

# **DIPLOMADOLGOZAT**

**Tasnádi Pál**

**Gödöllő  
2024**



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem**

**Gödöllői Campus**

**Növénytermesztési-tudományok Intézet**

**Agrármérnöki osztatlan szak**

**Hazai szántóföldi növényeink vizsgálata az AquaCrop modell  
alkalmazásával**

**Belső konzulens:** Dr.Vekerdy Zoltán  
egyetemi tanár

**Készítette:** Tasnádi Pál

**Intézet/Tanszék:** Környezettudományi Intézet  
Vízgazdálkodási és  
Klímaadaptációs Tanszék

**Gödöllő**

**2024**

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, célkitűzés .....	2
2. Szakirodalmi áttekintés .....	3
2.1. A növénynövekedési modellek .....	3
2.1.1. A növény növekedési modellek történelme .....	3
2.1.2. A növény növekedési modellek osztályozása .....	4
3.1. Az AquaCrop modell .....	6
3.1.1. Az AquaCrop modell eredete .....	6
3.1.2. Az AquaCrop modell kiemelkedő tulajdonságai .....	8
3.1.3. AquaCrop modell számításának sémája .....	8
4.1. Az érzékenységvizsgálatok .....	11
4.1.1. Az érzékenységvizsgálatok jelentősége .....	11
4.1.2. Érzékenységvizsgálatok típusai .....	11
5.1. Távérzékelés és az AquaCrop modell .....	12
5.1.1. Sentinel-2 műholdcsalád .....	13
5.1.2. Vegetációs indexek .....	13
5.1.3. Távérzékelés összekapcsolása növényi növekedési modellekkel .....	14
3. Anyag és Módszertan .....	15
3.1. A vizsgálat helye .....	15
3.2. Szükséges bemeneti adatok az AquaCrop modellbe .....	16
3.3. Műholdképek feldolgozása .....	19
3.3.1. NDVI átszámítása növényborítottságra .....	19
3.4. Validáció .....	20
4. Eredmények, értékelés .....	22
4.1. A durumbúza validációs eredményei .....	22
4.2. A napraforgó validációs eredményei .....	23
4.3. A kukorica validációs eredményei .....	24
4.4. NDVI értékekből számolt növényborítottság felhasználása modellben a durumbúza esetében .....	26
4.5. NDVI értékekből számolt növényborítottság felhasználása modellben a napraforgó esetében .....	30
5. Következtetések, javaslatok .....	34
6. Összefoglalás .....	35
7. Irodalomjegyzék .....	36
8. Ábrák és táblázatok jegyzéke .....	41

## 1.Bevezetés, célkitűzés

A mezőgazdaság jelenleg számos globális kihívással néz szembe, melyek komoly hatással vannak a termelési módokra és stratégiákra. Egyik ilyen kihívás a demográfiai növekedés. A világ népessége jelenleg meghaladja a 7,9 milliárd főt, és az ENSZ becslései szerint 2050-re ez a szám elérheti a 9,7 milliárdot.

A klímaváltozás is súlyos hatást gyakorol a mezőgazdaságra. A szélsőséges időjárások jelentős termésvesztést okozhatnak, ezzel veszélyeztetve a gazdák jövedelmét és a régiók élelmiszerbiztonságát. Ahogy a globális klíma változik, a mezőgazdaságnak alkalmazkodnia kell ezekhez a változásokhoz, hogy fenntarthassa és javíthassa a növénytermelést. Tanulmányok szerint az alkalmazkodás nélkül a klímaváltozás jelentős problémákat okozhat a mezőgazdasági termelésben és a közösségekben a világ számos régiójában (Wall & Smit, 2005).

A környezeti tudatosság növekedése és a szigorú szabályozások a precíziós mezőgazdaság irányába terelik a gazdálkodók figyelmét. Az adatgyűjtés és -feldolgozás lehetővé teszi a gazdálkodók számára, hogy hatékonyabban használják fel az erőforrásokat. Ebben a folyamatban a növény növekedési modellek kiemelt szerepet játszhatnak, mivel segítenek optimalizálni a termelési folyamatokat.

A növényi biomassza vagy terméshozam hatékony előrejelzése érdekében nagy előnnyel jár a távérzékelt adatok integrálása egy növény-növekedési modellbe a hagyományos módszerekhez képest (Ma et al., 2013).

A szimulációs modellek olyan eszközzé váltak, amelyek integrálják az agrárkutatás különböző területeit. Cserébe a modellek tovább segítik a kutatókat és információkat biztosítanak a gazdálkodóknak, hogy hogyan tudnak több élelmiszert termelni kevesebb földterületen, miközben csökkentik a mezőgazdasági gyakorlatok környezeti hatásait (Asseng et al., 2014).

A kutatásom célja az AquaCrop modell kalibrálása volt a Kiszombor területén termesztett durumbúza, napraforgó és kukorica növényekre, amit terepen gyűjtött adatok és a Sentinel-2 műholdas felvételek alapján végeztem. Ezen felül szerettem volna ellenőrizni a létrehozott növényi fájlok megfelelő működését korábbi évek termésadataival. A validációt követően pedig a modell növényborítottság paraméterének érzékenységét kívántam vizsgálni.

## 2. Szakirodalmi áttekintés

### 2.1. A növénynövekedési modellek

#### 2.1.1. A növény növekedési modellek történelme

A növényi modellezés története az 1960-as évekig nyúlik vissza. De Wit 1965-ös, valamint Monteith 1969-es munkái nyújtottak először tudományos alapot arra, hogy hogyan lehet kvantitatív módon értelmezni a napsugárzás és a növényi növekedés közötti kapcsolatot. Ezek az eredmények jelentősen hozzájárultak a fotoszintézis és a biomassza termelés közötti összefüggések matematikai modellezéséhez, megteremtve ezzel a növényi modellek fejlődésének alapjait (Bouman et al., 1996).

Az első növény modelleket az 1970-es években jelentek meg (Loomis & Rabbinge, 1979). Monteith és munkatársai (1977) egy egyszerű lineáris korrelációt írt le a növényi biomassza és a befogadott fény között, ami nagy hatással volt a növénymodellek további fejlesztésében, készítésében. Ennek eredményeként az 1980-as és 1990-es években kifejlesztették az ARC-WHEAT1 (Porter, 1984), a CERES-Wheat (Ritchie & Otter, 1985), és a SUCROS (van Laar et al., 1992) modelleket. Az 1970-es évek elején a növény modelleket elkezdték alkalmazni mezőgazdasági kutatásokban is (Hesketh et al., 1971), majd az 1980-as évek elején Farquhar és munkatársai (1980) publikáltak egy olyan modellt, ami részletesebben szimulálta a levelek fotoszintézisét, aminek számítási módját még ma is alkalmazott modellek használják (Asseng et al., 2014).

Az 1990-es évekre már számos növényre volt kialakítva modell, ezért elkezdték ezeket különböző platformokban összevonni. Így jött létre a DSSAT (Jones et al., 2003) is, amely ma már több mint negyvenkettő növény modelljét tartalmazza. Jelentős platform még az APSIM (Keating et al., 2003), a CropSyst (Stöckle et al., 2003) és az EPIC (Kiniry et al., 1995) is.

A 2000-es években a kutatók további fejlődést értek el a növények modellezésében. Például a SIRIUS modell (Martre et al., 2006) és a WheatGrow modell (Pan et al., 2006) tartalmaz szimulációt a búzaszem minőségéről. Ahogy az időben tovább haladunk, a kutatók még több növény modellt hoztak létre, amik különböznek a megközelítésükben és az összetettségükben,

mint például a HERMES (Kersebaum, 2007) és az Aquacrop (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009) modell.

Ma már számos modell létezik különböző növények szimulációjára, például kukoricára legalább harminc modell létezik, búzára pedig tizenkilenc. Bár a növény modellek tesztelése szántóföldi kísérleti adatokkal még mindig fontos része a modellek továbbfejlesztésének (Asseng et al., 2004), egyre gyakrabban alkalmazzák a modelleket szimulációs kísérletekben.

### 2.1.2. A növény növekedési modellek osztályozása

Általánosságban elmondható, hogy a növény növekedési modellek több összefüggő egyenlet felhasználásával becsülik meg a biomassa termelését olyan erőforrásokból, amelyeket a növény felhasznál az életfolyamataihoz.

A modellek osztályozására több megközelítés is létezik. Motha (2011) a növényi modelleket empirikus és mechanisztikus kategóriákba sorolta. Az empirikus modellek olyan egyenletekből áll, amelyek a növények vízre és mezőgazdasági kezelési tényezőkre, például a műtrágyázásra adott válaszreakcióit írják le. A mechanisztikus modellek ezzel szemben a számításukba beépítik a növények fiziológiai folyamatait, ahogyan azok a környezeti tényezőkkel kölcsönhatásba lépnek. A modellek másik csoportosítási lehetősége a növény életfolyamataihoz felhasznált erőforrásokat veszi alapul, hiszen mindegyik modell valamilyen formában ebből becsüli meg a biomassa termelődését összefüggő egyenletek segítségével. Ilyen erőforrás a szén-dioxid, a napsugárzás és a víz, ennek megfelelően három fő növény növekedési modell típust lehet megkülönböztetni: szénalapú, sugárzásalapú és a vízalapú (Todorovic et al., 2009).

A szén alapú modelleknél a növény növekedésének alapja a levelek által a fotoszintetikus folyamatokon keresztül történő szén-dioxid asszimiláció. Ezt a megközelítést de Wit és munkatársai fejlesztették ki 1970-ben kiadott munkájukban (Bouman et al., 1996). Ilyen modell a WOFOST (van Diepen et al., 1989) és a CROPGRO (Boote K. J. and Jones, 1998) modell, ami a DSSAT modellkészletébe van beépítve. Az ilyen típusú modellezési megközelítésnél a növekedési folyamatokat és a fenológiai fejlődést a hőmérséklet, a napsugárzás és a széndioxid koncentráció szabályozza (Todorovic et al., 2009). A modellek e kategóriája hierarchikus felépítésűek, amelyben a modell szintekbe szerveződik, ahol a magasabb szintű reakciók a kisebb szintű folyamatok összesített kombinációjából jönnek létre (Bouman et al., 1996). Ennek a következménye és egyben hátrányai is, hogy a szén alapú modellek alkalmazásához nagyon

részletes és nagy mennyiségű paraméterre van szükség a megfelelő kalibráláshoz. Ez a jelenség gyakran korlátozó tényezőként hat, ami akadályozza a modell használatát kutatásokban (Todorovic et al., 2009).

A napsugárzáson alapuló modellek alapvető koncepciója, hogy a biomassa termelés arányos a sugárzási hasznosulási hatékonysággal (RUE). Ez a hatékonyság azt jelzi, mennyire képes a növény a beérkező napsugárzást biomassa termelésre fordítani. Ilyen modell például a CERES-Wheat, és az EPIC. Ezek a modellek egyszerűbb felépítésűek, így kevesebb paraméter szükséges a kalibrálásukhoz, mint a szénalapú modellek esetében, mivel nem alkalmazzák a hierarchikus szintekre való felosztást és a részletesebb alacsony szintű folyamatok leírását (Todorovic et al., 2009). Azonban ezeknek a modelleknek hátrányai is vannak, többek között a sugárzási hasznosulási hatékonyság becslésének inkonzisztenciái különböző növények és növénycsoportok (C3, C4) között, valamint a RUE változékonysága különböző területeken és évről évre (Steduto & Albrizio, 2005). Ezek a korlátok csökkentik a modell alkalmazhatóságát előrejelzésekre és a modell általános megbízhatóságát (Steduto & Albrizio, 2005).

A víz vezérelt modellek esetében a biomassa növekedési üteme közvetlenül arányos azzal a sebességgel, amellyel a növény a vizet párologtatja, ezt a kapcsolatot a víz termelékenységi (WP) paraméteren keresztül modellezik (Todorovic et al., 2009). Ilyen modellek például az Aquacrop és a CropSyst. Azonban az utóbb megemlített modell valójában egyaránt víz és napsugárzás vezérelt (Stöckle et al., 2003). Bauböck (2014) szerint a CropSyst modellben a biomassa és a transzpiráció kapcsolata instabillá válik alacsony gőznyomás-deficit esetén, és ennek eredményeként a fő működése a modellnek a napsugárzáson alapul. Ennek eredményeképpen, jelenleg kizárólag az AquaCrop modell áll rendelkezésre, ami tisztán vízen alapuló modell.

A víz vezérelt modellek előnye a napsugárzás vezérelt modellekkel szemben abban rejlik, hogy lehetővé teszi a WP normalizálását a klimatikus viszonyok figyelembevételével, feltéve, hogy a normalizációt a referencia evapotranspirációs rátán keresztül végzik, és nem pedig a gőznyomás-deficit alapján (Steduto & Albrizio, 2005). A WP paraméter konzervatív jellege lehetővé teszi a víz vezérelt modellek használatát különböző területekre és jövőbeli éghajlatokra is, amikor a széndioxid koncentrációjának növekedése várható (Steduto et al., 2007).

## 3.1. Az AquaCrop modell

### 3.1.1. Az AquaCrop modell eredete

Az AquaCrop modell, az Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezet (FAO) által lett kifejlesztve, az első verziója 2009-ben jelent meg.

A modell Doorenbos és Kassam 1979-ben kidolgozott egyenlőségből fejlődött ki, amely összekapcsolja a növény terméshozamának relatív veszteségét az evapotranspiráció relatív csökkenésével egy  $K_y$  tényező által (Steduto et al., 2009):

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_X}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_X}\right)$$

ahol  $Y_X$  a maximum terméshozam, az  $Y$  a tényleges terméshozam,  $(1-Y/Y_X)$  a relatív terméshozam-csökkenés,  $ET_X$  a maximális evapotranspiráció,  $ET$  a tényleges evapotranspiráció,  $(1-ET/ET_X)$  a relatív vízstressz, és  $K_y$  a relatív terméshozam-csökkenés és az evapotranspiráció relatív csökkenése közötti arányossági tényező.

