

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

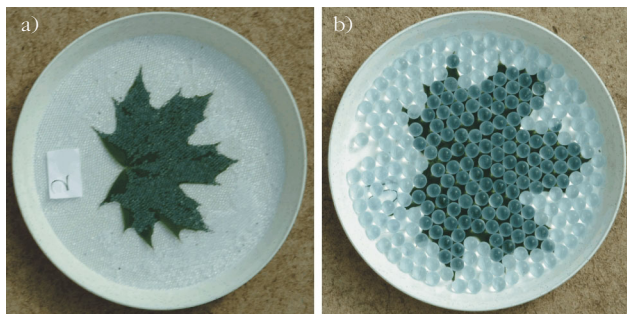
Horváth Ákos – Max Planck Meteorológiai Intézet, Hamburg

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 közhitet, 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 általános vélekedés, miszerint a növényekhez tapadt vízcseppek apró nagyítólencsökként 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-

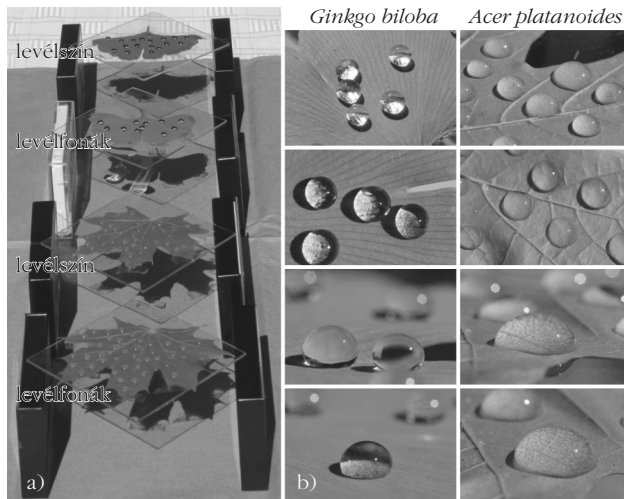


1. ábra. Az 1. kísérletben használt tálcák közül kettő, amelyekben 2 mm (a), illetve 10 mm (b) átmérőjű üveggolyók fedték a juharlevelet (*Acer platanoides*).

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.)

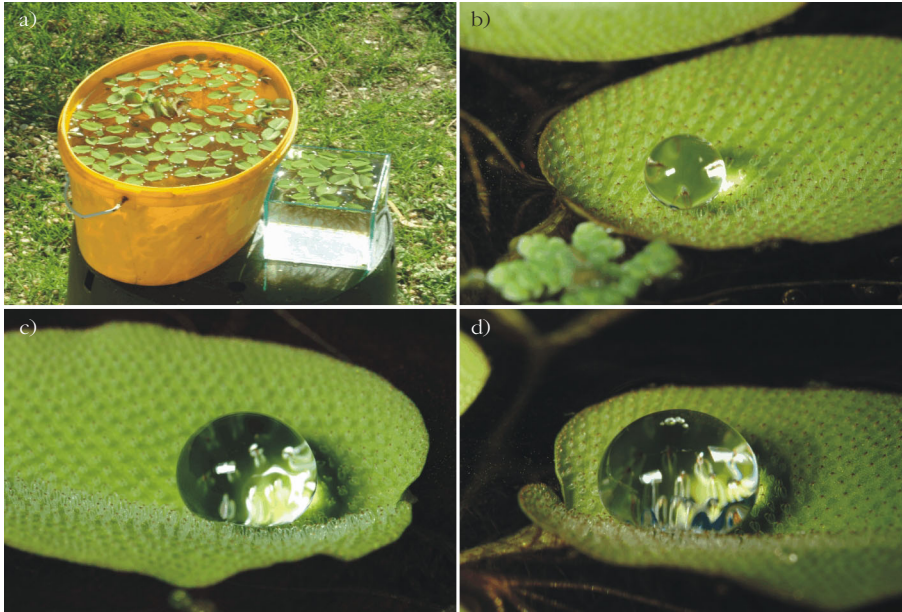
riumban egy Canon Arcus 1200 típusú szkennerral vittük számítógépre az esetleges napégés elemzése céljából (4. ábra).

