

Major György — Nagy Zoltán — Tóth Zoltán

**Magyarországi éghajlat-energetikai
tanulmányok**

9. szám

Budapest, 2002. május

ISBN 963 503 273 0

ISSN 1587-6586

A Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem
Környezettudományi Intézetének tanulmányai

Sorozatszerkesztő:

Kerekes Sándor
és
Kiss Károly

A tanulmány a Magyar Tudományos Akadémia
Magyarország az ezredfordulón c.
stratégiai kutatásainak keretében és
a Környezetvédelmi Minisztérium
anyagi támogatásával készült

Felelős kiadó: Kerekes Sándor igazgató
Olvasószerkesztő: Pósvai Adrienne
Műszaki szerkesztő: Mészöly László
Fedélterv: Éles Andrea
Készült az Aula Kiadó Kft. nyomdájában

Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem
Környezettudományi Intézet
Környezetgazdaságtani és technológiai tanszék
Cím: 1093 Budapest, Fővám tér 8.
Postacím: 1828 Budapest 5. Pf. 489.
Tel./fax: 217-95-88
Internet: <http://korny10.bke.hu>

Előszó

Úgy gondoljuk, hogy sorozatunkban a közgazdasági szemléletű vizsgálatok mellett célszerű, ha néha a folyamatokat a természettudományi oldalról elemző anyagokat is bemutatunk.

E szám két ilyen dolgozatot tartalmaz. Témájuk egymáshoz közel áll: mindkettő a magyarországi természetes éghajlati folyamatok egyes részeihez tartozó energia nagyságát elemzi, az egyikben kevésbé, a másikban szorosabban szerepel a társadalom energiafelhasználásának hatása a természeti folyamatokra.

A Szerkesztők

Tartalom

MAJOR GYÖRGY: MAGYARORSZÁG ÉVES ÉGHAJLATI ENERGIAMÉRLEGE.....	7
1. BEVEZETÉS.....	8
2. BACSÓ NÁNDOR MÓDSZERE ÉS EREDMÉNYEL.....	9
3. AZ ÚJ EREDMÉNYEK.....	12
3.1 A FELSŐ HATÁR	13
3.2 A FELSZÍN.....	15
3.3 A LÉGOSZLOP	22
3.4 A FELSZÍN-LÉGKÖR RENDSZER	30
4. A BIZONYTALANSÁGOK ELEMZÉSE.....	35
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	37
6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	37
7. IRODALOM.....	39
MAJOR GYÖRGY — NAGY ZOLTÁN — TÓTH ZOLTÁN: AZ ENERGIAFELHASZNÁLÁS CSÖKKENÉSÉNEK HATÁSA A FELSZÍN SUGÁRZÁSFORGALMÁRA MAGYARORSZÁGON	41
A SZERZŐK:.....	51
A SOROZAT.....	52

Major György:

Magyarország éves éghajlati energiamérlege

1. Bevezetés

A XIX. század első felében megfogalmazták az energiamegmaradás törvényét és a termodinamika alapvető tételeit. Azóta tudjuk, hogy a Föld egészének éghajlatát és a Föld valamely részének az éghajlatát az energiaátalakulási folyamatok hosszú sorozata alakítja ki. Természetesen azt is azonnal felismerték, hogy a természeti folyamatokat részleteiben és pontosan nem tudják leírni, ezért ez a tudás hosszú időn keresztül csak elvi jelentőséggel bírt. Ma már vannak a folyamatok jó részét leíró globális és regionális éghajlati modellek, de ezek még most sem elég megbízhatóak. Pl. *MacDonald* (2001) véleménye szerint mintegy 30 évre van szükség ahhoz, hogy az éghajlati modellek pontossága megfeleljen a társadalom elvárásának, azaz olyan megbízható válaszokat adjanak az egyes társadalmi cselekvések éghajlati hatását illetően, hogy a megfelelő cselekvési scenárió kiválasztásakor biztonsággal lehessen az általuk adott eredményekre támaszkodni.

Az elmondottak alapján érthető, hogy évszázadokon át az éghajlattal foglalkozó szakmai munkák leíró jellegűek voltak: a megfigyelt jelenségeket és a mért adatokat adták közre némi rendszerezéssel és elemzéssel, így keresve a szerzett ismeretek alkalmazhatóságát. Magyarországon az első éghajlati energiamérleget *Bacsó Nándor* készítette *Magyarország éghajlata* című könyvében (1959). Akkor már volt annyi mért adat az ország területéről, hogy megkísérelhette azokat energetikai rendszerbe foglalni és ily módon bizonyos hiányzó adatokat a többiekéből kiszámítani.

A címben éves éghajlati energiamérleget ígérünk. Az „éves” jelző azt jelenti, hogy a folyamatos természeti folyamatokból egy év hosszúságú szakaszokat ragadunk ki, azokra vonatkozó összegeket és átlagokat vizsgálunk. Egy év a földi élet egyik alapperiódusa, ennyi idő alatt teljesen megkerüljük a Napot, ezért a földi természeti folyamatok elég pontosan éves ciklusokban játszódnak le. Természetesen tudjuk, hogy sem a természetben, sem a társadalomban egyik év nem pontosan olyan, mint a másik, ezért az éves értékekből többéves átlagokat képezünk, hogy azok „éghajlati értékeit” előállítsuk. A Meteorológiai Világszervezet ajánlása szerint 30 évre célszerű az adatokat átlagolni, mert az elég hosszú időszak ahhoz, hogy sok különféle tulajdonságú év előforduljon benne (azaz az évek különbözőségei nagy biztonsággal „kiátlagolódnak” a 30 éves sorban), viszont nem olyan hosszú, hogy az ember számára jelentőséggel bíró éghajlati változásokat a 10 évenként elkészítendő 30 éves

átlagok sorozata ne mutatná meg. (Tehát a 2001-től 2010-ig terjedő időszakban az ajánlott aktuális éghajlati periódus 1971-2000.) A természetre és társadalomra vonatkozóan egyre többféle adatot gyűjtünk, ezért éghajlati vizsgálat készítésekor a 30 évnél rövidebb időszakkal bíró, újabb fajta mérések által adott információról elvben le kellene mondani. Azért, hogy a rendelkezésre álló teljes információt felhasználjuk, néha egyes méréseknél rövidebb időszorból vagy más alapperiódusból származó átlagokat is figyelembe veszünk.

Bacsó Nándor könyvének megjelenése óta a hazai éghajlati művek szerzői nem kerülhették meg az energetikai vizsgálatokat. Ezek a vizsgálatok azonban csak a felszínre korlátozódtak, mert onnan van a legtöbb adatunk és ott játszódnak le az életünk folyamatai, tehát a gyakorlati szempontok ezen korlátozódás mellett szóltak. Miért vállalkozunk most mégis arra, hogy a bolygóközi térség (a Napot beleértve), a légoszlop és Magyarország felszíne (ez utóbbi kettőt a későbbiekben felszín-légkör rendszerként említjük) között lejátszódó energiacsere (amennyire csak lehetséges, annyira) teljes jellemzését megadjuk?

Szándékaink a következők:

- az újabb (pl. műholdról származó) adatok birtokában pontosítsuk és kiegészítsük Bacsó eredményeit,
- itt az ideje, hogy Magyarországra és környékére regionális éghajlati modell készüljön, ezen modell fejlesztéséhez referenciaadatokat szolgáltatassunk az energiaáramok tekintetében,
- a hazai természeti környezet ember által történő befolyásolásának vizsgálatokor a folyamatok energetikájának elemzéséhez szükséges alapadatok jó részét összegyűjtjük.

2. Bacsó Nándor módszere és eredményei

1959-ben a kalória volt az energia törvényes mértékegysége, ezért Bacsó könyvében az adatok $\text{cal cm}^{-2} \text{ év}^{-1}$ mértékegységben szerepelnek. Itt (W/m^2 -be) átszámítva közöljük az ő adatait, így ez az oka annak, hogy a számértékek különböznek az eredeti műben szereplőktől. A mértékegység mutatja, hogy ezek a számok tulajdonképpen teljesítmény áramsűrűséget jelentenek, amelyből az egész ország területére és az egész év tartamára vonatkozó energiaértékek könnyen kiszámíthatók. A rövidség kedvéért a következőkben a „teljesítmény sűrűség” helyett „energiát” fogunk írni, noha tudatában vagyunk, hogy ez így nem szabatos.

Bacsó az energiamérleget két részre bontva kezelte: külön szerepelt a sugárzási energiamérleg (sugárzási egyenleg) és külön a hőmérleg, ezek előjeles összegeként állt elő a teljes energiamérleg.

Az éves energiamérleg elemzését a felszínre jutó napsugárzás vizsgálatával kezdte. Magyarországon az első meteorológiai célú napsugárzásméréseket az 1900-as évszázad első évtizedében végezték. Mérték a Naptól közvetlenül érkező párhuzamos sugárnyaláb (direkt sugárzás) energiáját egyrészt abból a célból, hogy kiszámítsák a légkör felső határára érkező sugárzás erősségét, másrészt azért, hogy különböző helyeken és időpontokban végzett mérésekből következtessenek a helyek és időszakok levegőszennyezettségének eltéréseire. Ezek a (mai nevén pirheliométerrel végzett) mérések nem alkalmasak a felszín éves napsugárzási energiabevételének meghatározására, mert csak derült időben végezhető, csak a mérés időpillanatára érvényesek és nem adnak számot a légoszlopban szóródott és a felszínre jutó napsugárzási energiáról. A felszínre jutó összes (direkt és szórt együtt) napsugárzás (szakszóval globálsugárzás) mérése 1937-ben kezdődött bimetall érzékelőjű, folyamatosan regisztráló műszerrel Tiszaórsön és Budán. Ezek a műszerek meglehetősen pontatlanok voltak, ráadásul a háború következtében a mérések megszakadtak és csak késve folytatódtak. Újabb és pontosabb (termoszlop érzékelőjű) sugárzásmérők léptek üzembe 1954-ben Pestlőrincen, az Országos Meteorológiai Szolgálat (1970 előtt Intézet) obszervatóriumában és 1955-ben Martonvásár-Erdőhátpusztán, az ELTE Meteorológiai Tanszék obszervatóriumában. Ez utóbbi helyen mérték a visszavert napsugárzást is, amelyről *Dobosi Zoltán* (1957) számolt be. Ezen kevés helyen és rövid ideig mért adatokból Bacsó Nándor Magyarország felszínének napsugárzási energiamérlegére a következő értékeket kapta:

beérkező napsugárzás	140 W/m ² ,
visszavert napsugárzás	25 W/m ² (17,7%),
elnyelt napsugárzás:	115 W/m ² .

A felszín sugárzási egyenlegének meghatározásához figyelembe kell venni a saját hőmérsékleti sugárzásból adódó energiamérleget is. A már idézett munkájában Dobosi Zoltán az 1930-as években ismertetett Angström-féle képletet használta erre a célra. A bemenő adatok a felszín hőmérséklete, a levegő páratartalma és a felhőzet mennyisége. Ezekből a felszín kisugárzása (362 W/m²) és a légoszlop visszasugárzása (303 W/m²) közti különbségre (az effektív kisugárzásra) 59 W/m² adódott. Tehát a felszín sugárzási mérlege:

$$115 - 59 = 56 \text{ W/m}^2.$$

Az ország felszíne jelen esetben egy geometriai absztrakció (nincs vastagsága), a sugárzásból így nyert energiát tárolni nem tudja, csak felfelé vagy lefelé átadni, tehát a felszín energia-mérlege minden időpillanatban (így sokéves átlagban is) nulla. A felszín alatti résszel lejátszódó energiacsere (a talajba vagy a talajból történő hővezetés) nyáron és ősszel lefelé irányul, télen és tavasszal felfelé, az éves eredő nagy pontossággal nulla; ha egyes években kismértékben el is tér a nulla értéktől, több év átlagában már biztosan nullának tekinthetjük, ugyanis több év alatt talajunk sem nem melegszik, sem nem hűl. Ez azt jelenti, hogy a felszín által a sugárzási egyenlegről nyert energia a felszíntől felfelé, a légkörbe távozik hőátadás, valamint a víz és hó párologtatása révén. Bacsó megállapítása szerint az éves átlagos párolgás Magyarországon 500 mm, azaz minden négyzetméter felületről 500 liter víz távozik a levegőbe. A víz párologtatásához szükséges energia $39,8 \text{ W/m}^2$, ehhez hozzá kell adnunk a hópárologtatáshoz tartozó részt, amit Bacsó $0,8 \text{ W/m}^2$ -ben határozott meg, azaz látens hő formájában mintegy 41 W/m^2 adódik át a légkörnek. Tehát a felszín a sugárzásból nyert 56 W/m^2 energiát mind a légkörnek adja át, ebből 41 W/m^2 -t párolgás, a többit turbulens és konvektív hőátadás révén.

Az ország feletti légteret úgy kell elképzelni, mint az ország határvonalára emelt képzeletbeli, végtelenbe nyúló, függőleges palást által közrefogott légoszlopot. A képzeletbeli paláston átáramló levegő az ország felett megváltoztatja hőmérsékletét (hőmérsékleti advekción) és vízgőztartalmát (vízgőzadvekción).

Ez utóbbit Bacsó úgy határozta meg, hogy az éves csapadék általa 600 mm -nek vett értékéből kivonta a hazai párolgás 500 mm -es értékét, majd kiszámította a maradék 100 mm víz látens hőjét, ami 8 W/m^2 -nek adódott. Mivel több a hazai csapadék, mint a hazai párolgás (a lehullott többlet vizet a folyók viszik ki az országból), ezért a nedvességadvekción révén az ország 8 W/m^2 energiát nyer.

A hőmérsékleti advekción a következőképpen számította. Az átlagos szélvektor olyan, hogy Mosonmagyaróvárról Szeged felé mutat és mintegy $0,3 \text{ m/s}$ nagyságú. Szegeden a hőmérséklet átlagban $1,5$ fokkal magasabb, mint Magyaróváron. Feltételezte, hogy ez a hőmérsékletkülönbség érvényesül az egész troposzférában, azaz a 250 hPa -os nyomásszintig (mintegy 10 km). Ezen feltételekből kiszámította, hogy a hazai felszíntől a felette átáramló levegő 11 W/m^2 mennyiségű energiát átvesz és kivisz a határainkon kívülre.

Tehát a légoszlop hőmérlege: $56 + 8 - 11 = 53 \text{ W/m}^2$. Az egyensúly fennállása megköveteli, hogy ebben az esetben a légoszlop sugárzási mérlege -53 W/m^2 legyen. Így a teljes felszín-légkör rendszer sugárzási egyenlege ekkor (a két rész egyenlegének algebrai összege, azaz) $56 - 53 = +3 \text{ W/m}^2$ kell legyen. Ez csak úgy állhat fenn, ha a légkör felső határán a napsugárzásból elnyelt energia ennyivel meghaladja a kisugárzással távozó energiát. Ezzel Bacsó Nándor azt az eredményt kapta, hogy Magyarország és a felette lévő légoszlop együttesen energiát nyer a bolygóközi térből sugárzás révén. Ehhez az eredményhez egyetlen műholdas adat nélkül jutott, ráadásul arra sem volt szükség, hogy felső határ sugárzási mérlegének összetevőire valamilyen becsléssel éljen. Az energiamegmaradás törvényéből következik, hogy az ország légköréből távozó energiát az űrből érkező energiának kell pótolnia, az éghajlati egyensúly csak így állhat fenn az alapvető folyamatokban.

