FELHŐÉSZLELÉS A FÖLDRŐL 180° LÁTÓSZÖGŰ KÉPALKOTÓ POLARIMETRIÁVAL II.

Barta András, Horváth Gábor, Gál József, Suhai Bence, Haiman Ottó
Eötvös Egyetem, Biológiai Fizika Tanszék

Azért hogy kiküszöböljük azon képalkotó polariméterek hátrányait, melyek az égbolt polarizációs felvételeit egymásután készítik el, egy háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polarimétert építettünk, amely a szükséges három polarizációs felvételt a teljes égboltról egyidőben készíti el. E polariméter használatával az egész égbolt polarizációs mintázata még olyankor is mérhető, ha az égen időben gyors változások történnek (például a felhők mozgása miatt). Cikkünk első részében [1] vázlatosan ismertettük polariméterünk felépítését és bemutattuk az előnyeit felhős égbolt esetén, illetve közvetlenül napkelte előtt és napnyugta után. Cikkünk második részében polariméterünk egyik fontos alkalmazását tárgyaljuk: felhők polarimetrikus észlelését a földről. Az ég vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) spektrális tartományban mért polarizációfok és polarizációs irány mintázata felhasználásával továbbfejlesztettük a fotometrikus felhőészlelés algoritmusát. Bemutatunk egy hatékony kombinált (fotometrikus és polarimetrikus) algoritmust, amely árnyaltabbá és megbízhatóbbá teszi a felhőészlelést. A kombinált felhődetektáló algoritmus hatékonyságát összehasonlítottuk a csak fotometrikus és csak polarimetrikus algoritmussal, mely vagy az ég fényintenzitás mintázatát vagy pedig a polarizációfok és polarizációs irány mintázatait használja fel.

Felhődetektálás

A polariméterünkkel készített égboltfelvételek digitalizálása, kalibrációs görbék szerinti korrekciója és kiértékelése után az égbolt minden pontjában kilenc optikai mennyiséghez jutunk. Ezek a három (λ_R = 650 nm, λ_G = 550 nm, λ_B = 450 nm) színcsatornában mért I_R, I_G, I_B fényintenzitások, p_R, p_G, p_B polarizációfokok és α_R, α_G, α_B polarizációs irányok. Felhődetektálási eljárásunk lényege, hogy az ég minden pontjában hét döntést hozunk: a három intenzitásértékből meghatározzuk a képpont színét, és ez alapján eldöntjük, hogy a képpont felhőhöz vagy tiszta égbolthoz tartozik-e. A további hat döntés mindegyikét egyetlen paraméter értéke alapján hozzuk meg, ami az első esetben a p_R, a másodikban a p_G, a harmadikban a p_B, a további három esetben pedig rendre az α_R, α_G, illetve α_B.

Mindegyik döntést egy-egy külön algoritmus hozza meg, amelyeket a továbbiakban „detektoroknak" nevezünk. Az első detektor jele IRGB, utalva arra, hogy az R, G, B színcsatornában mért I intenzitásokat veszi figyelembe. A további hat detektor jele PR, PG, PB, αR, αG, αB aszerint, hogy a p polarizációfok alapján dönt-e vagy az α polarizációs irány alapján, illetve hogy melyik színcsatorna adatát veszi figyelembe. Így például a PB detektor a kék színcsatornában mért polarizációfok alapján, míg az αG detektor a zöld csatornában mért polarizációs irány alapján dönt. Ha az IRGB detektor szerint egy adott képpont felhőhöz tartozik, ez arra a képpontra nézve 3 szavazatot jelent, mivel e detektor három különböző mennyiség felhasználásával hozza meg döntését. A többi hat detektor mindegyike 1-gyel járul hozzá a képpont szavazataihoz, amennyiben úgy dönt, hogy a képpont felhőhöz tartozik (vagyis „felhős"). Ha valamelyik algoritmus szerint az adott képpont tiszta égbolthoz tartozik, 0 értékűt szavaz.

Ha valamelyik színcsatornában a képpont alul- vagy felülexponált, akkor az ahhoz a csatornához kapcsolódó detektorok nem szavaznak. Az IRGB detektor működéséhez tehát az szükséges, hogy a vizsgált képpont egyik színcsatornában se legyen alul- vagy felülexponált. A PQ és αQ (Q = R, G vagy B) detektorok működéséhez elég, ha a Q színcsatornában kiértékelhető az információ. A szavazóképes (aktív) detektorok számát m-mel jelöljük. Ha az IRGB detektor aktív, m-et 3-mal növeli, mivel 3 bemeneti adatot képvisel. A többi detektor aktivitása m-hez egyenként 1-gyel járul hozzá. Az aktív detektorok szavazatainak összegét n-nel jelöljük. n értéke 0 és m között változhat, aszerint, hogy hány detektor szavazott a képpont felhőzöttségére. n értéke arányos annak valószínűségével, hogy a vizsgált képpont felhős-e: minél kisebb az n, annál valószínűbb, hogy tiszta égbolthoz tartozik a képpont, és n minél közelebb áll m-hez annál valószínűbb, hogy egy felhőhöz tartozik a képpont.

Mindegyik detektor rendelkezik egy-egy kísérleti úton beállítható paraméterrel, aminek jele az IRGB detektor esetében c, a polarizációfokot használó detektorok esetén p_R^0, p_G^0, p_B^0, a polarizációs irányt használó detektor esetében pedig $\Delta\alpha_R$, $\Delta\alpha_G$, $\Delta\alpha_B$ (lásd később). A felhőfelismerés sikeressége e paraméterek megfelelő beállításán múlik. A célunk olyan program kifejlesztése volt, amely által felismert felhők minél kisebb mértékben térnek el attól, amit az ember vizuálisan felhőnek ismer fel. Ezért e paraméterek beállításához kontrollképeket hoztunk létre, amelyeken vizuálisan (szemmel) ismertük fel a felhőket. Az egyes detektorok által felismert felhőket ehhez a kontrollképhez viszonyítottuk. Az összehasonlítás során a következő tulajdonságú képpontokat külön számoltuk:

1. a kontrollképen felhőhöz tartozik az adott képpont, de a detektor hibásan tiszta égboltnak ismerte fel;
2. a kontrollképen a tiszta égbolthoz tartozik a képpont, de a detektor hibásan felhőnek ismerte fel;
3. a képpontot a detektor felhősnek ismerte fel;
4. a képpont alul- vagy felülexponáltság miatt kiértékelhetetlen.