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 fölfelé. 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 vízszitó, 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).

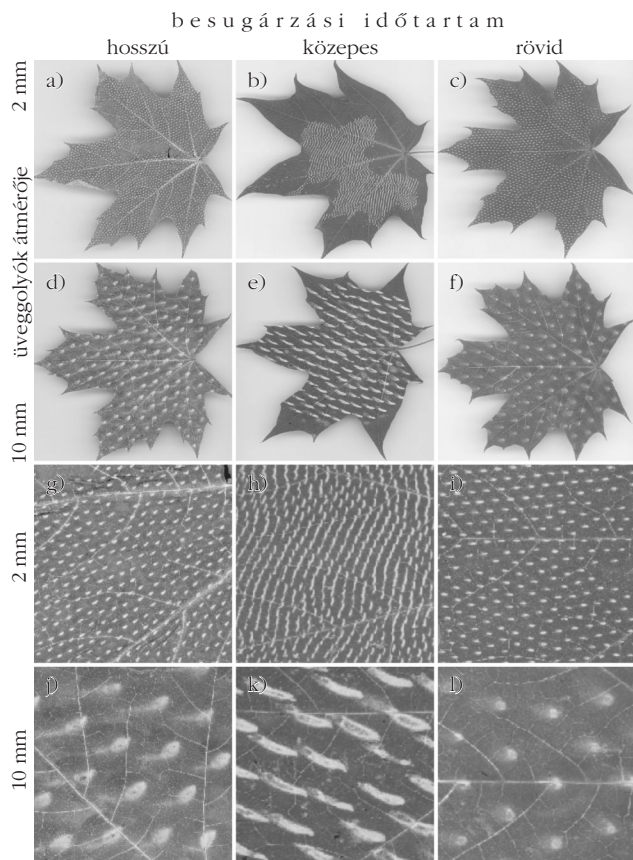
A harmadik kísérletet az ELTE Botanikus Kertjében (47° 28' N, 19° 05' E) végeztük 2007. július 30-án naps, meleg, szélcsendes, felhőtlen időben. Két, vízzel teli edénybe rucaörömöt (*Salvinia natans*) helyeztünk (3.a ábra), amit közvetlen napfénynek tettünk ki 13:00 órától 15:00 óráig (UTC+2h). A besugárzás 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

