

## KOMPARATIVNA ANALIZA NAPREDNIH MODELA ZA PRECIZNO NAVODNJAVANJE KUKURUZA

Benjamin Crljenković<sup>1</sup>, Sabrija Čadro<sup>1</sup>

Originalni naučni rad – *Original scientific paper*

### Rezime

Uzimajući u obzir ograničenost vodnih resursa i njihov značaj za biljnu proizvodnju, jasno je da tačno i precizno određivanje potreba za navodnjavanjem u savremenoj poljoprivrednoj praksi postaje imperativ, naročito u kontekstu sve izraženijih klimatskih promjena i učestalijih suša.

Danas postoje brojni načini mjerenja i procjene stanja vlažnosti tla i potreba za navodnjavanjem pojedinačnih poljoprivrednih kultura, a u modernoj poljoprivrednoj nauci sve su značajniji softverski modeli koji se koriste u te namjene. Ovaj rad daje pregled nekih od značajnijih softverskih modela koji se koriste za određivanje potreba za navodnjavanjem. Četiri različita modela (CROPWAT, EXCEL-IRR, AquaCrop i SIMDualKc) su konfigurisana kako bi korespondirali sa stanjem usjeva kukuruza uzgajanog tokom 2021. godine u Butmiru, kod Sarajeva.

Pomenute konfiguracije uključivale su definiranje meteoroloških, pedoloških i agronomskih ili bioloških parametara na terenu i korištenje softverskih modela za procjenu potreba za navodnjavanjem pri čemu su rezultati modeliranja predstavljeni kroz evapotranspiraciju kulture, dinamiku pražnjenja rezerve vode iz tla i potrebe za navodnjavanjem.

Evaluacija rezultata generisanih podataka dokazuje odgovarajuću tačnost i primjenjivost svih modela. Ipak, svaki od četiri korištena modela, ima određene prednosti i nedostatke, a praktična primjena zavisi od vrste korisnika i raspoloživih podataka. Modeli kao što su CROPWAT i EXCEL-IRR imaju manje zahtjeve u pogledu ulaznih podataka i jednostavniji su za upotrebu te su stoga pogodniji za farmere, dok su kompleksniji i precizniji modeli, poput SIMDualKc i AquaCrop modela, bolje prilagođeni istraživačima.

Ključne riječi: *precizno navodnjavanje, evapotranspiracija, softverski modeli, kukuruz, potrebe za navodnjavanjem*

### UVOD

Svjetski vodni resursi su ograničeni, a poljoprivreda kao jedan od najvećih potrošača vode mora, između ostalog, i zbog osiguranja vlastite održivosti, usvojiti održive prakse u oblasti upravljanja vodnim resursima. Racionalna upotreba vode za navodnjavanje u

---

<sup>1</sup>Poljoprivredno-prehrambeni fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Zmaja od Bosne 8, 71 000 Sarajevo  
Korespondencija: benjamin.crljenkovic@ppf.unsa.ba

poljoprivredi ima brojne prednosti, u prvom redu povećanje visine i stabilnosti prinosa (Čadro, 2019; Čustović *et al.*, 2015).

Klimatske promjene i suša predstavljaju dodatno opterećenje za ionako loše razvijenu poljoprivrednu proizvodnju Bosne i Hercegovine (Čadro *et al.*, 2012; Kovačević *et al.*, 2013), koja je uveliko zavisna od vremenskih prilika (Žurovec *et al.*, 2015).

Suše na prostoru Bosne i Hercegovine (BiH) su sve češća pojava (Čadro *et al.*, 2018, 2019, 2020; Čustović *et al.*, 2015; Milić *et al.*, 2019; Oprašić *et al.*, 2016; Ostić *et al.*, 2017; Stričević *et al.*, 2017), a sistemi za navodnjavanje u takvim okolnostima predstavljaju najjednostavniji način da se poveća prinos i njegova stabilnost (Čadro *et al.*, 2016, 2017; Žurovec i Čadro, 2010). Zbog svega navedenog, zaista je zabrinjavajuća činjenica da se tek manje od 2% bosanskohercegovačkih oraničnih površina navodnjava (Bajramović *et al.*, 2014). Hadžić i Imamović (2020) navode da se tek oko 0,65% poljoprivrednog zemljišta u BiH navodnjava. Rijetki poljoprivredni proizvođači na prostoru BiH posjeduju dozvolu za korištenje vode za potrebe navodnjavanja, pa ne postoje registri na koje bi se istraživači mogli pozvati. Zbog nestabilnih ekonomskih prilika proizvođači često stihijski biraju kulturu za uzgoj, a kako nisu sva tehnička rješenja sistema za navodnjavanje podesna za sve kulture rijetko se odlučuju za ove skupe investicije. U novije vrijeme značajnija pojava upotrebe plastenika za potrebe proizvodnje povrća inicirala je malo ozbiljnije razmišljanje o sistemima za navodnjavanje, ali se i tu uglavnom radi o malim površinama i ekstenzivnim sistemima. Slična je situacija i sa proizvodnjom jagodastog voća, kao što je malina.

Dva su osnovna načina određivanja statusa vlažnosti tla, i to onaj baziran na direktnim mjerenjima i baziran na modeliranju sistema tlo-biljka-atmosfera (Annandale *et al.*, 2011). Mjerenje sadržaja vlage u zemljištu može se obavljati na razne načine, bilo da se radi o tenziometrijskom, elektrometrijskom, gravimetrijskom ili nekom drugom metodu. Veliki nedostatak je potreba za konstantnim praćenjem mjernih instrumenata. Drugi način se bavi biofizičkim modeliranjem i procjenom sistema tlo-biljka-atmosfera i kompleksnim termodinamičkim i energetskim odnosima u njemu.

