

2. táblázat

Azon izotópok, amelyeken az ATOMKI-ban proton-, illetve alfa-indukált reakciók hatáskeresztmetszeteit mértük

proton-indukált reakciók	alfa-indukált reakciók
^{70}Ge , ^{76}Ge , ^{74}Se , ^{76}Se , ^{77}Se , ^{85}Rb , ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{106}Cd , ^{108}Cd	^{70}Ge , ^{106}Cd , ^{113}In , ^{144}Sm , ^{151}Eu , ^{169}Tm

jelentőségét mutatja, hogy az Európai Kutatási Tanács Starting Grant programja a kísérleti nukleáris asztrofizikai kutatások közül Európában jelenleg egyedülként a mi p-folyamattal kapcsolatos munkánkat támogatja (ERC StG No. 203175) [8].

Összefoglalás

A vasnál nehezebb elemek protongazdag izotópjainak szintézise az asztrofizikai p-folyamat, amely egyike az elemszintézis legkevésbé ismert folyamatainak. A p-folyamat modellszámítások nem képesek kellő pontossággal reprodukálni a p-izotópok természetben megfigyelt gyakoriságát, így a modellek jelentős pontosítás-

ra szorulnak. Jobban meg kell értenünk azokat az asztrofizikai körülményeket, amelyek között a folyamat lezajlik, valamint pontosítanunk kell a folyamatban részt vevő magreakciókra vonatkozó ismereteinket. Az ATOMKI kutatói ez utóbbi területen, konkrétan töltött részecskék által kiváltott magreakciók tanulmányozásával próbálnak hozzájárulni a folyamat részleteinek a tisztázásához.

Irodalom

1. Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése. Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
2. E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle: Synthesis of the elements in stars. *Reviews of Modern Physics* 29 (1957) 547.
3. S. E. Woosley, W. M. Howard: The p-process in supernovae. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 36 (1978) 285.
4. M. Arnould, S. Goriely: The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status. *Physics Reports* 384 (2003) 1.
5. Németh J.: Szupernóva-robbanás. *Fizikai Szemle* 47/5 (1997) 167.
6. Fényes T.: *Atommagfizika*. Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2005.
7. G. Gyürky et al.: α -induced cross sections of ^{106}Cd for the astrophysical p-process. *Physical Review C* 74 (2006) 025805.
8. a projekt honlapja: <http://namafia.atomki.hu/~gyurky/ERC/>

BEÉGETHETIK-E NAPSÜTÉSBN A LEVELEKET A RÁJUK TAPADT VÍZCSEPPEK? EGY TÉVHITEKKEL TERHES BIOOPTIKAI PROBLÉMA TISZTÁZÁSA

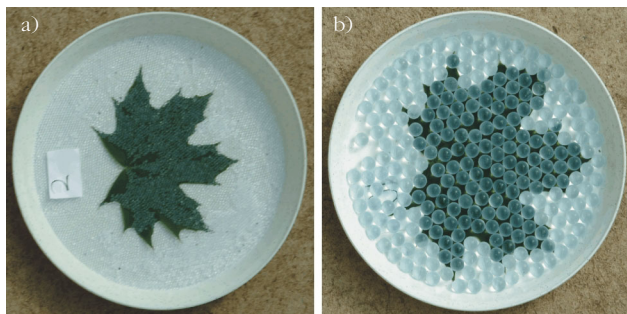
II. rész: Napfényes besugárzási kísérletek sima és szőrös leveleken ülő vízcseppekkel

Horváth Gábor, Egri Ádám – ELTE, Fizikai Intézet, Biológiai Fizika Tanszék
 Horváth Ákos – Max Planck Meteorológiai Intézet, Hamburg
 Kriska György – ELTE, Biológiai Intézet, Biológiai Szakmódszertani Csoport

A napsütötte növényi levelekhez tapadt vízcseppek által fókuszált napfény miatti levélégés mélyebb megértésének céljából kísérleteket végeztünk. Először demonstráltuk, hogy vízszintes juharleveleken (Acer platanoides) elhelyezkedő, 1,5 törésmutatójú, 2 és 10 mm közti átmérőjű üveggolyók napsütésben súlyos égési sérüléseket (barnulást) okoznak a levélszövetben. Utána megmutattuk, hogy páfrányfenyő (Ginkgo biloba) és juhar (Acer platanoides) vízszintes sima, többé-kevésbé víztaszító levelein ülő napsütötte vízcseppek nem képesek beégetni a levélszövetet. Ezáltal megcáfoltuk azt a régi közhiedelmet, miszerint eső vagy öntözés után mindig napégést szenvednek a növények a rájuk tapadt vízcseppek napfényfókuszáló hatása miatt. Ugyanakkor azt is megmutattuk, hogy napsütésben a rucaöröm (Salvinia natans) erősen víztaszító viaszszőrei által tartott vízcseppek megégethetik a levélszövetet. Vizsgálataink alapján azt a végkövetkeztetést vontuk le, hogy az az általános vélekedés, miszerint a növényekhez tapadt vízcseppek apró nagyítólecsékként összegyűjtve a napfényt mindig megégetik a leveleket, nem más, mint egy közkeletű tévhit.

Cikkünk I. részében [1] számítógépes sugárkövetéssel határoztuk meg a különféle vízszintes leveleken nyugvó forgásszimmetrikus vízcseppek által kialakított fényintenzitás eloszlását a levél síkjában a cseppalak és a napfény θ beesési szögének függvényében. Annak a kérdésnek a megválaszolása érdekében mo-

delleztük a vízszintes levélfelületen nyugvó vízcseppek napfényfókuszálását, hogy: szenvedhetnek-e a növények napégést eső vagy öntözés után, ha kisüt a nap? A téma szakirodalmának áttanulmányozásával megmutattuk, hogy a leggyakoribb válasz az „igen”, ami egy széles körben elterjedt hit, vélekedés. A víz-

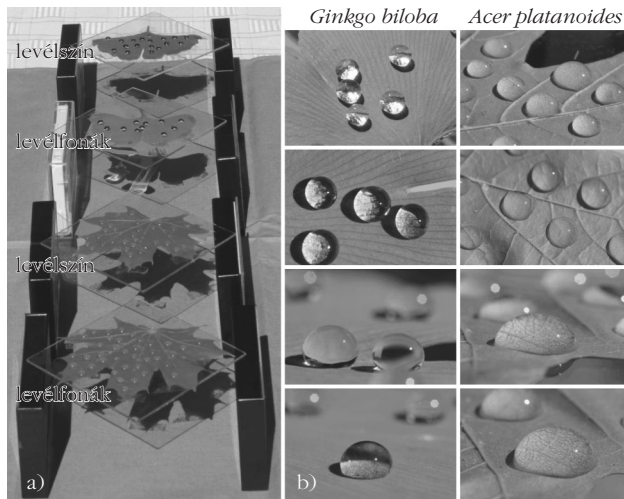


1. ábra. Az 1. kísérletben használt tálcák közül kettő, amelyekben 2 mm (a), illetve 10 mm (b) átmérőjű üveggolyók fedték a juharlevelet (*Acer platanoides*).

szintes levélen ülő vízcseppek által fókuszált napfény intenzitásmaximumát kiszámítva meghatároztuk azt a cseppalakot és azt a beesési szöget is, aminél a napégés veszélye a legvalószínűbb. Mivel az a legkisebb fényintenzitás, ami már sérülést okoz a levélszövetben, egyelőre ismeretlen, a fenti kérdés nem válaszolható meg csak számítógépes modellezéssel. Ezért kísérleteket végeztünk üveggolyókkal és vízcseppekkel borított, napsütésnek kitett, sima, illetve szőrös (különböző nedvesítőképességű) vízszintes levelekkel [2]. Cikkünk jelen, II. részében írjuk le a kísérleteket, mutatjuk be az eredményeinket, és vonjuk le a végkövetkeztetést.

