

A FELSZÍNKÖZELI VÍZKÉSZLETEK MONITORINGJÁNAK LEHETŐSÉGEI A SZÉLSŐSÉGES VÍZHÁZTARTÁSI HELYZETEK (ASZÁLY, BELVÍZ) ÉRTÉKELÉSÉNEK SZOLGÁLATÁBAN

POSSIBILITIES OF MONITORING NEAR-SURFACE WATER RESOURCES FOR THE PURPOSE OF THE ASSESSMENT OF EXTREME WATER MANAGEMENT SITUATIONS (DROUGHT, INLAND EXCESS WATER)

Barta Károly^{1*}, van Leeuwen Boudewijn¹, Szatmári József¹, Blanka Viktória¹, Kovács Ferenc¹, Ladányi Zsuzsanna¹, Mezősi Gábor¹, Rakonczai János¹, Sipos György¹, Szilassi Péter¹, Tobak Zalán¹, Fiala Károly², Benyhe Balázs², Fehérváry István²

¹ Szegedi Tudományegyetem Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék, 6720 Szeged Egyetem u. 2.

² Alsó-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság, 6720 Szeged, Stefánia 4.

*barta@geo.u-szeged.hu

Összefoglalás: Tanulmányunkban azon kutatásokat szeretnénk bemutatni dióhéjban, melyek a Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszékén (jelenleg Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék) az utóbbi 15 évben a felszín közeli vízkészletek monitoringjának lehetőségeivel foglalkoztak. Ezek célja a szélsőséges vízháztartási helyzetek (aszály, belvív) számszerűsítése, értékelése volt és eszköztárában mind a talajvízszint és talajnedvesség párhuzamos mérése, mind komplett meteorológiai és talajnedvesség-mérő állomások kiépítése, mind pedig a távérzékelés segítségével történő belvívborítás- és talajnedvesség-becslés szerepel. A jobbra uniós forrásokból finanszírozott kutatások számos tanulmányban, cikkben és kötetben megjelentek, itt most azok közül csak a legfontosabb eredményeink ismertetésére vállalkozunk, illetve bemutatjuk, hogy kidolgozott eszköztárunk milyen operatív tevékenységekben hasznosul.

Abstract: In our study, we present our research on the possibilities of monitoring near-surface water resources that has been conducted during the last 15 years at the Department of Physical Geography and Geoinformatics of University of Szeged (currently Department of Geoinformatics, Physical and Environmental Geography). The aim of these investigations was to quantify and assess extreme water management situations (drought, inland excess water), and its tools included the parallel measurement of groundwater level and soil moisture, the construction of complete meteorological and soil moisture measuring stations, and the estimation of inland excess water cover and soil moisture by remote sensing. The research, mostly financed by EU funds, has been published in many studies, articles and books. Here, we only present the most important results, and show in what operational activities our developed toolkit is applied.

1. Bevezetés

A klímaváltozás egyik káros hatása a szélsőséges vízháztartási helyzetek gyakoriságának és intenzitásának fokozódása, mely a Kárpát-medence síksági térszínein elsősorban a mezőgazdaságot sújtó aszályok és belvizek formájában jelentkeznek (Kozák, 2011; Fiala et al., 2014; Mezősi et al., 2017). Tanszékünk (Szegedi Tudományegyetem Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék) több mint 15 éve foglalkozik e két jelenséggel, s a kutatások egyik fókuszusa az aszály és a belvív monitoringja, valamint előrejelzése.

1.1. A belvízről röviden

A belvív az antropogén tájtalakítás által életre hívott fogalom. Eredete szerint a két leggyakoribb típusa a megemelkedő felszín alatti vízből származó belvív (feltörő belvizek), illetve a természetes vagy antropogén okokra visszavezethető gátolt elfolyás és/vagy beszivárgás következtében a felszíni mélyedésekben összegyűlő, a talajvíztől független, vagy azzal maximum kapillárisan kommunikáló

ún. összegyülekezési belvív (Pálfai, 2004; Rakonczai et al., 2011). Eredetének ismerete azért is fontos, mert mind a rendelkezésre álló vagy éppen elvezetendő vízmennyiséget, mind a belvív elleni védekezés mikéntjét ez határozza meg. Az utóbbi évtizedekben számos módszer került kidolgozásra, melyek célja alapvetően a belvív-veszélyeztettség területi eloszlásának megállapítása. Ezen módszerek segítségével több alföldi területre kisméretarányú térképek készültek (Thyll and Bíró, 1999; Körösparti et al., 2009; Laborci et al., 2020). Egy-egy csapadékos időszakban az előbb említett veszélyeztetettségi térképek méretarányánál jóval kisebb léptékben fontos lenne a belvizek mennyiségét és megjelenési helyét is előre jelezni. Az előrejelzéshez és a monitorozáshoz elengedhetetlen egy nagy felbontású domborzatmodell, illetve a talajvíztükör mélységének az ismerete. Ezen túlmenően az összegyülekezési belvív előrejelzéséhez az alapvető talajtani paraméterek ismerete mellett a vízháztartási elemek (csapadék, beszivárgás, párolgás, talajnedvesség stb.) nagy időfelbontású monitoringja is szükséges.

1.2. Az aszály – fókuszban a talajnedvesség

Aszályon olyan vízhiányos helyzetet értünk, mely során az átlagosnál kevesebb csapadék nem képes kielégíteni a szokásos vízigényeket. Az okozott hatások szerint értelmeznek meteorológiai (Palmer, 1965; Faragó et al., 1989), talaj- vagy mezőgazdasági (Maracchi, 2000) és hidrológiai aszályt (Pálfai, 2002; Hisdal and Tallaksen, 2003) is. Bár a belvizek által okozott kár rendkívül látványos, mégis sokkal pusztítóbb hatása van az élethez nélkülözhetetlen víz hiányának. Becslések szerint hazánkban egy-egy aszályos évben 10–15-szörös kár keletkezik egy-egy belvizes évhez viszonyítva. Az utóbbi 110 évben a Kárpát-medencében 1,1 °C-os melegedést és közel 5%-os csapadékcsökkenést regisztráltak (https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarország/), tehát a vízhiány egyike a legnagyobb természeti veszélyeknek, mely komoly károkat okoz a gazdaságban, különösen a mezőgazdaságnak az aszályos években. A direkt mezőgazdasági károkon túlmenően a vízellátásban is komoly zavarokat okozhat, és nem elhanyagolható a humánegészségügyi kockázata sem. Éppen ezért a kutatás, a monitoring és az előrejelzés egyre nagyobb jelentőségű (Blanka and Ladányi, 2014). Az aszály számszerűsítésére több mint 100 indexet dolgoztak ki (Zargar et al., 2011), melyek közül a legfontosabbakat napi, heti vagy havi frissítésben a European Drought Observatory honlapján is megtekinthetünk (<https://edo.jrc.ec.europa.eu>).

Az aszály kialakulásának és erősségének kulcsparamétere a csapadék mennyisége, annak idő- és térbeli eloszlása. A csapadék, illetve a csapadékhiány mellett a másik fontos meteorológiai tényező a párolgás, mely leginkább a besugárzástól függ, de jelentős szerepet játszik benne számos egyéb tényező is. Hazai tapasztalatok szerint a legsúlyosabb aszály akkor alakul ki, ha a nyári hosszú csapadékszegény időszak nagy hőséggel párosul. Ezt súlyosbíthatja, ha a megelőző téli félév is az átlagosnál kevesebb csapadékkal volt jellemezhető.