Uprkos brojnim prednostima, ali zbog visoke cijene, individualnog pristupa, potrebe za većim znanjem i kompleksnosti mjerenja biljnih pokazatelja potreba za navodnjavanjem, u svjetskoj poljoprivredi i dalje najznačajniju ulogu imaju druge metode. Prvenstveno se potrebe za navodnjavanjem utvrđuju na osnovu evapotranspiracije usjeva. Ovaj pristup proizilazi iz fundamentalne definicije i cilja navodnjavanja. Naime, ako je cilj navodnjavanja poljoprivrednih kultura vratiti im gubitke vode iz tla, a poznato je da se najveći dio vode iz tla gubi upravo evapotranspiracijom, sasvim je logično postupati tako.

Utvrđivanje potrebe biljaka za vodom i navodnjavanjem neminovno je vezano za hidrološki ciklus kruženja vode u prirodi. Najznačajniji faktori u vodnom bilansu tla su padavine te evaporacija i transpiracija, odnosno evapotranspiracija. Nauka nudi brojne pristupe mjerenju, procjeni ili proračunu evapotranspiracije kulture i potreba biljaka za vodom, a u skladu s time i potreba za navodnjavanjem (Abtew i Melesse, 2013; Allen *et al.*, 1998; Čadro *et al.*, 2017). Savremeni pristupi se uglavnom baziraju na

bilansiranju sadržaja vode u tlu, a u tu svrhu danas postoji veliki broj softverskih alata, aplikacija i modela koji mogu imati znatno širu upotrebu, nego samo za navedeno.

Danas postoji mnoštvo ekoloških modela, a svi imaju svoje vlastite koristi i prednosti. Prije nego se neki model upotrijebi potrebno je provesti kritičku evaluaciju najprikladnijeg modela za potrebe datog slučaja, baziranu na njegovom obimu i namjenama (Bennett *et al.*, 2013; Vanuytrecht *et al.*, 2014).

Dodatni naponi u povećanju efikasnosti sistema navodnjavanja usmjeravaju poljoprivrednu nauku u upotrebu daljinskog osmatranja i satelitskih tehnologija. Upotreba pomenutih tehnologija omogućuje monitoring velikih površina. Indeksi vegetacije izvedeni iz optičkih podataka ili satelitskih snimaka su pogodan alat za praćenje stanja usjeva, uključujući i vodni stres (Gontia i Tiwari, 2008; Er-Raki *et al.*, 2010). Time je moguće pratiti potrebu usjeva za vodom. Konkretno, satelitski snimci mogu se kombinovati sa FAO-56 pristupom čime se ostvaruje još bolja mogućnost praćenja potreba biljaka za vodom (Er-Raki *et al.*, 2007). Isti pristup se može koristiti na poljskoj razini, ali i na regionalnom planu, za šire osmatranje stanja na terenu. Štaviše, Belaqziz *et al.* (2013) su na osnovu satelitskih snimaka razvili indeks prioriteta pri navodnjavanju za koji su utvrdili korelaciju sa ostvarenim prinosima pšenice u marokanskoj žitnici ukupne površine oko 2800 ha, u blizini Marrakecha. Čadro (2019) je po prvi put na prostoru BiH koristio bespilotnu letjelicu (dron) za potrebe fotogrametrijskog istraživanja u poljoprivredi te je utvrdio mogućnost precizne procjene prinosa i potreba za navodnjavanjem na taj način.

U ovome radu prezentovani su softverski modeli koji se bave kompleksnim međudnosima klime, tla i biljke, a sve u kontekstu poljoprivredne proizvodnje i jedne od najznačajnijih poljoprivrednih kultura u svijetu.

## MATERIJAL I METOD RADA

U radu su korištena četiri softverska modela i alata za određivanje potreba za navodnjavanjem, i to: CROPWAT (Smith, 1992), EXCEL-IRR (Todorović, 2006), AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009) i SIMDualKc (Rosa *et al.*, 2012). Rezultati modeliranja, odnosno produkti upotrebe modela su predstavljani kroz evapotranspiraciju, dinamiku pražnjenja rezerve vode iz tla ili stanje vlažnosti tla tokom vegetacije i potrebe za navodnjavanjem, sa terminima navodnjavanja.

Za podešavanje modela tokom vegetacije kukuruza, tačnije od početka maja do kraja septembra, 2021. godine prikupljeni su i zabilježeni podaci o meteorološkim i pedološkim karakteristikama prostora, kao i određeni agronomski/biološki faktori usjeva.

Tokom trajanja oglada vršeno je *in-situ* mjerenje minimalne i maksimalne dnevne temperature, srednje dnevne relativne vlažnosti zraka i dnevne sume padavina. Izvedena je srednja dnevna temperatura prema Allen *et al.* (1998), sunčevo zračenje prispjelo na površinu Zemlje izračunato je korištenjem Hargreaves i Samani (1985) formule, gdje je korišten koeficijent za korekciju sunčevog zračenja ( $kR_s$ ) od 0,14 kako sugerišu Čadro *et al.* (2019), a ukupno sunčevo zračenje na površini usjeva ( $R_a$ ) je računato

u skladu sa FAO-56 metodom Allen *et al.* (1998). Srednja brzina vjetra je uzeta kao dnevni prosjek za lokaciju istraživanja.

