

MIÉRT KELETRE NÉZ A NAPOT MÁR NEM KÖVETŐ NAPRAFORGÓK (*HELIANTHUS ANNUUS*) VIRÁGZATA?

2. rész: a napraforgó-virágzat maximális fényenergiát nyel el, ha keletre néz és a délutánok felhősebbek a délelőttöknél

Horváth Gábor, Virágh Balázs, Horváth Dániel
ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium, Budapest

Slíz-Balogh Judit
ELTE Csillagászati Tanszék, Budapest

Horváth Ákos
Hamburgi Egyetem, Meteorológiai Intézet, Hamburg

Egri Ádám
Ökológiai Kutatóközpont, Vízi Ökológiai Intézet, Budapest

Jánosi Imre
Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz- és Környezetpolitika Tanszék, Budapest

Cikkünkben a Napot már nem követő, érett napraforgó-virágzat keleti irányulásának környezetoptikai magyarázatát adjuk. Az első részben az érett napraforgó-virágzatok keletre nézésének korábbi magyarázatairól szóltunk, valamint környezetoptikai számítási és biológiai mérési módszereinket írtuk le. E második részben az eredményeinket ismertetjük és elemezzük [2].

Eredmények

A Nap pályái Boone County egén

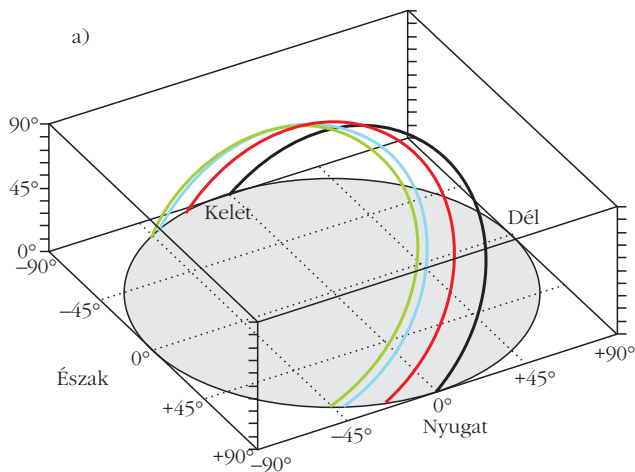
Számításaink egyik fontos bemeneti paramétere a Nap égi pályája júliusban, augusztusban és szeptemberben (5. ábra). A nap éggömbi pályája egy kör, aminek dőlésszöge a vízszintestől $90^\circ - 39^\circ = 51^\circ$ Boone County-ban (Kentucky, USA, $39,0^\circ$ É, $-84,75^\circ$ K), aminek környékéről származik a háziasított napraforgó [11]. Az 1. táblázat tartalmazza Boone Countyban a napkelte legkorábbi és a napnyugta legkésőbbi időpontját, valamint július, augusztus és szeptember

delének időtartományait. December 21. és június 21. között a napkelte iránya délkelettől keleten át északkelet felé halad, míg a napnyugta iránya délnyugattól nyugaton át északnyugatig vándorol. Június 21-én ezen irányok megfordulnak, és december 21-ig visszafelé mozognak. Boone County-ban a Nap delelőpontjának elevációs szöge $27,6^\circ$ -ról nő, június 21-én éri el $74,5^\circ$ -os maximumát, majd december 21-ig csökken. A tavaszi és őszi napéjgyenlőség és napforduló

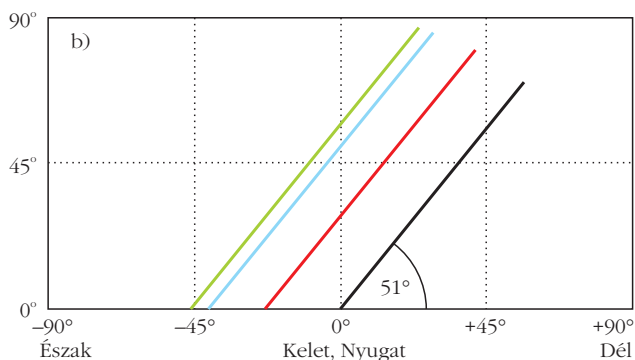
1. táblázat

A legkorábbi napkelte és a legkésőbbi napnyugta ideje (helyi idő), valamint a szoláris dél időintervalluma júliusban, augusztusban és szeptemberben Boone County-ban (Kentucky, USA, $39,0^\circ$ É, $-84,75^\circ$ K).

hónap	legkorábbi napkelte	szoláris dél	legkésőbbi napnyugta
július	5 ó 17 p	12 ó 42–45 p	20 ó 8 p
augusztus	5 ó 39 p	12 ó 39–45 p	19 ó 50 p
szeptember	6 ó 7 p	12 ó 28–38 p	19 ó 9 p



— szeptember 23. / március 20. — június 21.
 — május 23. / július 23. — augusztus 23. / április 23.



5. ábra. A Nap számított pályái az éggömbön Boone County-ban (Kentucky, USA, 39,0° É, -84,75° K) május 23-án, június 21-én, szeptember 23-án és augusztus 23-án. Helyi idő = greenwichi középideő -5 óra. a) Perspektivikus ábrázolás. b) Oldalnézet.

időpontjai évről évre a következőképpen változnak: március 20–21., június 20–22., szeptember 22–23. és december 21–22.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



Virágh Balázs Péter az ELTE-n 2021-ben szerezte meg fizika BSc fokozatát a biofizika szakirányon. „A napraforgóvirágzat (*Helianthus annuus*) állandó keleti irányának környezetoptikai magyarázata” című diplomamunkáját a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában írta Horváth Gábor témavezetésével. Az indiai klasszikus zenét előadói szinten műveli. A budapesti Ganapati Pakhawaj Zeneiskola alapítója, Pakhawaj és a klasszikus indiai zene művészetének terjesztője.

A napraforgófej időfüggő dőlésszöge

A következő oldalon található 6. ábra 100 érett napraforgó-virágzat normálvektorának vízszintestől mért θ_n elevációs szögeit mutatja a t idő függvényében. A mért adatokra illesztett $\theta_n(t)$ harmadrendű függvény a következő:



Horváth Dániel szabadúszó autodidakta informatikus.



Slíz-Balogh Judit a BME-n végzett matematikus-mérnökként, majd menedzserként dolgozott a Graphisoft SE szoftverfejlesztő cégnél. A Pázmány Péter Katolikus Egyetem Hittudományi szakán hittanári, majd az ELTE-n csillagász diplomát szerzett, ahol 2020 őszén doktorált a Fizika Doktori Iskola Részecskefizika és Csillagászat programjában. Fő kutatási területe az égi mechanika, azon belül a Naprendszer Lagrange-pontjainak kaotikus dinamikája és képalakító polarimetriája.



