

# Szigetközi termőhelyek talajnedvesség-forgalmának vizsgálata

Kása Ilona <sup>1</sup>, Farkas Csilla <sup>2</sup>, Giczi Zsolt <sup>3</sup>, Koltai Gábor <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Országos Vízügyi Főigazgatóság

<sup>2</sup> Norwegian Institute of Bioeconomy Research

<sup>3</sup> Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar, Széchenyi István Egyetem

## KIVONAT

Hazánk legnagyobb természetes víztárolója a talaj, ezért nedvességforgalma kiemelt fontosságú a vízgazdálkodási problémáink megoldásában. Jelentőségére a közelmúlt szélsőséges hidrometeorológia eseményei mindinkább felhívják a figyelmet. Munkánk során szimulációs modell alkalmazásával vizsgáltuk a talaj nedvességforgalmát, valamint a különböző vízmegtartó intézkedések talajnedvességre gyakorolt hatását. A modell (SWAP) három szigetközi termőhelyre történt kalibrációját és értékelését a Szigetközi Ökológiai Monitoring Program adatainak felhasználásával végeztük el. A sikeres modelladaptációt követően becsültük, majd összehasonlítottuk a talajkímélő, vízmegtartást elősegítő technológiák (talajművelés nélküli direktvetés, illetve csökkentett talajművelés (kultivátor)) és a hagyományos (szántásos) művelés talajnedvesség forgalomra gyakorolt hatását. A modellfuttatások eredményeként megállapítható, hogy mind a direktvetés, mind a kultivátoros talajművelés elősegítheti a talajok vízkapacitásának növekedését.

**KULCSSZAVAK:** Talajnedvesség, SWAP, vízforgalom, talajművelés, vízmegtartás

## BEVEZETÉS

A talajnedvesség a globális vízháztartás látszólag jelentéktelen részét képezi, ennek ellenére irányítja a földfelszínen vagy annak közelében lejátszódó szinte valamennyi hidrológiai folyamatot (Raymond 1971). A talajnedvesség alapvető fontosságú a növények növekedése, a tápanyagkörforgás, a talaj fizikai, kémia és biológiai tulajdonságai szempontjából. Jelentőségének megértése ugyancsak kritikus a talajegészség, a mezőgazdasági termelés, az ökoszisztéma-szolgáltatások és a vízkészletek optimalizálása tekintetében (Doran 2002). A nedvességtartalom térben és időben történő nyomon követése jelentősen hozzájárulhat az árvíz- és aszály, valamint globális éghajlatváltozás előrejelzéséhez (Abelen et al. 2015).

A klímaváltozás következtében hazánkban várhatóan a vízhiányos helyzetek gyakorisága növekedni, a vízhiány intenzitása pedig fokozódni fog. Ennek megfelelően a növekvő vízigény kielégítéséhez elengedhetetlen a vízkészletek megóvása, hatékonyabb kezelése és felhasználása. A mezőgazdaság jelentős vízigénnyel bír, éppen ezért kiváló lehetőség a vízfelhasználás hatékonyságának vizsgálatára (Sharma et al. 2015). Stratégiai kiindulópont, hogy hogyan tudunk optimális mennyiségű vizet tárolni (mezőgazdasági) területeinken úgy, hogy közben minden jelentkező vízigényt megfelelően kiszolgálunk. A kérdés megválaszolása nehéz, és csakis integráltan lehetséges, hiszen mind a talaj-növény-légkör rendszert, mind a társadalmi-gazdasági szereplőket és folyamatokat bonyolult kölcsönhatások jellemzik.

Az elmúlt évtizedekben számos tanulmány jelent meg a talajkímélő és a hagyományos talajművelési rendszerek talaj- és növénytulajdonságokra, valamint a vízháztartásra gyakorolt hatásairól (Horel et al. 2015, Castellini et al. 2019). Ezek a tanulmányok olykor ellentmondásos eredményeket mutatnak be, mivel a talajművelési technológiák hatása erősen függ a vizsgált terület talajtípusától és földrajzi adottságaitól (Horel et al. 2015).

A talaj fizikai, ezáltal a hidrológiai tulajdonságait jelentősen befolyásolhatja a talajműveléshez kapcsolódó zavarás mértéke (Zimmermann et al. 2006, Wheather-Evans 2009). A fizikai talajbolygatás erősségétől függően általában az alábbi talajművelési rendszereket lehet megkülönböztetni; hagyományos talajművelési eljárások (pl. szántás, tárcsázás), csökkentett talajkímélő művelési rendszerek (low- vagy min-till) és direktvetés/művelés nélküli (no-till). (FAO 2000). Megállapítást nyert azonban, hogy a helyi viszonyoknak leginkább megfelelő talajművelési gyakorlat nagymértékben függ a talajtípustól, a csapadék mennyiségétől, az évelő gyomnövények és a fő növénykultúra típusától (Ujj 2004, Calvino et al. 1999, Sharpley et al. 1984, Locke et al. 2002). Továbbá megjegyzendő, hogy a talajszerkezet javítható a talajművelési módszerek kombinálásával, valamint a köztes kultúrák, talajtakaró növények és mulcsozás alkalmazásával (Whiteley 1982). Azonban nemcsak a gazdálkodási gyakorlatok, hanem a megfelelő a gazdálkodási események időzítése és végrehajtása is befolyásolhatja a talaj minőségét. Bár a talajművelési módszerek alkalmazása eredetileg a talajállapot növénytermesztési célból történő javítására irányult, a káros mellékhatások, mint például az altalaj tömörödése, gyakran egyes technikák helytelen alkalmazása miatt fordulnak elő (Horel et al. 2015).

A matematikai modellek képesek összetett folyamatok és kölcsönhatások leírására; szimulálják a valós rendszerben zajló folyamatokat, így ígéretes lehetőségeket jelentenek a vízgazdálkodási problémák feltárásában és megoldásában (Zeidan 2015). A napjainkban rendelkezésre álló számítási kapacitásoknak köszönhetően a modellek szerepe jelentősen megnőtt. A számítógépes modellhasználat a kutatási mellett, oktatási, szaktanácsadási és ismeretközlő eszközzé és módszerré is vált (Rajkai, 2001). A modell szimulációk segítségével a vízgazdálkodási és talajművelési forgatókönyvek értékelése viszonylag gyorsan elvégezhető, ami megkönnyíti a megfelelő ajánlások kidolgozását (Sarkkula et al. 2007).

Munkánk célja, hogy matematikai modell alkalmazásával vizsgáljuk a talaj nedvességforgalmát, valamint a különböző vízmegtartó intézkedések talajnedvességre gyakorolt hatását.

## **ANYAG ÉS MÓDSZER**

### **Mintaterület bemutatása**

A vizsgálatainkba három szigetközi mérőhelyet (két szántó és egy erdő) vontunk be. A mérőhelyek a Szigetközi Környezeti Monitoring Program részét képezik.

- *T-03 – Dunakiliti:* A mérőpont közel 4 km-es távolságra helyezkedik el a Dunától, a Zátonyi Duna-ág jobb partján. Területhasználati szempontból az érintett terület szántó művelés alatt áll. Talaja humuszos öntéstalaj, 350 cm alatt homok található.
- *T-09 – Püski:* A mérőhely a Dunától mintegy 2 km-es távolságra helyezkedik el, szántóterületen. A terület talaja humuszos öntéstalaj, melynek 145 cm mélysége alatt már homokos kavics található.
- *T-16 – Dunasziget:* A T-16-os mérőpont hullámtéri erdőben helyezkedik el. Az érintett terület talaját vastag fedőrétegű karbonátos humuszos öntéstalaj képezi. A homokos kavics 345 cm-es mélységnél jelenik meg (Koltai et al. 2019).

A 1. táblázat az egyes mérőhelyekről származó talajminták kémiai-fizikai tulajdonságait mutatja.

1. táblázat  
Az egyes mérőhelyek talajtulajdonságai

Minta-vételi hely	Talaj réteg (cm)	Szemcseösszetétel (%)			Humusz (%)	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	CaCO <sub>3</sub> (%)
		homok	iszap	agyag				
T-03	0-15	18,8	62,6	18,6	3,5	7,8	7,4	20,9
	15-50	16,0	61,0	23,0	2,2	8,2	7,5	21,7
	50-80	8,3	67,6	24,2	1,8	8,2	7,5	24,1
T-09	0-40	23,9	48,3	27,7	2,5	8,0	7,3	19,0
	40-90	22,1	46,1	31,8	2,0	8,1	7,4	22,4
T-16	0-50	13,5	71,9	14,6	2,2	8,2	7,5	23,9
	50-90	11,3	71,8	16,9	1,1	8,5	7,8	25,2

A vizsgálat időszakban - 2006-2011 - az éves átlagos csapadék mennyiség 611,9 mm, míg az átlagos középhőmérséklet 11,3 °C volt.

### A SWAP modell adaptációja a mintaterületre

A SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) egy fizikai alapú, részletes agro-hidrológiai modell (FEDDES ET AL. 1978), amely alkalmas a víz-, tápanyag-, és hőforgalom szimulálására a telített és a telítetlen talajzónában. A modell bemenő adatai között szerepelnek a meteorológiai, növénytermesztési és talajadatok, valamint kezdeti és peremfeltételek.