Kísérleti módszerek

Az első kísérletet három napig végeztük felhőtlen, meleg, napos időben Gödön (47° 43' N, 19° 09' E) egy kertben. Tíz műanyag tálcát tettünk egy asztalra, mindegyikbe egy-egy frissen levágott, sima felszínű juharlevelet (*Acer platanoides*) helyeztünk. Az 1., 2., 3., ..., 9. tálcákban a leveleket teljesen lefedtük $n_{\text{üveg}} = 1,5$ törésmutatójú, 2, 3, 4, ..., 10 mm átmérőjű üveggolyókkal (1. ábra). A 10. tálcán a levél szabadon maradt, nem kerültek rá üveggolyók; ez volt a kontroll. Az asztalt a tálcákbeli, üveggolyókkal fedett levelekkel együtt közvetlen napsütésnek tettük ki három eltérő időtartamig: hosszú (2007. július 8., 8:00 – 17:00 óra között = helyi nyári idő = UTC + 2h), közepes (2007. július 14., 10:30 – 13:30) és rövid (2007. július 17., 16:00 – 17:00) ideig. A besugárzási idő alatt egyszer sem esett árnyék a levelekre. A kísérlet után a leveleket a laborató-



2. ábra. a) A 2. kísérlet elrendezése, melyben két juhar (*Acer platanoides*, lent) és két páfrányfenyő (*Ginkgo biloba*, fönt) levél volt vízszintesen kiterítve egy-egy üveglapon. Mindkét levélfaj leveleinek fonákját, illetve színét vízcseppek borították. b) A páfrányfenyő (bal oszlop) és juhar (jobb oszlop) levelein nyugvó vízcseppek fényképei közelről. (Az ábra színes változatát a hátsó belső borítón közöljük.)

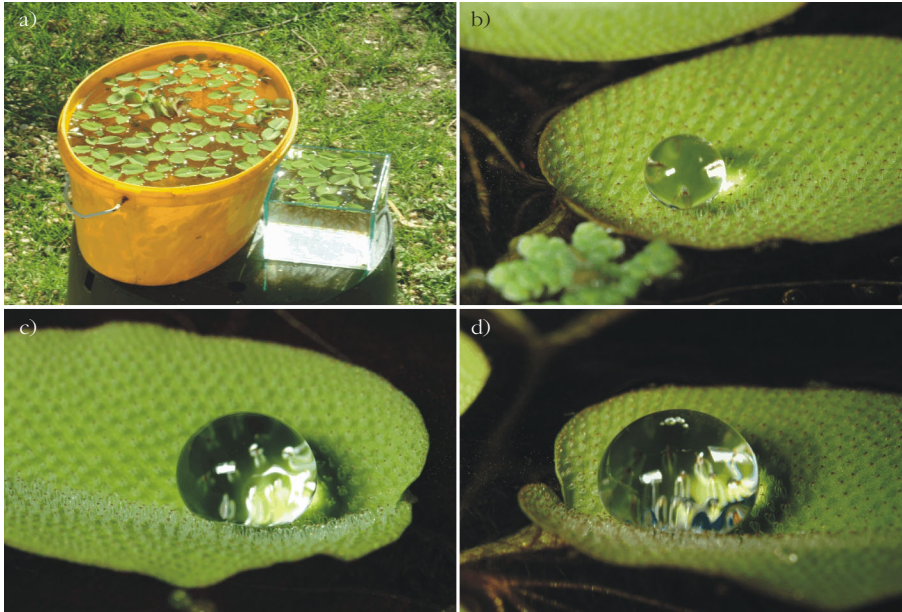
riumban egy Canon Arcus 1200 típusú szkennerral vittük számítógépre az esetleges napégés elemzése céljából (4. ábra).

A második kísérletet 2007. július 26-án végeztük ugyanazon kertben, ahol az elsőt. Meleg, napos, szélmentes idő volt, tiszta égbolttal. Két pár, frissen levágott, sima felszínű (szőrtelen) páfrányfenyő (*Ginkgo biloba*) és juhar (*Acer platanoides*) levelet négyzet (10×10 cm) alakú üveglapokra rögzítettünk átlátszó, szintelen ragasztószalagokkal, mindkét pár levélből az egyiket a színével, a másikat pedig a fonákjával felfelé. A leveleket hordozó üveglapokat 10 cm magasságban

1. táblázat

A 2. kísérlet három eltérő besugárzási időtartamának kezdete és vége ($t = \text{UTC} + 2\text{h}$), a Nap horizont fölötti θ szögmagassága, és a léghőmérséklet a besugárzás kezdetén és végén. N a vízcseppek száma a juhar (*Acer platanoides*) és páfrányfenyő (*Ginkgo biloba*) leveleinek színén, illetve fonákján.

besugárzás	levél (besugárzott oldal)	kezdet		vég		$T(^{\circ}\text{C})$		N
		t	θ	t	θ	kezdet	vég	
1.	<i>Acer</i> (fonák)	7:55	27,5°	9:40	44,9°	24,0	27,0	25
	<i>Acer</i> (szín)	7:55	27,5°	9:35	44,1°	24,0	27,0	21
	<i>Ginkgo</i> (fonák)	7:55	27,5°	10:30	52,6°	24,0	29,0	8
	<i>Ginkgo</i> (szín)	7:55	27,5°	10:00	48,1°	24,0	28,0	11
2.	<i>Acer</i> (fonák)	10:30	52,6°	11:28	60,1°	29,0	31,0	24
	<i>Acer</i> (szín)	10:30	52,6°	11:20	59,2°	29,0	30,5	29
	<i>Ginkgo</i> (fonák)	10:30	52,6°	12:00	63,0°	29,0	32,0	18
	<i>Ginkgo</i> (szín)	10:30	52,6°	11:31	60,4°	29,0	31,0	21
3.	<i>Acer</i> (fonák)	12:00	63,0°	13:11	64,4°	32,0	34,0	29
	<i>Acer</i> (szín)	12:00	63,0°	13:01	64,7°	32,0	33,5	31
	<i>Ginkgo</i> (fonák)	12:00	63,0°	13:45	62,3°	32,0	34,5	19
	<i>Ginkgo</i> (szín)	12:00	63,0°	13:17	64,1°	32,0	34,0	21



3. ábra. a) A 3. kísérlet elrendezése, amelyben két vízzel teli edénybe rucaörömöt (*Salvinia natans*) helyeztünk. b–d) A rucaöröm vízszűrő, szőrös levelein nyugvó vízcseppek fényképei.

egy vízszintes asztallap fölé helyeztük távtartók segítségével (2.a ábra). Az asztalt világoszöld vászon borította. Mind a négy levélre néhány csepp tiszta csapvizet csöp-pentettünk egy szemcseppentővel: a levél felszín egy adott helyére négy ugyanakkora vízcseppet csöp-pentettünk, miáltal az összes vízcsepp gyakorlatilag egyforma lett. Az üveglapok vízszintes síkban tartották a leveleket, és lehetővé tették, hogy az asztalt borító zöld vászonzól visszavert fény a levelek fonákját érje. Ezzel a természetes helyzetet utánoztuk, amikor a földről és a környező növényekről visszaverődő fény alulról világítja meg a leveleket.

