



FÓKUSZ

Egri Ádám – Dr. habil Horváth Gábor – Dr. Radnóti Katalin

Beégetik-e napsütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek?

Egy közismert biooptikai probléma fizikus szemmel

Tikkünk elején egy újszerű oktatási módszert vázolunk fel, majd rögtön az alkalmazási lehetőségeket is szemléltetjük a címben szereplő példa segítségével.

Kutatás alapú tanulás/tanítás

Több országban elterjedt gyakorlat a természettudományos nevelés, mint kutatás, illetve a kutatás alapú természettudomány-tanítás koncepciója, amelynek lényege, hogy a kutatás képezi a természettudományos nevelés alapját, irányítja a tanulói tevékenységek megszervezésének és kiválasztásának alapelveit (Molnár 2006, Nagy 2010). A kutatás alapú tanulás/tanítás, rövidítve KAT (angolul *Inquiry-Based Learning*, IBL) olyan módszer, amely biztosítja, hogy a tanulók átéljék a tudásalkotás folyamatait. A módszer fő jellegzetessége, hogy a diákok végezzenek kutatással kapcsolatos, illetve kutatás jellegű tevékenységeket a természettudomány tanulása során, mint:

- problémák keresése, kutatásra érdemes kérdések megfogalmazása,
- hipotézisek megfogalmazása,
- különböző alternatív magyarázatok megalkotása és elemzése,
- kutatások tervezése, vezetése,

- megfelelő eszközök és technikák használata az adatok gyűjtéséhez,
- az adatok elemzése,
- a természettudományos érvek/indokok közlése.

Azonban le kell szögeznünk, hogy a kutatáson alapuló oktatási módszer sem csodaszer a természettudományos oktatás valamennyi problémájának megoldására, noha nagyon hatékony, fejleszti a tanulók tartalmi tudását és készségeit, képességeit egyaránt. A tanuló aktívan vesz részt a tanulási folyamatban, saját tudása megkonstruálásában, miközben használja a problémamegoldó képességeit is a kutatás során. A vizsgálandó probléma sokféle lehet:

- Egy **aktuális esemény**, például valamilyen környezeti katasztrófa, környezetszennyezés vagy ipari baleset: tornádó, földrengés, olajömlés, nukleáris erőmű balesete, vörösiszapömlés, a Tisza vizének cián-szennyezése stb. E problémák fölvetése történhet úgy, hogy a témáról megjelent cikket, riportot, ismeretterjesztő filmet elemezzük a tanulókkal.
- Egy **olyan jelenség, ami mellett sokszor elmentünk anélkül, hogy fölfigyeltünk volna rá** és kerestük volna a magyarázatát. A problémát fölvetetik a tanulók, de a tanár is felhívhatja a figyelmet egy olyan hétközna-

pi jelenségre, aminek magyarázata érdekes tudományos tanulságokkal szolgálhat.

- Egy **új kutatási eredmény**: ha végigkövetik azt az utat, mely a fölfedezéshez vezetett, a tanulók a megismerési folyamat fontos lépéseit ismerhetik meg, a probléma megfogalmazásától a tudományos publikáció elkészítéséig.
- Egy **olyan létesítmény** – például egy szeméttégető vagy egy erőmű – építése, üzemeltetése, **amelynek környezeti hatásai is lehetnek**.
- Egy **olyan jelenség, melyről azt hisszük, hogy ismerjük a magyarázatát is**, valójában mégis érdemes utánajárni a kérdésnek. Cikkünkben erre mutatunk egy biooptikai példát.

A tanár fontos szerepe, hogy keltse föl és/vagy tartsa fenn a tanulók kíváncsiságát:

- Gyűjtsék össze a tanulókkal együtt, hogy miért érdekes vagy fontos a kiválasztott probléma!
- Fogalmazzák meg a tanulókkal együtt a kérdéseket, melyekre választ keresnek! Gyűjtsék össze, hogy milyen előzetes ismeretük van a tanulóknak a témával kapcsolatban!
- Bővítsék ismereteiket a szükséges mértékben!
- Beszéljék meg a probléma tudományos hátterét!
- Beszéljék meg az esemény/jelenség helyi és globális környezeti hatásait.
- Fogalmazzák meg előzetes elképzeléseiket, hipotéziseiket a jelenség okára, következményére és a megoldásra vonatkozóan.!
- Készítsenek részletes kutatási tervet!
- Határozzák meg, hogy milyen helyszíneken kell az egyes munkafázisokat végrehajtani:
 - o külső helyszín, ahol a jelenség közvetlenül megfigyelhető, anyagminták vehetők, mérések végezhető, kutatókkal lehet találkozni, akikkel riportok, fölmérések készíthetők;
 - o iskola, ahol kísérletek, mérések végezhetők, illetve a további lépések tehetőek meg.

A tanulók határozzák meg, hogy milyen eszközök, anyagok szükségesek a feladat elvégzéséhez! Végezzék el a megfigyeléseket, kísérlete-

ket, írásban rögzítsék a tapasztalataikat! Ha lehetséges, akkor külső helyszínen is végezzenek megfigyeléseket, méréseket, beszéljenek az ott élő, ott dolgozó emberekkel! Ha méréseket végeznek, azokat legalább kétszer ismételjék meg, de ha egymásnak ellentmondó adatokat kapnak, akkor még további mérések szükségesek. Igen fontos a fegyelmezett munkavégzés és a balesetvédelmi szabályok betartása – ezek ismertetése és a szükséges védőfelszerelések biztosítása tanári feladat. A tanulók további feladatai lehetnek:

- A megfigyelésekről készítsenek fényképeket, rajzokat!
- Alkossanak modelleket!
- Rendszerezék a frissen szerzett ismereteket! Döntsék el, hogy melyek azon megfigyelések és adatok, melyek a fölvetett probléma szempontjából fontosak és melyek azok, amelyek elhanyagolhatók!
- Ábrázolják grafikonon a mérési eredményeket! Állapítsák meg az egyes mennyiségek közötti matematikai összefüggést, amennyiben az lehetséges!
- Vonják le a következtetéseket! Találják meg az ok-okozati összefüggést! Mérlegeteljék a következményeket! Vessék össze az eredményeiket az előzetes elképzeléseikkel!