A talajszelvényben történő vízáramlását a Richards-egyenlet segítségével számítja a modell. A talajhidrológiai függvényeket a van Genuchten és Mualem (VGM) analitikus összefüggések paramétereivel kell megadni (van Genuchten 1980). A talajhidrológiai függvények kezdeti paramétereit a RETention Curve (RETC, van Genuchten et al. 1991) programmal számítottuk a mért víztartóképeség- és vízvezető képesség értékek alapján. A növényi növekedést és vízfelvételt a modell egyszerűsített növényi alprogramjával szimuláltuk (2. táblázat).

2. táblázat  
Az egyes mérőhelyeken termesztett növények a modellezési időszak éveire vonatkozóan

Monitoring pont	Év	Termesztett növény
T-03	2006	Tavaszi árpa
	2007	Silókukorica
	2008	Kukorica
	2009	Tavaszi árpa
	2010	Kukorica
	2011	Őszi káposztarepce
T-09	2006	Napraforgó
	2007	Őszi búza
	2008	Őszi búza
	2009	Őszi káposztarepce
	2010	Őszi búza
	2011	Őszi búza

\*A T-16 mérőhely ártéri erdőben található

A modellezéshez a mosonmagyaróvári automata mérőállomás napi felbontású adatait használtuk. A mért léghőmérséklet-, szélesség-, besugárzás-, légpáratartalom- és csapadékadatok az OMSZ Meteorológia Adattárból származnak. A kezdeti feltételeket a 2006 márciusban mért talajnedvességtartalom-értékek szerint állítottuk be. A felső peremfeltételt a modell számítja a bemenő meteorológiai adatok alapján, alsó peremfeltételként szabad mélybeszivárgást állítottunk be.

A SWAP modell kalibrálásához felhasznált talajnedvesség adatok BR-150 (SMM-001) típusú, kapacitív elven működő mélyszondás műszerrel, 10 cm-es mélységenként mért, térfogatszázalékban (a továbbiakban: tf%) kifejezett értékek. A szondák pontossága +/- 3 tf%. A megfigyelési időszakban kb. havi két mérési adat állt rendelkezésre a vegetációs perióduson belül. A modellt a 10, 30, 50, 70 cm mélyen mért talajnedvesség-tartalom adatokhoz illesztettük a modellparaméterek változtatásával. Az illeszkedést ezután több modellhatékonysági mutató segítségével jellemeztük ( $R^2$ , RMSE, NSE, d) mind a kalibráció, mind a validáció esetében. Az 3. táblázat foglalja össze az egyes mérőhelyekre vonatkozó kalibrációs és validációs időszakokat.

3. táblázat  
Kalibrációs és validációs időszakok

Mérőhely	Kalibráció		Validáció	
	Kezdet	Vége	Kezdet	Vége
T-03	2006.03.28	2009.03.26	2009.03.27	2011.09.26
T-09	2006.03.28	2009.03.25	2009.03.26	2011.09.27
T-16	2006.03.27	2009.03.25	2009.03.26	2011.11.06

#### A modellek teljesítményének statisztikai értékelése

A modellek teljesítményét többféleképpen értékeltem: a determinációs együtthatóval ( $R^2$ ), a Nash-Sutcliffe tényezővel (NSE) (Nash-Sutcliffe 1970), az átlagos négyzetes hiba négyzetgyökével (RMSE), valamint a d (index of agreement) értékkel.

Az  $R^2$  megmutatja, hogy a mért idősor változását milyen mértékben magyarázza a számított idősor. Hidrológia modelleknél általában 0.5 feletti  $R^2$  érték kielégítőnek tekinthető (Van Liew et al. 2003). Habár az  $R^2$  használata elterjedt a modellek teljesítményének értékelésére, meg kell jegyezni, hogy érzékeny a kiugró értékekre (Legates-McCabe 1999).

A hidrológia modellezésben a Nash-Sutcliffe tényező (NSE) az egyik leggyakoribb mutató az illeszkedés jóságának számszerűsítésére (1. egyenlet):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(t_i) - Q_s(t_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(t_i) - Q_o,a)^2} \quad (1)$$

, ahol  $Q_o(t_i)$  és  $Q_s(t_i)$  a mért és modell által számított vízhozamok  $t_i$  idő pillanatokban,  $Q_o$ , a mért vízhozam értékek számtani közepe. A Nash-Sutcliffe tényező értéke  $-\infty$  és 1.0 között változhat, nullánál nagyobb érték azt jelzi, hogy a modell jobban írja le a valóságot, mint a mérések várható értéke. Harmel et al. (2018) szerint a hidrológia és vízminőségi modellek illeszkedése kielégítő, ha az NSE értéke 0,5-nél nagyobb, míg a leírt jelenségtől függően 0,66, ill. 0,75 fölött kiválóan tekinthető.

Az RMSE az átlagos négyzetes hiba (MSE) négyzetgyöke, az előre jelzett értékek és a megfigyelt értékek közötti különbségek négyzetes átlagát jelenti (2. egyenlet).

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (2)$$

, ahol  $O_i$  a megfigyelt, a  $P_i$  a szimulált értékek. Az RMSD mindig nem negatív, a 0 érték (amelyet a gyakorlatban szinte soha nem ér el) az adatokhoz való tökéletes illeszkedést jelenti.

A  $d$  érték (3. egyenlet) a megfigyelt és a szimulált átlagok és szórások különbségeit mutatja, értéke  $-\infty$  és  $1,0$  között változhat. Széles körben használják, így átfogó információ áll rendelkezésre a szakirodalomban szereplő értékekről. Általában elfogadható az eredmény, ha értéke  $0,75$  felett van, havi léptékben (Moriasi et al. 2015).

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

, ahol  $O_i$  a megfigyelt, a  $P_i$  a szimulált értékek.

### Vízmegetartó intézkedések hatásának becslése

A SWAP térbeli korlátai meghatározzák, hogy mely vízmegetartó intézkedések hatását lehet megfelelően modellezni. A SWAP-ban a földhasználat váltás, talajművelési gyakorlatok, továbbá a vetésforgó és köztes növények hatásának vizsgálata megfelelő parametrizációval elvégezhető (Marval et al. 2022). Az intézkedésnek hatásának vizsgálatához a referencia állapottól függően kell beállítani/módosítani a talaj-, növény- vagy vízelvezetési paramétereket vagy azok kombinációit. Vizsgálatunkban három (referencia állapot + két forgatókönyv) talajművelési mód talajnedvesség forgalomra gyakorolt hatását becsüljük a T-03 és T-09 mintaterület vonatkozásban.

0. Referencia állapot: alpművelés szántással (SZ), 25-30 cm
1. Művelés nélküli direktvetés (DV)
2. Kultivátoros művelés (K), 16-20 cm

A beállításhoz az OPTAIN (optain.eu) projekt keretében kidolgozott ajánlásokat követtük (SWAT+ and SWAP retention measure implementation handbook, Mraval et al. 2022). A projekt keretében több tanulmány és szakirodalmi áttekintés is készült a talajművelés talajtulajdonságokra tett hatására vonatkozóan. Az OPTAIN kézikönyv tartalmazza az egyes talajművelési gyakorlatok szimulálásához szükséges paraméter beállításokat több földrajzi régióra, talajtípusra és talajrétegre vonatkozóan. Vizsgálatunkban az ajánlott paraméter beállítások közül, a józsefmajori (Hatvan) kísérlet talajművelési rendszereiben mért talajhidrológiai függvényekre illesztett VGM függvények paraméter beállításait (Farkas et al. 2008) vettük alapul, figyelembe véve a vizsgált mintaterület talajtulajdonságait és klimatikus viszonyait. A 4. táblázat VGM paraméterek módosítását mutatja a referenciaállapothoz képest, mindkét mintaterületre vonatkozóan.

#### 4. táblázat

A direktvetés (DV) és a kultivátoros művelés (K) VGM paraméter beállításai a T-03 és T-09 mintaterületeken (Farkas et al. 2008 nyomán)

Paraméter	Talajréteg (cm)	SZ → DV %*	SZ → K %*
$\theta_{sat}$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0-30	-15	-6
	30-70	25	19
$\theta_{res}$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0-30	25	6
	30-70	18	6
$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	0-30	-90	41
	30-70	40	234
n (-)	0-30	6	1
	30-70	2	-2

Paraméter	Talajréteg (cm)	SZ → DV %*	SZ → K %*
Térfogat s. (mg cm <sup>-3</sup> )	0-30	26	1
	30-70	-3	-6
KSATFIT (cm d <sup>-1</sup> )	0-30	-45	13
	30-70	8	18
KSATEXM, Ks (cm d <sup>-1</sup> )	0-30	-9	4
	30-70	-9	4

\*százalékos változás a referencia állapot (szántás, SZ) paraméter beállításához képest

## EREDMÉNYEK

### A talajnedvesség szimulációja

A SWAP modell adaptációját mindhárom termőhelyre sikeresen elvégeztük. A modellezést nehezítette, hogy viszonylag kevés megfigyelt adat állt rendelkezésre, 2007-ben csupán 2-4 db. Továbbá kiemelendő, hogy a meteorológia adatok Mosonmagyaróvár állomásról származnak, amely kb. 10 km távolságra helyezkedik el a talajnedvesség mérési pontoktól. A nem helyben mért meteorológiai adatok kedvezőtlenül hatnak a modellhatékonyságra, mivel a csapadékmennyiség térben rendkívül változékony, a vízforgalmi modellek pedig meglehetősen érzékenyek a peremfeltételekre (Kozma et al. 2019). Említésre érdemes, hogy a mintaterületeken a Duna nagyobb árhullámai jelentősen befolyásolják még a felső talajrétegek nedvességtartalmát is (Koltai et al. 2019), amelyet az alsó peremfeltételek beállításánál megfelelő adatok hiányában nem tudtam figyelembe venni.

