

A MŰHOLDAS TALAJNEDVLESSÉG KLIMATOLÓGIAI ALKALMAZHATÓSÁGA

CLIMATOLOGICAL APPLICATION OF SATELLITE SOIL MOISTURE

Breuer Hajnalka

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a, breuer.hajnalka@ttk.elte.hu

Összefoglalás. A talaj nedvességtartalma egyszerre mutatja a hőmérsékletben és a csapadékban jelentkező változásokat, és jelentősen befolyásolja a mezőgazdasági termelést. Ezért fontos, hogy az egész Földre kiterjedő mérésen alapuló talajnedvesség adatbázis is rendelkezésre álljon az éghajlatváltozási vizsgálatokhoz. Az Európai Űrügynökség műholdas méréseken alapuló talajnedvesség adatbázisát mérésekkel vetjük össze, hogy bemutassuk az adatbázis előnyeit és hátrányait. Az eredmények azt mutatják, hogy az adatbázis individuális rácsponthoz viszonyított időbeli változások vizsgálhatók, de fenntartással kell kezelni azon területeket, ahol öntözés zajlik.

Abstract. The soil moisture content shows the coupled changes in temperature and precipitation and has large impact on agriculture. Thus, it is important to have a global soil moisture database readily available for climate change analysis. Here the advantages and disadvantages of the European Space Agency's satellite measurement-based soil moisture database is shown comparing with in situ soil moisture measurements. Results show that relative changes in time can be analysed at individual grid points, while areas with irrigation must be treated with caution.

Bevezetés. A talajnedvesség, a párolgáson keresztül jelentős hatással bír a légköri folyamatokra, évszakos változékonysága befolyásolhatja a hőhullámok erősségét (Fischer et al., 2007), az árvizeket okozó konvektív csapadék mennyiségét (Saini et al., 2016), sőt a monszun bekövetkezési idejét is (Zuo és Zhang, 2007). Éppen ezért fontos a mérése és területi eloszlásának ismerete. A pontos területi eloszláshoz kiterjedt mérőhálózatra lenne szükség, mely nem kivitelezhető. A távérzékelés fejlődésével a talajnedvesség mérés is részben kiköltözött az űrbe, műholdak segítségével a talaj felső rétegének nedvességtartalmáról kaphatunk információt. E tanulmányban arra a kérdésre igyekszünk választ adni, hogy használható-e klimatológiai vizsgálatokra a távérzékeléssel kapott talajnedvesség.

Adatok. Az Európai Űrügynökség (ESA) kezelésében az Éghajlatváltozási Kezdeményezés (Climate Change Initiative – CCI) keretében a talajnedvesség távérzékelésen alapuló klimatológiai adatbázisának létrehozása kitüntetett szerepet kap. Az ESA talajnedvesség adatbázisa (Dorigo et al., 2017; Gruber et al., 2017; Gruber et al., 2019) napi szinten, 1978 novemberétől, 0,25° x 0,25° térbeli felbontás mellett áll rendelkezésre, időszakosan bővítve újabb mérésekkel.

Az ESA CCI programjában aktív és passzív műholdas távérzékelési módszerrel meghatározott talajnedvesség egyaránt rendelkezésre áll, valamint ezek kombinációja is. A tanulmányban a kombinált adatsort használjuk. A műholdas talajnedvesség mérés alapja a száraz talaj és a benne levő víz dielektromos tulajdonságai között fennálló jelentős különbség. A felszínre kibocsátott vagy arról reflektált mikrohullámú sugárzás majdnem lineáris kapcsolatot mutat a talaj-víz keverési aránnyal (Dorigo et al., 2017). A talajban levő víz és levegő térfogatának meghatározásához ugyanakkor szükséges egy referencia talajadatbázis, melyben a talaj hidrofizikai tulajdonságai ismertek. A kombinált ESA adatsor esetén a műholdas produktum egy adatszűrősen megy át, melynek fő lépése a GLDAS (Globális