A fenti egyenlőséget felhasználva a modell szimulációját pontosították két kulcsfontosságú elválasztás alkalmazásával:

- (1.) A modellalkotás során az aktuális evapotranspiráció számítása nagyon fontos szerepet játszik a vízgazdálkodás hatékonyságának megítélésében. A modell ezen a területen azáltal biztosít nagyobb pontosságot, hogy különbséget tesz a növény tényleges párologtatása és a talajfelszín párologása között. Ez a megkülönböztetés lehetővé teszi, hogy a modell pontosabban becsülje meg a víz produktív felhasználását, vagyis azt a mennyiséget, amely közvetlenül a növény növekedését támogatja, ellentétben azzal a vízmennyiséggel, amely pusztán párologás révén távozik a légkörbe. Ez a differenciálás különösen akkor válik kritikussá, amikor a vegetációs időszak korai szakaszában a talajfedettség hiányos. Ilyenkor a talajfelszín párologása aránytalanul magas lehet a növényi párologtatáshoz képest, amivel, ha nem számolnánk, jelentős hibát okozna a vízgazdálkodás szimulációjában.
- (2.) A második fontos elválasztás a terméshozamot bontja le megtermelt biomasszára és betakarítási indexre. Ez a megkülönböztetés lehetővé teszi, hogy pontosabban értelmezhesük és kezelhesük a környezeti feltételek hatásait a növény termelésére. A

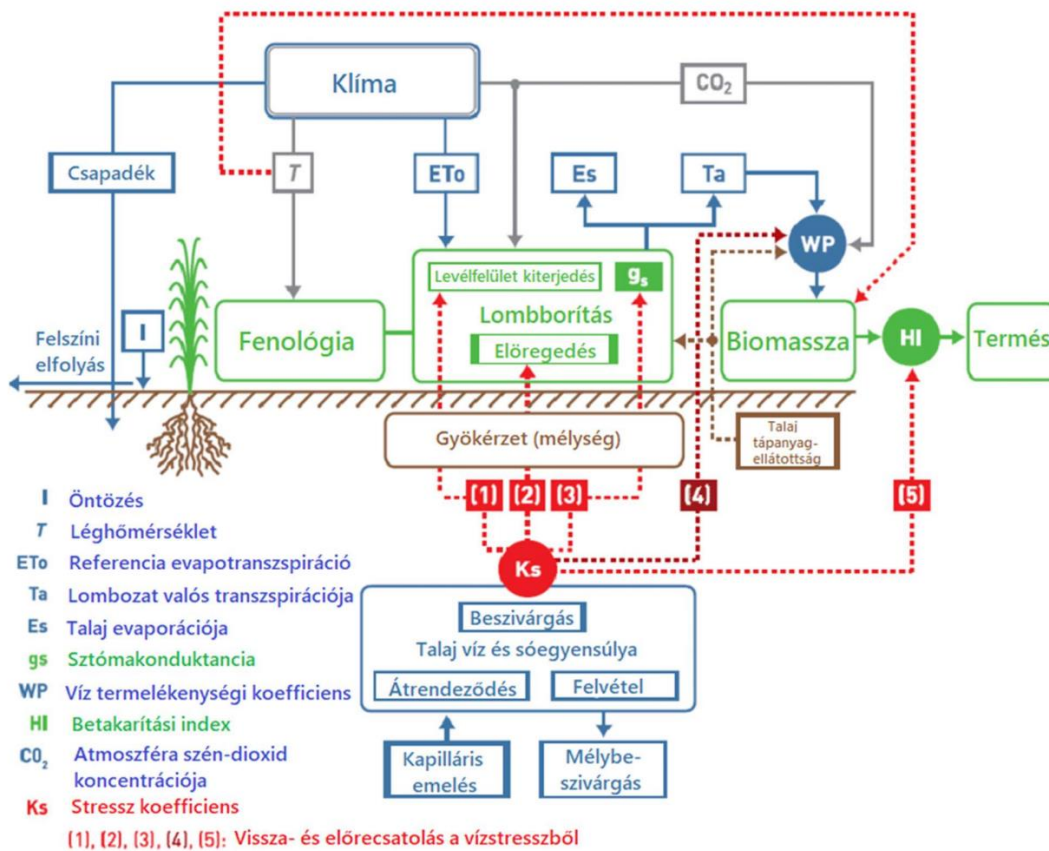


biomassza termelés és annak terméshozammá való alakulása ugyanis eltérő módon reagálhat a különböző környezeti tényezőkre, mint például a hőmérséklet, talajminőség, vízellátottság és más abiotikus stresszorok.

Ez a két elválasztás a következő egyenlőségekhez vezet, ami az AquaCrop központi eleme:

$$B = WP \cdot \sum Tr$$

ahol WP a víz termelékenysége, a Tr a növény transzpirációja, és B a biomassza mennyisége. Ez az egyenlet lényegre törően foglalja össze a modell alapfeltevését, miszerint a biomassza termelés, és ezen keresztül a terméshozam, elsősorban a növény által leadott víz mennyiségétől függ. A modell ezen a formulán alapul, de további komponensekkel is kiegészül, amelyek szintén befolyásolják a növény növekedését és termelékenységét (1. Ábra). Ilyenek például a környezeti tényezők, mint a hőmérséklet és a csapadék, a talaj tulajdonságai, illetve a gazdálkodási gyakorlatok, mint az öntözés és a talaj mulcsozása melyek szintén számottevő hatással bírnak a biomassza termelésre.



1. Ábra: A modell komponensei közötti funkcionális kapcsolatok (Steduto et al, 2009). Az ábrát fordította Takács (2019).

### 3.1.2. Az AquaCrop modell kiemelkedő tulajdonságai

Az AquaCrop modell kifejlesztésének egyik fő célja az volt, hogy megoldást nyújtson a többi gyakorlatban alkalmazott modell komplexitásából adódó problémákra (Steduto et al., 2009).

Az Aquacrop modell egyik kiemelkedő tulajdonsága a többi modellhez képest a szükséges paraméterek számában van. Míg például a szén-alapú modelleknél, mint a WOFOST, amelyek részletesek és hierarchikusan felépítettek, negyvenkilenc nehezen megmérhető paraméter szükséges a modell futtatásához, addig az AquaCrop csupán harminchárom paramétert használ. Ezek a paraméterek többsége könnyen megfigyelhető a terepen, vagy egyszerű módszerekkel meghatározható. A program segítséget is nyújt egyes paraméterek megfelelő beállításához leírásokkal, amelyekből akár meg is becsülhetjük a kérdéses paramétereket adatok hiányában (Todorovic et al., 2009).

Az AquaCrop egyik legfontosabb, hogy a növény transzpirációjához és így a biomassza termeléséhez szükséges növényfelületet a kutatók által jól ismert levélfelület-index helyett a lombkorona talajfedettségének arányaként határozza meg. Ez jelentősen egyszerűsíti a szimulációt, mivel a lombkorona fejlődését egy matematikai függvénnyel modellezi. Ennek a paraméternek a használata azért is előnyös, mert szemrevételezéssel is becsülhető, illetve távérzékeléses módszerekkel is meghatározható és írható be a modellbe. (Steduto et al., 2009).

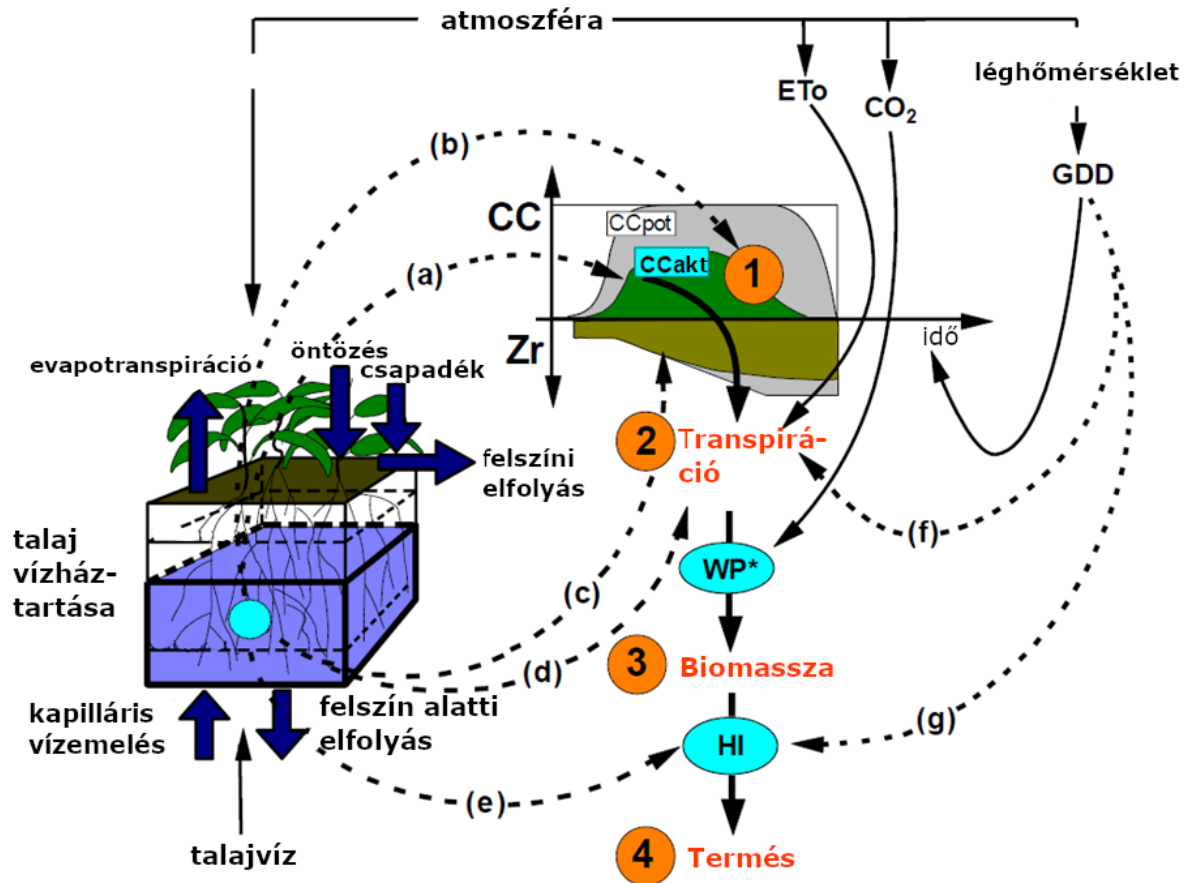
A modell célközönsége azok a felhasználók, akiknek egy egyszerű és megbízható eszközre van szükségük döntéshozatalukhoz, mint például a gazdálkodók, a mezőgazdasági tanácsadók és az öntözési tervezők (Hsiao et al., 2009). Ugyanakkor a modell elég pontos és robusztus az egyszerűsége ellenére is, mivel kellő hangsúlyt fektet a növény fontos élettani folyamataira és az agronómiai gyakorlatokra (Steduto et al., 2009).

### 3.1.3. AquaCrop modell számításának sémája

Az AquaCrop modell, amely napi időléptéssel működik, négy fő lépésben modellezi a növényfejlődést és a termés kialakulását, így biztosítva a részletes és pontos előrejelzést a mezőgazdasági termelésben. A modell szimulációs folyamata az alábbi lépésekből épül fel: (1) lombkorona fejlődés, (2) növény párologtatás, (3) biomassza termelés, és (4) terméshozam (2. Ábra) (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

1. A modell a talaj vízháztartásának időbeli szimulációjával kezdi a növény fejlődésének modellezését, figyelembe véve a kultúrnövény jellemzőit, az aktuális időjárási körülményeket, a talaj jellemzőit, az öntözési és gazdálkodási technikákat. A modell első lépése során a lombkorona fejlődését becsüli meg, amit a növény borítottságának százalékos arányával fejez ki. A növényborítottság (CC) azt mutatja, hogy a lombkorona milyen mértékben takarja le a talajfelszínt. A hőmérséklet által meghatározott növekedési napok, azaz hőfoknapok (GDD) alapján a növényborítottság értéke a csírázástól kezdve fokozatosan növekszik, egészen addig, amíg a növény lombzata teljesen be nem fedi a talajfelszínt. Ekkor a levélborítás eléri az 1.0, azaz 100%-os értéket, amely a talaj teljes lefedettségét jelenti. A modell ezen felül naponta nyomon követi a gyökérszónában kialakuló stresszhatásokat is. Ez kulcsfontosságú, mert a gyökérszóna állapota közvetlenül befolyásolja a növény leveleinek egészségét és fejlődését. Amennyiben jelentős stressz alakul ki (például aszály következtében), az befolyásolhatja a lombzat növekedését és akár korai öregedést is okozhat a növényben, ami negatívan érinti a terméshozamot és a növény általános állapotát.
2. A második lépés a növény párologtatásának meghatározása, ami közvetlenül kapcsolódik a növényborítottsághoz. Ebben a fázisban a modell figyelembe veszi a növény lombzatának aktuális állapotát, melyet a nap folyamán mért növényborítottság alapján számol. A modell különös figyelmet fordít a vízhiány által okozott stresszhatások figyelembevételére ebben a fázisban is, hiszen a vízhiány nem csak azt befolyásolja, hogy mennyire fejlődik a lombzat, hanem a levelek sztómáinak működésére is hatással van. Amikor a növény vízhiányos állapotban van, a sztómák bezárulnak a vízvesztés minimalizálása érdekében, ami csökkenti a transzpirációt.
3. Az AquaCrop modell harmadik lépésében a napi biomassza termelést számítja ki a normalizált víz termelékenységi faktor és a napi transzpiráció alapján. A normalizált víz termelékenység (WP\*) figyelembe veszi a klíma-specifikus változókat, mint például a hőmérsékletet, amely befolyásolja a vízhasználat hatékonyságát és így a biomassza termelést is.
4. A negyedik lépés a terméshozam (Y) számítása a szimulált felszín fölötti biomasszából, amely magában foglalja a növekedési ciklus során a növény által asszimilált összes felszín fölötti fotoszintetikus terméket. A terméshozam meghatározásához a modell a betakarítási

indexet (HI) alkalmazza, ami azt az arányt jelzi, hogy a növény teljes biomasszájának hányada valós termés. A számítás elvégzése során a modell figyelembe veszi a vízhiány és a hőmérséklet okozta stresszhatásokat is, amelyek módosíthatják a betakarítási index értékét. Így a betakarítási index korrekcióján keresztül a modell képes pontosan meghatározni a terméshozamot a környezeti hatások figyelembevételével.



