

A FELSZÍNI TALAJNEDVESSÉG-TARTALOM ÉS A PÁROLGÁS NUMERIKUS MODELLEZÉSE: GYAKORLATOK AZ OKTATÁSBAN

NUMERICAL MODELLING OF THE BARE SOIL SURFACE MOISTURE CONTENT AND EVAPORATION: EDUCATIONAL EXERCISES

Sürge Evelin, Czelnai Levente, Bali Gergely, Boronyák Virgínia, Cséke Dóra Csilla, Demeter Szilvia, Fejes Lilian, Kovács Ádám, Szabó Máté, Szekeres Levente, Szentes László Olivér, Tóth Gabriella, Várkonyi Anikó, Vaszkó András Imre, Virág Szabolcsné Németh Rita

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A., *surgeevelin@gmail.com, czelnai.levente@gmail.com, stangafon@hotmail.com, gini.boronyak@gmail.com, dcseke0109@hotmail.com, pirittotagyvelo@gmail.com, fejeslilian@gmail.com, kovadam94@yahoo.com, mateszabo930702@gmail.com, lev.szekeres@gmail.com, oliver.szentes@gmail.com, csigagabi@gmail.com, kisa93@gmail.com, tevavaszkovipmail.hu, nemrita@gmail.com*

Összefoglaló: A talaj nedvességtartalma és az evapotranspiráció változásainak megértése alapvető fontosságú ahhoz, hogy számszerűsíthessük a felszín-légkör kölcsönhatási folyamatokat a meteorológiában. E tanulmányban egy off-line módon futtatott talajmodell-vizsgálatot végzünk a talaj-felszínközeli levegő rendszer folyamatainak minél jobb megértése végett. Külön elemeztük a modell érzékenységét a talajtextúra-kombinációk változásaira, az átlagos vízvezető képesség számítási módjára és a párolgással szembeni felszíni ellenállás parametizálására. Az eredmények azt mutatják, hogy a felszíni talajnedvesség-tartalom időbeli változásait elsődlegesen a talajtextúra-kombináció határozza meg és csak másodlagosan az átlagolás és/vagy a parametizálás során alkalmazott eljárás. E két utóbbi hatás viszont fontosnak mutatkozott az éjjeli időszakban tapasztalható harmatképződés folyamatában.

Abstract. Understanding the changes of soil moisture content and evapotranspiration is of crucial importance to be able to quantify the land-surface-atmosphere interaction processes in the meteorology. In this study, a soil-model is tested in off-line mode to understand exchange processes in the soil-near-surface air system as well as possible. The sensitivity of the model is separately analyzed supposing different soil texture combinations, applying different soil water conductivity averaging procedures and soil surface resistance parameterizations for bare soil evaporation. The results reveal that soil surface moisture content changes are primarily determined by soil texture combinations and only secondary determined by averaging and/or parameterization procedures. The two latter effects seem to be important in the night-time period of the day, when dewfall is occurring.

Bevezetés. A felszíni talajnedvesség-tartalom és az evapotranspiráció alapvető fontosságú meteorológiai, talajtani és ökológiai (Ács *et al.*, 2015) változók. Tér- és időbeli változásaik igen nagyok lehetnek, ezért megfigyelésük (Posza és Stollár, 1983; Rajkai and Rydén, 1992; Rajkai, 2001; Rajkai, 2004; Shuttleworth, 1991) vagy modellezésük (Ács, 1999; Ács 2003; Ács 2005; Ács *et al.*, 2007; Ács *et al.*, 2008) nem egyszerű feladat. E változásokat meghatározó fizikai folyamatok kapcsolatrendszere ismertnek tekinthető (Ács *et al.*, 2000; Ács, 2008), sőt, a hazai gyakorlatban szerzett ismeretek oktatása is már lassan húsz éves múltra tekint vissza (Czucz és Ács, 1999; Ács és Lőke, 2001; Márffy és Ács, 2002; Ács és Drucza, 2003). E vizsgálatok eleinte többnyire off-line típusú vizsgálatok voltak, azaz, mért légköri határfeltételek alkalmazásával futtatták a különböző talajmodelleket. E megközelítés manapság is használatos egyszerűsége miatt, főleg az oktatásban, ahol a modell működését meghatározó minden elem hatása részletesen elemezhető (Ács, 2008). E tanulmány célja egy talajmodell-működési vizsgálat fontosabb eredményeinek tömör ismertetése és a legfontosabb következtetések levonása. A talaj-modell működésével az érzékenységi vizsgálatok során ismerkedtünk meg. Ezekből három érzékenységi vizsgálatot emelnénk ki: a talajtextúra-kombinációk változására, a

