

Umerjanje merilnikov in določitev vodozadrževalnih lastnosti tal za natančno namakanje na podlagi meritev vsebnosti vode v tleh

Špela ŽELEZNIKAR^{1,2}, Luka HONZAK³, Urša PEČAN¹, Marina PINTAR¹

Received June 22, 2020; accepted February 26, 2022.
Delo je prispelo 22. junija 2020, sprejeto 26. februarja 2022

Calibration of soil moisture sensors, determination of soil water retention properties for precision irrigation based on soil water content measurements

Abstract: Water is becoming a scarce commodity. Therefore, proper water management in precision irrigation is crucial to increase productivity and reduce the cost of crop production. Precision irrigation is based on measuring the soil water content, which is often measured with dielectric sensors that measure the apparent permittivity of the soil. Although the sensors are already equipped with a factory calibration function that converts the measured permittivity into volumetric water content, the function does not work properly for all soil types. It is therefore recommended to check whether a soil-specific calibration is required for accurate soil water content measurements. Precise irrigation also requires adequate determination of soil water retention properties, which can be determined using various procedures and methods. In this paper, we presented the results of applying different approaches to determine soil-specific calibration functions using two types of dielectric sensors (SM150T, Delta-T Devices and MVZ 100, Eltratec) in different soil samples obtained from locations in Slovenia where precision irrigation is performed. In addition, the results of determining the water retention properties of the soil using different methods were also compared.

Key words: precision irrigation; soil moisture sensors; water retention properties; calibration methods

Umerjanje merilnikov in določitev vodozadrževalnih lastnosti tal za natančno namakanje na podlagi meritev vsebnosti vode v tleh

Izvleček: Voda postaja redka dobrina, zato je strokovno pravilno upravljanje vode za natančno namakanje ključnega pomena za povečanje primarne rastlinske produkcije in zmanjšanje stroškov rastlinske pridelave v kmetijstvu. Natančno namakanje temelji na meritvah vsebnosti vode v tleh, ki jo običajno merimo z merilniki, ki merijo dielektričnost tal. Merilniki so opremljeni s tovarniško umeritveno funkcijo, ki zaznana dielektričnost pretvarja v volumsko vsebnost vode, vendar slednja ne deluje ustrezno v vseh talnih tipih. Zato je za točne meritve vsebnosti vode v tleh smiselno preveriti, ali je potrebna uporaba talno specifične umeritve. Poleg tega je za natančno namakanje potrebna tudi ustrezna določitev vodozadrževalnih lastnosti tal, ki jih lahko določimo z uporabo več različnih postopkov in metod. V prispevku smo na izbranih vzorcih tal, pridobljenih iz lokacij po Sloveniji, kjer se izvaja natančno namakanje, prikazali rezultate različnih načinov določanja talno specifičnih umeritvenih funkcij z dvema tipoma merilnikov (SM150T, Delta-T Devices in MVZ 100, Eltratec). Primerjali smo tudi rezultate določanja vodozadrževalnih lastnosti tal z uporabo različnih metod.

Ključne besede: natančno namakanje; merilniki vsebnosti vode v tleh; vodozadrževalne lastnosti tal; umeritev

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Ljubljana, Slovenija

² Korespondenčni avtor, e-naslov: spela.zeleznikar@bf.uni-lj.si

³ BO-MO d.o.o., Ljubljana, Slovenija

1 UVOD

Voda postaja redka dobrina, ne le v sušnih regijah, temveč tudi v regijah z obilnimi padavinami (Pereira in sod., 2002). Kmetijstvo velja za največjega porabnika sladke vode na svetu, zato so tehnološke inovacije, ki lahko izboljšajo trajnost namakanja v kmetijstvu, pomembne za optimalno izrabo vodnih virov in varovanje okolja (Adeyemi in sod., 2017).

Pri tem imajo pomembno vlogo namakalni sistemi in različni načini kmetijske pridelave. V izogib manjšanju primarne rastlinske produktivnosti zaradi sušnega stresa (raba premalo vode za namakanje), kmetje praviloma namakajo z večjimi obroki in porabijo več vode, kot je potrebno, kar vodi v prekomerno obremenjevanje okolja. Tako se zmanjšuje pridelovalna sposobnost določenih sistemov in se porablja večja količina vode in energije (Kamiński in sod., 2018). Pri natančnem namakanju vodo uporabljamo bolj učinkovito, pri čemer se izognemo tako nezadostnemu kot prekomernemu namakanju. Pametno upravljanje vode za natančno namakanje v kmetijstvu je ključnega pomena za povečanje pridelave na določeni površini in zmanjšanje stroškov, hkrati pa prispeva k okoljski trajnosti (Neupane in Guo., 2019). Konvencionalne kmetijske prakse upravljajo namakalne površine enakomerno, brez vključitve topografskih lastnosti površin, različnih karakteristik tal ter različnih razmer rasti namakanega pridelka in drugih agronomskih dejavnikov. To lahko privede do povečanja onesnaževanja okolja, povečanega izpiranja hranil in zmanjšuje dobičkonosnost in pridelovalno sposobnost namakane površine (Khosla in sod., 2002).

Z usmeritvijo v natančno namakanje se površine razdeli na manjše enote za upravljanje ter optimalno pridelavo. Začetki uvajanja natančnega namakanja izhajajo iz začetka osemdesetih let z razvojem različnih tehnologij za ocenjevanje terenskih variabilnosti. Tako je natančno namakanje in z njim natančno kmetijstvo odvisno od podrobnih prostorskih informacij, uporabe različne informacijske tehnologije ter večje zmogljivosti za obdelavo informacij (McBratney in sod., 2015).

1.1 DOLOČANJE VSEBNOSTI VODE V TLEH

Vsebnost vode v tleh lahko določimo z različnimi metodami. Osnovna, neposredna je gravimetrična metoda, ki temelji na odstranitvi vode iz tal, pri čemer neposredno izmerimo delež odstranjene vode. Odstranitev vode lahko poteka na več načinov, z ekstrakcijo in nadomestitvijo vode s topilom (kemična reakcija) ali s segrevanjem. Količina odstranjene vode je nato določena s kemično fizikalno analizo topila ali s spremembo mase po

segrevanju. Metoda je splošno uporabljena kot standard za ostale neposredne in posredne metode (Topp in Ferre, 2002). Vsebnost lahko določimo tudi s posrednimi metodami, ki merijo kemične ali fizikalne lastnosti tal, ki so odvisne od vsebnosti vode v tleh (Hignett in Evett, 2008).

1.2 MERILNIKI VSEBNOSTI VODE V TLEH IN NJIHOVA UMERITEV

Večino trenutno uporabljenih merilnikov vsebnosti vode v tleh uvrščamo v skupino elektromagnetnih metod. Gre za posredno metodo meritev, ki temelji na meritvah relativne dielektričnosti tal (ϵ). V primerjavi z relativno dielektričnostjo trdne faze tal ($\epsilon = 2 - 5$) in zraka ($\epsilon = 1$), je relativna dielektričnost vode bistveno višja ($\epsilon = 80$), zato je dielektričnost tal primarno posledica prisotnosti vode v obliki kapljevine (Topp in Ferré, 2002; Hignett in Evett, 2008). Talne lastnosti, kot so tekstura, predvsem delež gline, mineralna sestava, delež organske snovi, električna prevodnost, gostota tal in temperatura, imajo v večji ali manjši meri vpliv na meritve z merilniki, ki merijo dielektričnost tal (Vaz in sod., 2013; Fares in sod., 2016; Matula in sod., 2016; Hajdu in sod., 2019; Kassaye in sod., 2019). Zato uporaba zgolj tovarniške umeritvene funkcije ne deluje ustrezno v vseh tipih tal. Mnogo avtorjev ob uporabi merilnikov, ki delujejo z nižjo delovno frekvenco, priporoča izvedbo talno specifične umeritve (Parvin in Degre, 2016; Roberti in sod., 2018; Domínguez-Niño in sod., 2019).

Standardna referenčna metoda umeritve merilnikov, ki merijo dielektričnost tal, je termo gravimetrična, kjer vodo iz vzorca tal odstranimo s sušenjem in vsebnost vode v vzorcu določimo s tehtanjem (Topp in Ferré, 2002). Poznamo različne načine izvedbe talno specifične umeritve tovrstnih merilnikov. Umerjanje lahko izvedemo na terenu ali v laboratoriju.

