

## Talajnedvesség-tartalom mérése földradarral (GPR) és mezőgazdasági alkalmazhatóságának lehetőségei

<sup>1</sup>HERCEG András, <sup>2</sup>TÓTH Csaba

<sup>1</sup>Soproni Egyetem, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet, Sopron, Magyarország  
<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék,  
Budapest, Magyarország

(Beérkezett: 2023.01.27.; Elfogadva: 2023.11.02.)  
(Online megjelent: 2023.11.22.)

### Szemle

© Szerző(k) 2023



### Összefoglalás

A talajnedvesség-tartalom variabilitásának mérését jelentősen megnehezíti a talaj heterogenitása és a környezeti változatosság. Jelenleg még nem fejlesztettek ki olyan univerzális módszert, amely a magas vagy alacsony talajnedvesség-zónák szántóföldi léptékű feltérképezésére alkalmas úgy, hogy a talajnak és a talajnedvesség áramlásának teljes zavarásmentességét nagy mélységben is biztosítja.

A talajnedvesség-mérés részben (talajkapcsolt), vagy teljesen roncsolásmentes (levegőkapcsolt) lehetőségét biztosítja a földradar (GPR), amely nagy felbontást és jelentős behatolási mélységet biztosít a közepes léptékű talajnedvesség meghatározáshoz, így hiánypótló technikát jelent a kisléptékű pontszerű és a nagyléptékű távérzékelési technikák közötti metodikai hiány kitöltésére. Emellett jobb időhatékonyággal alkalmazható más roncsolásos és roncsolásmentes eljárásokkal összevetve.

A talajradart sikeresen alkalmazták a talajnedvesség-meghatározásra, de hidrológiai vizsgálatokban történő alkalmazásának nagy potenciálja ellenére nem minden körülmény között működik optimálisan. Felhasználhatósága többnyire olyan területekre korlátozódik, ahol viszonylag alacsony az elektromos vezetőképesség (az elektromágneses hullám gyenge csillapodására való tekintettel). Ezen túlmenően egyes talajradar módszerek működésének alapfeltétele a jól azonosítható és folyamatos jelviszaverődés, továbbá a dielektromos állandó tekintetében a földradar-rendszerek térben folyamatos felszín alatti kontrasztot igényelnek.

A talajnedvesség és annak áramlása kulcsparaméter a mezőgazdaság különböző területein. A talajnedvesség (és a talajvíz) látja el a növényeket, ami elengedhetetlen feltétele a növények fejlődésének. Ennélfogva a talaj nedvességtartalmának, eloszlásának, áramlásának, valamint a beszivárgás sajátosságainak alapos és lokális ismerete az öntözés hatékony megvalósításának alapköve, különösen a félszáraz és száraz éghajlatú területeken.

\*Levelező szerző: HERCEG ANDRÁS, Soproni Egyetem, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet, 9400 Sopron, Sopron Bajcsy-Zsilinszky u. 4.  
E-mail: herceg.andras88@gmail.com

A talajradar mérési alapjaival, valamint hasznosítási lehetőségeivel összefüggésben az elsősorban nemzetközi szakirodalmat összegezve megállapítható, hogy a GPR előnyös mérőeszköz lehet, amely segíthet a talaj nedvességeloszlásának feltérképezésében, tekintettel a beszivárgásra, a párolgás és a növényi vízfelvétel okozta vízvesztésre is. Következésképpen mezőgazdasági felhasználhatósága lehetséges.

A talajradar hasznos része lehet a „Smart farming”-nak (intelligens gazdálkodás), segítséget nyújthat a talajban elhelyezett talajnedvesség-mérő szenzorok kijelölésében. Különösen, ha a közelmúltban megjelent új, szimultán többeltolások és többcsatornás (SiMoc) GPR rendszerre asszociálunk, amely gyors talajprofil-feltérképezést tesz lehetővé a hét vevőegységével, de a hagyományos egycsatornás GPR sebességével.

Ha a teljes roncsolásmentesség a cél, úgy a drónra szerelt levegőkapcsolt GPR-ek nyújthatnak lehetőséget. Megjegyzendő azonban, hogy a talaj-levegő határfelületen jelentkező szignifikáns jelcsillapodás (hullámszóródás) következtében a feltárási mélység jelentősen csökken.

A földradar végső soron mérési alapul szolgálhat a hatékony (precíziós) öntözési gazdálkodás kialakításához, és a megfelelő vízfelhasználási hatékonyságot biztosítva járulhat hozzá a precíziós mezőgazdasági programok megvalósításához.

**Kulcsszavak:** földradar (GPR), talajnedvesség, mezőgazdaság

### Bevezetés

Korunk egyik legégetőbb globális kérdése az élelmiszertermelés szempontjából, hogy meddig tudjuk élelemmel ellátni az egyre növekvő népességet egyre kevesebb (és gyakran gyengébb minőségű) rendelkezésre álló termőterületről (FAO, 2020). A kulcs a növényi erőforrás-felhasználás hatékonyságának folyamatos fejlődése (MORISON et al., 2008), és a termőtalajok minőségének javítása (LIU et al., 2015).

A Föld vízkészletének csak 0,0012%-át képezi a földfelszín közeli talajnedvesség (VANDER & CASEY, 2010), azonban a hidrológiai folyamatok egyik kulcsparamétere, amely befolyásolja a vízcserét és az energiaáramlást a földfelszín/légkör határfelületen (SHUKLA & GARG, 2014). Szántóföldi körülmények között a talajnedvesség a növények fejlődésében kulcsparaméter, a termés minőségét leginkább meghatározó faktorok egyike (KLOTZSCHE et al., 2018). Legnagyobb kihívást a száraz és félszáraz régiók jelentik, ahol a felszín alatti vízforrásokat, különösen a víztartó rétegeket használják öntözésre, mivel a csapadék csak egy részét fedezi a termőnövények párologtatási veszteségének (NEUPANE & WENXUAN, 2019).

A talajban tárolt nedvesség mennyisége a talaj szemcseméret-eloszlásától, szerkezetétől, porozitásától, tömörödöttségének fokától, a termőrétegének vastagságától, ásványi összetételétől, sótartalmától, szennyezettségétől, szervesanyag tartalmától, illetve a légkör hőmérsékletétől és a páratartalmától is függ (MUNOTH et al., 2016).

A talajnedvesség-tartalom jelen cikk esetében a *térfogati talajvíz-tartalmat jelenti*, ami az adott talajban lévő víz térfogatának, a teljes talajtérfogathoz viszonyított aránya egy egységre vonatkoztatva (TOSTI & SLOB, 2015). A talajnedvesség és annak tér- és időbeli változása több tudományterület, így az ökológia, mezőgazdaság, hidrológia és mérnöki tudományok (pl.: talajok, talajfelszín alatti rétegek kutatásai) kulcsparamétere, ezért meghatározza a csapadéknak a beszivárgásra, felszíni lefolyásra jutó részét, ezáltal az erózió, vízfolyás-vízhozam, és a talajvíz-utánpótlódás arányait (KLOTZSCHE et al., 2018).

A talajnedvességtartalom-meghatározási eljárásoknál (áttekintés a következő fejezetben) jelenleg is hiányosság van a nagyléptékű, azaz pontszerű (<0,01 m<sup>2</sup>), és a kis/közepes léptékű, vagyis távérzékelt (>100 m<sup>2</sup>) mérési lehetőségek között. A két véglet közötti (0,01–100 m<sup>2</sup>) hiány áthidalását jelentheti a szántóföldi léptékű alkalmazást biztosító földradar (vagy talajradar – ground penetrating radar; GPR) (SHUKLA & GARG, 2014; TOSTI & SLOB, 2015).

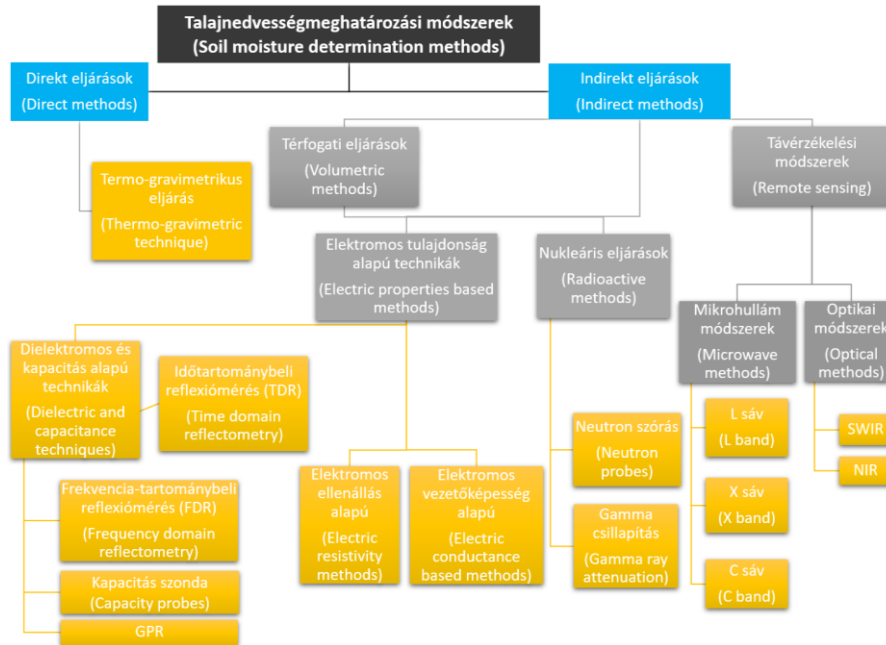
A GPR mérések sikeres mezőgazdasági alkalmazásának két fő követelménye a felszín alatti első méterig való behatolás képessége és a centiméteres felbontás (LOMBARDI et al., 2022).

