semmit nem tett hozzá a tudomány az elektronmikroszkópos vizsgálat felfedezéséig. Az optikai mikroszkóp felbontóképessége ugyanis nem tette lehetővé azoknak az apró részleteknek a felderítését, amelyek az elektronmikroszkópban jól látszanak. Pásztázó elektronmikroszkópban lehetővé vált a parafa celláinak teljes kvantitatív leírása.[10].

Meghatározták a cellák méretét, alakját, falaik vastagságát, a fakéregben való elhelyezkedésüket. A parafa zártcellás anyag, melynek hatszög alapú prizma alakú cellái - amilyenek azt már Hooke is látta -, a prizma tengelyét tartalmazó metszetben egy téglalaphoz hasonló képet mutatnak. A prizma tengelye a fatörzs keresztmetszetében sugárirányban helyezkedik el (2.28. ábra).



2.28. ábra A parafa szerkezete három egymásra merőleges metszetben [11]

Hooke az optikai mikroszkópjának viszonylag kis nagyítása miatt nem láthatta a téglalap alakú falak tangóharmonikához hasonló hullámosságát, mely meghatározó jelentőségű a parafa rugalmas tulajdonságainak alakítása szempontjából.



2.29. ábra A hatszög alapú hasáb cella [10]

A 2.29. ábrán feltüntettük a hatszöges cella elektronmikroszkóppal felderített összes adatát, melyeket felhasználva számítással meghatározható a parafa relatív sűrűsége,

$$\frac{\rho}{\rho_f} = \frac{t}{l} \left( \frac{l}{h} + \frac{2}{\sqrt{3}} \right),$$

a celluláris anyagok egyik legfontosabb paramétere.

A fenti képletben  $\rho_f = 1150 \text{ kg/m}^3$  a cellafal anyagának sűrűsége,  $l$  a hatszög élhossza,  $h$  a prizma magassága,  $t$  pedig a falvastagság. A fal hullámosságát leíró hullámhossz  $\lambda$ , amelynek még az amplitúdója is fel van tüntetve az ábrán.

A parafa celláinak hullámossága magyarázza az anyagnak azt a kivételes tulajdonságát, hogy ha az anyagot a cella tengelyének irányában meghúzzuk, akkor az észlelhető *harántösszehúzódás nélkül* deformálódik. Ha pedig ugyanebben az irányban összenyomjuk, akkor a harmonikához hasonlóan viselkedik, „*hasasodás*” nélkül deformálódik. E tulajdonsága teszi kivételesen alkalmas anyaggá a nagy belső nyomással rendelkező pezsgős italok palackjainak lezárására. Semmilyen más anyagból készült dugó nem rendelkezik ezekkel a sajátságokkal.

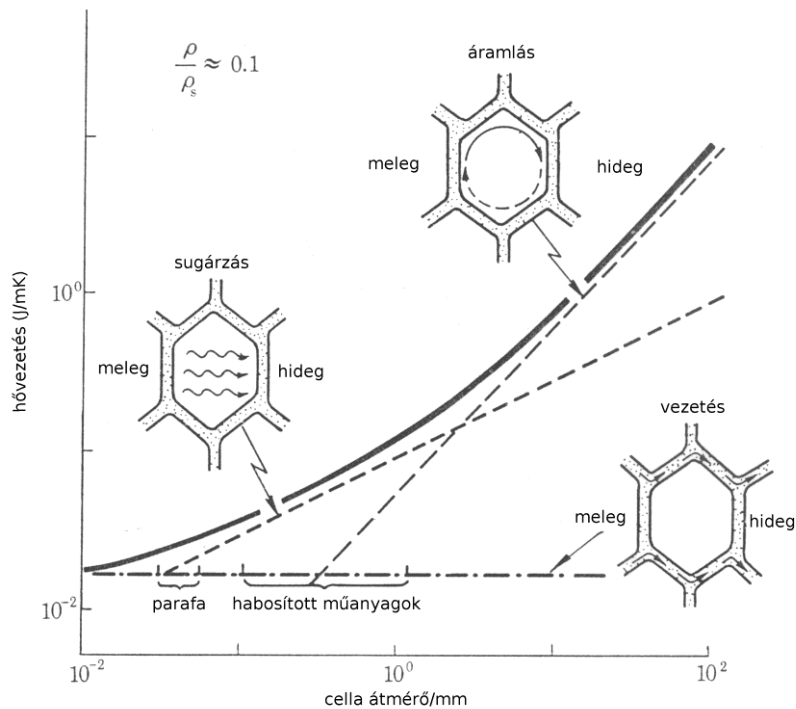
### **A parafa közismerten jó hőszigetelő**

E kijelentés megvilágításához szóljunk néhány szót a cellás anyagok hőátadási sajátságairól!

A cellás szerkezetű anyagok hőátadásáról még mostanáig sem derítettek ki mindent. Fizikai tanulmányainkból tudjuk, hogy hőcsere általában *hővezetés, hőáramlás és hőszugárzás* útján történhet. Érdekes megvizsgálni hogyan befolyásolja a hőcsere különböző módjait az anyagok szerkezete, felépítése. A cellák jelenléte vajon melyik módot részesíti előnyben?

A válasz nem egyszerű, hiszen láthattuk a bevezetőből, hogy milyen gazdag a celluláris anyagok birodalma. Bennük általában igen széles méretskálán találkozhatunk cellákkal, a cellaméret valószínűleg befolyásolja az ilyen anyagok hőátadási sajátságait.

A háromféle hőátadási módot számításba véve meghatározták egy cellás anyag hővezetési együtthatóját (amit jobb lenne hőátadási paraméternek nevezni), mint a cellaméret függvényét (2.30. ábra)[11].



2.30. ábra A hővezetés (J/mK) a cellaátmérő (mm) függvényében [11]

Elemezzük e grafikon!

A hőátadás **hővezetés** útján a cellás anyagokban is a cellafalakat alkotó anyagban történik. Ezért dominánssá e mód nagy relatív sűrűségű illetve adott relatív sűrűség esetén aprócellás anyagokban válhat.

**Hőáramlással** valósul meg a hőátadás, ha a cellák térfogata elegendően nagy ahhoz, hogy bennük a levegő szabadon cirkulálhasson. Megfigyelték, hogy az 1 mm-nél kisebb átlagos méretű cellákat tartalmazó anyagoknál e hőátadási formának semmi szerepe nincsen.

A **hősugárzás** során történő hőcsere cellás anyagokban több részfolyamat eredménye. A cella magasabb hőmérsékletű részéről hő az alacsonyabb hőmérsékletű rész felé csak ismételt elnyelési és kibocsátási folyamatokkal kerülhet. A fal anyagának hőelnyelő tulajdonsági határozzák meg a folyamat első lépését. Az elnyelt hő a falból a cella belsejébe sugározva majd a szemközti fal által újra elnyelve juthat a cella egyik oldaláról a másikra. Az egész hőcsere szempontjából az egyes részfolyamatok hatásfoka a meghatározó. Minél többször ismétlődik az elnyelés-kibocsátás, annál több hővész el útközben. Az aprócellás anyagokban a hőátadás ilyen módon rossz hatásfokú, rossz tehát a hővezető-képességük.

Ezek után könnyű megállapítanunk a **parafa** termikus tulajdonságait. Nem kell mást tennünk, csak a jellemző cellaméret szerint elhelyezni a diagramon. Ebből az adódik, hogy a parafa tehát jó hőszigetelő anyag.

### **A súrlódási együttható függhet a terhelés mértékétől?**

Már a pici gyerekek is tudják, hogy a frissen felmosott kövön óvatosan kell közlekedni, mert könnyen elcsúszhatnak. A gépek forgó alkatrészeit zsírozással kímélik. A falvakban télen a jeges járdákat hamuval szórják, ezzel teszik biztonságosabbá a járást. A különböző testek között fellépő súrlódás az érintkező felületek érdességétől, azok molekuláris szerkezetétől függ, s általában független az érintkező, mozgó testek tömegétől, felületük nagyságától. A parafa esetében más a helyzet.

### **Kísérletezzünk!**

Középiskolában tanultunk néhány módszert a csúszási és tapadási súrlódási együttható mérésére. Mérjük meg valamelyik módszerrel érdes felületű testek például fahasáb, alumínium hasáb stb. és a parafa felület között a súrlódási együtthatót. Változtassuk a test tömegét, s ismételjük meg a mérést. Szappanozzuk be ezután a parafa felületet, s végezzük el újra a mérést! A kísérlet azt az érdekes eredményt mutatta, hogy a szappannal síkossá tett felületen sem csökkent számottevően a súrlódás, s a súrlódási együttható nő a terhelés növelésével [10].

Mi lehet ennek a meglepő jelenségnek az oka?

A súrlódás eredete parafa esetén kettős. A súrlódás mikroszkopikus eredetén, az adhézió túl, itt jelentőssé válnak a parafa deformálásával kapcsolatos nem rugalmas veszteségek. Járás közben a parafacellák összenyomódnak, s ha lábunk felemelésekor a deformáció teljesen visszaalakulna, nem éreznénk a fenti furcsaságokat. De nem ez a helyzet. A parafa a hullámos cellafalak miatt könnyen alakítható. A mozgó test alatti talaj, arról tovább lépve nem újul meg, a befektetett munka egy része elvész a „talaj” felszíne alatti régiókban, mely makroszkóposan nagyobb súrlódás megjelenését eredményezi. Parafa felületen járni kicsit olyan, mintha homokban bicikliznénk. Parafán kerékpározni szintén nehéz, a gördülő ellenállási tényező deformációval kapcsolatos nagy értéke miatt [11].

### 3. Tavak, tengerek, folyók élővilága és a fizikai törvények

#### 3.1. Rovarok a tavak felszínén

Sok élő szervezet számára a vízfelszín kitűnő élettér. A könnyű rovarok és pókok szívesen népesítik be a tavak, lassú folyású patakok felszínét. A legismertebbek a tavi **molnárpoloska**, a **hanyattúszó** vagy **háton úszó poloska**.

A molnárpoloskák hossza általában 1 cm. A vízen állva sajátos felépítésű lábuk alatt a vízfelszín kissé behorpad, hártvaként viselkedik.



3.1 ábra Tavi molnárpoloska és lábának felépítése

A molnárkák lába nem olajos, hanem a láb utolsó, a vízzel érintkező ízét, apró, sílécsekhez hasonló, finom, levegővel teli szőrpárna borítja. Vannak olyan rovarok is, amelyek nemcsak a láb utolsó ízével, hanem egész lábszárakkal is támaszkodnak a vízen. A molnárkák nem csúsznak, hanem eveznek. Lábuikkal csapnak egyet a vízre, ahol kis gödör keletkezik. A gödör falának „támaszkodva” előre haladásukat a lábukra a gödör által kifejtett erőhatásnak köszönhetik. Egyetlen lábcsapással akár 12 cm-es távolságot is megtesznek, 90 cm/s sebességre is felgyorsulhatnak. Zsákmányuk felfedezésében a vergődő állat keltette, a víz felületén terjedő ún. kapilláris hullámok segítik őket [27]. A vízfelszínen terjedő hullámok sebessége az alábbi módon ugyanis függ a  $\lambda$  hullámhossztól:

$$v = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}\right)}$$

Rövidebb hullámhosszak esetén (néhány cm) az ún. kapilláris hullámok sebessége a domináns,

$$v_{kap} = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}},$$

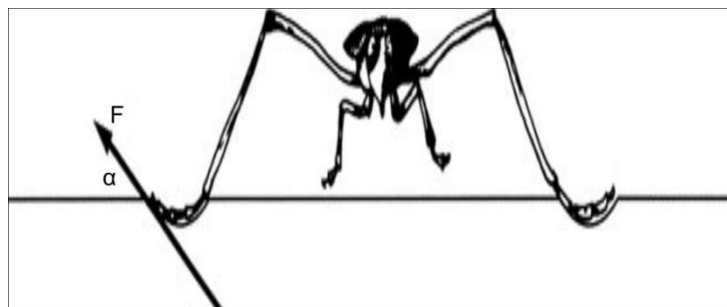
ahol  $\sigma$  a víz levegőre vonatkoztatott felületi feszültsége,  $\rho$  a víz sűrűsége,  $g$  a nehézségi gyorsulás.

A molnárpóloskák a középső és hátsó lábukat a vízben tartva a közöttük lévő távolság és az oda érkező felületi hullám hullámhosszának összehasonlításával a préda helyét, a hullámforrást is képesek meghatározni.

### Vajon mekkora súlyú rovar maradhat szárazon nyugalomban a vízfelszínen?

Végezzünk egyszerű számításokat!

Számos sajátos módon készített fotón is látható, hogy a víz felületén nyugvó bogár lábai alatt a felszín kissé benyomódik. Lábakat a víz nem nedvesíti. Az alábbi ábra segítségével megbecsülhetjük, hogy mekkora súlyú rovar maradhat a felszínen egyensúlyban.



3.2. ábra Molnárika modellje [15].

A bogár  $G$  súlyát a lábakon keresztül a felületi feszültségből származó  $F$  erő egyensúlyozza, azaz az erőnek a függőleges összetevője

$$G = L\sigma \sin\alpha ,$$

ahol az  $L$  az a hosszúság, amely mentén a rovarlábak érintkeznek a vízzel,  $\sigma$  a víz levegőre vonatkoztatott felületi feszültsége.

Kvantitatív megfontolásokhoz egyszerű modellt használunk, amellyel számításokat végezve nagyságrendben a valósággal azonos eredményekhez juthatunk.[12]

Legyen a rovarmodell egyszerűen  $\rho_r$  sűrűségű,  $l$  élhosszúságú kocka. A „rovarra” ható nehézségi erő:

$$G = l^3 \rho_r g$$

Továbbá tegyük fel, hogy a vízzel érintkező rovarlábak  $L$  hossza arányos a rovar lineáris méretével, azaz  $L \approx l$

$$l = \left( \frac{G}{\rho_r g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

azonos nagyságrendbe esik. Egyszerűség kedvéért számításainkat végezzük a legnagyobb erő az  $\alpha = 90^\circ$  esetére. Ekkor

$$F_{max} = l\sigma = \left(\frac{G}{\rho_r g}\right)^{\frac{1}{3}} \sigma$$

Ha a rovar  $\rho_r$  sűrűségét a vízével azonosnak vesszük  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ , s a víz levegőre vonatkoztatott felületi feszültségét pedig  $\sigma = 72.8 \text{ dyn/cm}$  értéknek, akkor az  $F_{max} = 19,7 \text{ dyn}$  ( $1 \text{ dyn} = 1 \text{ gcm/s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$ ). Ebből tehát a rovar tömegére kb.  $2 \cdot 10^{-2} \text{ g}$ , a közelítő lineáris méretére pedig  $3 \text{ mm}$  adódik.

Mielőtt az alábbi rovarok viselkedéséről beszelnénk, végezzünk el a következő ismert kísérletet. Segítségével ugyanis jobban megérthető a bogarak viselkedése.

Vágjunk ki papír vastagságú alumínium fóliából 5-6 cm hosszú hajóformát. Helyezzük azt óvatosan víz felületére, és cseppentsünk egy kis csepp mosogatószert, vagy érintsünk egy darabka szappant a hajóforma végénél a vízre. A kis hajó ezzel ellentétes irányban elmozdul. A mosogatószer a cseppentés környezetében ugyanis kb. harmadára csökkenti a víz felületi feszültségét, a hajó korábbi egyensúlya megbomlik, ezért az eredő erő irányába elmozdul.

A **hanyattúszó poloska** a molnárka távoli rokona.



3.3. ábra Hanyattúszó poloska

A vízfelszín alatt él, csónakformájú teste alkalmazkodott a vízi életmódhoz. Az álcázás miatt hátoldala világos, hasoldala sötét, amelyet lapos és sűrű szőrzet borít. A víz felületén a felszín alatt a szőrpárnában lévő légbuborék miatt testük a vízfelület hártájához tapad. Ők alulról „kapaszkodnak” a vízfelületbe. A légbuborékból levegőt is vesznek (fizikai tüdőnek is nevezik), néha viszont maguk szakítják át a hártaként viselkedő felszín, hogy levegőt vegyenek.

A gömbnyakú partiholyva 0,8 cm hosszú rovar, a vízpartok közelében és a vízben él.



3.4. ábra Gömbnyakú partiholyva

Potrohán mirigy található, amelyből kellemetlen szagú, maró hatású folyadékot képes kilövellni, amely részben védekezésre szolgál. A folyadék az emberre rendkívül veszélyes mérgező, hatóanyaga *pederin*, amely a kobra kígyó mérgeénél is erősebb mérgező [46]. Ha a hollyva a vízfelületen tartózkodik, akkor a kibocsátott anyaggal lokálisan lecsökkenti a felületi feszültséget, az állat ennek köszönhetően, ellenkező irányban könnyen elmenekülhet. Ez a kisebb felületi feszültségű folt a támadónak a veszését is jelentheti, mert ha óvatlan, akkor abban el is merülhet

### 3.2. Arkhimédész törvénye a természetben

Vízben élnek a Föld legnagyobb testű élőlényei. A kacsák a földön totyogva nehézkes madár benyomását kelti. Nem így a vízben! A vízfelszínen könnyedén siklik.



3.5. ábra Tőkésrécek



Mitől van ez a különbség?

A testek a vízben könnyebbek, s mozgásukat sem fékezi a víz annyira, mintha a talajon súrlódnának. A kisebb **súrlódás** és a testekre a vízben ható **felhajtóerő** jelentősen befolyásolta a vízi élőlények felépítését, viselkedését. Miért, hogyan?

A válaszhoz elevenítsük fel először 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,

$$p = \rho gh,$$

ahol  $\rho$  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,

$$p = 10^5 Pa = 100 kPa.$$

Hasonló módon meggyőződhetünk arról, hogy a nyomás a vízben közelítőleg 10 méter mélyen ugyanekkora. Az ott tartózkodó testekre tehát a légköri nyomás kétszerese, kb. 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:

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

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

- 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.

### **Vízi állatok 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 az energiáját a leggazdaságosabban használja, a megélhetéséhez szükséges cselekedetekre fordítsa, minden mélységben valamilyen „trükkal” biztosítani kell neki azt az állapotot, amelyet „semleges úszóképesség” elnevezéssel illet a szakirodalom. Ez az állapot 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 tartani a felhajtóerővel, s ehhez a szabályozáshoz szükség van bizonyos fortélyokra. A vízi állatok merülése és felszínre emelkedése gyors folyamat, de azokban a kívánt mélységekben való huzamosabb tartózkodáshoz szükségesek a fortélyok, melyek többnyire az állat átlagsűrűségének változtatásán keresztül valósulnak meg.

Vajon milyen fogásokat alkalmaznak a vízben élő állatok az átlagsűrűségük változtatására?

### **Kezdjük a halakkal!**

A vízben élő állatok átlagos sűrűsége a vízével 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 kb. 8%-a, a vízi és szárazföldi életet is élő békáké kb. 11%, addig a nyúlénál ez az érték már a 15%-ot is eléri.



3.6. ábra Ponty

A csontos halak érdekes szerve az **úszóhólyag**, amellyel az **úszás** mélységét szabályozzák.



3.7. ábra Az úszóhólyag és helye a hal belsejében

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 az **átlagsűrűsége** is.

Akár a gáztörvények tanításánál is használhatjuk a halak merülési szokásait. Hangozzék a feladat a következőképpen:

*Legyen, kb. 50 méter mélységben a hal úszóhólyagjának térfogata a teljes testtérfogat 5 százaléka. 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.

$$V_0 \cdot 6atm = V \cdot 31atm$$

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

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 [12]. 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 porcos halak, nincsen úszóhólyagjuk. Más merülési praktikához kell folyamodniuk. A vázuk könnyebbé válik már azzal, hogy csont helyett porcból áll. De van más lehetőségük is az átlagsűrűségük változtatására.



3.8. ábra Cápa

A **cáпамáj** a mindenkori átlagos sűrűség beállításához használt szervük, mely az állat teljes testtömegének akár 25-30 százaléka is lehet (emlősöknél csak 5 százalék). A cáпамáj kb 70 százalékban a tengervíznél kisebb sűrűségű olajokat és egyéb szerves anyagokat (squalene) tartalmaz. A cápa a tartózkodásához 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  $\rho_o = 0,90 - 0,92 \text{ g/cm}^3$ , a squalene sűrűsége pedig  $\rho_s = 0,855 \text{ g/cm}^3$ . Mivel a máj, mint sűrűség-szabályozó a cápáknál, nem annyira hatékony szerv, mint az úszóhólyag a csontos halaknál, ezért a cápák állandóan mozgásban vannak, hogy elkerüljék az elmerülést.

### A tintahal

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



3.9. ábra Közönséges tintahal és a szépiacsont

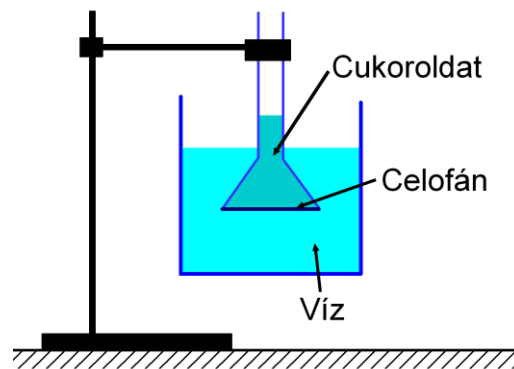
A szépiacsont, celluláris anyag, lemezes szerkezetű, a  $\text{CaCO}_3$  aragonit kristályaiból épül fel. Az aragonit lemezek szerveződését ilyené egy szerves molekula (kitin) irányítja. Az állatból frissen kivett csont átlagsűrűsége a  $\rho = 0,57 - 0,64 \text{ g/cm}^3$  tartományban mozog. Elég könnyű, az állat átlagsűrűségét csökkenti, de mert kiváló mechanikai tulajdonságai is vannak, jól ellenáll a mélységváltozás okozta nagy nyomásváltozásnak is. Egyébként védi az állat létfontosságú szerveit. A szépiacsont legfontosabb feladata a semleges úszóképesség beállítása, mely szabályozás a csont víztartalmának változtatásával valósul meg. A víztartalom változtatása – más tengeri állatokhoz hasonlóan, - ún. ozmoregulációs folyamattal történik.[12] Az ozmózis jelensége részletesen a középiskolás tantervekbe nem mindig került be, pedig a jelenség az élővilágban gyakran előfordul. Itt csupán egy kísérlettel szeretnénk bemutatni a jelenséget, a kvantitatív elemzést elkerüljük.

### Az ozmózis jelensége

Ozmózisnak nevezzük az olyan „egyirányú” diffúziót, amely oldat és oldószer között jelentkezik, ha ezeket ún. féligáteresztő (más néven szemipermeábilis) fal (hártya) választja el. Féligáteresztő az olyan fal, amely az oldószer molekuláit átengedi, de az oldott anyag molekuláit nem. Az ozmózis jelenség 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 cellofán hártyát egy kb. 3-4 cm átmérőjű, hosszúnyakú üvegtölcsérre. A ragasztást ún. „akvárium-ragasztóval” könnyen elvégezhetjük. Töltsünk a tölcsérbe cukoroldatot és jelöljük meg a tölcsér szárán az oldat szintjét. A tölcsért állványba fogva, az ábrán látható módon helyezzük vízzel telt főzőpohárba úgy, hogy az oldat és a víz szintje egy magasságban legyen.



3.13. ábra Kísérlet az ozmózis nyomás demonstrálására

Rövidesen megindul a víz diffúziója a féligáteresztő hártyán keresztül, mindkét irányban, de az oldat felőli diffúzió kisebb mértékű. E folyamatban, végeredményben az oldat hígul, térfogata nő, a tölcsér szárában 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 kb. 2/3 része, amely majdnem 7 méter magas vízoszlop nyomásának felel meg. A cellofán hártya ekkora nyomást nem bír ki, a demonstráció már néhány deciméteres emelkedés után kényszerű véget ér. A nagy ozmózisnyomás teszi például lehetővé azt, hogy a talaj nedvessége a fák koronájába is eljusson.

Visszatérve a szépiacsonthoz, ezután már megérthetjük a tintahal átlagsűrűség beállító folyamatát. A szabályozás nagy körvonalakban abban áll, hogy az állat a szépiacsonthoz lévő folyadék-gáz arányt képes változtatni. Nagyobb gázhányad könnyebb csont, kisebb arány

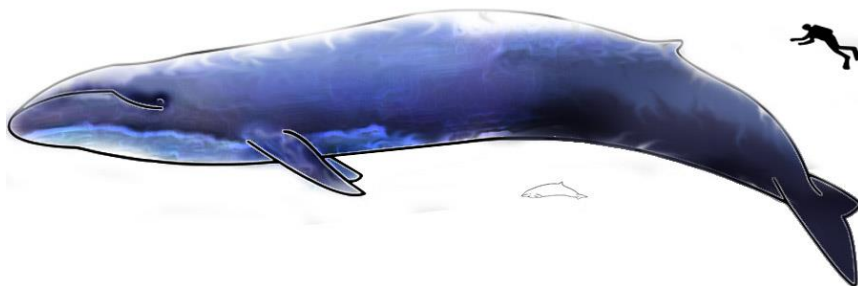
mellett viszont nehezebb csont áll elő, s így változik az állat átlagsűrűsége is. Az ozmózisnyomásnak a csontbeli folyadék mozgásában van szerepe. Kutatók kimutatták, hogy a szépiacsontnak az állat lágy részeihez csatlakozó felületén található lemezei között mindig található folyadék, amely a tengervízhez hasonlóan főleg oldott NaCl-ot tartalmaz. Ha a csonttal érintkező testfolyadékban nagyobb az ionkoncentráció, akkor olyan folyamat indul meg a féligáteresztő szövet- és sejthártyákon keresztül, mely 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 a figyelmet felhívni.[13]

### Mi a helyzet a tengeri emlősökkel?

Mindennapi tapasztalatunk, hogy a vízben könnyebbek vagyunk!

A vízben lévő testekre a Föld vonzásán kívül ugyanis 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, a legnagyobb tömegű szárazföldi emlős, 3000-5000 kg tömegű, addig a kékbálna tömege a 130 tonnát is eléri.



3.10. ábra Kékbálna

A bálna méreteinek ismeretében az Arkhimédész törvénye segítségével már általános iskolás tanulók közreműködésével is megbecsülhetjük a bálna tömegét. Jacques-Yves Cousteau, a közismert Cousteau kapitány tengerkutató mélytengeri megfigyeléseiből tudjuk, hogy egyes kékbálna példányok hossza a 30 métert is meghaladja, átmérőjük ennek kb. a tizedrésze. Egy durva becsléshez elég, ha az állatot hengeres alakúnak feltételezzük, a bálna által kiszorított víz súlya

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

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

A 30 méteres hosszat felhasználva a térfogatra 212 m<sup>3</sup> adódik.

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

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

A bálna tömege néhányszor  $10^5$  kg, azaz néhány száz tonna. (A valóságos tömegnél természetesen nagyobb adódott, mert a bálna alakjára vonatkozóan az egyszerűbb számítás miatt a hengeres alak durva, felső közelítés.)

Ezzel a hatalmas tömeggel képes akár 30 km/óra sebességgel is úszni. (A motorcsónak sebessége körülbelül ekkora). A 60 tonna tömegű ámbráscet a vízből néhány méter magasra még ki is ugrik. Ha ezek az állatok valamilyen oknál fogva a partra vetődnek, akkor ez az életükbe kerül. Képtelenek levegőt venni, mert tüdejük a hatalmas tömegű izom és zsírpárna súlya alatt szinte teljesen összenyomódik. A vízi életmódhoz alkalmazkodott csontvázuk ugyanis képtelen ekkora terhet tartani.