Mivel akkoriban már elég jól ismerték a légkör felső határára beérkező napsugárzás értékét és közvetett számítási eredmények voltak a rendszer napsugárzás-visszaverésére és -elnyelésére is, ezért Bacsó ezekre is adott számértékeket. A légoszlop felső határára beérkező napsugárzás értékét Takács Lajos számításából vette át: 307 Wm^2 értékben. Ebből szerinte visszaverődik 37% (114 W/m^2), a légkörben elnyelődik 78 W/m^2 . Mivel az imént meghatározott egyenleg $+3 = 307 - 114 - 190$, azaz a teljes rendszer saját hőmérsékleti kisugárzása 190 W/m^2 kell legyen.

Bacsó maga nevezi merész megállapításnak azt, hogy a felső határ egyenlegére $+3 \text{ W/m}^2$ értéket kapott. Az akkori közvetett számítások szerint a hazánkat tartalmazó földrajzi szélességi övben a felső határ egyenlege negatív. Bacsó szerint hazánk éghajlata ezen az övön belül különösen kedvező az Alpok és a Kárpátok hatása következtében, ezért nem irreális a pozitív sugárzási mérleg. Későbbi mérések igazolták, hogy az említett hegységek övezte medencében, főként annak közepén, a felszínre leérkező napsugárzás értéke nagyobb, mint bárhol másutt Európában ugyanezen a szélességi körön (Major, 1979, Whitlock et al., 1995).

3. Az új eredmények

Új eredmények gyanánt igyekeztünk minden (2002. év elején elérhető) adatot összegyűjteni, átszámítani stb., amely a fentebb megfogalmazott célkitűzéseket szolgálja. Ha az elmúlt négy évtizedben több érték is megjelent ugyanarra az éghajlati elemre vonatkozóan, akkor a több és

pontosabb méréseken alapulókat vesszük figyelembe, de megemlíjük a hazai úttörő munkákat is. Törekedtünk arra, hogy ne csak a számértékeket, hanem azok megbízhatóságát is jelezzük.

3.1 A felső határ

A légkörnek nincs általában értelmezhető felső határa, ezért minden esetben, amikor olyan vizsgálatokra kerül sor, ahol felvetődik a felső határ kérdése, az adott feladat alapján lehet meghatározni, hogy milyen magasság fogadható el felső határként. Olyan esetekben, amikor a bolygóközi térrel folytatott sugárzási energiacsere a vizsgálat tárgya, addig a magasságig kell felmennünk, amely felett már olyan kevés a levegő, hogy annak befolyása az áthaladó sugárzásra jelentéktelen. A Föld-légkör rendszer sugárzási mérlegét mérő mesterséges holdak 1000 km körüli magasságban keringve „minden számbaveendő határon” kívül vannak, hiszen 35 km-es magasság felett a légkör tömegének már csak 1%-a található.

Noha már korábban is végeztek meteorológiai megfigyeléseket műholdakról, éppen ezek sikere alapján, csak 1960. április 1-jén lötték fel az első tisztán meteorológia célú és szolgáltatási rendeltetésű mesterséges holdat. Azóta a meteorológiai előrejelzéseket készítő szakemberek és a nagyközönség tájékoztatása céljából folyamatosan működnek szolgálati meteorológiai műholdak. A Föld-légkör rendszer sugárzási energiamérlegét többnyire kutató műholdakról mérik, ez azt is jelenti, hogy ezen mérések ritkábbak, nem folyamatosak, az adatokhoz csak hosszas és esetleg többszöri feldolgozás után lehet hozzájutni.

A sugárzás-háztartási vizsgálatokat végző műholdas műszerek méréseiből napi értékeket állítanak elő az egész Földet beborító, 2,5 x 2,5 fokos földrajzi rácshálózatra. Magyarország területét és a hálózat hozzá legjobban illeszkedő rácsnégyszögét szemlélteti az 1. ábra. Mindaddig, amíg ez a rácsnégyszög az egész Földre vonatkozó minta egyik eleme volt, addig az országhatárok és a rácsnégyszög eltérése nem játszott szerepet. (Ugyanis abban a vizsgálatban arra volt szükség, hogy a felszínről sok adathoz könnyen hozzá tudjunk férni és jól ismerjük a felszín növényvel borítottságának jellemzőit.) Amikor azonban a Magyarországra vonatkozó adatokat akarjuk előállítani, akkor figyelemmel kell lennünk a két terület eltérésére. Rendelkezésünkre állnak az 1985. február–1990. február időszak (61 hónap) adatai az Earth Radiation Budget Experiment (ERBE, ez egy NASA kísérlet) eredményeiből,

valamint az 1994. március–1995. február közötti egy éves adatsor a ScaRaB (Scanner for Radiation Budget, ez egy francia vezetésű európai) kísérlet eredményeiből.

A Föld valamely pontján a légkör felső határára beérkező napsugárzás értékét a napállandó értékéből viszonylag egyszerűen és nagyon pontosan kiszámíthatjuk, ugyanis a napállandót igen pontosan tudjuk mérni. Értéke $1368 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$. A rácsnégyszög felső határára beérkező éves átlag évről évre kissé változik, mert a naptári évek nem teljesen azonos pályaszakasznak felelnek meg a Nap körüli keringés során és nem is egyforma hosszúak (pl. szökőévek). A rácsnégyszögre vonatkozó éghajlati átlag $301 \pm 1 \text{ W/m}^2$. A visszaverést megadó albedó értéke $36 \pm 1\%$, azaz a visszavert sugárzás $108 \pm 4 \text{ W/m}^2$. Sok éven keresztül foglalkoztam a légkörben elnyelt napsugárzás meghatározásával, ennek alapján a beérkező napsugárzásból elnyelt 26,5%-ot tartom a legvalószínűbbnek, azaz $80 \pm 4 \text{ W/m}^2$ értéket, a becült bizonytalansággal együtt. A kisugárzás $223 \pm 3 \text{ W/m}^2$, így az egyenleg $-30 \pm 3 \text{ W/m}^2$ értékűnek adódik, a mennyiségek és bizonytalanságaik nem függetlenek egymástól. (Ez lényegesen eltér Bacsó számításainak eredményétől.) Évről évre történő változásainak szemléltetésére szolgálnak a következő számok:

ERBE 1986: $-28,7 \text{ W/m}^2$

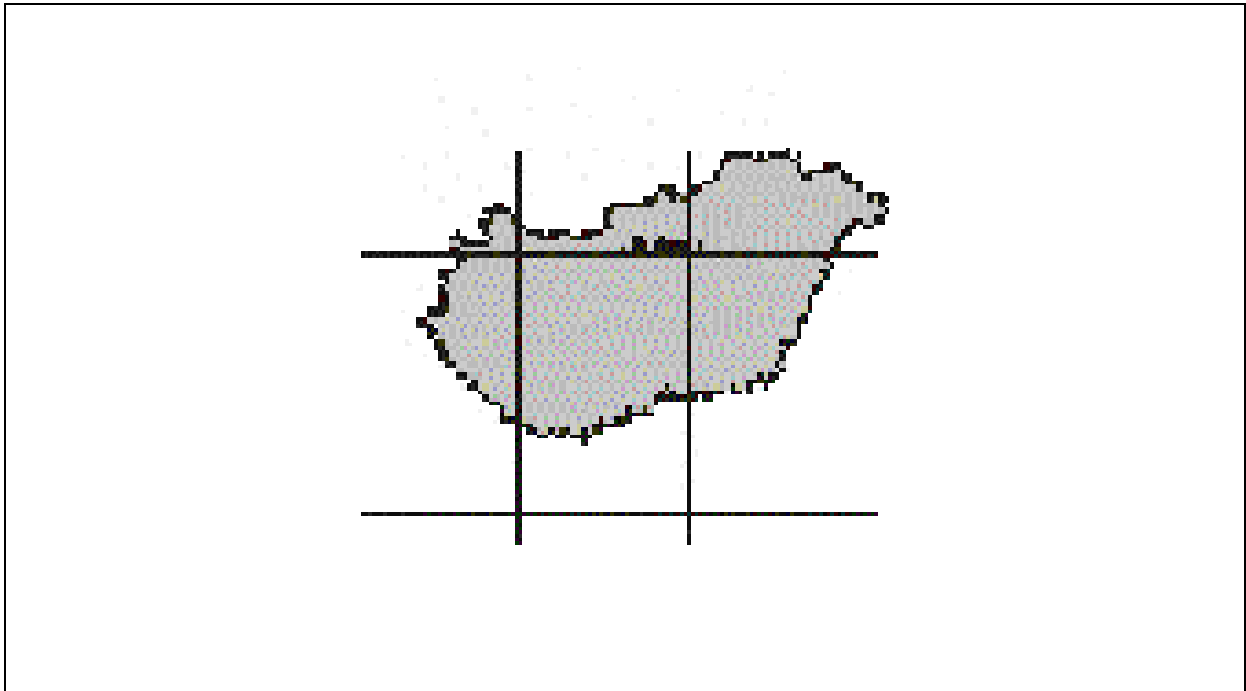
1987: $-28,0 \text{ W/m}^2$

1988: $-30,2 \text{ W/m}^2$

1989: $-33,5 \text{ W/m}^2$

ScaRaB 1994-95: $-28,2 \text{ W/m}^2$

Mivel a további számításokban nem a rácsnégyszög területét, hanem az ország felszínét és a felette lévő légoszlopot vizsgáljuk, ezért az egyenleget és összetevőit korrigáltuk a rácsnégyszögről az ország területére. Ehhez a POLDER (francia vezetésű nemzetközi) kísérlet adatait használtuk fel, amelyek 1996. november - 1997. június időszakra állnak rendelkezésünkre. A POLDER nagy felbontású rácának négyszögei Magyarország térségében fél fok „magasak” (földrajzi szélességben) és mintegy 0,7 fok „szélesek” (földrajzi hosszúságban). Ily módon az ország területére közel 30 POLDER rácsnégyszög, az ERBE rácsnégyszög területére pedig 15 POLDER rácsnégyszög esik. Ez lehetővé teszi a kétféle területre eső átlagos értékek összevetését. Úgy találtuk, hogy az ország egyenlege $2-3 \text{ W/m}^2$ értékkel kisebb, mint az ERBE rácsnégyszögé, tehát -32 W/m^2 értékkel kell számolnunk a továbbiakban. A beérkező napsugárzás 300, a visszavert 107, a légkörben elnyelt 79, a kisugárzás 225 W/m^2 -re módosul.



1. ábra

Magyarország területe és a műholdas adatok rácsnégyszöge.

(A napszél által a rendszerbe behozott és a légkörből a bolygóközi térbe kiszökő molekulák által elvitt energiát nem vesszük figyelembe, mivel a fentebbi értékek mellett elhanyagolhatók. Megjegyezzük, hogy az évtizedenként egy-két alkalommal előforduló extrém mértékű napkitörések idején néhány órára a légkörünkbe belépő napszél energia hozzáadéka 1 W/m^2 nagyságrendű is lehet. Ez megzavarja a Föld körül keringő műholdak elektronikus berendezéseit, továbbá zavart okozhat a felszíni távközlésben és a villamos távvezetékek szabályozó rendszerében.)

3.2 A felszín

A felszínre leérkező napsugárzás (meteorológiai nevén: rövidhullámú sugárzás) első hazai térképét *Dobosi Zoltán és Takács Lajos* (1959) készítette. A globális sugárzás és a napfénytartam közötti kapcsolatot használták fel a területi eloszlás megrajzolására. A Nemzetközi

Geofizikai Év (1957) alatt telepített bimetallos sugárzásmérők hálózatának állomásai közül 13 működött 15 évig, ily módon lehetőség nyílt a napsugárzás közvetlen adatokon alapuló térképezésére (Major, 1976). A térkép alapján a 15 éves országos átlag 141 W/m^2 . Az olajárrobbanás hatására felélénkült napenergia-hasznosítást célzó kutatások egyik eredménye volt a 25 éves adatsorból (ebben az utolsó 10 év már termo-elektromos műszerek méréseiből állt elő) készült térkép (Major, 1985), amelynek alapján az országos átlag 143 W/m^2 -nek adódott. Ugyanez a térkép szerepel Magyarország Nemzeti Atlaszában (Ambrózy-Béll, 1989). Az eddigi egyetlen 30 éves időszak (1951-1980) adatain alapuló napsugárzástérképet Dávid Aranka, Takács Olga és Tiringér Csaba szerkesztette (1990). (Természetesen ők is a napfénytartam-adatokból számított közvetett értékeket használták az 1950-es évekre.) A 30 éves területi átlag 142 W/m^2 . A legtöbb és a legpontosabb felszíni napsugárzásmérésünk az 1980-as és az 1990-es évtizedből van, ezekből még nem készült térkép. A 2002-ben megjelent Magyarország Éghajlati Atlasza (OMSZ) Budapest és Szarvas állomásokra tartalmazza az éves értékeket 1967-1998, illetve 1975-1998 időszakra. Ezek alapján érzékelhetjük az évről évre mutatózó változékonyságot, és korlátozott mértékben a területi eltéréseket is. A legkisebb és legnagyobb érték Budapesten 127 , illetve 147 , Szarvason 147 , illetve 167 W/m^2 . A legújabb térképeket műholdas megfigyelésekből készítette Rimócziné Paál Anikó. A METEOSAT geostacionárius meteorológiai mesterséges hold 1992-1996 között összegyűjtött (5 évnyi) napi több digitális felhőképe alapján határozta meg mintegy 20 km -es felbontással az ország és közvetlen környékének felszíni sugárzási paramétereit azon az alapon, hogy a sugárzási folyamatokat döntően a felhőzet mennyisége és tulajdonságai (mindkettő jól megfogható a digitális képeken) szabják meg. Térképe alapján a globálsugárzás öt éves országos átlaga 140 W/m^2 . Mivel 5 év rövid idő, ezért az 1961-1990 időszak éghajlati értékét közelítette a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek segítségével az év minden hónapjára. A havi értékek átlagolásával kapott, közelített 30 éves évi átlag: 141 W/m^2 . A bemutatott számok alapján érzékelhető a természetes változékonyság és a tudásunk bizonytalansága. Legjellemzőbb értéknek a $142 \pm 1 \text{ W/m}^2$ -t tartjuk.

