

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXIII. évfolyam

9. szám

2013. szeptember

SZÍNEK HARMÓNIAJA: A BOGLÁRKALEPKÉK SZERKEZETI KÉK SZÍNÉNEK FAJFELISMERÉSI SZEREPE – II. RÉSZ

Kertész Krisztián, Piszter Gábor, Vértesy Zofia, Biró László Péter
MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet¹
Bálint Zsolt
Magyar Természettudományi Múzeum²

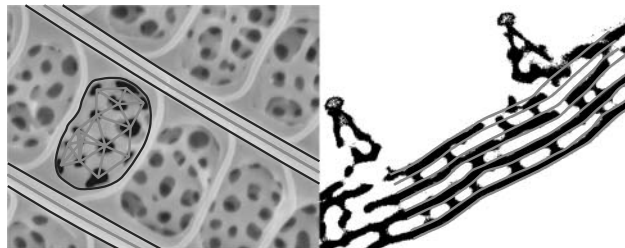
Szárnypikkelyek szerkezeti felépítése

Amint az a SEM és TEM felvételeken látható (1. *ábra* az előző szám hátsó belső borítóján), minden vizsgált lepkefaj pikkelyeiben jellegzetes szivacsos szerkezet található. A képeket szemlélve megfigyelhetünk eltéréseket, de pontos mennyiségi különbségek megállapítása lehetetlennek látszik. A SEM képekből a pikkelygerincek, keresztbordák és a legfelső lyukacsos réteg méretei nyerhetők ki, míg a mélységi adatokhoz a TEM képeket használhatjuk. A szivacsos szerű nanoszerkezet adatai az „ablak”-nak nevezett egységből (két gerinc és két keresztborda által meghatározott terület) származnak. Az összes adat három csoportra osztható: gerincek és keresztbordák távolságai és szélességei, a szivacsos szerkezet jellemzői, valamint a TEM képekről leolvasható rétegvastagságok és távolságok (2. *ábra*). Így összesen 24 adat nyerhető, de a további vizsgálataink szerint 9 paraméter (2. *táblázat*) elégséges az MNH (mesterséges neurális hálózat) elemzéshez. Összegezve, a 9 faj pikkelyein 450 ablakot mértünk meg, ezek fele az MNH-tanításban vett részt, a többi a tesztelésben. Az eredmények szerint (3. *táblázat*) a neurális hálózat a 255 ablakból 205-öt helyesen határozott meg, ami 91%-os találatot jelent.

Lepkeszárnyak optikai tulajdonságai

Korábban megmutattuk, hogy egy adott fajhoz tartozó egyedek színe gyakorlatilag megegyezik [8]. A fajok spektrális megkülönböztetésének automatizálását a normált és átlagolt visszaverési spektrumokon (3. *ábra*) végeztük. A spektrumok jellemzőit (4. *ábra*) a következő paraméterek határozzák meg: a csúcs maximumának hullámhossza, az intenzitás ebben a pontban, a csúcs területe és félértékszélessége, a csúcs talppontjainak helyzete és a félértékszélesség két oldalának értéke. Ez 8 paraméter csúcsonként, ami összesen a három csúcsra (a főmaximum, valamint balra két kisebb intenzitású csúcs) 24 bemeneti adatot jelent a mesterséges neurális hálózatba. Minden fajból legkevesebb 10 példányt mér-

2. *ábra*. A „Biophot Analyzer” program használata SEM és TEM képek feldolgozásához. Balra: a program felhasználói segítségével sötétben bejelöli a szerkezeti lyukak által elfoglalt részt, majd megadja az alakra és egymástól való távolságra vonatkozó statisztikát; ugyanitt mérődnek a szerkezeti gerincek és keresztbordák adatai is. Jobbra: a binarizált TEM képen a rétegek vastagsága és egymástól való távolsága mérhető (színesben lásd [7]).



A munka az OTKA PD 83483, és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

¹ www.nanotechnology.hu

² www.nhmus.hu

2. táblázat

A SEM és TEM felvételekből nyerhető legfontosabb 9 paraméter

1. a szivacsos szerkezet kitöltési tényezőjének (tömör/üres részek) átlaga
2. a szerkezeti lyukak körtől való eltérésének átlaga
3. a lyukba írható kör eltérésének átlaga a szerkezeti gerinckel párhuzamosan mért lyuk átmérőjétől
4. a lyukak tömegközéppontjának a szomszédoktól mért átlagos távolsága
5. a lyukak szomszédjainak átlagos száma
6. a lyukak első szomszédjainak maximális távolsága
7. gerincek átlagos szélessége
8. rétegszám a TEM képeken
9. átlagos rétegvastagság a TEM képeken

Összesen 225 ablak (a pikkely két gerince és két keresztbordája által meghatározott terület) adatai kerültek az MNH bemenetére.

tünk, amelynek fele vett részt az MNH tanításában. Az eredményeket a szerkezeti vizsgálathoz hasonlóan közöljük (4. táblázat), a spektrumok alapján végzett faj szerinti osztályozásban a találati pontosság 96% volt.