A meteorológiai paraméterek mellett a talajban tárolt nedvességekészlet a legjelentősebb tényező az aszály súlyosságának kialakításában. Ezt az aktuális és a megelőző időszak hidrometeorológiai jellemzőin kívül a talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságai (kötöttség, porozitás, pF-görbe, hidraulikus vezetőképesség stb.) is befolyásolják. Magyarországi viszonyok között a csernozjom talajok rendelkeznek a legkedvezőbb tulajdonságokkal, míg a homoktalajok és az agyagtalajok hasznosítható vízkészlete sokkal hamarabb kimerül, azaz aszályérzékenyebbek (Stefanovits, 1992; Várallyay et al., 1980).

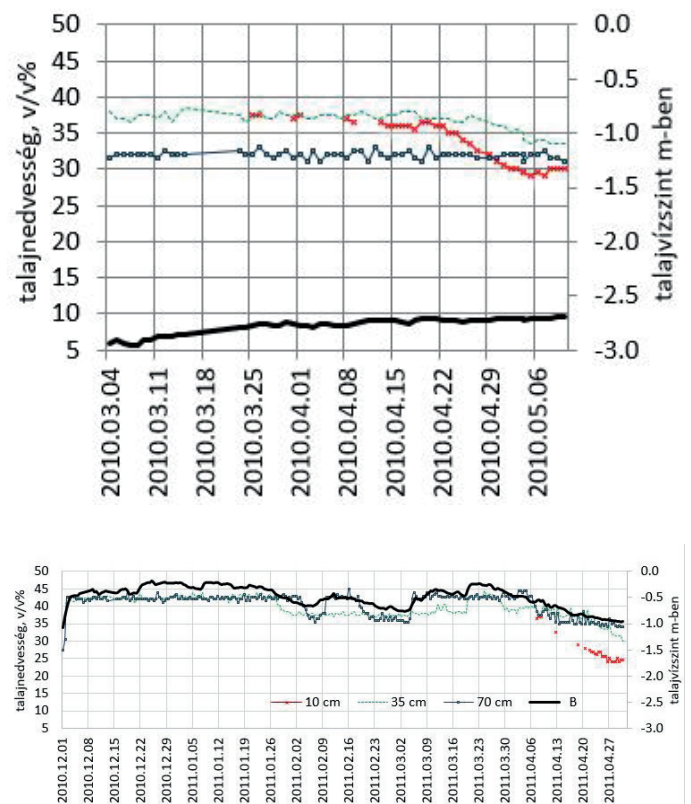
2. Módszerek/projektek a belvíz és az aszály jobb megértése érdekében

2.1. Belvíztípusok elkülönítése terepi monitoring-állomások segítségével

A BELVÍZ-INFO rendszer kifejlesztése című GOP-1.1.1-08/1-2008–0025 sz. projekt részeként Tanszékünk olyan komplett monitoringrendszert dolgozott ki, mely elsődleges

célja a belvíz képződési mechanizmusának alaposabb megismerése, illetve a mérési adatsorokból a várható előntések előrejelzése volt. Az előrejelzésen túlmenően kíváncsiak voltunk, hogy az adott módszer alkalmas-e arra, hogy elkülönítsük a feltörő és az összegyülekező belvizeket, és megállapítsuk a talajvízszint emelkedésében, illetve a belvíz kialakulásában szerepet játszó tényezők súlyát (a helyi beszivárgás, az oldalirányú áramlás, a talajfagy stb. szerepét). A kiépített komplett mérőállomások az alábbi mérőeszközöket tartalmazták: 1 db billenőkanalas csapadékmérő; 2 db súlylíziméter vízzel, illetve talajjal megtöltve; 1 db 50 cm hosszúságú talajhőmérő-lándzsa (5 mélységben méri a talaj hőmérsékletét); 3 db TDR-alapú talajnedvesség-mérő (10, 35 és 70 cm-es mélységben); 1 db talajvízszint-mérő DATAQUA-szenzor. A mérőállomás összeállítását a Boreas Kft. végezte, és a komplett monitoringállomás órás gyakorisággal mért (Barta, 2013).

A módszert a Dél-Alföldön, marosszögi mintaterületen teszteltük. A kiválasztott mintaterületről annyit érdemes tudni, hogy a Tisza és a Maros összefolyásánál elhelyezkedő mélyfekvésű terület, melyet jobbára agyag és nehézaggyag fizikai féleségű folyóvízi üledékek építenek fel (Dövényi, 2010), tehát egyaránt hajlamos feltörő és összegyülekező belvíz képződésére is. A több mint másfél éves adatsorunkból itt csak a 2010. március-májusi és a 2010 decemberétől 2011 májusáig tartó két periódust emelnénk ki, melyek jól reprezentálják a két eltérő típusú belvízképződést (1. ábra).



1. ábra. Összegyülekező (fenn) és talajvíz eredetű belvizek (lenn) melletti talajnedvesség-értékek 10, 35 és 70 cm-es mélységben, illetve talajvízszintek a két folt közelében, azoknál néhány 10 cm-rel magasabban.
B: talajvízszint a belvízfolt közelében.

A diagramok értelmezéséhez mindenképpen fontos tudni, hogy a mérőállomás az adott terület egyik magaslatára lett telepítve, hogy még a legnagyobb belvizek idején is a felszíni egységei szárazon maradhassanak. Ez szintkülönbségben néhány 10 cm-t jelent, de ennek köszönhetően a belvizek nem pozitív vízállásként, hanem 0–50 cm-es talajvízszintként jelennek meg. A 2010-es tavaszi periódusban jól beazonosítható az összegyülekezési eredet: a talajvíz mélyen alatta van a felszíni belvízfoltnak, és nem befolyásolja az időszak utolsó negyedében sem a talaj kiszáradását. A nedvességszenzorok közül a 70 cm-es mélységben lévő mutatja a legalacsonyabb értékeket, mely jól jelzi a korlátozott beszívargást. Ugyanakkor a 2010–11-es időszakban egy feltörő belvíztípust azonosíthatunk, ahol a mélység szerinti differenciált kiszáradást a talajvízszint determinálja.

Mit jelent mindez vízkészletek szempontjából? Az összegyülekezési belvíz esetében 200–250 mm hasznosítható víz tározódik a talajban, míg talajvíz eredet esetén ez az érték 400–450 mm közötti (Barta, 2013). Amennyiben ezek könnyen eltávolítható részét el akarjuk vezetni, az első esetben hektáronként 1000–2000 m³ vízmennyiséget, második esetben pedig 3000–3500 m³-t kell megmozgatnunk. Ugyanakkor ha potenciális vízkészletként tekintünk ezekre a mennyiségekre, a talajvíz eredetűnél sokkal bőségesebb víztartalmakkal számolhatunk, míg az összegyülekezési esetben, egy aszályra sokkal érzékenyebb szituációval állunk szemben, ahol a nyári meleg beköszöntével kb. egy hónap alatt elpárolog ez a tartalék, és a mély talajvízszint miatt a vízkészlet elapadása nem folyamatos, hanem a beázási mélység kiszáradásával gyakorlatilag egyik napról a másikra megtörténik (ld. „ledugaszolt üveg effektus”, Várallyay, 2008).

2.2. MERIEXWA talajvízszint-megfigyelő monitoring hálózat

A monitoring hálózat kialakítása a MERIEXWA (HUSRB/1202/121/087) szerb-magyar projekt keretében valósult meg 2012–2013 során.