talaj vízvezető képesség átlagolási módjára és a párolgással szembeni felszíni ellenállás parametizálására való érzékenységi vizsgálatot. A vizsgálatokat a „Felszín-légkör kölcsönhatás” című tárgy gyakorlatainak keretében végeztük el. A tárgy az ELTE Meteorológiai Tanszékének 1. éves MSc oktatásában szerepel, és mint látható, e vizsgálat évfolyamunk közös munkájának eredménye. Mi ezúttal a „rendszer” működésével kapcsolatos ismereteinket bővítettük, ami egyébként az operatív gyakorlatban is jelentősen könnyíti a munkát.

Anyag és módszer. Talajmodell. A modell részletes leírása megtekinthető Ács (1999) vagy Márffy és Ács (2002) munkájában. A homok-vályog-vályog és az agyag-vályog-vályog talajtextúra-kombinációk talajadatait az 1. táblázatban láthatjuk. A modell futtatásakor használt paraméter-értékek és a kezdeti feltételek a 2. táblázatban láthatók. A modellezett talaj szerkezetet az 1. ábra mutatja be.

Légköri határfeltételek. A légköri határfeltételekről szintén részletesen olvashatunk Ács és Drucza (2003) vagy Ács (2008) munkájában. A meteorológiai állapotváltozókra vonatkozó légköri határfeltételeket a braunschweigi szinoptikus állomás 6 napos adatsora szolgáltat

ta, amely negyedórás időléptékben csapadék, léghőmérséklet, relatív nedvesség, szélesebbesség és globálsugárzás adatokat tartalmaz.

Érzékenységi vizsgálatok. Érzékenységi vizsgálatainkban három tényező hatását elemeztük: a talaj fizikai féleségének reprezentálása során használt talajtextúra-kombinációk hatását, a rétegek közötti vízvezető képesség átlagos értékének számítására szolgáló átlagolási módszerek hatását és legvégül a párolgással szembeni felszíni ellenállás parametrizálásának hatását. E tényezőket az alábbiakban részletesen ismertetjük külön-külön.

A talajtextúra-kombinációk változásaira való érzékenység. Vizsgáltuk a talajtextúra változásai iránti érzékenységet.

1. táblázat: A homok, a vályog, és az agyag fontosabb vízgazdálkodási paraméterei

Fizikai talajféleség	Vízgazdálkodási tulajdonságok			
	Ψ_s (m)	K_s (ms ⁻¹)	b	θ_s (m ³ m ⁻³)
Homok	-0,121	176 · 10 ⁻⁶	4,05	0,395
Vályog	-0,478	7 · 10 ⁻⁶	5,39	0,451
Agyag	-0,405	1,3 · 10 ⁻⁶	11,4	0,482

2. táblázat: A modell futtatásakor használt paraméter-értékek és a kezdeti feltételek

Név	Jelölés	Érték	Mértékegység
Talajréteg vastagság	D1 – 1. réteg	0,1	m
	D2 – 2. réteg	0,2	
	D3 – 3. réteg	0,3	
Talajnedvesség (száraz eset)	θ_1 – 1. réteg	0,10	m ³ m ⁻³
	θ_2 – 2. réteg	0,08	
	θ_3 – 3. réteg	0,06	
Levegő sűrűsége	ρ_a	1,2	kgm ⁻³
Víz sűrűsége	ρ_w	1000	kgm ⁻³
Pszichrometrikus állandó	γ	0,65	hPaK ⁻¹
Levegő állandó nyomáson vett fajhője	c_p	1004	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Vízgőzre vonatkozó gázállandó	R_v	461	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Víz párolgáshője	L	2,5 · 10 ⁶	Jkg ⁻¹
Csupasz talaj érdessége	z_0	0,01	m
Karmán konstans	k	0,41	-
Szélmérséklet magassága	D_{sdin}	10	m
Hőmérsékletmérés magassága	D_{sterm}	2	m
Stabilitási függvény (neutrális eset)	ψ_m	0	-
Stefán-Boltzman állandó	σ	5,67 · 10 ⁻⁸	Wm ⁻² K ⁻⁴
Talaj-növény rendszer rétegének emisszivitása	ϵ_{vg}	1	-
Száraz talaj albedója	α_b	0,15	-
Sun empirikus állandók	c_1, c_2, c_3	30; 3,5, 2,3	sm ⁻¹
Dolman empirikus állandók	c_4, c_5	3,5, -2,3	sm ⁻¹
Wallace empirikus állandók	c_6, c_7	2,4, -1,9	sm ⁻¹