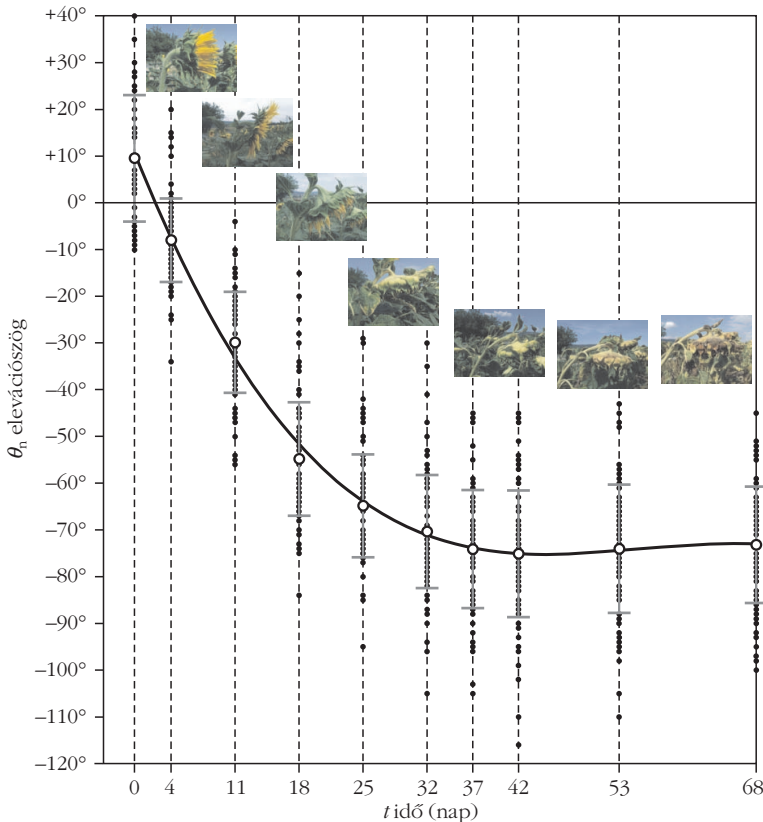
Horváth Ákos az ELTE-n végzett meteorológusként, majd az Arizonai Egyetemen (Tucson) szerzett MSc és PhD fokozatot légkörtudományból. Utána évekig a NASA Sugárhajtóművek Laboratóriumában (Pasadena) és a Miami Egyetemen volt vendégkutató. Fő kutatási területe a meteorológiai és vulkáni felhők műholdas távérzékelése a látható és infravörös hullámhossz tartományban. Jelenleg a Hamburgi Egyetem Meteorológiai Intézetének Sugárzási és Távérzékelési csoportjában kutat.



Egri Ádám az ELTE-n végzett biofizikusként, majd ott szerezte meg a PhD fokozatot a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában, Horváth Gábor vezetésével. Jelenleg az Ökológiai Kutatóközpont Vízi Ökológiai Intézetének tudományos munkatársa. Elsősorban ízeltlábúak vizuális ökológiájával foglalkozik, különös tekintettel a látórendszerük spektrális és polarizációs érzékenységére.



Jánosi Imre Miklós fizikus, az MTA doktora, az MTA Statisztikai Fizikai Tudományos Bizottság elnöke. 2021 elejétől a drezdai Max Planck Institut für Physik Komplexer Systeme vendégkutatója volt. 2021 szeptemberétől a Nemzeti Köszolgálati Egyetem Víz- és Környezetpolitikai Tanszék vezetőjeként folytatja korábbi, több évtizedes ELTE-s pályáját.



6. *ábra.* 100 napraforgó-virágzat normálvektorának vízszintestől mért θ_n elevációs szöge a napban számolt t idő függvényében a virágképzés után. A fekete pontok a θ_n -értékeket mutatják, a fehér körök és az I alakú függőleges pálcikák pedig az átlagokat és szórásokat. A folytonos görbe az illesztett $\theta_n(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$ függvény, ahol $a = -5,657 \cdot 10^{-4}$, $b = 9,341 \cdot 10^{-2}$, $c = -4,964$, $d = 10,494$. A betétképek balról jobbra egyre idősebb napraforgófejeket mutatnak oldalról (Horváth Gábor fotói). E képek vízszintes helyei nem teljesen felelnek meg a függőleges vonalak jelzete időpontoknak.

$$\theta_n(t) = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (23)$$

ahol $a = -5,657 \cdot 10^{-4}$, $b = 9,341 \cdot 10^{-2}$, $c = -4,964$, $d = 10,494$ és t -t napban mérjük. A virágképzést követő

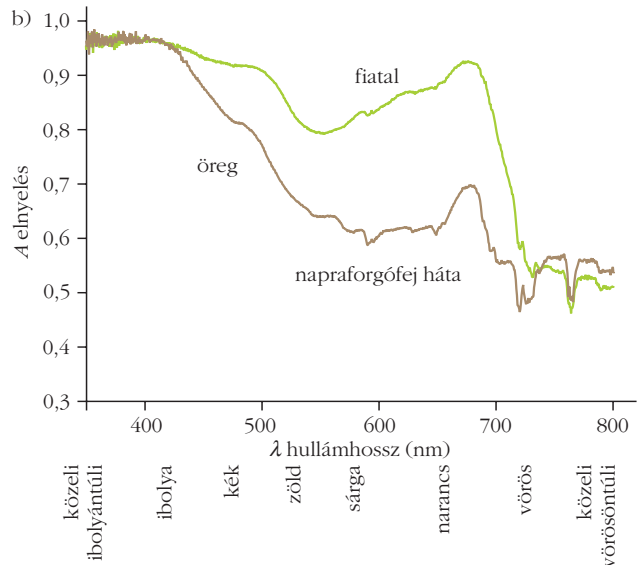
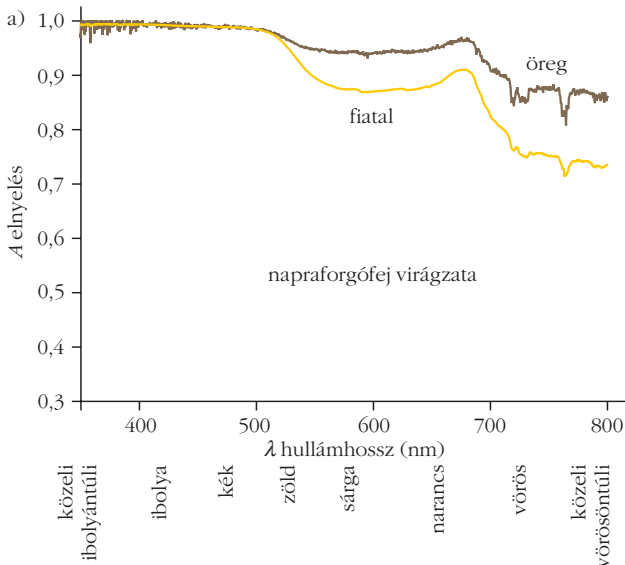
első három hétben az átlagos θ_n meredeken csökken $+10^\circ$ -ról, a 42. napon éri el -75° minimumát, végül kissé emelkedik -72° -ra. θ_n folyamatos csökkenésének oka elsősorban a fej súlyának fokozatos növekedése. Bár θ_n végső kis növekedése statisztikailag nem szignifikáns a nagy szórások miatt, ez mégis egy valós biológiai jelenség: a szár fejdali görbült végének öregségi elszáradásakor a felső szárrész gyorsabban szárad, mint az alsó (így a felső szárhossz gyorsabban rövidül az alsónál), mert az előbbi több közvetlen napfényt kap, mint az utóbbi.