Ha e mennyiségeket elosztjuk az összes képpont N = 346 207 számával, megkapjuk az égbolt azon tartományainak arányát,

I. melyek felhősek, de hibásan tiszta égboltnak ismert fel a detektor (*PCDS*, angolul: *Proportion of Clouds Detected as Sky*),

II. melyek tiszták (felhőtlenek), de hibásan felhősnek ismert fel a detektor (*PSDC*, angolul: *Proportion of Sky Detected as Cloud*),

III. melyeket felhősnek ismert fel a detektor (*PCC*, angolul: *Proportion of Cloud Cover*),

IV. melyeket a detektor nem tudott kiértékelni (*PUO*, angolul: *Proportion of Under and/or Overexposure*).

Az összes hibásan felismert képpont aránya (*PED*, angolul: *Proportion of Erroneous Detection*):

$$PED = PCDS + PSDC.$$

A detektorok kontrollparaméterét akkor tekinthetjük jól beállítottnak (optimálisnak: c^*, p_R^{0*}, p_G^{0*}, p_B^{0*}, $\Delta\alpha_R^*$, $\Delta\alpha_G^*$, $\Delta\alpha_B^*$), ha a detektorhoz tartozó *PED* érték minimális.

Fotometrikus felhőfelismerés

A fotometrikus IRGB detektor az egyes színcsatornákban mérhető fényintenzitás-adatok alapján hozza meg döntését. Az IRGB detektor működése azon a megfigyelésen alapul, hogy a viszonylag ritka (napkeltekor és napnyugtakor észlelhető) vörös, illetve narancssárga színárnyalatú felhőktől eltekintve a felhők általában szürkék, színtelenek [2]. E detektor akkor ismeri fel az adott képpontot felhőnek, ha az szürke, vagyis a három színcsatornában mért I_R, I_G, I_B fényintenzitása közel van egymáshoz. A közelség kvantitatíven azt jelenti, hogy

$$\frac{|I_B - I_R|}{I_B} < c \quad \text{és} \quad \frac{|I_B - I_G|}{I_B} < c,$$

ahol c a detektor kontrollparamétere. Ha e két feltétel valamelyike nem teljesül, akkor a detektor a vizsgált képpontot tiszta égboltnak tekinti. A feltételekben azért az I_B kék intenzitáshoz viszonyítjuk a vörös és zöld intenzitások I_B-től való eltérését, mivel az égboltfény intenzitása a kék tartományban a legnagyobb.

Polarizációfokon alapuló felhőfelismerés

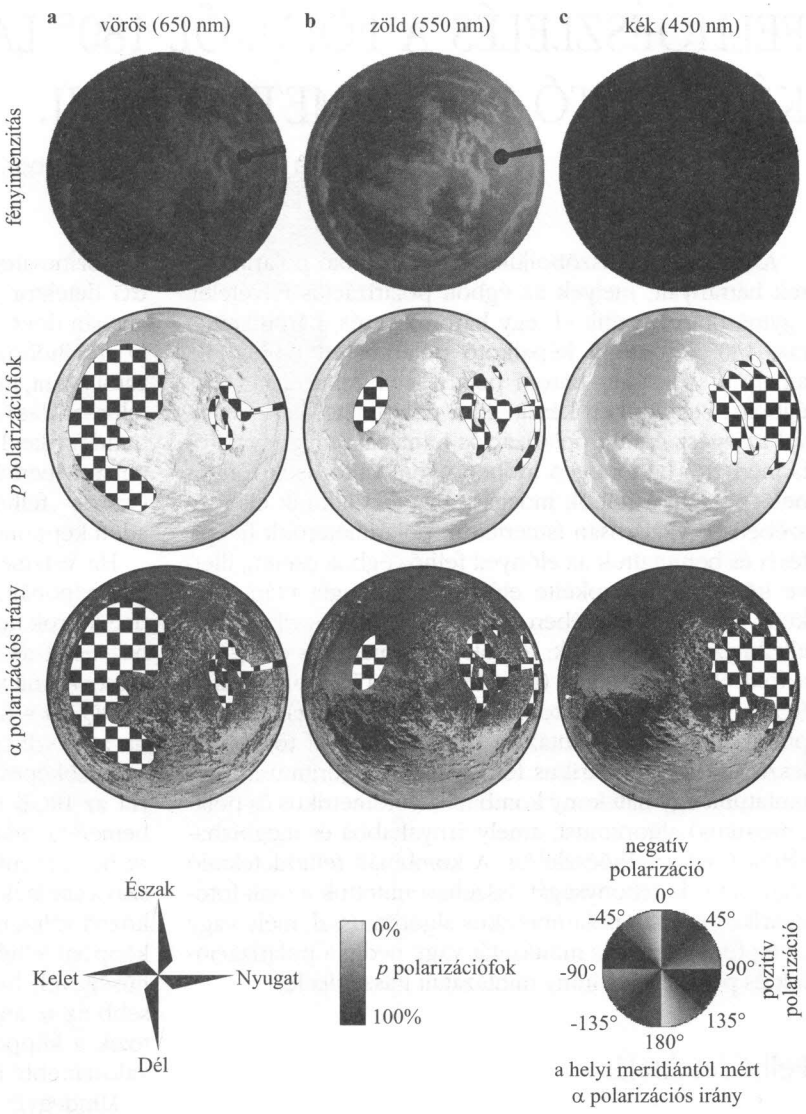
A PR, PG és PB detektorok működése a tiszta égbolt polarizációfok mintázatától való eltérések detektálásán alapul. A Naptól 140°-ra lévő felhős égbolttartományoktól és a neutrális pontok környékétől eltekintve a polarizációfok eloszlását az égbolton viszonylag jól írja le az egyszeres szórású Rayleigh-modell [3]. A Naptól 140°-ra lévő esőfelhőkben a szivárványszóródás dominál [2], ami nagy polarizációfokot eredményez (a jégfelhőktől eltérően), a neutrális pontok környékén pedig igen alacsony a polarizációfok, de ez nem okoz gondot, mert ott az egyszeres szórású Rayleigh-modell is kis p értékekre vezet. Az egyszeres szórású Rayleigh-modell szerint a polarizációfok eloszlása tiszta égbolton a

$$p(\gamma) = p_{\max} \frac{\sin^2\gamma}{1 + \cos^2\gamma}$$

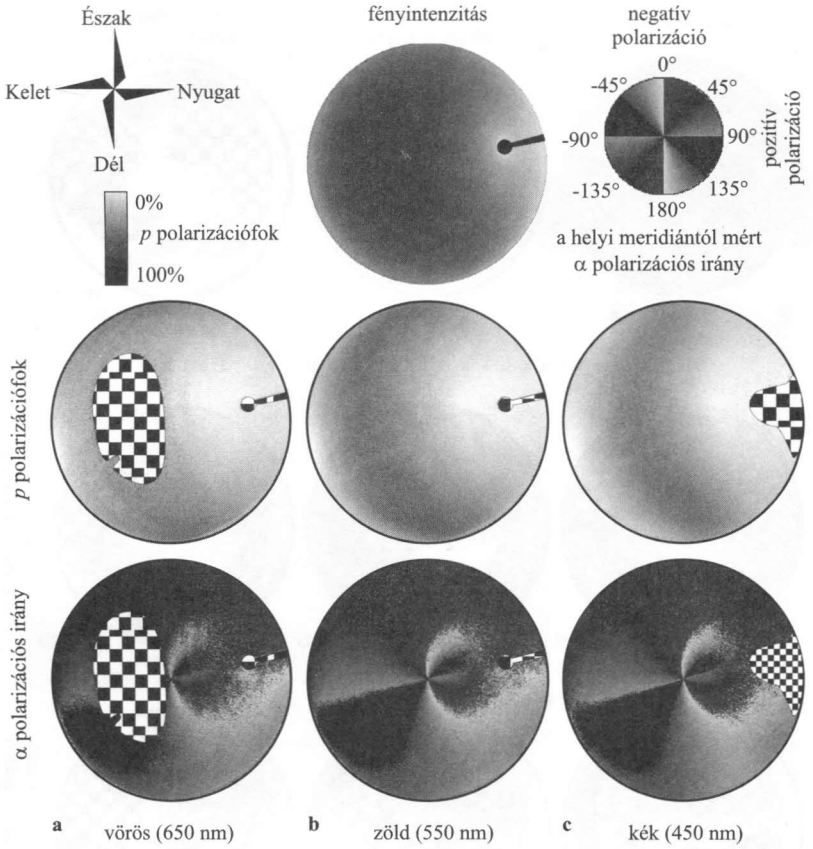
összefüggést követi, ahol $p_{\max}$ az égbolt maximális polarizációfoka (a Naptól 90°-ra), γ pedig a vizsgált pont Naptól mért szögtávolsága:

$$\cos\gamma = \sin\eta_s \sin\eta \cos\varphi + \cos\eta_s \cos\eta,$$

ahol η_s a Nap zenittől mért szögtávolsága, η illetve φ



1. ábra. Gyorsan mozgó felhőket tartalmazó égboltnak a vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (540 nm) színcsatornában a háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméterünkkel egyidejű üzemmódban mért fényintenzitás, p polarizációfok és α polarizációs irány mintázatai. A Nap körüli felülexponált és a Naptól körülbelül 90° szögtávolságban az alulexponált területeket pepita minta jelzi.



2. ábra. Az 1. ábrával azonos napállású tiszta égboltnak a vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) színtartományban a háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméterünkkel egyidejű üzemmódban mért fényintenzitás, polarizációfok és polarizációs irány mintázatai. A Nap körüli felülexponált és a Naptól körülbelül 90° szögtávolságban az alulexponált területeket pepita minta jelzi. A sugárirányú pepita alakzat a napkitakaró tányér és rúdjának a maszkja.

pedig a vizsgált pont zenittől, illetve a szoláris meridiántól mért szögtávolsága. Mivel a felhőkről szórt fény polarizációfoka kisebb, mint a tiszta ég ugyanazon pontjában mérhető polarizációfok, ezért a PQ detektor akkor tekint felhőnek egy képpontot, ha a p_Q polarizációfokra

$$p_Q < p_Q^0 \frac{\sin^2\gamma}{1+\cos^2\gamma}, \quad Q = R,\ G,\ B$$

teljesül, ahol p_Q^0 a PQ detektor kontrollparamétere.

Polarizációs irányon alapuló felhőfelismerés

A polarizációs irány alapján működő detektor a tiszta égbolt polarizációs irány mintázatától való eltérések alapján ismeri fel a felhőket. Míg azonban a PQ (Q = R, G, B) detektor esetén a tiszta ég polarizációfok mintázatát, mint összehasonlítási alapot az egyszeres szórású Rayleigh-modell szolgáltatta, addig az αQ detektor egy azonos napállású tiszta égboltról ugyanazon színcsatornában mért polarizációs irány eloszlásához hasonlítja a vizsgált égboltképet, mert a neutrális pontok környékén az egyszeres szórású Rayleigh-modell teljesen hibás eredményt ad a polarizációs irányra. Mivel a polarizációs irányban tiszta égbolt esetén is nagy helyi bizonytalanságok fordulnak elő a mérési zaj miatt, ezért a felhődetektálás előtt az α-mintázatokat egy $G(r) \sim \exp(-r^2/\sigma^2)$ Gauss-függvénnyel való konvolúcióval simítjuk, ahol σ a Gauss-függvény szórása. Az αQ detektor az így simított α-mintázatot használja fel, és akkor tekinti felhősnek a képpontot, ha az ott mért α_Q polarizációs irány és az összehasonlítás alapjául szolgáló simított tiszta égboltkép ugyanazon pontjában mért α_Q^c polarizációs irány közti különbségre fennáll, hogy

$$|\alpha_Q - \alpha_Q^c| > \Delta\alpha_Q, \quad Q = R,\ G,\ B,$$

ahol $\Delta\alpha_Q$ a detektor kontrollparamétere.

Az alul- és felülexponált égbolttartományok fotometrikus felismerése

A Nap környékén a nagy fényintenzitás miatt a fotoemulzió általában beég, ezért az ilyen területekről származó információt nem vesszük figyelembe. A beégés, azaz felülexponáltság felismerése azon alapul, hogy egy képpont fényintenzitásának egy byte-on történő reprezentációja nem lehet nagyobb 255-nél. Ha tehát a fényintenzitás digitális értéke eléri a 255-öt, akkor nem tudhatjuk, hogy valóban akkora volt-e az eredeti fényintenzitás, vagy pedig még annál is nagyobb, csak a fotoemulzió és/vagy a kiértékelő rendszer már nem tudta azt követni. Ezért, ha egy képpont digitális intenzitása valamelyik színcsatornában eléri a 255-öt, akkor abban a csatornában az a pont kiértékelhetetlennek minősül.

A Naptól 90°-ra a legkisebb a tiszta ég szórt fényének intenzitása. Itt a polarizációs felvétel, különösen a vörös színcsatornában, alulexponált lehet, vagyis olyan kicsi lehet a kiértékelés után kapott fényintenzitás-érték, hogy nem lehetünk biztosak abban, hogy valóban olyan kicsi volt-e az intenzitás, vagy még annál is kisebb, csak a fotoemulzió és/vagy a kiértékelő rendszer már nem tudta azt követni. Ezenkívül a kör alakú égboltkép szélén látható növényzet, tereptárgyak és az árnyékolórúd is többnyire alulexponáltak. A felhődetektáló program egy képpontot alulexponáltnak tekint, ha az ott mért fényintenzitás egy *t* küszöbértéknél kisebb. *t* értékének alkalmas megválasztásával az alulexponált égbolttartományok is megbízhatóan felismerhetőek.