Prije početka vegetacije na ogleđnoj parceli je otvoren pedološki profil tla, isti je premjeren i uzeti su uzorci tla u neporemećenom i poremećenom stanju za utvrđivanje njegovih fizičkih osobina.

Teksturni/mehanički sastav tla utvrđen je hidrometrijskom metodom. Frakcija tla promjera  $< 2$  mm vršena je rastvorom 40g natrijum heksametafosfata i 10g natrijum karbonata. Klasifikacija čestica tla rađena je po međunarodnoj podjeli koju je predložila Međunarodna unija za nauku o tlu (IUSS). Određivanje tipa tla rađeno je uz pomoć kalkulatora hidrauličkih svojstava tla (Saxton i Rawls, 2006, 2009). Sadržaj humusa je određen kolorimetrijskom metodom - mokrim spaljivanjem organske materije korištenjem sumporne kiseline i kalij dihidromata (Hanić *et al.*, 2009).

Korištenjem uređaja sa kutijamapijeska/kaolinitne gline proizvođača *Eijkelkamp Agrisearch Equipment* utvrđen je poljski vodni kapacitet ( $FC_{\%}$ ) i maksimalni vodni kapacitet ( $SAT_{\%}$ ) tla na uzorcima u neporemećenom stanju. Za potrebe određivanja vlažnosti trajnog venuća prvo je određena higroskopska vlaga tla metodom sušenja na  $105^{\circ}C$  u trajanju od 4-5 sati, i naknadnom usporedbom mase uzorka prije i poslije sušenja. Vlažnost trajnog venuća ( $WP_{\%}$ ) dobivena je tako što je vrijednost higroskopske vlage pomnožena sa koeficijentom 2 (Čustović i Tvica, 2003).

Saturisani tok procijenjen je na osnovu teksturnog sastava tla, korištenjem kalkulatora hidrauličkih svojstava (Saxton i Rawls, 2006, 2009). Ukupno pristupačna voda biljci ( $TAW_{\%}$ ) izračunata je kao razlika između  $FC_{\%}$  i  $WP_{\%}$ .

Za potrebe ogleđa je posijan hibrid kukuruz BL-43, a prikupljani su podaci o datumima sjetve, žetve te o početku i kraju svih pojedinačnih fenofaza razvoja. Pokrovnost tla usjevom mjerena je na sedmičnom nivou tako što je na tri lokacije unutar parcele fotografisan njen reprezentativan dio korištenjem okvira dimenzija  $143 \times 70$  cm. Fotografije su naknadno obrađene korištenjem *ImageJ* programa kako bi se utvrdila površina pod biljnim pokrovom u odnosu na ukupnu površinu parcele. Visina biljaka je, također, mjerena na sedmičnom nivou.

Koncem vegetacije utvrđena je gustina sklopa, a podaci o dubini korijena, bazalnom koeficijentu kulture i koeficijentu reakcije prinosa preuzeti su iz literaturnih izvora (Steduto *et al.*, 2012), prilagođeni lokalnim uslovima tla.

## REZULTATI I DISKUSIJA

Meteorološka stanica postavljena je na visinu od 2 m iznad površine tla, neposredno uz ogleđnu parcelu, a njome su tokom cijele vegetacije praćeni relevantni meteorološki parametri. Klima na lokaciji istraživanja se može okarakterizirati kao umjereno topla i humidna, kontinentalna klima (Drešković i Mirić, 2013; Gekić *et al.*, 2022).

Srednje temperature zraka u toku čitave vegetacije bile su više u odnosu na srednje vrijednosti temperature zraka za isti period u dugogodišnjem prosjeku za (1961-2020. godina). Tako je razlika u srednjoj mjesečnoj temperaturi zraka za maj iznosila  $1,78^{\circ}C$ , za juni  $2,84^{\circ}C$ , juli čak  $3,86^{\circ}C$ , za august  $2,18^{\circ}C$ , a za septembar  $1,59^{\circ}C$ . Suma

padavina za čitav period vegetacije iznosila je 188,6 mm, dok višegodišnji prosjek (1961-2020. godina) za isti period iznosi čak 403,0 mm (Tabela 1). Dakle, radi se o iznimno toploj i suhoj godini u kojoj je, pored povišenih temperatura, poljoprivrednu proizvodnju tlačilo i značajno smanjenje sume padavina tokom vegetacione sezone.

Tabela 1. Srednje mjesečne temperature i mjesečne sume padavina, Butmir  
*Table 1. Average monthly temperature and total monthly precipitation, Butmir*

Mjesec	V	VI	VII	VIII	IX	Suma
Srednja mjesečna temperatura zraka 2021. godina [°C]	16,23	20,64	23,91	21,68	16,88	
Srednja mjesečna temperatura zraka 1961-2020. godina [°C]*	14,45	17,80	19,60	19,50	15,30	
Razlika [°C]	+1,78	+2,84	+3,86	+2,18	+1,59	
Mjesečna suma padavina 2021. godina [mm]	25,00	21,00	62,00	45,00	36,00	188,60
Mjesečna suma padavina 1961-2020. godina [mm]*	85,00	91,00	78,00	68,00	81,00	403,00
Razlika [mm]	-56,00	-70,00	-16,00	-23,00	-45,00	-214,40

