

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék

Az árnyékolók hatása a léghőmérséklet-mérések és a hosszú távú adatsorok megbízhatóságára



Készítette:

Morvai Krisztián

V. évf. meteorológus

Témavezető:

Nagy Zoltán

Országos Meteorológiai Szolgálat

Konzulens:

Dr. Weidinger Tamás

ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2010.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A hőmérsékleti árnyékolók.....	5
2.1. A hőmérsékleti árnyékolók mérés technikai jelentősége	5
2.2. A hőmérsékleti árnyékolók a XIX. század elejétől napjainkig	6
Nemzetközi vonatkozások.....	6
Hazai vizsgálatok és fejlesztések (Ifj. Konkoly Thege Miklós munkássága)	11
A WMO szerepe a mérések egységesítésében és az árnyékoló fejlesztésekben	13
3. A hőmérsékleti árnyékolók fizikája	18
3.1. Alapvető összefüggések és fogalmak.....	18
3.2. Sugárzási modell az árnyékolók hőmérsékleti hibáira	24
4. Az OMSZ-nál alkalmazott árnyékolók hiba elemzése	30
4.1. Kísérleti mérések	30
4.2. Az árnyékoló hibák forrásai és statisztikai elemzése	33
4.3. Esettanulmányok, az árnyékoló hibáinak időjárási helyzetfüggése	38
4.4. Az árnyékoló hibák számszerűsítése – korrekciós eljárásunk.....	43
4.5. Korrekciós eljárás alkalmazása Debrecen-Kismacs és Debrecen-Reptér mérőállomáson	46
5. Összefoglalás	50
6. Irodalomjegyzék	51
7. Köszönetnyilvánítás.....	55

1. Bevezetés

Minden mérés bizonytalansággal, hibával terhelt; gondoljunk csak a térbeli és időbeli átlagolásra, vagy a reprezentativitás kérdésére! A meteorológia mérőtudomány is, így fontos kérdés a meteorológiai mérések és megfigyelések minőségbiztosítása, a hazai és nemzetközi mérőhálózatok összehasonlíthatósága, „egyenszilárdsága”, a mérések hibaforrásaink az ismerete. A Meteorológiai Világszervezet (továbbiakban WMO) egyértelműen rendelkezik a standard meteorológiai állomások elhelyezési követelményeiről, a mérések pontosságáról. (WMO, 2006)

A legrégebbi összefüggő meteorológiai idősorok hőmérsékletmérésekből származnak. A közép-angliai idősor 1659-től áll rendelkezésre (Matasovszky, 1988), a Budai észlelések 1780-ban indultak a Societas Meteorologica Palatina állomáshálózat tagjaként (Czelnai, 1979). A hőmérsékletméréssel egyidős a hőmérsékleti árnyékolók problémaköre. Számos kérdést vet fel ma is a műszer típusa, az árnyékolók alkalmazása, a lehetséges korrekciók megadása. A WMO publikációiban rendszeresen közzéteszi, hogy milyen hibákat generálnak az újabb árnyékolók (Warne, 1998).

A hibák ismerete (átlagérték, statisztikai szerkezet) fontos a hosszú idősorok elemzésénél, az idősorok homogenitás vizsgálatában, s így az éghajlatváltozás detektálásában is. A különböző árnyékolókban végzett mérések szisztematikus hibája elérheti a 0,3 °C-ot, a maximális hibák (pl. sugárzási hatások) nagyságrendje, pedig a 2 °C-ot (WMO, 2006). Ezek az értékek az elmúlt 100 évre számolt, hozzávetőlegesen 0,5–0,8 °C-os globális hőmérsékletemelkedéshez viszonyítva nem elhanyagolhatók (IPCC, 2007). Egy tömeges árnyékoló csere „hirtelen éghajlatváltozást okozhat” az adatsorban, amennyiben a különböző árnyékolók közötti cseréknél nem ismerjük a különbségeket. (Qualey et al., 1991).

Ezek adják a diplomamunka témaválasztásának a fontosságát, a hazai hőmérsékleti árnyékolók hibaanalízisét. Az ilyen vizsgálatok alapozzák meg a meteorológiai mérőrendszer fejlesztését, az árnyékolók szükségszerű cseréjét. Egy-egy új klímaállomás tervezésénél, vagy a most kiépülő nagy pontosságú éghajlati alap-mérőrendszerénél is ismernünk kell a felhasznált árnyékolók „hőmérsékletmódosító” hatásait (Szász és Nagy, 2007; Nagy et al., 2008; Weidinger et al., 2010).

A kis skálájú numerikus előrejelző modelleknél szintén fontos a lokális hőmérsékleti értékek lehető legpontosabb ismerete, különösen, ha a helyi domborzati hatásokat akarjuk figyelembe venni. Ehhez is megbízható hőmérsékletmérések kellenek.

Feladatunk a különböző árnyékolókban elhelyezett hőmérőkkel mért értékekből meghatározni az árnyékolók okozta hibákat, és egy operatív mérési célokra, akár a mérés helyén levő adatgyűjtőbe beprogramozható korrekciós eljárás kialakítása. Erre a célra a pestszentlőrinci Marczell György Főobszervatóriumban létrehoztunk egy műszerkeretet, ahol a különböző árnyékolókban mértem a léghőmérsékletet, illetve a szélességet, és globálsugárzást, rendelkezésre álltak a standard meteorológiai mérések is. Feladatom az adatok kiértékelése, a korrekciós eljárás elkészítése és hibaanalízise volt. Az elkészült eljárással – a tesztelés után – Debrecen-Reptér és Debrecen-Kismacs mérőállomásokon a 2009. évi órás bontású adatsoron egy utólagos korrekciót hajtottam végre.

Diplomamunkában a bevezetés után kifejttem az árnyékolók mérés technikai jelentőségét, majd egy rövid történelmi áttekintést adok az árnyékolók fejlesztéséről. Kitérek a hazai elődök munkájára is.

A harmadik fejezetben bemutatom az árnyékolók fizikáját és modellezési lehetőségeit. Foglalkozom a különböző meteorológiai elemek árnyékolóra gyakorolt hatásaival is. Ez a hőmérsékleti hiba analízisében lesz fontos. A következő részben az eredményeket mutatom be. Megismerkedünk a pestszentlőrinci Marczell György Főobszervatóriumban kiépített mérőrendszerünkkel, az adatgyűjtés- és feldolgozás módszereivel. A cél a részletes hőmérsékletmérési hibastatisztikák elkészítése, s olyan korrekciós eljárás készítése, amelyet a mért hőmérsékleti adatok időjárásfüggő korrekciójában is alkalmazhatunk. E feladat néhány eredményét mutatja be a dolgozat.

2. A hőmérsékleti árnyékolók

2. 1. A hőmérsékleti árnyékolók mérés technikai jelentősége

Mérés technikai (metrológiai) alapok

Egy mérés értékét akkor jelenthetjük ki biztosan, ha azt azonos külső körülmények között egymás után többször elvégeztük.

Ha több különböző esetre szeretnénk átfogó képet kapni, több körülményre (pl. időjárási helyzet, napszak) kell a mérés sorozatokat elvégezni. Így lesz egy mérési statisztikánk, amit kiértékelhetünk. Kiértékeléskor a mérőműszerünkkel egy mérési térben lévő párhuzamosan működtetett referencia eszközhöz viszonyítunk. A referencia eszközzel szemben általában elvárásként fogalmazzuk meg, hogy az legalább háromszor jobb mérési képességgel rendelkezzen, mint a kalibrálandó mérőeszköz. Hibának nevezünk mindent, ami a vizsgált műszer mérése és a referenciaérték közötti eltérés (Horváth, 2010).

A mérés technikában a kiértékelés során többféle hibát különböztetünk meg. A hiba értéke szerint csökkenő sorrendben megkülönböztetjük a durva, a rendszeres és a véletlen hibákat. A *durva hiba* olyan értéket mutat, ami nem felel meg az általunk vártaknak, mert az teljesen más folyamat eredménye. Ekkor az adatokat törölni szoktuk, mivel más mérésből származnak. A *rendszeres hiba* az a hiba, aminél még a külső körülmények változása mérési hibát okoz. Ez a durva hibánál kisebb nagyságrendű. A rendszeres hiba detektálása esetén alkalmazhatunk korrekciót, aminek a célja, hogy a referencia által mért értéket eltaláljuk. A *véletlen hiba* a rendszeres hibánál kisebb. Teljesen azonos mérési körülmények között is előfordul. Ez a hiba a mérés bizonytalanságát jelöli. Ideális esetben normális eloszlású és a várható értéke 0.

Egy tetszőleges eszközzel mért érték a következőképpen írható fel:

$$y_n = x_n - K \pm \varepsilon ,$$

ahol x_n a mért érték, K a korrekció értéke, ε a véletlen hiba, a változó előjel arra utal, hogy a véletlen hiba környezetében értendő az érték, y_n a korrekciózott érték.

A hőmérsékleti árnyékoló hibahatásai

Most alkalmazzuk a fenti elméleti megközelítést a léghőmérséklet-mérésre! Ha egy hőmérőt kihelyezünk a szabadba, ott fizikai folyamatok, kölcsönhatások szereplője lesz.

Ideális esetben felveszi a környező levegő hőmérsékletét. Részt vesz a hővezetési és sugárzási folyamatokban. Ha erősebb direkt sugárzás éri jobban felmelegszik, ha víz éri a szenzort, akkor hűteni fogja. Ha kellően sokáig fújja a szél, úgy, hogy nem tűnik el a víz a szenzorról, akkor a nedves hőmérséklet értékét közelíti meg.

Szennyezőanyagok is érhetik a felületet. Ezek más hőkapacitásúak és más hővezető képességgel rendelkeznek, mint a szenzor.

Összefoglalva, az árnyékoló elhagyása mind mérés technikai, mind meteorológiai szempontból nézve durva hibát eredményez. Az árnyékolók és a valós hőmérséklet között korrekció szükséges. A korrekciónak függenie kell az árnyékolón kívüli időjárási elemektől (pl. szél, sugárzás). Léteznek olyan hatások is, amiket a rendelkezésünkre álló eszközökkel nem tudunk pontosan megfogni. Ezeket a mérés-technikában véletlen hibának tudhatjuk be. Az ilyen hibák értéke $0,1\text{ °C}$ nagyságrendű. Ennyinek vagy ennél kisebbnek kell lennie a korrekciós eljárásunk átlagos szórásának. Feladatunk a mérés-technika nyelvére lefordítva egy ilyen pontosságú korrekciós eljárás kialakítása.

2. 2. A hőmérsékleti árnyékolók a XIX. század elejétől napjainkig

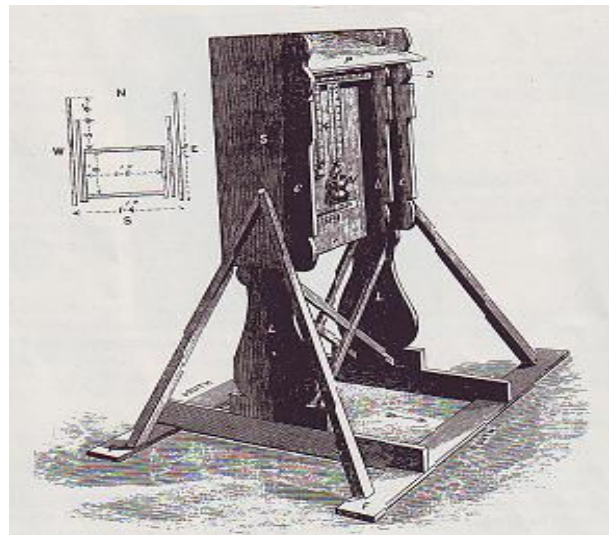
Nemzetközi vonatkozások

A meteorológiai mérések egységesítését elsőként a Societas Meteorologica Palatina szervezet kísérelte meg, amit 1780-ban alapítottak és 1795-ig működött (Czelnai, 1979). Az állomáshálózat közel negyven mérőhelyén (így Budán is) a hőmérsékletméréseket az épület északi oldalán kellett végezni. Itt még nem használtak külön árnyékolót. Feljegyzések szerint már 1838-ban, Hohenpeissenbergben használtak fából készített árnyékolót (Winkler, 2009).

1853-ban megtartották az első meteorológiai világkonferenciát Brüsszelben. Ezen a konferencián a hőmérsékletmérés fontossága is felmerült. 1873-ban megalakult a WMO jogelődje, a Nemzetközi Meteorológiai Szervezet (International Meteorological Organization, IMO). Ugyanebben az évben fogalmazta meg a hőmérsékleti árnyékolókkal

szembeni követelményeit a Brit Királyi Meteorológiai Társaság (Royal Meteorological Society). Hangsúlyozták, hogy a hőmérőt védenie kell a nap direkt sugárzásától, a hőmérőre nem hathat az árnyékoló külső napsütötte oldala, a visszavert sugárzást és minden egyéb külső hatást ki kell szűrni, biztosítani kell a levegő szabad áramlását a hőmérő körül, továbbá a hőmérőt nem érheti víz, és nem fedheti be a hó (Parker, 1994). Az addigi kutatások alapján az Egyesült Királyságban a legpontosabb árnyékolónak a kettős zsaluzású, északi oldalán nyitott ajtajú Stevenson-féle hőmérőházat minősítették, amit a Brit Királyi Meteorológiai Társaság a hőmérsékletméréshez javasolt (Mawley, 1897).

Ismerkedjünk meg röviden a Stevenson-ház elterjedése előtti „sokféleséggel” is. Kezdetben az Egyesült Királyságban Glaisher állványán a hőmérők kb. 1,5 m magasságon mérték a hőmérsékletet (**1. kép, balra**) (Laing, 1977).

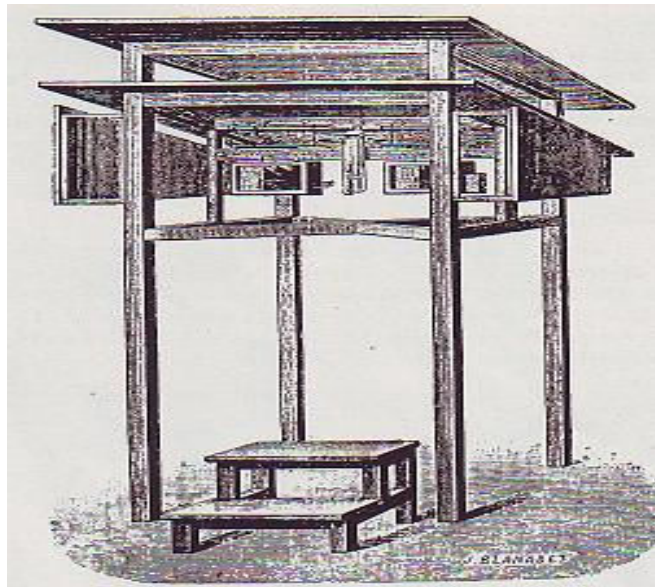


1. kép

Balra Glaisher állványát láthatjuk Greenwich-ben az 1880-s években,
jobbra Lawson állványát 1862-ből. (Gaster, 1882)

Ennél fejlettebb árnyékolónak tekinthető az Ausztráliában 1858–1880-as évek között használt Lawson állvány (**1. kép, jobbra**). Az állvány északi oldalára, kb. 1,6 m magasra helyezték el a hőmérőket. Bal és jobb oldalról egyaránt kinyúló falapokat használtak, valamennyire kivédve a besugárzást alacsony napállásnál (Donaldson, 1888).

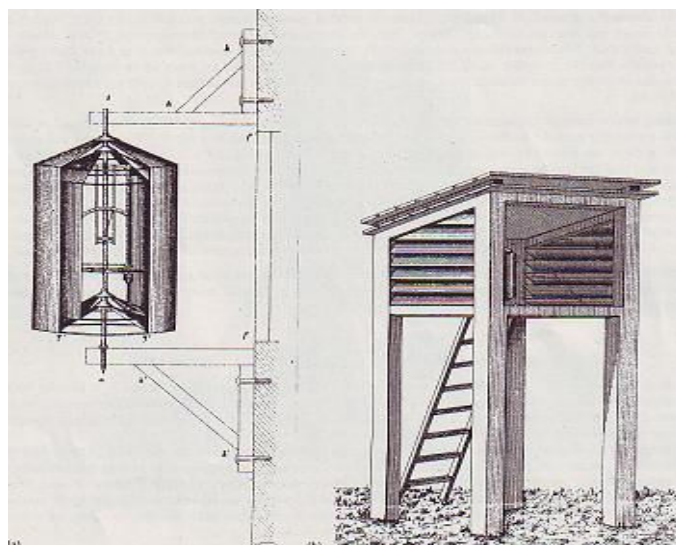
A XIX. századi Franciaországban észak felé nyitott, alulról is szellőző árnyékolókat használtak (**2. kép**). Itt a mérés 2 m magasan folyt, pl. Párizsban 1948-ig.



2. kép

A francia árnyékoló (*Gorczyński, 1910*)

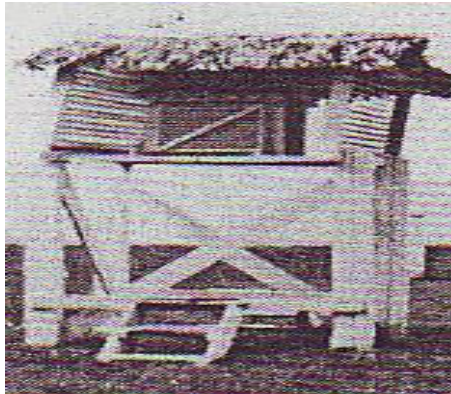
Ausztriában a Wild tervezte árnyékoló rendszerben eredetileg, a hengeres árnyékolót a „házba” helyezve kellett a hőmérsékletet mérni (**3. kép**). Hőcserélő tulajdonsága némileg rosszabb, sugárzásvédelme jobb volt a széles körben elterjedt Stevenson-féle hőmérőháznál. (Az optimális hőcsere van olyan fontos, mint a sugárzásvédelem.)