2. Ábra: Az AquaCrop számolási menetének sémája. A szaggatott nyilak a vízstressz (a-tól e-ig) és hőmérséklet általi stressz (f-től g-ig) által érintett folyamatokat jelöli. (Steduto, 2009)

Saját fordítás

## 4.1. Az érzékenységvizsgálatok

Az érzékenységvizsgálat egy kulcsfontosságú módszer a bizonytalanságelemzés terén, amely a modellparaméterek változtatásának a kimeneti változókra gyakorolt hatását vizsgálja. Ennek során a modell különböző bemeneti paramétereit szisztematikusan módosítják, hogy megfigyelhessék, hogyan befolyásolják ezek a változtatások a modell kimenetét (Klepper, 1997; Green & Whitemore, 2005; Confalonieri et al., 2010).

### 4.1.1. Az érzékenységvizsgálatok jelentősége

A modellek ilyen típusú elemzése lehetőséget biztosít arra, hogy azonosítsuk azokat a paramétereket, amelyek nagy, illetve kis hatással bírnak a modell működésére. Ezáltal jelentősen leegyszerűsíthetjük a modell kalibrációjának a folyamatát. Emellett segít megérteni a különböző modulok és folyamatok közötti összefüggéseket, ami nélkülözhetetlen a modell működésének optimalizálásában. Az elemzés felfedheti azokat a helyzeteket is, ahol a modell struktúrája nem kiegyensúlyozott, azaz a modell teljesítményét csak néhány paraméter befolyásolja túlzott mértékben. Ennek felismerése lehetővé teszi, hogy a modell fejlesztői pontosabban és célirányosabban javíthassanak a modellen, növelve annak pontosságát és megbízhatóságát (Cariboni et al., 2007; Confalonieri et al., 2010; Nossent et al., 2011; Pianosi et al., 2016; Vanuytrecht et al., 2014).

### 4.1.2. Érzékenységvizsgálatok típusai

Az érzékenységvizsgálatok két fő kategóriája, a lokális és a globális vizsgálatok. Ezek különböző módszertani megközelítéseket alkalmaznak a modell kimeneteinek érzékenységének értékelésére (Cariboni et al., 2007; Saltelli et al., 2000).

Lokális érzékenységvizsgálat alkalmazásánál azt figyeljük meg hogy milyen hatással lesz a modell kimenetére egy paraméter megváltoztatása, míg a többi paramétert egy fix értéken hagyjuk, ezzel ellentétben a globális érzékenységvizsgálatnál egy tartományon belül egyszerre több vagy az összes bemeneti tényezőt változtatjuk, és az együttes hatásokat mérjük meg a modell kimenetére (Saltelli et al., 2000).

A lokális érzékenységvizsgálatok előnye, hogy egyszerűségük és közvetlen alkalmazhatóságuk révén könnyen használhatóak. Ugyanakkor ez a módszer bizonyos korlátokkal is bír, különösen akkor, ha bonyolult, nemlineáris folyamatokat kell elemezni, mint amilyenek gyakran megtalálhatóak a növényi növekedési modellekben. A nemlineáris rendszerekben a változók egymással való kölcsönhatása döntően befolyásolhatja a modell kimenetelét. Mivel ez a fajta érzékenységvizsgálat nem veszi figyelembe a változók közötti interakciókat, félrevezető eredményeket produkálhat, amelyek eltérhetnek a valóságtól. Emiatt ez a módszer nem mindig nyújt megbízható betekintést a modell tényleges működésébe (Saltelli & Annoni, 2010).

A globális érzékenységvizsgálatok komplex és átfogó megközelítést alkalmaznak, jelentős számítási erőforrásokat igényelve, mivel egyszerre több, változó tartományban lévő paramétert vizsgálnak. Ennek ellenére, ezek a módszerek kritikusak a modell valós viselkedésének megértéséhez, mivel képesek figyelembe venni a paraméterek közötti kölcsönhatásokat és a nemlineáris reakciókat. Emellett a globális vizsgálatok átfogó képet adnak arról, hogy a különböző bemeneti kombinációk hogyan befolyásolják a modell kimenetét, lehetőséget biztosítva ezzel a kulcsparaméterek azonosítására és a modell teljesítményének optimalizálására. Ezáltal elengedhetetlenek a modell alapos elemzéséhez és a hatékony döntéshozatali folyamatokhoz komplex rendszerek esetében (Cariboni et al., 2007; Saltelli & Annoni, 2010).

## 5.1. Távérzékelés és az AquaCrop modell

A távérzékelés az a folyamat, amikor információkat gyűjtünk valamiről anélkül, hogy közvetlen fizikai kapcsolatba lépnénk vele (Fischer et al., 1976). A mezőgazdaságban ez különösen hasznos, mert lehetővé teszi a növények és mezőgazdasági területek megfigyelését és elemzését anélkül, hogy közvetlenül jelen lennénk a helyszínen.

A távérzékelési adatokat különböző felületekről gyűjthetjük, beleértve a műholdakat, repülőgépeket, és a pilóta nélküli légi járműveket (Bregaglio et al., 2015). Ezek az eszközök különféle típusú szenzorokkal vannak felszerelve, amelyek képesek a látható fény, az infravörös, és egyéb spektrumokban történő megfigyelésre.

### 5.1.1. Sentinel-2 műholdcsalád

Az Európai Űrügynökség által kezelt Sentinel-2 műholdrendszer, beleértve a Sentinel-2A és Sentinel-2B ikerműholdakat, kulcsfontosságú szerepet játszik a Föld felszínének megfigyelésében, különösen a szárazföldi területek részletes vizsgálatában. Ezek a műholdak öt napos visszatérési idővel nagy felbontású optikai felvételeket biztosítanak, amelyek lehetővé teszik a földfelszín változásainak pontos követését (Phiri et al., 2020).

A Sentinel-2 műholdrendszer képei tizenhárom különböző spektrális sávban rögzítődnek, amelyek között változó a térbeli felbontás: négy sáv rendelkezik tíz méteres, hat sáv húsz méteres, míg három sáv hatvan méteres felbontással. Ezen belül a látható és a közeli infravörös sávok térbeli felbontása tíz méter, az infravörös sávoké húsz méter, míg a többi sávé hatvan méter (Chastain et al., 2019; Immitzer et al., 2016).

A Sentinel-2 műholdrendszer látható és a közeli infravörös sávok kiemelkedően részletes térbeli felbontásának köszönhetően, valamint a műholdak gyakori, rövid visszatérési idejének eredményeképpen, különösen értékes eszközt jelentenek a mezőgazdaság számára. Ez a magas felbontású képalkotó képesség lehetővé teszi a növényi fedettség változásainak, valamint a termőterületek állapotának pontos és részletes megfigyelését (Phiri et al., 2020).

### 5.1.2. Vegetációs indexek

A növényzet állapotának elemzésére kifejlesztett vegetációs indexek azon elven alapulnak, hogy az egészséges növényzet erősen visszaveri a közeli infravörös spektrumot, miközben intenzíven elnyeli a látható vörös fényt. A spektrális sávok ezen tulajdonságainak kombinálásával jönnek létre a különböző vegetációs indexek (Kasampalis et al., 2018).

Az évek során számos vegetációs indexet hoztak létre (Xue és Su., 2017). A két leggyakrabban használt vegetációs index az NDVI (Normalizált Vegetációs Index) és az EVI (Kiterjesztett Vegetációs Index).

Az NDVI-t már a 70-es évek óta használják a növények állapotának felmérésére. (Xue és Su, 2017)

Számos tanulmány használta az NDVI-t a növények növekedésének elemzésére, valamint a terméshozam becslésére. Ezen tanulmányok többségében az alapstratégia az, hogy lineáris

regressziós modelleket használnak a távérzékeléssel nyert indexek alapján történő termés hozam előrejelzésére a növekedési időszak alatt (Jiang et al., 2006).

Az EVI, vagyis a Kiterjesztett Vegetációs Index, az NDVI korlátjainak kezelésére jött létre. Ez az index nemcsak a közeli infravörös (NIR) és a vörös (RED) tartományokat veszi figyelembe, hanem a kék (Blue) tartományt is méri, amivel képes az időbeli eltérések okozta anomáliák korrigálására. Az EVI tehát az NDVI továbbfejlesztett változata, amely finomabban reagál a biomassza változásaira, a légköri viszonyokra és a talajfelszín által okozott eltérésekre, ezáltal hatékonyabban szűri ki a környezet zavaró tényezőit. Az EVI értékei, hasonlóan az NDVI-hoz, 0 és 1 között mozognak, ahol az 1-hez közelebbi értékek a növény jobb egészségi állapotát, míg a 0-hoz közelebbi értékek valamilyen stresszállapotot jeleznek (Xue és Su, 2017).

### 5.1.3. Távérzékelés összekapcsolása növényi növekedési modellekkel

A távérzékelés értékes információkat szolgáltat, amelyeket növényi növekedési modellekkel kombinálva használhatunk a termés hozam becslésére.

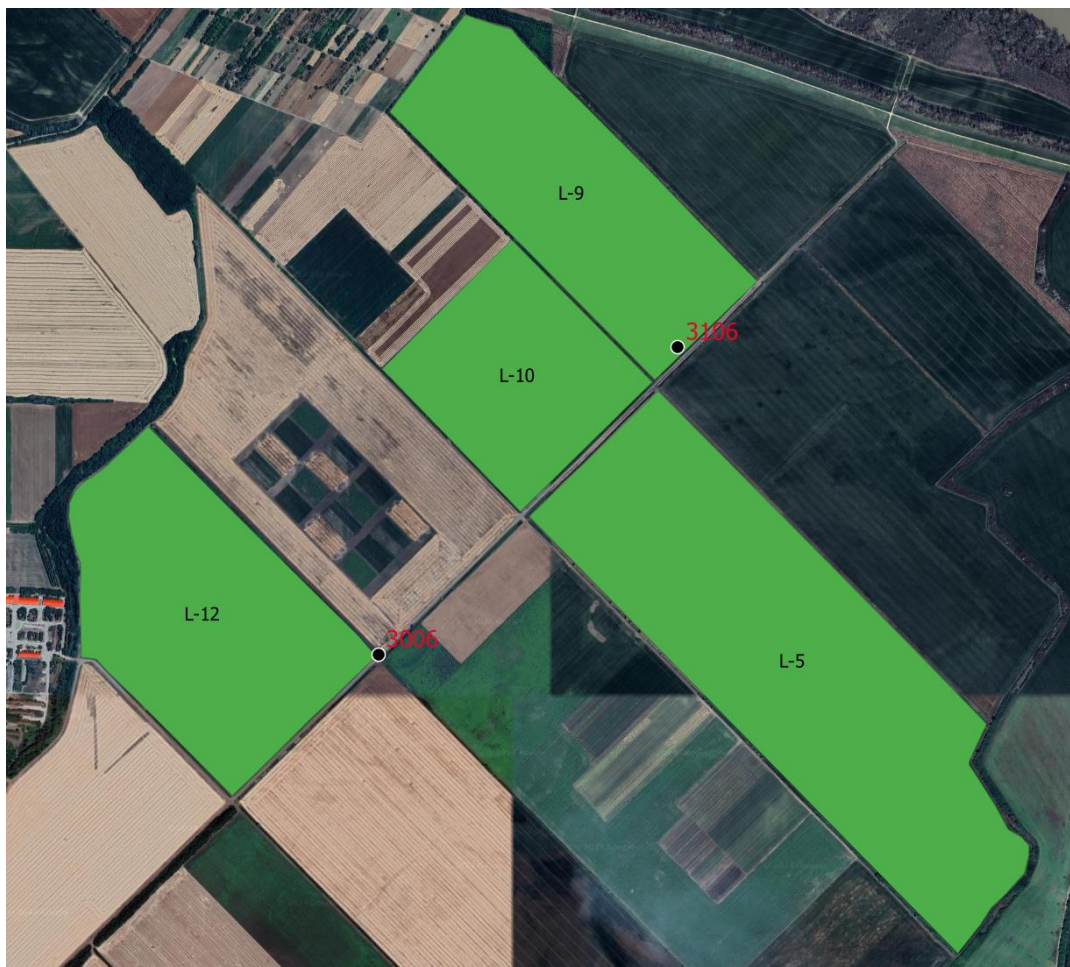
A távérzékelési adatok integrálhatók a növény növekedési modellekbe, biztosítva valóságos empirikus információkat a növény növekedési állapotáról az életciklusa során, és ezen keresztül figyelembe vehetik a növények környezetében lévő térbeli változékonyságot. Delécolle és munkatársai (1992) két fő megközelítést különböztetnek meg: a kényszerítést és az újra kalibrálást. A kényszerítés során a modell állapotváltozóit távérzékelésből származó becslésekkel helyettesítik vagy állítják be. Az újra kalibrálás során a modell paramétereit vagy kezdeti feltételeit állítják be a távérzékelési megfigyelések alapján.