A vízvezető képesség átlagolási módjára való érzékenység. Két talajréteg között a talaj vízvezető-képességét súlyozott számtani és mértani átlagolással becsüljük. A képletekben D_i az i -edik talajréteg vastagsága (2. táblázat), K_i pedig annak vízvezetőképessége (ms⁻¹). Ennek számítási módja Ács (2008) tanulmányában megtalálható:

$$K_{i,i+1} = \frac{D_i K_i + D_{i+1} K_{i+1}}{D_i + D_{i+1}} \quad i=1,2$$

és

$$K_{i,i+1} = \sqrt{K_i \cdot K_{i+1}} \quad i=1,2.$$

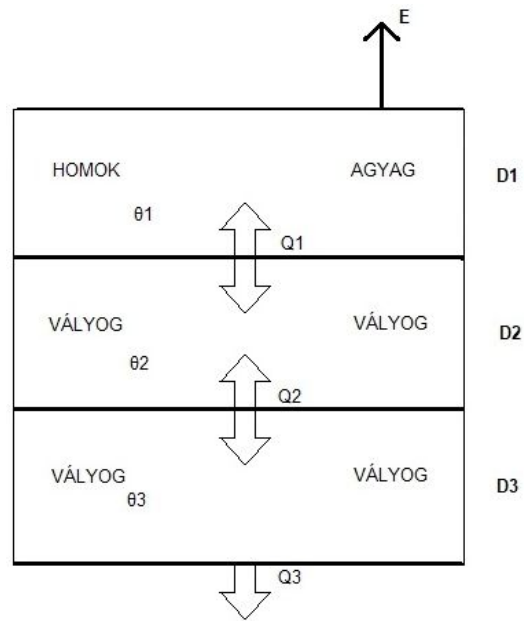
A párolgással szembeni felszíni ellenállás parametrizálására való érzékenység. Tanulmányunkban Sun (1982), Dolman (1993) és Wallace et al. (1999) felszíni ellenállás parametrizációit használtuk:

Sun (1982):

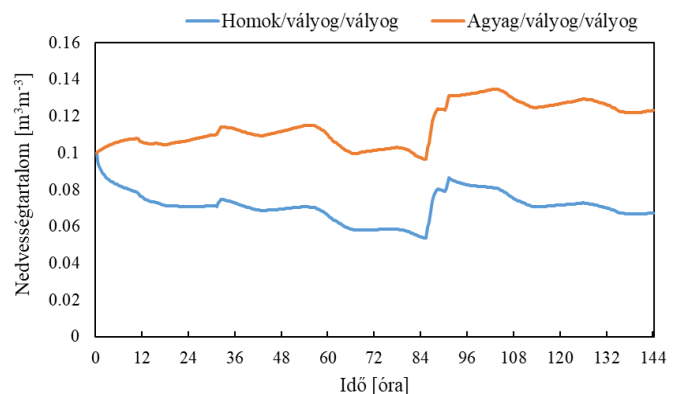
$$r^b = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\theta_{sl}}{\theta_1}\right)^{c_3}$$

Dolman (1993):