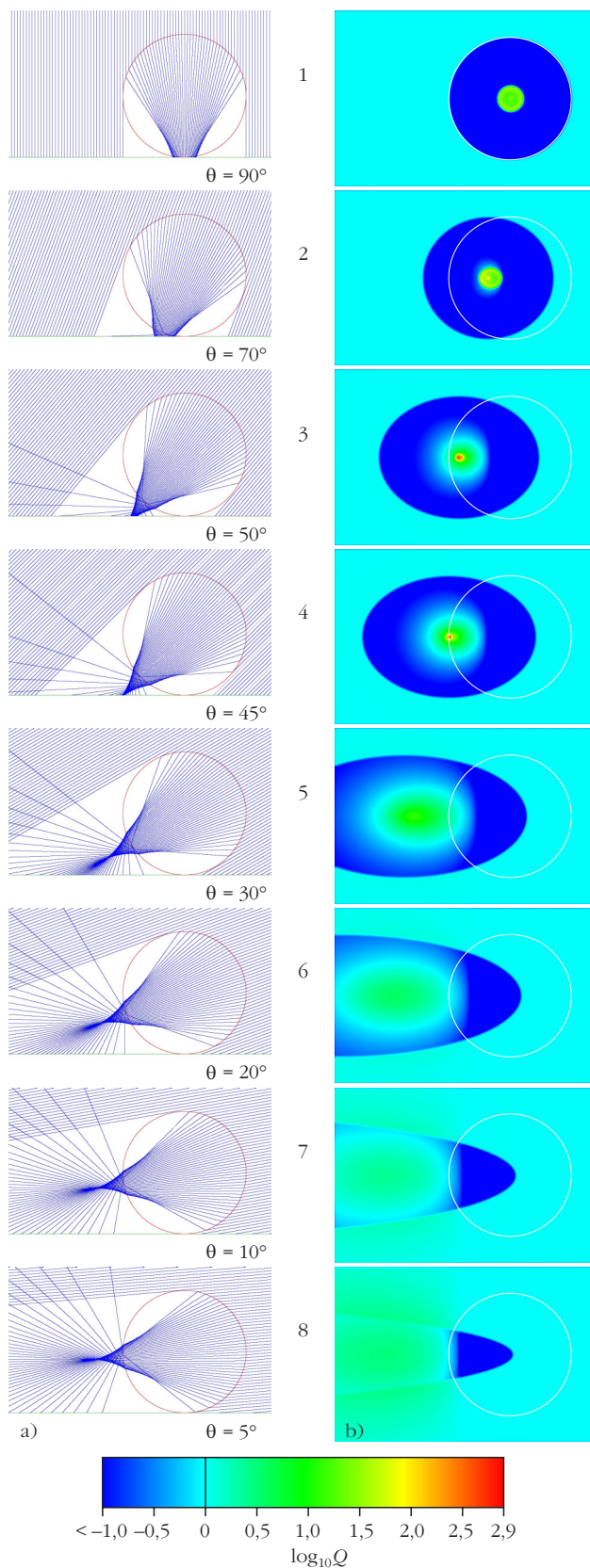
Az 1. kísérlet (1. ábra) mindhárom (rövid, közepes és hosszú) besugárzásakor mindegyik üveggolyóméret-nél (2–10 mm) az összes juharlevél (*Acer platanoides*) nagymértékben beégett a golyók által összegyűjtött napfény nagy intenzitása miatt. A napégés következtében a zöld leveleken barna foltok jelentek 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-



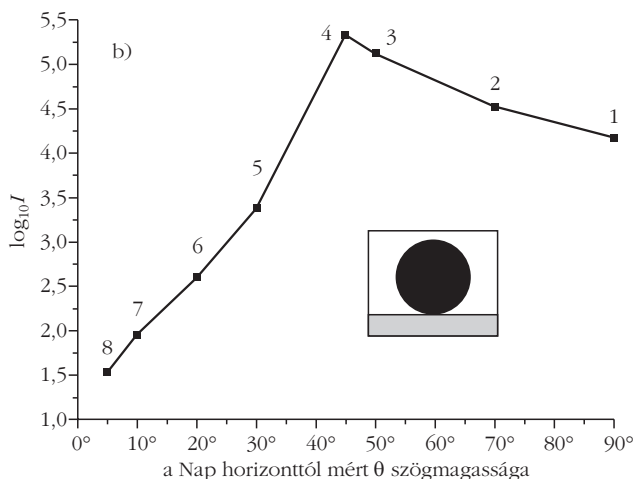
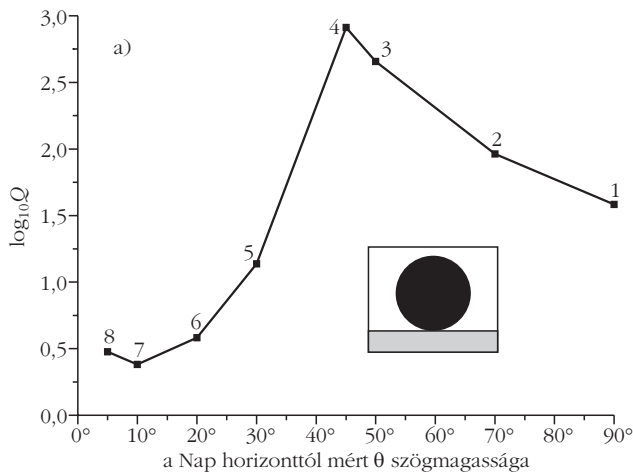
4. ábra. a–f) Az 1. kísérletben napégést szenvedett juharlevelek (*Acer platanoides*), amelyeket 2, illetve 10 mm átmérőjű üveggolyók borítottak a közvetlen napfényvel történt hosszú (bal oszlop), közepes (középső oszlop) és rövid (jobb oszlop) besugárzás alatt. Az üveggolyók által fókuszált napfény 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 fénygyűjtőképesség 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).