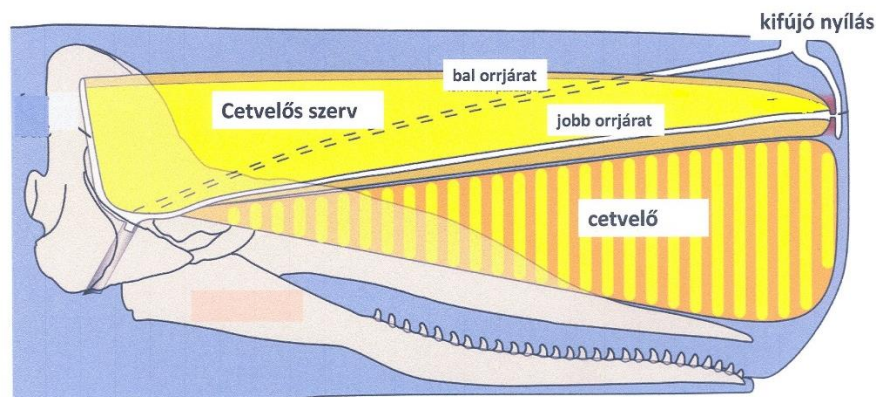
3.11. ábra Ámbráscet és borja

A bálna nem tartózkodik hosszú ideig a tenger mélyén, de ha eljut 50-60 méter mélyre, testét akkor is már a légköri nyomás 5-6 szorosa terheli. Vízszintes, lapátszerű farok úszójával, melynek teljesítménye elérheti az 500 lóerőt, (amely egy traktor teljesítményének közel kétszeresével egyenlő, 1 lóerő = 736 watt) a vízre csap. A reakcióerőnek, a víz által a bálna 4 méteres vízszintes kiterjedésű farok úszójára ható erőnek köszönhetően bukik a mélybe, ahol a légköri nyomás többszöröse nehezedik rá. 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 ott maradhat abban a mélységben. Ha feljut a felszínre, levegőt vesz, tüdeje kitágul, a felhajtóerő megnő. A változatlan nehézségi erő, de a megnövekedett felhajtóerő miatt nem szükséges teljesen elmerülnie, a test egy része a vízből kiemelkedik, úszik. Azt is mondhatjuk, hogy a bálna változatlan tömege mellett az átlagsűrűségét ( $\rho = m/V$ ) a térfogatának 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, az ún. cetvelővel töltött kamrák vannak. A fejében található szerve, mely a cetolaj vagy bálnaolaj néven ismert anyagot tartalmazza, felelős az ún. semleges úszóképesség biztosításáért. A kb. 2000 liter cetolaj, – mely viasz-észterek és trigliceridek keveréke –, egy „zsákban” helyezkedik el, s rendkívül érdekes termodinamikai tulajdonságokkal rendelkezik. A cetolaj kb.  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  körüli hőmérsékleten folyadék-szilárd halmazállapot-változáson megy keresztül. A  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül relatíve kis viszkozitású folyadék, amelynek atmoszférikus nyomáson a sűrűsége  $862\text{ kg/m}^3$ ,  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  alatt térfogatcsökkenéssel is járó szilárd viasszá kristályosodik, melynek sűrűsége  $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on  $889\text{ kg/m}^3$ .

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  $1\text{-}2\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet-változás jelentős sűrűség-változással jár. Mivel a szerv tömege nagy, e módszerrel hatékony tömegnövekedés érhető el. A cetvelő hőmérséklet-szabályozásában a szerven áthaladó érhálózat melegítő hatása és a szervet átszelő orrjáratokon átáramló tengervíz hűtő hatása játszik szerepet [14]. 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.



3.12. ábra Az ámbráscet cetvelőt tartalmazó szerve

E helyen csak megjegyezzük, hogy ezzel a szervvel valósul meg a bálnák és delfinek ultrahangokkal történő tájékozódása, az echolokáció is. A szerv ekkor „viaszlencse” 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 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.



3.13. ábra Szárcsa

Ha tolluk víztaszító tulajdonsága megváltozik, például környezetszennyezés miatt, akkor a fogva tartott levegő mennyisége kisebb lesz, jobban elmerülnek. Ha a tavakba olyan szennyező anyag (pl. mosószer) jut, amely csökkentheti a víz felületi feszültségét, ekkor a toll jobban nedvesedik, az állat akár vízbe is fulladhat. Látható, hogy a környezetszennyezés az állatot két oldalról is veszélyezteti.

### **Az úszás munkával jár**

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

Végezzünk számításokat!

A  $V$  térfogatának  $f$  hányadával a vízbe merülő  $\rho$  sűrűségű állatra ható felhajtóerő ( $\rho_v$  a víz sűrűsége)

$$F_f = fV\rho_v g$$

A nehézségi erő és a felhajtó erő

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

eredőjének megfelelő nagyságú, de ezzel ellentétes irányú erőt kell kialakítani az állatnak munkavégzéssel ahhoz, hogy el ne merüljön.

Ez az erő előállítható, ha az állat valamely testrészével lefele mutató irányban a vízre csap. Ekkor ugyanis a víz lefele gyorsuló mozgást végez, a víz ellenereje hat az állatra, amely fenntartja őt a vízen.

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

$$m = Av\rho_v$$

A víz impulzusa pedig  $mv$ , amely éppen az úszó test lendület-igénye is. Az **impulzus időegység alatt** történő változása éppen a meglökött víz állatra ható **reakcióereje**, amely a testét fenntartja. Egyenletekkel a következő formában adható meg:

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

ahonnan

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

A mozgásban lévő testrészek által végzett munka a **víz kinetikus energiájává** alakul. Így a testrész teljesítménye éppen a víz egységnyi idő alatt történő mozgási energia változásával lesz egyenlő, amely megfelelő számításokkal

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

képlettel fejezhető ki.[12]

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 számításhoz használt további adatok: a test 95 százaléka merül vízbe, a mozgó végtagok teljes területe  $600 \text{ cm}^2$ , s legyen  $\rho = \rho_v$ )

Ellenőrizzük számítással magunk is a teljesítmény fenti értékét!

### 3.3 A földigiliszta és a „hidrosztatikai váz”



3.14. ábra A földigiliszta

Az élőlények figyelemre méltó csoportját alkotják azok a szervezetek, amelyekben nem található szilárd váz, a puhatestűek. Az ilyen élőlények működésükkor, helyváltoztatásuknál szilárd váz hiányában sajátos módszerekkel élnek, mozgásukkor a hidrosztatikai tanulmányinkból ismert Pascal-törvényt alkalmazzák. ***Pascal törvénye szerint: zárt térfogatú folyadékokban és gázokban a külső erőhatások miatt fellépő nyomás mindenhol és minden irányban azonos.***

Mit jelent a hidrosztatikai váz fogalom?

Ha tanulmányainkban nem szerepelt e fogalom, érdemes akár lexikonból megismerni. Erre való a „Biológiai kislexikon, Digitális Tankönyvtár”, amelyet az internetről elérhetünk. Eszerint:

**hidrosztatikai váz** (*hydrostatic skeleton*)

„Lágytestű gerinctelenekben fellelhető **támasztórendszer**, amely a testüregen belül található folyadék összenyomhatatlanságán alapszik. Például a földigilisztákban a cölóma-folyadék nyomás alatt van a testüregben, és ezért támasztékot jelent a belső szervek számára.”

Az ún. **hidrosztatikai vázzal** rendelkező élőlények működése azon a tényen alapul, hogy belsejünkben **összenyomhatatlan folyadék** van, **állandó térfogatban, izmos falú edénybe zárva**. A puhatestűek egyik legismertebb képviselője a földigiliszta, amelyben a tartó szerepet és a mozgás aktiválását is **hidrosztatikai váz** oldja meg. A földigiliszta tulajdonságait biológiai tanulmányainkból ismerjük. Ismeretes, hogy a bőrízom-tömlővel rendelkező állatoknál a bőr összenőtt az alatta lévő izomzattal. Mozgásukat a **hengeres testet** borító falban lévő hosszanti- és haránt irányban futó izmaikkal koordinálják. Az izmok működésekor a henger átmérője és hossza is változtatható.

Ismerkedjünk meg a hidrosztatikai váz sajátjaival és szerepével az állatok helyváltoztatása folyamatában!

A hidrosztatikai váz elnevezés onnan adódik, hogy az izmok összehúzódásakor megjelenő **erők hatása** a zárt térfogatban lévő folyadékban **nyomásváltozás** útján továbbítódik. A hidrosztatikai váz működését **modell** segítségével érthetjük meg, amely egyszerűen egy rugalmas anyagból készült, folyadékkal töltött, zárt,  $r$  sugarú,  $l$  magasságú henger alakú tartály [15].

A haránt izmok összehúzódásakor az állat vékonyabbá és hosszabbá válik, a hosszanti izmok összehúzódása rövidebb és „kövérebb” állatot eredményez. Ha a hosszanti izmok csak a test egyik oldalán húzódnak össze, akkor a hengeres test görbül. Ez a művelet szolgál mozgás során az irányváltoztatásra. A tartály térfogata állandó:

$$V = r^2 \pi l = \text{állandó} .$$

Az átmérő- és a hossz változásának a kezdeti méretekkel való kapcsolata a térfogat állandóságából a következőképpen adható meg,

$$\frac{dr}{dl} = -\frac{r}{2l}.$$

Látható, hogy a hosszanti izmok és a haránt izmok összehúzódásukkor az állat méreteiben nem azonos mértékű változásokat eredményeznek.[16]

Vizsgáljuk meg, hogy milyen **erőkkel** kell számolnunk az **izomműködés** említett műveletei során! Végezzünk kvantitatív megfontolásokat is!

Számításainkhoz használjuk a következő jelöléseket. Legyen a henger sugara  $r$ , s tegyük fel, hogy a körkörös (haránt) izmok a henger  $L$  hossza mentén egymástól egyenlő távolságban futnak. Jelölje  $A_1$  a henger egységnyi hosszára jutó területet.

A harántizmok összehúzódásakor a megnövekedett belső nyomás miatt a hengerfalra erő hat. Ha az izom összehúzódásakor az izomban ébredő feszültség  $\sigma$ , akkor a gilisztá **egységnyi hosszára ható**, a falban ébredő  $f_1$  erő az  $f_1 = \sigma A_i$  kifejezéssel egyenlő. (Az  $f_1$  mértékegysége a felületi feszültséghez hasonlóan erő/hossz.)

E művelet során megnő az állat belsejében a nyomás, s ennek következtében a Pascal törvény szerint a hengerfelület minden pontjában érezhető a nyomásnövekedéséből adódó erőhatás.

Becsüljük meg a nyomás értékét a folyadék belsejében!

Használjuk számításainkhoz a következő gondolatkísérletet. Vágjuk ketté az  $L$  magasságú hengert az átmérő mentén. (Emlékeztetnénk, hogy hasonló módszerrel számítottuk ki „A fakéreg mintázata” című fejezetben a hosszanti repedések kialakulásának elemzésekor a  $p$  túlnyomás alatt álló hengerben a nyomás és a falban ébredő  $\sigma$  feszültség közötti kapcsolatot.)

A folyadékban lévő  $p$  nyomás a félhengereket a falra merőleges irányban tolja szét, amellyel a falban ébredő  $F_L$  erő tart egyensúlyt.

$$F_L = 2f_i L$$

A falban, az  $L$  hossz mentén lévő izmokban ébredő  $f_i$  erők összege egyensúlyt tart a megnövekedett  $p$  nyomásból származó, falra merőleges irányú  $F_p$  erővel, amely a már említett számítások alapján az

$$F_p = p2rL$$

kifejezéssel adható meg.

A két erőhatás egyenlőségéből következik, hogy a nyomás a folyadékban

$$p = \frac{f_i}{r} = \frac{\sigma A_i}{r}$$

a görbületi nyomáshoz hasonló formulával írható le.

Térjünk vissza a gilisztahoz!

Becsüljük meg a **nyomást** a giliszta belsejében!

Legyen a giliszta sugara  $r = 0,4 \text{ cm}$ , a hosszegységre jutó harántizmok összes felülete  $A_i = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ . Az izomban ébredő feszültség értékének használjuk az emberi izomban tapasztalt  $\sigma = 7 \cdot 10^6 \text{ dyn/cm}^2$  értéket. Így a giliszta belsejében a harántizmok összehúzódásakor  $p = 2,63 \cdot 10^4 \text{ dyn/cm}^2 = 19,8 \text{ torr}$  nyomás tapasztalható. Ez egy relatíve nagy nyomásérték.

Az erő, amely e nyomás hatására a giliszta bőrét terheli

$$F = p \cdot r^2 \pi = 1,32 \cdot 10^4 \text{ dyn} = 0,132 \text{ N}.$$

A hosszanti izmok viselkedése hasonlóan számítható.[16]

Határozzuk meg a giliszta mozgásában szerepet játszó, a **henger falában fellépő** feszültségeket!

Ha jelen esetben is alkalmazzuk az  $l \gg r$  közelítést, akkor

$$\sigma_1 \approx \frac{r}{h} p, \quad \sigma_2 = \frac{r}{2h} p$$

és a hosszanti irányban tapasztalt feszültség a haránt irányúnak kétszerese, azaz

$$\sigma_1 \cong 2\sigma_2.$$

Ez az eredmény azt mutatja, ha az állat ugyanakkora nyomásváltozást szeretne létrehozni az említett mindkét izommal, akkor a harántizmokat tartalmazó terület kétszer akkora kell, hogy legyen, mint a hosszanti izmoké.

### 3.4 A csigaházás polip és a fizika

Ebben a fejezetben azt szeretnénk megmutatni, hogy csupán egyetlen *érdekes élőlény* sokoldalú megismerése miként kapcsolható a fizikához is. Nem is fontos csupán az iskolai tanulmányainkra támaszkodni, bárholnan gyűjthetünk róla ismereteket. Az internet kiváló lehetőségnek kínálkozik, de a hagyományos források (könyvek, videók) is hasznosak lehetnek a gyűjtés során. E gyűjtőmunkában bizton számíthatunk diákjaink segítségére. Az állat felépítése, élettere, mozgása, érzékelése, táplálkozása, kommunikációja, stb., mind-mind lehet egy-egy terület, amelyet a diákok által szerzett ismeretek (lehetnek filmek, fotók, ábrák, stb) birtokában megpróbálhatunk a fizikával is kapcsolatba hozni.

Az alábbiakban egy lehetséges feldolgozást mutatunk be, melynek főszereplője egy puhatestű, fejlábú élőlény, a **csigáspolip**, a **Nautilus pompilius**. De lehetne más is, például a denevérek, a bálnák, delfinek, paradicsommadarak, stb., amelyek sok-sok szállal kapcsolódnak a fizikához. Megjegyezzük, hogy minden adatgyűjtésnél nagy segítséget jelent, ha megkeressük az élőlény latin nevét, s keresésünkben használjuk is azt. Ilyenkor a témában a különböző nyelveken található anyagok is segítségünkre lehetnek. Így a biológiai, fizikai ismereteket gyűjtő bűvárcodásunk azonnal nyelvi gyakorlás is lehet.

#### A Nautilus és a fizika

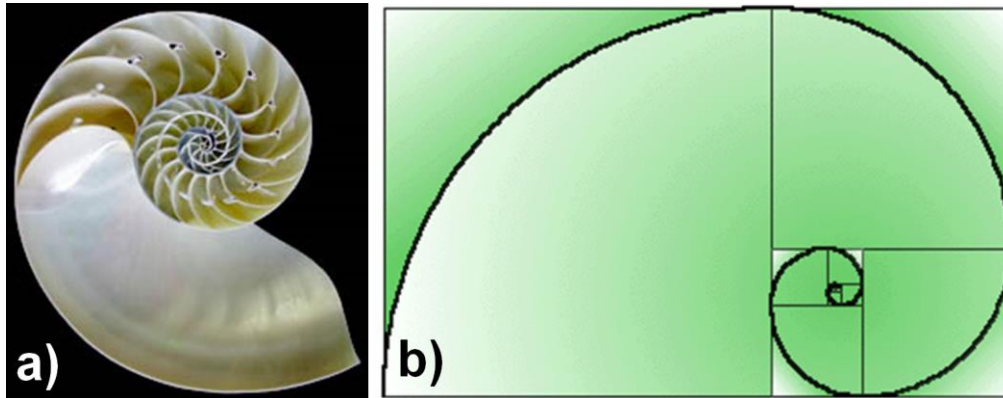
A Nautilus pompilius vagy csigaházás polip a lábasfejűek közé tartozik. A mintegy 20 cm-re megnövő, gyöngyházás Nautilus ma is élő faja azoknak a puhatestűeknek, amelyek már 550 millió évvel ezelőtt megjelentek. „A csigáspolip élő fosszília” – szokták mondani. A polipok közül az egyetlen, amely házat növeszt.



3.15. ábra Csigaházás polip

## Felépítés

A csigáspolip a házat szigorú rend szerint építi. A lapos, szinte egy síkban készült építmény *logaritmikus spirális* módjára tekeredik. A 3.16. ábra a csigáspolip házának hosszmetsetét mutatja.



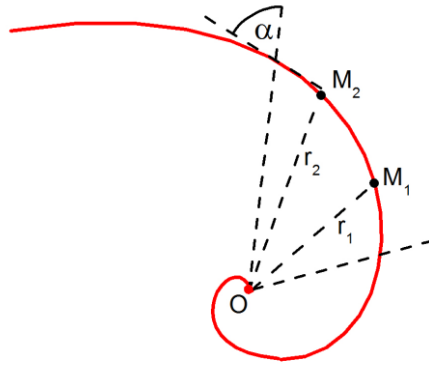
3.16. ábra a.) A csigaház hosszanti metszete és b.) Fibonacci spirális

A logaritmikus spirális a természetben, különösen a növények világában gyakran megfigyelhető. Például a napraforgótányéron elhelyezkedő magvak két, ellenkező irányban tekeredő spirálsereget tartalmaznak [18].



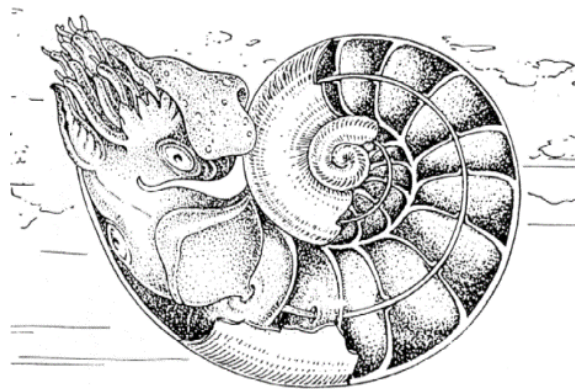
3.17. ábra Napraforgó virág

A tányéron a balra tekeredő spirálseregek száma úgy aránylik a jobbra tekeredő spirálok számához, mint két egymást követő Fibonacci szám, pl. 34/55. A Fibonacci számok sorozatának bármely eleme az előző két elem összege, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, .... Az egymást követő Fibonacci számok aránya egyre jobban megközelíti a 0,618034 értéket, a határérték a  $\varphi = (\sqrt{5} \pm 1)/2$  az ún. aranymetszési szám. A görbe úgy tekeredik, hogy közben minden pontjának a középponttól mért távolsága, a  $r$  sugár egyre nő, miközben a görbe bármely pontjához húzott érintő a sugárral meghatározott  $\alpha$  szöget zár be (3.18. ábra).



3.18. ábra A logaritmus spirál görbéje

A csigáspolip házában **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 kamráival összeköttetésben a spirál kezdőpontjánál lévő kamrához csatlakozó **szifóján** keresztül van (3.19. ábra). Kamrái gázt tartalmaznak, csak a néhány frissen „lefalazott”, legkülső kamrájában van kevés tengervíz.

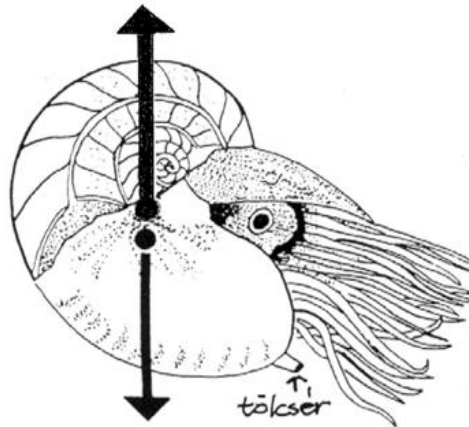


3.19. ábra A szifó spirálisa [19]

### Élettér

Az állat a legkülső kamrában él, sajátos, jól záró izomgyűrűvel tapad a kamrafalhoz, így a gáz a kamrákból nem tud megszökni. A természetfilmek keresett szereplője a Nautilus, amelyből meggyőződhetünk érdekes „himbálódzó” mozgásáról. Az állat ilyenkor **lebeg**, mert testének és a gázzal töltött kamráknak az együttes súlya éppen megegyezik a felhajtóerővel. Állandó pozícióját az biztosítja, hogy a nehézségi erő támadáspontja a felhajtóerő támadáspontja alatt van (3.20. ábra).





3.20. ábra Nautilus lebegése [19]

Ha kibillenne ebből a helyzetből, akkor a megjelenő erőpár forgatónyomatéka, – mint egy fizikai ingát –, azonnal visszabillenti. Nem leng tartósan, mert a vízben a közegellenállás miatt a lengés amplitúdója exponenciálisan csökken, tehát hamar lecsillapodik. [19]

### Merülés

Azt szokták mondani, hogy a Nautilus „élő tengeralattjáró”.

A Nautilus 50 és 500 méteres mélységben is előfordul. Ekkora mélységbeli különbségek igen nagy *nyomás- és hőmérséklet-változásokkal* járnak. Az állatnak tehát e szélsőséges körülményekhez alkalmazkodnia kellett. A csigáspolip nappal általában a tengerfenéken él, csak éjszaka merészkedik magasabbra. Ilyenkor néhány tíz méter mélységben, a melegebb vízrétegben tartózkodik. Tojásait, – melyek bőrrel borított kapszulákhoz hasonlítanak –, is ide rakja, általában kemény felületre, sziklára vagy korallokra. Szaporodását még most is titok övezi. Csak 1985-ben figyeltek meg akváriumi körülmények között először élő embriót [20].

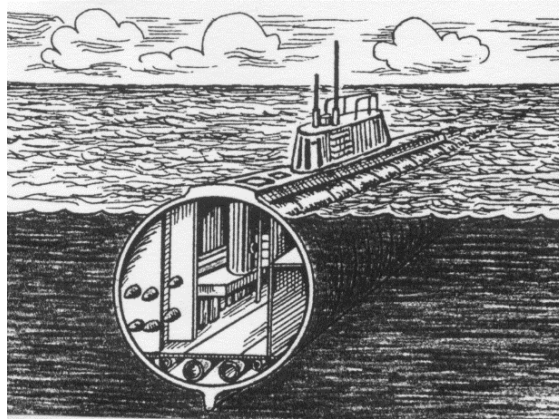
A csigaházaspolip nagyon rövid idő alatt tud több száz méter mélyre süllyedni, s onnan felemelkedni. A különböző mélységekhez való alkalmazkodásra sajátos módszert használ, mert az ún. „semleges úszóképesség”, a **lebegés beállítására** a már említett körülmények változása miatt, minden mélységben szükség van. Mivel a ház és a puhatestű állat együttes térfogata, – s emiatt a felhajtóerő –, a mélységtől függetlenül mindig ugyanakkora, az egyes eltérő mélységekben tömegét kell szabályoznia.

### Hogyan teszi?

A frissen lezárt kamrák tengervizet is tartalmaznak. Egy adott mélységben a lebegését ún. ozmoregulációval biztosítja. A víz a kamrából ozmotikus úton – a szifo szövetein, sejtjein keresztül –, a testnedvek ozmózis nyomását megfelelően beállítva tűnik el. Ezzel csökken az

állat átlagsűrűsége, így a csigáspolipra ható nehézségi erő is, s az állat a felhajtóerőnek köszönhetően felemelkedik. Süllyedéskor néhány hátsó kamrájába ismét a *szifó* szöveiteinek, sejteinek membránjain keresztül folyadékot juttat megnövelve ezzel az átlagsűrűségét, így állapota a mélyebb vizekben, a nagyobb nyomású helyeken stabilizálódik.

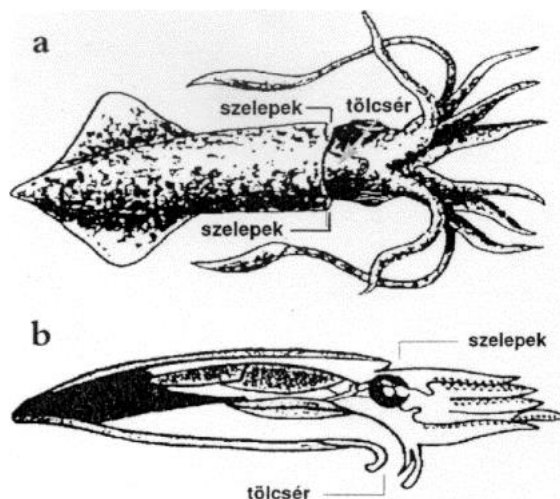
Házában túlnyomásnak kell lennie, amely néhány száz méter mélyen már jelentős, ellenkező esetben gyöngyházból készült háza a nagy külső nyomás miatt összeroppanna. A csigáspolip tökéletesebb, mint a hasonló elven működő tengeralattjáró (3.21. ábra), mert a tengeralattjárónak a víz kiszorításához használt levegőt többletsúlyként kell magával vinnie.



3.21. ábra Tengeralattjáró sematikus rajza

### Helyváltoztatás

A Nautilus puhatestű társaihoz hasonlóan, *vízszugárhajtással* halad. A rakétameghajtást Ciolkovszkij a 19. század végén írta le. Ismeretes, hogy a rakétákat a magukkal vitt üzemanyag elégetésekor keletkező gázok kiáramlásánál fellépő reakcióerő hajtja előre. A polipok, kalmárok, tintahalak, amelyek igen aktív vadászok, helyváltoztatáshoz a *vízszugár-meghajtást* már sokkal régebben használják. Meneküléskor a testük nagy hányadát elfoglaló *köpenyüregbe* vizet szivattyúznak, s a tölcsérré alakult szervükön keresztül azt kilövellik, amitől – az impulzus-megmaradás törvényének megfelelően – ők az ellenkező irányba mozdulnak 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. A 3.26. ábrán az elvet a kalmár sematikus ábráján mutatjuk be, mert ennél az állatnál a részletek szembetűnőbbek. A köpenyüreg töltődését a „3.6. Áramlások az élővilágban” című fejezetben külön elemezzük.