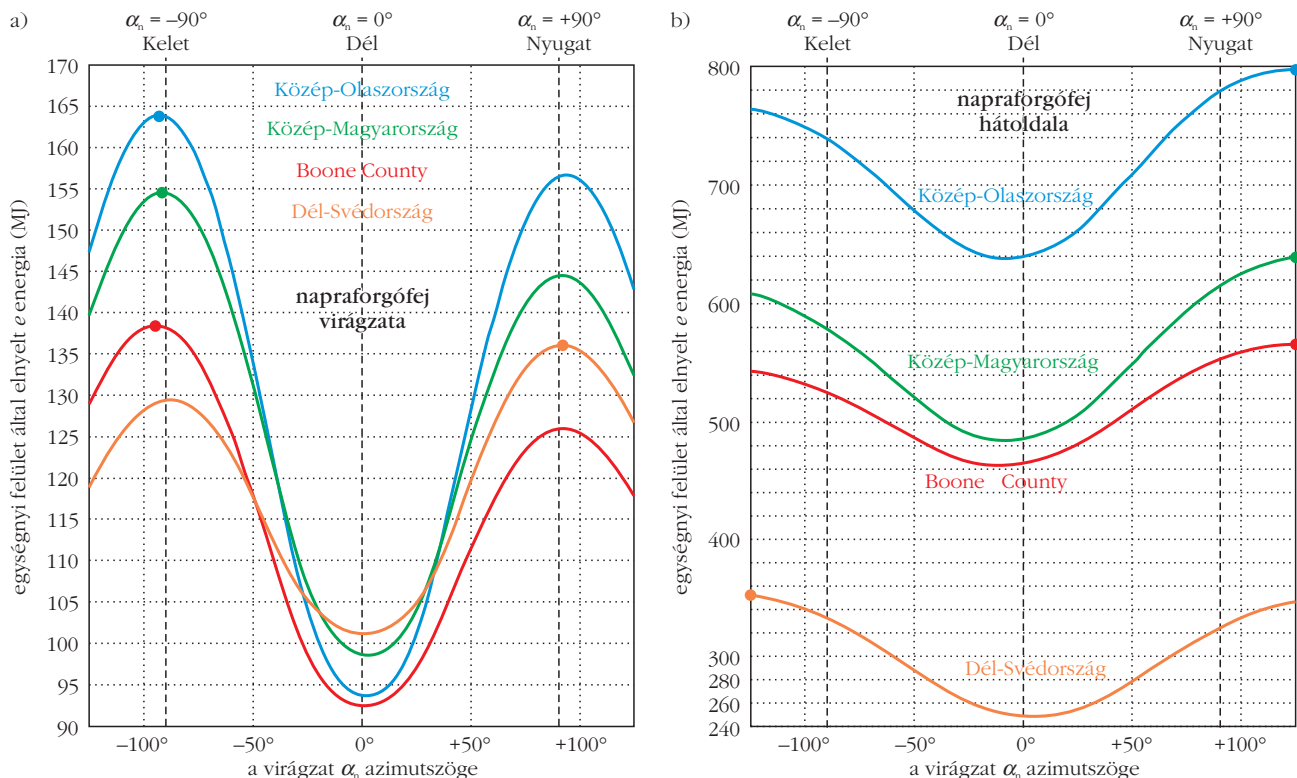
A napraforgófej virágzatának és hátának elnyelési spektrumai

A 7. *ábra* a napraforgófej fiatal (virágképzés utáni 2. heti) és öreg (virágképzés utáni 4. heti) virágzatának és hátoldalának teljesen borult ég alatt mért átlagos $0 \leq A(\lambda) \leq 1$ elnyelési spektrumait szemlélteti. A fiatal és öreg virágzatoknál a fényelnyelés egyaránt gyengébb volt a vörös és a közeli infravörös (KIV) spektrális tartományokban, mint a kék, ibolya és közeli ultraibolya (KUI) tartományokban (7.a *ábra*). A spektrum zöld, vörös és KIV részében a sárga, fiatalabb virágzatok fényelnyelése kisebb volt, mint a narancssárga öregebbeké. Mind a fiatal, mind az öreg virágzatok fényelnyelése a KUI, ibolya és kék tartományt átfogó, széles elsődleges maximummal ($A \approx 1$) bír, továbbá egy keskenyebb, másodlagos maximummal 680 nm körül.

A napraforgófej hátoldalának elnyelési spektrumai (7.b *ábra*) hasonlóak a virágzatéihoz, a következő két fő eltéréssel: 1) A fejhát fényelnyelése szinte minden hullámhosszon gyengébb, mint a virágzaté (7.a *áb-*

7. *ábra.* Fiatal (2 hetes) és öreg (4 hetes) napraforgófejek virágzatának (a) és hátoldalának (b) $A(\lambda)$ elnyelési spektruma, ahol λ a hullámhossz.





8. ábra. Egy napraforgófej virágzata (a) és hátoldala (b) egységnyi felülete által elnyelt e teljes fényenergia a virágképzés (július 1.) és öregeedés (szeptember 7.) között a virágzat normálvektorának α_n azimutszöge függvényében Boone County-ban, Közép-Olaszországban, Közép-Magyarországon és Dél-Svédországban. A görbék elsődleges maximumait pontok jelzik.

ra). 2) A KUI tartomány kivételével, a sárgászöld, öregebb fejhát fényelnyelése gyengébb, mint a zöld fiatalabbé. Úgy a fiatal, mint az öreg fejhát elnyelési spektrumának egy széles elsődleges maximuma ($A \approx 1$) van a KUI- és ibolyatartományokban, és 680 nm körül egy keskenyebb másodlagos maximuma.

A napraforgófej virágzata és háta által elnyelt fényenergia az azimutszög függvényében

A 8. ábra a virágképzés (július 1.) és öregeedés (szeptember 7.) között a napraforgófej virágzata és hátoldala egységnyi felülete által elnyelt e_{teljes} teljes fényenergiát mutatja a virágzat normálvektorának α_n azimutszöge függvényében Boone County-ban, Közép-Olaszországban, Közép-Magyarországon és Dél-Svédországban. A 2. táblázat a virágképzés és öregeedés között a virágzat és fejhát egységnyi felülete által elnyelt teljes fényenergia értékeit tartalmazza. A fejhát által elnyelt teljes fényenergia 4-5-ször nagyobb a virágzat által elnyelténél. A 8.a ábra és a 2. táblázat szerint, a virágzat maximális energiát $\alpha_{\text{max1}} = -94^\circ$ azimutszögnél nyel el, ami majdnem megegyezik a keleti iránnyal ($\alpha_{\text{kelet}} = -90^\circ$). A virágzat $e_{\text{virágzat}}(\alpha_n)$ függvényének másodlagos maximuma $\alpha_{\text{max2}} = +92^\circ$ azimutszögnél van, ami közel megegyezik a nyugati iránnyal ($\alpha_{\text{nyugat}} = +90^\circ$). $e_{\text{virágzat}}(\alpha_n)$ minimuma $\alpha_{\text{min}} = +1^\circ$ azimutszögnél van, ami gyakorlatilag egybeesik a déli iránnyal ($\alpha_{\text{dél}} = 0^\circ$). Egy kelet felé néző virágzat $e_{\text{max1}}/e_{\text{max2}} = 1,1$ -szer és $e_{\text{max1}}/e_{\text{min}} = 1,5$ -szer több fényenergiát nyel el, mint egy rendre nyugatra és dél-

re néző (2. táblázat). Ezzel szemben, egy dél helyett nyugat felé néző virágzat $e_{\text{max2}}/e_{\text{min}} = 1,36$ -szor több energiát nyel el.

Ezen eredményekből arra a következtetésre jutunk, hogy ha a Napot már nem követő, érett napraforgóvirágzat által elnyelt fényenergia egy jelentős környezeti tényező a magok fejlődésében és érésében, akkor Boone County-ban a virágzat ideális azimutiránya szinte pontosan kelet. Az ilyen, keletre néző virágzatok rendre 10 és 50%-kal több fényenergiát nyelnek el, mint a nyugatra vagy délre nézők.