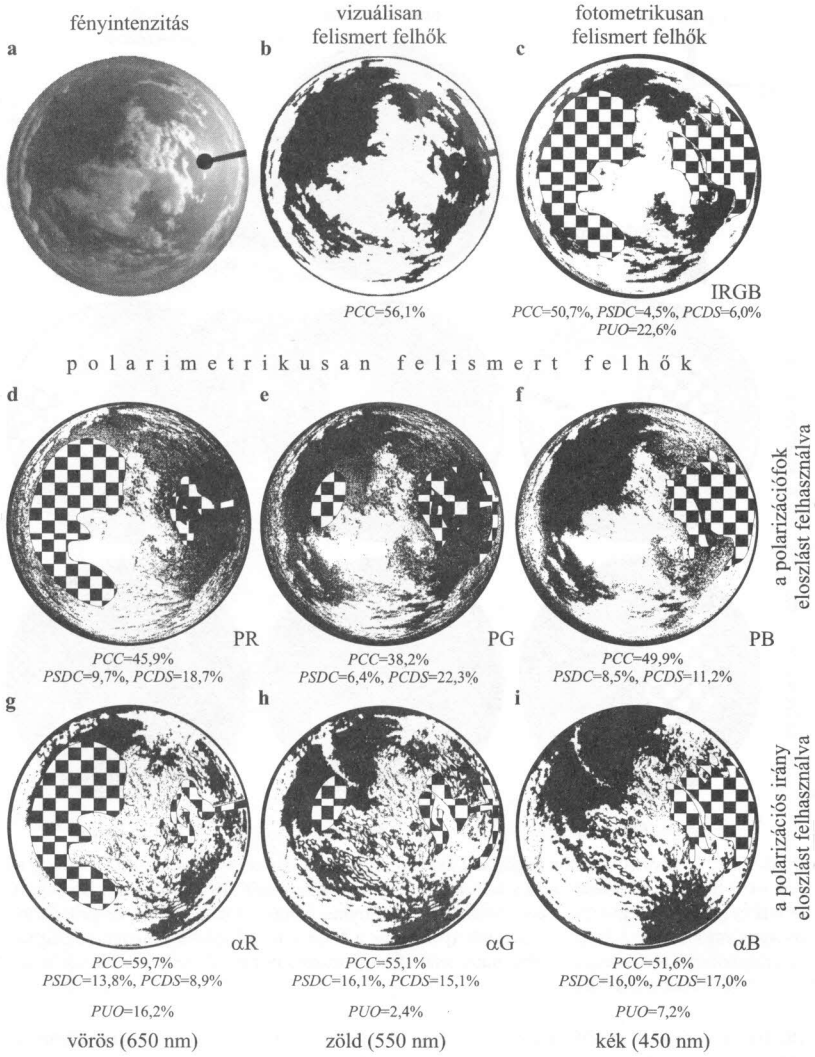
Fotometrikus, polarimetrikus és kombinált felhődetektálás

Tekintsük a felhődetektáló módszerünk eredményeit egy konkrét felhős égbolt esetén. A szóban forgó égboltról készült fényintenzitás, polarizációfok és polarizációs irány mintázatok a vörös, zöld és kék színcsatornában az *1. ábrán* láthatók. Összehasonlításként a *2. ábra* ugyan-

ezen mintázatokat mutatja egy azonos napállású, de tiszta égbolt esetén. A felhődetektálás jósági fokát a felismert felhőknek a valós felhőmintázattal való egybevetésével lehet meghatározni. Ilyen valós felhőmintázat azonban soha sem áll rendelkezésre, ezért bízva az emberi látórendszer kiváló mintázatfelismerő, szín- és fényességelkülönítő képességében, létrehoztunk egy ellenőrző felhőmintázatot: Vettük a *3.a ábra* (eredetileg színes) felhős égboltképét (amely ég optikai sajátságait az *1. ábra* mutatja), és a számítógép képernyőjére kivetítve egy számítógépes retusáló programmal lényegében pontról-pontra értékeltük, hogy az illető képpont felhőhöz tartozik-e vagy tiszta égbolthoz. Eredményül egy vizuálisan felismert felhőmintázatot kaptunk, amit a továbbiakban, mint a valós felhőmintázat egy jó közelítését, ellenőrző felhőmintázatként használtunk. Az ellenőrző felhőmintázaton a felhőzöttség foka *PCC* = 56%-nak adódott *(3.b ábra)*.

Az egyes detektorok által felismert felhők

A *3.c ábra* az IRGB detektor által a fotometrikus felhőfelismerés alfejezetben leírt algoritmus szerint a *3.a ábra* égboltján felismert felhőket mutatja. Az égbolt azon területeit, melyek legalább egy színcsatornában alul- vagy felülexponálódtak, pepitával jeleztük, e helyeken az IRGB detektor nem működőképes. Az IRGB detektor által felismert felhőzöttség foka *PCC* = 50,7%, azon területek hányada, ahol az égbolt tiszta, de a detektor hibásan felhőt ismert fel *PSDC* = 4,5%, míg azon felhős területek hányada, amelyeket tiszta égboltnak ismert fel a detektor *PCDS* = 6,0%. Alul- vagy felülexponáltság miatt az égbolt *PUO* = 22,6%-a volt kiértékelhetetlen.



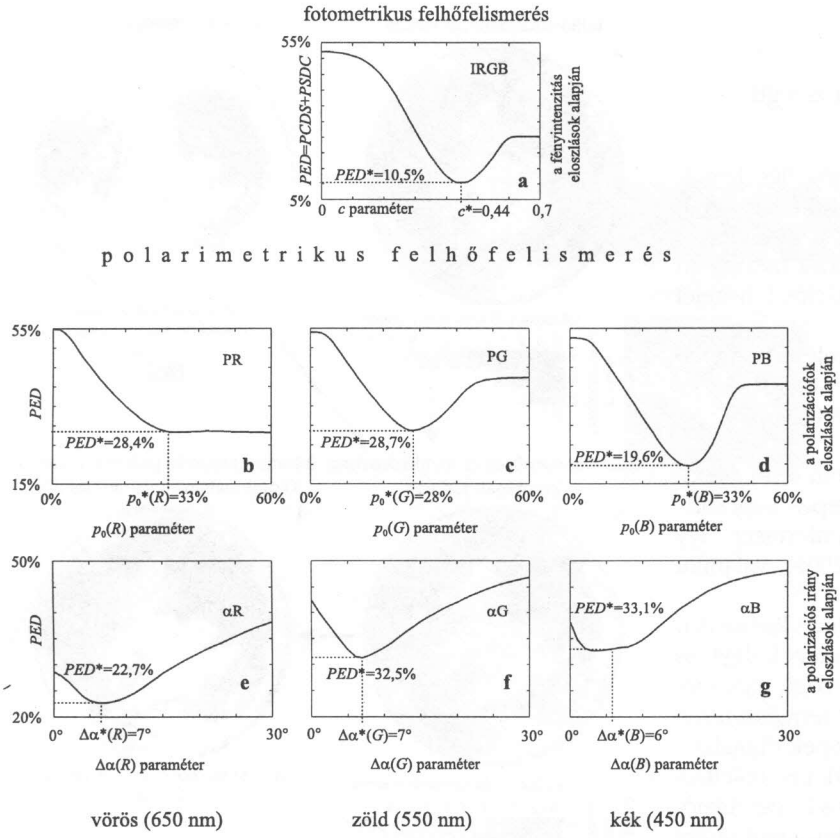
3. ábra. (a) Az 1. ábrán mutatott égbolt fényképfelvétele. (b) Az A ábrán emberi szemmel felismert felhős (fehér) és tiszta (fekete) égboltterületek. (c) Az 1. ábra fényintenzitás eloszlásainak felhasználásával fotometrikusan felismert felhők. Az alul- vagy felülexponált területeket pepita minta jelzi. (d–i) Az 1. és a 2. ábra polarizációfok és polarizációs irány mintázatainak felhasználásával polarimetrikusan felismert felhők a vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) spektrális tartományokban. Az alul- és felülexponált tartományokat pepitával jelöltük. *PCC:* az IRGB, PR, PG, PB, αR, αG, αB detektorok által felismert felhőzöttség foka *(Proportion of Cloud Cover)*. *PSDC:* a hibásan felhőnek detektált tiszta égboltterületek aránya *(Proportion of Sky Detected as Cloud)*. *PCDS:* a hibásan tiszta égboltnak felismert felhős területek aránya *(Proportion of Clouds Detected as Sky)*. *PUO:* az alul- vagy felülexponált területek aránya *(Proportion of Under- or Overexposure)*.