3. kép

Wild árnyékoló berendezése (*Parker, 1994*)

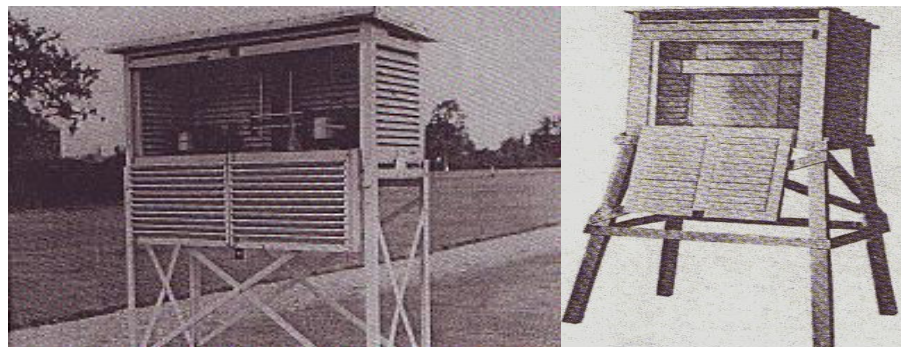
Érdekességként megemlítjük, hogy Szamoa térségében a Stevenson-ház köré tettek egy emelvényt is. A tetejét szalmával és náddal borították és be is zsaluzták. (4. kép)



4. kép

Szamoa térségében alkalmazott árnyékoló (Parker, 1994)

Az Amerikai Egyesült Államokban a Stevenson-ház egy módosított változata terjedt el az 1890-s években. Ezt „Cotton-region shelter”-nek nevezték. (5. kép jobbra) Itt a hőmérsékletmérést 1,5 m magasságon végezték egészen az 1970-s évekig.



5. kép

Angol és az amerikai Stevenson-ház („Cotton-region shelter”) (Sparks, 1972)

A Stevenson-ház kettős zsaluzású, fehérre festett fenyő vagy tölgyfából készült, teteje enyhe szögben döntött, a zsaluk dőlésszöge 45° . Az első változat északi oldalán egy lefelé nyíló ajtó volt, alulról nyitott. Az eredeti ház méretei: magasság 765 mm, szélesség 610 mm, mélység 593 mm (Czelnai, 1994). Mawley 1884-ben mutatta be a Stevenson-ház egy kibővített, nagyobb változatát (5. kép, balra), erre már 2 lefelé nyíló ajtó került, alulról is bezsaluzták, hogy a talajról visszavert rövidhullámú sugárzás, illetve a felszín hosszuhullámú kisugárzása ne jusson be. Mawley helyet hagyott egy szellőző cső beépítésére is. Az új változatban a mérési hibák kisebbek lettek, mint a régiben (Mawley,

1884). Megjegyezzük, hogy Japánban már 1950-re megoldották a Stevenson-ház folyamatos mesterséges szellőztetését a teljes mérőhálózatban.

De melyik árnyékoló a legjobb? A választ már a kritériumok hivatalos felállítása előtt keresték. Az első publikált és elismert munkához a méréseket 1869-ben Gaster végezte az angliai Kew közelében. Legjobban, legkisebb eltéréssel a hőmérsékletet a Stevenson-házba helyezett hőmérővel lehet mérni (*Gaster*, 1882). Már ekkor is történtek összevetések, pl. az akkor népszerű Glaisher állvánnyal, a francia árnyékolóval, a csupasz Wild-bódéval, a cinkkel borított Wild hengerrel, a komplett Wild rendszerrel, emellett az épület falára és Lawson állványára helyezett hőmérőkkel, akár egy mai műszer-összehasonlításnál. A referencia egy parittyahőmérő volt. A mérések 1,3 m körüli magasságban történtek. A mérések havi átlagára egyoldali t-próbát végezve a különbségek inszignifikánsnak mutatkoztak. Az eredmény általánosságban az volt, hogy a Stevenson-ház összességében jól leköveti a hőmérsékletváltozásokat, kis hibákkal dolgozik. Éjjel azonban a fafelület kisugárzása miatt alámér, nappal, szélcsendes időben, a napsütötte órákban fölmér. Foglalkoztak a szélsébség hatásával is. Megállapították, hogy a szélsébség növekedésével a hibák valamelyest csökkenni látszanak. Az árnyékolókkal szemben támasztott követelményeket Köppen (1913) bővítette, nevezetesen: az árnyékoló és tartozékainak a termális tehetetlensége legyen minimális, és az árnyékoló elhelyezésekor vegyük figyelembe a terület hőmérsékleti reprezentativitását.

Mint láthattuk, több alkalommal megvizsgálták a különböző hőmérsékleti árnyékolókban mért hőmérsékletértékeket. Nem volt azonban referencia-árnyékoló. Legtöbbször egy parittyahőmérőt használtak referenciaként (*Gaster*, 1882).

Assmann 1892-ben publikált cikkében bemutatott egy új eszközt a pontos hőmérsékletmérésre. Két hengert helyezett egymásba koncentrikusan, a levegőt egy felhúzható ventilátorral aspiráltatta 4 m/s sebességgel a hengereken keresztül. Cikkében megmutatta, hogy kis szél esetén a mérési hiba ezzel az eszközzel elhanyagolható (0,01 °C) (*Slob*, 1978). De mennyire pontos ez az árnyékoló köd, páráság vagy zúzmara esetén? Ezt a kérdéskört sokáig nem vizsgálták.

Az elmúlt hatvan év mérés technikai fejlesztéseit már a WMO koordinálta, amit külön részben mutatunk be. Előtte azonban ismerkedjünk meg a magyarországi hőmérsékletmérések, illetve árnyékoló vizsgálatok kezdeti lépéseivel.

Hazai vizsgálatok és fejlesztések (Ifj. Konkoly Thege Miklós munkássága)

Az Osztrák-Magyar Monarchia területén a XIX. század végén a higanyos üveghőmérőkkel történt hőmérsékletmérések nagyrészt még a házak falára tett bádogdoboz árnyékolókban folytak. Ilyen árnyékolót láthatunk az OMSZ belső udvarában a Meteorológiai Múzeum megbecsült tárgyaként.

Ifjabb Konkoly Thege Miklós, Magyar Királyi Meteorológiai és Földmágnességügyi Intézet asszisztense – több éves árnyékoló tervezés és mérés után – 1909-ben írt egy részletes tanulmányt „Kísérletek a Hőmérő-felállítások Tökéletesítésére” címmel (*Konkoly Thege M.*, 1909). Munkájában többféle felállítást is vizsgál, különféle árnyékolókban, különböző hőmérőkkel, az ideális füves talajtól kezdve az Ó-gyallai Főobszervatórium falához közel csupaszon felfüggesztett hőmérőig. A referencia itt is egy parittyahőmérő volt. A cikkben először felírja a problémát, mint egy minimalizációs feladatot, ahol a mérési hibát minden határon túli felbontással nullává lehet és kell tenni. Munkájában megvizsgálja a különböző faházikós felállításokat. Az „angol bódé”-nak nevezett Stephenson-ház adatait veti össze az akkor ismert, vastag falú „Wild-bódé”-ban mért hőmérséklettel. Megállapította, hogy az „angol bódéban” az átlag hőmérséklet a „Wild-bódénál” átlagban $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ -al alacsonyabb. A mérések 1901–1906 között történtek. A leolvasást naponta hússzor végezték, legnagyobb részt a délutáni órákban. A hőmérők túlnyomórészt Fuess-rendszerű higanyos hőmérők voltak. A szélirány hatását egyértelműen nem tudja kimutatni a szerző, amennyiben az előírásnak megfelelő helyre teszik a házat.

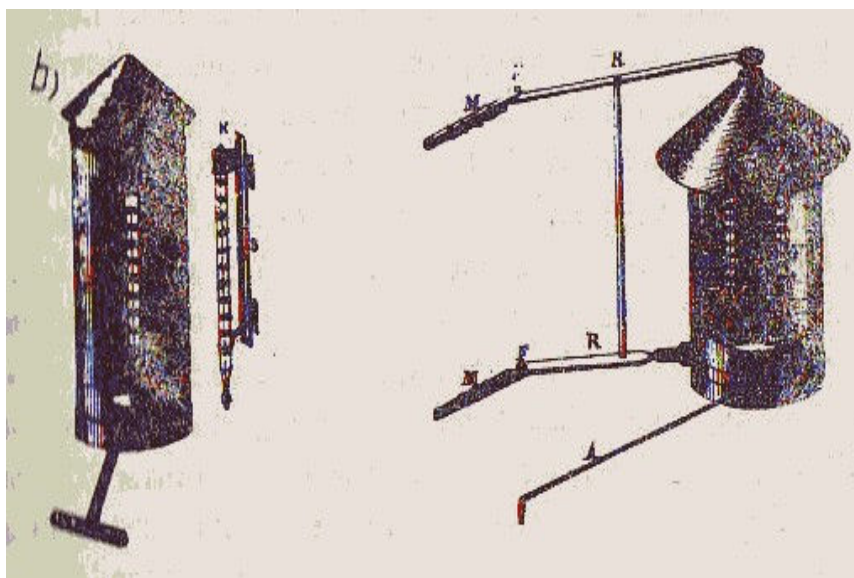
Az épületek tövében felállított árnyékolókban, illetve épületek falára aggatott hőmérőknél egyértelműen megmutatja, hogy a szél befolyásolja az eltérést. Amennyiben a szélvédett oldal felől fúj a szél, úgy az eltérések nagyobbak is lehetnek. Előnyösnek javasolja a mesterséges szellőztetést az eltérések korrigálására, ami a kor technika színvonalából adódóan még költséges, és folyamatos fenntartása lehetetlen feladat.

A legnagyobb eltérést délutáni órákban figyelték meg, a referenciához képest. Ekkor az „angol-bódé” adatainál volt olyan eset, hogy $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal mért a levegő hőmérséklete fölé. Napfelkelte idején adódtak a legkisebb eltérések. Említi a cikkben, hogy a napnyugta utáni erős kisugárzás idején jelentős eltérések mutatkozhatnak az árnyékolók között, átlagban mintegy $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Erős éjjeli kisugárzás esetén a hőmérőházak – a fa levegőnél nagyobb hőkapacitása folytán – valamivel a valós értékek alatt mérnek. A jelenséget a következőképpen magyarázza. A levegő a felhevült zsaluelemek között juthat csak be a megfigyelt térrészbe, ami természetesen felveszi a hőt és ezáltal a

megfigyelt térrészben már a zsalulemezek hőleadása által megterhelt levegőt mérjük. A fa hővisszaverő-képessége már régóta jól ismert tény.

Konkoly Thege Miklós munkássága nyomán az angol hőmérőház bizonyult összességében a legjobb árnyékolónak. 1909-től alkalmaznak a hazai gyakorlatban Stevenson-féle hőmérőházakat. A Meteorológiai és Földdelejtességi Magyar Királyi Intézet 1870-es alapításától számítva (Czelnai, 1995) körülbelül 50 éven át a hálózatban egységesen bádogházikókat (**6. kép**) használt (Szepesiné, 1971). Az 1920-as évek változást hoznak. A Stevenson-ház módosított változata került fölénybe Konkoly Thege Miklós munkásságának köszönhetően a hazai mérőhálózatban.

Az ő munkája inspirált minket arra, hogy a mai kornak megfelelő technikai háttérrel és ismeretek birtokában megvizsgáljuk hőmérsékletmérés pontosításának mai lehetőségeit, illetve a különböző árnyékolók okozta hibákat.



6. kép

Bádogházak az első operatíván használt árnyékolók Magyarországon

(Szepesiné *et al.*, 1971)

Az elmúlt évtizedek hazai fejlesztéseiről és árnyékoló-vizsgálatokról a későbbiekben írunk.

A WMO szerepe a mérések egységesítésében és az árnyékoló fejlesztésekben

1950. március 23-án megalakul a WMO. A meteorológiai mérések standardizálására különböző technikai bizottságok alakultak, s működnek folyamatosan (http://www.wmo.int/pages/about/milestones_en.html). Az egyik legfontosabb a Műszerek és a Megfigyelési Módszerek Bizottsága (Commission for Instruments and Methods of Observation, CIMO). A bizottság feladata az új mérés-technikai, mérés-módszertani megoldások tesztelése, vizsgálata. Javaslatokat tesznek továbbá az ismert és új eljárások, eszközök fejlesztésére, változtatására, megvizsgálják ezek alkalmazhatóságait, mérés-útmutató kiadványokat készítenek. A bizottság tagjai különböző WMO tagországokból származnak.

A CIMO vizsgálatai kiterjedtek az árnyékolók mérési hibáira is. Slob 1978-s publikációjában (Slob, 1978) megmutatja, hogy ha a szélesség nagyobb, mint a szellőztető áramoltatási sebessége, a levegő nedvességtartalmától függően átlagosan 0,1 °C és 0,2 °C közötti hibák adódnak. Árnyékolóra fagyó jégcsap esetén ezek értéke maximálisan 2 °C. Kontrolnak egy mesterségesen szellőztetett, periódikusan fűthető lamellájú árnyékolót használt.

A CIMO az új kiadványokban az árnyékolóval és a hőmérsékletméréssel kapcsolatban egyértelműen fogalmazza meg az alábbi főbb gondolatokat. A hőmérsékletmérést a földfelszín felett a mérési területet jól reprezentáló magasságban kell végezni. Az elhelyezésnél további ajánlás, hogy a földfelszín 5 és 15 cm magasság közötti fűfelszín borítsa a mintavételezés területén. A mintavételezés helyét úgy kell megválasztani, hogy a környezetében lévő akadályok magasságától körülbelül kétszer akkora távolságra kerüljön, azaz egy 10 méter magas fa esetében a fától 20 méter távolságra kell telepíteni a mérőeszközt, 20 méter távolságon a talajt a fent előírt fűfelszín kell, hogy borítsa. A mérőeszközt egy védőberendezésbe kell tenni, ami védi a mintát a direktsugárzás fűtő, illetve az esőcsepp hűtő hatásaitól, emellett a diffúz sugárzástól is. Az árnyékolókkal szemben a következő főbb követelményeket állították fel (WMO, 2006):

- a védőberendezés védje az eszközt a direkt, reflektált sugárzástól,
- a védőberendezés levegője gyorsan cserélődhessen a külső levegővel,
- a védőberendezés körüli szél minimálisan tudjon befújni,
- a védőberendezés ne cseréljen hőt a mért levegővel.
- a védőberendezés a hőmérsékleti változásokat a lehető leggyorsabban kövesse le.

A WMO folyamatosan frissíti ezeket a kiadványokat, amelyekben áttekinti az alkalmazható árnyékolókat és azok várható hibáit is leírja. Készülnek az árnyékoló hibákról összefoglaló munkák (*Sparks, 1970*), az árnyékolót ért direkt sugárzás kivédésének tervezési kérdéseiről, pedig útmutatások. (*Sparks, 1972*) Az 1970-s évektől készült publikációkban már a tányéros árnyékolók továbbfejlesztésével is foglalkoznak.

Az újabb átfogó vizsgálatokban (*Barnett et al. 1998, Warne, 1998*) már egyértelműen tányéros árnyékolókat javasolnak operatív célokra. A szerzők megjegyzik, hogy a WMO-nak egyértelműen standardizálni kellene az árnyékolókat.

A WMO – Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations 8. kiadványában (*WMO, 2006*) a hőmérőház és az üvegszálás, poliésztermerevítésű tányéros árnyékolók között $-0,5$ és $+2.5$ °C közötti hibaintervallumot jelöl ki. Egységes árnyékoló használatát itt sem javasolják, kiemelik azonban, hogy az eszköz és árnyékoló váltásakor tanácsos párhuzamos méréseket végezni a régi és az új eszközökkel egy ideig, hogy a mérési adatokat felhasználva homogenizálhatóak legyenek az adatsorok.

A gyártók ezen követelmények teljesítése érdekében tértek át a kezdeti nemesfémekből készült tányéros árnyékolókról a műanyag, üvegszálás változatokra.

Ezeket a következő módon készítik. A tányérokat alulról fekete színűre festik, elkerülve így a tányérról visszavert sugárzás méréstérbe jutását, ami a szenzort is felmelegítheti. A tányérok szélét gyártónként változó szöggel megdöntik. A tányérok közepét kettő kivételével (ez lesz a teteje és alja) kilyukasztják, kifúrják. A kifúrt kör mentén lévő résznél visszahajlítást készítenek és lecsiszolják. Ez a sugárzás lehető legjobb visszaverése miatt szükséges, továbbá a szél így hamarabb lehűti a napsütés során felmelegedett tányérokat. Végezetül gyártótól függően 9-13 darab (GILL, VAISALA) tányért 4 és 8 mm közötti menetre helyezik (mindig egy lyukasztatlannal kezdik, majd fejezik be) majd csavarral rögzítik.

Sok műszergyártó kínál ilyen árnyékolókat a műszerek mellé. (Young, Vaisala) Méreteik általában eltérőek de hengeralakúak.

A számítógépek és a hidrodinamikai egyenletrendszereket numerikusan, véges elem módszerrel megoldó programcsomagok (FLUENT) elterjedésével az árnyékolók tervezése is gyorsabbá, egyszerűbbé vált. Az itt beprogramozott áramlások alapján jó eséllyel tervezhetünk optimális szellőzésű árnyékolót. A WMO követelményeinek megfelelően ezekkel a programokkal az árnyékoló hőmérsékleti tehetetlenségét is meg tudjuk vizsgálni.