A 8.b ábra és 2. táblázat szerint, egy érett napraforgófej háta $\alpha_{\text{max1}} = +124^\circ$ északnyugati azimutszög esetén nyel el maximális fényenergiát. A hát $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ függvényének $\alpha_{\text{max2}} = -125^\circ$ északkeleti azimutszögnél másodlagos maximuma van. $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ minimuma $\alpha_{\text{min}} = -12^\circ$ azimutszögnél van, ami egy délihez közeli irány. Egy északnyugatra néző virágzatú fej háta rendre $e_{\text{max1}}/e_{\text{max2}} = 1,04$ és $e_{\text{max1}}/e_{\text{min}} = 1,22$ -szer több energiát nyel el, mint egy északkeletre és délre néző virágzatú fej háta (2. táblázat). Továbbá, egy dél helyett északkelet felé néző virágzatú napraforgófej háta $e_{\text{max2}}/e_{\text{min}} = 1,17$ -szer több energiát nyel el. Ezen eredmények arra utalnak, hogy Boone County-ban a napraforgóvirágzat ideális azimutszöge $\alpha_n = +124^\circ$ (északnyugat) lenne, ha a fejhát által elnyelt fényenergia maximalizálása lenne a növény számára fontos.

A főnti számításokat megismételtük Közép-Olaszország (4.b ábra), Közép-Magyarország (4.c ábra) és Dél-Svédország (4.d ábra) felhővalószínűségei mellett is. Olaszország és Magyarország esetében

2. táblázat

A virágképzés (július 1.) és öregedés (szeptember 7.) között egy napraforgófej virágzata és hátoldala egységnyi felülete által elnyelt teljes fényenergiák, azok arányai és maximumhelyei Boone County-ban, Közép-Olaszországban, Közép-Magyarországon és Dél-Svédországban.

	Boone County		Közép-Olaszország		Közép-Magyarország		Dél-Svédország	
	virág	hát	virág	hát	virág	hát	virág	hát
$e_{\max 1}$ (MJ)	138,4	566,0	163,7	797,6	154,5	638,1	136,1	352,0
$e_{\max 2}$ (MJ)	125,9	543,6	156,5	763,9	144,5	608,6	129,4	346,6
e_{\min} (MJ)	92,5	463,5	93,5	637,8	98,6	483,7	101,2	249,7
$e_{\max 1}/e_{\max 2}$	1,10	1,04	1,05	1,04	1,07	1,05	1,05	1,02
$e_{\max 1}/e_{\min}$	1,50	1,22	1,75	1,25	1,57	1,32	1,34	1,41
$e_{\max 2}/e_{\min}$	1,36	1,17	1,67	1,20	1,47	1,26	1,28	1,39
$\alpha_{\max 1}$	-94°	+124°	-92°	+125°	-91°	+125°	+92°	-125°
$\alpha_{\max 2}$	+92°	-125°	+94°	+124°	+92°	-125°	-88°	+125°
α_{\min}	+1°	-12°	+2°	-8°	+3°	-8°	+1°	+5°

virágzata dél helyett északnyugatra néz, $e_{\max 2}/e_{\min} = 1,39$ -szer több energiát nyel el.

Mindebből arra a következtetésre jutunk, hogy ha a virágzat által elnyelt fényenergia lenne a legfontosabb tényező az érett napraforgófejek számára, akkor Dél-Svédországban a virágzat ideális azimutja szinte pontosan nyugat lenne. Másrészt, ha a fejhát által elnyelt fényenergia maximalizálása lenne a növény célja, akkor Dél-Svédországban a napraforgó-virágzat ideális azimutszöge $\alpha_n = -125^\circ$ (északkelet) lenne.

A 8. ábra szerint, amint a tenyésztésterület Olaszországtól, Magyarországon és Boone County-n át Svédországig változik, a keletre néző érett napraforgó-virágzatok által elnyelt fényenergia csökken.

Ugyanez igaz az érett napraforgófejek háta által elnyelt energiára, az azimutszögüktől függetlenül.

Az a végkövetkeztetésünk, hogy az érett napraforgó-virágzatok keletre nézésének egyértelmű előnye, hogy maximalizálja a virágzat által elnyelt teljes fényenergiát, ha a délutánok felhősebbek, mint a délelőttök, amint az jellemző Boone County-ra, Közép-Olaszországra és Közép-Magyarországra. Ez az energiátöbblet elsősorban annak köszönhető, hogy a virágzatnak nagy a fényelnyelése a spektrum közeli ultraibolya, ibolya, kék és vörös tartományában (7.a ábra). Ez az extra fényenergia kézenfekvő környezetoptikai magyarázatot ad arra a kérdésre, hogy miért a napraforgó-virágzat keleti irányultsága a legelőnyösebb a háziasított napraforgó származási helyére jellemző aszimmetrikus délelőtti-délutáni felhőviszonyok ($\sigma_{\text{délélőtt}} < \sigma_{\text{délután}}$) között.

Hogy a valós légköri sugárzási viszonyokat még jobban közelítsük, a fenti számításokat elvégeztük olyan direkt és diffúz sugárzási adatokkal is, amelyek az ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) ERA5 (European Re-Analysis generation 5) projektjéből származtak [17]. Ezen adatbázisból meghatároztuk a földfelszín egységnyi vízszintes felületére eső, a nap k -adik ($1 \leq k \leq 24$) $\Delta t = 1$ óra időtartamára átlagolt direkt napfény és diffúz égfény W_{Nap} és $W_{\text{diffúz}}$ energiafluxusát (W/m^2) a 2009 és 2019 közötti évtizedre átlagolva, az észak-amerikai Boone County ($39,0^\circ \text{ É}, -84,75^\circ \text{ K}$, helyi idő: UTC -5 óra), Tennessee ($35,5^\circ \text{ É}, -88,25^\circ \text{ K}$, UTC -6 ó) és Georgia ($31,25^\circ \text{ É}, -83,25^\circ \text{ K}$, UTC -5 ó), valamint az európai Közép-Olaszország ($41,0^\circ \text{ É}, 15,0^\circ \text{ K}$, UTC +1 ó), Közép-Magyarország ($47,0^\circ \text{ É}, 19,0^\circ \text{ K}$, UTC +1 ó) és Dél-Svédország ($58,0^\circ \text{ É}, 13,0^\circ \text{ K}$, UTC +1 ó) régiói esetén. E meteorológiai sugárzási adatok felhasználásával kapjuk a napraforgó-virágzat egységnyi felülete

hasonló eredményre jutottunk, mint Boone Countyban (8. ábra, 2. táblázat): az $e_{\text{virágzat}}(\alpha_n)$ elsődleges maximuma $\alpha_n = -92^\circ$ (Olaszország) és $\alpha_n = -91^\circ$ (Magyarország) azimutszögnél van, míg $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ elsődleges maximuma mindkét országban $\alpha_n = +125^\circ$ azimutszögnél. Továbbá, egy keletre néző napraforgó-virágzat 5 (Olaszország) és 7 (Magyarország) százalékkal több energiát nyel el, mint egy nyugatra néző. Végül, egy keletre néző virágzat 75 (Olaszország) és 57 (Magyarország) százalékkal több energiát nyel el, mint egy délre néző. E hasonlóságok oka, hogy Olaszországban és Magyarországon is a délutánok felhősebbek a délelőttöknél, úgy mint Boone Countyban (4.a-c ábra).