Jelen cikk célja a talajnedvesség-tartalom földradarral történő mérési, valamint mezőgazdasági alkalmazhatósági lehetőségeinek bemutatása, összefoglalva a legfontosabb, elsősorban nemzetközi szakirodalmat.

### Talajnedvesség-meghatározási módszerek

A talajnedvesség meghatározásának legelterjedtebb, hagyományos, leginkább kutatott, ugyanakkor nagyszámú minta esetén munkaigényes, direkt eljárású lehetősége a magfűrészekre alkalmazott termogravimetricus eljárás (hőelemzési technika, ahol a vizsgált mintát standard 105 °C-on tömegállandóságig szárítják, és az így mért abszolút száraz tömegre vonatkoztatják a tömeg%-os nedvességtartalmat). A módszerrel a talaj térfogattömegének (vagy térfogatsűrűségének) mérése alapján konvertálhatók a kapott tömegarányos, (vagy tömeg%-os) nedvességtartalom eredmények térfogatarányos, (vagy térfogat%-os) értékekké (STEELMAN & ENDRES, 2012; TOSTI & SLOB, 2015).

A kevesebb roncsolással járó, indirekt módszerek közé sorolhatók a nukleáris eljárások, mint a gamma sugárgyengítéses módszerek, vagy a finomabb kalibrációt biztosító neutronszonda (KLOTZSCHE et al., 2018), valamint az elektromágneses szenzorok. Ezen utóbbi csoportba tartoznak a dielektromos és kapacitás alapú technikák: a legismertebbek közül például a magasfrekvenciás impedancia mérést lehetővé tevő kapacitás szonda, az időtartománybeli reflexiómérés (Time Domain Reflectometry; TDR), és a frekvencia-tartománybeli reflexiómérés (Frequency Domain Reflectometry; FDR). Az elektromágneses szenzorok közé tartoznak továbbá az elektromos ellenállás és elektromos vezetőképesség alapú technikák (*l. ábra*). Az alkalmazott technikák közül érdemes még megemlíteni a hőimpulzus-szenzorokat, tenziométereket és a gipszblokkok-nylonelemek elektromos vezetőképességének mérését is (TOSTI & SLOB, 2015).



1. ábra

## Talajnedvesség-meghatározási módszerek csoportosítása

Teljesen roncsolásmentes talajnedvesség-vizsgálatot tesz lehetővé a távérzékelési eszközök alkalmazása, ahol a műszerek nem érintkeznek a talajjal. Továbbá a nagyobb területi lefedettségre vonatkozó méréseket is lehetővé teszik (100 m<sup>2</sup> – 100 km<sup>2</sup>) (ROBINSON et al., 2008). A talajnedvesség távérzékelés alapú meghatározása elsősorban mikrohullámú szenzorokkal történik. Mivel mind a passzív, mind az aktív mikrohullámok érzékenyek a víz dielektromos állandójára, ami befolyásolja azok emissziós képességét és visszaverődését, lehetővé téve ezzel a felszíni talajnedvesség mérését. Az aktív érzékelő mikrohullámú impulzust bocsajt ki és fogad, míg a passzív érzékelő a természetes hőkibocsátást rögzíti a föld felszínéről.

A spektrumtartomány alapján optikai (VIS – VISible – látható fény; NIR – Near Infrared közeli hullámhosszú infravörös), termális (LWIR – Long WaveLength Infrared – hosszú hullámhosszú infravörös), valamint mikrohullám típus (passzív és aktív) különíthető el.

A spektroszkópiai módszer elve az elektromágneses sugárzási energia és az anyag közötti kölcsönhatáson alapul. A talaj fizikai és kémiai jellemzőinek – például vízmolekuláknak – jelenléte miatt az elektromágneses sugárzás az egyes molekuláris kötések rezgését idézi elő. A rezgések révén a fény elnyelődik egy frekvenciához kötött, meghatározott energiakvantummal, lehetővé téve a talaj tulajdonságainak elemzését (PRADIPTA et al., 2022a; SHUKLA & GARG, 2014).

Az aktív mikrohullámú érzékelők nagyobb térbeli feloldóképességgel bírnak, mint a passzív mikrohullámúak, ezért felhasználásuk egy farm gazdaság szintjén célszerű (amelyek átlagos területe 1,8 km<sup>2</sup> az USA-ban). A passzív mikrohullámú szenzorok a helyi vagy regionális szintű mezőgazdasági döntéshozatalban hasznosak (PRADIPTA et al., 2022b).

A növénytakaró és a talaj jellemzői jelentősen befolyásolhatják a talajnedvesség-meghatározás pontosságát, úgy, hogy a szenzor érzékenysége a növényzet sűrűségének növekedésével csökken. Általában ez a probléma minimálisra csökkenthető hosszabb hullámhossz használatával. A műhold alapú távérzékelés fő korlátja, hogy nem képes megragadni a talajnedvesség dinamikáját a mélyebb talajzónában (gyökérvíz talajnedvesség), ami a gyökérvízfelvétel és a talaj hidraulikus paraméterei szempontjából lényeges információ (PRADIPTA et al., 2022b).

Az optikai és termikus szenzorok kombinációja (optikai-termikus), az úgynevezett hőmérséklet-növényzet háromszög megközelítés. Alapelve, hogy a talajnedvesség szorosan összefügg a földfelszín hőmérsékletével és a vegetációs indexszel (PRADIPTA et al., 2022b).

A felszíni talajnedvesség mérés konkrét, távérzékelési alapú termékei, mikrohullám szenzor esetén a SMAP\_SM (Soil Moisture Active Passive) (9 km-es térbeli felbontás); az AMSR2 SM (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) (25 km-es térbeli felbontás). A MODIS\_LST (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer\_Land Surface Temperature), mint termikus (1 km-es térbeli felbontással) és a MODIS\_Surface Reflectance, mint optikai (250 m-es térbeli felbontás), továbbá a Sentinel-1 és -2 Landsat-8 OLI & TIRS (ahol a Sentinel-1: 15 m, míg a Sentinel-2: 10–60 m térbeli felbontásúak), az előbbi esetén mikrohullám, optikai és termális, utóbbi esetén pedig optikai és termális szenzorokról beszélhetünk. A gyökérvíz talajnedvesség-feltérképezésének, távérzékelés alapú termékei mikrohullám-optikai szenzor esetén a SMAP SM, SMOS SSM (Soil Moisture and Ocean Salinity Surface Soil Moisture) (35 km-es térbeli felbontás), SMOS\_RZSM (Soil Moisture and Ocean Salinity Root Zone Soil Moisture), MODIS LST, MODIS Surface Reflectance (PRADIPTA et al., 2022b). Itt jegyezzük meg, hogy a terepi módszerek mindig pontosabbak, mint a távérzékelés alapú, közvetett adatgyűjtési eljárások.

Kiemelendők a geofizikai módszerek, amelyek kifejezetten érzékenyek a talaj elektromos tulajdonságainak változásaira, a dielektromos permittivitásra vagyis „áteresztőképességre” és/vagy az elektromos vezetőképességre. Fő előnyük, hogy minimális roncsolással vagy teljesen roncsolásmentesen kivitelezhetők, és jelentős területet (1–80 km<sup>2</sup>) képesek lefedni. A mezőgazdasági alkalmazás tekintetében, a geofizikai módszereken belül az elektromos ellenállás (ERT), az elektromágneses indukció (EMI), illetve a jelen cikk tárgyát képező földradar (GPR) a legszélesebb körben alkalmazott technikák. A GPR esetén az elektromágneses hullámoknak – rádióspektrum, mikrohullám tartomány – a talajba történő kibocsájtása, majd detektálása történik (TOSTI & SLOB, 2015). A precíziós gazdálkodás területén legelterjedtebben a GPR-t alkalmazzák, mivel a módszer érzékeny a vizsgált közeg (talaj) permittivitási és vezetőképességi tulajdonságaira is (LOMBARDI et al., 2022).

### GPR alkalmazhatósága talajnedvesség-tartalom mérésére

A földradar egy részben, vagy teljesen roncsolásmentes eljárás, amely nagy horizontális és vertikális felbontást tesz lehetővé. Alacsony veszteségű anyagok, például a homok maximális elérhető függőleges felbontása nagyfrekvenciás (900 MHz-es) antennával 2–8 cm (NEAL, 2004). Másik előnye, hogy jelentős, akár 50 méteres behatolási mélység is elérhető vele (XINBO et al., 2019). A GPR-t számos tudományterületen sikeresen alkalmazzák, így például a régészetben és a kultúrmérnöki tudományokban felszín alatti objektumok, például védőgátak állapotának feltérképezésére (SHEISHAH et al., 2022), vagy útpályaszerkezet-elemzéshez (TOSTI & SLOB, 2015; PRIMUSZ & TÓTH, 2021). Ez utóbbi kapcsán HERCEG (2022) mutatja be az útpályaszerkezetek földműveinek vizsgálatára alkalmazható GPR alapú talajnedvesség-tartalom meghatározásának szakirodalmát.

A talajvizsgálatok során, a GPR leggyakoribb alkalmazása a talajnedvesség meghatározása, a nedvességtartalom elektromágneses jelterjedést befolyásoló tulajdonsága miatt (ZAJÍCOVÁ & CHUMAN, 2019; PATHIRANA et al., 2023).

A GPR nagyfrekvenciás (többnyire 10–1200 MHz-es) elektromágneses hullámokat használ a vizsgálandó közegben lévő célobjektumok detektálására (DANIELS, 2004). A GPR adó egysége elektromágneses hullámimpulzusokat bocsajt a vizsgálandó közegbe, a vevő egysége a visszavert jeleket fogadja, amit bisztatikus kialakításnak neveznek. A földradar elsődlegesen időt mér, az úgynevezett kétirányú futás idejét (HUISMAN et al., 2003). Ezt bővebben a *GPR alapú talajnedvesség-mérési módszerek* c. fejezet tárgyalja.

