

**A 2009-ES ÁZSIAI TELJES NAPFOGYATKOZÁS
A SHANGHAI TÉRSÉGÉBEN VÉGZETT
MIKROMETEOROLÓGIAI MÉRÉSEK TÜKRÉBEN**

SZAKDOLGOZAT

**FÖLDTUDOMÁNY ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SZAKIRÁNY**



Készítette: Lehoczky Annamária

Témavezető: Dr. Weidinger Tamás

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2011.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. A NAPFOGYATKOZÁSOK ÁTTEKINTÉSE	4
2.1. Csillagászati alapok	4
2.2. A napfogyatkozás típusai	6
3. A 2009. JÚLIUS 22-I TELJES NAPFOGYATKOZÁS: AZ ÉSZLELÉSI HELY KIVÁLASZTÁSA.....	8
4. A 2009. JÚLIUS 22-I TELJES NAPFOGYATKOZÁS A MÉRÉSEK TÜKRÉBEN.....	13
4.1. A meteorológiai elemek viselkedése napfogyatkozások során	13
4.2. A meteorológiai elemek változása a kínai szinoptikus állomások adatai alapján.....	18
4.3. A mikrometeorológiai állomás felépítése, adatgyűjtő rendszere	22
4.4. Műszer-kalibráció	23
4.5. A meteorológiai elemek változása a Jinshan-i mérések alapján.....	26
4.5.1. A mérőhely, mérési körülmények	27
4.5.2. A mérési eredmények bemutatása, elemzése	28
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	43
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	44
IRODALOMJEGYZÉK.....	45

*„Életünk napfényből és árnyékból épül fel –
lám, a Nap nagy csillag, az árnyék meg csak hűlt hely!”
/Richard Le Gallienne (1920?)/*

1. Bevezetés

Mióta értelemre ébredtünk a Földön, tudunk a napfogyatkozásokról, de csak az utóbbi, nagyjából 3000 évben értettük meg, és tudjuk előrejelezni. E természeti tüneményt mindmáig különleges érdeklődés övezi. Meteorológiával és csillagászzal foglalkozó hallgatóként lehetőségem volt „közelről” megismerni, s saját mikrometeorológiai méréseket végezni a 2009. július 22-i ázsiai teljes napfogyatkozás során a tejesség sávjába eső Jinshan-ban (100 km-re Shanghai-tól), a Sárga-tenger partján.

A meteorológiai mérések fontosak a jelenség pontos dokumentálásához. A fényes nappal hirtelen éjszakává fordul, a globálsugárzás zérussá válik, s ez befolyással van szinte az összes állapothatározóra, a felszín-légkör kölcsönhatásokra és a turbulens kicserélődésre. Az ilyen típusú mérések hozzájárulnak az élőlények viselkedési és fiziológiai változásainak magyarázatához is.

Céljaim között szerepel i) a napfogyatkozás alatt bekövetkező mikrometeorológiai változások dokumentálása és elemzése az ELTE Meteorológiai Tanszékén összeállított, s általam hitelesített mikrometeorológiai mérőállomás adataira és a kínai szinoptikus állomások méréseire alapozva, továbbá ii) eredményeim összevetése a szakirodalomban közölt napfogyatkozások során mért mikrometeorológiai változásokkal. Munkám során foglalkoztam a napfogyatkozást megelőző időjárás előrejelzésekkel is (ez a hely kiválasztásánál volt fontos a „csillagászati expedíció” számára), valamint az esemény csillagászati hátterével, amit a dolgozat elején tekintek át.

A jelenség külön érdekessége, hogy ez volt a XXI. század leghosszabb teljes napfogyatkozása, ehhez mérhető csak 2132-ben lesz újra. A Hold árnyéka majdnem elérte a maximális 264 km-es átmérőt, s így a leghosszabb totalitás (teljesség) időtartama 6 perc 39 másodperc volt, ami csak alig egy perccel maradt el az „abszolút fogyatkozás” elméleti határától. Az umbra (teljes Hold-árnyék) Nyugat-Indiából indulva csaknem 15 150 km hosszan „söpört végig” keleti irányban az ázsiai kontinensen, míg végül a Csendes-óceánon távozott ismét az űrbe. Mindeközben a Föld felszínének 0,71 százalékát járta be.

Hipotézisem az volt, hogy a totalitás időtartama, továbbá az optimális évszak, napszak és földrajzi szélesség együttesének köszönhetően a korábbi napfogyatkozásokhoz képest nagyobb mérvű lokális változások várhatóak. A tény azonban az, hogy a felhőzet és a csapadék adta a mérések sajátos jellegét.

2. A napfogyatkozások áttekintése

2.1. Csillagászati alapok

A napfogyatkozás egy rendkívül összetett „égi játék” eredménye. Alapvető feltétele a szinte tökéletes méretarány a Nap-Föld-Hold-rendszerben, hiszen mind a Nap, mind a Hold körülbelül azonos ($\sim 0,5^\circ$) látszó szögátmérővel rendelkezik, ami a távolságok és az átmérők arányából adódik (1. táblázat). A Nap átmérője a Holdénak 400-szorosa, de a Nap 400-szor messzebb is van a Földtől. Ha a 3476 km átmérőjű Hold csak 273 km-rel lenne kisebb, vagy távolabb volna, s így kisebbnek látszana – már nem láthatnánk teljes fogyatkozást (Littmann et al., 1999).

1. táblázat. Átmérők és távolságok (Littmann et al., 1999).

	Nap	Hold	Föld
Átmérő [km]	1 392 000	3 476	12 756
Közepes távolság a Földtől [km]	149 598 000	384 400	–

Ezek azonban csak átlagos értékek. Bolygónk ellipszis-pályán kering a Nap körül, így perihéliumban (napközelpont) nagyobbak látszik, míg aféliumban (naptávolpont) kisebbnek, következésképp itt könnyebben eltakarhatja a Napot a Hold. A Hold helyzete akkor a legoptimálisabb ahhoz, hogy kitakarja a Napot, amikor éppen a perigeumba (földközelpont) ér.

2. táblázat. A Nap és a Hold szögmérete (Littmann et al., 1999).

	legnagyobb	legkisebb	átlagos
Nap szögátmérője	32' 31,9''	31' 27,7''	31' 59,3''
Hold szögátmérője	33' 31,8''	29' 23,0''	31' 5,3''

A teljes napfogyatkozás oka, hogy a Hold szögátmérője akár 6,6 százalékkal is felülmúlhatja a Napét (2. táblázat); illetve a „másik szélső helyzetben” a Nap szögátmérője 10,7%-kal is meghaladhatja a Holdét, ezzel gyűrűs napfogyatkozást létrehozva. S végül belátható, hogy átlagosan (időben) a Hold szögátmérője kisebb, mint a Napé, ezért a teljes napfogyatkozás ritkább jelenség, mint a gyűrűs.

A Hold keringési ideje 29,53 nap, ezt nevezzük szinodikus hónapnak, ezalatt egyszer elhagyja, majd utoléri a Nap helyét az égen. Mivel fázisait a Naptól való szögtávolsága határozza meg, így a Hold fázisai is egy teljes ciklust járnak be. Ez a lunáció, vagy holdhónap, ami alatt a Hold újholdból teleholdon át ismét újholddá változik. Napfogyatkozás csak újholdkor következhet be, holdfogyatkozás pedig csak teleholdkor (*Littmann et al.*, 1999; *Gábris et al.*, 1998).



1. ábra. A Hold növekvő látszó szögátmérője 2009. július 22-re „készülve” július 6. – telehold (baloldal) és július 20. – fogyatkozó holdsarló (jobboldal). Forrás: NASA honlap

A Hold pályája két helyen keresztezi az ekliptikát, e metszéspontok a csomók (felszálló és leszálló aszerint, hogy az északi vagy a déli féltekére lép éppen a kísérőnk). Napfogyatkozás biztosan bekövetkezik, ha a Nap akkor van közel az egyik csomóhoz, amikor a Hold áthalad rajta, tehát ekkor mindhárom az ekliptika síkjában tartózkodik. (Erre utal a sík elnevezése is a görög eklipszis ~ fogyatkozás szóból.) A Nap éves látszó útján „kereszteznie kell a két csomót”. A három égitest jellemzői alapján (*1. és 2. táblázat*) napfogyatkozás az ekliptika-metszéspontok 15,3 fokos környezetében jöhet létre. A Nap évente kétszer ér ebbe a „veszélyzónába”, s mintegy 30–37 napig tartózkodik itt (fogyatkozási szezon). Eközben a Hold járva saját útját az összes fázison áthaladva 29,53 nap alatt ér körbe, tehát találkoznia kell a Nappal (*Littmann et al.*, 1999).

Az egy évben megfigyelhető fogyatkozások számát a fogyatkozási szezonok vándorlása szabja meg. Egy naptári évben minimum kettő, de időnként négy napfogyatkozás is előfordul. Sőt, maximálisan öt napfogyatkozás is megtörténhet (de csak egy lehet teljes), ami a naptári és a fogyatkozási év eltéréséből adódik, s igen ritka.

Fontos megemlíteni, hogy a fogyatkozások meghatározott égi ritmus szerint zajlanak, minden egyes napfogyatkozás egy „család”, azaz úgynevezett szárosz tagja. Ez a leghíresebb és talán leghasznosabb fogyatkozási ritmus, amelyet a káldeusok fedeztek fel és írtak ékírásukkal agyagtáblákra az Újbabiloni Birodalom idején. Ez egy 6 585 napos

ciklus (18 év 11 nap), amit a megfigyelések indokoltak, miszerint e ciklus elteltével a napfogyatkozás ugyanabban az évszakban következik be, mint a megelőző, és a Nap közel lesz a 18 évvel korábbi fogyatkozáskor általa elfoglalt állatövi pozíciójához. Ma már tudjuk, hogy ez a csomók vándorlásának köszönhető, amik 19,4 fokkal hátrálnak, így 18,61 év alatt tesznek meg egy teljes fordulatot. Egy szárosz (csaknem pontosan) 223 lunációnak (holdhónap) felel meg, azonban a fogyatkozási szezonok tolódásának „pontatlansága miatt” a Nap folyamatosan „kiballag” e ciklusból, ezért beszélhetünk a szárosz fejlődéséről. A szárosz minden egyes visszatérésekor nagyobb és nagyobb részleges fogyatkozás lesz, míg végül a Hold a Nap középpontja előtt halad el, amikor is a fogyatkozás vagy gyűrűs, vagy teljes lesz. Ezután, a következő generációk során, ahogy a Nap nyugatra távolodik a fogyatkozási határon belül, a fogyatkozások újra részlegesek lesznek. Tehát egy szárosz körülbelül 1300 évig él. (Littmann et al., 1999)

A 2009. július 22-i teljes napfogyatkozás a 136. szárosz 37. tagja. Ez a szárosz (vagy „napfogyatkozás-dinasztia”) 1360. június 14-én született mélyen a déli félgömbön. Fejlődése során, útvonalát egyre északabbra téve 1955-ben érte el tetőpontját, a leghosszabb totalitást 7 perc 8 másodperces időtartammal, majd lassú hanyatlásba kezdve 2009. július 22-én egy 6 perc 39 másodperces maximális totalitással tért vissza. E szárosz 1262 éven át (a 3. évezred közepéig) 71 nap-fogyatkozást teremt, amiből 45 teljes. (Littmann et al., 1999; Espenak és Anderson, 2008).

2.2. A napfogyatkozás típusai

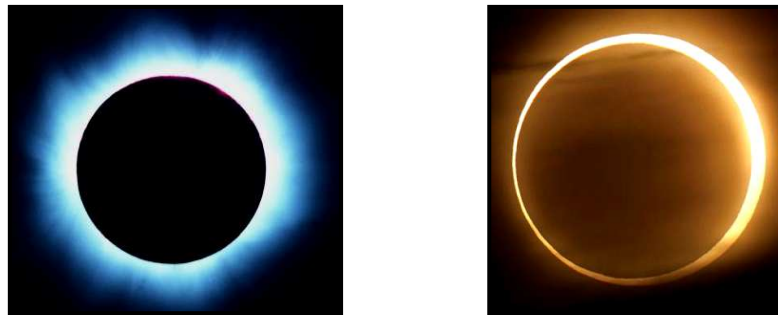
E fejezetben röviden áttekintem az egyes napfogyatkozás típusok főbb sajátosságait, előfordulási gyakoriságát, hogy jobban elhelyezhessük a 2009-es ázsiai eseményt.

Részleges napfogyatkozásról beszélünk, ha a Hold teljes árnyéka nem vetül a Földre, csak az úgynevezett félárnyék érinti azt. A részleges napfogyatkozások csak nagy takarás esetén (cc. 15% felett) vehetők észre szabad szemmel.

Teljes napfogyatkozás esetén a Hold teljes árnyéka a Földre vetül, és a Hold látszólagos mérete nagyobb, mint a Napé (2. ábra). A napfogyatkozás elején és végén, valamint a totalitás határán kívül részleges napfogyatkozás figyelhető meg. E típusnál lehet észlelni a Nap külső légkörét (a koronát), illetve a napkorong szélén zajló napkitöréseket, protuberanciákat (Pasachoff, 2009). Az elméletileg lehetséges leghosszabb totalitás (amikor a Hold teljesen eltakarja a Napot): 7 perc 31 másodperc. Érdekességként

megjegyezzük, hogy a leghosszabb időtartam „az általunk belátható” 10 000 év alatt (Kr.e. 3000 – Kr.u. 7000) 7 perc 29 másodperc lesz jó másfél évszázad múlva, 2186. július 16-án. A XXI. század megtapasztalhatóbb „közelségében” négy 6 perc feletti teljes napfogyatkozás várható, közülük a leghosszabb (6 perc 39 másodperc) már lejátszódott 2009. július 22-én.

Gyűrűs napfogyatkozást akkor láthatunk, ha a Nap látszólagos mérete meghaladja a Holdét, így teljes árnyékának egyetlen pontja sem tud a Földre vetülni. A teljes árnyék kúpja a Föld előtt halad el (2. ábra). Ilyenkor még a napfogyatkozás közepén is látszik a Nap széle. A részleges napfogyatkozáshoz hasonlóan a napkorona itt sem látható. A gyűrűs napfogyatkozás totalitása tovább tarthat (akár 12 percig is), mint egy teljes napfogyatkozásé, mert a "kisebb" Holdnak több időre van szüksége, hogy elhaladjon a Nap előtt.



2. ábra. Teljes (baloldal) és gyűrűs (jobboldal) napfogyatkozás. (MCSE és NASA honlap)

Hibrid napfogyatkozás viszonylag ritkán fordul elő, ez egy átmenet a gyűrűs és a teljes napfogyatkozás között. A hibrid napfogyatkozás azért jön létre, mert a Hold látszólagos mérete és a Nap látszólagos mérete majdnem teljesen egyforma. Általában gyűrűsként kezdődik, majd az útvonala mentén teljes fogyatkozássá változik, aztán a fogyatkozási út vége előtt újra gyűrűs lesz, mivel a Föld görbülete miatt a felszín elhajlik az árnyéktól.

3. táblázat. A napfogyatkozások eloszlása (4 530 év átlagában, Littmann et al., 1999).

Teljes	26,9%
Gyűrűs	33,2%
Hibrid (gyűrűs-teljes)	4,7%
Részleges	35,2%

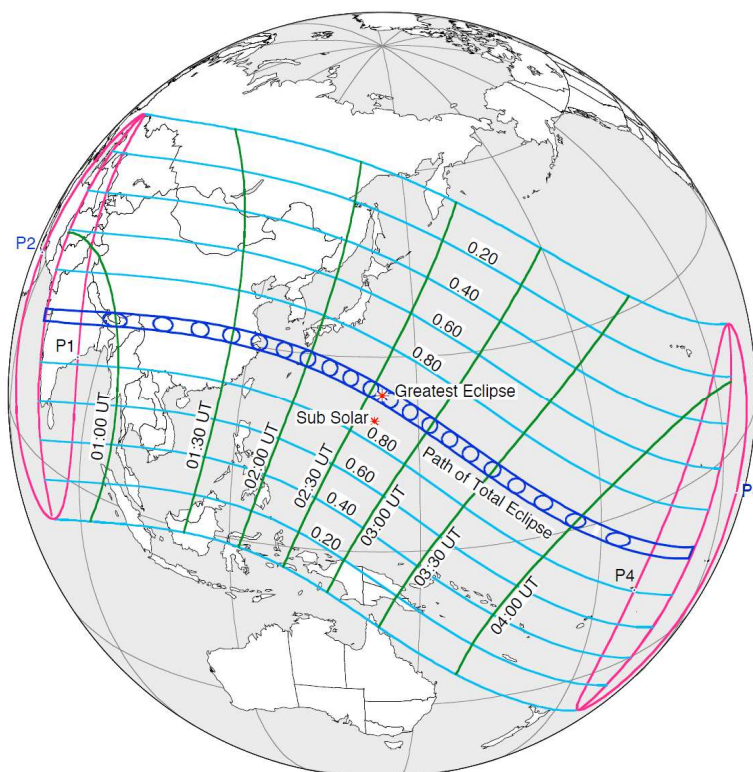
A napfogyatkozások száma évszázadonként (az elmúlt négy és félezer év átlagában a történelmi források szerint) 238. Egy adott helyen hozzávetőlegesen 375 évente figyelhető meg teljes napfogyatkozás.

A gyűrűs napfogyatkozások aránya a teljes napfogyatkozásokhoz viszonyítva 5:4 (Littmann *et al.*, 1999). Hibrid napfogyatkozás csak elenyésző számban fordul elő (3. táblázat). Meglepő, de a napfogyatkozások összességében gyakoribbak a holdfogyatkozásoknál (arányuk közel 3:2, Oppolzer (1962)).

Érdekességként megjegyezzük, hogy a Holdnak a Földtől való távolodása miatt a látszó átmérője folyamatosan csökken, és számítások szerint 600 millió év múlva olyan távolra kerül, hogy többé már nem lesz képes teljesen elfedni a napkorongot és nem lesz megfigyelhető teljes napfogyatkozás a Föld felszínéről (Littmann *et al.*, 1999).

3. A 2009. július 22-i teljes napfogyatkozás: az észlelési hely kiválasztása

A napfogyatkozás útvonala Ázsia déli részét, illetve a Csendes-óceánt érintette. Nyugat-India partjainál kelt fel a „fekete Nap” 00:53 (UTC)-kor, majd a Hold-árnyék 04:18 (UTC)-kor hagyta el a földfelszínt, s tért vissza az űrbe, míg a Nap fekete diszkoszként tűnt el a Csendes-óceán horizontja felett.