\*Podaci preuzeti od Federalnog hidrometeorološkog zavoda BiH (FHMZ BiH, 2020)

Tlo na oglednoj parceli je okarakterizirano kao aluvijalno, sa tri definisana horizonta od kojih je prvi izrazito antropogeniziran. Pregled relevantnih fizičkih osobina tla dat je u Tabeli 2. Prema teksturnoj klasifikaciji tla (USDA, 1951), radi se o glinovitoj ilovači u sva tri horizonta, sa približno jednakom zastupljenošću svih frakcija tla. U uzorcima nije bilo skeleta. Utvrđena je maksimalna dubina prodora korijena do 120 cm, zbog velike zbijenosti dubljih slojeva tla. Ukupno pristupačna voda (TAW) izračunata je kao razlika između poljskog vodnog kapaciteta (FC) i vlažnosti trajnog venuća (WP). Za konverziju volumnih procenata u ukupnu visinu vodenog taloga korišten je koeficijent 10.

Tabela 2. Fizičke osobine tla, Butmir  
*Table 2. Physical soil characteristics, Butmir*

Horizont	I	II	III	
Dubina [cm]	0-20	20-55	55-90	
Mehanički sastav	Pijesak [%]	37,8	37,4	38,8
	Prah [%]	31,9	32,4	32,2
	Glina [%]	30,3	30,2	29,0
Teksturna klasa	Glinovita ilovača	Glinovita ilovača	Glinovita ilovača	
Sadržaj humusa [%]	2,65	2,13	2,16	
SAT [%]	46,4	48,3	45,7	
FC [%]	36,7	38,4	31,2	
WP [%]	20,5	23,5	16,5	
TAW [%]	16,2	14,9	14,7	
K <sub>SAT</sub> [mm/dan]	154,4	140,2	158,1	

Sjetva kukuruza je obavljena 7. maja, a berba 30. septembra 2021. godine, što znači da je vegetacija trajala ukupno 147 dana. Sjetva je obavljena na međuredni razmak od 70 cm, a razmak u redu iznosio je prosječno 25,7 cm, čime je ostvaren sklop od 55.580 biljaka po hektaru. Datumi početka i trajanje pojedinačnih faza razvoja usjeva po FAO-56 metodologiji (Allen *et al.*, 1998), navedeni su u Tabeli 3.

Tabela 3. Faze razvoja, visina biljke i dubina korijena kukuruza

Table 3. Development stages, plant height and root depth of maize

Faza razvoja	Datum početka	Ukupno trajanje [dan]	Visina biljke [cm]	Dubina korijena [cm]
Inicijalna faza	07.05.2021.	30	5	20
Intenzivni rast	06.06.2021.	40	20	20
Sredina sezone	17.07.2021.	40	160	120
Početak sušenja cime	25.08.2021.	37	200	120
Puna zrelost	01.10.2021.	-	200	120

Pokrovnost tla ( $f_c$ ) mjerena je na sedmičnom nivou, do potpunog zatvaranja redova, od kada do kraja vegetacije zadržava konstantnu vrijednost, dok su vrijednosti koeficijenta kulture ( $K_C$ ), bazalnih koeficijenta kulture ( $K_{CB}$ ) za kukuruz, preuzeti iz literature (Steduto *et al.*, 2012).

Zbog izjednačavanja uslova za sve korištene softverske modele, pretpostavljeno je da su sve agrotehničke mjere optimalno provedene. Prema tome, u usjevu nije bilo korova, koncentracija hraniva ili zaslanjenost nisu predstavljali limitirajuće faktore. Površina nije malčirana, niti su provedene mjere zaštite od erozije tla ili površinskog oticaja, budući da parcela nije inklinirana.

Na parceli je instaliran sistem za navodnjavanje kapanjem, a trake za navodnjavanje kap po kap (laterali) postavljene su uz svaki red kukuruza. Izmjereni protok na kapaljkama iznosio je 1 l/h, a iste su bile postavljene na 10 cm međusobnog razmaka, po dužini laterala. Definirana je fiksna norma navodnjavanja od 30 mm, te je dužina trajanja navodnjavanja podešena u skladu s tim. Svi modeli su podešeni tako da planiraju navodnjavanje onda kada je iscrpljeno 80% kritičnih rezervi vode u tlu (RAW), a definisana je fiksna norma navodnjavanja od 30 mm.

Svi korišteni modeli koriste temperaturnu Penman-Monteith formulu (PM-T) prema Allen *et al.* (1998), a svaki od korištenih softverskih modela podešen je koristeći iste ulazne parametre i to ranije definirane meteorološke i pedološke karakteristike prostora te agronomske ili biološke osobine usjeva. Ipak, postoje određene razlike u pogledu ulaznih podataka.

Naime, CROPWAT koristi veoma mali broj ulaznih informacija, naročito onih koje se odnose na osobine tla. Pošto model ne nudi mogućnost definiranja različitih horizonata, podaci o kapacitetu tla za vodu su morali biti preračunati na ukupnu dubinu profila.

EXCEL-IRR je alat zasnovan na MS excel tabelama i zahvaljujući tome je veoma transparentan za korisnika, jedina preinaka inputa koja je rađena prilikom upotrebe EXCEL-IRR alata jeste predstavljanje donjeg praga tolerantne vlažnosti, odnosno

momenta početka navodnjavanja, umjesto u iscrpljenosti lako pristupačne rezerve (RAW), kao iscrpljenosti ukupno dostupne rezerve vode u tlu (TAW).