A tányéros árnyékolókból többféle van, a meteorológiai szolgálatoknál használtakat általában be lehet sorolni az alábbi 3 amerikai típus közül valamelyikbe. Ezek az MMT (Maximum – Minimum Temperature System), GILL, ASOS (Automatic Station and Observing System). (7. kép)



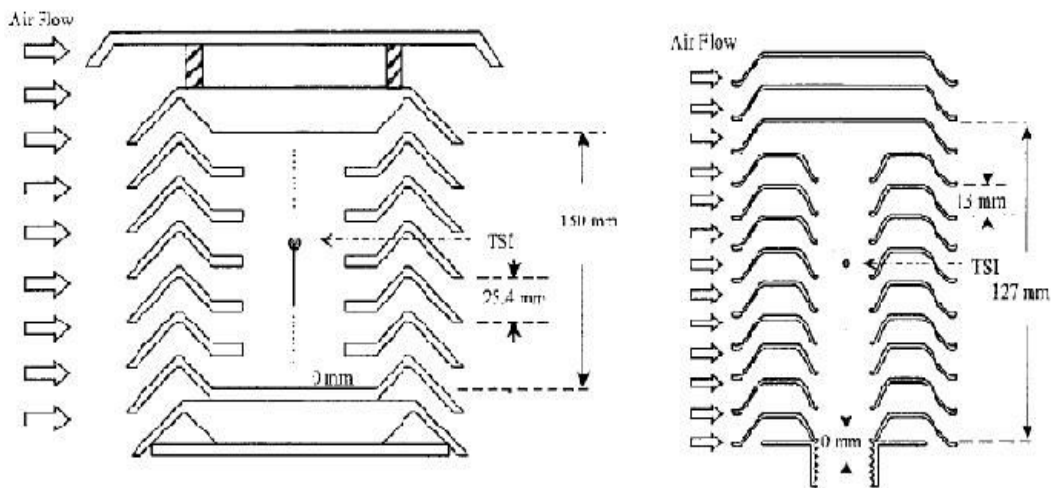
7. kép

Balra az ASOS, középen a GILL, jobbra az MMT árnyékoló láthatók

(<http://www.weatherunder.net>)

A GILL és az MMT között a különböző geometriai kialakítást jobban látjuk, ha megnézzük a keresztmetszeti képeket is. (8. kép) Az MMT rendszerben a maximum és minimum hőmérsékletek hibái ebből a geometriai elrendezésből adódóan kisebbek. Az infrahőmérők megjelenése óta meg tudjuk mérni az árnyékoló felszínhőmérsékletét is. A sugárzási egyenlegek minden komponensére léteznek mérőeszközök. A felszínhőmérsékletek és a sugárzási egyenlegek ismeretében meg tudjuk határozni az árnyékolók emisszivitási, tényezőjét, albedóját, abszorpcióját, reflektivitását, hőkapacitását. Szélcsatornás vizsgálatok és szimulációs programok segítségével megvizsgálhatjuk az árnyékoló körül uralkodó szélmezőt is. (Richardson et al., 1999)

Jelenleg a tányéros árnyékolók fejlesztése és tesztelése folyik világszerte. A világ élvonalában az Amerikai Egyesült Államok, a Hollandiai Királyi Meteorológiai Intézet (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI), az Egyesült Királyság, Németország és Franciaország meteorológusai játsszák a vezető szerepet. A WMO a CIMO kiadványokban rendszeresen összefoglalja az újabb eredményeket, sokszor, le is tesztelik az újabb kereskedelemben is kapható professzionális árnyékolókat (Warne, 1998).



8. kép

Balra az MMT, jobbra a GILL rendszer keresztmetszeti képe látható

(Linn et al., 2001)

Magyarországon Konkoly Thege Miklós nyomdokain haladva folytak további fejlesztések. Módosítások voltak például a hőmérőház lábázatában (Czelnai, 1961). Végeztek összehasonlító méréseket is. Az OMSZ Szarvasi Agrometeorológiai Observatóriumban végzett mérései során a mérőtorny 2 m-es szintjén használt zsalus árnyékolóban és a hőmérőházban mért hőmérsékletek között a legnagyobb eltérés 2,0 °C körüli volt (Galló, 1979). Alacsony napállásnál tiszta égbolt esetén a hőmérőházban, magas inszolációs állásnál a torony árnyékolójában történik felülmérés. Javasolják egy tökéletesebb árnyékoló alkalmazását.

Az 1990-s évektől kezdve egyre több elektromos hőmérőt és tányéros árnyékolót helyeznek üzembe, sokszor a hagyományos hőmérőházakat lecserélve. A szinoptikus főállomások egy részén és a klimatológiai állomásokon megmaradtak a Stevenson-féle hőmérőházak. Az áttérés során az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az automata műszereket és az új árnyékolókat – a CIMO kiadványok ajánlásának megfelelően – párhuzamosan működtették 1-2 évig. Az adatok kiértékelése után ezek bevezetésre kerültek. A tányéros árnyékolók közül a Magyarországon több típust is összehasonlítottak. A tesztek során az amerikai MMT-s típusra hasonlítókat bizonyultak a legjobbnak. Anyaguk poliésztermerevítésű üvegszál. Alulról feketére festették őket, felülről csillogó fehérre. Bár akadtak teszteredmények bőségesen, többféle árnyékoló komplex vizsgálatát szükségesnek találták. Ezért a pestszentlőrinci Marczell György Főobszervatóriumban kijelöltek egy

területet ezekre a vizsgálatokra. Itt a nemzetközi szintű vizsgálatokkal hasonló színvonalú és részletességű mérések történtek. Referenciaként egy Young 43502 típusú mesterségesen szellőztetett (4 m/s áramlási sebesség körüli) és nap-követő villanymotor hajtotta koronggal árnyékban tartott árnyékoló szolgált. A vizsgálat során részletes képet kapunk a műszerezettségéről. A munkában az árnyékoló albedójának napi menetét is láthatjuk (*Nagy, 2006*). Méréseinket ennek a kutatásnak a helyén indítottuk el.

3. A hőmérsékleti árnyékolók fizikája

3. 1. Alapvető összefüggések és fogalmak

Hőcsere különböző felületek között háromféle fizikai folyamat során történik. A folyamatok érvényességi köre, létezése teljesen más és a hőenergia szállításának módja, sebessége is különböző. Ezek a szállítási sebesség gyorsaságának növekvő sorrendjében a következők:

- molekuláris diffúzió,
- konvekció,
- hőmérsékleti sugárzás.

Molekuláris diffúzióról beszélünk – ami akkor indul meg – ha a közegen belül hőmérsékletkülönbség tapasztalható. Ilyenkor a hőcsere tisztán a molekulák kinetikus energiájának hasznosulása révén történik, a mozgások iránya tetszőleges. A melegebb részben a molekulák átlagos kinetikus energiája nagyobb, a hidegben kisebb. A molekulák ütközése gyorsítja a hőcsereét.

Konvekcióról beszélünk, ha a hőmérséklet-különbségekből adódó hőcsere a levegő és a felszín között a molekulák rendezett mozgásaival zajlik le. A konvekció során a hőcsere két folyamatból tevődik össze. Egyik a már ismertetett molekuláris diffúzió, másik a molekuláknál nagyobb skálájú rendezett mozgás. Létezik egy felületre merőleges szűk sáv, ahol a hőmérséklet a felülettől távolodva még nem egyenlő a levegő hőmérsékletével. Ezt nevezzük termális határrétegnek. A termális határrétegen belül a hőáram állandó, a szél iránya nem változik. A hőcserélődési folyamatok itt zajlanak le, majd turbulens módon kerülnek ki ebből a rétegből a levegőbe. A réteg mérete a hőmérsékleti gradiens változásával képes változni. Konvekció esetén a hőáramot a következőképpen számoljuk:

$$q = h \cdot (T_s - T),$$

ahol

q : a konvekcióból származó hőáram [Wm^{-2}],

h : a hőátviteli együttható [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$],

T_s : a felület hőmérséklete [K],

T : a léghőmérséklet [K].

A konvekciót tovább osztályozhatjuk aszerint, hogy mi hozza létre. Szabad konvekcióról beszélünk, amennyiben a konvekciót pusztán a hőmérsékletkülönbség hozza létre. Emelt- vagy kényszer-konvekcióról beszélünk, amikor a szél is hat az áramlásra. Az árnyékolók hűtésében mindkét folyamat egyszerre teljesül. Mikor indul be a szabad konvekció? Erre a választ a Rayleigh-szám kiszámolásával kaphatjuk meg.

$$Ra = \frac{\beta \cdot g \cdot (T_s - T) \cdot L^3}{\nu \alpha},$$

ahol

β : a hőtágulási együttható [K⁻¹],

g : a föld gravitációs gyorsulása az adott helyen [ms⁻²],

α : a hővezetési együttható [m²s⁻¹],

ν : a levegő kinematikai viszkozitása [m²s⁻¹],

L : a karakterisztikus hossz, esetünkben a lamellák közötti távolság [m].

A Rayleigh-szám egy dimenziótlan szám, amivel a hőcsere jól parametrizálható (*Incropera és Dewitt, 1985*).

A hőátviteli együtthatót meghatározhatjuk a dimenziótlan Nusselt-számból (Nu).

$$Nu = \frac{h \cdot l}{k},$$

ahol

l : a karakterisztikus hossz [m],

k : a hővezetési együttható [Wm⁻¹K⁻¹].

A Nusselt-szám megmutatja egy testben a konvektív folyamatok okozta hűtés és a hővezetési folyamatok okozta hűtés arányát (*Anderson és Baumgartner, 1998*). A Nusselt-számot más dimenziótlan számok felhasználásával is előállíthatjuk. Szabad konvekció esetén a Rayleigh – és a Prandtl-számot, kényszer konvekció esetén a Prandtl – és a Reynolds-számokat használjuk. A Reynolds-szám definíciós alakja:

$$\text{Re} = \frac{l \cdot v}{\nu},$$

ahol

v : az áramlás sebessége [ms^{-1}].

A Reynolds-szám a tehetetlenségi és a molekuláris viszkozitási erő arányát mutatja meg. Arról tájékoztat, hogy az áramlás lamináris, vagy turbulens, illetve a kettő közötti átmenet (Götz és Rákóczi, 1981, Lajos, 2004).

A Prandtl-szám alakja:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}.$$

A Prandtl-szám kinematikus viszkozitás és a termális diffúzió aránya. A kinematikai viszkozitás, a hővezetési együttható, hőtágulási együttható értékei függenek a hőmérséklettől.

A hőcsere következő formája a *hőmérsékleti sugárzás*. Minden, az abszolút nulla fok feletti hőmérséklettel rendelkező test elektromágneses hullámok formájában energiát sugároz ki környezetére felé. A kisugárzott energiaáramot a Stefan-Boltzmann törvénnyel határozhatjuk meg.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4,$$

ahol

E : az energiaáram [Wm^{-2}],

ε : a test emisszivitása, fekete testre ez 1, szürke testnél 1 és 0 közötti,

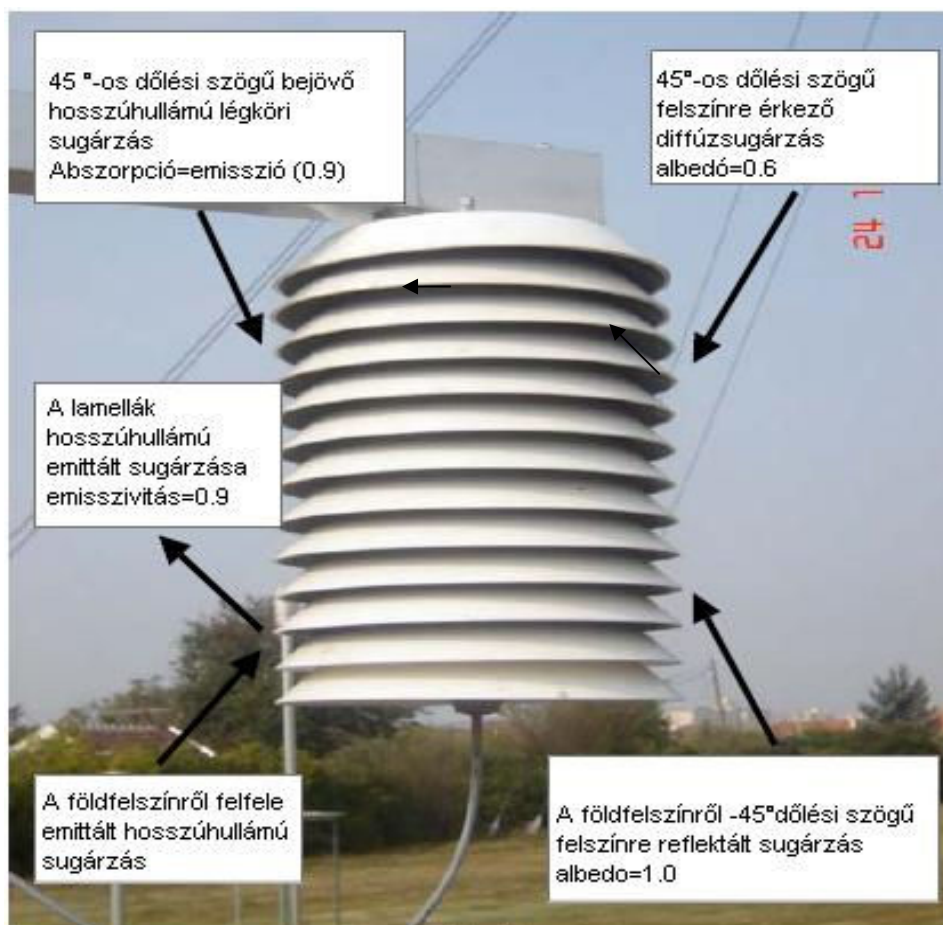
σ : a Stefan-Boltzmann állandó [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$],

T_s : az árnyékoló felületén mért hőmérséklet.

A hőmérsékleti árnyékolók energiaegyenlegének korábban ismertett komponensein túl nyilvánvalóan szerepet kapnak azon tagok is, amelyekkel a klasszikus napsugárzás mérések területén találkozhatunk, melyek részben bevételi, részben veszteségi tagokként szerepelnek a teljes energiaegyenlegben. A napsugárzás rövid-, illetve

hosszúhullámú sugárzásához tartozó bevételi és veszteségi tagok rövid áttekintését a **9. képen** láthatjuk.

Az előzőekben röviden ismertetett fizikai folyamatok a hőmérséklet-árnyékolók energiaegyenlegének veszteségi tagjaiként kezelhetők, ám a teljes energiaegyenlegben nyilvánvalóan a bevételi tagok is szerepelnek. A bevételi tagok szinte kizárólag a rövid- és hosszúhullámú sugárzási komponensek, melyek forrásai a Nap, a légkör illetve a talajfelszín. (A meteorológiai sugárzástanban rövidhullámú sugárzásnak tekintjük azon hullámhosszúságú sugárzást, melynek forrása a Nap, tehát a kb. 300-3000 nm-es hullámhossz tartományt.)



9. kép Az árnyékolót ért főbb sugárzási komponensek
(a kép a pestszentlőrinci Marcell György Főobszervatóriumban készült)

Energetikai számításokhoz és a későbbiekben alkalmazott árnyékoló korrekciós számításainkhoz elengedhetetlen a Nap pozícióját meghatározó szögek (napmagasság, azimut) ismerete.

A Nap azimutját és a napmagasságot a következő numerikus közelítő eljárással határoztuk meg (*Patridge és Plat, 1976*). Kiszámoltuk először az u aránytényezőt.

$$u = \frac{2\pi}{365} n_n,$$

ahol

n_n : az év napjának a száma, január 1-jén 0, december 31-én 364.

Meghatároztuk utána a deklinációt (δ) a Spencer-formulával:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos u + 0,070257 \sin u - \\ & - 0,006758 \cos 2u + 0,000907 \sin 2u \\ & - 0,002697 \cos 3u + 0,001480 \sin 3u. \end{aligned}$$

Csillagászati értelemben akkor delel a Nap, amikor áthalad az adott helyhez tartozó meridiánon. A keringési pálya excentricitása és a forgástengely dőlése miatt azonban ez nem mindig ugyanakkor történik meg. Az általunk mért dél és a csillagászati delelés közötti időt időegyenlítésnek (Δt_e) nevezzük. Ennek menetét jól leírja a Spencer-formula:

$$\begin{aligned} \Delta t_e = & 0,000075 + 0,001868 \cos u - 0,032077 \sin u - \\ & - 0,014618 \cos 2u - 0,040849 \sin 2u. \end{aligned}$$

A csillagászati időt az általunk mért zónaidőből származtatva a következőféleképpen írhatjuk fel:

$$t = 4(\lambda - \lambda_z) + \frac{720}{\pi} \Delta t_e + t_z.$$

Itt az időt (t) és a zónaidőt (t_z) is percekben kell megadnunk. λ a hely, λ_z a zónaközép földrajzi hosszúság °-ban megadott értéke. Esetünkben $\lambda = 15^\circ$, $\lambda_z = 19^\circ$. Az órák napi értékének meghatározásához szükségünk volt az óraszögre:

$$\omega = \frac{2\pi}{24}(t - 12).$$

A napmagasságot (h_n) és azimutot (a) gömbháromszögi ismereteket is felhasználva a következő alakban kapjuk:

$$\sinh_n = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega,$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh_n}.$$

Itt φ a megfigyelő földrajzi szélessége, esetünkben ez a műszerkert földrajzi koordinátája: $47,44^\circ$. Pozitív, mert északi szélességen vagyunk.