Laboratorijsko umerjanje lahko izvedemo na porušenem ali neporušenem vzorcu tal. Pri umerjanju porušenega vzorca tla najprej posušimo na zraku, jih presejemo skozi sito, zmešamo z znano količino vode ter jih zgostimo na naravno gostoto v primerno veliki posodi. Z vsako tako meritvijo dobimo le eno umeritveno točko, zato moramo postopek ponoviti pri vsaj petih različnih količinah dodane vode (Starr in Paltineanu, 2002). Umerjanje v neporušenih talnih monolitih je po mnenju določenih avtorjev bolj napredna, zaradi ohranitve naravne strukture tal (Provenzano in sod., 2015; Weitz in sod., 1997). V tem primeru merilnik vstavimo v z vodo nasičen talni monolit in ga pustimo, da se naravno suši. Vzorec tal skupaj z merilnikom v določenih časovnih intervalih tehtamo za kasnejšo gravimetrično določitev vsebnosti vode in sočasno odčitamo izhodne podatke

merilnika. Na ta način dobimo serijo merilnih točk na istem vzorcu tal (Holzman in sod., 2017).

Večina proizvajalcev merilnikov, ki merijo dielektričnost tal, v priročnikih za uporabo opiše priporočen način umerjanja njihovih merilnikov. Delta-T Devices Ltd., Cambridge, VB, za umeritev merilnika SM150T priporoča uporabo dvo-točkovne talno specifične umeritve, ki je podrobneje opisana v priročniku (Delta-T Devices, 2016). METER Group Inc., Pullman, ZDA, za svoje merilnike priporoča metodo umeritve kapacitivnih merilnikov v porušenem vzorcu tal, predlagane s strani Starr in Paltineanu (2002). Stevens Water Monitoring Systems Inc., Oregon, ZDA, navaja, da talno specifična umeritev njihovih merilnikov za večino tal ni potrebna.

1.3 POMEN LASTNOSTI TAL PRI DOLOČANJU PARAMETROV NAMAKANJA

Vsebnost vode v tleh pomembno vpliva na številne temeljne biofizikalne procese. Vpliva na mikrobnost, razgradnjo organske snovi v tleh, kalitev semen in rast ter prehrano rastlin. Določitev vsebnosti vode v tleh je potrebna za različne namene, od vnosa podatkov za zagon izdelave globalnih podnebnih modelov do spremljanja vsebnosti vode na terenu za uporabo v različnih kmetijskih praksah.

Za pravilno izbiro in izvedbo namakanja je potrebno poznavanje lastnosti tal, na katerih se bo namakanje izvajalo. Pridobiti moramo podatke, ki določajo lastnosti namakanih tal, med njimi so: informacije o zastopanosti posameznih talnih tipov na namakanih površinah; podatki o globini talnih horizontov ter sposobnosti zadrževanja vode v posameznem horizontu; teksturi tal ter koeficientu infiltracije (Baviskar in Heimovara, 2017; Pintar, 2006).

Kompleksen, trifazni sistem, ki ga predstavljajo tla, je sestavljen iz mešanice plinastih, tekočih in trdnih snovi. Mineralni delci in organska snov predstavljajo trdno fazo, povezano v porozen prostor. Voda s primesmi hranil in drugih snovi sestavlja talno raztopino, ki je del tekoče faze tal, zrak, ujet v talne pore pa predstavlja plinasto fazo tal (Pintar, 2006). Za določitev lastnosti tal, ki vplivajo na tok vode v tleh uporabljamo razmerja med plinasto, tekočo in trdno fazo tal. Teksturane razrede tal predstavljajo deleži različno velikih delcev tal. Tako lahko govorimo o glinenih, ilovnatih, meljastih, peščenih, peščeno meljastih, peščeno glinastih tleh, itn. Mineralna veziva in organska snov med seboj vežejo talne delce, ki dajejo tlu različno strukturo. Struktura, skupaj s teksturo, določa sposobnost tal za zadrževanje vode in vpliva na koeficient infiltracije, ki je pomemben pri izbiri kapacitete namakalnega sistema, predvsem ko namakamo

z razpršilci (Baviskar in Heimovara, 2017; Zhang in sod., 2018).

Rastline morajo, zato da lahko sprejemajo vodo skozi korenine, premagati negativni tlak (podan tudi kot pF vrednost, ki je negativni logaritem vodnega stolpca, izraženega v centimetrih), s katerim je voda vezana na talne delce oz. matrični potencial vode v tleh (Ψ). Ko je Ψ -1500 kPa oziroma pF 4,2 (največja vrednost, ki jo večina rastlin lahko premaga), govorimo o točki venenja (TV). Pri takem stanju vode v tleh rastline trajno uvenijo in si ne opomorejo, četudi jih namočimo. Ko količina vode v tleh narašča, voda postaja vedno bolj dostopna rastlinam, z debeljenjem plasti vodnih molekul, ki so vezane na talne delce. Ko je vode veliko in je Ψ od 6 kPa do -33 kPa (pF med 1,8 ter 2,5), je dosežena poljska kapaciteta (PK) tal. To je stanje, ko je v tleh največja količina vode, ki jo tla lahko zadržijo. V tleh je rastlinam dostopna voda, ki se zadrži med PK in TV. Označujemo jo kot razpoložljivo vodo (RV) (Pintar, 2003). Za natančno namakanje je zelo pomembno natančno določiti vsebnost vode pri PK in TV.

PK in TV sta dve najpomembnejši točki na t. i. krivulji vodozadrževalnih lastnosti tal (VZL), ki predstavlja povezanost vsebnosti vode in matričnega potenciala tal (Bittelli, 2011). Pomembna je tudi krivulja točka (KT), ki predstavlja točko določene količine vode v tleh, ko rastlina relativno lahko črpa vodo iz tal, pod to količino pa je rastlina v sušnem stresu. PK in TV sta talno specifični lastnosti, enako kot celotna krivulja VZL, medtem ko je KT rastlinsko specifična lastnost (Pintar, 2003). V praksi to pomeni, da na istih tleh različne vrste rastlin pokažejo znake sušnega stresa pri različni vsebnosti vode v tleh.

1.4 DOLOČITEV KRIVULJE VODOZADRŽEVALNIH LASTNOSTI TAL

Za določanje krivulje VZL tal lahko uporabimo več različnih postopkov in metod, ki so bile razvite v zadnjih desetletjih (Bittelli, 2011). Uporabimo lahko metodo Richardove tlačne posode, pri kateri s pomočjo nadtlaka izpodrinemo vodo, katere vezava na talne delce je šibkejša kot vzpostavljeni nadtlak. Večji kot je tlak, več vode lahko iztisne. Za določanje TV talne vzorce na keramični plošči izpostavimo tlaku 1500 kPa za približno teden dni (Bittelli, 2011). Vsebnost vode, ki je ostala v talnem vzorcu, določimo z gravimetrično metodo. Na enak način določimo vsebnost vode za katerokoli vrednost Ψ . Dobljene točke povežemo v najbolj prilagajajočo se krivuljo.

Napredek tehnologije je privedel do razvoja avtomatizirane naprave, ki precej skrajša postopek izdelave krivulje VZL tal. Naprava HYPROP[®] (proizvajalec UMS GmbH, München, Nemčija) deluje na podlagi Schin-

dljerjeve metode evaporacije. Omogoča kontinuirano merjenje Ψ s pomočjo dveh tenziometrov in hkratnega tehtanja vzorca tal (Schindler in sod., 2010). Tenziometra sta nameščena na dveh ravneh v neporušenem, z vodo nasičenem vzorcu tal z znanim volumnom (250 cm^3).

Vsebnost vode za krivuljo VZL tal analiziranega vzorca izračunamo na podlagi izgube mase vzorca. Naprava meri v območju med 0 do -100 kPa , pri majhnih vsebnostih vode pa meritve modelira z uporabo različnih, v programskem orodju vgrajenih, modelov. Meritve se izvajajo med naravnim postopkom sušenja tal. Čas merjenja znaša, odvisno od tal, od dveh (vzorci glinastih tal) do največ 10 dni (vzorci šotnih in peščenih tal). Ob koncu meritev s pomočjo termogravimetrične metode ugotovimo maso vode v talnem vzorcu in to je podlaga za preračun mase vode v času izvajanja meritev, ki ga izvedemo s pomočjo programskega orodja HYPROP-FIT (HYPROP Operation Manual, 2015).