Ezzel szemben, a napraforgószezonban Dél-Svédországban a délelőttök felhősebbek a délutánoknál, vagyis $\sigma_{\text{délélőtt}} > \sigma_{\text{délután}}$ (4.d ábra), aminek következményei: egy svéd napraforgó-virágzat maximális fényenergiát $\alpha_{\max 1} = +92^\circ$ azimutszög esetén nyel el, ami majdnem megegyezik a nyugati iránnyal ($\alpha_{\text{nyugat}} = +90^\circ$). $e_{\text{virágzat}}(\alpha_n)$ másodlagos maximuma $\alpha_{\max 2} = -88^\circ$ azimutszögnél van, ami gyakorlatilag kelet ($\alpha_{\text{kelet}} = -90^\circ$). $e_{\text{virágzat}}(\alpha_n)$ minimuma $\alpha_{\min} = +1^\circ$ azimutszögnél van, ami lényegében dél ($\alpha_{\text{dél}} = 0^\circ$). Egy nyugatra néző virágzat rendre 5 és 34%-kal több fényenergiát nyel el, mint egy keletre és délre néző, míg egy dél helyett kelet felé néző virágzat 28%-kal több energiát nyel el.

Dél-Svédországban az érett napraforgófej háta $\alpha_{\max 1} = -125^\circ$ azimutszögnél nyel el maximális fényenergiát. Az $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ függvénynek $\alpha_{\max 2} = +125^\circ$ azimutszögnél van másodlagos maximuma és $\alpha_{\min} = +5^\circ$ azimutszögnél minimuma. Egy északkelet felé néző virágzatú fej hátsó oldala rendre $e_{\max 1}/e_{\max 2} = 1,02$ és $e_{\max 1}/e_{\min} = 1,41$ -szer több fényenergiát nyel el, mint egy északnyugatra és dél felé néző virágzatú fej háta (2. táblázat). Továbbá, azon napraforgófej háta, aminek

által a fej napkövetésének leállításától a magérés végéig elnyelt teljes fényenergiát:

$$e_{\text{virág}} = \sum_{i=1}^{i=m} [e_{\text{Nap, virág, } i}(\theta_n, \alpha_n) + e_{\text{diffúz, virág, } i}(\theta_n, \alpha_n)],$$

$$e_{\text{Nap, virág, } i}(\theta_n, \alpha_n) = \sum_{k=1}^{k=24} \cos\gamma(k, \theta_n, \alpha_n) \frac{W_{\text{Nap}}(k) \Delta t}{\sin\theta_s^i(k)}, \quad (24)$$

$$e_{\text{diffúz, virág, } i}(\theta_n, \alpha_n) = \frac{2\theta_n + \pi}{2\pi} \sum_{k=1}^{k=24} W_{\text{diffúz}}(k) \Delta t,$$

ahol $i = 1$ a virágzat napkövetésének leállta utáni 1. napot jelöli, míg $i = m$ a magérés utolsó napjának felel meg, k ($1 \leq k \leq 24$) a k -adik $\Delta t = 1$ órás időtartam egy napon belül, $\cos\gamma$ kifejezését (11) adja, és

$$\frac{2\theta_n + \pi}{2\pi}$$

az égbolt azon hányada, ahonnan a virágzat diffúz égfényt kap (2. ábra). Hasonlóan adódik a napraforgófejhát egységnyi felülete által ugyanezen időszakban elnyelt teljes fényenergia:

$$e_{\text{hát}} = \sum_{i=1}^{i=m} [e_{\text{Nap, hát, } i}(\theta_n, \alpha_n) + e_{\text{diffúz, hát, } i}(\theta_n, \alpha_n)],$$

$$e_{\text{Nap, hát, } i}(\theta_n, \alpha_n) = \sum_{k=1}^{k=24} -\cos\gamma(k, \theta_n, \alpha_n) \frac{W_{\text{Nap}}(k) \Delta t}{\sin\theta_s^i(k)}, \quad (25)$$

$$e_{\text{diffúz, hát, } i}(\theta_n, \alpha_n) = \frac{\pi - 2\theta_n}{2\pi} \sum_{k=1}^{k=24} W_{\text{diffúz}}(k) \Delta t,$$

ahol

$$\frac{\pi - 2\theta_n}{2\pi}$$

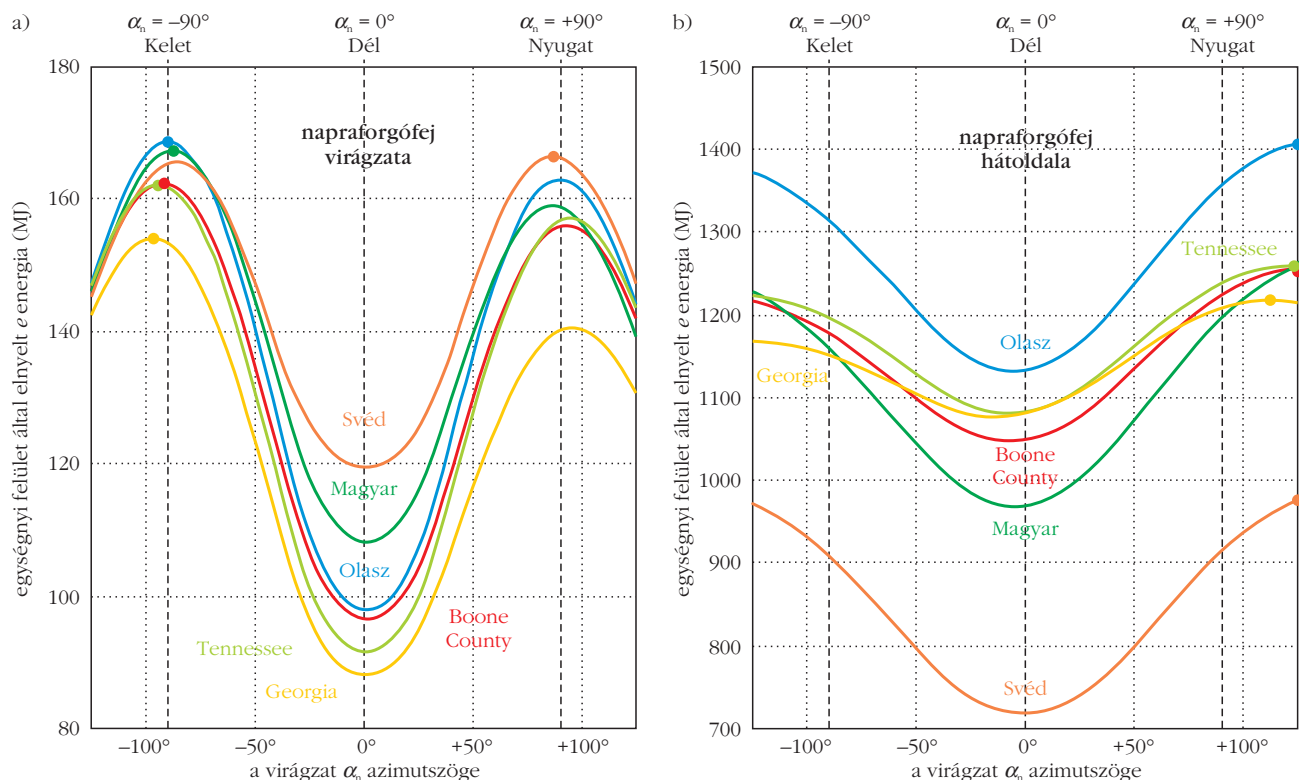
az égbolt azon hányada, ahonnan a fejhát diffúz égfényt kap (2. ábra). A számítógépes integrálásakor a (25) szerinti $e_{\text{Nap, hát, } i}(\theta_n, \alpha_n)$ komponens csak akkor növekszik, amikor a fejhát közvetlen napfényt kap, vagyis amikor a $-1 < \cos\gamma(k) < 0$ feltétel teljesül. Mivel ekkor $\cos\gamma < 0$, ezért a (25)-beli $\cos\gamma$ előtt negatív előjel szükséges.