A lepkefajok rajzasi eloszlása egy vegetációs időszak (év) alatt

A rajzasi időszakok meghatározására a lepkék befogási idejét használtuk fel. Ehhez a Természettudományi Múzeum Állattárában feljegyeztük 285 lepke befogási idejét (hónap, nap), és ezt egy hisztogramban ábrázoltuk (5. ábra). A lejegyzett minták nagy száma szükséges az eloszlás követése és az évenkénti eltérő éghajlati viszonyok hatásának átlagolása miatt.

A lepkék látására vonatkoztatott szintér

A színek megkülönböztetésére használt egyik ábrázolási mód a CIE (Commission internationale de l'éclairage) szín-inger-háromszög [10], amely a színek emberi látáshoz illeszkedő kétdimenziós megjelenítése. Korábban már végeztünk ehhez hasonló vizsgálatot [8], viszont figyelembe kell venni, hogy a vizsgált lepkék nem az emberre jellemző há-

3. táblázat

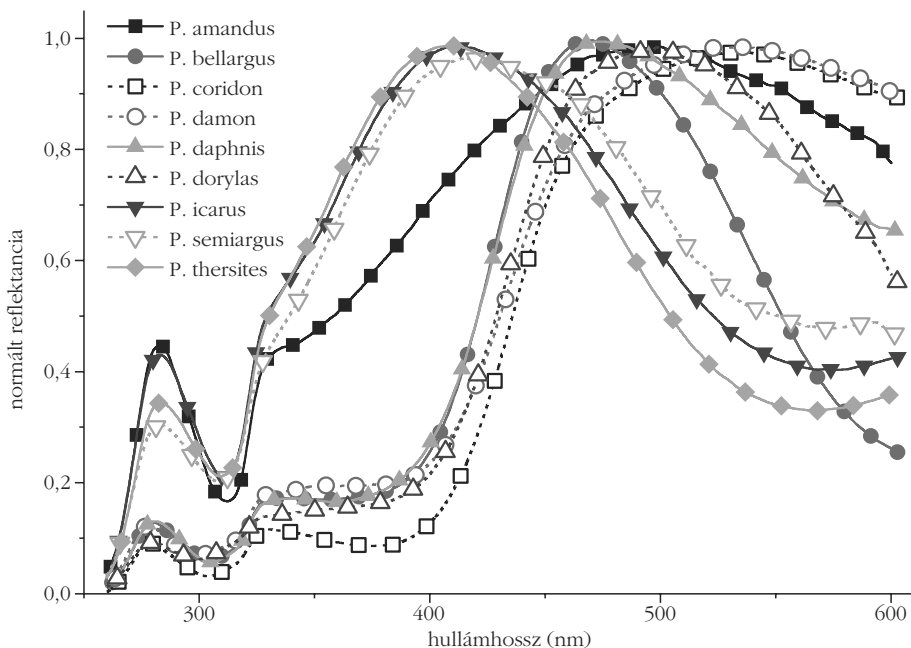
Az MNH kimeneti találat/tévedés táblája a szerkezeti adatokra