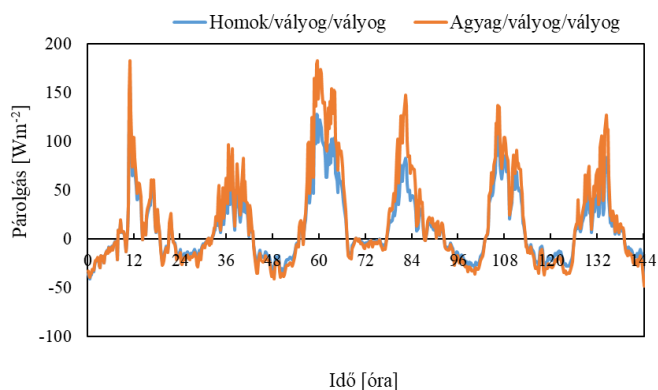
$$r^b = c_4 \cdot \theta_1^{c_5}$$



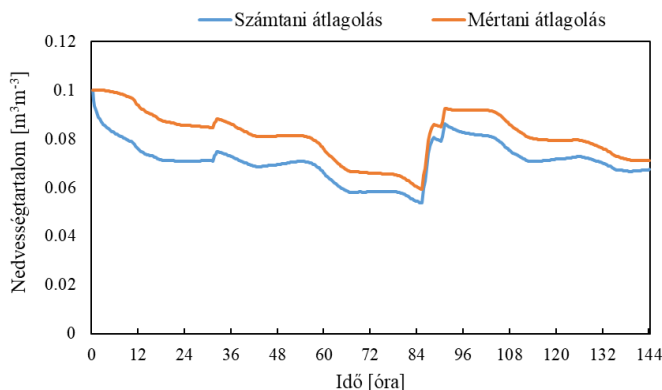
1. ábra: Sematikus ábra a modellezett talaj szerkezetéről



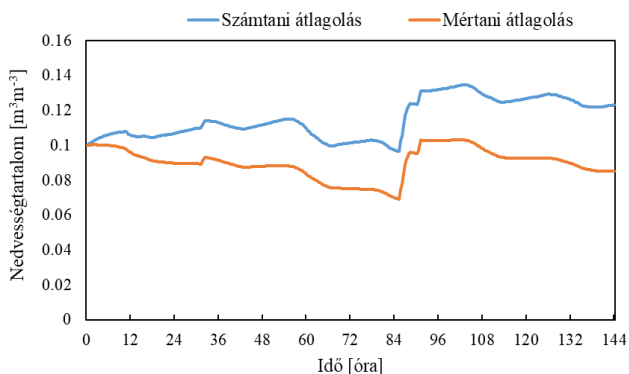
2. ábra: A csupasz-talaj felszíni rétege nedvességtartalmának időbeli változása különböző talajtextúra-kombinációk esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban



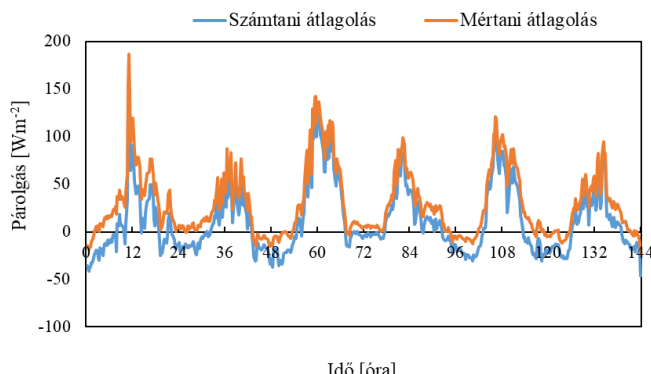
3. ábra: A csupasz-talaj felszíni rétege párolgásának időbeli változása különböző talajtextúra-kombinációk esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban



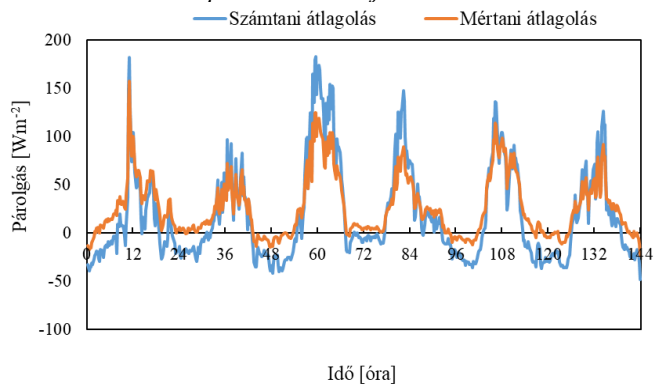
4. ábra: A felszíni homokréteg nedvességtartalmának időbeli változása a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban



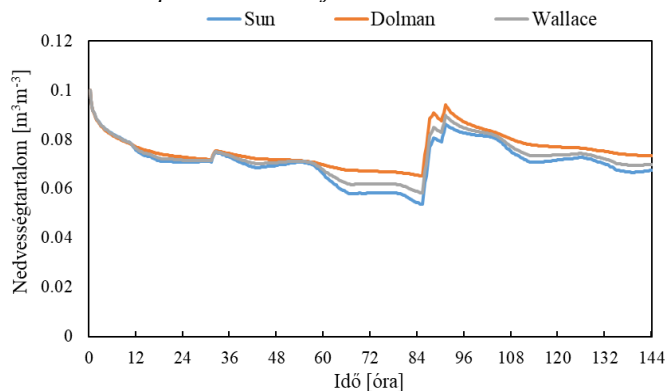
5. ábra: A felszíni agyagréteg nedvességtartalmának időbeli változása a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban



6. ábra: A felszíni homokréteg párolgásának időbeli változása a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban



7. ábra: A felszíni agyagréteg párolgásának időbeli változása a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban



8. ábra: A felszíni homokréteg nedvességtartalmának időbeli változása különböző párolgással szemben kifejlesztett felszíni ellenállás parametризációk esetén az 1992. április 28. - május 3. közötti időszakban

Wallace et al. (1999):

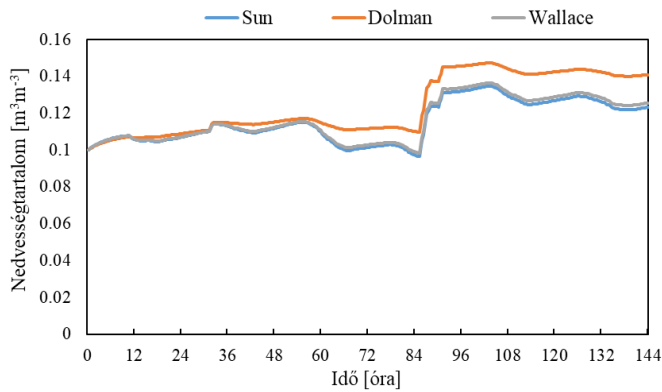
$$r^b = c6 \cdot \theta_1^7,$$

θ_1 felszíni talajnedvesség-tartalom, $c1$ [sm^{-1}], $c2$ [sm^{-1}], $c3$, $c4$ [sm^{-1}], $c5$, $c6$ [sm^{-1}], $c7$ empirikus állandók értékeit a 2. táblázat tartalmazza. θ_{s1} felszíni telítettségi talajnedvesség-tartalom értékek AcS (2008) munkájában találhatóak meg.

Eredmények. Dolgozatunkban a felszíni talajréteg nedvességtartalmának és párolgásának időbeli változásait vizsgáltuk, nevezetesen, e változások érzékenységét a talajtextúra-kombinációk változásaira, a vízvezető-képesség átlagolásának módjára és a párolgással szembeni felszíni ellenállás parametризálására. A felszíni ellenállás *Sun* (1982) parametризációjával és a vízvezető-

képesség számtani átlagolásával kapott eredményeket fogjuk referencia esetnek tekinteni.

Talajtextúra-kombinációk változásaira való érzékenység. A felszíni talajnedvesség-tartalom és a párolgás időbeli változásai a homok/vályog/vályog és az agyag/vályog/vályog talajtextúra kombinációk esetén a referencia esetben a 2. és a 3. ábrán láthatók. Szemléljük előbb a 2. ábrát! Láthatjuk, hogy ugyanarra a kezdeti talajnedvesség-tartalom értékre a homok nedves (jó a vízellátottsága, mivel szabadföldi vízkapacitása $0,135 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), míg az agyag száraz (a vízellátottsága alacsony, mivel szabadföldi vízkapacitása $0,367 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A homok nedves, ezért a víz gyorsan szivárog át rajta, aminek következtében már az első nap markáns talajnedvesség-

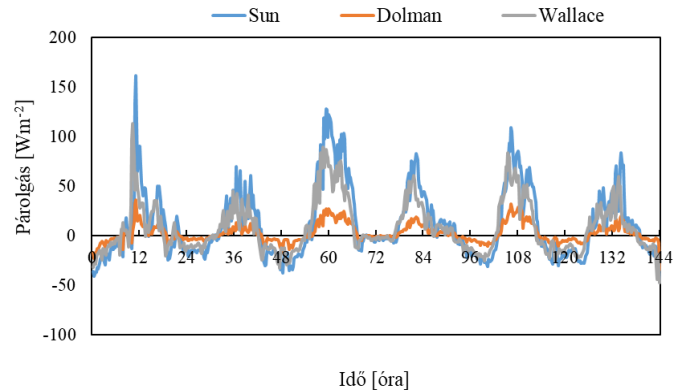


9. ábra: A felszíni agyagréteg nedvességtartalmának időbeli változása különböző párolgással szemben kifejtett felszíni ellenállás parametizációk esetén, 1992. április 28.- május 3. között