Felszíni Adatasszimilációs Rendszer – Rodell et al., 2004) felszín modellhez történő skálázás. A GLDAS, rendszerét tekintve egy felszíni modell, melybe műholdas és felszíni megfigyelések kerülnek asszimilálásra, hogy a felszíni áramok és a felszíni/talaj állapotjelzők minél pontosabban ismertek legyenek. A modellhez történő illesztést követően minden egyes műholdas produktumhoz egy hibakovariancia mátrixot állítanak elő a GLDAS modellhez képest. A végső kombinált produktum az adott napon rendelkezésre álló műholdas adatainak a hibakovariancia-mátrixszal történő súlyozásával áll elő (Gruber et al., 2019). Fontos megjegyezni, hogy a modellhez történő illesztés miatt, az ESA talajnedvesség értékek nem csökkennek a hirtelenséggel, annak ellenére, hogy a talaj felső 5 cm-es rétegében az ilyen jellegű száradás természetes.

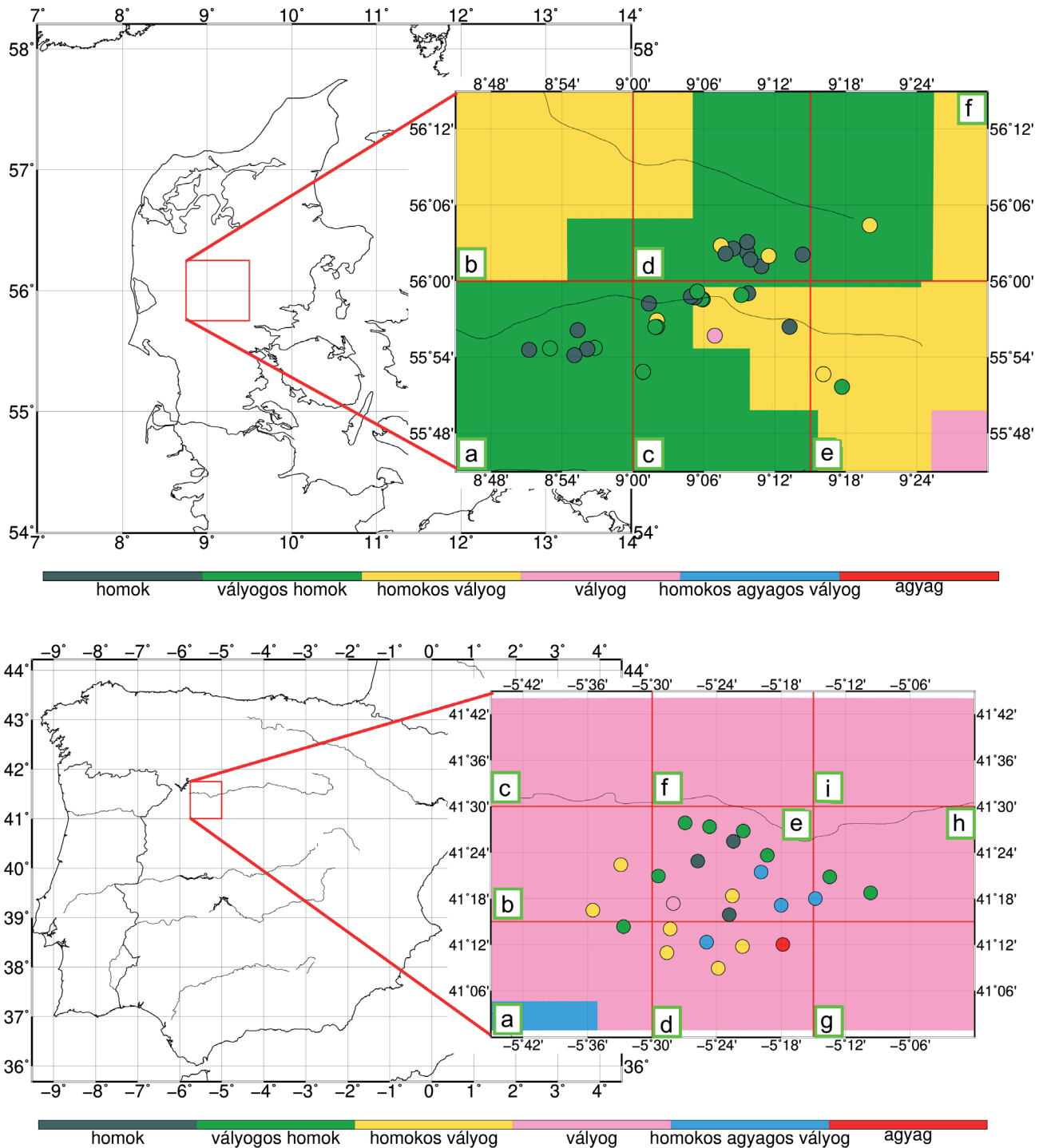
A GLDAS modellhez történő skálázás a különálló aktív és a passzív adatsorok esetén is szükséges lépése a talajnedvesség előállításának. A közbeiktatott modell így hibaforrást jelent a végső produktum abszolút-értékében, amennyiben a modellben szereplő talaj- és felszínhasználati információk nem kellően pontosak, ugyanakkor az időbeli változékonyság adott rácsponthoz viszonyított befolyásolt. E tanulmányban azt vizsgáljuk, hogy az ESA CCI kombinált talajnedvesség adatbázisban elérhető információ mennyire közelíti a valóságot. Mivel a műholdas talajnedvesség a talaj felső, maximum 5 cm-es rétegére vonatkozik, kevés olyan mérési program van, ahol rendelkezésre áll ilyen jellegű információ.