Ha nem meggyőzőek az eredmények, akkor gondolják végig, hogy vajon az előzetes elképzelések voltak-e helytelenek, a mérés során követtek-e el hibát, vagy hol hagytak figyelmen kívül valamilyen fontos tényezőt. Előbbi esetben módosítani kell az előzetesen felállított elméletet, utóbbi esetben pedig meg kell ismételni, vagy módosítani kell a kísérleteket, méréseket. A tanár hívja fel a tanulók figyelmét arra, hogy a kutatók is ezt az utat járják végig. Hasonlítsák össze az eredményeiket másokéval! Ha ugyanazt a jelenséget vizsgálták, ugyanolyan eredményeket kell kapniuk. Fontos a tanulókkal megértetni, hogy a természettudományok jellemzője a térbeli és időbeli megismételhetőség, tehát ha két kutató ugyanazt ugyanolyan körülmények

között méri meg, akkor ugyanazt az eredményt kell kapniuk, hiába történtek a mérések különböző helyen és időben.

A feladat befejezéseként a tanulók készítsenek posztert vagy kiselőadást! Ha helyi problémával foglalkoztak, akkor érdemes a helyi újságban, rádióban, TV-ben is közzétenni az eredményeiket, ez is inspiráló tényező lehet a tanulók számára.

Szabad-e déli napsütésben a növényeket locsolni?

Széles körben elterjedt vélekedés a kertészetben és növényvédelemben, hogy a növényeket délben, tűző napon nem szabad locsolni, mert a rájuk tapadt vízcseppek megégethetik a leveleket azáltal, hogy a levélfelületre fókuszálják a napfényt. A növények felületén ülő vízcseppek fényfókuszálását részleteiben csak nemrégiben tanulmányozták magyar kutatók és oktatók (Egri és társai 2010a,b, Horváth és társai 2010, Stonawski és társai 2011), ezért valószínűleg érdekes kutatási probléma lehet tanulók számára is.

Első feladatként érdemes a diákokkal utánanézni, hogy a szóban forgó kérdésről milyen vélemények találhatóak a Világhálón a kertészeti, erdészeti és növényvédelmi honlapokon.

Azt fogják tapasztalni, hogy e honlapok közel 80%-a tartja úgy, hogy a napsütötte vízcseppek megégethetik az alattuk lévő leveleket. E biooptikai probléma az (alap-, közép- és felsőfokú) oktatásban is gyakran előfordul. Példaként idézzük a 2006. május 15-i gimnáziumi fizika érettségi feladatsor egyik feladatát, amit az Oktatási Minisztérium adott ki:

Nyáron, déli napsütésben nem ajánlatos a kertben locsolni, mert „megégnék” a növények levelei. Az alábbi magyarázatok közül csak egy fogadható el, melyik?

- A gyorsan párolgó víz hirtelen lehűti a növényt. A fagyás tünetei megegyeznek az égésével.
- A vízcseppek gyűjtőlencseként viselkednek, és a levelekre fókuszálják a napfényt.

c) Az elpárolgó víz forró gőze okoz „égési tüneteket”.

A válaszok közül a b-t fogadták el helyesnek. Mindebből jól látszik, hogy sok laikus és szakember is úgy gondolja: öntözés vagy eső után a vízcseppek mindig képesek megégetni a leveleket napsütésben. Kérdésünk annak kiderítése, hogy ez ténylegesen így van-e? Valójában ez egy régi környezetoptikai probléma, aminek megoldása nem egyszerű. Cikkünkben az ezzel kapcsolatos fizikai/optikai jelenség egy lehetséges tanulói feldolgozását mutatjuk be. E problémának fizikai és biológiai vonatkozásai is vannak, ezért *A Biológia Tanítása* 2013. márciusi számában a téma biológiai vetületeit mutatjuk be.

A kutatási kérdés megfogalmazása és modellezése

Elő lépésként pontosítsuk a kérdést, fogalmazzuk meg úgy a problémát, hogy azt ténylegesen vizsgálni lehessen az általános és középiskolában! A következő kérdések merülhetnek föl: (1) Milyen lehet egy vízcsepp alakja egy levélen? (2) Miért növekedhet meg a fényintenzitás a levél felületén annyira, hogy égési sérülést tudjon okozni? (3) Milyen fizikai jelenséggel állunk szemben?

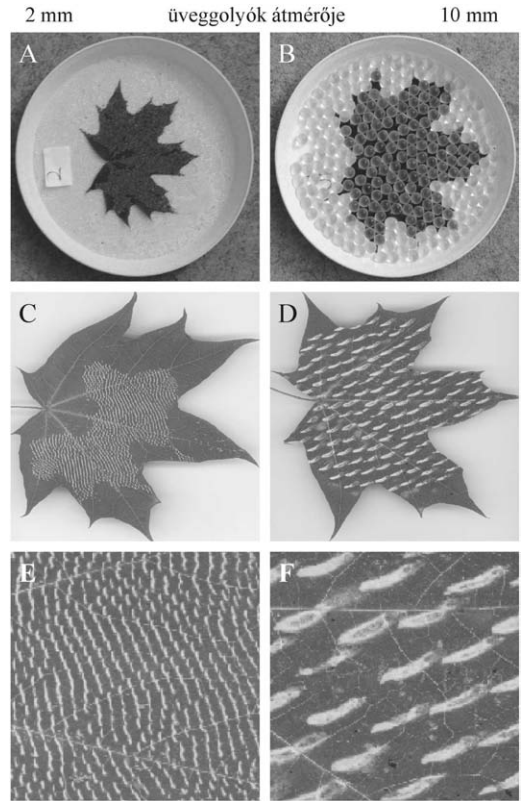
Első közelítésként egy víztaszító levélen ülő gömbölyded vízcsepp alakját modellezzük gömbbel. E vízgömbnek nincs pontos fókuszpontja, vagyis nem egyetlen pontba gyűjti a rá eső napfényt, optikai nyelven szólva gömbi hibával rendelkezik. Ugyanakkor a mindennapi tapasztalatunk szerint létezik egy fókusztartománya, ahol a legnagyobb a fényintenzitás a lencsehatás, azaz a fénytörés okozta fénygyűjés miatt. A tanulókkal végeztessük el a következő kísérletet:

1. kísérlet: Felhőtlen, napos időben tegyünk két műanyag tálcába egy-egy frissen vágott, sima felszínű levelet (például juhar, Acer platanoides levelét). A tálcákbeli leveleket fedjük le például 2 mm, illetve 10 mm átmérőjű

üveggolyókkal¹ (1A, B ábra). A tálcákbeli, üveggolyókkal fedett leveleket tegyük ki közvetlen napsütésnek bizonyos ideig. A besugárzási idő lehet egy változó paraméter, de negyedóránál ne legyen kevesebb. Ugyancsak változó paraméter lehet a Nap horizont fölötti θ szögmagassága. Ügyeljünk arra, hogy a napbesugárzás alatt ne essen árnyék a levelekre! A kísérlet után a leveleket vegyük ki az üveggolyók alól, s nézzük meg szabad szemmel vagy üvegnagyítóval a felszínüket!

Azt fogjuk tapasztalni, hogy a levelek nagymértékben beégtek az üveggolyók által összegyűjtött napfény nagy intenzitása miatt. E napégés következtében a zöld leveleken sárgás-barna foltok jelentek meg rácsszerű elrendezésben, az üveggolyók eredeti elhelyezkedésének megfelelően (1C-F ábra). Végezzük el e kísérletet a tanulókkal a Nap alacsony, közepes és nagy θ szögmagasságai mellett felhőtlen időben! Határozzák meg a diákok a levelek napégéséhez szükséges legrövidebb időt a θ napállás függvényében! Magyarországon 67° -nál nem nagyobb a napmagasság még nyáron sem. E kísérletekből az a következtetés vonható le, hogy vízszintes leveleken elhelyezkedő, $n_{\text{üveg}} = 1,5$ törésmutatójú üveggolyók reggeltől késő délutánig képesek napégési sérüléseket okozni a levél-szövetben. Az üveggolyók és a gömb alakú vízcseppek fénygyűjtését a következő egyszerű kísérletben (2. ábra) modellezhetjük:

2. kísérlet: Egy vékony falú, R sugarú, vízzel töltött, színtelen, átlátszó, műanyag gömböt² függesztünk föl dróttal vagy spárgával. E vízgömböt fehér párhuzamos fénynyalábbal világítsuk meg, amit egy R -nél nem kisebb átmérőjű gyűjtőlencsével és annak fókuszpontjában elhelyezkedő pontszerű fényforrással állíthatunk elő. A fényforrás-lencse-vízgömb rendszer optikai tengelyébe helyezzünk egy keretben kifesztített pauszpapír ernyőt. Az ernyő és a víz-



1. ábra

(A, B) Az 1. kísérletben használt tálcák, melyekben 2 mm (A), illetve 10 mm (B) átmérőjű üveggolyók fedték a juharlevelet (*Acer platanoides*). (C, D) Napégést szenvedett juharlevelek, melyeket 2, illetve 10 mm átmérőjű üveggolyók borítottak a közvetlen napfényvel történt besugárzás alatt. Az üveggolyók által fókuszált napfény nagy intenzitása miatt kialakult világos perzselési foltok jól kivehetők a sötétebb leveleken. (E, F) A C és D ábrák 4-szeres nagyításban.

gömb középpontja közti H távolság, valamint az optikai tengely és az ernyő síkjának szöge legyen változtatható. A vízgömb által az ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatát besötétített szobában fényképezzük le (3. ábra).

¹ Üveggolyók például barkács és dekorációs boltokban szerezhetők be. Üveggöngyök nem jók, mert bennük egy furat van a felfűzhetőség érdekében, vagyis optikailag nem homogének, így nem lehetnek a vízcseppek jó modelljei.

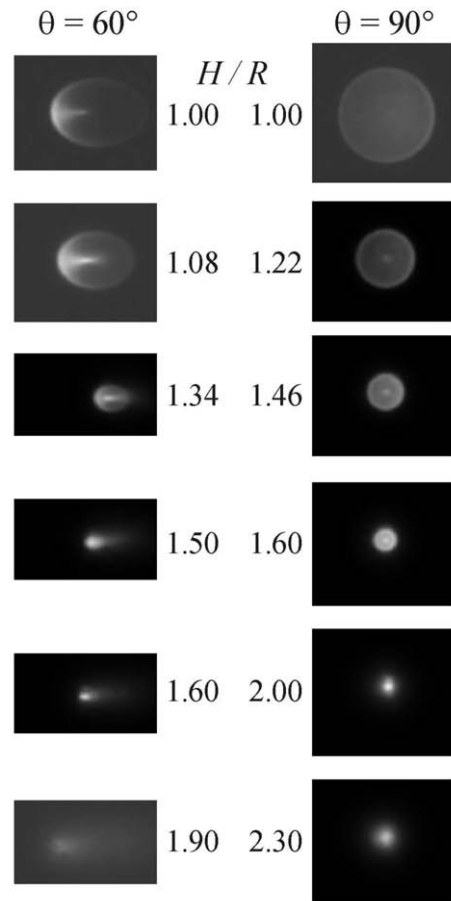
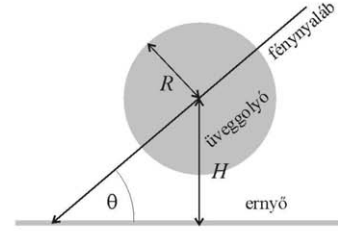
² Vékony falú, színtelen, átlátszó, műanyag gömböt például dekorációs boltokban vehetünk.

Habár a tanulók még nem képesek bonyolultabb számítógépes modellezést végezni, de el tudják fogadni, hogy ez megtehető, miáltal pontosan kiszámítható az 1. kísérletben a levélfelszínen a fényintenzitás kétdimenziós eloszlása. Ezt magyar fizikusok (Egri és társai, 2010a,b, Horváth és társai 2010) el is végezték a fénysugarak számítógépes sugárkövetésével. Ennek során a Snellius-Descartes-féle fénytörési törvényt alkalmazták, amikor az üveggolyó bármely adott pontján belépett a napfény, majd egy megfelelő másik pontján kilépett az üvegből, s végül elérte a levél vízszintes felületét (4. ábra). Az eredményt az 5A ábra mutatja, melyen az üveggolyó Q fénygyűjtőképességének a levélfelszíni eloszlása látható a beeső napfény vízszintestől mért θ szögének függvényében. Q értéke megadja, hogy a levél adott pontjában mennyivel nagyobb vagy kisebb a fényintenzitás az üveggolyó fénytörése hatására a golyómentes helyzethez képest.