A felszín által visszavert napsugárzás és a beérkező napsugárzás hányadosa a felszín albedója. Néhány négyzetméter nagyságú felület albedóját lehet mérni, ha a beérkező és a visszavert napsugárzást mérő műszereket néhány méterrel a felület fölött helyezzük el. Nagy térségű felület albedóját nagy magasságból (repülőgép, műhold) lehetne mérni, de ekkor a műszer és a felszín közötti levegőréteg hatását ki kellene küszöbölni, ami újabb mérések elvégzését tenné szükségessé. Ennek alapján érthető, ha nagy területek albedóját úgy határozzák meg,

hogy a területre jellemző rész-felszínek albedójának a részterületek nagyságával súlyozott átlagát állítják elő. Magyarország területének albedóját először *Borhidi és Dobosi* (1967) térképezte jórészt az irodalomból vett jellemző albedóértékek alapján. A mezőgazdasági növények jellemző albedóit saját mérésekből határozta meg *Weingartner Ferenc*, ezekre támaszkodva készítette el az országos térképet (1970). Az ország területét 44 poligonra osztva dolgozott *Dávid, Takács és Tiringner* (1990). Figyelembe vették a poligonok talajtípusait, növényzeti szerkezetét, a hótakaró jellemzőit stb., így a lehető legjobb 30 évi átlagos albedókat állították elő. Eredményeik szerint a sokéves országos évi átlag 19,8%. Az évről évre történő változások szemléltetésére szolgál a következő számsor, amely a műholdas rácsnégyzög naponkénti albedóiból a besugárzás szerint súlyozott éves átlagokat mutatja:

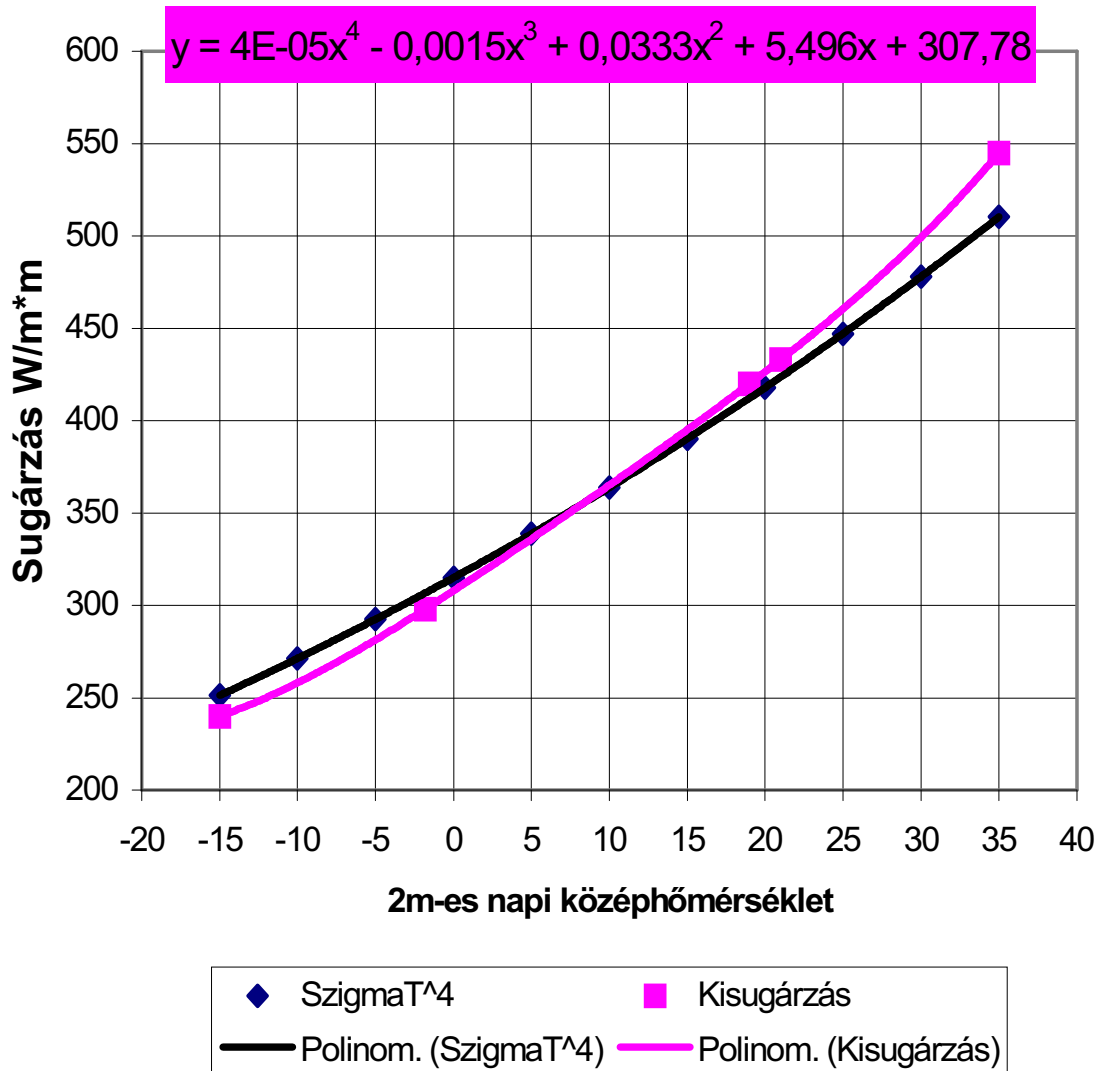
1985: 18%
1986: 22%
1987: 21%
1988: 20%
1989: 19%
1994/1995: 20%.

Úgy gondoljuk, hogy az éghajlati éves országos albedót $19,8 \pm 0,5\%$ -nak vehetjük, azaz a felszín által elnyelt napsugárzás 114 W/m^2 .

A felszín és a légkör saját hőmérsékleti sugárzását (a meteorológiai szóhasználat szerint hosszuhullámú sugárzást) nehezebb mérni, mint a napsugárzást. Ezt jelzi az, hogy míg mintegy 1000 állomás küld napsugárzási adatokat a Meteorológiai Világszervezet Sugárzási Adatközpontjába, addig a sugárzási egyenleg hosszuhullámú komponenseiről mindössze 40 körüli állomás ad számot. Magyarországon 1964 óta folyik éghajlati célú mérés Pestlőrincen, mezőgazdasági növényállományok és erdők sugárzási egyenlegének mind a négy összetevőjét néhány évig vagy néhány vegetációs időszakon át több helyen is mérték. Az 1930-as években egyrészt modell légkörökre érvényes fizikai számítások alapján, másrészt mérésekből statisztikai módszerrel származtattak képleteket a hosszuhullámú összetevők kiszámítása céljára. Éghajlati értékek előállítására ezek a képletek általában elég jók, de ma már valamivel pontosabb számítások is végezhetők. Térképezéskor elkerülhetetlen a számítás alkalmazása, mivel a felszín mozaikos szerkezete miatt a mért kisugárzásértékek csak néhány négyzetméter felületre érvényesek ugyanúgy, mint az albedó esetében. A felszín éves sugárzási egyenle-

gének első hazai térképét *Dobosi Zoltán* készítette 1963-ban napfénytartam-, hőmérséklet-, felhőzet- és nedvességi adatokból. Az 1901-1950 időszakra, szintén közvetett számítás alapján, havi és évi egyenlegtérképet szerkesztettünk (*Major és Tárkányi*, 1969), a felszín-kisugárzást a saját méréseinkből származó empirikus összefüggéssel számoltuk (2. ábra), ez a számítási formulánk a hazai éghajlati viszonyokat „tartalmazza”. Az éves egyenleg országos átlaga 60 W/m^2 -nek adódott. Budapesten az 1965-1973 közötti 9 éves időszak alatt mért sugárzási egyenleg átlagára 52 W/m^2 -t kaptunk, az 1958-1972 időszak országos területi átlagára pedig 54 W/m^2 -t (*Major*, 1976). *Dávid, Takács és Tiringner* (1990) továbbfejlesztve a hazai mérésekre alapozott formula használatot, 6 empirikus összefüggést állított fel az elnyelt napsugárzás és a sugárzási egyenleg között: csupasz talaj, havas talaj, füves felszín, zöld növényvel részben borított felszín, zöld növényvel teljesen borított és elszáradt növényvel borított felszín esetére. Az általuk kapott 30 éves országos átlag 57 W/m^2 , ennél megalapozottabban sokéves országos értéket jelenleg előállítani nem lehet. Műholdas digitális felhőzeti adatokból *Rimócziné Paál Anikó* 1992-1996-ra 66 W/m^2 értéket, 1961-1990-re átszámított értéként 59 W/m^2 -t kapott. A bemutatott számokból érzékelhető, hogy a bizonytalanság nagyobb, mint a napsugárzás esetében. Jellemző éghajlati értéknek $57 \pm 2 \text{ W/m}^2$ -t tekintünk. Ekkor az effektív kisugárzás: $114 - 57 = 57 \text{ W/m}^2$. A kisugárzást a 2. ábrán látható görbével számolva 362 W/m^2 értéket kapunk (Bacsóval egyezik), így a légkör visszasugárzása: $362 - 57 = 305 \text{ W/m}^2$, bizonytalansága $\pm 3 \text{ W/m}^2$.

A felszín kisugárzása



2. ábra

A kisugárzás empirikus görbéje és a Stephan-Boltzmann (σT^4) görbe

A talajhővezetés éghajlati értékéről Bacsó Nándor munkájánál elmondottak érvényesek. Némi kiegészítést azonban tennünk kell. A Föld belsejében lezajló természetes radioaktív folyamatok hőt termelnek, ennek következtében a Föld belsejéből folyamatosan hő áramlik a felszínre. A geotermikus gradiens értéke Magyarországon 5 fok/100 m, másfélszerese a világ átlagának. A kőzetek által a felszínre vezetett hőáram sűrűsége 90 mW/m^2 , jóval meghaladja az európai átlagos 60 mW/m^2 -t. Ezzel magyarázhatók a jó hévizes adottságaink. A kitermelt hévizekkel a felszínre jutó energia 10^{-6} W/m^2 nagyságrendű. A számok *Liebe Pál* (2001) munkájából származnak.

Ugyancsak szólnunk kell a felszínen az országba be- és kifolyó vizek által szállított energiáról. Sokéves átlagban a folyók az országhatáron $114 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ vizet hoznak be egy év alatt (Wisnovszky Iván ábrája 1994-ből). Ha a belépő víz sebessége 1 m/s, akkor ez 1,8 MW, ha 2 m/s, akkor 7,2 MW teljesítményt jelent. Az országos felszíni energiasűrűség mindössze 10^{-5} W/m^2 nagyságrendű. A kilépő víz mennyisége nagyobb, mint a belépőé, mert a nálunk leesett csapadék egy része a folyókkal távozik el az ország területéről. A kifolyó víz sebessége valamivel kisebb, mint a belépőé, ezért a tömegnövekedés ellenére nem megy ki több energia, mint amennyi bejön. Nálunk a folyók esése általában kicsi, a kifolyás csak kevéssel van alacsonyabb tengerszint feletti magasságon, mint a befolyás. A potenciális energia csökkenése súrlódásra fordítódik, így elvben befolyásolja a felszín hőmérsékletét és ezen keresztül a légkörrel folytatott energiacserét, de ez benne foglaltatik az effektív kisugárzásban és a légkörnek átadott hőben. Ősszel és télen a befolyó víz általában magasabb hőmérsékletű, mint az itteni környezet, tavasszal és nyáron pedig hidegebb. Ez a hőforgalom éves összegben nagyjából kinullázódik.

A felszín által a sugárzásból nyert energiát a levegő veszi át, mivel láttuk, hogy mind a talaj hőforgalma, mind a folyók energiaforgalma sokéves átlagban kinullázódik. A felszín a levegőnek párolgással, turbulens kicserélődéssel (az áramló levegő a felszíntől, illetve a felszínhez a hőmérséklet-különbség és a sebességkülönbség révén hőt visz) és konvekcióval (a felszín felmelegíti a vele érintkező levegőt és a meleg levegő feláramlásával visz el hőt) adja át a sugárzásból nyert energiát.

Az országos területi párolgás meghatározása nehéz feladat. Bacsó után a következő éghajlati országos értéket *Péczely György* határozta meg 550 mm-ben (1981). Sok mérés alapján, igen részletes területi vizsgálatra alapozva a területi párolgás éghajlati értékére 500 mm-t kapott

Zárbok Zsolt (1984). Ez az érték jelent meg a Nemzeti Atlaszban is. Az újabb egyetemi jegyzetekben szereplő értékek sem egységesek. Justyák János (1998) térképe alapján 470 mm-t, a táblázatában szereplő 7 állomás átlagaként 570 mm értéket kapunk. Varga Haszonits Zoltán és munkatársai (2000) az országban többé-kevésbé egyenletesen eloszló 19 állomásra adnak meg havi tényleges párolgásértékeket az 1951-1990 időszakra, az ezekből kapott országos éves átlag mindössze 370 mm. Ezek alapján a keresett értéket 500 ± 30 mm értéknek tekintjük, azaz 40 W/m^2 -re van szükség az elpárologtatásához.

Az előbbieket szerint az 57 W/m^2 sugárzási nyereségből elvisz 40 W/m^2 -t a párolgás, tehát turbulens és konvektív hőátadásra marad 17 W/m^2 . Erre a két utóbbi hőátadásra nem találtunk közvetlenebb számítást, így együttes értéküket maradéktagként kell elfogadnunk.

1. táblázat

*A felszín energiamérlegének áttekintése (a mértékegység W/m^2):
A satírozott területeken részértékek szerepelnek, közvetlenül alattuk az összegük jelenik meg.*

Beérkező napsugárzás	142
Visszavert napsugárzás	- 28
Elnyelt napsugárzás	114
Kisugárzás	-362
Visszasugárzás	305
Effektív kisugárzás	- 57
Sugárzási mérleg	57
Geotermikus gradiens hő	0, 09
Hévizetek	~ 0,000005
Folyóvizek szállította energia mérlege	~0
Párolgás	- 40
Turbulens és konvektív hőátadás	- 17
Hőmérleg	- 57
Energiamérleg	0

3.3 A légoszlop

Az ország felett a légkörben elnyelt napsugárzásra 79 W/m^2 -t kaptunk, amikor a felső határra beérkező napsugárzást tárgyaltuk. A légkör a felszín felé 305 W/m^2 -t sugároz „vissza”, amint a felszín sugárzásmérlegénél láttuk. A felszín kisugárzására 362 W/m^2 -t kaptunk, ez belép a légkörbe az alsó határán. A felső határán kilépő hosszuhullámú sugárzást a műholdas adatokból 225 W/m^2 -nek határoztuk meg, így a hazai légoszlop sugárzási mérlege:

$$79 - 305 + 362 - 225 = -89 \text{ W/m}^2.$$

A légoszlop hőmérlegének vizsgálatát a felszíni folyamatokkal kezdjük. A felszíntől párolgással kap a légkör 40 W/m^2 -t, turbulens és konvektív hőként pedig 17 W/m^2 -t. Az ország lakossága által felhasznált energia a termodinamika szerint előbb vagy utóbb, de mindenképpen hővé válik. Ennek döntő része közvetlenül a légkörbe jut, így azt egészében itt vesszük számba antropogén hő néven. Az 1990 előtti tíz évben az ország éves energiafelhasználása meghaladta az $1\,200\,000 \text{ TJ}$ -t ($1 \text{ TJ} = 1 \text{ teraJoule} = 10^{12} \text{ Joule}$), ez a rendszerváltással járó iparszerkezet-átalakulás hatására $1\,000\,000 \text{ TJ}$ körülire csökkenve stabilizálódott. Ezeket az értékeket elosztva az ország m^2 -ben mért területével és az évben lévő másodpercek számával, megkapjuk a többi értékünkhöz hasonlítható teljesítménysűrűséget, ami kerekítve mindkét időszakra $0,4 \text{ W/m}^2$ -nek adódik. Látható, hogy a természeti folyamatokhoz képest ez jelentéktelen. Sűrűn lakott területeken a hőfelszabadulás sokkal nagyobb, pl. Budapestre és a 43 helyséből álló agglomerációs övezetére vonatkozó átlag már 4, magára Budapestre pedig 10 W/m^2 [Mészáros, Major és Horváth (1984), itt akkori világszámok is találhatóak].