A földradar kifejezetten érzékeny a talajtextúrára, és a talaj elektromos vezetőképességére (HUISMAN et al., 2003), ezért felhasználhatósága többnyire olyan területekre korlátozódik, ahol viszonylag alacsony a talaj elektromos vezetőképessége, gyenge az elektromágneses hullám csillapodása (KLOTZSCHE et al., 2018).

A földradar két főparamétere a felbontás, és a behatolási mélység. Felbontása, annak központi frekvenciájával együtt nő (XINBO et al., 2019). A GPR mérések esetén a sávzélesség értéke alapvetően 10 és 1200 MHz közé esik. A feltárható mélység a vizsgálandó talaj elektromos konduktivitásának, és a GPR központi frekvenciájának függvénye. Alacsony vezetőképességű közeg (száraz homok, kavics) esetén az alacsony frekvenciás GPR rendszerek (pl. 50 vagy 100 Mhz-es) néhány 10 méteres, de akár 50 méteres behatolási mélységet is képesek elérni (DOOLITTLE et al., 2007). A magas frekvenciás típusok (pl.: 450 vagy 900 MHz) pár méteres behatolási mélységet valósíthatnak meg. A GPR azonban nem megfelelő eszköz szikes talajokon, ahol a behatolási mélység jellemzően 25 cm-nél kisebb. Kőzetlisztes homok vagy agyag esetén is jelentősen csökken a behatolási mélység. A nedves agyagokban kifejezetten kedvezőtlenek a lehetőségek a talajnedvesség-tartalom meghatározására, mert ezeknél a behatolási mélység jellemzően kevesebb, mint 1 m (DOOLITTLE et al., 2007).

SCHROTT és SASS (2008) rámutat, hogy a meredek és sziklás terepfelszín a GPR antennák nagy méretei miatt gyakorlatilag lehetetlenné teszi azok alkalmazását. Emellett az erdőállományok földradar alapú vizsgálata is korlátozott, hiszen a fák

gyökérzete, mint visszaverődést okozó felületek, hibás mérési adatokat generálnak. Míg a fák gyökérzetének talajradarral történő feltérképezéséről az elmúlt 20 évben számos tanulmány született, addig a mezőgazdasági termőnövények gyökérzetének vizsgálatával csak korlátozott számú közlemény foglalkozott (SHUKLA & GARG, 2014).

A DOOLITTLE és munkatársai (2007) által bemutatott talajalkalmassági térképek információt adnak azokról a talajtulajdonságokról, amelyek befolyásolják a földradar alkalmazhatóságát. Ezeket a térképeket az Egyesült Államokban fejlesztették ki a talaj elektromos vezetőképességének adatai alapján, amelyet a talaj agyagtartalma, nátrium-abszorpciós aránya és kalcium-karbonát-tartalma befolyásol (LIU et al., 2016).

Hazai kutatásként ki kell emeljünk NÁDASI és munkatársai (2020) munkásságát, akik Magyarország földradar-alkalmazhatósági térképét készítették el. Öt osztályt különítettek el úgy, hogy az első jelenti a legalkalmasabbat, míg az ötödik jelenti a legkevésbé alkalmasat. Az alkalmassági osztályok meghatározásánál a radarhullámok terjedését gátló tényezők, mint jelző faktorok, jelentették az alapot, ami elsősorban a víz felszínközeli jelenléte (vagy hiánya), az agyagtartalom, az oldott ionok potenciális mennyisége, a szikesedés és a kémhatás. A NÁDASI et al. (2020) által közölt alkalmassági térkép rámutat, hogy Magyarországon a GPR mérésekre kimondottan, illetve közepesen alkalmas területek aránya a teljes területhez viszonyítva megközelítőleg 15–15%. Körülbelül 50%-ra tehető a kevésbé alkalmas, míg 20%-ra az alkalmatlan területek aránya. Jó területeknek számítanak a Duna-Tisza köze, valamint a Nyírség homok szövetű talajai.

### A GPR mérési elve

A dielektromos állandó (valós része) ( $\epsilon_r$ ) egy anyag vákuumhoz viszonyított elektromos térerősség-tárolási kapacitását adja meg. Értéke a háromfázisú polidiszperz rendszerben széles skálán mozoghat, így a cseppfolyós halmazállapotú (szabad, vagy másnéven gravitációs) víz értéke a hőmérséklet függvényében 78–88 közötti (a magasabb hőmérséklet a polarizáció erősödésével csökkenti a permittivitást), a talajlevegő értéke kb. 1, míg a szilárd fázisok kb. 3–10 közöttiek (CASSIDY, 2009; HUISMAN et al., 2003; STEELMAN & ENDRES, 2012). A három talajalkotó fázis közti szignifikáns különbség főként a vízmolekulák jelentős polarizálhatóságának köszönhető (TOSTI & SLOB, 2015). A higroszkópos (adszorpciós) víz esetében a permittivitás 4 alá is csökkenhet (SAARENKETO, 1998), a kapilláris víz permittivitása pedig a szabad víz és a higroszkópos értékei között található. Ezt a hatást a nagy fajlagos felülettel rendelkező részecskék (agyag vagy humusz) okozzák, melyeknek nagyobb a vízmolekulákat megkötő potenciáljuk; ezért a vízmolekulák nem képesek válaszreakcióba lépni az elektromágneses mezővel, és így csökken a talaj dielektromos permittivitása (LAUER et al., 2010).

A talajra jellemző jelentős dielektromos állandó különbség teszi lehetővé a GPR-ek mérőeszközként való használatát a talajnedvesség-tartalom meghatározásában (XINBO et al., 2019). A telítetlen talajok dielektromos permittivitása elsősorban a talaj víztartalmától függ, azonban más tényezők, mint a

litológia, a hőmérséklet, az ionkoncentráció és a pórusfolyadék összetétele szintén befolyásolják azt (LOMBARDI & MAURIZIO, 2019).

Itt jegyezzük meg, hogy a talaj dielektromos permittivitása a talaj szervesanyag-tartalmának emelkedésével csökken, ami a talaj, adott térfogategységnyi súlyának csökkenéséből következik. A száraz biomassa dielektromos permittivitása 1-hez közeli értékű, ami a lebomlással növekszik (ZAJÍCOVÁ & CHUMAN, 2019).

### GPR alapú talajnedvesség-mérési módszerek

Számos, a nedvességérzékelést megcélzó GPR-alapú módszert fejlesztettek ki különböző alkalmazási területekre és anyagokra, így a természetes (módon kialakuló) talajokra is (LAMBOT & ANDRÉ, 2014).

Az elmúlt évtizedekben a földradar egy lehetséges, nagy hatékonysággal alkalmazható műszere volt a telítetlen zónák hidrológiai feltárásának, a vízkészlet kutatásoknak (TOSTI & SLOB, 2015), a talajrétegek azonosításának (DAVIS & ANNAN, 1989), a felszín alatti hidraulikai paraméterek feltérképezésének (HUBBARD, et al. 1997), a talajvízszint lokalizálásának (NAKASHIMA et al., 2001), és természetesen a jelen cikk tárgyát képező talajnedvesség-tartalom mérésnek is (HUISMAN et al., 2003; KLOTZSCHE et al., 2018).

A GPR-alapú talajnedvesség-mérési módszerek területén, a közelmúltban elért kutatási eredményeket XINBO és munkatársai (2019) mutatják be az alapelvek, előnyök, korlátok, valamint alkalmazási lehetőségek tekintetében. A szerzők hét elterjedt mérési technikát demonstrálnak, név szerint a visszavert hullám, a talajhullám, a felszíni visszaverődés, a fűrőlyuk GPR technika, teljes hullámforma inverzió, átlagos burkológörbe amplitúdó és frekvencia eltolás.

Hardver tekintetében talajkapcsolt GPR-t és levegőkapcsolt földradar antenna kialakítást különíthetünk el. Előbbi esetén az eszköz a talajjal közvetlenül érintkezik, ezért ez a megvalósítás csak a felszín alatt roncsolásmentes. Az adatminőséget a talaj felületérdessége, a vegetáció, az antenna pozícionálásakor esetlegesen fellépő akadályok befolyásolják (HUISMAN et al., 2003).

A felszínvisszaverődés módszer levegőkapcsolt antennával működik, ezért teljes roncsolásmentességet biztosít. A technika alkalmas a talajnedvesség nagy térbeli felbontással kivitelezett feltárására, emiatt azonban néhány cm-re szűkül a feltárási mélység, továbbá érzékennyé válik a felszínborítottságra, felületérdességre, (XINBO et al., 2019), ami az érdesség-modell integrálásával javítható (KLOTZSCHE et al., 2018).

Az elterjedt földradar-technikák adatgyűjtési és adatfeldolgozási metódusát tekintve a visszavert hullám, a talajhullám és a fűrőlyuk GPR módszerek esetén először a rendelkezésre álló radarhullámok átlagos sebességének meghatározása szükséges (a GPR által kibocsájtott elektromágneses hullám jel kétirányú futási idejéből meghatározva), amelyet a dielektromos állandó, majd a talajnedvesség számításához használnak. A felszín-visszaverődés módszerrel a reflexiók együttható (a levegő és a talaj felszíne közötti határfelületről történő visszaverődés amplitúdójából meghatározva) és a talaj dielektromos állandója között határoznak meg összefüggést; a teljes hullámforma inverzió és az átlagos burkológörbe amplitúdó módszerekkel



viszont a radarjelekből közvetlenül is meghatározható a talaj dielektromos állandója. A dielektromos állandó alapú módszerek átszámítási képletet igényelnek (bővebben a „*Petrofizikai összefüggések*” fejezetben) a talaj dielektromos állandójának talajnedvességgé alakításához, továbbá terepi kalibrációt (STEELMAN & ENDRES, 2012). A szokványos megközelítéstől eltér a frekvenciaeltoláson alapuló módszer, amely a talajnedvességet a FFT (Fast Fourier Transformation) révén kapja meg.