Ez után a tanulók mondják el, hogy mik olvashatók le az 5A ábráról: a vízszintes levél síkjában a legnagyobb Q -értékekkel jellemzett fókusztartomány a leginkább veszélyeztetett a napégés szempontjából. E fókusztartomány megközelítőleg egy ellipszis. Az 1C-F ábra napégésnyomait ilyen magas fényintenzitású, ellipszisszerű fókusztartomány okozta, amint vé-

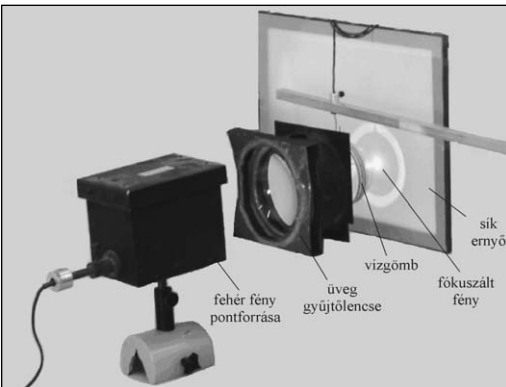
gighaladt a levél egy szakaszán a Nap mozgása következtében.

Vegyük figyelembe a napsugárzásnak a Nap θ szögmagasságától függő spektrumát, azaz a



3. ábra

Egy R sugarú vízgömb által, a gömb középpontjától H távolságra lévő és az optikai tengellyel θ szöget bezáró sík ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatának fényképei $\theta = 60^\circ$ és 90° esetén H/R függvényében

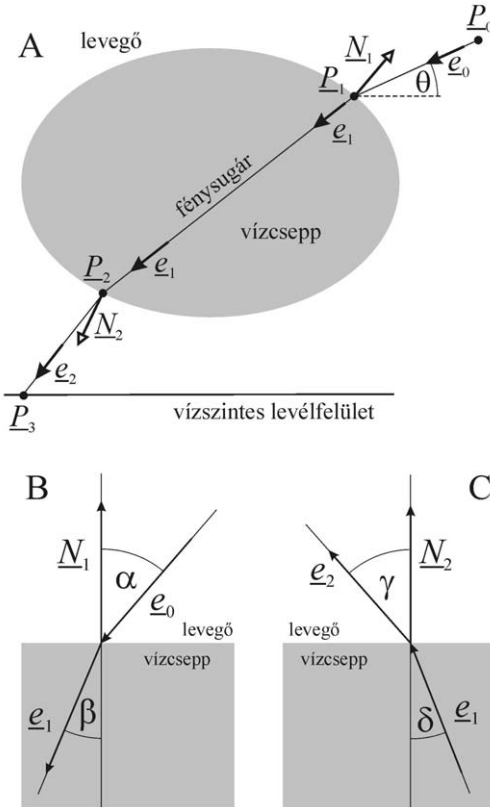


2. ábra

A 2. kísérlet elrendezése, melyben egy vízgömbnek egy sík pauszpapír ernyőre történő fényfókuszálása vizsgálható és fényképezhető

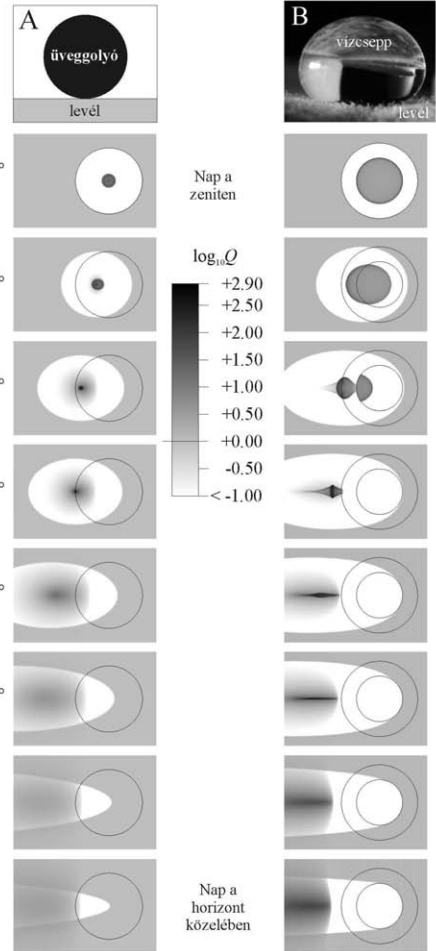
napfény $I_{\text{Nap}}(\lambda, \theta)$ intenzitását a λ hullámhossz függvényében (6A ábra), valamint, hogy ebből mennyit nyel el a levelek zöld növényi szövete a rájuk jellemző elnyelési spektrum (hullámhossztól függő elnyelési együttható, ami 1, ha mindent elnyel a levél, és 0, ha semmit sem nyel el) miatt (6B ábra)! Ekkor szintén kiszámíthatók egy üveggolyó által fókuszált s a levélszövet által elnyelt $I(\theta)$ napfényintenzitás levélsíkbeli ma-

ximumértékei a beeső napfény horizonttól mért θ szögmagasságának függvényében (7. ábra). A 6A ábráról a diákok például olvashatják, hogy amint csökken a Nap θ szögmagassága,



4. ábra

(A) A P_0 kiindulási pontból a P_3 végpontba haladó fénysugár útja a P_1 és P_2 törési pontokon keresztül. $\underline{e}_0, \underline{e}_1, \underline{e}_2$: a fénysugár irányának egységvektorai, $\underline{N}_1, \underline{N}_2$: a vízcsepp felületéhez húzható érintősíkok felületére merőleges vektorok, a beesési merőlegesek. (B, C) Egy vízcsepp felületére beeső, illetve ott megtört fénysugarak α, δ beesési szögei, β, γ törési szögei, és a fénysugarak irányának $\underline{e}_0, \underline{e}_1, \underline{e}_2$ egységvektorai, továbbá a csepp felszínének $\underline{N}_1, \underline{N}_2$ normálvektorai, mikor a fény a levegőből a vízbe lép (B), illetve a vízből a levegőbe (C).