AquaCrop je znatno sofisticiraniji model u odnosu na prva dva, a u velikoj mjeri se oslanja na konzervativne parametre koje su utvrdili (Steduto *et al.*, 2012). Zbog toga nije bilo moguće direktno unositi koeficijente kulture niti podatke o pokrovnosti tla usjevom.

Najznačajnija razlika SIMDualKc modela u odnosu na ostale jeste činjenica da implementira dvostruki koeficijent kulture za izračun evapotranspiracije kulture, prema tome korišteni su bazalni koeficijenti kulture navedeni u Tabeli 4.

Tabela 4. Vrijednosti koeficijenta kulture ( $K_C$ ), bazalnog koeficijent kulture ( $K_{CB}$ ) i kritične iscrpljenosti vode u tlu kao frakcija lako pristupačne vode ( $p$ )

*Table 4. Values of crop coefficient ( $K_C$ ), basal crop coefficient ( $K_{CB}$ ) and critical soil water depletion as fraction of readily accessible water ( $p$ )*

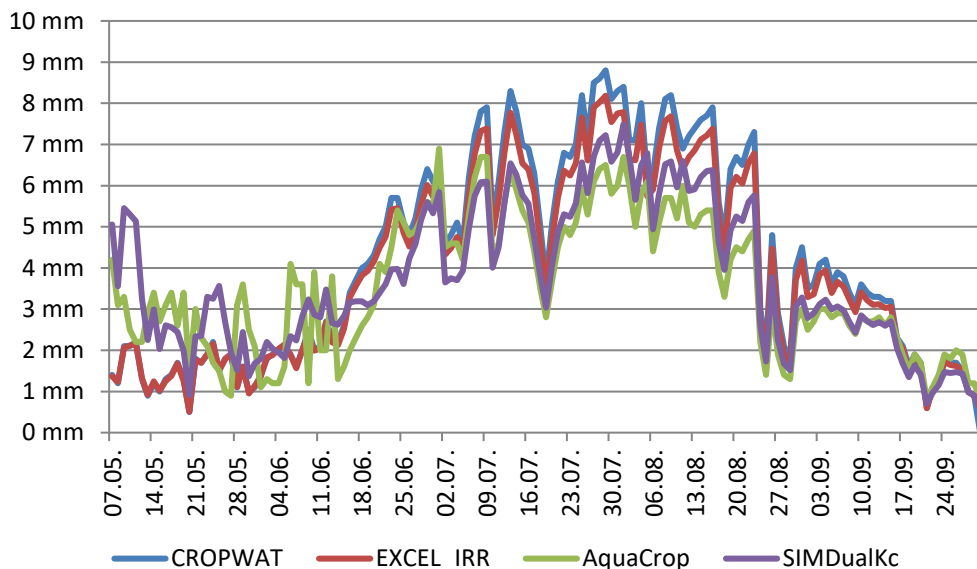
Faza razvoja	Datum početka	$K_C$	$K_{CB}$	$p$
Inicijalna faza	07.05.2021.	0,40	0,15	0,55
Intenzivni rast	06.06.2021.	1,20	1,15	0,55
Sredina sezone	17.07.2021.	1,20	1,15	0,55
Kraj sezone	25.08.2021.	0,35	0,50	0,55
Puna zrelost	01.10.2021.	-	-	-

Prilikom simulacije u svim slučajevima su pretpostavljeni optimalni agrotehnički uslovi, bez zakorovljenosti, bez površinskog malča i bez površinskog oticaja, sa optimalnom opskrbljenošću hranivima. Uticaj podzemne vode je zanemaren, a pretpostavljeno je da su rezerve vode u tlu na početku vegetacije bile popunjene do poljskog vodnog kapaciteta.

Iako svi korišteni modeli koriste isti pristup, odnosno temperaturnu Penman Monteith formulu za izračunavanje referentne evapotranspiracije ( $ET_0$ ), ipak, uočeno je određeno variranje evapotranspiracije kulture (Grafikon 1), koje se može pripisati različitim načinima procjene koeficijenta kulture ili evaporacije sa površine tla.

Posmatrajući krive evapotranspiracije, uočavaju se značajna variranja izračunate evapotranspiracije kulture kod različitih modela u početku vegetacije, da bi oni kasnije pokazivali iste trendove i slične vrijednosti. Uzrok tome može biti manja pokrivenost tla biljnim pokrovom, i veći udio evaporacije sa površine tla, za šta postoje različiti načini proračuna u korištenim modelima. Na Grafikonu 1 uočljivo je odstupanje evapotranspiracije kulture koji je u početku vegetacije procijenjeno korištenjem modela AquaCrop i SIMDualKc.

Generalno, prvi dio vegetacije, sve do polovine jula, obilježen je postepenim rastom nadzemne mase usjeva po svim modelima. Ako se ima u vidu različita mogućnost unosa kardinalnih tačaka visine i pokrovnosti tla usjevom po fazama razvoja u modelima, jasno je da će se simulirana nadzemna masa, pa stoga i transpiracija razlikovati među modelima.