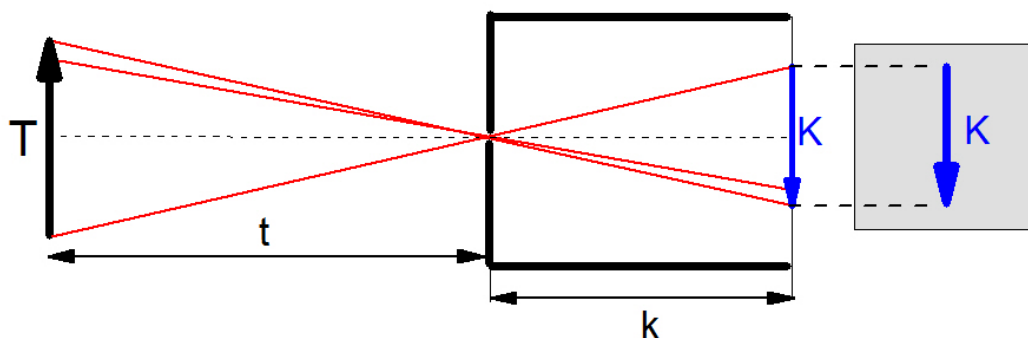


3.22. ábra A kalmár sematikus rajza

Az állat a tölcsért izom segítségével begömbíti, mozgása során így képes *irányváltatásra* is.

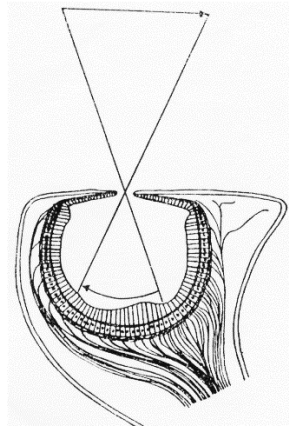
### Érzékelés

A csigáspolipok szeme egyszerű lyukkamera. A lyukkamera, sötétkamra, camera obscura (latin) szinonimák. A sötétkamra működése a fény egyenes vonalú terjedésének bizonyítéka (3.23. ábra). A külvilágban lévő tárgyról a fény a kamrába, az egyik falán lévő piciny nyíláson keresztül jut be.



3.23. ábra A sötétkamra képalkotása

A tárgy fordított állású, nem nagyon fényes képe a szemközi falon figyelhető meg. Minél kisebb a lyuk mérete, annál élesebb, de fénysegeyebb kép jelenik meg. Egy bizonyos lyukméretnél újra elmosódottság tapasztalható, amelynek magyarázata a fény hullámtulajdonságával (fényelhajlás) kapcsolatos. A Nautilus ún. *kehelyszeme* is egy sötétkamra, amelynek alján vannak a látósejtek (3.24. ábra)



3.24. ábra Kehelyszem

A látósejtek a környezettől annál tökéletesebben vannak elszigetelve, minél mélyebb a kehely, és minél kisebb nyíláson jut be a fény. E két körülmény azt eredményezi, hogy az ideghártyán ugyan éles kép jelenik meg, de a kép nagyon fényszegény. Azokba a mélységekbe, amelyekben az állat általában előfordul, már nem jut sok fény a külvilágból, elég, ha szemével csak sötétet és világosat érzékel, tájékozódásához egyébként *kémiai érzékelést* használ.

### Újabb felfedezések a csigaházzól

A csigaház elragadó geometriája és kiváló tulajdonságú anyaga sok kutatót tett kíváncsivá a finom részleteket illetően. Ezért már Robert Hooke óta többen foglalkoztak a ház belső szerkezetének és funkciójának vizsgálatával. A csigaházzól az utóbbi évtizedben a kutatásban jelenlévő képalkotó módszerek tökéletesedésével egyre finomabb méretskálán válhattak ismertté szerkezeti részletek. Az 1990-es években, Japánban akvárium körülmények között is sikerült megfigyelni a Nautilus fejlődését születésétől kezdve [21]. Nem volt kis feladat biztosítani az állat valódi életterének megfelelő körülményeket, a nagy tartományt átívelő nyomás- és hőmérsékleti eltéréseket. Kiderült, hogy a tojásból – amely bőrrel bevont kapszulához hasonlít – kikelt *embrió a fejlett állat kicsinyített, pontos mása*. Ez különös, mert ez a kapcsolat más esetekben, például az embernél az újszülött és a felnőtt egyed vonatkozásában egyáltalán nem mondható el. A csigáspolip élete folyamán növekedése során megőrzi ezt a tulajdonságát, az *önhasonlóságot*. Ez adta az ötletet a kutatóknak valószínűleg ahhoz, hogy megvizsgálják a csigaház kamráinak tulajdonságait *fraktál analízissel* is. A pontosan félbevágott csigaház szkennelt képén, a fraktáldimenzió meghatározásánál rendszerint alkalmazott ún. „box-counting” módszerrel végzett elemzésekből azt az eredményt kapták, hogy a ház a Nautilus születésétől fogva fraktál. Növekedésére az önhasonló kritérium jellemző. A kétdimenziós képből kapott eredményt a három dimenzióra kiterjesztve kiderült,

hogyan az eredeti Nautilus ház fraktáldimenzója:  $2.635 \pm 0.006$ . Ennek alapján a 30 kamrás állat 31. **kamrájának méretét** és a kialakulásának **várható idejét** is előre lehetett jelezni. Számításaik eredményét az adott csigaházon végzett térfogatmérési vizsgálatokkal alá is támasztották [22]. A **csigaház kialakulásának** mechanizmusát is megfelelő képalkotó eljárásokkal derítették ki, s a mai napig is próbálnak elméletet alkotni a minden méretskálán csodálatos szerkezet szerveződésének részleteire is. A biokristályosodás tudomány területét érintő kutatómunka manapság is folyik. Pillanatnyi elképzelések szerint a csigaház gyöngyház fényű belsejét alkotó szerkezet megfelelő vastagságú aragonit ( $\text{CaCO}_3$ ) lapocskák (lamellák) síkbeli elrendeződéseként jön létre, mely síkok között szerves molekulák, rugalmas fehérjék, biopolimerek teremtenek kapcsolatot, s „irányítják” a növekedést spirálissá [23]. Laboratóriumi körülmények között szeretnék növesztetni hasonló szerkezeteket, amelyből kis mintákat már készítettek, de „csigaháznyi” méreteket a mai napig nem sikerült előállítani.

### 3.5. A Tündérrózsák királynője



3.25. ábra Az amazonasi tündérrózsza

Az amazonasi tündérrózsza (*Victoria amazonica*) a tündérrózsák királynője, a világ legnagyobb úszólevelű növénye. Brazíliában, a csendes folyású Amazonas folyó sekély vizeinek felszínén él. **Leveleinek átmérője** elérheti a **3 métert** is. Hatalmas leveleinek **pereme** több, mint 10 cm magasan enyhén kifelé hajlik. A levelet a növény tövéhez aránylag erős levélnyel köti. Egy-egy levélnyel akár 8 méter hosszú is lehet, mert a tónél fejlődő újabb levelek nagy helyigényének biztosításához a nyél a levelet egyre távolabb kell, hogy tolja. A hatalmas levél élénkzöld színű, az erek körül a felülete domborulatosan kiemelkedik.



3.26. ábra A levél pereme és a hosszú levélnyelek

Az óriás levél **szilárdítását** a szinte mérnöki pontossággal megtervezett **érhálózat** biztosítja, amely sugárirányú és keresztirányú erek hálózatából áll, amelyek a levelet kis négyszögekre és háromszögekre bontják (3.27. ábra). Ez a speciális ún. kétdimenziós celluláris szerkezet, mely nem ritka az élővilágban, a levélnek különösen jó **mechanikai** sajátságokat kölcsönöz. Erre nagy szükség van, hiszen hatalmas méreteinél fogva jelentős tömeggel, így súllyal is rendelkezik. Hasonló felépítésű, ún. kétdimenziós méhsejt szerkezet a méheknél a lépben látható, amely – egyéb jó tulajdonságai mellett –, szintén igen ellenálló a mechanikai hatásokkal szemben. A sok vastag ér megnövelné a levél súlyát, s elmerülne. Ezt elkerülendő, az **erek belül** levegővel töltött **csatornákat** tartalmaznak. Így válik kisebbé a levelek átlagsűrűsége, s hatalmas méretük ellenére kiváló felépítésüknek köszönhetően mégis úsznak a vízen. A levelet az ereket alsó oldalán erős tüskés szerkezet óvja az állatoktól, sőt a nyelet is tüskék borítják.



3.27. ábra Erezet a levél fonákján

Az erős érhálózat a levelet **nagy teherbírásúvá** teszi, a felületén, – egyenletesen elosztva – akár 60-70 kg tömeget is elbírhát. A tündérrózsa levelén a **légzőnyílások a levél felületén** vannak (más leveleknél a levél fonákján), ezért fontos, hogy a levelet ne borítsa tartósan víz, a ráhullott csapadék könnyen elfolyjon róla. Az egyébként erősen **víztaszító** (hidrofób) levéllemez domborulatai is segítik a víz gyors elvezetését, a víz a levél körben felálló peremén lévő

bevágásszerű réseken át könnyen kifolyhat. A tündérrózsa meghonosítására Európában több próbálkozás is született, itt először 1849-ben virágzott [24].

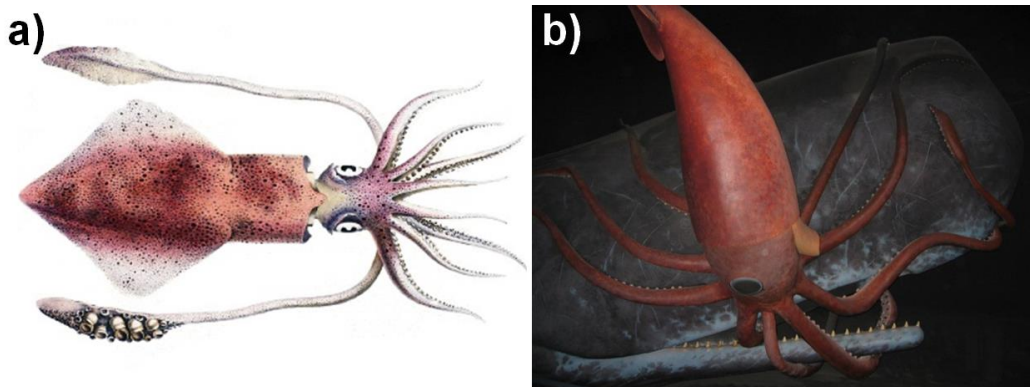
### 3.6. Áramlások az élővilágban

#### A Bernoulli-törvény a természetben

A természetben szemlélődve gyakran vehetünk észre olyan jelenségeket, melyekben az iskolában tanult fizika törvények köszönnek vissza. Néha első látásra nehéz felismerni azokat, de előbb-utóbb sikerül, ha búvárkodunk egy kicsit a biológiában is. Lássunk néhány, az áramlásokhoz kapcsolódó érdekességet.

#### A kalmár és a köpenyüreg töltődése

Az óriáskalmár szörny a tenger mélyéről. Új-Fundlandban előkerült egy példány, kiterjesztett karokkal a hossza 20 méter, súlya 1 tonna volt. Az ámbráscet az ellensége. A kalmárok is azért nőhetnek meg olyan óriásira, mert nincsen külső héjuk. Vízen a felhajtóerő miatt sokkal kevésbé kell korlátozni a súlyt, mint a szárazföldön. Sok legenda terjedt el az óriás puhatestűekről, de élő óriás példányokat sokáig nem sikerült megfigyelni. Csupán a kifogott ámbráscetek gyomrában találtak óriás kalmárokra utaló nyomokat.



3.28. ábra a.) Kalmár és b.) óriás kalmár küzdelme az ámbráscettel

Először 2004-ben japán kutatók közöltek képeket élő óriás kalmárról [26], s csak 2012 júliusában sikerült először lefilmezni őt természetes környezetében [27].

A kalmár lassú mozgása az áramvonalas alakot hasznosan kiegészítő deltoid úszólebenyeinek periodikus moztatásával valósul meg. Gyors helyváltoztatáshoz speciális szervet használ, amelyet 3.22. ábrán már ismertettünk, amikor csigáspolip esetében – a fejlábúaknál általánosan használatos – *víz sugarhajtásról* először esett szó. Veszély esetén a kalmár is vizet szív a köpenyüregébe, majd annak csővé módosult, tölcsérré alakult alsó szegélyén át izmai

összehúzóásával vizet lövell ki. A kilökött víz reakcióereje, mint egy rakétát – az impulzusmegmaradás törvényének megfelelően – hajtja őt előre. Ez a vízsugárhajtás-módszer lehetővé tesz  $70 \text{ km/óra}$  sebességet is. A tölcsér végét egy izommal képes mozgatni, így mozgása során irányt is változtathat. A felszín közelében élő legtöbb kalmár testének sűrűsége nagyobb a vízénél, ezért csak úszólebenyeik állandó csapkodása árán maradnak fenn a vízen. Ha sugárhajtásos helyzetváltásra kényszerülnek, gyakran kiemelkednek a vízből, s akár 45 métert is tudnak „repülni” a víz felett.

Hogyan kerül a víz a kalmár köpenyüregébe?

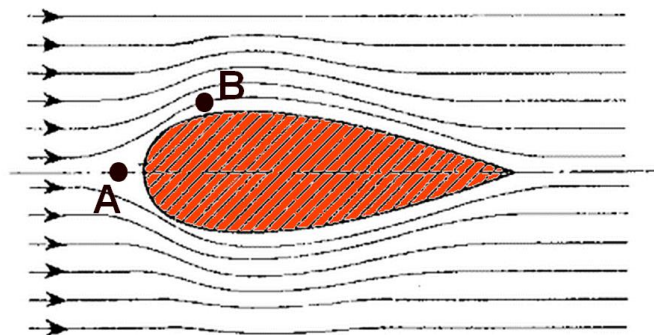
A Bernoulli törvény ismeretében választ kaphatunk a kérdésre. A tenger felszíne alatt  $h$  mélységben mozgó állat körül a nyomásviszonyokat ugyanis az

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho gh = \text{állandó}.$$

Bernoulli-törvénnyel adhatjuk meg, ahol  $\rho$  az áramló közeg sűrűsége,  $p$  a nyomás az áramlási tér azon helyén, ahol  $v$  a közeg áramlási sebessége. (Állóvízben mozgó állat esetében a relatív sebesség említésével kezelhető az állat mozgása áramlási problémaként.)

A kalmár felépítése alkalmazkodott a környezeti körülményekhez. Az állat belső szerveiben a nyomásviszonyok a külső, áramlási térben uralkodó nyomásviszonyoknak felelnek meg.

Vizsgáljuk meg először egy csepp alakú test, mint modell körül kialakult nyomásviszonyokat az áramlási térben. (3.29. ábra) [27]



3.29. ábra. Csepp alakú test az áramlási térben.

Az áramlási térben a cseppnek ütköző folyadék sebessége az A pontban jelentősen lecsökken, így a nyomás a Bernoulli-törvénynek megfelelően ott megnő. (A fenti egyenletben szereplő harmadik taggal nem kell foglalkoznunk, hiszen egy adott mélységben vizsgálódva  $h$  értéke nem változik.) Az áramló folyadék a csepp szélei felé felgyorsul és a legszélesebb részénél a B pont környezetében éri el legnagyobb sebességet. Ezen a helyen ekkor a legkisebb nyomással kell számolnunk. A víz felgyorsításához szükséges erőt éppen az A és B pontban tapasztalt



nyomások különbsége biztosítja. Innen tovább követe a csepp körvonalát, a nyomás fokozatosan növekedik, a víz sebessége pedig csökken. A Bernoulli-törvény szerint tehát a csepp legszélesebb részén található az a hely, ahol a nyomás az áramlási térben a legkisebb. Ha most a csepp helyébe a kalmár alakját képzeljük, megérthetjük a vízbeszívás mechanizmusát. A kalmár testében minden egyes helyen kialakult nyomások természetesen egyensúlyt tartanak a testet körülvevő térben pontról-pontra változó nyomásokkal. Az egyes szervek az evolúció során ennek megfelelően kerültek a valóságban megfigyelhető helyre.

Az 3.22. ábrán feltüntettük a sugárhajtásnál használt *szifo* helyét, s a vízbeszívásra szolgáló *szelepeket* is. A szelepek arra a helyre kerültek, ahol az egységnyi távolságra jutó nyomásváltozás (nyomás-gradiens) a legnagyobb. A nyomásváltozás segíti a vizet a köpenyüregbe. A kalmár mozgási sebességének növekedésével a nyomáseloszlásban tapasztalt különbségek még inkább felfokozódnak, a sugárhajtás még jobban működik.

### **A halak felépítése**

Egy állat sem él jobban a Bernoulli törvény adta lehetőségekkel, mint a halak.

Az egyedfejlődés során alakjuk a nyomásviszonyoknak megfelelően tökéletesedett. Az áramlási tér legkisebb nyomású helyére került a szív, hogy a vér áramoltatása közben a legkevesebb többletmunkát kelljen elvégeznie. A szem pedig ott található, ahol a kétféle nyomás, a sztatikus és torlónyomás egymással egyenlő.



3.30. ábra Pataki pisztráng

Ekkor deformálódik ugyanis a hely környezete a legkevésbé. A szemet ekkor csak a tartózkodási mélységből adódó hidrosztatikai nyomás deformáló hatása terheli [27].

### **Földalatti légkondicionálás**

A természetvárokhhoz hasonlóan az Észak-Amerikában élő feketefarkú prérikutya (3.31. ábra) földalatti járatainak is van szellőző rendszere.



3.31. ábra Feketefarkú prérikutyák és alagútrendszerük bejárata

A prérikutya viszonylag sok ellensége miatt sokat tartózkodik a föld alatt. Ezért olyan alagútrendszert készít, amelyben népes családjával együtt hosszabb tartózkodásra is berendezkedhet. A 20 métert is meghaladó hosszúságú alagútrendszernek két nyílása van (3.32. ábra).



3.32. ábra Az alagútrendszer sematikus rajza

Az egyik bejárat meredek falú, egy kürtőhöz hasonlít, a másik ennél sokkal lankásabb dombocskában végződik. A levegő áramlása a kiemelkedő akadályok alakját követve történik (Coanda-effektus), így a „kürtő tetején” az áramlási sebesség nagyobb, mint a talaj közelében, a nyomás pedig – a Bernoulli-törvénynek megfelelően – a talaj közelében tapasztalt értéknél kisebb. A kürtőnél uralkodó kisebb nyomás miatt az alagútba a másik, lankásabb bejárat felől érkező levegőáram biztosítja a szellőztetést, a levegő folyamatos cseréjét.[28]

### Víz alatt élő bogarak

Ismeretes, hogy bizonyos bogarak, például az afrikai *Potamodytes tuberosus* életük nagy részét a víz alatt töltik, s mivel lélegeznek, a víz alatt is biztosítaniuk kell a levegőt.

A víz alatt csak légbuborékkal létezhetnek. Többnyire sebes folyású vizekben, s nem állóvízben élnek. A folyóvízben olyan kőbe kapaszkodnak, mely körül erős a víz áramlása. Vajon miért? Takarékoskodnak az energiájukkal. Folyóvízben ugyanis a bogárnak nem kell olyan gyakran

újabb levegőbuborékért felemelkednie, mint állóvízben. Sőt, az áramló vízben hosszúkás alakot öltő buboréka még stabilizálódik is. Az elnyúlt buborék körül – az előzőkben említettek miatt – az áramlási térben az adott mélységnek megfelelő hidrosztatikai nyomástól eltérő nyomásviszonyok uralkodnak, a buborékban lévő levegő ezzel tart egyensúlyt. A vízben oldott oxigén mennyiségét mindig az atmoszférikus nyomás szabályozza. Mivel a bogarak általában közvetlenül a vízfelszín alatt élnek, ott a vízben oldott oxigén mennyisége gyakorlatilag az atmoszférikus nyomásnak megfelelő. A buborék körül a víz áramlásának köszönhetően viszont ennél kisebb nyomásviszonyok is kialakulhatnak. Emiatt a vízben oldott levegő a kisebb nyomású buborékba áramolhat. A rovar levegő-fogyasztása miatt csökkenő méretű buborékba tehát a vízből levegő áramlik, a buborék mérete megnő, stabilizálódik [27].

### A vér áramlási sebességének mérése

Létezik néhány módszer a vér áramlási sebességének mérésére, most foglalkozunk azzal, amelyet *elektromágneses módszer* elnevezéssel illettek.

Mint ismeretes, a vér elektrolit, amely kifelé elektromosan semleges rendszer, pozitív és negatív töltésű ionokból áll. A vér áramlása az erekben tehát töltött részecskék  $\mathbf{v}$  áramlási sebességgel történő, meghatározott irányú, rendezett mozgása.

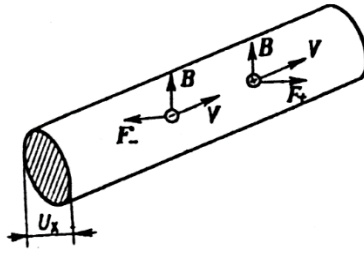
Mi történik, ha az eret **mágneses mezőbe** helyezzük?

Az elektromágnességgel kapcsolatos tanulmányainkból ismeretes, hogy a  $\mathbf{B}$  indukciójú mágneses mezőben  $\mathbf{v}$  sebességgel mozgó  $q$  töltésre erő hat, a Lorentz erő (mágneses tagja), amelyet

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

a  $\mathbf{v}$  sebesség- és a  $\mathbf{B}$  mágneses indukció vektor vektoriális szorzatával határozhatunk meg. Az erő nagysága az  $F = qvB \sin \alpha$ , ahol  $\alpha$  a  $\mathbf{v}$  sebességvektornak a  $\mathbf{B}$  mágneses indukcióvektorral bezárt szöge. Az  $\mathbf{F}$  erő **irányát** jobb kezünknek az egymásra merőlegesen tartott hüvelykujja, mutatóujja és középsőujja szerint, az ún. „jobbkez-szabállyal” adhatjuk meg, ahol a vektorok a  $\mathbf{v}$ , a  $\mathbf{B}$  és  $\mathbf{F}$  sorrendben követik egymást. Ha a töltés előjelet vált, akkor az erő iránya is ellentétesre változik.

A vérben áramló pozitív és negatív ionokra ezek szerint egymással ellentétes irányú Lorentz erő hat (3.33. ábra), emiatt az ellentétes töltésű ionok az érfal szemközti oldala felé mozdulnak el, szétválnak.



3.33. ábra A pozitív és negatív részecskékre ható Lorentz erő

A szétválás mindaddig tart, amíg a sebességre merőleges irányban keletkező  $\mathbf{E}$  elektromos tér által az ionokra ható erő egyensúlyt nem tart a Lorentz erővel, amelyet a következő összefüggéssel fejezhetünk ki:

$$qE = qvB .$$

A létrejött elektromos tér nagyságára tehát a fenti formulából

$$E = vB$$

adódik.

A jelenséget Hall-effektusként ismerjük. A  $d$  belső átmérőjű érfal szemközti oldalán, az áramlási sebességre merőlegesen mérhető feszültséget, a Hall-feszültséget az

$$U_H = Ed = vBd$$

összefüggés alapján számíthatjuk ki, amelyből a  $v$  áramlási sebesség meghatározható. Ha ismeretes az ér keresztmetszetének  $A$  területe, akkor az

$$I = vA$$

összefüggéssel megadható az időegység alatt a felületen átáramlott vér mennyisége is.

A gyakorlatban az eret váltakozó mágneses mezőbe helyezik, ekkor a váltakozó Hall-feszültség felerősítve pontosabban mérhető [29].

### A vérnyomásmérés fizikai alapjai

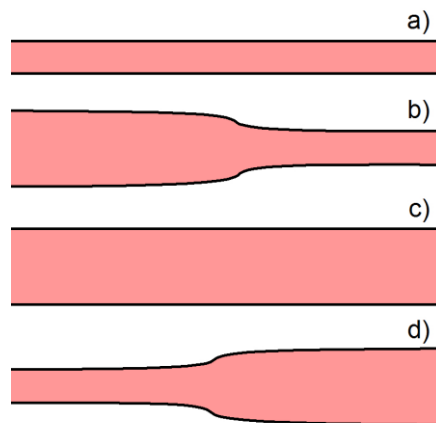
Mielőtt a vérnyomás mérésével foglalkoznánk, beszéljünk először arról, hogyan áramlik a vér a zárt érrendszerben, mi tartja fenn a folyamatos véráramlást.

A szív, a szívizom összehúzódása (szisztolé) következtében vért pumpál az aortába, ahonnan a vér a verőerekbe (artériák) jut. Az érfalak rugalmasságának köszönhető, hogy a szív összehúzódásakor megjelenő lökéshullám, a hang közegbeli terjedési sebességével terjedő vérmennyiség, kitágítja a nagyobb átmérőjű véredényeket, az aortát, artériákat, arteriolákat stb., ahonnan a hajszálerek az artériákban lecsökkent nyomás után kapják vérellátásukat. Ha erre nem lenne mód, a vér teljesen merev falú csövekben áramolna, akkor a megnövekedett

vérmennyiség a hang folyadékban mérhető sebességével, közel 1500 m/s sebességgel katasztrófát okozva jutna el a hajszálerekbe.

A szisztolés nyomás egy egészséges embernél körülbelül 16 kPa. A szív elernyedésekor (diasztolé) a korábban kitágult véredények összehúzódnak, s potenciális energiájuk változása rovására a vér mozgási energiára tesz szert, áramlik, miközben bennük kb. 11 kPa, ún. diasztolés nyomás alakul ki. A vér kilökődésekor megjelenő, az aortában, s az artériákban terjedő, megnövekedett nyomáshullámot hívják pulzushullámnak.

A pulzushullám 5-10 m/s sebességgel terjed, a szív összehúzódásának ideje alatt (kb. 0,3 s) 1,5-3 méter távolságra juthat el. Ez a távolság sokkal nagyobb annál, ahova valójában el kell jutnia, a perifériára. Ez azt jelenti, hogy a pulzushullám azelőtt eljut mindenhol, mielőtt az aortában a szív elernyedése (diasztolé) miatti nyomásesés megkezdődne. Az artéria profilját szematikusan az 3.34. ábra mutatja [29].



3.34. ábra a) az artéria a pulzushullám után, b) az artérián a pulzushullám frontja látszik, c) pulzushullám az artériában, d) elkezdődik a nyomásesés az artériában. [29]

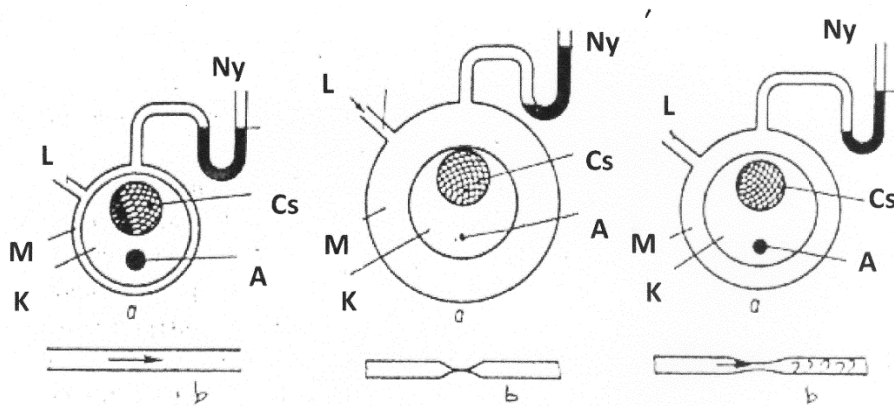
A nagy véredényekben a véráram sebességének pulzálásáért a pulzushullám a felelős. A véráram sebessége sokkal kisebb a pulzushullám terjedési sebességénél, 0.3-0.5 m/s.

A nyomás fizikai paraméter, a vér nyomásának ismerete az orvos számára igen fontos, szerepe a diagnosztikában jelentős. Sokféle betegség kapcsolatos a vérnyomással.

