

MODELLEK AZ AGRÁRIUM SZOLGÁLATÁBAN

Fodor Nándor

Agrártudományi Kutatóközpont, Mezőgazdasági Intézet
Martonvásár, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Fogalmi és történeti áttekintés	8
2.1 Modellek típusai	8
2.2 Szerveződési szintek	16
2.3 Ökoszisztéma modellek felépítése és fejlesztése	17
2.3.1 Paraméterek meghatározása méréssel	22
2.3.2 Paraméterek meghatározása becsléssel	23
2.3.3 Modell kalibráció és validáció	25
2.3.4 Modellértékelés	27
2.3.5 Érzékenységvizsgálat	29
2.3.6 Modellezési eredmények hibája és bizonytalansága	29
2.3.7 Modellek átlátszósága és átláthatósága	33
2.3.8 Modellek fejlesztése és továbbfejlesztése	33
2.3.9 Modellek kezelése és hibakezelése	35
2.4 Ökoszisztéma modellezés történeti áttekintése	36
3. Modellek az agrárium szolgálatában	43
3.1 Ökoszisztéma modellek használatát támogató alkalmazások	43
3.1.1 TALAJTANonc, illetve SOILarium	43
3.1.2 S-shape globálsugárzás-becslő eljárás	44
3.1.3 MV-WG időjárás-generátor	46
3.2 Statisztikus modellek	47
3.2.1 Proplanta trágyázási szaktanácsadási rendszer	48
3.2.2 Az Egyesült Királyság tejtermelésének jövője	51
3.2.3 A magyarországi kukoricatermelés jövője	54
3.3 AgroMo modellezési keretrendszer	57
3.3.1 Az AgroMo felépítése és működése	66
3.3.2 Az AgroMo alkalmazása: trágyázási tilalmi időszak	86
3.3.3 Az AgroMo alkalmazása: ökoszisztéma szolgáltatások	87
3.3.4 Az AgroMo alkalmazása: alkalmazkodási stratégiák	93
3.3.5 Az AgroMo rendszer fejlesztésének lehetőségei	96
4. Legfontosabb eredmények	100
5. Irodalomjegyzék	101

„Akkor ezt mondta Isten: Alkossunk embert a képmásunkra, hozzánk hasonlóvá: uralkodjék a tenger halain, az ég madarain, a jóságokon, az összes vadállaton és az összes csúszómászon, ami a földön csúszik-mászik.”

Teremtés könyve 1:26

1. Bevezetés

Az emberre ruházott hatalom gyakorlásának legősibb és legfontosabb megnyilvánulása a mezőgazdaság, amely magában foglalja a termőföld megművelését, a kultúrnövények termesztését, a haszonállatok gondozását: élelmiszert, takarmányt, rostalapanyagot, üzemanyagot és gyógyszer alapanyagot állít elő; fenntartja és jobbá teszi életünket. Mivel a mezőgazdaság ágazatainak meghatározása nem egyértelmű, a dolgozat címéhez ragaszkodva, a továbbiakban kimondottan a növénytermesztésre összpontosítunk, amely alatt összefoglalóan a szántóföldi növénytermesztést, a gyepgazdálkodást és az erdőgazdálkodást értjük.

Az ember mindig is törekedett arra, hogy munkáját nagyobb hatásfokkal végezze: megfigyelte környezetét, ismereteit összegyűjtötte, eltárolta, kielemezte. A megszerzett tudás segítette ráruházott hatalmának gyakorlásában. A fejlődés alapmotívuma évezredek óta változatlan: egyre nagyobb mennyiségű és egyre jobb minőségű információ felhalmozása és feldolgozása. Ez teszi lehetővé a felelősségteljes döntéseket, a helyes mezőgazdasági gyakorlatot, az áttörő újításokat és végső soron a fenntartható fejlődést. Néhány éve az ún. 'Big Data'¹ korszakba léptünk. A világon előállított, tárolt és forgalmazott adat mennyisége már meghaladta a 10 zettabyte-ot². A 2018-as téli olimpián debütált az első 5G mobil hálózat, amely másodpercenként 10 gigabit adat átvitelére képes. Óriási kihívást jelent az adatok sokfélesége, megjelenítése, illetve megbízhatóságának ellenőrzése főleg akkor, ha tudományos munkában akarjuk felhasználni őket. Az információ mennyiségének és az elérés sebességének növekedése azonban nem jelent garanciát a fejlődésre még akkor sem, ha gondosan ügyelünk arra, hogy a hibás adatokat kiszűrjük az adatbázisainkból. Legfontosabb kérdés az, hogy mit jelentenek az adatok. Az ismereteket rendszerezni kell. Összefüggések után kutatva, a lehető legtöbb szempontból kell elemezni adatainkat és a felismert szabályszerűségek felhasználásával modelleket kell készíteni, amelyek segítségével előrejelzéseket készíthetünk: ismereteinket térben és időben kiterjeszhetjük.

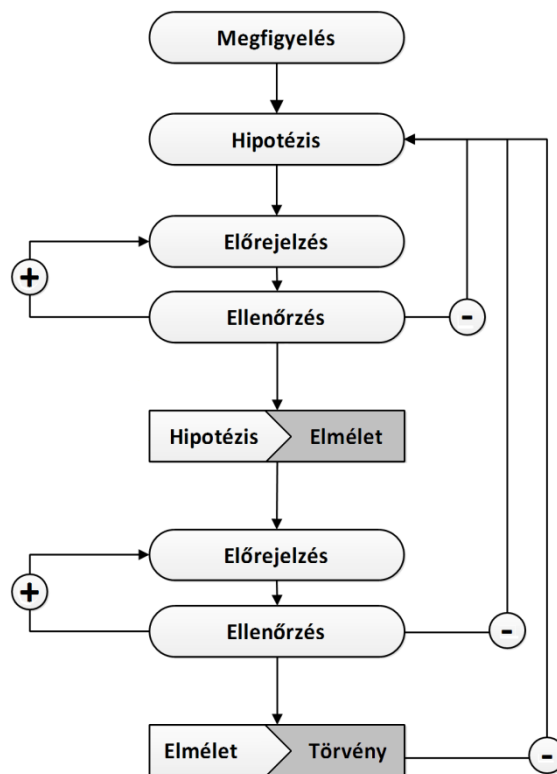
¹ A 'Big Data' a cégek, az intelligens hálózatok, a magánszektor és az egyéni felhasználók által világszerte és napi szinten előállított óriási mennyiségű és igen változatos adatnak, illetve a nagy adattömegek elfogadható idő alatti feldolgozását és kezelését lehetővé tevő technológiák összefoglaló elnevezése.

² 1 zettabyte = 1 milliárd terabyte = 10²¹ byte

A világegyetemben megfigyelhető objektumok, illetve jelenségek (összefoglalóan: valóságelemek) többsége olyannyira bonyolult, hogy felfogásuk, megértésük, illetve áttekintésük elképzelhetetlen valamilyen mértékű absztrakció nélkül. Az absztrakció során a szóban forgó valóságelemet egy felépítésében és/vagy működésében hasonló, de egyszerűbb modellel helyettesítjük. A modellek mindig is fontos szerepet játszottak a tudományos megismerés folyamatában, amelynek legfontosabb eleme a megfigyelés, illetve kísérlet. A kísérlet tulajdonképpen egy kérdés. Pontos válasz azonban ritkán érkezik olyan kérdésre, amely nincs pontosan megfogalmazva. Összetett, elvont vagy általánosságban megfogalmazott kérdések kísérletes úton közvetlenül nem megközelíthetők. Szükség van tehát az általános kérdéseknek olyan egyszerű kérdésekké történő lebontására, amelyek kísérleti úton már közvetlenül vizsgálhatók, illetve megválaszolhatók. Gyakorlatban ez a folyamat legtöbbször az induktív irányt követi, melynek során a speciális esetekből kiindulva haladunk az általános felé, egy iteratív módszer szerint **(1.1 ábra)**. A meglévő ismeretek alapján hipotézis állítunk fel, amely alapján konkrét kérdések, illetve előrejelzések (várt válaszok) fogalmazhatók meg. Az előrejelzések ellenőrzése kísérletek segítségével történik, melyek kimenetelétől függően a hipotézist elvetjük vagy megtartjuk. Az utóbbi esetben, a kísérletből nyert adatok alapján még általánosabb és/vagy pontosabb modellt készítünk. Az *adat*→*modell*→*adat*→*modell*→... sémát követve egyre pontosabb képet kapunk a világ felépítéséről és a benne lezajló folyamatokról, amely képet elméletek, illetve törvények formájában rögzítünk. Ezek a sarokpontjai a tudományos gondolkodásunknak mindaddig, amíg olyan tapasztalatokra teszünk szert, amelyek ezek elvetésére, vagy megváltoztatására kényszerítenek bennünket. A modellek készítésének fő célja a világ egyre jobb megismerése, működésének egyre pontosabb leírása és a megszerzett tudás gyakorlatban történő hasznosítása. Bár a tudomány hihetetlen nagy utat tett meg ezen a területen, a tudós munkáját mindvégig az az alázatos tudat kell, hogy jellemezze, hogy a modell sohasem egyenlő a valósággal. Egy rossz vagy egy jelentőségét tekintve túlértékelt modell kerékkötője lehet a tudományos fejlődésnek. Jóllehet segített szakítani az alkimista (misztifikáló, tudományosan nem vizsgálható) felfogással, a flogisztion elmélet mégis több mint fél évszázados kitérőre kényszerítette a kémiát a 18. században. *Smolin (2011)* szerint napjaink népszerű részecskefizikai modellje, a húrelmélet, felelős a fejlődés megtorpanásáért a fundamentális fizikában az elmúlt 25 évben.

A modellek két nagy osztályba, a materiális és formális modellek csoportjába oszthatók (*Rosenblueth és Wiener, 1945*). A materiális modell egy bonyolultabb valóságelemet próbál reprezentálni feltételezve, hogy a modell egyszerűbb, mint maga a valóságelem de a modell és a valóságelem a vizsgálat szempontjából lényeges tulajdonságok tekintetében hasonlóak. A materiális modellek segíthetik a tudósokat egy kevésbé ismert tudományterülethez tartozó jelenség megértésében úgy, hogy kapcsolatban hozzák a kérdéses jelenséget egy másik, már jól ismert jelenséggel. *Drude (1900)* modellje például, amellyel az elektromos áramot

igyekezett leírni, a klasszikus mechanikán alapult. Feltételezte, hogy a fémek belsejében az elektronok tökéletesen rugalmas golyókként pattognak ide-oda a kevésbé mozgékony pozitív ionok között. A talajok kapacitív modellje (Ritchie, 1985) is, amely az egyes talajrétegeket egy meghatározott vízkapacitással rendelkező tárolóedénynek képzei, ebbe a modellosztályba tartozik. A materiális modellek nem csak az ismeretlen jelenségek megismerésében jelentenek nagy segítséget, de a kutatómunkát is nagyban leegyszerűsíthetik. A modell és a modellezett rendszer közötti analógiát kihasználva például egyszerűbb egerekkel kísérletezni, mint elefánttal és bizonyos genetikai hatásvizsgálatokat célszerűbb lehet gyorsabb szaporodású fajokon végrehajtani.



1.1 ábra: A tudományos megismerés, illetve modellalkotás folyamata. A modell a hipotézisek, elméletek, illetve törvények gyűjtőfogalma.

A formális modellek elvont, logikai és egyéb matematikai kifejezések segítségével írják le a valós rendszer jellemzőinek (állapotjelzőinek) kapcsolatát, illetve azok térbeli és/vagy időbeli változását. Az ötletet vagy hipotézist, amely a modell alapját képezi, nem a matematika szolgáltatja, de igazán használhatóvá csak akkor válik, ha a matematika nyelvén is megfogalmazásra kerül, és így számszerű, ellenőrizhető előrejelzéseket tud adni. A formális modellosztály talán legszebb példája Maxwell modellje (Maxwell, 1865), amely négy egyenlet segítségével írja le az elektromos, és a mágneses tér viselkedését, valamint kölcsönhatásukat az anyaggal.

A talaj-növény rendszer igen összetett. Egy átlagos magyarországi tábla egy hektáros területére évente kb. 5000 tonna csapadék esik. Eközben ugyanerre a területre több mint 4 Tj energia érkezik a Napból. Az elvetett néhány kilogramm vetőmagból pár hónap alatt akár több mint 100 tonna tömegű növénytakaró fejlődhet ki, miközben a rendszer összetevői számtalan módon hatnak egymásra. Mi lesz a csapadék sorsa? Mennyi folyik el belőle a talaj felszínén? Mekkora hányada szivárog be a talajba, milyen anyagokat és mennyit ragad magával és szállít a talajvíz felé? Hogyan változik a talaj nedvességtartalma és a szállított anyagok koncentrációja térben és időben? A növények egységnyi idő alatt mennyi vizet vesznek föl a talajból, mennyi sugárzó energiát nyelnek el, és ebből mennyi szerves anyag keletkezik? A termelt szerves anyag hogyan oszlik meg a növény egyes szervei között? Hogyan fejlődik és növekszik a növény? Mekkora lesz a termés? A szárazföldi ökoszisztéma modellek közvetlen célja, hogy megválaszolják a fenti kérdéseket vagy legalább egy részüket. A bennük rejlő potenciál azonban messze túlmutat ezen. Ezen modellek segítségével nem csak a kapcsolódó tudományterületek tudásanyagát bővíthetjük, de fejleszthetjük a termelés hatékonyságát és fenntarthatóságát a növénytermesztésben felismert problémák megoldása révén. A szárazföldi ökoszisztéma modellek sokrétű alkalmazhatósága magyarázza azt, hogy az elmúlt évtizedben folyamatos és fokozatosan növekedő érdeklődés mutatkozik az agrár, illetve környezeti/környezetvédelmi hatástanulmányokra készített modellek fejlesztése és alkalmazásai iránt. Különösen sokat használnak ezeket a modelleket klímaváltozással kapcsolatos elemzések és hatástanulmányok készítése során, mivel gyakorlatilag ezek kínálnak az egyetlen tudományosan is megalapozott módszert arra, hogy kellő óvatossággal ugyan, de valamiképpen a jövőbe pillantsunk.

Az előrejelzések szerint 2050-re Földünk lakossága eléri a 9 milliárdot, az élelmiszer- és takarmányigény akár 70%-os növekedést is mutathat majd a jelenlegi szinthez képest. A népességnövekedéssel együtt járó szükségletnövekedés kielégítésére, az elkövetkező 50 év alatt több élelmiszert kell előállítani, mint az elmúlt 10.000 év alatt összesen, ráadásul egyre szélsőségesebb körülmények között. A 2010. és 2011. egymást követő évek voltak az elmúlt száz év legcsapadékosabb (959 mm) és legszárazabb (424 mm) évei. Bár erre a kihívásra a legkézenfekvőbb megoldást a mezőgazdasági termelés hatékonyságának növelése jelentené, a szomorú tény az, hogy az intenzív növénytermesztés gyakran vezet a talajállapot romlásához és végső soron a várható termésszintek csökkenéséhez. A helyzetet tovább nehezíti, hogy a szélsőséges időjárási helyzetek valószínűsége, hosszúsága és intenzitása várhatóan növekedni fog a jövőben. A termésszintek valamint a termésbiztonság fenntartását új kórokozók és kártevők megjelenése is várhatóan megnehezíti majd. A téli csapadékmennyiség és a zivatarok intenzitásának növekedésével a talajerózió és a nitrátlemosódás kockázata is előreláthatólag megnövekszik.

A környezeti feltételek kedvezőtlen irányú megváltozásának káros következményeit enyhítő lehetőségek, illetve eszközök tárháza bőséges, amely magában foglalja a különböző talajmegőrző technikákat, alternatív agrotechnikai módszereket, a növénynemesítést, a precíziós gazdálkodás folyamatosan bővülő tevékenységi körét valamint az agro-infokommunikációs eszközök egyre nagyobb választékát kezdve az egyszerű agrometeorológiai érzékelőktől az automatizált öntözésvezérlő rendszerekig és egyéb szaktanácsadási rendszerekig. Az előrejelzések szerint a jövőben felértékelődik a növénytermesztéshez felhasznált vízzel és tápanyagokkal történő okszerű gazdálkodás jelentősége. A szárazföldi ökoszisztéma modellek várhatóan mindkét területen meghatározó szerephez jutnak majd.

Jelen dolgozat célja, hogy az alapkutatástól kiindulva egészen a gyakorlati alkalmazásokig terjedően bemutassa a szárazföldi ökoszisztéma modellezés történetét, alapelveit, problémáit, kihívásait valamint a benne rejlő lehetőségeket. Bár a szerző igyekszik átfogó képet adni az említett témákról, a tárgyalás mégis szubjektív mivel azon élmények súlypontoszák, amelyek során a szerző megismerkedett a szóban forgó modellekkel. Fontos megjegyezni, hogy a dolgozatban megfogalmazott állítások a talaj-növény rendszer egészét, illetve egyes részeit leíró modellekre vonatkoznak. A dolgozatnak nem célja a bemutatott témakörök teljes részletességgel történő tárgyalása. Célja viszont a modellezéssel kapcsolatos témák szerteágazó, sokszínű kapcsolatrendszerének bemutatása, egyfajta figyelemfelkeltés, egy kiindulási pont megadása, ahonnan az olvasó elindulhat az általa érdekesnek tartott téma részletes feldolgozásának irányába.