A fenti ismeretek függvényében felírhatjuk a tányéros léghőmérséklet-árnyékolók energiaegyenlegének általános alakját egységnyi felületre normálva, amely a következő:

$$R_{sw} + R_{LW} + \varepsilon_t \sigma T_t^4 + L_t + K_t = 0,$$

ahol

R_{sw} : az árnyékoló tányérjain a Nap rövidhullámú sugárzásából (direkt, diffúz és földfelszín által reflektált) hasznosuló bevételi tag [Wm^{-2}],

R_{LW} : az árnyékoló tányérjain a légkörből és a földfelszínről érkező hosszuhullámú sugárzásából hasznosuló bevételi tag [Wm^{-2}],

ε_t : a tányér emisszivitása,

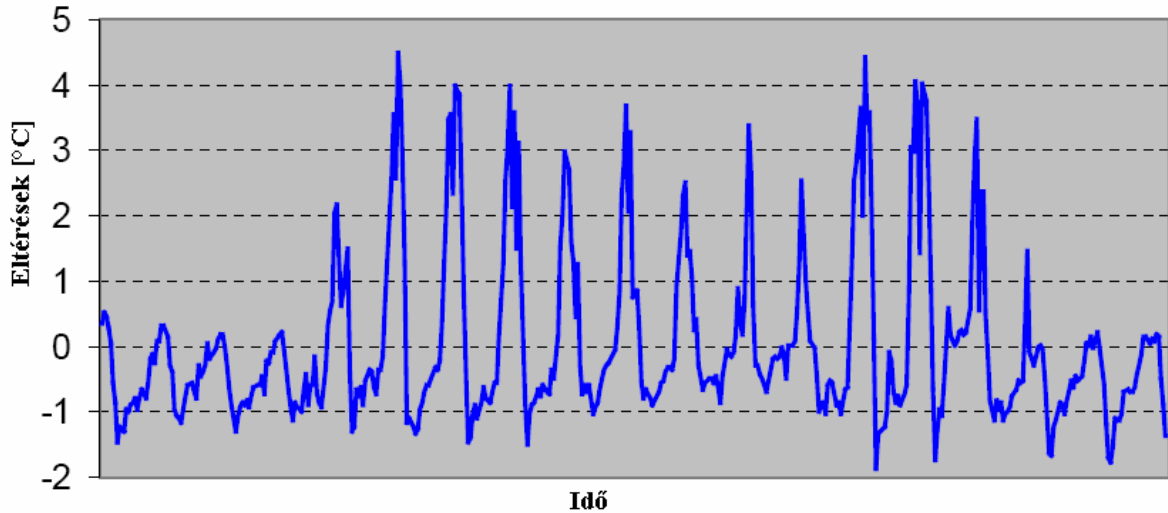
T_t : a tányér felszíni hőmérséklete [K],

L_t : a tányér konvektív hőcsere tagja [Wm^{-2}],

K_t : Tányér konduktív hőcsere tagja [Wm^{-2}].

Az energiaegyenleg fentiekben felírt általános alakjába a sugárzást tagokból származó energiabevétel a tányérok hosszuhullámú kisugárzása, a tányérok konvektív és konduktív hőcsereje révén emésztődik fel. Megállapítható, hogy a sugárzási bevételi tagok nagyságának függvényében az árnyékoló tányérok hőmérséklete a környező levegő hőmérsékletéhez képest mindig magasabb lesz, mérési hibát okozva ezzel az árnyékoló

belsejében lévő hőmérő méréseire. Ha a sugárzási egyenleg negatív (éjjel) akkor az árnyékoló hidegebb, mint környezete, ilyenkor alámérjük a léghőmérsékletet. A tányéros hőmérséklet-árnyékolók lamelláinak valamint a belső térbe kialakuló léghőmérséklet különbségeit az **1. ábrán** láthatjuk.



1. ábra

A lamellák felszínén és az árnyékolóban mért hőmérsékletek különbségének időbeli menete (Nagy, 2006)

3. 2. Sugárzási modell az árnyékolók hőmérsékleti hibáira

Fontos kérdés az árnyékolók hőmérsékleti hibájának az ismerete. Példaként megemlítjük, hogy az Arab-tenger térségében a nem mesterségesen szellőztetett bójákon napi átlagban 0,27 °C-os fölémérést detektáltak a TOGA mérési expedíció egyik csoportjára. Legnagyobb adatuk 3,4 °C volt, amikor az adatokat összevetették a ventilátorral szellőztetett bóják adataival. A bóják által mért hőmérsékleti adatok alapján számolták a szenzibilis hőáramot. Mivel a hőmérsékleti hibák a szenzibilis hőáramban is jelentős eltéréseket okoztak, ezért volt szükség a korrekcióra (Anderson és Baumgartner, 1998).

A javításokat a „Gill” típusú tányéros árnyékolókban mért hőmérséklet-értékekre végezték a következő módon:

Kiindulási egyenletünk árnyékoló energiaháztartási egyenlete:

$$\alpha_s R_s A_s + \alpha_t R_t A_t = \varepsilon_t \sigma T_s^4 A_t + L + S . \quad (1)$$

ahol

R_s : a rövidhullámú sugárzási egyenleg [Wm^{-2}],

R_l : a hosszúhullámú egyenleg [Wm^{-2}],

A_s : a rövidhullámú sugárzás irányára merőlegesen normált felület [m^2],

A_l : a hosszúhullámú sugárzás irányára merőlegesen normált felület [m^2],

α_s : a rövidhullámú sugárzás esetén lévő abszorpciós tényező,

α_l : a hosszúhullámú sugárzás esetén lévő abszorpciós tényezők,

T_s : árnyékoló felületén mért hőmérséklet [K],

L : a konvektív hőleadás [W],

S : a konduktív hőleadás [W].

Az árnyékolók gyors reagálását feltételezve a hőmérséklet-változásra a „steady-state” közelítést alkalmazták, vagyis azt mondták, hogy minden időpillanatban az árnyékoló hőmérséklete felveszi az energiaegyenlegben meghatározott egyensúlyi hőmérsékletet. Elhanyagolható az árnyékoló belsejében (T) és a felületén mért hőmérséklet közötti különbség. Azt feltételezzük a modellben, hogy az árnyékoló felületéhez közeli levegő sodródik be az árnyékoló belsejébe, $T \approx T_s$.

A rövidhullámú sugárzásnál a direkt és a diffúz sugárzás szétválasztása egyszerű módon történt: tiszta égbolt esetén 0,9-nek vették a direkt sugárzás arányát a teljes rövidhullámú sugárzásból.

A napállással normálták a felületeket, hengernek vették az árnyékoló alakját. E feltételezésekkel a direkt sugárzásból az árnyékolóra jutó teljesítmény [W] már kiszámítható:

$$\alpha_s A_s R_s = \alpha_s \frac{SW \downarrow}{(0,1 + 0,9 \sin \theta)} (r\pi[h \cos \theta + r \sin \theta]), \quad (2)$$

ahol

θ : a napmagasság,

r : árnyékoló sugara [m],

h : árnyékoló magassága [m],

SW : a tengerfelszínre merőlegesen érkező sugárzási áram [Wm^{-2}].

(A nap megsüti az árnyékoló tetejét és a fél palástját.)

Láthatjuk, hogy a képletben nem veszik figyelembe az alacsony napállásnál a méréstérbe bejutó visszavert sugárzásokat. A képlet alkalmazhatóságát mutatja, hogy a követi a napmagasság változását és alacsony napállásnál is pontosan leírja az árnyékoló jutó direktsugárzást, ami ilyenkor nem elhanyagolható (közel merőleges homlokl felület).

Feltételezték, hogy az árnyékoló ugyanakkora felületén megy végbe konvektív és konduktív hőcsere, amit a következő képlettel adtak meg:

$$L + S = h_u \cdot (T_s - T_0)A_c + h_0(T_s - T_0)A_c, \quad (3)$$

ahol

T_0 : levegő hőmérséklete [K] (ezt az értéket szeretnénk megmérni),

h_u : kényszerkonvekció hőátviteli együtthatója [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$],

h_0 : hővezetési hőátvitel együtthatója [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$],

A_c : felület, ahol a folyamatok végbemennek [m^2].

Mivel az árnyékolót hengernek vettük, az A_c felület így $2\pi r(h+r)$ alakú az árnyékoló, ahol r a henger alakú árnyékoló sugara, míg h a magassága. (Az árnyékoló teljes felületén szellőzik.)

A Nusselt-számot a Reynolds- és a Prandtl-szám hatványkitevős szorzataként írjuk fel (Incropera és DeWitt, 1985):

$$Nu = C' Re^m Pr^n, \quad (4)$$

$$\frac{h_u D}{k} = C' \left(\frac{VD}{\nu} \right)^m Pr^n, \quad (5)$$

ahol

V : a szélesség [ms^{-1}],

D : a henger átmérője ($D = 2r$) [m],

k : a hővezetési együttható [$\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$],

Pr : a Prandtl-szám,

ν : kinematikai viszkozitási együttható [m^2s^{-1}],

C' , m , n : empirikusan (pl. a legkisebb négyzetek módszerével történt illesztéssel) meghatározott konstansok.

Tegyük fel, hogy a Prandtl-szám, akárcsak a kinematikai viszkozitási együttható állandó. Ekkor:

$$h_u = CV^m, \quad (6)$$

ahol C egy újabb számítási állandó (*Anderson és Baumgartner, 1998*).

Az árnyékoló hővesztesége, az ún. hűtőfüggvény (δ , [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]) az (1) (3) (6) egyenletek egymásba helyettesítésével áll elő:

$$\delta = (CV^m + h_0) = \frac{R_s A_s}{(T - T_0) A_c}, \quad (7)$$

ahol a h_0 a sugárzás abszorpciójától függő állandó. A hűtőfüggvény ismeretében már felírhatjuk a tányéros árnyékoló belsejében mért T hőmérséklet és a külső levegő (léghőmérséklet) közötti korrekciót. A (7) egyenletben kihasználtuk, hogy $T \approx T_s$. *(Megjegyezzük, hogy ez a feltetelezés nem teljesül a hagyományos hőmérőházak esetén, mivel túl vastag a faluk, s a fának és a műanyagnak mások a termális tulajdonságai.)*

A sugárzásból adódó hibák figyelembevételével a léghőmérséklet (T_0) becslése az árnyékolóban mért T hőmérséklet ismeretében:

$$T_0 = T - \frac{R_s A_s}{\delta A_c}, \quad (8)$$

A modellben figyelembevették a szél szélirányfüggő szellőztető hatását is. A szélnél empirikus csoportosítást, egyenlő méretű statisztikai osztályokra való bontást alkalmaztak (*Kendhall és Stuart, 1967*) a szélirány bójával bezárt szögéhez képest. Ezt a B blokkoló függvény fejezi ki (*Anderson és Baumgartner, 1998*):

$$B(\psi) = 1 - \frac{D(\psi) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}. \quad (9)$$

Itt ψ a bója sodródásához képesti szélirány, $D(\psi)$ a szélirány szerinti hőmérsékletkülönbség, D_{min} , D_{max} a szélirányok szerinti hőmérsékletkülönbségek minimuma és maximuma. A blokkoló függvény megmutatja, hogy mennyire szellőzik a bója. A blokkoló függvényben levő értékkel megszorozva a szélesebbeséget, új sebességet kapunk, ezt visszaírjuk a (7)-be így új hűtőfüggvényt generálunk. Az új hűtőfüggvény δ_2

A Nap azimutjánál ugyanezt a megoldást alkalmazzák, ott is alkottak csoportokat a Nap azimutjára és a hiba kapcsolatára. A napsugárzás azimut-függő hibáit is normálják, ezt árnyékolási aránynak nevezik. Alakja:

$$S(\phi) = \frac{D(\phi) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad (10)$$

ahol

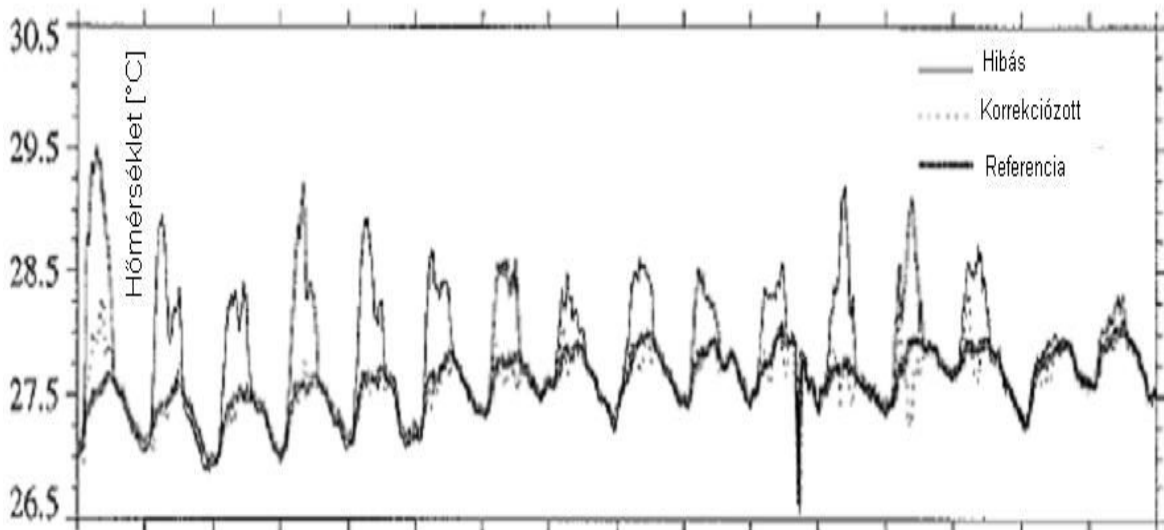
S : az árnyékolási arány,

ϕ : a Nap azimutja,

$D(\phi)$: a hőmérsékletkülönbség az azimut függvényében.

A kapott aránnyal megszorozzák R_s -t. És megkapják R_{s2} -t. Az új korrekció a következőképpen áll elő:

$$T_0 = T - \frac{R_{s2} A_s}{\delta A_c}. \quad (11)$$



2. ábra (Anderson és Baumgartner, 1998)

A modell eredményeivel történt korrekció 3 napos adatsorra

A kiértékelésnél a modell legnagyobb hibái 0,4 °C körül mutatkoznak. A modell hibáinak szórásai 0,21 °C körüliek. (**2. ábra**)

A modellnél nem veszik figyelembe, hogy alacsony napállásnál a nap besüthet a méréstérbe további hibákat okozva. Nem foglalkoznak továbbá az árnyékoló felmelegedett oldaláról történő meleg levegő befújásával. Ezt a hatást a szél által alkotott statisztikai osztályok elmosás. Hibát okozhat az a feltételezés is, hogy az árnyékoló felszíne és belseje között nincs hőmérsékletkülönbség.

A rövidhullámú sugárzás direkt és diffúz komponensekre bontásánál a cikk szerzői alkalmazhattak volna egyszerű, kifejezetten ilyen célú eljárást is (*Erbs et al.*, 1982).

A bemutatott modell alkalmas a szinoptikus állomásokon használt árnyékolók sugárzásháztartási modellezésére. A későbbiekben mi is tervezzük ilyen típusú sugárzási modell felépítését.

4. Az OMSZ-nál alkalmazott árnyékolók hiba elemzése

4.1. Kísérleti mérések

Vizsgálataink során az adatokat az alábbi forrásokból nyertük:

- a hőmérséklet árnyékolók vizsgálatára szolgáló módszertani mérőkert tízperces felbontású léghőmérséklet, szélesség és globálsugárzás adatsorai,
- az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában a vizsgálat idejére vonatkozó szélirány adatsor,
- Debrecen-Reptér és Debrecen-Kismacs mérőállomás 2009. évre vonatkozó léghőmérséklet, szélesség, szélirány és globálsugárzás adatsorai.

Méréseink és megfigyeléseink színhelye az OMSZ pestszentlőrinci Marczell György Főobszervatóriumának műszerkertje (**10. kép**).



10. kép

Az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumának műszerkertjében végzett méréseink.

A mérések 2009. július 12-én kezdődtek. 9 árnyékoló berendezésben mérünk hőmérsékletet, Pt100-as ellenállás hőmérőkkel. Ezek közül 3 Young 43502 illetve egy Young 43408 típusú, mesterségesen szellőztetett árnyékoló. Az egyik Young 43502 típusú árnyékolónkat egy napkövető berendezés alkalmazásával folyamatosan árnyékban tartjuk, kiszűrve a direkt napsugárzás melegítő hatását. Egy másik Young 43502 típusú árnyékolót 20 cm-rel alacsonyabban helyeztünk el, mivel a mesterséges szellőztetés által okozott „szívó hatás” miatt az árnyékolóban elhelyezett hőmérő a beszívó felület alatti, vélhetőleg pár cm vastag levegőrétegből beáramló levegő hőmérsékletét méri. A tesztmérésekbe 4 tányéros árnyékolót vontunk be, amelyek közül egy teljesen megegyezik az OMSZ mérőhálózatában alkalmazott árnyékoló berendezéssel. Egy másik tányéros árnyékoló az előzővel megegyező, azzal a különbséggel, hogy a tányérok közötti távolság kisebb, míg a harmadik az OMSZ mérőhálózatában alkalmazott típusnak egy erősen elhasználódott változata. Végül a tányéros árnyékolók között tesztelünk egy kevesebb árnyékoló tányérból összeállított változatot is.

A mérési programba természetesen bevontuk az OMSZ korábbi és jelenlegi mérési gyakorlatában használatos kettős zsáuzású, hagyományos hőmérőházat is.

A hőmérsékletmérések mellett a szélesebbeséget egy Vaisala WAA151 típusú kanalas szélmérővel, míg egy Kipp&Zonen CM3 piranométerrel a globálsugárzást is mértük, melyeken túl a Marczell György Főobszervatóriumban működő automata mérőállomás 15 m magasan lévő szélesebbeség és széliránymérő adatait is bevontuk a vizsgálatba, a korrekciós formula megalkotásához. Az általunk használt árnyékolók jelölését az **1. táblázatban** foglaljuk össze.