5. táblázat  
Kalibrált VGM modell paraméterek

Monitoring pont	Talajréteg (cm)	θ <sub>res</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	θ <sub>sat</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	K <sub>s</sub> (cm d <sup>-1</sup> )	α (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	λ (-)
T-03	0-10	0,04	0,51	98,93	0,0050	1,67	-1,90
	10-30	0,09	0,50	35,63	0,0051	1,81	-2,06
	30-50	0,05	0,51	27,40	0,0051	1,77	-1,06
	50-70	0,05	0,52	18,45	0,0050	1,78	-1,06
T-09	0-10	0,06	0,50	18,09	0,0079	1,57	-2,80
	10-30	0,13	0,46	26,73	0,0077	1,60	-1,00
	30-50	0,12	0,46	70,37	0,0082	1,55	-2,00
	50-70	0,06	0,46	50,48	0,0087	1,50	-2,00
T-16	0-10	0,06	0,48	42,66	0,0043	1,67	-1,06
	10-30	0,04	0,51	21,46	0,0047	1,70	-0,06
	30-50	0,12	0,50	65,65	0,0119	1,48	-1,06
	50-70	0,10	0,52	56,03	0,0159	1,49	-0,06

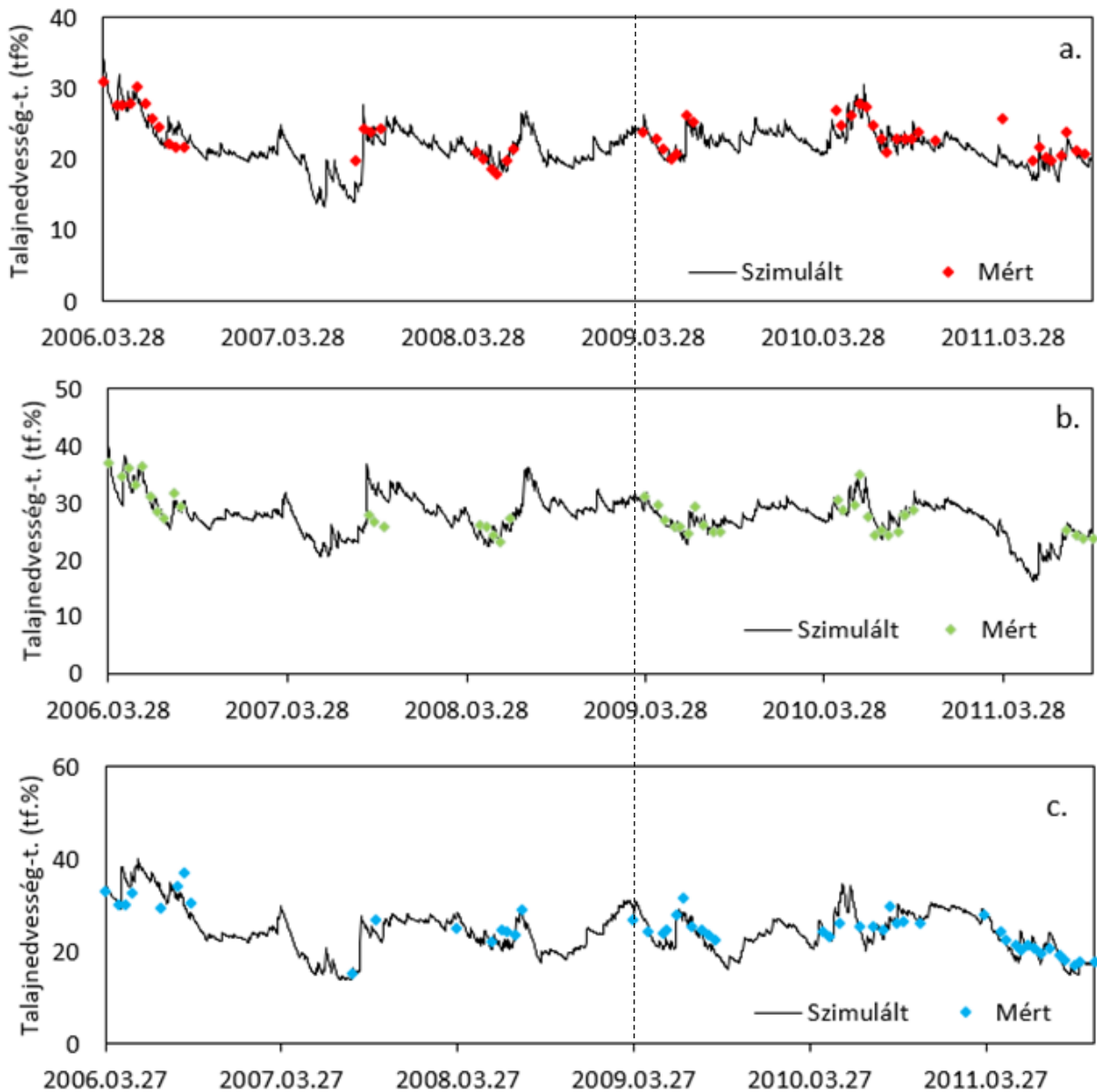
A kalibrációs folyamat során négy mélység (10, 30, 50, 70 cm), szimulált talajnedvesség-tartalom értékeit hasonlítottuk össze a mérésekkel, mind a három mérőhelyre (T-03, T-09, T-16) vonatkozóan. A modellillesztéshez szükséges VGM paraméterek kalibrált értékeit az 5. táblázat mutatja be. Minden modellezett talajréteg esetében statisztikai vizsgálatot végeztünk a modellilleszkedés jóságának megállapítására (6. táblázat).

A szimulált átlagos talajnedvesség-tartalom a felső 70 cm-es rétegben minden mintavételi pont esetében kielégítő/megfelelő volt, mind a kalibrációs mind a validációs időszakban (Harmel et al. 2018). Az R<sup>2</sup> értéke 0,51-0,74, az NSE 0,5-0,65, míg az RMSE 0,01-0,03 (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>), a

d érték pedig 0,77-0,85 között változott. A szimulációs periódus alatt a felső 70 cm átlagában mért talajnedvesség-tartalom a T-03 mérőhelyen 23,3 tf% volt, a modellezett érték 21,9 tf%. A T-09 esetében a mért érték 27,9 tf%, míg a modellezett 27,7 tf% volt. A T-16 mérőhelyen a mért átlag 24,4 tf%, a szimulált pedig 24,8 tf%.

6. táblázat  
Modellhatékonysági mutatók az első modellezési időszakra vonatkozóan (2006-2011)

Monitoring pont	Modellezési időszak	Mélység (cm)	n (db)	R <sup>2</sup> (-)	NSE (-)	RMSE (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	d (-)
T-03	2006-2008	kalibráció	10	0,64	0,53	0,03	0,89
			30	0,67	0,63	0,02	0,57
			50	0,53	0,24	0,02	0,86
			70	0,70	0,70	0,02	0,72
			<b>10-70</b>	<b>21</b>	<b>0,73</b>	<b>0,58</b>	<b>0,02</b>
	2009-2011	validáció	10	0,50	0,28	0,03	0,89
			30	0,59	0,60	0,01	0,89
			50	0,77	0,58	0,01	0,76
			70	0,67	0,53	0,01	0,80
			<b>10-70</b>	<b>24</b>	<b>0,69</b>	<b>0,51</b>	<b>0,02</b>
T-09	2006-2008	kalibráció	10	0,54	0,52	0,03	0,94
			30	0,53	0,53	0,03	0,66
			50	0,50	0,50	0,03	0,89
			70	0,48	0,46	0,04	0,50
			<b>10-70</b>	<b>18</b>	<b>0,51</b>	<b>0,50</b>	<b>0,03</b>
	2009-2011	validáció	10	0,46	0,48	0,03	0,65
			30	0,72	0,59	0,02	0,96
			50	0,69	0,52	0,02	0,95
			70	0,57	0,39	0,03	0,76
			<b>10-70</b>	<b>25</b>	<b>0,67</b>	<b>0,50</b>	<b>0,02</b>
T-16	2006-2008	kalibráció	10	0,76	0,74	0,03	0,92
			30	0,79	0,76	0,03	0,92
			50	0,48	0,35	0,04	0,60
			70	0,60	0,48	0,04	0,93
			<b>10-70</b>	<b>16</b>	<b>0,70</b>	<b>0,65</b>	<b>0,03</b>
	2009-2011	validáció	10	0,76	0,53	0,03	0,79
			30	0,62	0,31	0,02	0,88
			50	0,66	0,62	0,02	0,77
			70	0,65	0,60	0,03	0,71
			<b>10-70</b>	<b>33</b>	<b>0,74</b>	<b>0,64</b>	<b>0,03</b>