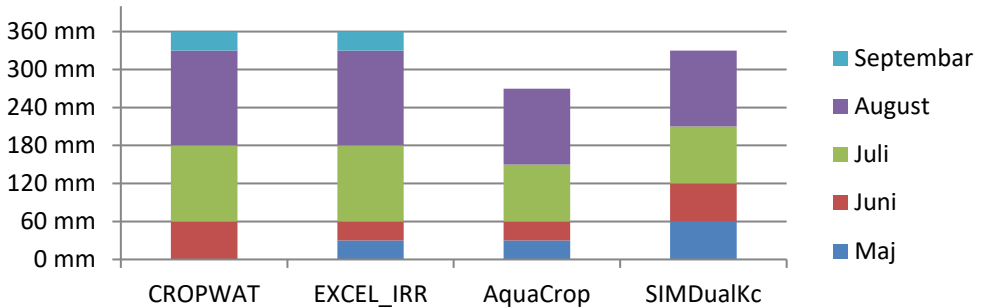
Grafikon 1. Dnevne vrijednosti evapotranspiracije kulture dobijene upotrebom različitih softverskih modela  
*Graph 1. Daily values of crop evapotranspiration calculated using different software models*

Veoma slična je i situacija sa razvojem korijena. Budući da su modeli podešeni tako da navodnjavanje počne u momentu kada je istrošenost rezervi vode u aktivnoj zoni korijena na određenoj granici, jasno je da će veliku ulogu u određivanju momenta početka navodnjavanja igrati i volumen ili dubina aktivne zone korijena. Upravo se dubina razvoja korijena razlikuje između modela, a time ukupna i lako pristupačna voda. Razlog za ove razlike u dubini korijena leži u činjenici da nemaju svi modeli jednake mogućnosti unosa dubine korijena. Primjera radi, CROPWAT traži unos dubine korijena u inicijalnoj fazi razvoja i u punom razvoju, zbog toga će model predvidjeti linearan rast dubine korijena od samog početka pa do polovine vegetacije. S druge strane, SIMDualKc ima mogućnost unosa većeg broja dubina korijena u različitim fazama razvoja. Ovakav pristup povećava mogućnost finog podešavanja modela od strane korisnika koji posjeduje tražene podatke i rezultati će u tom slučaju, bez sumnje, biti znatno tačniji.

Zbog pomenutih razlika ili ograničenja pojedinačnih modela i alata dolazi do određenih razilaženja u pogledu rasporeda potreba za navodnjavanjem, naročito u početnim fazama vegetacije, odnosno do punog razvoja nadzemne mase.

Nakon simuliranja vodnog bilansa tla sa svakim od korištenih softverskih modela i alata dobijeni su momenti navodnjavanja za svaku od simulacija, u skladu sa postavljenim donjim pragovima vlažnosti u rizosfernom sloju tla. Ukupne potrebe za navodnjavanjem kukuruza u Butmiru za cijeli period vegetacije 2021. godine, izračunate koristeći

CROPWAT i EXCEL-IRR iznose po 360 mm, potrebe modelirane SIMDualKc modelom iznose 330 mm, dok je AquaCrop simulacija pokazala potrebe za 270 mm navodnjavanja. Potrebe za navodnjavanjem u svim simulacijama imaju dobru raspodjelu po mjesecima (Grafikon 2).



Grafikon 2. Raspored potreba za navodnjavanjem po mjesecima trajanja vegetacije  
*Graph 2. Distribution of irrigation requirements through the vegetation months*

Uprkos određenom odstupanju u utvrđenoj količini vode potrebnoj za navodnjavanje i razlikama u početku i na kraju vegetacije, svi modeli i alati su utvrdili najveće potrebe za navodnjavanjem u toku najvećeg stepena razvoja usjeva i najviših temperatura. Tako su svi modeli predvidjeli najveću potrebu za navodnjavanjem u mjesecu augustu, a zatim tokom jula mjeseca.

Osnovna zadaća svakog plana navodnjavanja jeste smanjenje vodnog stresa u poljoprivrednom usjevu, što su svi korišteni modeli postigli. Količina vode u tlu (iscrpljenost) se u svim simulacijama zadržavala ispod granice lako pristupačne vlage (RAW), zbog čega biljke nisu dolazile u stanje vodnog stresa. Dodatna racionalizacija sistema bi se mogla postići povećanjem obroka navodnjavanja, smanjujući time broj potrebnih navodnjavanja i utrošak ljudskog rada. Još jedan način za racionalniju upotrebu bi bilo korištenje pouzdanih vremenskih prognoza, kako bi se izbjeglo navodnjavanje ukoliko se očekuju padavine u nekom razumnom roku.

Razlike u izračunatoj evapotranspiraciji, a time i potrebi za navodnjavanje postoje, zbog čega se i planovi navodnjavanja razlikuju u određenoj mjeri, međutim ona nije velika i lako je objašnjiva prirodom pojedinačnih modela. Također, svi su modeli testirani kroz brojne ogledе gdje su dokazali svoju pouzdanost i potencijal u savremenim i budućim problemima sa vodoopskrbom, odnosno rastućim izazovima u pogledu racionalne upotrebe vodnih resursa u poljoprivrednoj proizvodnji.

## ZAKLJUČAK

U skladu sa prezentovanim rezultatima rada može se zaključiti da različiti softverski modeli i alati korišteni u ovome istraživanju, uprkos činjenici da koriste isti metod za proračun referentne evapotranspiracije, imaju određene razlike u rezultatima proračuna evapotranspiracije kulture, i shodno tome predlažu različite termine navodnjavanja.

Međutim, pomenute razlike nisu velike i uzrokovane su prevashodno različitim stepenom mogućnosti finog podešavanja ulaznih parametara prilikom podešavanja pojedinačnih modela.