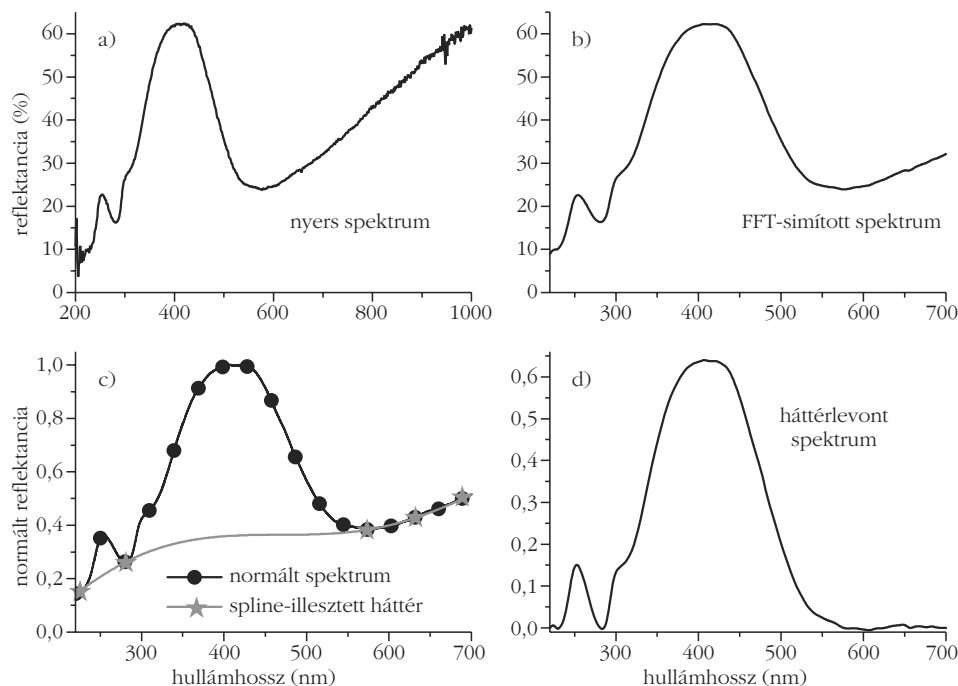
eltalált/várt	<i>amandus</i>	<i>bellargus</i>	<i>coridon</i>	<i>damon</i>	<i>daphnis</i>	<i>dorylas</i>	<i>icarus</i>	<i>semiargus</i>	<i>thersites</i>
<i>amandus</i>	14	0	0	2	0	0	0	2	0
<i>bellargus</i>	0	28	0	0	0	0	0	0	0
<i>coridon</i>	0	0	45	0	0	0	0	0	0
<i>damon</i>	1	0	0	29	0	1	0	1	0
<i>daphnis</i>	0	0	0	0	15	0	0	0	0
<i>dorylas</i>	0	0	0	0	0	13	1	0	0
<i>icarus</i>	2	0	0	0	0	0	41	1	0
<i>semiargus</i>	1	0	0	0	0	0	2	7	2
<i>thersites</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	13

A helyes válaszok az átlón vannak. 225 ablak (a pikkely két gerince és két keresztbordája által meghatározott terület) adatai tesztelésre, és ugyanennyi a hálózat betanítására lett felhasználva. A helyes találatok aránya 91%.

romféle szín érzékelésére képes fotoreceptorokkal rendelkeznek, hanem ez kiegészül egy negyedik érzékelővel az ultraibolya (UV) tartományban. Ez a tény a színek minőségileg más jellegű megkülönböztetését teszi lehetővé. Hogy megtudjuk, miként látják egymást ezek a lepkék, a CIE szín-inger-mérő rendszerre alapozva háromdimenziós leképezést készítettünk (lásd [7], 5. függelék). A kapott adatokat ábrázolva (6. ábra és [7], 2. függelék) láthatjuk, ahogy az egyes lepkefajok jobban elkülönülnek, mint a korábban használt CIE diagram esetében [8].

3. ábra. Kilenc lepkefaj kék szárnyának átlagolt fényvisszaverési spektruma. Az egyszerűbb összehasonlítást elősegítendő, a görbék a spektrum kék tartománybeli főmaximumára normáltak. Zajszűrésre FFT (Fast Fourier Transform) szűrőt használtunk (színesben lásd [7]).





4. ábra. Optikai spektrumok előfeldolgozása. (a) Nyers adatok. (b) FFT-szűrés utáni adatok. (c) Meghatározott pontokon (csillag) áthaladó közelítés megadása. (d) Az illesztett görbe levonása után kapott spektrum. Ezeket követően „Origin 8” program segítségével a spektrum csúcsainak helyzete, intenzitása, területe, félértékszélessége, a talppontok bal és jobb oldali helyzete, valamint a csúcsok bal és jobb oldali szélessége a magasság felénél került meghatározásra.

A kék szín szerepe a párkeresésben

Míg a kutatók a lepkeszárny fonák oldalának mintázatát használják a fajok azonosításra (ami laboratóriumi, preparált lepkék esetében jól működik), addig a repülő hím lepkéknek ezt a fajra jellemző apró mintázatot kellene felismerniük egy vizuálisan összetett növényi környezetben (harmincszorosan lassított videofelvétel: [7], 3. függelék). Hasonlóan, a nőtényeknek a gyors szárnymozgású hímeket kellene felismerniük (harmincszoro-

4. táblázat

Kimeneti találat/tévedés tábla a spektrális adatokra

eltalált/ várt	<i>amandus</i>	<i>bellargus</i>	<i>coridon</i>	<i>damon</i>	<i>dapbnis</i>	<i>dorylas</i>	<i>icarus</i>	<i>semiargus</i>	<i>thersites</i>
<i>amandus</i>	5	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>bellargus</i>	0	10	0	0	0	0	0	0	0
<i>coridon</i>	0	0	4	0	0	0	0	0	0
<i>damon</i>	0	0	1	5	0	0	0	0	0
<i>dapbnis</i>	0	0	0	0	5	0	0	0	0
<i>dorylas</i>	0	0	0	0	0	10	0	0	0
<i>icarus</i>	0	0	0	0	0	0	5	0	1
<i>semiargus</i>	0	0	0	0	0	0	0	5	0
<i>thersites</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	4