Iz pridobljenih podatkov se nato s pomočjo programskega orodja izriše krivulja VZL tal (HYPROP Operation Manual, 2015; Durner in sod., 2015). V programskem orodju lahko za izris krivulj uporabimo več različnih modelov hidravličnih lastnosti tal. Matrični potencial vode v tleh v grafičnem prikazu, t. j. krivulji VZL tal izrazimo s pF vrednostjo, kar omogoča bolj pregleden prikaz VZL tal. Nabor vrednosti vsebnosti vode v tleh je relativno majhen (od 0 do npr. 60 vol. %) v primerjavi z naborom vrednosti Ψ (od 0 do -1500 kPa oz. od 0 do 15 000 cm vodnega stolpca), zato je prikaz s semilogaritmskim grafom (logaritmiramo vrednosti vodnega stolpca izražene v centimetrih, da pridemo do pF vrednosti) precej bolj primeren. Krivulje VZL tal so specifične za posamezen tip tal in so odvisne od teksture, strukture, gostote tal ter vsebnosti organske snovi (Pintar, 2003).

PK in TV lahko določimo tudi iz podatkov o teksturi tal. S t. i. Saxtonovim modelom lahko izračunamo PK (pF 2,5) in TV (pF 4,2) na osnovi masnega deleža peska in gline s pomočjo nelinearne regresijske zveze (Saxton in sod., 1986). Leta 2006 sta Saxton in Rawls model nadgradila še s štirimi dodatnimi parametri, in sicer: vsebnost organske snovi, gostota tal, vsebnost skeleta in slanost tal (Saxton in Rawls, 2006).

Poleg zgoraj opisanih metod ter različnih modelov za določanje vsebnosti vode v tleh, lahko vrednosti PK določimo tudi na terenu (Veihmeyer and Hendrickson, 1949). Po obilnem deževnem dogodku oz. doseženem stanju nasičenosti tal z vodo (voda na opazovani lokaciji stoji na površini), lahko po 2-3 dneh od tega dogodka, ko pronicanja vode v globlje plasti tal ni več, s pomočjo merilnika izmerimo vsebnost vode v tleh, ki predstavlja stanje PK izbrane lokacije (Zotarelli in sod., 2010).

2 MATERIAL IN METODE

2.1 UMERJANJE MERILNIKOV

Umerjanje smo izvedeli z dvema različnima vrstama merilnikov, ki merijo dielektričnost tal: merilnik SM150T, Delta-T Devices Ltd., ki deluje po principu kapacitivnosti (Delta-T Devices, 2016) in merilnik MVZ 100, Eltratec, trgovina, proizvodnja in storitve d.o.o., SLO, ki po proizvajalčevih trditvah deluje na podlagi merjenja odboja v časovnem prostoru (angl. Time Domain Reflectometry - TDR). Z merilniki SM150T smo umeritev izvedli na tleh iz šestih različnih lokacij po Sloveniji, ki so vključene v projekt EIP Pro-Pridelava (Pro-Pridelava, EIP, BF, Oddelek za Agronomijo, 2020). Merilnike MVZ 100 smo umerili na 35 vzorcih tal iz Vipavske doline, vključenih v projekt LIFE VivaCCadapt (LIFE VivaCCadapt; 2020).

Talno specifično umeritev merilnikov smo izvedli v laboratoriju na neporušenih vzorcih tal (Holzman in sod., 2017). Najprej smo za vsak tip merilnika določili volumen vpliva, na podlagi katerega smo izbrali dimenzije vzorčnega valja. Postopek je podrobneje opisan v Vaz in sod. (2013). Za merilnik SM150T smo izbrali valj s polmerom 5,15 cm in višino 8,00 cm, za merilnik MVZ 100 pa s polmerom 3,50 cm in višino 6,00 cm. Kovinsko masko valjaste oblike, znotraj katere je bil nameščen PVC valj, merilniku ustreznega volumna zaznave, smo zabili v tla in tako dobili neporušen vzorec tal. V laboratoriju smo odvečno maso tal odrezali in poravnali z robom valja, za pridobitev vzorca znanega volumna. Na eno ploskev valja smo namestili filter papir in kovinsko mrežico za preprečitev sipanja vzorca. Tako pripravljene vzorce smo postavili v posodo in vanjo postopoma nalili vodo, skoraj do roba valjev. Vzorce smo pustili v posodi toliko časa, da so se popolnoma nasitili z vodo. Nato smo jih vzeli iz posode in pustili, da odvečna voda odteče in na sredino vsakega vstavili merilnik. V določenih časovnih intervalih smo odčitali surovo vrednost merilnika, mV v primeru SM150T in vsebnosti vode pridobljene s privzeto umeritvijo v primeru MVZ 100. Po odčitku smo nemudoma stehali celoten vzorec, skupaj z merilnikom, za kasnejšo gravimetrično določitev vsebnosti vode v vzorcu. Časovna serija meritev je potekala do vidne suhosti vzorcev, ki je bila dosežena po približno 14 dneh, na sobni temperaturi $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Po zadnji meritvi smo vzorce pretresli v papirnate vrečke in sušili v pečici na $105 \text{ }^\circ\text{C}$ za določitev mase suhe snovi. Zaradi večjega volumna, kot je naveden v standardu (ISO 11465, 1993), smo jih 48 ur, do konstantne mase.

Z enačbo 1 smo izračunali volumnsko vsebnost vode v tleh.

$$\theta (\%) = \left(\frac{m_{sk} - m_{ss}}{m_{ss}} \right) \times \frac{\rho_t}{\rho_v} \times 100 \quad (1)$$

θ je volumska vsebnost vode, m_{sk} je skupna masa tal in vode, m_{ss} je masa suhe snovi tal, ρ_t je gostota tal in ρ_v je gostota vode.

Z regresijsko analizo smo za vsako vzorčno mesto določili večtočkovno talno specifično, linearno ali polinomsko umeritveno funkcijo, ki povezuje gravimetrično določeno θ z: a) surovimi vrednostmi merilnika ali z b) θ , pridobljenimi s tovarniško umeritvijo.

Zgoraj opisani način umeritve nam je hkrati omogočil tudi izvedbo dvotočkovne talno specifične umeritve merilnikov SM150T po priporočilu proizvajalca. V mokrem in suhem talnem monolitu smo odčitali surovo vrednost merilnika in jo s priloženo enačbo pretvorili v koren iz dielektričnosti. Razmerje med vsebnostjo vode in korenem iz dielektričnosti je linearno. Postopek je podrobneje opisan v priročniku (Delta-T Devices, 2016).

Na lokacijah projekta EIP Pro-Pridelava, smo primerjali umeritvene krivulje merilnikov SM150T, pridobljene na različne načine: a) privzeta umeritvena funkcija, b) dvotočkovna talno specifična umeritvena funkcija, predlagana s strani Delta-T Devices in c) večtočkovna talno specifična umeritvena funkcija, pridobljena z regresijsko analizo. Na primerih umerjanja z merilniki MVZ 100 na tleh iz Vipavske doline (projekt LIFE VivaCCAdapt) smo izrisali grafe, ki prikazujejo napake, povzročene v primeru a) izbire linearne ali polinomske večtočkovne umeritvene funkcije in b) ob uporabi različnega števila umeritvenih točk.

Za analizo smo uporabili 14 vzorcev iz lokacij projekta LIFE VivaCCAdapt ter 22 vzorcev iz projekta EIP Pro-Pridelava. Za vse vzorce je bila določena tekstura in gostota tal. Vrednosti gostote tal ter tekstura so v Preglednici 1, predstavljene za 6 izbranih vzorcev, ki smo jih grafično prikazali v poglavju rezultati.