1. táblázat

Az egyes detektorokhoz tartozó *PED*-görbék *PED minimuma és a *c**, *p*^{0*}, Δα* kontrollparaméterek optimális értékei**

detektor	*PED**	*c**	*p*^{0*}	Δα*	*ábra*
IRGB	10,5%	0,44	–	–	4.a
PR	28,4%	–	33%	–	4.b
PG	28,7%	–	28%	–	4.c
PB	19,6%	–	33%	–	4.d
αR	22,7%	–	–	7°	4.e
αG	32,5%	–	–	7°	4.f
αB	33,1%	–	–	6°	4.g

A *3.d, e* és *f ábra* mutatja a PR, PG és PB detektorok által a polarizációfokon alapuló fehőfelismerés alfejezetben leírt algoritmus szerint a *3.a ábra* égboltján felismert felhőket. A *3.g, h* és *i ábra* pedig az αR, αG és αB detektorok által a polarizációs irányon alapuló fehőfelismerés alfejezetben leírt algoritmus szerint felismert felhőket mutatja. A detektorok kontrollparaméterének optimális beállítása a *PED*-görbe alapján történt *(1. táblázat)*. E görbe minimumhelye adja a kontrollparaméter optimális értékét, hiszen ekkor a legkisebb a felhődetektor hibája. A PR detektor esetén *(4.b ábra)* a *PED*-görbe csökkenő szakaszát egy közel vízszintes plató követi; ebben az esetben a kontrollparaméter értékét a plató elejére választottuk. Az αB detektor *(4.g ábra)* esetében szintén kivételt tettünk, mert a *PED*-görbe minimumhelye egy



4. ábra. Az égbolton az egyes IRGB, PR, PG, PB, αR, αG és αB detektorok által hibásan felismert képpontok *PED* = *PSDC* + *PCDS* aránya a megfelelő *q* kontrollparaméter (*q* = *c*, p_0 vagy Δα) függvényében a vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (540 nm) színcsatornában. A minimális *PED** értéket és a kontrollparaméter hozzá tartozó optimális *q** értékét szaggatott vonalak jelzik. (a) Fotometrikus felhődetekció *c* kontrollparaméterrel. (b–d) Polarimetrikus felhődetekció az 1. ábra polarizációfok mintázatait felhasználva p_0 kontrollparaméterrel. (e–g) Polarimetrikus felhődetekció az 1. és 2. ábra polarizációs irány mintázatait felhasználva Δα kontrollparaméterrel.

széles, gyengén emelkedő plató; itt a kontrollparaméter optimális értékét a plató közepére választottuk.

A polarimetrikus detektor a PR, PG, PB, αR, αG és αB detektorok szavazatát veszi figyelembe. Ekkor a szavazó (aktív) detektorok száma m = 0, 2, 4, 6 lehet, míg a szavazatok száma n = 0-tól m-ig terjedhet. Ahhoz, hogy egy képpont felhős vagy tiszta voltáról egyértelműen dönteni lehessen, meg kell adni, hogy mely szavazati értékek esetén tekinti a detektor a képpontot felhősnek, és melyek esetén tiszta égboltnak. Minden egyes m értékhez definiálni kell egy $n^*(m)$ küszöböt, ami alatti n értéknél tiszta égboltnak tekintjük a képpontot, és ami fölöttinél felhősnek. Ha például m = 4 esetén a küszöbérték $n^*(4)$ = 3, ez azt jelenti, hogy ha m = 4 detektor aktív, akkor n = 0, 1, 2 és 3 szavazat esetén tekintjük tiszta égboltnak a képpontot és n = 4 esetén felhősnek. A küszöbértékeket a *2. táblázat* tartalmazza. Ezen értékeket úgy választottuk meg, hogy a keletkező képre jellemző *PED*-érték, vagyis a hibásan detektált képpontok aránya a lehető legkisebb (*PED**) legyen.

A kombinált felhődetekciós algoritmus az összes detektor egyesítése által jön létre. Ekkor az IRGB detektor szavazata 3-at ér, a többi detektoré 1-et, mert az IRGB detektor döntése három optikai információ értékeléséből születik meg, míg a többi detektoré csak egyéből. Ebben az esetben az aktív detektorok száma m = 2, 4, 9 lehet. A vizsgált felhős ég esetén az aktív detektorok számának eloszlását az *5.b ábra* mutatja, míg a felhővalószínűség eloszlását az *5.a ábra*. A kettő egyesítéseként jön létre az *5.c ábra,* amelyen a színkódot visszafejtve egy adott képpontról megállapítható az aktív detektorok száma és az aktív detektorok által adott szavazatok száma is. A megfelelő optimális $n^*(m)$ küszöbértékeket a *2. táblázat* tartalmazza. E küszöbértékek felhasználásával egy kétszínű ábra készíthető *(5.d ábra),* amely a legvalószínűbb felhőeloszlást mutatja.

A *3. táblázat* foglalja össze a lényeges mennyiségek értékeit az egyes felhődetektálási típusokra. Az utolsó oszlop adja meg a detektor bizonytalanságát, vagyis azt, hogy a legkisebb és legnagyobb elképzelhető felhőzöttségi fok között mennyi a különbség. A fotometrikus detektor rendkívül nagy hibája annak köszönhető, hogy a vörös színcsatornában alulexponált és a kék színcsatornában felülexponált égboltterületek együttesen a teljes égbolt csaknem egynegyedét teszik ki, vagyis ekkora területről a detektor nem tud véleményt mondani. A polarimetrikus és kombinált felhődetektálási eljárásokban ott, ahol a vörösben a kép alulexponált, még zöldben és kékben a polarimetrikus detektorok tudnak szavazni, ezáltal a detektálásból kizárt égboltterület a teljes ég 1%-a alá esik. Ezen kívül a több detektor használata árnyaltabbá teszi a eljárást, aminek következménye, hogy a detektált felhőmintázat jobban megközelíti a valóságot. Ugyanakkor ott, ahol az IRGB fotometrikus detektor működőképes, biztosabban detektálja a felhőket, mint a polarimetrikus detektorok önmagukban, amit az mutat, hogy a *PSDC* és *PCDS* értékek a fotometrikus detektornál a legkisebbek.