3. ábra. A 2009. július 22-i teljes napfogyatkozás útvonala, a totalitás (kék) és a részleges napfogyatkozás sávja és ideje. Forrás: NASA honlap

A teljesség sávja a Kambaj-öbölből indult, majd átszárguldott Nepálon, Bangladesen, Butánon, Mianmaron és Kínán, elhaladt Japán déli partjai mellett, végül néhány kis szigetet érintve végigfutott a Csendes-óceán jelentős részén, mindösszesen 15 ezer kilométer hosszan, mintegy 250 kilométeres sávban (3. ábra). A centralitás vonalán (a totalitás sávjának közepén) a maximális 6 perc 39 másodpercig tartó nappali sötétség a Csendes-óceánban lévő Bonin-szigetektől délre következett be, onnan nézve a Nap 86 fok magasan mutatkozott az égen, „majdnem a szerencsés megfigyelők feje felett”. Itt a totalitás sáv szélessége, 258,4 km volt, az árnyék haladási sebessége pedig $0,65 \text{ km s}^{-1}$.

Az észlelési hely kiválasztása éghajlati és meteorológiai információk alapján

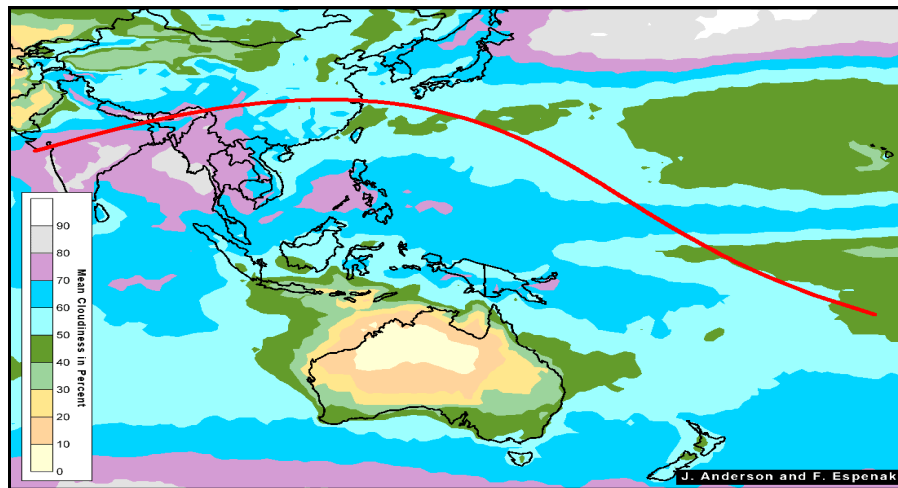
A Magyar Csillagászati Egyesület szervezésében lehetőségem volt csatlakozni az ázsiai teljes napfogyatkozást tanulmányozó – többségében amatőr csillagászokból álló – csoporthoz, s mikrometeorológiai méréseket végezni a helyszínen. A felkészülés a mérőhely kiválasztásával kezdődött. A döntést az interneten elérhető klimatológiai, majd a helyszíni előrejelzések és műholdképek (Japan Meteorological Agency) alapján hoztuk. Az időjárás nem kedvezett. Az előrejelzett csapadékmező később érkezett, s így a várt felhőzetcsökkenés helyett július 22-én hajnalban párás felhős idő fogadott bennünket, majd a totalitás után még a részleges napfogyatkozás idején megindult a heves esőzés. Utólag visszagondolva ez a szokatlan időjárás adta meg a mérések érdekességét. Nézzük az adatokat!

A 4. ábrán a felhőborítottság várható alakulását mutatjuk be. Ezt pontosította a szintén éghajlati adatok alapján készített városokra lebontott kép a totalitás sávjában (5. ábra). Mindkét jól ismert ábra a NASA honlapjáról származik. *Nem volt reménykeltő a helyzet.* A totalitás sávja által kijelölt kontinentális területek közül a legideálisabbnak jelzett kelet-kínai régióra, Shanghai térségére esett a választás (Espenak és Anderson, 2008). Ez még hónapokkal az utazás előtt történt. A pontos helyszín kiválasztása az utolsó pillanatig bizonytalan maradt. Reményeinkkel ellentétben nem választhattuk meg nagy valószínűséggel a legoptimálisabb helyet, mivel az időjárási kép az évszaknak megfelelően igen változatosan alakult.

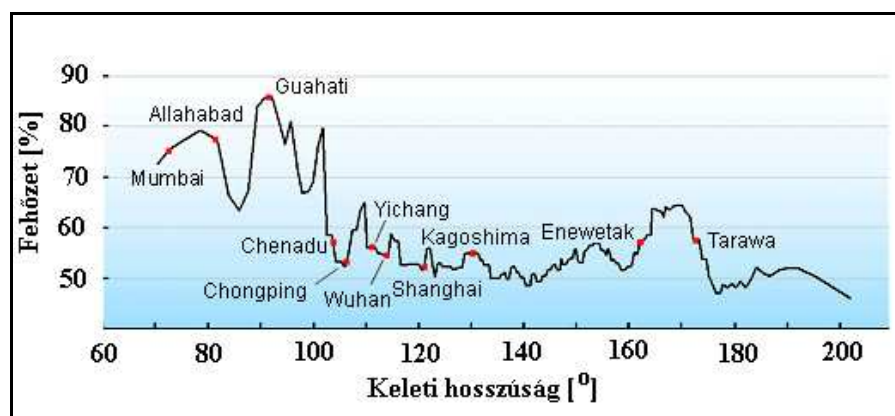
Az 5. ábrán bemutatott felhőborítottsági értékek között Shanghai térségében találjuk júliusra a legkisebbeket. Ez érthető, hiszen az Alsó-Jangce-medencében (Közép-Kelet-Kína) szubtrópusi monszun szélrendszer alakítja az erősen felhős, csapadékos időjárási képet. A kínai monszun kialakításában a tengeri hatások mellett lényeges szerepet

játszanak a belső, nyugati területek magas hegyei, fennsíkjai, elsősorban a Tibeti-plató. Nyáron az óceán felől érkező nedves légtömegek kellemetlenül fülledt klímát okoznak, hiszen a legmelegebb hónap (július) középhőmérséklete 26–30 °C körül alakul, az átlagos évi csapadékmennyiség pedig 1000–1500 mm. Ennek eloszlása azonban kevésbé szélsőséges, mint a mediterrán éghajlaton, de májustól szeptemberig meghaladja a havi 100 mm-t. Tehát nem meglepő, hogy az átlagos felhőborítottság júliusban sosem esik 50% alá (Péczely, 1979; 1984).

Az utazás tervezésekor a tengerparti sáv mellett felmerültek belső-kínai területek is. Az 5. ábra szerint az itt szóba jöhető városok közül Chongqing, illetve Wuhan tűnt a legjobb választásnak.



4. ábra. A napfogyatkozás idején várható felhőborítottság (%) éghajlati adatok alapján. A piros vonal a totalitás útja. Forrás: NASA honlap



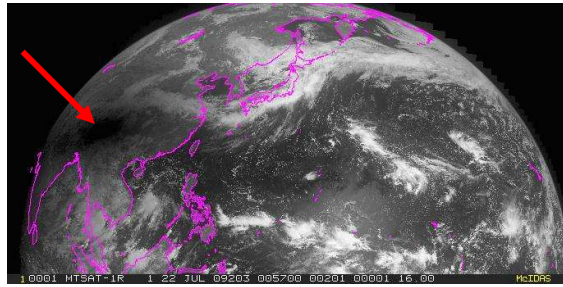
5. ábra. Az éghajlati adatok alapján várt felhőborítottság a totalitás sávjába eső nagyvárosokban nyugatról keletre. Forrás: NASA honlap

Az 5. ábra szerint Wuhan helyzete kedvezőbb még a parti térségeknél is, hisz fekvésénél fogva jóval kisebb a légköri porszennyezettsége, mint más erősen iparosodott területen.

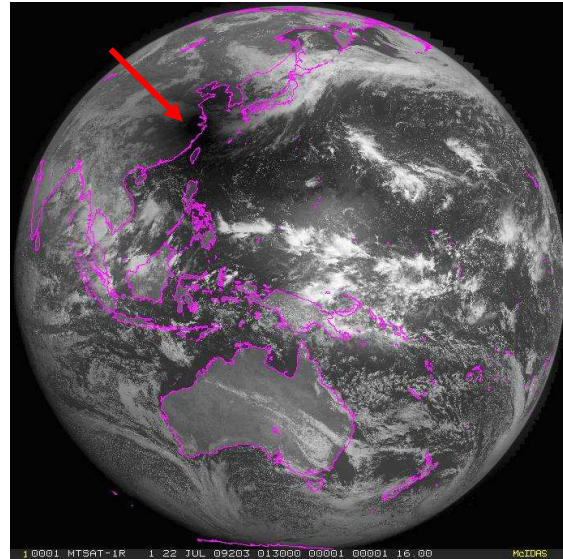
A monszun-felhőzet egy része a napi felmelegedés hajtotta konvekció és instabilitás eredménye, így Shanghai térségében a tenger közelségének hűtő hatása miatt a tengerparti zóna bizonyult „naposabbnak” a belső területekhez képest. Ezt bizonyítja Shanghai két repülőterének statisztikája is, ahol Hongqiao-hoz 67%, Pudong-hoz pedig 50% felhőborítottság társul a tengerpart javára. A tengerpart szeles lehet, s az uralkodó szélirány déli, délkeleti, ami hűvösebb és tisztább légtömegeket hozhat a Kelet-kínai-tenger felől. Áttanulmányozva a különböző éghajlati statisztikákat megállapítható, hogy Shanghai térségét elérő tájfunok valószínűsége júliusban mindössze egy százalék. A teljes borultság valószínűsége 29%, míg a teljesen tiszta égbolt, illetve a szakadozott felhőzeté rendre 4% és 22%. 30 °C környéki hőmérsékletre és a nedves tengerparti levegő miatt 24 °C körüli harmatpontra számítottunk. A gyenge szél is a várakozásnak megfelelően alakult.

A tengerhez közeli városok közül az előző napi időjárás előrejelzések alapján a centralitás vonalához közel fekvő tengerparti városkára, Jinshan-ra esett a választásunk. (Hozzávetőlegesen egy 100 km-es körben dönthettük el az észlelés helyét). A már napok óta jelzett front nem érkezett meg kora délután, helyette az éjszakai, kora hajnali órákban áztatta el a térséget, miként egy monszun-esőzéshez illik. Vastag felhőtakarót, valamint rettentően párás levegőt hagyva maga után a fogyatkozás hajnalán új helyszínt kellett találnunk. Azonban, miként a műholdképek is reprezentálják (6. ábra), egy széles felhősáv húzódott a régió felett, amiből két „menekülési útvonal” adódott a teljesség sávjában: „befelé” vagy „kifelé”. Végül az utóbbi javára született döntés a tengerpart előnyeiben bízva. A lehetőségekhez képest jó döntést hoztunk, de a csapadékhullást itt sem kerülhettük el.

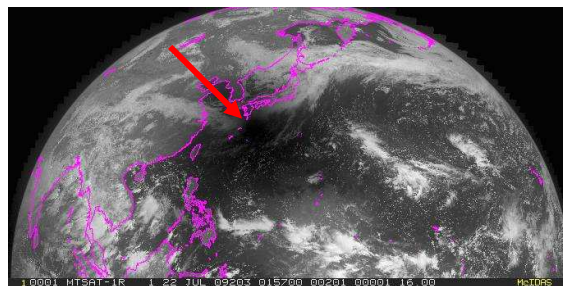
A napfogyatkozás sávját lefedő műholdképeket (6. ábra) az MTSAT-1R nyugat-csendes-óceáni (0,00 N, 140 E) geostacionárius műhold készítette félóránként a VIS (látható fény) hullámhossztartományban a 0,73 µm-es sávban. A VIS-képek a felhőzet és a felszíni alakzatok optimális megjelenítői. Hátránya – ami most előnyt jelent –, hogy nem látja a Nap által nem megvilágított, azaz éjszakai sötétségbe burkolózó területeket. E tulajdonságának köszönhetően pontosan nyomon követhető a Hold-árnyék pásztája. A félóránként rögzített képeken a sötét folt vándorlását figyelve, jól látható az a széles frontálzóna, ami Japántól Shanghai térségén át, mélyen benyúlik a kontinens belsejébe.



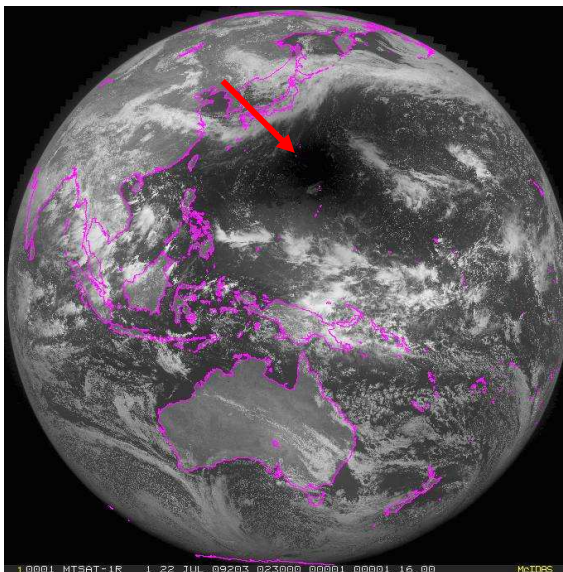
2009. 07. 22. 00:57 (UTC)



2009. 07. 22. 01:30 (UTC)



2009. 07. 22. 01:57 (UTC)

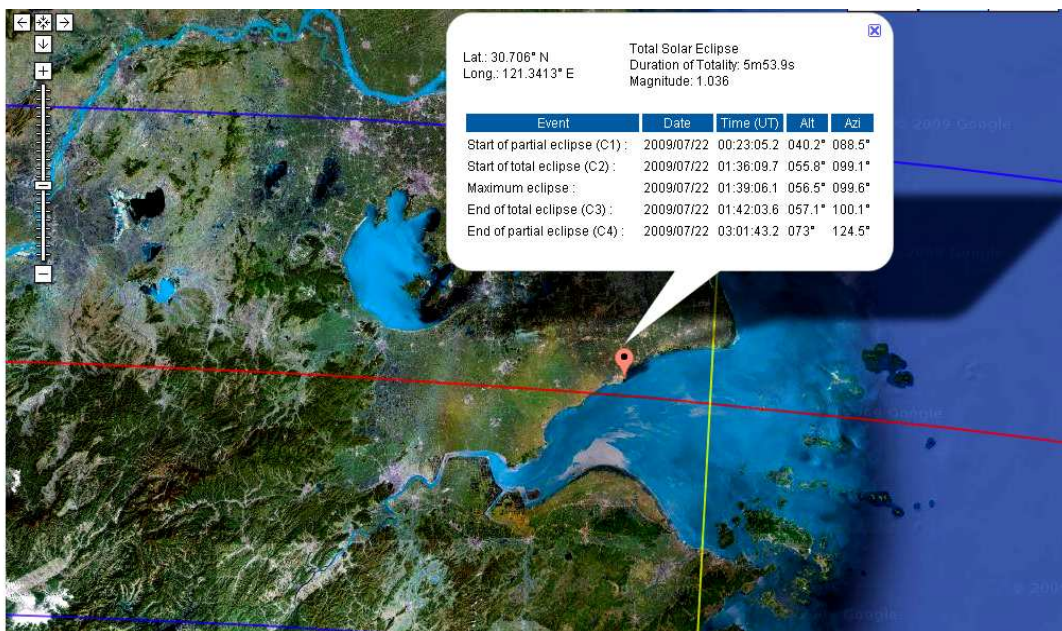


2009. 07. 22. 02:30 (UTC)

6. ábra. A napfogyatkozás vándorlása a műholdképeken (árnyékszóna – piros nyíl).
(SSEC Data Center)

4. A 2009. július 22-i teljes napfogyatkozás a mérések tükrében

E fejezetben elsőként röviden áttekintjük a napfogyatkozások meteorológiai jellemzőit, majd a kínai szinoptikus meteorológiai állomások 30 perces, illetve órás mérései alapján elemezzük a jelenséget, vizsgáljuk kimutathatóságát. Ezt követi a helyszín, majd a saját méréseim bemutatása (7. ábra). Ismertetem a mérőállomás műszerezettségét, az adatgyűjtő programját, illetve a szenzorok itthoni hitelesítését. Ezután kerül sor a mérési adatok kiértékelésre, a felhős, majd csapadékos időjárás sajátosságainak az elemzésére.



7. ábra. A mikrometeorológiai mérőhely a Jangce völcsértorkolatánál és a napfogyatkozás helyi adatai a Google térképén. Piros a centralitás vonala, kék a részleges napfogyatkozás határa.

4.1. A meteorológiai elemek viselkedése napfogyatkozások során

A napfogyatkozások különleges alkalmat adnak azon léggöri változások tanulmányozására, melyek a sugárzás hirtelen lecsökkenésekor, illetve megnövekedésekor történnek. Ilyen változások tapasztalhatók a talaj felsőbb rétegeitől egészen a légkör 50–80 km-es tartományában levő mezoszféráig (Singal *et al.*, 1982).

Az időjárást a különböző skálájú léggöri folyamatok együttese határozza meg, a több ezer kilométeres kiterjedésű ciklonok és anticiklonok mozgásától a ciklonok

frontálzónáin keresztül a zivatarfelhőkön át a kis örvényekig (Czelnai et al., 1991). Az időjárási kép, a nagyskalájú felhőzeti mező szerkezete természetesen nem függ a napfogyatkozástól, hiszen azt a légkör dinamikai folyamatai kormányozzák. Azonban lokálisan jelentős befolyással lehet a meteorológiai állapotathatározókra, s a felszín energiaháztartására (Fabian et al., 2001; Foken et al., 2001).

Napfogyatkozáskor a fényviszonyokban egy lassú kezdeti változás (részleges napfogyatkozás) után hirtelen csökkenés következik be közvetlenül a totalitás előtt (majd utána ugyanez fordított sorrendben): jóval gyorsabban és más jellegű időbeli lefolyással, mint naplementekor a besötétedés során (v.ö. Czelnai, 1995 illetve Foken et al., 2001; Weidinger et al., 2001; Nymphas et al., 2009). A teljes napfogyatkozás ritka jelenség. Érthető, hogy sokan, mint egy különleges alkonyatról számolnak be, kékes-lilás színű derengésről, szürkületi homályról, fényesebben látszó horizontról mesélnek, amit tulajdonképpen az árnyéksávon kívüli területek felől beszűrődő szórt sugárzás okoz (Domonkos, 1999).