Minden vérnyomásmérő készülék tartalmaz a nyomás mérésére szolgáló egységet, például egy manométert. A manométer U alakú cső, melyben folyadék található. A régebbi vérnyomásmérőkben higanyos manométereket használtak, manapság a nyomás mérésére olyan eszközt használnak, amely alkalmas a digitális kijelzéshez szükséges feltételek biztosítására is. A vérnyomásmérő másik alapvető eleme a mandzsetta. A mandzsetta rugalmas anyagból készült, kettősfalú, és két kivezetéssel rendelkezik. Az egyik a nyomásmérőhöz csatlakozik, a

másik csatlakozás a levegő bepumpálására szolgáló labdacshoz kapcsolódik. A mandzsettát a felkarra húzzák, a váll és a könyök között rögzítik, újabban öntapadós rögzítéssel.

A 3.35. ábra a) része a mandzsetta és a felkar keresztmetszeti képét mutatja, a 3.35. ábra b.) része a sematikus feltüntetett artéria egy-egy darabja.



3.35. ábra M mandzsetta, A felkari artéria, L levegő pumpálása, Ny nyomásmérő, Cs felkarcsont [29]

Hogyan történik a vérnyomás mérése?

A karon lévő mandzsettába levegőt pumpálunk, a manométeren leolvasható a mandzsettában létesített túlnyomás. Ekkor a mandzsetta a karban lévő lágy részeket összenyomja, az ott található artériát is teljesen leszűkíti, megszüntetve ezzel a vér áramlását. (3.35. b) ábra)

Az orvos a fonendoszkópot az alkaron elhelyezi az artériának a mandzsetta alatt található darabjára, mert a mérés során a vér áramlásának változásával kapcsolatos hangjelenségeket szeretné követni. Itt nem részletezendő okok miatt ugyanis, az áramlás jellegében bekövetkező változásokat hangjelenségek kísérik, s így a hangból következtetni lehet a változásokra.

A következő folyamat a mandzsetta leengedése, a túlnyomás lassú, folyamatos csökkentése. Eközben az artéria teljes összenyomása folyamatosan megszűnik, s amikor a túlnyomás eléri a szisztolés értéket, az ún. szisztolés nyomás, a még túlnyomás alatt lévő artérián megindul a vér áramlása. Mivel e helyen az artéria ekkor a normális keresztmetszeténél még szűkebb, az áramlási sebesség a megszokott, lamináris áramlási értéknél nagyobb, az áramlás turbulenssé, örvénylővé válik. (3.35. jobb szélső ábra) A turbulens áramlást kísérő, jellegzetes hangok hallatszanak a fonendoszkópon. A mandzsetta nyomásának további csökkentése során e hang elhalkulva hallatszik, s csak akkor szűnik meg, ha az áramlás visszaáll az eredeti, lamináris áramlásra. Azt a nyomásértéket, amelynél visszaáll a lamináris áramlás, nevezik diasztolés nyomásnak.

Az egészséges felnőtt ember vérnyomása 120/80 Hgmm.

Ha az érfalak rugalmassága csökken, akkor a pulzushullám terjedési folyamata változik, ha a vér összetétele változik, akkor a viszkozitásán, sűrűségén keresztül az áramlás a jellegében módosulhat, minden változás hatással van a vérnyomásra. Emiatt az orvost a vérnyomás "normálistól" való eltérése informálja, kereshető a betegség, amely a változás hátterében áll.



3.36. ábra Higanyos vérnyomásmérő és fonendoszkóp

### 3.7. Kapilláris jelenségek az természetben

A kapilláris jelenségek ismerete az élővilágban nem csak a vizek felszínét benépesítő rovarvilág szempontjából fontos. A legtöbb növényi, állati és emberi szövet tele van kapillárisokkal, az élő szervezetek alapvető folyamatai kapillárisokban játszódnak le, a légzéssel, a táplálkozással kapcsolatos és más, bonyolult kémiai folyamatok is szervesen kapcsolódnak a kapilláris jelenségekhez.

A fatörzsben, az ágakban óriási mennyiségű kapilláris található, ezekben mozog a víz az oldott sókkal a gyökerektől a levelek irányába. A hajszálgökök is kapillárisok. Maga a talaj, amely a gyökér számára a táplálék forrása, szintén kapillárisok halmaza, amelyekből, azok szerkezetétől függően (nem azonos keresztmetszetű, szűkülő vagy táguló csövek) lassabban vagy gyorsabban emelkedik a nedvesség a növény gyökeréhez.

A talajnedvesség megőrzéséhez a talajt kapálni kell, a kiszáritáshoz pedig döngölni.

#### **„Egy kapálás felér egy öntözéssel”**

Vajon mi a magyarázata ennek a népi mondásnak?

Könnyebben boldogulunk a válasszal, ha előtte megoldjuk a következő feladatot.

*A vízszinteshez azonos szögben hajló, két felfelé azonos módon szélesedő, vékony üvegcsőbe, a csövek azonos keresztmetszetű helyeire juttassunk az elsőbe egy vízcseppet, a másodikba egy higanycseppet. Merre mozdulnak el a cseppek, a cső szélesedő vagy keskenyedő vége irányába?*

Megoldás:

A higany az üveget nem nedvesíti, ezért a cseppből a csőben különböző görbületi sugarú, kívülről nézve **domború** végekkel lezárt (domború meniszkusz) kis higanyoszlop alakul ki. A higanyoszlopnak a cső keskenyedő része felőli vége kisebb görbületi sugarú felületben végződik, mint a szélesedő rész felőli vég. A görbületi nyomás, a csepp belsejében uralkodó többletnyomás, a cső görbületi sugarával a

$$p \approx \frac{\sigma}{r}$$

összefüggés szerint változik,  $\sigma$  a folyadék levegőre vonatkoztatott felületi feszültsége. Emiatt a többletnyomás a kisebb  $r$  értékű helyen nagyobb, mint a higanyoszlop nagyobb sugarú részén. E nyomáskülönbség miatt a cseppre cső **szélesedő vége irányába** mutató erő hat, a higanycsepp tehát a cső szélesedő vége felé mozdul el.

Mi a helyzet a vízcseppel?

A víz az üveget nedvesíti, a vízcsepp kívülről nézve különböző görbületi sugarú, **homorú** felületben (homorú meniszkusz) végződik. A kisebb görbületi sugarú a kis vízoszlopnak a cső keskenyedő végéhez közebbi végénél van. A homorú felületekkel lezárt vízoszlop (homorú meniszkusz) belsejében kisebb a nyomás, mint a síkfelületek alatt. Egyébként éppen a homorú meniszkusz megjelenése miatt emelkedik fel általában egy vízbe helyezett üvegapillárisban a víz.

A nyomáshiány is arányos a görbületi sugárral a fenti kifejezés szerint. A vízcsepp szélesedő végénél, a nagyobb görbületi sugarú miatt kisebb nyomáshiány lép fel. A vízcsepp ezért a benne uralkodó nyomásviszonyoknak köszönhetően, a cső szűkülő vége irányában mozdul el.

A víz mozgása a kapillárisok szélesebb helyeiről a szűkebb felé nagy jelentőséggel bír a talaj víztároló tulajdonsága szempontjából. Ha a talaj felső rétege tömörebb az alsó rétegénél, a benne lévő repedések, kapillárisok lefelé szélesednek. A felső réteg az alsóból nedvességgel töltődik fel, a növény gyökerétől a víz a tömör rétegbe jut. Fordított helyzetben az alsó réteg marad nedvesebb, a víz a növény gyökere körül marad, de a felső réteg kiszárad. Talajlazítással, kapálással a repedéseket, kapillárisokat tönkre tesszük, benne a talajszemcsék között szélesebb tartományok keletkeznek, ahova az alsóbb, tömörebb rétegből nem juthat víz. Ez a magyarázata a megfigyeléseken alapuló népi mondásnak: „Egy kapálás felér egy öntözéssel”.



### 3.8. Miért vannak buborékok zivatar idején egyes tócsák felszínén?

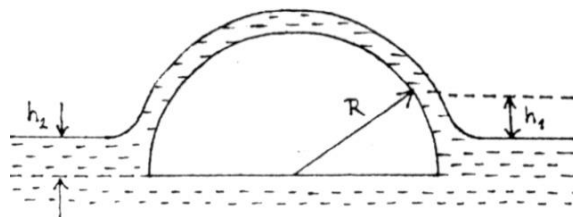
Sokan mondják: „a buborékos eső nem tart sokáig”. Vajon mit mond a fizika erről a népi bölcsességről?

A kérdésfeltevés jellege a problémát a versenyfeladatok közé sorolja. Nyíltvégű feladat, a megoldás szempontjából megfelelő fizikai paraméterek kiválasztását is a tanulóra bízta. Hasonló feladattal már találkoztunk a fakéreg mintázatának elemzésekor. Ilyen típusú feladatokat versenyeken általában a résztvevőkkel a verseny megrendezése előtt több hónappal előre közölnék, s megoldásukhoz minden eszköz használható (IYPT nemzetközi verseny). A versenyen a rendezők arra kíváncsiak, hogy a magyarázathoz a diákok milyen úton jutottak el, s eredményeiket mennyire meggyőzően mutatják be, álláspontjukat meg tudják-e védeni. A következőkben itt egy mintát mutatunk a megoldáshoz, de a kérdésre más úton eljutva is lehet válaszolni.

Nyári esőzések alkalmával gyakran láthatunk buborékokat az utcákon lévő víztócsák felszínén. A buborékok viszonylag sokáig „élnek”, közel félgömb alakúak, mint egy kalap, kis peremmel is rendelkeznek.

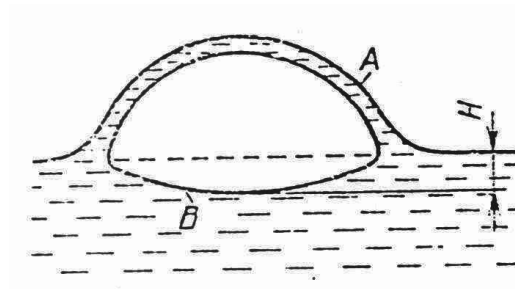
Miért alakulnak ki éppen ilyen buborékok? Van-e kapcsolat az esőzés időtartama és a tócsákon látható buborékok között?

A buborékok kialakulása minden bizonnyal a tócsára zuhanó esőcseppek sebességével, mozgási energiájával kapcsolatos. A nagyenergiájú esőcsepp ugyanis levegőt visz a tócsa vizébe. A becsapódó csepp alatt a vízfelszín kezdetben behorpad, majd szög fejéhez hasonló domborulatba megy át. Különösen felhőszakadáskor előfordulhat az is, hogy a csepp a becsapódáskor mély, csatornaszerű üreget alakít ki. Ez a csatorna azután nem „simul” ki, hanem bezáródik, a felszín alatt buborék képződik, mely onnan a felszínre tör. A félgömb alakú buborékot a 3.37. ábrán látható módon vízköpeny burkolja. A gondolkodó diákokban további kérdések merülhetnek fel. Miért félgömb alakú a buborék? Miért van kis pereme is a buborékoknak?



3.37. ábra Félgömb alakú buborék

A szappanbuborékok gömb alakúak, mert szinte súlytalanok, s alakjukat csak a felületi feszültség alakítja. A buborék olyan alakú lesz, hogy energiája minimális legyen. A legkisebb területű felülete adott térfogatú testek esetén a gömbnek van. A víz alatt lévő buborék esetén is ez a helyzet, ha elég nagy a sugara, akkor félgömb alakú. A víz a buborékot nedvesíti, a folyadék felszíne a buborék körül kissé megemelkedik. A jelenség hasonló a vékony üvegsőben megfigyelhető vízfelszínhez. A perem kialakulása a **kapilláris erő**kkal magyarázható. A buborék, ha rövid ideig is, azért létezik a víz alatt, mert benne többletnyomás uralkodik. A vízfelületen „ülő” buborék alakja a valóságban kissé eltér a 3.37. ábrán láthatótól. A víz felé eső felülete is görbült, de ott a görbületi sugár a levegőben lévő domború részénél nagyobb. Miért alakul ki ez a forma?



3.38. ábra A valós buborék alakja

A többletnyomás feszíti a buborék falát, a nyomás a fal mentén minden pontban ugyanakkora értékű. Határozzuk meg, milyen paraméterekkel fejezhető ki a többletnyomás a 3.38. ábrán bejelölt A illetve B helyeken. Az A helyen, ahol a folyadékhártya kettős falú, a nyomás a buborék görbületi sugarától függ:

$$p_A = \frac{4\sigma}{R_A}.$$

Mivel a B hely a vízfelszín alatt  $H$  mélységben van, a  $\rho gH$  hidrosztatikai nyomás és az ottani görbületi nyomás együtt egyensúlyozza a többletnyomást, a következő módon:

$$p_B = \frac{2\sigma}{R_B} + \rho gH.$$

A  $p_A = p_B$  egyenlőségből a görbületi sugarakra a

$$\frac{2}{R_A} - \frac{1}{R_B} = \frac{\rho gH}{2\sigma}$$

összefüggést kapjuk.

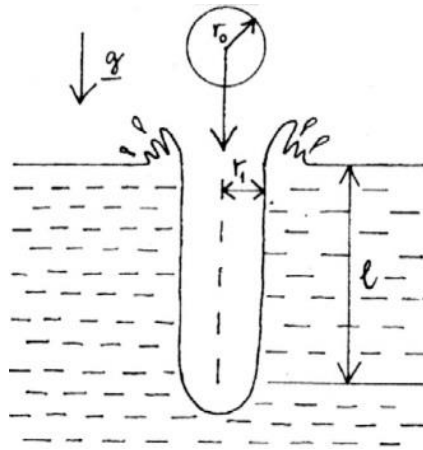
E kifejezésből látható, hogy a buborék alakja csak közelítőleg félgömb, mert itt az  $R_B$  nem végtelen. Kísérleti vizsgálatokból kiderült, hogy az  $R_A = 10^{-2}m$ , az  $R_B = 3 \cdot 10^{-2}m$  illetve  $H \approx 2,5 \cdot 10^{-3}m$  értékek jól kielégítik a paraméterek közötti fenti kapcsolatot [31].

A buborékok tehát 1-2 cm átmérőjűek. A buborékok körüli peremet a nedvesítés miatt látjuk, mert azon a helyen a buborék körüli vízréteg kissé vastagabb, ezért más optikai tulajdonságokkal rendelkezik.

Tovább elemezve a buborék kialakulásának folyamatát, meghatározhatjuk a buborékot kiváltó esőcsepp nagyságát is.

Végezzünk egyszerű számítást!

Csapódjon  $r_0$  sugarú esőcsepp a tócsa felszínére. A csepp  $r_1$  sugarú,  $l$  mélységű henger alakú üreget alakít ki ( $r_0$  nem nagyon tér el  $r_1$  -től).



3.39. ábra. A vízben képződő henger alakú üreg

Az üreg gömbbé formálódása közben a csatornában lévő levegő a  $R$  sugarú buborékba kerül, amely a felszínre törés előtt a sekély tócsában félgömb alakot ölt.

A térfogatok egyenlőségéből

$$r_1^2 \pi l = \frac{2}{3} R^3 \pi$$

az  $r_1$  paramétert megbecsülhetjük, ha felhasználjuk azt a tapasztalati tényt, hogy buborékok nagyon sekély vizek felszínén nem képződnek. A csatorna  $l$  mérete általában a tócsák mélységével azonosnak vehető.

Az említett megfontolásokat elvégezve a csatorna sugarára  $r_1 \geq 3 \text{ mm}$  értéket kapjuk, tehát általában ennél kisebb sugarú esőcseppek váltanak ki buborékokat.

Az esőcsepp esésének dinamikájából a maximális cseppméretre is következtethetünk, részletezés nélkül erre  $r_{0max} \approx 4 \text{ mm}$  adódik [30].

Ha most az esőzés időtartamára is kíváncsiak vagyunk, akkor csak azt kell megtudnunk a meteorológusoktól, hogy milyen típusú felhőkből hullnak a most kiszámított méretű vízcseppek. Nos, ezek főként a függőlegesen hatalmas kiterjedésű, vízszintesen pedig nem túl széles *zivatarfelhők*ben jelennek meg. Az ilyen felhőkből hulló záporok így többnyire helyi jellegűek, és mint a népi bölcsesség is mondja, rövid ideig tartanak.

## 4. Mitől színes az élővilág?

Általában hajlamosak vagyunk arra, hogy ami mindennapi tapasztalat, azt egyszerűen természetes és magától értetődő dolognak tartsuk. Így van ez a színekkel is.

„A szín a természet mosolya, egy csöppnyi igazság” – mondta egy angol bölcs. És milyen igaza volt! Mennyivel kisebb élményt nyújt például a fekete-fehér televízió és film, mint a színes. Színek nélkül kiüresedne világunk. Talán fel sem tűnik, de *sárga* színnel ragyog a Nap, *kék* az ég és a tengerek színe, *vörös* vér kering az ereinkben, *zöld* színben pompáznak a lombok, csak, hogy néhányat említsünk. Az egyes színekkel különböző érzelmi hatást is kiválthatunk. Más színű fényvel világítják meg az iskolai tantermet, mással a bárkat, és mással a húsos pultokat az élelmiszerüzletekben. Tárgyaink a megvilágító színtől függően más és más színűnek tűnnek, s bennünk is különböző hatásokat váltanak ki.

A történelem folyamán a színeknek szimbolikus jelentése is kialakult. Egy időben, Kínában például sárga ruhát csak a császár hordhatott, mert a sárga a legmélyebb bölcsesség, a legteljesebb megvilágosodás jelképe volt. A gyászoló kínaiak fehérbe öltöztek, jelezve, hogy az elhunytat a tisztaság és a fény országába kísérik.

Mást jelentenek a színek a festőknek és a fizikusoknak, az irodalmároknak, a kémikusoknak, mást a pszichológusoknak és az ipari formatervezőknek.

A **színtan** a fizika és az orvosi szakkönyvek önálló fejezetévé vált. De művészek is könyveket töltenek meg színekkel kapcsolatos benyomásaikkal, ismereteikkel.

Mi a magyarázata annak, hogy az égboltot kéknek, a fűvet zöldnek, a paradicsomot pirosnak, a grafitot feketének látjuk? Mitől színesek a lepkék, a madarak? Hogy ilyen kérdésekre válaszolhassunk, segítségül kell hívnunk a fizikát, a kémiát, a biológiát.

### 4.1 A színek

A szín, mint jelenség csak részben függ fizikai-kémiai folyamatoktól. Függ a szem működésétől, s attól is, hogy mi megy végbe az agyban. A fény érzékelése összetett, **fotokémiai**-, **idegi**, s **pszichológiai** folyamatok eredménye. Az egészséges emberi szem színérzékelése rendkívül érzékeny, igen sokféle színárnyalatot képes megkülönböztetni.

A tudósokat már a régmúlt időkből érdekli a különböző színek eredete. Annak ellenére, hogy a mindennapi életből és tudományos kísérletekből is rendkívül sok tapasztalat gyűlt össze a színekről, az eredetükre vonatkozó kielégítő magyarázatra viszonylag sokáig, a XVII. századig kellett várni. Newton (1666) előtt a színek keletkezésére vonatkozóan igen sok ellentmondó

magyarázat forgott közkezen. Igaz, hogy már akkor észrevették, hogy a testek színe függ a megvilágítástól, – ugyanaz a test a nap különböző szakában más színűnek látszott –, a testek színét a testek tulajdonságának vélték.

A szivárvány jelenségét régről ismerik, sőt rögzítették kialakulásának körülményeit is. Descartes (1596-1650) szökőkút szétporlasztott vízcseppjein megfigyelt már mesterséges szivárványt is, sőt ő maga vízcseppet, – vízzel telt gömb alakú üvegedénnyel modellezve –, a szivárvány színeit kísérletileg is tanulmányozta. Ennek ellenére a színek keletkezésének mikéntje, azok sorrendjének oka még akkor sem volt világos.

Newton távcső készítése közben figyelmes lett a lencsék karimáján vetítéskor megfigyelhető elszíneződésre, ami érdeklődését a színek tanulmányozásának irányába fordította. Besötétített szobába vékony nyíláson beszűrődő fény útjába prizmát helyezett, s a szemközti falon színes csíkok tűntek fel, elsőként állított elő tehát színeképet. A *spektrum* elnevezés is tőle származik. A színeképet azt is bizonyította, hogy a *fehér fény színes fények keveréke*. Megállapította, hogy a prizma a különböző színű fénysugarakat különböző módon tör meg. A jelenség neve: diszperzió. Ha a prizma által „szétbontott” fehér fény színeit lencsével újra összegyűjtjük, ismét fehér fényt kapunk. A spektrum egyes színei viszont tovább már nem bonthatók.

Newton alapvető kísérlete két fontos felfedezést tartalmazott:

- 1.) adott közegben a közeg törésmutatója a különböző színű fénysugarakra más és más,
- 2.) a fehér fény egyszerű színekből összetett fény.

A körülöttünk lévő dolgokat azért látjuk, mert maguk világítanak, vagy azért, mert megvilágítottuk őket. A testek a rájuk eső *fényt* vagy *visszaverik* (reflexió), vagy *átengedik* (transzmisszió), vagy *elnyelik* (abszorpció). E három folyamat egymáshoz viszonyított mértéke határozza meg a testek színét. A *fekete* színű test például a fény hullámhosszától függetlenül minden fényt elnyel, a *fehér* test, pedig szinte mindent visszaver. Ha a fehér fényből valamilyen oknál fogva hiányzik az egyik összetevő, akkor a megvilágított test a hiányzó szín *kiegészítő* (komplementer) *színében* látszik.

## 4.2 Hogyan állíthatunk elő színeket?

Mielőtt részleteznénk a módszereket, ejtsünk néhány szót a fénykvantumról, a **foton**ról. A középiskolában is tanított fényelektromos jelenség magyarázatából tudjuk, hogy amikor a fény

és anyag kölcsönhatásba lép egymással, akkor az anyagnak átadott energia legkisebb adagja, kvantuma:

$$E = h\nu, \text{ illetve } E = hc/\lambda$$

ahol  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  a fény sebessége levegőben,  $h$  a Planck-féle állandó,  $\lambda$  a fény hullámhossza. Az energiakvantum a fénykvantum, a foton energiája.

### **Az anyag állóhullám modellje**

Amikor egy atom vagy egy molekula elnyel egy fénykvantumot, megváltozik a magok és elektronok kölcsönös elrendeződése. Egyes elektronok magasabb energiájú pályára lépnek, így megnövekszik a rendszer energiája. Abból, hogy akármilyen energiát nem vehet fel a molekula, arra következtethetünk, hogy a magok, és az elektronok egymáshoz viszonyított helyzete nem lehet akármilyen. Energiájuk csak hirtelen, **ugrásszerűen** változhat. A rendszernek az állapotváltozáshoz pontosan meghatározott energiára van szüksége, ezt nyeli el a fényből. Ennél kevesebb energiával nem jut semmire, ennél többel, pedig nem tud mit kezdeni. A rendszer vagy megmarad az "**alapállapotban**", vagy hirtelen ugrik át egy minőségileg más, ún. "**gerjesztett**" állapotba. Azt mondjuk, hogy az atom, a molekula lehetséges energiaállapotai **kvantumusak**. Két lehetséges állapot energiája közti különbség egy pontosan meghatározott energiakvantum. Tehát a molekula sokféle állapotban lehet, de nem akármilyenben.

Egy egyszerű mechanikai rendszer, a **rezgő húr** is hasonlóan viselkedik. A kifeszített, mindkét végén rögzített megpendített húron állandósult hullámok, ún. **állóhullámok** alakulnak ki. A rezgő húrnak is sokféle állandósult állapota lehet, de nem akármilyen. A rezgő húr is **kvantumos**. A lehetséges állapotok feltétele, hogy a húr teljes hosszán egész számú félhullám alakuljon ki. A lehetséges állóhullámokra tehát jellemző, hogy

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

illetve a rezgő húron kialakult állóhullámok frekvenciája

$$\nu_n = n \frac{c_{tr}}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

a húron a  $\nu_1$  alaphang és a  $\nu_{n+1}$  az ún. felharmonikusok együtt hallhatók. Az  $L$  a húr hosszát,  $c_{tr}$  a transzverzális hullám terjedési sebességét jelenti a húrban.

A "**sokféle, de nem akármilyen állapot**" lehetősége avatja a rezgő húr az atomok és a molekulák, vagyis az atommagokból és elektronokból álló rendszerek kitűnő modelljévé. A mag-elektron rendszerek állapotait tehát **állóhullámokkal** jellemezhetjük.

A mechanikai analógiát felhasználva a következő absztrakt, de egyszerű modell szerint zárjuk be az elektront egy  $L$  hosszúságú, minden erőhatástól mentes **egydimenziós dobozba**. A "doboz" jelenti azt a feltételt, hogy az elektron a térnek csak egy meghatározott részén lehet. Azon belül semmiféle erő nem hat rá, de a térrészt el nem hagyhatja. Az elektronnak mozgásához egy vonalszakasz áll a rendelkezésére. Az elektron az egydimenziós dobozban **szabad**, rá semmiféle vonzó vagy taszítóerő nem hat, az elektron a dobozban mégis "**sokféle, de nem akármilyen**" állapotban lehet. Helyzeti energiája nincsen, a doboz minden erőhatástól mentes, változhat viszont a mozgási energiája. A dobozba zárt elektron lehetséges állapotait tehát mozgási energiájának **változó** értékei jellemzik.

Az  $m$  tömegű elektron energiája (Einstein formulája)

$$E = mc^2,$$

ahol  $c$  a fénysebesség levegőben (vákuumban), a mozgó elektron ún. de Broglie hullámhossza

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

A mozgási energia az impulzussal ( $p$ ) és a de Broglie hullámhosszal kifejezve:

$$E = \frac{p^2}{2m}, \text{ illetve } E = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$$

adódik.

Ez az összefüggés ad lehetőséget arra, hogy összehasonlítsuk az **elektron lehetséges** állapotait a **húrmodellel**. Az  $L$  hosszúságú húron csak olyan mozgásállapotok alakulhatnak ki, amelyekre igaz, hogy  $\lambda = 2L/n$ . Az  $L$  hosszúságú vonalدارabra beszorított elektron mozgási energiája – amely jelen esetben az összes energia – csak a következő értékeket veheti fel:

$$E = \frac{h^2}{2m(2L/n)^2} = \frac{n^2 h^2}{8mL^2},$$

ahol  $h$  a Plank-állandó,  $m$  az elektron tömege,  $L$  az elektronmozgás számára rendelkezésre álló ( egydimenziós) "méret",  $n$  pedig bármely pozitív egész szám, vagyis a "**kvantumszám**".

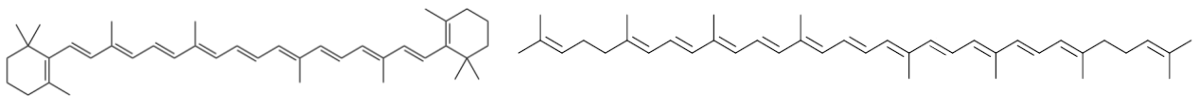
Ennek az összefüggésnek a segítségével konkrét számításokat végezhetünk az elektron lehetséges energiáira vonatkozóan, csak meg kell adnunk  $L$  értékét. Ha az elektron mozgásához kellően **nagy térrész** áll rendelkezésre, akkor energiáját **kis adagokban** változtathatja, – az adagot a  $h^2/8mL^2$  kifejezésből számíthatjuk. A „húrmodell” jó lehetőséget kínál a lineáris molekulákban delokalizált elektronállapotok elemzéséhez, segítséget nyújthat a szerves világban tapasztalható színek kialakulásának megértéséhez.