2. Fogalmi és történeti áttekintés

2.1 Modellek típusai

A modellalkotás módja, illetve a jelenségek leírásának módszertana szerint három modelltypust különböztethetünk meg: empirikus, teleologikus és mechanisztikus modelleket. A megfigyelési adatokat, illetve a vizsgált jelenséget közvetlenül leíró modelleket **empirikus** (tapasztalati vagy statisztikus) modelleknek nevezzük. A népi bölcséletben, de a szépirodalomban is találkozhatunk velük: 'Medárd napján, ha esik, akkor negyven napig esik', tartja a mondás. "Piros az ég alja: aligha szél nem lesz." írja Petőfi Sándor, János vitéz című versében. Egyszerű összefüggések ezek, mégis komoly segítséget jelenthetnek bizonyos agrotechnikai műveletek tervezésénél. A megfigyelések igazán hasznossá, használhatóvá akkor válnak, ha a matematika nyelvén is sikerül megfogalmazni őket a közöttük lévő összefüggéseket. Az empirikus modellalkotás módszertana egyszerű, amely az adatok¹ vizsgálatából, a független és függő változó(k) közötti kapcsolatot leíró függvény kiválasztásából és a függvény paramétereinek meghatározásából áll. A számítástechnika fejlődésével gyakran felcserélik a második és a harmadik lépést mivel egyre több olyan szoftver áll rendelkezésre, amelyek képesek nagyszámú, előre definiált függvénytypust illeszteni az adatokra, majd néhány hibamutató segítségével rangsorolni a megvizsgált függvényeket például az illeszkedés szorossága szempontjából. Sőt, neurális hálózatok alkalmazása esetén a második és a harmadik lépés összemosódik, az algoritmus egyszerre keresi a modell függvény alakjának és paramétereinek az optimumát. Problémát jelenthet azonban, ha a felhasználó gondolkodás nélkül legjobbnak tartja azt a modellt, amit a program a legjobbnak minősített.

Közismert tény, hogy termésnövekedés érhető el vetés előtti vagy vegetatív fázisban történő nitrogén (N) műtrágya kijuttatásával. Megfigyelési adatokra leggyakrabban hiperbolikus (E.2.1) vagy polinom (E.2.2) függvényt illesztnek így állítva elő egy empirikus modellt (2.1 ábra).

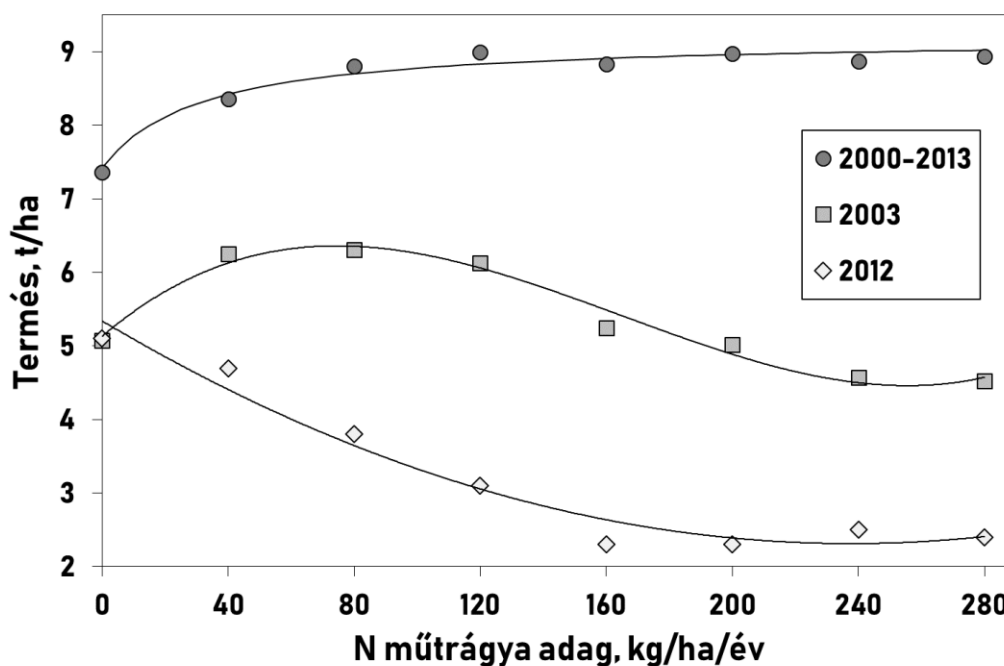
$$\text{E.2.1} \quad T = a \cdot \frac{b+N}{c+N}$$

$$\text{E.2.2} \quad T = a + b \cdot N + c \cdot N^2 + d \cdot N^3$$

ahol T az elért termés, a , b , c és d függvényillesztéssel meghatározható paraméterek.

¹ Az adatok bemenő (független változók) és kimenő (függő változók) csoportokba sorolhatók, amelyek legtöbbször megfigyelésből, illetve mérésből származnak.

Sokéves átlagadatokra a hiperbolikus függvény jobban (kisebb hibával) illeszkedik. Szigorúan monoton jellegéből fakadóan azonban nem képes leírni azt a főként szárazabb években megfigyelhető jelenséget, amikor az átlagos trend megváltozhat és a N műtrágya egy bizonyos mennyiség után már nem növeli, hanem csökkenti a termést, sőt szélsőséges esetben a kontroll kezelés (N = 0 kg/ha) adja a legnagyobb termést (**2.1 ábra**). A polinom függvény alkalmas ennek a jelenségnek a leírására. Amennyiben a modellalkotó, minden elképzelés vagy szakértelem nélkül, egy program segítségével keresi a legkisebb hibával illeszkedő függvényt könnyen olyan modellt kaphat, amely matematikailag megfelelő (sőt a legjobb, azaz a legkisebb hibával illeszkedik a mérési adatokra) de a valóságnak még sem felel meg. A **2.1 ábrán** látható 2003-as év adataira egy polinom függvény sokkal jobban illeszkedik, mint egy hiperbolikus függvény. Az előbbinek azonban 240 kg/ha körül minimuma van, ami értelmezhetetlen. 240 kg/ha fölött egyre növekvő a kijuttatott N műtrágya mennyiségét nem kaptunk volna egyre nagyobb terméseket abban az évben².



2.1 ábra: Kukorica szemtermésének alakulása a kijuttatott N műtrágya mennyiségének függvényében, Martonvásáron. A ● szimbólumok a 2000-2013 időszak átlagát, a ■ és ◆ szimbólumok a 2003. és 2012. aszályos éveket, míg a folytonos vastag, illetve vékony vonalak a pontokra illesztett hiperbolikus (E.2.1), illetve polinom (E.2.2) függvények képét jelölik.

A kizárólag megfigyelési adatokra épülő, és valamilyen matematikai formulában testet öltő empirikus modellekben általában nem jut kifejezésre semmilyen alapvető fizikai (pl. Lomonoszov–Lavoisier-törvény) vagy kémiai (pl. Arrhenius törvény)

² Empirikus modellek esetében különösen fontos megállapítani és közölni a modell érvényességi (értelmezési) tartományát, ami legegyszerűbben a modellfejlesztés során felhasznált adatok értékkészletével közelíthető.

törvényszerűség, és a modell nem hordoz információt sem a rendszer felépítéséről sem annak működéséről, az ok-okozati összefüggések ezen modell típusban nem fejeződnek ki. A tapasztalati modell tulajdonképpen csak leképezi a megfigyelési adatokat egy egyszerűbb, könnyebben használható formába és a független, illetve függő változók közötti kapcsolatot függvény(ek) segítségével írja le. Ezek a modellek kiválóan alkalmazhatók interpolációra: a megfigyelt értékek közötti tartományokra történő becslésre. A megfigyelési adatok által meghatározott értelmezési tartományon kívüli alkalmazásuk (extrapoláció: pl. **2.1. ábra**: $N > 240$ kg/ha) azonban nem, vagy csak mértéktartó óvatossággal együtt javasolt. Az empirikus modellek esetében különösen fontos az érvényességi tartomány megállapítása, illetve annak rögzítése a modell dokumentálása során.

Az empirikus modellek jellemzően statikus modellek, az idő, mint független változó nem szerepel bennük. Vannak viszont determinisztikus és sztochasztikus fajtái. A determinisztikus modellekben (pl. **E.2.1 és E.2.2**) a bemenő változók értékei egyértelműen meghatározzák a kimenő változók értékeit. A sztochasztikus modellek a mérési adatokat valószínűségi változók realizációjaként fogják fel és a valószínűségi változókhoz tartozó eloszlásfüggvények statisztikai között determinisztikus kapcsolatot feltételeznek. Ennek megfelelően a sztochasztikus modellek a gyakorlatban két almodellből épülnek föl: egy determinisztikus almodellből és annyi véletlenszám generátorból, amennyi független változót a modell tartalmaz. Egyváltozós esetben a véletlenszám generátor minden számítási lépés előtt véletlenszerűen választ egy értéket a determinisztikus almodell értelmezési tartományából³, annak eloszlásfüggvényét figyelembe véve. Sztochasztikus modellek jellemzően az időjárás generátorokban fordulnak elő. Az MV-WG időjárás generátorban (Fodor et al., 2010) a csapadékos napok csapadékmennyiségének (x) eloszlását egy háromparaméteres Weibull eloszlásfüggvény ($F(x)$) írja le.

$$\mathbf{E.2.3} \quad y = F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} & x \geq a \\ 0 & x < a \end{cases}$$

Ahol a , b , és c az eloszlásfüggvény paraméterei, melyeket hosszú időjárási adatsorokra (megfigyelt napi csapadékmennyiségek relatív gyakorisága) történő függvényillesztéssel kaphatunk meg.

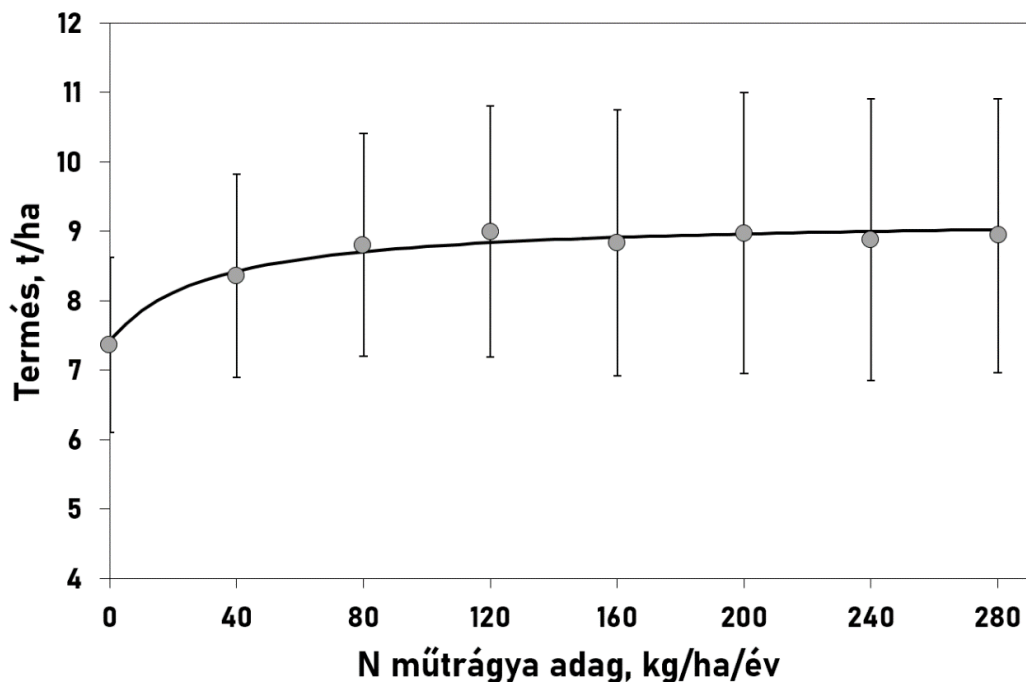
Az időjárás generátor $F(x)$ inverzét (determinisztikus almodell) használja, amelynek bemenő értéke egy véletlenszám generátorral előállított 0 és 1 közé eső szám (y),

³ Többváltozós esetben a véletlenszám generátorok minden számítási lépés előtt véletlenszerűen választan egy vektort a determinisztikus almodell többdimenziós értelmezési tartományából.

kimeneti értéke pedig az a csapadékmennyiség (x), amit az adott napra a modell generál.

Amennyiben a méréseinket hosszabb ideig és/vagy több ismétlésben végezzük, a bemenő adatok segítségével nem csak a függő változó várható értékére adhatunk becslést, hanem ezen értékek bizonytalanságára is. A bizonytalansági tartomány eloszlásfüggvényét is megbecsülhetjük vagy, egy kicsit egyszerűsítve a modellen, azt a tartományt adjuk meg, ahová a lehetséges kimenetek 95% százalékos valószínűséggel esnek (E.2.4 vö. E.2.1 és 2.2 ábra).

$$\text{E.2.4 } T = \underbrace{9,2 \cdot \frac{25+N}{31+N}}_{\text{várható érték}} \pm \overbrace{1,376 + 0,0027 \cdot N}^{\text{bizonytalansági tartomány}}$$



2.2 ábra: Kukorica szemtermés várható értékének alakulása a kijuttatott N műtrágya mennyiségének függvényében, Martonvásáron, 2000-2013. A folytonos vonal a pontokra illesztett hiperbolikus függvény (E.2.4) képét mutatja. A függőleges hibasávok a szemtermés bizonytalanságát jelölik: azt a tartományt, amelybe termésértékek 95% százalékos valószínűséggel esnek.

A bizonytalansági tartomány mérete a mérés, illetve körülményeinek (térbeli heterogenitás, évjáráthatás, stb.) bizonytalanságát tükrözi. Ettől független fogalom a modell hibája, ami leginkább a tudásunk hiányosságáiból, a modellünk egyszerűségéből, illetve pontatlanságából vagy a helytelen modellhasználatból ered, és amit különböző hibamutatókkal jellemezhetünk (2.3.4 fejezet).

A **teleologikus** (célorientált) modellek kidolgozásakor a modellalkotó feltételezi, hogy az élő rendszerben történő folyamatokat bizonyos célszerűség vezérli, amely

egyben megadja a folyamatot leíró modell alakját is. Mindezt egy virágzás idejének becslésére alkalmas modell példáján keresztül mutatjuk meg. A kezdő időpontban még vegetatív fázisban lévő, w_0 tömegű, μ növekedési együtthatóval jellemzett növény tömege (w) egy tetszőleges későbbi időpontban (t) az alábbi képlettel számítható ki:

$$\mathbf{E.2.5} \quad w = w_0 \cdot e^{\mu t}$$

Jelölje t_f a virágzás időpontját. Ebben az időpontban a növekedés ütemének aktuális értékét (g) **E.2.5** differenciálásával kaphatjuk meg:

$$\mathbf{E.2.6} \quad g = \mu \cdot w_0 \cdot e^{\mu t_f}$$

Feltételezve, hogy a virágzás után a tömeggyarapodás ebben az állandó ütemben folytatódik és a növény által előállított összes anyag a termésbe kerül, a tenyészidőszak végére (t_e) a termés tömege (w_e) az alábbi értéket veszi föl:

$$\mathbf{E.2.7} \quad w_e = \mu \cdot w_0 \cdot (t_e - t_f) \cdot e^{\mu t_f}$$

Minél később következik be a virágzás annál nagyobb lesz a reprodukzív szakaszra jellemző növekedési sebesség, viszont annál rövidebb idő marad a szentelítődésre, illetve a termés kialakulására, hiszen a növény maximális életkora genetikailag determinált. Feltételezve, hogy a növény 'célja' (és ettől válik ez a modell teleologikus modellé) az, hogy minél nagyobb termést érjen el, **E.2.7** maximumának keresésével, ahol a deriváltja nulla, lehetőség nyílik a virágzás időpontjának meghatározására.

$$\mathbf{E.2.8} \quad 0 = \frac{\partial w_e}{\partial t_f} = -\mu \cdot w_0 \cdot e^{\mu t_f} + \mu^2 \cdot w_0 \cdot (t_e - t_f) \cdot e^{\mu t_f}$$

Az egyszerűsítéseket elvégezve és az egyenletet átrendezve a vetési időre az alábbi képletet nyerhetjük:

$$\mathbf{E.2.9} \quad t_f = t_e - \frac{1}{\mu}$$

Az **E.2.9** egyenlet (modell) segítségével a növény két jól meghatározható paraméterének (maximális életkor és vegetatív növekedési sebesség) ismeretében, a virágzás időpontja is meghatározható. A teleologikus modellek előnye, hogy kidolgozásukhoz nincs szükség megfigyelési adatokra. Hátrányuk viszont, hogy a leírt folyamatok, illetve összefüggések működési elvéről valamint ok-okozati viszonyairól ezek a modellek sem hordoznak információt. Bár az elmúlt évtizedekben, a gyakorlati modellalkotásban, ezt a típust fokozatosan kiszorították az empirikus modellek, meglévő rendszermodellek almodelljeiként napjainkig használatosak. Például a CERES modellcsalád (*Ritchie and Otter, 1985*) az előbbieken vázolt modellt használja a virágzási idő meghatározására, de például a

fotoszintézissel termelt anyag földalatti és földfeletti növényrészek közötti elosztására is teleologikus modellt használ feltételezve, hogy a növény 'célja' az optimális növekedési ütem fenntartása.