2. táblázat

A polarizációs információkat felhasználó felhődetektáló eljárások optimális n^* küszöbértékei az m függvényében

detektálás típusa	m	n^*
polarimetrikus	2	1
	4	3
	6	3
kombinált	2	1
	4	3
	9	5

A polarimetrikus detektor magában foglalja a PR, PG, PB, αR, αG és αB detektorokat. A kombinált detektor a fotometrikus és polarimetrikus detektorok egyesítése.

Elemzés

A háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméter előnyei

Háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméterünk egyesíti a korábbi 180° látószögű képalkotó polariméterek néhány előnyös tulajdonságát:

– *North* és *Duggin* (1997) polariméteréhez hasonlóan a miénk is az egész égbolt három polarizációs felvételét egyszerre készíti el;

– polariméterünk felállítása és szétszerelése könnyen és gyorsan elvégezhető, mint *Voss* és *Liu* (1997), *Gál* és társai (2001), valamint *Pomozi* és társai (2001) polariméterei esetén;

– mivel polariméterünk nem igényel sem termoelektromos hűtést/fűtést, sem pedig számítógépes kapcsolatot, ezért nincs szüksége hálózati áramforrásra, így könnyen szállítható, mint Gál és társai (2001), valamint Pomozi és társai (2001) polarimétere.

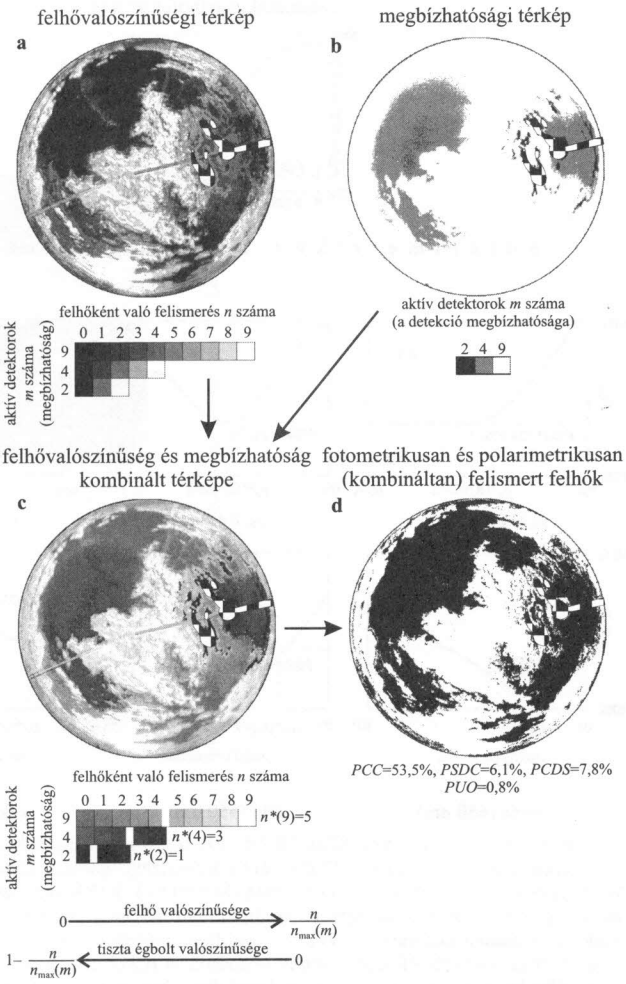
Polariméterünk hagyományos tekercsfilmes kamerákat használ, bár e feladatra alkalmazhatók lennének digitális fényképezőgépek is megfelelő, 180° látószögű halszemobjektívvel felszerelve. Az utóbbi esetben természetesen a színes film előhívására, valamint a diaképek digitalizálására nincs szükség, de a digitális kamerák mai fejlettségi szintjén még nem érik el a hagyományos fotoemulzióból digitalizált kép optikai felbontását. Ezen kívül terepi munkákhoz alkalmasabbak a hagyományos tekercsfilmes fényképezőgépek, mivel a digitális kamerák rendkívül érzékenyek a környezeti jellemzők változásaira és a környezeti hatásokra, mint például a hőmérsékletváltozásra, a levegő nedvességtartalmára, a porra, a közvetlen napfényre, az elektromágneses térre vagy a mechanikai hatásokra. Továbbá, digitális kamerák használatakor a felvételek tárolására jelenleg még drága elektromágneses tárolóeszközre van szükség, vagy közvetlen kapcsolatra egy hordozható számítógéppel. Az utóbbi nem a legkedvezőbb megoldás terepi munkákhoz. Mindezen problémák egyszerűen kiküszöbölhetők tekercsfilmes fényképezőgépek és elegendő film használatával. Polariméterünk felépítését megfelelően módosítva, vízalatti polarizációs felvételek készítésére is alkalmassá tehető.

A háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméter korlátai

Az a mód, ahogyan a Napot egy segédszemély által tartott rúd végén lévő árnyékolólappal kitakarjuk „nem túl elegáns", és erős szélben meglehetősen nehéz a rudat megtartani, viszont terepi munkákhoz praktikus és a legegyszerűbb módszer, hogy mindhárom objektívet megóvjuk a közvetlen erős napfénytől. Ahhoz, hogy az objektívek belső felületein létrejövő zavaró tükröződéseket megszüntessük, mindhárom objektívnek a kitakaró lap teljes árnyékában kell lennie, ami megindokolja a lap méretét, hiszen a két szélső objektív körülbelül 50 cm-es távolságban van.

Polariméterünkkel jelen állapotában nemcsak a teljes égboltról lehet polarizációs felvételeket készíteni, hanem bármilyen más légi és földi objektumról (például dombor, víz- és földfelszín, növényzet), amennyiben a vizsgált tárgy elegendően messze van a polarimétertől. Közeli tárgyak esetén a rálátás szöge különbözik a három kameránál, ami a sztereó fényképezés alapja, és csak nehezen kiküszöbölhető. Ugyanez a probléma jelentkezik a kitakaró lap esetén, amely viszonylag közel helyezkedik el a polariméterhez. A kiértékelt felvételeken a rúd és a lap három közeli kontúrja jelenik meg, aminek unióját ezért egy megfelelő maszkkal lefedtük.