Európában lokálisan egy-egy helyszínen elérhető a felső réteg talajnedvesség-tartalmáról információ, de tekintve a műholdas adatbázis térbeli felbontását, olyan adatbázisokat kerestünk, melyek egy műholdas rácson belül több mérést is tartalmaznak. Al-Yaari et al. (2019) a Nemzetközi Talajnedvesség Mérőhálózatban (ISMN – Dorigo et al., 2011) megtalálható mérésekkel végeztek összehasonlítást. Munkájukban minden olyan mérést figyelembe vettek, mely a 0–5 cm-es rétegben rendelkezésre állt, akkor is, ha

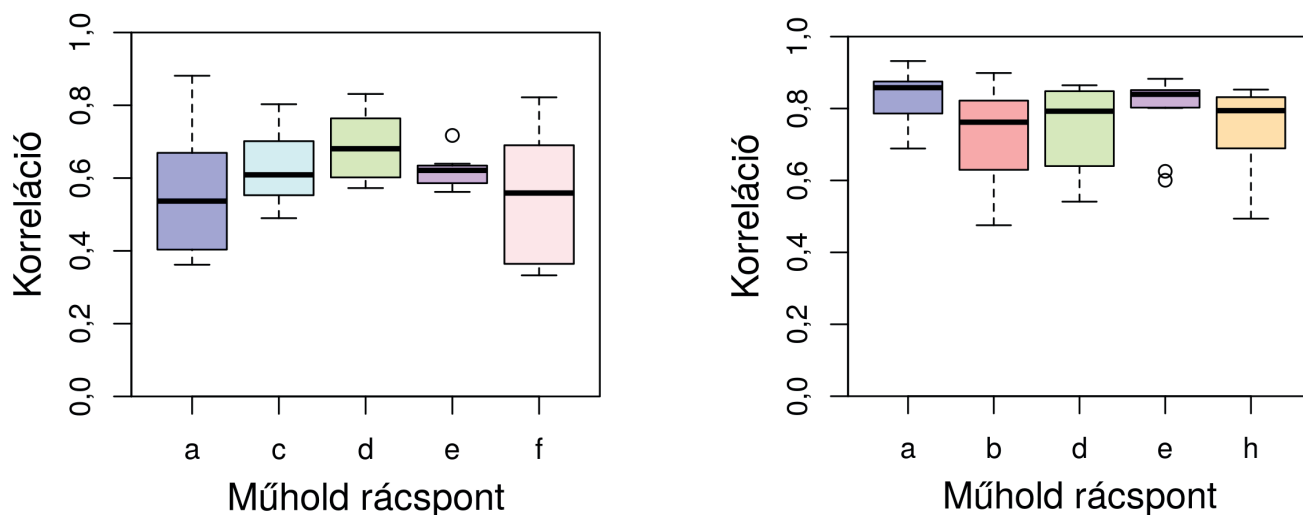
csak egy mérés volt egy műholdas rácson belül, valamint az összesített eredmények közé csak azon állomások adatai kerültek be, melyek korrelációja magasabb volt, mint 0,5. Eredményeik alapján az ESA CCI adatbázisa az elérhető távérzékelési adatbázisok közül a legjobb minőségű, Európára átlagosan 0,6 volt a korreláció, a hiba $0,02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, a négyzetes hiba pedig $0,06 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ volt.