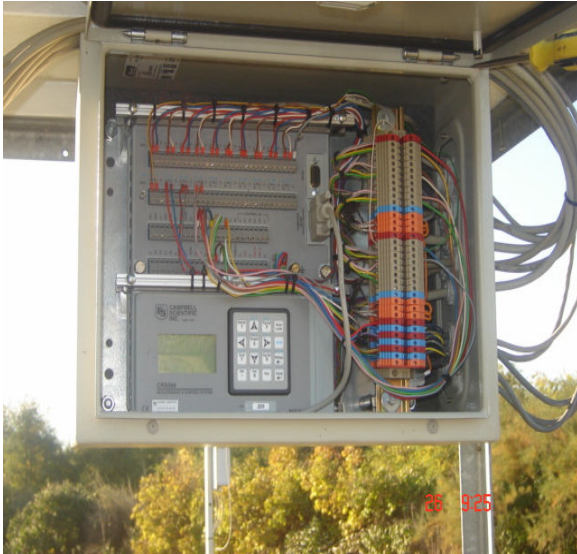
T1	Young 43502 (REF); szellőztetett, árnyékolt
T2	Young 43502; szellőztetett
T3	Young 43508; szellőztetett
T4	Tányéros; OMSZ hálózatában használt
T5	Tányéros; sűrített tányéros (<i>kísérleti</i>)
T6	Young 43502; szellőztetett, 1,8 m magasságban
T7	Használt tányéros; OMSZ hálózatában használttal megegyező
T8	Tányéros; sűrített tányértávolság, kisebb tányérszám (<i>kísérleti</i>)
T9	Hagyományos hőmérőház; OMSZ hálózatában használt

1. táblázat

A tesztelésbe bevont árnyékolók

Adatgyűjtőnk egy Campbell CR5000 típusú adatgyűjtő, (**11. kép, balra**) amely a 10 perces átlagértékek mellett a hőmérsékletmérések esetében a 10 perces szórás, maximum és minimum értékeket is tárolja. Az adatgyűjtő elemi mintavételezése 3 másodpercre lett beállítva.

A hőmérők esetében a teljes mérőrendszer rendszeres kalibrálását egy JOFRA157B típusú termosztáttal végezzük (**11. kép, jobbra**).



11. kép

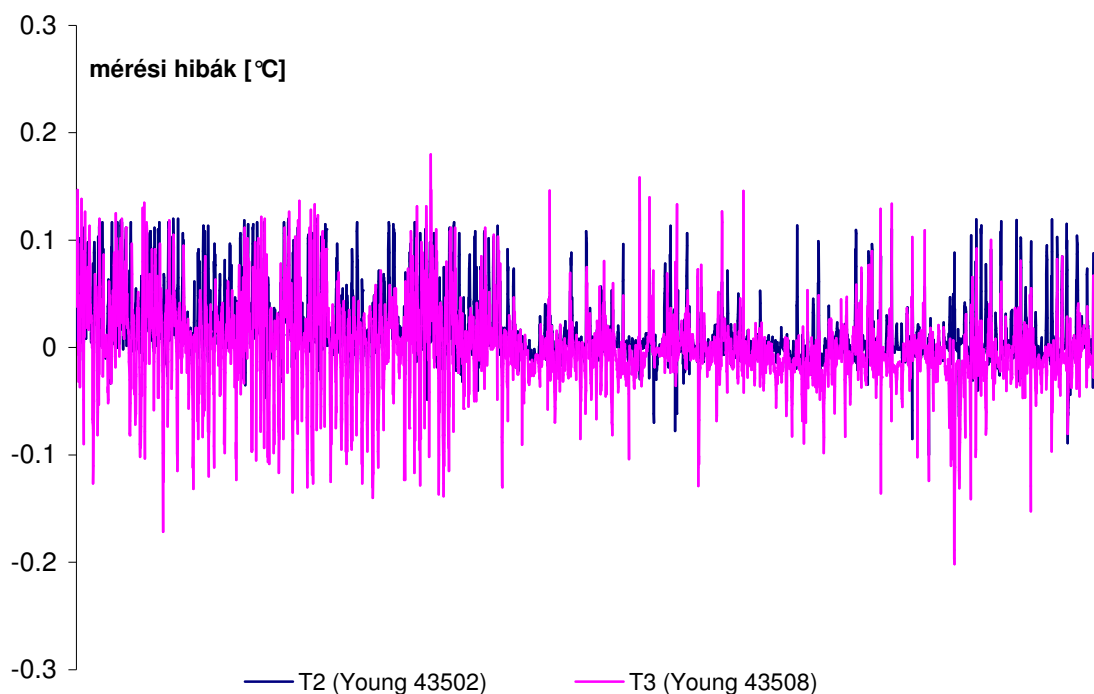
Balra a Campbell CR 5000 adatgyűjtő, jobbra a JOFRA157B típusú termosztát

Referenciánk az árnyékolt, mesterségesen szellőztetett Young-féle árnyékoló volt. Az árnyékolóban a szellőztetést úgy oldották meg, hogy alacsonyabb szintről szívja be a levegőt, mint ahol a szenzor helyezkedik el. Ebből adódóan a referencia eszköz is adhat eltéréseket a valós értéktől. Erre az alacsonyabb szinten elhelyezett ugyanilyen árnyékoló mérte hőmérsékletértékekből számolt nyers gradienssel korrekciózuk a hőmérsékletet 2 m-s szintre. A referenciával történt mérésnél külön odafigyeltünk arra is, hogy víz semmilyen módon ne kerüljön a méréstérbe, se jégcsap ne fagyjon rá.

4. 2. Az árnyékoló hibák forrásai és statisztikai elemzése

Ebben a részben, először a mérési hibák előfordulásáról vázolunk fel egy általános képet. Fontosnak tartjuk a főbb hibacsoportok bemutatását, a hibák kialakulásának az elemzését. A nyári, tavaszi és az őszi időszakot együtt, míg a téli időszakot külön elemezzük, mivel a hótakaró jelenléte, mint plusz reflektált sugárzást generáló tényező a hibákat is megváltoztathatja.

- Az árnyékolt referenciában (T1) és az azzal megegyező típusú árnyékolatlan árnyékolóban (T2) mért hőmérsékletértékek között a különbség szinte minden esetben $0,1\text{ °C}$ -n belül marad, vagyis a mesterségesen szellőztetett árnyékolóknak a direkt sugárzás által okozott hibája minimálisnak tekinthető (3. ábra).
- A referencia (T1) és a másik szellőztetett konstrukció (T3) között a legnagyobb különbség általában $0,1\text{-}0,2\text{ °C}$ között alakult, ami szintén közeli egyezést mutat (3. ábra).



3. ábra

Mesterségesen szellőztetett árnyékolók mérési hibái (T2, T3) (T1 a referencia)

- Másképpen alakul a helyzet a többi árnyékolónál! Az OMSZ operatív célra alkalmazott árnyékolója (T4) jellemzően 0,5 °C-kal a referencia fölé mér erős besugárzásnál és gyenge szélnél.
- A sűrített tányéros változat (T5) szélcsendes időben akár 0,1-0,3 °C-kal közelebb mér a referenciához a standard társánál, azonban gyenge szélben előfordul, épp az ellenkezője is.
- A kopott változatnál (T7) erős besugárzásnál átlagosan 0,1-0,2 °C-kal magasabb értéket mérhetünk, mint az új társánál. Meg kell jegyeznünk, hogy a kopott változatként kezelt tányéros árnyékoló esetében a tányérok kopásának, elszíneződésének a foka jelentős volt, a tányérok felszínének jelentős részét zöldes-szürke alga bevonat fedte. Ez az eredmény pozitívként tekinthető, mivel az OMSZ mérőhálózatában a tányéros árnyékolókban mért léghőmérséklet adatok megbízhatóságát a tányérok öregedése, csak csekély mértékben befolyásolja.
- A T8 kísérleti változatban, ahol a fő eltérés az, hogy kevesebb árnyékoló tányért alkalmaztunk, a mért eltérések általában nagyobbak, mint az OMSZ operatív hálózatában alkalmazott T4-es típusnál, ami jelzi, hogy az árnyékoló belső térfogatának nagysága befolyásoló tényezőként szerepelhet.
- A hagyományos hőmérőházban (T9) erős besugárzás és közepes szélnél akár 1,2 °C-kal magasabb hőmérsékletet mérhetünk, mint a referenciában. Általánosságban 0,5 °C-kal magasabbak az értékek a nappali órákban, de a különbségek meglehetősen szélsőbesség, globálsugárzás, valamint látni fogjuk, hogy napállás és szélirány függőek.

A továbbiakban a mérési hibák lényegi eloszlását mutatjuk be a **2. táblázat** segítségével. Itt a 0,1 °C-os , illetve a 0,5 °C-os hibaküszöböket meghaladó esetek számát vastagon szedett betűkkel, a százalékos arányát dőlt betűkkel tüntettük fel a bemutatott árnyékolókra. Az esetek számával rámutatunk statisztikánk reprezentativitására is.

Az egymást követő tízperces adatok hibáiból készült értékek természetesen nem tekinthetők egymástól minden esetben függetlennek. Összességében mégis jó képet adnak a tipikus mérési hibákról, amit a korrekciós eljárásnál is figyelembe tudunk venni. A küszöbértékek kiválasztását a következőkkel indokoljuk. A 0,1 °C-os mérési hiba, az a hiba, amin belül optimális körülmények között még az ellenállás-hőmérőkkel tudunk mérni. Ennél nagyobb pontosság tartós fenntartása már bizonytalan. Ezért az ennél

nagyobb eltéréseket tulajdonítjuk majd, az árnyékoló okozta hibának. A 0,5 °C-os mérési hiba esetén a hiba leépülése már általában nem következik be a következő tízperces időlépcsőre, ekkor tartósan fennálló hibával van dolgunk.

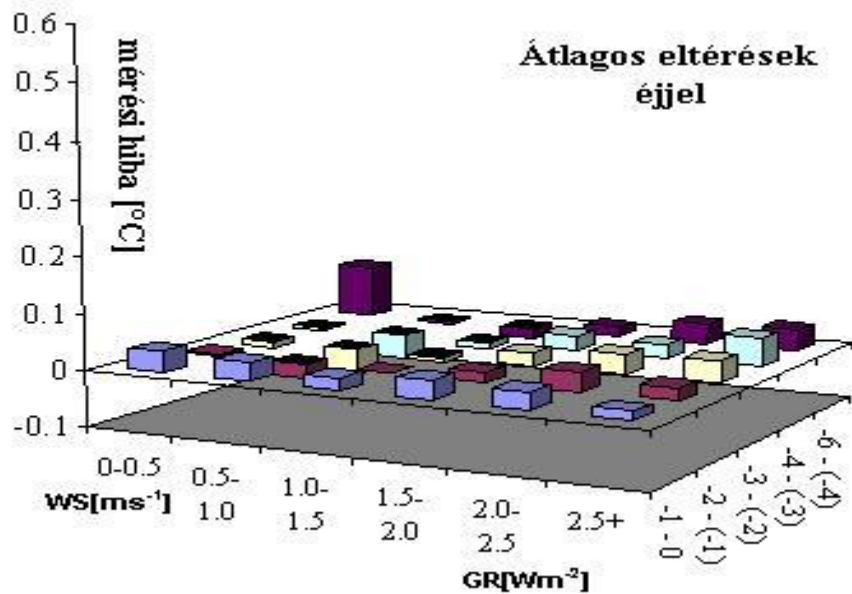
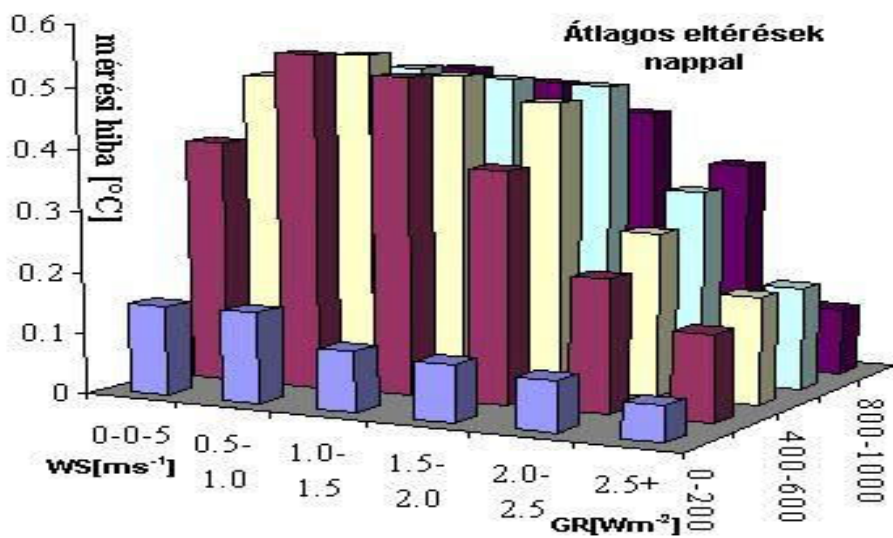
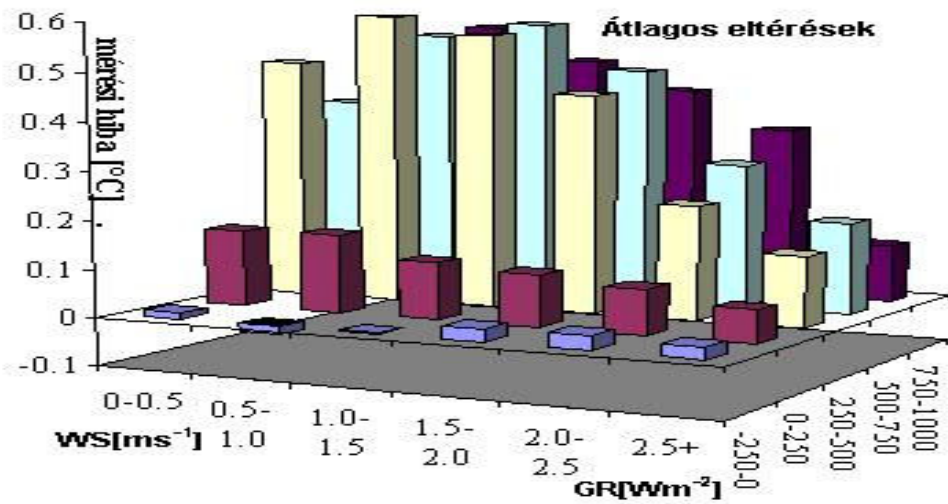
Eltérési hibaküszöbök [°C]	T3	T4	T5	T7	T8	T9
±0,1 °C	2121	7261	6095	7325	7697	12095
	7,3	25,0	21,0	25,2	26,4	41,5
±0,5 °C	14	254	218	446	456	2077
	0,1	0,9	0,8	1,5	1,6	7,1
+0,1 °C	1282	4652	3309	7325	4850	9831
	4,4	15,6	11,4	25,2	16,7	33,8
-0,1 °C	839	2629	2786	5086	2847	2264
	2,9	9,0	9,6	17,5	9,8	7,8
Átlag +0,1°C	0,1	0,24	0,22	0,27	0,27	0,33
Átlag -0,1°C	-0,1	-0,2	-0,19	-0,19	-0,20	-0,20
Alá és fölélmérések aránya	1,5	1,4	1,2	1,4	1,7	4,3

2. táblázat

A hibaküszöbököt meghaladó esetek számát vastag, a százalékos arányt dőlt betűvel szedtük. Vastagon szedve látjuk a 0,1°C-ot meghaladó alá és fölélmérések arányát, illetve az átlagos fölé és aláméréseket, ezen hibaküszöbökön kívül a bemutatott árnyékolókra.

A táblázatból levont következtetéseink az árnyékolók mérési hibáira a következők:

- a T3-al jelölt régebbi típusú mesterségesen szellőztetett árnyékoló mérési hibái kisebbek a többi természetes szellőzésűnél,
- az öregedés hatása az árnyékolókban a fölélmérések számát növeli, ezt bizonyítják T7 értékei,
- a sűrített-tányéros változat (T5) lényegében kisebb mérési hibákat okoz, mint a jelenleg használt változat (T4), az alámérések gyakoriságának növelése árán,
- a kevesebb tányéros változat pontosságban megközelíti, bár el nem éri a jelenleg használt szintjét,
- a hőmérőház (T9) véti a legtöbb mérési hibát minden tekintetben, a fölélmérések egyértelműen dominálnak.



4. ábra

A mérési hibák értékeit láthatjuk a szélesség (WS) és globálsugárzás (GR) feltüntetett csoportjain belül. Felül az egész napszakra, középen a nappali órákra, alul az éjjeli órákra.

A szórások segítségével is megvizsgáltuk az árnyékolók reagálásait a változásokra. Amikor jelentősebb változás (0,1 °C-nál nagyobb) történt a tízperces hőmérséklet-értékekben bármely irányba, a referenciánkban mért értékekre is megnéztük a szórást. A legnagyobb szórások a legnagyobb 10 perces hőmérsékletváltozásokhoz tartoztak. A tányéros árnyékolók jól lekövetik a változást, míg a hőmérőház kevésbé.

A hőmérsékletárnyékolók hibáját befolyásoló főbb tényezők (napsugárzás, szélsébsesség) hatásáról a **4. ábráról** kapunk felvilágosítást.

A folyamatok pontosabb leírásához tekintsük át a mérési hibák napi meneteiben jelentkező, a mérési időszak alapján levonható általános következtetéseket, melyeket először a hómentes tavaszi, nyári, őszi hónapokra vonatkozóan mutatunk be.