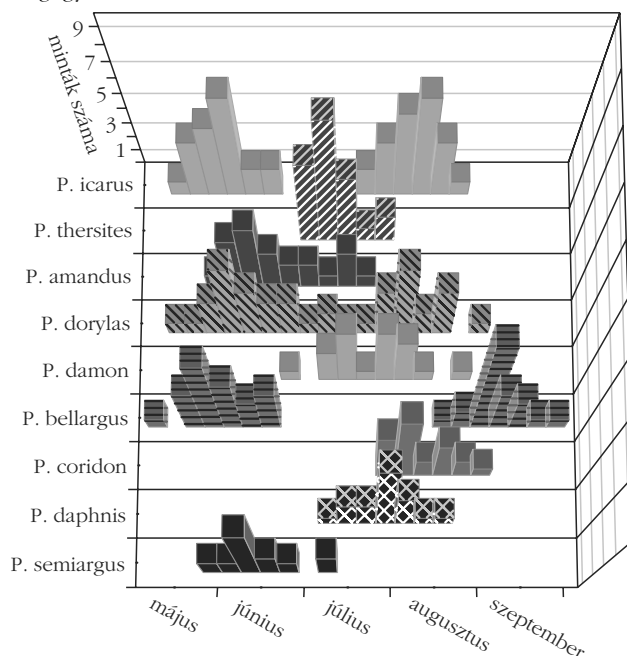
A helyes válaszok az átlón olvashatók. Teszt 55 példányon, a helyes találatok aránya 96%.

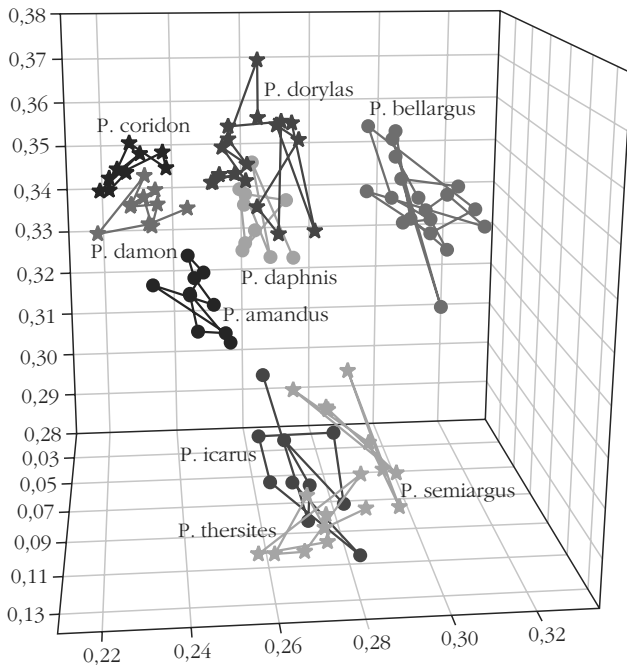
san lassított videofelvétel: [7], 1. függelék). Kérdéses, hogy a lepkék agya képes-e feldolgozni ilyen gyorsan a vizuális információkat (egy szárnycsapás 10-20 ms idejű) és a szárnyfonák bonyolult mintázatát sikeresen felismerni. Vegyük azt is figyelembe, hogy az egyes fajok szárnyfonájának mintázata legtöbbször csak kis mértékben tér el; továbbá, a lepkék között gyors röptűnek számító boglárkalepkéknél a távoli felismerés nagyon előnyös lehet, hogy megelőzhessék a sikertelen párzási próbálkozásokat.

A tanulmányozott hímek ugyan rendelkeznek illatpikkelyekkel, de ezek szerepe a párválasztásban csak részben tisztázott, és az eredmények arra utalnak, hogy szerepük nem

egyezik meg az éjszakai lepkéknél tapasztalt nagy távolságú, feromon alapú vonzással. A saját élőhelyükön történt megfigyelések alátámasztják, hogy a hímek és nőtények illatanyagainak is csak testközelből van szerepük. Nem ismert, hogy a vizsgált lepkéfajok ivarszervi szerkezete önmagában mennyire hatékonyan gátolja a kereszteződéseket (hibridek létrejöttét), hiszen a fajok mesterséges körülmények kö-

5. ábra. A vizsgált lepkéfajok időbeni előfordulása élőhelyükön. Jól megfigyelhetők az átfedő és az elkülönülő nemzedékek.