### 3. Anyag és Módszertan

#### 3.1. A vizsgálat helye

A vizsgálatomban szereplő táblák Dél-Magyarország területén, Csongrád- vármegyében, Kiszombor (46° 10' 59.99" É, 20° 25' 59.99" K) belterületétől DK-i irányban az országhatár közeli területen helyezkednek el és a Szeredi Kft. tulajdonában vannak (3. Ábra). A terület tengerszint feletti magassága 78 méter. Éghajlata meleg, száraz. A napsütéses órák száma évi 2020 körüli. Az évi középhőmérséklet 10,5-10,6 °C. A kultúrnövények tenyész időszaka 200-202 nap, a fagymentes időszak 200 nap. A legmagasabb nyári hőmérsékletek sokévi átlaga 34 °C. A legalacsonyabb téli hőmérséklet -17 °C. Az évi csapadékösszeg 570 mm körüli és a vegetációs időszakban 320-340 mm csapadék várható.



3. Ábra: A Vizsgált táblák és a talajmintavételi helyek (Forrás: saját munka)

## 3.2. Szükséges bemeneti adatok az AquaCrop modellbe

A kutatásom az AquaCrop 7.1-es verzióját használtam. A modellnek hat bemeneti fájlra van szüksége a szimuláció lefuttatásához: I. klíma fájl, II. talaj fájl, III. kultúrnövény fájl, IV. öntözés fájl, V. művelés fájl és VI. talajvíz fájl. A fájlokat mind a felhasználó állítja be a vizsgálatához szükséges módon. Meg kell említeni, hogy a fájlokat nem szükséges saját magunk által létrehozni, vannak alap beállítású bemeneti fájlok, amiket a felhasználó módosítani tud. A felsorolt szükséges fájlok közül nem készítettem öntözés fájlt, művelés fájlt és talajvíz fájlt. Ennek indoka, hogy a növények nem voltak öntözve, megfelelő tápanyagmennyiséggel voltak ellátva, illetve 2022-es talajvédelmi terv készítésekor nem találtak a táblákon két méter mélységig talajvizet.

### I. Klíma

A klíma fájl létrehozásához három alfájlról van szükség: napi minimum és maximum hőmérséklet, napi referencia evapotranspiráció ( $ET_0$ ), napi csapadékmennyiség. Az  $ET_0$  a modell a FAO Penman-Monteith egyenlőséggel (Allan et al., 1998) számolja ki, illetve a szükséges adatok hiányában beépített tényezők segítségével megtudja becsülni.

Az időjárás adatait az Országos Meteorológiai Szolgálat által fenntartott Meteorológiai adattárból (odp.met.hu) töltöttem le a 2014.05.22.-2023.02.27.-as időszakra. Az automata mérőállomás Kiszomborban található meg, nem messze a vizsgált tábláktól. A mérőállomás száma 58213. A letöltött adatok tartalmazzák napi maximum hőmérsékletet ( $^{\circ}C$ ), napi minimum hőmérsékletet ( $^{\circ}C$ ), napi átlaghőmérsékletet ( $^{\circ}C$ ), napi csapadékmennyiséget (mm), illetve napi átlagos szélsebességet (m/s). A nettó sugárzást az állomáson nem mérik, ennek az adatnak a hiánya miatt az  $ET_0$  a vizsgálatban becsülve lett a modell által.

### II. Talaj

A vizsgált területek karbonátos réti talajok, illetve karbonátos humuszos öntéstalajok. A modellben felhasznált talaj paraméterek 1992-ből származnak, a Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer (TIM) által lettek mérve.

A talajmintákban a szemcsefrakciók a nemzetközi, Atterberg-féle osztályozás szerint voltak megadva, így először meg kellett határoznom, az agyag, az iszap és a homok százalékos arányát. A kiszámolt százalékokból az Amerikai Egyesült Államok Talajtani Szolgálat

(USDA) által készített textúra háromszög diagramm segítségével azonosítottam be a különböző mélységek talajtextúráját. Az adatsor továbbá tartalmazott holtvíztartalmat (pF 4,2), szabadföldi vízkapacitást (pF 2,5), és maximális vízkapacitást (pF 0) három mélységben mintánkként (1. táblázat). A hidraulikus vezetőképességről (Ksat) nem volt adat, ezért a modell által megadott alapbeállítást használtam, amit a modell az adott talaj textúrához állít be.

A szimulációhoz mindig az adott táblához legközelebbi talajadat fájlt használtam.

1. táblázat: A talajfajokhoz felhasznált paraméterek (Forrás: TIM és AquaCrop)

<b>fájl név</b>	<b>mélység</b>	<b>textúra</b>	<b>agyag (%)</b>	<b>homok (%)</b>	<b>iszap (%)</b>	<b>pF 0</b>	<b>pF 2,5</b>	<b>pF 4,2</b>	<b>Ksat</b>
3006	0-40cm	agyag	43,0	27,0	30,02	46,96	42,12	27,62	35
	40-90cm	homokos agyagos vályog	22,1	58,7	19,13	42,65	36,05	20,10	225
	90-150cm	homokos vályog	16,8	70,2	12,97	43,87	34,05	15,72	1200
3106	0-60cm	agyag	43,8	21,2	34,97	49,32	43,22	30,20	35
	60-100cm	agyagos vályog	34,7	32,6	32,69	47,45	40,43	29,04	125
	100-150cm	agyagos vályog	32,4	39,3	28,27	46,81	38,65	22,99	125

### III. Kultúrnövények

A vizsgálatomban három fontos termesztett növényünket, a durumbúzát, a kukoricát és a napraforgót vizsgáltam, mindegyik kultúrnövény esetében egy-egy fajtát.

A kultúrnövény fájlja tartalmaz konzervatív paramétereket (helytől és időtől független), illetve felhasználó specifikus paramétereket (helytől/ időtől függő). A felhasználó specifikus paraméterek egy részét a terepi tapasztalok alapján állítottam be (2. táblázat), amiről a Szeredi Kft nyújtott információt. Amiket a terepi megfigyelésekből nem tudtam beállítani, azokat műhold képek segítségével tudtam megbecsülni. Ilyen időpontok a maximális növényborítottság elérése, és a lombzat öregedésének kezdete. Ezeket a paramétereket a Sentinel-2 műholdképeiből kiszámolt NDVI index idősoros megjelenítésével határoztam meg.

A növény beállítása során a modellben lehet választani, hogy kalendárium napokban vagy hőösszeg napokban szeretné-e a felhasználó megadni a fenológiai fázisokat. A szimulációkban

hőösszeg napot alkalmaztam, annak érdekében, hogy a valósághoz hasonlóbb állapotban szimuláljam a kultúrnövények viselkedését (Steduto et al., 2009). A modellben felhasznált paramétereket a 3. táblázat mutatja be.

2. táblázat: A modell kalibrációjához felhasznált terepi adatok (Forrás: Szeredi Kft.)

	Sambadur	Jaguár XL	Scorpius
Tábla azonosító	L-12	L-9	L-5
vetés	2022.10.10.	2020.04.15.	2023.04.27.
kelés	2022.10.18.	2020.05.03.	2023.05.23.
virágzás kezdete	2023.05.21.	2020.07.04.	2023.07.13.
virágzás vége	2023.05.28.	2020.07.25.	2023.07.19.
érettség elérése	2023.06.28.	2020.09.06.	2023.09.01.
betakarítás	2023.07.08.	2020.09.10.	2023.09.21.

3. táblázat: Az AquaCropban felhasznált paraméterek. GDD a hőösszeget jelenti. (Forrás: Saját munka)

paraméterek	Durumbúza	Napraforgó	Kukorica
kezdeti levélborítottság	6,97%	0,29%	0,42 %
összegyűlt hőösszeg az állomány csírázásáig	118 GDD	86 GDD	82 GDD
maximális növényborítottság	85%	85%	80%
összegyűlt hőösszeg a maximális növényborítottságig	1684 GDD	985 GDD	703 GDD
összegyűlt hőösszeg virágzás kezdetéig	1799 GDD	1022 GDD	854 GDD
virágzás hossza	139 GDD	399 GDD	149 GDD

összegyűlt hőösszeg a lombozat öregedésének kezdetéig	1615 GDD	1493 GDD	1092 GDD
érettség eléréséig összegyűlt hőösszeg	2592 GDD	2080 GDD	1627 GDD
maximális gyökérmélység	1 méter	2 méter	2 méter
összegyűlt hőösszeg a maximális gyökérmélységig	1589 GDD	917 GDD	854 GDD
referencia betakarítási index	44%	26%	48 %

### 3.3. Műholdképek feldolgozása

A Sentinel-2 műholdas képeket, amelyek második szintű feldolgozáson mentek keresztül, a Copernicus program webes felületéről, a Copernicus Open Access Hub-ról (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) szereztem be. Első lépésként kijelöltem azokat a területeket, amelyeket vizsgálni szerettem volna. A kijelölés során figyelembe vettem, hogy a mezőgazdasági tábla szélétől két pixellel beljebb helyezkedjen el a kijelölt zóna, hogy elkerüljem a műveletlen területek növényzetének zavaró hatását az NDVI értékekre. Ezután lekértem az összes műholdfelvételt az adott év vegetációs időszakára. A lekért képek közül kiszűrtem és eltávolítottam azokat, amelyek felhővel voltak borítva, így tisztítva az idősoromat a zavaró elemektől.

Miután minden előkészítő lépést elvégeztem, az idősorban rögzített NDVI értékeket Excel formátumban töltöttem le a további feldolgozáshoz.

#### 3.3.1. NDVI átszámítása növényborítottságra

Több módszer létezik arra, hogy az NDVI értékekből növényborítottságot számoljunk (Jiang, Huete, Chen, Chen, Li, Yan, & Zou, 2006). A vizsgálatomban Gutman & Ignatov (1998) által leírt skálázott NDVI módszert használtam, aminek az egyenlete a következő:

$$CC = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_\infty - NDVI_S}$$

Az egyenletben a CC a levélborítás, NDVI az aktuális NDVI érték, az NDVI<sub>S</sub> a csupasz talaj NDVI értéke és az NDVI<sub>∞</sub> a sűrű vegetáció NDVI értéke.

Az NDVI<sub>S</sub> és az NDVI<sub>∞</sub> értékek meghatározása nehéz és bizonytalanságokkal jár (Liu et al., 2012). Az értéket számos környezeti tényező befolyásolja, mint a talajtípus, a növényzet típusa, a növényzet levéltulajdonságai és az atmoszférikus tényezők. A szakirodalmakban különböző megközelítéseket javasolnak. Gutman és Ignatov (1998) helytől és növényzettől független állandókat használnak, míg (Zeng et al., 2000) az NDVI<sub>∞</sub> értékét külön-külön származtatják az Internacionális Geoszféra-Bioszféra Program keretében kidolgozott földborítási típusok osztályozása szerint.

A kutatásom során a Sentinel-2 műholdfelvételei alapján a csupasz talaj NDVI értékét 0,15-nek, míg az NDVI<sub>∞</sub> értékét 0,95-nek határoztam meg a vizsgált táblákon.

A kiszámított növényborítottsági értékeket kényszerítéses módszerrel integráltam a modellbe. Ez a technika lehetővé teszi, hogy közvetlenül használjam az NDVI-ből származó növényborítottsági adatokat a modell paramétereiként, anélkül, hogy más paramétert módosításnak vetnék alá.

### 3.4. Validáció

A modellek kalibrációja után fontos lépés a validáció, annak érdekében, hogy ellenőrizzük a modell megfelelő működését, helytállóságát a további alkalmazásuk előtt (Addiscott et al., 1995; Power, 1993). A modell validációjára két statisztikai módszert alkalmaztam. Az első módszer az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}$$

ahol S<sub>i</sub> a szimulált érték és az M<sub>i</sub> a tapasztalt érték. Minél jobban közelít az RMSE a nullához, annál jobban van kalibrálva a modell.

A második módszer a normalizált átlagos négyzetes hiba gyöke (NRMSE):

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \times \frac{100}{M}$$

ahol az  $S_i$  a szimulált érték és az  $M_i$  a tapasztalt érték,  $M$  a megfigyelt értékek átlaga. A normalizált RMSE a szimulált és a megfigyelt adatok relatív különbségének mértékét adja meg százalékban. Kitűnőnek számít a szimuláció, ha a NRMSE kisebb mint 10%, jó, ha 10%-20% között van, megfelelő, ha 20% és 30% között van, gyenge hogyha 30%-nál nagyobb. (Jamieson et al., 1991)

A validációt úgy végeztem el, hogy a kalibrált modell segítségével szimuláltam legalább egy másik évet, és összehasonlítottam a valóságban tapasztalt termésátlagokat a modell által kiszámolt értékekkel. A durumbúza és a napraforgó esetében a kalibrációs éven kívül két év adataival rendelkezttem a vizsgált táblákról, Míg a kukorica esetében a kalibráción kívül csak egy év volt elérhető (4.táblázat)

4. táblázat: A validációban és kalibrációban felhasznált évek adatai (Forrás: Szeredi Kft)

<b>Tábla megjelölése</b>	<b>Vetés időpontja</b>	<b>Betakarítás időpontja</b>	<b>Kultúrnövény</b>	<b>Fajta neve</b>	<b>Termésátlag (t/ha)</b>
L-12	2019.10.11.	2020.07.06.	Durumbúza	Sambadur	6,3
L-12	2022.10.10.	2023.07.05.	Durumbúza	Sambadur	6,8
L-10	2022.10.17.	2023.07.07.	Durumbúza	Sambadur	5,568
L-10	2015.04.14.	2015.09.22.	Napraforgó	Jaguár XL	2
L-10	2018.04.18.	2018.09.14.	Napraforgó	Jaguár XL	3
L-9	2020.04.15.	2020.09.10.	Napraforgó	Jaguár XL	2,86
L-5	2023.04.27.	2023.09.20.	Kukorica	Scorpius	7,345
L-9	2022.04.08.	2022.10.10.	Kukorica	Scorpius	5,413

## 4. Eredmények, értékelés

### 4.1.A durumbúza validációs eredményei

A validációs és kalibrációs évek során elért NRMSE értékek tíz százalék alattiak voltak, amelyek kiemelkedő szimulációs teljesítményt jelentenek. Az összes évet figyelembe véve az NRMSE értéke csupán 6,08% volt, ami szintén kiváló eredménynek számít, és megerősíti a modell megbízhatóságát (5. táblázat).