A számos vízcseppet hordozó leveleket közvetlen napfénynek tettük ki. Az első besugárzás reggel, alacsony napmagasságnál, 7:55 órakor (UTC+2h) kezdődött (1. táblázat), és addig tartott, amíg a vízcseppek teljesen el nem párologtak a levelek felszínéről. A következő besugárzást új, frissen vágott páfrányfenyő- és juharlevelekkel folytattuk, amelyek szintén vízcseppeket hordoztak. Összesen három besugárzást végeztünk, a harmadik kora délután ért véget (1. táblázat). Ekkortájt a kísérletet mindenképpen be kellett fejeznünk az egyre növekvő felhőzet miatt: felhős időben nem lehetett garantálni a vízcseppes levelek napfényvel történő folyamatos besugárzását. A kísérlet végeztével a leveleket a laboratóriumban beszkeneltük, hogy dokumentáljuk az esetleges napégés nyomait. A besugárzások kezdetének és végének időpontjait, az ekkor mért napmagasságokat és léghőmérsékleteket, továbbá a vízcseppek számát az 1. táblázat foglalja össze. Egy adott besugárzás kezdetének időpontja mind a négy levélre azonos volt, viszont a végének időpontja különbözött, mert a vízcseppek párologási sebessége függött a levélfelszín minőségétől, amennyiben ez határozta meg a levél és a vízcsepp közti nedvesítési szöget, így a vízcsepp alakját is, valamint a levél fényvisszaverő-képességét (2.b ábra).

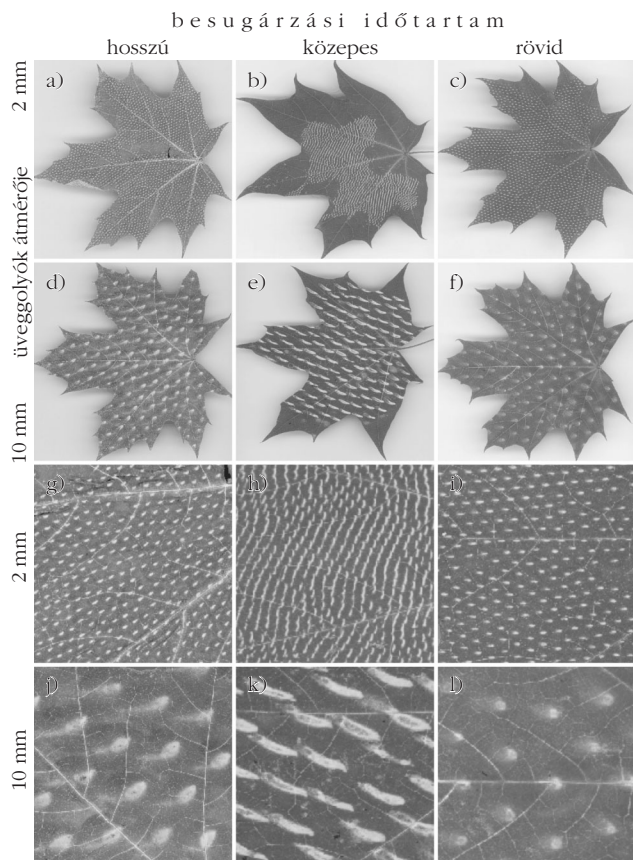
A harmadik kísérletet az ELTE Botanikus Kertjében (47° 28' N, 19° 05' E) végeztük 2007. július 30-án naps, meleg, szélcsendes, felhőtlen időben. Két, vízzel teli edénybe rucaörömöt (*Salvinia natans*) helyeztünk (3.a ábra), amit közvetlen napfénynek tettünk ki 13:00 órától 15:00 óráig (UTC+2h). A besugárzás előtt számos kisebb és nagyobb vízcseppet hoztunk létre a szőrös rucaörömleveleken (3.b–d ábrák) egy szemcseppentővel és kézi permetezővel. A besugárzás alatt a vízfelszínen lebegő rucaörömlevelek helyzete nem változott. A kétórás besugárzás alatt a kisebb vízcseppek elpárologtak, míg a nagyobbak közül némelyik megmaradt.

Azon rucaörömlevelek némelyikét, amelyeken két óra elteltével is volt vízcsepp, a laboratóriumban beszkeneltük, hogy dokumentáljuk az esetleges napégés nyomait.

A negyedik kísérletben (8. ábra) egy vékony (1 mm) falú, $R = 10$ cm sugarú, vízzel töltött műanyag gömböt függesztettünk fel egy drót segítségével. E vízgömböt fehér párhuzamos fénynyalábbal világítottuk meg, amit egy 12 cm átmérőjű gyűjtőlencsével és annak fókuszpontjában elhelyezkedő pontszerű fényforrással állítottunk elő. A fényforrás–lencse–vígömb rendszer optikai tengelyébe helyeztünk egy keretben kifeszített pauszpapír ernyőt. Az ernyő és a vízgömb középpontja közti távolság H , az optikai tengely és az ernyő síkjának szöge pedig $\theta = 60^\circ$ és 90° volt. A vízgömb által az ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatát besötétített szobában fényképeztük le (9. ábra).

Kísérleti eredmények

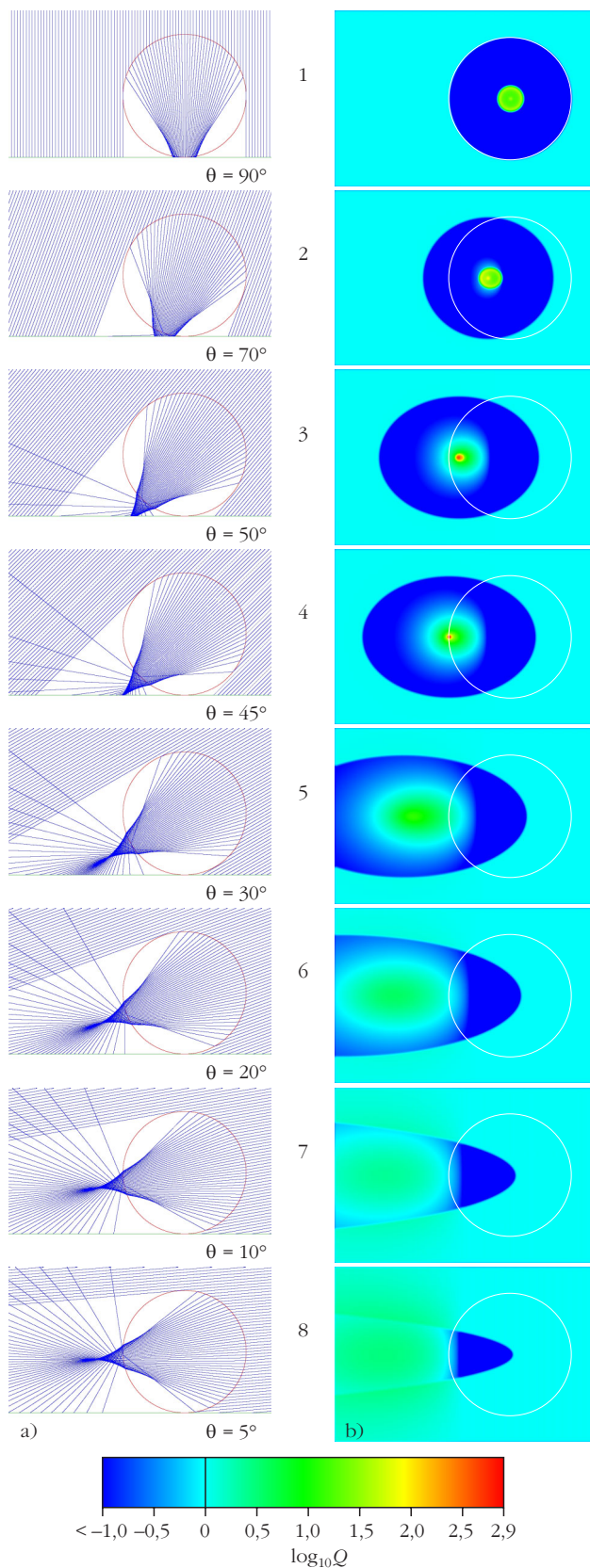
Az 1. kísérlet (1. ábra) mindhárom (rövid, közepes és hosszú) besugárzásakor mindegyik üveggolyóméret-nél (2–10 mm) az összes juharlevél (*Acer platanoides*) nagymértékben beégett a golyók által összegyűjtött napfény nagy intenzitása miatt. A napégés következtében a zöld leveleken barna foltok jelentek meg rácsszerű elrendezésben (4. ábra). A hosszú besugárzás 9 óráig tartott (reggel 8 órától délután 17 óráig), mialatt a levelek gyenge, közepes és erős napfénynek voltak kitéve alacsony, közepes és magas napállások mellett. A közepes besugárzás 3 óra hosszúságú volt: 10:30-tól 13:30-ig, vagyis akkor, mikor a Nap a legmagasabban járt, s egyben a legintenzívebben sugárzott. A rövid besugárzás mindössze 1 órás volt késő délután, alacsony napállás mellett. Mindebből az a követ-