### 4.3 Festékek a növény- és állatvilágban

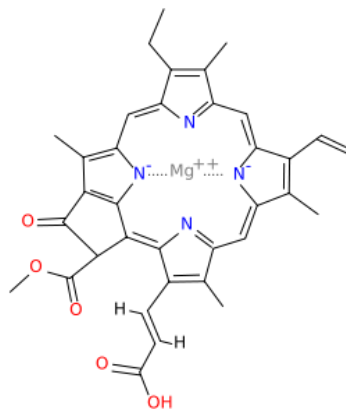
Az élő természet rengeteg színárnyalatát mindössze háromféle vegyülettípus kialakulása, kölcsönhatása és bomlása okozza. Ezek a **karotinoidok**, **porfirinek** és **flavonoidok**. A színek eredetének elemzéséhez ezért segítségül kell hívnunk a kémiát. A teljesség igénye nélkül mutatunk néhány példát a környezetünkben ismert élővilágból minden vegyülettípusra.

A **karotinoidok** okozzák például az árvácska, a pitypang virágának, a sárgarigó és a kanári tollának, a homár páncéljának a színét. A sárgarépa festékanyaga a **karotin** mellett, a vegyületcsoport egyik legismertebb tagja a **likopin**.



4.1. ábra  $\beta$ -karotin és likopin molekula egyszerű ábrázolása

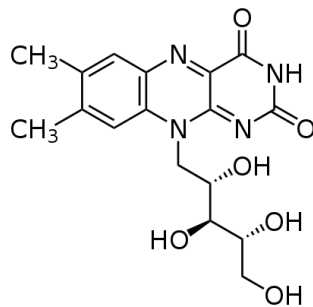
Likopin legnagyobb mennyiségben a paradicsomban van, de kevesebb található a csipkebogyóban, a görögdinnyében és más gyümölcsökben is. Ez a vegyület felelős a piros színért. Valamennyi **porfirin** jellegű festékanyagnak a **porfin** nevű gyűrűs vegyület képezi az alapját. A porfirinek két legfontosabb képviselője a **hem** és a **klorofill**.



4.2. Klorofill

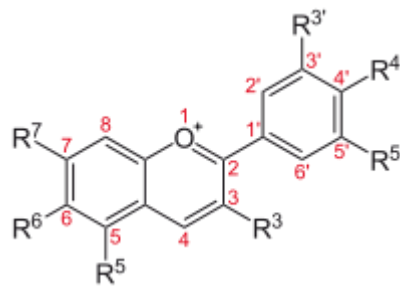
A hem a vér oxigénszállító molekulája vörös festékanyagának, a **hemoglobinnak** a nem fehérjetermészetű része. A gyűrű középpontjában egy darab két vegyértékű **vas-ion** van, amely a porfinváz két hidrogénatomját helyettesíti, és a gyűrűkhöz különböző oldalláncokkal kapcsolódik. A növények zöld színéért a **klorofill** a felelős, ebben a molekulában a porfin gyűrű közepén magnézium-ion található.

A legtöbb virág és gyümölcs a színét a **flavonoidoknak** köszönheti. A **flavon** sárgára színez, a növények vörös, kék, bordó és ibolya színét, pedig az **antociánok** okozzák.



4.3. ábra Riboflavin

Az antociánok olyan vegyületek, amelyek egy színes flavonoid részből és egy szintelen cukorrészből állnak. Az **antociánok** a közeg pH-jától függően változtatják szerkezetüket és ennél fogva a színüket is. Ugyanaz a vegyület, amely savas közegben (pH=3) piros, lúgos közeg (pH=11) esetén kék, adja a vörös rózsza és a kék búzavirág színét.



4.4. ábra Az antocián molekula színezéséért felelős egysége

Csodálkozunk azon, ha a tavaly még kék jácint a következő évben pirosas színű virágot hoz. A magyarázat egyszerű. Ha a hangyák véletlenül tartósan a jácint hagymája körül vernek tanyát, akkor a hangyasavval savanyított talaj a színekért felelős molekulában szerkezeti változást idézhet elő. A megváltozott szerkezetű molekulák a növény szirmára eső fehér fényből már másik összetevőt nyelnek el, így más kiegészítő színben mutatkoznak. A kertészek ilyen módon a legváltozatosabb színű virágokat állíthatják elő, sőt ha például megfelelő sókat a talajba kevernek, mélyen beavatkozhatnak a természet munkájába.

### Vajon mi a közös az említett szerkezetekben?

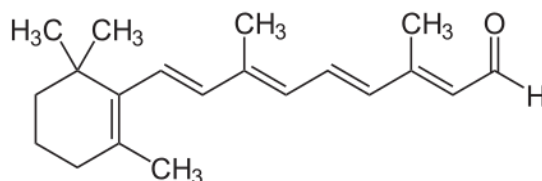
Első ránézésre az említett molekula szerkezeteknél feltűnik, hogy mindegyikben észrevehetünk váltakozó egyes és kettős kötéseket sorozatát. Idézzük fel kémiai ismereteinkből, hogy ez a

sematikus jelölésmód a molekulákban jelen lévő elektronok viselkedésével milyen kapcsolatban van.

Ismeretes, hogy a molekulákban az elektronok  $\sigma$  - és  $\pi$  - kötő-, lazító és nemkötő molekulapályákon tartózkodnak. Mindhárom említett szerves molekula-típusban a molekulában ún. konjugált kettőskötésekkel szemléltethető elektronelrendezés található. A molekula lehet **lineáris** (karotin), de a szénatomok záródhatnak **gyűrűvé** is (klorofill). Vagy együtt tartalmazhatnak hosszabb lineáris szakaszokat és a láncvégeken záródó gyűrűs elemeket is. Az ilyen molekulákban vannak olyan elektronok (delokalizált elektronok) amelyek mozgása a teljes molekulaméretre kiterjed. A molekula hosszában mozgó „szabadnak” mondható elektronok állapota, és a két végén rögzített L hosszúságú húr mérete és állapotai között párhuzamot vonhatunk. Visszaemlékezve a „dobozba zárt elektron” modellre láthatjuk, hogy a hosszabb molekulában az elektronok energiája kisebb adagokban változhat, a molekula kisebb frekvenciájú fény elnyelésére képes. Például a karotinoidok családjába tartozó, a fokozatosan növekvő szénatom számú molekulák színe a **sárgától** a **vörös** felé változik. A sárgarépa színének kialakításakor a **karotin** molekulák a fehér fényből a kék színű fényt elnyelik, a sárgarépa a kék kiegészítő színében látszik. A paradicsomnál, a hosszabb méretű **likopin** molekulák zöldessárga színű fény abszorpciója már piros kiegészítő színt eredményez. A zöldessárga fény energiakvantuma a karotinéval hosszabb likopin molekulákban ugyanis kisebb, így a likopin a zöldeskék színnek megfelelő, kisebb energiájú fénykvantumot nyeli el. A paradicsomban tehát a vörös kiegészítő szín adja a domináns színt. A paprika színéért felelős **kapszorubin** molekulában is olyan hosszúságú konjugált lánc található, amely a **zöld** fény elnyelését teszi lehetővé, a paprikát a zöld szín kiegészítő színében, **pirosnak** látjuk.[32]

### A látás és a színérzet

Szemünk a karotinhoz nagyon hasonló szerkezetű molekulát, a **retinált** (fél karotin molekulahosszúságú) használja a fény felfogására. A retinál a táplálkozással a szervezetünkbe jutott, szintén hasonló szerkezetű A-vitaminből keletkezik.



4.5. ábra Retinál molekula egyszerűsített ábrázolása

A továbbiakban csak nagyon röviden, leegyszerűsítve foglaljuk össze a színlátás lényegét. A szemünkbe érkező fénysugár a különböző színérzékenyséű csapokban eltérő erősségű elektromos jelet, idegáramot idéz elő. Az idegáram-erősségek aránya minden sugárzás esetén más és más, s az agyban minden egyes arány esetén más színérzet alakul ki. Ha a fényinger egyforma erősen hat mind a háromféle csapra, akkor fehér fényt észlelünk. A vörös fény a vörösre érzékeny csapokban erősebb idegáramot kelt, így vörös színérzet keletkezik. Ha a fényinger egyforma erősen hat a vörösre és a zöldre érzékeny csapokra, akkor sárga színt látunk. Ily módon valamennyi szín a **vörös**, a **zöld** és a **kék** keverésével áll elő. Ezért nevezzük az egészséges színlátást háromszínűnek, **trikromatikusnak**.

#### 4.4. Szerkezeti színek az élővilágban

A színek kialakulása az élővilágban rendkívül összetett jelenség. Megértéséhez kémiai, fizikai, és biológiai ismeretekre egyaránt szükségünk van, amelyek összekapcsolása lehetővé teszi a természeti jelenségek mélyebb megértését. A következőkben az élő természet színeinek keletkezésén keresztül megmutatjuk, hogyan kapcsolhatjuk össze biológiai és fizikai ismereteinket

A színek a biológiai rendszerekben, a madarak és rovarok világában gyakran festékszemcsékben, ún. **pigmentek**ben keletkeznek, a „kémiai színezésnél” megismert hullámhosszfüggő fényelnyelés útján. Bizonyos esetekben azonban a színek kialakulása a **fény** egy meghatározott **szerkezeten** történő szelektív **szóródásának**, **interferenciájának** illetve **diffrakciójának** következménye.

A szórással, interferenciával és diffrakcióval létrejövő színeket **szerkezeti, vagy struktúra színeknek** nevezzük [33]. Az interferenciával és diffrakcióval keletkező szerkezeti színek, akárcsak a szappanhártyák színei, rendszerint visszavert fényben láthatók jól.

#### Fényszórás

Ha az anyag atomjai molekulái a beeső sugárzás hatására másodlagos sugárzás forrásaivá válnak, **fényszórás** jelenségről beszélünk. A sugárzás természete függ a beeső sugárzás  $\lambda$  hullámhosszának és a részecske  $a$  méretének arányától. Ha a fényt szóró részecske mérete a fény hullámhosszánál sokkal kisebb, akkor a fényszórást **Rayleigh-szórásnak** nevezzük. A **szórt intenzitás** ekkor erősen függ a hullámhossztól, a Rayleigh-törvény szerint fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával.

$$I_s = \frac{1}{\lambda^4}$$

Erőteljes kék szórás figyelhető meg azokon a részecskéken, melyeknek átmérője 1 nm és 300 nm közé esik. Jó szóró centrum lehet akár néhány atom- vagy molekulacsoport is. A szórt fény színének kék és lila közötti pontos árnyalata a szóró centrumok eloszlásától, méretétől, alakjától is függ.

### **Mie szórás**

Ha a szóró részecskék mérete eléri, vagy felülmúlja a fényhullámhossz nagyságát, a Rayleigh közelítés már nem alkalmazható. A nagyobb részecskéken bekövetkező szórást Mie-szórásnak nevezzük. Gömb alakú részecskék esetén, ha a méretük  $\lambda$  és  $2\lambda$  közé esik, a szórás a beeső sugárzás haladásának irányában egyre intenzívebbé válik. A részecskeméret további növekedésekor már csak fehér szórás figyelhető meg, az intenzitás nem függ többé a hullámhossztól. Ez az a fehér szín, amelyet például a köd vagy az alacsony felhők vízcseppjein átnézve láthatunk. Az intenzitás eloszlás meghatározása Mie-szórás esetén nagyon bonyolult, különösen akkor, ha a szóró részecskék mérete különböző. A módszer nagyon jól használható kolloid oldatok, aeroszokok, köd, füst vizsgálatakor a részecskék méretének meghatározására. A kolloid oldatok fényszórási jelensége ún. Tyndall-kék szín kialakulása is ebbe a témakörbe tartozik. A szórócentrumok mérete ekkor a durván 1 nm és 500 nm, az ún. kolloid mérettartományba eső részecskeméret. Ezért látszik a fény útja a kolloid oldatokban kék színnel.

A Rayleigh szórás látványos példája az élettelen természetben az ég kék, valamint a felkelő és lemenő Nap vörös színe. Miközben a fény áthalad a vastag levegőrétegen, spektruma a kisebb (kék) hullámhosszú sávban a szóródás következtében jobban gyengül, emiatt a nagyobb hullámhosszúságú sáv (vörös) intenzitása relatíve megnő. Szemünk a Napot ilyenkor pirosas színűnek érzékeli. A fényszóródás erősödik, ha nagy mennyiségű finom részecske kerül a felső légrétegekbe. Példaként említhetünk két megtörtént eseményt is:

1883-ban a Krakatau vulkán kitörésekor a levegőbe került sok apró porszemcse különösen mélyvörös naplementét eredményezett, és ez a látványos jelenség több mint három évig fennmaradt. Erdőtüzekkor a felhevült fákból szerves anyag párolog a levegőbe, zömmel apró gyanta- vagy olajcseppek formájában, ami szintén csodálatos naplementét okozhat. Ha az olajcseppek mérete 500 nm körül van, a Nap vagy a Hold zöld vagy kék színűnek látszik. A jelenséget észlelték 1950-ben, amikor egy nagy kanadai erdőtűz után hatalmas felhő húzódott át az Atlanti-óceánon Európába.[33]

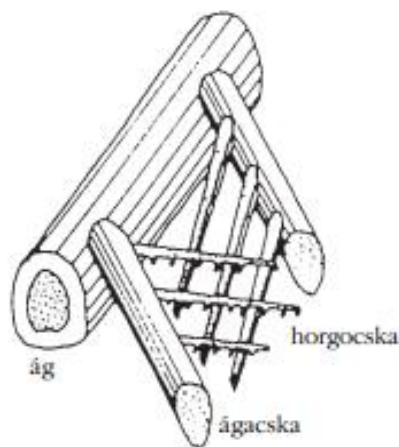
Az élő természetben a növények között a Tyndall-kék szerkezeti szín elég ritka, gyakori azonban az állatvilágban. Az alapvető biológiai *szórócentrumok* a szövetekben található levegővel telt *üregek*, vagy *zsírcseppek*, *protein*, *keratin* vagy *guanin* kristályok, amelyek általában sötét melanin réteg felett helyezkednek el [34].

A legtöbb nem irizáló kék szín, például a kékszajkó színe - tiszta szórás eredménye. A zöld és a bíbor szín kialakulásában is szerepe lehet fényelnyelési folyamatnak, ha a szóródás sárga illetve piros színt eredményező fényelnyeléssel kombinálódik. Ilyenkor a szórócentrumokat tartalmazó réteg mögött általában pigment is jelen van. Tiszta kék szín akkor alakul ki, ha a melanin réteg fekete, amely a kéknél kevésbé szóródott fényt elnyeli. E színezési módra szép például szolgál a 4.6. ábrán látható kékszajkó.



4.6. ábra Kékszajkó

Madártollak esetében a színezés az ún. ágacska felületén történik. A 4.7. ábrán egy madártoll vázának szerkezetét tüntettük fel. A kampókkal ellátott ágacska egymást átfedve az ágak között helyezkednek el.



4.7. ábra Madártoll vázának szerkezete

Ezeket az ágacskákat három különböző anyagréteg fedi: felül egy kb.  $10 \cdot \mu\text{m}$  vastag, átlátszó szaruréteg van, ez alatt helyezkednek el a szórásért felelős cellák, legalul pedig a sötét melanin réteg található. A cellák szabálytalan alakú, **30-300 nm** átlagos méretű, levegőt tartalmazó üregekből állnak. Az üregek az aktuális szórócentrumok. Három egyszerűen elvégezhető kísérlettel könnyen meggyőződhetünk a fenti szerkezeti felépítésről, és hatásáról:

- a.) Ha a kék tollat alkoholba mártjuk, a légbuborékok folyadékkal telnek meg, törésmutatójuk megváltozik. Ennek következményeként a kék szín eltűnik, a fekete melanin válik láthatóvá. Az alkohol elpárolgása után a toll visszanyeri eredeti kék színét.
- b.) A toll elveszíti kék színét akkor is, ha kalapáccsal széttroncsoljuk a cellaszerkezetet.
- c.) Ha a melanin réteget hidrogén-peroxiddal kifehérítjük, a kék szín akkor sem látható. Ismét megjelenik azonban, ha az ágacskák hátoldalát feketére festjük. Ez azt jelenti, hogy a hidrogén-peroxid a szóró-centrumokban nem tett kárt.[33]

### **Szilva, kökény, kék szem**

A **szem kék színe** nem festéktől származik, hanem a vizes közegben jelenlévő **protein, zsiradék** részecskék illetve **rostos szövet** finom keverékén történő **fényszóródás** következménye. Ha egy kevés tej ömlik sötét színű asztalra, s ott vékony rétegben szétterül, a foltot kékesnek látjuk. A tejben lévő zsírcseppek mérete éppen abba a mérettartományba esik, amelyeken a kék színű fény szóródik. A kék szem nem csak embereknél gyakori, hanem néhány állatnál, pl. a sziámi macskánál is megfigyelhető (4.8. ábra). A szivárványhártyáról való szóródással létrejövő kék szín kialakulását háttérként segíti a sötét uvea réteg.



4.8. ábra Sziámi macska

A kék szem korral járó fakulását a szóró részecskék méretének növekedése eredményezi. A nagyobb szórócentrumok jelenlétében ugyanis a kék Rayleigh-szórás helyett egyre inkább a fehér Mie-szórás válik uralkodóvá [35]

A szilva és a **kökény** hamvas kék színét annak köszönhetik, hogy a fény a felületüket borító vékony viaszrétegen szóródik. Ezt a réteget akár a kezünkkel is letörölhetjük, ekkor a hamvas kék színük eltűnik, s megfigyelhető a fehér fény többi összetevőjét elnyelő sötétbarna háttér.



4.9. ábra Kökény

### **Fényinterferencia**

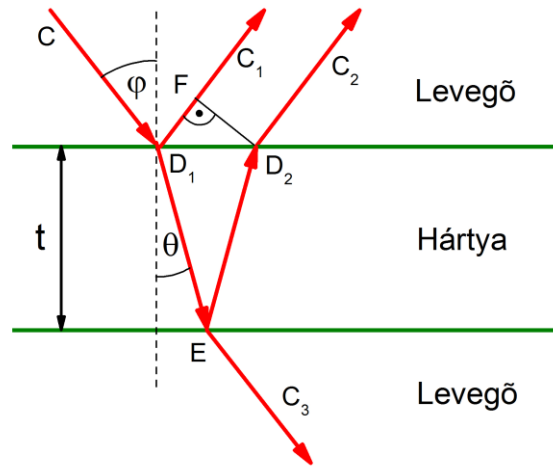
Fényinterferencia előállításához elég egyetlen fénysugarat valamilyen eszközzel, valamilyen módon kettéosztani, majd újra egyesíteni. Az így találkozó fényhullámok *koherensek*, a közöttük jelenlévő fáziskülönbségtől (útkülönbségtől) függően fényerősség maximumokat illetve minimumokat eredményeznek. A mechanikai hullámok tanából tudjuk, hogy az eredő hullám amplitúdóját, s így erősségét is az összetevő hullámok amplitúdói és a közöttük lévő fáziskülönbség határozza meg. Egy pontszerű fényforrásból érkező fénysugarat az újbóli találkozáshoz többféle eszközzel oszthatunk ketté.

A. Fresnel (1728-1827) kettőstükörrel, kettősprizmával osztotta a fényt ketté, az így végzett *fényinterferencia* kísérletekkel bizonyította a fény hullámtermészetét.

Fehér fényel megvilágított optikai rács mögötti ernyőn megjelenő színek a *fényelhajlás* eredményei. F. Grimaldi (1618-1663) írta le a jelenséget elsőként, de elfogadható értelmezése több tudós, C. Huygens (1629-1695), T. Young, és A. Fresnel munkájának együttes eredménye. Szappanbuborékokon, vizes felületen vékony rétegben szétterülő olajfoltokon is láthatunk színeket, melyre először R. Boyle hívta fel a figyelmet. A *vékonyréteg-interferencia* jelenség részleteit Newton tisztázta (Newton-féle színes gyűrűk), de magyarázatát a fényinterferencia alapján azonban T. Young (1802) adta meg.



Mivel a vékonyréteg-interferencia részletes kvantitatív elemzésére a középiskolai fizikatanítás során nincsen lehetőség, ezért a jelenség jobb érthetősége érdekében e hiányt most pótoljuk. A jelenség összetett, vizsgáljuk meg először egy adott vastagságú vízszintes, vékony hártya (szappanhártya) színeinek kialakulását.



4.10. ábra Vékonyréteg interferencia

A levegőben lévő,  $t$  vastagságú,  $n$  törésmutatójú folyadékra egy adott  $\varphi$  szögben érkező  $C$  fénysugár a réteg felületéről, mint tükörről részben visszaverődik ( $C_1$ ), részben a hártya  $n$  törésmutatójú oldatába jutva  $\theta$  szögben megtörik. Az oldatban haladva eléri a hártya másik falát, amelyről ismét visszaverődve újabb töréssel juthat vissza a levegőbe ( $C_2$ ) (4.10. ábra). A második határfelületet érő fénysugár azonban nemcsak visszaverődhet, hanem töréssel, a réteg másik oldalán azonnal ki is juthat a levegőbe ( $C_3$ ). Mivel a hártya színeit általában visszavert fényben tanulmányozzuk, ezért bennünket most az első felületen kilépő és az arról közvetlenül visszaverődő fénysugarak (hullámok),  $C_1$  és  $C_2$  találkozásának eredménye érdekel. A két találkozó hullám között a hártya megvalósuló haladás miatt optikai útkülönbség lép fel, amelynek eredményét szemünk és idegrendszerünk színesnek minősíti. Hasonló jelenség tapasztalható akkor is, ha a találkozó hullámokat lencsével összegyűjtve ernyőre vetítjük.

Számoljunk egy kicsit!

A mechanikai hullámok tanából tudjuk, hogy két hullám találkozásakor erősítő interferencia abban az esetben jelenik meg, ha a hullámok a fél hullámhossz páros számú többszörösével egyenlő útkülönbséggel találkoznak ("hullámhegy hullámhegygel, hullámvölgy hullámvölgygel"). Gyengítést vagy teljes kioltást pedig a hullámhegy-hullámvölgyes találkozás, azaz a fél hullámhossz páratlan számú többszörösével történő hullámtalálkozás eredményez.

Határozzuk meg az útkülönbséget esetünkben a találkozó fénysugarak között!

Az 4.10. ábrának megfelelően a  $C_1$  és  $C_2$  sugarak között az útkülönbség a következő egyenlettel alapján számolható:

$$\Delta s = n(D_1E - ED_2) - D_1F .$$

Trigonometriai összefüggéseket, és a törés Snellius-Descartes törvényét felhasználva a fenti összefüggés a

$$\Delta s = 2D_1E(n - \sin \theta \sin \varphi) = 2nD_1E(1 - \sin^2 \theta) = 2nD_1E \cos^2 \theta$$

alakot ölti. Ezután a  $D_1E$  távolságot a hártya vastagságával kifejezve az útkülönbségre a

$$\Delta s = 2dn \cos \theta$$

kifejezést kapjuk.

Ne feledkezzünk meg egy nagyon fontos járulékról!

Megértéséhez kanyarodjunk vissza ismét a mechanikai hullámokhoz. Feszítsünk ki egy hosszú gumikötelet úgy, hogy egyik végét falhoz rögzítjük. Üssünk rá az egyik végénél felülről lefelé (hullámvölgyszerű zavar). A zavar a kötélen végighaladva a rögzített végről hullámhegyként, azaz fél-hullámhossznyi útkülönbséggel verődik vissza. Ha a kötél másik végét egy a kötélnél lényegesen vékonyabb zsineggel tartjuk, úgy a visszaverődés hullámvölgyszerű lesz. Azt mondjuk, hogy a sűrűbb közegről történő visszaverődéskor a közegethatáron  $\pi$  fázisugrással kell számolnunk. Így van ez a fénytamban is, hiszen ez egy általános hullámtani jelenség. A rögzített végről való visszaverődésnek a fénytamban a nagyobb törésmutatójú (optikailag sűrűbb) közegről történő visszaverődés felel meg. A szappanhártya első felületéről, mint optikailag sűrűbb közegről történő visszaverődéskor lép fel tehát  $\pi$  fázisugrás. A fázisugrás tényének egyetlen kísérleti bizonyítékaként egyébként éppen a szappanhártyákon megjelenő interferencia jelenségek szolgálnak. (Newton-féle fekete hártya)

A fázisugrást is figyelembe véve a **valódi  $\Delta s'$  útkülönbség** tehát a

$$\Delta s' = 2dn \cos \theta + \frac{\lambda}{2}$$

érték. Egy adott  $\lambda$  hullámhosszúságú fényre az erősítő interferencia fent említett feltétele a

$$\Delta s' = 2k \frac{\lambda}{2},$$

míg a kioltásé a

$$\Delta s' = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

ahol  $k$ -val az interferencia rendjét jelöljük.

Megadhatjuk a  $t$  vastagságú,  $n$  törésmutatójú szappanhártyáról visszaverődött  $\lambda$  hullámhosszúságú fény észlelt intenzitását a megfelelő paraméterek függvényében. Itt nem

részletezendő, a fizikai optikában szokásos részletszámítások után az  $I_r$  ún. reflektált (visszaverődött) intenzitás egyenlő:

$$I_r = 4I_b \sin^2 \frac{2\pi}{\lambda} n t \cos \theta$$

ahol  $I_b$  a beeső fény intenzitása,  $\theta$  az  $n$  törésmutatójú közegben mért törési szög (Snellius-Descartes törvény). A fenti összefüggésből látható, hogy a hullámhossznál sokkal vékonyabb hártáknál, azaz  $t \rightarrow 0$  esetben, a visszavert intenzitás zérushoz tart, az  $I_r \rightarrow 0$ . Ilyenkor a  $C_1$  és  $C_2$  sugarak között a hártán belül már nem jelenik meg útkülönbség, s az interferencia eredményét csak az említett  $\pi$  fázisugrás, azaz a  $\lambda/2$  útkülönbség határozza meg. Jól ismert, hogy  $\pi$  fáziskülönbséggel találkozók, azonos frekvenciájú és azonos amplitúdójú hullámok eredménye kioltás (hullámhegy-hullámvölgy találkozás). A hártya ekkor feketének látszik (Newton-féle fekete hártya).

A biológiai rendszereknél megfigyelhető **irizáló színek** kialakításában nagy szerep jut a **többrétegű szerkezeten** kialakuló **vékonyréteg-interferencia** jelenségnek. Az irizáló színezés egy szivárványszínű jelenség, azzal kapcsolatos, hogy különböző színeket látunk attól függően, hogy **milyen szögből** nézzük a felületet.

A növényvilágban az interferenciaszínek ritkák, csupán néhány **moha** illetve **nedves tengeri alga** esetén figyelhetők meg. Az algák kiszáradás után irizáló tulajdonságukat elveszítik.

Az állatvilágban azonban gyakrabban előfordulnak irizáló színek: rovarok, bogarak, madarak, sőt, bár sokkal ritkábban, de emlősök között is találkozhatunk velük.[33]

### Szitakötők, legyek

A szappanhárttyák illetve vízen úszó olajfolt felületén is megfigyelhető egyrétegű interferencia néhány rovar, bogár átlátszó szárnyán is kialakul. A szárnyak **fémes** fénye figyelhető meg a szitakötő és a házi légy szárnyán. Ha a szárny vékonyabb, mint 50 nm, akkor már nem látszik színesnek. A szárny nagyon vékony belső rétegében a találkozó hullámok között – a már említett okok miatt – ugyanis szinte nem lép fel útkülönbség, s a  $\pi$  fázisugrás minden színre gyengítő (kioltó) interferenciát eredményez.