tartalom csökkenés figyelhető meg. Az agyag esetében kezdeti talajnedvesség-tartalom növekedést láthatunk, mivel igen száraz. Az is észrevehető, hogy a 2. nap végétől a homok és agyag talajnedvesség-tartalom görbéi szinte „párhuzamosan” futnak, és e párhuzamosság a kisebb (2. nap) és a nagyobb (4. nap) csapadékkal jellemzett napokon is fennáll. Nézzük most meg a párolgási görbéket! A párolgás erősen függ a talajnedvesség-tartalomtól, ezért nem meglepő, hogy a párolgási értékek tükrözik a nedvességi viszonyokat. Mivel a homok talajnedvesség-tartalma kisebb, mint az agyagé, értelemszerűen a homokos felszín párolgása is kisebb, mint az agyagos felszíné. A nappali (pozitív látens hőáram-sűrűség értékek) és éjszakai (negatív látens hőáram-sűrűség értékek, ami harmatképződést jelent) napszakaszok egyértelműen elkülöníthetők, a napi menetek hullámzásszerűek. Ez a talajnedvesség-tartalom esetén közelről sem ennyire kifejezett. Az éjjeli időszakokban a harmatképződés egyértelműen megmutatkozik, és ez a két talajtextúra-kombináció esetén hozzávetőlegesen azonos. Számszerűsítsük ennek közelítő értékét 1 m^2 -es területen! Feltéve, hogy a látens hőáram-sűrűség érték éjszaka -20 Wm^{-2} , és, ha ez egy órán keresztül fennáll, akkor a képződő harmat tömege négyzetméterként és óránként 29 g . Hasonló becslés adható az elpárolgott víz mennyiségére is. 50 Wm^{-2} -es nappali látens hőáram-sűrűség értékkel számolva, az 1 m^2 -es felszínről 8 óra alatt az elpárolgott víz mennyisége fél liter.

A vízvezető képesség átlagolásának módjára való érzékenység. A felszíni homok- (homok-vályog-vályog talajtextúra-kombináció) és agyagréteg (agyag-vályog-vályog talajtextúra-kombináció) időbeli változásait a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén a 4. és az 5. ábrán láthatjuk. Homok esetén a számtani átlagolással kapott görbe a mértani átlagolással kapott görbe alatt vonul. Agyag esetében ez a helyzet fordított. Megfigyelhető az is, hogy a homokra és az agyagra vonatkozó görbék közötti eltérések észrevehetően különböznek. Ezek a különbségek nagyobbak agyag, mint homok esetében. A legnagyobb értékek $0,03\text{--}0,04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ körül vannak.

Az ábrák azonban annyiban hasonlóak, hogy a második és a negyedik nap csapadéktevékenysége mindkét esetben jól kivehető. A párolgási görbék összhangban vannak a talajnedvesség-tartalom görbékkel. Így, homok esetén a számtani átlagolással kapott párolgás kisebb, mint a mértani átlagolással kapott párolgás.



10. ábra: A felszíni homokréteg párolgásának időbeli változása különböző felszíni ellenállás parametizációk esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakban

golással kapott párolgás. Agyag esetén fordítva, a számtani átlagolással kapott párolgás nagyobb, mint a mértani átlagolással kapott párolgás. Kiemelendő, hogy az éjszakai harmatképződés kiemelten érzékeny a vízvezető képesség átlagolásának módjára. Ez az érzékenység a nappali időszakban is számottevő. A felszíni homokréteg nedvességtartalmának időbeli változását a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén a 6. ábra, míg a felszíni agyagréteg párolgásának időbeli változását a vízvezető képesség számtani és mértani átlagolása esetén az 1992. április 28. és május 3. közötti időszakra a 7. ábra mutatja be.