Nem szabad pusztán vizuális élményeinkre hagyatkozni. Szemünk nagy alkalmazkodóképessége miatt a részleges fogyatkozás alatti besugárzás csökkenés mértékét hajlamosak vagyunk alábecsülni. Az 1999-es hazai teljes napfogyatkozásnál végzett mérések alapján is igazolták azt a feltevést, miszerint a napkorongból érkező sugárzás-áramsűrűség jó közelítéssel arányos a napkorong felületével, így megállapítható, hogy még egészen kis látható napkorongfelület esetén is számottevő sugárzás érkezik. Ahhoz, hogy például a telihold fényével világítson a már majdnem teljesen elfedett Nap, elegendő, ha a napkorongnak csak 1/400 000-ed részét nem takarja el a Hold (Tóth, 2001).

Analógiát keresve a jelenség hatásaira, eszünkbe juthat, hogy miért nem okozhat hasonló „égbolt-elsötétülést” egy a Nap elé tolakodó vastag felhő? A döntő különbség az, hogy napfogyatkozáskor egy sötét felhővel ellentétben nullává válik a globálsugárzás, azaz nemcsak a direkt, hanem a szórt sugárzás is a Hold árnyékkúpjában. A globálsugárzás minimumához közeledve (totalitás) a sugárzási egyenleg negatív értékre vált, ami stabil éjszakai rétegződést jelent, ha csak 5–10 percre is. A felszín hosszuhullámú kisugárzása dominál (a hosszuhullámú sugárzási egyenleg negatív), ami hőmérsékletcsökkenéshez vezet előbb közvetlenül a felszínen, majd a felszín közeli légrétegekben, valamint a talajban, és végül a fogyatkozás, s főként a totalitás időtartamától függően az egyre magasabb légrétegekben is. Ehhez szükséges feltétel, hogy nagy legyen a megelőző, illetve a fogyatkozás utáni besugárzás (Domonkos, 1999). Felhős, csapadékos időjárási helyzetben – amilyen a miénk is volt – e hatások elmosódottabbak.

A relatív nedvesség is változik a napfogyatkozás során. Mivel a felszínközeli réteg vízgőztartalma közel állandó, így ellentétes futású a hőmérsékletváltozással.

Sokan vizsgálták a szélesebbégi mező megváltozását is. A totalitás idején csökken a szélesebbesség. Ezt mérték 1999-ben Magyarországon (*Weidinger et al.*, 2001), ezt tapasztaltam a 2009-es kínai teljes napfogyatkozás során, de ezt az eredményt adják a numerikus modellek is (*Domonkos*, 1999). Ez érthető, hiszen a csökkenő besugárzás nyomán a talaj közeli réteg hidegebbé, stabilisabbá válik. Megjegyezzük, hogy nem következik be szélgyengülés, ha a légrétegződés már a napfogyatkozás kezdetekor is stabilis (pl. télen vagy borult időjárásban), illetve kis mértékű a csökkenés, ha nagy a légnyomási gradiens (eleve erős a szél).

*A mérési eredmények tehát megcáfolják a legendát, ami szerint a napfogyatkozás alatt feltámad a szél és egy speciális „eclipse wind” alakul ki. Fontos megemlíteni, hogy amennyiben a hőmérséklet csökkenése nem párosul szélesebbesség-csökkenéssel, a szubjektív megfigyelő a szél fokozódását hajlamos érzékelni, aminek az alacsonyabb hőmérséklettel együtt járó hűtő hatás a magyarázata. Lehetséges, hogy ez az „eclipse wind” legendájának az alapja (*Domonkos*, 1999).*

Az energiamérleg komponensek, illetve a nyomanyag fluxusok vizsgálata integráltan tükrözi a sugárzási és a meteorológiai viszonyok változását. Itt a kulcs a sugárzási egyenleg menete, a stabilissá váló légrétegződés és a turbulens kicserélődés csökkenése (*Chen et al.*, 2011). Gondoljunk csak a szélesebbesség és a dinamikus sebesség (u_*) közötti kapcsolatra, vagy a szenzibilis és a latens hőáram csökkenésére (*Foken et al.*, 2001).

A napfogyatkozások során (mindenekelőtt csapadékmentes időjárási helyzetekben) fontos információ a meteorológiai elemek szélsőértékeinek a bekövetkezési ideje (illetve intervalluma) a totalitáshoz képest. A 4. táblázat ezekről az eredményekről számol be szakirodalmi hivatkozások, illetve saját mérési eredményeim alapján.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a mérésekből és a numerikus modell-számításokból (pl. ALADIN-modell az 1999-es hazai teljes napfogyatkozásra, lásd *Domonkos*, 1999) egyértelműen kiderült, hogy a napfogyatkozás hatásai csupán néhány órán keresztül jelentkeztek.

4. táblázat. A meteorológiai paraméterek jellemző változásai és a késési idő.
(Foken et al., 2001; Weidinger et al., 2001; Nymphas et al., 2009 és saját megfigyelések)

Paraméter	Reakció	Reakcióidő ¹ [perc]
Globálsugárzás	csökken	0
Sugárzási egyenleg	csökken	~ 6,5
Hosszúhullámú felszíni kisugárzás (felszínhőmérséklet)	növekszik	~ 2
Léghőmérséklet	csökken	6 – 20
Relatív nedvesség	növekszik	2 – 20
Talajhőmérséklet (-2 cm)	csökken	10 – 35
Talajhőmérséklet (-5 cm)	csökken	10 – 40
Szélesség (2–4 m)	mérséklődik	15 – 30
Légnyomás	-	2 – 87
Sűrűlási sebesség	csökken	~ 25
CO ₂ áram	növekszik	< 5
Ózon áram	csökken	< 5
Szenzibilis hőáram	csökken	~ 5
Látens hőáram	csökken	~ 25

¹A napfogyatkozások során (mindenekelőtt csapadékmentes időjárási helyzetekben) fontos információ a meteorológiai elemek szélsőértékeinek bekövetkezési ideje (illetve intervalluma) a totalitáshoz képest.

A napfogyatkozás a bioszférára is hatást gyakorol. Fizikai és meteorológiai kísérő-jelenségei (a megvilágítás szokatlan csökkenése, a besugárzott energia gyors változása, a hőmérséklet csökkenése, a relatív nedvességtartalom növekedése) a szakirodalmi adatok szerint hatással vannak a növényzetre, az állatokra, sőt még az emberre is (Vértes, 2000). John Milton így fogalmazott 1667-ben: „...a Nap... fogyatkozása szörnyű félhomályt terít a félvilágra, s változással rémít királyokat.”

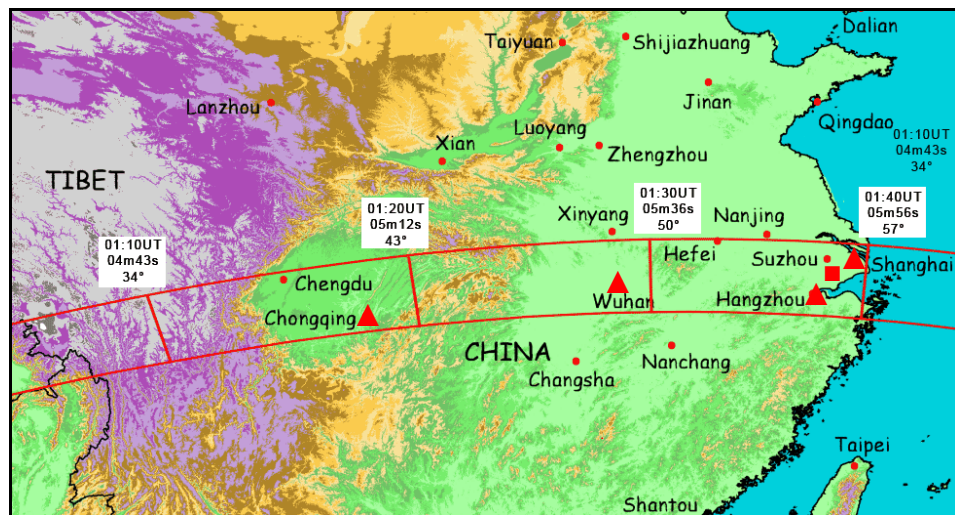
Az állatok, leggyakrabban a madarak és a rovarok éjszakai pihenőjükre készülnek, vagy zavarodottan viselkednek, a virágok pedig bezárják szirmaikat. 1999-ben a magyarországi teljes napfogyatkozás idején pl. a Kiskunsági Nemzeti Park területén több kutatást is végeztek, hogy megfigyeljék a madarak, illetve a méhek viselkedését, napi aktivitás változását. A madarak a fényintenzitás napszakos változásához hasonlóan reagáltak a jelenségre, azaz a sötétedés hatására esti viselkedést mutattak, míg a világosodásra megújuló aktivitással válaszoltak (Csörgő et al., 2001). A méheket tekintve – amik az égbolt polarizációs mintázatát is felhasználják tájékozódásukhoz – az eredmények hasonlóak voltak. A teljes fogyatkozás alatt és azután még egy óráig erősen csökkent gyűjtési aktivitás volt jellemző, illetve a totalitást megelőző és követő néhány perc alatt

zavarodottság volt megfigyelhető (tájékoztató képesség zavara, kinnrekedtek zúgó hangot hallattak, erős kimerültség a visszatérőknél, ventilálás a szárnyakkal, szokatlan elrepülés) (Baldavári et al., 2001). Mindezen furcsa tapasztalatot az égbolt polarizációs mintázatának és a légkör alapvető meteorológiai paramétereinek a megváltozására vezetik vissza (Bernáth et al., 2001). *A kínai expedíciókon egy biológus is velünk tartott. A madarak itt is hasonlóan viselkedtek, a totalitás idején elcsendesültek és visszahúzódtak a part menti nádasba. A rovarok aktivitása is észrevehetően csökkent, pl. a szitakötők eltűntek az égről.*

Végezetül megemlítem, hogy a teljes napfogyatkozás további, elsősorban geofizikai vonatkozású méréseket és megfigyeléseket is lehetővé tesz, mint az égbolt polarizációs mérések, ionosféra vizsgálatok, továbbá a napkorona-sugárzás, protuberanciák, napfoltok, különféle sugárzási kölcsönhatások stb. tanulmányozása, melyekről részletesebben olvashatunk többek között Pasachoff (2009); Pomozi et al. (2000); Chen et al. (2010) és Zhang et al. (2010) cikkében.

4.2. A meteorológiai elemek változása a kínai szinoptikus állomások adatai alapján

A napfogyatkozás általános meteorológiai jellemzése után nézzük meg, hogy hogyan tükröződött a 2009. július 22-i teljes napfogyatkozás a totalitás sávjában levő kínai szinoptikus állomások adatsorában. Vizsgálatainkban a két legfontosabb elem a hőmérséklet és a páratartalom. Az adatok az University of Wyoming internetes nyílt adatbázisából származnak. Mind a négy állomás (Chongqing, Wuhan, Hangzhou, Shanghai) repülőtéren van, elhelyezkedésüket a 8. ábra mutatja.

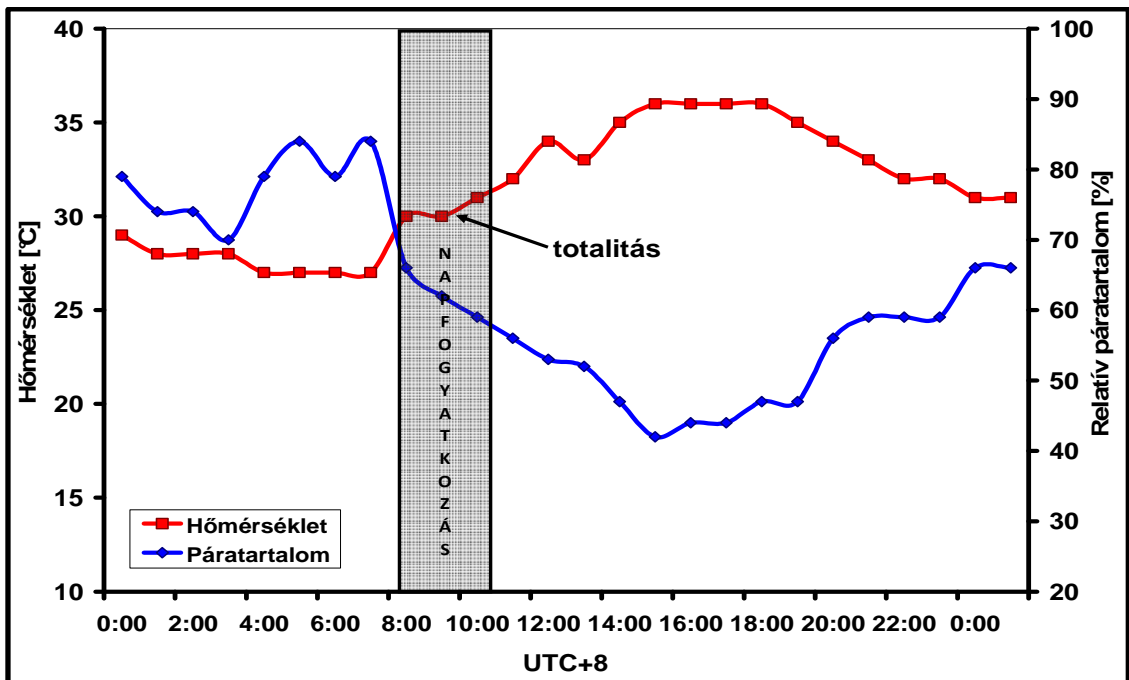


8. ábra. A négy kínai repülőtéri szinoptikus állomás (Chongqing, Wuhan, Hangzhou, Shanghai) (▲) és a saját mérési helyszín, Jinshan (■) a totalitás övében.
(NASA honlap nyomán)

Mindenütt változatosan alakult az időjárás és az égkép. Chongqing és Wuhan adatai órás bontásban, míg a másik két állomásé félóránként állt rendelkezésre. Mint látni fogjuk, még a félórás adatgyűjtési intervallum sem bizonyult kellően érzékenynek a napfogyatkozás kimutatására, továbbá a vastag felhőzet (Hangzhou, Shanghai) is csillapította a meteorológiai elemek változását. Nézzük az eredményeket!

Chongqing (ZUCK, 29,52 N, 106,48 E, 351 m) a legnyugatabbra fekvő állomás. A Jangce felső folyásánál, a Szecsuáni-medencében található, nem messze a Tibeti-plató lábától. Július 22-én nagyrészt felhőtlen volt az ég, a látástávolság 10 km volt egész nap. A hőmérséklet a részleges fogyatkozás kezdetekor 30 °C volt, míg a fogyatkozás végére (a napi menetet követve) 2 fokot emelkedett, a relatív páratartalom pedig mintegy

tükörképeként 10%-ot csökkent. Az órás adatsorban sajnos nem mutatható ki egyértelműen a napfogyatkozás hatása (9. ábra).

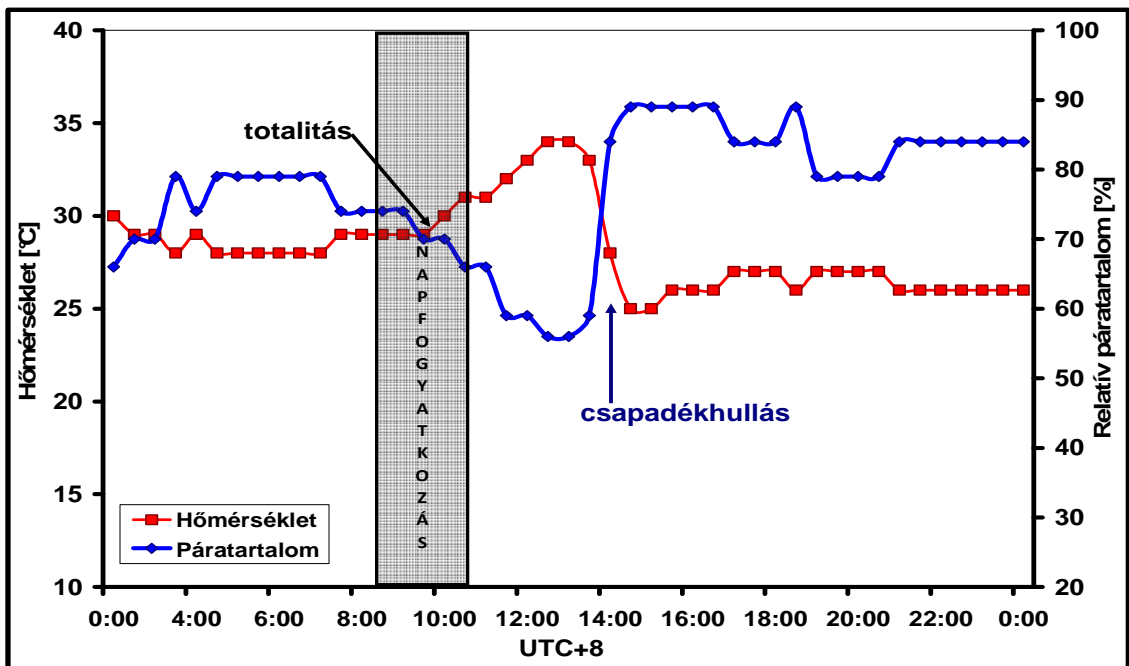
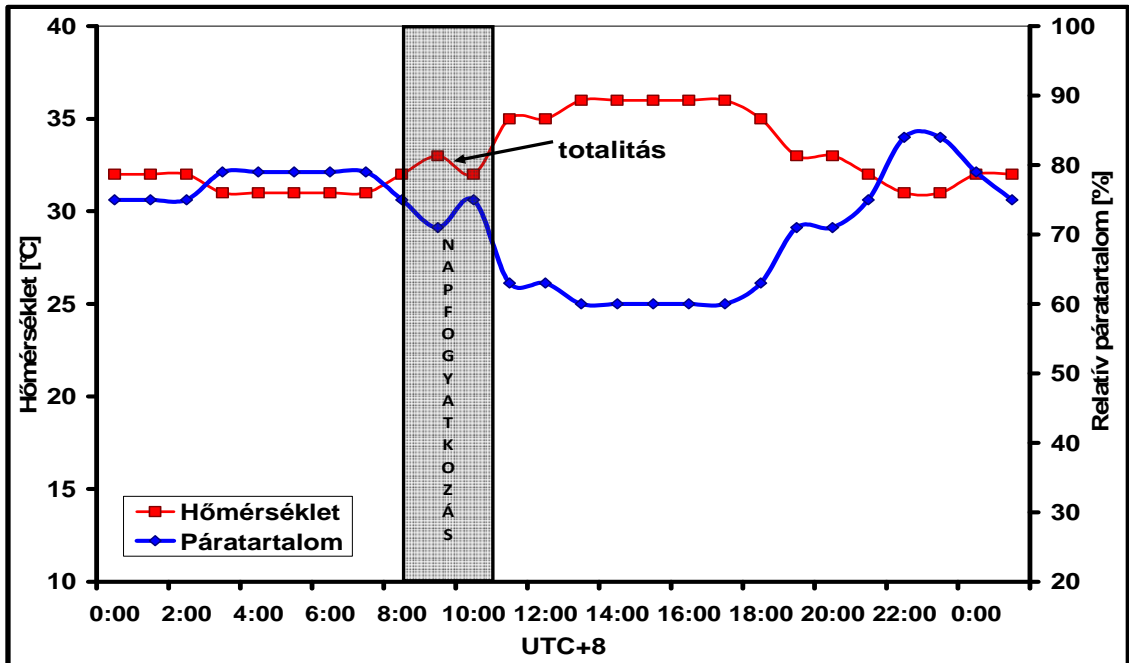


9. ábra. A hőmérséklet és a relatív nedvesség napi menete Chongqing-ben (ZUCK, 29,52 N, 106,48 E, 351 m) 2009. július 22-én.