A **mechanisztikus** (folyamat-orientált) modellek alapjául az szolgál, hogy a természetben megfigyelhető folyamatok alapvető törvényszerűségeknek megfelelően zajlanak. Ezek az ún. megmaradási törvények a mechanisztikus modellekben kontinuitási egyenletek formájában jelennek meg. Az anyagmegmaradás törvénye szerint a rendszerben (talaj egységnyi térfogateleme, növény, stb.) az anyag felhalmozódásának üteme megegyezik az anyag beáramlási és kiáramlási ütemének különbségével. Az energia-megmaradás törvénye kissé bonyolultabb, lévén a rendszer energiája több formában létezik és több tényező is képes ezeket az energiaformákat megváltoztatni. A Termodinamika I. főtétele értelmében a rendszer összenergiája három fő komponensből tevődik össze: belső (E_b), kinetikus (E_k) és potenciális (E_p) energiából. Ennek megfelelően a rendszer energiájának megváltozását (ΔE) az alábbi általános összefüggéssel írhatjuk le:

$$\mathbf{E.2.10} \quad \Delta E = \text{beáramló}(E_b, E_k, E_p) - \text{kiáramló}(E_b, E_k, E_p) + E_s - W$$

Ahol E_s és W a sugárzással érkező energiát, illetve a rendszer által végzett munkát jelölik.

Hasonló összefüggések fogalmazhatók meg a töltésmegmaradás és a lendület-megmaradás törvénye alapján is. A mechanisztikus modellek ezen alapvető törvényszerűségeket alkalmazzák a konkrét folyamatban szereplő változók közötti összefüggések, ok-okozati kapcsolatok leírására. Bár ezen modellek kidolgozásához elvileg nincs szükség megfigyelési adatokra, az adatok segíthetik a modellalkotót általános törvények konkrét esetre történő alkalmazásába. A mechanisztikus modellek teszteléséhez (validálásához), sőt gyakorlati (tényleges) alkalmazásukhoz is szükség van megfigyelési adatokra, hiszen ezen modellekben is szerepelnek olyan paraméterek, amelyek meghatározása empirikus modell(ek) használatát igényli, illetve igényelheti, amint azt a következő példa is jól szemlélteti.

Buckingham (1907) és *Richards (1931)* az anyag- és energia-megmaradás törvénye alapján dolgozták ki a telítetlen talajban történő vízáramlás modelljét. Az egyenletben (**E.2.11**) az a két tény fejeződik ki, hogy a talaj egy térfogatelemének nedvességváltozását a vízáramlás intenzitásának helyi viszonyai határozzák meg (anyagmegmaradás), míg a talaj két pontja (praktikusan a térfogatelem függőleges irányban vett két szemközti határfelülete) közötti vízáramlás intenzitását a víz két pontban tapasztalható potenciáljának különbsége határozza meg (energia-megmaradás).

$$\mathbf{E.2.11} \quad \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \cdot \left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \right)$$

Θ nedvességtartalom [m³/m³]

h nedvességpotenciál [H₂O m]

K vízvezető-képesség [m/s]

t idő [s]

z (talajfelszíntől mért) távolság [m]

A Richards egyenlet (E.2.11) egy másodrendű (a potenciál második deriváltja szerepel benne), nemlineáris (a benne szereplő függvények $h(\theta)$ és $K(h)$ nem lineárisak), csatolt (a nedvességtartalom időbeli változása a potenciál térbeli változásának függvénye) differenciálegyenlet. Gyakorlatban a $h(\theta)$ és $K(h)$ függvényeknek csak néhány mérésből származó pontja ismert, amelyekre meghatározott alakú függvényeket illesztve (E.2.13 és E.2.14) állíthatók elő azok a folytonos függvények (empirikus modellek), amelyek az E.2.11 differenciálegyenlet megoldásához szükségesek. Jól látható tehát, hogy a tisztán elméleti alapon (megfigyelési adatok felhasználása nélkül) kidolgozott Richards egyenlet (mechanisztikus modell) a gyakorlatban csak akkor használható, ha mérési adatokra épülő empirikus modellekkel kapcsoljuk össze. Ezen összekapcsolás révén lesz az univerzális (elméletileg bárhol érvényes), mechanisztikus modell alkalmas arra, hogy egy konkrét helyen használjuk. Ezen összekapcsolás során kerül bele a modellbe a helyspecifikus információ, az adott helyre jellemző paraméterértékek integrációja révén.

A mechanisztikus modellekben, mivel általában folyamatot írnak le, legtöbbször az idő is megjelenik, mint független változó. Ennél fogva, ezeket a modelleket a **dinamikus** jelzővel is illelhetjük. Azokat a dinamikus modelleket, amelyek számítógépek segítségével írják le a rendszer folyamatait, azaz számítógépes algoritmusok segítségével implementálnak egy mechanisztikus modellt, **szimulációs** modelleknek nevezzük. Mivel a mechanisztikus modellek alapvető fizikai törvényszerűségekre épülnek ezért nagy valószínűséggel megfelelően működnek akkor is, amikor olyan körülmények között alkalmazzuk őket, amelyek kívül esnek a megfigyelési adatok tartományán (extrapoláció). Bár az empirikus modellekről ez nem mondható el, mégis segítséget nyújthatnak a mechanisztikus modellek kidolgozásához, mivel segítségükkel jobban áttekinthetővé válnak a megfigyelési adatok, amelyek segítik az általános fizikai törvényszerűségek konkrét jelenségre történő alkalmazását. Tycho Brahe megfigyelései segítették Keplert törvényei (empirikus modell) megalkotásában, amelyek hozzájárultak Newton földi és égi mechanikát egybefoglaló törvényeinek (mechanisztikus modell)

megalkotásához. Hasonlóan, Darcy vízáramlásra vonatkozó megfigyelési adatai és az arra épülő egyszerű empirikus modellje (*Darcy, 1856*) jelentette a kiindulási alapot Richards mechanisztikus modellje számára.

A **növénytermesztési** modellek legegyszerűbb fajtái tisztán statikus, empirikus modellek. Összetettebb fajtái viszont olyan szimulációs modellek, melyek egyaránt tartalmaznak empirikus és mechanisztikus almodelleket ún. modulokat, amelyek a talaj-növény rendszer egyes folyamatait írják le általában egy napos időléptékben. Ezen modellek elsődleges célja, hogy becslést adjanak a termés várható mennyiségre az időjárási- és talajviszonyok valamint az agrotechnikai műveletek ismeretében. Ennél fogva, a növénytermesztési modellekben különösen nagy hangsúlyt fektetnek a növényben zajló folyamatok részletes leírására, míg mondjuk a talaj szénforgalmának leírása elnagyolt, illetve sok modell esetében teljesen hiányzik. Mivel ezek már összetett modellek nem csak a paramétereik értékét, de a bemenő változók kezdő-, perem- és kényszerfeltételeit is meg kell adni a modell számára. A kezdőfeltételek közül a talajszelvény egyes rétegeinek nedvesség- és tápanyagtartalma a legfontosabb. A peremfeltételek tulajdonképpen a napi meteorológiai adatok, de idetartozik a talajvíz-szint mélysége is. Ezek adják meg a néhány méter vastag talaj-növénytakaró felső és alsó határán keresztül történő anyag- és energiaáramlás intenzitás viszonyait. A kényszerfeltételek tulajdonképpen az emberi beavatkozás (agrotechnika) számszerű kifejeződései: a talajműveléssel, trágyázással, vetéssel, öntözéssel és betakarítással kapcsolatos adatok.

A **biogeokémiai** modellek olyan mechanisztikus modellek, amelyek szintén a talaj-növény rendszer folyamatait írják le, eredetileg egy napnál jóval nagyobb (pl. hónapos) időléptékben. Igen részletesen írják le a talaj szén-, ÜHG⁴- és tápanyagforgalmát, viszont a növényben lezajló folyamatok és/vagy az emberi tevékenység hatásának modellezését általában elnagyolják: csak bizonyos földhasználati típusok (pl. erdő) modellezését teszik lehetővé, vagy például elhanyagolják a gyökérsűrűség mélységtől függő változását és tulajdonképpen egyenletes függőleges irányú gyökéreloszlást feltételeznek a teljes gyökérszónában.

A szárazföldi ökoszisztémák modellezésének fenti két típusa elsősorban a modellfejlesztők szakterülete, illetve érdeklődési köre mentén jött létre: a modell képességeit és felhasználási lehetőségeit meghatározta és behatárolta a fejlesztő hozzáértése és céljai. Mára a két modelltípus közötti határ elmosódott (**Id. AgroMo, 3.3 fejezet**), a modellezők tanulnak egymástól és egy-egy megbízható modell-összetevőt (almodellt) más modell típusban is újra hasznosítanak. Egyértelműen az

⁴ ÜHG – üvegházhatású gáz

a cél, hogy az ökoszisztémában lezajló folyamatok lehető legszélesebb körét legyen képes leírni modell. Ehhez igazodva, a továbbiakban a szárazföldi ökoszisztémák modelljeire összpontosítok, melyekre az egyszerűség kedvéért **ökoszisztéma modellként**⁵ vagy még pontosabban **növény-talaj modellként** hivatkozok, éssben tartva, hogy jelen dolgozatban a vizes, illetve vízi élőhelyek modellezésével nem foglalkozok.

2.2 Szerveződési szintek

A bioszférában, illetve biológiában számos szerveződési szintet figyelhetünk meg, illetve különböztethetünk meg kezdve a sejtektől az ökoszisztémáig. Az egymásra épülő szinteket indexszel ellátva az ökoszisztéma modellek működési tartománya a szervek (i-1), az egyedek (i) és az állományok (i+1) szintjét öleli át. Az esetleg fogalmi zavarok elkerülése végett érdemes kiemelni a hierarchikus rendszerek néhány, modellezési szempontból is fontos tulajdonságát.

- 1) Minden szintnek meg van a saját nyelvezete, szóhasználata. A 'termés' vagy 'levélfelület' fogalmaknak például nincs értelme a szervek vagy a szövetek szintjén.
- 2) Minden szint (objektumai és folyamatai) a megelőző szintek összegződéseként áll elő. A teljes növény tömegének gyarapodása az anyagcserét lefolytató részek teljesítményének (pl. a levélben megtermelt anyag és a gyökér által felvett tápanyagok mennyiségének) függvénye.
- 3) Egy adott szinten való működésnek szükséges (de nem elégséges) feltétele a megelőző szinteken való megfelelő működés, ami fordított irányban nem feltétlenül igaz. Például a frissen levágott és az élő növény sejtszintű működése között nincs különbség.
- 4) Egy szint működését meghatározó hatótényezőket, kényszer- és peremfeltételeket a magasabb szintek szolgáltatják. Például egy növényegyed párologtatásának intenzitását az állományban kialakult mikroklíma és a talaj nedvességtartalma határozza meg.
- 5) Egyre magasabb szintek felé haladva a szintekre jellemző térbeli és időbeli skálaméret általában növekszik: egyre nagyobb objektumokkal és egyre lassabb folyamatokkal találkozhatunk.

⁵ A növény-talaj modell megnevezés a pontosabb, hiszen a dolgozatban tárgyalt modellek nem foglalják magukba az ökoszisztémákban élő állatok élettani folyamatait és viselkedését, illetve azok hatását az ökoszisztéma többi összetevőjére. Ennek ellenére a szakirodalomban inkább az ökoszisztéma modell megnevezés használatos.

2.3 Ökoszisztéma modellek felépítése és fejlesztése

Összetettségétől függetlenül, valamennyi modell **tározók** és **folyamatok** rendszerével írja le az ökoszisztéma felépítését és változásait. Tározók reprezentálják a valóságelemeket (levél, talajréteg, stb.), pontosabban az azokban tárolt anyag mennyiségét (levél széntartalma, talajréteg nedvességtartalma, stb.). Egy valóságelemhez több tározó is tartozhat a modellben. A tározók állapotát, a tárolt anyag mennyiségének aktuális értékét, a modellek **állapotváltozó**okban tárolják, de vannak állapotváltozók, amelyek nem anyagmennyiséget jelölnek (pl. levélfelület index vagy talajhőmérséklet). Folyamatok (fotoszintézis, szervesanyag bomlása, stb.) határozzák meg az egyes tározókból egységnyi idő alatt más tározókba átáramló, illetve átalakuló anyag mennyiségét.

A számítások virtuális időben vett időegységét nevezzük a modell **időléptékének**, illetve **időbeli felbontásának**, ami ökoszisztéma modellek esetében általában egy nap⁶, melynek valós időben vett megfelelője egy **számítási ciklus** időtartama. Valós időben a számítások időtartama természetesen jóval rövidebb: pl. a kukorica virtuális időben vett, hat hónapig tartó tenyészidőszakának szimulációja valós időben kevesebb, mint egy másodpercig tart⁷. A valóságban az anyagáramok intenzitását a tározók állapotán túl, számos hatótényező, környezeti feltétel (talajhőmérséklet, levélfelület index, stb.) befolyásolja, melyek aktuális értékét a modellek szintén állapotváltozóokban tárolják és az időléptéknek megfelelően frissítik. Az állapotváltozók a modellt implementáló algoritmusokon keresztül kerülnek logikai kapcsolatba, melyek rendszere biztosítja az **információ áramlását** a modellen belül. A modellfejlesztés első, kulcsfontosságú lépése az információ modellen belüli áramlásának megtervezése, melynek során figyelembe kell venni, hogy a környezeti feltételek nem csak a tározók közötti anyagáramlást, de a tározók kapacitását is befolyásolhatják⁸.

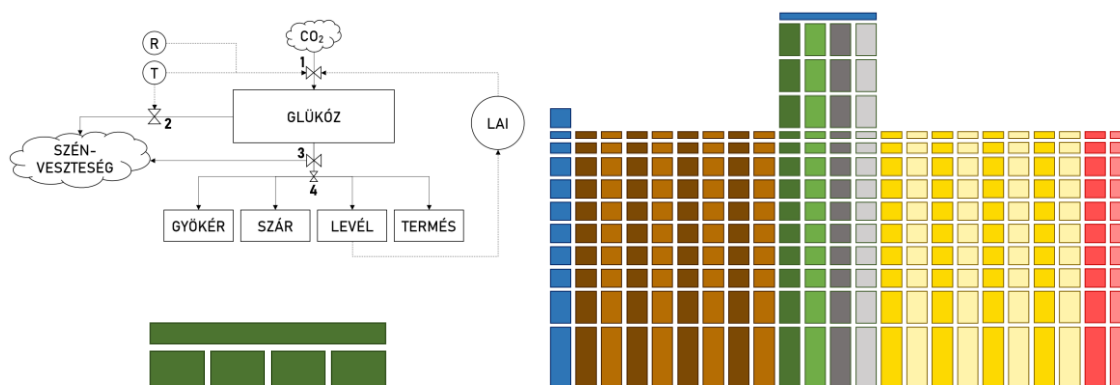
A bioszféra rétegzettsége miatt, a környezeti feltételek függőleges irányban jelentős heterogenitást mutatnak ugyanazon időpillanatban, melyet a modellek a rendszer, (általában csak a talaj, függőleges irányú) **térbeli felbontásával** igyekeznek kezelni (**2.3 ábra**) eltérő tulajdonságú tározókat definiálva a rendszer különböző (megkülönböztetett) rétegei számára. Egy modell felépítését és összetettségét a figyelembe vett tározók száma, a közöttük feltételezett anyagáramlást leíró

⁶ Időlépték szempontjából (is) léteznek vegyes modellek, amelyek más-más folyamatokat más időbeli felbontásban szimulálnak. Sőt bizonyos modellek a folyamatok (pl. vízáramlás intenzitása a talajban) változó dinamikáját figyelembe véve, a számítások időléptékét megváltoztatják szimuláció közben, a számítási pontatlanságok csökkentése érdekében.

⁷ A szimulációt Intel Core i7 (4,2 GHz) processzorral rendelkező számítógépen futtatva.

⁸ Például: a levélfelület növekedésével a lombzat által felfogott csapadék maximális mennyisége növekszik.

folyamatok száma és jellege, valamint a folyamatok során figyelembe vett hatótényezők száma határozza meg (2.3 ábra).



2.3 ábra: Két eltérő összetettségű ökoszisztéma modell: A kimondottan öntözött rizs modellezésére kifejlesztett ORYZA1 v1.3 modell⁹ (Kropff et al., 1994) folyamat ábrája (bal fent) és öt növényi tározója (bal lent, téglalapokkal szemléltetve). A Biome-BGCMuSo v6.2 modell (Hidy et al., 2022) 244 tározót (jobb oldalon) különböztet meg és a talajt, függőleges irányban tíz eltérő vastagságú rétegre bontja egészen tíz méter mélységig. Jelölések: R – sugárzás; T – léghőmérséklet; LAI – levélfelület index; 1 – fotoszintézis; 2 – fenntartó légzés; 3 – növekedési légzés; 4 – elosztás; kék: víz-tározók: a talajrétegeken túl egy 'tócsa/belvíz' és egy 'lombozaton felfogott csapadék' tározó; barna: talaj szervesanyag-tározók (négy eltérő bomlási sebességű tározó reprezentálja): sötét – széntartalom, világos – nitrogéntartalom; zöld: (élő) növény (gyökér, szár, levél, termés) szervesanyag-tározók: sötét – széntartalom, világos – nitrogéntartalom; szürke: (elhalt) növény (gyökér, szár, levél, termés) szervesanyag-tározók: sötét – széntartalom, világos – nitrogéntartalom; sárga: növényi maradvány szervesanyag-tározók (négy eltérő bomlási sebességű tározó reprezentálja): sötét – széntartalom, világos – nitrogéntartalom; piros: talaj szervesetlen nitrogén-tározók: sötét – ammónia, világos – nitrát.