- Napfelkelte idején még nincsen mérési hibánk.
- Egy kritikus napmagasság tartományban (6-10 óra CET), hirtelen megugranak a mérési hibák, általában 0,5 °C fölé. Ez az érték, mint az esettanulmányokban látni fogjuk erősen szélirány- és szélsébsességfüggő. A megugrástól számítva 1-2 órán belül beáll a napi maximumhiba. Ennek a mértékében a szélsébsességnek és a széliránynak is fontos szerepe van.
- A szél megélénkülésével és a napállás változásával 10 óra körüli időre ez a mérési hiba jelentősen csökkenni kezd. Délre ez a mérési hiba gyakorlatilag megszűnik.
- A napállás szöge a délutáni órákban eléri a reggeli kritikus értéket. Második maximális hibaértékek alakulnak ki, mivel a megélénkült széllel jobban szellőznek az árnyékolók.
- Napnyugtakor megkezdődik a kisugárzás a talaj felszínéről, ami a hőmérsékleti gradiens átfordulásához vezet. Gyenge fölmérést tapasztalhatunk kezdetben. A referenciaárnyékolón szükségszerűen végzett korrekció után kijelenthetjük, hogy napnyugta után 1 órával már nincs lényeges mérési hiba.
- Az éjjeli órákban lényeges mérési hiba nincs. Nincs besugárzás. A mindig negatív hosszúhullámú sugárzási egyenleg a fő hibaalakító. Napnyugta utáni 2. és napkeltét megelőző 1-2 órában hirtelen alámérés történik. Felhős égbolt esetén elszórtan fölméréseket is tapasztalhatunk. Ilyen esetek pontos ismerete hasznos lehet a lejtőszél, hegy-völgyi hatások tanulmányozásánál.

Téli időszakra vonatkozóan a fentiekhez képest az alábbi sajátosságokat tapasztaltuk:

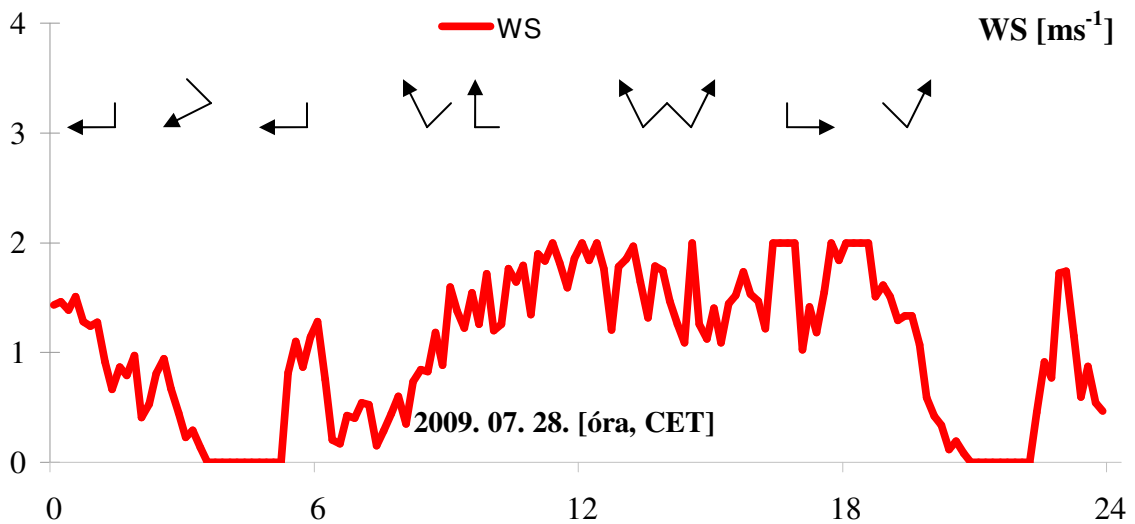
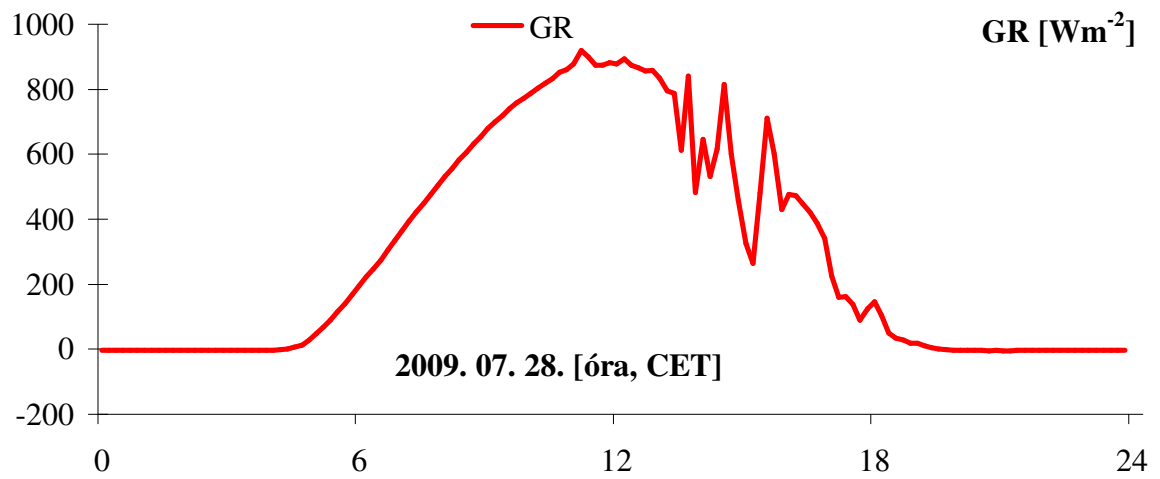
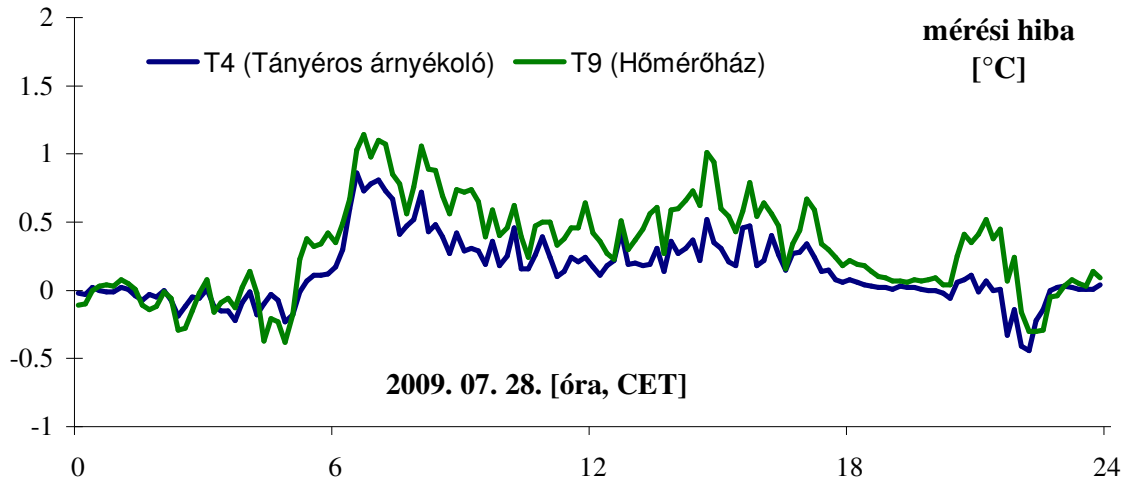
- Télen a napi menet jellege megmarad.
- Hasonló napmagasságnál a hibák növekedése a nyárinál gyorsabban is történhet.
- A maximum hibák nagyobbak lehetnek, mint a többi évszakban. A fő ok a hótakaró sugárzásmódosító hatásában keresendő.
- A hótakaró jelenléte felveti azt a problémát is, hogy az eredetileg 2 m-es magasságon történt mérés a hó-vastagság értékével alacsonyabb szinten történik.

4. 3. Esettanulmányok, az árnyékoló hibáinak időjárási helyzetfüggése

A különböző típusú hőmérsékleti árnyékolók által okozott hibák még pontosabb megértéséhez az általános képen túl célszerű egy-két tipikus eset elemzése is, mivel ezek különböző időjárási helyzetekben fordulnak elő, alapvetően különböznek egymástól a napsugárzás és a szélesebbesség függvényében.

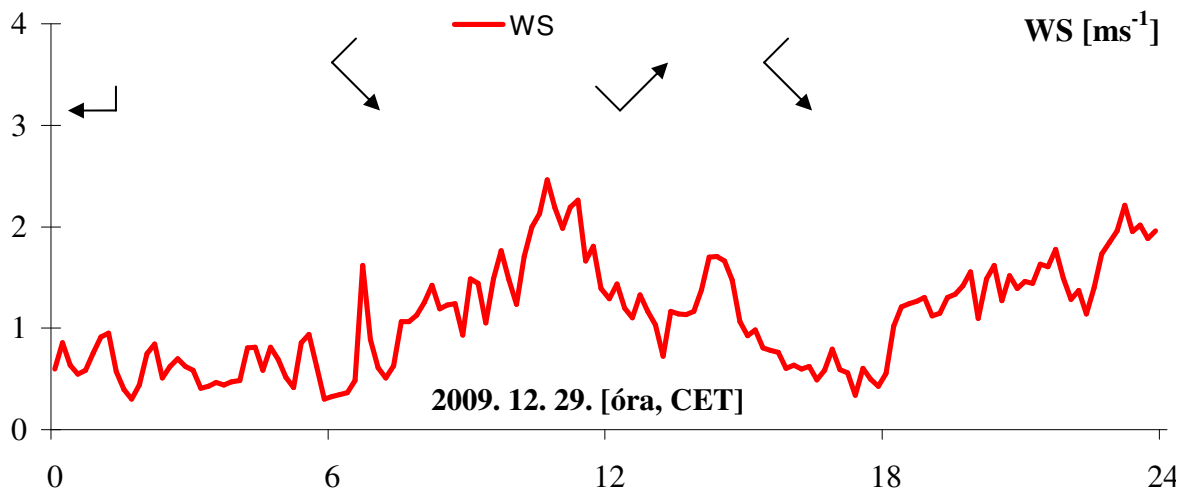
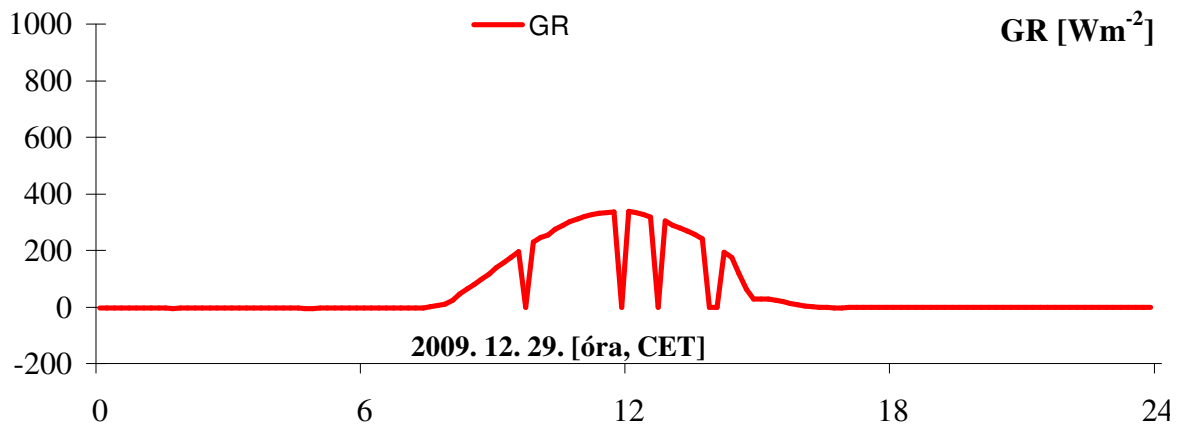
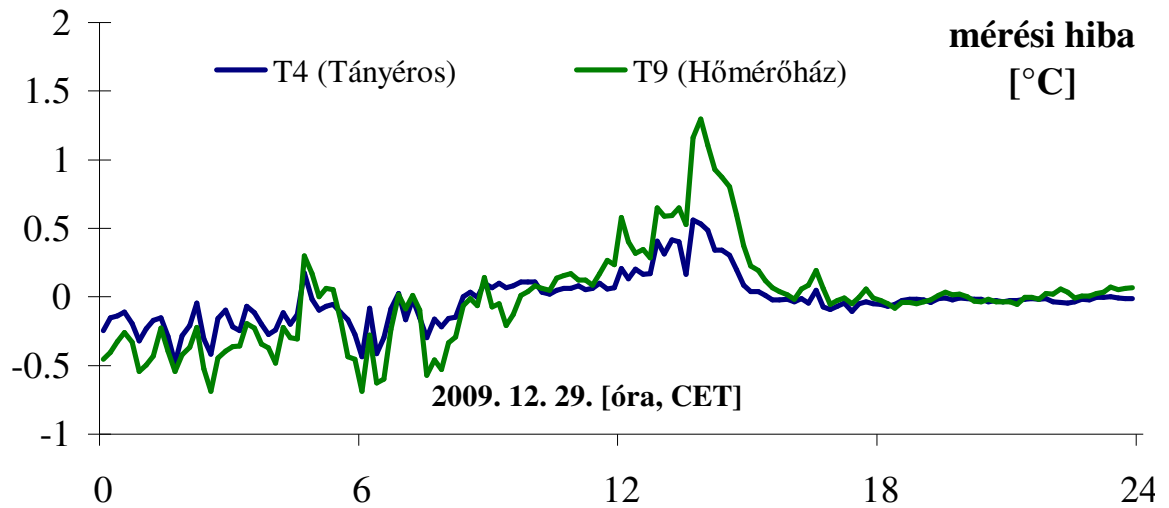
A **5. ábrán** egy tipikus nyári napon láthatjuk a mérési hibák alakulását a hagyományos hőmérőházban és az operatív használatban lévő tányéros árnyékoló esetében, ahol megállapíthatjuk, hogy a léghőmérséklet-mérésekben okozott hiba nem tisztán a globálsugárzás függvénye. A reggeli órákban alacsonyabb napállásnál, kis szélesebbesgnél nagyobb hibák fordulnak elő, mint az azt követő magas napállású késő délelőtti órákban. A szélesebbesség alapvetően csökkenti a mérési hibákat, de az esetünket megvizsgálva reggel 5 és 6 óra közötti időpontokban a hiba gyenge növekedését tapasztalhatjuk a szélesebbesség növekedésével. A hőmérőház és a tányéros árnyékoló mérési hibái között ebben az időszakban lényeges eltérések mutatkoznak.

A délutáni órákban a szélesebbesség növekedése és a globálsugárzás átmeneti csökkenései ellenére a hibák nem csökkennek feltehetően a levegőnek az árnyékoló napsugárzás felőli melegített oldaláról történő bekeveredése következtében. Az éjszakai órákban a hőmérőházban a hőmérsékleti gradiens előjelváltása miatt fölmérési hibáink keletkeznek (inverziós rétegződés). Ezek a hibák, azonban a gradiens visszarendeződésével csökkennek. Az éjjeli órákban átlagosan maximálisan $-0,2$ °C-os mérési hibával van dolgunk. Ilyenkor a hőmérőházban nagyobb hibával mérünk léghőmérsékletet, mint a tányéros árnyékolóban.



5. ábra

A mérési hibák (T4,T9), globálsugárzás (GR), szélesség (WS), szélirány (nyilakkal jelölt) alakulása egy tipikus nyári napon, T1 a referencia hőmérséklet.



6. ábra

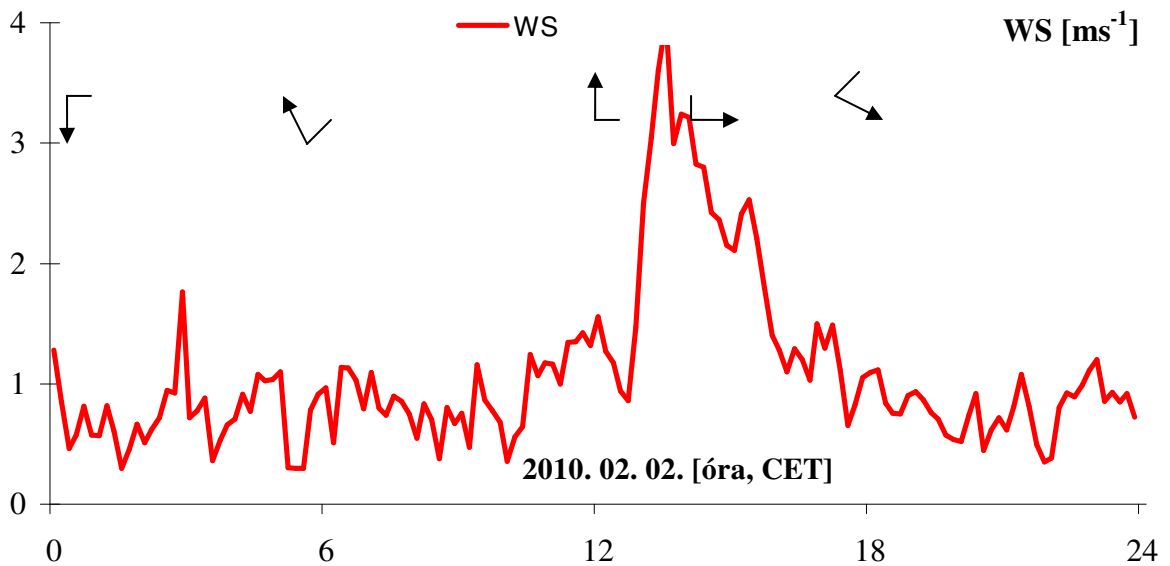
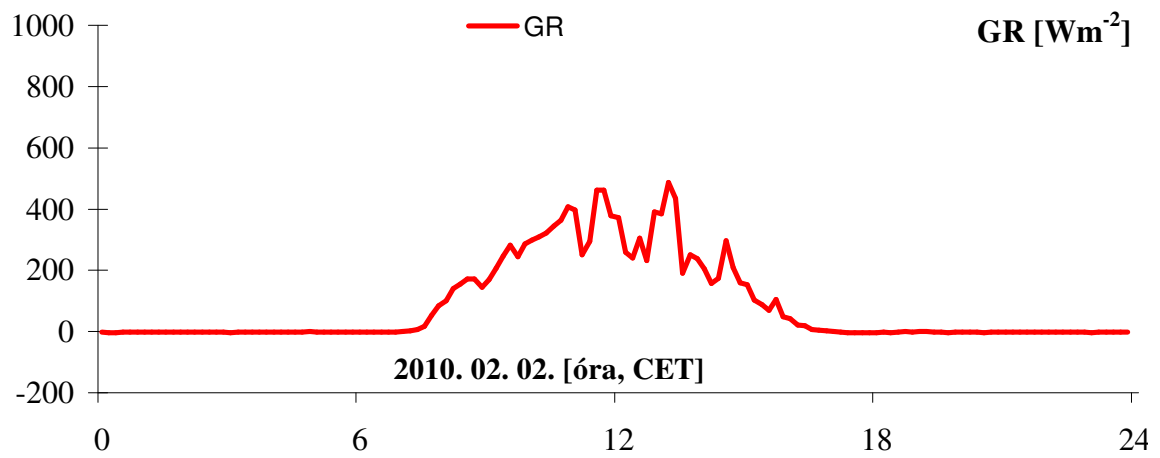
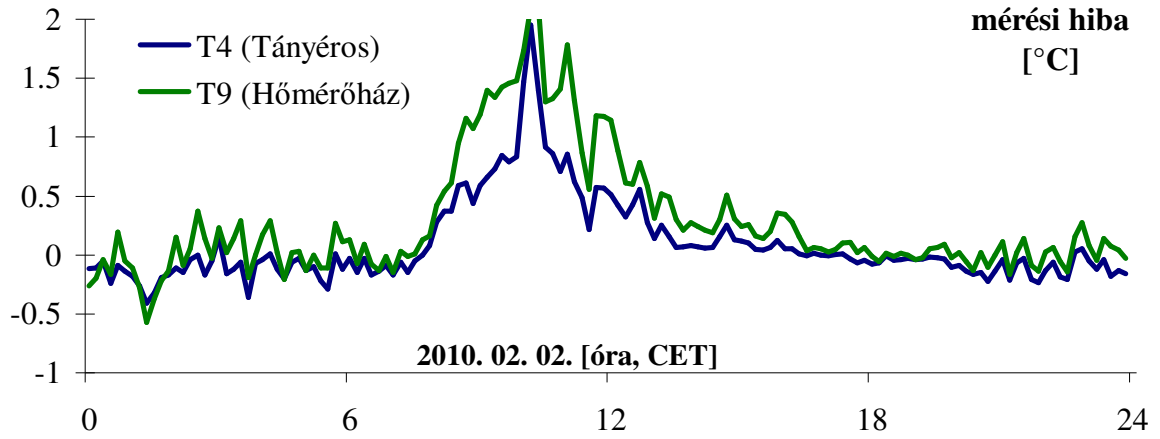
A mérési hibák (T4, T9), globálsugárzás (GR), szélesség (WS) és szélirány (nyilakkal jelölt) alakulása egy hótakarómentes téli napon, T1 a referencia hőmérséklet.