6. ábra. A megvizsgált lepkefajok elhelyezése a színtérben (lásd [7] 5. függelék). A pontok egyedeket jelölnek, a csoportosulások fajoknak felelnek meg. A hasonlóság a távolság csökkenésével növekszik.

zött párosíthatók. Ha az ivarszervek szerkezete eléggé eltérő is lenne, a párzási próbálkozást általában egy hosszas udvarlás előzi meg. Így nagyon fontos lehet bármilyen optikai vagy kémiai jelzés, ami segíti a fajok megkülönböztetését, hiszen ezáltal felesleges energiabefektetés előzhető meg. Kísérletileg is bizonyították a kémiai jelzés hatását a *Lycaeides argyrognomon* lepkefajnál: a hím által kibocsátott illatanyagok hatására a nőstény a befogadó testhelyzetet veszi fel.

A boglárkákra vonatkozóan az irodalom hivatkozik arra, hogy ha a nőstény vonzza a hímeket, akkor az közel repül és megkezd az udvarlást. Ez ellentmond annak az egyértelmű ténynek, hogy a hím minden tekintetben sokkal feltűnőbb. Ha a hím a látványában (sokkal élénkebb szín), az illatanyagok tekintetében (jelentős mennyiségű illatpikkely jelenléte miatt intenzívebb kémiai jelzés, mint a nősténynél) és a mozgékonyágában is feltűnőbb, felmerülhet a kérdés, hogy mi a nőstény jelzése? Szintén ez a kérdés vetődik fel, ha a nőstény szárnyfonákján található sárga foltokat tekintjük a legfontosabb jelzésnek. Ezek a foltok a hímek számára abban az optikailag bonyolult környezetben, ami a fűben üldögélő nőstényt körülveszi, gyakorlatilag láthatatlanok. A kísérletek szerint a *Polymmatius icarus* szeme a szárnyak kék színére a legérzékenyebb.

Szabadtéri megfigyeléseink és mások munkái is azt bizonyítják, hogy a nőstények és hímek viselkedése nagyon eltérő. A bából kikelt nőstények nem mutatkoznak, a növényzetben elbújva a kikelés helyén maradnak, és csak akkor repülnek, amikor a hím közeledik, hogy felhívják magukra a figyelmet. Bár szabad téren nem teszteltük, de az a hipotézisünk, hogy erre a hívó táncra csak akkor kerül sor, ha megfelelő színű

hím közeledik. A jelenség nehezen figyelhető meg, mivel a nőstények leginkább párzás, táplálkozás vagy petézés közben láthatók.

A szubtrópusi-trópusi erdőekben található rokon boglárkafajok más stratégiát alkalmaznak: a nőstények még a bábban tartózkodva erős illatanyagokat bocsátanak ki, és ezzel vonzzák a hímeket. A mérsékelt klímájú füves területeken nincs ilyen megfigyelés. A vizsgált boglárkafajok hernyói hangyák járataiban telelnek, onnan is kelnek ki, és amikor elhagyják a talajt, egy fűszálra kapaszkodva tudják a szárnyaikat kifeszíteni és megszáritani. Közvetlenül ezután a párkeresés és a párzás is megtörténik, ezért a gyűjteményekben is nehéz nem megtermékenyített nőstényt találni.

Szerkezeti és optikai tulajdonságok

Bár a pikkelyszerkezet teljes háromdimenziós szerkezetének feltárását leginkább a TEM tomográfia tenné lehetővé, SEM és ugyanolyan területről készített TEM képek megfelelően feldolgozva, elég sok jellemzőt megmutatnak. A cikkünkben vizsgált szárnypikkelyek első látásra nagyon hasonlóak, mégis jól érzékelhető az általuk keltett színkülönbsége. A szerkezet MNH-elemzése megmutatta, hogy a pikkelyek adatai jellemzőek az egyes fajokra. Korábban az *Albulina metallica* faj esetében megmutattuk, hogy a szivacsos szerkezet parányi eltérései miképpen befolyásolják a szárnyak színét [3]. A fényvisszaverés spektrális maximumának legfontosabb meghatározója a szivacsos szerkezetben a lyukak távolsága és a kitin kitöltési tényezője. A Biophot Analyzer programmal meg lehet határozni felszíni (SEM képek) és mélységi (TEM képek) adatokat is. A tárgyalt fajok esetében 9 adatot határoztunk meg a fajok hatékony megkülönböztetéséhez (2. táblázat). Megfelelően nagy számú bemeneti adat mellett automatikusan is el lehet különíteni az egyes fajokhoz tartozó mikroszkópos képeket. Az algoritmus által elkövetett legnagyobb hiba a 3. táblázatban a *P. icarus* faj *P. thersites*ként való azonosítása. Ezek visszaverési spektruma (3. ábra) nagyon hasonló, a spektrális adatokat összehasonlító MNH is itt követett el hibát (4. táblázat). A másik a *P. coridon* egyik példányának *P. damon*ként való azonosítása. Ez a hiba a lepkék életkorának előrehaladásával a felső rétegben levő kék pikkelyek elvesztésének tulajdonítható. A megmaradó alappikkelyek barna melanin festékanyagot tartalmaznak, és ez okozza a fényvisszaverés növekedését a 600-800 nm hullámhossztartományon.