A mintaterület kiválasztásának legfőbb szempontja a belvív-veszélyeztetettség volt. E határon átívelő probléma érinti mind a Tisza bal parti területeit, mind a jobb parti területeket Magyarországon és Vajdaságban egyaránt. Így esett választásunk a Duna-Tisza-közi hátság DK-i részére és határon túli folytatására, a Marostól északra elterülő Marosszögre, a Maros déli oldalán található Torontálra, illetve a vajdasági oldalon Bánát területére. A különböző domborzati, földtani és talajtani adottságokkal rendelkező területeken a belvíz kialakulásának okai is rendkívül változatosak. A Marost és a Tiszát kísérő alluviumokon (Marosszög, Torontál, Bánát) a rendkívül magas agyagtartalom felelős a belvizek kialakulásáért. Itt egyaránt előfordulnak talajvíz eredetű és összegyülekezési belvizek. A Tiszától nyugatra főként homok és homokos vályog fizikai féleségű üledékeket találunk, s itt a belvíz fő okaként a homokhátság alól kiáramló vizek felelősek (Dövényi, 2010). A mintaterület nyugati határának kijelölésénél fontos szempont volt, hogy ne csak a belvízveszélyes területeket monitorozzuk, hanem azokat a magasabban fekvő tápláló területeket is, melyek emelkedő talajvízszintjei vélhetően korábban jelzik a belvízhelyzet kialakulását.

A kutak pontos helyének kijelölésénél fontos szempont volt a reprezentativitás és a megbízhatóság. Geostatistikai értelemben a talajvíz megfigyelése és modellezése akkor tekinthető megbízhatónak, ha a mintázási stratégiából származó információk valóságként jellemzik a talajvízszintet (Bárdossy *et al.*, 2002). Következésképpen a kúthálózat kialakítási stratégia megtervezésekor figyelembe kell venni (1) az egyes földtani képződmények méretét, alakját, térbeli elhelyezkedését; (2) a képződmény tulajdonságainak térbeli eloszlását és változékonyságát, a tulajdonságok hatástávolságát és anizotrópiáját, továbbá (3) további földtani folyamatok, szerkezetek és környezeti hatótényezők hatásait (Füst and Geiger, 2011). További szempont volt, hogy a határ mindkét oldalán kialakítandó 25–25 kút (2. ábra) a már meglévő országos talajvízszint-monitoring mintaterületre eső kútjaival egységes talajvízszint- és belvíz előrejelző rendszert alkossanak (Perger, 1996).



2. ábra. A MERIEXWA projekt keretében telepített egyik talajvízszint figyelő kút Szeged-Tápé külterületén. A kút előtt a vízszint érzékelésére alkalmas akusztikus szenzor látható.

A kutakban alkalmazott vízszintregisztráló két fő komponensből épült fel: egy PROTON mote, mely az adatokat tárolja, és a számítógéppel a kommunikációt valósítja meg, illetve egy akusztikus szenzorkártya, mely 4 egységből áll (hangszóró, mikrofon, hőmérséklet- és páratartalom-érzékelő). A vízszintmérés lényege, hogy a hangszóró által kibocsátott hangjel a talajvíz felszínéről visszaverődve eléri a mikrofont, és a hangkiadáستól eltelt idő segítségével a vízszint mélysége számolható (Sztalmári *et al.*, 2014).

A megfigyelések és a mérések megbízhatóságát a vizsgált területen a humán és műszaki tényezők (időszakos öntözés, szivattyúzás) kis léptékben jelentősen befolyásolhatják azáltal, hogy egy adott talajvízmérő állomás adatsorát torzítják. Mindezek a térbeli modellezés során a ténylegesnél nagyobb kiterjedésű depressziós tölcserként jelentkeznek. Az említett hibák esetünkben a folyamatosan végzett méréseknek köszönhetően a talajvíz-idősorokban könnyedén felismerhetők, és egyszerű statisztika módszerekkel szűrhetők (Bárdossy, 1997). A korábbi tanulmányok

(Pálfai, 2004; Szalai, 2011) szerint a talajvíz és a topográfia között szignifikáns kapcsolat feltételezhető, ezért a mérési adatok térbeli kiterjesztésekor segédváltozóként digitális domborzatmodellt (DDM) is alkalmaztunk. A nagyszámú geostatistikai megoldás közül a kokrigelést (Isaaks and Srivastava, 1989), azon belül pedig a nagy információtartalmú, szabályosan mintázott másodlagos adat bevonását megkönnyítő Markov 2 modellt (Journal, 1999; Xianlin and Journal, 1999; Shmaryan and Journal, 1999) alkalmaztuk. A kollokált kokrigelés Markov 2 modellel történő elvégzésekor a talajvíz variogrammodellje és a talajvíz-DDM kereszt félvariogrammodellje a DDM-ből és a talajvízadatokból analitikusan következik (Journal, 1999). Kokrigelés során a GsLib függvénycsomag NEWCOKB3D (Xianlin and Journal, 1999) algoritmusát, szekvenciális ko-szimulációnál az SGSIM_FC (Shmaryan and Journal, 1999) módosított verzióját alkalmaztuk.

2.3. Pontszerű talajnedvesség-monitoring az aszály számszerűsítésében és előrejelzésében

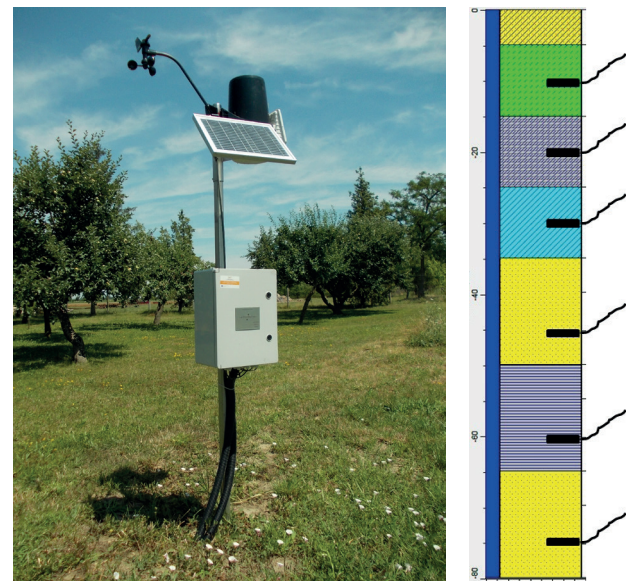
Mint korábban említettük, az aszály jellemzésében három környezeti tényezőcsoportnak van kiemelt jelentősége (Pálfai, 2004): a légköri aszályt meteorológiai paraméterrel (csapadék, léghőmérséklet, páratartalom, szélesség), a hidrológiai aszályt a vízfolyások és állóvizek vízállásával, illetve a talajvízszinttel, míg a talajaszályt a különböző mélységekben mért talajnedvesség-adatokkal jellemezhetjük. Egy adott időszak várható aszályosságának előrejelzését alapvetően a meteorológiai előrejelzésekre tudjuk építeni, ennek megfelelően az előrejelzendő időszak hosszának növekedésével jelentősen növekszik annak bizonytalansága is. A mezőgazdaság szempontjából legalább ilyen fontos a talaj nedvességi állapota. Napjainkban egy átlagos nyáron a talaj felső 10–20 cm-e legtöbbször a hervadási pontig kiszárad, de ami számottevően megnöveli az aszály bekövetkeztének valószínűségét, ha már a vegetációs időszak kezdetén legalább 70–80 cm-es mélységig száraz, azaz lényegesen a szántóföldi vízkapacitás alatt maradó talajnedvességet tapasztalunk. Ennek kialakulásának okát általában a megelőző őszi-téli időszak súlyos csapadékhiánya okozza. Önmagában ez természetesen még nem vezet szükségképpen nyári aszályhoz, de amennyiben nem várható az átlagosnál csapadékosabb tavasz és nyárelő, nagyon komoly mezőgazdasági károkat számíthatunk (Barta et al., 2014).