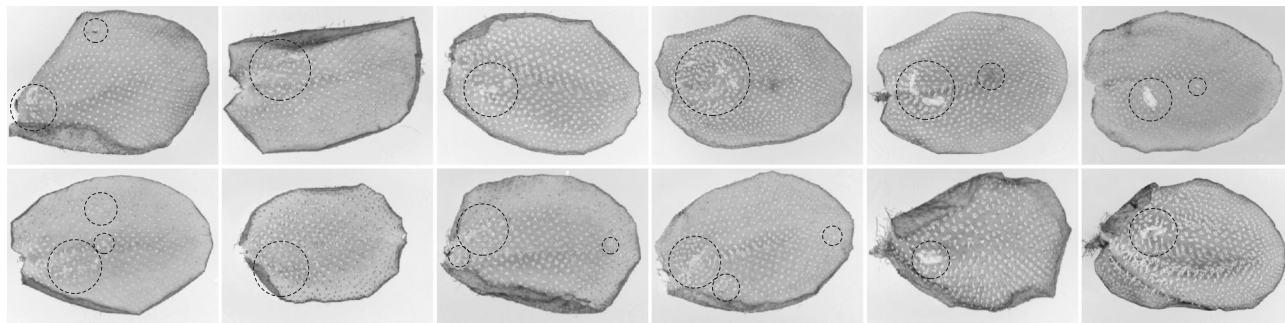
Mivel (i) eső, illetve öntözés után a leveleken megtapadt vízcseppek általában nem gömbölyűek (2.b ábra), (ii) a víz törésmutatója ($n_{\text{víz}} = 1,33$) jóval kisebb, mint az üvegé ($n_{\text{üveg}} = 1,5$), és (iii) a levelekhez tapadt vízcseppek hűtik a levélszövetet, a vízcseppek napfényfókuszálása 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.

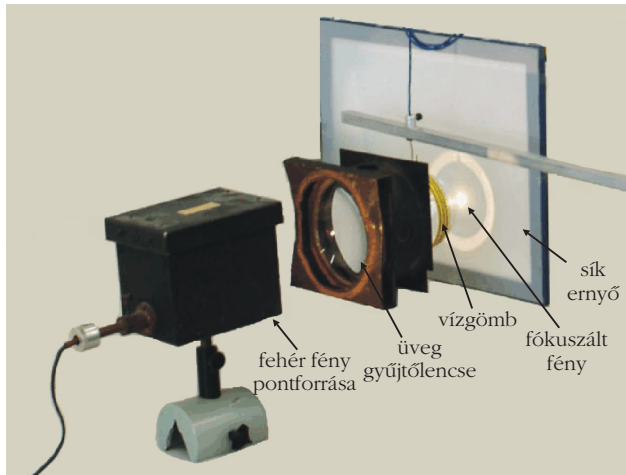
A 2. kísérletben a vízcseppekkel borított vízszintes páfrányfenyő- és juharlevelek nem szenvedtek semmiféle szemmel látható napégést (barnulás). Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy vízszintes páfrányfenyő- és juharleveleken ülő vízcseppek nem képesek kiegészíteni (bebarnítani) a levélszövetet. 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.