E tanulmányban két, az ISMN adatbázisból elérhető mérőhálózat adatsorait használtuk, melyek a Dániai Hidrológiai Megfigyelő Központ HOBE (Bircher et al., 2011)

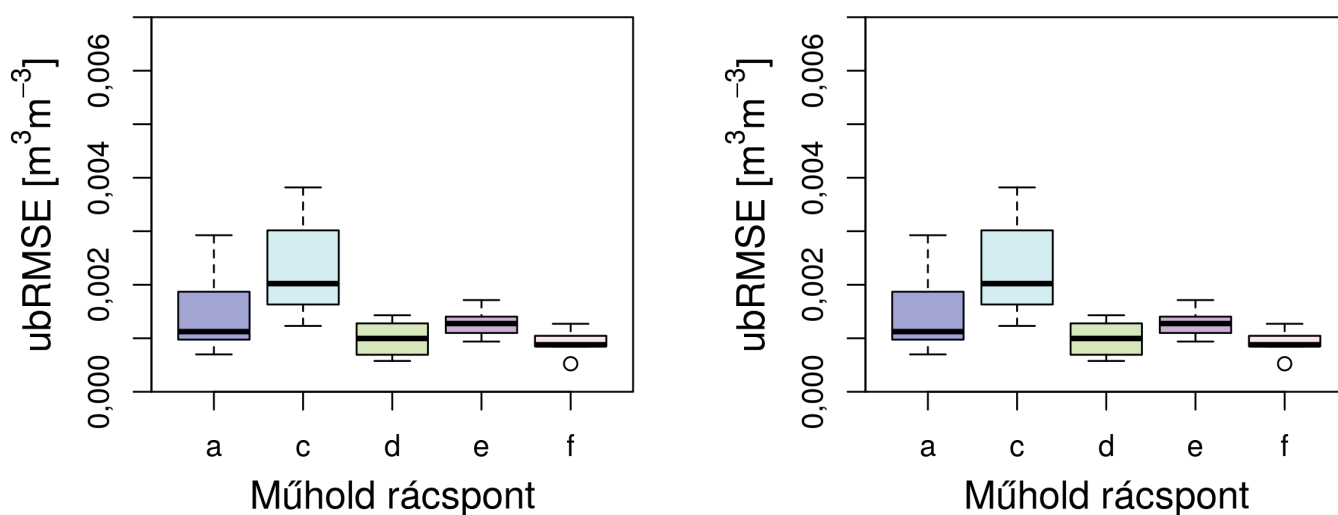
és a Spanyolországi Salamanca Egyetem REMEDHUS (Gonzales-Zamora et al., 2019; Martínez-Fernandez and Ceballos, 2003) projektjeihez kapcsolódnak. A dániai adatbázisban 32, a spanyolországban 24 állomás adatai találhatóak meg, melyeken különböző időszakokban folytattak méréseket 2006-tól, illetve 2000-től kezdve (1. ábra). A HOBE mérései esetén többször csak időszakos mérések állnak rendelkezésre, míg a REMEDHUS esetében a 24 állomás méréseinek száma kevésbé ingadozott a vizsgálati időszakban.