A következő állomás a Középső-Jangce-medencében fekvő Wuhan (ZHHH, 30,62 N, 114,13 E, 23 m). A napfogyatkozás idején az előrejelzésekkel ellentétben felhőtlen volt az ég, s tökéletesek a látási viszonyok. A kora reggeli órákban lassan emelkedni kezdett a hőmérséklet, míg 9:00 és 10:00 között 1 °C-os esést mértek, ugyanis ebben az intervallumban következett be a totalitás, illetve a részleges fázisok jelentős hányada, ami jelentős „energiahiányt” eredményezett a besugárzás elmaradásával. Sajnos csak a Wuhan-i állomásról állíthatjuk, hogy a várt tendencia jelentkezett a hőmérséklet alakulásában (10. ábra). Ez érthető, hiszen egyedül itt voltak „ideálisak” a viszonyok a napfogyatkozás észleléséhez. A sűrűbb mintavételezés minden bizonnyal itt is szignifikánsabb hőmérsékletesést eredményezett volna.

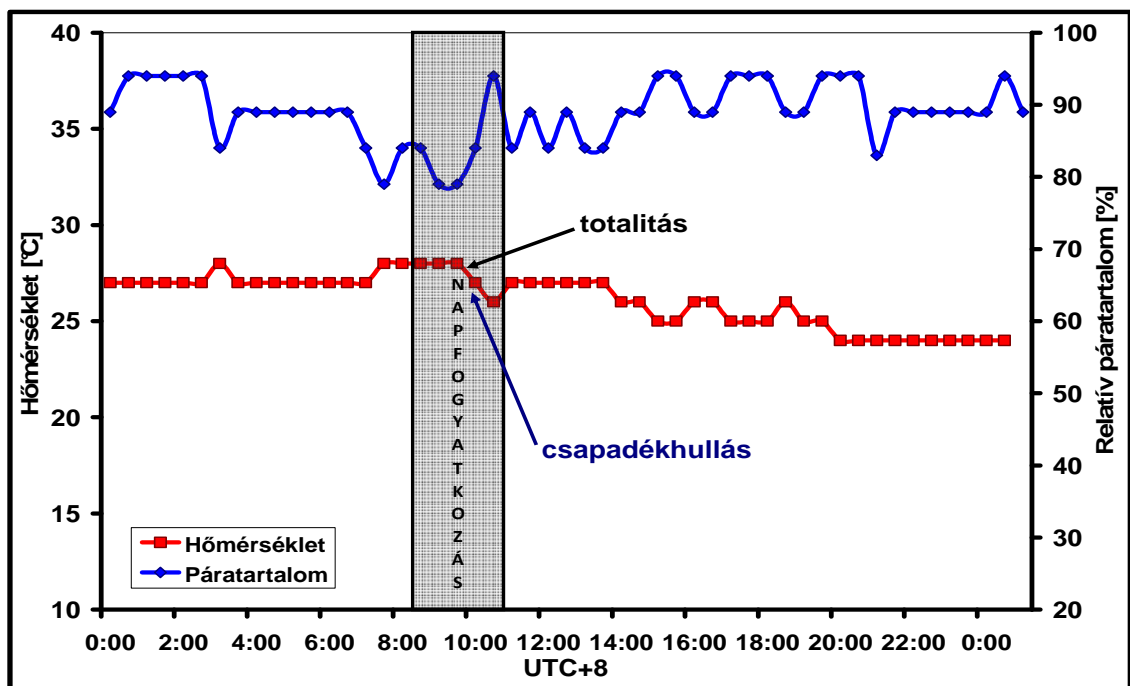
Kelet felé haladva a harmadik állomás Hangzhou (ZSHC, 30,23 N, 120,17 E, 43 m) a Jangce alsó folyásánál, a Sárga-tenger partján fekszik. Július 22-én felhős volt az ég, azonban 9:30 és 10:00 között rendkívül szerencsés helyzet alakult ki: a totalitás idejére felhőablak nyílt, lehetővé téve a jelenség vizuális észlelését. A meteorológiai adatokban azonban inkább csak a hőmérséklet viszonylagos változatlansága figyelhető meg, illetve

a 14:00-kor regisztrált csapadékkal járó hőmérsékletesés és a relatív páratartalom ugrásszerű megnövekedése (11. ábra). Számos nemzetközi kutatócsoport végezte itt az észleléseit (Pasachoff, 2009).



10-11. ábra. A hőmérséklet és a relatív nedvesség napi menete Wuhan-ban (ZHHH, 30,62 N 114,13 E, 23 m) – felső ábra és Hangzhou-ban (ZSHC, 30,23 N, 120,17 E, 43 m) – alsó ábra 2009. július 22-én.

A Jangce torkolatvidékénél, *Shanghai*-ban a Pudong-i repülőtér szinoptikus állomása (ZSPD, 31,12 N, 121,77 E, 4 m) a meteorológiai elemek hasonló értékeit rögzítette, mint amit mi is mértünk 100 km-re délre, Jinshan határában. Egy széles frontálzóna húzódott ugyanis e térségben, melynek felhőzete csak a késő esti órákban oszlott fel. Hangzhou-hoz hasonlóan az éppen megkezdődő reggeli felmelegedés megtorpant, majd *Shanghai*-ban közvetlenül a totalitás után, 10:00-kor csapadékhullás kezdődött. A részleges fogyatkozás idején már nem emelkedett a hőmérséklet (ekkor érte el napi maximumát), továbbá 9:30 és 10:00 között (ekkor következett be a totalitás) 1 °C-ot esett. A további csökkenés már egyértelműen a csapadék hűtő hatásának tudható be. A nap folyamán már nem emelkedett a hőmérséklet 27 °C fölé. A relatív páratartalom, a felhős, csapadékos időjárás miatt mindvégig 80% felett maradt. A látótávolság épp a fogyatkozás fő fázisaiban csökkent 3,5 km-re. Ezen adatok tökéletesen alátámasztják saját méréseimet a hőmérsékletet és a páratartalmat illetően (12.ábra).



12. ábra. A hőmérséklet és a relatív nedvesség menete *Shanghai*-ban (ZSPD, 31,12 N, 121,77 E, 4 m) 2009. július 22-én.

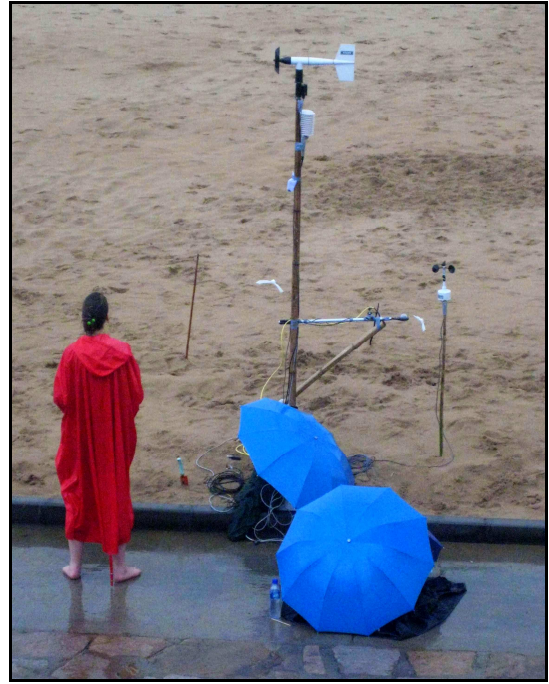
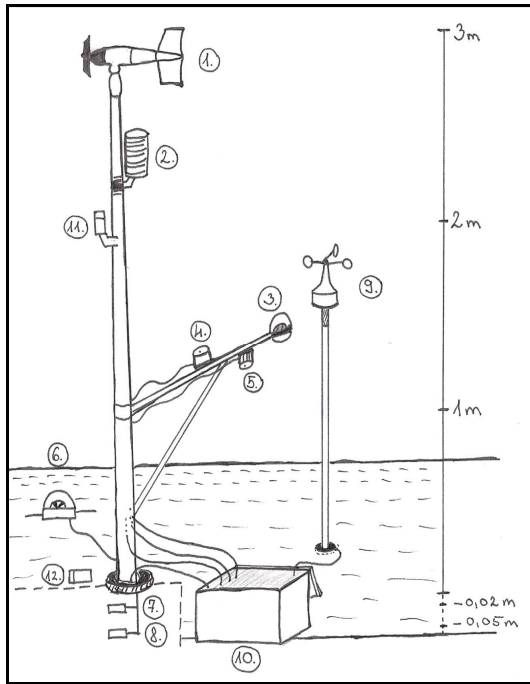
4.3. A mikrometeorológiai állomás felépítése, adatgyűjtő rendszere

Az ELTE Meteorológiai Tanszéken összeállított mikrometeorológiai állomás a klasszikus meteorológiai elemek (hőmérséklet, légnedvesség, szélsébség, szélirány) rögzítése mellett a globálsugárzás és a sugárzási egyenleg (*a felszínre érkező és a visszavert rövidhullámú sugárzás, illetve a hosszúhullámú bejövő és a hosszúhullámú visszasugárzás egyenlege*) változását, valamint a fotoszintetikusán aktív sugárzást, továbbá két szinten a talajhőmérséklet is mérte. Az adatokat egy Campbell gyártmányú, CR10 adatgyűjtő és egy hozzákapcsolt AM416 multiplexer segítségével rögzítettük (*5. táblázat*). Vittünk magunkkal tartalékként kézi műszereket is (Conrad által forgalmazott hőmérséklet nedvesség regisztrálót, kézi szélmérőt és infrahőmérőt). Ezek adatait csak ellenőrzésként használtuk. A dolgozatban külön nem elemezzük.

A meteorológiai adatok mellett tároltuk az akkumulátor feszültséget, illetve az adatgyűjtő belső és referencia hőmérsékletét. Erre azért volt szükség, mert a Campbell gyártmányú felszínhőmérséklet mérő műszer (IRTS-P Precision Infrared Thermocouple) mind a felszín mind a műszertest hőmérsékletét termoelemmel méri. Itt fontos a hideg pont pontos mérése. Ez a mi esetünkben a jól szigetelt dobozban levő adatgyűjtő felszíni (referencia) hőmérséklete. Gyors besugárzás változás – így gyors belső hőmérsékletváltozás esetén – a referencia hőmérséklet bizonytalansága 0,2–0,4 °C-ot is meghaladhatja. (Megjegyezzük, hogy az újabb fejlesztésű (SI-111 Apogee Infrared Radiometer) műszer már termisztort használ, lásd a *Campbell Scientific honlapját*.)

A szélsébség és szélirány kivételével – ahol a mintavételi időt megdupláztuk – 5 másodperces mintavételezési gyakorisággal és egyperces átlagolással dolgozott az adatgyűjtő. Részt vettem a mérőrendszer kialakításában és az adatgyűjtő programozásában. A mérőállomás felállítását és működtetését az itthoni tesztméréseknél már önállóan végeztem.

A napfogyatkozás helyszínén felállított meteorológiai állomást, illetve a műszerek sematikus elhelyezését a 13. ábra szemlélteti. A műszerek típusát, felszín feletti magasságát az *5. táblázat* adja meg. A lehetőségek szerint arra törekedtünk, hogy olyan rendszert alakítsunk ki, ami könnyen szállítható, de már alkalmat ad a felszíni energiamérleg komponensek becslésére is. Hasonló műszer együttessel találkozhatunk a 2006-os afrikai napfogyatkozás mérésénél is (*Nymphas et al., 2006*). A teljes eddy-kovariancia mérőrendszer kivitelére nem volt lehetőség.



13. ábra. A mikrometeorológiai állomás felépítése rajzon és a valóságban. A műszerek típusát és magasságát az 5. táblázat mutatja. (Forrás: saját grafika és fotó)

A részleges és a teljes napfogyatkozás idején végeztünk méréseket. A mérőrendszer felállítása és beüzemelése egy órát vett igénybe, ezalatt a szenzorok már felvették a környezet hőmérsékletét. Két és fél órás adatsor áll rendelkezésünkre (08:30 – 10:58 [UTC+8]).

4.4. Műszer-kalibráció

A pontos és megbízható mérés előfeltétele a műszerek kalibrálása. A következő részben ezzel foglalkozunk. Egyfelől az összeállított mérőállomás eszközeinek megbízhatósága érdekében próbaméréseket végeztem itthon, illetve Kínában közvetlenül a napfogyatkozás előtt. Másfelől az adatgyűjtő programot is teszteltem mind a laboratóriumban, mind a családi házunk kertjében Szegváron. Itt különös hangsúlyt fektettem a kora hajnali és késő délelőtti közötti időszakra, mivel Kínában is ekkor használtuk az állomást.

A talajhőmérők és az árnyékolóval ellátott Vaisala hőmérséklet-nedvességmérő összemérése szerint az egyik talajhőmérő szisztematikus eltérést mutatott (0,14 °C), amit egy korrekciós tényezővel vettem figyelembe.

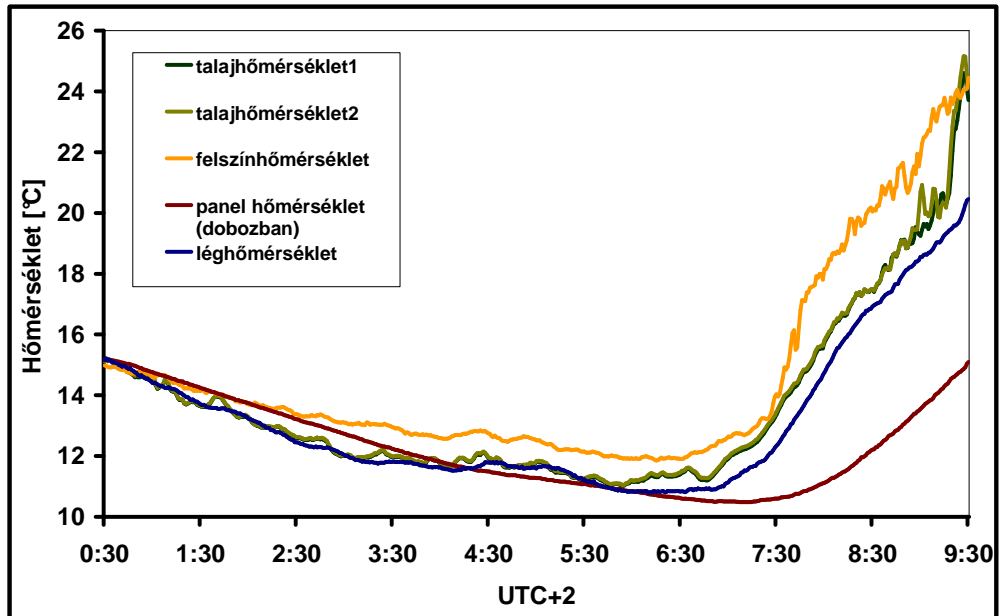
5. táblázat. A mikrometeorológiai állomás (lásd a 14. ábrát) műszerezettségé.

No.	Paraméter	Magasság	Eszköz	Gyártó
1.	Szélsebesség, szélirány	3 m	Young 05103 Szélmonitor	R.M. Young CO.
2.	Hőmérséklet, relatív nedvesség (és árnyékoló)	2,5 m	HMP45C	Vaisala Inc.
3.	Sugárzási egyenleg	1 m	Q7 Rebs	Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, WA, USA
4.	Fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR)	1 m	PAR-lite	Kipp & Zonen
5.	Infra felszín hőmérő	1 m	IRTS-P	Campbell Scientific
6.	Globálsugárzás	0,1 m	Schenk	Schenk Gmbh. Wien
7., 8.	Talajhőmérséklet	-2 cm és -5 cm	107 Termisztor	Campbell Scientific
9.	Szélsebesség	1,2 m	WA15	Vaisala Inc.
10.	Adatgyűjtő, multiplexer	0,1 m	CR10+AM 416	Campbell Scientific
11., 12.	Hőmérséklet, relatív nedvesség és USB adatgyűjtő	2 m és felszín	Voltcraft DL-100T	Conrad

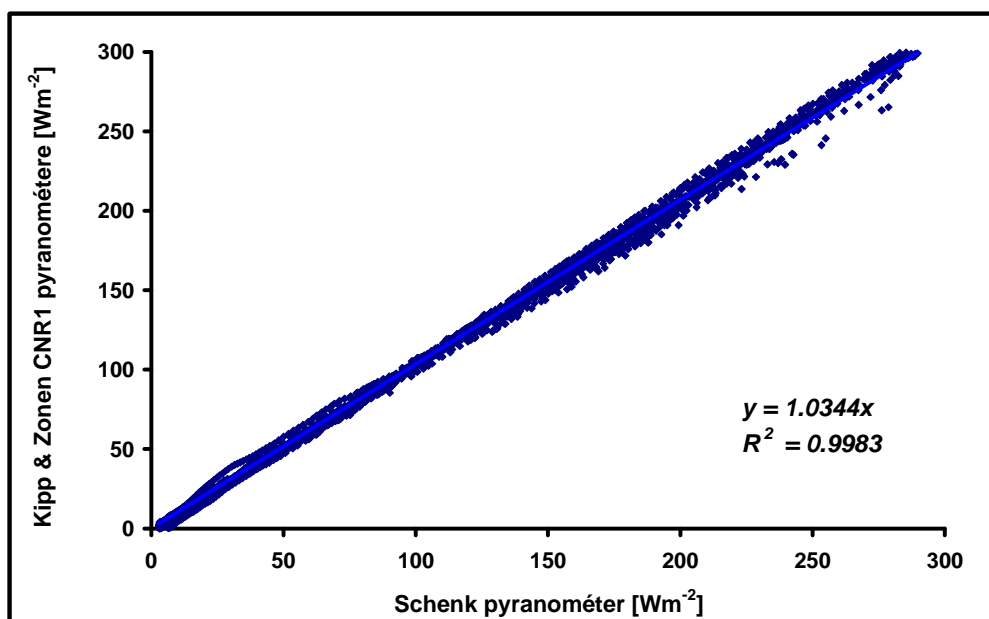
A felszínhőmérséklet-mérésnél nem találtam szisztematikus hibát. A gyári korrekciót alkalmaztuk. Referencia hőmérsékletként az adatgyűjtő dobozában mért értéket használtuk. Megjegyezzük azonban, hogy hirtelen sugárzásváltozás esetén ez az adatgyűjtő dobozában mért referencia hőmérséklet vagy panelhőmérséklet (a termoelemek hideg pontja) bizonytalan, ami elérheti akár az 1 °C-os értéket is.