A talaj, GPR alapú nedvességtartalom meghatározásának pontossága – a talajviszonyoktól és a talajradar antenna konfigurációjától függően –  $0,0026 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (STOFFREGEN et al., 2002) és  $0,115 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (WEIHERMÜLLER et al., 2007) között változhat.

A GPR módszerek mérési pontossága mellett a precíz, térbeli pozicionálása is kiemelt szerepet kap, amit a legtöbb GPR-rendszer ma már lehetővé tesz a GPS-rendszerekkel való plug-and-play kapcsolat segítségével.

A közelmúltban kereskedelmi forgalomba került műholdas kommunikációs jelvétele alapú GPS rendszer az „European Geostationary Navigation Overlay Service” (EGNOS) és a „Wide Area Augmentation System” (WAAS), melyekkel akár 0,04 m abszolút pozíciópontosság érhető el (KLOTZSCHE et al., 2018).

### Petrofizikai összefüggések

A dielektromos állandón alapuló módszereknél a talaj dielektromos állandóját határozzák meg első körben, majd abból helyszíni kalibrációval, vagy empirikus módon a talajnedvességet petrofizikai összefüggés segítségével.

A petrofizikai összefüggéseknek 3 csoportja ismeretes: empirikus összefüggések, térfogati keveréses formulák, effektív közeg megközelítések.

TOPP et al. (1980), ROTH et al. (1990), NADLER et al. (1991), JACOBSEN és SCHJONNING (1993) rámutattak, hogy a terepi és laboratóriumi mérés alapú, kevésbé összetett empirikus megközelítések, a talaj szerkezeti tulajdonságairól (pl. térfogatsűrűség, porozitás, pórusszerkezet stb.) csak korlátozott információt igényelnek.

A térfogati keverés formulák, a háromfázisú talaj-levegő-víz rendszer térfogati összetevőit és dielektromos állandóját veszik alapul a kapcsolat felállítására. Ilyen például a CRIM (Complex Refractive Index Model) modell (DOBSON et al., 1985; JONES & FRIEDMAN, 2000).

Az effektív közeg megközelítések figyelembe veszik egy kompozit anyag texturális és szerkezeti hozzájárulását annak dielektromos állandójához (TYČ et al., 1988; FRIEDMAN, 1998; ENDRES & BERTRAND, 2006).

Jelen cikkben a két legelterjedtebb, a nemzetközi szakirodalomban leggyakrabban előforduló empirikus petrofizikai összefüggést, vagyis a Topp és Roth egyenleteket vázoljuk (ROTH et al., 1992; TOPP et al., 1980; STEELMAN & ENDRES, 2012).

$$\theta_{soil} = -5,3 * 10^{-2} + 2,92 * 10^{-2} \varepsilon_{soil} - 5,5 * 10^{-4} \varepsilon_{soil}^2 + 4,3 * 10^{-6} \varepsilon_{soil}^3 \quad (1a)$$

ahol  $\theta_{soil}$ : térfogati talajnedvesség,  $\varepsilon_{soil}$ : talaj dielektromos állandója

A Topp-egyenletet empirikus módon határozták meg a különböző fizikai talajféleségekre (különböző textúrával rendelkező ásványi talajokra), de elsősorban homokos talajok esetén alkalmazható (TOPP et al., 1980; STOFFREGEN et al., 2002). Pontossága JACOBSEN és SCHIJONNING (1994) validációja alapján:  $0,022 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

ROTH et al. (1992) TDR segítségével ásványi, szerves és mágneses tulajdonsággal rendelkező talajokra alkalmazható empirikus összefüggést alkotott,  $0,015 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  előrejelzési hibával:

$$\theta = -7,28 \cdot 10^{-2} + 4,48 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 19,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 36,1 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (1b)$$

STEELMAN és ENDRES (2012) a talajnedvesség és a dielektromos állandó közötti közetfizikai összefüggések hatékonyságát vizsgálták. A GPR terepi mérések homokra, homokos vályogra és iszapos vályogra irányultak. A teljes adatsort nézve ROTH et al. (1990) összefüggése mellett TOPP és munkatársai (1980) adták a legpontosabb előrejelzést a talajnedvesség-tartalomról  $0,052 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  négyzetes hibával (RMSE: root mean square error).

DEIANA és munkatársai (2008) a beszivárgás hatására létrejövő lefelé irányuló vízarámlást vizsgálták kiterjedt vadózus zónákban, GPR segítségével. A szerzők rámutattak, hogy legtöbb tanulmány a természetes infiltrációhoz kapcsolódóan kis (max.  $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) talajnedvesség változásokat jelzett. Meg kell jegyezni azonban, hogy a GPR-vizsgálatokat túlnyomórészt alacsony elektromos vezetőképességű talajokon végezték, amelyek jellemzően alacsony vízmegtartó képességgel is rendelkeznek (KLOTZSCHE et al., 2018).

### GPR mérési technika számítási menete (visszavert hullám módszerrel)

A GPR adóegysége által kibocsájtott elektromágneses hullámok visszaverődnek, illetve megtörnek a levegő/talajfelszín határfelületen és/vagy két eltérő dielektromos tulajdonságú talajrétegen, majd levegő-, talaj-, visszavert vagy megtört hullámként érik el a vevőegységet. HUISMAN et al. (2003) rámutatnak, hogy a visszavert hullám sebessége a talaj elektromos értelemben vett áteresztőképességétől, dielektromos állandójától függ, ha kis vezetőképességű és nemmágneses talajt vizsgálunk:

$$v_{soil} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{soil}}} \quad (2)$$

ahol,  $v_{soil}$ : a visszavert hullám talajban történő átlagos terjedési sebessége,  $\varepsilon_{soil}$ : talaj dielektromos állandója,  $c$ : elektromágneses hullám vákuumban való terjedési sebessége ( $2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )

Amennyiben a mélység ismert, akkor a vevőegységbe érkező hullámok kétirányú futásidejéből meghatározható a vizsgált zóna (itt talaj) átlagos talajnedvesség-tartalma a következő egyenlettel:

$$v_{soil} = \frac{2d}{t_{rw}} \quad (3)$$

ahol,  $t_{rw}$ : a visszavert hullám kétirányú futásideje,  $d$ : vizsgált réteg mélysége

Ha az adó és a vevőegység között jelentős a távolság, akkor a (3) egyenlet módosul (HUISMAN et al., 2003; TOSTI & SLOB, 2015):

$$v_{soil} = \frac{2\sqrt{d^2+(0,5a)^2}}{t_{rw}} \quad (4)$$

ahol,  $a$ : antennatávolság

A bemutatott számítás a talajfelszín és a visszaverő felület közti réteg (talajszelvény) talajnedvességét reprezentálja, amin a hullám áthalad.

A visszavert- és a talajhullám értelmezésekor idealizált esetben homogén talajnedvességeloszlást feltételezünk, azonban a valós terepi viszonyok nem mindig egyszerűsíthetők le ennyire. Kifejezetten igaz ez az olyan dinamikus hidrológiai folyamatok esetén, mint a beszivárgás, a kapillaritás vagy az olvadás, ahol a vékony rétegek közötti erős kontraszt és a permittivitás gradiense lényegesen befolyásolhatja a földradar válaszelőjelét (KLOTZSCHE et al., 2018).

### A földradar mezőgazdasági alkalmazhatósága a talaj nedvességtartalmának meghatározására

Az éghajlatváltozás főként a globális felmelegedéssel, szárazodással tipizálható. (IPCC, 2022). A világszintű, ugyanakkor régióként eltérő hőmérsékletemelkedés következményeként az evapotranszpiráció (ET), a csapadék és a légköri vízgőztartalom tér és időbeli változékonysága is fokozódik. Ez a talaj nedvességtartalmának ingadozását és a teljes hidrológiai ciklus felerősödését okozza. Globális szinten a 21. század eleje óta az evapotranszpiráció meghaladja a csapadék mennyiségét (DENG et al., 2020).

Hazánkra, a minimum- és maximumhőmérsékletek 21. század végi emelkedése mellett, a csapadék szabálytalan eloszlása jellemző. Elviekben a heves csapadékesemények és a súlyos szárazság előfordulása egyaránt valószínű, a gyakorlatban azonban az 1980-as évek óta egyre gyakrabban fordul elő aszály, amely elsősorban a vegetációs időszakot sújtja (GÁLOS et al., 2015; MÁTYÁS et al., 2018).

A fokozódó aszály miatt a vízgazdálkodási feladatok aránya nő. A 2021 végére országosan 112 állomással rendelkező Operatív Aszály- és Vízhánykezelő Monitoringrendszer magában foglalja és ingyenesen elérhetővé teszi a talajnedvesség-mérő monitoringhálózat adatait, a védekezési fokozatok elrendeléséhez szükséges (napi) meteorológiai és talajnedvesség adatokat is tartalmazó kombinált aszályindexet, az ezekre épülő elemzéseket, kármentesítési terveket, és védekezési fokozatokat. A rendelkezésre álló adatok révén így napi szintű tájékoztatás kapható a vízhiány (aszály) aktuális helyzetéről és várható tendenciáiról (FIALA et al., 2018).