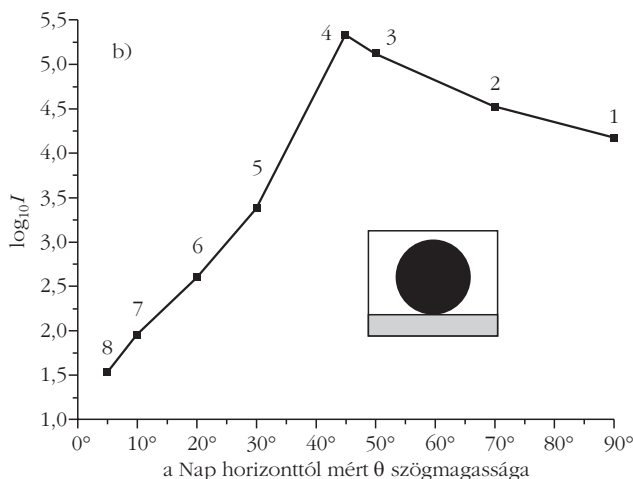
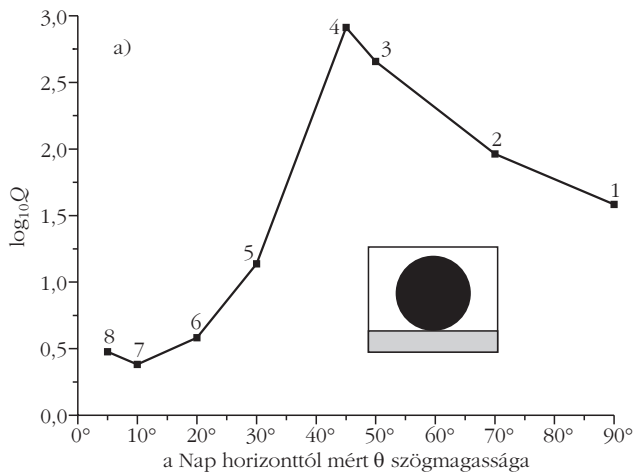
4. ábra. a–f) Az 1. kísérletben napégést szenvedett juharlevelek (*Acer platanoides*), amelyeket 2, illetve 10 mm átmérőjű üveggolyók borítottak a közvetlen napfényvel történt hosszú (bal oszlop), közepes (középső oszlop) és rövid (jobb oszlop) besugárzás alatt. Az üveggolyók által fókuszált napfény nagy intenzitása miatt kialakult barna perzselési foltok jól kivehetők a zöld leveleken. g–l) Az a–f ábrák 4-szeres nagyításban. (Az ábra színes változatát a hátsó belső borítón közöljük.)

keztetés vonható le, hogy vízszintes leveleken elhelyezkedő üveggolyók ($n_{\text{üveg}} = 1,5$) reggeltől késő délutánig képesek napégési sérüléseket okozni a levélszövetben.

Az 5.a ábra egy üveggömb függőleges főtengelymetszetében haladó fénysugarak menetét mutatja a bejövő párhuzamos fénynyaláb vízszintestől mért θ szögének függvényében. Az 5.b ábra az üveggömb Q fénygyűjtőképessége 10-es alapú logaritmusának eloszlását szemlélteti a levél vízszintes síkjában. Ezen intenzitásmintázatokat a cikkünk I. részében részletezett módszerrel számítottuk. A levél síkjában a legnagyobb Q -értékekkel jellemzett „fókuszterület” a leginkább veszélyeztetett a napéggel szemben. Az 5.b ábrán láthatjuk, hogy a fókuszterület megközelítőleg egy ellipszis. A 4. ábrán látható napégésnyomokat ilyen magas fényintenzitású, ellipsziszzerű fókuszterület okozta, amint végighaladt a levél egy szakaszán a Nap mozgása következtében. A 6. ábra a vízszintes levélen nyugvó üveggömbre számított $Q(n_{\text{üveg}}=1,5, \theta)$ fénygyűjtőképesség és a gömb által fókuszált, a levélszövet által elnyelt $I(\theta)$ fényintenzitás 10-es alapú logaritmusát mutatja. Mivel Q és I egyaránt $\theta = 45^\circ$ -nál maximális,



5. ábra: a) Fénysugarak menete egy $n_{\text{üveg}} = 1,5$ törésmutatójú homogén üveggömb függőleges főtengelymetszetén keresztül a vízszintes-hez képest különböző szögben beeső fénynyalábok esetén. b) Az üveggömb Q fénygyűjtőképessége 10-es alapú logaritmusának levél-síkbeli eloszlása színekkel kódolva. Felülről nézve a gölyő kontúr-vonalát mindkét ábrán kör jelzi.



6. ábra. a) Az 5. ábra üveggömbjére számított maximális Q fénynyújtóképesség 10-es alapú logaritmus a beeső napfény horizonttól mért θ szögének ($\theta = 0^\circ$: horizont, $\theta = 90^\circ$: zenit) függvényében. A fekete kör az üveggömb függőleges főtengelymetszetét ábrázolja. Az 5. ábra 1., 2., ... 7., 8. soraihoz tartozó adatokat fekete négyzetek jelölik. b) Az üveggömb által fókuszált, s a levélszövet által elnyelt $I(\theta) = Q(n_{\text{üveg}}=1,5, \theta) \cdot \sin\theta \cdot a(\theta)$ napfényintenzitás 10-es alapú logaritmusának levélsíkbeli maximumértékei. $a(\theta)$ a levélszövet szoláris elnyelési tényezője (lásd: cikkünk I. részének 7.c ábrája). Az 5. ábra 1., 2., ... 7., 8. soraihoz tartozó adatokat fekete négyzetek jelölik.

ezért a napégés ennél a napállásnál a legvalószínűbb. Cikkünk I. részének számításai alapján egy vízcsepes vízszintes levél $Q(n_{\text{üveg}}=1,5, \theta)$ -szor nagyobb fényintenzitást nyel el ahhoz az esethez képest, amikor vízcsepp nélkül éri közvetlen napfény

ugyanazt a levelet. A 6.a ábráról leolvasható, hogy $\log_{10} Q(\theta=45^\circ) = 2,85$, azaz $Q(\theta=45^\circ) = 707,9$.

Tehát $\theta = 45^\circ$ esetében az üveggömb fókusztartományának levéllemezre eső részén a levél 708-szor nagyobb intenzitású napfényt nyel el, mint amikor nincs üveggömb a levélen. Az 1. kísérletben a fényintenzitás fókusztartománybeli több, mint meghétszázszorozódása okozta tehát a juharlevelek napégését (4. ábra).