Az ökoszisztéma modellek számításait a légkör, a talaj és a növény számszerű jellemzői határozzák meg. Két fajtájuk van, melyeket a modell **paramétereinek**, illetve **változóinak** nevezünk (2.1 táblázat). A paraméterek értékei a modell működése/működtetése során nem változnak¹⁰, a változók értékei viszont, ahogy az elnevezés is sejteti, változhatnak; A modell használatához szükség van az összes paraméter értékének megadására¹¹. Szükséges továbbá néhány állapotváltozó

⁹ Optimális víz- és tápanyag-ellátottságot feltételezve 'nincs szükség' a talajfolyamatok nyomon követésére.

¹⁰ A paraméterek, illetve változók közötti különbségtétel tükrözi a modell kifejlesztésének körülményeit, illetve lehetőségeit. Egy modell adott paramétere egy másik modellben változóként szerepelhet (2.3.2 fejezet).

¹¹ A gyakorlatban sokszor előfordul, hogy több paraméter értéke más paraméterekből, becslés (ún. beágyazott modell) segítségével kerül meghatározásra, így ezeket nem szükséges a felhasználónak megadni.

kezdeti értékének megadása, valamint a modellezett rendszer peremfeltételeit meghatározó változók időbeli alakulásának megadása. Ezeket az adatokat együttesen **bemenő adatok**nak hívjuk. A kezdőfeltételeket nem feltétlenül a felhasználónak kell megadni. Vannak modellek, amelyek egy ún. önbeállítási (angolul: *spin-up* vagy *self-initialization*) fázis során képesek megbecsülni a legfontosabb tározók induló értékeit (**2.3.9 fejezet**).

2.1 táblázat: Ökoszisztéma modellek néhány paramétere illetve változója

Megnevezés	Típus	Szerep	Be/Kimenő
napi max. léghőmérséklet	változó	peremfeltétel	bemenő
talajvíz mélysége	változó	peremfeltétel	bemenő
szabadföldi vízkapacitás	paraméter	-	bemenő
feltalaj (0-30 cm) víztartalma	(állapot)változó	kezdőfeltétel	be/kimenő
feltalaj szervesanyag-tartalma	(állapot)változó	kezdőfeltétel	be/kimenő
humusz C:N aránya	paraméter	-	bemenő
talaj N ₂ O kibocsátása	változó	-	kimenő
bázishőmérséklet	paraméter	-	bemenő
levélfelület index	(állapot)változó	-	kimenő
műtrágya mennyisége	változó	kényszerfeltétel	bemenő
vetés dátuma	változó	kényszerfeltétel	bemenő

A modell által számított változókat kimenő változóknak, **kimenő adatok**nak nevezzük, melyek legfontosabb csoportja, a modellezett rendszer mindenkori állapotát meghatározó változók, az állapotváltozók. Összetettebb modellek használnak még ún. belső, vagy segédváltozókat is a kimenő változók számítása során, amelyeket nem feltétlenül tesznek elérhetővé a felhasználó számára.

Azt az eseményt, amikor az ökoszisztéma egy térben és időben behatárolt egységének folyamatait, a rendszert jellemző változók értékeinek időbeli alakulását, egy szimulációs modell segítségével határozzuk meg **szimulációnak**, **in silico kísérletnek**, **modellfutásnak** vagy egyszerűen csak futásnak nevezzük.

A modellek mindenképpen tartalmaznak egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat. A modell felhasználási célja miatt például, a talaj szerepének illetve funkcióinak teljes figyelmen kívül hagyása (ORYZA1 v1.3, *Kropff et al., 1994*) vagy nagyon durva térbeli és időbeli felbontása (FOREST-BGC; *Running and Gower, 1991*; térbeli felbontás: egyetlen, akár több méter vastag, talajréteg; időbeli felbontás: 1 év) is megtalálható a modellek között. Bizonyos hatótényezők (pl. a talaj foszfor- és káliumtartalma) szerepe elhanyagolható más tényezőké (víz- és nitrogéntartalom) mellett, ezért nem kerülnek bele a modellbe, a modell képletei nem tartalmazzák ezeket a mennyiségeket. Mivel a kevésbé jelentős tényezők kevesebb kutató érdeklődését keltik fel, ezek hatásmechanizmusára vonatkozóan jóval kevesebb mérési adat áll

rendelkezésre, ami alapján a hatás formalizálható, matematikailag leírható lenne, tovább 'segítve' ezen tényezők elhanyagolását. Vannak olyan paraméterek illetve tényezők (pl. globálsugárzás), amelyek hatása messze nem elhanyagolható, meg is jelennek, mint a modell fontos bemenő adatai, de csak kevés helyen vagy kevés esetben mérik, vagy mérték a múltban. Ezen tényezők más, gyakrabban és/vagy egyszerűbb mennyiségekből történő becslését (pl. **E.2.14-16**) gyakran alkalmazzák a modellfejlesztés során (**2.3.2 fejezet**). Bizonyos folyamatok egzakt matematikai leírása már közel száz éve ismeretes (pl. víz áramlása a talajban: *Richards, 1931*) de a vonatkozó differenciálegyenlet valós környezeti (perem)feltételek mellett analitikusan nem megoldható. A numerikus (közelítő) megoldási sémák csak kellően finom térbeli és időbeli felbontás esetén szolgáltatnak elfogadható pontosságú eredményt, amely óriási számítási kapacitást igényel, ezért ezeket a módszereket a 1990-es évek végéig nem alkalmazták ökoszisztéma modellekben. Helyettük, egy jóval egyszerűbb, gyorsabb, de kevésbé pontos¹² módszert¹³ (*Ritchie, 1985*) alkalmaz szinte minden modell mind a mai napig. Mindezeket túl a valóságban egyszerre/párhuzamosan történő folyamatokat leíró képleteket illetve algoritmusokat a modellek, pontosabban a futást végrehajtó számítógép (egy számítási cikluson belül) csak sorban, egymás után tudják végrehajtani.

A modellekben alkalmazott egyszerűsítések számítási hibához, a mért értékektől való eltéréshez vezetnek, melyet sokféle mérőszámmal jellemezhetünk (**2.3.4 fejezet**). A modellfejlesztés mindenkori fő célja egyértelmű: az egyszerűsítések számának és a modell számítási hibájának csökkentése.

Az ökoszisztémákhoz hasonlóan, az azokat leíró modellekre is jellemző a hierarchikus felépítés. Az összetett modellek, több szinten egymásba ágyazott almodellből (modulokból) épülnek fel (**2.4 ábra**), ahol a mélyebben elhelyezkedő, kisebb modulok kimenő adatai a nagyobb modulok bemenő adatai lesznek. Az ökoszisztéma modellek egyik legfontosabb modulja a talajban történő vízáramlás modellje, melynek egy lehetséges reprezentációja Richards differenciálegyenlete (**E.2.11**). A differenciál-egyenletben szereplő víztartóképeség $h(\theta)$ illetve vízvezetőképesség $K(h)$ függvények, a talaj nedvességtartalma illetve

¹² A sebességen túl, a modellfejlesztők számára ez a döntéshelyzet: Egyszerűbb (kevésbé pontos) modellt használni, melynek kevesebb paramétere van és azok értékét könnyebb meghatározni vagy összetettebb (elvileg pontosabb) modellt használni, amelynek több és nehezebben (gyakran csak becsléssel) meghatározható paramétere van. A számítási pontosság, a döntéstől függetlenül, ugyanaz lehet (*Fodor, 2002*).

¹³ A nemzetközi szakirodalom, a lefelé szivárgó víz mozgását leegyszerűsítően elképzelve: 'tipping buckets' (túlcsorduló vödörök) vagy 'cascade' (lépcsős vízesés) modellként ismeri a módszert, amely az egymás alatt elhelyezkedő talajrétegekről feltételezi, hogy bizonyos mennyiségű nedvességet képesek visszatartani a gravitációval szemben és belőlük csak akkor szivárog tovább, lefelé a víz, ha a réteg nedvességtartalma meghaladja a szabadföldi vízkapacitás értékét. A dolgozatban **kaszkád modell**ként hivatkozunk erre az eljárásra.

vízvezetőképessége és a tenziométer-potenciál közötti összefüggést írják le, amelyekre *Mualem (1976)* és *van Genuchten (1980)* munkája nyomán leggyakrabban az alábbi modelleket használják (**E.2.12** és **E.2.13**).

$$\mathbf{E.2.12} \quad \theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^{1 - \frac{1}{n}}}$$

$$\mathbf{E.2.13} \quad K(h) = K_s \cdot \frac{\left(1 - (\alpha \cdot h)^{n-1} \cdot (1 + (\alpha \cdot h)^n)^{\frac{1}{n-1}}\right)^2}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^{0.5} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)}$$

θ_s , θ_r , α és n olyan talajspecifikus paraméterek, amelyek a víztartóképesség függvény alakját határozzák meg és különböző (homok, vályog, agyag, stb.) talajok esetében jellemzően igen eltérő értékeket vesznek fel. K_s a talaj hidraulikus vízvezetőképessége. Sok esetben θ_s és θ_r azonosítható a talaj maximális és maradvány (reziduális) nedvességtartalmával, de általában ennek a négy paramétereknek nincs közvetlen fizikai jelentése, így mérésel, közvetlenül nem meghatározhatók. Gyakorlatban a $h(\theta)$ és $K(h)$ függvényeknek csak néhány mérésből származó pontja ismert. Ezen pontok ismeretében a θ_s , θ_r , α és n paraméterek függvényillesztéssel határozhatók meg. A pontok meghatározásához szükséges mérések azonban nehézkesek és időigényesek ezért sok esetben ezen paramétereket más, egyszerűbben és/vagy gyorsabban meghatározható talajjellemzőből, modellek (ún. pedotranszfer függvények) segítségével becsülik meg. *Rajkai et al. (2004)* becsülő modelljeinek (**E.2.14-16**) például, a homokfrakció (H), az iszapfrakció (I), az agyagfrakció (A) a térfogattömeg (T) és szerves anyag tartalom (S) a bemenő változói.

$$\mathbf{E.2.14} \quad \theta_s = 123,76 + 65,37 \cdot T - 0,28 \cdot S - 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 - 2 \cdot \ln(A) + 12,46 \cdot T^2 - 0,054 \cdot T \cdot H + 0,14 \cdot \frac{H}{I} + 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \cdot A^2$$

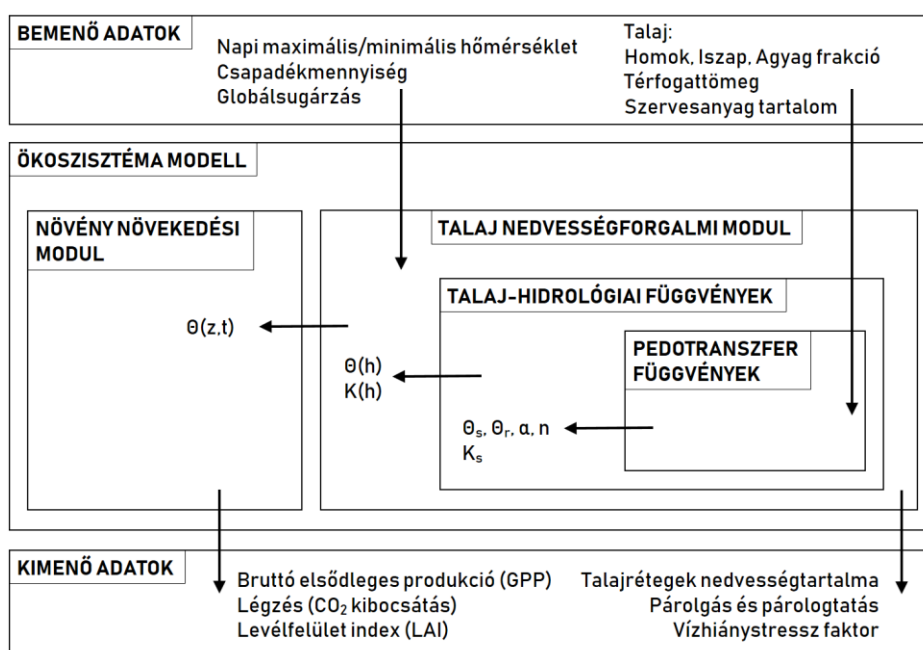
$$\mathbf{E.2.15} \quad \ln(\alpha) = 16,97 + 0,12 \cdot T \cdot I + 0,22 \cdot A - 0,039 \cdot T^2 - 9,34 \cdot \ln(I) + 0,21 \cdot I - 0,0029 \cdot A^2 - 0,435 \cdot \frac{H}{I} - 9,3 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \cdot I^2$$

$$\mathbf{E.2.16} \quad \ln(n) = -0,069 + 0,32 \cdot T - 0,007 \cdot S - 9 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 + 0,00147 \cdot \ln(A) - 0,00011 \cdot T \cdot H - 0,0064 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot \frac{H}{I} + 8 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \cdot A^2$$

A talaj hidraulikus vízvezetőképesség becslésére *Dane és Puckett (1992)* olyan modellt (**E.2.17**) dolgoztak ki, amelynek mindössze egy bemenő változója van, a talaj agyagtartalma (A).

$$\mathbf{E.2.17} \quad K_s = 727 \cdot e^{-0,144 \cdot A}$$

Egy szimulációs ökoszisztéma modell (2.4 ábra) almodellje (talaj nedvességforgalmi modulja) lehet a Richards féle vízáramlás modell (E.2.11), amely két almodellt használ a víztartóképeség (E.2.12) illetve vízvezetőképesség (E.2.13) függvények definiálására, amelyek paramétereit adott esetben további almodellek (E.2.14-16) segítségével határozhatjuk meg a rendelkezésünkre álló adatokból. Az ökoszisztéma modell nedvességforgalmi modulja számítja ki a talajrétegek mindenkor, aktuális nedvességtartalmát, amely fontos bemenő adata a növénynövekedési modulnak, amely a növény fejlődésével és növekedésével kapcsolatos állapotváltozók aktuális értékeit számítja ki. Az utóbbiak az ökoszisztéma modell legfontosabb kimenő adatai.



2.4 ábra: Többszörösen egymásba ágyazott modellek egy példája. Az ábrán található jelölések megegyeznek az E.2.11 és az E.2.12-13 egyenletek jelöléseivel.

2.3.1 Paraméterek meghatározása méréssel

Minél összetettebb egy modell, minél több folyamatot ír le, annál több paramétert használ és annál nagyobb kihívás elé állítja a felhasználót. Ideális esetben ugyanis, a modell minden bemenő adatát: a paramétereket, a perem- és kezdőfeltételek változóit a felhasználónak kell megadnia, vagy a saját vagy mások mérései alapján. A paraméterek méréssel történő meghatározása még a látszólag 'egyszerű' esetekben sem egy egyszerű, és a mért értékek bizonytalansága jelentős mértékű lehet, amit a talaj hidraulikus vezetőképességének példáján mutatok be. A K_s az ökoszisztéma modellek egyik fontos paramétere, melynek értékét szabvány szerint (ISO 17312:2005) egy talajból kiemelt 100 cm^3 térfogatú hengeres mintán végrehajtott méréssel állapítják meg. Precíz mintakiemelés esetén is keletkezhetnek

makropórusok (rések) a mintázó henger fala és a talaj között, kérdéses, hogy kistérfogató minta mennyire reprezentálja jól a talajszelvényt vízgazdálkodási szempontból, illetve a mérés víznyomás alatt történik, azaz a víz vezetésében nem csak a talajmátrix pórusai, de valamennyi makropórus is részt vesz, holott szántóföldi körülmények között ez ritkán fordul elő. Megfigyeléseink szerint (*Fodor et al., 2011*):

- i) A mintázó henger belső falát szilikonzsírral vékonyan kikenve, az ún. falhatást minimálisra csökkentve, lényegesen (40-50 %-kal) kisebb vezetőképesség értékek mérhetők.
- ii) A mérést nagyságrenddel nagyobb (6000 cm³) mintán végrehajtva számottevő (40-400 %) eltérést kaphatunk a szabvány módszerhez képest.
- iii) Amennyiben a mérés során kizárjuk a makropórusokat a vízáramlásból¹⁴, 30-70 %-kal alacsonyabb vezetőképesség értékeket kaphatunk.

A szabványos, laboratóriumi mérés mellett számos terepi módszer is létezik, melyek nagy előnye, hogy a talaj bolygatása nélkül, eredeti környezetben, végezhető el a mérés. Ezek segítségével a vezetőképesség térbeli heterogenitása is megvizsgálható. *Sándor et al. (2015)* őrbottyáni homoktalajon, egy négyzetméteres felületen, 10×10 rácspan, száz pontban mérte meg a talajfelszín (telítésközeli) hidraulikus vezetőképességét mini disk infiltrométerrel (*MDI, 2022*).

- iv) A mért értékek 34 és 134 cm/d között változtak; a vezetőképességet már 1 m²-en belül is komoly térbeli heterogenitás jellemezheti.

Még ha méréssel is határozzuk meg a modellünk bizonyos paramétereit, számolnunk kell azzal, hogy a modell számára megadott érték (általában a mérések átlaga) számottevő bizonytalansággal terhelt (**2.3.6 fejezet**), amely modelleredményekben is visszaköszön, attól függően, hogy a modell az adott paraméterre mennyire érzékeny (**2.3.5 fejezet**).