A fenti számítások eredményeit a 9. ábra és a 3. táblázat foglalja össze Boone County, Tennessee, Georgia (ahonnan a házasított napraforgó származik), Közép-Olaszország, Közép-Magyarország és Dél-Svédország esetén. Mind a hat régióra az $e_{\text{virág}}(\alpha_n)$ és $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ görbék minimuma közel délen van ($\alpha_{\text{min}} \approx \alpha_{\text{dél}} = 0^\circ$), továbbá a napraforgófejhát 6-8-szor több fényenergiát kap, mint a virágzat. Az első öt régióban a virágzat rendre $\alpha_{\text{max1}} = -92^\circ, -94^\circ, -96^\circ, -90^\circ$ és -87° azimutszögeknél részesül a legtöbb fényenergiában, ami lényegében keletnek ($\alpha_{\text{kelet}} = -90^\circ$) felel meg. Az $e_{\text{virág}}(\alpha_n)$ görbék másodlagos maximuma $\alpha_{\text{max2}} = +93^\circ, +95^\circ, +97^\circ, +90^\circ, +87^\circ$ azimutszögeknél van, azaz gyakorlatilag nyugaton ($\alpha_{\text{nyugat}} = +90^\circ$). Egy keletre néző virágzat $e_{\text{max1}}/e_{\text{max2}} = 1,04, 1,03, 1,10, 1,03, 1,05$ -szor, illetve $e_{\text{max1}}/e_{\text{min}} = 1,68, 1,77, 1,75, 1,72, 1,54$ -szor több energiát kap, mint egy nyugatra, illetve délre néző. Másrészt, egy dél helyett nyugatra néző virágzat $e_{\text{max2}}/e_{\text{min}} = 1,61, 1,71, 1,59, 1,66, 1,47$ -szor több energiában részesül.

A szóban forgó első öt régióban a napraforgó fejháta $\alpha_{\text{max1}} = +125^\circ, +121^\circ, +112^\circ, +125^\circ$ és $+125^\circ$ északnyugati azimutoknál kap legtöbb fényenergiát (9. ábra, 3. táblázat). Az $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ görbék másodlagos maximuma $\alpha_{\text{max2}} = -125^\circ$ északkeleti azimutszögnél van. Egy napraforgófejháta, aminek virágzata északnyugatra néz $e_{\text{max1}}/e_{\text{max2}} = 1,03, 1,03, 1,04, 1,03, 1,02$ -szor, illetve $e_{\text{max1}}/e_{\text{min}} = 1,20, 1,16, 1,13, 1,24, 1,30$ -szor több fényenergiában részesül, mint egy olyan fejháta, aminek virágzata északkeletre, illetve délre néz. Egy napraforgófejháta, aminek virágzata dél helyett északkeletre néz, $e_{\text{max2}}/e_{\text{min}} = 1,16, 1,13, 1,09, 1,21, 1,27$ -szor több energiát kap.

A fentiekből következik, hogy ha a napraforgók számára a virágzatukat érő fényenergia maximalizálása a legfontosabb, akkor a szóban forgó első öt régióban kelet a virágzat ideális azimutiránya, mert a keletre néző virágzatok 3–10%-kal, illetve 54–77%-kal több energiát kapnak, mint a nyugatra, illetve délre nézők. Ennek oka, hogy e régiókban a délutánok felhősebbek a délelőttöknél a napraforgók tenyészidejében.

Dél-Svédországban más a helyzet, mivel ott nyáron a délelőttök felhősebbek a délutánoknál, aminek következménye, hogy a svéd napraforgó-virágzatok $\alpha_{\text{max1}} = +87^\circ$ azimutszögnél kapják a legtöbb fényenergiát, ami gyakorlatilag nyugatnak ($\alpha_{\text{nyugat}} = +90^\circ$) felel meg (3. táblázat). Az $e_{\text{virág}}(\alpha_n)$ görbe másodlagos maximuma $\alpha_{\text{max2}} = -85^\circ$ azimutszögnél van (9. ábra), ami lényegében kelet ($\alpha_{\text{kelet}} = -90^\circ$). Egy nyugatra néző svéd napraforgó-virágzat 1%-kal, illetve 39%-kal több fényenergiában részesül, mint egy keletre, illetve délre néző, míg egy dél helyett keletre néző virágzat 39%-kal több energiát kap. Dél-Svédországban a napraforgófejhátak $\alpha_{\text{max1}} = +125^\circ$ azimutszögnél kapják a legtöbb fényenergiát. Az $e_{\text{hát}}(\alpha_n)$ görbe $\alpha_{\text{max2}} = -125^\circ$ azimutszögnél rendelkezik másodlagos maximummal. Egy északnyugatra ($\alpha_n = +125^\circ$) néző virágzatú napraforgófejháta $e_{\text{max1}}/e_{\text{max2}} = 1,01$ -szor, illetve $e_{\text{max1}}/e_{\text{min}} = 1,36$ -szor több fényenergiát kap, mint egy olyan fejhát, aminek virágzata északkeletre



9. ábra. Egy napraforgófej virágzata (a) és hátoldala (b) egységnyi felülete által elnyelt e teljes fényenergia a virágképzés (július 1.) és öregezés (szeptember 7.) között a virágzat normálvektorának α_n azimuttszöge függvényében Boone County, Tennessee, Georgia, Közép-Olaszország, Közép-Magyarország és Dél-Svédország régiókban. A görbék elsődleges maximumait pontok jelzik.

($\alpha_n = -125^\circ$), illetve délre ($\alpha_n = 0^\circ$) néz (9. ábra, 3. táblázat). Egy dél ($\alpha_n = 0^\circ$) helyett északkeletre ($\alpha_n = -125^\circ$) néző virágzattal bíró napraforgófej háta $e_{\max 2}/e_{\min} = 1,35$ -szor több energiában részesül. Mindezek szerint, ha a napraforgók számára a virágzatukat érő fényenergia maximalizálása a legfontosabb, akkor Dél-Svédországban az $\alpha_n = +87^\circ$ nyugati azimuttszög lenne a virágzat ideális iránya. Ugyanakkor, ha a napraforgók számára a fejhátukat érő fényenergia maxi-

malizálása lenne a legfontosabb, akkor Dél-Svédországban az $\alpha_n = +125^\circ$ északnyugati azimuttszög lenne a virágzat ideális iránya.

Vegyünk észre, hogy a meteorológiai direkt és diffúz sugárméréseken alapuló eredmények kvalitatíven azonosak a légköri sugárzási modellszámításainkból kapottakkal [2], miáltal ugyanarra a végkövetkeztetésre vezetnek. Mindez e kissé eltérő két számítási módszer helyességét tükrözi.

3. táblázat

A virágképzés (július 1.) és öregezés (szeptember 7.) között egy napraforgófej virágzata és hátoldala egységnyi felülete által elnyelt teljes fényenergiák, azok arányai és maximumhelyei Boone County, Tennessee, Georgia, Közép-Olaszország, Közép-Magyarország és Dél-Svédország régiókban.