A hőmérsékletmérők dinamikájáról a 14. ábra tájékoztat. A mérések Szegváron, füves talajon folytak, a szenzorokat nem érte direkt sugárzás. Éjszaka kisebb, nappal nagyobb eltérések voltak a szenzorok között. A talajhőmérők – a korrekció után – jól együtt futnak. Látszik az árnyékoló hatása is. Napfelkelte után a Vaisala szenzor kisebb értékeket mutat, mint az árnyékoló nélkül kihelyezett két talajhőmérő. Az adatgyűjtő doboz árnyékoló hatását mutatja a panelhőmérséklet lassú változása is. A legnagyobb értékeket az infrahőmérő adta, mivel érzékenyen reagál a felszín hőmérsékletváltozásaira.

A sugárzásmérő műszerek (Schenk pyranométer, Q7 sugárzásegyenleg mérő) hitelesítését az ELTE Meteorológiai Tanszék Dániában a NitroEurope program keretében végzett 2009. áprilisi mikrometeorológiai mérései alapján végeztem (Pogány *et al.*, 2010).



14. ábra. A felszín- a talaj és a léghőmérséklet mérő szenzorok együttes vizsgálata füves felszínre kihelyezve (direkt sugárzástól védve) 00:30 és 9:30 (UTC+2) között.

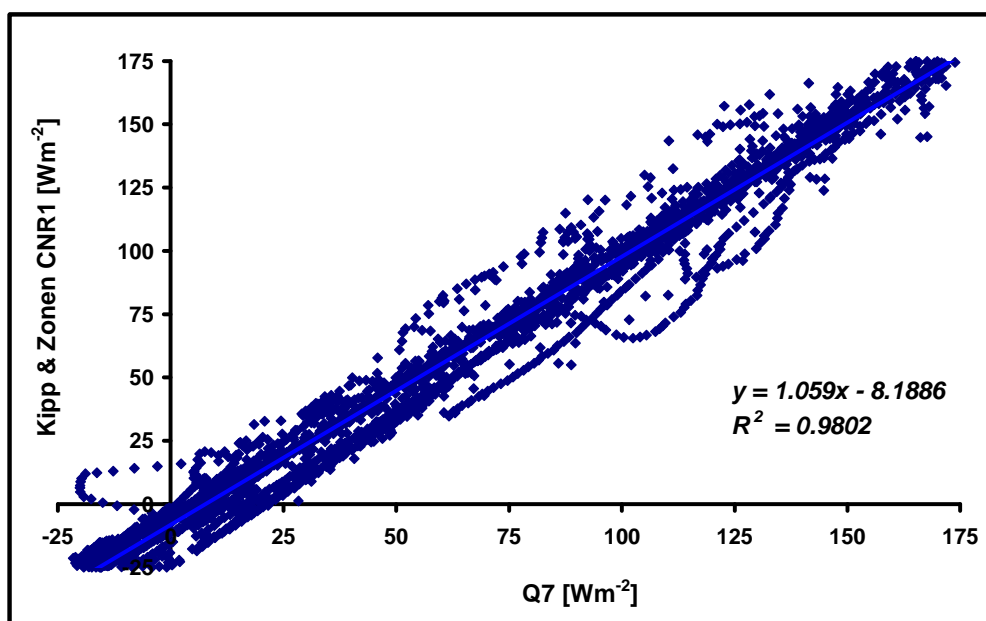


15. ábra. A Schenk pyranométer hitelesítése a CNR1 műszer által mért globálsugárzással. (2009. április, Dánia)

Referencia műszerként a Kipp & Zonen cég CNR1 négykomponensű sugárzás-egyenleg mérője szolgált. A 15. ábra a Schenk pyranométer kalibráló görbéjét mutatja. A hitelesítést a $0 - 300 \text{ W m}^{-2}$ tartományban végeztük el, mivel a földfelszínre érkező

rövidhullámú sugárzás maximális értéke nem haladta meg a 250 W m^{-2} -t a napfogyatkozás során rögzített adatsorban. A több mint negyven esztendőes műszer ma is kiválóan teljesít.

A Q7 Rebs sugárzásegyenleg mérőt szintén a CNR1 referenciamérővel vetettük össze (16. ábra). A kalibrációt $-25 - 175 \text{ W m}^{-2}$ intervallumban végeztük el. A nyers adatokra a Q7 Rebs szenzorra kidolgozott gyári szélkalibrációt alkalmaztuk. A két műszer közötti eltérés „hiszterézis” görbéit a növekvő és a csökkenő sugárzásegyenleg (napfelkelte és naplemente körüli időszak) mérés eltérő dinamikája magyarázza. Összességében jó az egyezés. Kis sugárzásegyenleg értékek esetén a pontosság 10 W m^{-2} körüli.



16. ábra a Q7 Rebs sugárzásegyenleg mérő hitelesítése a CNR1 műszer adataival.
(2009. április, Dánia)

4.5. A meteorológiai elemek változása a Jinshan-i mérések alapján

A műszeregyüttes és a hitelesítés bemutatása után a Jinshan-i mikrometeorológiai méréseket elemezzük. Nem voltak ideális körülmények: borult ég (7–8 okta felhőzet), totalitás utáni csapadéktevékenység és az ezzel együtt járó lehűlés. (Ez adja az érdekességét a méréseknek – szándékunkon kívül.) A klasszikus meteorológiai elemek (hőmérséklet, légnedvesség, szélesebesség, szélirány) mellett foglalkozunk a globálsugárzás és a sugárzási egyenleg változásával, érdekességként a fotoszintetikusan aktív sugárzással, ezt követően a talajhőmérséklettel, s végül az energiamérleg komponensekkel.

4.5.1. A mérőhely, mérési körülmények

A mikrometeorológiai állomást közvetlenül a tengerparton, a parttól körülbelül 250–300 m távolságban állítottuk fel (30° 42,459' N; 121° 30,337' E). A terep keleti, déli és nyugati irányból nyitott volt, míg északról kb. 100 m-re egy teraszos-tetős építmény magasodott, az égbolt azonban minden irányban tökéletesen látszódtott (17. ábra). A felállítás megfelel a mikrometeorológiai mérések kívánalmainak (Foken, 2008). A legkisebb homogén felszín (100 m) is több mint harmincszorosa volt, mint a legmagasabb mérés (3 m) szintje. A tereptárgyak nem zavarták számottevő mértékben a méréseket. A parton sárga homok volt szétterítve. Az égbolt a baljóslatú kora hajnali Jiaxing-i párák, felhős időjáráshoz képest nem változott még a tengerparton sem. A gyors felhőátvonulások során, itt-ott megnyíló felhőablakok jelentek meg, melyeken át fel-felbukkant a fogyatkozó Nap, ami ekkor már magasán járt az égen (57 fok körül).



17. ábra. Az észlelés és mikrometeorológiai mérések helyszíne Jinshan tengerpartján.
(Forrás: Brlás Pál honlapja) Illetve a „csillagászati expedíció” emblémája.
(Fotó: Gulyás Krisztián, szerkesztette: Molnár Gergely)

A kora reggeli órákban még oszlani látszó (inkább remélt) felhőzet a délelőtti folyamán tovább vastagodott, s szürke rétegfelhővé (Ns) fejlődött, és teljesen beborította az égboltozatot. A várthoz képest kis globálsugárzást, illetve sugárzásegyenleget mértünk.

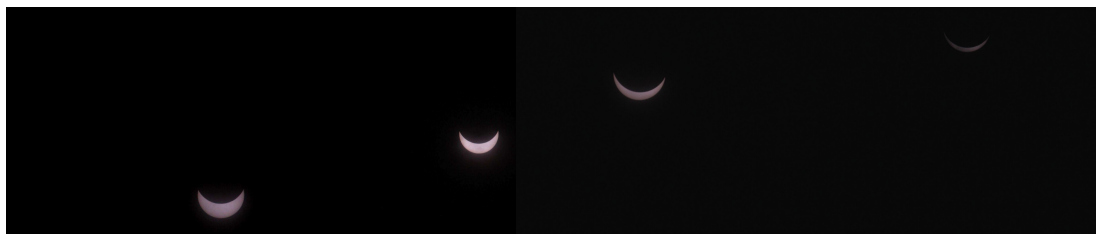
Az ébredező reggeli természetben jelentős rovaraktivitást figyeltünk meg. A meginduló reggeli besugárzásnak köszönhetően a levegő melegegett, s erősen párák volt (80% feletti), néha hűvös szellő fújdogált. A meteorológiai méréseket a részleges napfogyatkozás elején, 8:31-kor (UTC+8) kezdtem; már megkezdődött az első kontaktus, a Hold belépett a Nap elé. A totalitáshoz közeledve körülbelül egy órán át madarak és

szitakötők cikáztak az égen, az utolsó pillanatokban azonban eltűntek, a levegő jól érezhetően hűvösebbé vált. A második kontaktushoz érve (9:36) a nyugatról érkező sötétség egyszerre mindent elborított, előbb szürkületi derengést, majd hirtelen teljes sötétséget okozva. A látás néhány méterre korlátozódott. A különleges alkonyatban kigyúltak a városi fények, a szélmérők forgása látványosan mérséklődött, végül 9:42-kor (harmadik kontaktus) a koromsötét égen egyszerre felvillant egy vékony karéj, jelezve a totalitás végét, melynek látványa sajnos fedve maradt előttünk. 9:50 körül ismét megjelentek az első fecskék, s igen hűvös széláramlatok érkeztek a tenger felől. Az esemény „koronájaként” 9:58-kor cseperegni kezdett az eső, majd két perc múlva már felhőszakadás-szerű heves monszunesőzés áztatta a vidéket, az égen pedig a nyugati világos és a keleti sötét oldal között éles kontraszt rajzolódott ki egy sávban. Kisebb megszakításokkal folyamatosan esett, nyugaton (a város felett) csökkent a párásság, 10:25-kor már északkeletről gyors ütemben délnyugat felé alacsony szintű felhők vonultak, s a keleti horizont is kivilágosodott a negyedik kontaktus végéhez közeledve. A meteorológiai idősor 10:58-kor zárult.

4.5.2. A mérési eredmények bemutatása, elemzése

Az égbolt elsötéülése.

Ahogy a Hold elérte a napkorongot, és egyre többet hasított ki belőle (18. ábra), a fényviszonyok nyilvánvalóan gyengültek, s a totalitás beálltakor hirtelen lecsökkent a megvilágítás, mintha „leoltottak volna egy lámpát”.

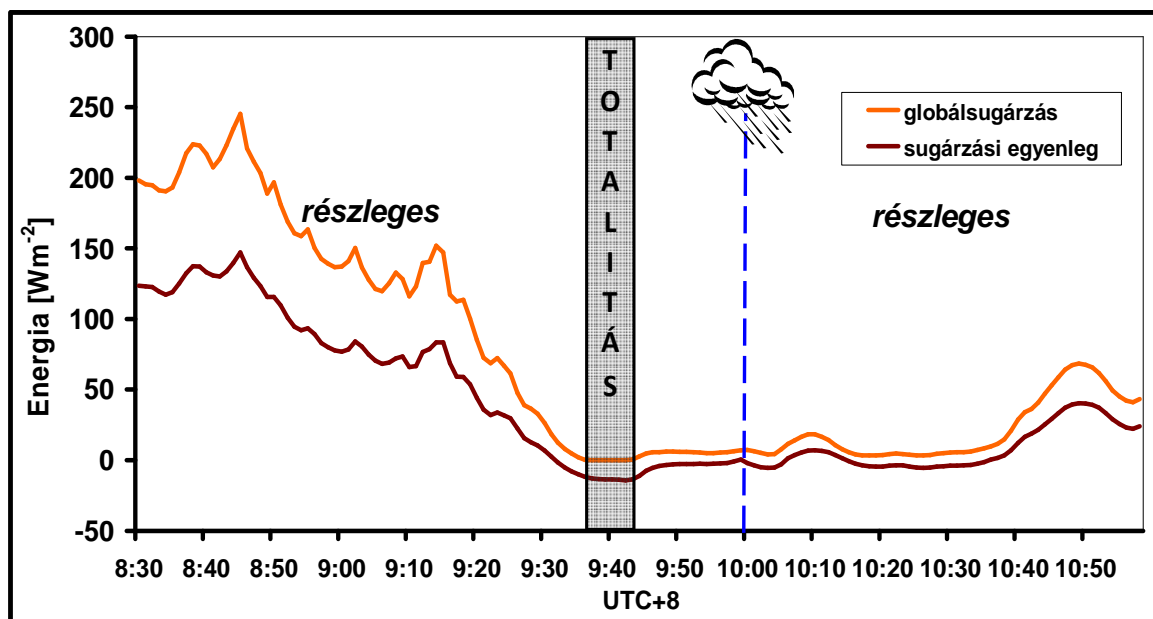


18. ábra. A részleges fogyatkozás fázisai az első és második kontaktus között, a totalitás előtt. (Forrás: saját fotók)

Egy '99-es Tiran (Irán) városából származó adat szerint teljesen derült ég mellett a megvilágítás erőssége a totalitás előtt 6 perccel mért 18 600 luxról a totalitás idején 23,4 luxra csökkent ($1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen m}^{-2}$) (Makra et al., 1999).

A globálsugárzás

A megvilágításhoz hasonlóan a globálsugárzás (a vízszintes síkra érkező teljes – pontosabban $0,3\text{--}3 \mu\text{m}$ közé eső – rövidhullámú sugárzás, azaz a Nap korongjának térszögéből érkező direkt, illetve a diffúz sugárzás összege) is karakterisztikusan csökkent, akár csak 1999-ben (Makra et al., 1999). A napi menettel ellentétben (ebben a napszakban intenzíven emelkedő görbe) a korábbi mérésekhez hasonlóan a globálsugárzás lefele ível (19. ábra). A tipikus „V” helyett inkább „U” alakot formáz, kitűnően reprezentálva a totalitás rendkívüli hosszát. A totalitás során a besugárzás néhány percre zérussá válik.

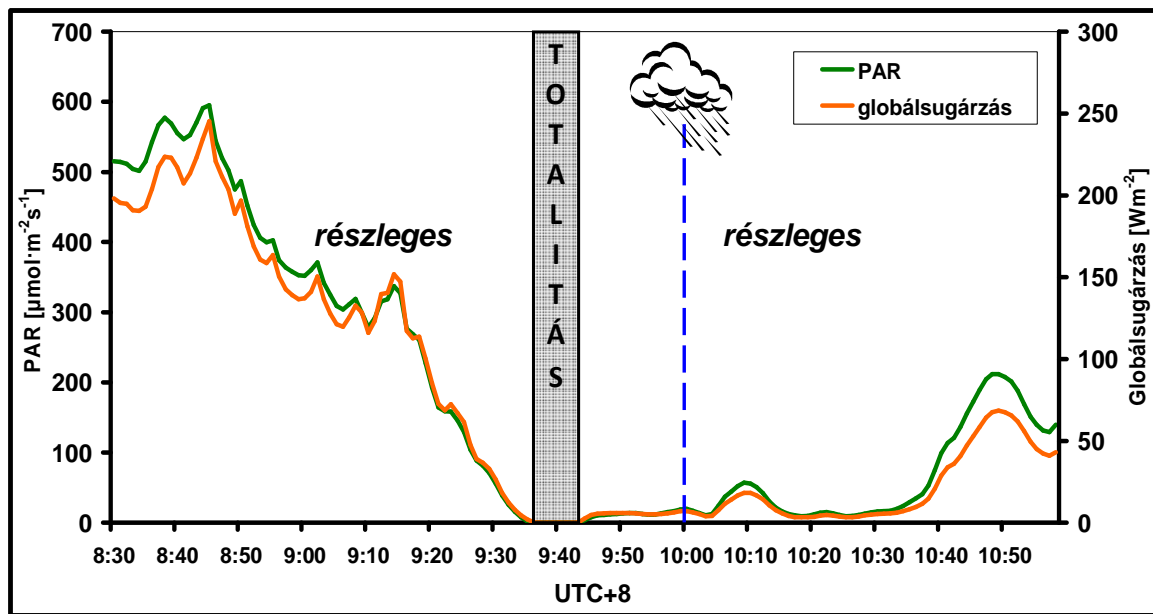


19. ábra. A globálsugárzás és a sugárzási egyenleg menete. (A kék szaggatott vonal a csapadékhullás kezdetét jelzi itt és a többi soron következő ábrán.)

A napfogyatkozás kezdetén megfigyelt mindössze 250 W m^{-2} körüli besugárzás jól jellemzi a teljesen borult eget, hisz ebben az évszakban ezen a szélességen akár háromszor ekkora értékek is lehetnének. A globálsugárzási görbe „hullámzása” a felhőzetből kibukkanó Napot is jelzi, illetve a 10:15 – 10:35 intervallumon tökéletesen megmutatkozik a vastag Ns felhőzet jelenléte. Az ábra jól mutatja azt a korábban említett megállapítást, miszerint a napfogyatkozás nem azonosítható egy felhőtakarás hatásával.

A fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR)

A fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) és a globálsugárzás között szoros a kapcsolat (20. ábra). A 0,4–0,7 μm -es tartományban leérkező PAR $\sim 55\%$ -a a globálsugárzásnak. Elnevezése és mértékegysége ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) is biológiai vonatkozásaira utal, mivel a növények ebben a tartományban leérkező napsugárzást használják fel a fotoszintézishez.



20. ábra. A fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) alakulása, a globálsugárzást is ábrázolva az összevethetőség érdekében.