A legnagyobb tapasztalt terméskülönbség a valós és a szimulált adatok között fél tonna volt. Ez a különbség több tényezőtől is adódhat, például abból, hogy a modell egy rögzített mag nedvességtartalommal számol, ami nem feltétlenül tükrözi a valós körülményeket. Ezen kívül a tábla heterogenitása is jelentős hatással lehet a szimulációs eredményekre, mivel a különböző területeken eltérő talajviszonyok és mikroklíma is befolyásolhatják a növények fejlődését és ezáltal a terméshozamot.

5. táblázat: Durumbúza NRMSE hibaértékei (Forrás: saját munka)

Fajta	Sambadur	Sambadur	Sambadur
Kalibrációs év/ Validációs év	Validáció	Kalibráció	Validáció
Tábla azonosító	L-12	L-12	L-10
Vetés időpontja	2019.10.11.	2022.10.10.	2022.10.17.
Betakarítás időpontja	2020.07.06.	2023.07.05.	2023.07.07.
Termésátlag (t/ha)	6,3	6,8	5,6
Szimulált termésátlag (t/ha)	6,528	7,324	6
RMSE	0,2	0,5	0,4
NRMSE (%)	3,62	7,71	7,76
NRMSE (%) az évekre	6,08		



#### 4.2.A napraforgó validációs eredményei

A napraforgó esetében az NRMSE hibaértéke magasabb volt, mint a durumbúzánál. Kiemelkedik a 2015-ös év, ahol 14%-os volt a hiba, de még ez is beletartozik a jó eredmények közé. A kalibrációs évben is láthattunk jelentős eltéréseket a szimuláció és a valós adatok között, de az összes év átlagában az NRMSE 10% körül mozgott, ami kiváló teljesítménynek számít. Ez azt jelenti, hogy a modell, bár néha pontatlan lehet, általában megbízhatóan előre jelzi a napraforgó termés hozamát különböző környezeti feltételek mellett. A hibák kialakulásában szerepet játszhatott a napraforgó deszikkálásának időzítése, a magok nedvességvesztésének sebessége, és a betakarítási időszakban lehullott csapadék mennyisége is. A szimuláció és a valóság különbségei részletesebben a 6. táblázatban találhatóak.

6. táblázat: A napraforgó NRMSE hibaértékei (Forrás: saját munka)

Fajta	Jaguár XL	Jaguár XL	Jaguár XL
Kalibrációs év/ Validációs év	Validáció	Validáció	Kalibráció
Tábla azonosító	L-10	L-10	L-9
Vetés időpontja	2015.04.14.	2018.04.18.	2020.04.15.
Betakarítás időpontja	2015.09.22.	2018.09.14.	2020.09.10.
Termésátlag (t/ha)	2	3	2,86
Szimulált termésátlag (t/ha)	2,279	3,014	3,205
RMSE	0,27	0,01	0,34
NRMSE (%)	13,95	0,46	12,06
NRMSE (%) az évekre	9,78		

#### 4.3. A kukorica validációs eredményei

A kalibrációs évben a Scorpius hibrid kukorica kiváló teljesítményt mutatott, amit az 1,79%-os NRMSE érték is igazol. Ebben az időszakban a szimulált és a valós terméseredmények között mindössze csak 130 kilogramm volt a különbség, ami rendkívül pontos szimulációnak számít. Azonban a validációs évben a hiba értéke jelentősen megnőtt, elérve a 19,34%-ot. A kukorica modellezési eredményeinek pontosabb ellenőrzése érdekében hasznos lenne több évnnyi adatot gyűjteni. Emiatt a továbbiakban nem foglalkoztam a vizsgálatával.

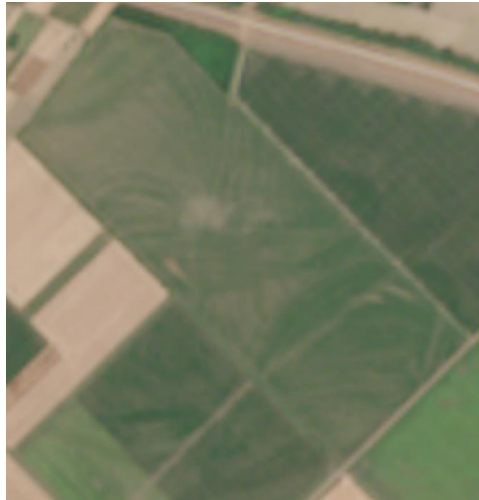
7. táblázat: A kukorica NRMSE hibaértékei (Forrás: saját munka)

Fajta	Scorpius	Scorpius
Kalibrációs év/ Validációs év	Kalibrációs	Validációs
Tábla azonosító	L-5	L-9
Vetés időpontja	2023.04.27.	2022.04.08.
Betakarítás időpontja	2023.09.20.	2022.10.05.
Termésátlag (t/ha)	7,345	5,413
Szimulált termésátlag (t/ha)	7,477	4,366
RMSE	0,13	1,04
NRMSE (%)	1,79	19,34
NRMSE (%) az évekre	11,69	

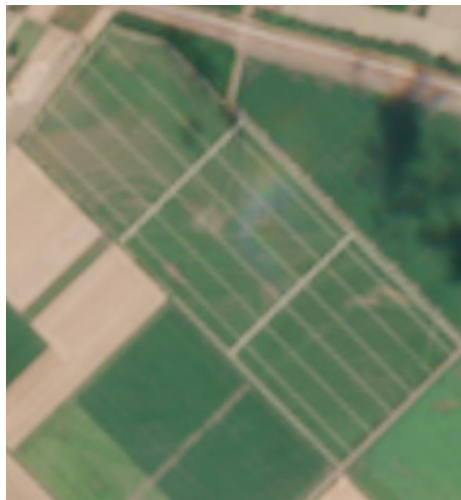
A kukorica validációs évében a tenyészidőszak alatti csapadékmennyiség csupán 100 mm volt, ami jelentősen alacsonyabb, mint a 2023-ban mért több mint 200 mm. Ez a drasztikus különbség a csapadék mennyiségében komoly hatással volt a növény fiziológiájára. A vízhiány befolyásolta a kukorica fejlődését, transzpirációját, tápanyagfelvételét és így közvetve a terméshozamot is, ami aláhúzza a megfelelő öntözés fontosságát a kukorica termesztésében.

A Szeredi Kft. sajnos nem tudott konkrét információt szolgáltatni az öntözési gyakorlatokról. Ugyanakkor a műholdfelvételek elemzése során megfigyelhető volt, hogy a táblákon

valamilyen kezelés történt. (4.-5. Ábra) A szárazság miatt nagy valószínűséggel esőztető öntözés történt.



4. Ábra: Az L-9-es tábla műholdfelvétele 2022.07.03.(Forrás: Copernicus web browser)



5. Ábra: Az L-9-es tábla műholdfelvétele 2022.07.13. (Forrás: Copernicus Web Browser)

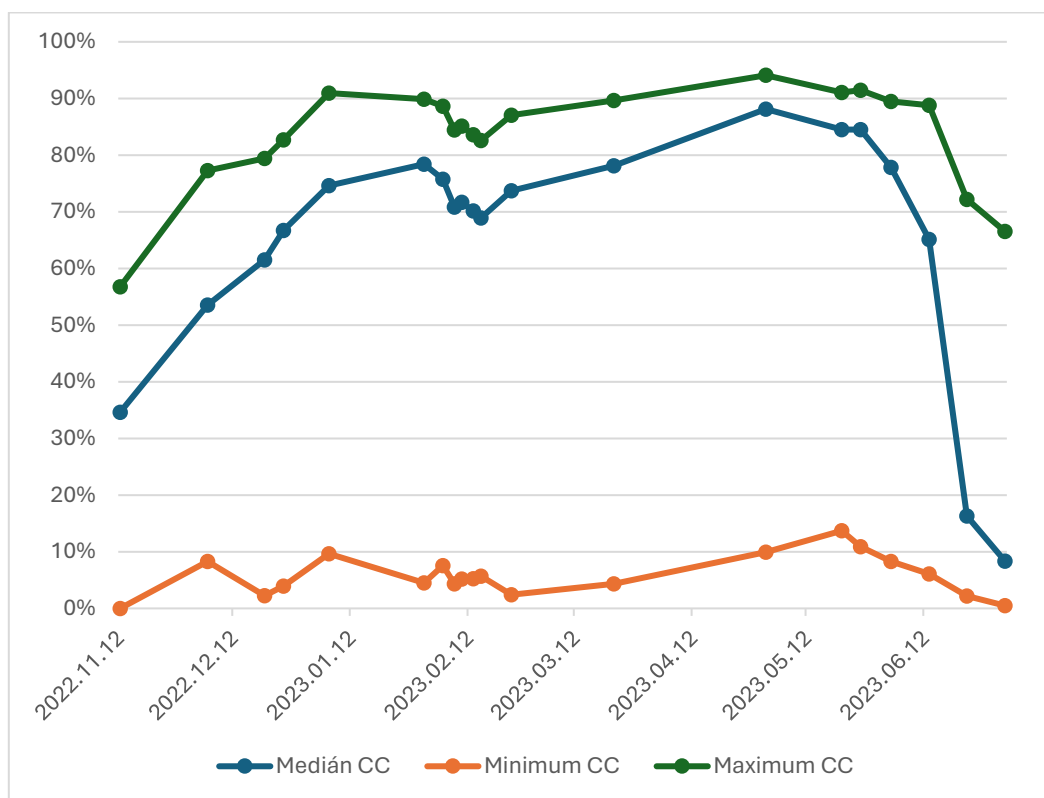
Miután megbizonyosodtam róla, hogy a modellben a durumbúza és a napraforgó helyesen van kalibrálva, a műholdas NDVI adatokból származó növényborítottságot kezdtem el elemezni. Kíváncsi voltam rá, hogy milyen különbségek adódnak a termésátlagokban, amikor az egész táblára egy darab NDVI értéket nézek, és azt átszámolom növényborítottságra. Az elemzések alapján szerettem volna következtetéseket levonni arról, hogy mekkora eltérések vannak a

termésmennyiségben a sűrűbben és ritkábban borított területek között. Ehhez használtam fel az NDVI minimum, maximum és medián értékeiből számolt növényborítottságot.

#### 4.4. NDVI értékekből számolt növényborítottság felhasználása modellben a durumbúza esetében

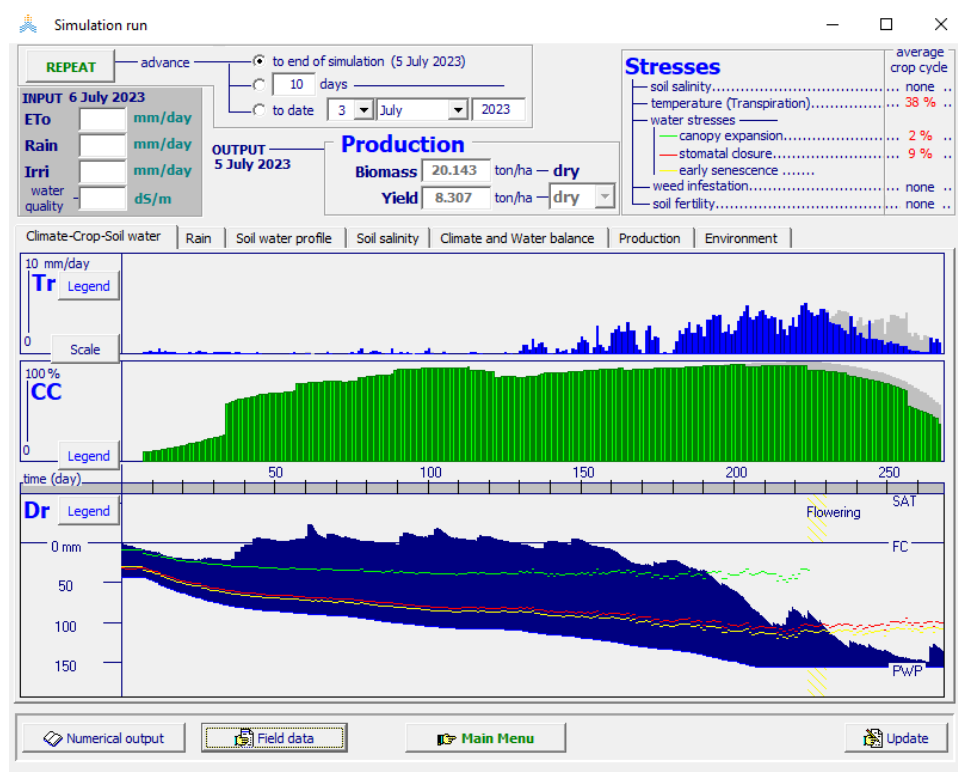
A 2022.10.10. elvetett durumbúzáról összesen 20 darab műholdképet tudtam feldolgozni. A vegetációs időszak elején nem volt elérhető műholdfelvétel a magas felhőborítottság miatt.