Polariméterünk nem a legjobb megoldás vízfelszínek tükröződési-polarizációs mintázatának mérésére, mivel a vízfelszín általában nagyon közel van a kamerákhoz (csak nehezen lehetne biztosítani a megfelelő magasságot a vízfelszín fölött). Ilyen mérésekre a legalkalmasabb eszköz az egykamerás 180° látószögű képalkotó polariméter, amit



5. ábra. (a) A 3.a ábrán látható részlegesen felhős égbolton (melynek optikai sajátságait az 1. ábra mutatja) a felhőként való felismerés n számának színkódolt eloszlása. (b) A 3.a ábrán az aktív (sem alul-, sem felülexponált) detektorok m számának színkódolt eloszlása. m arányos a felhőfelismerés megbízhatóságával. (c) Az a és b térképek kombinált mintázata. $n/n_{max}(m)$ arányos a felhő valószínűségével, $1-n/n_{max}(m)$ pedig a tiszta égbolt valószínűségével. (d) A kombinált (fotometrikus és polarimetrikus) algoritmussal felismert felhős (fehér) és tiszta (fekete) égboltterületek. Az algoritmus azon képpontokat tekinti felhősnek, melyek $n(m)$ értéke nagyobb $n^*(m)$-nél, míg az $n^*(m)$-nél kisebb $n(m)$-mel rendelkező képpontokat tiszta égboltnak tekinti. Az eljárás *PED*-értéke $n^*(2) = 1$, $n^*(4) = 3$ és $n^*(9) = 5$ esetén minimális. A felülexponáltság miatt kiértékelhetetlen területeket ($m = 0$) pepita minta jelzi. A sugárirányú pepita alakzat a napkitakaró tányér és rúdjának a maszkja.

3. táblázat

A felhődetekció eredményei

detekció típusa	PCC_{det} (%)	−	$PSDC$ (%)	=	PCC_{min} (%)	≤	PCC_{val} (%)	≤	PCC_{max} (%)	=	PCC_{det} (%)	+	$PCDS$ (%)	+	PUO (%)	$\Delta PCC = PCC_{max} - PCC_{min}$ (%)
IRGB	50,7	−	4,5	=	46,2	≤	56,1	≤	79,3	=	50,7	+	6,0	+	22,6	33,1
PR	45,9	−	9,7	=	36,2	≤	56,1	≤	80,8	=	45,9	+	18,7	+	16,2	44,6
PG	38,2	−	6,4	=	31,8	≤	56,1	≤	62,9	=	38,2	+	22,3	+	2,4	31,1
PB	49,9	−	8,5	=	41,4	≤	56,1	≤	68,3	=	49,9	+	11,2	+	7,2	26,9
αR	59,7	−	13,8	=	45,9	≤	56,1	≤	84,8	=	59,7	+	8,9	+	16,2	38,9
αG	55,1	−	16,1	=	39,0	≤	56,1	≤	72,6	=	55,1	+	15,1	+	2,4	33,6
αB	51,6	−	16,0	=	35,6	≤	56,1	≤	75,8	=	51,6	+	17,0	+	7,2	40,2
FOT	50,7	−	4,5	=	46,2	≤	56,1	≤	79,3	=	50,7	+	6,0	+	22,6	33,1
POL	59,4	−	12,1	=	47,3	≤	56,1	≤	68,1	=	59,4	+	7,9	+	0,8	20,8
KOM	53,5	−	6,1	=	47,4	≤	56,1	≤	62,1	=	53,5	+	7,8	+	0,8	14,7

FOT: fotometrikus detektor, megegyezik az IRGB detektorral. POL: polarimetrikus detektor, magában foglalja a PR, PG, PB, αR, αG és αB detektorokat. KOM: kombinált detektor, a fotometrikus és polarimetrikus detektorok egyesítése. PCC_{det}: PCC detektált értéke, PCC_{min}: PCC minimuma, PCC_{val}: PCC (esetünkben vizuálisan detektált) „valódi" értéke, PCC_{max}: PCC maximuma. A táblázat második (legszélesebb) oszlopának első sorában a $PCC_{min} \leq PCC_{val} \leq PCC_{max}$ egyenlőtlenség látható, ahol $PCC_{min} = PCC_{det} - PSDC$ és $PCC_{max} = PCC_{det} + PCDS + PUO$. Az egyes tagok %-ban mért numerikus értékei az alsóbb sorokban olvashatók a különböző detekciótípusokra. A $\Delta PCC = PCC_{max} - PCC_{min}$ különbség lényegében nem más, mint PCC_{val} értékének bizonytalansága, hibája: a felhődetektálás végeredményeként az mondható, hogy PCC_{val} értéke PCC_{min} és PCC_{max} között van valahol.

például Gál és társai (2001) is használtak, amennyiben a víz felszíne sík, nem hullámzik. Hullámos, azaz időben gyorsan változó felszínű vizekről visszavert fény polarizációs tulajdonságainak vizsgálatára azonban csak a háromlencsés, háromkamerás képalkotó polariméter alkalmas.

Mivel az égbolton a Naphoz közeli és a Naptól 90°-ra eső égbolttartományok fényintenzitása között több nagyságrend különbség van, nem lehet kiküszöbölni a polariméter detektora bizonyos területeinek alul- vagy felülexponálódását. A szórt égboltfény a spektrum kék tartományában a legintenzívebb, ezért a felülexponált területek a kék színcsatornában a legnagyobbak. Ugyanígy a szórt égboltfény intenzitása a vörös tartományban a legkisebb, ezért az alulexponált területek a vörös színcsatornában a legnagyobbak. A felülexponált területek csökkenthetők az expozíciós idő és/vagy az objektívek apertúrájának csökkentésével, de ekkor az alulexponált területek növekednek meg, és viszont, ha növeljük az expozíciós időt és/vagy az objektívek apertúráját, az alulexponált területek csökkenni fognak, de a felülexponált területek megnőnek. Ugyanarról az égboltról egymásután több felvétel-hármast is készíthetünk különböző expozíciós időkkel, amennyiben az égbolt nem tartalmaz gyorsan mozgó felhőket. Amennyiben lehetőségünk van rá, minden égboltról két vagy három felvétel-hármast is készítünk különböző expozíciós időkkel, és a kiértékelés után azt a hármast tartjuk meg, amelyiken az alul- és felülexponált területek uniója a legkisebb.

A 180° látószögű halszemobjektívek számos lencsét tartalmaznak, amelyek ultraibolya-elnyelő üvegből készülnek, emiatt a teljes égboltról polarizációs mérések a spektrum ultraibolya (UV) tartományában nem lehetségesek ezekkel az eszközökkel. Ilyen mérésekhez vagy UV-áteresztő üvegből (például kvarcból) készült lencséket vagy UV-visszaverő tükröket kell használni. North és Duggin (1997) polariméterében és a YES cég TSI-880 *fullsky imager*ében ilyen tükrök fordulnak elő.

A kombinált felhődetekció előnyei a csak fotometrikus és csak polarimetrikus algoritmussal szemben

Cikkünk korábbi fejezeteiben leírtuk, miként fejleszthető tovább a fotometrikus felhődetekció hagyományos algoritmusa [4–6] a földi 180° látószögű képalkotó polariméterrel a vörös, zöld és kék színcsatornában mérhető polarizációfok és polarizációs irány információk felhasználásával. A *3. táblázat* második oszlopának első sorában a $PCC_{min} \leq PCC_{val} \leq PCC_{max}$ egyenlőtlenség látható, ahol $PCC_{min} = PCC_{det} - PSDC$ és $PCC_{max} = PCC_{det} + PCDS + PUO$. $PCC_{det} = PCC$ detektált értéke, $PCC_{min} = PCC$ minimuma, $PCC_{val} = PCC$ (esetünkben vizuálisan detektált) „valódi" értéke, $PCC_{max} = PCC$ maximuma. Az egyes tagok %-ban mért numerikus értékei a *3. táblázat* alsóbb soraiban olvashatók az egyes detekciótípusok esetén. A $\Delta PCC = PCC_{max} - PCC_{min}$ különbség lényegében nem más, mint PCC_{val} értékének bizonytalansága, hibája: a felhődetektálás végeredményeként az mondható, hogy PCC_{val} értéke PCC_{min} és PCC_{max} között van valahol.