A 2007 és 2013 közötti WAHASTRAT projekt keretén belül a Dél-Alföldön 8 hidrometeorológiai állomást helyeztünk üzembe, melyek célja a meteorológiai paraméterek mérése, a területi különbségek monitorozása, illetve a talajnedvesség mérés segítségével a talajaszály kimutatása és előrejelzése volt. A következőkben röviden bemutatjuk a kiépített monitoringrendszert és az adatokból számítható talajspecifikus vízhiány fogalmát (Barta et al., 2014).

A mérőállomások (3. ábra) az alábbi paraméterek mérésére alkalmasak: csapadékmennyiség mm-ben billenőkanalas érzékelő segítségével; léghőmérséklet a felszín felett 2 m-es magasságban °C-ban; relatív páratartalom a felszín felett 2 m-es magasságban %-ban; átlagos szélesség

a felszín felett 2 m-es magasságban m/s-ban szélkanalas érzékelő segítségével; szélirány fokban; talajnedvesség 6 különböző mélységben (10, 20, 30, 45, 60 és 75 cm). Az alkalmazott talajnedvesség-mérő szenzor (EC-5, gyártó: Decagon Devices, most METER Group) működése a talaj dielektromos állandójának mérésén alapszik, és gyári kalibráció segítségével a talaj aktuális nedvességtartalmát a teljes talaj térfogatának %-ában (v/v%) adja meg. A felsorolt paraméterek mérése órás gyakorisággal történik, értelemszerűen a csapadék- és széljellelmezők az elmúlt egy óra értékét, illetve átlagértékeit adják meg.

A kiválasztott helyszínek mindegyikén részletes talajfeltárást végeztünk: szintenként, illetve a talajnedvesség-szenzorokkal megegyező mélységekben mintáztuk a talajtakarót. A talajtani alapvizsgálatok (Arany-féle kötöttség – MSZ 08-0205:1978, pH, összes oldható sótartalom, karbonáttartalom – MSZ 08-0206/2:1978 és humusztartalom – MSZ 21470-52:1983) mellett a szenzorok mélységéből bolygatatlan talajminták segítségével meghatároztuk a térfogattömeget, a maximális és szántóföldi vízkapacitást, a higroszkópositást, a holtvíztartalmat és a hidraulikus vezetőképességet (Stefanovits, 1992).



3. ábra. A WAHASTRAT keretében telepített egyik mérőállomás (Szentés) és az alkalmazott talajszenzorok mélység szerinti eloszlása. A negatív számok a felszín alatti mélységet jelentik cm-ben. A különböző színek azokat a mélységtartományokat különítik el, melyekre a szenzorok által mért nedvességértéket vonatkoztatjuk.

A mért talajnedvesség-adatok értékeléséhez két indikátort vezetünk be:

1. Egy adott mélységben mért nedvességértéket a vízügyi gyakorlatban használt „vízállás százalékos értéke” alapján az ún. hasznosítható vízkészlet %-os értékével (AW%) jellemeztük. Ezen érték meghatározásához az aktuális nedvességtartalom (SM, v/v%) kívül az adott talajszint szántóföldi vízkapacitásának (FC, v/v%) és a holtvíztartalmának (WP, v/v%) ismeretére van szükség, és az alábbi képlettel számolható:

$$AW\% = \frac{SM-WP}{FC-WP} \times 100 \quad (1)$$

Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogyha az aktuális talajnedvesség megegyezik a szántóföldi vízkapacitással, akkor AW% értéke 100%, ha a talajunk kiszárad holtvíztartalomig, akkor pedig 0% (Ladányi et al., 2021). Közöttük értelemszerűen lineáris skálán mozgunk. Növénytermesztés szempontjából kb. 30%-os AW% érték alatt már nehezen felvehető vízkészletről beszélünk, 20% alatt pedig már elpusztul a növény, még a holtvíztartalom elérése előtt (Dunay és Kalmár, 1993). Bár kvantitatív úton tetszőleges mélységben és tetszőleges időpontra kiszámolható AW%, mégis ezen indikátor inkább a vízhiány kvalitatív szemléltetésére alkalmas, illetve kiválóan el lehet segítségével különíteni az extrém vízhiányos és extrém vízbő időszakokat.

2. Az operatív beavatkozásokban sokkal jobban használható paraméter a 6 mélységben mért nedvességtételekből számolt „vízhiány” (WD) mm-ben kifejezett értéke. Ennek számszerűsítése úgy történik, hogy a szántóföldi vízkapacitásig történő feltöltődéshez szükséges beszivárgás mennyiségét fejezzük ki mm-ben. Ehhez a felső 3 szenzor esetén 1 v/v%-nyi hiányhoz 1 mm-nyi, az alsó 3 szenzor esetén pedig 1,5 mm-nyi csapadékot rendelünk (3. ábra). Egy adott talajszelevény mm-ben kifejezett vízhiányát a 6 szenzor alapján számolt rétegenkénti hiány összegzésével kapjuk meg. Ugyanilyen logika alapján egy-egy csapadékesemény után meghatározható az adott mélységbe leszivárgott vízmennyiség mm-ben. Ezzel azt is ki tudjuk mutatni, hogy a talajtípus és a felszíni hőmérséklet függvényében a lehulló csapadékból hány mm párolog el, illetve „hasznosul”.

2.4. Távérzékelési lehetőségek a talajnedvesség területi monitoringjára

A talajnedvesség folyamatos becslése lehetővé teszi a talaj víztartalmában bekövetkező változások dinamikus megfigyelését. A változás trendjeinek és irányainak meghatározása hozzájárulhat az aszály vagy belvíz előrejelzéséhez. Annak ellenére, hogy a talajnedvesség fontos paraméter számos alkalmazásnál, annak széleskörű és/vagy folyamatos mérése ritka (Patel et al., 2009). Egy másik probléma a pontszerű mérések kiterjesztésének korlátozott lehetősége nagyobb területekre. Ezek megoldásában nagy szerepe lehet a távérzékelési adatoknak, melyek nagy területre elérhetőek nagy időbeli felbontással.

A talajnedvesség mérésére két távérzékelési módszer létezik. Az egyik passzív mikrohullámú adatot használ, melynek alapja a víz és a száraz talaj dielektromos állandója közötti nagy eltérés (az előbbi ~80, utóbbi <4). A dielektromos állandó értéke fordítottan arányos a talaj emissziójával. A talaj emisszióját a mikrohullámú műhold adatokból határozzák meg (Schmugge et al., 2002; Wang, 2008). A módszer előnye, hogy szilárd fizikai alapja van, és az adatok minden időjárási körülmény között begyűjt-

hetők. A módszer hátránya a jelenlegi passzív mikrohullámú szenzorok alacsony felbontása, valamint a növényzet erőteljes zavaró hatása (Wang, 2008; Vicente-Serrano et al., 2004). A másik módszer az elektromágneses spektrum látható, közeli infravörös és termális infravörös sávok adatainak kombinációját használja. A látható és közeli infravörös sávokat arra használják, hogy kinyerjék a növényzet relatív mennyiségét, melyet gyakran a Normalizált Vegetációs Indexszel (NDVI) vagy a növényborítás arányával (Fr) fejezik ki. A termális sáv adatait a földfelszín hőmérsékletének (LST) számítására használják. Ezeknek a módszereknek az alapfeltételezése az, hogy a hasonló növényborítottsággal rendelkező területek közti hőmérsékletkülönbségek oka a talajnedvességükben bekövetkezett változások (Vicente-Serrano et al., 2004). Számos korlátja van a LST-NDVI alapú talajnedvesség méréseknek. A vizsgált terület lehet, hogy nem fedi le a növényzeti osztályok teljes skáláját (a kopár talajtól a sűrű növényzetig), ezért az LST-NDVI teret nem lehet teljes mértékben meghatározni. Továbbá, mivel a módszer alapját a távérzékelési felszíni hőmérséklet (LST) adatok adják, csupán a felső néhány millimétertől 1 centiméterig jellemző talajnedvesség „mérhető”, azonban a növényzeten keresztül közvetve a gyökérnedvesség is figyelembe vehető. Az űrfelvételekből származó LST és NDVI értékek hibákat is tartalmazhatnak, amelyek a talajnedvesség index (SMI) számítását befolyásolják (Carlson, 2007; Mallick et al., 2009).