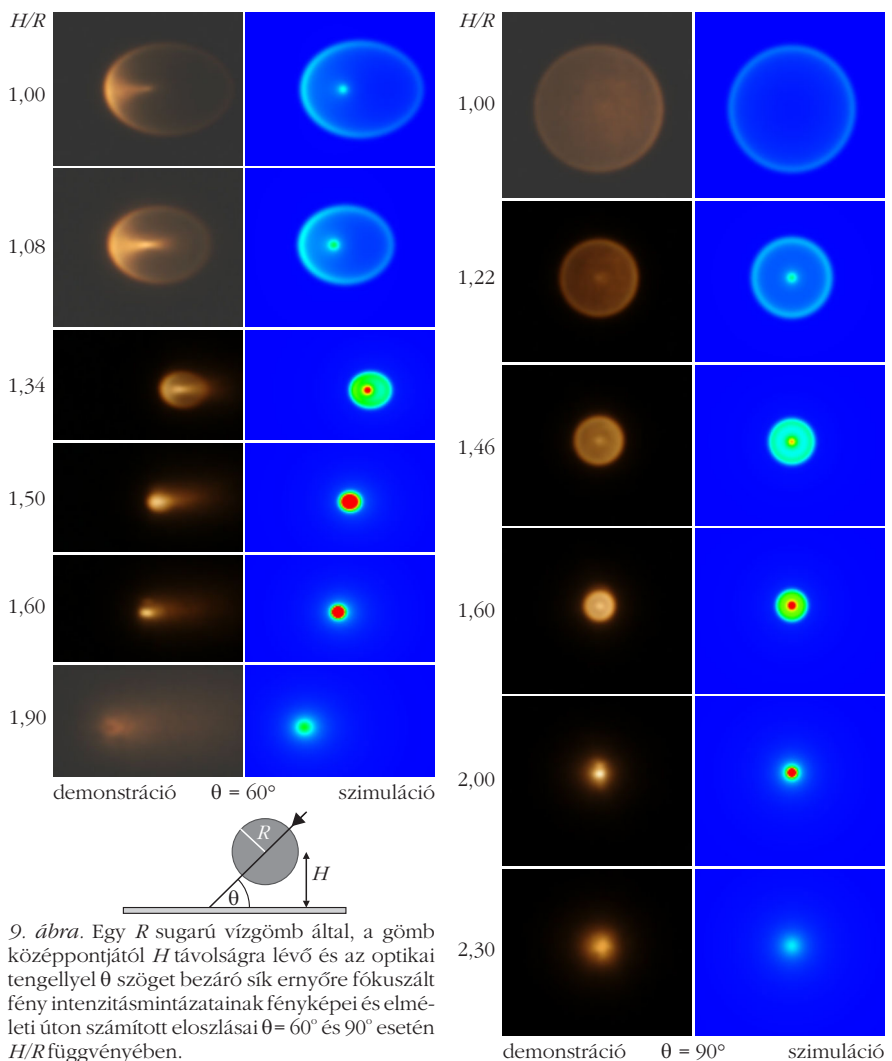
A 9. ábra egy R sugarú vízgömb által, a gömb középpontjától H távolságra lévő és az optikai tengellyel θ szöget bezáró sík ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatát szemlélteti $\theta = 60^\circ$ és 90° irányszögek esetén. Ugyanitt láthatók az adott H/R arányhoz számítógépes modellezéssel számított 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).