A mezőgazdaság fenntarthatóságának – ahol a növényi erőforrás-felhasználás hatékonysága folyamatosan fejlődik – meghatározó tényezője a rendelkezésre álló víz mellett (MORISON et al., 2008) a termőtalaj minősége (LIU et al., 2015). A növények gyökérzete a vizet és a szükséges tápanyagokat a talajból veszi fel, aminek állapota befolyásolja a növények gyökérzetének eloszlását és működését (ZHANG et al., 2009; SHARMA et al., 2014; LIU et al., 2015; 2016). Megjegyzendő azonban, hogy egy mezőgazdasági terület esetén a talajfelszín alatti kölcsönhatások komplexek, így a talajnedvesség mellett, a talaj szerkezete és tömörödése is befolyásolhatja a gyökéreloszlást.

Agrotechnológia szempontjából a talajdegradáció egyik formája, a talajtömörödés a mezőgazdasági talajok sajátossága. AKINSUNMADE et al. (2019) kutatása a talajtömörödés vizsgálatát célozta meg. A talajtömörödés az intenzív gazdálkodással, a nehézgépek súlya révén alakul ki. A tömörödés a talajban a nagy hézagok redukálódását (makroporozitás-csökkenését), vagy eltűnését okozhatja, így a talaj hidraulikus vezetőképessége és ezáltal a nedvessége és az oldottanyag-tartalma is csökken. A folyamat gátolja az öntözővíz beszivárgását és a tápanyagfelvételt. A lefolyást és a talajeróziót fokozza, illetve korlátozza a gyökér fejlődését is (LOMBARDI et al., 2022).

A GPR mérések sikeres mezőgazdasági alkalmazásának két fő követelménye a felszín alatti első méterig való behatolás képessége és a centiméteres felbontás. Ezért a mezőgazdasági vizsgálatokhoz használt GPR berendezések többsége 200–900 MHz közötti központi frekvenciatartományra kielezített, ami száraz talajok esetén 3–14 cm, nedves talajok esetében pedig 8–18 cm vertikális felbontásnak felel meg (LOMBARDI et al., 2022).

A növénytermesztés hozamának a talajtömörödés okozta veszteségei gyorsan kivizsgálhatók GPR segítségével. Ennek oka, hogy a talaj agrotechnikai tulajdonságainak változása szorosan összefügg a talajszerkezetben lévő víz térfogati hányadával. A talajtömörödöttség fokával változik a porozitás, a pórusméret-eloszlás, ezáltal a víz térfogatarányos mennyisége is változik, ami a GPR jelet is megváltoztatja.

AKINSUNMADE et al. (2019) krakkói mezőgazdasági parcellán végzett talajtömörödéssel kapcsolatos kutatási eredményei rámutattak, hogy a GPR hullámamplitúdó abszolút értéke, a traktor által tömörített talaj esetén körülbelül háromszor kisebb, mint a jármű futását megelőző értéke.

A GPR mérés eredményeit, a talajtömörödés mellett a talajszennyezettség is befolyásolhatja. A mezőgazdasági talajokban a nehézfémek kevésbé oldódó formában felhalmozódhatnak, negatívan hatva a termés minőségére, hiszen a növények számára esszenciális tápanyagok felvételét akadályozzák. Ugyanakkor előfordulhat, hogy bizonyos körülmények (pH, vagy redoxipotenciál-változások) hatására ismét vízoldható formába kerülnek a fémek, ezért elszennyezhetik a talajvizet, és bekerülhetnek a növényi szövetbe, majd a terményen tartott használatba, végül az emberbe. Kiemelendő a szennyvíz alapú öntözés, különösen, ha az ipari eredetű, ami hozzájárul egyes toxikus nehézfémek koncentráció-növekedéséhez (KELEPERTZIS, 2014; ULLAH et al., 2022). Ez utóbbi különösen a

fejlődő országokban probléma, ahol a vízhiány miatt széles körben használják fel öntözésre a szennyvizet (ATTA et al., 2023).

A hagyományos mezőgazdálkodási gyakorlat egységesen kezeli a termőterületet anélkül, hogy figyelembe venné a domborzati, talaj- és növényfejlődési feltételek valamint egyéb agronómiai tényezők változékonyságát. A környezet geológiai és hidrológiai viszonyainak heterogenitása miatt a terepről származó pontadatok gyakran leegyszerűsített képet adnak, és nem tükrözik a tényleges állapotot. Ez tápanyag kimosódást (túlöntözést), környezetszennyezést (pl. szennyező anyagok talajvízbe mosódását) és a gazdálkodó szempontjából csökkent jövedelmezőséget eredményezhet. A precíziós mezőgazdálkodás során a termőterületet kis gazdálkodási egységekre osztják fel, az optimalizált termelést megcélözva (ZAJC et al., 2020). A precíziós mezőgazdaság egy olyan irányítási rendszer, amely a termőföld és a terméshozam tér- és időbeli változékonyságát méri és reagál azokra, a résztáblák szintjén növelve a jövedelmezőséget és csökkentve a környezeti terhelést. A főbb technológiák közé tartoznak a földrajzi információs rendszerek (GIS), a távérzékelés, a globális navigációs műholdrendszer (GNSS) és a terméshozam-figyelés. Lehetővé válik továbbá az öntözővíz helyspecifikus kijuttatása is. A változó arányú öntözési technológia (VRI = variable rate irrigation) segíthet a megfelelő mennyiségű víz megfelelő időben történő kijuttatásában a tábla megfelelő területén, ami kb. 10–15% vízmegtakarítást eredményez (NEUPANE & WENXUAN, 2019). A szenzoros technológia a talaj nedvességszintjének folyamatos nyomon követését biztosítja, vagyis döntéstámogató eszközként szolgálhat az öntözés ütemezéséhez, így elkerülhetővé válik a szárazságstressz (MUNOTH et al., 2016). A talaj nedvességtartalmának szántóföldi monitorozása a precíziós öntözésen alapuló gazdálkodás alapköve (VISCONTIA et al., 2014), ami lehetővé teszi a termésminőség optimalizálását (LOMBARDI & MAURIZIO, 2019).

A talajnedvesség eloszlásának ismerete segíthet a növények gyökér-karakterisztikájának feltárásában, mivel a hajszálgökök megnövelik a makropórustereket, légtereket hozva létre a talajszerkezetben (ZHANG et al., 2009; LIU et al., 2016).

A mezőgazdasági kutatások jelentős része foglalkozik talajnedvesség méréssel (GROTE et al., 2003; GALAGEDARA et al., 2005; ROBINSON et al., 2008; LU et al., 2017).

A GPR lehetőséget ad a talaj nedvességének meghatározására, és ahogy LIU, et al. (2016) kutatása rámutat, hatékonyan alkalmazható (magas központi frekvencia értékeken) akár hajszálgökök becslésre is hidrológiai alapú inverz modell segítségével. Lényegében a xilém-víz kapcsolat is meghatározható (a xilém feladata a víz és a vízdékony ásványi anyagok szállítása, és a párologtatás, illetve fotoszintézis során felhasznált víz pótlása). A GPR talajnedvesség-tartalom becslése a talajnedvesség profiljának mérését (LAMBOT & ANDRÉ, 2014), a talaj nedvességtartalom tér- és időbeli változásának nyomon követését (PAN et al., 2012), a talajnedvesség-tartalom térbeli változásának szántóföldi léptékben történő feltérképezését (WEIHERMÜLLER et al., 2007), a talajművelés talajnedvesség-tartalomra gyakorolt hatásának összehasonlítását (JONARD et al., 2013) és a

talajnedvesség változásának, öntözés alatt és után történő becslését (GALAGEDARA et al., 2005; LIU et al., 2016) jelenti.

A növény hajszálgöyökér fejlődésének egyik bevált hatékony meghatározási módja a makroszkopikus gyökér-tápanyagfelvétel modell, kiegészítve a talajnedvesség-áramlási modellel (YADAV & MATHUR, 2008). A gyökérnövekedés mintázatainak becslésére és a talajfizikai tulajdonságok meghatározására különféle optimalizálási megközelítéseket alkalmaztak a mért talajnedvességtartalom-adatok alapján (DONG et al., 2010). LU és LU (2022) egy roncsolásmentes, GPR jel (parabola) alapú rendszert alkotott a gyökérről történő visszaverődés elemzéséhez és a gyökérforma rekonstrukciójához. A modellt almaültetvényen tesztelték. A rekonstruált finomszemcsés 3D-s gyökérmodell további alkalmazási lehetőségeket is lehetővé tesz: a gyökérátmérő és a növekedés becslését.

A legtöbb talajnedvességre és annak fizikai tulajdonságaira irányuló meghatározási módszer pontmérés alapú, ezért a kivitelezésük időigényes, sőt megnehezíti az ismeretlen paraméterek megbízható meghatározását. ZAJC és munkatársai (2020) egy szlovéniai, hordalékos üledéken elhelyezkedő gyümölcsösben tesztelték a GPR módszert, és hasonlították össze az eredményeket talajprofiladatokkal. A GPR hasznosnak bizonyult a talajnedvesség-szondák optimális helykijelölésében. Alkalmazásával meghatározhatjuk a kritikus területeket, mint a magas agyagtartalmú, sekély felszín alatti vízvisszatartó, vagy a magas homoktartalmú gyorsabb vízelnyelésű területeket. Alkalmazása tehát hasznos lehet öntözés-optimalizálási felméréseknél, a vízfenntarthatóság és jelentősebb mezőgazdasági termelés biztosítása érdekében a precíziós mezőgazdaságban.