A talajnedvesség index (SMI) becslésének alapadatai vegetációs index (MOD13) és felszíni hőmérséklet és emisszió (MOD11) adatok. Ezek ingyenesen letölthetők az USGS Earth Explorer weboldaltól (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). A munkánkban MOD13A1 adatokat használtunk, melyek NDVI, EVI vegetációs index, valamint adatminőség (QA) réteget tartalmaznak. Az adathalmaz 16 nap méréseiből tevődik össze a kék, vörös és közeli-infravörös sávokban, térbeli felbontása 500 m. Mindkét indexet atmoszféricusan korrigált, kétirányú felszíni visszaverődési együtthatóból számolják, melyet víz, felhő, erős aeroszol és felhő vetette árnyékokkal javítanak. A második bemenő adat a MOD11A1, mely 1 km-es felbontású napi földfelszín hőmérséklet (LST) réteget tartalmaz.

Az SMI munkafolyamat első lépése az NDVI és adatminőség rétegek importálása a MOD13A1 adatokból. A következő lépésben eltávolítottuk a gyenge minőségű adatokat, kalibrációt végeztünk, és a képet a vizsgált területre vágtuk. Utána a negatív értékek eltávolítása érdekében normalizáltuk az NDVI adatokat, 0 és 1 közötti mutatószámot hozva ezzel létre:

$$F_r = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})^2} \quad (2)$$

ahol F_r a növényborítás aránya. Az LST és F_r egy képzeletbeli háromszöget alkotnak, ahol a nedves területek alkotják a háromszög alsó részét, és a száraz területek a felső átlót (Vicente-Serrano et al., 2004; Carlson, 2007; Mallick et al., 2009; Patel et al., 2009). A következő lépésben az NDVI térképet F_r térképpé alakítjuk, és az F_r értékek egyenlő intervallumokba való besorolásával 10 altérképet hozunk

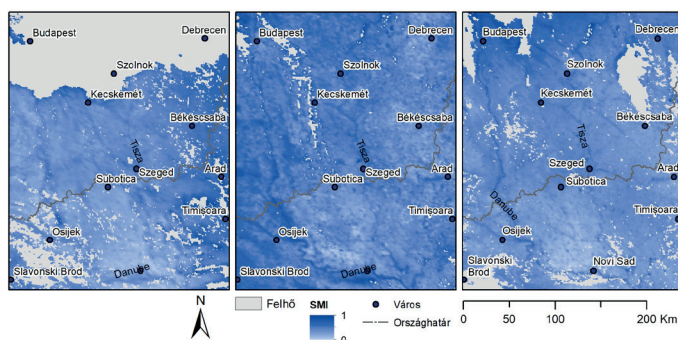
létre növekvő vegetációborítással. A munkafolyamat következő részében az LST térkép előfeldolgozása következik. Az eredeti nappali földfelszíni hőmérséklet értéket a MOD11A1 adatokból importáljuk, és eltávolítjuk a gyenge minőségű adatokat. Számos LST fájlnál nagy területek maradtak ki, mivel a felhőborításnak köszönhetően nincsenek megfelelő LST értékek. Az LST értékeket szorzó tényezővel korrigáljuk, hogy a hőmérsékleteket Kelvin értékekben kapjuk meg. Ezt követően az 1 000 m térbeli felbontású LST adatokat újraosztályozzuk, hogy egyezzenek az NDVI adatok geometriájával és 500 méteres felbontásával. Végsőként az adatokat a mintaterületre kivágjuk.

A módszer lineáris összefüggést feltételez az LST és a talajnedvesség között egy Fr osztályon belül, ezért mindegyik Fr térkép esetében a legalacsonyabb és legmagasabb LST pixelt választottuk ki. A legalacsonyabb LST értékű pixel egy adott Fr osztályban 1-es talajnedvességi értéket, a legmagasabb pedig 0-ás talajnedvességi értéket kap. Az SMI talajnedvesség értéket az i -edik Fr térkép pixeleire a következőképpen számítjuk:

$$SMI_i = \frac{LST_{min} - LST}{(LST_{max} - LST_{min})} + 1 \quad (3)$$

Ennek eredménye egy-egy SMI térkép a 10 db Fr térkép mindegyikére. Az utolsó lépésben az összes SMI_i térképet egyesítjük a mintaterületre. Ez a térkép a terület talajnedvességének területi eloszlását mutatja egy adott időpillanatban, ahol a 0 a legalacsonyabb talajnedvességet jelöli, míg az 1-es a legmagasabbat.

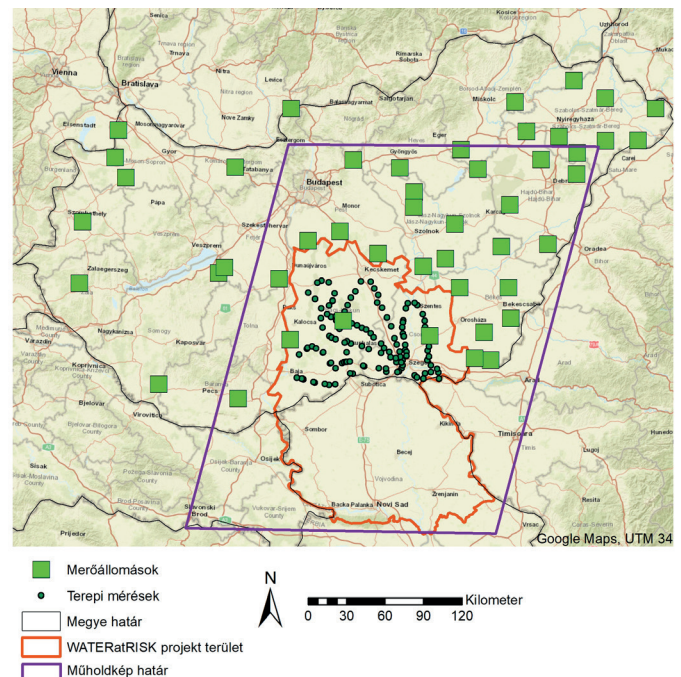
A módszert az Alföld középső és déli részén, illetve a Vajdaság területén teszteltük a 2017. január 1. és 2019. március 29. közötti időszakra vonatkozó adatokkal. A vizsgált 630 npra elő lehetett állítani a műholdas alapú SMI térképeket, de számos térkép felhős napon készült, ezért nagy területek maradtak SMI érték nélkül (4. ábra).



4. ábra. Talajnedvesség index (SMI) térképek eltérő mértékű hiányzó adattal (szürke részek) három különböző időpontban – 2017. január 1. (baloldal), 2017. április 25. és 2018. november 12. (jobboldal).