Preglednica 1: Talne lastnosti izbranih vzorcev iz projekta PRO-PRIDELAVA (oznaka vzorca PP1, PP2) ter LIFE VivaCCAdapt (oznaka vzorca L1-L4)

Table 1: Soil properties of selected soil samples from the projects PRO-PRIDELAVA (sample ID PP1, PP2) and LIFE VivaCCAdapt (sample ID L1-L4)

VZOREC	Pesek (%)	Melj (%)	Glina (%)	Tekstura	GOSTOTA (g/cm ³)
PP1	43	40	17	I	1,48
PP2	15	46	38	MGI	1,27
L1	22	50	28	GI	1,59
L2	40	51	9	MI	1,37
L3	27	51	22	MI	1,51
L4	34	54	12	MI	1,53

2.2 DOLOČITEV VODOZADRŽEVALNIH LASTNOSTI TAL

Meritve za izris krivulj VZL tal izbranih lokacij smo izvedli s sistemom HYPROP[®], za izris krivulj pa smo uporabili osnovni van Genuchtenov model, ki na podlagi meritev, z upoštevanjem strukture izbranega vzorca tal izdelava krivuljo VZL (van Genuchten, 1980; Durner in sod., 2015).

V raziskavi smo za določitev PK in TV izbranih lokacij projekta EIP Pro-Pridelava uporabili različne metode. PK smo določili po treh metodah; (1) na terenu, pri čemer smo določili vrednost po več močnih deževnih dogodkih s pomočjo talno specifično umerjenega merilnika SM150T, (2) s sistemom HYPROP[®] z evaporativno metodo, pri pF 2,5 in 1,8 ter vzeli povprečje teh dveh vrednosti ter (3) uporabili model Saxton (Saxton in sod., 1986; Saxton in Rawls, 2006).

TV je bila v laboratoriju določena z meritvami v Richardovi tlačni posodi, kar nam je predstavljalo referenčno vrednost, in na sistemu HYPROP[®], oboje pri pF 4,2, ter po modelu Saxton (Saxton in sod., 1986; Saxton in Rawls, 2006).

2.3 METODE STATISTIČNE ANALIZE

Večtočkovno talno specifično umerjanje smo izvedli z uporabo regresijske analize. Funkcija je bila linearna ali polinomska, in sicer do 5. stopnje. Optimalno stopnjo polinoma smo določili z zaporednimi F-testi za dva gnezdena modela.

Merilne napake ob uporabi različnih umeritvenih krivulj in merilne napake za določitev vsebnosti vode pri poljski kapaciteti smo izračunali z enačbo 2.

$$\text{Napaka (vol. \%)} = \theta_i - \theta_{ref} \quad (2)$$

θ_i je izmerjena oz. določena vsebnost vode in θ_{ref} je referenčna vsebnost vode; v primeru umerjanja merilnikov je to gravimetrično določena vsebnost vode in v primeru določitve poljske kapacitete je referenčna vsebnost vode določena na terenu po več močnih deževnih dogodkih s pomočjo talno specifično umerjenega merilnika SM150T.

Analize podatkov in grafični prikazi so bile izvedeni s programom R 3.5.3 (R Core Team 2019).

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

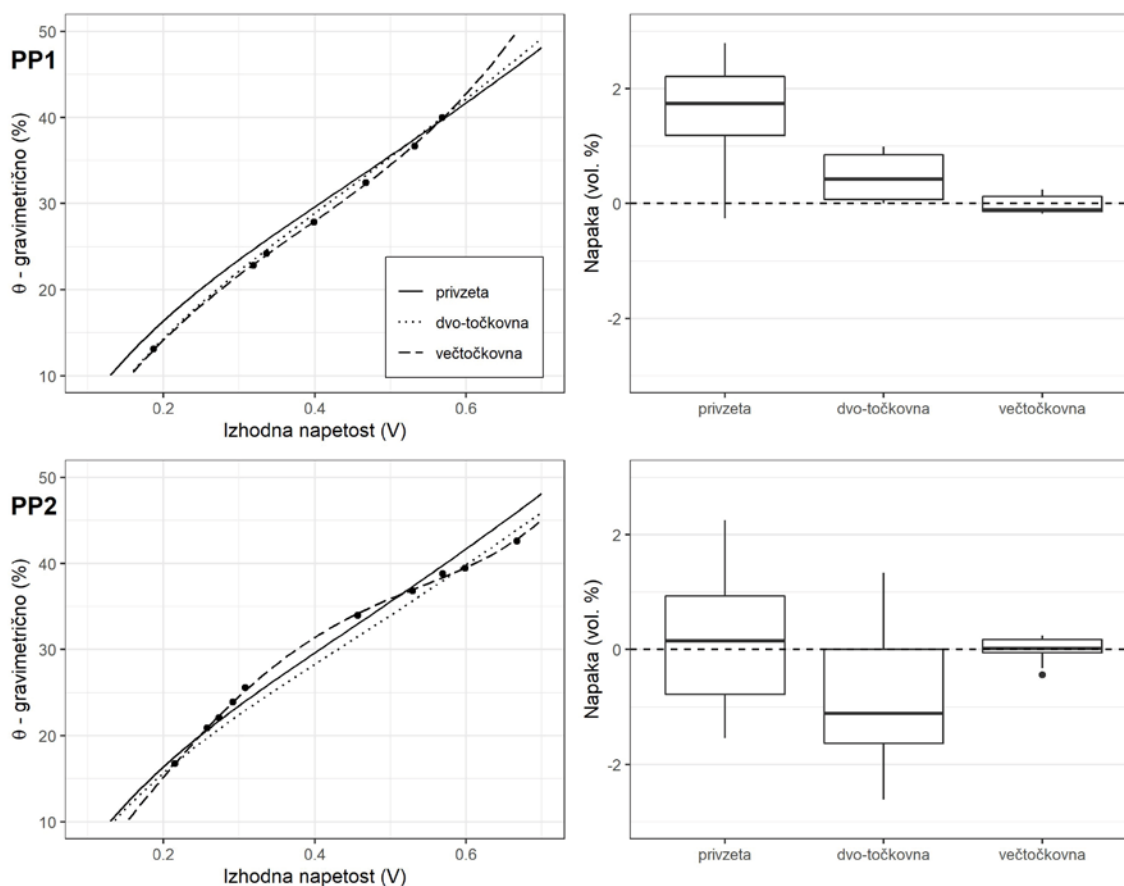
3.1 UMERJANJE MERILNIKOV

Najmanjšo razliko med izmerjenimi vrednostmi z merilnikom in z gravimetrično metodo določeno vsebnostjo vode v tleh in s tem najbolj natančno umeritev merilnikov SM150T v skoraj vseh primerih dobimo z večtočkovno talno specifično umeritvijo (Slika 1). Me-

diana napak je v večini primerov manjša kot 0.5 vol. %. Tudi dvotočkovna talno specifična umeritev je v skoraj vseh primerih boljše od tovarniško privzete, a so napake v večini primerov bistveno večje kot pri večtočkovni talno specifični umeritvi. Mediana napak se v večini primerov giblje okoli 1 %. Ugotavljamo tudi, da je bila napaka meritve vsebnosti vode v tleh ob privzeti tovarniški umeritvi v večini primerov v okviru navedbe proizvajalca, t. j. ± 3 vol. % (Delta-T Devices, 2016).