Također, različiti softverski alati imaju različite zahtjeve u pogledu ulaznih parametara, što može predstavljati problem korisnicima, naročito u nedostatku meteoroloških i drugih mjernih stanica. Zbog toga, a budući da se upotrebom svih modela postižu zadovoljavajući rezultati, preporuka je farmerima, neprofesionalcima i neiskusnim korisnicima da koriste jednostavnije alate za određivanje potreba za navodnjavanjem, kakvi su EXCEL-IRR ili CROPWAT. Zahtjevniji modeli poput AquaCrop ili SIMDualKc modela će biti od veće koristi profesionalcima, savjetodavcima, istraživačima ili naučnim radnicima.

## ZAHVALNICA

Rezultati ovog rada su nastali u sklopu međunarodnog projekta SMARTWATER (Horizont 2020 - WIDESPREAD-05-2020 Twinning – 952396), kao i projekta Ministarstva civilnih poslova Bosne i Hercegovine „Primjena pametnih tehnologija u poljoprivrednom sektoru BiH“.

## LITERATURA

- Abtew, W., Melesse, A. (2013). Evaporation and Evapotranspiration. In *Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4737-1>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (Irrigation). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Annandale, J. G., Stirzaker, R. J., Singels, A., van der Laan, M., Laker, M. C. (2011). Irrigation scheduling research: South African experiences and future prospects. *Water SA*, 37(5), 751–764. <https://doi.org/10.4314/WSA.V37I5.12>
- Bajramović, S., Nikolić, A., Butković, J. (2014). Agriculture and Agricultural policy in Bosnia and Herzegovina. In T. Volk, E. Erjavec, K. Mortensen (Eds.), *Agricultural policy and european integration in Southeastern Europe* (pp. 73–94). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Belaqiz, S., Khabba, S., Er-Raki, S., Jarlan, L., Le Page, M., Kharrou, M. H., Adnani, M. El, Chehbouni, A. (2013). A new irrigation priority index based on remote sensing data for assessing the networks irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 119, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.011>
- Bennett, N. D., Croke, B. F. W., Guariso, G., Guillaume, J. H. A., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Marsili-Libelli, S., Newham, L. T. H., Norton, J. P., Perrin, C., Pierce, S. A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A. A., Fath, B. D., Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 40, 1–20.

- <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>
- Čadro, S. (2019). *Razvoj i promjena softverskih modela u cilju održivog upravljanja vodom i povećanja produktivnosti poljoprivrednih kultura u BiH*. Univerzitet u Sarajevu, Poljoprivredno-prehrambeni fakultet.
- Čadro, S., Berjan, S., El Bilali, H., Žurovec, O., Simić, J., Rajčević, B. (2012). Governance of adaptation to and mitigation of climate change on agricultural, forest and water resources in Bosnia. *Third International Scientific Symposium "Agrosym Jahorina 2012,"* 321–326.
- Čadro, S., Cherni-Čadro, S., Marković, M., Žurovec, J. (2019). A reference evapotranspiration map for Bosnia and Herzegovina. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(1), 89–101. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2018.11.002>
- Čadro, S., Marković, M., Kaloper, S. E., Ravlić, M., Žurovec, J. (2020). Soil Water Balance Response to Climate Change in Posavina Region. *30th Scientific-Experts Conference of Agriculture and Food Industry*, 78, 11–24. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40049-1>
- Čadro, S., Miseckaite, O., Gavrić, T., Baublys, R., Žurovec, J. (2018). Impact of climate change on the annual water balance in a humid climate. *Agriculture and Forestry*, 64(4), 129–143. <https://doi.org/10.17707/AGRICULTFOREST.64.4.15>
- Čadro, S., Uzunović, M., Cherni-Čadro, S., Žurovec, J. (2019). Changes in the water balance of Bosnia and Herzegovina as a result of climate change. *Agriculture and Forestry*, 65(3), 19–33. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.65.3.02>
- Čadro, S., Uzunović, M., Žurovec, J., Žurovec, O. (2017). Validation and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(4), 309–324. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2017.07.002>
- Čadro, S., Žurovec, J., Cherni-Čadro, S. (2017). Severity, magnitude and duration of droughts in Bosnia and Herzegovina using standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *Agriculture and Forestry*, 63(3), 199–206. <https://doi.org/10.17707/AGRICULTFOREST.63.3.20>
- Čadro, S., Žurovec, J., Mrkulić, A., Šehić, D., Šero, A., Mičić, G. (2016). Effects of climate change on agro hydrological balance for some regions in Bosnia and Herzegovina. *VII International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym 2016,"* 1863–1869.
- Čustović, H., Ljuša, M., Sitaula, B. K. (2015). *Adaptacija na klimatske promjene u sektoru poljoprivrede (vrijeme je da djelujemo odmah)*. Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta u Sarajevu.
- Čustović, H., Tvica, M. (2003). *Praktikum za pedološka istraživanja (interna skripta)*. Poljoprivredno-prehrambeni fakultet, Univerzitet u Sarajevu.
- Drešković, N., Mirić, R. (2013). Klimatski tipovi u Bosni i Hercegovini. *Zbornik Radova Trećeg Kongresa Geografa Bosne i Hercegovine*.

- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Duchemin, B. (2010). Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region. *Remote Sensing*, 2(1), 375–387. <https://doi.org/10.3390/rs2010375>
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R. (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 87(1), 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.02.004>
- FHMZ BiH. (2020). *Meteorološki godišnjaci*. <https://www.fhmzbih.gov.ba/latinalica/KLIMA/godisnjaci.php>
- Gekić, H., Bidžan-Gekić, A., Drešković, N., Mirić, R., Reményi, P. (2022). *The Geography of Bosnia and Herzegovina*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98523-3>
- Gontia, N. K., Tiwari, K. N. (2008). Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. *Agricultural Water Management* 2, 95(10), 1144–1152. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.017>
- Hadžić, E., Imamović, A. (2020). Water Resources in Bosnia and Herzegovina. *Springer Water*, 177–210. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22468-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22468-4_8)
- Hanić, E., Čivić, H., Murtić, S. (2009). *Osnovi ishrane biljaka sa praktikumom*. Univerzitet Džemal Bijedić, Agromediteranski fakultet Mostar.
- Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Kovačević, V., Kovačević, D., Pepo, P., Marković, M. (2013). Climate Change in Croatia, Serbia, Hungary and Bosnia and Herzegovina: Comparison the 2010 and 2012 Maize Growing Seasons. *Poljoprivreda*, 19(2), 16–22.
- Milić, V., Drašković, B., Berjan, S., Govedarica, B., Đurđić, I., Jugović, M., Jakišić, T., Perković, G. (2019). The impact of climate change on crop production in Bosnia and Herzegovina. *Agrotechnologies of the XXI Century - Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Devoted to the Centennial of Higher Agrarian Education in the Ural Region*, 61–71.
- Oprašić, S., Avdić, S., Selmanagić Bajrović, A., Muharemović, A., Prašović, S., Trbić, G., Husika, A., Krajinović, B., Stojanović, B., Zorić, B., Bajić, D., Vojinović, Đ., D., A.-A., Zahirović, E., Krečinić, E., Omerčić, E., Kupusović, E., Tica, G., Čustović, H., ... Federalni hidrometeorološki zavod. (2016). *Treći nacionalni izvještaj i Drugi dvogodišnji izvještaj o emisiji stakleničkih plinova Bosne i Hercegovine*.
- Ostić, G., Radanović, S., Simić, D., Supić, D., Štrbac, M. (2017). Correlation of precipitation with yield grain and variability of maize production of Republic of Srpska (Bosnia and Herzegovina). *VIII International Scientific Agriculture Symposium, "Agrosym 2017,"* 1003–1009.

- Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Alves, I., Fernando, R. M., Pereira, L. S., Allen, R. G. (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 103, 8–24. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.10.013>
- Saxton, K. E., Rawls, W. (2009). *Hydraulic Properties Calculator*. Washington State University. <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>
- 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>
- Smith, M. (1992). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management*.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Raes, D. (2012). *Crop yield response to water (Irrigation)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2008.0139S>
- Stričević, R. J., Stojaković, N., Vujadinović-Mandić, M., Todorović, M. (2017). Impact of climate change on yield, irrigation requirements and water productivity of maize cultivated under the moderate continental climate of Bosnia and Herzegovina. *Journal of Agricultural Science*, 156(5), 618–627. <https://doi.org/10.1017/S0021859617000557>
- Todorović, M. (2006). An Excel-based Tool for Real-time Irrigation Management at Field Scale. *International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture*, 1–11.
- USDA. (1951). Soil survey manual. In *Soil Survey Division Staff, Soil Conservation Service Volume Handbook 18*. United States Department of Agriculture.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2014.08.005>
- Žurovec, J., Čadro, S. (2010). Climate changes, the need and importance of crop irrigation in northeastern Bosnia and Herzegovina. *XXI Naučno-stručna konferencija poljoprivrede i prehrambene industrije*, 705–716.
- Žurovec, O., Vedeld, P. O., Sitaula, B. K. (2015). Agricultural Sector of Bosnia and Herzegovina and Climate Change—Challenges and Opportunities. *Agriculture*, 5(2), 245–266. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE5020245>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ADVANCED MODELS FOR PRECISION IRRIGATION OF MAIZE

### Summary

Taking into account water resources and their importance for human life and economic development, it is clear that accurate and precise determination of irrigation requirements in modern agricultural practice becomes imperative, especially in the context of increasingly pronounced climate changes and more frequent droughts.

Today, there are numerous ways to measure and assess the state of soil moisture and, accordingly, the need for irrigation of individual agricultural crops, in modern agricultural science, software models used for these purposes are increasingly important. This paper provides an overview of some of the more important software models used to determine irrigation needs. Four different models (CROPWAT, EXCEL-IRR, AquaCrop and SIMDualKc) are described and configured to correspond to the state of a maize crop grown during 2021, at the Experimental Field of the Faculty of Agriculture and Food Sciences, University of Sarajevo, in Butmir.

The mentioned configurations included the definition of meteorological, pedological and agronomic or biological parameters in the field and the use of software models to estimate irrigation requirements. The modeling results were presented through crop evapotranspiration, soil water depletion dynamics and crop irrigation requirements.

Evaluation of the results of the generated data proves the appropriate accuracy and applicability of all models. However, each of the four used models has certain advantages and disadvantages, and practical application depends on the type of user and available data. Farmers will prefer to use simpler models such as CROPWAT and EXCEL-IRR, while researchers will prefer more complex and accurate models such as SIMDualKc and AquaCrop.

*Key words: precision irrigation, evapotranspiration, software models, maize, irrigation needs*