A folyamatos műholdas nedvességértékek és a helyszíni mérések közötti kapcsolat megteremtése érdekében összehasonlítottuk az eredményeket a rendelkezésre álló talajnedvesség mérő állomások és kézi műszerekkel végzett pontszerű mérések értékeivel (5. ábra). A talajnedvesség mérő

állomások az Országos Vízügyi Főigazgatóság hálózatának részét képezik (<https://aszalymonitoring.vizugy.hu/>), amely 2019 márciusában 47 állomásból állt, melyből 27 db esett a mintaterületre. A többi mérést FieldScout TDR350 talajnedvesség mérő készülékekkel végeztük. A tervezett méréssorozat 2019. március 27-én zajlott le. Ezen a napon négy csapat indult útnak, hogy a területen 4 útvonal mentén mérjék a talaj nedvességtartalmát. A FieldScout szenzorai közvetlenül v/v%-ban határozzák meg a talaj felső 12 cm-es rétegének átlagos nedvességtartalmát, és a beépített GPS-moduloknak köszönhetően a mérési adatokhoz azonnal hozzárendelik a koordinátáikat is. A mérési pontok kiválasztásánál további fontos szempont volt, hogy olyan méretű parcellákon mérjünk, melyek legalább egy teljes pixelt lefednek a távérzékelte MODIS-felvételeken. Figyelembe véve a képek 250×250 m-es felbontását, minimum 500×500 m-es parcellák kiválasztása volt a cél. Ezek legtöbbször szántó volt, de voltak közöttük legelők, gyümölcsösök (szőlő) és erdők is.



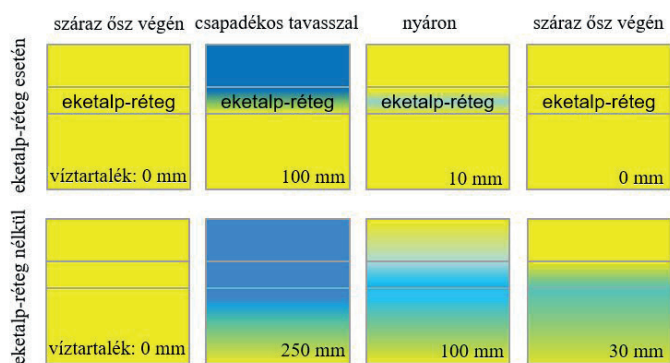
5. ábra. A vizsgált terület a talajnedvesség mérő állomásokkal és a 2019. március 27-i terepi mérések pontjaival.

Eredményeink alapján a műholdas mérések és a helyszíni mérések között nem volt szignifikáns kapcsolatot. Ennek egyik oka az lehet, hogy a helyszíni mérések kis területet reprezentálnak, míg a műholdfelvételek nagy terület adatait integrálják. Emellett sok esetben a két adatkészlet között eltérés is előfordult. Egy másik probléma az volt, hogy a pontméréseket olyan időszakokban végeztük, amikor nagyon alacsony volt a talajnedvesség. Lehetséges, hogy nedvesebb időszakban erősebb összefüggés határozható meg.

3. Eredményeink és alkalmazhatóságuk

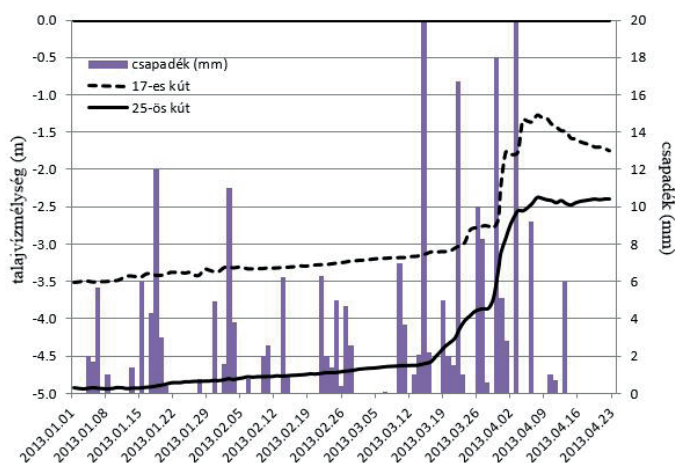
A vázolt kutatásaink eredményeit három önálló kötetben adtuk közre (Barta et al., 2013; Blanka and Ladányi, 2014; Ladányi and Blanka, 2014), melyek közül itt most elsősorban a kidolgozott módszerek alkalmazhatóságára koncentrálnánk.

A BELVÍZ-INFO projekt keretén belül telepített mérőállomásaink adataiban a talajnedvesség vertikális változása és időbeli növekedése, valamint a talajvíztükör mélysége egyértelműen lehetőséget adott az összegyülekezési és a talajvíz eredetű belvizek időbeni elkülönítésére. Az elkülönítés nemcsak tudományos szempontból érdekes, hanem a két típus teljesen eltérő megelőzési-védekezési stratégiát is kíván: míg az összegyülekezési belvíz döntően topográfiai és agrotechnológiai probléma, addig a talajvíz eredetű belvizeknél jóval nagyobb területekre kiterjedő talajvízszint-süllyesztésre – értelemszerűen jóval nagyobb víztömeg megmozgatására és tárolására – van szükség (Kozák, 2003). Néhány talajtani paraméter, mint például kötöttség, szemeloszlás, térfogattömeg, hidraulikus vezetőképesség megvizsgálásával egyértelműen eldönthető, hogy a terület hajlamos-e összegyülekezési belvíz kialakulására, illetve a talajvíztükör mélységének ismeretében a felszín alatti víz eredetű belvízképződésre való hajlam is becsülhető. A tapasztalatok azt mutatják, hogy még a jobb adottságú talajokon is könnyen kialakulhat összegyülekezési belvíz, általában az intenzív szántóföldi művelés következményeként. Az ennek háttérben álló talajtömörödés a talaj vízbefogadó és vízraktározó képességének növelését célzó agrotechnológiai eljárásokkal megszüntethető, illetve megelőzhető (Birkás, 2011). Ennek pozitív hatása nemcsak a belvízkárok csökkenésében, hanem a víztartékok növekedésében is egyértelmű (6. ábra).



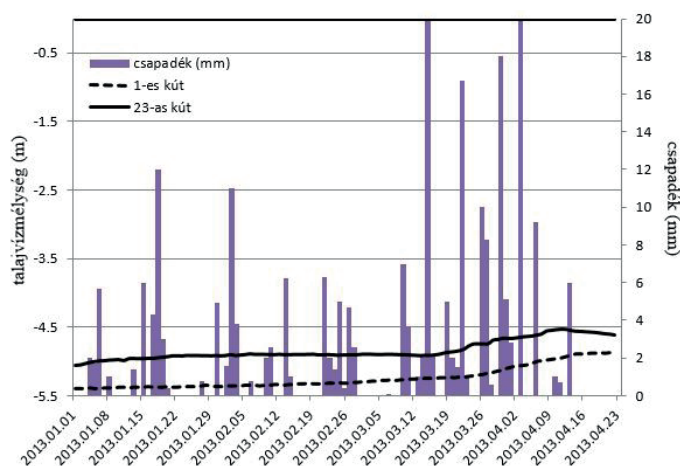
6. ábra. A több tonnás mezőgazdasági gépek talajtömörítésének eredményeképpen 25–50 cm mélységben kialakuló ún. eketalp-réteg hatása a talaj víztartalékaira. A szám adatok csak tájékoztató jellegű példák.