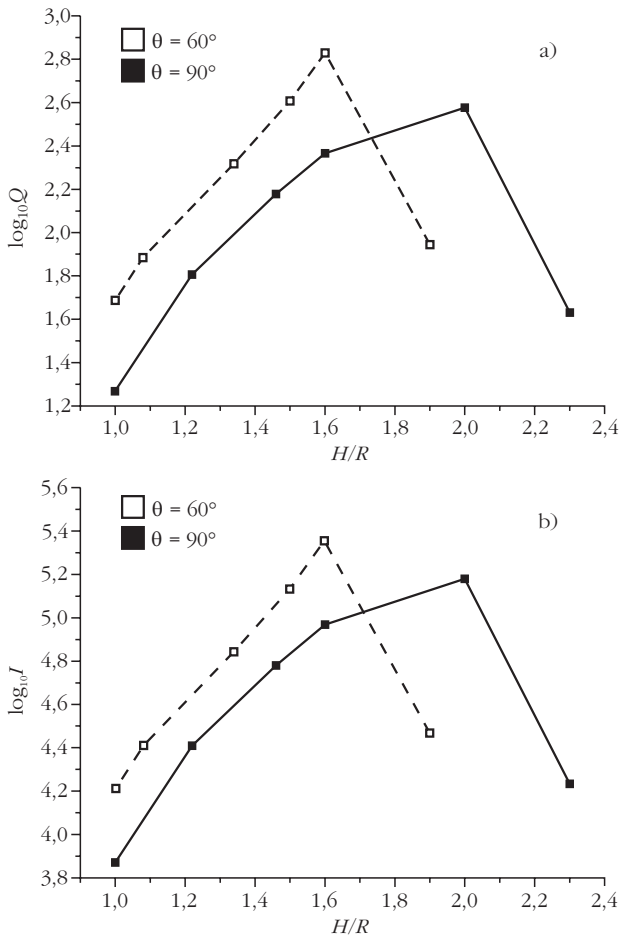
Elemzés és végkövetkeztetés

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 gázcserenyílásokat 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, levélcúcs).

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.

Másrészt 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 szőrbevonat vastagsága, sűrűsége) miként határozzák meg a rajtuk kialakuló vízcseppek alakját, s általában a levelek víztaszító, illetve nedvesítő képességét [13].

Végül megemlíjtük, hogy napsütéses, 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 tévhitekkel terhes biooptikai probléma tisztázása. I. rész: Napfény forgás-szimmetrikus vízcseppek általi fókuszálásának 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:

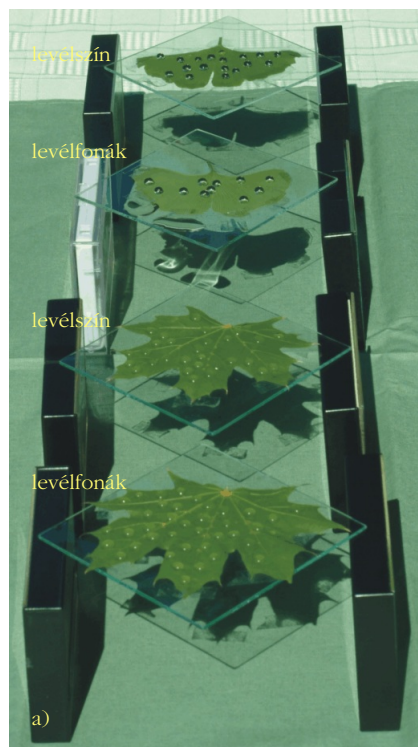
$$I(\theta) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} A(\lambda) Q[n(\lambda), \theta] \sin \theta I_{\text{Nap}}(\lambda, \theta) d\lambda, \quad (8)$$

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 fókuszartományban a cseppmentes esethez képest. E hibáért elnézést kérünk a tisztelt Olvasótól.

BEÉGETHETIK-E NAPSÜTÉSBE A LEVELEKET...



2. ábra. (balra fönt) a) A 2. kísérlet elrendezése, amelyben két juhar (*Acer platanoides*, lent) és két páfrányfenyő (*Ginkgo biloba*, fönt) levél volt vízszintesen kiterítve egy üveglapon. Mindkét levélfaj levelének fonákját, illetve színét vízcseppek borították. b) A páfrányfenyő (bal oszlop) és juhar (jobb oszlop) levelein nyugvó vízcseppek fényképei közelről.

4. ábra. (balra lent) 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.

7. ábra. (jobbra lent) Barna napégési foltok, körökkel jelölve, a rucaöröm (*Salvinia natans*) szőrös, zöld levelein, a 3. kísérlet végén.