A levegő vízszintes áramlásához kapcsolódó vizsgálatot azzal kezdjük, hogy sokéves átlagban nyilvánvalóan annyi levegő megy ki az ország fölötti térből, amennyi bejön, hiszen a légnyomás sokéves átlagban nem változik. Az Éghajlati Atlaszban szereplő 30 éves havi átlagokból kiszámítva az éghajlati érték 1017 hPa -nak tekinthető. Ezen érték körül szokásos évi járás olyan, hogy két minimuma (április és november) és két maximuma (január és október) van. Ez azt jelenti, hogy áprilistól októberig egyre nagyobb tömegű az ország feletti légoszlop, a tömegnövekedés a nehézségi erőből adódó potenciális energia növekedését is jelenti. Az áprilisi átlagos légnyomás 1013 , az októberi pedig 1020 hPa , ez fél év alatt $5,8 \text{ MJ/m}^2$ potenciális energianövekedést jelent, teljesítményben pedig mindössze $0,37 \text{ W/m}^2$ -t. Az időjárás-változással kapcsolatos légnyomásváltozás teljesítménye már jóval nagyobb. Szélsőséges esetben az évszakos 7 hPa változás egy nap alatt is lejátszódhat, ekkor a

teljesítménysűrűség már 67 W/m^2 . Mind az évszakos, mind a rövidebb időszakos légnyomás-ingadozások hosszabb távon kiegyenlítik egymást, tehát a légoszlop potenciális energiája hol nő, hol csökken, ennek megfelelően a légáramlás energiája csökken, illetve növekszik.

Az ország felett átáramló levegő legalsó rétege a felszínhez sűrűlódik, a felszín feletti légrétegek pedig egymáshoz sűrűlődnak, ezáltal mind a felszín, mind a légkör melegszik (a mozgási energia egy része diszzipálódik), ennek hatása benne van a felszín és a légkör közötti, már tárgyalt hőcserében. Az átáramló levegő mozgási energiájának egy részét szélerőművekkel próbáljuk kivenni a légáramlásból. Magyarországon két szélerőművet telepítettek az utóbbi években: Inotán egy 250 kW , Kulcsón egy 600 kW névleges teljesítményűt (ekkora elektromos teljesítményt 10 m/s -ot meghaladó szélességnél adnak le). A kisebbik 693 (Kajor és Kovács, 2001), a nagyobbik 1521 m^2 (Tóth László és munkatársai, 2001) nagyságú felületet fordít szembe a széllel, azaz a lapátjaik ekkora területet súrolnak. 1 m^2 felületen átáramló szélteljesítmény $= 1/2 * s * v^3$, ahol „s” a levegő sűrűsége, „v” a szél sebessége. A köbös függés miatt az átlagos szélteljesítményt nem lehet az átlagos sebességből kiszámítani, hanem a szélesség gyakorisági eloszlását is ismerni kell. Az Éghajlati Atlasz adatait véve alapul (a meteorológiai állomásokon a szélmérők 10 m magasságba vannak a talaj felett), Budapesten az éves átlagos szélteljesítmény 50 , Kékestetőn pedig 100 W/m^2 . (A mértékegységben szereplő m^2 felület a szélre merőlegesen álló „munkafelületet” jelenti.) A sűrűlődés miatt a szél sebessége a talaj közelében igen gyorsan nő a magassággal, Radics Kornélia számításai szerint (megjelent az Éghajlati Atlaszban) 18 m magasságban 100 (ez megegyezik a kékestetői értékkel), 50 m magasságban (nagyjából itt van a szélmotorok tengelye) pedig már 150 W/m^2 az éves átlagos szélteljesítmény. Ha az egész országot a lehetséges sűrűségben teleraknánk szélmotorokkal (ezzel a természetes diszzipációt növelnénk meg), akkor az egy erőművet körülvevő vízszintes területnek legalább tízszeresnek kell lenni a szélkerék lapátjai által súrolt felülethez képest (nemcsak azért, hogy a szélkerekek ne akadhasanak össze, hanem azért, hogy a szélmező függőleges kicserélődés révén „kisimulhasson”), tehát a használható felületi teljesítménysűrűség a 15 W/m^2 -t nem haladja meg az országban. A teljes légoszlop (mondjuk 30 km magas) igen nagy mozgási energiája átáramlik felettünk (lásd 3. táblázat), anélkül, hogy hasznosíthatnánk, de talán ez így jobb is, ha kevésbé zavarjuk a természetet.

A természetes energiaforgalom alakítja időjárásunkat és éghajlatunkat. A energiaforgalomban a légoszlopnak nemcsak a potenciális és a mozgási energiája változik meg, hanem az ország

felett megváltozik a hőmérséklete és nedvességtartalma (hőmérsékleti és nedvességadvekciónak) is. Mivel a kozmikus térrel az energiacserénk veszteséges, ezt a veszteséget a beáramló levegőnek kell kiegyenlíteni. A nedvességadvekciónak könnyen számíthatjuk úgy, ahogy Bacsó is tette, mert a bejövő levegőből itt képződik a csapadék döntő része, tehát a csapadék és párolgás különbsége az, ami energiában a hazai légtér nyeresége (ez közvetett számítás). Láttuk, hogy a párolgás országos éghajlati éves értéke 500 mm (elégképpen bizonytalan érték), tehát meg kell néznünk, hogy mennyi a csapadék.

Péczely (1981) szerint 620 mm, a Nemzeti Atlasz szerint 600 mm, az Éghajlati Atlasz szerint „kevésbé 600 mm felett” van, *Justyák* (1998) szerint 590 mm, *Varga Haszonits és munkatársai* (2000) szerint 580 mm, tehát itt jóval egyöntetűbbek az adatok, mint a párolgás esetében. Jellemzőnek 600 ± 5 mm-t vehetünk. Tehát a csapadék és párolgás különbségének 100 ± 30 mm-t kell vennünk, itt a bizonytalanság értéke egyezik magának a párolgásnak a bizonytalanságával, mert a csapadék hibája a kerekítésen belüli értékkel növeli a párolgásé (a hibák négyzetei adódnak össze). Ez azt jelenti, hogy a nedvességadvekciónak 8 ± 3 W/m².

Emlékezzünk, hogy Bacsó Nándor a hőmérsékleti advekciónak a felszíni hőmérséklet- és széladatokból számolta, feltételezve, hogy azok érvényesek 10 km magasságig. Valójában a hőmérsékleti advekciónak különböző magasságokban más és más lehet, tehát elegendően sok magassági (azaz légnyomás) szintre ki kell számolnunk az értékét, majd az egész légoszlopra összegezni a hozott vagy elvitt energiát. Valamely szinten a hőmérsékleti advekciónak számítása elvben egyszerű: az ott érvényes szélvektor és hőmérsékleti gradiens-vektor skaláris szorzata adja a keresett mennyiséget. Ehhez az országra és környékére szélmező és hőmérsékleti mező digitális térképeire van szükség számos nyomásszinten és naponta legalább kétszer. Ilyen adatbázis Magyarországon csak a legutóbbi mintegy 3 évre van, ezért vagy közelítést alkalmazunk, vagy nemzetközi adatbázishoz fordulunk.

2. táblázat
Az évi átlagos szélenergia profil Magyarország felett

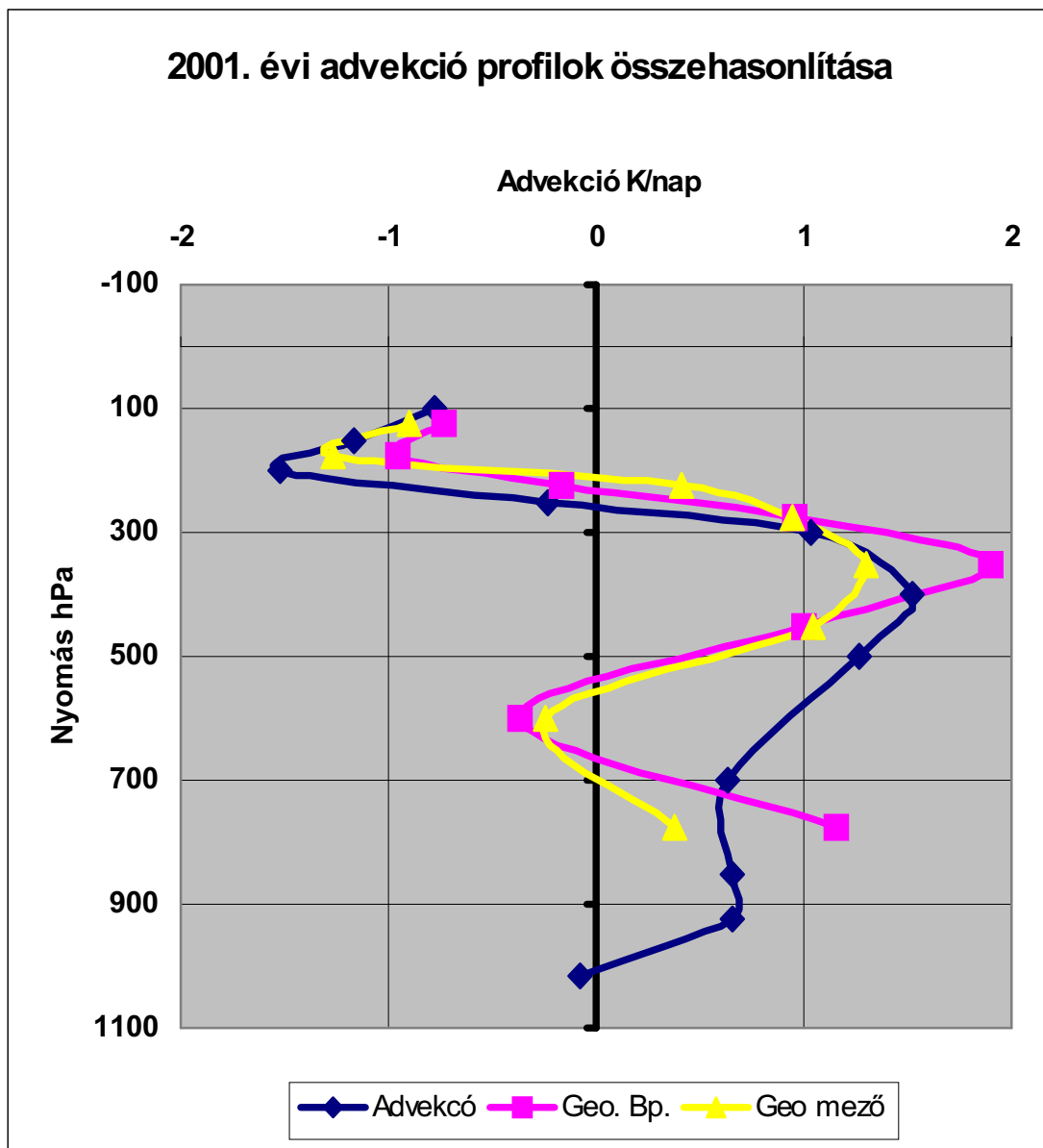
Magasság	Évi átlagos szélsebesség m/s	Az átlagos szél energiája kW/m ²	Tényleges szélenergia kW/m ²
10 m	2,7	0,012	0,05
18 m	3,7		0,1
50 m			0,15
1km	18	3,4	
10 km	30	5,4	
20 km	16	0,20	
30 km	40	0,64	
A légoszlop összes szélenergiája		70 MW/m	~100 MW/m

Az adatok az Éghajlati Atlaszból származnak, amelyben a magassági szélnek csak az átlagértéke szerepel, a gyakorisági eloszlása nem, ezért az átlagos szélből számolt energia alapján becsültük a tényleges szélenergiát. A felszínen az átlagos szél energiája mintegy negyede a ténylegesnek, nagyobb magasságban ez a hányados közeledik az 1-hez (pl. a Kékestetőn közel kétharmad). A MW/m mértékegység azt mutatja, hogy a számérték a felszínen 1 m hosszúságú vonalból felfelé 30 km magasságig terjedő „szalag” alakú felületen átáramló szélenergiát jelent, a szalag minden magassági szinten merőleges áll a szél irányára.

A közelítő számítást Németh Péter végezte el (*Németh és Mika, 1992*). Feltételezte, hogy 850 hPa nyomási szint felett a talaj hatása már elhanyagolható a légáramlásra (szabad légkör), ekkor érvényes az úgynevezett geosztrofikus közelítés, amely lehetővé teszi, hogy a vízszintes hőmérsékleti advekciót a légnyomás és a szél függőleges gradienseiből kiszámítsuk. A függőleges gradiensek meghatározásához nem kellene mezőnyi adatok, elegendő egyetlen rádiószondás felszállás is. Magyarországon a légkör rádiószondás megfigyelése az 1930-as években kezdődött, rendszeres napi 4 felszállás (amelyek többségének magassága elérte a 10 hPa-t) adatainak archiválása csak 1962-ben indult. Németh Péter az 1962-1985 közötti 24 évre kiszámolta az éves átlagos advektív hőbevételt, amelynek értékére $17,4 \text{ W/m}^2$ -t kapott. Ez a légoszlopnak csak a 850 és 10 hPa közötti részére vonatkozik, tehát nincs benne a légoszlop tömegének alsó 15 és legfelső 1%-a.

Az European Center for Medium-range Weather Forecast (ECMWF, székhelye Bracknell, Anglia) archívumából lehívható a legutóbbi két évtizedre vonatkozó északi félgömbi meteorológiai mezők napi 4 digitális térképe. Egyrészt ezekből sincs az ajánlott 30 évnyi idősor, másrészt egy évnyi anyag lehívása a számítógép-hálózaton keresztül 3-4 napig tart, tehát valódi klimatológiai értéket a tényleges hőmérsékleti advekció számításból nem tudunk előállítani. Ezért Ihász István a 2001. évi anyag alapján teszt-számításokat végzett. Az első vizsgálat eredménye az, hogy a napi 4 térképből és a napi 2 térképből (Magyarországon az utóbbi években csak délben és éjjelkor végeznek rádiószondás méréseket) származtatott havi és éves hőmérsékleti advekció átlagok jelentéktelen mértékben térnek el egymástól.