Az **6. ábrán** egy hótakarómentes, téli helyzetet láthatunk. A globálsugárzás nyáritól lényegesen kisebb értékei esetében is előfordulhatnak olyan nagy hibák, mint nyáron erős besugárzás esetén. Ugyancsak levonhatjuk azt a következtetést, hogy a szélirány jelentősen befolyásolja az eltérések nagyságát.

Télen a hótakaró jelenléte nagyban megnöveli a mérési hibákat, erre láthatunk példákat a **7. ábrán**. A nap kezdetén a mérési hibák még kisebbek, azonban a napkelte utáni órákban a hibák gyors ütemben kezdenek növekedni. A maximális hibát 10 órakor (CET) mértük. Ez a hiba körülbelül 1,5 szerese az **5. ábrán** 6 órakor (CET) mért értéknek. Ebben a két időben a nap magassága és a szélviszonyok közel megegyeznek. Egyértelműen megállapítható, hogy a hótakaró csupasz talajnál nagyobb reflektivitása okozta ezeket a különbségeket.

A szél befúvása is jelentősen „rásegített” a 10 órakor (CET) mért napi maximális mérési hiba kialakulására. A hiba tartósan fennmarad, és csak a déli órákban kezd el jelentősen csökkenni a szélsébség jelentős növekedésével. A mérési hibák a napnyugtával lényegében megszűnnek. Alámérést csak az éjjeli órákban vehetünk észre.

A hőmérőház mérési hibái itt is nagyobbak, mint a tányéros árnyékolónak. A lég-befúvásra érzékenyebb a hőmérőház.



7. ábra

A mérési hibák (T4,T9), globálsugárzás (GR), szélesség (WS), szélirány (nyilakkal jelölt) alakulása egy hóborította téli napon.

Láthattuk, hogy az év minden szakában kialakulhatnak mérési hibák. A fenti jellemzések rávilágítottak arra, hogy a hiba kialakításáért felelős főbb meteorológiai elemek – mint a globálsugárzás és a szélesség – esetében, a hiba nem egyértelműen azok abszolút értékeivel arányos. Célszerű ezen tényezők olyan módosított változatát figyelembe venni, melyek pontosabban leírhatják a lég hőmérséklet-árnyékolók okozta hibák nagyságát.

Ezért vezettük be a normált globálsugárzást, illetve a normált szélességet használatát, aminek tárgyalására a következő fejezetben térünk rá.

4. 4. Az árnyékoló hibák számszerűsítése – korrekciós eljárásunk

Az esettanulmányokból és a méréseinkből kitűnt, hogy a hibák pontosabb meghatározásához két új változó bevezetése szükséges. Ezek a normált globálsugárzás és a normált szélesség. A további vizsgálatainkhoz ezek függvényében végezzük el a korrekciós eljárást.

A normált szélesség a hőmérő napsütötte lamelláiról a hőmérőház mérési terébe befűvő átlagos szélesség. Meghatározása a hagyományos hőmérőházra következő:

- a Nap azimutszögének kiszámítása,
- a Nap irányának transzformálása a hőmérőház oldalsíkjainak normálására,
- a szélirány transzformálása a hőmérőház oldalsíkjainak normálására,
- a napsütés által besugárzott oldalsíkokra a Nap és a szélirány transzformált szorzatértékeinek összegzése.

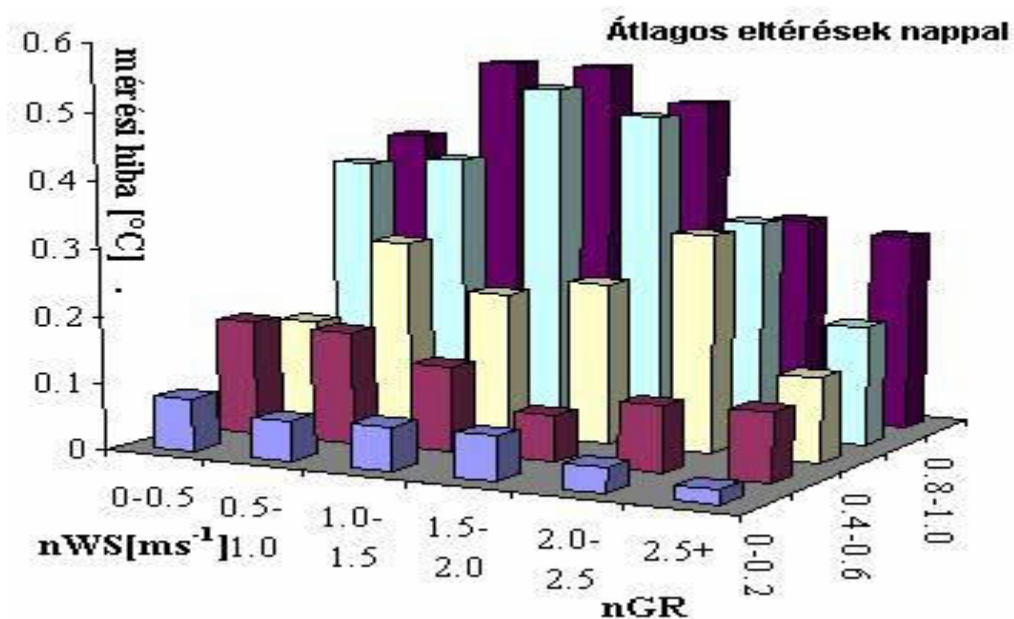
A globálsugárzás jellegzetes napi és évi menettel rendelkezik, s nagymértékben függ a felhőborítottságtól. Az esettanulmányokból láthattunk nagy mérési hibákat kisebb globálsugárzás mellett. Ezért az általunk mért globálsugárzás értékek óras átlagait normáltuk egy harmincéves adatsor alapján meghatározott maximális óras átlagokkal. A normált globálsugárzást gyakran nevezik égbolt tisztasági indexnek (*Erbs et al.*, 1982).

Az esettanulmányokból láthattuk, hogy a talajfelszín borító hóréteg lényegesen befolyásolja a mérési hibákat. Ezért a korrekciós eljárás meghatározásakor és a további elemzések elvégzésekor a havas napokon a mérési hibáinkat 1,5-es konstans értékkel leosztottuk.

Minden napmagasság állásnál kigyűjtöttük a maximális mérési hibákat. Valamennyi árnyékoló típus hibájára elvégeztük a Kolgomorov-Szmirnov tesztet. A teszt alapján nem tekinthetőek a hibák sem normális, sem gamma, sem Weibull, sem pedig

binomiális eloszlásúnak egyik szignifikancia szinten sem (0,01, 0,05 és 0,1). *F-eloszlásúnak* azonban tekinthetők a mérési hibák 0,1 szignifikancia szinten. (Megjegyezzük, hogy a hibák eloszlása a normás eloszláshoz is elég jól hasonlított.) A kétmintás Kolgomorov-Szmirnov teszt alapján a tányéros árnyékolók mérési hibái azonos eloszlásúnak tekinthetők 0,01-s szignifikancia szinten. A hőmérőház hibái azonban ezektől eltérnek. Az árnyékolók empirikus eloszlásfüggvényeit felhasználva megoldható egy megfeleltetés a különböző árnyékolók által mért hibákra. Ezeket mi is megvizsgáltuk a szórásuk maximuma 0,03 körüli értéket mutat, ami számunkra megfelelő pontosságú, tehát alkalmaztuk a hőmérőház és a többi árnyékoló közti megfeleltetésre. A korrekciós eljárás módszerében a fenti tényezőket használtuk fel.

A mérési hibákat, a normált globálsugárzás és a normált szélesség alapján 5 x 6 kategóriákba helyeztük.



8. ábra

A mérési hiba csoportosításának eredményeit a normált globálsugárzás és a normált szélesség függvényében láthatjuk nappali órákban

Az így kapott kategóriákban a léghőmérsékletben jelentkező mérési hibákra mint függő, valamint a normált globálsugárzás és szélesség mint független változókkal regresszió számítást végeztünk, ahol a kapott együtthatókat a **3. táblázatban** láthatjuk.

Az eljárás során a következő megszorításokat alkalmaztuk:

- az esti órákban nem végzünk korrekciót. (**4. ábra** átlagos eltérések éjjel),
- a nappali órákban csak a fölméréseket korrigáljuk,
- maximális hibakorlát alkalmazása a napmagasságnak megfelelően,
- hóborította felszín esetén a mérési hiba értékének szorzása 1,5-vel.

Az együtthatókat az alábbi táblázatban foglaltuk össze:

nGR					
0,39	0,51	0,58	0,35	0,03	0,11
0,44	0,44	0,49	0,70	0,49	0,21
0,34	0,53	0,83	1,00	1,26	0,29
0,48	0,58	0,90	1,23	1,11	0,40
0,40	0,41	0,46	0,25	0,92	0,29

nWS					
0,10	0,01	0,06	0,01	0,02	0,01
0,24	0,06	-0,02	-0,10	-0,35	-0,16
0,06	0,44	-0,15	-0,15	-0,13	-0,04
0,23	0,04	-0,10	-0,23	-0,22	-0,10
0,24	0,21	0,10	0,04	-0,20	-0,22

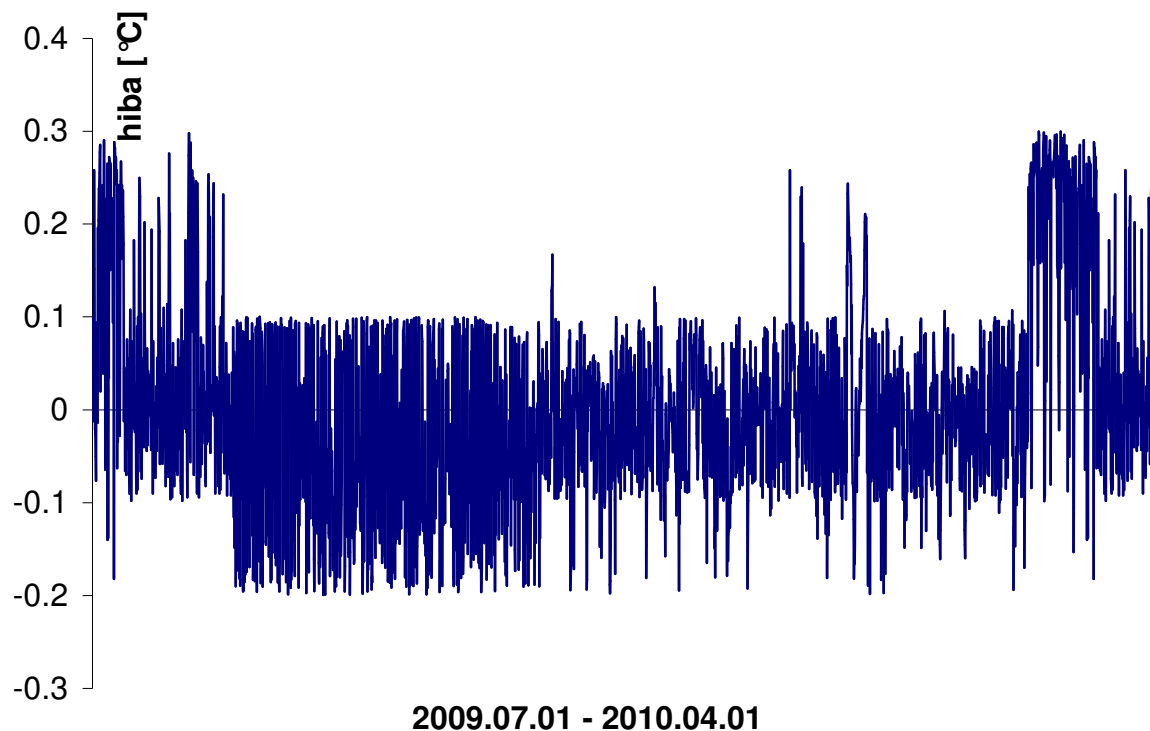
3. táblázat

Eljárásunkban a normált globálsugárzás (nGR) és a normált szélesség (nWS) együtthatói a különböző csoportokra.

Korrekciós eljárásunkat megfelelő mérési körülmények között tartott zománczott ép festési felületű hőmérőházra alkottuk meg. Nem vettük figyelembe a csapadék hűtőhatását, sem a szennyeződések albedó módosítását. Minden más hatás további korrekciózást igényel.

Az eljárás használhatóságának vizsgálatára a hagyományos hőmérőház órás átlagértékeire meghatároztuk a kísérleti mérésünk időszakára számított eltérések hibáit, melyet a **9. ábrán** láthatunk.

A korrekciós eljárás hibáinak a szórása 0,2 körüli. Az eljárásunk szisztematikus hibáktól mentes, a korrekciós hibák átlaga nulla. Magasabb napállásnál némi felülbecslés, hóborítottságnál alulbecslés mutatkozik.



9. ábra

A korrekciós eljárás hibái a budapesti adatsorra

4.5. Korrekciós eljárás alkalmazása Debrecen-Kismacs és Debrecen-Reptér mérőállomáson

Eljárásunk alkalmazására bemutatjuk Debrecen-Kismacs és Debrecen-Reptér állomások 2009. évi hőmérsékleti adatsorának a korrekcióját. Debrecen-Reptér mérőállomás az OMSZ automata mérőhálózatának tagja, ahol a léghőmérsékletet a 2 méteres szinten hagyományos hőmérőházban mérjük, míg az OMSZ alap-éghajlati mérőhálózatának tagjaként működő Debrecen-Kismacs állomáson tányéros árnyékolót használunk. A két mérőállomás elhelyezkedéséből adódóan alkalmas például Debrecen városklímájának tanulmányozására, ahol a módszerünk alkalmazásával a város léghőmérsékletre gyakorolt módosító hatása pontosabban értelmezhető.

Debrecen-Kismacs esetén a 2 méteres léghőmérséklet adatok mellett a 2 méteren mért szélesség adatok is rendelkezésre álltak, míg Debrecen-Reptér esetében a szélesség 10 méteres magasságában mért értékének a 2 méteres szintre történő átszámításához a logaritmikus szélprofil-egyenletet használjuk:

$$u_{10} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z_{10}}{z_0}\right),$$

ahol

u_{10} : 10 m-s (z_{10}) szélesség [ms^{-1}],

u_* : a súrlódási sebesség [ms^{-1}],

z_0 : az érdességi paraméter [m],

κ : von Kármán állandó, 0,41.