A sugárzási egyenleg

A felszíni energiaháztartás meghatározója a sugárzási egyenleg. Nézzük meg röviden ennek a menetét is (19. ábra). A görbe futása hasonló a globálsugárzáshoz; minimumát a totalitás utolsó percében éri el, akárcsak a '99-es magyar, illetve német méréseknél (Weidinger et al., 2001; Foken et al., 2001). Ellentétben a részleges fogyatkozásokkal, a sugárzási egyenleg negatív tartományba is „lecsúszik”, tehát ténylegesen éjszakai kondíciók állnak be; a felszín több energiát sugároz ki, mint amennyit kapott. Stabil légrétegződés alakul ki. Érdekesen változik a hőmérséklet vertikális szerkezete is.

A léghőmérséklet

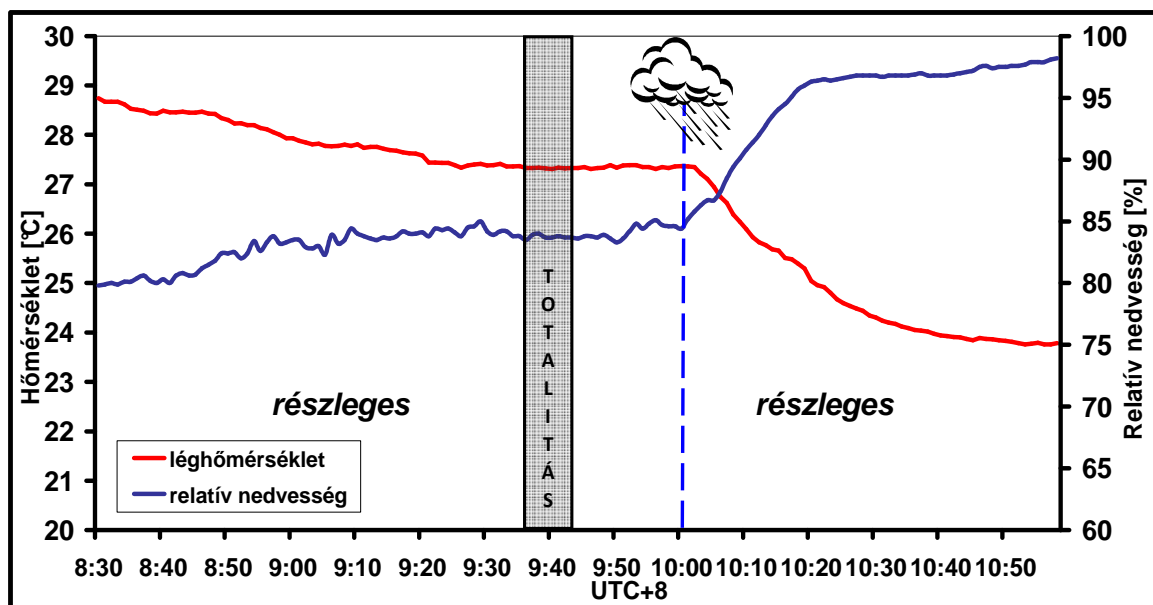
A felszín számottevően csökkenő sugárzási egyenlege általános esetben a felszínhőmérséklet csökkenését vonja maga után, ez pedig a léghőmérséklet csökkenését idézi elő. A 6. táblázatban a totalitás sávjában található néhány állomáson fellépő hőmérséklet-változásokat mutatjuk be a 1999-es (Makra et al., 1999) és a 2009-es teljes napfogyatkozás során. Jól látható a fellépő hőmérsékletcsökkenés széles spektruma (0,1–11,1 °C).

6. táblázat. A totalitás sávjában található néhány állomáson (a '99-es napfogyatkozás adatai^{*}: Makra et al., 1999, Weidinger et al., 2001), a vizsgált négy kínai állomáson, valamint Hefei és Jinshan térségében fellépő (2009-es napfogyatkozás adatai^{**}: Chen et al., 2011; University of Wyoming) hőmérsékletváltozások.

Település	A fellépő hőmérséklet-csökkenés [°C]	Megjegyzés
Plymouth (Nagy-Britannia) [*]	0,1	teljes borult ég; St
Criquemenville (Franciaország) [*]	4,0	részlegesen borult ég; St
Altomünster (Németország) [*]	4,5	–
München (Németország) [*]	2,4	részlegesen borult ég; St
Fülöpháza (Magyarország) [*]	1,7	változóan felhős
Bukarest (Románia) [*]	5,5	derült ég
Donchevo (Bulgária) [*]	4,6	derült ég
Bagdere, Elazig (Törökország) [*]	4,8	derült ég
Batman (Törökország) [*]	11,1	derült ég
Tiran (Irán) [*]	8,0	derült ég
Chongqing ^{**}	–	derült ég
Wuhan ^{**}	>1	derült ég
Hangzhou ^{**}	–	részlegesen borult ég; St
Shanghai ^{**}	<1	teljesen borult ég; St, Ns
Hefei ^{1**}	0,1	változóan felhős
Jinshan ^{1**}	0,1	teljesen borult ég, St, Ns

¹Csak a totalitáshoz kötődő hőmérsékletváltozás.

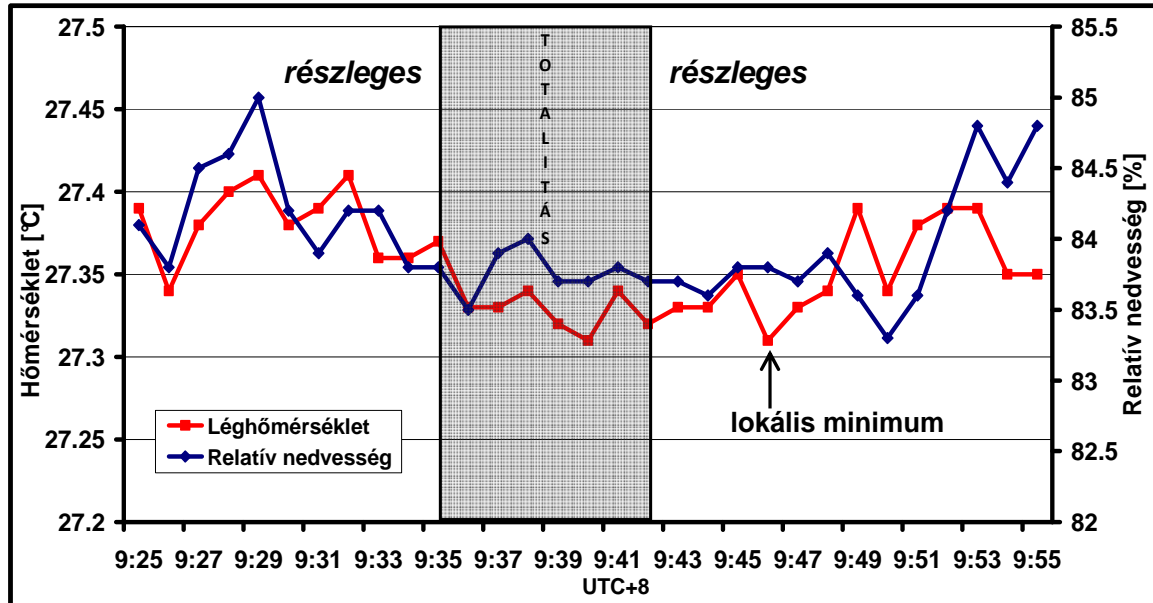
Az alacsonyabb értékek nyilvánvalóan a borult égnek tudhatók be. A ténylegesen fellépő hőmérsékletcsökkenést befolyásolják csillagászati tényezők, így többek között a holdárnyék időtartama, továbbá földrajzi tényezők, mint az állomás földrajzi koordinátái, tengerszint feletti magassága, s az, hogy a napfogyatkozás melyik év- és napszakban lép fel (Makra et al., 1999). Ennek fényében a Shanghai térségében végzett hőmérsékleti mérésekkel szemben előzetesen „magas” elvárásaink voltak, hiszen a 30. szélességi kör környékén, a tengerszinten, közel maximális hosszúságú totalitás-időtartam mellett, a kora délelőtti erősen növekvő besugárzási viszonyok közepette történt az elsötétülés. A folyamat azonban – miként azt a klímastatisztikák is jelezték – nem így alakult. Borult volt az ég, ami lényegesen befolyásolta a léghőmérséklet alakulását.



21. ábra. A léghőmérséklet és a relatív nedvesség alakulása az egész adatsoron keresztül.

Az teljes időszakot ábrázoló 21. ábra monoton csökkenő hőmérsékletet és szinte monoton növekedő légnedvesség értékeket mutat – itt a napfogyatkozás hatása nem mutatható ki egyértelműen. A 10:00-kor bekövetkező törés az esőzés megérkeztét jelzi, s az ahhoz kapcsolódó hőmérsékletesést. Így kérdésessé válhat, hogy a csapadékhullást megelőző másfél órában mutatkozó mintegy 1,4 °C-nyi hőmérsékletcsökkenés (10:00-ig a maximum és minimum különbsége) mennyiben köszönhető a közeledő „felhőszakadásnak”, s mennyiben a napfogyatkozásnak.

A paraméterek változásának vizsgálatok általában különös hangsúlyt kell fektetni az ún. késésre vagy késleltetésre, azaz, hogy a globálsugárzás minimumhelyéhez képest az adott paraméter mikor éri el minimumát, illetve maximumát.

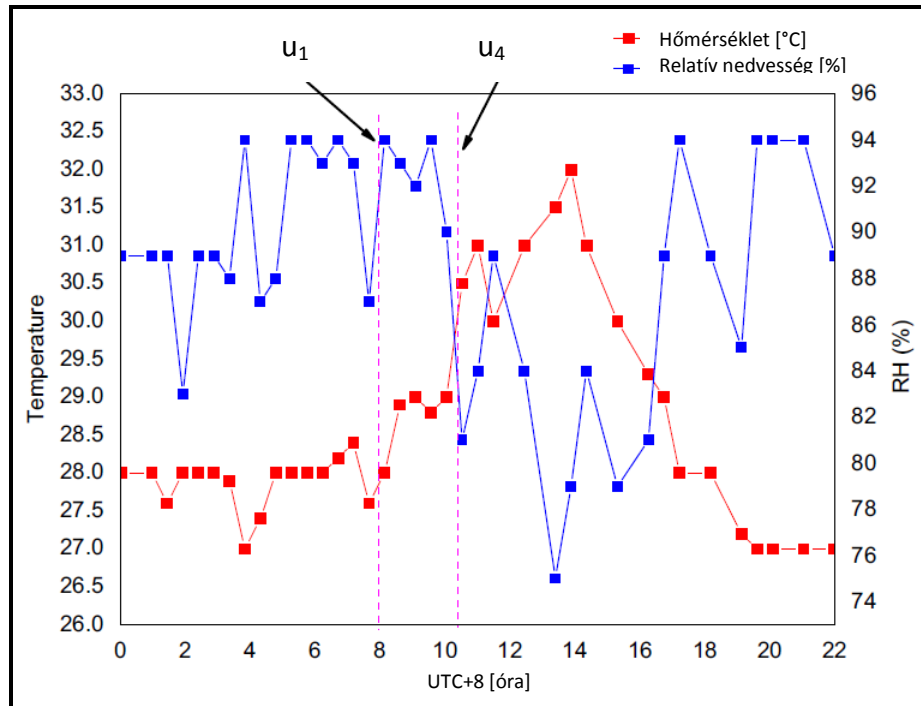


22. ábra. A léghőmérséklet és a relatív nedvesség alakulása rövidebb intervallumon, a totalitás 10 perces környezetében.

E késéssel jellemezhetjük az egyes állapotváltozások viszonyát egymáshoz, azaz kapcsolatuk szorosságát, ami elsősorban a hőáramok követésének segítségével hozzájárulhat a felszín-légkör energiaháztartás jobb megértéséhez is. Korábbi mérések a minimum hőmérséklet bekövetkeztét általában 10–15 perccel a teljes fogyatkozás után írták le. Ha rövidebb adatsort szemlélünk (22. ábra), akkor látszik némi lokális minimum a hőmérséklet alakulásában, ám ez sem számottevő, $\sim 0,1$ °C változást reprezentál a totalitás intervallumának 10 perces környezetében.

A 2009. július 22-én a teljes és részleges napfogyatkozás sávjában számos helyszínen végeztek különféle méréseket. Shanghai-tól kb. 500 km-re nyugatra, Hefei-ben hasonlóan felhős körülmények között vizsgálták elsősorban a keveredési réteg magasságának változását lézeres technológiával, továbbá mérték a léghőmérséklet, relatív nedvesség és a szélesség, illetve szélirány változását. Abban a térségben kb. 6 perccel korábban következett be a totalitás, mint Shanghai közelében, s csak alig több mint egy percig tartott. Ezalatt a hőmérséklet $0,1$ °C-os esését regisztrálták, míg a napfogyatkozás teljes időtartama alatt enyhe ($0,5$ °C) emelkedő tendenciát mutattak ki (23. ábra). E csekély mértékű változás szintén a helyi felhős időjárásnak köszönhető. A vékony felhőzet

megakadályozta a felszín számottevő lehűlését, továbbá a magas relatív páratartalom szintén a hűlés ellen hatott. A napfogyatkozás teljes időtartama alatt a keveredési réteg magassága kb. 100 m-t csökkent, ami igazolja a határréteg gyors leépülését és stabilizálódását a hirtelen sötétedés révén (Chen *at al.*, 2011).



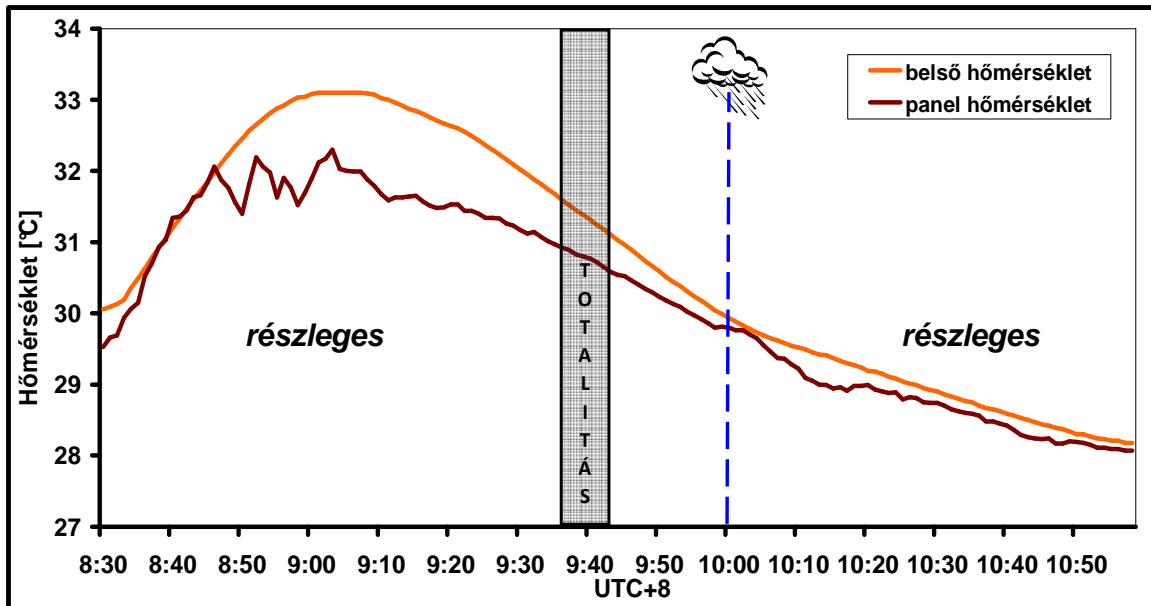
23. ábra. A felszín közeli léghőmérséklet és a relatív páratartalom menete 2009. július 22-én Hefei térségében. Az első kontaktus (u_1) a napfogyatkozás kezdete, a negyedik kontaktus (u_4) a napfogyatkozás vége. (Chen *at al.*, 2011 nyomán)

A relatív nedvesség

A relatív nedvesség szinte tükörképe a hőmérsékletnek; végig 80% felett marad (21. ábra). A rövidebb időskálájú 22. ábrán szembeűnő, hogy a totalitás kezdetekor növekszik. Lokális maximumát 2 perccel a hőmérséklet helyi minimuma után veszi fel. Összességében nő a relatív páratartalom. A totalitás alatt azonban szignifikáns változás nem tapasztalható. Természetesen a csapadékhullás során 100%-os értékhez tart. Az árnyékolt Vaisala hőmérséklet-nedvességmérő adatainak kiértékelése után essék néhány szó a két Voltcraft DL-100T műszer (hőmérséklet, relatív nedvesség és harmatpont) adatairól (14. ábra, 5. táblázat). Az adatsorok a fentiekhez hasonló tendenciát mutatnak, bár nagyobb hőmérsékleti értékekkel, ami valószínűleg a megfelelő árnyékolás hiányával magyarázható (itt külön nem ábrázoljuk).

A felszín- és talajhőmérséklet

Mielőtt részletesen elemeznénk e két fontos állapotjelzőt, nézzük a felszín-hőmérséklet referenciájaként szolgáló hőmérsékletet! A CR10 adatgyűjtő doboza a homokon volt. A mérés során nem háborgattuk. A gyorsan változó sugárzás hatása jól látszik a panel hőmérséklet adatsorában (v.ö. 19. és a 24. ábrát).

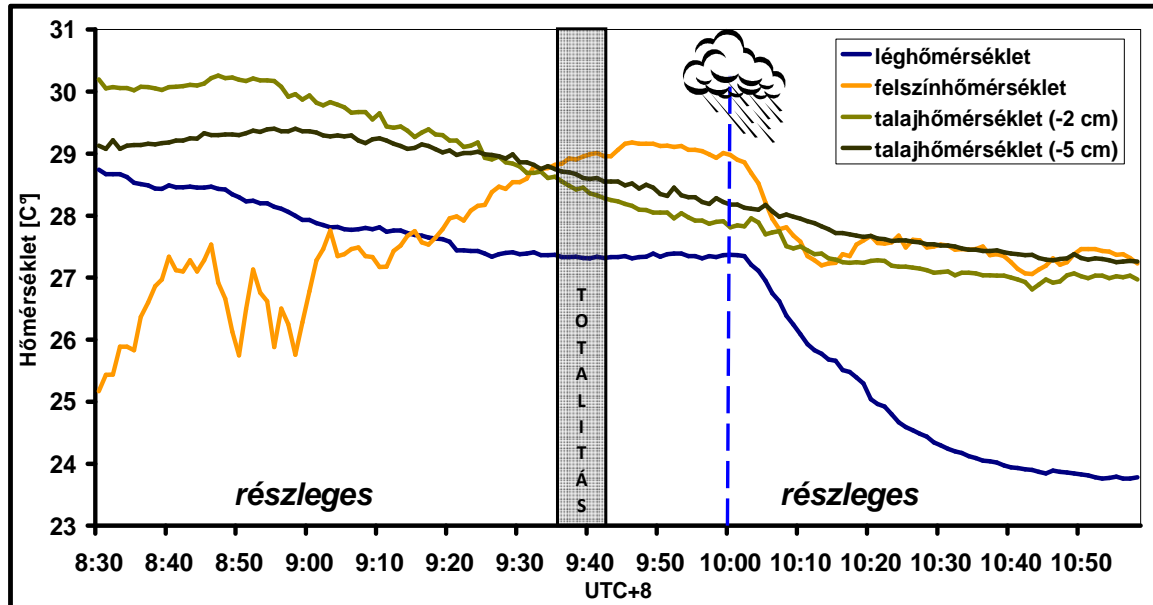


24. ábra. Az adatgyűjtő dobozában mért hőmérsékletek menete.