2.3.2 Paraméterek meghatározása becsléssel

A gyakorlatban szinte soha sem fordul elő, hogy a modellező számára valamennyi szükséges bemenő adat rendelkezésre áll; bizonyos paraméterek értékét csak becslő eljárások segítségével tud meghatározni. A paraméterbecslés legegyszerűbb formája egy **regressziós egyenlet** alkalmazása (pl. **E.2.14**), melynek függő változója a keresett paraméter, független változói olyan mennyiségek, melyek mérése jóval

¹⁴ Ebben az esetben a telítésközeli (vagy szabadföldi) hidraulikus vezetőképességet határozzuk meg.

egyszerűbb és/vagy gyorsabb, mint a megbecsülni kívánt paraméteré. A regressziós egyenlet együtthatóinak meghatározásához szükség van egy kellően nagy adatbázisra, amelyben mind a függő mind a független változók összetartozó, mért értékei szerepelnek. Független változók nem csak konkrét fizikai mennyiségek lehetnek, hanem, ahogy az **E.2.14-16** egyenletek példájából is látszik, a mért mennyiségekből képzett (ún. kompozit) mennyiségek illetve változók is. A regressziós egyenlet alakját, a benne szereplő változókat korreláció analízis alapján lehet kiválasztani, a sok lehetséges független változó közül kiválasztva azt a néhányat, amelyek megfelelően erős összefüggést mutatnak a függő változóval. Régebben a független változók 'gyártása' illetve a megfelelők kiválogatása, az egyenlet végső alakja, a regressziós egyenletet felállító szakember kreativitásától és türelmétől függött, de az egyenlet együtthatóit, valamilyen regressziós eljárás segítségével már a számítógép határozta meg. Az 1990-es évektől kezdődően, a mesterséges neurális hálózatok illetve a gépi tanulási módszerek¹⁵ térhódításával, már tulajdonképpen csak az adatbázisra van szükség a becslésre használható egyenlet előállítására is 'rábízható' a számítógépre. Akár egy szakértő, akár a legmodernebb gépi tanulási módszert alkalmazó szoftver készíti a becslő eljárást, annak érvényességi tartománya első sorban attól az adatbázistól függ, amelyen kidolgozták. A regressziós egyenlet is egy modell, amely beágyazott (al)modellként megkönnyítheti az ökoszisztéma modell felhasználójának dolgát.

Paraméterbecslésre felhasználható az a modell is, amelynek a paramétereit, paramétereit keressük. Egy mérési adatokat tartalmazó adatbázisra ekkor is szükség van, de az, a keresett paraméterekre vonatkozóan nem tartalmaz mért értékeket. Tartalmaznia kell viszont minden más modellfuttatáshoz szükséges bemenő adatot és mért értékeit legalább egy olyan változónak, amely szerepel a modell kimenő adatai között. Lényeges, hogy a modell paramétereit számához képes csak viszonylag kevés paraméter meghatározásáról legyen szó. Ellenkező esetben, könnyen előfordulhat, hogy a módszer olyan paraméter eredményeket szolgáltat, amelyek nem valószerűek¹⁶. A módszert **inverz modellezés**-nek hívják, amely iterációs eljárás alapján alapul. A keresett paraméterek értelmezési tartományának meghatározása után, minden iterációs lépésben rögzítjük a paraméterek

¹⁵ Fontos megjegyeznünk azt a ritkán említett tényt, hogy ez az apparátus csak abban az esetben használható hatékonyan, amikor nagy mennyiségű adat áll rendelkezésre. Agrárvonatkozású modellezési projekteknél ez a körülmény ritkán fordul elő.

¹⁶ Aránytalanul sok paraméter meghatározása esetén az **ekvifinalitás** jelenségével találkozhatunk: a rendszer egy végállapota több lehetséges eszközzel is elérhető. Modellezési szempontból ez azt jelenti, hogy ugyanaz a modell kimenet, egy vagy több kimeneti változó, egy vagy több időpontra vonatkozó értéke több paraméter-beállítás esetén is (közel) megegyező lehet. Egészen pontosan, a modell számítási pontossága több paraméter-beállítás esetén is (közel) azonos lehet, ami megnehezíti a helyes/valós paraméter-beállítás kiválasztását.

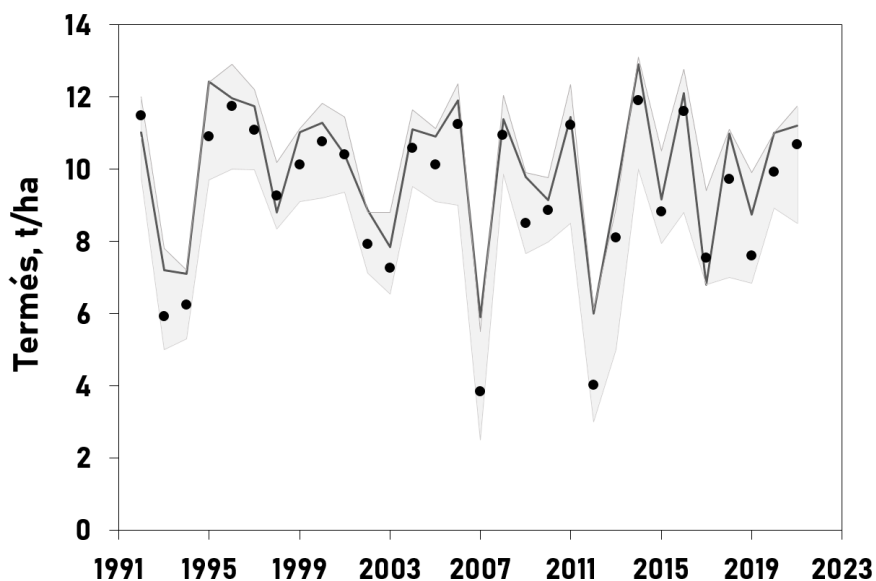
véletlenszerűen kiválasztott értékét és lefuttatjuk a modellt. A modell eredményét egy célfüggvény¹⁷ segítségével vetjük össze a mért adatokkal. A célfüggvény értéke egyetlen számmal jellemzi a szimulált és a mért értékek hasonlóságát. A célfüggvény-értékből és a hozzátartozó paraméter értékekből készített tömböt minden iterációs lépésben eltárolva, kellően nagy, előre rögzített számú lépés végrehajtása után, kiválasztható az a paraméter készlet, amihez a célfüggvény-értékek szélsőértéke¹⁸ tartozik. Ezek a paraméter értékek tekinthetők a legjobb becsült (valós) értékeknek, hiszen velük érhető el a legjobb hasonlóság a modellezett és a mért eredmények között.

2.3.3 Modell kalibráció és validáció

A paraméterek a valós rendszer fizikai, kémiai és biológiai jellemzőinek számszerű kifejeződései a modellben. Optimális esetben a paraméterek értékeit mérésrel határozzák meg, ám a gyakorlatban sokszor csak becslésekre hagyatkoznak illetve bizonyos paraméterek értékeit csak közvetett módon állítják be. Végző soron, a paraméterértékek beállításával lehet a modellt összhangba hozni a valósággal azért, hogy a modell kimenő változóinak az értékei (egy előre megállapított/elfogadott hibahatáron belül) megegyeznek a valóságos, megfigyelt értékekkel. Azt a folyamatot, amikor a modellt összhangba hozzuk a valósággal kalibrációnak, paraméter-optimalizációnak vagy finomhangolásnak nevezzük, amely lényegét tekintve egy inverz modellezési folyamat. Amennyiben ismeretes a mért értékek bizonytalansági tartománya, például egy négyismétléses tartamkísérlet terméseredményeinek évenkénti maximuma és minimuma, előnyösebb olyan kalibrációt végezni, amellyel a modelleredmények legnagyobb valószínűséggel (maximum likelihood) minden évben ebbe a tartományba (**2.5 ábra**) esnek ahelyett, hogy a modellezett és a mért értékek különbségét próbáljuk minimalizálni.

¹⁷ Az egyik leggyakrabban használt célfüggvény az összetartozó mért (M) és modellezett (m) értékek különbségeinek négyzetes középértéke, illetve annak négyzetgyöke: $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - m_i)^2}{N}}$, ahol N az összetartozó mért és modellezett adatpárok száma.

¹⁸ A célfüggvény felépítésétől/jelentésétől függően, annak minimuma vagy maximuma jellemzi a kalibrációs paraméterek optimumát: távolság/különbség típusú célfüggvény (pl. RMSE) esetén a minimum, valószínűségi és korreláció típusú célfüggvény (pl. likelihood vagy determinisztikus együttható) esetén a maximum.

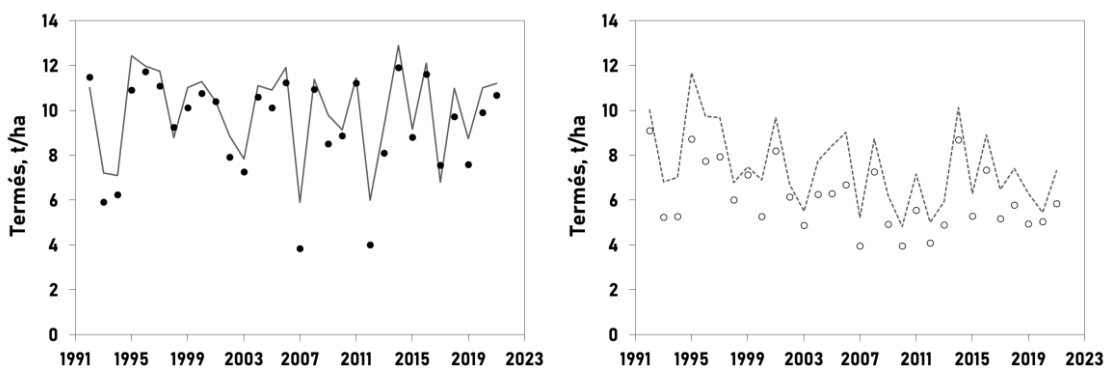


2.5 ábra: Martonvásári vetési idő tartamkísérlet (kukorica monokultúra, 180 kgN/ha/év műtrágya kezelés) megfigyelt (pont) és modellezett (sötétszürke vonal) terméseredményei. A halványszürke sávot a mért eredmények tartománya, négy ismétlés minimuma és maximuma definiálja.

A kalibrációt sok esetben, kényszerűen, ún. alulhatározott, illetve adatszegény esetben alkalmazzák, amikor csak egyféle mért adat (pl. évenkénti termés) áll rendelkezésre ráadásul kis mennyiségben (kevés évben mérve), miközben olyan paraméterek (pl. fajlagos levélfelület) beállítása is cél, amelyek kapcsolata a mért adattal nem egyértelmű. Az ilyen esetekre olyan, ún. feltételes kalibrációs eljárást (CIRM) fejlesztettünk, amely csak olyan paraméterértékeket szolgáltat, amelyekkel a modell nem eredményez az adott növénykultúra esetében irreális, egyéb, a kalibrációban közvetlenül nem vizsgált, értékeket: pl. kukorica esetében augusztusi virágzási időpontot, 6 fölötti LAI értékeket vagy 0,4 alatti harvest index-et (Hollós *et al.*, 2022). A módszer további előnye, hogy alkalmazásával megszabadulhatunk az ekvifinalitástól.

A modell paramétereinek beállítása után szükséges megvizsgálni, hogy a modell egy vagy több, a kalibráció során felhasznált adatoktól független megfigyelésekkel történő összevetésben milyen teljesítményt nyújt. Ez a vizsgálat, a validáció, (i) fontos információt szolgáltat a modell robusztusságával kapcsolatban: azaz mennyire, milyen magabiztossággal használható a kalibrációs adatok által definiált körülményektől eltérő helyzetekben, azaz térben és/vagy időben mennyire kiterjeszhető a modell; (ii) feltárhatja a modell gyengeségeit és kijelölheti a modellfejlesztés irányait. A **2.6 ábrán** megfigyelhető, hogy az AgroMo modell paramétereinek megfelelő beállításával 15 %-os átlagos termésbecslési pontosság érhető el a kalibráció során, és hogy a modell nem tudja megfelelően szimulálni a súlyos aszályal sújtott évek (2007, 2013) termés kieséseit. A validáció során a

becslési pontosság 25 % fölé emelkedett és már az ábra alapján is egyértelmű, hogy modell felülbecsli a kontrol kezelésben megfigyelt terméseket, azaz vagy a nitrogén stressz mértékét becsli alul a modell vagy a szervesanyag-bomlás és az ezzel járó nitrogénfeltáródás mértékét becsli felül. Bármelyikről is van szó, a validációs eredmény alapján a modell további fejlesztésre szorul.



2.6 ábra: Martonvásári vetési idő tartamkísérlet (kukorica monokultúra) megfigyelt (pont) és modellezett (vonal) terméseredményei. Baloldali ábra: kalibrációhoz használt, 180 kgN/ha/év műtrágya kezelés; jobboldali ábra: validációhoz használt, 0 kgN/ha/év műtrágya kezelés.

2.3.4 Modellértékelés

Egy modell minden szempontból történő értékelése gyakorlatilag lehetetlen, mivel az megkövetelné a modell összes lehetséges kimenetének tesztelését minden lehetséges bemeneti feltétel mellett. Következésképpen a modellértékelés célja inkább az, hogy növelje a bizalmat abban, hogy a modell pontossága megfelel az adott alkalmazáshoz szükséges elvárásoknak, mintsem annak megállapítása, hogy a modell minden körülmények között abszolút helyes. A modellértékelés alapja megfelelő számú (N) modelleredmény (m) összehasonlítása a vonatkozó mérési adatokkal (M). Egy modell teljesítményét több szempontból is értékelhetjük, különböző mérőszámok (mutatók, indexek) segítségével, melyek az alábbi négy fő kategóriába sorolhatók, példaként megemlítve a leggyakrabban használt mérőszámokat

- i) Különbség-alapú mutatók, például az átlagos abszolút hiba (ME) és az átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke (RMSE):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - m_i|}{N}$$

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

- ii) Összefüggés-alapú mutatók, például a determinációs együttható (R^2), ahol \bar{M} illetve \bar{m} a megfigyelt, illetve a modellezett értékek átlagai:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(m_i - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}} \right)^2$$

- iii) Hatékonysági mutatók, melyek a különbség- és az összefüggés-alapú mutatók kombinálásával jöttek létre, például a Nash-Sutcliffe modellhatékonysági mutató (NSE) és a Willmott-féle egyezési index (d):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{M}| + |m_i - \bar{m}|)^2}$$

- iv) Komplexitás-alapú mutatók, melyek a modell összetettségére vonatkozó információt is hordoznak, például az Akaike-féle információs kritérium (AIC), ahol T a modell független paramétereinek száma:

$$AIC = N \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - m_i)^2}{N} \right) + 2 \cdot T$$

A modellezési gyakorlatban használt mutatók közel teljes listáját az alábbi publikációk tartalmazzák: *Simon et al. (2012)*; *Crochemore et al. (2015)*; *Richter et al. (2012)*; *Burnham and Anderson (2002)*. A modellértékelés során jellemzően minél kis hibát ($ME \rightarrow 0$), minél magas korrelációt ($R^2 \rightarrow 1$) produkáló, minél egyszerűbb ($AIC \rightarrow -\infty$) modelleket keresünk.

Bellocchi et al. (2002) dolgoztak ki módszert arra, hogy a modellhasználó elvárásainak/prioritásainak függvényében, a különböző szempontú mérőszámok megfelelő súlyozásával egyetlen, összetett modellértékelő indexet (IMEI) állítsanak elő, amely a modell hitelességének, egy bizonyos célra történő használhatóságának mérőszáma (*Bellocchi et al., 2015*). Mivel a súlytényezők beállításánál az IMEI meghatározása is tartalmaz szubjektív elemet, szakmai szempontból az a leghelyesebb, ha az i, ii és iv kategóriákból is közöljük egy-egy mérőszám értékét. A többszempontú modellértékelés elengedhetetlen eleme a modellfejlesztés folyamatának, hiszen segítségével több modell(változat) esetében kiválasztható a (leg)jobb, illetve eldönthető, hogy a fejlesztéseknek köszönhetően valóban javult-e

a modell teljesítménye. Fontos megjegyezni, hogy a modellek korlátozott használatáért leginkább a hitelesség (bizonyításának) hiánya tehető felelőssé.

2.3.5 Érzékenységvizsgálat

Az érzékenységvizsgálat során azt határozzuk meg, hogy a modell kiválasztott paraméterei, illetve azok változásai hogyan befolyásolják a modell bizonyos kimenő változóit. Ennek legegyszerűbb módja, ha a modell paramétereit (egyenként) ± 5 , ± 10 , ± 20 , stb. százalékkal megváltoztatva megfigyeljük a modell által számított értékek (pl. szemtermés) változásait. Ha egy paraméter értékének adott mértékű (pl. 10 %) megváltozása a modell eredmények nagyobb (pl. 23 %), illetve kisebb (pl. 3 %) mértékű megváltozását okozza, akkor a modellt arra a paraméterre, illetve kimenetre vonatkozóan érzékenynek, illetve nem érzékenynek minősíthetjük¹⁹. Veerbeek et al., (2006) Monte Carlo módszer alapú eljárásával, több modellparaméter, megadott tartományon belüli, egyidejű változtatása mellett is megbecsülhető a modell adott paraméterekre vonatkozó érzékenysége. Az érzékenységvizsgálat legfontosabb eredménye azon modell-paraméterek listája és fontossági sorrendje, melyekre a modell érzékeny. Ezen paraméterek értékeinek pontos meghatározása kiemelt fontosságú modellezési feladat, mivel így jelentősen csökkenthető a modelleredmények hibája és bizonytalansága.