1. ábra: A vizsgálatban használt két mintaterület (fent) a dániai HOBE és (lent) a spanyolországi REMEDHUS. A háttér színezése a FAO USDA talajtextúrát követi, míg az egyes állomási pontok színezése a helyszíni talajmintákból megállapított USDA talajtextúrának felel meg. A kivágoton piros vonalak jelzik a mintaterületre eső műholdas rácspontok területét, zöld keretes négyzetekben azok azonosító jele található.



2. ábra: Napi adatokból előállított Spearman-korreláció évenkénti változékonysága az egyes műhold rácspontokban, bal) a dániai, jobb) a spanyolországi mintaterületen, a betűk az 1. ábrán található műholdas rács jelöléseket jelentik



3. ábra: Napi adatokból előállított torzítatlan négyzetes hiba (ubRMSE) évenkénti változékonysága az egyes műhold rácspontokban, bal) a dániai, jobb) a spanyolországi mintaterületen, a betűk az 1. ábrán található műholdas rács jelöléseket jelentik

Amint az 1. ábrán látható, az ESA CCI rácsban (piros vonalak) a GLDAS modell által használt talajtextúrák egyes állomások esetén jelentősen eltérnek a helyszíni mérésekből megállapított talajtextúráktól. Az eltérő talajtextúrának a talajnedvesség abszolút értékére van hatása, hiszen a tévesen jellemzett talajtextúra esetén a talaj víztartó- és vízvezető-képessége eltér, így az illesztett talajnedvesség értékek más intervallumban változhatnak.

Módszer. Az adatsorokat napi bontásban, és abból származtatva évi, illetve havi átlagban az állomásonként elérhető teljes időszakra vizsgáltuk. A vizsgált időszak a HOBE esetében 2010–2017, a REMEDHUS esetében 2006–2017 volt, az elérhető adatok függvényében. Minden adatsorra összehasonlítottuk a mérések átlagát, interkvartilis és interdecilis terjedelmét az adott ESA CCI adatbázisban levő rácspontokban. Az adatsorok nemnormális eloszlása miatt a Spearman-korrelációt (Wilks, 2011) is meghatároztuk a lineáris korreláció mellett. A műholdas talajnedvesség vizsgálatokban ún. torzítatlan négyzetes hibát (ubRMSE) határoznak meg (Entekhabi et al., 2010), mely kisebb mér-

tékben tartalmazza a talajnedvesség évszakos változékonyságából eredő hibákat,

$$ubRMSE = \sqrt{[(\bar{\theta}_m - \bar{\theta}_m^-) - (\bar{\theta}_s - \bar{\theta}_s^-)]^2}, \quad (1)$$