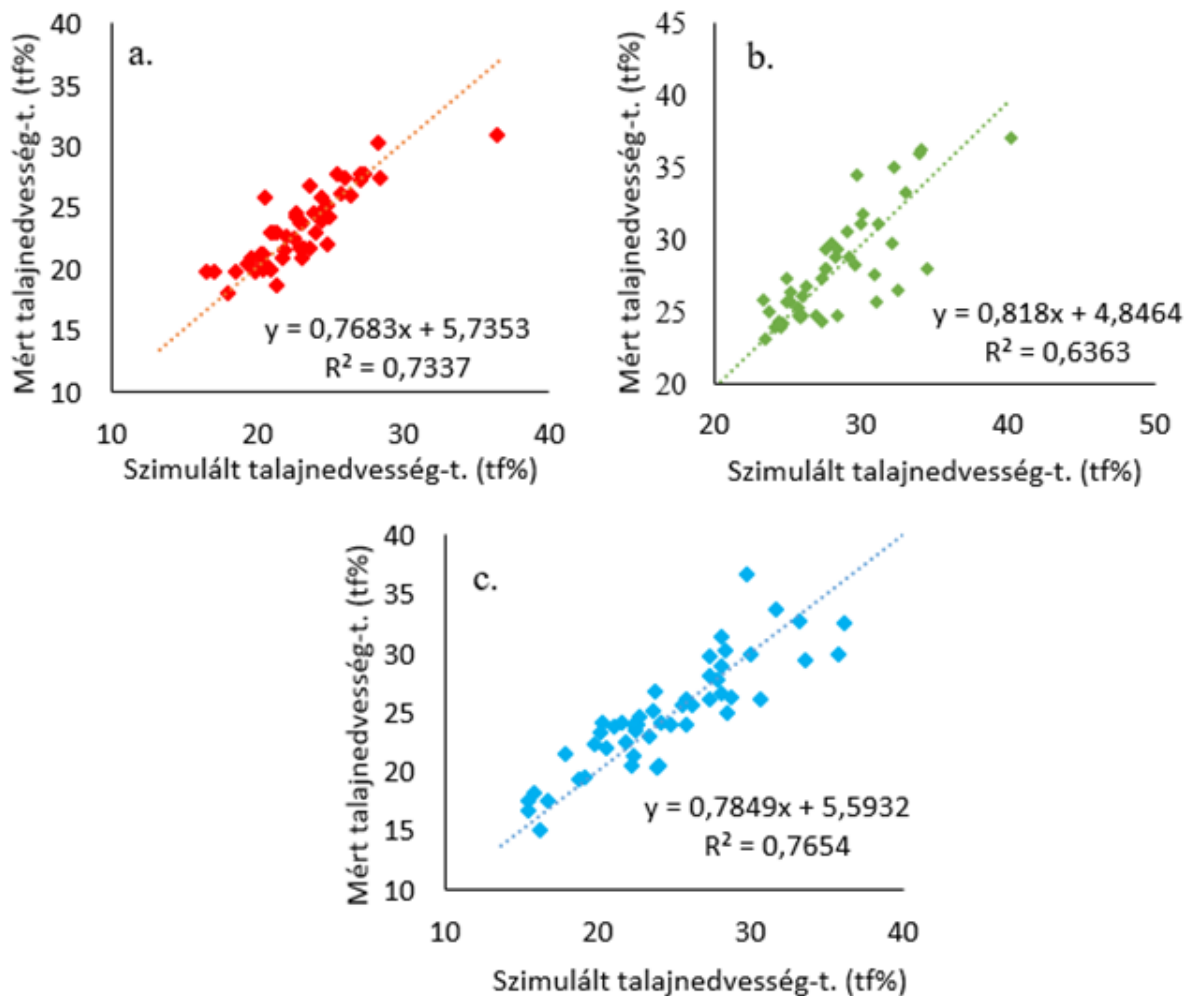
1. a-c. ábra

A szimulált és a mért talajnedvesség-tartalom összehasonlítása a felső 70 cm átlagában T-03 (a.), T-09 (b.) és T-16 (c.) kezelés esetében (2006-2011). A függőleges vonal a kalibrációs és validációs időszakot választja el.

Az 1. a-c. ábra a vizsgált termőhelyek felső 70 cm-es rétegében mért és modellezett talajnedvesség-tartalom értékeket hasonlítja össze az első szimulációs periódusban. Az ábrákon jól látszik, hogy a modellezett idősorok megfelelően írják le az intenzív csapadékok és a párolgási veszteség talajnedvességre gyakorolt hatását. A kalibráció és validáció hatékonysági mutatói nem térnek el jelentősen egymástól, de általában a kalibráció időszak jobb illeszkedést mutat. A T-09 esetében azonban megfigyelhető, hogy a validáció valamivel erősebb. Ennek egyik oka, hogy 2007-es nyári időszakot nem tudta megfelelően leírni a modell. A valóságban a talaj jobban kiszáradt, illetve nem jelent meg olyan határozottan a szeptember eleji csapadékesemények hatása, mint a modell számítások szerint. A legnagyobb szezonális ingadozást a T-16 erdőterület talajnedvesség adatai mutatják. A jelentős ingadozás vélhetően a nyárfák számotvető vízigénye miatt alakult ki. Fontos kiemelni, hogy mindhárom választott mintaterület ta-



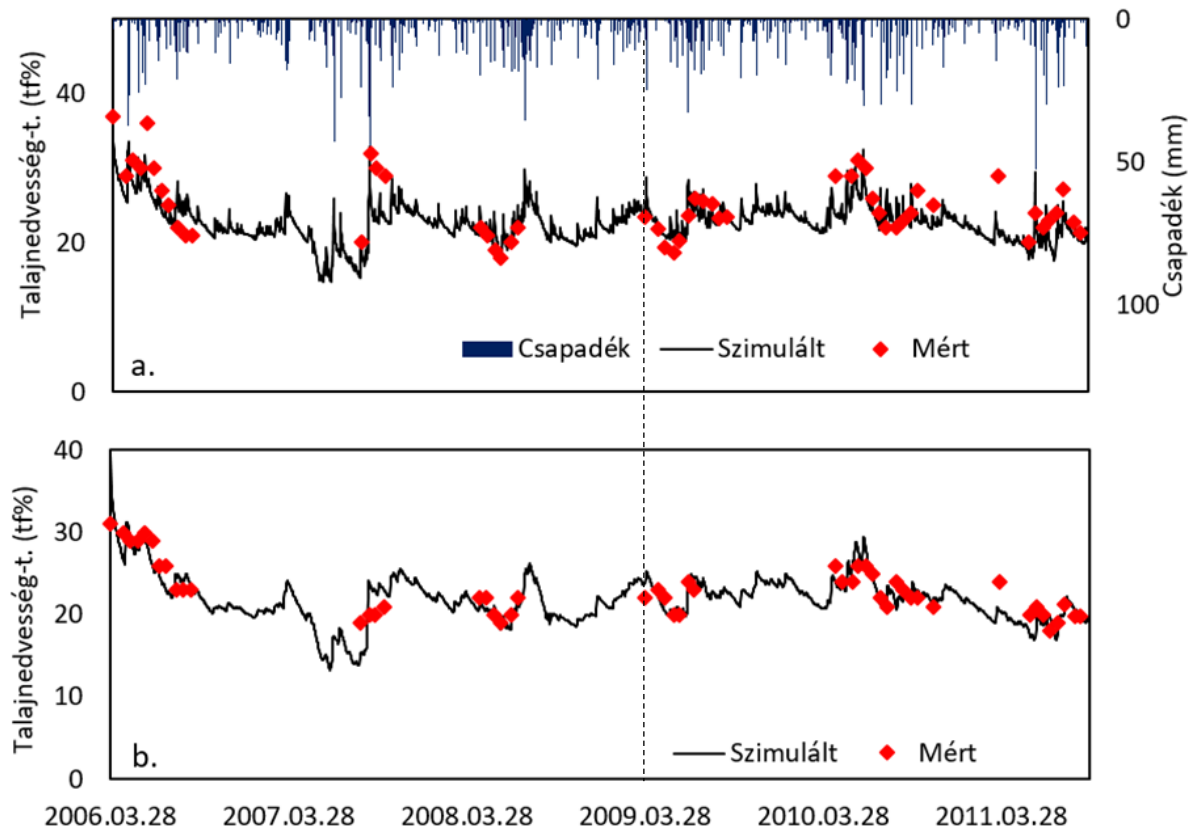
lajnedvesség értékeire mérhető hatást gyakorolnak a Duna nagyobb árhullámai, habár a mérőhelyek talajai a Dunától mért távolságuk és tulajdonságaik függvényében eltérően reagálnak azokra (Koltai et al, 2019). Az 1. a-c. ábrán megfigyelhető, hogy egyes, nagyobb árhullámokhoz köthető talajvízhatás miatt kialakuló talajnedvesség csúcsokat nem tudta a modell megfelelő mértékben reprezentálni. Ilyen nagyobb árhullám volt például 2006.04.02-án, 2007.09.08-án, 2009.06.27-én, 2010.06.05-én, illetve 2010.09.02-án (a vízállás Dunaremete vízmércénél magasabb, mint 550 cm). Továbbá fontos megemlíteni, hogy a nem helyben mért csapadék is hozzájárulhat a szimulációk alkalmanként rosszabb illeszkedéséhez.



2. a-c. ábra

A szimulált és a mért talajnedvesség-tartalom (tf%) összehasonlítása a 10 és 70 cm közötti talaj profilban a T-03, a T-09 és a T-16 mintaterület esetében (kalibráció-validáció). A vonal az adatsorok közötti potenciális 1:1 kapcsolatot jelzi.