Ha összességében tekintjük a szerkezet és a szín MNH-elemzését, láthatjuk, hogy a fajra jellemző színek illeszthetőek a fajra jellemző szerkezetekkel. Tekintettel arra, hogy a szerkezet SEM képeken szabad szemmel láthatóan nagyon kis megváltozása felelős a jelentős színi eltérésekért, a fotonikus nanoarchitektúra feltehetően rendkívül hatékonyan és stabilan van beírva a fajok genetikai állományába. Nagyon valószínű, hogy a nem megfelelő színnel (és szerkezettel) rendelkező

egyedek hamar kiküszöbölődnek a párzási folyamatból. Ez azt sugallja, hogy ahol a színnek szerepe van a kiválasztódásban, érdemes részletes szerkezeti és optikai elemzésnek alávetni a rokon fajok pikkelyszerkezeteit, mert egy ilyen munka számítógépes modellekkel kiegészítve új ötletekkel szolgálhat a bioinspirált fotonikus nanoszerkezetek tervezésében.

Figyelembe véve a lepkék szemében levő UV-érzékeny színérzékelő receptortípust is, a lepkék által érzékelt szintér egy dimenzióval kiegészül az emberi színlátáshoz képest. Így a 110 példány spektrumait egy 3D diagramon ábrázolhatjuk, ahol a pontok közötti kisebb távolságok a színek közötti kisebb különbségeket jelentenek, ahogy azt a lepkék látják. Következésképpen, az emberi szemhez illeszkedő 2D színingertérben részlegesen átfedő részek a 3D színingertérben jól elkülönülnek. Amint az elforgatott diagramon látszik ([7], 5. függelék), vannak olyan metszetek, ahol bizonyos lepkefajok átfednek, mégis összességében a 3D-ben elkülönülnek. A negyedik színérzékelő lehetővé teszi az UV tartományon belüli jobb szétválasztást, és ez éppen egybeesik azzal a hullámhossztartománnyal, ahol a kék szárnyak spektrális jellegzetességei vannak. Az alábbiakban a 3D színingerdigram és a repülésiidő-diagram együttes használatával megmutatjuk, hogy a különböző kék árnyalatú lepkék egy közös életterben lehetnek anélkül, hogy zavarnák egymás párzását, míg a közel azonos árnyalatú lepkék az év más szakában repülnek.

A hímek szárnyának kék színe

Színüket tekintve (1. és 3. ábra) három csoportra oszthatjuk a vizsgált fajokat, és ez a feloszthatóság látható a 3D színingerdigramon (6. ábra) is: lila (*P. icarus*, *P. semiargus* és *P. thersites*), égszínkék (*P. bellargus*, *P. daphnis* és *P. dorylas*) és zöldes (*P. amandus*, *P. coridon* és *P. damon*). A lila csoportban a visszaverési csúcs keskenyebb, mint a többi fajnál. Mivel a főmaximumok jól fedik egymást, szabad szemmel nehezen lehet megkülönböztetni a színüket (1. ábra). A másodlagos maximumoknak (250 nm körül) köszönhetően a 3D színingertérben jól elkülönülnek. A kék csoport spektruma kiszélesedik, a rövidebb hullámhosszú oldal helyzete nem változik, míg a hosszabb hullámhosszú lefutás jobbra tolódik. Egy plató is látható mindhárom spektrumon 325–400 nm között, ami egybeesik a lilák főmaximumának vállával. A 250 nm-nél látható másodlagos maximumok fedésben vannak. A zöldes csoportra a még erőteljesebb kiszélesedés jellemző. A *P. amandus* eltérő, amennyiben a visszaverési spektrumában egy határozott váll van 325 nm-nél, amint a lila csoportnál is láthattuk, és 250 nm körül van a másodlagos maximum. A zöldes csoport másik két tagja rövidebb hullámhosszúnál a kék csoport tagjaihoz hasonlít. Az 1. ábra SEM képein megfigyelhető, hogy a *P. amandus* szivacsos szerkezetének kitöltési tényezője nagyobb, mint a lila csoport tagjainak, míg a zöldes csoport