A MERIEXWA monitoring hálózat kútjainak mérési eredményei alapján megállapítottuk, hogy a szélsőségesen száraz 2011–2012-es évek után 2012 telére még a belvizek által legveszélyeztetettebb területeken (Torontál, Maros-szög) is 3–3,5 m alá süllyedt a talajvízszint, a homokhátság magasabb részein (pl. Ásotthalom környékén) pedig 5 m alatt állandósult. A csapadékban rendkívül gazdag 2013-as első negyedév nem várt fordulatot hozott a talajvíztükör alakulásában: március 15. és április 10. között bő 3 hét alatt 1,5–2 m-es vízszintemelkedés következett be a kutak döntő többségénél (7. ábra). Ennek egyik feltétele a bőséges csapadékhullás volt, az ATIKÖVIZIG batidai mérőállomásán januárban 43, februárban 52, márciusban pedig 108(!) mm csapadékot regisztráltak. Emellett a felszínhez közeli talajvíztükör és a földtani felépítés is jelentős szerepet játszott a gyors vízszintemelkedésben.



7. ábra. Két maros-szögi kút vízszintváltozása 2013 elején.

Más kutaknál ugyanakkor a mély talajvízszint és a jelentős oldalirányú eláramlás miatt a leírt csapadékmennyiség alig érezte a hatását. Erre példa a 8. ábrán bemutatott ásothalmi kút, mely nagy vízáteresztő képességű homokos összetételű mélyült. Ehhez a menetgörbéhez hasonló néhány teljesen más hidrológiai adottságú kúté is, mint pl. a maros-szögi 23-as kúté, mely egy mélyfekvésű, mátrixában vegyes agyagos-iszapos-homokos folyóvízi üledékből felépülő térszínen található (8. ábra).



8. ábra. Az 1-es sz. ásothalmi és a 23-as sz. maros-szögi kút menetgörbéje.

Itt egyértelműen a felszínközeli rétegek gyenge vízvezető képessége játssza a döntő szerepet abban, hogy a lehullott csapadék nem tud hasznosulni: az összegyülekezési belvizekre láthatunk itt is jó példát, ugyanis a belvízfoltok alatt a kút vízszintje még ekkor is 4,5–5 m-es mélységben volt a felszíntől (9. ábra).

Összefoglalóan a MERIEXWA projekt talajvíz-megfigyelő hálózata, valamint a talajvíz szintjét modellező teljes magyar-szerb rendszer működésének tapasztalatai és az eredmények azt mutatják, hogy egy-egy csapadékos időszak vagy év átmeneti talajvízszint-növelő hatásán kívül a vizsgálat közel 10 évében (2012–2020) tendenciózus talajvízszint-csökkenés volt megfigyelhető a dél-alföldi és észak-vajdasági régióban.



9. ábra. Összegyülekezési belvíz a 23-as kút közelében.

A WAHASTRAT projekt keretein belül kidolgozott, majd a WATER@RISK-ben is alkalmazott mérőállomások koncepciója szintén túlmutat az említett két projekt lehetőségén. A szerzett tapasztalatok országos szintű hasznosulása az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) koordinálásával egy új, napi időléptékű aszályindex kidolgozása, mely jelenleg az OVF által működtetett Operatív Vízhány Értékelő és Előrejelző Rendszer alapját képezi (Fiala et al., 2018). A rendszer részeként 2016-tól napjainkig egy olyan meteorológiai és talajnedvesség-mérő monitoringrendszer épült ki, mely jelenleg, 2021-ben már több mint 100 állomást számlál (<https://aszalymonitoring.vizugy.hu/>).

Zárógondolatok

Cikkünk elsődleges célja az SZTE Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszékének aszályal és belvízzel kapcsolatos kutatásainak a bemutatása volt. Bár alapvetően a felszínközeli vizek – beleértve a talajnedvességet is – monitorozását helyeztük a cikk középpontjába, mindenképpen meg kell említenünk, hogy a különböző monitoring-rendszereink segítségével az utóbbi 15 évben végzett talajvízszint- és talajnedvesség-méréseink nagyon jól alátámasztják azt az országos tendenciát, hogy felszín alatti vízkészleteink drámai módon apadnak (Blanka and Ladányi, 2014; Fiala et al., 2014; Mezősi et al., 2017; Ladányi and Blanka, 2019; Ladányi et al., 2021). Talajnedvesség-monitoringunk rávilágít arra is, hogy rendkívül fontos talajaink eredeti szerkezetének megőrzése, a szerkezetszétesés és a tömörödés megelőzése (ld. eketalp-réteg, 6. ábra), mivel ezen folyamatok térhódításával óriási vízkészlet természetes tározásától fosztjuk meg vízhiányos Alföldünket (Várallyay et al., 1980; Várallyay, 2008).

Legfontosabb szakpolitikai következményként megfogalmazható, hogy kiemelt jelentőségű a vízvisszatartás minden eszközzel való segítése, beleértve az ehhez szükséges törvényi háttér megeremelését (elvezetés helyett visszatartási kötelezettség), agrártámogatási rendszer átalakítását, agrotechnikát, vízvisszatartásra alkalmas területek kijelölését is.

Irodalom

- Barta, K., 2013: Inland Excess Water Projection based on Meteorological and Pedological Monitoring Data on a Study Area Located in the Southern Part of The Great Hungarian Plain. *J. Environ. Geogr.* 6/3–4, 31–37. <https://sciendo.com/article/10.2478/jengeo-2013-0004>
- Barta, K., Bata, T., Benyhe, B., Brkić, M., Dogan, V., Dolinaj, D., Farsang, A., Gál, N., Henits, L., Juhász, L., Kiss, T., Kovács, F., Mezősi, G., Mucsi, L., Mészáros, M., Obradović, D., Pavić, D., Rakonczai, J., Savić, S., Sipos, Gy., Sümeghy, B., Szatmári, J., Szilassi, P., Tobak, Z., van Leeuwen, B. és Živanov, M., 2013: Inland Excess Water – Belvív – Suvišne Unutrašnje Vode. Szegedi Tudományegyetem, Újvidéki Egyetem. Szeged, Újvidék. (http://www.geo.u-szeged.hu/meriexwa/sites/all/themes/meriexwa/pdf/IEW_book.pdf)
- Barta, K., Crnojevic, V. B., Blanka V., Ladányi, Zs., Fiala, K. és Vukobratovic, D., 2014: Terepi talajnedvesség megfigyelés az aszálykutatás szolgálatában. In (szerk.: Blanka V. és Ladányi Zs.) Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban – Suša i upravljanje vodama u južnoj mađarskoj ravnici i Vojvodini – Drought and Water Management in South Hungary and Vojvodina. Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged. 245–258.
- Bárdossy, Gy., 1997: Geomatematikai kérdések geológus szemmel. *Magyar Geofizika* 38, 124–141.
- Bárdossy, Gy., Fodor, J., Molnár, P. és Tungli, Gy., 2002: A bizonytalanság értékelése a földtudományokban. *Földtani Közöny* 130, 291–322.
- Birkás, M., 2011: A klímaváltozás hatása a növénytermesztési gyakorlatra. In (szerk.: Rakonczai, J.) Környezeti változások és az Alföld. *A Nagyalföld Alapítvány kötetei* 7., Békéscsaba, 257–269.
- Carlson, T., 2007: An Overview of the „Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors* 7, 1612–1629. (<https://doi.org/10.3390/s7081612>)
- Dövényi, Z. (szerk.), 2010: Magyarország kistájainak katasztere. MTA FKI, Budapest. 187–194.
- Dunay, S. és Kalmár, E., 1993: A talajvízszint szerepe a talajok vízháztartásában. *Éghajlati és agrometeorológiai tanulmányok* 1, Országos Meteorológiai Szolgálat, 43–84.
- Faragó, T., Kozma, E. és Nemes, Cs., 1989: Drought indices in meteorology. *Időjárás* 93, 45–59.
- Fiala, K., Blanka, V., Ladányi, Zs., Szilassi P., Benyhe, B., Dolinaj, D. and Pálfai I., 2014: Drought Severity and its Effect on Agricultural Production in the Hungarian-Serbian Cross-Border Area. *J. Environ. Geogr.* 7/3–4, 43–51. (<https://sciendo.com/article/10.2478/jengeo-2014-0011>)
- Fiala, K., Barta, K., Benyhe, B., Fehérváry, I., Lábdy, J., Sipos, Gy. és Győrffy, L., 2018: Operatív aszály- és vízhiánykezelő monitoring rendszer. *Hidrológiai Közöny* 98/3, 14–24.
- Füst, A. és Geiger, J., 2011: Monitoringtervezés és -értékelés geostatistikai módszerekkel I. Szakértői vélemény alapuló, „igazoló” mintázás geostatistikai támogatása. *Földtani Közöny* 140, 303–312.
- Hisdal, H. and Tallaksen, L. M., 2003: Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics. *J. Hydrol.* 281, 230–247.