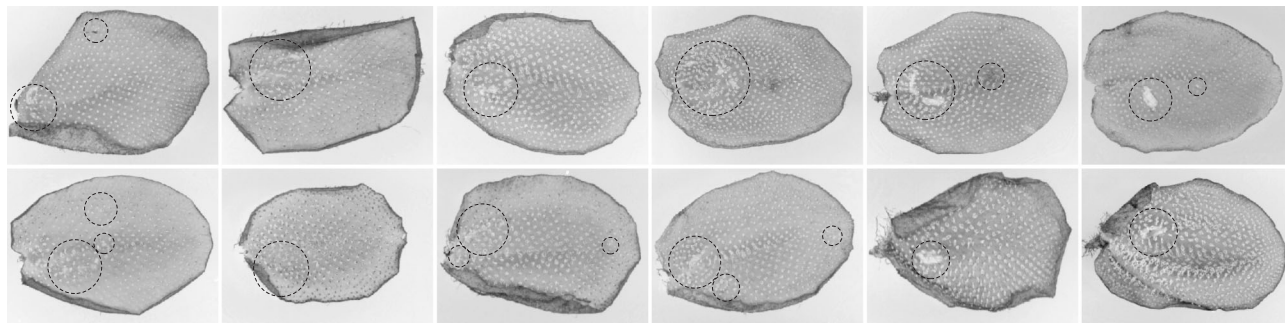
Mivel (i) eső, illetve öntözés után a leveleken megtapadt vízcseppek általában nem gömbölyűek (2.b ábra), (ii) a víz törésmutatója ($n_{\text{víz}} = 1,33$) jóval kisebb, mint az üvegé ($n_{\text{üveg}} = 1,5$), és (iii) a levelekhez tapadt vízcseppek hűtik a levélszövetet, a vízcseppek napfényfókuszálása nagyban különbözik az 1. kísérletbeli üveggolyókéétól. Ezért végeztük el a 2. kísérletet, amelyben vízszintes, sima, vízcseppekkel borított páfrányfenyő- és juharlevelet tettünk ki napfénynek (2. ábra), hogy modellezzük azt az esetet, amikor eső vagy öntözés után közvetlen napfény éri a vízes leveleket.

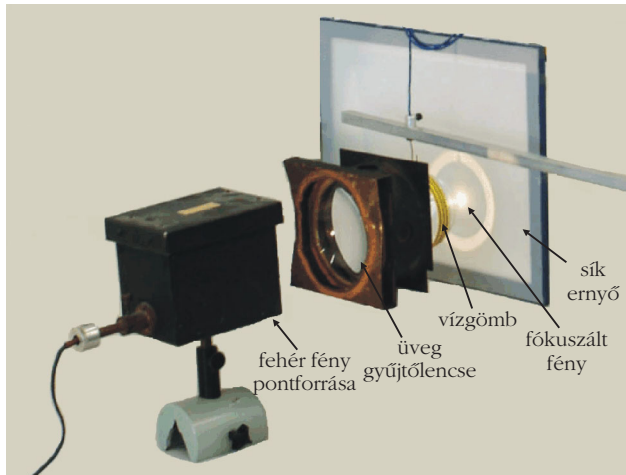
A 2. kísérletben a vízcseppekkel borított vízszintes páfrányfenyő- és juharlevelek nem szenvedtek semmiféle szemmel látható napégést (barnulás). Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy vízszintes páfrányfenyő- és juharleveleken ülő vízcseppek nem képesek kiegészíteni (bebarnítani) a levélszövetet. Figyelembe véve a széles körben elterjedt azon vélekedést, hogy a leveleken megtapadó vízcseppek napsütésben napégést okoznak, ezen eredményünk váratlan volt.

A 2. kísérletben a vízszintes, sima levéllemezhez tapadt vízcseppek fókusztartománya határozottan a levélszövet alá esett, így a cseppek által fókuszált napfény intenzitása a levélen nem volt elég nagy a napégéshez. Ha egy vízcsepp távolabb helyezkedhet el a levél felszínétől, akkor fókusztartománya a levéllemezre eshet, így már okozhat napégést a levélszövetben. E helyzet általában akkor állhat elő, amikor szőrös levelekre kerülnek vízcseppek, s a viaszos, víztaszító szőrök a vízcseppeket a levéllemez fölött tartják.

A 3. kísérletet ilyen helyzet tanulmányozásáért végeztük el. Itt a rucaöröm (*Salvinia natans*) szélsőségesen nagy vízlepergető-képességű, szőrös, vízcsepes leveleit tettük ki közvetlen napfénynek (3. ábra). A rucaörömlevelek szőreit vékony, víztaszító viasz-

7. ábra. Napégési foltok – körökkel jelölve – a rucaöröm (*Salvinia natans*) szőrös, zöld levelein, a 3. kísérlet végén. (Az ábra színes változatát a hátsó belső borítón közöljük.)





8. ábra. A 4. kísérlet elrendezése, amelyben egy vízgömbnek egy sík ernyőre történő fényfokuszálását vizsgáltuk.

szálak kötegei alkotják, amelyek nagyobb vízcseppeket is képesek olyan magasságban tartani, hogy a cseppek nem érnek a levéllemezhez (3.b-d ábrák). A 7. ábrán néhány rucaörömlévről látható a napfényrel való besugárzás után. E leveleken jól kivehetőek a barna napégéses foltok. A 3. kísérlet alapján azt mondhatjuk, hogy eső vagy öntözés után napsütésben a levelek víztaszító viaszszőrei által tartott vízcseppek okozhatnak napégést a levélszövetre fókuszált fény intenzitásának nagy értékei miatt.

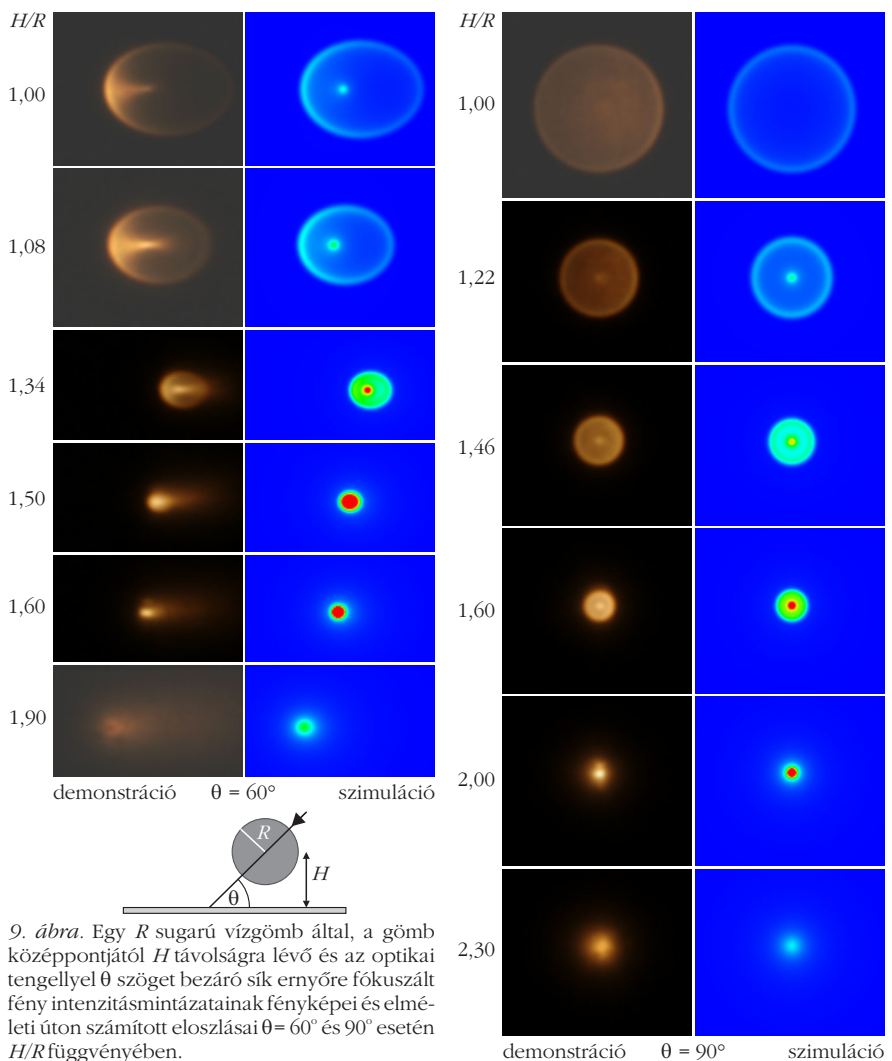
A 9. ábra egy R sugarú vízgömb által, a gömb középpontjától H távolságra lévő és az optikai tengellyel θ szöget bezáró sík ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatát szemlélteti $\theta = 60^\circ$ és 90° irányszögek esetén. Ugyanitt láthatók az adott H/R arányhoz számítógépes modellezéssel számított intenzitásmintázatok is. Jól látszik, hogy a számított intenzitásmintázatok közel állnak a valós (fényképezett) mintázatokhoz. A 10. ábra a vízgömb Q fénygyűjtő-képessége és a levélszövet által elnyelt I intenzitás 10-es alapú logaritmusát mutatja a kísérlet (8., 9. ábra) H/R értékeinek függvényében $\theta = 60^\circ$ és 90° mellett. Q és I akkor maximális, ha az ernyő a vízgömb fókuszstartományát metszi ($H/R = 1,6$ és $2,0$, mikor $\theta = 60^\circ$ és $\theta = 90^\circ$). Ekkor $\log_{10} Q$ és $\log_{10} I$ elérheti a $2,6$ – $2,8$ és $5,2$ – $5,35$ értékeket is 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 3. kísérletben megmutattuk (3., 7. ábra).