A 2. a-c. ábra a szimulált és a mért talajvíz-tartalom összehasonlítását mutatja a 10-70 cm-es profilban a T-03 (a.), T-09 (b.) és T-16 (c.) mérőhelyen. Az ábrákon szereplő vonalak 1:1 méretarányúak; minél közelebb vannak a pontok a vonalhoz, annál jobb a korreláció a mért és a szimulált adatsor között. A szimulált talajnedvesség jó összhangban van a mért értékekkel a T-03 és a T-16 helyen. A T-09 mérőhely mért-szimulált adatainak összehasonlításakor viszont élesen látszik, hogy 2007 nyarán erőteljesen felülbecsli a modell a talajnedvességet.



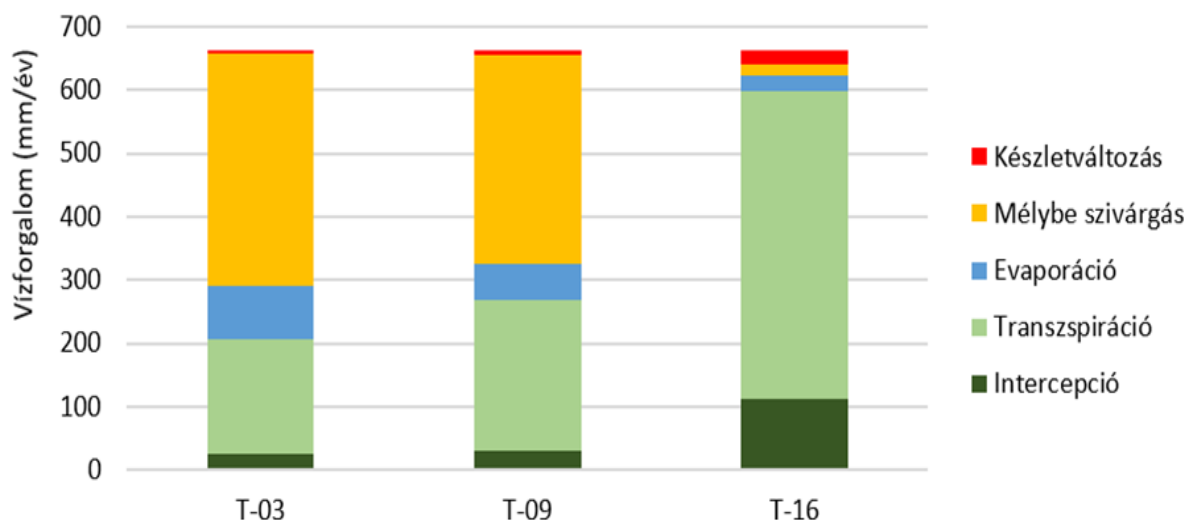
3. a, b. ábra

A T-03 mérőhelyen, 10 cm-en (a.) és 70 cm (b.) mélyen mért talajnedvesség-tartalom (2006-2011). A függőleges vonal a kalibrációs és validációs időszakot választja el.

A talaj nedvességtartalma a felső 10 cm-es rétegben drasztikusabban változik, mint a mélyebb talajrétegekben (3.a, b. ábra), ugyanis itt jobban érvényesül a meteorológiai körülmények (csapadék, ET) együttes hatása. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy ezt a változékonyságot a modell nem tudja minden esetben megfelelő amplitúdával lekövetni. Az alsóbb rétegekben a talajnedvesség változékonysága csökken, a felső rétegekhez képest, de a jelentősebb csapadékesemények hatása 70 cm-es mélységben is határozottan megjelenik, valószínűleg a viszonylag magas vízvezető képességnek, illetve a fentiekben említett talajvízhatásnak köszönhetően.

#### Vízforgalmi összetevők szimulációja

A szimulációkból levezetett vízforgalmi összetevők - szinkronban az eltérő környezeti adottságokkal – a három helyszín között lényeges különbséget mutatnak: míg a T-03 és T-09 szántó művelési ágú mérőhelyen, a vízvesztési oldalon a mélybe szivárgás volt a meghatározó, addig a T-16 ponton a növényi párologtatás szerepe volt a legjelentősebb. A T-03 és T-09 mérőhely esetében a modell közel hasonló képet adott a vízmérleg elemekről, azonban a transzpiráció aránya a T-09-nél magasabb volt, míg az evaporációé alacsonyabb. A számított vízmérlegeket a szimulációs periódus teljes naptári éveinek (2007-2010) átlagában mutatjuk be (4. ábra).



4. ábra

Az egyes mérőhelyekre modellezett átlagos vízforgalmi összetevők

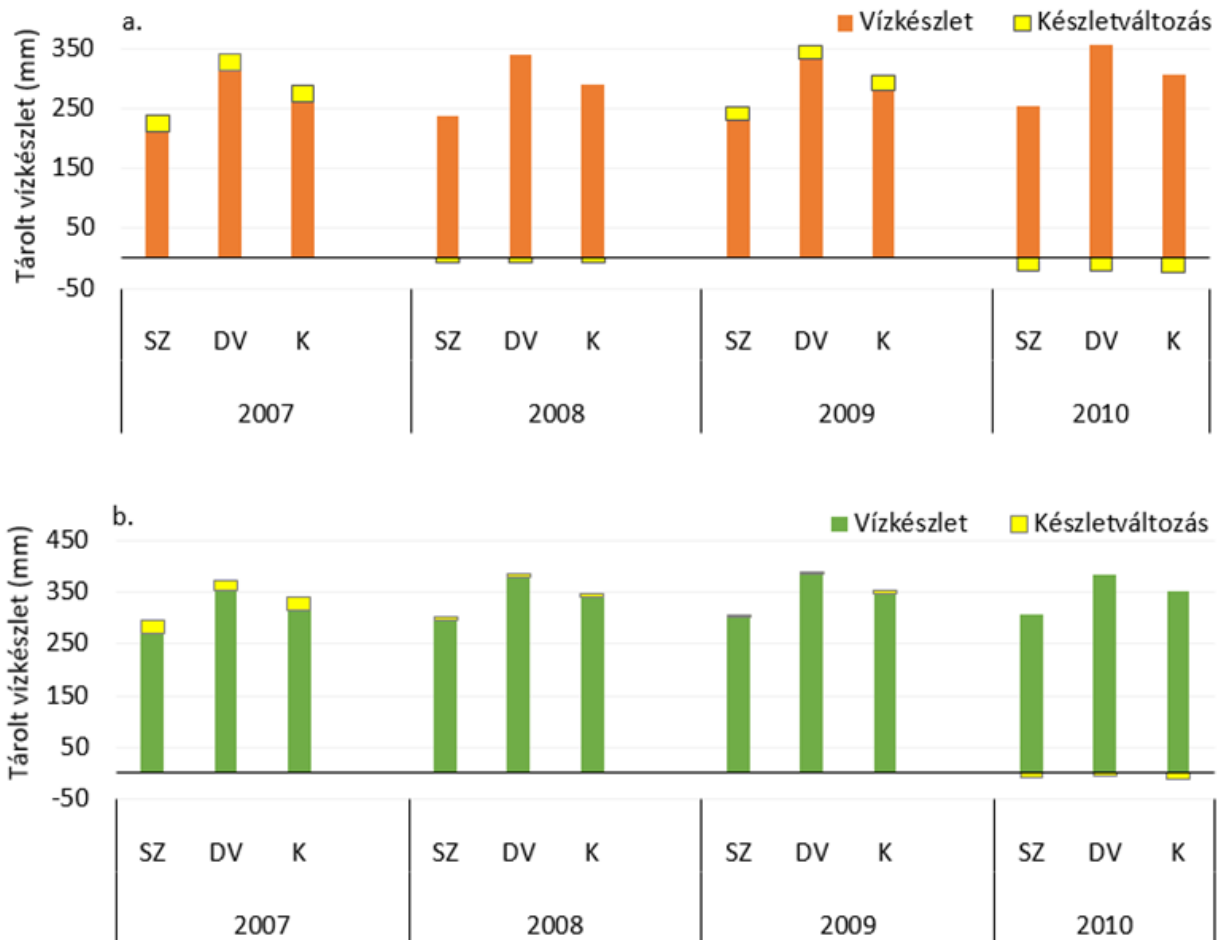
Az átlagos csapadékösszeg 663 mm/év volt. A felszíni lefolyás a területek adottságait tekintve mindhárom esetben elhanyagolható.

- A T-03 esetében a talajba jutó csapadékot az intercepció 26 mm/év-el (4 %) csökkentette. A transzspirációs és evaporációs veszteség 181 mm/év (27 %), illetve 84 mm/év (13 %) volt. A mélybeszivárgás útján 367 mm/év (55 %) távozott a talajprofilból. A talaj vízkészlete gyakorlatilag nem változott az évek alatt (+4 mm/év, 0,7 %).
- A T-09 mérőhelyen az intercepció 31 mm/év (5 %), a transzspiráció 236 mm/év (35 %), az evaporáció 58 mm/év (9 %), míg a mélybeszivárgás értéke 331 mm/év volt (50 %). A tárolt nedvességkészlet 7,7 mm/évvel (1%-kal) nőtt.
- A T-16-os, erdő felszínborítású mérőhelyen a legszembetűnőbb, hogy a csapadék döntő hányada (77%-a) párolgás/párolgotatás révén visszajutott a légkörbe (transzspiráció: 466 mm/év, evaporáció 25 mm/év). A talajprofilban tárolt nedvességkészlet valamivel nagyobb arányban növekedett (22 mm/év, 3%), mint az előbbieken. Az intercepció értéke 113 mm/év (17%), míg a mélybe szivárgás mindössze 17 mm/év volt (2,5 %).