5. ábra

(A) Egy $n_{\text{üveg}} = 1,5$ törésmutatójú homogén üveggolyóra a vízszinteshez képest különböző θ szögekben beeső fénnyalábok esetén a golyó Q fénygyűjtő képessége 10-es alapú logaritmusának levélsíkbeli eloszlása. Felülről nézve az üveggolyó kontúrvonalát egy fekete kör jelzi. (B) Mint az (A), de most egy vízszintes, víz-taszító berkenyelevélen (*Sorbus aucuparia*) ülő gömbölyded vízcseppre, ahol a vízcsepp és a levél érintkezési felületének kerületét a belső a külső kör mutatja.

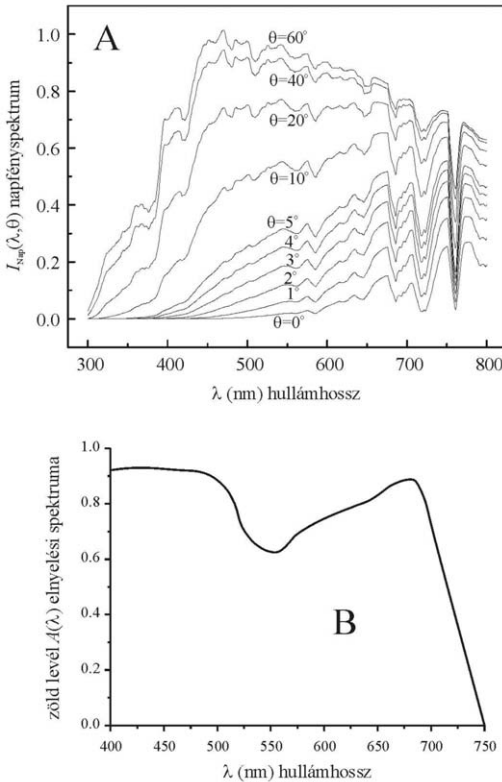
úgy csökken a napfény intenzitása is, aminek maximuma a vörös hullámhosszak felé tolódik el. E közismert jelenség a lemenő Nap narancssárgává, majd vörössé történő elszíneződésében nyilvánul meg. A 6B ábráról a tanulók leolvashatják, hogy a napfény látható spektrumából ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) a zöld levelek a zöld fényt ($520 \text{ nm} < \lambda < 580 \text{ nm}$) nyelik el legkevésbé, vagyis azt szórják vissza, illetve azt eresztik át leginkább, s éppen ezért látszanak zöldnek az emberi szem számára.

A 7. ábra a következőkről tájékoztatja a tanulókat: a vízszintes levélen nyugvó üveggolyó által fókuszált s a levélszövet által elnyelt $I(\theta)$ fényintenzitás $\theta = 45^\circ$ -os napmagasságnál ma-

ximális, ezért a napégés e napállásnál a legvalószínűbb. Ekkor az üveggolyó fókuszirtományának levéllemezre eső részén a levélre 708-szor nagyobb intenzitású napfény jut, mint mikor nincs üveggolyó a levélen. Az 1. kísérletben a fényintenzitás fókuszirtománybeli több, mint meghétszázszorozódása okozta tehát a juharlevelek napégését (1. ábra).

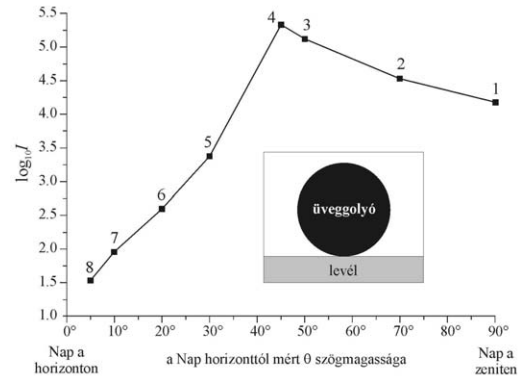
Vízcseppek fénygyűjtése és az ebből levonható következtetések

A főnti modellkísérlet alkalmas arra, hogy megértesse a diákokkal a levelekre kerülő üveggolyók fénygyűjtését és az ezzel kapcsolatos fizikai fogalmakat. A kísérlet és a számítógépes modellezés alapján elmondható, hogy az üveggolyók képesek annyi napfényt összegyűjteni a vízszintes levélfelületre eső fókuszirtományukban, ami már beégeti a levelet. De az üveggolyók a tökéletes gömb alakjuk és a vízénél nagyobb, $n_{\text{üveg}} = 1,5$ törésmutatójuk miatt mégsem pontos modelljei a leveleken ülő vízcseppeknek. Az utóbbiak a gömbnél laposabban, törésmutatójuk pedig $n_{\text{víz}} = 1,33$ körüli.



6. ábra

(A) A napfény $I_{\text{Nap}}(\lambda, \theta)$ spektruma a Nap horizonttól mért $\theta = 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 4^\circ, 3^\circ, 2^\circ, 1^\circ$ és 0° szögmagasságai mellett az 1976-USA normál légkörmodell alapján számítva.
(B) Zöld növényi levél $A(\lambda)$ elnyelési spektruma.



7. ábra

Egy üveggolyó által fókuszált, a levélszövet által elnyelt $I(\theta)$ napfényintenzitás 10-es alapú logaritmusának levélsíkbeli maximumértékei a beeső napfény horizonttól mért θ szögmagasságának függvényében. Az 5B ábra 1., 2., ... 7., 8. soraihoz tartozó adatokat fekete négyzetek jelölik.

E két különbség azt eredményezi, hogy a vízcseppeknek jóval kisebb a $k = (n - 1)/R$ fénytörőereje, ahol n a csepp törésmutatója, R pedig a csepp adott pontján a helyi görbületi sugár. E kisebb törőerő okán egy vízcseppnek a hozzá méretben hasonló üveggolyóéhoz képest jóval nagyobb a fókusz távolsága, miáltal a vízcsepp alatti vízszintes levélfelszínen (ami általában nem a fókuszban van) kisebb a fényintenzitás maximuma. Ebből kifolyólag már nem biztos, hogy a vízcseppek által összegyűjtött napfény képes égési sérülést okozni a levélszövetben.