A második vizsgálat eredményeit a 3. ábra tartalmazza. Eszerint a geosztrofikus módszer és a teljes számolás csak 500 hPa felett ad elfogadható egyezést, ezért a 24 évnyi geosztrofikus közelítéssel nyert átlagos profilt nem fogadjuk el. Ennek oka nem az, hogy a kiindulási adatok (mező vagy egy helyi felszállás) eltérnek, mivel a mezőadatokból és a budapesti felszállásokból számolt geosztrofikus közelítések elég jól egyeznek annak ellenére, hogy a mezők mindig némi simítással jönnek létre. Ez utóbbi meg is mutatkozik abban, hogy a mezőből számolt értékek kevésbé mennek el a szélsőségek irányába. Maga a geosztrofikus közelítés az, amely a hőmérsékleti advekció számítására csak a légoszlop 500 hPa feletti részére alkalmazható.



3. ábra.

Különböző módszerekkel számolt évi átlagos hőmérsékleti advekción függőleges profiljainak összehasonlítása.

A jelmagyarázatok jelentése: Advekción: napi 4 mezőből teljes számolás, Geo Bp.: geosztrofikus közelítés budapesti napi 2 felszállásból, Geo mező: geosztrofikus közelítés mezőadatokból

Mivel sok évre vonatkozó teljes számolás nem volt elvégezhető, ezért ahhoz a megoldáshoz kellett folyamodnunk, hogy az elérhető időszakból kiválasszunk azt a 3 évet, amely a legközelebb van az időszak (1981-2001 közötti 21 év) átlagához. Ezt a 3 évet a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek gyakorisága alapján választottuk ki. Károssy Csaba 1881. január 1-jével

kezdődően összegyűjtötte, illetve az utóbbi évtizedekben már maga határozza meg minden napra a jellemző makroszinoptikus helyzetet, azaz azt, hogy az ország körüli nagy térségű cirkuláció jellege az adott napon melyiknek felel meg a Péczely György által jellemzőnek talált 13 típus közül. Ebből az adatbázisból meghatároztuk az 1981-2001 közötti időszak minden egyes évére és a 21 éves időszak egészére a 13 típus átlagos gyakoriságát. Az egyes évek és a 21 évi átlag közötti eltérés mértékeként definiáltuk a következő mennyiséget:

$$Táv1 = \left(\frac{(y_i - Y_i)^2}{D_i^2} \right) \quad i = 1, 2, \dots, 13, \quad (1)$$

ahol: a felülvonás az i szerinti átlagolást jelenti,

y_i : az adott évben az i -edik típus gyakorisága,

Y_i : a y_i -k 21 évből képezett átlaga,

D_i : a y_i -k szórása Y_i körül,

a „Táv1” elnevezés arra utal, hogy ez első kísérletünk az évek időjárása közötti eltérés (távolság) mértékének meghatározására.

Az eredményeket a 3. táblázat mutatja, amely szerint az 1981-es év nagyon eltér az átlagtól, legközelebb van hozzá az 1988, 1995, 1997 és 1998. (Az évek távolsága átlagának 1-nek kellene lenni, de a többszöri kerekítés miatt ez nem teljesül.) A következő 3 év átlagából közelítjük a 21 éves átlagos advekciónak a profilt: 1988, 1995 és 1997 (1995, 1997 és 1998 egymáshoz közelsége miatt esetleg ugyanabban az „irányban” tér el az átlagtól, ezért a tőlük távolabbi 1988-at vettük 1998 helyett). Nem tudjuk, hogy ennek a három, átlaghoz közeli évnek az átlaga mennyire adja vissza a 21 éves átlagos profilt, de nagyon nem térhet el tőle, mert mindegyik év közel van az átlaghoz. A három év átlaga, remélhetőleg, még közelebb, mint az egyes évek maguk. A három profilt mutató 4. ábra azt sejteti, hogy az egymásba fonódó görbék a keresett 21 éves átlagot is körbefonják (5. ábra). Az átlagos profil a felszíntől 0 hPa-ig van felrajzolva az ábrán, a felső 100 hPa extrapoláció, amelynél a közelítő számítás 24 éves átlagának 10 hPa-ig terjedő szakaszát vettük alapul. A többi érték viszont méréseken alapul, a felszíni is, amely azt mutatja, hogy a felszínen érvényesül Bacsó kiindulási feltétele, azaz a felszínen a levegő hőt visz el Magyarország fölé. Ez azonban a magassággal gyorsan megváltozik, a légoszlop nagy részén a levegő hőt szállít az ország fölé.

Mivel az advekciónak teljes számolása elvégezhető a talajszintre és a talaj közeli légköri szintekre is, így a közelítő számolásból hiányzó légoszloprészek is benne vannak a hőadvekciónak számításában, így a teljes légoszlop által advektált hőt vesszük figyelembe, amikor a felső határon eltávozó sugárzási energiával vetjük össze, mert a teljes légoszlop a releváns ebben az összevetésben, amint a csapadék és párolgás különbségeként adódó nedvességadvekciónak is a teljes légoszlopra vonatkozik. A hőmérséklet megváltozása által létrejött, a teljes légoszlopra vonatkozó hőtartalom-változás számítása a következő formula numerikus közelítésével történt:

$$Q = \frac{c_v}{g} \int_{p_0}^0 \frac{dT}{dt} dp \quad (2)$$

ahol: c_v a levegő állandó térfogaton vett fajhője, $718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,

g a nehézségi gyorsulás,

dT/dt a hőmérsékleti advekciónak,

a légnyomás szerinti integrál a felszíntől a légkör felső határáig tart.

Az integrál numerikus közelítését úgy számoltuk, hogy a légoszlopot 100 hPa -os rétegekre osztottuk (kivétel a legalsó réteg, amely az átlagnak adódott $1016,6 \text{ hPa}$ -tól 900 hPa -ig tart), az ábráról leolvastuk a rétegre érvényes átlagos hőmérsékleti advekciónak, ezt hővé átszámítottuk, majd összegeztük a rétegek értékeit. Eredményül $27,4 \text{ W/m}^2$ -et kaptunk. Bizonytalanságként $\pm 3 \text{ W/m}^2$ értéket vehetünk.

Ezek után összefoglalhatjuk a légoszlop energiamérlegét, amelynek alapvető összetevőit a 4. táblázat tartalmazza.

Klimatikus átlagban a légoszlop energiamérlege zérus kell legyen, mert a légoszlop energiatartalmának változásai több év alatt kiegyenlítik egymást. A nagyobb változások az év folyamán játszódhatnak le, akár évszakos, akár napi változások formájában, tehát a fő kiegyenlítődés egy teljes év alatt történik. Mivel az egyes évek kissé eltérnek a klimatikus átlagtól, néhány év sorozata megközelíti a teljes kiegyenlítődést, ha csak nincs valamilyen irányú éghajlatváltozás. Az éghajlatváltozás kimutatásához nagy pontosságú és hosszabb időn

keresztül végzett mérések időszora (monitorozás) szükséges, mert a változás mértéke kicsi a természetes ingadozásokhoz és a mérési pontossághoz képest.

3.4 A felszín-légkör rendszer

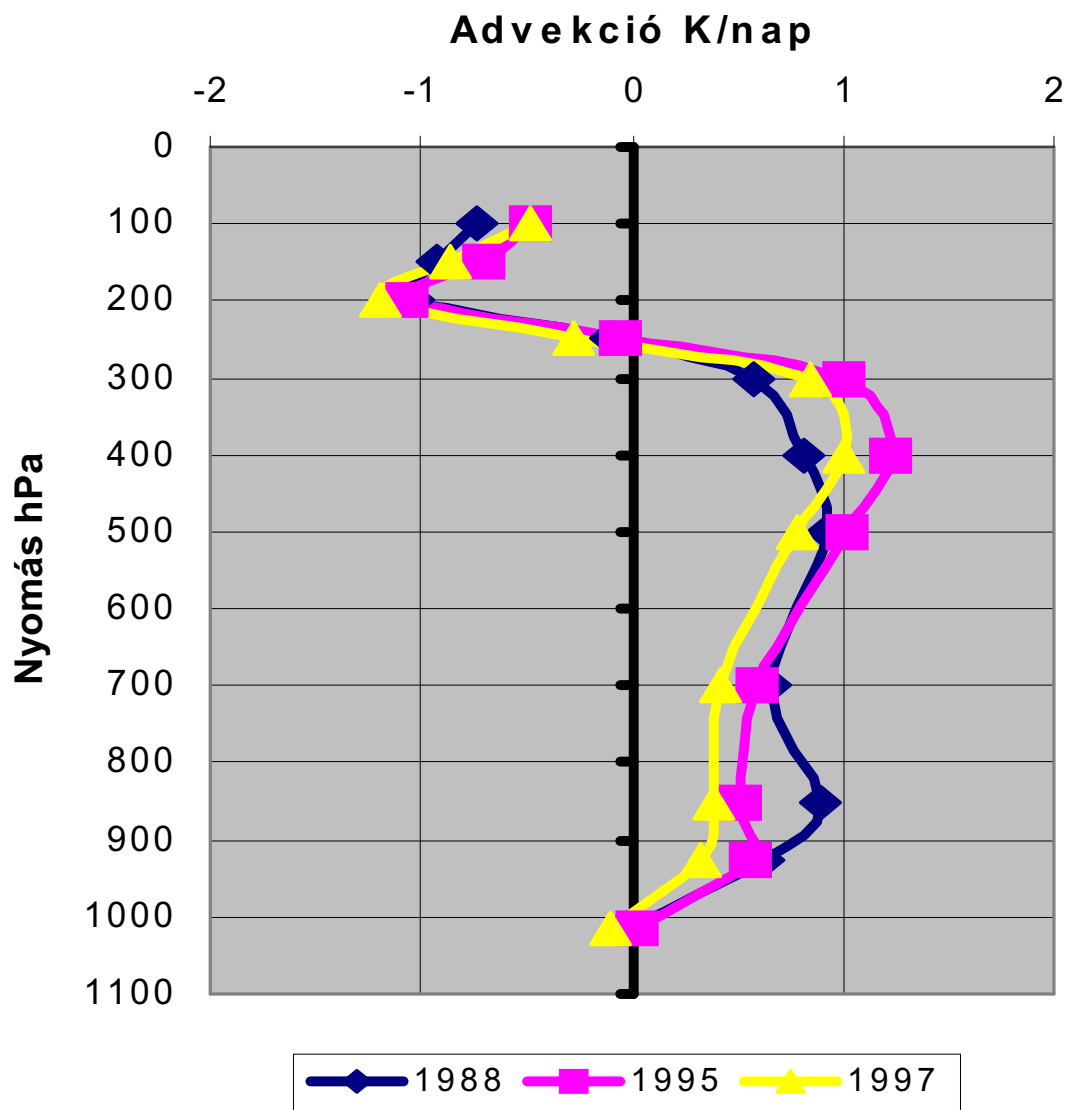
A teljes felszín-légkör rendszer sugárzási és hőmérlege a két részrendszer megfelelő jellemzőjének az összegéből áll. Az alapvető számértékek az 5. táblázatban találhatóak. Az értékek bizonytalansága (hibája) a részértékek bizonytalanságát „örökli”. Az előző bekezdésben leírtak (mutatis mutandis) érvényesek a teljes rendszerre is.

3. táblázat

Az 1981-2001 időszak egyes éveinek távolsága az időszak átlagától a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek gyakorisága és az (1) képlet alapján

Évek	Táv1
1981	2,5
1982	1,5
1983	1,6
1984	1,2
1985	0,71
1986	0,81
1987	0,70
1988	0,43
1989	1
1990	0,96
1991	1,2
1992	0,75
1993	0,47
1994	0,45
1995	0,40
1996	1,6
1997	0,40
1998	0,41
1999	1
2000	0,93
2001	0,84
Átlag:	0,94

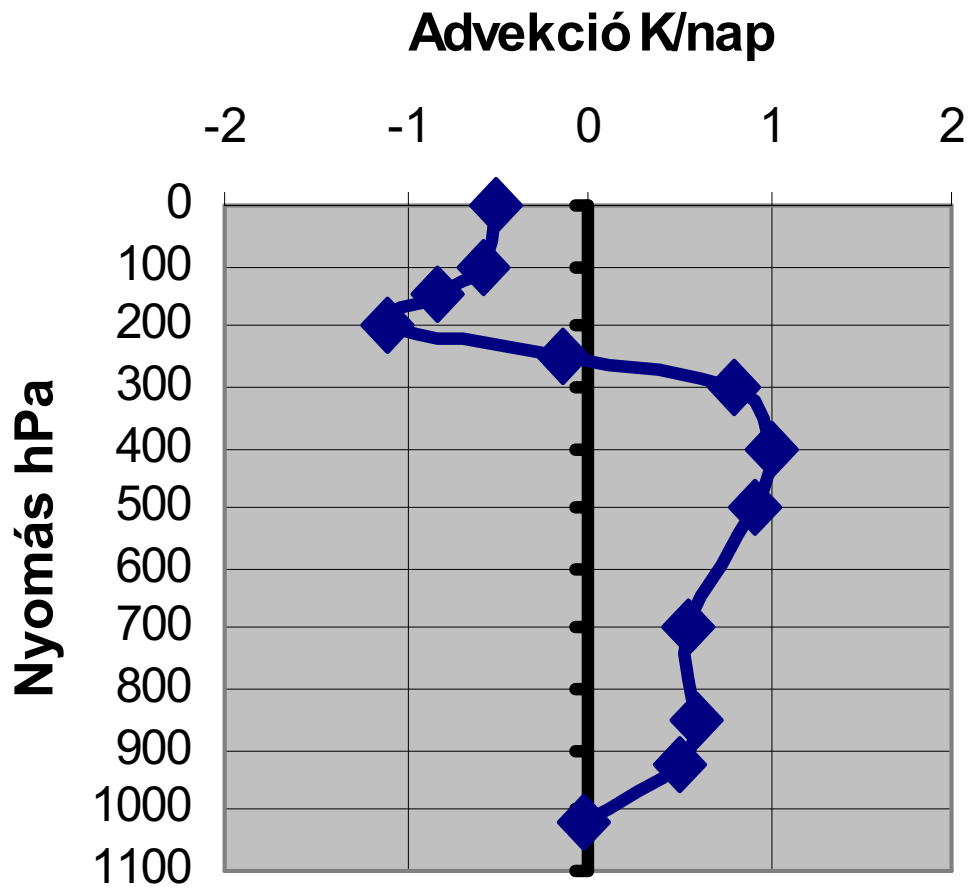
Az átlaghoz közeli évek advekcio profiljai



4. ábra

Az 1981-2001. évek átlagához közeli évekre vonatkozó évi átlagos hőmérsékleti advekcio profilok az ECMWF adatbázisából számítva

Átlagos hőmérsékleti advekcio profil



5. ábra

Az átlag közeli évekből számolt átlagos hőmérsékleti advekcio profil

4. táblázat
A légoszlop energiamérlegének áttekintése
(a mértékegység W/m^2):

A satírozott területeken részértékek szerepelnek, közvetlenül alattuk az összegük jelenik meg. Elvben az energiamérlegnek nullának kellene lenni, mert sokéves átlagban a légoszlop felettünk se nem melegszik, se nem hűl, a részértékek bizonytalansága miatt azonban az összeg eltér a várt nullától. Részletesebben lásd a bizonytalanságokról szóló pontban.