A talajnedvesség párolgással szembeni felszíni ellenállás parametizálására való érzékenysége. A felszíni homok és agyag talajnedvesség-tartalmának időbeli változása különböző párolgással szembeni felszíni ellenállás parametizálásokra a 8. és a 9. ábrán látható. Mint ahogy már említettük, mindezen esetekben a számtani átlagolással kapott vízvezető képesség értékeket használtuk. Mindkét ábra kapcsán elmondható, hogy az első napon még nincs szignifikáns eltérés a különböző parametizációkkal kapott görbék között. A harmadik naptól kezdve az eltérések már markánsabbak mind a nap délutáni, mind az éjszakai feltöltődési, mind a csapadékhullás időszakaiban. A Wallace- és a Sun-féle parametizációkkal kapott görbék igen közel futnak egymáshoz, a Dolman-féle parametizációval kapott görbe mindkét talajtextúra-kombináció esetén jelentősen eltér ezekről. A mértani átlagolás alkalmazásával – e görbék bemutatását most terjedelmi okok miatt mellőzzük – ezek az eltérések még jelentősebbek. Ebben az esetben a Sun és a Wallace parametizációjával kapott görbék közötti eltérések nagyobbak, mint amit láthatunk a 8. vagy a 9. ábrán. A számtani átlagolással kapott maximális eltérés $0,01 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, míg a mértani átlagolással kapott maximális eltérések $0,03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ körüliek. A felszíni homok és agyag párolgásának időbeli változását különböző felszíni ellenállás parametizációk esetén a 10. és a 11. ábra szemlélteti. Vegyük észre, hogy Dolman-féle parametizációval kapott legmagasabb talajnedvesség-tartalom értékekhez tartozó párolgás értékek a legalacsonyabbak, míg a Sun-féle parametizációval kapott legalacsonyabb talajnedvesség-tartalom értékekhez tartozó párolgás értékek a legmagasabbak. Vajon elmentmondásos-e ez? Nem, ugyanis Dolman (1993) és Sun (1982) parametizációja jelentősen eltérnek egymástól. Tegyük fel, hogy a felszíni talajnedvesség-tartalom érték

0,07 m³m⁻³. E talajnedvesség-tartalom értékre vonatkozóan a Sun-féle felszíni ellenállás érték 217,3 sm⁻¹, míg a Dolman-féle felszíni ellenállás érték 1586,1 sm⁻¹, ami több mint hétszerese a Sun-féle értéknek. Tehát ugyanakkora talajnedvesség-tartalom értékre a Dolman-féle parametrizációval kapott párolgás sokkal kisebb, mint a Sun-féle parametrizációval kapott párolgás a nagyobb felszíni ellenállás értékek miatt. Megemlíthető az is, az éjszakai harmatképződés nem csupán a vízvezető képesség átlagolásának módjára, hanem a felszíni ellenállás parametrizálására is rendkívül érzékeny. Ez egyértelműen látható a felszíni homokrteg esetén. Ugyanis, a felszíni agyagrétegnél tapasztalt 10 Wm⁻²-es legnagyobb eltérések a felszíni homokrteg esetén egyes napokon akár a kétszeresére is növekedtek.

Konklúzió. Tanulmányunkban – a gondolat-kísérletek számítógépes megvalósításával – részletesen tanulmányoztuk a talajnedvesség-tartalom és a csupasz talaj párolgás időbeli változásainak érzékenységét a talajtextúra-kombinációk (homok-vályog-vályog/agyag-vályog-vályog) változásaira, a vízvezető képesség átlagolásának módjára és a párolgással szembeni felszíni ellenállás parametrizálására. Amire rájöttünk, az az, hogy a tényezők (a talaj fizikai féleségének hatása/a rétegek közötti vízvezető képesség átlagolása, a felszíni ellenállást jellemző empirikus képletek közötti eltérések) markáns különbözősége ellenére, egyiknek hatása sem hanyagolható el. A talajtextúra-kombináció alapvetően meghatározza a felszíni talajréteg nedvességtartalom változásainak tendenciáját. Azt is láthattuk, hogy az átlagolásra és a parametrizálásra való érzékenység igen nagy a nap éjjeli időszakában, amikor a harmatképződés a jellemző folyamat. Ugyan nem szemléltettük, de megemléltettük, hogy a parametrizálásra való érzékenység nagyobb-nak mutatkozott a mértani, mint a számtani átlagolás esetén. A modell kitűnő játékeszköznek bizonyult a „rendszer” működésének megismerésére. Ez a „rendszer” ezúttal igen egyszerű volt: egy talajmodell, melyet off-line módon futtattuk mért légköri határfeltételek segítségével. A Tanszék számítógép kapacitása egyelőre csak ezt a vizsgálati módszert engedi meg. Meggyőződésünk, hogy előbb-utóbb, de inkább előbb, mint utóbb, a számítógép kapacitás növekedésével és az informatikai háttér fejlődésével on-line típusú vizsgálatokat is végezhetünk majd gyakorlat óráinkon. Az on-line típusú vizsgálatokban a talaj és a légkör kölcsönhatásban vannak, így a „rendszer” működése sokkal mélyebben és szélesebb kitekintésben ismerhető meg. Feltételezzük, hogy ennek tükrében a most kapott érzékenységi vizsgálati eredményeink is módosulni fognak. Számunkra azonban az off-line módon szerzett tapasztalatok voltak, vannak előtérben (Ács, 2008).