	Boone County		Tennessee		Georgia		Közép-Olaszország		Közép-Magyarország		Dél-Svédország	
	virág	hát	virág	hát	virág	hát	virág	hát	virág	hát	virág	hát
$e_{\max 1}$ (MJ)	162,4	1256,0	162,2	1258,8	154,1	1217,3	168,6	1407,8	167,2	1258,5	166,4	977,0
$e_{\max 2}$ (MJ)	156,0	1217,2	157,2	1223,5	140,5	1168,7	163,0	1372,9	158,9	1229,5	165,5	972,0
e_{\min} (MJ)	96,7	1048,4	91,7	1082,8	88,2	1077,3	98,0	1133,8	108,3	970,2	119,4	719,2
$e_{\max 1}/e_{\max 2}$	1,04	1,03	1,03	1,03	1,10	1,04	1,03	1,03	1,05	1,02	1,01	1,01
$e_{\max 1}/e_{\min}$	1,68	1,20	1,77	1,16	1,75	1,13	1,72	1,24	1,54	1,30	1,39	1,36
$e_{\max 2}/e_{\min}$	1,61	1,16	1,71	1,13	1,59	1,09	1,66	1,21	1,47	1,27	1,39	1,35
$\alpha_{\max 1}$	-92°	+125°	-94°	+121°	-96°	+112°	-90°	+125°	-87°	+125°	+87°	+125°
$\alpha_{\max 2}$	+93°	-125°	+95°	-125°	+97°	-125°	+90°	-125°	+87°	-125°	-85°	-125°
α_{\min}	+3°	-8°	+2°	-8°	+1°	-16°	+1°	-5°	+2°	-2°	+2°	0°

Az eredmények értelmezése és elemzése

A napraforgóban (*Helianthus annuus*) a fény nagy részét a levelek gyűjtik össze, a szár és a levélgyekek csak kevesebb, mint 5%-kal járulnak hozzá a teljes fényelnyeléshez. A napraforgófej által elnyelt nagy fényenergia növeli a szerv hőmérsékletét, miáltal felgyorsítja fejlődését, különösen a magok növekedését. Az érett napraforgó-virágzatok állandó keleti irányultságának Bevezetésben említett hat magyarázata egyelőre csak hipotetikus, mert kísérletekkel nincs alátámasztva. A napraforgó-virágzat keletre nézésének magyarázata céljából meghatároztuk a fej által elnyelt összes fényenergiát a virágképzés (amikor leáll a napkövetés) és a teljes öregedés közti időszakban a virágzat azimutiránya függvényében, különböző felhővalószínűségeket mellett [2]. Megállapítottuk, hogy a virágzat által elnyelt fényenergia maximumát biztosító ideális azimut a keleti irány, ha a délelőttök átlagban kevésbé felhősök a délutánoknál (8., 9. ábra).

Az erősen lefelé hajló, idősebb napraforgófejeknek kifelé domborodó felülete lehet a számításainkban feltételezett sík helyett. Alacsonyabb napmagasságok esetén az ilyen domború felületek több közvetlen napfényt kapnak, mint sík társaik. Így a sík napraforgó-virágzatot feltételező számítások kissé alulbecsülik az elnyelt teljes fényenergiát, de végkövetkeztetéseinket nem módosítják.

Mivel a különböző földrajzi régiókban eltérő a felhőzottság napi menete és délelőtti-délutáni aszimmetriája, fölmerül a kérdés: miért néznek az érett napraforgó-virágzatok mindig keletre, függetlenül a földrajzi fekvéstől? Ennek oka az a tény, hogy a házasított napraforgó Észak-Amerika keleti részéről származik [11], aminek felhőviszonyai Boone County-éhoz, Georgia-éhoz és Tennessee-éhez hasonlóak. Ezért először Boone County, Georgia és Tennessee földrajzi helyére és felhővalószínűségére végeztük számításainkat (majd Olaszországra és Magyarországra), ahol a délutánok felhősebbek a délelőttöknél, s aminek következménye, hogy a napraforgó-virágzatok akkor nyelnek el maximális fényenergiát, ha keletre néznek. Ezen ideális keleti orientáció genetikailag kódolva rögzült a házasított napraforgóban, ami aztán később elterjedt az egész Földön. Ellenpróbaként szemléltettük, hogy ha a délelőttök felhősebbek a délutánoknál – mint például Dél-Svédországban –, akkor az érett napraforgó-virágzatok abban az esetben nyelnek el maximális fényenergiát, ha nyugatra néznek. Ennek ellenére a svéd napraforgók virágzatai is kelet felé néznek (amint azt svéd biológus kollégáinktól is tudjuk), mert a faj házasítása óta eltelt viszonylag rövid idő (néhány száz év) során még nem tudtak alkalmazkodni a helyi felhőviszonyokhoz. Úgy gondoljuk, hogy a szóban forgó genetikai kódolás lehet annak az oka, hogy a napraforgó-virágzatok keleti orientációjuk független a regionális felhőviszonyoktól.

Amint a 2. és 3. táblázat mutatja, az érett napraforgófej háta 4-5-ször, illetve 6-8-ször több fényenergiát

nyel el, mint virágzata. Ennek fő oka, hogy a virágzat vízszintestől mért normálvektorának θ_n elevációs szöge meredeken csökken a virágképzéskori $+10^\circ$ -ról a minimális -75° -ra a virágképzést követő 42. napon (6. ábra). Így a virágképzés utáni 2.–3. héten a virágzat jelentősen lecsökkent fényintenzitást kap. A fejhát kezdetben zöld, később sárgászöld a fotoszintézis végző klorofill miatt (a zöld növények főként a spektrum kék és vörös összetevőit igénylik a fotoszintézisükhöz). Ha a napraforgófejek a fotoszintetikus aktivitásuk maximalizálására törekednének, akkor a hátoldaluk által elnyelt fényenergiát kellene maximalizálniuk, amihez a virágzatok északnyugati $\alpha_n = +112^\circ - +125^\circ$ azimutszögek lennének ideálisak. Azonban a feltételezést nem támasztja alá az a tény, hogy az érett napraforgó-virágzatok kelet ($\alpha_{kelet} = -90^\circ$) felé néznek. Következésképpen, a zöld fejhát funkciója inkább a zöld levelekéhez hasonlít: részt venni a fotoszintézisben, függetlenül a virágzat azimutszögétől és elevációjától. A virágzaton kívül, a napraforgó minden föld fölötti része hozzájárul a fotoszintézishez a zöld klorofilltartalmának köszönhetően.

Azt találtuk, hogy ha a délutánok felhősebbek a délelőttöknél, akkor a virágzat által elnyelt teljes fényenergia $\alpha_{max} = -87^\circ - -96^\circ$ azimutszögeknél maximális, ami gyakorlatilag a keleti iránnyal ($\alpha_{kelet} = -90^\circ$) esik egybe. Ez magyarázhatja a Boone County, Georgia és Tennessee régióiból származó napraforgók (valamint Olaszország és Magyarország) érett virágzatainak keletre nézését, ahol a vegetációs időszakban a délutánok valóban felhősebbek, mint a délelőttök.