másik két tagja, amelyeknek szintén nagyobb a kitöltési tényezője, mint a kék csoportban, ezzel együtt szélesebb szórást mutat a lyukak méretében, mint a kékek esetén. Modellezéssel kiegészített további munkára van szükség, hogy mélységében megértsük a szerkezet és a spektrum összefüggését. A tény, miszerint az MNH 91%-os találattal képes az egyes fajokhoz tartozó szerkezeteket azonosítani a visszaverési spektrum fajra jellemző kiegészítésével, arra utal, hogy a jól meghatározott szerkezeti jellegzetességek felelősek a szín kialakulásáért. Ez nem olyan egyszerű, mint a tökéletesen rendezett szerkezeteknél, ahol a törésmutatót állandónak véve, a szerkezet periodicitása egyértelműen meghatározza a fotonikus tiltott sáv helyét. Érdemes vizsgálni a szerkezetek és tulajdonságaik összefüggését, mivel a lepkék szárnyán található kvázirendezett szerkezetek bizonyítják ezen nanokompozitok lehetőségét.

Lepkék előfordulása a vegetációs időszakban

Az 5. ábrán a vizsgált lepkefajok eloszlását láthatjuk hónapok szerint. Egy, illetve két maximummal rendelkező csoportokat fedezhetünk fel, amelyek azt mutatják, hogy a *P. icarus*, *P. dorylas* és a *P. bellargus* esetében a nyár eleji nemzedék után egy második is repül a nyár vége felé. Bár nagy szórás van (a mintákat véletlenszerűen választottuk az 1930 és 2010 közötti időszakból), a hisztogramok határozott maximumot mutatnak. Hogy a kék szín a fajok megkülönböztetésére alkalmas távoli kommunikációs jel legyen, a színeknek nagy távolságból is jól láthatóan különbözniük kell. Ezért a megvizsgált boglárkák csoportjára jellemző negyedik fajta (UV-érzékeny) színérzékelő részletesebb megkülönböztetést tesz lehetővé, mint az emberi szem. A kiegészítő UV-érzékelő a 300–450 nm tartományon segíti a színelbontást. Ez épp az a tartomány, ahol a szárny visszaverésében a másodlagos maximum és a főmaximum bal oldala van. Tudomásunk szerint első alkalommal végeztük el a számolást a CIE ábrázolást felhasználva a négy érzékenységi görbére a lepkék látásának vizsgálatára (6. ábra). Ez a megközelítés hasznos lehet más lepkék vizsgálatának esetében is. Fontos viszont megjegyezni, hogy bizonyos fajok akár nyolcféle színérzékelővel is rendelkezhetnek, így ezekhez többdimenziós ábrázolás szükséges.

A repülési időket tekintve, a lila csoportban a *P. icarus* és a *P. thersites* nagyon hasonló színű, de a *P. thersites* rajzása (egy nemzedék) beékelődik a két *P. icarus* nemzedék közé. A *P. thersites* repülési idejének eltolódása július vége felé megengedett, mivel az akkori példányok már öregek, ezáltal kopottak, és nem zavarják a *P. icarus* második generációjának nászrepülését. Átfedés figyelhető meg a *P. icarus* és a *P. semiargus* esetében is, de a hisztogramon láthatjuk, hogy a *P. icarus* első nemzedéke május közepéig tetőzik, amikor az első *P. semiargus*ok megjelennek, és egészen hosszan tart a repülési idejük,

június közepi tetőzéssel. A *P. thersites* példányok csak a *P. semiargus* nemzedék végén kezdenek repülni, amikor már csak idős példányok fordulnak elő.

Az égszínkéek csoportból a *P. bellargus* és a *P. dorylas* is kétnemzedékes. A *P. bellargus* rendelkezik a legkorábbi és legkésőbbi tetőzéssel, és bár van valamennyi átfedés a *P. dorylas* repülésével, spektrálisan jól láthatóan különböznek. A *P. dorylas* második nemzedékének repülési ideje teljesen átfed a *P. daphnis* előfordulásával. Bár a színük lehetővé teszi a megfelelő megkülönböztetést, a két faj elkülönülését azon egyedi jelenség is segíti, hogy a *P. daphnis* nőtényei mindig kékek.

A zöldes csoport tagjai egynemzedékesek. Elsőként a *P. amandus* jelenik meg, ami színében is eltér a többitől. Június közepére már megfakul a szárny színe annyira, hogy ne zavarja a megjelenő *P. damon* faj pázását. A *P. coridon* és a *P. damon* váltják egymást, a rendszerint nagy számban kirajzó *P. coridon* már csak az idős, kevés számú *P. damon* hímmel találkozhat az élőhelyen.