Köszönetnyilvánítás. E tanulmány megírásához a lelkesítő buzdítást és a motivációt dr. Ács Ferenc, a Felszín-légkör kölcsönhatás vezető oktatója adta. Nagyon szépen köszönjük e segítségét, közbenjárását, ami mindenféleképpen színesebbé tette a tárgyat is és a tanulmányainkat is.

Irodalom

Ács, F., 1999: The Penman-Monteith concept based land-surface model PMSURF. *Időjárás* 103, 19–36.

- Ács, F., Hantel, M. and Unegg, J. W., 2000: Climate Diagnostics with the Budapest-Vienna Land Surface Model SURFMOD. *Austrian Contributions to the Global Change Program, National Committee for the IGBP, Austrian Academy of Sciences*, pp. 116
- Ács, F. és Lőke, Zs., 2001: Biofizikai modellezés az agrometeorológiában. *Légkör* 46(3), 2–7.
- Ács, F. és Drucza, M., 2003: A légköri rétegződés hatása a szárazföldi felszíni turbulens áramok intenzitására. *Légkör* 48(2), 9–16.
- Ács F., 2003: On the relationship between the spatial variability of soil properties and transpiration. *Időjárás* 107, 257–272.
- Ács, F., 2005: On transpiration and soil moisture content sensitivity to soil hydrophysical data. *Bound. Layer Meteorol.* 115, 473–497.
- Ács F., Breuer, H., és Szász, G., 2007: A tényleges párolgás és a talaj vízkészlet becslése tenyészidőszakban. *Agrokémia és Talajtan* 56, 217–236.
- Ács, F., Horváth, Á., és Breuer, H., 2008: A talaj szerepe az időjárás alakulásában. *Agrokémia és Talajtan* 57, 225–238.
- Ács, F. 2008: A talaj-növény-légkör rendszer meteorológiai alkalmazású modellezése. Alkalmazások a tudományban és az oktatásban. *ELTE Eötvös Kiadó*, Budapest, ISBN 963 868 9511, pp. 249
- Ács, F., Rajkai, K., Breuer, H., Mona, T., and Horváth, Á., 2015: Soil-atmosphere relationships: The Hungarian perspective. *Open Geosciences* 7, 395–406.
- Czucz, B. és Ács, F., 1999: A labilis rétegződés parametrizálása a PMSURF növénytakaró modellben: konvergencia vizsgálat empirikus módszerekkel. *Légkör* 44(2), 2–6.
- Dolman, A., 1993. A multiple-source land-surface energy balance model for use in general circulation models. *Agric. Meteorol.* 65, 21–45.
- Márfy J. és Ács F., 2002: A csupasz talajfelszínközeli réteg nedvességi viszonyainak modellezése a Penman-Monteith-féle képlet alapján. *Légkör* 47(3), 23–26.
- Rajkai K., and Rydén, B. E., 1992: Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma* 52, 73–85.
- Rajkai K., 2001: Mérés, becslés és modellalkalmazás a talajvízgazdálkodás témakörben. *Habilitációs Értekezés tézisei*, (MTA TAKI Herman Ottó út 15., 1525 Budapest), pp. 22
- Rajkai K., 2004: A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban. *MTA talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet*, ISBN 963 214 752 9, Budapest, pp. 208
- Shuttleworth, J. W., 1991: Evaporation Models in Hydrology. in *Schmugge T. J. and Andre J.-C.* (eds.): Land surface evaporation: measurement and parameterization. *Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg*, 93–120.
- Posza, I. és Stollár, A., 1983: A tényleges párolgás számításához használt növény-konstansok értékei többévi mérés alapján. *Időjárás* 87, 170–177.
- Sun, S. F., 1982: Moisture and heat transport in a soil layer forced by atmospheric conditions. *M.S. Tesis, Dept of Civil Engineering, University of Connecticut*, pp.72
- Wallace, J. S., Jackson, N. A. and Ong, C. K., 1999: Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya. *Agric. For. Meteorol.* 94, 189–202.