- Isaaks, E. H. and Srivastava, M. R., 1989: An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York
- Journel, A. G., 1999: Markov Models for Cross-Covariances. *Math. Geol.* 31, 955–964.
- Kozák, P., 2003: Az alföldi belvizek elvezetése. *Hidrológiai Közöny* 83, 51–61.
- Kozák, P., 2011: Belvízi jelenségek az Alsó-tiszai vízgyűjtőkön az 1955–2010 közötti időszakban. In (szerk.: Rakonczai, J.), *Környezeti változások és az Alföld. A Nagyalföld Alapítvány kötetei* 7, 127–136.
- Körösparti, J., Bozán, Cs., Pásztor, L., Kozák, P., Kuti L. és Pálfai, I., 2009: GIS alapú belvív-veszélyeztetettség térképezés a Dél-Alföldön. Magyar Hidrológiai Társaság XXVII. Vándorgyűlése. *Konferencia Proceedings CD-ROM*. 2009. július 1-3., Miskolc 1-14.
- Laborczi, A., Bozán, Cs., Körösparti, J., Szatmári, G., Kajári, B., Túri N., Kerezsi G. és Pásztor L., 2020: Application of Hybrid Prediction Methods in Spatial Assessment of Inland Excess Water Hazard. *ISPRS Int. J. Geo-Inform.* 9/4, 268. (<https://doi.org/10.3390/ijgi9040268>)
- Ladányi, Zs. és Blanka, V., 2019: Aszály és belvív monitoring és menedzsment, valamint a kapcsolódó kockázatok a Dél-Alföldön és a Vajdaságban. SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged. (<http://www.geo.u-szeged.hu/wateratrisk/sites/www.geo.u-szeged.hu/wateratrisk/files/pdf/kotet.pdf>)
- Ladányi, Zs., Barta, K., Blanka, V. and Pálffy, B., 2021: Assessing Available Water Content of Sandy Soils to Support Drought Monitoring and Agricultural Water Management. *Water Resour. Manage.* 35, 869–880. DOI: 10.1007/s11269-020-02747-6
- Mezősi, G., Bata, T., Blanka, V. és Ladányi, Zs., 2017: A klímaváltozás hatása a környezeti veszélyekre az Alföldön. *Földrajzi Közlemények* 141, 60–70.
- Pálfai, I., 2002: Probability of drought occurrence in Hungary. *Időjárás* 106, 265–275.
- Pálfai, I., 2004: Belvizek és aszályok Magyarországon. Hidrológiai tanulmányok. Közlekedési Dokumentációs Kft., Budapest.
- Palmer, W. C., 1965: Meteorological Drought. Res. Paper No.45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C., USA.
- Patel, N. R., Anapashsha, R., Kumar, S., Saha, S. K. and Dadhwal, V. K., 2009: Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *Int. J. Remote Sens.* 30, 23–39.
- Mallick, K., Bhattacharya, B. K. and Patel, N. K., 2009: Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agromet. Forest. Meteorol.* 149, 1327–1342.
- Maracchi, G., 2000: Agricultural Drought – A practical approach to definition, assessment and mitigation strategies. In (ed.: Vogt, J. V., Somma, F.), *Drought and Drought Mitigation in Europe. Adv. Natural Technol. Haz. Res.* 14, 63–78.
- Perger, L., 1996: A talajvízészlelőhálózat korszerűsítése. IV. ütem. Hódmezővásárhely és Szeged. Kézirat, Budapest.
- Rakonczai, J., Farsang, A., Mezősi, G., és Gál, N., 2011: A belvízképződés elméleti háttere. *Földrajzi Közlemények* 135, 339–349.
- Schmugge, T., 1990: Measurements of surface soil moisture and temperature. In (ed.: Hobbs, R. J., and Mooney, H. A.): *Remote Sensing of Biosphere Functions*. Springer-Verlag, New York. 31–63.
- Shmaryan, L. E. and Journel, A. G., 1999: Two Markov Models and Their Application. *Math. Geol.* 31, 965–988.
- Stefanovits, P., 1992: Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Szalai, J., 2011: Talajvízszint-változások az Alföldön. In (szerk.: Rakonczai J.): *Környezeti változások és az Alföld. A Nagyalföld Alapítvány kötetei* 7. Békéscsaba. 97–110.
- Szatmári, J., Barta, K., Csépe, Z., Fehér, Zs., Miodrag, B., Obradovic, D., Dudarin, és Z., Radonic, V., 2014: A talajvíz megfigyelésének lehetőségei. In (szerk.: Blanka V. és Ladányi Zs.) *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban – Suša i upravljanje vodama u južnoj mađarskoj ravnici i Vojvodini – Drought and Water Management in South Hungary and Vojvodina*. SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged. 289–299.
- Thyll, Sz. és Bíró, T., 1999: A belvív-veszélyeztetettség térképezése. *Vízügyi Közlemények* 81, 709–718.
- Xianlin, M. and Journel, A. G., 1999: An expanded GSLIB Cokriging Program Allowing for two Markov Models. *Comp. Geosc.* 25, 627–639.
- Várallyay, Gy., Szűcs, L., Rajkai, K., Zilahy, P. és Murányi, A., 1980: Magyarországi talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak kategóriarendszere és 1:100.000-es méretarányú térképe. *Agrokémia és Talajtan* 29, 77–112.
- Várallyay Gy., 2008: Talaj-víz kölcsönhatások a klímaváltozás tükrében. Talajvédelem különszám, Nyíregyháza. 17–30.
- Vicente-Serrano, S. M., Pons-Fernandez, X. and Cuadrat-Prats, J. M., 2004: Mapping Soil Moisture in the Central Ebro River Valley (Northeast Spain) with Landsat and NOAA Satellite Imagery: a Comparison with Meteorological Data. *Int. J. Remote. Sens.* 25, 4325–4350.
- Wang, L., 2008: Remote Sensing Techniques for Soil Moisture and Agricultural Drought Monitoring. PhD Thesis. Fairfax, USA.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. and Khan, F. I., 2011: A review of drought indices. *Environ. Rev.* 19, 333–349.
- https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarorszag/
- <https://edo.jrc.ec.europa.eu>
- <https://aszalymonitoring.vizugy.hu/>