Második feladatként kideríttethetjük a tanulókkal, hogy milyen alakú vízcseppek formálódhatnak vízszintes leveleken a levélfelszín víztaszító, illetve víznedvesítő képességétől függően. A diákokkal különböző leveleket gyűjtünk az iskola udvarán vagy környékén. Az összegyűjtött leveleket vízszintes kartonlapra ragasztják ragasztószalaggal a levelek szélénél, majd szemcseppentővel vízcseppeket csöppentenek rájuk. Ennek során beláttatjuk a tanulókkal, hogy amint nő a levélfelszín víztaszító képessége (vagyis nő a nedvesítési/kontakt szög), úgy egyre gömbölydedebb lesz a rajta ülő vízcsepp. Továbbá, a vízcsepp térfogatának növekedésével egyre laposabb lesz a cseppalak.

Harmadik feladatként megbecsülthetjük a tanulókkal a különböző alakú vízcseppek $k = (n - 1)/R$ fénytörőerejét: laposabb vízcseppnek nagyobb az R görbületi sugara, vagyis kisebb a k törőereje, míg gömbölydedebb cseppnek kisebb a görbületi sugara, azaz nagyobb a törőereje. Ezáltal a laposabb cseppnek nagyobb a fókusz távolsága, mint a gömbölydedebbek. Így más napmagasságoknál eshet az eltérő alakú vízcseppek fókusz tartománya az alattuk lévő vízszintes levélre. Ennek az a végkövetkezménye, hogy a különböző alakú vízcseppek más napszakban, azaz más napmagasságnál lehetnek képesek napégést okozni a napsütötte leveleken.

A fentieknél több nem következtethető ki a fizikai/optikai megfontolásokból. A szóban forgó biooptikai probléma további vizsgálata kí-

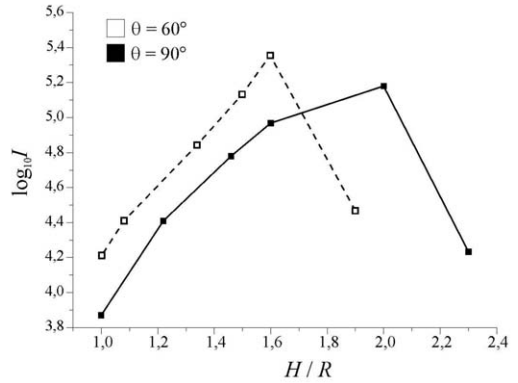
sérletileg történhet vagy pedig számítógépes modellezéssel. A kísérleti megközelítést részletesen ismertetjük *A Biológia Tanítása* 2013. márciusi számában megjelenő párhuzamos cikkünkben (Horváth és társai, 2013). Itt a továbbiakban a számítógépes modellezésből levonható fizikai következtetésekkel foglalkozunk.

Az *5B* ábra egy vízszintes, víztaszító berkenyelevélen (*Sorbus aucuparia*) ülő gömbölyded vízcsepre különböző szögekben beeső fénynyalábok esetén a vízcsepp Q fénygyűjtő képességének levélsíkbeli eloszlását mutatja. E csepp gömbölyded a nagy nedvesítési szög ($\alpha \approx 145^\circ$) miatt, miáltal erősen megtöri és összegyűjti a napfényt. Az *5B* ábra elemzése után a diákok a következőket láthatják: a levélen a gyűrűszerű árnyékos terület $\theta > 50^\circ$ napmagasság esetén jelenik meg, míg ha $\theta < 40^\circ$, akkor az anti-Nap felé elnyúlik. Mikor $\theta > 50^\circ$, az árnyék jelentős része a csepp és a levél érintkezési körén belülre esik, míg ha $\theta < 40^\circ$, akkor az árnyék fokozatosan kikerül e körből. $\theta < 23^\circ$ mellett az érintkezési kör teljesen árnyékban van, és a rajta kívüli árnyékos rész jelentősen megnyúlik az anti-Nap irányában. A levélen a fókusz tartomány ovális, ha $\theta > 50^\circ$. A fókusz tartomány $\theta \approx 30^\circ$ -nál nyolcas alakot vesz föl, melynek maximális fényintenzitású része sarló alakú. $\theta \approx 23^\circ$ esetén a sarló alakú fókusz tartomány merőleges az antiszoláris meridiánra, míg ha $\theta < 16^\circ$, akkor a fókusz tartomány egy elnyújtott ellipszis, melynek nagytengelye párhuzamos az antiszoláris meridiánnal. Ha $\theta > 50^\circ$, akkor a fókusz tartomány nagy része a levéllemez és a vízcsepp érintkezési körén belül van, azaz a vízcsepp hűti a levelet. Viszont $\theta < 40^\circ$ mellett a fókusz tartomány kiesik e körből, és ezért a csepp nem hűti a levél legintenzívebb fényt kapó tartományát. Mindemellett a napmagasság e szög tartományában éri a levelet a legnagyobb fényintenzitás, ezért nagyban megnő a beégés esélye.

A számítógépes modellezéssel kapott *8. ábra* a levélszövet által elnyelt I intenzitást mutatja