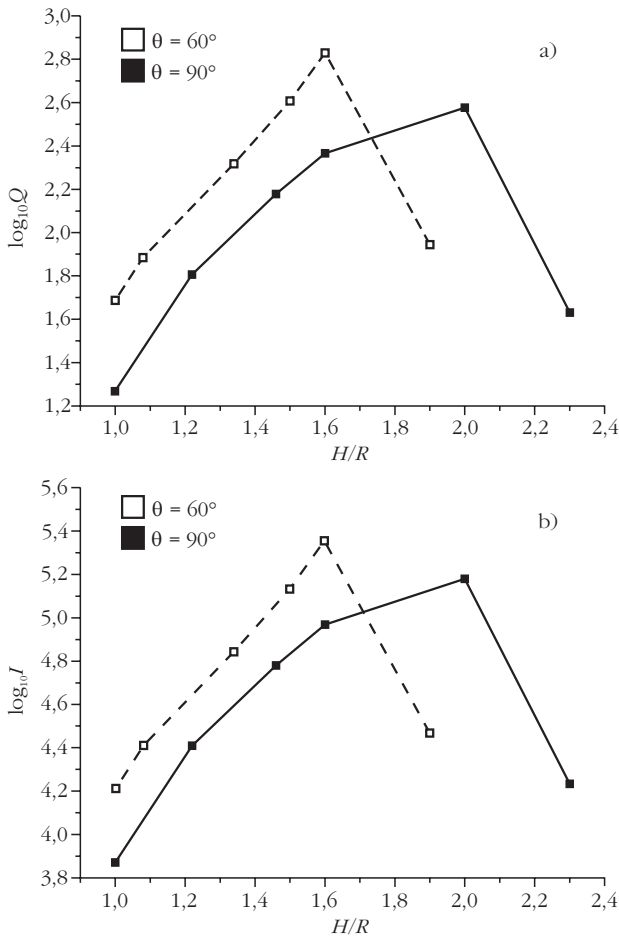
Elemzés és végkövetkeztetés

A növényi levelek nedvesítése jelentősen függ a levélfelület tulajdonságaitól, amelyek fontosak a levélfelület nedvesítő, vízáteresztő és vízmegtartó képességének, valamint a levegő és növény közti gázcsere meghatározásában és szabályozásában [3–6]. A nedvesítéssel kapcsolatban megemlíthetjük az úgynevezett lótuusz-hatást [7]: amikor esőcsepp hullik a lótuusz (*Nelumbo nucifera*) levelére, a vízcsepp egészen gömbölyűvé válik a levéllemezen. Ekkor a nedvesítési szög akár 160° is lehet.

A lótuuszlevélre hullott vízcseppek azonnal legerulnak, és ezáltal meg is tisztítják a levélfelületet a szennyeződésektől. E jelenség a levélfelület fölépítésének két szintjéből, valamint az őket borító viaszréteg jelenlétéből ered. Pásztázó elektronmikroszkóppal



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



10. ábra. A 8. és 9. ábrabeli R sugarú vízgömbre számított $\log_{10} Q$ és $\log_{10} I$ értékek H/R függvényében $\theta = 60^\circ$ és 90° -ban beeső párhuzamos fénynyaláb esetén, ahol H az ernyő és a gömb középpontjának távolsága.

megvizsgálva egy lótuuszlevelet azt láthatjuk, hogy mikrométer nagyságrendű egyenetlenségek és azokon belül nanométer nagyságrendű szőrök borítják a levél egész felszínét. E kétskálás egyenetlenség teszi lehetővé, hogy levegő szoruljon a levél és a ráhulló vízcsepp közé. Ekkor a lótuuszlevélnek nagy a nedvesítési szöge, s ez felelős a víz lepergéséért is. A lótuuszlevél viselkedhet víztaszító, illetve nedvesítő felületként is attól függően, hogy a vízcsepp miként kerül a felszínére [7]. A kísérleteinkben vizsgált páfrányfenyő- és rucaörömlevelek szintén erősen víztaszítóak voltak.

A növényi levelek felületi struktúrája nagyban befolyásolja a levélhez tapadt vízcseppek által a levéllemezre fókuszált napfény fiziológiai következményeit. Ha eső után a leveleket vékony vízréteg borítja, akkor a levelek mindaddig csak kevésbé képesek lélegezni, amíg el nem párolog róluk a víz, mivel a gázcsereváltásokat a víz elzárja. Hogy ezt elkerüljék, bizonyos növények hatékony módszereket fejlesztettek ki a víz lepergetésére [8]:

a) Mikroszkopikus méretű vízlepergető képződmények (például víztaszító viaszszőrök, bordák) alakultak ki a levél felszínén, hogy megnehezítsék a víz megtapadását.

b) A levél felszínén különböző makroszkopikus struktúrák vezetnek el a vizet (vízelvezető csatornák, levélcsúcs).

Általános szabály, hogy minél nagyobb a levélfelszín nedvesítési szöge (azaz minél víztaszítóbb), annál kevesebb vizet képes megtartani a levél. A vízcseppek könnyen legurulnak például a lótuusz, páfrányfenyő és rucaöröm nagyon víztaszító leveleiről, ha azok kissé dőltek a vízszinteshez képest.

Az 1. kísérletben (1. ábra) megmutattuk, hogy napsütésben vízszintes, sima leveleken nyugvó üveggolyók megégetik a leveleket (4. ábra), mert egy optikailag homogén üveggolyó fókuszterománya a napfény beesési szögének széles tartományában közel kerülhet, illetve pontosan ráeshet az alatta levő levéllemezre. Amíg a napfény beesési szöge ebben a tartományban van, az üveggolyó által a levélfelszínre fókuszált napfény intenzitása igen nagy, ami napégést (barnulás) okoz. Mialatt a Nap az égen halad, a golyó fókuszterománya egy barna (beégett), ívelt vonalat hagy maga után a levélszövetben (4. ábra).