Beérkező napsugárzás	300
Világűrbe visszavert napsugárzás	-107
Felszínen elnyelt napsugárzás	-114
Légkörben elnyelt napsugárzás	79
Kisugárzás a világűrbe	-225
Visszasugárzás a felszínnek	-305
A felszín kisugárzása a légkörbe	362
A légkör effektív kisugárzása	-168
Sugárzási mérleg	-89
Antropogén hőterhelés	0,4
Látens hő	40
Turbulens + konvektív hő	17
Nedvességadvekción	8
Hőadvekción	27
Hőmérleg	92
Energiamérleg	+3

5. táblázat

A teljes felszín-légkör rendszer energiamérlegének áttekintésese ***(a mértékegység W/m^2):***

A satírozott területeken részértékek szerepelnek, közvetlenül alattuk az összegük jelenik meg. Elvben az energiamérlegnek nullának kellene lenni, mert sokéves átlagban a rendszer se nem melegszik, se nem hűl, a részértékek bizonytalansága miatt azonban az összeg eltér a várt nullától. Részletesebben lásd a bizonytalanságokról szóló pontban

A felszín sugárzási egyenlege	57
A légoszlop sugárzási egyenlege	-89
A rendszer sugárzási mérlege	-32
A felszín hőmérlege	-57
A légoszlop hőmérlege	92
A rendszer hőmérlege	35
A rendszer energiamérlege	+3

4. A bizonytalanságok elemzése

Ahogy *Bárdossy és szerzőtársai* (2000) elmondják, a földtudományokban általában a hiba és a bizonytalanság keveredik, noha a két fogalom nem ugyanazt jelenti. Ez érvényes erre a vizsgálatra is, külön munkát kell majd ráfordítani, hogy ezt a két összetevőt külön-külön is meghatározzuk, az idézett munka alapján ezt tervezzük megtenni fuzzy számok segítségével.

1) Az egész munka során mind az ország felszínét, mind a felette lévő légoszlopot (következésképp a teljes rendszert is) klimatológiai értelemben energetikailag egyensúlyban lévőknek tekintettük. Tettük ezt annak ellenére, hogy tudjuk (*IPCC*, 2001, 7-9. oldalak) 1750 és 2000 között a légkörben felhalmozódott üvegházhatású gázok következtében $2,43 \text{ W/m}^2$ -rel növekedett földi átlagban a légkör visszasugárzása, ezt az értéket a sztratoszférikus ózon fogyása és az aeroszolok hatása valamivel 2 W/m^2 alá csökkenti, így ezt kell a mondott 250 évre érvényes sugárzási éghajlati kényszer értékének tekintenünk. Ez a szám Magyarországra is vonatkozik, mivel az 1750 és 2000 közötti légköri összetevő változások az egész légkörre érvényesek (a jó átkeveredés következtében), így az általuk létrehozott éghajlati kényszer is érvényes. A visszasugárzás bizonytalanságára 3 W/m^2 értéket adtunk meg, amely bizonytalanság nagyobb, mint az éghajlati kényszer, ezért a kényszert nem tekintettük úgy, hogy felborítja az egyensúlyt. (Meg kell jegyeznünk, hogy a visszasugárzás egész földre vonatkozó értékének bizonytalansága jóval nagyobb, mint a magyarországi érték bizonytalansága, pl. gondoljunk a mérésekkel nem fedett óceáni területek nagyságára, ennek ellenére magát az üvegházgázok általi sugárzási kényszer értékét jól ismerjük, mert számítása más úton, pontosabb mérésekből kiindulva történt. Az már más kérdés, hogy a légkör visszasugárzását alakító többi tényező esetleges változásaiból adódó kényszer nagyságát és előjelét nem ismerjük.)

2) Ezen munka során a leszármaztatott értékeket többnyire összeadással vagy kivonással állítjuk elő. Ha az összeadandók vagy kivonandók meghatározása egymástól függetlenül történt, akkor a bizonytalanságaik négyzetének összeadásával számíthatjuk ki az összetett érték bizonytalanságának négyzetét. Ezért törekedtünk minden összetevő független meghatározására még akkor is, amikor az energetikai kiegyensúlyozottság feltétele alapján egyes értékeket „maradéktagként” megkaphattunk. Az egyensúly független adatokból való teljesülésének mértéke az ismereteink bizonytalanságának mértékét adja. Sajnos nem tudtunk minden összetevőre független adatokat szerezni. Pl. a felszín energiamérlegének meghatáro-

zásakor a turbulens és konvektív hőátadás együttes mértékét úgy kaptuk meg, hogy az egyensúly fennállása ezek összegét a sugárzási egyenleg értékével tette egyenlővé. Ezért nem volt lehetőségünk a felszín energiamérlegére bizonytalanságot meghatározni, illetve jelen számításunkban ez a bizonytalanság a sugárzási egyenleg bizonytalanságával egyenlő. Ez a helyzet akadályozza a bizonytalanság és hibaszámításunk teljes végigvételét, nem minden egyes értékre tudunk elfogadható becslést adni.

3) Az energetikai folyamatok összetettsége ellenére egyértelmű, hogy az ország által a bolygóközi térbe kisugárzott energiatöbbletet a bejövő levegő pótolja hő- és nedvességadvekciónak révén. A most felsorolt összetevők mindegyikére van független adatunk, így ezen egyensúly fennállásának mértéke a bizonytalanság jellemzője. Mind a felső határ sugárzási egyenlegének, mind a hőadvekciónak, mind pedig a nedvességadvekciónak bizonytalanságát $\pm 3 \text{ W/m}^2$ értékben állapítottuk meg. A két advekciónak együttes értéke 35 W/m^2 , együttes hibájuk $\pm 4 \text{ W/m}^2$, a felső határ sugárzási egyenlege $-32 \pm 3 \text{ W/m}^2$ volt, így az értékek körüli bizonytalanságot kifejező intervallumok jelentős részben átfedik egymást, így az adatok az egyensúly fennállása mellett szólnak.

5. Összefoglalás

1. Az elérhető ismeretek szintjén áttekintettük jelenlegi tudásunkat az ország éghajlati éves energiamérlegéről. A felszín által a légkörnek átadott turbulens és konvektív hő, valamint a légkör mozgási energiájának diszzipációja kivételével a többi összetevőre sikerült adatokat találnunk, illetve meghatároznunk. Nemcsak az energiamérleg fő összetevőiről adtunk számot, hanem azok érdeklődésre számot tartó részösszetevőiről is igyekeztünk tájékoztatni.
2. Ebben a munkában szerepelnek először az országra vonatkozó, a légkör felső határának sugárzási mérleget megadó műholdas mérésekből származó adatok, valamint a légkör hőadvekciónál teljes (nem közelítő) számítás alapján kapott számértékek.
3. Eléggyőzően egyezik a légkör által az ország fölé behozott, valamint a légkör felső határán át sugárzással elveszített energia klimatikus éves értéke, a bizonytalansági határokon belül fennáll az energia egyensúlya.

6. Köszönetnyilvánítás

Ez a munka, jellegéből adódóan, főként adatok összegyűjtéséből, kisebb részben pedig előállításukból áll. A publikált forrásokból átvett adatok mindegyikénél megadtuk a megfelelő irodalmi hivatkozást. Az adatok jó részéhez azonban kollegiális segítség révén jutottunk, így ebben a részben mondunk köszönetet mindazoknak, akik segítették a dolgozat elkészítését. A segítők nevei következnek abban a sorrendben, ahogy a dolgozatban megjelenik az általuk adott információ.

- Győrffy János (ELTE Térképtudományi Tanszék), aki elektronikus formában előállította Magyarország kontúrját és a műholdas rácsnégyszög határvonalát,
- Rimócziné Paál Anikó (OMSz), aki rendelkezésünkre bocsátotta a METEOSAT műhold adataiból számított, még nem publikált sugárzási adatait,
- Alföldi László (VITUKI), aki a folyóvizek mozgási energiájának számolásához szükséges adatokat mutatta meg, valamint gondolatait ismertette a folyóvizek által szállított hőenergiával kapcsolatban,

- Geresdi István és Horváth Ákos, akik elmondták, hogy a Magyarországon lehulló csapadék cseppjeinek döntő többsége a saját légterünkben képződik, így az advektált látens hő jól számítható a csapadék és párolgás különbségéből,
- Németh Péter (OMSZ), aki a hóadvekciónak közelítő számítását végezte,
- Ihász István, aki a hóadvekciónak teljes számítását végezte az ECMWF adatbázisából saját maga által letöltött adatokból, ezzel a legtöbb munkát végezte segítőim közül,
- Károssy Csaba (Nyugat Magyarországi Egyetem, Szombathely), aki rendelkezésemre bocsátotta a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek idősorát.

7. Irodalom

Ambrózy Pál és Béll Béla (szerkesztők), 1989: Éghajlat, Magyarország Nemzeti Atlasza, Kartográfia Kiadó, Budapest.

Bacsó Nándor, 1959: Magyarország éghajlata. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Bárdossy György, Fodor János, Molnár Péter és Tungli Gyula, 2000: A bizonytalanság értékelése a földtudományokban. FÖLDTANI KÖZLÖNY, 130/2, 291-322.

Borhidi Attila és Dobosi Zoltán, 1967: A felszíni albedó területi eloszlása Magyarországon. IDŐJÁRÁS, 71. 150-159.

Dávid Aranka, Takács Olga és Tiringér Csaba, 1990: A sugárzási egyenleg eloszlása Magyarországon az 1951-1980-as időszak adatai alapján. Az OMSZ Kisebb Kiadványai 66. szám, Budapest.

Dobosi Zoltán, 1957: Vizsgálatok egy hazai talajfelszín sugárzási mérlegéről. IDŐJÁRÁS, 61. 260-265.

Dobosi Zoltán és Takács Lajos, 1959: A globálsugárzás területi eloszlása Magyarországon. IDŐJÁRÁS, 63. 82-87.

Dobosi Zoltán, 1963: A sugárzási mérleg Magyarországon. A Kárpátok hatása az időjárásra. Akadémiai Kiadó, Budapest.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, 2001.

Justyák János, 1998: Magyarország éghajlata. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen.

Kajor Béla és Kovács Tibor, 2001: Az inotai szélerőmű projekt eddigi tapasztalatai. Meteorológiai Tudományos Napok 2001: A légköri erőforrások... OMSz, Budapest

Liebe Pál, 2001: Tájékoztató: termálvízkészleteink, hasznosításuk és védelmük. VITUKI Rt. Budapest

Major György és Tárkányi Zsuzsanna, 1969: A számított sugárzási egyenleg területi eloszlása Magyarországon. IDŐJÁRÁS, 73, 81-85.

- Major György* (szerk.), 1976: *A napsugárzás Magyarországon 1958-1972*. Az OMSZ Hivatalos Kiadványai 10. szám, Budapest.
- Major György*, 1979: Mennyi energiát kapunk a napsugárzásból? *Élet és Tudomány* 35. szám, 1093-1097.
- Major György* (szerk.), 1985: *A napenergia hasznosítás meteorológiai megalapozása Magyarországon*. Építéstudományi Intézet, Budapest.
- MacDonald, A. E.*, 2001: The Wild Card in the Climate Change Debate. *Issues in Science and Technology*, Summer 2001, pp. 51-56.
- Mészáros Ernő, Major György és Horváth László*, 1984: A fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának hatása a légkör összetételére, savasodására és hőszenyeződésére. *IDŐJÁRÁS*, 88, 339-344.
- Németh Péter és Mika János*, 1992: A szabad légkör hőmérsékleti advekciónak meghatározása és éghajlati parametrizációja. *Beszámolók az 1988-ban végzett tudományos kutatásokról*. OMSZ, Budapest. 148-155.
- OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat), 2002: *Magyarország Éghajlati Atlasza*, Budapest
- Péczely György*, 1981: *Éghajlattan*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Tóth László, Horváth Gábor, Tóth Gábor és Stelczer Balázs*, 2001: A kulcsi 600 kW-os szélerőmű projekt. *Meteorológiai Tudományos Napok 2001: A légköri erőforrások...* OMSZ, Budapest
- Varga Haszonits Zoltán, Lantos Zsuzsanna, Vámos Ottilia, Schmidt Rezső*, 2000: *Magyarország éghajlati erőforrásainak agroklimatológiai elemzése*. Mosonmagyaróvár.
- Weingartner Ferenc*, 1970: Az albedó területi eloszlása Magyarországon. *Beszámolók az 1968-ban végzett tudományos kutatásokról*. OMSZ, Budapest
- Whitlock, C. H., T. P. Charlock, W. F. Staylor, R. T. Pinker, I. Laszlo*, 1995: First Global WCRP Shortwave Radiation Budget Dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76, No 6, 1-18.
- Zárbok Zsolt*, 1984: A területi párolgás Magyarországon. *Beszámolók az 1981-ben végzett kutatásokról*, OMSZ, Budapest.

Major György — Nagy Zoltán — Tóth Zoltán:

**Az energiafelhasználás csökkenésének hatása a felszín
sugárzásforgalmára Magyarországon**

Tartalom. Az ipar szerkezetének átalakulásával jelentősen csökkent az éves energiafelhasználás Magyarországon. Ebben a vizsgálatban arra a kérdésre keresünk választ, hogy az e csökkenés következtében kevésbé szennyezett levegő milyen mértékben befolyásolja a felszínre jutó napsugárzás értékét, illetve a felszín teljes sugárzási energiamérlegét.