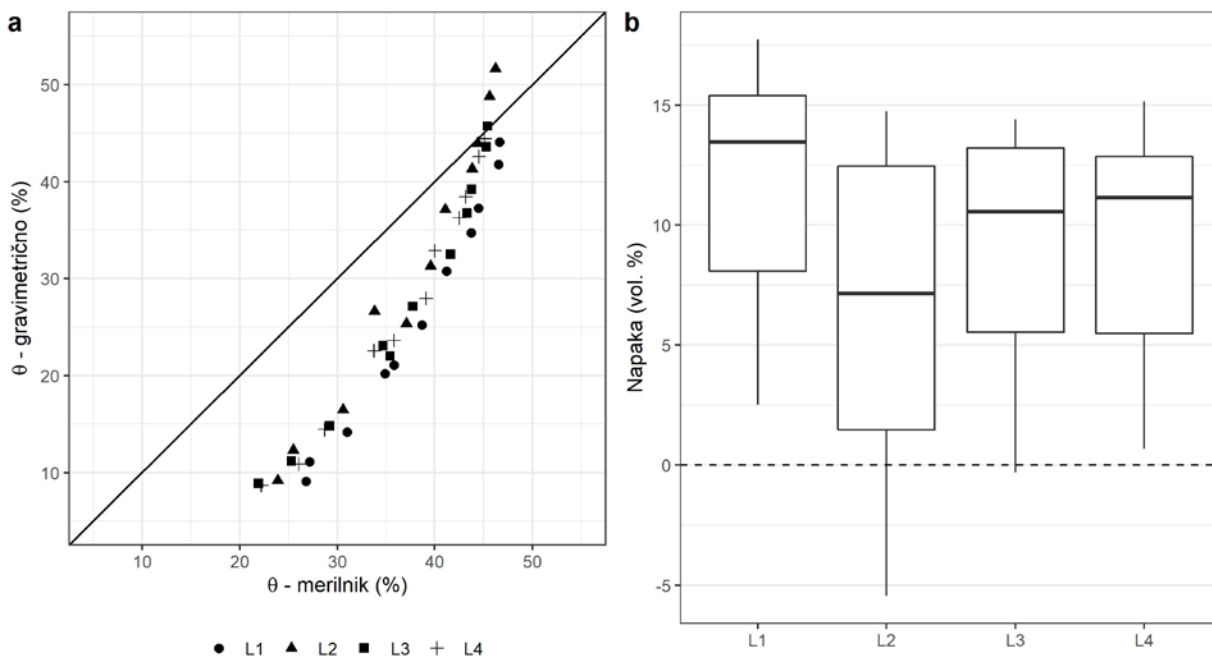
Tovarniško privzeta umeritev merilnika MVZ 100 je zelo netočna (Slika 2). Mediana napak predstavljenih štirih primerov se giblje med 7 in 13 vol. %, največja napaka je celo nad 15 vol. %. Merilnik podaja vsebnosti vode, ki so večje od dejanskih, razen pri zelo velikih vsebnostih vode v tleh. Poleg tega se z zmanjševanjem volumnske vsebnosti vode v tleh napaka povečuje.

Tudi izbira stopnje polinoma pri določitvi talno specifične umeritvene funkcije je pomembna (Slika 3). V primeru merilnika MVZ 100 linearna funkcija v veliki večini primerov ni primerna, saj so napake v primerjavi



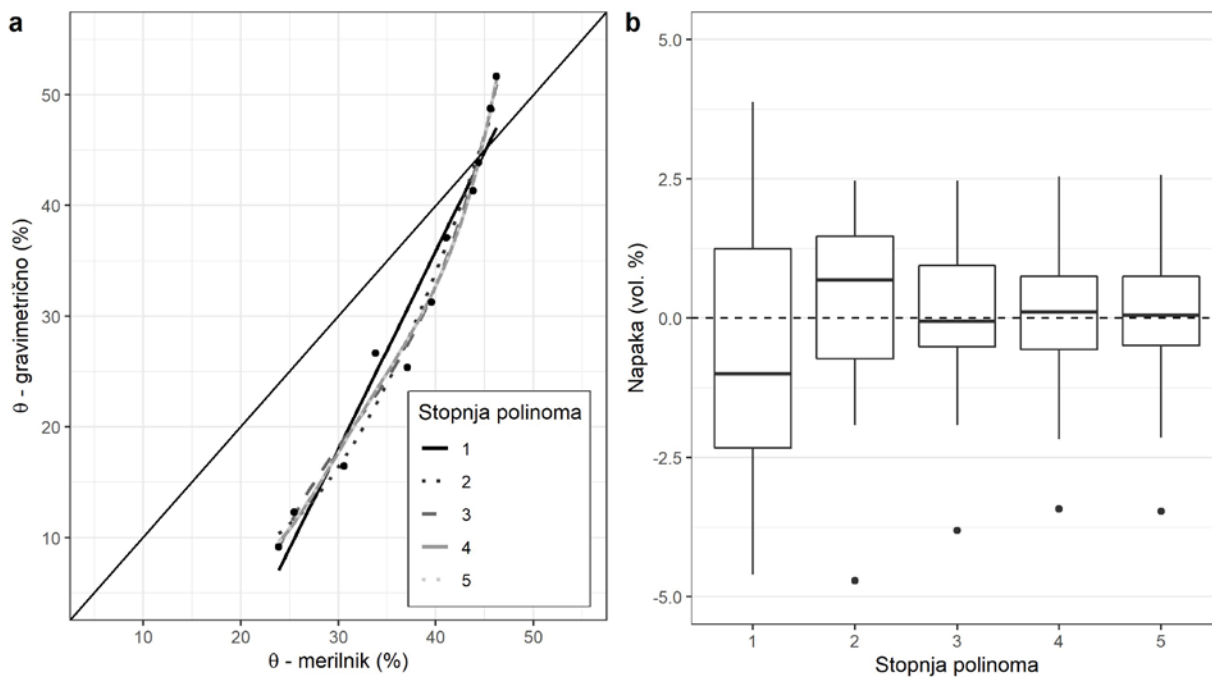
Slika 1: Različne umeritvene krivulje (levo) in okvirji z ročaji napak v vsebnosti vode v tleh (desno), za merilnik SM150T za dva izbrana primera tal iz projekta PRO-PRIDELAVA (PP1 in PP2)

Figure 1: Different calibration curves (left) and boxplot measurements of soil water content errors (right) for the SM150T sensor for two selected soil samples from the PRO-PRIDELAVA project (PP1 and PP2)



Slika 2: Primerjava gravimetrične in z merilnikom izmerjene volumske vsebnosti vode v tleh (a) in okvirji z ročaji napak v točkah (b), za merilnik MVZ 100 za štiri izbrane tipe tal iz projekta LIFE VivaCCAdapt (L1,L2,L3 in L4)

Figure 2: Comparison of gravimetric and volumetric soil water content measured with a sensor (a) and boxplot with error points (b), for the MVZ 100 sensor for four selected soil types from the LIFE VivaCCAdapt project (L1, L2, L3 and L4)



Slika 3: Primerjava različnih stopenj umeritvenega polinoma (a) in okvirji z ročaji napak v točkah (b), za merilnik MVZ 100 za izbrano lokacijo L2 iz projekta LIFE VivaCCAdapt

Figure 3: Comparison of different calibration polynomials (a) and boxplots with error points (b), for the MVZ 100 sensor for the selected site L2 from the project LIFE VivaCCAdapt

s polinomsko funkcijo višjega reda večje. Ugotavljamo tudi, da je napaka tudi pri izbiri optimalnega polinoma bistveno večja kot pri merilniku SM150T, in sicer znaša do 3 vol. %, t. j. toliko kot pri privzeti umeritvi merilnika SM150T.