2.3.6 Modellezési eredmények hibája és bizonytalansága

A modellezési eredmény (pl. szimulált termésmennyiség) hibája, a megfigyelt értékektől való (átlagos) eltérése, elsősorban a modell tökéletlenségéből fakad. Minden modell tartalmaz egyszerűsítéseket, közelítéseket és elhanyagolásokat, amelyek jelenlegi tudásunk, technikai, illetve informatikai lehetőségeink korlátjainak következményei. Tudjuk, hogy a biotikus stressz-tényezők (kártevők, betegsége, stb.) komoly termés kiesést okozhatnak, de ha nincs elég tudásunk, ha nem áll rendelkezésre (elegendő) megfigyelési adat a hatások számszerűsítéséhez, akkor ezt a hatást a modellünkben nem tudjuk figyelembe venni. Tudjuk, hogy a növények párologtatását a lombhőmérséklet, illetve az állomány mikroklímája határozza meg vagy, hogy egy talajmenti fagy tönkre tehet egy frissen kikelt kukoricaállományt; mégis, ha a sztenderd elérhető meteorológiai adatok sorában

¹⁹ Az 'érzékeny', illetve 'nem érzékeny' minősítés megállapítására más módszert is használhatunk. Amennyiben ismert a modell kérdéses paraméteréhez (pl. hidraulikus vezetőképesség) tartozó mérési bizonytalanság, illetve a modell kimenetéhez tartozó (pl. termés) mérések bizonytalansága. Ha ez utóbbi kisebb, mint amekkora bizonytalanságot kérdéses paraméter bizonytalansága okoz a modell eredményében, akkor a modell az adott paraméterre érzékenynek mondható.

csak a két méter magasságban, árnyékban mért hőmérséklet szerepel, akkor olyan modellt kell/lehet alkotni, amely ezt az adatot használja, jóllehet ez magától értetődő módon számítási hibához vezet. Az ökoszisztéma modellek, elsősorban az elérhető bemenő adatok időbeli felbontása miatt, jellemzően napi léptékűek: az átalakulási és áramlási folyamatok egy napra vonatkozó integrálját számítják ki, jóllehet ezen folyamatok intenzitása a nap folyamán komoly mértékben változhat, így a kényszerűségből alkalmazott napi lépték potenciális hibaforrást jelent.

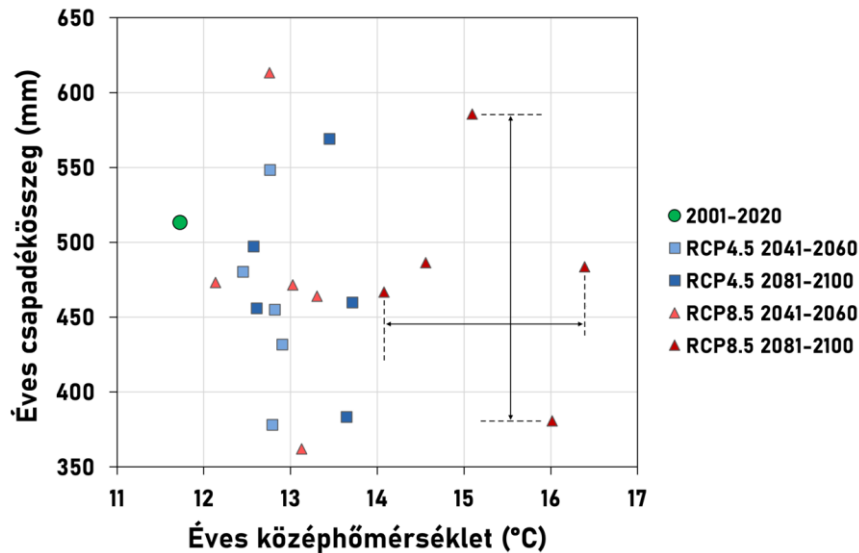
A modellszámítások hibája a helytelen modellhasználatból is fakadhat. Ez végső soron a felhasználó figyelmetlenségének a következménye: pl. nem összetartozó bemenő adatállományokkal vagy nem megfelelő paraméter-beállításokkal fut le a szimuláció. Jóllehet ez a hibaforrás könnyen kiküszöbölhető, a gyakorlatban mégis sokszor előfordul ilyen-olyan formában.

A modelleredmények pontatlanságát nem elhanyagolható mértékben a bemenő adatok hibája okozza. A mért adat adott helyre és időegységre vonatkozó valóságos értéktől való eltérésének számos oka lehet. (i) Minden szenzornak van a gyártó által közölt (átlagos) mérési pontatlansága²⁰: talajnedvesség esetében, az alkalmazott technológiától függően $\pm 1-3\%$; talajhőmérséklet esetében: $\pm 0,2-0,5\text{ }^\circ\text{C}$; csapadék (eső) esetében, a gyűjtő tölcser keresztmetszetétől és a csapadék intenzitásától függően 2% körüli a mérési hiba várható értéke. A terepi műszerekre jellemző, hogy a segítségükkel mért mennyiség csak származtatott érték. A TDR típusú talajnedvesség szenzorok (*Topp et al., 1980*) lényegében időkülönbséget mérnek. A szenzor-fej elektromágneses impulzus bocsájt ki, amely a szenzor végén (részben) visszaverődik. A kibocsátott jel és a visszaérkezése között eltelt idő valamint a szenzor mérete alapján meghatározható az impulzus terjedési sebessége, ami a talaj relatív dielektromos állandójának függvénye, amely pedig a talaj nedvességtartalmának függvénye. A ceptométerek az állomány fölött és alatt (a talajfelszín közelében) mért sugárzás arányából számítják ki a levélfelületindexet. A számítási módszer meglehetősen bonyolult (*Pokovai and Fodor, 2019*) és tartalmaz egy paramétert, amely egyetlen számmal jellemzi a levélzet geometriáját: a levelek vízszintes és függőleges vetületének átlagos arányát. Kukorica esetében ez a paraméter, fajta és fejlődési állapot függő, és méréskori értékének pontos meghatározása gyakorlatilag lehetetlen. A felhasználók jobbhíján a műszer gyártója által javasolt értékkel számolnak, így mindent összevetve, kizárólag a mérési eljárás közelítő jellege miatt, a levélfelületmérést akár 15 %-os hiba is terhelheti (*Lang, 1987*), még tökéletesen végrehajtott mérés esetén is. Összegezve: a terepi eszközökkel mért értékek pontossága/hibája függ attól, hogy a közvetlenül mért fizikai mennyiségből történő számítás során alkalmazott

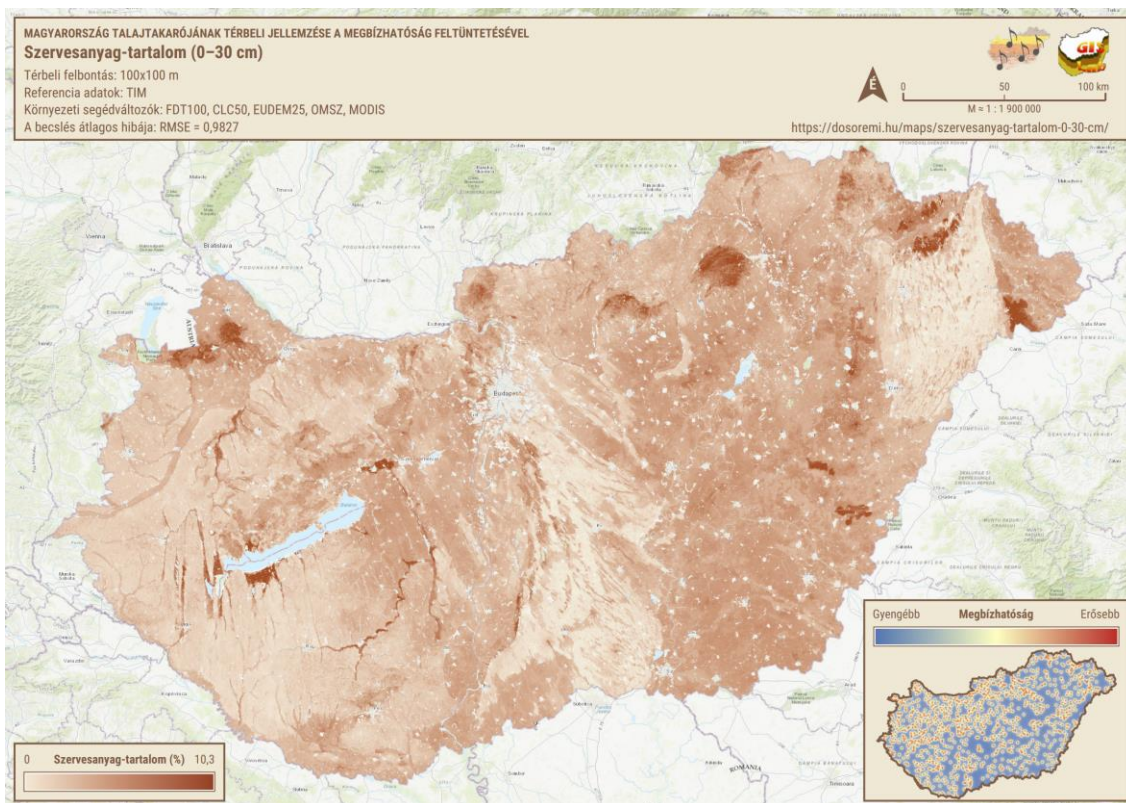
²⁰ A műszer/érzékelő pontossága (*accuracy*) a szabatos megnevezés: a valós érték körüli azon tartomány, amelybe a mért érték nagy valószínűséggel esik.

egyszerűsítések/közelítések önmagukban mekkora hibát hordoznak, feltételeik milyen mértékben teljesülnek, illetve a számítási képletekben szereplő paraméterek értékét milyen pontosan képes megadni a mérést végző személy. (ii) Hibás és/vagy nem megfelelően karbantartott érzékelő; a növényállományba telepített sugárzásmérőt belepi a por vagy a csapadékmérő lefolyónyílását eltömíti, így az érzékelők a valóságosnál jelentősen kisebb sugárzást és csapadékot rögzítenek. (iii) A mérés és/vagy az érzékelők telepítése megbolygatja a mérés környezetét (a növényállományt vagy a talaj szerkezetét). Ha viszont destruktív mintát veszek (növényt vagy talaj távolítok el a mérés helyéről) annak reményében, hogy laboratóriumi körülmények között nagy(obb) pontosságú mérést végezzek el, akkor a mérés ugyanazon a helyen már nem megismételhető. (iv) A mért mennyiségeknek még a modellezési szempontból homogén területegységen belül is komoly változatossága lehet, de mérni, pénzügyi és időbeli korlátok miatt, csak bizonyos térbeli felbontásban lehet. Kutatóközpontunk (ATK, Martonvásár) valamennyi kísérleti parcellája a kevesebb, mint 3 km-re van meteorológiai állomásunktól, ahol az automatizált csapadékmérés történik, mégis előfordul, hogy eltérő részei, bizonyos napokon akár 10 mm-t is meghaladó mértékben eltérő mennyiségű csapadékot kapnak, mint amekkorát az állomás rögzít.

Származtatott, illetve több ismétlésben mért mennyiségek esetében az alkalmazott módszertan határozatlanságaiból és az ismétlések eltérő értékeiből adódóan már az adatok esetében is megjelenik a bizonytalanság. Eltérő klímaváltozási forgatókönyvekre (*Thomson et al., 2011; Riahi et al., 2011*) eltérő klíamodelleket (*Vautard et al., 2021*) alkalmazva, számottevő bizonytalanság (eltérés) figyelhető meg a Magyarországra készített klímaprojekciók között. A távolabbi jövőre (2081-2100) vonatkozóan, több mint 2 °C, illetve több mint 200 mm az éves középhőmérséklet, illetve csapadékösszeg tekintetében (**2.7 ábra**). Amennyiben egy térség bizonyos pontjaiban mért meteorológiai vagy talaj adatokból, térbeli interpolációs technikákkal (*Szentimrey et al., 2007; Pásztor et al., 2020*) a mérési pontok hálózatánál finomabb felbontású (és általában egyenközű) rács pontjaira vonatkozóan származtatnak adatokat, a keletkező adatrács(ok)/adatsík(ok) (gridded dataset) minden pontjában meghatározható az adatok bizonytalansága (**2.8 ábra**), amely az alkalmazott interpolációs technika 'műterméke'.



2.7 ábra: Az éves középhőmérséklet, illetve az éves csapadékösszeg várható alakulása tíz eltérő (5 RCP4.5 és 5 RCP8.5 alapú) klímaprojekció alapján, a referencia időszakhoz (2001-2020) képest, Magyarországra vonatkozóan.



2.8 ábra: Szervesanyag-tartalom a feltalajban, 100×100 méteres térbeli felbontásban. A referencia adatokat mérések szolgáltatták, melyek elhelyezkedését jól mutatja a beágyazott 'Megbízhatóság' térkép piros foltjai, ahol a megbízhatóság erősebb. A megbízhatóság tartománya: 0 – 0,162 %. (Forrás: <https://dosoremi.hu>)

Gyakran előfordul, hogy a számítási kapacitás korlátossága miatt a rendelkezésre álló adatrácsok adatait felskálázzák és az eredetnél kisebb (rosszabb) térbeli

felbontásban adják meg bemenő adatként a modell számára. A felskálázás során keletkező/aggregált egyetlen adat természetesen csak kisebb-nagyobb bizonytalansággal képes reprezentálni a háttérben szereplő adatokat (*Hoffmann et al., 2016*). Ha például a **2.8 ábrán** bemutatott 100×100 méteres felbontású adatokat csak 10×10 kilométeres felbontásban használjuk, akkor egy szervesanyag-tartalom érték 10.000 adatot reprezentál/aggregál.

A bemenő adatok bizonytalansága a modellszámítások során tovaterjed. Monte Carlo módszer (*Rubinstein and Kroese, 2007*) segítségével, a bemenő adatokat az ismert bizonytalansági tartományaikon belül véletlenszerűen változtatva, kellően nagyszámú modellfutás eredményeinek eloszlásából megbecsülhető a bemenő adatok bizonytalanságából fakadó modellbizonytalanság.

2.3.7 Modellek átlátszósága és átláthatósága

Az átlátszóság és átláthatóság (*Soltani and Sinclair, 2015*) a modell dokumentálásához kapcsolódó fogalmak. A tudományos megismerés alapvető motívumai a megismételhetőség és ellenőrizhetőség (**1.1 ábra**). Az átlátszóság a modellben szereplő képletek és a modulok kapcsolatrendszerének bemutatása révén garantálható, ahol egyértelmű elvárás, hogy a közölt tartalom közérthető legyen. Az átláthatóság a modell leírását, illetve szoftveres megvalósítását jellemzi: azt, hogy az ismertető, illetve program kód alapján mennyire könnyű megérteni, hogy a modell pontosan hogy is működik. A modell, illetve a modell kódjának átláthatósága nagyban függ a modellalkotó(k) és még inkább függ a modellel ismerkedő(k) informatikai felkészültségétől: az alkalmazott matematikai apparátustól, a választott programnyelvtől, a programozás absztrakciós szintjétől (pl. többszörösen egymásba ágyazott függvények alkalmazásától). Az átláthatóság esetében a közérthetőség már nem elvárás, jóllehet a modell (tovább)fejlesztését nagyban elősegíti a jó átláthatóság, hiszen kiszélesíti azoknak a körét, aki képesek megérteni a modell (kódjának) működését, és javaslatokat tudnak tenni az esetleges modellhibák kijavítására.

2.3.8 Modellek fejlesztése és továbbfejlesztése

Egy modell fejlesztését két tényező határozza meg leginkább, a (1) modellezni kívánt rendszer összetettsége és a (2) modell felhasználási célja. Amennyiben a modellezett ökoszisztéma egy jól működő gazdaság egy öntözött parcellája és a modell célja a hozam kiszámítása számos hatótényezőt (pl. biotikus és abiotikus stresszek) figyelmen kívül hagyhatunk, illetve jónéhány a termés kialakulásával

párhuzamos folyamat (pl. légzés) leírását is elhagyhatjuk. Ebben az esetben a talaj(folyamatok) modellezésére nincs is szükség, a modellben nincs szükség talajjal kapcsolatos tározókra, változókra és paraméterekre. Ha azonban a rendszer által kibocsátott CO₂ mennyiségét is meg kívánjuk határozni a modell segítségével, akkor a talaj tározóinak és folyamatainak reprezentációjára is szükség van a modellben. A modellfejlesztés főbb lépései az alábbiak:

- 1) Nyomon követni kívánt valóságselemek beazonosítása, és az azokat reprezentáló állapotváltozók²¹ meghatározása.
- 2) Nyomon követni kívánt folyamatok beazonosítása, az állapotváltozók közötti logikai kapcsolatrendszer definiálása.
- 3) A folyamatokat leíró, az állapotváltozók közötti összefüggések (függvények, differenciál egyenletek) definiálása, amely egyúttal meghatározza a modell paramétereit.
- 4) A modell időléptékének és a folyamatok egy számítási cikluson belüli sorrendjének meghatározása.
- 5) A 'papíron megalkotott' modell implementálása számítógépes algoritmus(ok), illetve program(kód) formájában. A modell leprogramozásának módja elsősorban a modellfutás idejét határozza meg. A programozási nyelvtől, a programkód optimalizáltságától, és a hardver kihasználtsági fokától függően, a szimulációk sebességében akár nagyságrendi különbség is lehet ugyanazon modell két implementációja között.