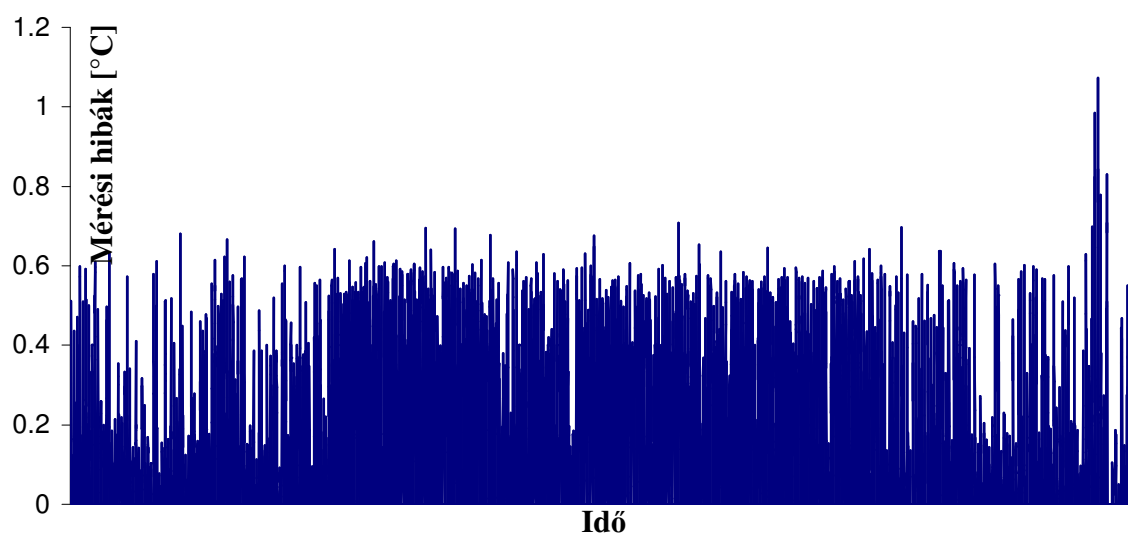
Az érdességi magasság 15 cm-es fűfelszín esetén 3-5 cm-nek vehető. Így logaritmikus profilközelítéssel a következő munkaformulát kapjuk a 2 m-es szint szélességére (u_2):

$$u_2 = 0.7 \cdot u_{10}.$$

A becsült mérési hibákat a **10-a.** és **10-b. ábrán** mutatjuk a teljes egy éves időszakra. Egyértelműen látszik a hagyományos hőmérőház és a tányéros árnyékolók eltérő viselkedése.

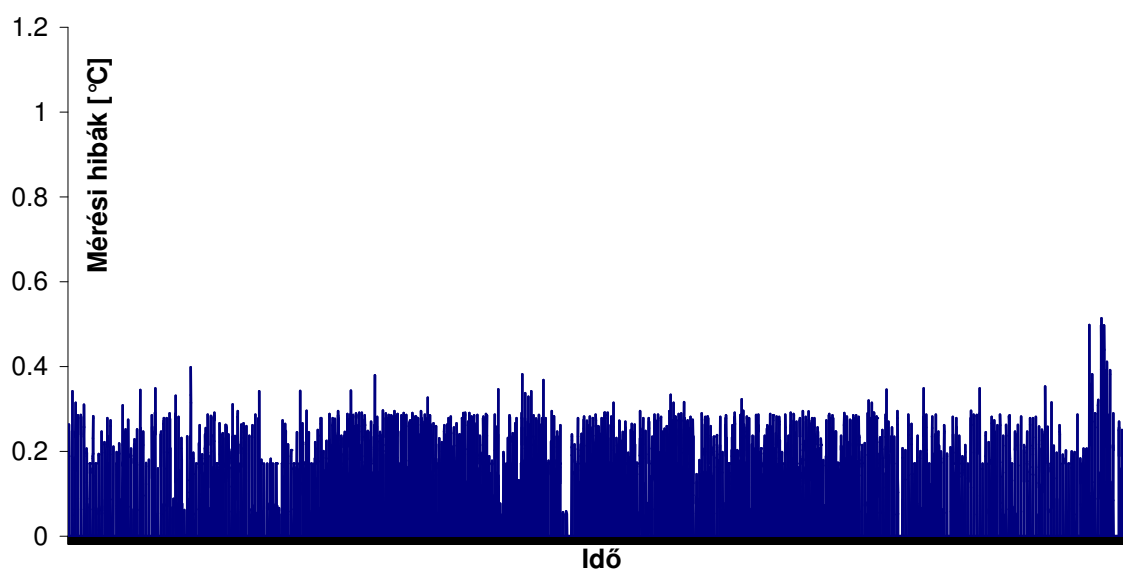
Az ábrák csalókák, hiszen az esetek nagy részében a hiba 0,1 °C alatti. A nagy esetszám miatt a maximális hibák rajzolódnak ki.

A **11. ábrán** a korrekció havi átlagos hőmérsékletre gyakorolt hatását láthatjuk, ahol kitűnik, hogy a nyári időszakban a korrekciós eljárás esetenként 0,2 °C körüli értékkel javítja a léghőmérséklet-mérések összehasonlíthatóságát.



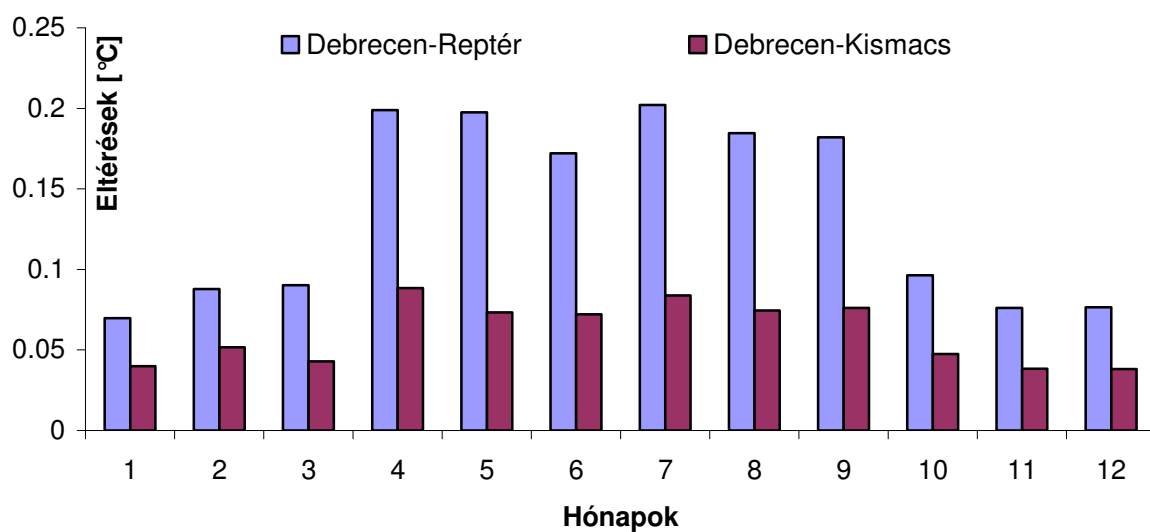
10-a. ábra

A korrekciós eljárás által a léghőmérséklet-mérésekre számított hibák órás átlagai
Debrecen-Reptér mérőállomáson 2009. évben.



10-b. ábra

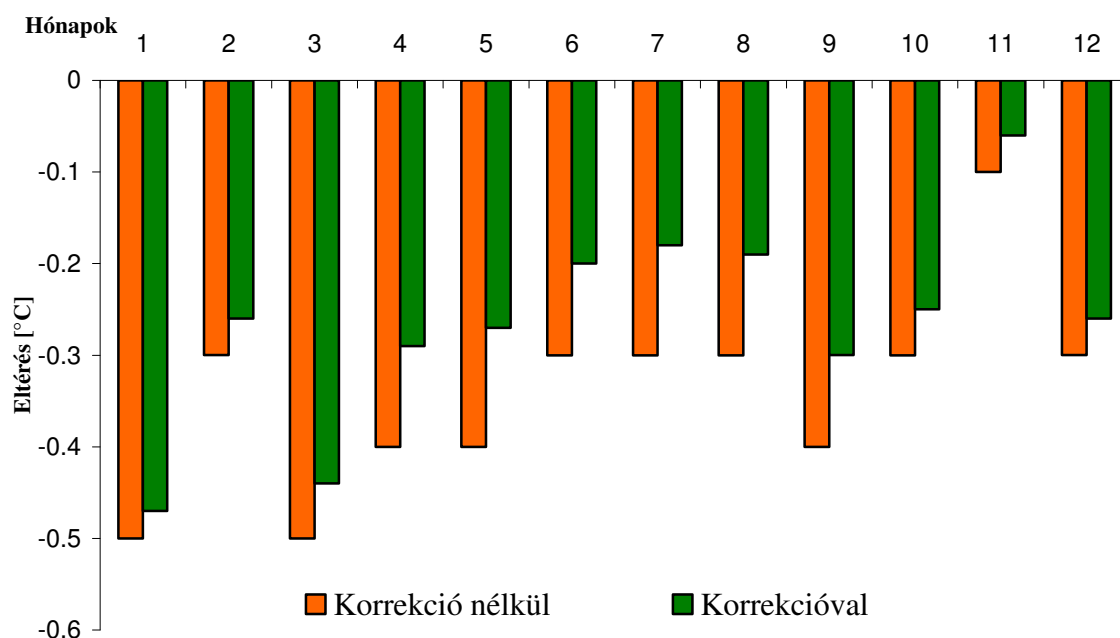
A korrekciós eljárás által a léghőmérséklet-mérésekre számított hibák órás átlagai
Debrecen-Kismacs mérőállomáson 2009. évben



11. ábra

A különböző léghőmérséklet-árnyékolókban mért havi átlaghőmérsékletekben a korrekciós eljárás által számított hiba nagysága 2009. évben

A 12. ábrán a korrekciós eljárás alkalmazása utáni pontosabb képet láthatjuk Debrecen város klímamódosító hatásáról.



12. ábra

Debrecen-Kismacs és Debrecen-Reptér havi átlaghőmérsékleteinek különbségei az alkalmazott árnyékolókra vonatkozó korrekciós eljárással és anélkül 2009. évben

5. Összefoglalás

Dolgozatomban, a különböző árnyékolókban végzett hőmérsékletméréseket elemeztem. Megállapítottam, hogy a különböző árnyékolók eltérő nagyságú hibát okozhatnak a léghőmérséklet-mérésekben, amelyet alapvetően az alkalmazott árnyékoló konstrukciója határoz meg. Ezen túl a napsugárzás és a szélsébség is jelentős mértékben befolyásolja a kialakuló hiba mértékét.

Dolgozatomban áttekintettem az árnyékolók hazai és nemzetközi történetét, fejlesztését. Kitértem a WMO szerepére is. Elemeztem az OMSZ-nál használatos árnyékolók mérési hibáit. A vizsgálatba 9 különböző (ventillált és nem ventillált, tányéros és hagyományos) árnyékolót vontunk be. Kilenc hónapos 10 perces bontású mérési adatsort dolgoztam fel. Részt vettem a mérési program tervezésében, a műszer együttes felépítésében és az adatbázis kiépítésében is. A fő cél az árnyékolók sugárzási tulajdonságai és mérési hibáinak (szél, sugárzás, elöregedés) meghatározására volt. Az árnyékolók okozta mérési hibákat a rendelkezésre álló adatsorok statisztikai elemzésén keresztül tanulmányoztam. Feltárom a tipikus eseteket az időjárási helyzet függvényében.

Az eddigi gyakorlattól eltérően az adatbázis elemzése és a végzett kísérletek során új elemként a szélirányt, mint hibanövelő tényezőt is figyelembevettem.

Az eddig szerzett tapasztalatok alapján a hagyományos hőmérőház mérési hibáira megalkottam a hibák korrekciójának új eljárását egy saját fejlesztésű korrekciós módszert.

Az eljárás elsődleges tesztelése és kiértékelése megtörtént. Megállapításaink szerint az eljárás használható korrekciózásra, csökkenti a sugárzási és a szélsébségből származó hibát, alkalmazható hosszú adatsorok feldolgozásánál is.

6. Irodalomjegyzék

- Anderson, S.P. and Baumgartner, M.F.*, 1998: Radiative Heating Errors in Naturally Ventilated Air Temperature Measurements Made from Buoys. *Journal of American Meteorology Society* **15**, 157-173.
- Barnett, A, Hatton, D.B. and Jones D.W.*, 1998: Recent changes in thermometer screen design and their impact, *WMO* **871**, 1-16.
- Czelnai R.*, 1961: Új, szabványos hőmérőházak, *Légekör*, **6**(1), 14-18
- Czelnai R.*, 1979: Societas Meteorologica Palatina (1780-1795), *Légekör* **24**(3), 1-9.
- Czelnai R.*, 1994: Bevezetés a Meteorológiába III. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Czelnai R.*, 1995: Az Országos Meteorológiai Szolgálat 125 éve. OMSZ, Budapest.
- Dévényi D. és Gulyás O.*, 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Donaldson, J.*, 1888: Account of the Operations of the weather Bureau and List of Stations. Meteorological Branch, Queensland Post and Telegraph Department, General Post Office, Brisbane, 6.
- Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J.A.*, 1982: Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy* **28**(4), 293-302.
- Gallo V.*, 1979: A szarvasi mérésadatgyűjtő üzemeltetésének tapasztalatai. *Beszámolók az OMSZ szakmai tevékenységéről*, 102-110.
- Gorczyński, W.*, 1910: New type of English thermometer screen. *Wiadomości Matematyczne* **XIV**, 203-236.
- Götz G. és Rákóczi F.*, 1981: A dinamikus meteorológia alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Horváth E.*, 2010: Méréstechnika, ÓE-KVK-1161, 6-63; 364-373.
- Incropera, F.P. and Dewitt D.P.*, 1985: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and sons.
- IPCC*, 2007: Assesment report-4. 241-266.
- Kendhall, M.G. and Stuart A.*, 1967: The Advanced Theory of Statistics. **2**. Grifton and Co. limited.

- Konkoly Thege, M.* 1909: Kísérletek a Hómérő felállítások Tökéletesítésére. M. Kir. Országos Meteorológiai és Földmágnességügyi Intézet Kiadványa **8**.
- Köppen, W.*, 1913: Uniform thermometer set-up for meteorological stations for the determination of air temperature and humidity. *Meteorologische Zeitschrift* **30**, 474-488.
- Lajos T.*, 2004: Az áramlástan alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest.
- Laing, J.*, 1977: Maximum summer temperatures recorded in Glashier stands and Stevenson screens. *Meteorology Magazine* **106.**, 220-228.
- Linn. X. and Hubbard K. G., Meyer E. G.*, 2001: Airflow Characteristics of Commonly Used Temperature Radiation Shields, *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, **18.**, 239-339.
- Matyasovszky, I.* 1988: Further results of the analysis of Central England temperature data. *Theoretical and Applied Climatology*, **39.**, 126-136.
- Mawley, E.*, 1897: Shade temperature, *Quarterly Journal Royal Meteorological Society* **23**. 69-87.
- Nagy, Z.*, 2006: Effect of thermometer screens on accuracy of temperature measurements. Instrument and observing methods, IOM No. 94. TECO-2006, WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation. Innovations in Observing Systems and Practices to Meet the Evolving Needs of Members.
- Nagy Z., Weidinger T., Szász G., Baranka Gy., Tóth Z., Nagyné Kovács E. és Törék O.*, 2008: Célzott éghajlati mérőhálózat a globális klímaváltozás magyarországi hatásainak nyomon követésére. IV. Magyar Földrajzi Konferencia, Debreceni Egyetem, 2008. November 14-15, CD.
- Nurmi, P.*, 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts, 1-21.
- Paltridge, G. W., Platt, C. M. R.*, 1976: Radiative processes in meteorology and climatology. *Elsevier*, Amsterdam, Oxford and New York.
- Parker, D.E.*, 1994: Effects of changing exposure of thermometers at land stations, *International Journal of Climatology*, **14**, 1-31.
- Qualey, R.G., Easterling, D.R., Karl, T.R. and Hughes, P.Y.*, 1991: Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network NOAA/NESDIS/National Climatic Data Center – *Bulletin of American Meteorological Society* **72**, 1718-1723.

- Richardson, S.J., Brock, F.W., Semmer, S.R. and Jirak, C., 1999: Minimizing errors associated with multiplate radiation shields. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology* **16**, 1862-1872.
- Slob, W.H., 1978: The accuracy of aspiration thermometers – De Bilt, W.R. **78-1**, 1-31.
- Sparks, W. R., 1970: Current concepts of temperature measurement applicable to synoptic networks. *Meteorological Monographs*, **11**, 33, 1-5.
- Sparks, W. R., 1972: The effects of radiation shield design on the measurements of temperature, *WMO Geneva conference*, 315.
- Szász G. és Nagy Z., 2007: A légköri és a felszíni hatások elkülönítésének lehetőségei a felszínközeli sűrűdési térben. Felhőfizika és mikrometeorológia. A 32. *Meteorológiai Tudományos Napok előadásai*, (Weidinger T. és Geresdi I. (Szerkesztők), Budapest, OMSZ,
- Szepesiné Lőrinc A. (szerkesztő) 1971: Fejezetek a magyar meteorológia történetéből. OMSZ, Budapest, 276–285.
- Warne, J., 1998: A Preliminary Investigation of Temperature Screen Design and Their Impacts on Temperature Measurements – *CIMO, Instrument Test Report No. 649* 1-10.
- Weidinger T., Horváth, L., Nagy Z. and Gyöngyösi A.Z., 2010: Long-term measurements of energy budget and trace gas fluxes between the atmosphere and different types of ecosystems in Hungary. *Advances in environmental fluid mechanics* (Mihailovic, D.T. and Gualtieri C. Editors) Publisher: *World Scientific*, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 185-208.
- Winkler., P., 2009: Revision and necessary correction of the long- term temperature series of Hohenpeissenberg, 1781-2006; *Theor Appl. Climatology* **98.**, 259-268.
- WMO, 2006: Guide to Instruments and Methods of Observations, *WMO No. 8.*, I.1; I.1 21-22; I.2 1-17.

Internetes hivatkozások

http://www.wmo.int/pages/about/milestones_en.html

WMO hivatalos oldala

http://www.wmo.int/pages/about/images/structure_wmo.jpg

A WMO szervezeti ábra helye

<http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/IMOP-home.html>

A CIMO leírásának lelőhelye

<http://www.weatherunder.net>

Árnyékoló-kereskedés

7. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Nagy Zoltánnak és tanszéki konzulensemnek, Dr. Weidinger Tamásnak a szakmai irányításért és a hasznos tanácsokért, észrevételekért. Köszönetemet fejezem ki az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a rendelkezésemre bocsátott adatokért.