Természetesen az üveggolyós 1. kísérletünk eredményei alapján nem állítható, hogy a leveleken megtapadó vízcseppek is képesek kitétni a levélszövetet napsütésben. A vízcseppek jóval kisebb törésmutatóval ($n_{\text{víz}} = 1,33$) rendelkeznek, mint az üveggolyók ($n_{\text{üveg}} = 1,5$), így kisebb a fénytörőerejük is.¹ Továbbá, a leveleken ülő vízcseppek alakja általában ellipszoidhoz hasonló, azaz egy gömbnél laposabb. Ez még inkább hozzájárul a fénytörőerő csökkenéséhez az üveggolyóhoz képest. Mindebből azt szűrhetjük le, hogy sima, vízszintes leveleken lévő vízcseppek fókuszterománya messze a levél síkja alá esik mind magas, mind közepes vagy alacsony napállásoknál. A vízcseppek fókuszterománya az őket tartó levél síkjára csak nagyon alacsony napállás esetén eshet. Ekkor viszont a lemenő Nap fényének intenzitása már túl kicsi ahhoz, hogy égést okozzon a levélszövetben. Ez a fő oka a 2. kísérlet (2. ábra) eredményének, miszerint vízszintes leveleken nyugvó napsütötte vízcseppek nem okoznak égési sérüléseket a levélszövetben, függetlenül a napmagasságtól és a cseppalaktól. Megjegyezzük, hogy a 2. kísérletben (1. táblázat) a θ napmagasság kicsi (1. besugárzás), közepes (2. besugárzás) és nagy (3. besugárzás) volt, továbbá a levélhez tapadt vízcseppek szinte gömbölyűek voltak a páfrányfenyőleveleken, és lapos lencseszerűek a juharleveleken (2.b ábra).

Van még kettő további, fiziológiailag fontos különbség a levélen nyugvó üveggolyók és vízcseppek között:

- A vízcseppek, főleg a laposak, a levél felszínét nagyobb felületen érintik, mint az üveggolyók.
- A víz hűti a vízcsepp alatti levélfelületet, az üveggolyó viszont nem. Annyi mindenképp mondható, hogy a vízcseppek sokkal hatékonyabban hűtik

¹ Egy optikailag homogén közeg, például üveg vagy víz, fénytörőerején az $(n-1)/R$ mennyiséget értjük, ahol n a közeg törésmutatója és R a felület helyi görbületi sugara.

az alattuk elhelyezkedő levélszövetet, mint az üvegolyók, s így jobban csökkentik a fókuszált napfény általi beégés veszélyét.

A 3. kísérletünket víztaszító viaszszőrökkel borított rucaörömleveleken ülő gömbölyded vízcseppekkel végeztük. E levelek nagyon hasonlóak a lótuszéihoz, amelyekről a nagyobb vízcseppek könnyen legurulnak a nagy nedvesítési szögnek köszönhetően. (1) A vízcseppek gömbölyded alakjának, (2) a cseppek levéltől való távolságának, és (3) a víz általi hűtés hiányának köszönhetően a rucaörömlevelek megégték a tűző napon (7. ábra). A rucaörömleveleken ülő vízcseppek gömbölyded volta nagy fénytörőerőt eredményezett. Továbbá az a tény, hogy a cseppek nem is értek hozzá a levélhez a viaszszőrök miatt, lehetővé tette, hogy a cseppek fókuszirtományai a levéllemezre essenek. A levélfelületre fókuszált napfény nagy intenzitása és a víz általi hűtés hiánya a levélszövet beégését eredményezte.

Minél inkább víztaszító egy levél felszíne, annál nagyobb a nedvesítési szög a víz és a levél kutikulája között, annál kisebb a levél vízmegtartó képessége, és annál gömbölyűbb a levélen ülő vízcsepp alakja. A nagyobb görbületük miatt a gömbölyded vízcseppek jobban megtörik a fényt, mint a lapos ellipszoid alakúak, ezért nagyobb a fénygyűjtőképességük, tehát nagyobb eséllyel okoznak égési sérülést a levélszövetben. Ennélfogva csak az erősen víztaszító levélfelületeken tudnak kialakulni annyira gömbölyded vízcseppek, amelyek napsütésben képesek égési sérüléseket okozni, viszont éppen az ilyen levelekről pereg le könnyen a víz már kis légmozgás, vagy a vízszinteshez képest már kis dőlésszög esetén is. Mindebből az a következtetés vonható le, hogy eső vagy öntözés után napsütésben az erősen víztaszító levelek nem szenvednek napégést, mert a víz jelentős része leperreg róluk.

Másrészről pedig a nedvesítő felületű leveleken, mint például a juharleveleken, a víz lapos cseppek formájában képes megtapadni a kis nedvesítési szögnek köszönhetően. Az ilyen vízcseppek lapultsága miatt fényfókuszáló-képességük igen gyenge, ezért nem okoznak napégést. Következésképpen, az eső vagy öntözés utáni napsütésben a nedvesítő levelek nem szenvednek napégést.

A fentiek alapján arra a végkövetkeztetésre jutunk, hogy a napsütötte vízcseppek gyakorlatilag soha sem okoznak napégést sem víztaszító, sem pedig szórtelesen, sima nedvesítő leveleken. Mindezt jól alátámasztják a 2. kísérlet eredményei is.

Ugyanakkor a 3. kísérletben megmutattuk, hogy ha a levelet víztaszító viaszszőrök borítják, amelyek képesek a levélfelület fölött tartani a vízcseppeket, akkor tűző napon előfordulhat napégés a levélszövetben (7. ábra). Ezért az eső vagy öntözés utáni napsütésben a vízlepergető, szőrös növényi levelek (például a rucaöröm levelei) súlyos égési sérüléseket szenvedhetnek, ha a víz képes cseppek formájában megmaradni rajtuk. A szupervíztaszító szőrös levelek (például a lótusz és a rucaöröm leveleinek) nagy elő-

nye, hogy könnyen lepergetik magukról a vizet, aminek következtében a szennyeződésektől is megszabadul a növény. Azonban a szupervíztaszító felszínnek az az ára, hogy a víz igen gömbölyű cseppekké formálódik rajtuk, a szőrök a levéllemez fölött tarthatják a vízcseppeket, és ha azok mégiscsak a levélen maradnak, napégést okozhatnak.

Hangsúlyozzuk, hogy a levélszövet napégésszerű barna foltjait a következő környezeti tényezők is okozhatják:

- Savasesők miatt is keletkezhetnek elhalt szövetű, barna foltok a leveleken [9, 10].

- Tengerpartokon a növények levelei a megtörő hullámokból szétfröccsenő sós víztől is károsodhatnak. A levelekre került tengervízcseppekben a víz párolgása miatt a sókoncentráció egyre növekszik, így az ozmózis miatt a levélszövetből a cseppbe áramlik a víz, s ezen ozmotikus vízvesztés a levél barnulásához, elhalásához vezet [11].

- Esetleg a csapvízbeli só is eredményezhet levélbarnulást. A víz párolgása közben a vizeinkben gyakori ásványi sók olyan koncentrációsintet érhetnek el, ami már ozmotikus vízvesztés miatti levélbarnulást okozhat.

- Túl klóros csapvíz öntözéshez való használata is eredményezhet ozmotikus levélégést.

- Ha a növényekre túl sok tápanyagot, trágyát, vegyszert tartalmazó vizet permeteznek, akkor a leveleken megtapadó tömény oldatcseppek szintén eredményezhetnek barna foltokat a leveleken a levélszövet ozmotikus vízvesztése következtében [12].

E levélégéseknek természetesen semmi közük sincs a vízcseppek által fókuszált napfény nagy intenzitása miatti napégéshez. Botanikusok korábban már részletesen vizsgálták, hogy a növényi levelek felületi sajátosságai (például a viaszréteg és szórbevonat vastagsága, sűrűsége) miként határozzák meg a rajtuk kialakuló vízcseppek alakját, s általában a levelek víztaszító, illetve nedvesítő képességét [13].