A GPR-alapú talajfeltárással térbeli átlagolás is megvalósítható, ami ideális kiegészítője lehet a makroszkopikus gyökér-tápanyagfelvétel modellnek. A földradar mellett más, szintén geofizikai alapú mérőeszközök (mint az időtartomány-, és frekvenciatartomány alapú reflexiómérések) is használhatók a talajkarakterisztika átfogóbb feltérképezéséhez (LIU et al., 2016). Konkrét példaként a talajnedvesség meghatározásra LIU et al. (2016) az iszapos agyag esetén a frekvenciatartomány alapú reflexiómérést javasolja a GPR mellé kiegészítésnek. Maga a GPR ez esetben konkrétan a teljes-hullámforma inverzió módszer (200–800 MHz-es központi frekvencia-tartományban), a kőzetfizikai összefüggés pedig valamely keverési modell. Másik példaként LIU et al. (2016) a geoelektromos képalkotó eljárás módszerének földradarral (600–1600 MHz) való kombinációját javasolják, frekvenciacsúcs-elemzéssel, homokos vályog esetén, Topp-egyenlettel. Sem LIU et al. (2016), sem a többi példában szereplő kutató(csoport) nem közöl további konkrét információkat az egyes kombinációk alkalmazásának sikerességéről.

LU et al. (2017) egy Belső-Mongóliai sivatagi sztyeppén négy különböző felszínborítottság-típus (öntözött zöltség és lucerna, természetes gyepek, mocsár) talajnedvességét, valamint a talajnedvesség-változásának dinamikáját vizsgálták különböző mélységben, földradar talaj és visszavert hullám elemzésével. A GPR mérés pontosságát gravimetriás módszerrel ellenőrizték. Az alkalmazott empirikus kőzetfizikai módszerek közül a Topp-egyenlet pontosabb, mint a Roth-egyenlet a GPR-adatokon alapuló talajnedvesség számításában. A GPR talajnedvesség-mérések összhangban voltak a gravimetriás mérési eredményekkel, hiszen az

RMSE = 0,0101 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Eredményeikből világosan látszik, hogy sűrű növényborítottság esetén, a levegőhullám, a talajhullámmal és a visszavert hullámmal is interferál a radarprofilban, ami a GPR mérés pontosságát csökkentheti. Emellett a csapadék is csökkenti a talajhullám-feltárás mélységét bizonyos körülmények között.

WIJEWARDANA és GALAGEDARA (2010) kutatásának középpontjában talajradar alapú talajnedvesség-tartalom tér- és időbeli változásbecslése állt mezőgazdasági táblák esetén (Gannoruwa, Peradeniya, Sri Lanka). A GPR méréseket termogravimetrikus mintavételi adatokkal ellenőrizték, és a talajnedvesség-tartalom 2D-s térképeinek kidolgozását végezték el. A GPR mérései révén meghatározott talajnedvesség-tartalom jól illeszkedett a mért adatokhoz ( $R^2 = 0,754$ ).

A vadózus zóna vizsgálatokhoz elengedhetetlen a talaj heterogenitásának jellemzése. A talaj magminta-vételezésen alapuló vizsgálata azonban időigényes, és hiányzik a kellő térbeli lefedettség (KAUFMANN et al., 2020). PAN és munkatársai (2012) sikeresen alkalmazták a GERHARDS et al. (2008) által kifejlesztett, többcsatornás GPR adatok (Multi-Offset Techniques) módszerét, amely lehetővé teszi a talajnedvesség tér és időbeli változásának nagy felbontású meghatározását heterogén talajszerkezetű mezőgazdasági terület esetén. A módszer nyilvánvaló potenciálja ellenére a többcsatornás GPR méréseknek is vannak korlátai. A legjelentősebb kihívást az egyértelműen meghatározott visszaverő felületek folyamatos szükségessége jelenti, az antennaeltolások miatt (KLOTZSCHE et al., 2018).

A LOMBARDI és MAURIZIO (2019) lépésfrekvenciás, folyamatos hullám GPR (Step Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar; SFCW GPR) alkalmazási lehetőségeit vizsgálta. A frekvenciatartomány alapú talajradar esetén, egy fixen beállított frekvencia helyett, diszkrét lépésekkel változtatott frekvenciaértékekkel történik a célterület vizsgálata. A kutatás eredményei rámutatnak a GPR jel amplitúdójának a vizsgált központi frekvenciától függő szignifikáns ingadozásaira, vagyis a heterogén talaj elektromágneses tulajdonságai erősen frekvenciafüggőek, ami bizonyos feltárási minőség esetén lényeges. Ez a GPR technika a növényzet vízfelhasználás-hatékonyságának vizsgálatára alkalmas, ezért precíziós mezőgazdasági programok tervezésének alapjául szolgálhat.

A hagyományos FO (fixed offset – rögzített távolság) GPR mérések a talajréteg változásait csak az idő függvényében érzékelik, így a (talajnedvesség-meghatározáshoz szükséges) permittivitás pontos meghatározása kivitelezhetetlen. A sebességbecsléshez CMP (common middle point – közös középpont) vagy WARR (wide-angle reflection and refraction – szélesszögű visszaverődés és refrakció) mérésekre van szükség, amelyek kifejezetten időigényesek. Ezért ezekkel a mérésekkel nagyobb területeket kell reprezentálni, ami így a felszín alatti sebesség tekintetében alacsony térbeli felbontást jelent. Mindez növeli a becsült rétegvastagságban, a talaj áteresztőképességében és ezáltal a talajnedvességben megjelenő hibalehetőséget. A közelmúltban megjelent egy új, szimultán többeltolós és többcsatornás (SiMoc) GPR rendszer, amely gyors talajprofil-feltérképezést tesz lehetővé a WARR segítségével (KAUFMANN et al., 2020). Az úgynevezett „WARR-gép” (WARR machine) egy adó és hét vevőegységet használ.

Minden mérési pozíciót egy nagy pontosságú differenciál-GPS rögzít. Ez az új rendszer a többeltolások és többsatornás GPR adatok egyidejű mérését ugyanolyan sebességgel teszi lehetővé, mint egy hagyományos egycsatornás FO GPR, akár 10 000 WARR h<sup>-1</sup> teljesítménnyel. A GPR méréseket a németországi Selhausenben, egy mezőgazdasági teszterületen végezték. A GPR mérésekkel számított talajnedvesség-értékek (Topp-egyenlet felhasználásával) 0,20 m mélységben jól korreláltak a kontrollként használt meteorológiai állomás és a TDR szondák talajnedvesség-változásával (KAUFMANN et al., 2020).

A modern pilóta nélküli légi járművek (unmanned aerial vehicle; UAV) számos tudományterületen vonzó technológiát képviselnek egyszerű használatuk, alacsony karbantartási költségük és nagyfokú működési rugalmasságuk miatt. Az UAV-k nagyon kis területekről tudnak fel- és leszállni, és minden irányban mozoghatnak, vagyis szinte minden helyet – beleértve a nehezen megközelíthetőket is – elérhetnek (NOVIELLO et al., 2022). Az UAV és GPR technológiájának kombinációjaként, innovatív képalkotási rendszer valósítható meg, ami a földi telepítésű akna felderítésétől (BURR et al., 2021), a keresés/mentésen (JENSSEN et al., 2020) át a mezőgazdaságig (KAIJUN et al., 2019) számos gyakorlati területen alkalmazható (NOVIELLO et al., 2022). NOVIELLO és munkatársai (2022) rámutatnak, hogy ezen újszerű kombinációval a mezőgazdaság területén még csak kevesen foglalkoztak, ezért az ebben rejlő lehetőség még nincs kihasználva. Kiemelendő, hogy teljes roncsolásmentességet biztosít, megkímélve ezzel a talajt és a növényeket. Az elért eredmények azt mutatták, hogy a talajnedvesség-térképek jól korrelálnak a mezőgazdasági táblák topográfiai térképeivel és a légi fotogrammetriai megfigyelésekkel, demonstrálva ezzel a precíziós mezőgazdasági és környezeti monitoring célokra használt UAV alapú GPR rendszerekben rejlő potenciált (NOVIELLO et al., 2022). KAIJUN et al. (2019) drónra szerelt GPR alapú mérési tapasztalatait összegzi a talajnedvesség-térképezéshez kapcsolódóan egy belgiumi mezőgazdasági területen, Saint-Denisben. A GPR rendszer egy vektorhálózat-elemzőből, mint frekvenciatartomány-radarból, a radar vezérléséhez használt mikroszámítógépből, a távvezérléshez alkalmazott okoseszközből, valamint egy GPS-ből áll. A radar adatok feldolgozása teljes hullámforma inverzió módszerrel történik LAMBOT és ANDRÉ (2014) munkássága alapján. A központi frekvencia tartománya 500–700 MHz. A GPR adatokból származtatott dielektromos állandó értékeket a Topp-egyenlettel alakították talajnedvesség-értékekké. DEHEM (2020) Belgiumban, egy gemblouxi mezőgazdasági területen drónra szerelt, dipólantennával ellátott GPR-t használt nagy felbontású térképek készítésére, valamint a talajnedvesség-tartalom térbeli eloszlásának és dinamikájának tanulmányozására. Két mérési alkalommal, csupán két talajnedvesség-térkép készült (2020 júliusában) eltérő adatsűrűséggel (0,24 mérés m<sup>-2</sup> és 2,62 mérés m<sup>-2</sup>).