A durumbúza esetében a táblán hatalmas különbségek voltak a maximum és a minimum növényborítottság között (6. Ábra). A minimum érték a legmagasabb pontján csak 14%-ot ért el, míg a maximum érték a 90%-os növényborítottság fölé ment.



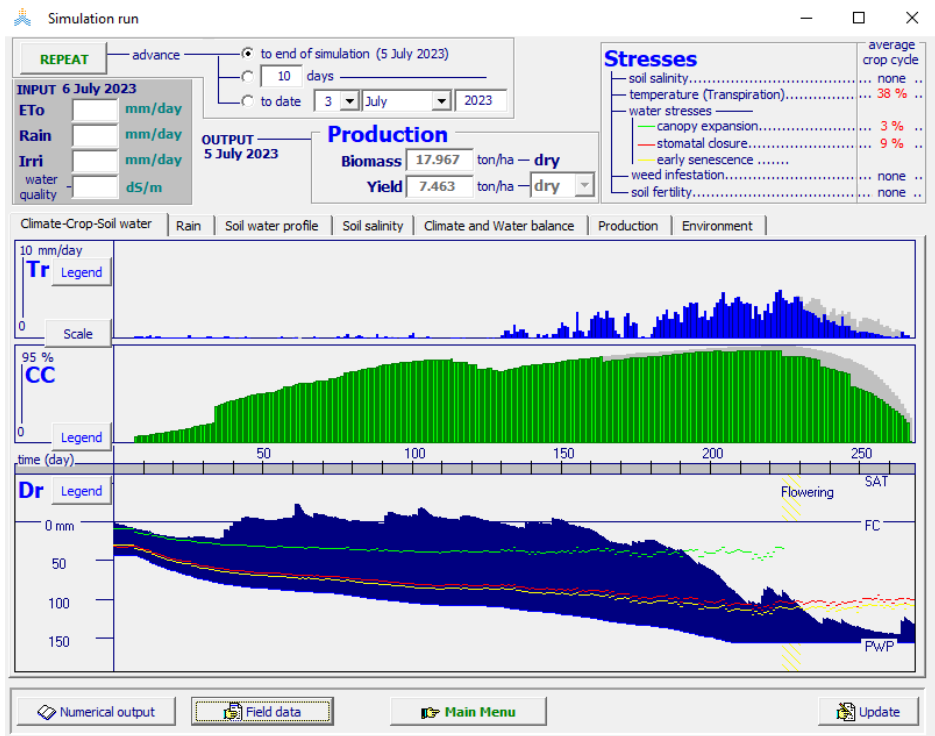
6. Ábra: A 2022. vetésű Sambadur növényborítottsága az L-12 táblán. (Forrás: saját munka)

A modellbe betáplált NDVI maximum értékekből számolt növényborítottság alapján a szimuláció 8,307 tonna termést jelez (7. Ábra). Ez arra utal, hogy a sűrűbben növényzettel borított területeken a tényleges terméshozam is valószínűleg ehhez az értékhez közelíthet. A 2022. november 12-i növényborítottsági adatok kiugróan magas értékei felvetik a műholdas adatok tökéletlen központi szűrésének lehetőségét, ami az atmoszférikus zavarok miatt bekövetkezhetett. Egy másik magyarázat lehet, hogy a durumbúza növények gyorsabban kezdtek növekedni, mint amit az eredeti modellbeállításokkal számoltam, ami szintén befolyásolhatta a szimulált adatok pontosságát.



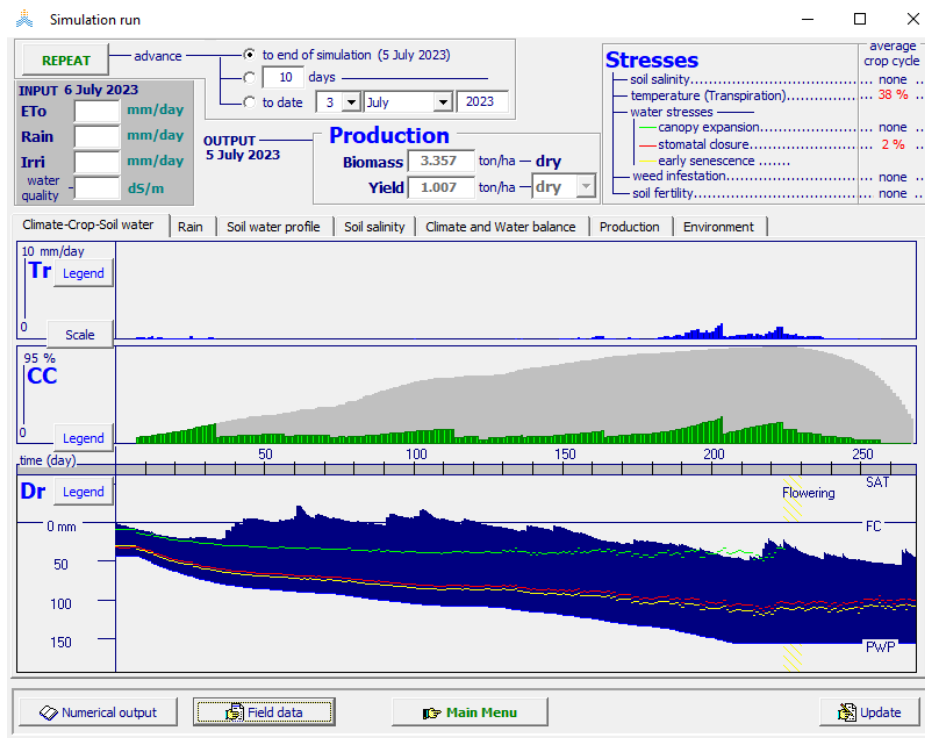
7. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a maximum növényborítottsági értékekkel a durumbúzánál. (Forrás: saját munka)

A modellben a medián NDVI értékek alapján kiszámolt növényborítottság 7,463 tonna termést eredményezett (8. Ábra), ami nagyon közel áll az eredeti szimuláció által előre jelzett 7,324 tonna terméshez. A két érték közötti különbség hasonlóan magyarázható, mint a korábban említett maximum értékek esetében: a vegetációs ciklus elején tapasztalható hirtelen növekedés a növényborítottságban.



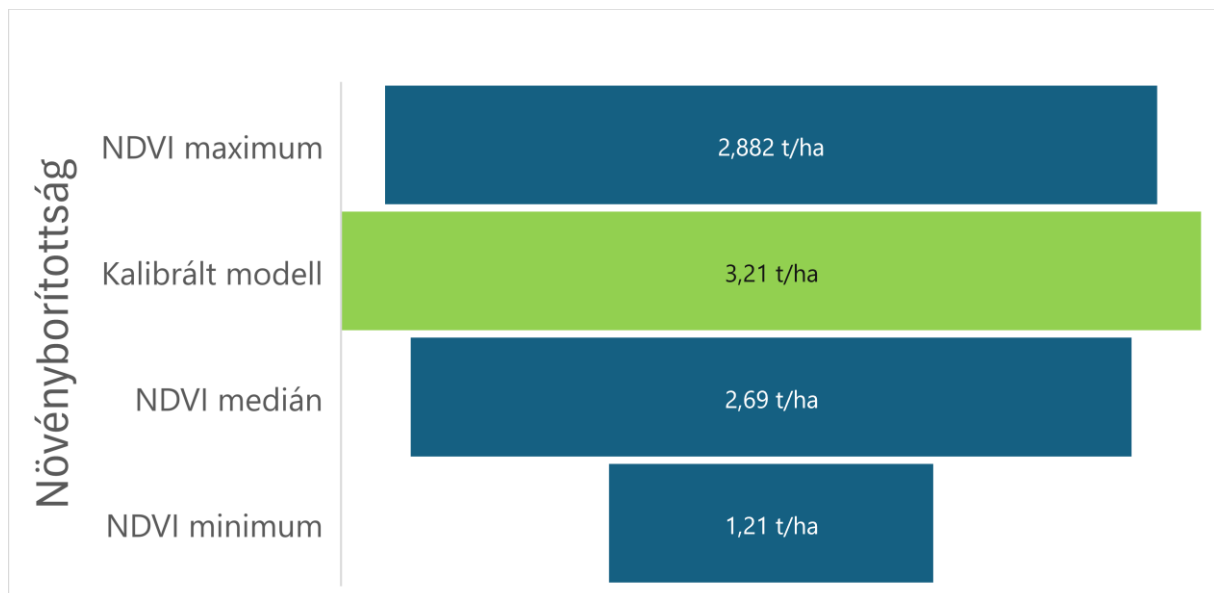
8. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a medián növényborítottsági értékekkel durumbúzánál. (Forrás: saját munka)

A modellben a minimum növényborítottsággal számolva a termés csupán 1 tonna termést eredményezett (9. Ábra). Ez az alacsony érték összefüggésben állhat a műholdfelvételeken is azonosítható specifikus területi jellemzőkkel. A képeken látható egy folyómaradvány, ami befolyásolta a növények növekedését. Emellett a vegetációs időszak során a tábla két kisebb részén a durumbúza szintén ritkának tűnt a műholdképeken. Emiatt a területek kevésbé voltak termékenyek, ami hozzájárult az alacsony átlagos növényborítottsághoz és ennek következtében a szimulált alacsony terméshozamhoz.



9. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a minimum növényborítottsági értékekkel durumbúzánál. (Forrás: saját munka)

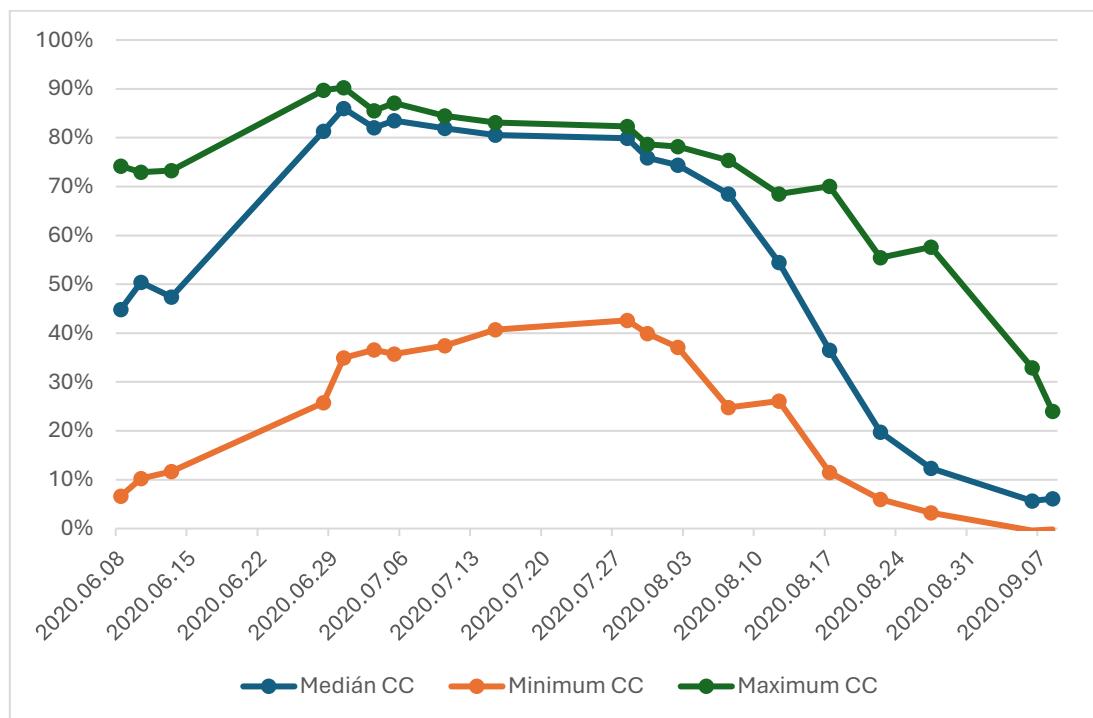
A modell szimulált terméseredményeit a megváltoztatott növényborítottsággal és az alap kalibrációval a durumbúza esetében a 10. Ábra mutatja be.



10. Ábra: Sambadur durumbúza szimulált termésátlagai a különböző növényborítottsági értékekkel (Forrás: saját munka)

#### 4.5. NDVI értékekből számolt növényborítottság felhasználása modellben a napraforgó esetében

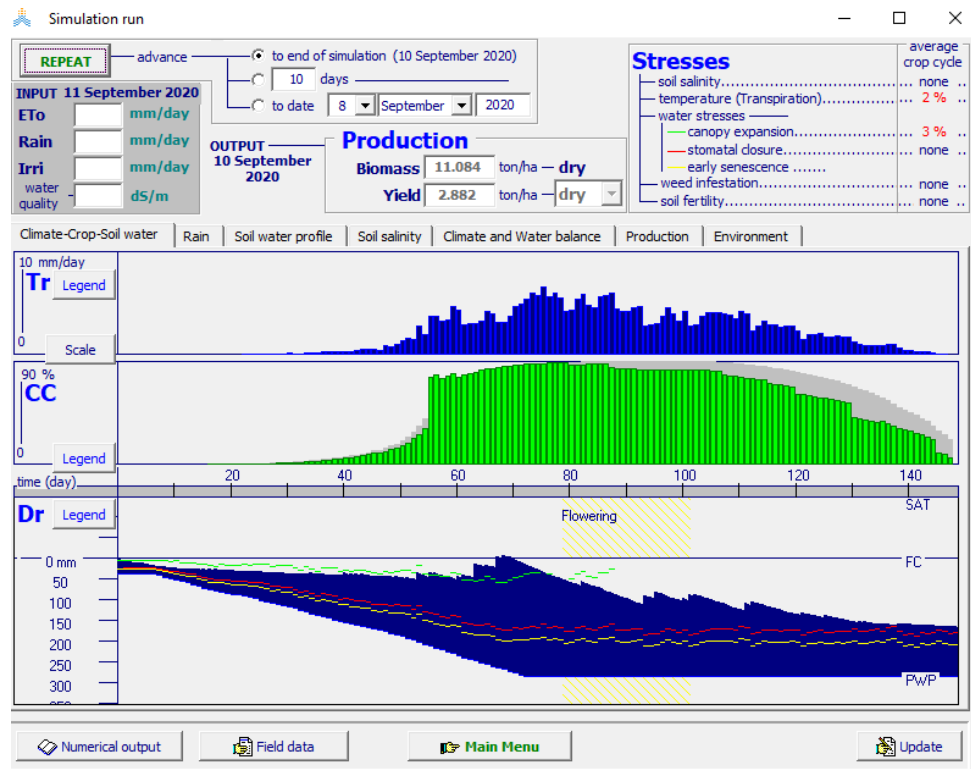
A 2020. április 15-én elvetett napraforgó esetében összesen 19 darab műholdképet sikerült megtisztítani és feldolgozni. A tavaszi időszakban a képek felhőtakarás miatt zavarosak voltak, így pontos, felhőmentes műholdfelvételek csak június 8-tól álltak rendelkezésre. A területen a napraforgó egyenetlenül, helyenként ritkán, más helyeken dúsabb foltokban kelt ki. Ezt a minimum és a maximum közötti növényborítottság magas különbsége is igazolja. Érdekességként megemlíthető, hogy a napraforgó virágzásának kezdetétől, július elejétől, az NDVI értékekben néhány százalékos csökkenés figyelhető meg. Ez a csökkenés a származtatott növényborítottság adatokban is megjelenik, amint azt a 10. ábra is szemlélteti.