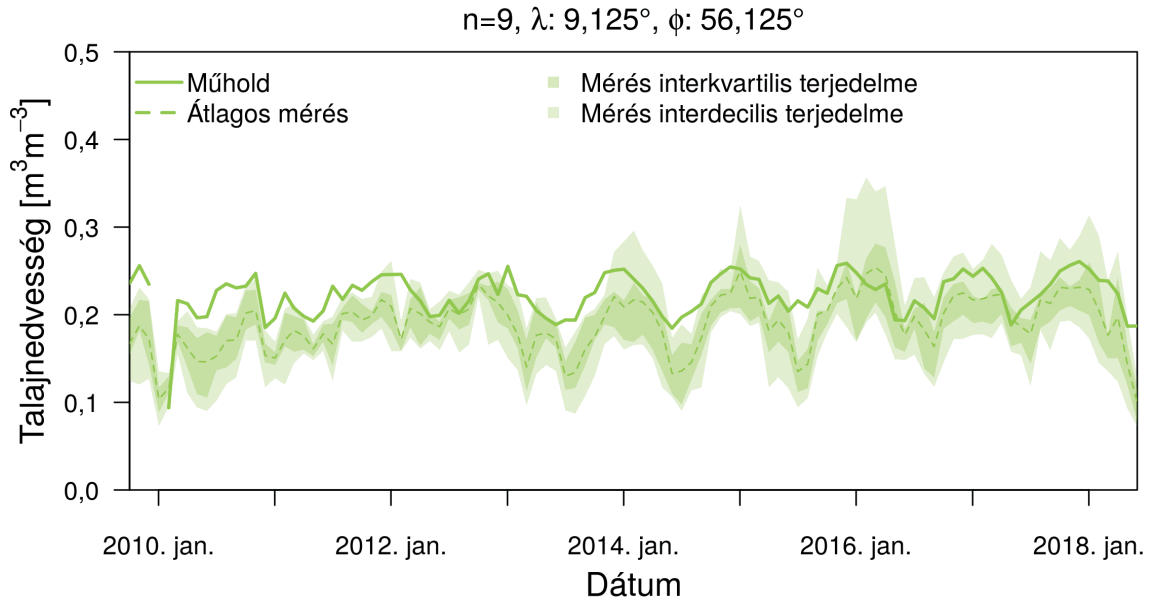
ahol m alsó index a mérési, s pedig a műholdasat jelenti adatsort. Az ubRMSE értékei 1–2 nagyságrenddel kisebbek, mint a standard négyzetes hibáé (RMSE).

A statisztikai számításokhoz és az adatsorok ábrázolásához az R programot használtuk (R Core Team, 2019), a térképek pedig a GMT (Generic Mapping Tools – Wessel et al., 2013) szoftverrel készültek.

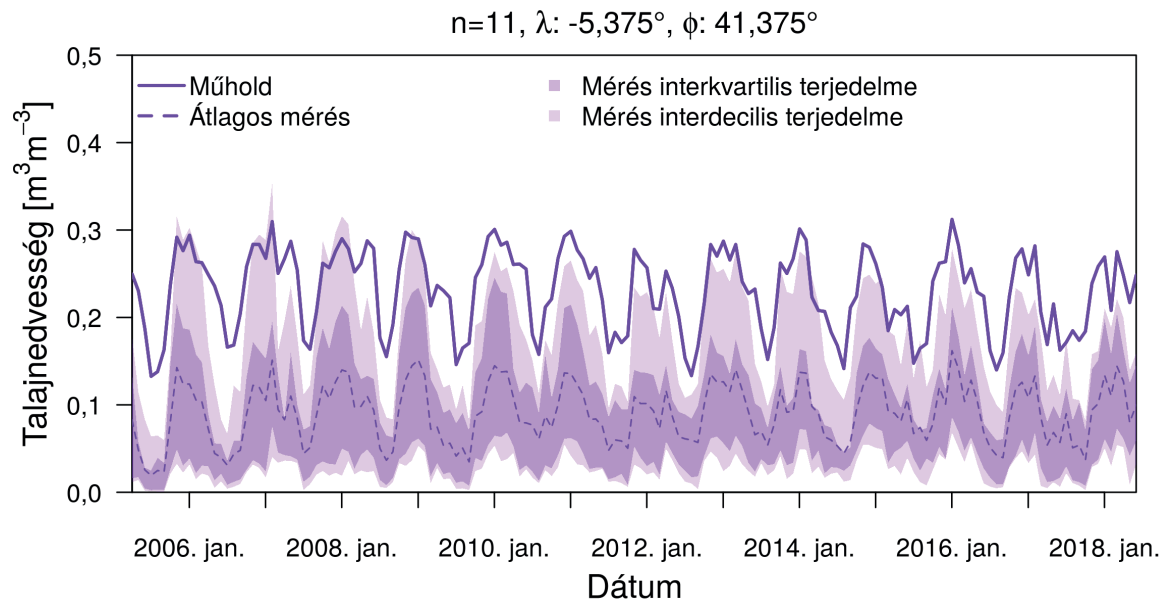
Eredmények. A Spearman-korreláció (2. ábra) és az ubRMSE (3. ábra) értékei a két mintaterület esetén jelentősen eltérnek. A dániai területen a műholdas adatok az éven belüli menetet kevésbé követik (korreláció átlaga 0,6 körüli), ugyanakkor az ubRMSE értékei kisebbek. A műholdas adatbázishoz használt talajtextúra a HOBE területén közelebb esik a ténylegeshez, a homok és a vá-