4.11. ábra Szitakötők

Érdekes, hogy a 4.11. ábrán látható szitakötők esetében nem csak a szárny, hanem a potrohuk is biológiai festés miatt színes. A potrohon tapasztalható kék színt fényszórás okozza. A rovar a fejlődése egyik fázisában ugyanis kámforszerű anyagot választ ki magából, ami vékony rétegben befedi a testét. A rétegben lévő apró részecskéken a kék fény szóródik.

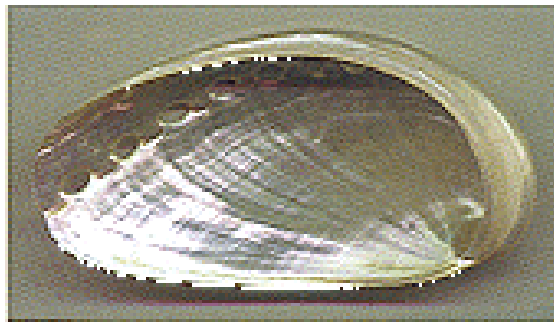
A házi légy vastagabb szárnyai már irizáló interferenciaszíneket mutatnak.



4.12. ábra Házi légy

### **Kagylók, csigák, gyöngyök**

Vékonyréteg-interferencia és fényelhajlás (diffrakció) okozza általában a kalcium-karbonát tartalmú kagylók csillogását, az igazgyöngyök színét, a tengeri kagylók és csigaházak gyöngyházfényét is. Egy kagyló irizáló belső felületét mutatja a 4.13. ábra.



4.13. ábra Kagyló belseje

A modern képalkotó eljárásoknak köszönhetően nem olyan régen ismertük meg a csigahéj belsejének finomszerkezetét.[23] „A Nautilus és a fizika” fejezet végén a csigahéj felépítésének részletes elemzésekor láthattuk, hogy a csigahéj téglatest alakú és megfelelő méretű aragonit kristály-lapocskákból épül fel. A csigaház belsejének gyöngyház hatása abból adódik, hogy a lapocskák vastagsága a fény (350 – 700 nm) hullámhosszával összemérhető. A lapocskák (lamellák) 10 – 20  $\mu\text{m}$  szélesek, de a vastagságuk 500 nm. Interferencia okozza a fény hullámhosszával összemérhető vastagságú, akár több rétegekről történő visszaverődéskor észlelt színeket. Ha a kagyló felülete még például a CD lemezhez hasonló barázdáltságot is mutat, akkor arról, mint kétdimenziós diffrakciós rácsról történő visszaverődéssel is

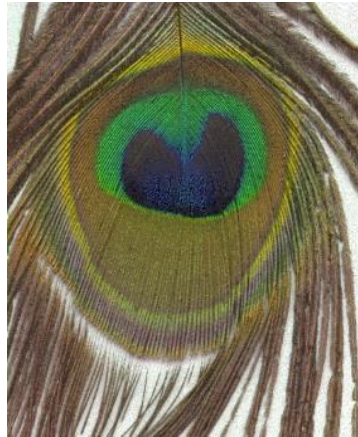
keletkezhetnek színek. A barázdák vastagsága, egymástól való távolságuk, finomszerkezetük, valamint a kagylóhéj görbületének helyi változásai együttesen felelősek az irizálás változatosságáért. Minden egyes kagylóhéj illetve gyöngy felületének a szerkezetét külön-külön kell megvizsgálni ahhoz, hogy biztosan eldönthessük, a kétféle lehetőség közül melyik a domináns az észlelhető szín alakításában.

### **Pávatoll**

A pávatoll színei szintén irizáló színek, változnak, ha a tollat forgatjuk. A hím páva tollainak pompázatos látványához ez a „természeti trükk” nagyban hozzájárul.

A pávatoll színeinek kialakulása már évszázadokon keresztül sok tudóst (R. Hooke, I. Newton, Rayleigh) foglalkoztatott, de képződésük mechanizmusára elfogadható magyarázat csak a 20. században született. A szerkezetvizsgálati módszerek fejlődésének köszönhetően manapság egyre több biológiai szerkezet finom részleteit tárják fel. Az új ismereteknek megfelelően egészíthetjük ki korábban megfogalmazott megállapításainkat a színek keletkezését illetően. Az utóbbi 20 évben derült fény a nanoskálán építkező élővilág, lenyűgöző, változatos szerkezeteire az ún. fotonikus kristályokra, amelyek a látható fénnel kölcsönhatva eredményezik azt a színgazdagságot, amelyet különösen szembetűnően a páváknál és az irizáló lepkéknél tapasztalhatunk. A tollakon, a szárnyakon gyakran megfigyelhető olyan szerkezet, amely a fény hullámhosszával összemérhető vastagságú, periodikusan ismétlődő, változó törésmutatójú rétegekből áll. A réteges felépítésű szerkezetekre eső fény az egyes rétegekben történő többszöri visszaverődés és fénytörés után szemünkben **egy adott hullámhosszra** erősítő interferenciát eredményez. A természet az egyes tollakon, szárnyakon fellelhető réteges struktúrák méreteit gyakran a kék fény hullámhosszához hangolja, a kék szín előállításánál él ezzel a lehetőséggel. A nanovilágban alkalmazott terminológiával élve azt mondhatjuk, hogy az ilyen szerkezet, mint 1D (egydimenziós) fotonikus kristály, a kék fény frekvenciájára tiltott átmenettel rendelkezik. Megjegyezzük, hogy a színek keletkezésének pontos leírásakor a fotonikus kristályok és a fény (fotonok) kölcsönhatását a szilárdtest fizikából megismert sávmélethez hasonlóan kezelik. A fotonok mozgása a fotonikus kristályokban, amelyek dielektrikumok, hasonló ez elektronoknak a kristályos anyagokban történő mozgásához. Ezért egy adott szerkezetről történő nagy intenzitású szelektív fényvisszaverődést úgy értelmezhetünk, hogy az ilyen frekvenciájú fény nem terjed a fotonikus kristályban, mert erre a frekvenciára a dielektrikumban tiltott sáv jelenik meg. A továbbiakban itt inkább azokkal a színekkel foglalkozunk, amelyek a középiskolában használatos fizikai optikai

megfogalmazásokkal értelmezhetők. Mint az már korábbi példáinkból kiderült, a valóság azonban ennél sokkal összetettebb.



4.14. ábra Páva szem

Már a kékszajkó esetében láttuk, a színek kialakításáért felelős struktúrák a madár szárnyain, az ágacskák felületén találhatóak.

### **Kolibri**

A kolibrit a „természet drágakövének” is szokták nevezni. Gyönyörű színeinek köszönhetően úgy tűnik, mintha mindig izzásban, ragyogásban lenne.

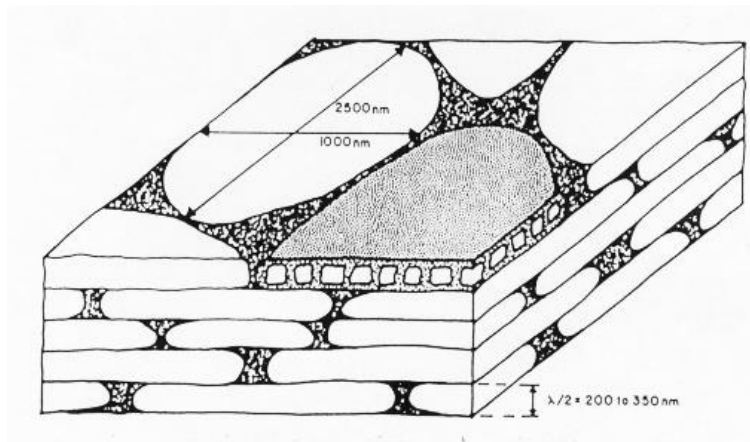


4.15. ábra Tüzesstorkú kolibri



4. 16. ábra Mozaik mikroszerkezet a kolibri szárnyán [33]

A kolibri szárnyán lévő  $200 \times 100 \mu\text{m}$  méretű ágacskákat  $1 \times 2.5 \mu\text{m}$  nagyságú, ovális lemezek százaiból álló mozaikréteg fedi (4.16. ábra). A lemezek **vastagsága** és **törésmutatója** akár ugyanazon madár tollának különböző helyein is nagyon változatos lehet. Ahol a törésmutató például  $n = 1,85$ , ott a tollak piros színűnek, ahol pedig  $n = 1,5$  ott kéknek látszanak. Az összes lemez ugyanabból az anyagból áll, de a tényleges törésmutató az anyaghoz kevert levegő arányától függően szinte mindig kisebb érték. A 4.17. ábrán a kolibri tollának felületi szerkezete látható. Ahogy a szín változik vörösből zölden át kékig, a rétegek vastagsága egyre csökken. A rétegek vastagság akkora, hogy az effektív optikai úthossz (a törésmutató és a rétegvastagság szorzata) a domináns szín hullámhosszának a fele [33].



4.17. ábra Sematikus rajz a kolibri tollának finomszerkezetéről [33]

### A lepkék és a nanovilág

A legszebb, fémes fényű, **irizáló kék színeket** (metálkék) a lepkéknél és a bogaraknál figyelhetjük meg, amelyek különösen szembetűnőek néhány Morpho családba tartozó trópusi lepkefajnál. A lepkeszárny a ráeső fény feltűnően nagy hányadát, majd 80 százalékát visszaveri, tökéletesebb, mint a legjobb tükör.



4.18. A Morpho család egyik lepkéje

A szárny e tulajdonsága is felkeltette a kutatók érdeklődését a szárny mikroszerkezetének kutatására. Eddig már többször előkerült az irizálás jelensége, de az irizálás a legszembetűnőbbben a biológia szerkezeti színek esetében a lepkéknél jelentkezik. Mivel a szárny szerkezete ún. **biológiai nanoszerkezet**, pár mondatban ismertetjük a fizika új ágának, a nanofizikának az utóbbi 30 év alatt felfedezett, e témakörrel kapcsolatos eredményeit.

Az irideszcencia azt jelenti, hogy a vizsgálandó test, jelen esetben a lepkeszárny, **színének árnyalata** és a szín **intenzitása** erősen függ a **megvilágítás** és a **megfigyelés** irányától is. Bár a szappanbuborékok, olajfoltok, mint vékony rétegek színe is függ attól, hogy hogyan esik rájuk a fény és honnan nézzük azokat, de a **szín intenzitásának** a megfigyelés irányától való függését csak fotonikus kristályszerkezetekkel lehet értelmezni [36]. Az egyre tökéletesedő képalkotó kutatási módszereknek köszönhetően az anyagok szerkezete már atomi skálán is ismeretes. A nanométeres ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) mérettartományú részletek megismerésével sikerült megérteni olyan anyagok különleges viselkedését is, melyek kiterjedésének egy domináns mérete ebben a mérettartományba (grafén, szén nanocső) esik.

A médiából is ismert és sokat emlegetett nanovilág megismerése a jövő tudományában nagy perspektíva, új utakat jelöl ki a kutatásban, és az elért eredmények technikában történő alkalmazásában egyaránt. A nanotechnológia fejlődéséhez az élő természet is hozzájárul. Az élővilágban a nanométeres skála nem ritka, érdemes kutatni jelenségeiket, felfedni a háttérben meghúzódó struktúrákat, mert tőlük is sokat lehet tanulni. A biomimetika egy új tudományág, amely felfedezi az élővilág struktúráit, az azokhoz kapcsolódó jelenségeket, működéseket azzal a céllal, hogy az ember szolgálatába állítsa azokat is. Ezután már „csak” le kell másolni a megfelelő szerkezeteket, hogy mesterségesen is előállíthassunk hasonló jó tulajdonságú anyagokat. A „másolási” feladat nem könnyű, a versenyben sok területen mostanáig a természet



győzött. A nanovilág kutatásának folytatásával azonban egyre közelebb juthatunk a jobb technikai alkalmazásokhoz.

Egy példával szeretnénk bemutatni e törekvés rögzös útját, mely látszólag ugyan közvetlenül nem kapcsolódik a lepkék színéhez, de nem is áll nagyon távol tőle.

Középiskolában szerzett ismereteink közé tartozik, hogy a grafit kristályrácsa réteges szerkezetű (rétegrácsos), a rétegekben a C-atomok hatszöges szimmetriával rendeződnek, a síkban egymással erős, kovalens kötéssel kapcsolódnak. A rétegek között viszont gyengébb, van der Waals kölcsönhatás működik, a rétegek ennek köszönhetően egymáson könnyen csúsznak. A grafitceruzával írunk.

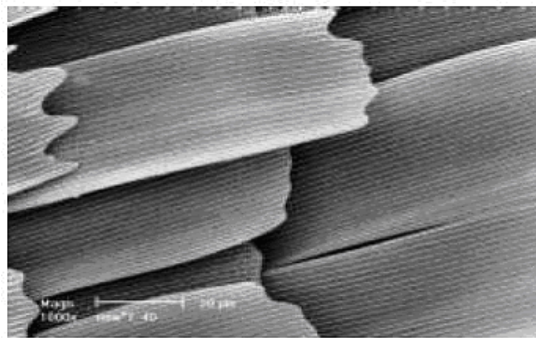
Ha egy nagyobb kiterjedésű réteget a grafitról sikerül leválasztani, s az önálló életre kel, már egészen más tulajdonságú anyaggal találkozunk. Az egyrétegű, atomi vastagságú „grafit” szilárdsága meglepően nagy, az acél szilárdságánál lényegesen nagyobb, s elektromos- és termikus vezetőképessége is feltűnően nagy. A fénynek csak 2,3 %-t nyeli el, a többit áttereszti, teljesen átlátszó. A grafitról leválasztott, egy rétegű anyag a **grafén** önálló nevet kapta [37]. Érdekes kutatni sajátosságait. A kutatások során a legnagyobb probléma olyan méretű grafén minta előállítás volt, amelyen méréseket lehet végezni, hogy minden, számításokkal megjósolt érdekes tulajdonság mérésel megerősíthető legyen. A grafitceruza nyoma a papíron is grafén. Egy, vagy néhány réteg grafit. A probléma csak az, hogy a nyom méreténél fogva alkalmatlan a grafén fizikai paramétereinek vizsgálatára. A grafén előállítás nem volt egyszerű feladat, de találékony tudósok „erős” ragasztószalag segítségével grafitömről mégis „könnyen” leválasztották. Módszerüket, egyébként a grafén tulajdonságainak kísérleti és elméleti feltérképezésével együtt 2010-ben fizikai Nobel díjjal jutalmazták [37]. A grafén egyik kiterjedése, a „vastagsága” atomi méretű, a nanométeres mérettartományba esik, s a grafitól teljesen eltérő sajátosságokat mutat. A nanovilágba tartozó anyagok, mert kétdimenziósak, a tömbi anyag sajátosságaitól általában eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek. A **nanotechnológia** egy új tudomány lett, mely az anyagok szerkezetét, tulajdonságaikat, a szerkezetek működését kutatja az 1nm-100 nm méretskálán.

Ki gondolná, hogy a biológia nanoszerkezetek, az élő természet színezésének fortélyai, hasznosak lehetnek a kozmetikai iparnak, az autógyártásnak, de még a ruhatervezéssel foglalkozó divatcégeknek is. Manapság a híres kozmetikai- és divatcégek a nanokutatások egyik legnagyobb szponzorai közé tartoznak [38]. A természetbarát alapanyagok és technikák fejlesztése mindhárom említett gazdasági szereplő érdeke, s persze a miénk is!

Ha most visszakanyarodunk a lepkékhez, akkor megérthetjük, hogy nem csak a kutatók természetes tulajdonsága a kíváncsiság, hanem komoly gazdasági igények is nagy hajtóerőt

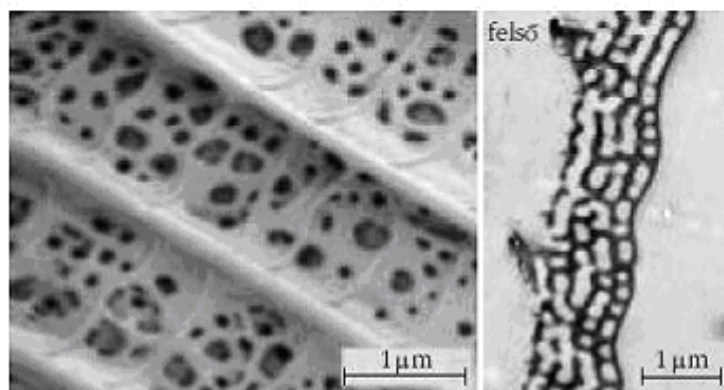
jelentenek a szerkezeti színek kutatásában. Ennek köszönhetően szinte naponta tesznek e téren, újabb és újabb felfedezéseket. Magyar kutatócsoport is jelentős eredményeket ért el a biológiai eredetű, az ún. természetes fotonikus szerkezetek kutatásában, különös tekintettel a lepkék szárnyán található hímpor mikroszerkezetének kísérleti felderítésében és az optikai spektrum, az irizáló színek kialakulásának megértésében. Pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) a szárny felületének szerkezete, transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) a szárny keresztmetszeti struktúrája vizsgálható.

Fizikusok és biológusok együttes munkájának eredményeként ma már számtalan magyarországi, irizáló színek mutató lepke szárnyának összetett nanoszerkezete is ismertté vált.



4.19. ábra Albulina metallica szárnyának pikkelyes szerkezete (SEM) (L.P. Bíró felvétele)

Mai ismereteink szerint a lepkeszárnyon lévő szerkezetek fotonikus kristályok, az  $n = 1,56$  törésmutatójú kitin és a levegő alkotta nanokompozitok, amelyekben a két összetevő törésmutatója a fény hullámhosszával összemérhető periodicitással, 100 nm-es skálán változik.



4.20. ábra Albulina metallica SEM és TEM képe (L.P. Bíró felvétele)

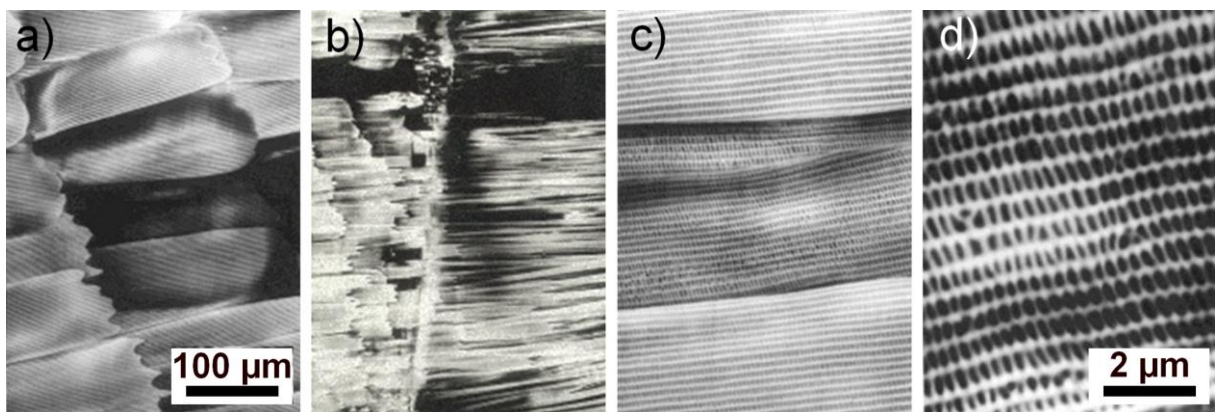
A fotonikus kristályra eső fény bizonyos hullámhosszai a fenti szerkezetben nem tudnak terjedni, onnan teljes egészében visszaverődnek. A szerkezeti színek mutató lepkéknél a

fotonikus kristályszerkezet jellemző méretei és szimmetria-sajátságai olyanok, hogy leggyakrabban a **kék** színű fény nem tud terjedni a szerkezetben, ezért visszaverődik [39].

A továbbiakban beszámolunk azokról az eredményekről is, amelyek a fotonikus kristályok megjelenéséig (1990 Jablonovitch) születtek, amelyek a kék szín kialakulását a tudomány akkori fejlettségi szintjén értelmezték. Tesszük ezt azért, mert a magyarázatok a középiskolai ismeretekhez közelebb állnak. Nem követünk el szakmai hibát sem, mert az addig felfedett struktúra-részletek a fotonikus kristályszerkezetekben is fellelhetők. Mára viszont kiderült, hogy e szerkezetek nem kizárólagosan felelősek a kék szín kialakításáért. A korábbi elméletek kissé egyszerűsítve, **többrétegű vékonyréteg interferenciával** magyarázzák az irizáló kék keletkezését, amelyről tudjuk, hogy az azóta megismert valóságnak csak egy része.

A hímpor a lepkék szárnyán a szárnyfelületet pikkelyesen, a tetőcseréphez hasonlóan borítja.

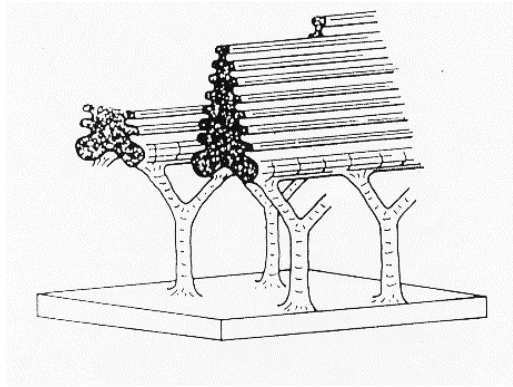
A pikkelyeken nagyobb nagyítással egymástól többnyire azonos távolságban húzódó, hosszanti bordázatot fedezhetünk fel. Növelve a felbontást a bordák között keresztbordák is megfigyelhetők, a szerkezet ebben a felbontásban egy szabályos rácsozathoz hasonlít.



4.21. ábra Boglárkalepke szárnya növekvő nagyításban (Szalóki Dezső felvétele)

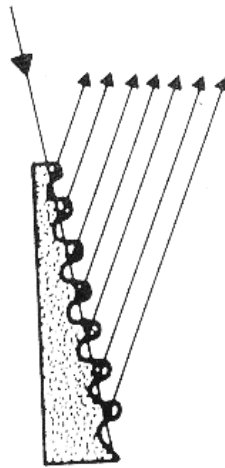
A TEM vizsgálatokból az is kiderült, hogy a szárnyfelületre merőleges irányban is van egy szabályosan ismétlődő szerkezet, amely a Morpho Rhetenor lepkéknél a fenyőfához hasonló megjelenésű (4.22. ábra). A „fenyőágakat” jelentő bordák azonos vastagságúak, és egymástól a vastagságukkal azonos távolságban helyezkednek el. A bordázat anyaga kitin.

A Dél-Amerikában honos, 13 cm-es szárnytávolságú Morpho Retenor példányán a pikkelyek 0,1 mm méretűek, rajtuk kb. 200 nm széles bordázat látható. Ha a szerkezetet nagyobb felbontásban is szemügyre vesszük, akkor észrevehető a bordázat lábakon álló, háztetőszerű finomabb szerkezete.



4.22. ábra Sematikus rajz a Morpho Rhetenor szárnyának finomszerkezetéről [33]

A bordák elrendezésének keresztmetszeti képén jelöltük a szárnyat érő és a felületről visszaverődő fénysugarakat. E példányon a kitin bordák törésmutatója  $n = 1,5$ , a borda és a légrés vastagsága egyaránt  $90 \text{ nm}$ .



4.23. ábra Többrétegű interferencia a bordázaton

Az effektív optikai útkülönbség (merőleges megfigyelés esetén)

$$90 \text{ nm} + 1,5 \cdot 90 \text{ nm} = 225 \text{ nm}$$

amely éppen a  $450 \text{ nm}$  hullámhosszúságú kék fény hullámhosszának a fele [33]. Elképzelhető, hogy a multiréteges szerkezeten kívül a 4.21 ábra d.) fényképén jól látható bordázat, mint reflexiós diffrakciós rács, szintén hozzájárul a színezéshez.

### Emlősök

Az emlősállatok körme, haja, szeme szintén mutathat irizáló színeket. Sötét haj esetén a hajszálak felületén mikroszkóp alatt láthatunk csillogó interferenciaszíneket. Ha sötétben például autóban utazva, megvilágítjuk egyes gerinces állatok szemét, akkor azok fémes fényűen

csillognak. Az éjszakai életre berendezkedett állatok akkor is látnak, ha kevés fény éri a szemüket. A szemük felépítése eltér az emberi szemétől. A retina (ideghártya) és az érhártya között, található egy fényvisszaverő tulajdonságú réteg, amelyet *tapetum lucidum*nak hívnak. Ez a réteg a retinán átjövő fényt visszaveri, így az **új**ból áthalad a retinán. A tapetum lucidum a mögötte lévő érhártyával – felépítésénél fogva – felelős azért a fémes csillogásért is, amelyet macskáknál, kutyáknál akkor észlelünk, ha az állat „belenéz” a fénycsóvába. Ezek a reflexiók az érhártya rétegben kialakuló többrétegű interferencia eredményeként jönnek létre. A **macska szeme** fémes zöld reflexiót mutat, a kutyák szemének kissé különböző szerkezete eredményezi a **kutyák** esetén tapasztalható sárga szemszínt.

### Fényelhajlás biológiai rácsokon

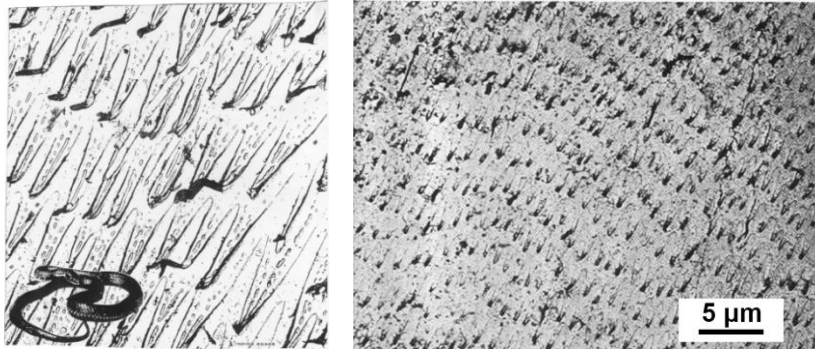
Ha a hullámterjedés útjába a hullámhosszal összemérhető méretű akadály kerül, akkor az akadály mögött is észlelünk hullámjelenséget. A jelenség az elhajlás vagy diffrakció. A **fényelhajlás** jelensége laboratóriumban optikai réssel, ráccsal tanulmányozható. Gyakran találkozunk olyan elhajlási képpel, (pl. CD-lemezre nézve), amelyet fényes, tükröző periodikus szerkezet, ún. *reflexiós diffrakciós rács* hoz létre. Ilyen eseteket az élővilágban is megfigyelhetünk. Az indigókígyó színe fényelhajlás eredménye.