Nagy a különbség az adatgyűjtő belsejében és a paneljén mért hőmérséklet között. Ez a referenciahőmérséklet-mérés pontosságának a kérdését veti fel, amit az adatok kiértékelésénél kell figyelembe venni. A bizonytalanság néhány tized °C-tól 1 °C körüli értékig terjed.

A két talajhőmérőt 2 és 5 cm-es mélységben helyeztük el a homokban, csupasz felszín alá. A '99-es fülöpházi mérések szerint az 5 cm-es mélységben mért talajhőmérséklet gyorsabban reagált az első kontaktusra, mint a léghőmérséklet, a 30 cm-es mélységben mért viszont lényegesen lassabban, itt már nem is lehet egyértelműen szétválasztani a napfogyatkozásból és az egyéb változásokból (napi menet, felhőzet, talajszerkezet, stb.) adódó hatásokat (Weidinger et al., 2001). Itt a léghőmérséklet alakulásához hasonló tendencia mutatkozik 2 és 5 cm-en is (25. ábra). Érdekes, hogy a talajban végig magasabb a hőmérséklet, mint a léghőmérséklet. A csökkenő tendencia a napfogyatkozás eredménye. A totalitás idején megfordul a két talajhőmérséklet

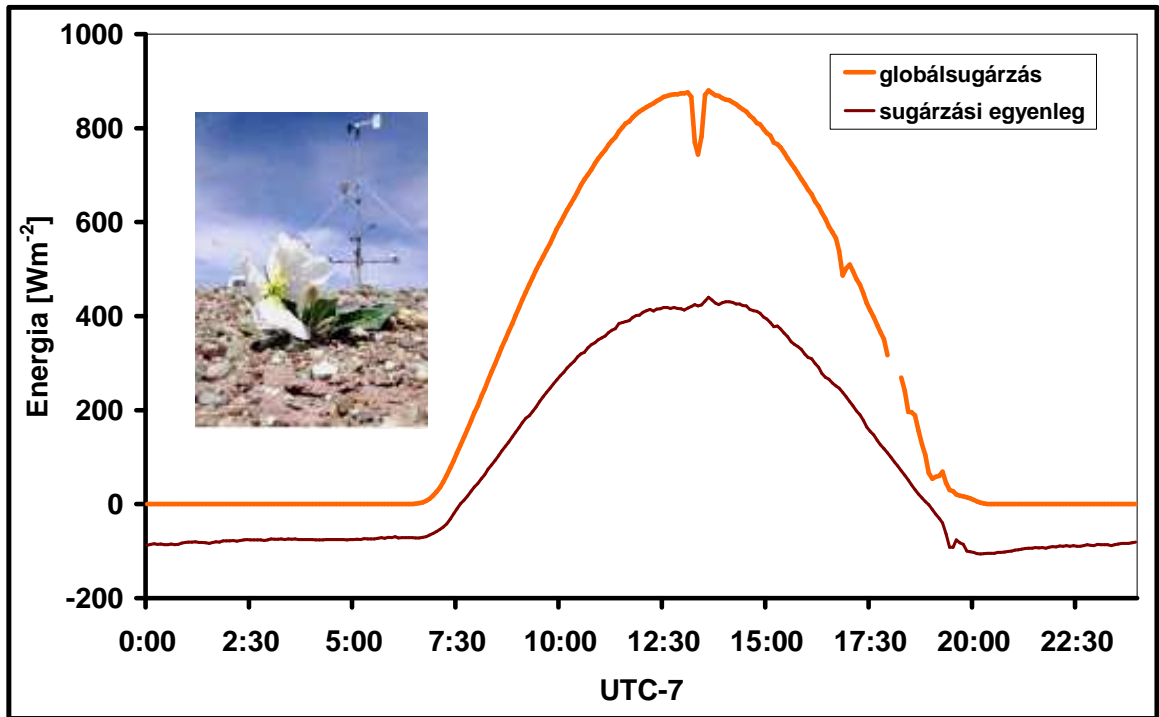
különbsége. Előbb a 2 cm mélyen levő műszer adott magasabb értéket, majd a totalitás idején megfordult a kép, s az alsó szint hőmérséklete lett a nagyobb. A felszínhőmérséklet követi a napi menetet, de a totalitás alatt nem emelkedik tovább.



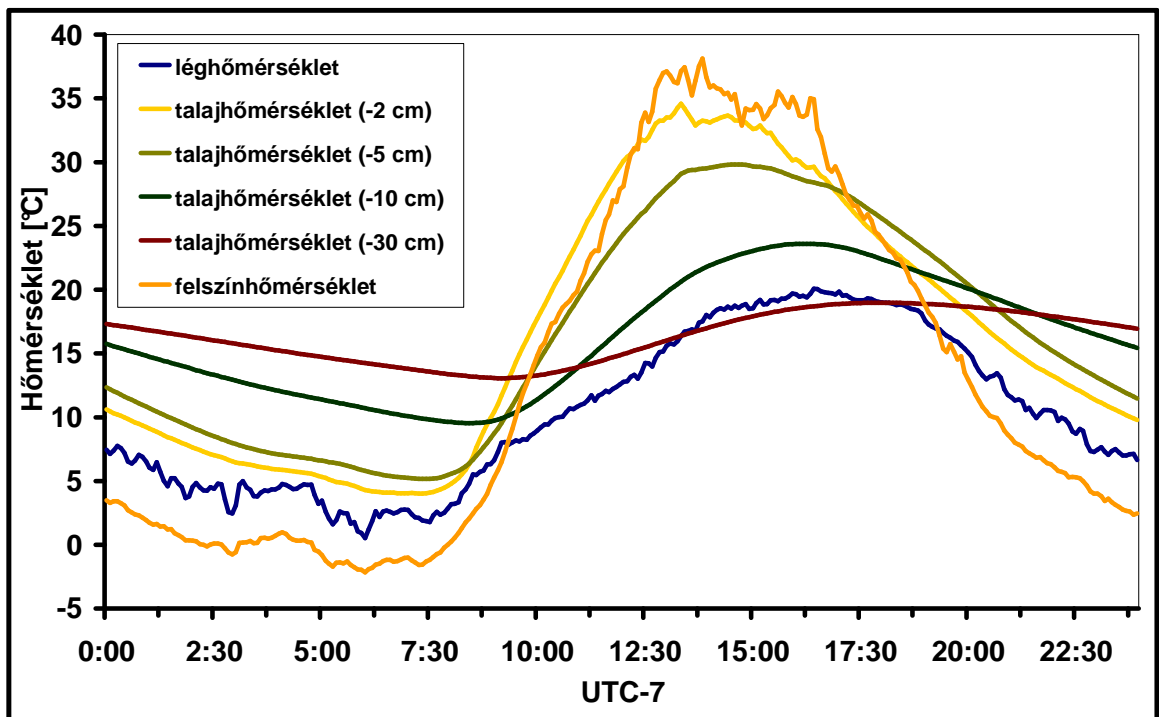
25. ábra. A lég-, felszín- és talajhőmérséklet alakulása.

Érdekes, hogy míg a talajban mindkét mélységben monoton csökken a hőmérséklet, valamint a léghőmérséklet is ehhez hasonlóan alakul, addig a felszín melegszik, vagyis energiához jut. A talaj-felszín-légkör rendszerben tehát mindvégig változó irányú energiaáramok folynak, majd a csapadék következtében az egész rendszer lehül. 10:00 után pedig már közelítőleg együftfutnak a felszíni és talajhőmérsékletek, míg a csapadék hűtötte levegő hozzávetőlegesen 3 °C-kal alacsonyabb hőmérsékletű lett, mint a felszín.

Nézzük tovább a felszínhőmérséklet e „furcsa” viselkedését! Az egyik ok a homoktalaj. A felszín éjszakai kisugárzása és lehülése során nagy a hőmérsékleti kontraszt a felszín és a néhány cm-es talajszint hőmérséklete között a hajnali és a reggeli órákban. Ezt a jelenséget figyeltük meg a 2008-ban az Utah-i sivatagban (USA) levő MRDS szimulációs állomáson (Weidinger *et al.*, 2009) végzett mérésekben is, amit a 26. és a 27. ábra szemléltet. A reggeli órákban a nagy besugárzás ellenére is a mélyebb talajrétegekhez képest alacsonyabb, gyorsan növekvő felszínhőmérsékleti értékekkel találkozunk.



26. ábra. A globálsugárzás és a sugárzási egyenleg napi menete a Utah-i homoksivatagban. (2008. május 22.)



27. ábra. A talaj-, felszín- és léghőmérséklet napi menete a Utah-i homoksivatagban. (2008. május 22.)

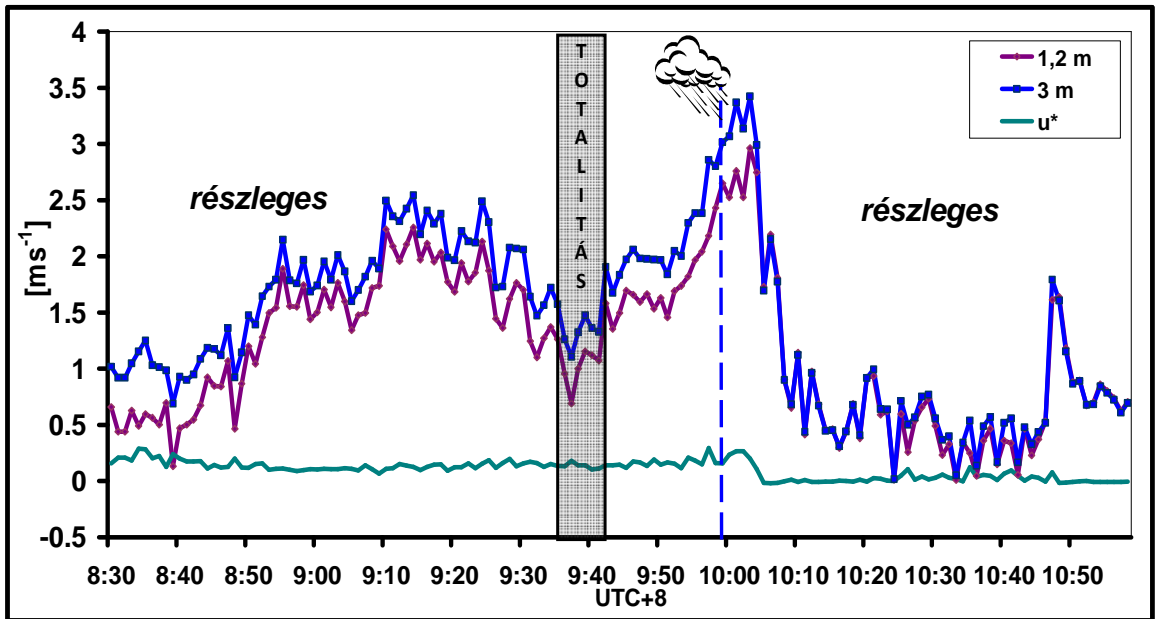
Szélesebesség, szélirány és dinamikus sebesség

A szélesebességet 1,2 m és 3 m magasan mértük. A két szinten mért szélesebesség természetesen jól korrelál, átlagosan $0,2\text{--}0,3\text{ m s}^{-1}$ -mal jelez többet a magasabban levő (28. ábra). A totalitást tekintve látványosan kirajzolódik már a teljesség első percében egy sebességminimum, ami a totalitás intervallumához kötődő „V” alak csúcsa. A második kontaktus előtti 20 perc maximumához viszonyítva a magasban $1,44\text{ m s}^{-1}$ (56,5%), alacsonyabban pedig egy kicsit több, $1,57\text{ m s}^{-1}$ (69,5%) a változás. 9:50-től már érezhető az eső előfutára: megélnkül a hűvös szél, s 10:00-tól már kizárólag mezoskálájú légköri dinamika irányítja a szeleket. Így sajnos nem derült ki, hogy a következő fél órában miként alakult volna, hisz a németországi 1999-es mérések szerint (Foken et al., 2001) a szélesebesség 20–30 perces késéssel reagált a sugárzás-minimumra. A fülöpházi vizsgálatok azonban teljes mértékben alátámasztják a Kínában tapasztaltakat (Weidinger et al., 2001). Továbbá nemcsak elcsendesedett, hanem irányt is váltott a szél, ami finom „U” alakban rajzolódik ki 0–360 fokig terjedő skálán (29. ábra). Tendenciáját tekintve a fogyatkozás alatt folyamatosan fordult délkeletről nyugat felé, ám a teljesség alatt mintha megtorpant volna, s percekig délről fújt. Végül a csapadék érkezésével a szélirány is bizonytalanává vált.

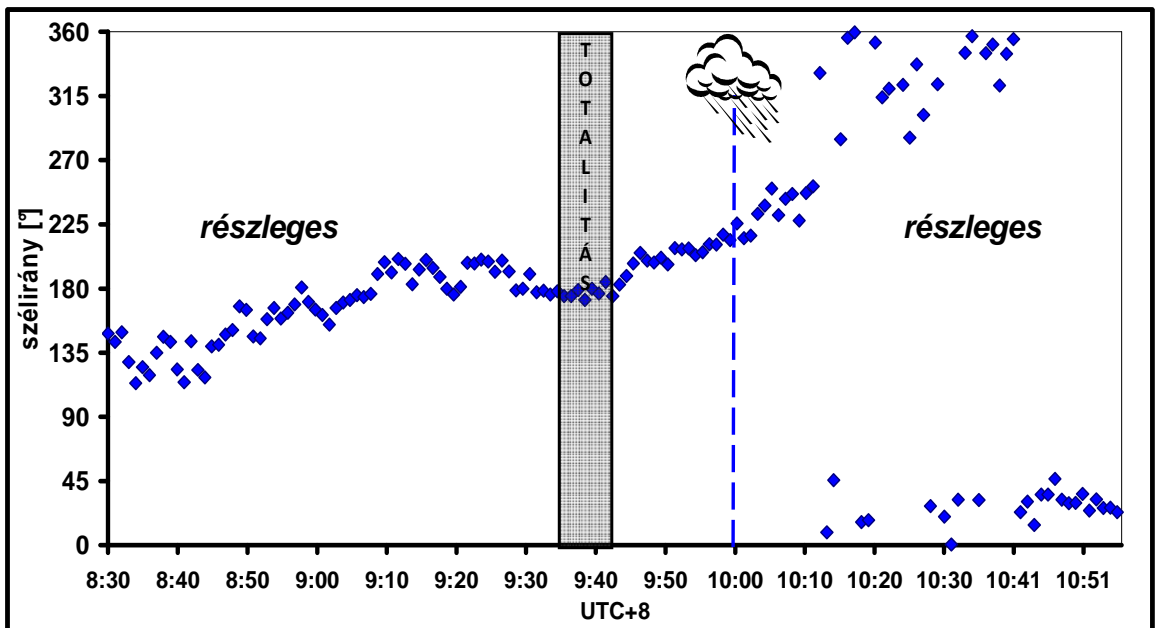
Ugyanezen a napon Hefei-ben végzett mérések is hasonló eredményt adnak. A totalitás alatt a szélesebességben – Jinshan-i méréseinkhez hasonlóan – szignifikáns csökkenést detektáltak, valamint a szél iránya is módosult. E változások együttes következményei lehetnek a hőmérsékleti gradiens csökkenésének, a felszíni légrétegek stabilizálódásának és a turbulens folyamatok intenzitás-csökkenésének (Chen et al., 2011).

A szélesebesség különbségek ismeretében kis sugárzási egyenleg esetén a logaritmikus szélprofil feltételezésével kiszámíthatjuk a dinamikus sebesség (u_*) értékét is (Unger és Sümeghy, 2002). A csapadéktevékenység elejéig (10:05) a tenger felől fújt a szél.

Ez jelenik meg a nagyobb sebesség különbségekben és a nagyobb dinamikus sebesség értékekben. Kicsi az érdeességi magasság. A szélfordulással és a csapadékos időjárással a dinamikus sebesség is lecsökken (kicsi a mechanikus turbulencia). Érdekes, hogy a szélesebesség csökkenés hatása nem mutatható ki a szélesebesség különbségben, s így a dinamikus sebesség menetében sem.



28. ábra. A szélesség menete 1,2 m és 3 m magasan, valamint a dinamikus sebesség (u^*).



29. ábra. A megváltozó szélirány (3 méteren), „kiöblösödés” a totalitásnál.

A felszíni energiamérleg komponensek

A teljes napfogyatkozások során a nappali világosság hirtelen éjszakába fordul, s a sugárzási egyenleg negatívvá válik (éjszakai állapot). A rövidhullámú besugárzás teljes napfogyatkozás során történő megváltozása azonban jóval rövidebb ideig tart és gyorsabban játszódik le, mint beesteledéskor. Ahogy korábban olvashattuk, a napfogyatkozás kitűnő alkalmat nyújt a rövidhullámú besugárzás által befolyásolt meteorológiai paraméterek és energiaáramok (fluxusok, vagy energiamérleg komponensek) vizsgálatára (Fabian et al., 2001). A felszíni energiamérleg komponensek mérése, illetve becslése segíti a módszerfejlesztést, illetve az energiamérleg lezárási problémájának (*energy balance closure problem*) vizsgálatát (Foken et al., 2001; Heusinkveld et al., 2004; Liebenthal et al., 2005).

A rendelkezésre álló műszerek és az alkalmazott mérési program csak a Bowen–arány módszer használatát tette lehetővé (itt a lezárási problémával nem kell foglalkozni). A szokásos jelölések szerint a felszíni energiamérleg egyenlet:

$$Rn - G = H + LE + \Delta,$$

ahol Rn a sugárzási energiamérleg, G a talaj által forgalmazott hőmennyiség, H a levegőnek átadott hőenergia nagysága, azaz a szenzibilis hő, LE a párolgásra fordított energia nagysága, azaz a latens hő, míg Δ a lezárási hibateg (ettől most eltekintünk).