## Talajművelés hatásának vizsgálata a talajnedvesség-tartalomra

### Talajnedvesség szimulációja

A különböző talajművelési eljárások talajnedvesség készletre gyakorolt hatása erőteljesen megmutatkozott mindkét mintaterületen és minden vizsgált évben. Az 5. ábrán a modellezett tárolt vízkészletet szemlélteti - beleértve a készletváltozást is - a talajprofil felső egy méterében.



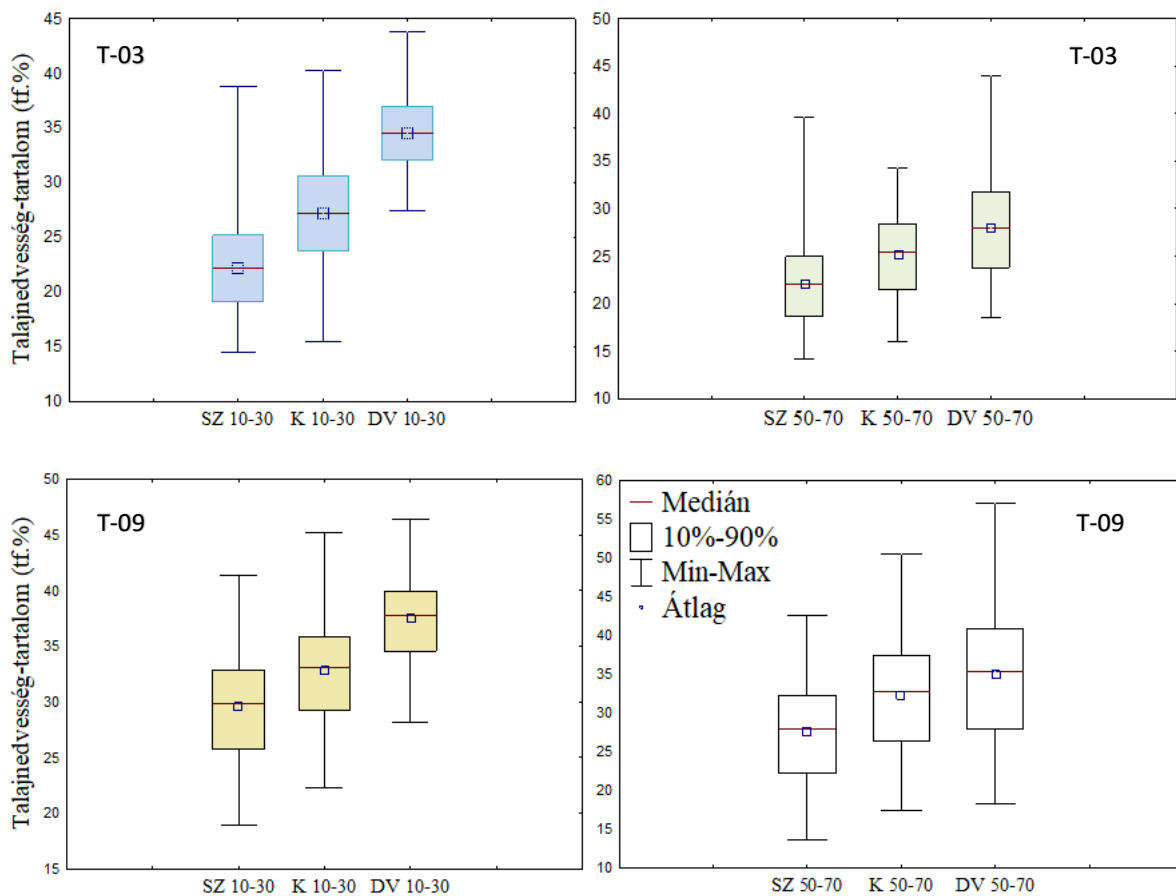
5. a,b. ábra

A felső 1 méterben tárolt talajnedvesség készlet (és készletváltozás) a különböző talajművelésekben a T-03 (a) és T-09 (b) mintaterületen (2007-2010)

A számítások szerint a T-03 mérőhely esetében az átlagos talajnedvesség készlet (2007-2010) a szántásban 239 mm volt, míg a direktvetésben 341 mm, a kultivátoros művelésben pedig 291 mm. Ugyanezen időszakban a T-09 mintaterületen a szántásban 300 mm, a direktvetésben 382 mm, míg a kultivátoros kezelésben 345 mm volt a tárolt vízkészlet. Jól látható, hogy a direktvetés és a kultivátoros kezelés forgatókönyv esetében mindkét területen és minden évben jóval magasabb a talaj vízkészlete, mint a szántás esetében. A T-03 területen a direktvetésben az átlagos becsült vízkészlet 42 %-kal, míg a kultivátoros művelésben 21 %-kal magasabb, mint a szántásban. A T-09 mérőhelyen a direktvetésben 27 %-kal, a kultivátoros kezelésben pedig 15 %-kal magasabb az átlagos nedvesség készlet. Mindamellett megfigyelhető, hogy a T-03 területen kevesebb a talajban tárolt vízmennyiség, a vízkészlet változása is tágabb határok között mozog, mind pozitív, mind negatív irányban.

A 6. ábra a talajnedvesség-tartalom alakulását szemlélteti a 10-30 cm, illetve 50-70 cm-es mélység öt éves átlagában a különböző talajművelési forgatókönyvekben. Általánosságban elmondható, hogy a szántásos műveléshez viszonyítva a felső talajrétegek nedvességtartalma jelentősebben változott, mind a kultivátoros, mind a direktvetéses művelésben, mint az alsóbb talajrétegeké (7. táblázat). A T-03 mintaterületen a direktvetés scenárióban a felső 30

cm-es réteg nedvességtartalma a megfigyelési időszak átlagában 55 %-kal növekedett, a referenciaállapothoz képest. Az alsó, 50-70 cm-es rétegben a növekedés 27% volt. A kultivátoros kezelésben a felső 30 cm-re becsült növekedés 22 %, az 50-70 cm-es rétegre pedig 14%.



6. ábra

Talajnedvesség-tartalom alakulása a 10-30 cm, illetve 50-70 cm-es mélység átlagában a különböző talajművelésekben

7. táblázat

Minimum, maximum és átlagos talajnedvesség-tartalom (tf%) értékek ( $p < 0,05$ ) a különböző mélységekben