lyogos homok textúrák hasonló víztározó és vezetőképességgel rendelkeznek. A hasonlóság magyarázza a kisebb ubRMSE értékeket. A REMEDHUS esetben a műholdas vályog helyett homok, vályogos homok, sőt agyag textúra is megtalálható, melyek víztározó képességei jelentősen

Az eltérő textúra önmagában a korrelációt nem rontja el szükségszerűen, ahogyan ez a REMEDHUS esetében is látható: a különböző textúrák ellenére a Spearman-korreláció 0,8 körüli. A HOBE terület szinte teljes egészében mezőgazdasági terület, ahol kiterjedt csatornahálózat



4. ábra: Havi átlagos talajnedvesség változása a dániai mintaterület, 1. ábrán „d”-vel jelölt műhold rácsában. (n : rácsban található állomások maximális száma, λ : földrajzi hosszúság, ϕ : földrajzi szélesség, a koordináta a műholdas rácsponjtát jelöli)



5. ábra: Havi átlagos talajnedvesség változása a spanyolországi mintaterület, 1. ábrán „e”-vel jelölt műhold rácsában. (n : rácsban található állomások maximális száma, λ : földrajzi hosszúság, ϕ : földrajzi szélesség, a koordináta a műholdas rácsponjtát jelöli)

(pl. hasznos vízkészlet különbség $\approx 0,1 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) eltérnek (Cosby, 1984). A rosszul megadott talajtextúra miatt, a műholdas adatok szisztematikusan felülbecslik a helyszíni méréseket. A REMEDHUS adatsor d rácsponjtában az egyik legnagyobb a szórás az egyes állomások talajtextúrái között van és ebben a rácsponjtban a legtöbb mérés is, ami megnöveli az ubRMSE szórását.

található és öntözés is zajlik. Mivel az öntözésből eredő nedvességtöbblet nem számítható egy globális vízmérleg modell esetén, ezért az ebből eredő nedvességi változások nem jelennek meg a műholdas adatsorban.

A REMEDHUS területén hasonló öntözési tevékenységet nem folytatnak.

Az ESA CCI talajnedvesség adatsor elsődleges célja a klimatológiai alkalmazás, így a havi átlagolt értékeket is megvizsgáltuk, műholdas rácspontonként. A két mintaterületről egy-egy rácsponthoz tartozó mérési adatsort mutatunk be, mely rácsponthoz tartozóan minél több, ugyanakkor minél stabilabb állomásszám tartozik. A HOBE területén a *d* jelű rácspontban összesen 9 állomás található. A 9 állomás közül 2010 és 2017 között átlagosan 7 állomás üzemelt egyszerre a nyári időszakban, a téliben legkevesebb 3, legtöbb 6. A 9 állomásból 7 homok textúrával jellemzett, a műholdas vályogos homok helyett. A hasonló hidrofizikai tulajdonság jól látszik a 4. ábrán, ahol a mérések interkvartilis terjedelme kicsi, átlagosan $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ alatti. Cosby (1984) számításai alapján a homok és a vályogos homok hervadáspontra $0,01 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, illetve $0,028 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, míg szabadföldi vízkapacitása $0,192 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, illetve $0,283 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, így a műholdas talajnedvesség értékek természetesen felülbecsültek. Az időszak végén az egyik homokos vályog textúrájú állomáson magasabb talajnedvességet mértek, mint az időszak elején, átlagosan $0,196 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ helyett $0,285 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ -t. Ennek hátterében nagy valószínűséggel a területen folyó mezőgazdasági művelés áll, ám erről nincs elérhető információ. A magasabb nedvességtartalomnak köszönhetően a műholdas értékek az időszak második felében már közelebb haladnak a mérések átlagához. Az időszakos eltérések ellenére a Spearman-korreláció $0,71$, az ubRMSE $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, míg az RMSE $0,038 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