### Köszönetnyilvánítás

Jelen publikáció a 143972SNN azonosítószámú OTKA pályázat és a TKP2021-NKTA-43 számú projekt támogatásával valósult meg. „A TKP2021-NKTA-43 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási



Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

### Irodalomjegyzék

- AKINSUNMADE, A., TOMECKA-SUCHOŃ, S., PYSZ, P., 2019. Correlation between agrotechnical properties of selected soil types and corresponding GPR response. *Acta Geophysica*. **67**. 1913–1919.
- ATTA, M.I., ZEHRA, S.S., DAI, D.Q., ALI, H., NAVEED, K., ALI, I., SARWAR, M., ALI, B., IQBAL, R., BAWAZEER, S., ABDEL-HAMEED, U.K., ALI, I., 2023. Amassing of heavy metals in soils, vegetables and crop plants irrigated with wastewater: Health risk assessment of heavy metals in Dera Ghazi Khan, Punjab, Pakistan. *Frontiers of Plant Science*. **13**. 1080635.
- BURR, R., SCHARTEL, M., GRATHWOHL, A., MAYER, W., WALTER, T., WALDSCHMIDT, C., 2021. UAV-Borne FMCW InSAR for Focusing Buried Objects. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. **19**. 1–5. 4014505.
- CASSIDY, N., 2009. Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In: JOL, H.M. (ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam. Chapter 3. pp. 41–72.
- DANIELS, D. J., 2004. *Ground Penetrating Radar: 2nd Edition*. Institution of Electrical Engineers, London.
- DAVIS, J. L., ANNAN, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. **37**. 531–551.
- DEHEM, M., 2020. Soil moisture mapping using a drone-borne Ground Penetrating Radar. *Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain*.
- DEIANA, R., CASSIANI, G., VILLA, A., BAGLIANI, A., BRUNO, V., 2008. Calibration of a vadose zone model using water injection monitored by GPR and electrical resistance tomography. *Vadose Zone Journal*. **7**. 215–226.
- DENG, Y., WANG, S., BAI, X., LUO, G., WU, L., CAO, Y., LI, H., LI, C., YANG, Y., HU, Z., TIAN, S., 2020. Variation trend of global soil moisture and its cause analysis. *Ecological Indicators*. **110**. 105939.
- DOBSON, M.C., ULABY, F.T., HALLIKAINEN, M.T., EL-RAYES, M.A., 1985. Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II. Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **23**. 35–46.
- DOOLITTLE, J.A., MINZENMAYER, F.E., WALTMAN, S.W., BENHAM, E.C., TUTTLE, J.W., PEASLEE, S.D., 2007. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. *Geoderma*. **141**. 416–421.
- DONG, X., PATTON, B.D., NYREN, A.C., NYREN, P.E., PRUNTY, L.D., 2010. Quantifying root water extraction by rangeland plants through soil water modeling. *Plant and Soil*. **335**. 181–198.
- ENDRES, A.L., BERTRAND, E.A., 2006. A pore-size scale model for the dielectric properties of water-saturated clean rocks and soils. *Geophysics*. **71**. (6) F185–F193.
- FAO, 2020. *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020*. FAO, Rome.
- FIALA, K., BARTA, K., BENYHE, B., FEHÉRVÁRY, I., LÁBDY, J., SIPOS, G., GYÓRFFY, L., 2018. Operatív aszály- és vízhiánykezelő monitoring rendszer. *Hidrológiai Közlöny*. **98**. (3) 14–24.

- FRIEDMAN, S.P., 1998. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. **34**. 2949–2961.
- GALAGEDARA, L. W., PARKIN, G. W., REDMAN, J. D., VON BERTOLDI, P., ENDRES, A. L., 2005. Field Studies of the GPR Ground Wave Method for Estimating Soil Water Content During Irrigation and Drainage. *Journal of Hydrology*. **301**. 182–197.
- GÁLOS, B., FÜHRER, E., CZIMBER, K., GULYÁS, K., BIDLÓ, A., HÄNSLER, A., JACOB, D., MÁTYÁS, C., 2015. Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. **119**. (4) 425–441.
- GERHARDS, H., WOLLSCHLÄGER, U., YU, Q.H., SCHIWEK, P., PAN, X.C., ROTH, K., 2008. Continuous and simultaneous measurement of reflector depth and average soil-water content with multichannel ground-penetrating radar. *Geophysics*. **73**. J15–J23.
- GROTE, K., HUBBARD, S.S., RUBIN, Y., 2003. Field-scale estimation of volumetric water content using GPR ground wave techniques. *Water Resources Research*. **39**. (11) WR002045.
- HERCEG, A., 2022. Földradar (GPR) alapú talajnedvességtartalom-mérési lehetőségek földművek esetén – szakirodalmi áttekintés. *Útügyi Lapok*. **10**. (16) 18–37.
- HUBBARD, S., RUBIN, Y., MAJER, E., 1997. Ground-penetrating-radar-assisted saturation and permeability estimation in bimodal systems. *Water Resources Research*. **33**. WR03979.
- HUISMAN, J. A., HUBBARD, S. S., REDMAN, J. D., ANNAN, A. P., 2003. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar. *Vadose Zone Journal*. **2**. (4) 476–491.
- IPCC, 2022. PÖRTNER, H.-O., ROBERTS, D.C., TIGNOR, M., POLOCZANSKA, E.S., MINTENBECK, K., ALEGRÍA, A., CRAIG, M., LANGSDORF, S., LÖSCHKE, S., MÖLLER, V., OKEM, A., RAMA, B. (eds.) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- JACOBSEN, O.H., SCHJØNNING, P., 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurements including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology*. **151**. 147–157.
- JACOBSEN, O.H., SCHJØNNING, P., 1994. Comparison of TDR calibration functions for soil water determination. In: *Proceedings of the Symposium Time Domain Reflectometry, Applications in Soil Science*. Danish Institute of Plant and Soil Science, Tjele, Denmark. pp. 9–23.
- JENSSEN, R. O. R., ECKERSTORFER, M., JACOBSEN, S., 2020. Drone-Mounted Ultrawideband Radar for Retrieval of Snowpack Properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. **69**. (1) 221–230.
- JONARD, F., MAHMOUDZADEH, M., ROISIN, C., WEIHERMÜLLER, L., ANDRÉ F., MINET J., VEREECKEN, H., LAMBOT, S., 2013. Characterization of tillage effects on the spatial variation of soil properties using ground-penetrating radar and electro-magnetic induction. *Geoderma*. **207**. 310–322.
- JONES, S.B., FRIEDMAN, S.P., 2000. Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles. *Water Resources Research*. **36**. 2821–2833.

- KAIJUN, W., RODRIGUEZ, G. A., ZAJC, M., JACQUEMIN, R. CLÉMENT, M., DE COSTER, A., LAMBOT, S., 2019. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping, *Remote Sensing of Environment*. **235**. 111456.
- KAUFMANN, M. S., KLOTZSCHE, A., VEREECKEN, H., VAN DER KRUK, J., 2020. Simultaneous multichannel multi-offset ground-penetrating radar measurements for soil characterization. *Vadose Zone Journal*. **19**. e20017.
- KELEPERTZIS, E., 2014. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece. *Geoderma*. **221–222**. 82–90.
- KLOTZSCHE, A., JONARD, F., LOOMS, M.C., VAN DER KRUK, J., HUISMAN., J.A., 2018. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress. *Vadose Zone Journal*. **17**. 180052.
- LAUER, K., ALBRECHT, C., SALAT, C., FELIX-HENNINGSSEN, P., 2010. Complex effective relative permittivity of soil samples from the taunus region (Germany). *Journal of Earth Science*. **21**. 961–967.
- LAMBOT, S., ANDRÉ., F., 2014. Full-wave modeling of near-field radar data for planar layered media reconstruction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **52**. 2295–2303.
- LIU, X., ZHANG, X., CHEN, S., SUN, H., SHAO, L., 2015. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat. *Agricultural Water Management*. **154**. 59–67.
- LIU, X., DONG, X., LESKOVAR, D., 2016. Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: A review. *International Agrophysics*. **30**. 533–543.
- LOMBARDI, F., MAURIZIO, L., 2019. Step-Frequency Ground Penetrating Radar for Agricultural Soil Morphology Characterisation. *Remote Sensing*. **11**. (9) 1075.
- LOMBARDI, F., ORTUANI, B., FACCHI, A., LUALDI, M., 2022. Assessing the Perspectives of Ground Penetrating Radar for Precision Farming. *Remote Sensing*. **14**. 6066.
- LU, Y., WENLONG, S., JINGXUAN, L., XUEFENG, W., YANAN, T., 2017. An Examination of Soil Moisture Estimation Using Ground Penetrating Radar in Desert Steppe. *Water*. **9**. (7) 521.
- LU, Y., LU, G., 2022. 3D Modeling Beneath Ground: Plant Root Detection and Reconstruction Based on Ground-Penetrating Radar. In: *IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Waikoloa, HI, USA. pp. 697–706.
- LUNT, I.A., HUBBARD, S.S., RUBIN, S., 2005. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*. **307**. (1–4) 254–269.
- MÁTYÁS, C., BERKI, I., BIDLÓ, A., CSÓKA, G., CZIMBER, K., FÜHRER, E., GÁLOS, B., GRIBOVSZKI, Z., ILLÉS, G., HIRKA, A., Somogyi, Z., 2018. Sustainability of Forest Cover under Climate Change on the Temperate-Continental Xeric Limits. *Forests*. **9**. 489.
- MORISON, J. I., BAKER, N. R., MULLINEAUX, P.M., DAVIES, W.J., 2008. Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. **363**. 639–658.
- MUNOTH, P., GOYAL, R., GARG, A., 2016. Estimation of soil moisture and its application to irrigation water allocation: a review. In: *Proceedings of International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (Hydro2016)*. Central Water and Power Research Station, Pune, India. pp. 331–342.