A fenti csoportosulásokon kívül meg kell jegyezzük a kétnemzedékes *P. icarus*, *P. dorylas* és *P. bellargus* esetét. Május közepén vagy végén tetőzik az első nemzedékük, de a színük jellegzetesen elkülönül, tehát ennek alapján az ugyanazon fajhoz tartozó egyedek azonosítani tudják egymást.

Következtetések

Kilenc közeli rokon (és azonos földrajzi helyen élő) boglárka lepkefaj részletes szerkezeti és spektrális vizsgálata megmutatta, hogy a hímek szárnyának kék színe és a színért felelős fotonikus nanoszerkezet fajra jellemző. Mesterséges neurális hálózatot alkalmazva, a szerkezeti vagy a spektrális adatok alapján is a fajokat 90% feletti találati aránnyal lehet azonosítani. A fajok repülési idejét tekintve az látszik, hogy a hasonló színű lepkék időben elkülönülnek. A lepkék ultrabolya-érzékeny fotoreceptor-típusát figyelembe vevő, háromdimenziós színingertérben ábrázolva, az eltérő fajok szárnyszínerei jobban elkülönülnek egymástól, mint az emberi látáson alapuló, kétdimenziós színingertérben. A repülési időszakokat tekintve, a vizsgált 9 boglárkafaj kék színe lehetővé teszi a biztonságos párkeresést, illetve a versenytársak eredményes kiszűrését.

A szerkezet-szín összefüggés vizsgálata modellezéssel együtt lehetővé teszi új utak feltárását a bioinspirált, kívánt színárnyalatú mesterséges fotonikus nanoarchitektúrák tervezésében és azok gyakorlati alkalmazásában.

Irodalom

10. Lukács Gy.: *Színmérés*. Műszaki Kiadó, Budapest, 1982.

GÖMBIHI BAMENTES EGY- ÉS KÉTFÓKUSZÚSÁG: A TRILOBITALENCSEK MAGJÁNAK OPTIKAI SZEREPE – II. RÉSZ

A központi lencse mag szerepe bizonyos schizochroális szemű háromkaréjos ósrákokban (trilobitákban) máig ismeretlen volt. Azért, hogy megértsük e rejtélyes lencse mag lehetséges optikai szerepét, cikkünk I. részében egy számítógépes sugárkövetéses módszert írtunk le, amivel egy szilur kori *Dalmanites* trilobitafaj összetett szeméibeli lencsék optikája vizsgálható [19]. Cikkünk II. részében számításokat végzünk annak kiderítésére, hogy milyen fényintenzitás alakul ki a lencse alatt az optikai tengely mentén. Számításainkban két paraméter szerepel: az alsó lencsetag n_a és a lencse mag n_m törésmutatója. Meghatározzuk n_a és n_m azon értékeit, amelyek esetén a vizsgált trilobitalencse egy, kettő, illetve három fókuszponttal rendelkezik. A fókuszpontok jóságát (a gömbi hiba kiküszöbölésének mértékét) számszerűen vizsgáljuk. Megmutatjuk, hogy a lencse mag egyik szerepe a gömbi hiba kiküszöbölése volt a fókuszpontok számától (1, 2 vagy 3) függetlenül, de akár a lencse kétfókuszúságát is biztosíthatta. A lencse mag másik lehetséges szerepe, hogy a lencse szélső tartománya egy meghatározott fókusz-távolsággal rendelkezett, míg a központi lencserész-

nek hosszabb vagy rövidebb volt a fókusz-távolsága attól függően, hogy a lencse mag n_m törésmutatója kisebb vagy nagyobb volt a felső lencsetag n_l törésmutatójánál. Megvizsgáljuk azon paraméterértékeket is, amelyek háromfókuszú lencséhez vezetnek, de ezt a lehetőséget kizártuk a biooptikailag értelmes megoldások közül.

Paleo-biooptikai eredmények

A 6. ábrán példák láthatók a lencse alatt az optikai tengely mentén kialakuló i relatív intenzitásra a lencse aljától mért l relatív távolság függvényében, ami-

A következő oldalon: 6. ábra. Balra: példák az $i(l)$ relatív intenzitás-görbékre a központi maggal rendelkező trilobitalencsétől mért l relatív távolság függvényében, amikor a görbéknek csak egy csúcsa van. Az intenzitás-csúcsok helyét egy vékony függőleges vonal jelzi. Az adott intenzitás-görbéhez tartozó n_a és n_m törésmutató-értékek a grafikonok jobb felső sarkában olvashatók. Az R_1, \dots, R_{16} címkék a 9. ábra megfelelő címkéihez tartoznak. Jobbra: a bal oldali intenzitás-görbékhöz tartozó sugármenetek a lencse főtengelymetszetében.