A modellfejlesztés meghatározó momentuma a változók és a paraméterek megkülönböztetése. A modell felhasználása, használhatósága szempontjából ez különösen lényeges, hiszen a paraméterek értékeit a felhasználónak kell megadnia. Az, hogy miből lesz paraméter vagy változó nem feltétlenül egyértelmű; függ a modell kifejlesztésének körülményeitől és a fejlesztő(k) felkészültségétől. Ha egy modellt olyan térségre fejlesztenek, ahol jellemzően nagy mélységben található a talajvízszint, megfelelő megoldást jelent, ha a talaj szabadföldi vízkapacitása paraméter lesz, amely értéke nem változik. Ha azonban a modellt, (tovább)fejlesztés során olyan területekre is érvényessé akarják tenni, ahol a gyökérszóna talajvízhatás alá kerülhet, akkor ebből paraméterből változó lesz. Ebben az esetben vagy egy almodellre (ún. beágyazott modell) van szükség, amely a szabadföldi vízkapacitás

²¹ Egy valóságselemet több állapotváltozó is reprezentálhat (pl. levelek széntartalma és levélfelület index).

környezeti feltételektől (pl. talajvízszinttől mért távolság) való függését leírja, vagy a peremfeltételekhez hasonlóan a felhasználónak kell megadnia az értékek időbeli változását.

A modellfejlesztés egyik eredménye, a modell megjelenítésének egy lehetséges formája a tározók és folyamatok rendszerét, vagy még részletesebben az állapotváltozók logikai rendszerét bemutató folyamatábra. Egyszerűbb modellek esetében (**ORYZA1 v1.3; 2.3 ábra**) egyetlen folyamatábrán átlátható módon ábrázolható valamennyi tározó és folyamat. Összetettebb modellek esetében (**AgroMo, 3.21-22 ábra**) csak több, a modell különböző szintjeit külön ábrákon bemutatva jeleníthető meg a teljes modell.

Szinte minden modell esetében elérkezik a 'pillanat', ami legtöbbször egy viszonylag hosszadalmas folyamat, amikor tovább fejlesztik. Az egyes változatokat verziószámokkal (v1, v2, stb.) különböztetik meg, sőt kisebb fejlesztések esetében alverziókat (v1.1, v1.2, stb.) is megkülönböztetnek. A fejlesztésnek több oka és módja lehet: (1) új folyamat kerül leírásra, (2) egy már modellezett folyamat összefüggése (a függvény alakja) változik meg, (3) új hatótényező kerül figyelembe vételre egy folyamat esetében, (4) megváltozik (finomodik) a modell térbeli és/vagy időbeli felbontása. Vitatható, hogy modellfejlesztésnek minősül-e, de mivel a modell felhasználhatóságát jelentősen javítja, itt említtem meg azokat fejlesztéseket, amelyek (5) egy vagy több paraméter, illetve változó értékének becslésére adnak lehetőséget (**3.1 fejezet**).

2.3.9 Modellek kezelése és hibakezelése

A legegyszerűbb modellezési környezet, amelyre mind a mai napig találunk példát (*Hidy et al., 2022*), egyetlen futtatható állományból (programból) áll, ami a modell valamilyen programozási nyelvben készült implementációja, és néhány szöveges fájlból, amelyek a bemenő adatokat tárolják. A modellszámítások eredményei szintén egy szöveges fájlba kerülnek. A bemenő adatállományok közül kitüntetett szerepe van az ún. vezérlő vagy inicializációs fájlnek, amit a program az indításakor beolvas. Ebben a fájlban található azok a hivatkozások, illetve beállítások, amelyek segítségével a program további adatfájlokat tud beolvasni, illetve a modell egyes funkciói be- vagy kikapcsolhatók vagy bizonyos opciók választhatók. Bizonyos modellekben létezik az ún. spin-up funkció, amellyel a bemenő adatok egy csoportját, a kezdőfeltételeket rögzítő adatokat, a talaj víz, szén és nitrogén tározóinak kezdőértékeit, a modell képes saját maga számára előállítani. A modell ebben az esetben, a rendelkezésre álló meteorológiai adatsort kellő számban ismételve addig fut, amíg a talaj széntározói nulláról indulva dinamikus egyensúlyi

állapotra nem jutnak úgy, hogy (általában) gyepborítást feltételezünk a szimulált területre. Ez a szimuláció virtuális időben több száz vagy akár ezer évig is tarthat. Minden más bemenő adatot (meteorológia, talaj, növény, agrotechnika), amelyeket a modellek túlnyomó többsége külön fájlokból érnek el, a felhasználónak kell biztosítania. Míg a bemenő adatokat a talaj-növény modellek mindegyike adatfájlokból éri el, a kimenőadatokat a modernebb modellek már adatbázisban helyezik el, megkönnyítve azok utófeldolgozását és megjelenítését. A modellek kezelését ma már szinte minden esetben felhasználóbarát, grafikus kezelői felületek (GUI) alkalmazásával oldják meg. GUI segítségével sokkal hatékonyabb és áttekinthetőbb a bemenő adatok kezelése, azonnali riportok, grafikonok készíthetők a futási eredményekről, sőt a BioMa rendszer (*Donatelli et al., 2012*) kezelőfelülete modellépítésre is alkalmas: a rendelkezésre álló (a talaj-növény rendszer egyes folyamatait leíró) modulokból a felhasználó tetszőleges felépítésű modell készíthet és futtathat.

Egy ökoszisztéma modell, mint bármelyik program, csak azt teszi, amit a felhasználó (bemenő adatfájlok keresztül) előír. Ha a bemenő adatállományokban hiba van, akkor az a modell működésében hibát eredményez. 'Jó esetben' a hiba észrevehető, sőt a program is 'megtanítható' arra, hogy ezeket észlelje. Egy felhasználó barát (sőt ún. bolondbiztos) modell hibakereső modulja, ami még a szimuláció előtt leellenőrzi a bemenő adatokat képes lehet felfedezni a 1) téves fájlhivatkozásokat (pl. hiányzik egy adatfájl, amit használna a modell); 2) inkonzisztens bemenő adatokat (pl. a vezérlő fájlban 20 év hosszú szimuláció van beállítva, de csak 10 év hosszú időszakra állnak rendelkezésre időjárás adatok); 3) irreális bemenő adatokat (pl. a napi globálsugárzás értéke meghaladja a csillagászatilag lehetséges maximumot); 4) gyanús, nagy valószínűséggel hibás adatokat (pl. az istállótrágya adagja t/ha helyett q/ha-ban lett megadva). Egy fejlett hibakereső modul üzeneteken keresztül tájékoztatja a felhasználót a hiba jellegéről és pontos helyéről. 'Rossz esetben' a hiba észrevétlen marad és a szimulációban sem okoz fennakadást. Az ilyen jellegű tévedések kizárólag a szimulációs eredmények gondos vizsgálatával és szűrésével lehetséges, amely automatizálása gyakorlatilag lehetetlen, és komoly modellezési gyakorlatot és szakmai tapasztalatot igényel.

2.4 Ökoszisztéma modellezés történeti áttekintése

Más alapokról, de az Egyesült Államokban és Hollandiában is a 1960-as évek elején indultak el azok a kezdeményezések, amelyek lefektették a mai növény-talaj modellek alapjait. Amerikában nemzetközi biológiai kutatási programot (*IBP, 1964*) indítottak, amely egyik kiemelt célja volt, hogy a vidékfejlesztés támogatására

kidolgozott farm-szintű, agrárközgazdasági modellek számára folyamat-orientált növénynövekedési almodelt fejlesszenek (*Van Dyne and Anway, 1976*). Különösen nagy érdeme az IBP munkájának, hogy meghonosította azt az interdiszciplináris és rendszerszemléletű gondolkodásmódot, amely lehetővé teszi a természetben előforduló összetett rendszerek megértését, illetve azok működésének matematikai és informatikai alapokon nyugvó modellezését (*Coleman et al., 2004*). Hollandiában, de Wit, a Wageningen-i egyetem professzora, fizikai és biológiai alapelvek ötvözésével alkotta meg fotoszintézis modelljét (*de Wit, 1965*), amely sok későbbi szimulációs növénytermesztési modell alapjául szolgáló ELCROS (*de Wit et al., 1970*) és BACROS (*de Wit et al., 1978*) majd pedig a világhírű WOFOST (*de Wit et al., 2019*) modell központi rutinja lett. Szinte teljesen egyidőben, de szintén a Beer-Lambert (*Beer, 1852*) elvre épülve Duncan is kidolgozta fotoszintézis modelljét (*Duncan et al., 1967*), melyet a későbbi amerikai fejlesztésű növény-talaj modellek (CERES: *Ritchie and Otter, 1985*; CROPGRO: *Boote et al., 1998*; CropSyst: *Stockle et al., 1994*) megalkotásakor használtak fel. A növényi folyamatok korai modellezéséhez képest néhány éves 'fáziskéséssel' dolgozták ki a talajban történő vízmozgás, illetve nitrogénforgalom (átalakulási folyamatok és nitrátmozgás) első modelljeit: *Keig and McAlpine, 1969*; *Ritchie, 1972*; illetve *Watts and Hanks, 1978*. A korai talajmodellek nagy hiányossága, hogy a gyökérzónát egyetlen tározóként fogták fel, nem különböztettek meg rétegeket, és minden változót egyenletes eloszlásúnak feltételeztek a tározón belül. Ennél fogva, a víz, a nitrát és a gyökérzet függőleges irányú eloszlását egyáltalán nem vették figyelembe.

1972 jelentős és különleges mérföldkő a modellek fejlesztésében. A Szovjetunió óriási volumenű, tekintélyes áremelkedést és globális ellátási gondot okozó búza felvásárlása meglepte az Egyesült Államokat és válaszlépésre sarkallta. Komoly forrásokat mozgósítva kutatási programok indultak, hogy a már meglévő növénynövekedési és talajmodellek összekapcsolásával olyan szimulációs növény-talaj modelleket hozzanak létre, amelyek segítségével a legfontosabb, a nemzetközi kereskedelemben is kulcsfontosságú szántóföldi növények terméshozama megbecsülhető, sőt előre jelezhető függetlenül attól, hogy az adott termőterület hol található a világon. Mindehhez természetesen arra is szükség volt, hogy az 1970-es években a műholdfelvétel alapú képfeldolgozó módszerek már használható minőségű bemenő adatokat tudtak szolgáltatni az első szántóföldi ökoszisztéma modellek számára (*Rithcie, 2002*).

Az 1980-as évek több szempontból is komoly fejlődést hozott. A rendszerszemléletű modellezési alapelveket egyre több probléma és jelenség vizsgálatára, illetve szimulációjára használták fel. Kifejlesztésre került a talajerózió szimulációjára alkalmas EPIC modell (*Williams and Renard, 1985*), két meghatározó legelő (*Johnson and Thornley, 1983*; *Thornley, 1988*), illetve gyepek modell (SAVANNA; *Coughenour et*

al, 1984) is napvilágot látott. Az erdős területek szimulációjára alkalmas FOREST-BGC modell (*Running and Coughlan, 1988*) amely az AgroMo modellezési keretrendszer (3.2 fejezet) alapjául szolgáló Biome-BGCMuSo (*Hidy et al., 2016*) modell őse is ebben az időszakban keletkezett. A FOREST-BGC és az egy évvel később megjelenő Luxmore-féle (*Luxmore, 1989*) modell a biogeokémiai modellek legkorábbi képviselői. Ezek a modellek lényegesen nagyobb hangsúlyt fektettek a talajban történő biokémiai folyamatok részletes leírására, míg a növény-talaj modellek elsősorban a növény-életteni folyamatok egyre pontosabb leírására törekedtek. E két modelles család tagjaival már valamennyi agrár-ökoszisztéma szimulációja lehetővé vált az 1980-as évek végére. Közben természetesen a már meglévő növény-talaj modelleket is továbbfejlesztették és megjelentek azok a változatok, amelyek a talajrétegek eltérő fizikai és kémiai tulajdonságait is figyelembe vették, és szimulálták az egyes rétegek közötti energia- és anyagforgalmat. Az IBM asztali számítógépek (1981) majd az Apple Mac (1984) megjelenésének köszönhetően ugrásszerűen megnőtt a modellfejlesztők és modellfelhasználók száma. Az Internet exponenciális bővülése felgyorsította a fejlesztők közötti tudáscserét, a felhasználók tapasztalatainak visszacsatornázását a fejlesztésbe és a kutatók/kutatócsoportok közötti adatmegosztást. Az IKT szektor azóta is tartó töretlen fejlődése folyamatos támogatást biztosít a szimulációs modellek fejlesztéséhez és felhasználásához. A processzorok órajelének valamint az egyre gyorsabb adattovábbítást és adattárolást lehetővé tevő technológiáknak köszönhetően a személyi számítógépek megjelenése óta négy nagyságrenddel csökkent a szimulációk futtatásához szükséges idő (2.1 táblázat).

2.1 táblázat: Egyetlen kukorica tenyésztési időszak (valós időben kb. 6 hónap) szimulációjához szükséges gépidő.

Processzor típusa	Processzor megjelenésének dátuma	Szimuláció ideje
286	1982	9,7 óra
486	1989	8,4 perc
P4	2001	27 mp
Core i7	2011	0,5 mp
Core i7 (8. generáció)	2019	0,1 mp

2002-ben megjelentek a párhuzamos (többszálú) programozást, illetve modellfuttatást lehetővé tevő több magos processzorok. Manapság egy asztali

számítógép akár 24 független szálon (24 példányban) képes szimulációkat végezni. A számítási kapacitás ilyen mértékű növekedése ellenére bizonyos modellalkalmazások még mindig időigényesek. Ha például egy klímaváltozási hatástanulmány keretében a magyarországi szántóterületekre 1 hektáros felbontásban szeretnénk szimulációkat végezni 2001-2100 időszakra vonatkozóan, de minden területemre 10 eltérő klímaprojekciót alkalmazva akkor a jelenleg leggyorsabb számítógépünkkel is közel 10 napot venne igénybe a szimuláció.

Az 1990-es években megjelentek azok a modellek, amiket az első pillanattól fogva úgy fejlesztettek, hogy a lehető legtöbb növényfaj szimulációjára alkalmasak legyenek bemenő paramétereik megfelelő beállításával: APSIM (*McCown et al., 1996*) és STICS (*Brisson et al., 1998*). Az APSIM, az egyik legszélesebb körben használt modell, azért is különleges mert ez az egyetlen olyan modell, amit egy olyan multidiszciplináris kutatócsoport hozott létre, amelyet kimondottan erre a célra hoztak létre 2001-ben, Ausztráliában, teljes mértékben kormányzati pénzből. Az amerikai koordinálású nemzetközi modellfejlesztő csoport (IBSNAT) más úton indult el: több speciális (egyenként csak egy vagy csak néhány hasonló növényfaj szimulálására alkalmas) modell összegyűjtésével, közös inputfájlrendszer és közös kezelő felület kialakításával létrehozták a DSSAT programcsomagot (*Tsuji et al., 1994*). Mivel a párhuzamosan fejlesztett modellek száma már lehetővé tette, ebben az időszakban láttak napvilágot az első modell-összehasonlító munkák (*Xevi et al., 1996; Jamieson et al., 1998*). Egy vagy több kísérleti állomás megfigyelési adatsoraihoz (tartamkísérletek terméseredményei, levélfelület index maximális értékei, talajnedvesség különböző mélységekben, stb.) hasonlították a különböző modellek eredményit, (az első időkben) nem titkoltan abból a célból, hogy megtalálják a legjobb modellt. Az első IPCC jelentést (1990) követően megszülettek az első szimulációs modell alapú előrejelzések a klímaváltozás agro-ökoszisztémákra gyakorolt várható hatásáról (*Curry et al., 1990; Rosenzweig and Parry, 1994*). Ezeket az elemzéseket időről-időre újra elkészítik, amikor komolyabb módszertani fejlesztések történnek vagy új klímaprojekciók válnak elérhetővé. Még ebben az évtizedben két fontos esemény történt: 1998-ban két meghatározó modellfejlesztő csoport is úgy döntött, hogy nyilvánosa teszik modelljeik (DSSAT és APSIM) forráskódját, ami lehetőséget teremtett arra, hogy bárki hozzájárulhasson a fejlesztéshez, természetesen csak megfelelő minőségbiztosítási folyamat révén. 1999-ben és 2001-ben megrendezésre került a növénytermesztési modellezők első és második nemzetközi szimpóziuma (Lleida, Spanyolország, illetve Firenze, Olaszország), ahol bemutatkoztak a világ említésre méltó növény-talaj modelljei, köztük a 4M, magyar fejlesztésű modell is (*Fodor et al., 2003*).