Röviden elemezzük a napraforgó-virágzatok keleti irányultságának lehetséges előnyeit magyarázó hat korábbi hipotézist:

1. Seiler [8] szerint, ha az érett napraforgófejek virágzata nem az ég felé irányul, akkor csökkenhet a magevő madarak miatti magveszteség. E hipotézist támogatja azon kvalitatív megfigyelésünk, miszerint a vízszinteshez képest meredekebb síkú napraforgófejek szélén megkapaszkodó madarak könnyebben tudják a magokat kicsipegetni, mint a kevésbé meredek, jobban lefelé néző fejeken. A madarak általában a napraforgófej legfelső szélére szállnak le, mert legkönnyebben a legfelső magokat képesek kicsipegetni (10.a-d ábra a következő oldalon). Ha a fej kevésbé meredek, akkor a madarak nehezebben férnek hozzá a lefelé néző magokhoz (10.e-f ábra). Mindez azonban független a fej azimutszögétől, így Seiler [8] hipotézise képtelen megmagyarázni a napraforgó-virágzatok keletre nézését.

2. Lesbem [5], valamint Lang és Begg [4] hipotézise szerint, az érett napraforgó-virágzat keleti irányultságának az lehet az előnye, hogy csökkenti a hőterhelést a déli órákban. Azonban a nyugatra néző virágzatoknak ugyanez lenne az előnyük, továbbá megmutattuk, hogy a délre néző virágzatok nyelik el a legkevesebb fényenergiát (8., 9. ábra), amely effektus jelentősen csökkenti a dél környéki hőterhelést [2]. Ezért a napraforgó-virágzat keleti orientációjának a magyarázatát nem támogatják az eredményeink.

3. Lang és Begg [4] azt is feltételezte, hogy a Napot már nem követő napraforgóvirágzatok keleti irányultsága kora délelőtt erősebb napfénybesugárzást tesz lehetővé, ami felgyorsíthatja a virágzaton kicsapódott harmat elpárolgását, miáltal csökkentheti a gombásodás veszélyét. Ezt az elképzelést támasztja alá azon eredményünk [2], hogy a keletre néző virágzatok nyelnek el maximális fényenergiát (8., 9. ábra). Ugyanakkor, a természetesen keletre néző napraforgóvirágzatoknak a mesterségesen nyugatra vagy dél felé irányított virágzatokhoz képest feltételezett csökkent gombásodását jövőbeli terepkísérletekben még ellenőrizni szükséges.

4. Lamprecht és társai [9] szerint, az érett napraforgóvirágzatok keleti irányultsága miatti erősebb délelőtti beeső napsugárzás vonzóbbá teheti őket a beporzó rovarok számára, amely időszak egybeesik a virágpor portokbeli megjelenésével. E hipotézissel is összhangban vannak az eredményeink (8., 9. ábra). Mindazonáltal, terepkísérletekben még ellenőrizni kell, hogy a maguktól keletre néző napraforgóvirágzatok valóban vonzóbbak-e a beporzók számára, mint a mesterségesen nyugatra vagy délre irányított virágzatok.

5. Seiler [8] azt is feltételezte, hogy az érett napraforgóvirágzatok keletre nézése csökkentheti a hőterhelést, főleg a délutáni nagy besugárzású időszakban. Azonban megmutattuk [2], hogy a keletre néző napraforgóvirágzatok által elnyelt fényenergia nagyobb, mint a nyugat vagy dél felé nézőké (8., 9. ábra), amely eredmény nem támasztja alá e hipotézist.

6. Ploschuk és Hall [10] a Napot nem követő napraforgóvirágzatok keletre nézését az alacsonyabb fejhőmérséklettel próbálta magyarázni, ami előnyös lehet a magok éréséhez és növekedéséhez. A napraforgófej hőmérsékletét főleg a virágzat és a fejhát által elnyelt összenergia határozza meg. A 2. és 3. táblázat szerint, Boone County-ban, Georgia-ban, Tennesseeben, Közép-Olaszországban, Közép-Magyarországon és Dél-Svédországban a virágzat és a fejhát által elnyelt fényenergia minimuma a délihez ($\alpha_{\text{dél}} = 0^\circ$) közeli $\alpha_{\text{min}} \approx 0^\circ$ azimutszögnél van [2]. Következésképpen, e magyarázat is megalapozatlannak tűnik.



10. ábra. (a, b, c) A vízszinteshez képest meredekebb síkú napraforgófejek magjait a fejszélén megkapaszkodó madarak (piros) könnyebben ki tudják csipkedni. (d) Egy magevő madár sötét ürülete egy napraforgófej hátoldalán. (e, f) A lefelé néző napraforgófejek magjait nehezebben csipkedik ki a madarak. A kicsipkedett sötétszürke magvak után maradt lyukak jól láthatók az a-c képeken (Horváth Gábor fényképei).

A keletre néző napraforgóvirágzat nyugat, illetve dél felé néző virágzathoz képesti 3–10%, illetve 50–77% energiátöbblete előnyös lehet a mag fejlődéséhez és éréséhez. Továbbá, e többletenergia felgyorsíthatja a virágzatra lecsapódott hajnali harmat elpárolgását, ami csökkentheti a gombásodás veszélyét, amint azt Lang és Begg [4] feltételezte. E többletenergia egy másik előnye az lehet, hogy a délelőtt aktív beporzók erősebben vonzódnak a keletre néző virágzatokhoz, amint azt Lamprecht és társai [9], valamint Atamian és társai [7] feltételezték. Ennélfogva, a napraforgóvirágzat keleti orientációjának előnyére általunk adott környezetoptikai magyarázat [2] összhangban áll e két korábbi hipotézissel.

A napraforgóvirágzatok ideális keleti azimutiránya meglepő lehet, mert a déli irányt gondolhatnánk ideálisnak, tekintve, hogy délben a legerősebb a földfelszínre érő napsugárzás. Noha a közvetlen napsugarak délben a legintenzívebbek, egy délre néző ferde síkú ($\theta_n < +40^\circ$, 6. ábra) napraforgóvirágzatot mégis olyan nagy γ beesési szögek alatt érik (ahol γ a virág-

zat \mathbf{n} normálvektora és a Nap felé mutató \mathbf{s} egységvektor közti szög, *1. ábra*), hogy a virágzat által elnyelt, $\cos\gamma$ -val arányos fényenergia kisebb lesz ahhoz képest, mint amikor keletre néz a virágzat. Habár a délelőtti és délutáni közvetlen napsugarak a délinél kisebb intenzitásúak, a keletre vagy nyugatra néző ferde ($\theta_n < +40^\circ$) napraforgó-virágzatot kisebb γ beesési szögek alatt érik, így az elnyelt fényenergia nagyobb lesz a délre néző virágzathoz képest. Állandóan tiszta égbolt alatt, a napraforgó-virágzat ideális keleti és nyugati azimuttszögei (amelyeknél maximális egy adott dőlésszögű virágzat által elnyelt fényenergia) tükörszimmetrikusak lennének a déli irányra. Azonban e szimmetria sérül, ha a délutáni felhővalószínűség nagyobb a délelőttinél, amint ez így van a házasított napraforgó származási helyén (*4.a ábra*).

Ilyen aszimmetrikus felhőviszonyok közepette a napraforgó-virágzatok fényenergetikailag ideális azimutiránya a kelet (*8., 9. ábra*).

Irodalom

2. Horváth G., Slíz-Balogh J., Horváth Á., Egri Á., Virágh B., Horváth D., Jánosi I. M.: Sunflower inflorescences absorb maximum light energy if they face east and afternoons are cloudier than mornings. *Scientific Reports* 10 (2020) 21597. (doi: 10.1038/s41598-020-78243-z)
17. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Holm E., Janiskova M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thepaut J. N.: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146 (2020) 1999.