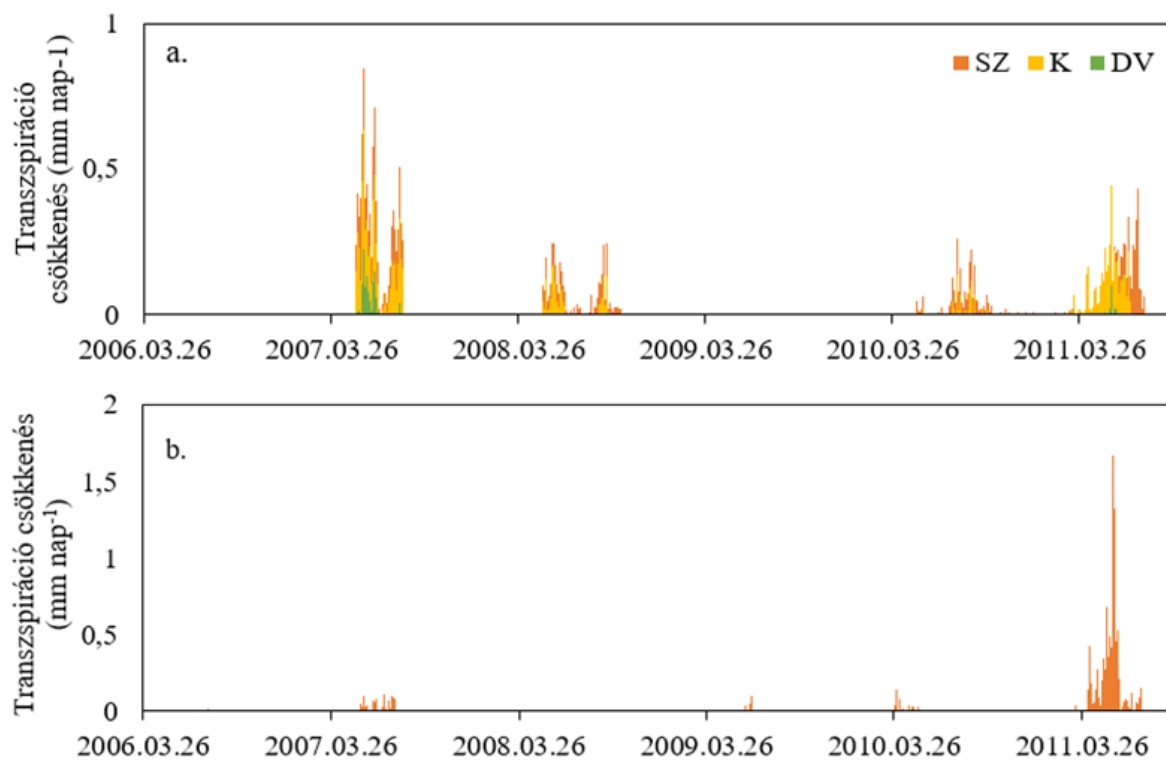
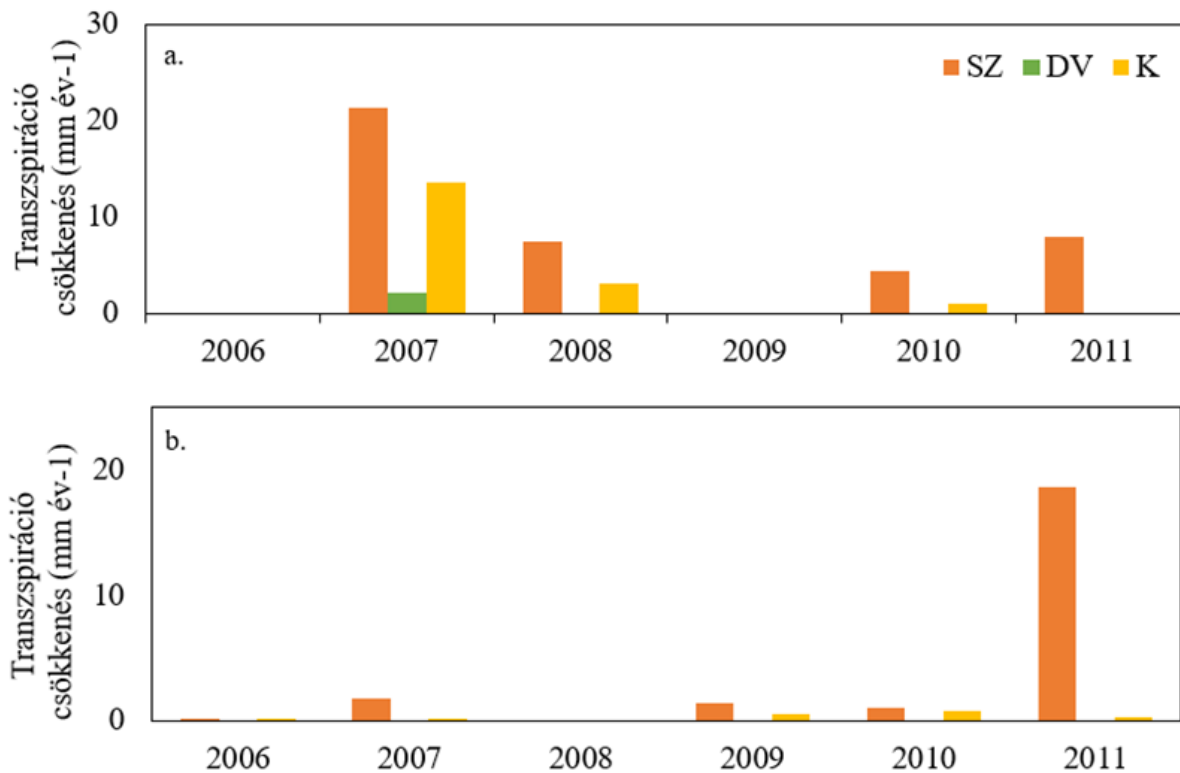
Talajművelés	Talajmélység (cm)	Átlag	Min	Max
<b>T-03</b>				
SZ	10-30	22,2	14,6	38,8
	50-70	22,0	14,2	39,6
DV	10-30	34,5	27,4	43,8
	50-70	27,9	18,6	44,0
K	10-30	27,2	15,5	40,3
	50-70	25,2	16,0	34,3
<b>T-09</b>				
SZ	10-30	29,6	19,0	41,4
	50-70	27,6	13,7	42,6
DV	10-30	37,4	28,2	46,4
	50-70	34,9	18,2	57,1
K	10-30	32,8	22,3	45,2
	50-70	32,3	17,4	50,6

A T-09 mérőhelyen a modell kisebb eltéréseket kalkulált a referencia állapothoz képest, mint a T-03-nál. A direktvetés forgatókönyv esetében a szántásos műveléshez képest a felső 10-30 cm-ben 27 %-kal, az 50-70 cm-es rétegben pedig 13%-kal emelkedett az átlagos talajnedvesség-tartalom. A kultivátoros művelésnél a felső és az alsó rétegekben megközelítőleg 11%, valamint 12%-kal nőtt a nedvesség tartalom.

A modellezett értékek jó összhangban vannak a szakirodalmi adatokkal. Maćecka és munkatársai (2012) Lengyelországban hét egymást követő évben tavaszi árpában figyelték a hagyományos szántásos talajművelés, a csökkentett talajművelés és a talajművelés nélküli termesztésmód hatását a talajnedvességre. Eredményeik szerint a felső 20 cm-en a talajművelés nélküli kezelésben 30 %-kal, míg csökkentett talajművelés esetén 18 %-kal nőtt a talajnedvesség. Ugyancsak lengyel mintaterületen, kukorica kultúrában három éven át vizsgálták a hagyományos szántásos művelés és a talajművelés nélküli termesztésmód hatását (Król et al. 2018). A talajnedvesség tartalma a felső 30-cm-en átlagosan 34%-kal volt több, míg 30-60-cm-en 30%-kal. Adugna (2019) Etiópiában kukorica, szója és kukorica-szója kultúrákban vizsgálta a szántás és a direktvetés talajtulajdonságokra és talajnedvességre gyakorolt hatását. A hagyományos talajművelés esetén a visszatartott víz mennyisége a felső 20 cm-en 9,83%-kal, 11,3%-kal, valamint 7,76%-kal csökkent a kukorica, a szójabab és a kukorica-szója vegyes kultúrával történő művelés nélküli, mulcsos kezeléshez képest. Gelybó et al. (2022) Hatvan melletti tartamkísérletben, 5 egymást követő évben (napraforgó, őszi búza, kukorica, zab) tanulmányozta a talaj nedvességtartalmát szántásos és talajművelés nélküli kezelésben. Megfigyeléseik szerint 5-10 cm közötti mélységében a talaj nedvességtartalma átlagosan 24%-kal volt magasabb a talajművelés nélküli területen, mint a szántásban. Mindamellet kiemelendő, hogy az egyes évek és termesztett növénykultúrák között jelentős különbségek adódtak a talajnedvesség-készlet tekintetében.

### *Szárazság-stressz szimulációja*

A szárazság-stressz szimulációja során megállapíthatjuk, hogy nagy valószínűséggel sem a T-03, sem a T-09 mérőhelyen nem volt jelentős vízhiányos állapot a megfigyelési időszakban. Továbbá a 7.a,b. ábrán jól látható, hogy mind a direktvetés, mind a kultivátoros forgatókönyv szimulációja esetén a szárazság stressz értékek alacsonyabbak maradtak, mindkét mintaterület esetében. A T-03 mintaterületen a legnagyobb éves transzspiráció csökkenés a szántásos művelésben 21,3 mm volt 2007-en. A kultivátoros kezelésben ugyanez az érték 13,6 mm volt. A direktvetés szárazság stressz gyakorlatilag nem jelentkezett a megfigyelési időszakban a modellszámítások szerint. A T-09 mérőhelyen a T-03 területhez képest a legtöbb évben alacsonyabb transzspiráció csökkenés értékek adódtak. Egyedül 2011-ben, a szántás esetében volt számottevő az értéke, évi 18,5 mm. A kultivátoros kezelés, illetve direktvetés forgatókönyv esetében a szárazság stressz becsült értéke elhanyagolható volt. Az alacsony értékek összhangban vannak a mintaterület nagyobb tárolt vízkészletével. Amennyiben a transzspiráció csökkenés napi dinamikáját vizsgáljuk (8.a,b. ábra) nem meglepő módon megállapítható, hogy a legmagasabb értékek a tavaszi-nyári időszakban jelentkeztek.



## KÖVETKEZTETÉSEK

Vizsgálatunkban matematikai modell (SWAP) segítségével becsültük három szigetközi termőhely talajnedvesség forgalmát, eltérő területhasználati és talajművelési rendszerekben. Megállapítottuk, hogy az alkalmazott modell - a bizonytalanságok figyelembevételével - alkalmas a vizsgált termőhelyeken a talajnedvesség szimulálására, valamint talajművelési forgatókönyvek talajnedvességre gyakorolt hatásának szimulálására.