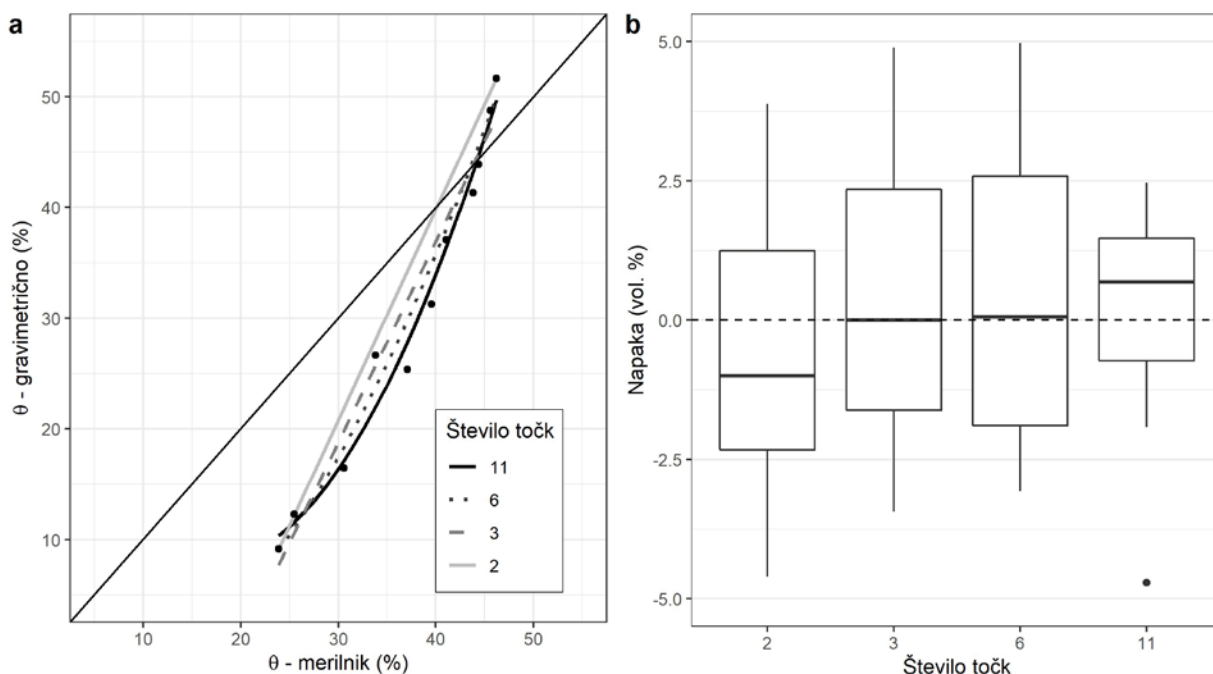
Določitev umeritvene krivulje smo izvedli na različnem številu točk, in sicer za vse točke (11), vsako drugo točko (6 točk), prvo, srednjo in zadnjo (3 točke) ter prvo in zadnjo (2 točki). Primer različnih umeritvenih krivulj prikazujemo na Sliki 4. Ugotavljamo, da v redkih primerih zadoščajo 3 točke, v večini zadostuje 6, ponekod, kot v prikazanem primeru, pa potrebujemo za zanesljivo umeritev 11 točk.

Naše ugotovitve kažejo na to, da je pri umerjanju pomembno določiti dovoljšne število točk, vsaj 6 in pravilno izbrati stopnjo polinoma umeritvene funkcije. Uporaba dvotočkovne talno specifične umeritve merilnikov SM150T, v večini primerov zmanjša napako v primerjavi z napako, povzročeno z uporabo privzete umeritve, vendar pa je v določenih primerih, kot npr. PP2 (Slika 1), napaka primerljiva s privzeto umeritvijo oziroma celo večja, zato je potrebno uporabo dvotočkovne umeritve, predlagane s strani proizvajalca Delta-T, še podrobneje raziskati. Matula in sod. (2016) uporabe dvotočkovne talno specifične umeritve merilnikov ThetaProbe istega proizvajalca, ne priporočajo, saj v primerjavi s privzeto,

ne doprinese bistveno k zmanjšanju napak. Natančnost meritev je še posebej pomembna v primeru deficitnega namakanja, kjer že napaka nekaj vol. % lahko pomeni veliko razliko v sušnem stresu za rastlino.

Merilniki vsebnosti vode v tleh omogočajo sprotno in neprekinjeno merjenje vode v tleh na različnih globinah z minimalnimi spremembami naravnih razmer v tleh (Paltineanu in sod., 1997). Na točnost delovanja vplivajo talne lastnosti ter delež kamena in korenin v tleh, v katere so vgrajeni. Po navedbah Vaz in sod. (2013) imajo nekateri merilniki tovarniško določene umeritvene enačbe za mineralna ali organska, njihova natančnost pa se lahko poveča za 2-3 %, če se izvede talno specifična umeritev. Slednje smo z našimi analizami potrdili tudi sami.

V raziskavi, ki so jo izvedli Ferrarezi in sod. (2020), so se z uporabo tovarniške umeritvene funkcije najbolje odrezali merilniki, ki delujejo na podlagi merjenja odboja v časovnem prostoru (angl. Time Domain Reflectometry - TDR). Ravno nasprotno, v naši raziskavi se je slabše odrezal merilnik MVZ 100, proizvajalca Eltratec, ki prav tako deluje na podlagi TDR. Na drugi strani so, cenejša alternativa TDR merilnikom, kapacitivni merilniki, kot je preučevani SM150T, proizvajalca Delta-T Devices Ltd.. Po navedbah Matula in sod. (2016) in Singh in sod. (2018), so se kapacitivni merilniki izkazali za natančne



Slika 4: Primerjava umeritvenih krivulj za različno število točk (a) in okvirji z ročaji napak v točkah (b), za merilnik MVZ100 za izbrano lokacijo

Figure 4: Comparison of calibration curves for different number of points (a) and boxplot with error points (b), for the MVZ100 sensor for the selected site

za učinkovito spremljanje vode v tleh v znanstvene ali agronomske namene, če je zagotovljena talno specifična umeritev. Slednje potrjujejo tudi naši rezultati, kjer dobimo z uporabo večtočkovne talno specifične funkcije natančnejšo umeritev merilnika SM150T. Več raziskav je pokazalo, da talno specifične umeritve kapacitivnih merilnikov izboljšajo natančnost meritev vsebnosti vode v tleh (Bircher in sod., 2016; Mittelbach in sod., 2012; Vaz in sod., 2013).

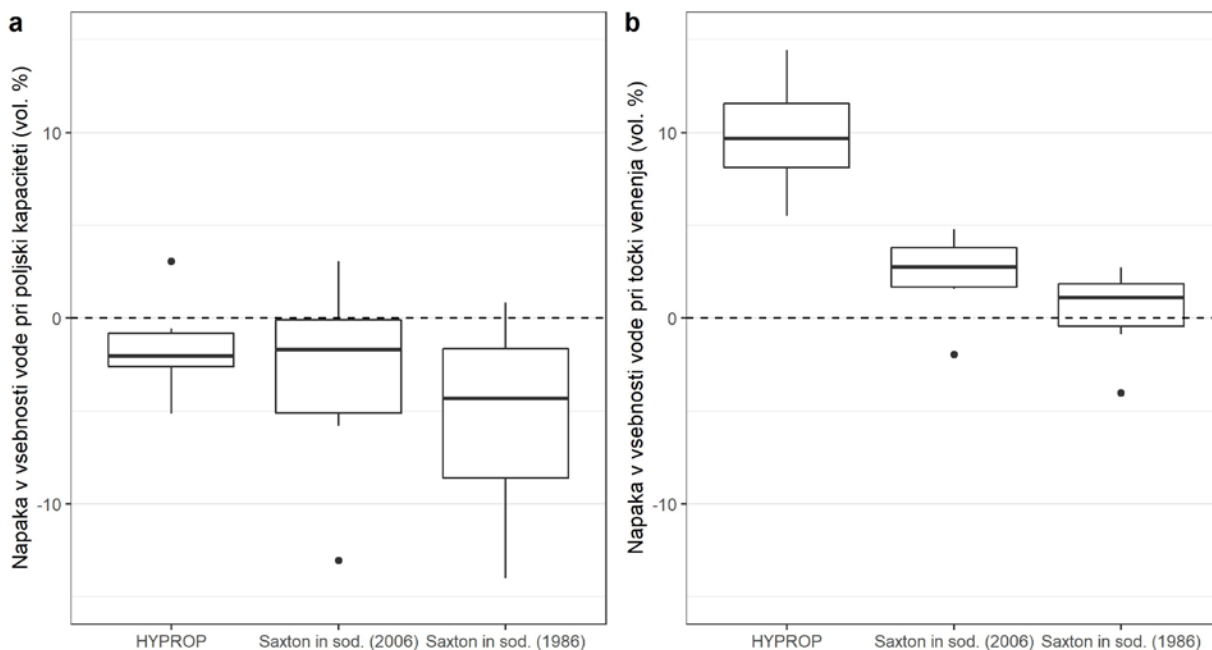
3.2 VODOZADRŽEVALNE LASTNOSTI TAL

Vsebnost vode pri PK in TV smo določili na podlagi različnih metod in jih med seboj primerjali (Slika 5). Pri PK vse tri metode v večini primerov podcenjujejo referenčno vrednost. Najboljše rezultate dobimo z evaporacijsko metodo s sistemom HYPROP[®] in nadaljnjim modeliranjem s programskim orodjem HYPROP-FIT. Med metodama Saxton pa se bolje obnese novejša (Saxton in Rawls, 2006). Pri TV vse tri metode precenjujejo vsebnost vode v tleh, še posebej evaporacijska metoda izvedena s sistemom HYPROP[®], kjer je mediana napake

okoli 10 vol. %. Slab rezultat je do neke mere pričakovani, saj HYPROP meri le do 100 kPa, TV, določena pri 1500 kPa je bila modelirana z modelom van Genuchten. Pri tej metodi je ključna izvedba dodatnih meritev pri manjših vrednostih matričnega potenciala, v Richardovi tlačni posodi. Dobljene dodatne vrednosti nato vnesemo v HYPROP-FIT in model priredimo novemu naboru podatkov z večjim razponom. Nasprotno kot pri PK dá pri TV boljše rezultate starejša metoda Saxton (Saxton in sod., 1986).