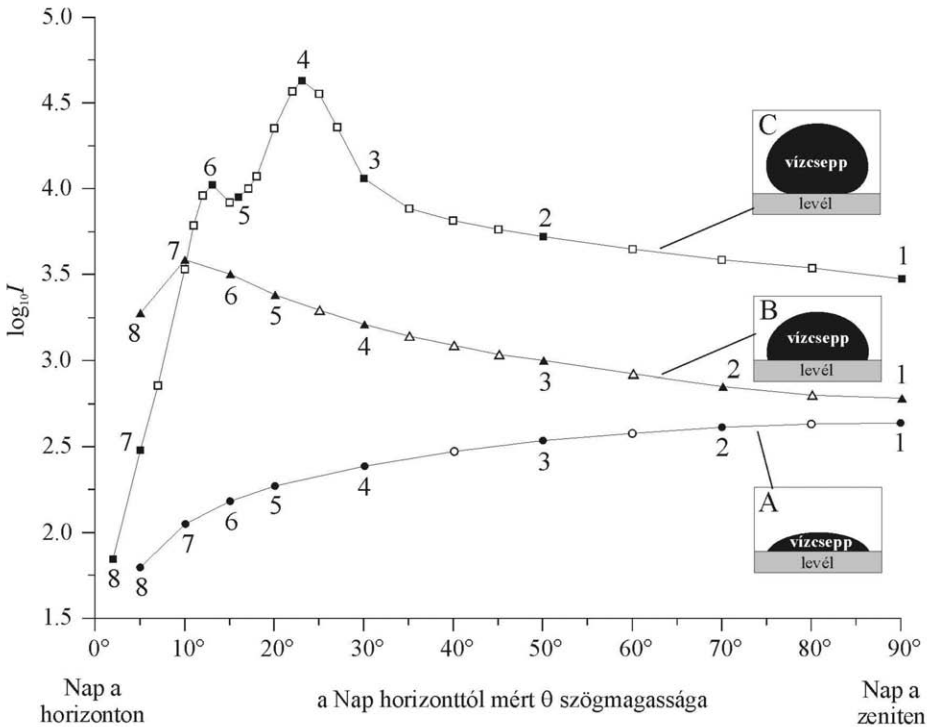
a 2. kísérlet (2. ábra) H/R értékeinek függvényében $\theta = 60^\circ$ és 90° mellett. I akkor maximális, ha a levél síkja a vízgömb fókuszterületét metszi ($H/R = 1.6$ és 2.0 , mikor $\theta = 60^\circ$ és 90°). Ekkor $\log_{10} I$ elérheti az 5-nél is nagyobb értékeket a bejövő fénynyaláb irányától függően. Ilyen erős fókuszálás akkor fordulhat elő, ha a vízcseppek egy szőrös levélen ülnek. Ekkor a szőrök megfelelő távolságban tarthatják a gömbölyded vízcseppeket a levél felszíne fölött ahhoz, hogy súlyos égési sérüléseket okozzanak, ahogyan azt *A Biológia Tanítása* 2013. márciusi számában megjelenő párhuzamos cikkünkben megmutatjuk (Horváth és társai, 2013).

Az ugyancsak számítógépes modellezéssel kapott 9. ábra egy zöld levél által elnyelt $I(\theta)$ napfényintenzitás levélsíkbeli maximumértékét



8. ábra

A 3. ábrabeli R sugarú vízgömbre számított $\log_{10} I$ értékek H/R függvényében $\theta = 60^\circ$ és 90° -ban beeső párhuzamos fénynyaláb esetén, ahol H az ernyő és a gömb középpontjának távolsága



9. ábra

Egy zöld levél által elnyelt $I(\theta)$ napfényintenzitás 10-es alapú logaritmusának levélsíkbeli maximumértéke a vízcsepp fókuszterületében egy vízszintes jubar- (A), platán- (B) és berkenyelevélen (C) ülő lapos (A), ellipszoid (B) és gömbölyded (C) vízcseppre számítva a beeső napfény vízszintestől mért szögének függvényében. Az 5B ábra 1., 2., ..., 7., 8. soraihoz tartozó adatokat itt fehér négyzetek jelölik a C cseppalak esetén

mutatja a vízcsepp fókusztartományában egy vízszintes juhar- (9A ábra), platán- (9B ábra) és berkenyelevélen (9C ábra) ülő lapos, ellipszoid és gömbölyded vízcseppekre számítva a beeső napfény horizonttól mért θ szögmagasságának függvényében. A 9. ábra elemzésével a diákok a következőkre juthatnak: a juharlevélen laposan elterülő vízcsepp esetében, amint a θ napmagasság nő, $I(\theta)$ monoton nő (9A ábra). Eszerint egy vízszintes juharlevelet a legnagyobb fényintenzitás délben éri, mikor a Nap magasan jár. E trend ellenkezője érvényes egy vízszintes platánlevélen ülő, félgömb alakú vízcseppekre (9B ábra). Naplementekor a félgömb alakú vízcseppet tartó platánlevélre (9B ábra) nagyjából 4,4-szer nagyobb intenzitású fény jut a vízcsepp fókusztartományában, mint a lapos vízcsepp esetén délben (9A ábra). Másrészt viszont a vízszintes berkenyelevélen levő gömbölyded vízcsepp esetében az $I(\theta)$ függvénynek két helyi maximuma van: az egyik $\theta = 13^\circ$ -nál, a másik pedig $\theta = 23^\circ$ -ál (9C ábra). $\theta = 13^\circ$ és 23° mellett e gömbölyded vízcseppeknek köszönhetően a levelet 63-szor és 200-szor nagyobb fényintenzitás éri, mint a lapos vízcsepp esetén (9A ábra).

E két intenzitásmaximum optikai oka a vízcsepp asztigmatizmusa, ami azt jelenti, hogy a nem pontosan gömb alakú vízcsepp két különálló fókusztartománnyal bír: Az első ($\theta_1 = 13^\circ$ -nál, a csepptől távolabbi) és a második ($\theta_2 = 23^\circ$ -nál, a csepphez közelebbi) fókusztartomány rendre a vízcsepp vízszintes és függőleges főtengelymetszetében haladó fénysugaraknak köszönhetően alakul ki. Ennek eredményeképpen az első és a második fókusztartomány az antiszoláris meridiánnal párhuzamosan, illetve arra merőlegesen elnyújtott. Mindez tisztán látszik az 5B/6 ($\theta_1 = 13^\circ$) és 5B/4 ($\theta_2 = 23^\circ$) ábrákon.

A 9. ábrán látszik, hogy egy adott θ -nál minél víztaszítóbb a vízszintes levél (minél nagyobb a nedvesítési szög), annál nagyobb

a rajta ülő vízcsepp felületének görbülete, és egyben a csepp fénygyűjtő képessége is (ha $\theta > 10^\circ$). Vagyis: minél vízlepergetőbb a levél, annál nagyobb annak a veszélye, hogy a levélen megtapadó vízcseppek a napfényt fókuszálva beégetik a növényt. Ugyanakkor minél víztaszítóbb egy levél, annál könnyebben lepereg róla a víz, tehát csökken a napégés veszélye. Az eddigiek alapján a tanulókkal a következőket láttathatjuk be:

(i) A napsütötte növényi leveleken jól megtapadó vízcseppeknek kicsi a görbületük, a fókusztartományuk mélyen a levéllemez alá esik, így vélhetőleg nem okoznak égési sérüléseket a leveleken.