- NÁDASI, E., DOBOS, E., PECSMÁNY, P., TURAI, E., 2020. Magyarország földradar-(GPR) alkalmazhatósági térképe, fizikai és talajtani paraméterek alapján. *Magyar Geofizika*. **61**. (4) 191–198.
- NADLER, A., DASBERG, S., I. LAPID., 1991. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of America Journal*. **55**. 938–943.
- NAKASHIMA, Y., ZHOU, H., MOTOYUKI, S., 2001. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections. *Journal of Applied Geophysics*. **47**. (3–4) 241–249.
- NEAL, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*. **66**. 261–330.
- NEUPANE, J., WENXUAN, G., 2019. Agronomic Basis and Strategies for Precision Water Management: A Review. *Agronomy*. **9**. (2) 87.
- NOVIELLO, C., GENNARELLI, G., ESPOSITO, G., LUDENO, G., FASANO, G., CAPOZZOLI, L., SOLDVIERI, F., CATAPANO, I., 2022. An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems. *Remote Sensing*. **14**. 3245.
- PAN, X., ZHANG, J., HUANG, P., ROTH, K., 2012. Estimating field-scale soil water dynamics at a heterogeneous site using multi-channel GPR. *Hydrology and Earth System Sciences*. **16**. 4361–4372.
- PATHIRANA, S., LAMBOT, S., KRISHNAPILLAI, M., CHEEMA, M., SMEATON, C., GALAGEDARA, L., 2023. Ground-Penetrating Radar and Electromagnetic Induction: Challenges and Opportunities in Agriculture. *Remote Sensing*. **15**. 2932.
- PRADIPTA, A., PANTELIS, S., NEKTARIOS, K., DOULA, M., DOKOU, Z., MAKKAWI, M., ALFARHAN, M., TAWABINI, B., KIRMIZAKIS, P., YASSIN, M., 2022a. Remote Sensing, Geophysics, and Modeling to Support Precision Agriculture – Part 1: Soil Applications. *Water*. **14**. (7) 1158.
- PRADIPTA, A., PANTELIS, S., NEKTARIOS, K., DOULA, M., DOKOU, Z., MAKKAWI, M., ALFARHAN, M., TAWABINI, B., KIRMIZAKIS, P., YASSIN, M., 2022b. Remote Sensing, Geophysics, and Modeling to Support Precision Agriculture – Part 2: Irrigation Management. *Water*. **14**. 1157.
- PRIMUSZ, P., TÓTH, C., 2021. Az FWD és GPR mérési technológiák együttes alkalmazásának lehetőségei az útállapot felmérésben és értékelésben. In: „Termeljünk együtt a természettel! – Az agrárerdészet, mint új kitörési lehetőség”. Sopron. pp. 410–417.
- ROBINSON, D., CAMPBELL, C., HOPMANS, J., HORNBUCKLE, B.K., JONES, S., KNIGHT, R. O., OGDEN, F., SELKER, J., WENDROTH, O., 2008. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*. **7**. 358–389.
- ROTH, K., SCHULIN, R., FLÜHLER, H., ATTINGER, W., 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*. **26**. 2267–2273.
- ROTH, C.H., MALICKI, M.A., PLAGGE, R., 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. **43**. (1) 1–13.
- SAARENKETO, T., 1998. Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics*. **40**. 73–88.

- SCHROTT, L., SASS, O., 2008. Application of Field Geophysics in Geomorphology: Advances and Limitations Exemplified by Case Studies. *Geomorphology*. **93**. 55–73.
- SHARMA, S.P., LESKOVAR, D.I., CROSBY, K.M., VOLDER, A., IBRAHIM, A., 2014. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. **136**. 75–85.
- SHEISHAH, D., SIPOS, G., HEGYI, A., KOZÁK, P., ABDELSAMEI, E., TÓTH, C., ONACA, A., PÁLL, D.G., 2022. Assessing the structure and composition of artificial levees along the Lower Tisza River (Hungary). *Geologica Pannonica*. **26**. (3) 258–272.
- SHUKLA, G., GARG, P., 2014. Assessment of surface soil moisture through classical method and optical, thermal remote sensing techniques. *Journal of Indian Water Resources Society*. **34**. 17–24.
- STEELMAN, C. M., ENDRES, A. L., 2012. Assessing Vertical Soil Moisture Dynamics Using Multi-frequency GPR Common-midpoint Soundings. *Journal of Hydrology*. **436–437**. 51–66.
- STOFFREGEN, H., ZENKER, T., WESSOLEK, G., 2002. Accuracy of Soil Water Content Measurements Using Ground Penetrating Radar: Comparison of Ground Penetrating Radar and Lysimeter Data. *Journal of Hydrology*. **267**. 201–206.
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P., 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*. **16**. (3) 574–582.
- TOSTI, F., SLOB, E., 2015. Determination, by Using GPR, of the Volumetric Water Content in Structures, Substructures, Foundations and Soil. Springer, Cham.
- TYČ, S., SCHWARTZ, L.M., SEN, P.N., WONG, P., 1988. Geometrical models for the high-frequency dielectric properties of brine saturated sandstones. *Journal of Applied Physics*. **64**. 2575–2582.
- ULLAH, N., REHMAN, M.U., AHMAD, B., ALI, I., YOUNAS, M., ASLAM, M.S., 2022. Assessment of heavy metals accumulation in agricultural soil, vegetables and associated health risks. *PLoS ONE* **17**. (6) e0267719.
- VANDER, P., CASEY, G., 2010. From H<sub>2</sub>O: Turning Alberta's Water Headache to Opportunity. Alberta Water Research Institute's Project on Financial Market-Based Instruments for Sustainable Water Management. Canada West Foundation, Calgary, Canada.
- VISCONTIA, F., MIGUEL DE PAZA, J., MARTÍNEZ, D., MOLINA, M., 2014. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. *Agricultural Water Management*. **132**. 111–119.
- WEIHERMÜLLER, L., HUISMAN, J. A., LAMBOT, S., HERBST, M., VERECKEN, H., 2007. Mapping the Spatial Variation of Soil Water Content at the Field Scale with Different Ground Penetrating Radar Techniques. *Journal of Hydrology*. **340**. 205–216.
- WIJEWARDANA, Y.G.N.S., GALAGEDARA, L.W., 2010. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*. **391**. 24–33.
- XINBO, L., JIN, C., XIHONG, C., QIXIN, L., XIN, C., XUEHONG, C., 2019. Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods. *International Journal of Digital Earth*. **12**. (1) 95–118.

- YADAV, B.K., MATHUR, S., 2008. Modeling soil water uptake by plants using nonlinear dynamic root density distribution function. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. **134**. 430–436.
- ZAJC, M., URBANC, J., PEČAN, U., GLAVAN, M., PINTAR, M., 2020. Using 3D GPR for determining soil conditions in precision agriculture. *SEG Global Meeting Abstracts*. **2020**. 291–294.
- ZAJÍCOVÁ, K., CHUMAN, T., 2019. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*. **343**. 116–129.
- ZHANG X., CHEN S., SUN H., WANG Y., SHAO L., 2009. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. *Field Crops Research*. **114**. 75–83.

### **Soil water content measurements with ground penetrating radar (GPR) and its application possibilities in the agriculture**

<sup>1</sup>\*András HERCEG, <sup>2</sup>Csaba TÓTH

<sup>1</sup>University of Sopron, Faculty of Forestry, Institute of Geomatics and Civil Engineering, Sopron, Hungary

<sup>2</sup>Budapest University of Technology and Economics, Department of Highway and Railway Engineering, Budapest, Hungary

#### **Summary**

Measurement of soil water content is complicated due to the soil heterogeneity and environmental variability. No single efficient method has been developed to map the different soil moisture zones at great depth at the field scale without disturbing the soil structure and paths of the waterflow.

Partially or completely non-destructive measurement of soil moisture is provided by ground-penetrating radar (GPR), which offers high resolution and significant penetration depth for medium-scale soil moisture measurements, bridging the methodological gap between small-scale point-based and large-scale remote sensing techniques. In addition, this technique can be used with better time efficiency compared to other destructive or non-destructive procedures.

GPR has been used for soil water content estimation including measuring soil water content profile, identifying specific soil water depths or soil water variation under irrigation conditions.

Despite the high potential of GPR for hydrological investigations, it is important to realize that no single geophysical method is able to perform optimally under all conditions. For example, GPR is mostly restricted to areas with relatively low electrical conductivity (low attenuation of the electromagnetic wave). In addition, some of the GPR interpretation methods require the presence of well identifiable and continuous GPR reflections, which requires sufficient and spatially continuous subsurface contrast in dielectric permittivity.

Soil moisture (considering its flow) is a key variable in the fields of agriculture. It is the essential requirement for plants to grow. Consequently, soil moisture is important for irrigation management particularly in semiarid and arid regions.

In this paper, the literature of the principles of GPR measurements and utilization possibilities is summarized with the emphasis on the agricultural sector. GPR can be a beneficial measuring device that can help in mapping soil moisture distribution, taking into account infiltration, but also water loss caused by evaporation and plant water absorption. Consequently, it can be used in agriculture, due to its precision at high central frequency values, even (fine)root characteristics of the plants, essentially the xylem-water relationship can also be determined (xylem transports water and water-soluble minerals and supply water used during photosynthesis). In addition, GPR can provide valuable information regarding natural stratification and soil compaction. The data interpretation of GPR measurements, in addition to soil compaction causing a decrease in the moisture of soils (as three-phase systems), can in principle be extended to other aspects of agrotechnology, such as soil contamination studying. However, it has not been sufficiently explored, as no recent literature can be found on this subject.

Soil radar can be a useful part of "Smart farming", which can help in the selection of soil moisture measuring sensors placed in the soil as part of it. Especially when associated with the recently released new simultaneous multi-offset and multi-channel (SiMoc) GPR system, which enables fast soil profile mapping with seven receivers, but at the speed of a traditional single-channel GPR.

If complete non-destruction is the goal, air-coupled GPRs mounted on a drone can provide an opportunity. It should be noted, however, that due to the significant signal attenuation (wave scattering) occurring at the soil-air interface, only a small penetration depth can be achieved.

**Keywords:** ground penetrating radar (GPR), soil moisture, agriculture

### Tables and figures

*Figure 1* Grouping of soil moisture determination methods

---

**Open Access nyilatkozat:** A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID\_1)

---