Po podatkih Evett in sod. (2019) je določanje PK in TV z Richardovo tlačno posodo ter PK z sistemom Hyprop uveljavljena praksa, vendar tako določene vrednosti PK in TV morda niso neposredno uporabne za učinkovito upravljanje namakanja na podlagi podatkov o vsebnosti vode v tleh, izmerjenih na terenu. Te vrednosti so lahko uporabne za oceno hidravličnih lastnosti tal, za natančno določitev vodozadrževalnih lastnosti pa je potrebna kombinacija in uporaba več različnih metod, kar priporočamo tudi v naši raziskavi.

Spremljanje vsebnosti vode v tleh se v času vse večjega povpraševanja po hrani in vse intenzivnejših kmetijskih suš hitro razvija. Natančne meritve vsebnosti vode



Slika 5: Okvirji z ročaji za napako v vsebnosti vode pri poljski kapaciteti (a) in točki venenja (b), za različne metode izračuna, pri čemer smo pri poljski kapaciteti kot referenčna vrednost vzeli določeno na terenu po več močnih deževnih dogodkih s pomočjo talno specifično umerjenega merilnika SM150T, pri točki venenja pa v laboratoriju določeno z meritvami v Richardovi tlačni posodi

Figure 5: Boxplots for water content errors at field capacity (a) and wilting point (b), for different calculation methods. The field capacity value was determined in the field, after several heavy rains using a soil-specific calibrated SM150T sensor and the wilting point was determined in the laboratory using the pressure plate extractor

v tleh v realnem času omogočajo kmetom, agronomom in hidrologom boljše obveščenost o količini vode v tleh. Za izboljšanje načrtovanja in upravljanja vodnih virov za kmetijstvo se lahko uporabljajo različne namakalne tehnologije. Ne glede na namakalni sistem je treba vedno natančno določiti količino uporabljene vode, da se zmanjša možnost izgub vode zaradi odtekanja in pronicanja ter poveča pridelek (Ferrarezi in sod., 2020). Če želimo doseči večji obseg uporabe različnih orodij za načrtovanje namakanja, je potreben razvoj novih in dostopnejših tehnologij. Med njimi se po navedbah González-Teruel in sod. (2019) že pojavlja razvoj in umeritev novih kapacitivnih nizkocenovnih merilnikov vsebnosti vode v tleh, ki omogočajo izbiro umeritvene funkcije glede na tip tal. Tudi Cvejić in sod. (2020) pišejo, da je posebno pozornost potrebno nameniti iskanju primernih, nizkocenovnih in nizkoenergijskih merilnikov vsebnosti vode v tleh z umeritvenimi funkcijami, ki pokrivajo širok razpon tipov tal.

Novi dosežki na področju tehnologij natančnega namakanja, obdelave podatkov in upravljanja namakalnih sistemov ponujajo možnosti za optimizacijo odločanja glede režima namakanja. Za zmanjšanje izgub vode čez talni profil je pomembno ne le pravilno določiti potrebe po vodi, temveč tudi prilagoditi pogostost namakanja talnim značilnostim in rasti korenin (Zinkernagel in sod., 2020). To lahko dosežemo z izbiro in uporabo ustreznih merilnikov vsebnosti vode v tleh. Njihov razvoj in dostopnost na trgu se iz leta v leto povečuje. Poleg ustreznih merilnikov, potrebujemo za učinkovito natančno namakanje tudi znanje o modelih za izračunavanje potreb po vodi, ki združujejo podatke iz različnih virov kontinuuma tla-rastline-atmosfera.

4 SKLEPI

Ob uporabi merilnikov, ki merijo dielektričnost tal, za meritve vsebnosti vode v tleh, priporočamo izvedbo večtočkovne talno-specifične umeritve, na vsaj 6 točkah. Za merilnike SM150T proizvajalca Delta-T Devices, se je uporaba dvotočkovne talno specifične umeritve, izkazala za ustrezno v določenih tipih tal, v nekaterih pa so napake podobnega velikostnega reda, kot ob uporabi privzete tovarniško določene umeritvene funkcije. Glede na to, da so pri tovarniški umeritvi napake v okviru navedenih napak iz priložnika ± 3 vol. % (Delta-T Devices, 2016), se lahko pri upravljanju namakanja, kjer se vsebnost vode giblje le okoli PK, zadovoljimo tudi samo s privzeto umeritvijo. Podobno velja za primere, kjer želimo spremljati le dinamiko vsebnosti vode v tleh in nas absolutne vrednosti vsebnosti vode v tleh ne zanimajo.

Pri merilnikih MVZ 100 proizvajalca Eltratec je privzeta umeritvena funkcija zelo netočna. Merilniki skoraj na celotnem območju meritev močno precenjujejo dejansko vsebnost vode v tleh. Tudi po večtočkovni talno-specifični umeritvi je napaka enakega velikostnega razreda kot pri SM150T ob uporabi zgolj tovarniške umeritve.

Za namen upravljanja namakanja, priporočamo določitev PK na podlagi meritev z merilnikom vsebnosti vode v tleh na terenu po močnejšem deževnem dogodku. V kolikor dežja ne pričakujemo, oziroma je lokacija namakanja v rastlinjaku, mesto, kjer je v tla vstavljen merilnik, namočimo z večjo količino vode. Takšna določitev PK je še bolj smiselna, če ni bila opravljena talno specifična umeritev merilnika. Za TV priporočamo, da se določi z gravimetrično metodo z Richardovo tlačno posodo. Če je namakanje pogosto in ni deficitno ter se vsebnost vode giblje blizu PK, ali pa želimo spremljati gibanje vsebnosti vode v tleh in ne tudi absolutnih vrednosti, pa lahko uporabimo tudi modele, ki TV izračunajo na podlagi teksture tal. Kljub majhnemu vzorcu (6 lokacij), ki ga predstavljamo v prispevku, smo do podobnih ugotovitev prišli tudi na več kot 10 drugih analiziranih lokacijah.

Za natančno določitev in izbiro ustreznih merilnikov, bi bilo potrebno raziskavo razširiti z preučevanjem širšega nabora v merilnikov vsebnosti vode v tleh od več proizvajalcev. Pri izbiri preučevanih merilnikov bi bilo potrebno upoštevati želje in zahteve končnih uporabnikov, največkrat so to kmeti ali drugi raziskovalci, ki se vsak dan na terenu srečujejo z uporabo merilnikov ter težavami z njihovim delovanjem.

Samo z natančno določitvijo parametrov pomembnih za namakanje ter ustrezne izbire in uporabe namakalne opreme, lahko dosežemo zelene rezultate, ki nam jih prinaša uporaba natančnega namakanja v kmetijski pridelavi. Najboljše namakalne tehnologije je treba združiti z novimi pristopi za načrtovanje namakanja in sistemi za podporo odločanju o namakanju, ki temeljijo na poznavanju značilnosti tal in potreb po vodi za posamezno namakalno kulturo.

5 ZAHVALA

Pripravo prispevka sta omogočili projekti LIFE ViVaCCAdapt - Prilaganje na vplive podnebnih sprememb v Vipavski dolini (LIFE15 CCA/SI/000070), ki je sofinanciran s strani Evropske komisije (60 %) in Ministrstva za okolje in prostor Republike Slovenije (20 %) ter projekta EIP PRO-PRIDELAVA - Povečanje produktivnosti kmetijske pridelave z učinkovito in trajnostno rabo vode (33133-1005/2018/19) in EIP DiNaZe – Digitalizacija namakanja zelenjave (33117-3006/2018/12), ki

sta sofinancirana s strani Evropskega kmetijskega sklada za razvoj podeželja (80 %) in Programa razvoja podeželja Republike Slovenije (20 %).