A Bowen–arány (β) a szenzibilis és a latens hőáram hányadosa, ami a hőmérséklet és a nedvesség (gőznyomás, vagy specifikus nedvesség) gradiens alapján számítható. Első közelítésként azzal a feltételezéssel élünk, hogy a 2 cm-en mért talajhőmérséklet jól jellemzi a nedves homokfelszín hőmérsékletét is, ami felett a levegőt telítettnek tekintjük. (A direkt felszínhőmérséklet mérést a termoelemes mérési technika miatt nem tartottuk elég megbízhatónak.) Götz és Rákóczi (1981); Huzsvai et al. (2004) és Ács (2010) alapján:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho c_p K_H \Delta T}{L \rho K_E \Delta q} \cong \frac{c_p}{L} \frac{p}{0,622} \frac{\Delta T}{\Delta e},$$

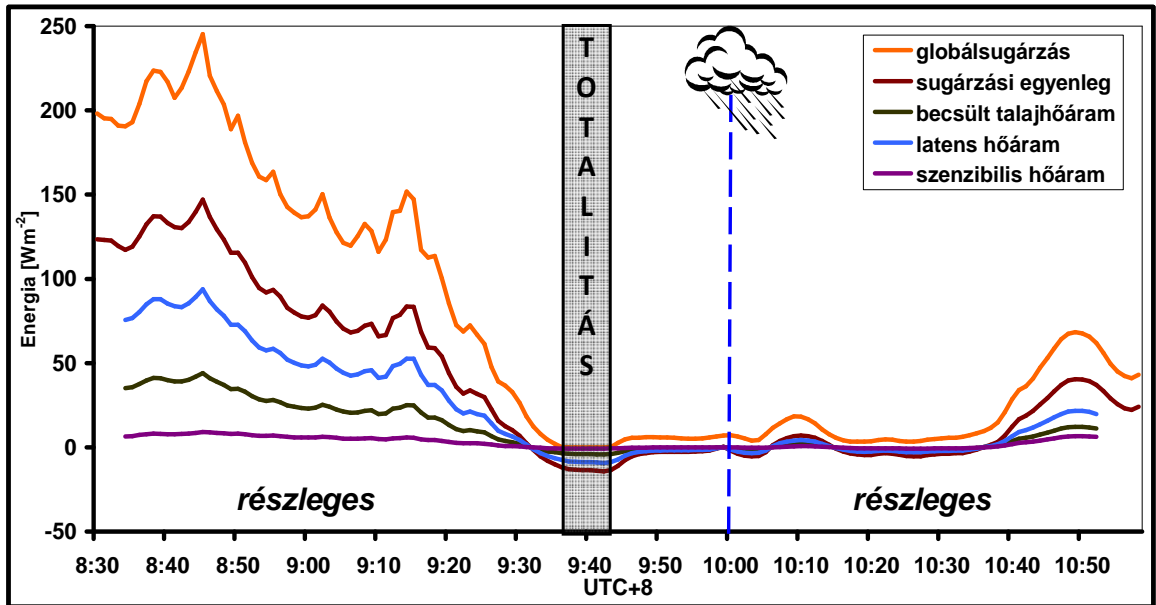
ahol ΔT , Δq , Δe a felszín és a hőmérséklet-relatív nedvesség mérés szintje (2,5 m) közötti hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], specifikus nedvesség [kg kg^{-1}] és gőznyomás [hPa] különbség,

ρ a levegő sűrűsége, c_p az állandó nyomáson vett fajhője, K_H , K_E a hőre és a vízgőzre vonatkozó turbulens diffúziós együttható, amiket a vizsgálatunkban azonosnak tekintünk, p a légnyomás, L a fázisátalakulási hő. A Bowen–arány (β) tehát a mérések alapján becsülhető. *(Pontosabb számításoknál természetesen a hőmérséklet különbség helyett a virtuális hőmérséklet különbséggel kell dolgozni.)*

A talajba jutó hőáramot kétféleképpen határoztuk meg. Telítéshez közeli (tengerparti) homoktalaj esetén a nappali órákban a sugárzásegyenleg 30%-ának becsültük G értékét (Santanello & Friedl, 2003). A másik út a talajhőmérséklet profil ismeretén át vezet. A 2 cm-es és az 5 cm-es talajhőmérséklet alapján (perces adatok) megbecsülhető a felső 2 cm-es réteg hőtárolása (G_T) és a mélyebb (itt a 2 cm-es talajréteg alatti) rétegekbe jutó hőáram (G_S), ($G = G_T + G_S$). A telítéshez közeli homoktalaj hőkapacitását (c_{talaj}) $2 \cdot 10^6 \text{ J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$ -rel, míg a hővezető képességét (λ_{talaj}) $0,25\text{--}2 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ közötti értékkel közelíthetjük (Engineering ToolBox honlap). Mi a számításokban $0,9 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ értéket használtunk. *(Megjegyezzük, hogy K helyett számolhatunk $^{\circ}\text{C}$ -kal, mivel hőmérsékletváltozásról van szó.)* A két munkaformula:

$$G_T = c_{talaj} \cdot \Delta T_s / (\Delta t \cdot h), \quad G_S = \lambda_{talaj} \cdot (T_{2\text{ cm}} - T_{5\text{ cm}}) / \Delta z,$$

ahol Δt a hőtárolás számításánál alkalmazott időintervallum (1 perc = 60 s), $h = 0,02 \text{ m}$ a felső talajréteg vastagsága, ΔT_s a 2 cm-es mélységben mért talajhőmérséklet 1 perces változása, azaz $\Delta T_s = (T_{2\text{ cm}}(t+2) - T_{2\text{ cm}}(t-2)) / 4$, itt $T_{2\text{ cm}}$ a $t+2$ és $t-2$ időpontokban a vizsgált 1 perces intervallum előtt és után 2 perccel a számított talajhőmérséklet érték 2 cm-en. *(Megjegyezzük, hogy az aktuális perces talajhőmérsékletet 5 perces mozgóátlagolással számítottuk ki a hirtelen fluktuációk kiszűrésére.)* Tehát $T_{2\text{ cm}}$ és $T_{5\text{ cm}}$ az adott 1 perces időintervallumra jellemző (5 perces mozgóátlagolással meghatározott) 2 cm-es és 5 cm-es talajhőmérséklet. $\Delta z = 0,03 \text{ m}$ a két talajhőmérő közti távolság (rétegvastagság). Számos átlagolási módszert kipróbáltunk. A kulcs a c_{talaj} és λ_{talaj} értéke, aminek a megadásánál becslésekre hagyatkozhatunk, mivel nem vettünk talajmintát. A két módszerrel számított talajba jutó hőáram hasonló futású volt. A fentiek alapján az egyszerűbb $G = 0,3 \cdot Rn$ parametrizáció eredményét közöljük a 30. ábrán. A Bowen–arány (ami a vízfelszínre jellemző 0,14 körüli volt) és a rendelkezésre álló energia ($A = Rn - G$) ismeretében már a szenzibilis és a latens hőáram is becsülhető.



30. ábra. A felszíni energiamérleg komponensek a Bowen–arány módszerével.

A sugárzási egyenlegből származó energia legnagyobb része – a becslés szerint – párolgásra fordítódik, míg a szenzibilis hőáram ~ 0 és 10 W m^{-2} közötti. A nagy hőmérséklet különbség (a talaj melegebb) és a nagy nedvességkülönbség (a talaj nedvesebb), továbbá a kis rendelkezésre álló energia ($A = R_n - G$) alakítja ki a kis szenzibilis hőáramot (neutrálisához közeli hőszállítás).

„Az egész jelenség talán a legfélelmetesebben fenséges,
aminek az ember tanúja lehet.”
/George B. Airy (1851)/

5. Összefoglalás

Egy teljes napfogyatkozást sokféleképpen értelmezhetünk. Így lehet csodás, isteni, esetleg félelmetes égi tüneményként, ahogy azt évezredekken keresztül gondolták, lehet „csillagászati-szuperprodukciónak” tekinteni, miként a szakemberek és lelkes amatőr csillagászok vélik, lehet művészeti alkotás fotográfusok számára, és végül, de nem utolsó sorban kitűnő vizsgálódási tárgy, pontosabban egy „természetes laboratórium” a kutatók számára.

A 2009. július 22-i teljes napfogyatkozás során mért eredményeinket összevetettük a korábbi napfogyatkozások során levont következtetésekkel: a globálsugárzás, a sugárzási egyenleg, a talajhőmérséklet, a szélesebség és a szélirány esetében a változások iránya hipotézisünknek megfelelően alakult. Mérési eredményeinkben hangsúlyos a felhőzet változásokat csökkentő, „pufferoló” hatása, ami miatt néhány paraméter, így a léghőmérséklet, a relatív nedvesség és a felszínhőmérséklet változása várakozásainkat nem, vagy csak részben igazolta. Összehasonlításként elsősorban az 1999-es Fülöpháza (*Weidinger et al.*, 2001) és Freising-Weihenstephan (*Foken et al.*, 2001) térségében mért adatokat vettük, de megvizsgáltunk néhány – a totalitás sávjába eső – meteorológiai állomás által regisztrált hőmérsékleti tendenciát is.

Az Jinshan-i időjárási viszonyok új árnyalatot kölcsönöznek a kérdéskörnek, hiszen magas (80% feletti) páratartalom mellett dolgoztunk, és a fogyatkozás harmadik fázisában erőteljes csapadékhullás is bekövetkezett. Fontos szakirodalmi adalék a felhőzet által nagymértékben befolyásolt helyszínen végzett mérési eredményünk. Az ugyancsak a totalitás sávjában fekvő Hefei-ben hasonlóan felhős helyzetben rögzített adatok is alátámasztják és kiegészítik észleléseinket (*Chen et al.*, 2011). Összességében eredményeink híven tükrözik (i) a teljes napfogyatkozás befolyását a különböző paraméterek napi menetében, továbbá (ii) a felhőzet hatását a felszíni energiamérleg komponensek és a meteorológiai elemek változásában.

Az általunk felépített mikrometeorológiai mérőrendszer és az alkalmazott adatfeldolgozási eljárás más mikrometeorológiai mérésekben is hasznosul. Terveim között szerepel az 1999-es magyarországi napfogyatkozás energiaháztartási adatainak, illetve az ózon fluxus méréseinek részletesebb elemzése.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Weidinger Tamásnak, a dolgozat elkészítésében nyújtott segítségéért, értékes tanácsaiért, illetve az ELTE Meteorológiai Tanszéknek a rendelkezéseimre bocsátott mérőműszerekért. Ezúton szeretném megköszönni a Magyar Csillagászati Egyesületnek a kínai csillagászati expedíció megszervezését, az észlelésekhez és a meteorológiai mérések előkészítéséhez nyújtott segítséget, továbbá a napfogyatkozáshoz kapcsolódó dokumentumokat. Külön hálával tartozom családomnak kitartó támogatásukért.

Az adatfeldolgozás az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg, a támogatási szerződés száma TÁMOP 4.2.1./B-09/1/KMR-2010-0003.

Irodalomjegyzék

- Baldavári, L., 2001: Méhek viselkedésének változása az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozás hatására egy méhészetben. *Állattani Közlemények* **86**, 137–143.
- Bernáth, B., Pomozi I., Gál J., Horváth G. és Wehner, R., 2001: Égboltpolarizáció az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozáskor és lehetséges biológiai vonatkozásai. *Állattani Közlemények* **86**, 81–92.
- Chen, G., Zhao, Z., Zhou, C., Yang, G. and Zhang, Y., 2010: Solar eclipse effects of 22 July 2009 on Sporadic-E. *Annales Geophysicae* **28**, 353–357.
- Chen, Z., Liu, W., Zhang, Y., He, J. and Ruan, J., 2011: Mixing layer height and meteorological measurements in Hefei China during the total solar eclipse of 22 July, 2009. *Optics & Laser Technology* **43**, 50–54.
- Czelnai, R., 1995: *Bevezetés a meteorológiába I. Légekörtani alapismeretek*. Tankönyvkiadó, Budapest, 247 oldal.
- Czelnai, R., Götz G. és Iványi Zs., 1991: *Bevezetés a meteorológiába II. A mozgó légkör és óceán*. Tankönyvkiadó, Budapest, 403 oldal.
- Csörgő, T., Miklay, Gy., Halmos, G., Karcza, Zs., Bank, L., Németh, Á. és Palkó S., 2001: Madarak napi aktivitásának változásai az 1999. augusztus 11-i napfogyatkozás alatt. *Állattani Közlemények* **86**, 145–152.
- Domonkos, P., 1999: Ezt láttuk 1999. augusztus 11-én. *Légkör* **44**, 13–20.
- Espenak, F. and Anderson, J., 2008: *Total Solar Eclipse of 2009 July 22*. NASA/TP–2008–214169, Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 74p.
- Fabian, P., Winterhalter, M., Rappengl-ck, B., Reitmayer, H., Stohl, A., Koepke, P., Schlager, H., Berresheim, H., Foken, T., Wichura, B., Haberle, K.-H., Matyssek, R. and Kartschall, T., 2001: The BAYSOFI Campaign – Measurements carried out during the total solar eclipse of August 11, 1999. *Meteorologische Zeitschrift* **10**(3), 165–170.
- Foken, T., 2008: *Micrometeorology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 301 p.

- Foken, T., Wichura, B., Klemm, O., Gerchau, J., Winterhalter, M. and Weidinger, T., 2001: Micrometeorological measurements during the total solar eclipse of August 11, 1999. *Meteorologische Zeitschrift* **10**(3), 171–178.
- Gábris, Gy., Marik, M. és Szabó, J., 1998: *Csillagászati földrajz*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 338 oldal.
- Götz, G. és Rákóczi, F., 1981: *A dinamikus meteorológia alapjai*. Tankönyvkiadó, Budapest, 484 oldal.
- Heusinkveld, B.G., Jacobs, A.F.G., Holtslag, A.A.M. and Berkowicz, S.M., 2004: Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology* **122**, 21–37.
- Huzsvai, L., Rajkai, K. és Szász, G., 2004: *Az agroökológia modellezéstechnikája*. Egyetemi jegyzet, Debrecen, 226 oldal.
- Liebenthal, C., Huwe, B. and Foken, T., 2005: Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 253–262.
- Littmann, M., Willocox, K. és Espenak, F., 1999: *Napfogyatkozás a maga teljességében*. Napvadász Kft. Kiadó, Budapest, 247 oldal.
- Makra, L., Sódar, I., Horváth, Sz. és Puskás, J., 1999: Teljes napfogyatkozások a múltban és ma. *Légekör* **44**: 8–12.
- Nymphas, E.F., Adeniyi, M.O., Ayoola, M.A. and Oladiran, E.O., 2009: Micrometeorological measurements in Nigeria during the total solar eclipse of 29 March, 2006. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **71**, 1245–1253.
- Pasachoff, J.M., 2009: Scientific observations at total solar eclipses. *Research in Astron. Astrophys* **9**(6), 613–634.
- Péczely, Gy., 1979: *Éghajlattan*, Tankönyvkiadó, Budapest, 336 oldal.
- Péczely, Gy., 1984: *A Föld éghajlata*, Tankönyvkiadó, Budapest, 598 oldal.
- Pogány, A., Weidinger, T., Theobald, M., Schelde, K., Bienkowski, J., Bordás, Á., Bozóki, Z., Eredics, A., Hensen, A., Janku., K., Kiss, G., Kraai, A., Istenes, Z. and Mohácsi Á., 2010: Ammonia concentration and flux measurements on an agricultural landscape near Bjerrigbro, Denmark. Open Science Conference, Reactive Nitrogen

- and the European Greenhouse Gas Balance, February 3–4, 2010, Soloturn, Switzerland, Conference proceedings, 82–83.
- Pomozi, I., Gál, J., Horváth, G. and Wehner, R., 2000: Fine structure of the celestial polarization pattern and its temporal change during the total solar eclipse of 11 August 1999. *Remote Sensing of Environment* **76**, 181–201.
- Santanello, J.A. and Friedl, M.A., 2003: Diurnal Covariation in Soil Heat Flux and Net Radiation. *Journal of Applied Meteorology* **42**, 851–862.
- Singal, S.P., Aggarwal, S.K., Gera, B.S., Ramesh, K., Kapoor, K. and Adiga, B.B., 1982: Studies of the atmospheric stability characteristics during the solar eclipse of February 16, 1980. *Boundary-Layer Meteorology* **24**, 415–419.
- Tóth, Z., 2001: A földfelszínre érkező napsugárzás intenzitásának változása különböző spektrum tartományokon az 1999. augusztus 11-i napfogyatkozás alatt történt mérések alapján. *Állattani Közlemények* **86**, 75–80.
- Unger, J. és Sümegehy, Z., 2002: *Környezeti klimatológia*. Egyetemi jegyzet, SZTE-TTK.
- von Oppolzer, T.R., 1962: *Canon of eclipses*. Dover Publications, Inc. New York.
- Vértes, E., 2000: *A teljes napfogyatkozás Vas megyében 1999. augusztus 11-én*. Gothard AmatőrCsillagászati Egyesület, Szombathely, 127 oldal.
- Weidinger, T., Pintér, K., Hirsch, T. és Mészáros, R., 2001: Az időjárási helyzet és a meteorológiai elemek változása az 1999. augusztus 11-i magyarországi teljes napfogyatkozás során. *Állattani Közlemények* **86**, 59–74.
- Weidinger, T., Istenes, Z., Hargitai, H., Tepliczky, I. and Bérczi, Sz., 2009: Micrometeorological station at the Mars analog field work, Utah, April, 2008. NASA 40. *LPSC Conference*, Session 631: Mars analogs: chemical and physical, #1282.
- Zhang, X., Zhao, Z., Zhang, Y. and Zhou, C., 2010: Observations of the ionosphere in the equatorial anomaly region using WISS during the total solar eclipse of 22 July 2009. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **72**, 869–875.

Internetes hivatkozások:

Ács Ferenc: Felszín-légkör kölcsönhatás, 2010:

http://nimbus.elte.hu/~acs/pdf/OKTATAS/fel_leg_kol_2.pdf

Brlás Pál honlapja: <http://invitel.hu/brlas1/TSE2009.htm>

Campbell Scientific honlapja: <http://www.campbellsci.com>

Engineering ToolBox:

http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

Japan Meteorological Agency, Satellite Imagery: <http://www.jma.go.jp/en/gms/>

Magyar Csillagászati Egyesület honlapja: <http://www.mcse.hu/>

Space Science and Engineering Data Center (SSEC): <http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/>

Total Solar Eclipse of 2009 July 22, NASA:

<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEmono/TSE2009/TSE2009.html>

University of Wyoming, Department of Atmospheric Science:

<http://weather.uwyo.edu/surface/meteogram/>