Végül megemlíjtük, hogy napsütötte, meleg időben hideg víz permetezése, locsolása a növények leveleire fiziológiai stresszt okozhat, aminek ugyancsak valamilyen sérülés (például a levelek hervadása) lehet a következménye. Bár e sérülések nagyban különböznek a szőrökön ülő vízcseppek által okozott napégéstől, erősíthetik azt az elterjedt tévhitet, hogy tűző napon veszélyes a növényeket öntözni, mert a rajtuk megtapadt vízcseppek a napfényt fókuszálva kiégetik a leveleket. Reméljük, hogy a cikkünkben bemutatott számítógépes és kísérleti eredmények segítenek tisztázni e tévhitet.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük *Gnädig Péter*nek (ELTE Atomfizika Tanszék), amiért fölhívta a figyelmünket a cikkünkben tárgyalt optikai problémákra. Köszönjük *Haiman Ottó*nak (ELTE Biológiai Fizika Tanszék) és *Bérczes György*nek (ELTE Anyagtudományi Tanszék) a 4. kísérletünk számára kölcsönzött eszközöket. Köszönjük *Orlói László*nak, az ELTE Botanikus Kertje igazgatójának, amiért lehetővé tette a 3. kísérletünk elvégzését a budapesti fűvészkertben.

Irodalom

1. Egri Á., Horváth G., Horváth Á., Kriska Gy.: Beégethetik-e nap-sütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhitkel terhes biooptikai probléma tisztázása. I. rész: Napfény forgáshozmetrikus vízcseppek általi fókuszlálásának számítógépes vizsgálata. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 1–10.
2. Á. Egri, Á. Horváth, G. Kriska, G. Horváth: Optics of sunlit water drops on leaves: Conditions under which sunburn is possible. *New Phytologist* 185 (2010) 979–987. és a címlap.
3. G. E. Fogg: Quantitative studies on the wetting of leaves by water. *Proceedings of the Royal Society of London B* 134 (1947) 503–522.
4. P. J. Holloway: The effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of Applied Biology* 63 (1969) 145–153.
5. J. T. Martin, B. E. Juniper: *The Cuticles of Plants*. St. Martin's Press, New York, 1970.
6. B. E. Juniper, C. E. Jeffree: *Plant Surfaces*. Arnold, London, 1983.
7. Y-T. Cheng, D. E. Rodak: Is the lotus leaf superhydrophobic? *Applied Physics Letters* 86 (2005) 144101.
8. P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré: *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Springer-Verlag, Heidelberg–Berlin–New York 2004.
9. B., Haines, M. Stefani, F. Hendrix: Acid rain: threshold of leaf damage in eight plant species from a southern Appalachian forest succession. *Water, Air, and Soil Pollution* 14 (1980) 403–407.
10. B. L. Haines, J. A. Jernstedt, H. S. Neufeld: Direct foliar effects of simulated acid rain II. Leaf surface characteristics. *The New Phytologist* 99 (1985) 407–416.
11. B. Appleton, V. Greene, A. Smith, S. French, B. Kane, L. Fox, A. Downing, T. Gilland: Trees and shrubs that tolerate saline soils

and salt spray drift. *Trees for Problem Landscape Sites* – Virginia State University, Publication 430-031 (2002)

12. L. Boize, C. Gudin, G. Purdue: The influence of leaf surface roughness on the spreading of oil spray drops. *Annals of Applied Biology* 84 (1976) 205–211.
13. C. A. Brewer, W. K. Smith, T. C. Vogelmann: Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant, Cell and Environment* 14 (1991) 955–962.

HIBAIGAZÍTÁS

Jelen cikk I. részének [1] 4. oldalán a (8) és (9) képletek hibásan jelentek meg. A helyes képletek:

$$I(\theta) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} A(\lambda) Q[n(\lambda), \theta] \sin \theta I_{\text{Nap}}(\lambda, \theta) d\lambda, \quad (8)$$

illetve

$$\begin{aligned} I(\theta) &\approx Q(n, \theta) \sin \theta \int_{400 \text{ nm}}^{750 \text{ nm}} A(\lambda) I_{\text{Nap}}(\lambda, \theta) d\lambda \equiv \\ &\equiv Q(n, \theta) \sin \theta a(\theta), \quad (9) \\ a(\theta) &= \int_{400 \text{ nm}}^{750 \text{ nm}} A(\lambda) I_{\text{Nap}}(\lambda, \theta) d\lambda, \end{aligned}$$

ahol Q a vízcsepp fénygyűjtőképessége az alatta lévő vízszintes levélfelület egy adott pontjában. Egy vízcseppekes levél $Q(n, \theta)$ -szor nagyobb intenzitást nyel el a fókuszstartományban a cseppmentes esethez képest. E hibáért elnézést kérünk a tisztelt Olvasótól.

EMLÉKEZÉS PAÁL GYÖRGYRE

Paál György (1934–1992), a hazai kozmológiai kutatások úttörője volt. Halálát követően a Fizikai Szemle nem közölt róla nekrológot, bár tevékenysége és annak hatása alapján erre méltó lett volna. Születésének 75. évfordulóján most két egykori munkatársa emlékezik meg róla.

Paál György csillagász és fizikus 75 éve, Szilveszter napján született. Szakmai munkáját az 1950-es évek végén kezdte, galaxishalmazok, majd kvazárok vizsgálatával, olyan időben, amikor a nemzetközi tudományos kapcsolatok kiépítése és ápolása magyar kutató számára még nehézkes volt, a tudományos élet pedig át volt itatva a tekintélytisztelet (mind önkéntes, mind megkövetelt) legváltozatosabb formáival. Ilyen körülmények között a választott téma művelése nem volt könnyű.

Mégis, a fiatal kutató gyorsan rátalált két problémára, amelyek ma is a kutatás tárgyai, mert kielégítő magyarázatuk máig sincs: a galaxishalmazok tömeghiányára és a kvazárok néhány vöröseltolódás táján tapasztalható „sűrűsödésére”. Az elsőről ma úgy gondoljuk, az egzotikus „sötét anyag” lehet a megoldása, ha ma még nem is tudjuk, *mi* is e sötét anyag, és nehezebb is a sötét anyagot egy galaxishalmazban elhelyezni, mint az egész Univerzumban. A második probléma egyrészt megfigyelési tény, másrészt a „józan észnek” látszik ellentmondani, legalábbis egy nem végtelenül öreg Univerzumban; de megfigyelési adatok sokasága

és az általános relativitáselmélet biztosít minket arról, hogy az Univerzum csak 1-2 tucat milliárd éves. Megemlékezésem végső része Paál Györgynek a „sűrűsödés” problémájából kinőtt munkásságával foglalkozik, de előbb néhány más témát is felidézek, már csak az érdekesség kedvéért is.

Magam 1981-ben kerültem munkakapcsolatba Paál Györggyel. Ennek első értékelhető eredménye az 1982-es *Csillagászati évkönyv*ben megjelent cikk volt [1]. A téma ősi: úgy tűnik, mintha valami közvetlen kapcsolat volna a mikrovilág (atomok, parányok, részecskék...) és a megvilág (Világegyetem, galaxishalmazok...) közt, de ennek magyarázata ismeretlen. Mivel e témát szinte csak filozófusok művelték 2500 év óta, senki meg nem akadályozhatta, hogy hozzá ne tegyék: „és az ember középen áll”. Azonban a kérdést nem csak misztikus irányból lehet megközelíteni: a mi konklúziónk az lett, hogy az általános relativitáselmélet és a kvantumelmélet, némi kozmológiával együtt egészen jól tudnánk magyarázni az Univerzumban látható méret- és tömegskálákat, *ha* a részecskefizikusok tudnának mutatni még egy 30 eV körüli tömegű, semleges, feles spinű részecskét *is*; csak még nem tudnak. Az állítás ma éppannyira érvényes, mint három évtizede, a részecskefizikai elméletek változó részleteitől függetlenül.

1985-ben felismertük, hogy ha még nem is tudjuk megalkotni a *minden egyesítése* néven keresett elmé-