4.24. ábra. Az indigókígyó

Az indigókígyó levedlett bőre kétdimenziós, két különböző periodicitást tartalmazó diffrakciós rácsként működik. Az ismétlődő egységek egymástól való távolságát elektronmikroszkópos vizsgálatokkal meghatározták, ami jó egyezést mutatott más módszerrel – a spektrometriás analízissel – kapott eredményekkel. A levedlett bőr egy részletének külső felülete reflexiós diffrakciós rácsként működik. Jól látható a hullámos mintázat a 4.25. ábrán, a hullámvonallal párhuzamos illetve merőleges rácsparaméter  $d=1\mu\text{m}$  illetve  $d=2.5\mu\text{m}$  [40]. A viszonylag nagy rácsállandók ellenére működik a diffrakció, mert a kígyó erősen görbült bőrfelületéről szinte

mindig teljesül a fény sűrűlő beesése, amiért a bőr periodicitása kisebb **látszólagos rácsállandóval** jellemezhető. Hasonló jelenség figyelhető meg a bakelit lemezen is. A barázdák  $40\mu\text{m}$  távolságra vannak egymástól, ez a látható fény hullámhosszánál egy nagyságrenddel nagyobb távolság. Egyszerű ránézéssel nem látunk rajta színeket. Ha azonban a lemezt szemünk magasságába emeljük, s nagyon kis szögben, szinte vízszintesen nézünk rá, akkor halványan ugyan, de megjelenik az elhajlás eredményezte színskála. Nem túl bonyolult szerkesztéssel és számításokkal meghatározható a valódi barázda-távolságnál kisebb látszólagos rácsállandó.



4.25. ábra Az indigókígyó bőrének szerkezete [40]

A kígyóknál a szemünkbe jutó visszavert fény két különböző hullámhosszúságú összetevője együttesen eredményezi az indigó színhatást. Ezt a feltevést igazolandó, a kutatók a levedlett kígyóbőrrel szintelen műanyagból lenyomatot, replikát készítettek. (Régen az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz használtak ilyen lenyomatot.). A szintelen anyagból készült lenyomat is – amely természetesen a kígyóbőrrel azonos periodicitást mutatott – indigó színűnek látszott.

Nem tettünk említést a rovarok legnagyobb csoportját képező **bogarak** színeiről, közöttük is található irizáló, lumineszkáló bogarak, ultraibolya jeleket kibocsátó, polarizált fényt érzékelő és visszaverő egyedek, amelyeknél a szín kialakításáért összetett biológia fotonikus kristályszerkezetek felelősek. A kitinpáncél felépítése alapján a bogarak körében is találkozhatunk töbrétegű szerkezetekkel, diffrakciós rácsokkal, olyan biológiai nanoszerkezetekkel, melyek periodicitása a látható, de néha még az ultraibolya fény hullámhosszával egyezőek. A bogarak színeinek szerkezeti eredetét a fentiekhez hasonló részletességgel elemezni a gyűjtemény véges terjedelme miatt itt nem áll módunkban megtenni.

A teljesség igénye nélkül próbáltunk bepillantást nyújtani az élővilág színeit kialakító mechanizmusokba felhasználva azt a középiskolai háttérismeretet, amelyet a fizikaórákon szereztünk. Érdeklődő olvasóink, az e témához kapcsolódó, napjainkban felfedezett további

kiegészítéseket a **nanotechnológia** eredményeiről szóló internetes és nyomtatott folyóiratokban publikált beszámoló cikkekből szerezhetik meg. A hazai kutatásokat is tartalmazó nemzetközi együttműködés legfrissebb eredményeiről a [www.nanotechnology.hu](http://www.nanotechnology.hu) című honlapról értesülhetnek.

Az ebben a fejezetben említett fizikai optikai jelenségeket bemutatható **fizikai demonstrációs kísérletek** megtalálhatók az ELTE oktatói által készített, „Fizikai kísérletek gyűjteménye” című könyvben [44].

## 5. Alkalmazkodás különleges körülményekhez

A továbbiakban az élővilágból vett néhány érdekességgel a diákok már meglévő biológiai, kémiai ismereteit szeretnénk „bevinni” a fizika órára. Gyermekeinket gyorsuló világunkban már nem csak az iskola tanítja, ismereteik forrásaként a különböző tömegkommunikációs lehetőségek is megjelennek, olyan dolgokról is tájékozódhatnak, amelyekről az iskolai tanórán nem is esik szó. A 7. osztályos biológia tananyag leíró jelleggel, néhány példát említve foglalkozik a sivatagok élővilágával, de e témában is nagyon sok érdekes anyag gyűjthető az internetről is. Ha néhány kulcsszóval segítséget adunk a kereséséhez diákjainknak, akkor az általuk talált érdekességekből igen színes órákat lehet felépíteni. A teljesség igénye nélkül mutatnánk példákat a szélsőséges körülményekhez való alkalmazkodás frappáns megoldásaiból. Gyűjteményünkéből a fizikai jelenségek magyarázatához kiválaszthatók azok a részletek, amelyek a tanulók életkori sajátosságainak, képzettségi színvonalának megfelelnek. Ezzel minden bizonnyal a biológiai ismeretek is elmélyülnek, érthetőbbekké válnak. Ebben a fejezetben is a biológia dominál, a természet egyedülálló megoldásai, az említett fizikai törvények, a hőtan egyes törvényei, már általános iskolában is előkerülnek, nem csak fizika, hanem kémia órákon is.

### 5.1 Párolgás, lecsapódás

#### Falevelek „pöndörödése”

Ismeretes, hogy szárazság idején a falevelek "összepöndörödnek". Vajon mi lehet e jelenség oka? Szárazság esetén a talajban nincsen elég víz, és a víz utánpótlása a gyökereken keresztül lelassul. A párolgás a levelek felületén történik, a levél párolgó felületének csökkentésével "pöndörödéssel" alkalmazkodik a kisebb vízhozamhoz, csökkenti a párolgási sebességet. Éppen emiatt sok sivatagi növénynek a levele tuskévé módosult.

#### Sivatagi növények

A sivatagi növényeknek gyakran jelentős víztároló kapacitásuk van. Leveleik kicsinyek és rövid életűek. A sivataghoz a legjobban alkalmazkodott növény a Welwitschia, évente mindössze két levelet hajt. Akár 1000 évig is él. A földben répához hasonló víztároló gyökere van, nagyon idős példányoknál a gyökér legnagyobb átmérője akár az 1 métert is eléri. A levelek a tő közelében zöldek, hosszabb felük a szél hatása miatt a homokhoz súrlódva szálakra szakad. A levelek viaszos felülete alatt igen jó vízszívó tulajdonságú rostos szerkezet található,



amely minden csepp vizet magába szív. A gázcseré-nyílások a sivatagi növényeknél, – a párolgás csökkentése miatt –, általában mélyen helyezkednek el. Gyakran a fák ágai is képesek a fotoszintézisre.



5.1. ábra Welwitschia



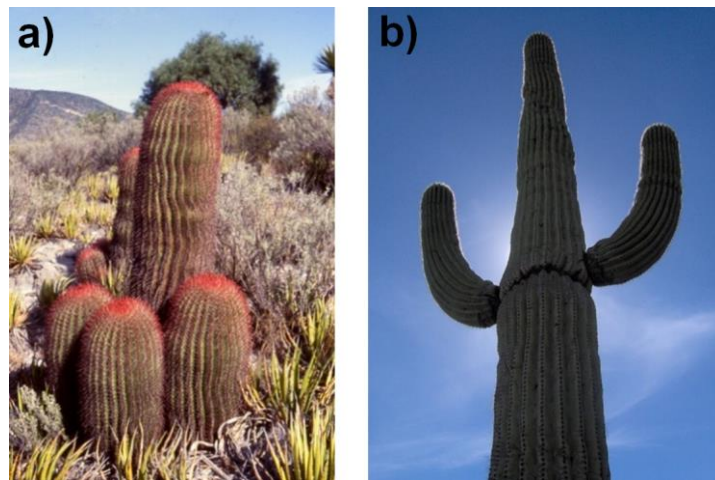
5.2. ábra Elcsökevényesedett falevelek

### **A kaktuszok**

A növényvilág egyik legérdekesebb csoportját alkotják a kaktuszok, nemcsak a különleges formájuk miatt, hanem a szárazságtűréshez alkalmazkodott, az évmilliók során kialakult életmódjuk miatt is. A szárazságtűréshez termőhelyüktől függően fokozatosan, különféle módon alkalmazkodtak. A pozsgások húsos vastag levelét nagy üregű sejtekből álló víztároló szövet alkotja. A levelek párolgató felülete egyre csökkent, a levelek elcsökevényesedtek, részben tövisékké vagy szőrökké alakultak, és maga a szár, a törzs vált pozsgássá. A kaktuszok felületén rendszerint vastag bőrszövet és viaszréteg alakult ki a felületi párolgatótást a minimumra csökkentve. A hosszú fehér szőrök is akadályozzák a párolgást. A takarékos

vízgazdálkodást szolgálja, hogy a sivatagi növények gázcseré-nyílásainak száma  $\text{mm}^2$ -ként kb. tízszer kevesebb, mint más növényeké.

A kaktuszok testét borító tövisek, illetve szőrök fontos szerepet játszanak a vízszerzésben is.



5.3. ábra a) Kaktuszok, b) Kandeláber (Saguaro) kaktusz

Az aránylag száraz, kis páratartalmú levegőből a jelentős éjszakai lehűlés következtében a sok tövisre és a gazdag szőrözetre – a **nagyobb felület miatt** –, több harmat csapódik, mint a csupasz testfelületre. A nedves tüskék és a fedőszőrök a növény körül így sajátos, párás „mikroklíma” kialakulását teszik lehetővé.

A kaktuszok alakja, gömb- (minimál felület) vagy oszlop alak is az adott térfogathoz tartozó lehető legkisebb párologtató felület kialakítása miatt alakult ilyenné. Míg a kb. 40 kg tömegű oszlopkaktuszok öntözés nélkül egy év alatt, súlyukból mintegy 10 kg-t veszítenek, egy hasonló tömegű gömbkaktusz kevesebbet, a fentiek csak kb. a felét veszíti.

A szárazságtűrő növények különös sajátossága, hogy sejtnedvük ozmotikus nyomása rendkívül alacsony. Az átlagos ozmotikus nyomás a csapadékban rendszeresen részesülő növényekben 1-2 MPa. A kaktuszokban az ozmotikus nyomás a 0,5 MPa-t sem éri el. Hogyan tudnak mégis elegendő vízhez jutni? Hatékony víztároló rendszerük nem teszi szükségessé a csak magas ozmotikus nyomással a talajból megszerezhető vízhez jutást, gyökereik a talaj felszínéhez közel helyezkednek el, azért, hogy kisebb eső vagy harmat esetén is könnyebben tudjanak vízhez jutni, és víztartalékoló sejtjeiket rendkívül gyorsan meg tudják tölteni. A talaj felszínéhez közel található gyökerek viszonylag hamar elpusztulnak, de esőzéskor hamar regenerálódnak.

A környezet hatása, az életmód mutatkozik a kaktuszok színében, tüskézettségében is. A tűző napon élő fajok színe a vastag viaszos borítás miatt kékes vagy szürkészöld, amely a nagyfokú felületi párologtástól védi őket. Az Andok magas hegyein élő kaktuszokat finom hajszerű, egyes fajokat szinte selymes, lágy, fehér vagy sárgás szőrbunda borítja. Ettől ezek a növények nagyon

szépek. A szőrbunda életfontosságú alkalmazkodás eredménye. Nappal a magas hegyen a növényeket erős napsütés éri, ekkor a szőrzet árnyékolást jelent, a nagyon hűvös éjszakákon, pedig a bunda igen jó hőszigetelést biztosít.[42]

### **A majomkenyérfa**

Az afrikai szavannák furcsa megjelenésű fafélesége a majomkenyérfa vagy baobab.



5.4. ábra Majomkenyérfa

Idősebb egyedeknél a 8 métert is meghaladó átmérőjű fák sem ritkák, törzsükön gyér korona található. A fatörzsek valóságos **víztárolók**, a törzs laza szerkezetű szövete 120 liter vizet is tartalmazhat. Elefántok eszik a törzsét, a nagy szárazságban így jutnak vízhez.

### **Párologtatás az állatvilágban**

#### **A kutya**



5.5. ábra Pulí kutya

A kutya szervezete sokkal rosszabban alkalmazkodik a hőséghez, mint az emberé. A kutya csak a garaton keresztül a tüdő felületén párologtat, a nagyobb felület biztosítása miatt "lóg a nyelve" a hőségben. A nyál relatíve kis felületen történő elpárologtatása ugyanis az állatnak nem biztosít kellő hűtő hatást. Van azért lehetősége ennél egy kissé jobban hűtenie magát, ha szabaddá teszi a szőrrel nem borított testfelületeit is.

### **Páragyűjtő bogár**



5.6. ábra „Ködevő” vagy páragyűjtő bogár

A dél-nyugat afrikai gyászbogár (*Onymacris unguicularis*) testével gyűjti össze az óceáni eredetű páras szél vizét. Egyetlen alkalommal akár 40 %-kal is megnövelheti testsúlyát. Amikor a szél az Atlanti-óceán irányából ködöt hoz, az állat a homokdűnék tetejére mászik. Hosszabb hátulsó lábával feltámasztja potrohát, teljes testfelületével a szél irányába fordul. A ködből a parányi vízcseppek ott lecsapódnak, s a víztaszító kitinpáncélon lévő barázdák közötti "levezető csatornákból" a víz egyenesen a szájába csorog.

### **A teve**



5.7. ábra Az egypúpú teve

Igen érdekes az egy púpú teve, a dromedár hőszabályozása. A teve, lévén sivatagi állat, előfordulhat, hogy 2 hétig nem iszik. Ez az alkalmazkodás a sivatagi körülményekhez azzal kapcsolatos, hogy rendkívül gazdaságosan osztja be vízkészletét. Még 40 °C-os hőségben sem izzad. Teste vastag, sűrű szőrrel borított, amely hőszigetelő tulajdonságánál fogva megvédi testét a túlmelegedéstől. Púpja a legerősebb napsütéskor akár 80 °C-ra is felmelegszik, miközben a bőr alatt lévő testrész hőmérséklete "csak" 40 °C! A test párolgását a szőr megakadályozza. A teve még a rekkenő hőségben sem nyitja ki a száját, ha szélesre nyitná, akkor a szájüreget borító nyálkahártya párolgás miatt száradna. A légzésének ritmusa lassú, mindössze 8-szor vesz levegőt percenként, ennek köszönhetően a kilélegzett levegővel is kevesebb vízpára távozik szervezetéből. Nagy hőségben a légzés percenként 16-ra fokozódik. (Összehasonlításként néhány más állat légzésének üteme hasonló körülmények között: bika 250/perc, kutya 300-400/perc.) Az éjszakák a sivatagban hidegek, a teve testhőmérséklete is lecsökken 34 °C-ra, a nappali hőségben 40-41 °C-ra is felemelkedik. Ez a hőmérséklet-szabályozás a víz gazdaságos felhasználása miatt igen fontos. Van még egy igen érdekes víztárolási képessége. Ismeretes a kémiából, ha a zsír "elég", akkor víz keletkezik. 107 g zsírból 100 g víz képződik. A teve a púpjában tárolt zsírból a legnagyobb szükség esetén az anyagcsere termékeként megjelenő vízhez juthat, amely akár 50 kg tömegű is lehet.

### **A kengurupatkány**



5.8. ábra Kengurupatkány

A vízzel a tevénél is gazdaságosabban bánik az amerikai Arizona sivatagban élő kengurupatkány. A testében lévő összes víz szinte az étel feldolgozásából származik.

### **Arányszabály rókák, nyulak esetén**

A különböző hőmérsékletű környezetben élő azonos fajhoz tartozó állatok méretarányainak összehasonlítására léteznek ún. tapasztalati szabályok, amelyek közül egyik az Allen-szabály.

A szabály háttérében az állatok vízháztartását érintő fizikai törvényszerűségek húzódnak. 1877-ben Joel Asaph Allen által megfogalmazott szabály szerint: a testfüggelék (fül, farok, végtagok) egy faj hűvösebb vidéken élő képviselőinél vagy az egy rokonsági körbe tartozó fajok esetében a hűvösebb éghajlat alatt élőkénél a testhez viszonyítva kisebbek. Szembetűnően jelentkezik például antilopok, rókák, nyulak esetében, pingvinek esetében.

Az alábbi ábrán például rókák esetében szembetűnő a fülek méretének változása.



5.9. ábra Sarki róka, vörös róka és a sivatagi róka

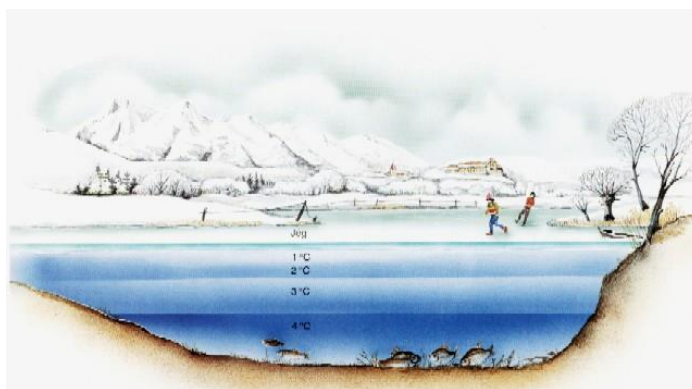
## 5.2. Olvadás, fagyás

### A természetes vizek befagyása

Természetes környezetünkben található vizeinkben – a folyókban, tavakban és a tengerekben – a jégképződési folyamatok egymástól eltérően játszódnak le.

A folyóvizek, turbulens keveredésük miatt, termikusan kiegyenlítettek, ezért bennük a jégképződés csak akkor indulhat meg, ha már fenékgig lehültek 0 °C hőmérsékletre. A víz megszilárdulása tehát nemcsak a folyók felszínén, hanem a mélyebb vízrétegekben (lebegő hordalékszemcsékre fagyó kásajéggént) és medrük alján (fenékjég formájában) is megindul.

Más a helyzet az **édesvízi tavak** esetében. A tavak vize (a hullámozás keverő hatásától eltekintve) nyugalomban van, a felszíntől lefelé a lineáristól eltérő hőmérsékleti rétegződés alakul ki. Ennek oka a víz érdekes szerkezeti tulajdonságában rejlik. A tiszta víz sűrűsége ugyanis nem növekszik egyenletesen a hőmérséklet csökkenésével, hanem 4 °C-nál maximumot ér el. A meleg tavakban a leghidegebb víz alul helyezkedik el, a hőmérsékleti rétegződés egyenletes.



5.10. ábra Állóvíz befagyása és a hőmérséklet szerinti rétegződés

Ha a levegő hőmérséklete  $4\text{ °C}$  alá süllyed, kialakul a fordított hőmérsékleti rétegződés: alul lesznek a legmelegebb, de a legsűrűbb  $4\text{ °C}$ -os víztömegek, fölötte hidegebb, de kisebb sűrűségű vízrétegek helyezkednek el. Ha a levegő hőmérséklete  $0\text{ °C}$  alá süllyed, a felszínen megindul a jégképződés. Az egyre vastagodó jég azonban hőszigetelő réteget képez a víz felett. A jégréteg alatt a lehűlt víz nehezebben fagy meg, mert a fázisátalakuláskor felszabaduló hő elszállítását a rossz hővezető jégpáncél lassítja. A tavak befagyása önmagát lassító folyamat. Ennek a jelenségnek nagy hasznát veszik a tavakban élő halak és egyéb élőlények, hiszen a jégpáncél alatt a megfagyás veszélye nélkül, kellemesen áttelelhetnek.

Az átlagos sótartalmú **tengervíz** másként viselkedik, mint az édesvíz, mert lehüléskor a sűrűsége egészen a fagyáspontig növekszik. Ebből nemcsak az következik, hogy  $4\text{ °C}$  alatti hőmérsékletek előfordulhatnak az óceán fenekén, hanem az is, hogy egy ideális óceáni medencében, ahol a víz sótartalma mindenütt azonos, és a sűrűség csak a hőmérséklettől függ, a leghidegebb víz – az édesvízi tavakkal ellentétben, – mindig alul helyezkedik el. A sótartalom miatt csökken a tengervíz fagyáspontja, így a tengerek az édesvizeknél alacsonyabb levegőhőmérséklet mellett fagynak be.

### 5.3 Szélsőséges hőmérsékletekhez való alkalmazkodás módjai

#### Félnaponta váltakozó lángoló nyár és dermedtő tél

A magas hegyek – mint az afrikai Kenya-hegy is – élővilágának nemcsak az éjszakai hideggel, hanem – a vékony atmoszféra miatt – a nappal tapasztalható meleggel is meg kell küzdeniük. A túl **magas hőmérsékletnek**, vagyis erős besugárzásnak és felmelegedésnek kitett növények **színe** gyakran világos, felületük fehér, igen sima vagy fényes. Az ilyen felületek jól **visszaverik** a fény- és hősugarakat, és így csökkentik a növények felmelegedését.

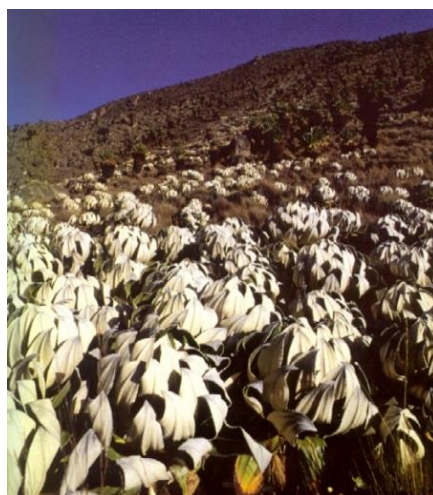
A hőmérséklet ingadozása olyan szélsőséges, mintha a lángoló nyár és a dermedtő tél félnaponta váltaná egymást. Azokon a szélességi körökön, ahol fa alakú aggófűvek (óriás aggófű) nőnek, a hegyekben nappal hőség van, éjszaka viszont nulla fok alá esik a hőmérséklet. Az *aggófű* sikeresen vette fel a harcot a hideggel.



5.11. ábra Óriás aggófű (Senecio kilimanjari) erdő 3200 méter magasan

Vastag levelei rozettában helyezkednek el a törzsön, a minden évben elszáradt levélgyűrűt a növény nem hullatja el, hanem belőle hőszigetelő burkot alakít ki a törzs körül. Az élő levelekben egy **különös anyag, fagyálló** termelődik, amely megakadályozza, hogy a szövetek megfagyjanak. A fatörzs edényrendszerében lévő víz megfagyását, pedig a régi száraz levelekből álló burok akadályozza meg.

Egy **másik aggófűféle** a talajhoz közel nő, és káposztához hasonlóan rendezi levél rozettáit.



5.12. ábra Éjszakára összezárt aggófű-„káposztafejek” [42]



A belül lévő **csúcsrügyet** az éjjeli fagyoktól – az óriás aggófű törzséhez hasonlóan –, a rájuk boruló, külső levelekből álló, több rétegű burok védi. Ha a levegő  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra is hűl, a “levélruha” alatt a hőmérséklet akkor is  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  marad. [42]

Ahogy az édesvízi tavak élővilágát a tófenékhez közeli tartományokban télen a felületi jégréteg védi a megfagyástól, ugyanígy van ez a magas hegységi lobélia rügyeinél is.



5.13. ábra A lobélia virágzása

A kétféle előforduló lobélia faj közül az egyik ugyanúgy védekezik, mint az aggófű, de a másik viszont egész éjszakára széttárva hagyja leveleit. A levelek itt mély, vizet át nem eresztő medrecskét formáznak, amelyben **három liternél** is több víz fér el. **Éjjelente** a víz felszíne megfagy, s a vékony jégréteg alatt lévő víz folyékony marad. A tavacska alján növekedő **csúcsrügy** így fagykárosodás nélkül vészeli át a hideget. Az időtényező rendkívül fontos. Ha az éjszaka ugyanis csak néhány órával is hosszabb lenne, vagy napközben is fagypont alatt maradna a hőmérséklet, akkor a tavacska "fenéig" befagyna, és a zsenge hajtások elpusztulnának. A **nappali** melegben sem párologhat el a védőfolyadék a mederből, mert a rügy kiszáradna. A mederben ugyanis nem tiszta esővíz van, hanem a növény által termelt nedvesség, amelynek párolgását a folyadék tetején összegyűlt speciális nyálka, akadályozza. Kutatók kimutatták, hogy a nyálka anyaga **pektin** [41]. Így a csúcsrügy élete nem függ az esőzéstől.



5.14. ábra Lobelia Kilimanjaro és Lobelia Telekii a Kenya-hegyen

Magyar vonatkozású érdekességekkel is találkozunk e távoli helyen. A Teleki lobélia nevét ugyanis gróf Teleki Sámuelről, a híres magyar utazóról, felfedezőről kapta. Teleki Sámuel vezette az első európai expedíciót a Kenya-hegy északi oldalára 1888-ban, s ott talált rá a 4300 méter magasságban élő egyik óriás lobélia fajra, amelyet róla neveztek el „Lobelia telekii”-nek. Sikeres expedíciójának köszönhetően nevét viseli egy afrikai vulkán, egy hasadék, s számos, ott élő más növény faj is, amelyeket először ő írt le.

#### **Védekezés a levelek orientációjával**

Sok növény a levelek orientációjának megváltoztatásával küszöböli ki a túlzott párologtatást okozó, a levelet érő káros **hőhatásokat**. Jó példa erre az *ausztráliai eukaliptuszerdő*, melynek lombozata nem vet árnyékot, mert a levelek a beeső napsugárzással párhuzamos helyzetet vesznek fel. Még azonos levélorientáció esetén is a **kisebb felületű** levél hőszugárzás okozta hőmérséklete kisebb. A levelek hőmérsékletét a levelek *mérete*, azok *orientációja*, és a **légmozgások** (szelek) együttesen alakítják.



5.15. ábra A nyugat ausztráliai bozót jellegzetes növényei az eukaliptuszok [42]

### **Antarktisi halak**

Már 1899 óta, az első antarktisi expedíció óta ismeretes, hogy a világ leghidegebb tengerében hemzsegek a halak. Érdekes megismerni az alkalmazkodás részleteit, amely képessé teszi a halakat e korábban lakhatatlannak hitt környezetben való fennmaradáshoz.

A hideg vízben való fennmaradáshoz elengedhetetlen egyik tényező, hogy az állatok olyan speciális **fagyásgátló** tulajdonságú vegyületeket termeljenek, amelyek csökkentik a testnedvek fagyáspontját.

Az alkalmazkodás másik módja a vízben a **súlytalanság**, az ún. "**semleges úszóképesség**" megvalósítása. A "súlytalanság" beállításával a hal megtakarítja azt az energiát, amelyet a mérsékelt égövi halak a lebegéshez szükséges mozgásra fordítanak. Azok a halak (Notothenioidae alrend), amelyek e két problémát "megoldották", a tengerfenékről a középső vízrétegekbe húzódhattak.

Miképpen kerülnek el az antarktisi halak a megfagyást?

Ismertté vált, hogy az életterükül szolgáló vizek átlagos évi hőmérséklete  $-1,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pontosabban  $-1,4$  és  $-2,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  között ingadozik. A szabad felszínre érő napfény még nyáron sem jut el nagyobb mélységekbe, ezért szinte teljes sötétségben élnek. A legnagyobb veszélyt mégis a többszörös jégrétegek jelenléte okozza. A vizeket az év nagy részében, télen 2-3 méter vastag összefüggő jég borítja, amelynek aljához úgynevezett "kásajég" tapad. Az év egy részében a 30 méteresnél nem mélyebb aljzatot nagy kristályokból álló, ún. "horgonyjég" borítja, amely a halakra nézve különösen veszélyes.