Amint az a *3. táblázat*ban látható, a polarizációs adatokat is figyelembe vevő kombinált (KOM) algoritmus sokkal megbízhatóbban ismeri fel a felhőket, mint a fotometrikus (FOT) algoritmus: az előbbi bizonytalansága (ΔPCC_{KOM} = 14,7%) kevesebb mint a fele az utóbbiénak (ΔPCC_{FOT} = 33,1%). Ennek oka, hogy az előbbi sokkal árnyaltabb, mint az utóbbi: a kombinált algoritmus hét (IRGB, PR, PG, PB, αR, αG és αB) detektort foglal magába, míg a fotometrikus algoritmus csupán egyet (IRGB). Ha az IRGB detektor alul- vagy felülexpozíció miatt inaktív, a felhőzöttségi állapot fotometrikusan meghatározhatatlan. Minél nagyobb az égboltkép *PUO* kiértékelhetetlen hányada, annál rosszabb eredményt ad a fotometrikus algoritmus. A kombinált algoritmus esetében viszont az IRGB detektor működésképtelenségéből még nem következik *PUO* nagy értéke, mivel ahol az IRGB detektor inaktív, még a többi hat detektor között lehet több aktív is. A kom-

binált algoritmus előnye éppen abban áll, hogy mielőtt egy képpontról meghoznánk a végső döntést (felhőhöz tartozik-e vagy tiszta égbolthoz), háromszor annyi döntést hozunk, mint a fotometrikus detekció esetén.

A *3. táblázat*ban az is látható, hogy a tisztán polarimetrikus (POL) algoritmus is sokkal megbízhatóbb, mint a fotometrikus: az előbbi bizonytalansága (ΔPCC_{POL} = 20,8%) kevesebb mint a kétharmada az utóbbiénak (ΔPCC_{FOT} = 33,1%). Ennek oka, hogy egyetlen képpontban kétszer annyi döntés születik, mint fotometrikus esetben. Az is látható a *3. táblázat*ban, hogy a polarimetrikus és kombinált algoritmusok jobb eredménye a fotometrikussal szemben legnagyobbrészt a *PUO* kis értékeinek köszönhető, amiből következik, hogy ez az előny elveszhet vagy csökkenhet, amennyiben az égboltképen nincsenek alul- és/vagy felülexponált területek. Mint arra az előző alfejezetben már rámutattunk, ilyen területek általában elkerülhetetlenül jelen vannak, így a kombinált felhőfelismerő algoritmus általában is megőrzi előnyét a fotometrikussal szemben, nem csak a vizsgált felhős kép esetén *(1.* és *3.a ábra)*.

A kombinált fotometrikus és polarimetrikus felhőfelismerő algoritmus továbbfejlesztési lehetőségei

Egy jól működő felhőfelismerő algoritmus megbízhatóan képes detektálni az égbolt felhőmintázatát, amiből számos paraméter értéke (*PCC, PSDC, PCDS, PUO* stb.) határozható meg. A meteorológiában és a légkörfizikában általában csupán a felhőzöttség fokára (*PCC*) van szükség, ami az egyik legfontosabb bemeneti paramétere például a klímamodelleknek. Az általunk használt *PCC*-érték a kör alakú égboltkép felhős területeinek részaránya. Ugyanúgy, mint a YES cég által kifejlesztett TSI-880 eszközben, mi sem vettük figyelembe az égbolt görbületét és a perspektivikus torzításokat, vagyis minden képpontot egyenlően súlyoztunk. Megfelelő geometriai transzformációval azonban meghatározható a valódi felhőfedettségi érték.

A kombinált algoritmus egyik sarokköve a kontrollparaméterek optimális c^*, p_Q^0*, $\Delta\alpha_Q^*$ ($Q = R, G, B$) értékeinek meghatározása. A *4. ábra* mutatja, hogy miként határoztuk meg ezen értékeket a vizuálisan felismert felhőmintázat *(3.b ábra)* segítségével. Tervezzük további felhős égboltképekre is elvégezni a vizsgálatot, hogy kiderüljön, mennyire stabilak a kontrollparaméterek optimális értékei, hiszen csak akkor használható a kombinált eljárás, ha ezen optimális értékek kis relatív szórással rendelkeznek.

A számos különféle felhőtípus létezése miatt azt várjuk, hogy a kontrollparaméterek optimális értéke függ a felhő típusától, és esetleg az égbolton elfoglalt helyétől, valamint a Nap zenittől mért szögtávolságától. Napnyugtakor és napkeltekor a felhők színe vöröses a róluk visszaverődő égboltpírtól, míg a nagyon magas cirrusz felhők egész nap többnyire kék árnyalatúak a napfénynek az alattuk elhelyezkedő vastag légrétegen való szóródása következtében. A kontrollparaméterek optimális értékét a helyi időjárási viszonyoknak, a felhőtípusnak és a napszaknak megfelelően kell beállítani, hogy a felhőfelismerés megbízható legyen.

Köszönetnyilvánítás

Kutatómunkánkat a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János kutatói ösztöndíja és az Oktatási Minisztérium Széchenyi István ösztöndíja (H. G.), valamint a Soros Alapítvány 230/2/878 számú doktori ösztöndíja (G. J.) támogatta. Hálásak vagyunk *Putsay Mártá*nak (Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest) a szakirodalom beszerzésében nyújtott segítségéért. Köszönjük *Horváth Ákos*nak (OMSZ, Viharjelző Obszervatórium, Siófok) a vele folytatott szakmai megbeszéléseket.

Irodalom

1. BARTA A., HORVÁTH G., GÁL J., SUHAI B., HAIMAN O.: *Felhőészlelés a földről 180° látószögű képalkotó polarimetriával* – Fizikai Szemle 51 (2001) 315–319
2. G.P. KÖNNEN: *Polarized Light in Nature* – Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
3. K.L. COULSON: *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere* – A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 1988.
4. R.W. SAUNDERS: *An automated scheme for the removal of cloud contamination from AVHRR radiances over western Europe* – International Journal of Remote Sensing *7* (1986) 867–886
5. R.W. SAUNDERS, K.T. KRIEBEL: *An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data* – International Journal of Remote Sensing *9* (1988) 123–150
6. M. DERRIEN, B. FARKI, L. HARANG, H. LEGLÉAU, A. NOYALET, D. POCHIC, A. SAIROUNI: *Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR imagery* – Remote Sensing of Environment *46* (1993) 246–267

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LI. évfolyam 11. szám 2001. november