A REMEDHUS területen található *e* jelű műholdrácspan a GLDAS vályog textúra csupán 1 állomásra jellemző, míg 5 állomás esetén vályogos homok, 3 esetén homok, 2 esetén homokos agyagos vályog, 1 homokos vályog található. Tekintve, hogy a vályog magasabb hervadáspontra, szabadföldi vízkapacitással és telítési talajnedvességgel rendelkezik, mint bármelyik felsorolt textúra, ezért itt is felülbecslés figyelhető meg (5. ábra). Ebben az esetben azonban a textúrák hidrofizikai tulajdonságai közötti különbségek jelentősebbek, mint a HOBE esetén, így a rácspontra átlagolt mérési értékek télen $0,15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ -rel is kisebbek, mint a műholdas adatsor. Ugyanakkor a műholdas adatok időbeli változékonysága jól követi a mérések átlagának változását. Ezt jól tükrözi a teljes időszakra vett Spearman-korreláció, mely $0,873$, ugyanakkor a rossz talajtextúrából eredő becslés miatt az ubRMSE $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, míg az RMSE $0,142 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

Összefoglalás. A különböző területekről származó adatsorok összehasonlításából látható, hogy a műholdas talajnedvesség mérés legnagyobb hibája a felszín helytelen információjának kezelése, illetve maga a modellhez történő illesztés. Ugyanakkor elmondható, hogy öntözésmentes területeken, a műholdas adatok időbeli változékonysága megbízható. Így tehát ha az egyes rácspontokat egymástól függetlenül kezeljük és az azokban bekövetkezett változásokat keressük, az ESA CCI talajnedvesség adatbázis megbízható forrásként szolgálhat.

Köszönetnyilvánítás. A bemutatott munka a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, valamint az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.

Irodalom

- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B. and Ginn, T.R., 1984: A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. *Water Resources Research* 20, 682–690.
- Dorigo, W.A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., Robock, A., and Jackson, T., and Jackson, T., 2011: The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1675–1698.
- Dorigo, W.A., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, D. P. Hirschi, M., Ikonen, J., De Jeu, R. Kidd, R. Lahoz, W., Liu, Y.Y., Miralles, D., and Lecomte, P., 2017: ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment* 203, 185–215.
- Entekhabi, D., Reichle, R. H., Koster, R. D., and Crow, W. T., 2010: Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements. *Journal of Hydrometeorology* 11(3), 832–840.
- Fischer, E M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., and Schär, C., 2007. Soil Moisture–Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave. *Journal of Climate* 20, 5081–5099.
- Gruber, A., Dorigo, W. A., Crow, W., and Wagner W., 2017: Triple Collocation-Based Merging of Satellite Soil Moisture Retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1–13. doi:10.1109/TGRS.2017.2734070.
- Gruber, A., Scanlon, T., van der Schalie, R., Wagner, W., and Dorigo, W., 2019: Evolution of the CCI Soil Moisture Climate Data Records and their underlying merging methodology. *Earth System Science Data* 11, 717–739.
- Martínez-Fernández, J., and Ceballos, A., 2003: Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. *Soil Science Society of America Journal* 67(6), 1647–1656.
- R Core Team, 2019: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, <https://www.R-project.org/>.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., and Toll, D., 2004: The global land data assimilation system. *Bul. of the Am. Meteor. Soc.* 85(3), 381–394.
- Saini, R., Wang, G. and Pal, J. S., 2016: Role of Soil Moisture Feedback in the Development of Extreme Summer Drought and Flood in the United States. *Journal of Hydrometeorology* 17(8), 2191–2207.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. and Wobbe, F., 2013: Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU* 94, 409–410.
- Wilks, D. S., 2011: *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press. pp. 676
- Zuo, Z. and Zhang, R., 2007: The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 52(23), 3310–3312