11. Ábra: A 2020. vetésű Jaguár XL növényborítottsága az L-9 táblán (Forrás: saját munka)

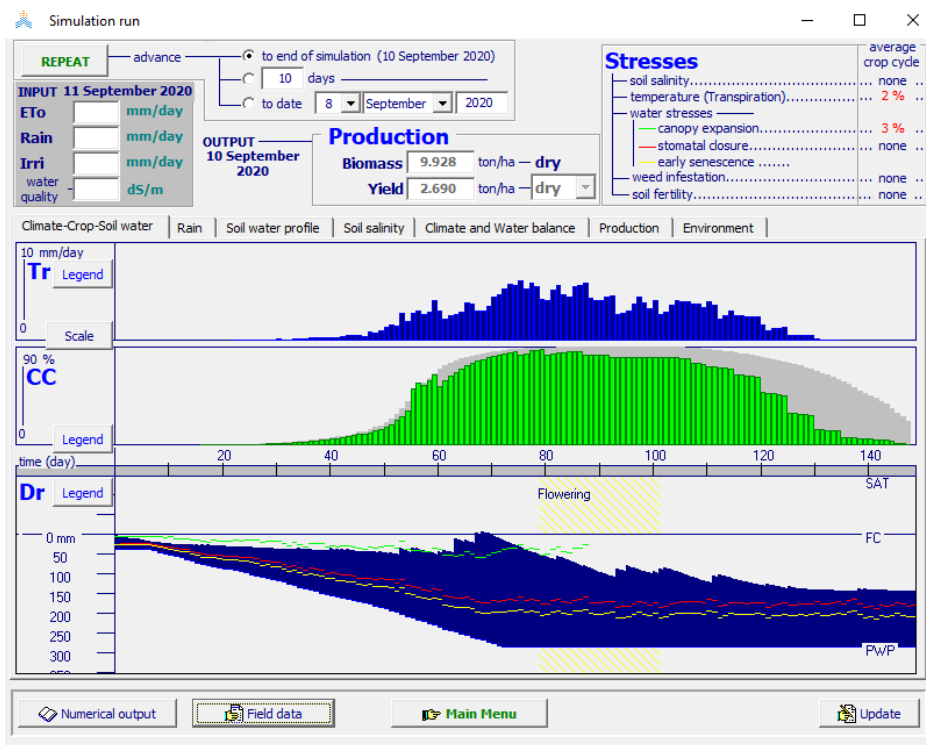


A 2020-ban vetett Jaguar XL napraforgó esetében, amikor a növényborítottság maximum értékeivel számoltam, a modell 2,882 tonna termést szimulált (11. Ábra). A valóságban a betakarított termés mennyisége nagyon hasonló volt, szinte azonos, pontosabban 2,86 tonna. Ez az egyezés mutatja a modell megbízhatóságát és pontosságát.



12. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a maximum növényborítottsági értékekkel napraforgónál. (Forrás: saját munka)

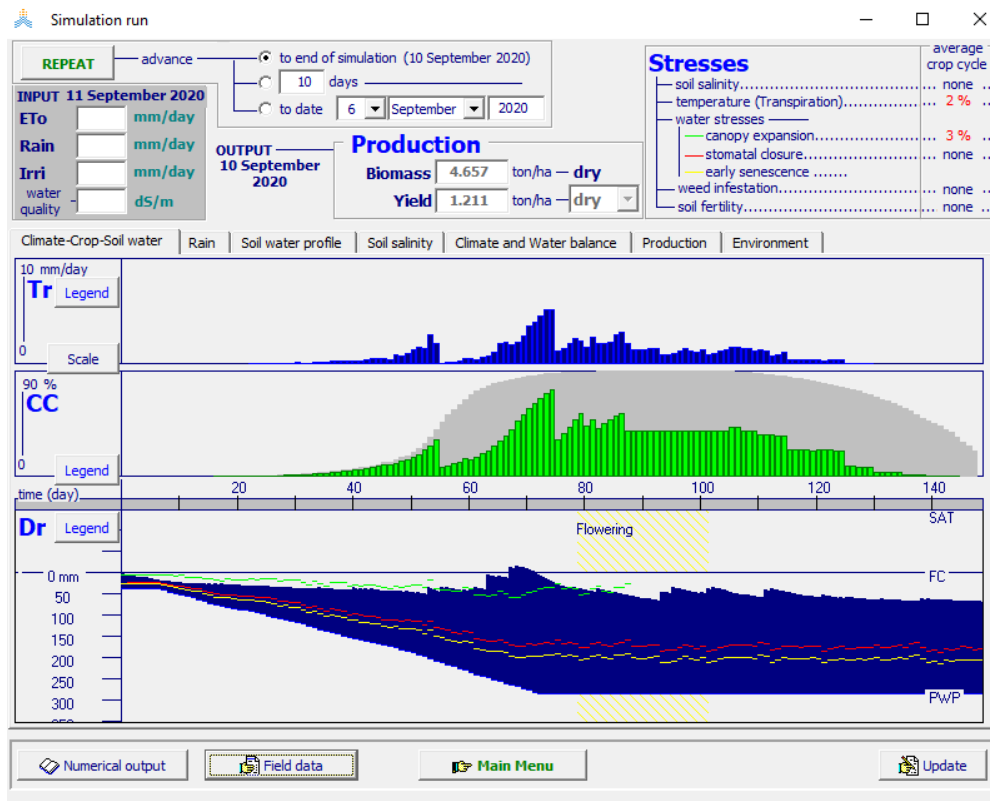
A modellben, amikor a medián NDVI értékeket használtam a növényborítottság számításához, a szimuláció 2,69 tonna termést eredményezett, ami a 12. ábrán is látható. Ez az érték nagyon közel áll a valós adatokhoz, ami 2,86 tonnás termés volt. A medián és a maximum növényborítottsággal számolva egymáshoz közeli terméshozamot kaptam. A modell végén megfigyelhető lépcsőzetesség arra utal, hogy a modell szerint a lombkorona öregedése gyorsabban történt, mint a valóságban. Ebből a hibából adódhat a szimulált és a valós termés mennyiségek közötti különbség.



13. Ábra Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a medián növényborítottsági értékekkel napraforgónál. (Forrás: saját munka)

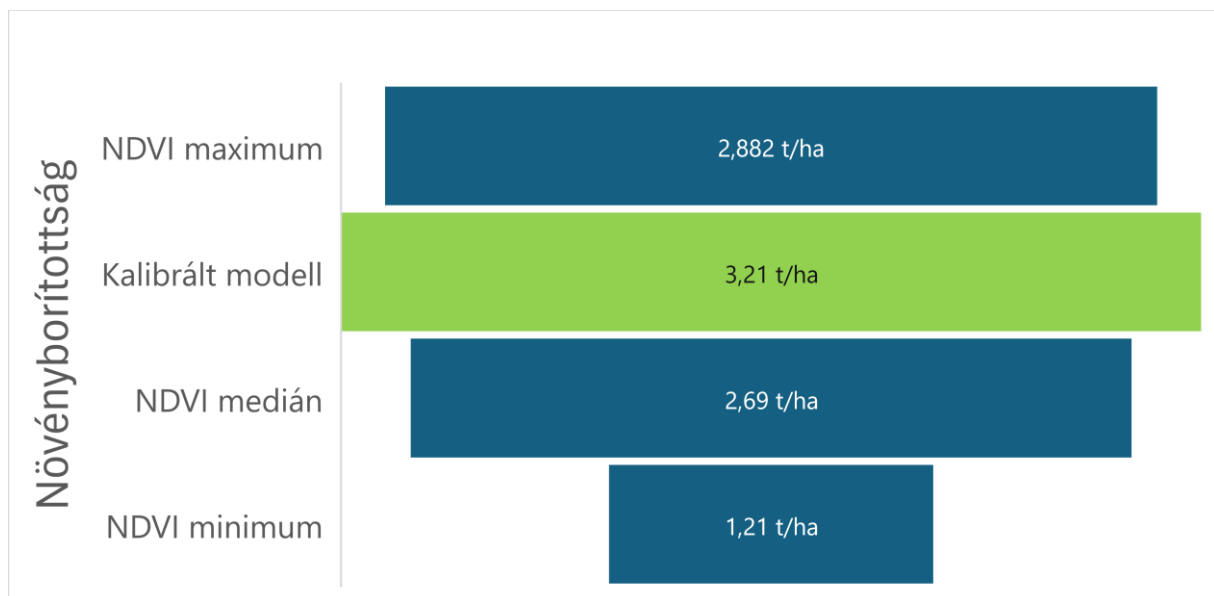
A növényborítottságban megfigyelhető nagy kiugrás a 60-80 napos időszakban kialakult, mert ebben az időszakban felhőzet miatt nem állt rendelkezésre műholdfelvétel. Ennek következtében a modell nem kapott friss adatokat, így hosszabb ideig a korábban beállított növényborítottsági adatok alapján szimulálta a növényzet állapotát. A 75. napon azonban friss adatok érkeztek, ami lehetővé tette a szimuláció korrekcióját és frissítését. Fontos megjegyezni, hogy ez a felülírás még a virágzás kezdete előtt történt, így a modellben nem történt meg a biomassza terméssé való átszámolása. Ennek ellenére a szimuláció végeredménye valósághoz közel állhat, mivel az új adatok időben érkeztek ahhoz, hogy korrigálják a növényborítottság kiugrását.

A maximum és a medián értékekhez képest hatalmas eltérés van a minimummal számolt terméseredményhez képest. A mediánnal és a maximummal számolt növényborítottság szimulációjához képest másfél tonnával volt kevesebb a termés Ennek oka az, hogy a tábla közepén lévő egy nagyobb területen a vegetációs időszak alatt folyamatosan ritkább volt a növényzet, ami alacsonyabb növényborítottságot és így jelentősen alacsonyabb termésmennyiséget eredményezett.



14. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a minimum növényborítottsági értékekkel napraforgónál. (Forrás: saját munka)

A modell szimulált terméseredményeit a megváltoztatott növényborítottsággal és az alap kalibrációval a napraforgó esetében a 15. Ábra mutatja be.



15. Ábra: Jaguar XL szimulált termésátlagai a különböző növényborítottsági értékekkel (Forrás: saját munka)

## 5. Következtetések, javaslatok

Az AquaCrop modell segítségével lehetőségem nyílt arra, hogy viszonylag kevés, egyszerűen mérhető paraméterek felhasználásával sikeresen kalibráljam a Sambadur durumbúza és a Jaguár XL napraforgó fajtákat.

Érdekes lenne további kutatások során a modellt hasonló módon vizsgálni más vegetációs indexek, mint például a Kiterjesztett Vegetációs Index (EVI) használatával. Az EVI különösen hasznos lehetne, mivel részletesebb információt nyújt a vegetációról, és érzékenyebb a növényzet változásaira az NDVI-hoz képest.

Ajánlatos lenne a Sambadur durumbúza és a Jaguár XL fajtájú napraforgó fajtákat Kiszombor régiójában olyan területeken is tesztelni, ahol a talajviszonyok még nem ismertek vagy eltérnek a jelenlegi termőterületektől. Ezen vizsgálatok célja az lenne, hogy részletesen elemezzük, hogyan reagálnak ezek a növényfajták a különböző talajtulajdonságokra, mint például a talaj textúrájára.

Javasolt lenne a jövőben is folytatni az adatgyűjtést a Kiszomborban vizsgált SCORPIUS kukorica hibrid esetében. Ezzel ellenőrizhetnénk az általam kalibrált modellfájl teljesítményét, és megvizsgálhatnánk, hogy a magas NRMSE érték az aszályos év miatt alakult-e ki a validálás során.

## 6. Összefoglalás

Az AquaCrop modell kalibrálását a Kiszombor területén termesztett durumbúza, napraforgó és kukorica növényekre végeztem, amelyhez terepen gyűjtött adatokat és a Sentinel-2 műholdas felvételeket használtam. A kalibrációs folyamat során az NDVI értékeket alkalmaztam, amelyeket a műholdfelvételekből számoltam ki. Az NDVI adatok feldolgozásához a Gutman és Ignatov (1998) által javasolt skálázott NDVI módszert használtam, ami lehetővé tette számomra a növényborítottság meghatározását.