(ii) Habár napsütésben a nagy fénytörő képességű gömbölyded vízcseppek fókusztartománya a napmagasság széles tartományában közel esik a levélfelülethez, s így talán még égési sérüléseket is okozhatnának a levélen, e vízcseppek könnyen leperegnek a levélről. Ezért várhatóan e gömbölyded vízcseppek sem okozhatnak napégést a leveleken.

(iii) A föntiek miatt a vízcseppek által fókuszált napfény többnyire nem képes beégetni a sima felületű leveleket, függetlenül a cseppek alakjától, méretétől és a napállástól.

(iv) Az egyetlen kivétel, mikor a vízcseppet víztaszító növényi szőrök tartják a levél felszíne fölött úgy, hogy a csepp fókusztartománya a levélre eshet. A *Biológia Tanítása* 2013. márciusi számában megjelenő párhuzamos cikkünkben (Horváth és társai, 2013) erre látható egy konkrét példa.

(v) Az a közkeletű vélekedés, hogy déli napsütésben nem szabad a növényeket öntözni, mert a leveleikre tapadt vízcseppek által fókuszált napfény megégeti a leveleket, részben egy tévhit, mítosz. A 9C ábra szerint a beégés veszélye $\theta \approx 23^\circ$ -os napmagasságnál, nyáron kora délelőtt vagy késő délután a legnagyobb, nem pedig délben, mikor maximális (Magyarországon nyár közepén délben $\theta_{\max} \approx 67^\circ$).

Más ellenérvek a déli öntözésre

Miután a tanulók számára nyilvánvalóvá vált a szóban forgó közhiedelem tarthatatlansága a fenti fizikai/optikai vizsgálatok alapján, alternatív érveket kereshetnek a déli locsolás nem ajánlatos voltára. Ezek például a következők:

- Megfontolandó, hogy a kertet azért nem érdemes délben locsolni, mert az akkor általában nyitott szirmú virágok tönkremehetnek, ha nagy vízcseppek ütődnek a szirmaikhoz.
- Ha délben, meleg, napsütéses időben öntözünk, akkor a növények nem képesek az összes kilocsolt vizet hasznosítani, mert a víz nagy része gyorsan elpárolog, s nem jut el a gyökerekhez.
- Délben és kora délután nem érdemes locsolni a növényeket, mert a helyi szelek ekkor a leg-erősebbek, s a víz párolgása is ekkor a leggyorsabb a nagy hőségben.
- Mivel a növénykárosító gombák (pl. liszthar- mat, monília) melegben jobban szaporodnak, mint alacsonyabb hőmérsékleten, a déli öntözés segítheti e gombák növekedését, azaz növelheti az öntözött növények gombás fertőző- dését.

Összegzés

Vizsgálataink alapján az mondható el, hogy a téma fölvezetésében említett népi hitet úgy látszik, hogy jórészt cáfoltuk. Írásunkban a kutatás alapú természettudományos oktatásra mutattunk egy biooptikai példát. Jelen írásunkban a téma fizika tantárgy körébe tartozó vetületeit jártuk körül, fölhasználva és elmélyítve a tanulók optikai ismereteit. *A Biológia Tanítása* 2013. márciusi számában megjelenő párhuzamos cikkünkben (Horváth és társai, 2013) a biológiai vonatkozások olvashatók.

Köszönetnyilvánítás: Köszönjük az angol és magyar cikkeink másik két társszerzőjének, Dr. Horváth Ákosnak (Leibniz Troposzférakuta- tató Intézet, Lipcse, Németország) és Dr. Kriska

Györgynek (ELTE Biológiai Intézet, Biológiai Szakmódszertani Csoport) a kutatási eredmé- nyeink elérésében nyújtott segítségüket. Hálá- sak vagyunk Dr. Gnädig Péternek (ELTE Atom- fizika Tanszék), aki fölhívta figyelmünket az itt tárgyalt biooptikai problémára.

Irodalom

- [1] Egri Ádám, Horváth Gábor, Horváth Ákos, Kriska György (2010a): Beégethetik-e napsü- tésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhitekkel terhes biooptikai probléma tisztázása. I. rész: Napfény forgásszimmetrikus vízcseppek általi fókuszálásának számítógépes vizsgálata. *Fizikai Szemle* 60: 1–10 + címlap
- [2] Egri, Á.; Horváth, Á.; Kriska, G.; Horváth, G. (2010b): Optics of sunlit water drops on leaves: Conditions under which sunburn is possible. *New Phytologist* 185: 979–987. + cover picture + electronic supplement
- [3] Horváth Gábor, Egri Ádám, Horváth Ákos, Kriska György (2010): Beégethetik-e napsü- tésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhitekkel terhes biooptikai probléma tisztázása. II. rész: Napfényes besugárzási kí- sérletek sima és szőrös leveleken ülő vízcsep- pekkel. *Fizikai Szemle* 60: 41–49. + színes borító 3. oldal
- [4] Horváth Gábor, Radnóti Katalin, Egri Ádám (2013): Szabad-e déli napsütésben a növé- nyek leveleit öntözni? Egy közismert bioop- tikai probléma biológus szemmel. *A Biológia Tanítása* 2013/március
- [5] Molnár Gyöngyvér (2006): *Tudástranszfer és komplex problémamegoldás*. Műszaki Kiadó, Budapest
- [6] Nagy Lászlóné (2010): A kutatás alapú tanu- lás/tanítás ('inquiry-based learning/teaching', IBL) és a természettudományok tanítása. *Is- kolakultúra* 2010 (1): 31–51.
- [7] Stonawski Tamás, Murguly Alexandra, Pátzay Richárd, Cérna László (2011): Folya- dékcsappes levelek napégése – Egy bioop- tikai diákkísérlet. *Fizikai Szemle* 61: 259–263.