Avtorji se zahvaljujemo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo mladim raziskovalcem.

6 VIRI

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. *Sustainability*, 9(3), 353. <https://doi.org/10.3390/su9030353>
- Baviskar, S. M., & Heimovaara, T. J. (2017). Quantification of soil water retention parameters using multi-section TDR-waveform analysis. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 549, 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.068>
- Bittelli, M. (2011). Measuring soil water content: A review. *HortTechnology*, 293–300. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.293>
- Bircher, S., Andreasen, M., Vuollet, J., Vehviläinen, J., Rautiainen, K., Jonard, F., Weihermüller, L., Zakharova, E., Wigneron, J.-P., & Kerr, Y. H. (2016). Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(1), 109–125. <https://doi.org/10.5194/gi-5-109-2016>
- Cvejič, R., Černič-Istenič, M., Honzak, L., Pečan, U., Železnikar, Š., & Pintar, M. (2020). Farmers try to improve their irrigation practices by using daily irrigation recommendations—The Vipava valley case, Slovenia. *Agronomy*, 10(9), 1238. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091238>
- Delta-T Devices. (2016). *User manual for the SMT150T soil moisture sensor*. Delta-T Devices, Cambridge, VB. Pridobljeno s https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/SM150_Manual_version_1.2.pdf
- Evetts, S. R., Stone, K. C., Schwartz, R. C., O'Shaughnessy, S. A., Colaizzi, P. D., Anderson, S. K., & Anderson, D. J. (2019). Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: Implications for irrigation management. *Irrigation Science*, 37(6), 751–759. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00644-4>
- Fares, A., Awal, R., & Bayabil, H. K. (2016). Soil water content sensor response to organic matter content under laboratory conditions. *Sensors*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/s16081239>
- Ferrarezi, R. S., Nogueira, T. A. R., & Zepeda, S. G. C. (2020). Performance of soil moisture sensors in Florida sandy soils. *Water*, 12(2), 358. <https://doi.org/10.3390/w12020358>
- González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P. J., Toledo-Moreo, A. B., Jiménez-Buendía, M., & Soto-Valles, F. (2019). Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. *Sensors*, 19(3), 491. <https://doi.org/10.3390/s19030491>
- Hajdu, I., Yule, I., Bretherton, M., Singh, R., & Hedley, C. (2019). Field performance assessment and calibration of multi-depth AquaCheck capacitance-based soil moisture probes under permanent pasture for hill country soils. *Agricultural Water Management*, 217, 332–345. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.002>
- Hignett, C., Evett, S. (2008). Direct and surrogate measures of soil water content. V: *Field estimation of soil water content. A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology*. Training course series 30. Vienna, International Atomic Energy Agency: 1-21
- Holzman, M., Rivas, R., Carmona, F., & Niclos, R. (2017). A method for soil moisture probes calibration and validation of satellite estimates. *Methodsx*, 4, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2017.07.004>
- Hyprop Operational Manual.pdf. (2020). Pridobljeno s http://library.metergroup.com/Manuals/UMS/Hyprop_Manual.pdf
- International Organization for Standardization. (1993). Soil quality - determination of dry matter and water content on a mass basis-gravimetric method (*ISO Standard No. 11465*). Pridobljeno s <https://www.iso.org/standard/20886.html>
- Kamienski, C., Soininen, J.-P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Salmon Cinotti, T., Filev Maia, R., & Torre Neto, A. (2019). Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, 19(2), 276. <https://doi.org/10.3390/s19020276>
- Khosla, R., Fleming, K., Delgado, J. A., Shaver, T. M., & Westfall, D. G. (2002). Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(6), 513–518.
- LIFE VivaCCAdapt. (2020). Pridobljeno s <http://www.life-vivaccadapt.si/sl/>
- Matula, S., Batkova, K., & Legese, W. L. (2016). Laboratory performance of five selected soil moisture sensors applying factory and own calibration equations for two soil media of different bulk density and salinity levels. *Sensors*, 16(11), 1912. <https://doi.org/10.3390/s16111912>
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>
- Mittelbach, H., Lehner, I., & Seneviratne, S. I. (2012). Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 430–431, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.041>
- Neupane, J., & Guo, W. (2019). Agronomic basis and strategies for precision water management: A review. *Agronomy*, 9(2), 87. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020087>
- Paltineanu, I. C., & Starr, J. L. (1997). Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 61(6), 1576–1585. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100060006x>
- Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00075-6)
- Durner, W., Pertassek, T., & Str, G. (b. d.). *HYPROP-FIT Software*. 68. (2011). Pridobljeno s http://www.soil.tu-bs.de/mitarbeiter/durner/software/hyprop/HYPROP-FIT_Manual.pdf
- Pintar, M. (2006). *Osnove namakanja s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v zahodni, osrednji in južni Sloveniji*. Mini-

- strstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano.
- Pro-Pridelava, EIP, BF, Oddelek za Agronomijo. (2020). Pridobljeno s <https://www.bf.uni-lj.si/sl/raziskave/raziskovalni-projekti/140/povecanje-produktivnosti-kmetijske-pridelave-z-ucinkovito-in-trajnostno-rabo-vode-propridelava>
- Provenzano, G., Rallo, G., & Ghazouani, H. (2015). Assessing field and laboratory calibration protocols for the Diviner 2000 probe in a range of soils with different textures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142, 04015040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000950](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000950)
- R Core Team (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Pridobljeno s <https://www.R-project.org/>
- Roberti, J. A., Ayres, E., Loescher, H. W., Tang, J., Starr, G., Durden, D. J., ... Zulueta, R. C. (2018). A robust calibration method for continental-scale soil water content measurements. *Vadose Zone Journal*, 17(1), UNSP 170177. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.10.0177>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), 1031–1036. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>
- Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., Mueller, L., & Wieland, R. (2010). The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 563–572. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900201>
- Starr, J. L., Paltineanu, I. C. (2002). Capacitance devices. V: Dane J.H., Topp G.C. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4 - Physical Methods*. SSSA Book Series. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Book Series
- Topp, G. C., Ferré, P. A. (2002). General information. Scope of methods and brief description. V: Dane, J. H., Topp, G. C. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 4 - Physical Methods*. SSSA Book Series. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Book Series
- van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vaz, C. M. P., Jones, S., Meding, M., & Tuller, M. (2013). Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors. *Vadose Zone Journal*, 12(2), vzj2012.0160. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160>
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1949). Methods Of Measuring Field Capacity And Permanent Wilting Percentage Of Soils. *Soil Science*, 68(1), 75–94. <https://doi.org/10.1097/00010694-194907000-00007>
- Weitz, A. M., Grauel, W. T., Keller, M., & Veldkamp, E. (1997). Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resources Research*, 33(6), 1241–1249. <https://doi.org/10.1029/96WR03956>
- Zinkernagel, J., Maestre-Valero, Jose. F., Seresti, S. Y., & Intrigliolo, D. S. (2020). New technologies and practical approaches to improve irrigation management of open field vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 242, 106404. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106404>
- Zemni, N., Bouksila, F., Persson, M., Slama, F., Berndtsson, R., & Bouhlila, R. (2019). Laboratory Calibration and Field Validation of Soil Water Content and Salinity Measurements Using the 5TE Sensor. *Sensors*, 19(23), 5272. <https://doi.org/10.3390/s19235272>
- Zotarelli, L., Dukes, M., & Morgan, K. (2010). Interpretation of Soil Moisture Content to Determine Soil Field Capacity and Avoid Over-Irrigating Sandy Soils Using Soil Moisture Sensors 1. Undefined. <https://www.semanticscholar.org/paper/Interpretation-of-Soil-Moisture-Content-to-Soil-and-Zotarelli-Dukes/4c522b8638c84516e81b3baca2250bc530ca25ca> <https://doi.org/10.3390/s19235272>
- Zhang, Y., Schaap, M. G., & Zha, Y. (2018). A High-Resolution Global Map of Soil Hydraulic Properties Produced by a Hierarchical Parameterization of a Physically Based Water Retention Model. *Water Resources Research*, 54(12), 9774–9790. <https://doi.org/10.1029/2018WR023539>