A modell teljesítményének validálása során különös figyelmet fordítottunk a növényi fájlok hibáinak értékelésére. A napraforgó és a durumbúza esetében a modell rendkívül pontosnak bizonyult, ahol az NRMSE hibaérték 10%-on belül maradt. Ez azt jelzi, hogy a modell jól illeszkedik a valósághoz, és hatékonyan modellezi ezen növények növekedési folyamatait a tényleges terepi körülmények között.

Ezzel szemben a kukorica modellje nagyobb hibaértékeket mutatott. Ennek oka részben az lehet, hogy a validálás során csak egyetlen év adatai álltak rendelkezésre, ráadásul ez az év aszályos időjárási viszonyokat mutatott. Az ilyen extrém körülmények alatt a modell kevésbé képes pontosan előre jelezni a növény fejlődését, ami jelentős eltéréseket okozhat a valós és a szimulált adatok között.

A modellbe a növényborítottság minimum maximum és medián adatait kényszerítéses módszerrel integráltam, a durumbúza és a napraforgó esetében. Ez a módszer lehetővé teszi, hogy az NDVI értékekből számított növényborítottság közvetlenül befolyásolja a modell szimulációját, így növelve a modellezési folyamat valósághűségét és pontosságát.

Összességében az AquaCrop modell alkalmazása a Kiszombor területén termesztett növényekre sikeresnek bizonyult, különösen a napraforgó és durumbúza esetében.

## 7. Irodalomjegyzék

- Addiscott, T. M., Smith, J. A., & Bradbury, N. J. (1995). Critical Evaluation of Models and Their Parameters. *Journal of Environmental Quality*, 24, 803–807.  
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:95986450>
- Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (Vol. 56).
- Asseng, S., Jamieson, P. D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J. W., & Howden, S. M. (2004). Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Field Crops Research*, 85(2), 85–102.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00154-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00154-0)
- Asseng, S., Zhu, Y., Basso, B., Wilson, T., & Cammarano, D. (2014). Simulation Modeling: Applications in Cropping Systems. In *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 102–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00233-3>
- Bauböck, R. (2014). Simulating the yields of bioenergy and food crops with the crop modeling software BioSTAR: the carbon-based growth engine and the BioSTAR ET0 method. *Environmental Sciences Europe*, 26(1), 1. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-26-1>
- Boote K. J. and Jones, J. W. and H. G. and P. N. B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In G. and T. P. K. Tsuji Gordon Y. and Hoogenboom (Ed.), *Understanding Options for Agricultural Production* (pp. 99–128). Springer Netherlands.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_6)
- Bouman, B. A. M., van Keulen, H., van Laar, H. H., & Rabbinge, R. (1996). The ‘School of de Wit’ crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 52(2), 171–198. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0308-521X\(96\)00011-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0308-521X(96)00011-X)
- Bregaglio, S., Frasso, N., Pagani, V., Stella, T., Francone, C., Cappelli, G., Acutis, M., Balaghi, R., Ouabbou, H., Paleari, L., & Confalonieri, R. (2015). New multi-model approach gives good estimations of wheat yield under semi-arid climate in Morocco. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 157–167. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0225-6>
- Cariboni, J., Gatelli, D., Liska, R., & Saltelli, A. (2007). The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecological Modelling*, 203(1–2), 167–182.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.045>
- Chastain, R., Housman, I., Goldstein, J., Finco, M., & Tenneson, K. (2019). Empirical cross sensor comparison of Sentinel-2A and 2B MSI, Landsat-8 OLI, and Landsat-7 ETM+ top of atmosphere spectral characteristics over the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 221, 274–285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.012>
- Confalonieri, R., Bellocchi, G., Bregaglio, S., Donatelli, M., & Acutis, M. (2010). Comparison of sensitivity analysis techniques: A case study with the rice model WARM. *Ecological Modelling*, 221(16), 1897–1906. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.04.021>
- Delécolle, R., Maas, S. J., Guérif, M., & Baret, F. (1992). Remote sensing and crop production models: present trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 47(2), 145–161. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0924-2716\(92\)90030-D](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0924-2716(92)90030-D)

- Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., & Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, *149*(1), 78–90. <https://doi.org/10.1007/BF00386231>
- Fischer, W. A., Hemphill, W. R., & Kover, A. (1976). Progress in remote sensing (1972–1976). *Photogrammetria*, *32*(2), 33–72. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-8663\(76\)90013-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-8663(76)90013-2)
- Green, D. M., & Whittemore, C. T. (2005). Calibration and sensitivity analysis of a model of the growing pig for weight gain and composition. *Agricultural Systems*, *84*(3), 279–295. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.06.017>
- Gutman, G., & Ignatov, A. (1998). The Derivation of the Green Vegetation Fraction from NOAA/AVHRR Data for Use in Numerical Weather Prediction Models. *International Journal of Remote Sensing*, *19*. <https://doi.org/10.1080/014311698215333>
- Hesketh, J. D., Baker, D. N., & Duncan, W. G. (1971). Simulation of Growth and Yield in Cotton: Respiration and the Carbon Balance I. *Crop Science*, *11*(3), [cropsci1971.0011183X001100030025x](https://doi.org/https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100030025x). <https://doi.org/https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100030025x>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, *101*(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing*, *8*(3). <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, *27*(4), 337–350. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Jiang, Z., Huete, A., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zou, Y. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, *101*, 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>
- Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, *101*(3), 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>
- Jones, J., Porter, C., Boote, K. J., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. (2003). DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, *18*, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kasampalis, D. A., Alexandridis, T. K., Deva, C., Challinor, A., Moshou, D., & Zalidis, G. (2018). Contribution of remote sensing on crop models: A review. In *Journal of Imaging* (Vol. 4, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jimaging4040052>
- Keating, B., Carberry, P. S., Hammer, G., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J., Silburn, D., Wang, E., Brown, S., Bristow, K., Asseng, S., & Smith, C. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, *18*, 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)

- Kersebaum, K. (2007). Modelling nitrogen dynamics in soil–crop systems with HERMES. In *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (Vol. 77, pp. 147–160). [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4479-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4479-3_11)
- Kiniry, J., Major, D., Izaurralde, R., Williams, J., Gassman, P., Morrison, M., Bergentine, R., & Zentner, R. (1995). Epic Model Parameters for Cereal, Oilseed, and Forage Crops in the Northern Great Plains Region. *Canadian Journal of Plant Science*, 75. <https://doi.org/10.4141/cjps95-114>
- Klepper, O. (1997). Multivariate aspects of model uncertainty analysis: tools for sensitivity analysis and calibration. *Ecological Modelling*, 101(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)01922-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)01922-9)
- Liu, Y., Mu, X., Qian, Y., Tang, L., & Li, C. (2012). A vegetation phenology model for fractional vegetation cover retrieval using time series data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3339–3342. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350588>
- Loomis, R. S., & Rabbinge, R. (1979). *EXPLANATORY MODELS IN CROP PHYSIOLOGY*. [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)
- Ma, G., Huang, J., Wu, W., Fan, J., Zou, J., & Wu, S. (2013). Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3), 634–643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.038>
- Martre, P., Jamieson, P., Semenov, M., Zyskowski, R., Porter, J., Eu, E., & Triboi, E. (2006). Modelling protein content and composition to crop nitrogen dynamics for wheat. *European Journal of Agronomy*, 25, 138–154. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.007>
- Monteith, J. L., Moss, C. J., Cooke, G. W., Pirie, N. W., & Bell, G. D. H. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 281(980), 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Motha, R. P. (2011). *Use of Crop Models for Drought Analysis Use of Crop Models for Drought Analysis Use of Crop Models for Drought Analysis*. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub>
- Nossent, J., Elsen, P., & Bauwens, W. (2011). Sobol' Sensitivity Analysis of a Complex Environmental Model. *Environmental Modelling and Software - ENVSOFT*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.010>
- Pan, J., Zhu, Y., Jiang, D., Dai, T., Li, Y., & Cao, W. (2006). Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 97(2), 322–336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.11.006>
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J., Rougier, J., Stephenson, D., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- Porter, J. R. (1984). A model of canopy development in winter wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 102(2), 383–392. <https://doi.org/DOI: 10.1017/S0021859600042714>



- Power, M. (1993). The predictive validation of ecological and environmental models. *Ecological Modelling*, 68(1), 33–50. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90106-3](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90106-3)
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Ritchie, J., & Otter, S. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. *USDA-ARS, ARS-38*, 38.
- Saltelli, A., & Annoni, P. (2010). How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1508–1517. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012>
- Saltelli, A., Tarantola, S., & Campolongo, F. (2000). Sensitivity Analysis as an ingredient of modelling. *Stat. Sci.*, 15.
- Steduto, P., & Albrizio, R. (2005). Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea: II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(3–4), 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.04.003>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), 189–207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- 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>
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M. T., Stöckle, C., & Steduto, P. (2009). Assessment of aquacrop, cropsyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101(3), 509–521. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>
- van Diepen, C. A., Wolf, J., van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16–24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
- van Laar, H. H., Goudriaan, J., & van Keulen, H. (1992). Simulation of crop growth for potential and water - limited production situations : as applied to spring wheat. (Simulation reports; No. 27). CABO. <https://edepot.wur.nl/359573>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., & Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling and Software*, 51, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.017>
- Wall, E., & Smit, B. (2005). Climate Change Adaptation in Light of Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 27. [https://doi.org/10.1300/J064v27n01\\_07](https://doi.org/10.1300/J064v27n01_07)
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. In *Journal of Sensors* (Vol. 2017). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Zeng, X. B., Dickinson, R., Walker, A., Shaikh, M., Defries, R., & Qi, J. (2000). Derivation and Evaluation of Global 1-km Fractional Vegetation Cover Data for Land Modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 39, 826–839. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<0826:DAEOGK>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<0826:DAEOGK>2.0.CO;2)

## 8. Ábrák és táblázatok jegyzéke

1. Ábra: A modell komponensei közötti funkcionális kapcsolatok (Steduto et al, 2009). Az ábrát fordította Takács (2019). .....	7
2. Ábra: Az AquaCrop számolási menetének sémája. A szaggatott nyilak a vízstressz (a-tól e-ig) és hőmérséklet általi stressz (f-től g-ig) által érintett folyamatokat jelöli. (Steduto, 2009) Saját fordítás.....	10
3. Ábra: A Vizsgált táblák és a talajmintavételi helyek (Forrás: saját munka).....	15
4. Ábra: Az L-9-es tábla műholdfelvétele 2022.07.03.(Forrás: Copernicus web browser).....	25
5. Ábra: Az L-9-es tábla műholdfelvétele 2022.07.13. (Forrás: Copernicus Web Browser) ...	25
6. Ábra: A 2022. vetésű Sambadur növényborítottsága az L-12 táblán. (Forrás: saját munka)	26
7. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a maximum növényborítottsági értékekkel a durumbúzánál. (Forrás: saját munka) .....	27
8. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a medián növényborítottsági értékekkel durumbúzánál. (Forrás: saját munka) .....	28
9. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a minimum növényborítottsági értékekkel durumbúzánál. (Forrás: saját munka) .....	29
10. Ábra: Sambadur durumbúza szimulált termésátlagai a különböző növényborítottsági értékekkel (Forrás: saját munka) .....	29
11. Ábra: A 2020. vetésű Jaguár XL növényborítottsága az L-9 táblán (Forrás: saját munka)	30
12. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a maximum növényborítottsági értékekkel napraforgónál. (Forrás: saját munka).....	31
13. Ábra Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a medián növényborítottsági értékekkel napraforgónál. (Forrás: saját munka).....	32
14. Ábra: Az AquaCrop modell lefuttatásának eredménye a minimum növényborítottsági értékekkel napraforgónál. (Forrás: saját munka).....	33
15. Ábra: Jaguár XL szimulált termésátlagai a különböző növényborítottsági értékekkel (Forrás: saját munka).....	33
1. táblázat: A talajfajlokhoz felhasznált paraméterek (Forrás: TIM és AquaCrop).....	17

2. táblázat: A modell kalibrációjához felhasznált terepi adatok (Forrás: Szeredi Kft.).....	18
3. táblázat: Az AquaCropban felhasznált paraméterek GDD a hőösszeget jelenti. (Forrás: Saját munka).....	18-19
4. táblázat: A validációban és kalibrációban felhasznált évek adatai (Forrás: Szeredi Kft).....	21
5. táblázat: Durumbúza NRMSE hibaértékei (Forrás: saját munka).....	22
6. táblázat: A napraforgó NRMSE hibaértékei (Forrás: saját munka).....	23
7. táblázat: A kukorica NRMSE hibaértékei (Forrás: saját munka) .....	24

## NYILATKOZAT

Tasnádi Pál (hallgató Neptun azonosítója: F3C4R1) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védésére javaslom / ~~nem javaslom~~

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: ~~igen~~ nem

Kelt: Gödöllő, 2024. 04.21.



belső konzulens

## 1. melléklet: Hallgatói nyilatkozat

### NYILATKOZAT

Alulírott Tasnádi Pál, büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy az általam benyújtott, Hazai szántóföldi növényeink vizsgálata az AquaCrop modell alkalmazásával című szakdolgozat (diplomadolgozat) önálló szellemi termékem. Amennyiben mások munkáját felhasználtam, azokra megfelelően hivatkozom, beleértve a nyomtatott és az internetes forrásokat is.

Tudomásul veszem, hogy a szakdolgozat/diplomadolgozat elektronikus példánya a védés után a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtárába kerül elhelyezésre, ahol a könyvtár olvasói hozzájuthatnak.

Kelt: Budapest, 2024 év 04 hó 27 nap.

.....Tasnádi Pál.....

aláírás