Egy kutató 1950-ben megmutatta, hogy a jég azért veszélyes, mert behatolhat a hal kopolyájába, beszűrődhet kültakarójába. A halak ugyanis változó hőmérsékletű állatok, testhőmérsékletük általában megegyezik a környezet hőmérsékletével. Még akkor is életben

maradhatnak, ha testnedveik túlhűlnek, akár  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -val a fagyáspontjuk alá. A halak viszont csak akkor tudják elviselni a túlhűlést, s megtartani a testnedveiket folyékony állapotban, ha nem kerül jég a testükbe. Ha bőrüket jégkristály döfi át, az a túlhűtött testnedvben kristályosodási gócként azonnal robbanásszerűen indítja meg a jég kristályosodását. A nedvek befagynak, a hal elpusztul. Jég jelenlétében egyébként a mérsékeltéögvi halak már akkor megfagynak, ha a testnedvek  $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra lehűlnek.

Nem így az antarktisi halak!



5. 16. ábra Antarktisi jégahal

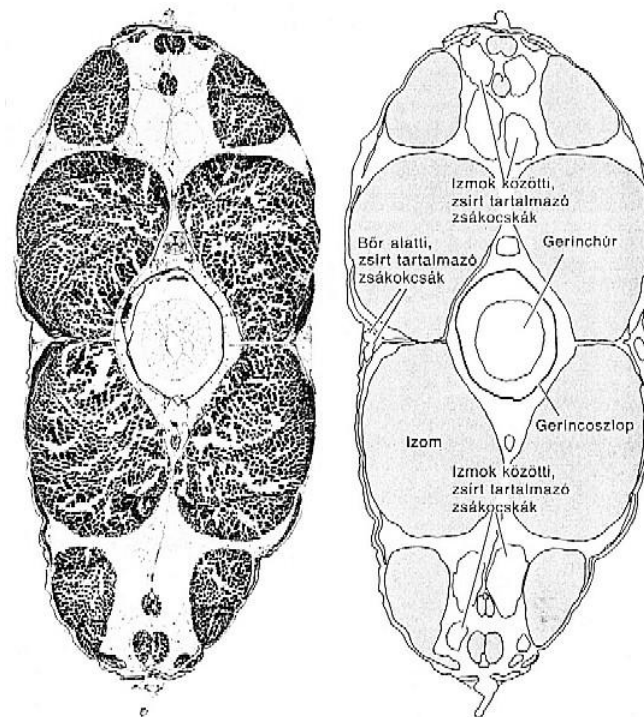
Testnedveik akár a  $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -t is elérhetik, és életben maradnak. Milyen oldott vegyületeknek köszönhető a fagyáspont ilyen mértékű csökkenése?

A fagyáspontcsökkenés legtöbb tengeri halfaj esetében nagy részben a testnedvekben oldott sóknak (főleg nátrium-klorid, de a kálium-klorid és a kalcium-klorid is hozzájárul) köszönhető. Kisebb hányadban játszanak szerepet a vér és a szövetek további természetes alkotói: a karbamid, glükóz, aminosavak. A tengervíz fagyáspontja  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A halak vére és testszövetei a tengervízénél kevesebb sót tartalmaznak, ezért már  $-0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on megfagynának. A Déli-óceánon még nyáron sem emelkedik a hőmérséklet  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  fölé. Az antarktisi halak többségének vérében fagyásgátló anyag található: glikoproteinek, fehérjék, cukrok. A fagyásgátló a kristálynövekedés mechanizmusát zavarja meg, molekulái beépülnek a jégkristályban a vízmolekulák helyére, elfoglalják azok helyét, ezzel megakadályozzák a jégkristály további növekedését.[43]

A vízben egy test bárhol történő lebegésének az a feltétele, hogy a testre ható erők eredője nulla legyen, a nehézségi erőt a felhajtóerő kiegyenlíti. Mivel a felhajtóerőt (a test által kiszorított víz "súlyát") a test térfogata és a víz sűrűsége meghatározza, a test átlagsűrűségét kell megfelelően beállítani a nehézségi erő megfelelő értékének eléréséhez.

Az antarktisi halak sajátos felépítése az evolúció során alakult ki olyanná, hogy a középső vizekben is lebegőképesek legyenek. A kutatók 1978-ban indítottak vizsgálatot annak eldöntésére, hogy az itt élő halak szervezetében, felépítésében milyen változtatások történtek az alkalmazkodáshoz.[45]

Szervezetükben a váz csontozatának, a test legnagyobb sűrűségű összetevőjének a lecsökkent mennyisége figyelhető meg. A váz szövetei főleg porcból állnak. A legtöbb halfajnál a gerincoszlop anyaga tömör csont, e halaknál, pedig üreges. A csontosodás csökkenésén kívül a semleges úszóképességhez a bőségesen jelenlévő trigliceridek is hozzájárulnak.



5.16. ábra Antarktisi hal keresztmetszeti képe [45]

A zsírszerű anyagok kisebb sűrűségűek, mint a tengervíz. A középső vízrétegekben élő halak a zsírt nem sejtekben, hanem zsákocskákban raktározzák. Ezek a 0,2-3 milliméter átmérőjű zsákocskák bőségesen megtalálhatók a hal melltájának bőre alatt, közel a test súlypontjához. A legnagyobb zsákok a test mélyében, az izmok között helyezkednek el, jelenlétük további sűrűségcsökkentő hatással bír.

Az antarktisi jégihalak vérében nincsen hemoglobin, és így is képesek aktív életmódra. Vajon miért és hogyan?

A Déli-óceán állandó hullámszásban van, vize emiatt gazdag oxigénben. Az oxigén hideg vízben jobban oldódik, mint az északabbra lévő melegebb területeken. Hideg vízben a sejtek anyagcseréje, az életműködés folyamatai lassúbbak, a pusztá létezéshez kevesebb energiára van

szükség. A szerényebb energiaigény miatt a szervezet oxigénellátása hemoglobin nélkül is megoldható, másféle alkalmazkodási technikák jelentkeznek.

Az antarktisi halak légzési rátája messze alul marad a mérsékelt égövi halakénak. A jégalak légzési rátája még az antarktisi halakéinak is csupán a fele. A jégálnak 2-3-szor több vére van, mint egy átlagos csontos halnak, testüknek közel tizedét az oxigénszállító szintelen vér teszi ki. Szívük 3-szor akkora, s 10-szer gyorsabban ver, mint egy csontos halnak. Kopoltyúik nagyobbak. Testükben a vér gyorsabban kering. Vérereik átmérője nagyobb, ezért a Hagen-Poiseuille törvénynek megfelelően, egy terület vérellátása jobb, hiszen adott idő alatt oda több vér jut el. Az oxigén felvételére pikkely nélküli testük szivacsos bőrfelületén keresztül is képesek.[45]

## 6. Irodalom

- [1] Papp Katalin: „Ami a számszerű eredmények mögött van...”, Fizikai Szemle, **51.** 26-34 (2001)
- [2] A. Mineev: „O vysokih derevjah I.” Kvant, 1992/3 (13-16)
- [3] L.J. Gibson and M.F. Ashby: Cellular Solids, Structure and Properties, Pergamon Press, Oxford, 1988,
- [4] A. Mineev: „O vysokih derevjah II.” Kvant, 1992/4, (10-15)
- [5] A. Mineev: „O reliefe kori na stvole dereva”, Kvant, 2004/3 (11-15)
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Birch\\_sap](http://en.wikipedia.org/wiki/Birch_sap)
- [7] A. Abrikosov: „Berezovaja volna”, Kvant, 2002/5 (2-6)
- [8] T. Barabas: „Pocemu drozhit osnovnyj list?” Kvant, 1992/1 (16-18)
- [9] R. Hooke: Micrographica, Royal Society, London, 1664, 112
- [10] L. J. Gibson, K. E. Easterling and M. F. Ashby: The structure and mechanics of cork, Proc. R. Soc. London. **A377.** 99-117, (1981)
- [11] L.J. Gibson and M.F. Ashby: Cellular Solids, Structure and Properties, Pergamon Press, Oxford, 1988, 332-343
- [12] Paul Davidovits: Physics in Biology and Medicine, 3rd edition, Academic Press, Elsevier Inc., 2008 (93-95)
- [13] Kundt Schmidt-Nielsen: Animal Physiology, 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1990. (433-448)
- [14] M.R. Clarke: „Physical properties of spermaceti oil in sperm whales”, J. Mar. Biol. Ass. U.K., **58.** 19-26 (1978)
- [15] Paul Davidovits: „Physics in Biology and Medicine”, 3rd edition, Academic Press, Elsevier Inc., 2008 (82-87)
- [16] William M. Kier, „The diversity of hydrostatic skeleton”, The Journal of Experimental Biology **215**, 1247-1257 (2012)
- [17] Ian Stewart: „A természet számai”, Világ-Egyetem, Kulturtrade Kiadó, Budapest, 1995
- [18] Herman Weyl: „Szimmetria”, Gondolat Kiadó, Budapest, 1982
- [19] Greguss Ferenc: „Eleven találmányok”, Móra Könyvkiadó, Budapest, 1976
- [20] [http://en.wikipedia.org/wiki/Waikiki\\_Aquarium](http://en.wikipedia.org/wiki/Waikiki_Aquarium)
- [21] <http://www.waikikiaquarium.org/experience/animal-guide/invertebrates/molluscs/nautilus/>

- [22] A.A. Castrejón-Pita and J.R. Castrejón-Pita, A. Sarmiento Galán, R. Castrejón García: "The impressive complexity in the nautilus pompilius shell", **Fractals**, **11**, No.2 (2003) 163-168
- [23] R.R. Velazquez-Castillo, J. Reyes-Gasga, Domingo I. Garcia-Gutierrez and Miguel Jose-Yacamán: "Crystal structure characterization of nautilus shell at different length scales", **Biomaterials**, **27**, 25 (2006) 4508-4517
- [24] [http://en.wikipedia.org/wiki/Victoria\\_amazonica](http://en.wikipedia.org/wiki/Victoria_amazonica)
- [25] Kubodera, T. & Mori, K. (2005). "[First-ever observations of a live giant squid in the wild](#)". Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **272** (1581): 2583–6.
- [26] "[The Giant Squid, Captured on Camera in its Natural Habitat for the First Time Ever! Revealed on NHK and Discovery Channel](#)" (PDF). NHK. 9 January 2013.
- [27] K. Bogdanov: "Bolshie i malenykie na progulke", Kvant, 1990/6 (17-22)
- [28] David Attenborough: „Az élet erőpróbái”, Park Kiadó, 1991 (143-144)
- [29] A. N. Remizov: „Medicinskaja i biologicheskaja fizika”, Vysshaja shkola, Moszkva, 1996 (186-195)
- [30] A. Mitrofanov: „Puziri na luzhe”, Kvant, 1989/6 (22-25)
- [31] J. E. Geguzin: „Puzyri”, Nauka, Moskva, 1985 (35-36)
- [32] <http://www.termesztvilaga.hu/tv2001/tv0105/kajtar.html>
- [33] Kurt Nassau, „The Physics and Chemistry of Colors: The Fifteen Causes of Colors”, John Wiley & Sons, 1983
- [34] Jan Dyck, Naturwissenschaften, **79**. 187-188 (1992)
- [35] Neugebauer Tibor: „Az élő természet színei” Fizikai Szemle **21**. 33-48. (1971)
- [36] Márk Géza István, Bálint Zsolt, Kertész Krisztián, Vértesy Zsófia, Bíró László Péter: „A biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái”, Fizikai Szemle, **57**. 116-121 (2007)
- [37] A.K. Geim and K. Novoselov  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/advanced.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced.html)
- [38] S.M Luke and P. Vukusic: „An introduction to biomimetic photonic design”, Europhysics news, **42**,/3 20-23 (2011)
- [39] Kertész Krisztián, Piszter Gábor, Vértesy Zsófia, Bíró László Péter, Bálint Zsolt: „Színek harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe – I. rész”, Fizikai Szemle, **68**. 231-234 (2013)
- [40] E. A. Monroe: „Origin of Iridescence colors on the Indigo Snake” Science, **159**. (97-98) 1968
- [41] T. P. Young, Susan Van Orden Robe: „Microenvironmental Role of a Secreted Aqueous Solution in the Afro-Alpine Plant Lobelia Keniensis”, Biotropica, **18**,/3 267-269 (1986)



- [42] David Attenborough: „A növények magánélete”, Aqua Kiadó, Budapest, 1995 (244-306)
- [43] Knut Schmidt-Nielsen: Animal Physiology, 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1990. (225-231)
- [44] Hullámoptikai kísérletek, Fizikai kísérletek gyűjteménye, Arkhimédész Bt., Budapest, 2001 (314-377)
- [45] Joseph T. Eastman and Arthur L. DeVries: „Antarctic fishes”, Scientific American, **255**. 106-114 (1986)
- [46] J. Howard Frank: „Pederin”, Encyclopedia of Entomology, Springer Netherlands, 2008 (2776-2777)

## 7. Ábra-hivatkozások

### 2. fejezet

2.2. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4a/United\\_States\\_-\\_California\\_-\\_Sequoia\\_National\\_Park\\_-\\_General\\_Sherman\\_Tree\\_-\\_Panorama.jpg/320px-United\\_States\\_-\\_California\\_-\\_Sequoia\\_National\\_Park\\_-\\_General\\_Sherman\\_Tree\\_-\\_Panorama.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4a/United_States_-_California_-_Sequoia_National_Park_-_General_Sherman_Tree_-_Panorama.jpg/320px-United_States_-_California_-_Sequoia_National_Park_-_General_Sherman_Tree_-_Panorama.jpg)

visit:2015.06.19

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/CaliforniaTree.jpg> visit:2015.06.19

2.13. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Taxus\\_wood.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Taxus_wood.jpg) visit:2015.06.19

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quercus\\_robur1\\_cross\\_beentree.JPG#/media/File:Quercus\\_robur1\\_cross\\_beentree.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quercus_robur1_cross_beentree.JPG#/media/File:Quercus_robur1_cross_beentree.JPG) visit:2015.06.19

2.15. ábra

<http://bonsaigallery.hu/lap/felepites/felepites206.jpg> visit:2015.06.19

2.21. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ac/PopulusTremula001.JPG/260px-PopulusTremula001.JPG> visit:2015.06.19

2.25. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/09/Illustration\\_Populus\\_tremula0.jpg/640px-Illustration\\_Populus\\_tremula0.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/09/Illustration_Populus_tremula0.jpg/640px-Illustration_Populus_tremula0.jpg) visit:2015.06.19

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/Aspen-leaves.jpg/800px-Aspen-leaves.jpg> visit:2015.06.30

2.26. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/KorkeichePortugal1994.jpg>

visit:2015.06.19

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/Quercus\\_suber\\_corc.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/Quercus_suber_corc.JPG)

visit:2015.06.19

2.27. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/RobertHookeMicrographia1665.jpg/640px-RobertHookeMicrographia1665.jpg> visit:2015.06.19

### 3. fejezet

#### 3.1 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/61/Eniwa\\_Amenbo\\_Gerris\\_lacustris2.jpg/120px-Eniwa\\_Amenbo\\_Gerris\\_lacustris2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/61/Eniwa_Amenbo_Gerris_lacustris2.jpg/120px-Eniwa_Amenbo_Gerris_lacustris2.jpg) visit:2015.06.18

#### 3.3 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Notonecta\\_glauca1.jpg/260px-Notonecta\\_glauca1.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Notonecta_glauca1.jpg/260px-Notonecta_glauca1.jpg) visit: 2015.06.18

#### 3.4 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/81/Paederus\\_littoralis01.jpg/260px-Paederus\\_littoralis01.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/81/Paederus_littoralis01.jpg/260px-Paederus_littoralis01.jpg) visit:2015.06.18

#### 3.5 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bf/Anas\\_platyrhynchos\\_male\\_female\\_quadrat.jpg/640px-Anas\\_platyrhynchos\\_male\\_female\\_quadrat.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bf/Anas_platyrhynchos_male_female_quadrat.jpg/640px-Anas_platyrhynchos_male_female_quadrat.jpg) visit:2015.06.18

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Anas\\_platyrhynchosMale2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Anas_platyrhynchosMale2.jpg)

visit:2015.06.18

#### 3.6 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a8/Common\\_carp.jpg/260px-Common\\_carp.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a8/Common_carp.jpg/260px-Common_carp.jpg) visit:2015.06.18

#### 3.7. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/50/Swim\\_bladder\\_%28Abramis\\_brama%29\\_%28leszcz%29.jpg/1920px-Swim\\_bladder\\_%28Abramis\\_brama%29\\_%28leszcz%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/50/Swim_bladder_%28Abramis_brama%29_%28leszcz%29.jpg/1920px-Swim_bladder_%28Abramis_brama%29_%28leszcz%29.jpg) visit:2015.06.18

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Air\\_bladder\\_in\\_a\\_bleak.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Air_bladder_in_a_bleak.jpg)

visit:2015.06.18

#### 3.8. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/Tibur%C3%B3n.jpg> visit:2015.06.18

#### 3.9 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Sepia\\_officinalis\\_%28aquarium%29.jpg/800px-Sepia\\_officinalis\\_%28aquarium%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Sepia_officinalis_%28aquarium%29.jpg/800px-Sepia_officinalis_%28aquarium%29.jpg) visit:2015.06.18

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Cuttlefish-Cuttlebone2.jpg/1024px-Cuttlefish-Cuttlebone2.jpg>

visit:2015.06.18

3.10 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Image-Blue\\_Whale\\_and\\_Hector\\_Dolphine\\_Colored.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Image-Blue_Whale_and_Hector_Dolphine_Colored.jpg) visit:2015.06.18

3.11. ábra

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mother\\_and\\_baby\\_sperm\\_whale.jpg#/media/File:Mother\\_and\\_baby\\_sperm\\_whale.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mother_and_baby_sperm_whale.jpg#/media/File:Mother_and_baby_sperm_whale.jpg) visit:2015.06.18

3.12 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ed/Sperm\\_whale\\_head\\_anatomy\\_%28transverse\\_%2B\\_sagittal%29.svg/1920px-Sperm\\_whale\\_head\\_anatomy\\_%28transverse\\_%2B\\_sagittal%29.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ed/Sperm_whale_head_anatomy_%28transverse_%2B_sagittal%29.svg/1920px-Sperm_whale_head_anatomy_%28transverse_%2B_sagittal%29.svg.png) visit:2015.06.18

3.13 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Szarcsa\\_Kew-ban\\_2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Szarcsa_Kew-ban_2.jpg)  
visit:2015.06.18

3.14. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/30/Regenwurm1.jpg/260px-Regenwurm1.jpg> visit:2015.06.18

3.15. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ad/Nautilus-JB-01.jpg/260px-Nautilus-JB-01.jpg> visit:2015.06.18

3.16. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/NautilusCutawayLogarithmicSpiral.jpg/800px-NautilusCutawayLogarithmicSpiral.jpg> visit:2015.06.18

3.17. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Helianthus\\_whorl.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Helianthus_whorl.jpg)  
visit:2015.06.30

3.25. ábra

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vitregias02.jpg#/media/File:Vitregias02.jpg>  
visit:2015.06.18

3.26. ábra

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Victoria\\_amazonica\\_-\\_Nymphaeaceae\\_01.jpg#/media/File:Victoria\\_amazonica\\_-\\_Nymphaeaceae\\_01.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Victoria_amazonica_-_Nymphaeaceae_01.jpg#/media/File:Victoria_amazonica_-_Nymphaeaceae_01.jpg)

visit:2015.06.18

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Victoria\\_amazonica\\_002.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Victoria_amazonica_002.jpg)

visit:2015.06.18

3.27. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Victoria\\_amazonica%2C\\_back\\_side\\_of\\_a\\_leaf\\_%28Kobe\\_Kachoen%29.jpg/1024px-Victoria\\_amazonica%2C\\_back\\_side\\_of\\_a\\_leaf\\_%28Kobe\\_Kachoen%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Victoria_amazonica%2C_back_side_of_a_leaf_%28Kobe_Kachoen%29.jpg/1024px-Victoria_amazonica%2C_back_side_of_a_leaf_%28Kobe_Kachoen%29.jpg) visit:2015.06.18

3.28. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Loligo\\_vulgaris.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Loligo_vulgaris.jpg) visit:2015.06.18

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c5/Display\\_of\\_sperm\\_whale\\_and\\_giant\\_squid\\_battling\\_in\\_the\\_Museum\\_of\\_Natural\\_History.jpg/800px-Display\\_of\\_sperm\\_whale\\_and\\_giant\\_squid\\_battling\\_in\\_the\\_Museum\\_of\\_Natural\\_History.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c5/Display_of_sperm_whale_and_giant_squid_battling_in_the_Museum_of_Natural_History.jpg/800px-Display_of_sperm_whale_and_giant_squid_battling_in_the_Museum_of_Natural_History.jpg)

visit:2015.06.25

3.30. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b9/Brook\\_trout.jpg/1920px-Brook\\_trout.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b9/Brook_trout.jpg/1920px-Brook_trout.jpg) visit:2015.06.18

3.31. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Cynomys\\_ludovicianus.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Cynomys_ludovicianus.jpg)

visit:2015.06.18

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/T%C3%A1rsas\\_pr%C3%A9rikutya\\_4.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/T%C3%A1rsas_pr%C3%A9rikutya_4.jpg) visit:2015.06.18

## **4. fejezet**

4.1. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Beta-carotene-2D-skeletal.svg/517px-Beta-carotene-2D-skeletal.svg.png> visit:2015.06.18

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/Lycopene.png> visit:2015.06.29

4.2 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e4/Chlorophyll\\_c1.svg/220px-Chlorophyll\\_c1.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e4/Chlorophyll_c1.svg/220px-Chlorophyll_c1.svg.png) visit: 2015.06.18

4.3 ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Riboflavin.svg/200px-Riboflavin.svg.png> visit: 2015.06.18

4.4 ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2a/Anthocyanine.png> visit: 2015.06.18

4.5. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a1/All-trans-Retinal2.svg/260px-All-trans-Retinal2.svg.png> visit:2015.06.15

4.6. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/73/Cyanocitta\\_cristata\\_FWS.jpg/640px-Cyanocitta\\_cristata\\_FWS.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/73/Cyanocitta_cristata_FWS.jpg/640px-Cyanocitta_cristata_FWS.jpg) visit:2015.06.18

4.8. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/Colorpoint\\_Shorthair.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/Colorpoint_Shorthair.jpg)

visit: 2015.06.18

4.9. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7f/Closeup\\_of\\_blackthorn\\_aka\\_sloe\\_aka\\_prunus\\_spinosa\\_sweden\\_20050924.jpg/260px-Closeup\\_of\\_blackthorn\\_aka\\_sloe\\_aka\\_prunus\\_spinosa\\_sweden\\_20050924.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7f/Closeup_of_blackthorn_aka_sloe_aka_prunus_spinosa_sweden_20050924.jpg/260px-Closeup_of_blackthorn_aka_sloe_aka_prunus_spinosa_sweden_20050924.jpg)

visit: 2015.06.18

4.11. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Libellula\\_depressa.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Libellula_depressa.jpg)  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/0/0b/Img\\_041538\\_mating\\_anax\\_junius.jpg/220px-Img\\_041538\\_mating\\_anax\\_junius.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/0/0b/Img_041538_mating_anax_junius.jpg/220px-Img_041538_mating_anax_junius.jpg) visit:2015.06.18

4. 12. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bd/Musca\\_domestica\\_eating\\_sugar.jpg/120px-Musca\\_domestica\\_eating\\_sugar.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bd/Musca_domestica_eating_sugar.jpg/120px-Musca_domestica_eating_sugar.jpg) visit: 2015.06.18

4.15. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Rubythroathummer65.jpg>

visit:2015.06.18

4. 18. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ee/Morpho\\_didius\\_Male\\_Dos\\_MHNT.jpg/800px-Morpho\\_didius\\_Male\\_Dos\\_MHNT.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ee/Morpho_didius_Male_Dos_MHNT.jpg/800px-Morpho_didius_Male_Dos_MHNT.jpg) visit: 2015.06.18

4.24. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/db/Eastern\\_Indigo\\_Snake.jpg/220px-Eastern\\_Indigo\\_Snake.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/db/Eastern_Indigo_Snake.jpg/220px-Eastern_Indigo_Snake.jpg) visit: 2015.06.18

## 5. fejezet

### 5.1 ábra

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/Welwitschia.jpg> visit: 2015.06.13

### 5.2. ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a8/Adansonia\\_grandidieri04.jpg/640px-Adansonia\\_grandidieri04.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a8/Adansonia_grandidieri04.jpg/640px-Adansonia_grandidieri04.jpg) visit: 13.06.2015

### 5.3. ábra

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/65/Ferocactus1.jpg/640px-Ferocactus1.jpg> visit: 13.06.2015

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c3/Saguaro3.jpg/640px-Saguaro3.jpg> visit:2015.06.22

### 5.4. ábra

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/09/Baobab\\_and\\_elephant%2C\\_Tanzania.jpg/1024px-Baobab\\_and\\_elephant%2C\\_Tanzania.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/09/Baobab_and_elephant%2C_Tanzania.jpg/1024px-Baobab_and_elephant%2C_Tanzania.jpg) visit:2015.06.13

### 5.5. ábra

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/af/Csalfa\\_Sommer\\_07\\_10\\_A.jpg/800px-Csalfa\\_Sommer\\_07\\_10\\_A.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/af/Csalfa_Sommer_07_10_A.jpg/800px-Csalfa_Sommer_07_10_A.jpg) visit: 2015.06.13

### 5.6 ábra

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/48/Onymacris\\_unguicularis\\_MHNT.jpg/800px-Onymacris\\_unguicularis\\_MHNT.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/48/Onymacris_unguicularis_MHNT.jpg/800px-Onymacris_unguicularis_MHNT.jpg) visit: 2015.07.01

### 5.7. ábra

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/07.\\_Camel\\_Profile%2C\\_near\\_Silverton%2C\\_NSW%2C\\_07.07.2007.jpg/640px07.\\_Camel\\_Profile%2C\\_near\\_Silverton%2C\\_NSW%2C\\_07.07.2007.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/07._Camel_Profile%2C_near_Silverton%2C_NSW%2C_07.07.2007.jpg/640px07._Camel_Profile%2C_near_Silverton%2C_NSW%2C_07.07.2007.jpg) Visit: 2015.06.13

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/Dromedar\\_Kopf.jpg/800px-Dromedar\\_Kopf.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/Dromedar_Kopf.jpg/800px-Dromedar_Kopf.jpg) visit: 2015.06.13

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Camel\\_portrait.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Camel_portrait.jpg) visit:2015.06.19

### 5.8. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Kangaroo-rat.jpg> visit:2015.06.19

### 5.9. ábra

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Polarfuchscele4.jpg/1024px-Polarfuchscele4.jpg> visit: 2015.06.13

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/R%C3%B8d\\_r%C3%A6v\\_%28Vulpes\\_vulpes%29.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/R%C3%B8d_r%C3%A6v_%28Vulpes_vulpes%29.jpg) visit: 2015.06.13

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Nemui\\_kitune.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Nemui_kitune.jpg) visit: 2015.06.13

5.11. ábra

A Magyar Tudományos Afrika–Expedíció, Teleki Centenárium, 1988, Varga József és Lerner János felvételei

5.14. ábra

A Magyar Tudományos Afrika–Expedíció, Teleki Centenárium, 1988 Varga József és Lerner János felvételei

5.16. ábra

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Icefishuk.jpg/220px-Icefishuk.jpg> visit: 2015.06.14