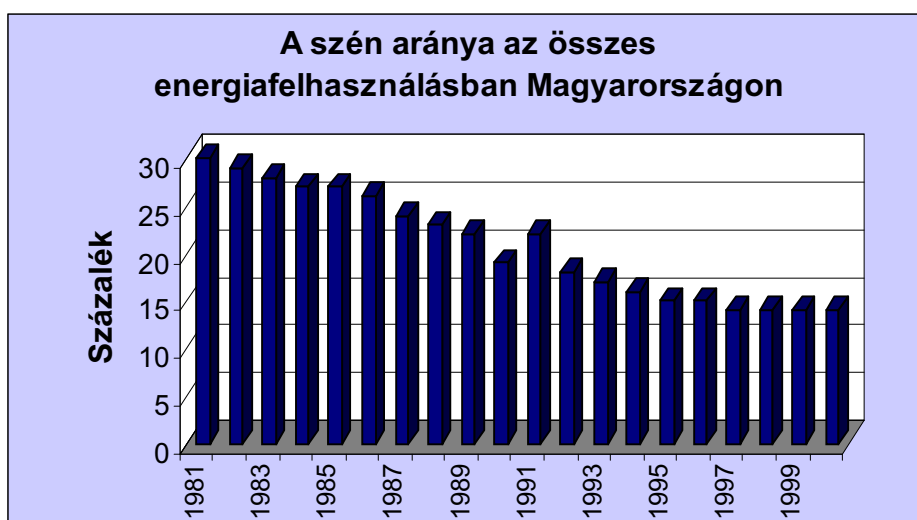
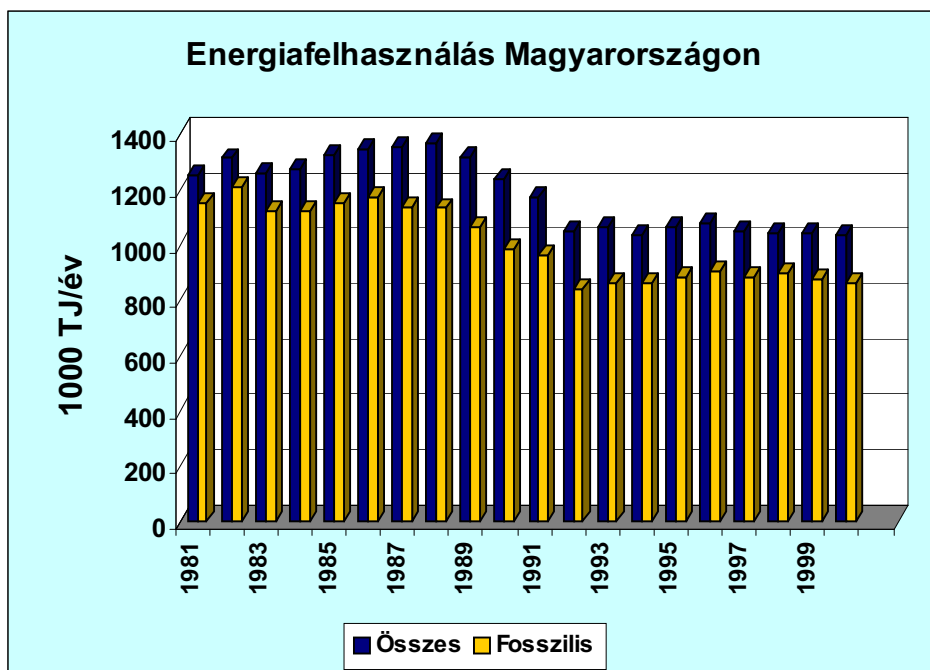
Bevezetés

Az emberi tevékenység egyik legszennyezőbb része az energiatermelés. A társadalom gazdasági fejlődéséhez jelentős mértékben járult hozzá a fosszilis energiahordozók felhasználása, az utóbbi évtizedekben azonban az energiahatékonyság növekedésével valamelyest csökken a fajlagos energiafelhasználás, így remény van arra, hogy a korábbinál lassabban növekedjen a levegőbe bocsátott, energiatermelésből származó anyagok mennyisége. Ezen anyagok közül a levegőben hosszú ideig tartózkodik a szén-dioxid, ezért légköri koncentrációja folyamatosan növekszik a teljes légkörben, ezáltal növekszik a Föld–légkör rendszerben az üvegházhatás. A globális szén-dioxid problémával nemzetközi egyezmények foglalkoznak. Ebben a vizsgálatban az égéstermékek más csoportjának hatását keressük, amely hatás kisebb térségeken mutatkozik meg. A Magyarországon lejátszódott iparszerkezet-átalakulás következtében az energiafelhasználás csökkent (lásd 1. ábra), így csökkennie kellett az ország levegőjében a rövid tartózkodású égéstermékeknek. Ezen változások levegőkémiai elemzése helyett most a sugárzásátbocsátásban megmutatkozó változást keressük a hagyományos meteorológiai sugárzási adatok alapján. Előzetesen feltételezzük, hogy a tisztább levegőben az éves értékek kimutatható mértékben megnövekedtek.

Az 1. ábrán látható idősor három szakaszra bontható:

- 1981-1988: a kiindulási időszak, amikor magas az energiafelhasználás szintje,
- 1989-1991: az átmeneti időszak, amikor a felhasználás csökken,
- 1992-2000: a stabilizációs időszak, amikor beállt az új, alacsonyabb felhasználási szint.

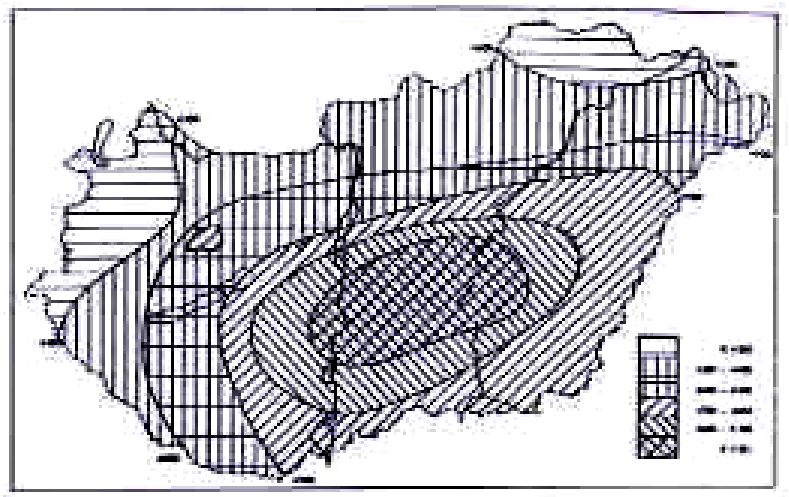
Az ábráról leolvasható, hogy az összes energiafelhasználás 1 300 000 TJ-nál valamivel nagyobb értékről 1 000 000 TJ-ra csökkent, a fosszilis eredetű energia felhasználása 1 100 000 TJ-ról 800 000 TJ-ra csökkent. A szén égetése okozza a legnagyobb levegőszennyezést, ezért a második rész ábra külön mutatja a szén felhasználásának változását.



1. ábra. Az ország éves energiafelhasználásának menete a Magyar Statisztikai Évkönyvek adatai alapján

Felhasznált adatok

Hazánkban az 1900-as évek elejétől végeznek meteorológiai célból napsugázméréseket. Már az első programban, amikor több helyen nyert adatokat hasonlítottak össze, a cél a tisztább levegőjű helyek megkeresése volt, üdülőhelyek és gyógyhelyek kiválasztása céljából. Az ország felszínére lejutó napsugárzás térképezésére több kísérlet történt az utóbbi 40 évben. A következő ábrán a leginkább megalapozott éves térképet mutatjuk be.



2. ábra. A felszínre lejutó napsugárzás éves értékeinek eloszlása Magyarországon, 30 éves adatsor (1951-1980) alapján

A térkép bemutatásával szemléltetni szeretnénk, hogy az ország kis területe ellenére az éves napsugárzás eloszlásában jól kimutatható különbségek vannak. A legkevesebb napsugárzást a nyugati határszél és az északkeleti „csücsök” kapja, a legnagyobb értékek a hegyektől övezett medence közepére jutnak. Budapest (ahol a legtöbb meteorológiai és sugárzási mérés folyik) az országos átlaghoz közeli helyen van. A minimális érték a budapestinél mintegy 5%-kal kevesebb, a maximális pedig ugyanannyival több. A különbségeket lényegében a felhőzet eloszlása okozza.

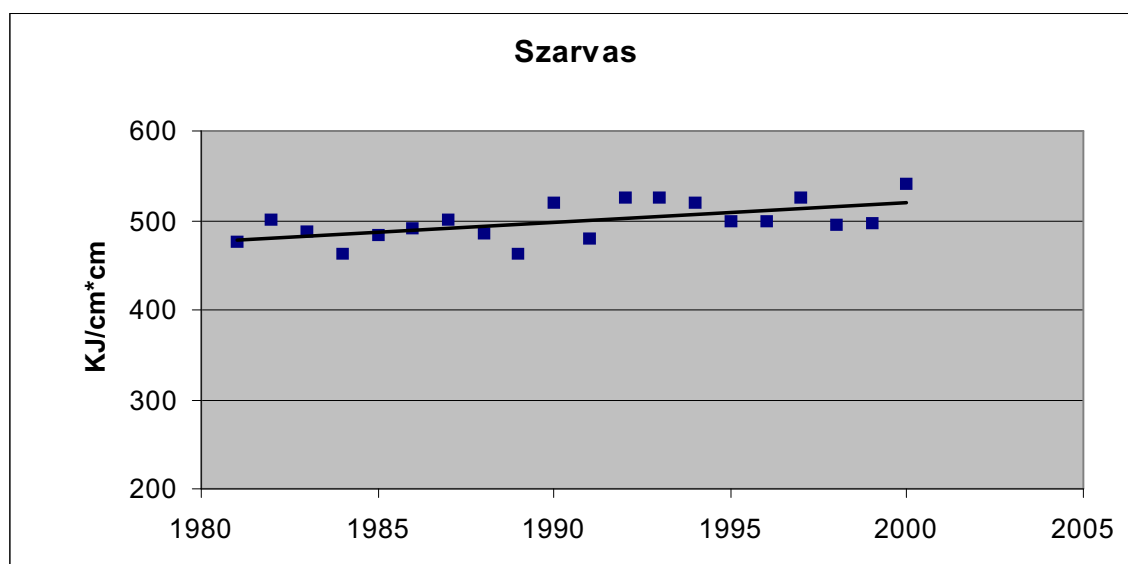
A térkép alapján 4 állomás napsugárzási adatsorát választottuk ki arra a célra, hogy megkeressük bennük a csökkenő légszennyezés hatását. Az állomások a következők:

- Sopron (a legfelhősebb hely),
- Keszthely és Budapest (közel átlagos hely),
- Szarvas (legderültebb hely).

Mivel az 1990-es évtizedben a meteorológiai állomásokon áttértek az automatizált megfigyelésre, ezért több állomást nem tudtunk bevonni a vizsgálatba, mert adatsorukban hiány van. Sopronban is hiányosak az 1990-1995 közötti évek adatai, így teljes éves összeget onnan sem tudtunk használni ebben a 6 évben, de a területi kép miatt szükséges volt a legborultabb országrész képviselésére. A területi eloszlás alapján ez a 4 állomás reprezentálja az egész országot a keresett hatás kimutatása céljából.

A globálsugárzás éves összegeinek vizsgálata

A globálsugárzás szó a vízszintes felszínre lejutó közvetlen és szórt napsugárzás összegét jelenti, tehát a teljes napsugárzási energiabevételt. A 3. ábra mutatja Szarvas állomáson a globálsugárzás éves értékeinek menetét ugyanarra a 20 évre, amelyre az energiateljesítmény értékei szerepelnek az 1. ábrán. Mivel Sopronban nem látható változás a 20 év alatt, Keszthelyen és Budapesten igen gyenge a növekedés, ezért ezen állomások adatait nem szerepeltetjük ábrán. Figyelembe véve az évenkénti változékonyságból adódó szórást, a növekedés egyedül Szarvason szignifikáns. Ha összehasonlítjuk az egyes állomások kiindulási időszakra vonatkozó átlagát a stabilizációs időszakra vonatkozó átlagával, akkor az eltérés Sopronban 1 KJ/cm^2 , Budapest és Keszthely átlagában 3 KJ/cm^2 , Szarvason pedig 28 KJ/cm^2 az éves összegekben.



3. ábra. A globálsugárzás éves értékeinek menete Szarvason

Tehát a kiindulási és a stabilizációs időszak között minden állomáson növekedett a globálsugárzás éves értéke, a növekedés azonban csak Szarvason szignifikáns. A következő lépésben arra kerestük a választ, hogy a növekedésben mekkora részt játszik a levegő tisztulása. Mivel a felszínre lejutó napsugárzást alapjában a felhőzet szabályozza, ezért megnéztük, hogy van-e változás a felhőzet mennyiségében.

A felhőzet mennyiségét és szerkezetét az egyes állomásokon az észlelő személy vizuális úton állapította meg a legutóbbi időig. A meteorológiai felhőészlelések döntő többségét ma már műholdas berendezések végzik, ezek az adatok azonban nagyobb terület átlagos felhőzetét

adják, az egyes állomásokra nehézkesen vonatkoztathatók. Azonos módszerrel észlelt, 20 éves adatsor ma már csak kevés állomásról található, azokról, ahol még létezik a személyhez kötött vizuális észlelés. A személyes észlelés azonban nem elég pontos ahhoz, hogy az esetünkben várható kis változások az idősből kimutathatók legyenek. A felhőzetnek bizonyos fajta műszeres észlelését jelentik a napfénytartam-adatsorok (pl. melyik évben hány órán át sütött a Nap az adott állomáson). Ma már a sokkal több információt tartalmazó globálsugárzás-mérések váltják fel a napfénytartam-méréseket, így a mostani vizsgálatban is magukból a sugárzási adatsorokból kerestünk választ a felhőzet változására.

A relatív globálsugárzás az a szám, amely megmutatja, hogy a légkör felső határára érkező (csillagászatiilag lehetséges) napsugárzás hány százaléka jut le a felszínre. Derült napnak tekintettük azokat, amelyeken a relatív globálsugárzás meghaladta az 55%-ot. Ezt a határt úgy választottuk, hogy ne csak a teljesen felhőtlen napok, hanem azok is derültnek számítsanak, ahol már néhány órán keresztül süt a nap, mivel itt a határ két oldalára jutást biztosan a felhőzet mennyisége és szerkezete szabja meg és nem a levegő tisztasága. Átlagos napnak tekintettük a 40 és 55% közötti relatív globálsugárzásúakat, borultnak a 40%-nál kisebbeket. A derült, az átlagos és a borult napok részarányát megállapítottuk mind a 20 évre Keszthely, Budapest és Szarvas állomások adatsorából. (Sopron adatsora egyrészt hiányos, másrészt lényegében nem mutat változást.) A részarányok 20 éves menetének elemzése azt mutatta, hogy a derült napok részaránya mind a 3 állomáson növekedett, de nem szignifikáns mértékben. Ez arra vall, hogy Szarvason, ahol maga az éves napsugárzás szignifikáns növekedést mutatott, a felhőzet csökkenése nem elég magyarázat a sugárzás növekedésére, tehát itt nyilván szerepe van a levegő tisztulásának is. A többi állomáson a jelentéktelen sugárzásnövekedés lehet pusztán a felhőzet jelentéktelen csökkenésének következménye, de nem kizárt a tisztább levegő szerepe sem.