Következtetéseinket az alábbi pontokban foglaljuk össze:

- ❖ A modellezés sikerességét a peremfeltételként használt meteorológiai mérési adatok nagymértékben meghatározzák. Valószínűsíthető, hogy a helyben mért meteorológiai adatok alkalmazásával a modell pontossága növelhető lenne.
- ❖ A felső peremfeltételek mellett fontos az alsó peremfeltételek megfelelő megadása is. Az általunk vizsgált termőhelyeken (főleg a T-09 és T-16) a Duna nagyobb árhullámai hatással vannak a talaj nedvességtartalmára a talajvízhatásnak köszönhetően.
- ❖ A modellezett vízmérlegek jelentősen eltérő képet mutattak a két szántó és az erdő mintaterületek között. A T-03 és T-09 (szántó) mérőhelyeken a mélybe szivárgás volt a meghatározó, míg a T-16 (erdő) mintaterületen a növényi párologtatás szerepe volt a legjelentősebb a vízveszteségi oldalon.
- ❖ A talajnedvesség sikeres szimulációja után a talajművelési forgatókönyvek hatását vizsgáltuk két szántó területen (T-03, T-09). A választott talajművelési forgatókönyvek – talajművelés nélküli direktvetés és csökkentett talajművelés (sekély kultivátor) – több szabadföldi kísérlettel igazoltan is hatásos eszköznek bizonyultak a talaj vízkapacitásának növelésére. Becsléseink szerint a direktvetés és a kultivátoros kezelés forgatókönyv esetében mindkét mintaterületen és minden évben jóval magasabb a talaj vízkészlete, mint a szántás esetében. A T-03 területen a direktvetésben az átlagos becsült vízkészlet 42 %-kal, míg a kultivátoros művelésben 21 %-kal magasabb, mint a szántásban. A T-09 mérőhelyen a direktvetésben 27 %-kal, a kultivátoros kezelésben pedig 15 %-kal magasabb az átlagos nedvesség készlet.
- ❖ Általánosságban elmondható, hogy a szántásos műveléshez viszonyítva a felső talajrétegek nedvességtartalma jelentősebben változott a forgatókönyvek alkalmazása során mind a kultivátoros, mind a direktvetéses művelésben, mint az alsóbb talajrétegeké, hiszen ezt a réteget érinti leginkább a művelés hatása.
- ❖ A szimulációkból levezetett szárazság-stressz értékek egyik termőhely esetében sem voltak jelentősek a referencia állapotban. Mindazonáltal a becslések szerint mind a direktvetés, mind a kultivátor forgatókönyv esetében a szárazság stressz csökkenthető, amely fontos szempont a klímaváltozás várható hatásait figyelembe véve.
- ❖ A vizsgált mintaterületekre vonatkozóan nem voltak szakirodalmi adatok talajművelési tartamkísérletekből, így a paraméter beállításoknál más hazai mintaterület eredményeit használtuk fel. Ez a megállapítás egyben felhívja a figyelmet a tartamkísérletek fontosságára és kiemelt szerepére modellezési módszerek alkalmazása esetén.

Összességében megállapítható, hogy a SWAP modell hasznos eszköznek bizonyul a talaj nedvességforgalmának és a különböző talajművelési rendszerek talajnedvesség dinamikára gyakorolt hatásának becslésére. A modellmódszer igazolta a talajkímélő csökkentett talajművelési rendszerek és a direktvetés talajnedvesség-forgalomra gyakorolt kedvező hatását. A modellezési munkák elősegíthetik, hogy megalapozott döntések szülessenek a



vízkezelések megtartása és okszerű használata érdekében. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a szimulációs kísérletek nem helyettesítik a terepi kísérleteket, méréseket, de kitűnően kiegészíthetik azokat.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Abelen S.- Seitz F.- Abarca-del-Rio R.- Güntner A. (2015): Droughts and Floods in the La Plata Basin in Soil Moisture Data and GRACE. *Remote Sens.* 7(6), 7324-7349.o.
- Adujna O. (2019): Effects of tillage practices and cropping system on soil physical properties and in-situ water conservation in clay loam of Assosa , Ethiopia. 7(9), 794–802.o.
- Calvino P.A.- Sadras V.O. (1999): Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management, *Field Crops Res.* 237–246.o.
- Castellini M.- Stellacci AM.- Tomaiuolo M.- Barca E. (2019): Spatial Variability of Soil Physical and Hydraulic Properties in a Durum Wheat Field: An Assessment by the BEST-Procedure. *Water*; 11(10):2185.o.
- Doran W. (2002): Soil health and global sustainability: translating science into practice John, *Agriculture, Ecosystems & Environment* Volume 88, Issue 2, 119-127.o.
- FAO (2000d): Manual on integrated soil management and conservation practices, *FAO Land Water Bull.* 8, 214.o.
- Farkas Cs.- Hagyó A.- Horváth E.- Várallyay Gy. (2008): A Chernozem Soil Water Regime Response to Predicted Climate Change Scenarios. *Soil & Water Res.*, 3,(Special Issue 1): S58–S67.o.
- Feddes R.A.- Kowalik P.J.- Zaradny H. (1978): Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 189.o.
- Gelybó Gy.– Barcza Z.- Dencső M.- Potyó I.- Kása I. -Horel Á.- Pokovai K.- Birkás M.- Kern A.-, Hollós R.- Tóth E. (2022): Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate. *Soil and Tillage Rese-arch*, 216,105239.o.
- Harmel R.D.- Baffaut C.- Douglas-Mankin K. (2018): Review and development of ASABE Engineering Practice 621: “Guidelines for calibrating, validating, and evaluating hydrologic and water quality models” *Transactions of the ASABE.* 61. (4). 1393-1401.o.
- Horel A. – Tóth E. – Gelybó Gy.- Kása I. - Bakacsi Zs. – Farkas Cs. (2015): Effects of Land Use and Management on Soil Hydraulic Properties. *Open Geosciences.* 7.o.
- Koltai G.- Giczi Zs.- Rajkai K. (2019): A Talajvíz hatása a talajnedvességre a Szigetközben 1995-2012 TÁJAK MŰKÖDÉSE ÉS ARCULATA Szerk.: Fazekas István, Lázár István DEBRECEN
- Koltai G.- Giczi Zs.- Enzsölné Gerencsér E. – Rajkai K. (2019): Árhullámok hatása a mezőgazdasági és erdő hasznosítású területek talajnedvesség állapotára a Szigetközben. XXXVII. ORSZÁGOS VÁNDORGYŰLÉS Pécssett. [www.hidrologia.hu](http://www.hidrologia.hu)
- Kozma Zs.- Decsi B.- Manninger M.- Móricz N.- Makó A.- Szabó B. (2019): Becsült talajhidrológiai paraméterek szimulációs vizsgálata a NAIK Erdészeti Tudományos Intézet két mintaterületén. *Agrokémia és Talajtan.* 68.1, 13-36.o.
- Król A.- Żyłowski T.- Kozyra J. - Księżak J. (2018): Soil moisture under no-tillage and tillage systems in maize long-term experiment *POLISH JOURNAL OF SOIL SCIENCE.* VOL. LI/1. PL ISSN 0079-2985.o.
- Legates D. - McCabe G. (1999): Evaluating the Use Of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. *Water Resources Research.* 35. 233-241.o.
- Locke M.A.- Reddy K.N.- Zablotowicz R.M. (2002) Weed management in conservation crop production systems, *Weed Biol. Manag.* 2, 123–132.o.

- Matecka I.- Blecharczyk A.- Sawinska Z.- Dobrzeńiecki T. (2012): The effect of various long-term tillage systems on soil properties and spring barley yield. 36, 217–226.o.
- Marval, Š.- Fučík P. -Čerkasova N. -Schürz C. -Farkas C. -Piniewski M. -Strauch M. -Weiland S. Plung, S. -Krzeminska D. -Lemann T. -Witing F. (2022): SWAT+ and SWAP retention measure implementation handbook. Deliverable D2.3 EU Horizon 2020 OPTAIN Project, Grant agreement No. 862756
- Moriasi D.- Margaret G.-Naresh P.- Prasad D. (2015): Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). 58.o.
- Nash, J.E. - Sutcliffe, J.V. (1970): River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10, 282-290.o.
- Rajkai K. (2001): Modellézés és modellhasználat a talajtani kutatásban. Agrokémia és talajtan, 50 (3-4). 469-508.o.
- Raymond L.N. (1971): Scientific framework of world water balance, Technical papers in hydrology SC.70/XXI.7/A 27.o.
- Sarkkula J. - Keskinen M.- Koponen J. - Kumm M. - Nikula J. - Olli V. - Virtanen M. (2007): Mathematical modelling in integrated management of water resources. In: Democratizing water governance in the Mekong Region.127-156.o.
- Sharma B.- Molden D. – Cook S. in Drechsel P.- Heffer P.- Magen H.- Mikkelsen R.- Wichelns D. (Eds.) (2015): Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends. Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification. First edition, Paris, France. 39-64.o.
- Sharpley A.N. (1984): Depth of surface soil-runoff interaction as affected by rainfall, soil slope, and management, Soil Sci. Soc. Am. J. 49, 1010–1015.o.
- Ujj A. (2004): Soil conditions and phenological studies on a brown forest soil, Növénytermelés 2004, 53, 263–272.o.
- van Genuchten M. TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J.44: 892–898.o.
- van Genuchten M. TH. (1991): The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. IAG-DW12933934. <https://www.pc-progress.com/Documents/programs/retc.pdf>
- Van Liew M.W.- Arnold J.G.- Garbrecht, J.D. (2003): Hydrologic Simulation on Agricultural Watersheds: Choosing Between Two Models. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 46. 1539-1551.o.
- Wheater H. - Evans E. (2009): Land Use, Water Management and Future Flood Risk. Land Use Policy, 26, S251-S264.o.
- Whiteley G.M.- Dexter A.R. (1982): Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soils, Soil Till. Res. 2, 379–393.o.
- Zeidan B. (2015): "Mathematical Modeling of Environment Problems". In: Environmental Science and Engineering, Instrument, Modeling and Analysis. Volume 7. 422-461.o.
- Zimmermann B.- Elsenbeer H.- De Moraes J.M. (2006): The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation, Forest Ecol. Manage. 222, 29–38.o.