Napsugárzás a teljesen derült napokon

Nyilvánvaló, hogy a levegő tisztulásának hatása a felszínre jutó napsugárzásban a legnagyobb mértékben a felhőtlen napokon kell jelentkezzen. Az előzőekben azt néztük, mennyire jelentkezik a hatás a teljes éves értékekben, most a nyári és téli legderültebb napokon mutató hatásnak nézünk utána.

Az I. táblázatban szereplő adatok és a belőlük készült statisztikai jellemzők azt mutatják, hogy a tisztább levegő hatása, noha megmutatkozik, a természetes változékonyságon belül

jelentéktelen a nyári derült napokon, ugyanakkor bizonyossággal állítható, hogy jelentős a téli derült napokon. Tehát a levegő sugárzást átbocsátó képessége nem annyira a teljes energiafelhasználás 25%-os csökkenésétől növekedett meg, hanem attól, hogy a lakosság jórészt áttért a gázfűtésre a szénfűtésről. Ez érthető, ha a különböző energiahordozók felhasználásával járó levegőszennyezés mértékére is gondolunk.

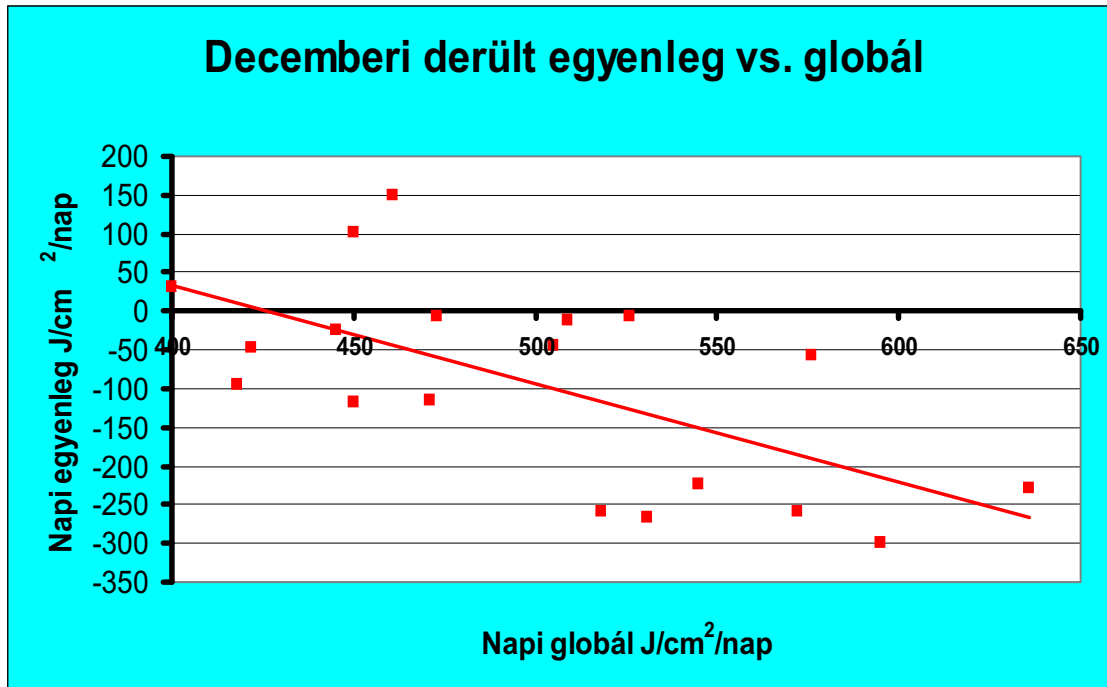
I. táblázat. Az adott hónap 2 legderültebb napján mért felszíni globálsugárzás átlagai (J/cm^2), valamint az adatsorokból készült statisztikák: a kiindulási időszakra (1981-1988) és a stabilizációs időszakra (1992-2000) számolt átlagok és szórások, az „U” próba értékei és annak a %-os valószínűsége, hogy tévedünk, ha a kétféle átlagot különbözőnek tekintjük.

Év	Budapest június	Budapest december	Keszthely június	Keszthely december	Szarvas június	Szarvas december	Sopron december
1981	3086	445	2599	453	2984	520	461
1982	2636	450	2772	555	2970	525	455
1983	2931	473	2857	532	2792	573	488
1984	2812	505	2541	449	2984	588	512
1985	2269	461	2849	519	3039	577	473
1986	2726	400	3027	654	2761	577	461
1987	2896	450	3202	684	3001	722	499
1988	2888	526	3313	694	2934	730	517
1989	2603	509	3343	547	2869	779	509
1990	2634	418	3209	544	3044	797	520
1991	2775	545	2871	640	3002	618	485
1992	2770	552	2752	518	2973	740	522
1993	2835	422	2786	598	3103	831	491
1994	2914	595	2750	631	3125	737	536
1995	2810	572	2739	594	3065	705	521
1996	2685	531	2875	598	2986	716	496
1997	2799	471	2993	629	3158	667	471
1998	2694	636	2864	685	2648	808	512
1999	2892	576	3019	636	2811	623	482
2000	2902	518	3072	650	2799	696	477
81-88 átl.	2765,14	454,857	2835,29	549,429	2933	583,143	478,429
szórás	231,126	36,1654	254,465	92,1805	94,8004	75,5993	22,7198
92-00 átl.	2811,22	541,444	2872,22	615,444	2963,11	724,778	500,889
szórás	79,8732	61,406	120,504	44,0255	164,697	61,0861	21,4706
"U"	0,53616	3,58775	0,37489	1,84699	0,46813	4,21522	2,08769
%	46	0,02	36	3	32	0	2

Teljes sugárzási egyenleg a derült téli napokon

A felszín teljes sugárzási energiamérlegének legfőbb természetes összetevője a beérkező napsugárzás, azonban nem ez az egyetlen összetevő. A felszín a ráeső napsugárzás egy részét visszaveri a légkörbe, másrészt a saját hőmérsékletének megfelelően kisugároz. A légkör maga is sugároz a saját hőmérséklete szerint (ezt a képességét fokozzuk az üvegházhatású gázok levegőbe pumpálásával) a felszín felé is és a világűr felé is, így a felszín energiamérlegében négy sugárzási összetevő játszik szerepet. Az előzőkben megnéztük, hogy a helyi légszennyezés változása hogyan mutatkozott meg a felszínre jutó napsugárzás változásában. Természetesen meg kell azt is néznünk, hogy a négy sugárzási összetevő eredőjeként előálló teljes sugárzási egyenlegben mutatkozik-e változás.

Magyarországon sugárzási egyenleg mérése 1964 óta folyik Pestlőrincen, a meteorológiai obszervatóriumban, másutt csak igen rövid mérési időszakokról tudunk. Megnéztük (4. ábra), hogy a legderültebb napokon milyen kapcsolat adódott a leérkező napsugárzás és a teljes sugárzási egyenleg között a budapesti adatsorban.

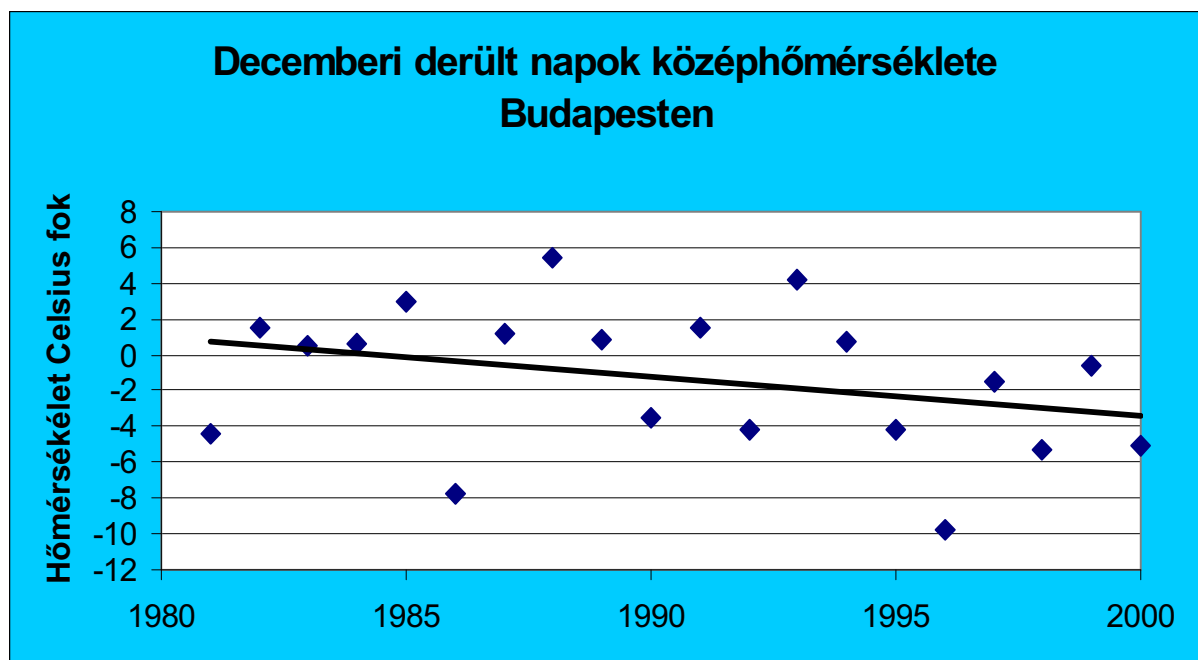


4. ábra. A Budapesten mért sugárzási egyenleg összefüggése a globálsugárzással

Az ábráról látható, hogy téli napokon a sugárzási egyenleg negatív is lehet, azaz a felszín a saját kisugárzásával több energiát veszít, mint amennyit napsugárzásból és a légköri visszacsugárzásból elnyel. Az is jól látszik, hogy mennél tisztább a levegő (azaz nagyobb a globálsugárzás), a sugárzási egyenleg annál inkább csökken. Tehát a csökkenő helyi levegőszennyezés hatására jelentősen növekszik a nappali besugárzás, ugyanakkor azonban jelentősen csökken a légkör visszacsugárzása, végeredményben a tisztább levegő esetén kevesebb lesz a sugárzási egyenleg, mint a szennyezettebb levegő esetében.

Hőmérséklet a derült téli napokon

A tisztább levegőben a derült téli napokon a felszín sugárzás útján több energiát veszít (negatív egyenleg), mint a szennyezettebb levegőben, ezért a felszín közelében mért levegőhőmérséklet a levegő tisztulásával csökken. Ezt mutatja az 5. ábra.



5. ábra. Évenként a két legderültebb decemberi nap középhőmérsékletéből készült átlagértékek menete 1981 és 2000 között

Az ábrán látható értékek nagymértékben szóródnak, ennek ellenére meggyőzően mutatkozik az a trend, hogy a tisztuló levegő alacsonyabb hőmérséklettel jár együtt. A különbség a kiindulási időszak és a stabilizációs időszak átlagai között 2 fok, a nagy szórás miatt azonban csak 13% szinten szignifikáns.

Összefoglalás

Az 1990 körüli években Magyarország energiafelhasználása mintegy 20%-kal csökkent, ezen belül a szénfelhasználás a felére esett vissza. Ez nemcsak a szén-dioxid-kibocsátás, hanem az egyéb levegőszennyező anyagok kibocsátásának csökkenésével is járt. A helyi szennyezés csökkenésének következtében tisztábbá vált levegőn keresztül a felszínre érkező napsugárzás éves mennyisége megnőtt, a növekedés mértéke azonban nem szignifikáns. A derült napokon (amikor nem a felhőzet, hanem a levegő tisztasága szabályozza a levegő sugárzást átocsátó képességét) a napsugárzás növekedése nyáron nem éri el, télen viszont jelentősen meghaladja a szokásos szignifikancia szint szerinti mértéket. Minden bizonnyal a lakossági fűtés szénről gázra történő átállása azt eredményezte, hogy a derült téli napokon a felszínre mintegy 100 J/cm^2 -rel több napsugárzási energia érkezik. Ugyanakkor a tisztább légoszlop visszasugárzása jelentősen kisebb, így a felszín sugárzási energiamérlege végeredményben mintegy 18 J/cm^2 értékkel kisebb az 1990-es évek tisztább levegőjében, mint az 1980-as évtized szennyezettebb levegőjében, emiatt a mostani derült téli napokon mintegy 2 fokkal hidegebb van (a nagymértékű változékonyság miatt ez az érték sem szignifikáns).

Az előzetes várakozásunkhoz képest a kimutatott változások csekélyebbek, de olyan szempontból megnyugtatóak, hogy az emberi tevékenységgel szemben a természetes folyamatok erősebben ellenállóak, mint ahogy azt vártuk.

Irodalom

Magyar Statisztikai Évkönyv 1981, 1982, ..., 2000, KSH.

Dávid A., Takács O. és Tiringier Cs. 1990: *A sugárzási egyenleg eloszlása Magyarországon az 1951-1980-as időszak adatai alapján.* Az Országos Meteorológiai Szolgálat Kisebb Kiadványai 66. szám, Budapest

A SZERZŐK:

Major György kutatóprofesszor, BKÁE, Környezettudományi Intézet

Nagy Zoltán az Országos Meteorológiai Szolgálat osztályvezetője

1675 Budapest, Pf. 39

nagy.z@met.hu

Tóth Zoltán az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársa

1675 Budapest, Pf. 39.

toth.z@met.hu

A Környezettudományi Intézet sorozatának kiadványai

1. Burger Ferenc – Rabóczki Laura – Szabó Sándor: *Az önkéntes környezetvédelmi megállapodások alkalmazásának előkészítése*
2. Csutora Mária: *A környezetvédelmi projektek pénzügyi elemzésének módszertana*
3. Kovács Eszter: *Vállalati környezeti jelentések elemzése a nemzetközi tapasztalatok tükrében*
4. Kovács Nóra — Paulovits Gábor: *Ökológiai kockázatelemzés és –becslés, mint vizes élőhelyek kezelését megalapozó metodológia*
5. Tanyi Anita — Zilahy Gyula: *A tisztább termelést korlátozó szervezeti tényezők*
6. Fleischer Tamás — Magyar Emőke — Tombácz Endre — Zsikla György: *A Széchenyi terv autópálya fejlesztési programjának környezeti hatásvizsgálata*
7. Bela Györgyi — Fucskó József — Kajner Péter — Marossy Zoltán: *A környezetterhelési díjak bevezetésének vizsgálata*
8. Tombácz Endre — Marossy Zoltán: *Az IPPC direktíva alkalmazásának problémái az EU-ban*
9. Major György – Nagy Zoltán – Tóth Zoltán: *Magyarországi éghajlat-energetikai tanulmányok*

Előkészületben

Kálmán Edina: *Környezetvédelmi együttműködés az ellátási láncok mentén*

Galli Miklós — Zilahy Gyula: *A tisztább termelés bevezetésének lehetőségei a söriparban*

Kiss Károly: *Környezetvédelmi adóreformok Nyugat-Európában*