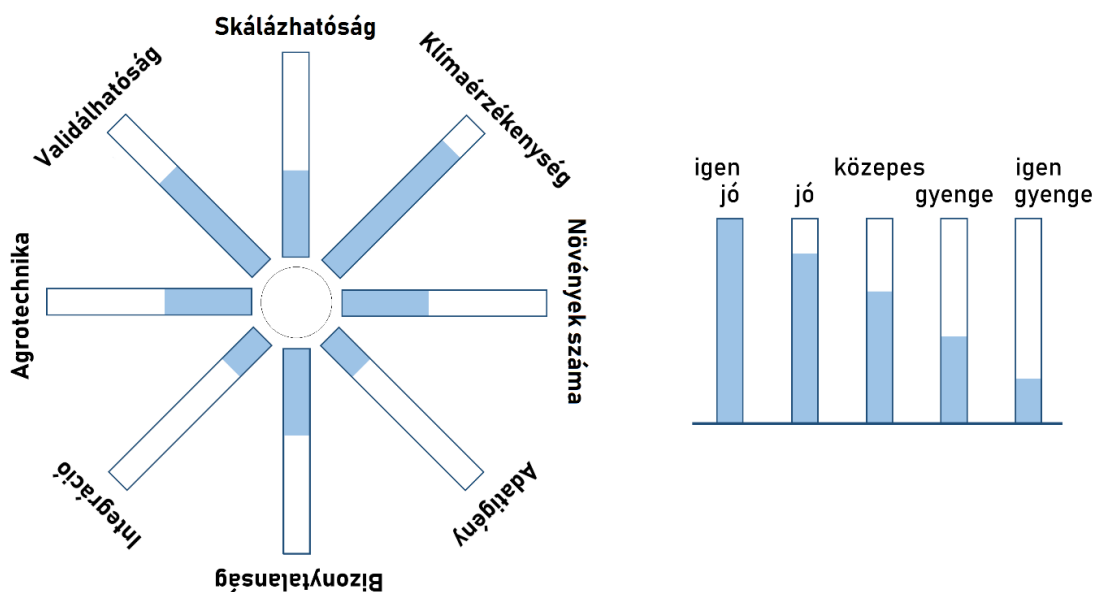
A 21. század első évtizede, főként ennek a két meghatározó eseménynek köszönhetően, elsősorban a hálózatosodásról szólt. Egyre intenzívebbé vált a

modellfejlesztők között az együttműködés. Az első modellezők nem voltak képzett programozók, kódjaik sok esetben nehezen visszafejthető, rosszul felépített, kevésbé hatékony, nehézkesen kezelhető programokat eredményeztek. A kutatási projekteknek köszönhetően, a modern programozási nyelvekhez, adatbáziskezeléshez jól értő informatikusok alkalmazásával egyre hatékonyabbak és könnyebben kezelhetőek lettek szimulációs modellek. A modellek grafikus felhasználói felületeket kaptak, melyeknek köszönhetően tovább bővült a felhasználók köre; így már az oktatásban is jóval könnyebb volt őket alkalmazni. A globális cirkulációs (GCM) és regionális klímamodellek (RCM) segítségével előállított klímaprojekciók és a fokozatosan elérhetővé váló globális adatbázisok (*Challinor et al., 2004; Ramankutty et al., 2008*) segítségével születő tanulmányok egyre finomabb térbeli felbontásban vetítették előre a klímaváltozás földi ökoszisztémákra gyakorolt hatását. Az egyre bővülő 'modellezős társadalom' számára a SEAMLESS FP6 projekt (2005-2009) rögzítette a további együttműködést lehetővé tevő standardokat és kijelölte a legfontosabb fejlesztési irányokat.

Az AgMIP (2010, USA) majd a MACSUR (2012, EU) projektek indulásával kezdetét vette az a korszak, ahol az egyes modellfejlesztő csoportok önállóan, de rögzített és egyeztetett protokollok alapján végzik a modellek fejlesztését, tesztelését, összehasonlítását és alkalmazását. Miután a klasszikus modellösszehasonlító vizsgálatok azzal a végkövetkeztetéssel zárultak, hogy nincs olyan modell, amely minden szempontól jobb lenne a többinél, tért hódított a különböző modellek csoportos alkalmazása (*ensemble modelling*) az egyes problémák vizsgálatánál (*Bassu et al., 2014; Martre et al., 2015; Ruane et al., 2016; Wang et al., 2017; Webber et al., 2018; Minoli et al., 2019; Franke et al., 2020; Müller et al., 2021; Kimball et al., 2022*). Klímaváltozási hatástanulmányok esetében, nyolc-tizenkettő talaj-növény modellt, tíz-húsz eltérő GCM-RCM modell által előállított klímaprojekcióval kombinálva, az akár többszáz modelleredmény átlagát tekintik a kutatók a legnagyobb valószínűségű 'jövőképnek'. Ennek a modellezési technikának különleges előnye, hogy a legnagyobb valószínűséggel rendelkező előrejelzések (pl. termésátlagok alakulása a 21. század utolsó 30 évében) várható értéke mellett azok bizonytalanságára is számszerű becslést ad.

Napjainkban az egyes modellek, illetve modellkomponensek fejlesztése mellett az ún. Integrált Modellezési Keretrendszerek (IMK) kialakítása (*Ewert et al., 2015; Ruane et al., 2017*) áll a modellező csoportok tevékenységének középpontjában. Egy IMK létrehozása során több tudományterületet érintő, eltérő célú és felépítésű modelleket és adatbázisokat kapcsolnak össze azzal a kifejezett céllal, hogy az IMK a lehető legtöbb gyakorlati probléma/kérdés megoldására/megválaszolására legyen alkalmas. Jóllehet a modellezési keretrendszerekkel szemben támasztott követelmények jól definiáltak, a központi modulként beágyazott növénytermesztési

vagy biogeokémiai modell képességei, 'leggyengébb láncszemként' számos szempontból korlátozó tényezőt jelentenek a felhasználás során. A beágyazott modellek jól, megbízhatóan képesek előre vetíteni a klímaváltozás várható hatásait, viszont csak erősen korlátozott számú növény(faj) és agrotechnikai beavatkozás szimulációjára képesek, ráadásul olyan komoly bemenő adat igényt támasztva, amely jelentősen megnehezíti ezen rendszerek használatát (2.3 ábra).



2.3 ábra: A beágyazott agro-ökológiai modellek értékelése abból a szempontból, hogy mennyire képesek megfelelni az Integrált Modellezési Keretrendszerek által támasztott követelményeknek a klímaváltozás várható hatásainak számszerűsítése során (Ewert et al., 2015).

Jóllehet már létezik működő Integrált Modellezési Keretrendszer (*AgMIP framework, Rosenzweig et al., 2018*) funkciógazdagsága miatt a kezelése annyira körülményes, hogy a modellezési projektek során a résztvevő csoportok mind a mai napig a saját modellezési környezetüket használják és a modellfutások (bemenő és kimenő) adatait e-mailekben vagy fájlmegosztó rendszerek segítségével teszik elérhetővé egymás számára (Kimball et al., 2022).

Fontos ezen projektek tanulságait levonni, és egy olyan 'minimális' rendszert felépíteni, amelyben a legfontosabb modellezési feladatok a lehető legkönnyebben végezhetőek el. A fejlesztés folyamatának is nyomon követhetőnek, reprodukálhatónak kell lennie, a kész keretrendszernek pedig szabad szoftvernek, mert az így létrejövő eszközök nagyobb eséllyel maradnak használatban a projekt vége után. További fontos tanulság, hogy a szoftvereknek a felhasználókkal együtt kell fejlődniük. Egy túl összetett, nehézkesen kezelhető új rendszerre nehezen térnek át a felhasználók, nehezen hagyják el a megszokott környezetet, még akkor is, ha az

új rendszer több funkciót kínál. Jó példa erre a MS Word szövegszerkesztő esete. A Word első változata még nagyon-nagyon egyszerű volt. A felhasználók visszajelzései alapján (is) fokozatosan gyarapodott új funkciókkal, így az embereknek volt idejük/kedvük hozzászokni. Ha van egy egyszerű, de már elég sok funkciót tartalmazó első verzió, akkor azt már kezdetben is sokan tudják használni. Ha a fejlesztési ötletek zöme tőlük származik, akkor nagyobb eséllyel a későbbiekben is sokan fogják tudni használni a programot.

Az ökoszisztéma modellezés óriási változáson ment keresztül az elmúlt 60 évben. Néhány, növényben és talajban történő folyamat algoritmusának megalkotásától, társadalmi folyamatokat és politikai döntéseket meghatározó eszközrendszerre fejlődött. A környezettudományok területén öt meghatározó (Q1-es) tudományos folyóirat is működik, amelyeknek már a nevében is megtalálható a modellezés szó, de húsz körül van azon lapok száma, amelyek tématerületi lehatárolásuk alapján befogadnak modellezéssel kapcsolatos cikkeket. Az évente megjelenő publikációk számából is jól látszik, hogy a jelentős fejlődés ellenére rengeteg továbblépési, kutatási lehetőség rejlik még ebben a tudományágban.

3. Modellek az agrárium szolgálatában

Ebben a fejezetben azokat a modellezéssel kapcsolatos alkalmazásokat mutatom be, amelyek fejlesztésében, létrehozásában és alkalmazásban részt vettem az elmúlt évek során.

3.1 Ökoszisztéma modellek használatát támogató alkalmazások

A természettudományos megismerés alapvető eszköze a mérés. A méréssel előállított adatok alapoznak meg minden modellezési tevékenységet. Amennyiben a mérés valamilyen okból nem lehetséges (pl. pénz- vagy időhiány) a mérendő mennyiséget becsléssel határozzák meg. A becslést a korábbi mérések tapasztalatai teszik lehetővé. Minden becslési eljárás kidolgozását mérések előzik meg, amelyek segítségével a becslő módszerek összefüggéseit megállapítják. A modellezési gyakorlatban ritkán fordul elő, hogy valamennyi szükséges bemenő adat rendelkezésre áll mért értékek formájában. A modellek használatához legtöbbször szükség van olyan alkalmazásokra, melyek segítségével bizonyos bemenő adatok meghatározhatók, a mért értékek hiányában

3.1.1 TALAJTANonc, illetve SOILarium

Az elmúlt évtizedekben mérési adatbázisok felhasználásával számos talajfizikai vonatkozású becslési eljárást dolgoztak ki, melyek segítségével a talaj legfontosabb vízgazdálkodási paraméterei meghatározhatók, amelyek ráadásul az alább bemutatásra kerülő AgroMo modell (3.2 fejezet) bemenő paraméterei is (3.1 táblázat).

3.1 táblázat: TALAJTANonc, illetve SOILarium programokban implementált becslőeljárások függő változói és a vonatkozó publikációk.

Függőváltozó	Publikáció
térfogattömeg:	<i>Rawls, 1983</i>
víztartóképeség- függvény paraméterei:	<i>Wösten et al., 1999; Rajkai et al., 1981; Rajkai et al., 2004</i>
hidraulikus vízvezetőképesség:	<i>Campbell, 1974; Dane and Pucket, 1992; Wösten et al., 1999; Suleiman and Ritchie, 2001</i>
szabadföldi vízkapacitás és holtvíztartalom:	<i>Ritchie et al., 1999</i>

A TALAJTANonc (Fodor és Rajkai, 2005), illetve SOILarium (Fodor and Rajkai, 2011) programokba ezeket hazai és külföldi fejlesztésű becslési eljárásokat építettük be a vonatkozó publikált képletek illetve eljárások leprogramozásával. Ezek a modellek a statisztikus modellek csoportjába tartoznak, melyek többváltozós lineáris függvény segítségével adnak becslést, a megnevezett függőváltozók értékére (**3.1 táblázat**). Mindkét program korszerű, felhasználóbarát grafikus kezelő felülettel rendelkezik, melyen a becslési eljárásokhoz szükséges bemenő adatok táblázatosan adhatók meg és egyetlen gombnyomásra akár több száz talajra vonatkozóan készíthető becslés (**3.1 ábra**). Ezek a programok mára már elvesztették jelentőségüket. Önmagukban már nem használják őket. Az egyes becslőeljárások kódrészletei újra lettek hasznosítva az AgroMo rendszerben és automatikusan meghívásra kerülnek, ha a modell vonatkozó bemenő adata nem áll rendelkezésre. Az AgroMo ezek segítségével igyekszik pótolni a hiányzó bemenő adatokat.

	K _A	H	I	A	θ _s	alfa	n	Textúra osztály
1.	34	67.4	21.1	11.5	43.97	0.0301760	1.267	homokos-vályog
2.	52	3.2	75.9	20.9	44.93	0.0135930	1.205	vályog
3.	53	4.6	72.1	23.3	44.93	0.0135930	1.205	vályog
4.	53	1.3	72.1	26.6	44.93	0.0135930	1.205	vályog
5.	59	1.5	64.9	33.6	44.22	0.0063090	1.173	agyagos-vályog
6.								
7.								
8.								
9.								
10.								
11.								
12.								
13.								

3.1 ábra: A TALAJTANonc kezelőfelülete: A van Genuchten-féle víztartóképeség-függvény paramétereinek becslése a talaj fizikai félesége alapján.

3.1.2 S-shape globálsugárzás-becslő eljárás

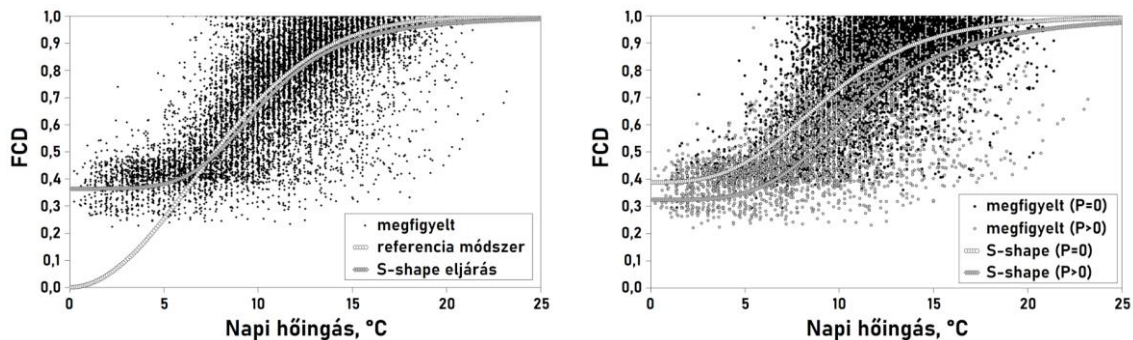
Bár csak kevés meteorológiai állomáson mérik, a földfelszínre érkező napi globálsugárzás az ökoszisztéma folyamatainak egyik legfontosabb tényezője, és a növény-talaj modellek kulcsfontosságú bemenő adata. A hosszú időszakra vonatkozó, jó minőségű napsugárzás adatok szűkössége komoly nehézséget jelent az ökoszisztéma modellek használatában. Ezen modellek futtatásához azokban esetekben, amikor a sugárzási adatok hiányoznak, olyan módszerre van szükség, amely becslést ad a sugárzás mennyiségére más meteorológiai változók alapján (pl. hőmérséklet és csapadék), amelyek egyszerűbben (olcsóbban) mérhetők és jóval több helyre vonatkozóan állnak rendelkezésre. A szakirodalomban elérhető

eljárások (*Hargreaves and Samani, 1982; Bristow and Campbell, 1984; Thornton and Running, 1999; Bechini et al., 2000; Liu and Scott, 2001*) módszertani hiányosságait kiküszöbölve, talajfizikai analógiára épülő becslőeljárást dolgoztunk ki (*Fodor and Mika, 2011*) és validáltunk 109 meteorológiai állomás adatait (SAMSON, 2009) felhasználva. A napi hőingás alapú módszerek, mint amilyen az S-shape eljárás is az alábbi egyenlettel határozzák meg a napi globálsugárzás (GSR) mennyiségét:

$$E.3.1 \quad GSR = ETR \cdot CST \cdot FCD$$

ahol *ETR* a légkör felső határán mérhető sugárzás mennyisége, *CST* a földfelszínre érkező sugárzás hányada tökéletesen tiszta légköri viszonyok között, *FCD* a légkör *CST*-hez viszonyított aktuális (adott napi átlagos) átteresztőképessége.

A hőingás alapú módszerek az *FCD*-t a napi maximum- és minimumhőmérséklet különbségének (ΔT) függvényeként adják meg. Az egyes módszerek elsősorban ezen függvény alakjában különböznek. A korábbi módszerekhez képest az S-shape eljárás két fontos módszertani újítást (javítást) vezetett be az *FCD* számítása során: (1) Olyan függvénnyel közelítette az *FCD*- ΔT kapcsolatot, amely határértéke egyre kisebb ΔT értékekre egy nullánál nagyobb szám. (2) Figyelembe vette azt a tényt, hogy csapadékos és csapadék nélküli napokra lényegesen más alakú az *FCD*(ΔT) függvény (3.2 ábra).



3.2 ábra: A megfigyelt és függvénnyel közelített illesztett *FCD*- ΔT kapcsolat, baloldali ábra: a referencia módszer (*Donatelli and Campbell, 1998*) és az S-shape eljárás összehasonlítása; jobboldali ábra: az S-shape eljárás összehasonlítása csapadékos ($P>0$) és csapadék nélküli napokra. Athens, GA, USA, 1961-1990.

A referencia módszerhez képest az 1. módszertani újítás 7 %-os csökkenést eredményezett az átlagos abszolút hibában, melyet további 12 %-kal csökkentett a 2. módszertani fejlesztés (*Fodor and Mika, 2011*).

3.1.3 MV-WG időjárás-generátor

Az időjárás-generátorok olyan statisztikus modellek, amelyek napi léptékű időjárási adatsort készítenek egy adott helyszínre, több változóra, koherens módon úgy, hogy a mesterségesen előállított adatsorok statisztikai (éves illetve havi) jellemzői (csapadékos napok átlagos száma, átlaghőmérséklet, hőségnapok száma, stb.) megegyezzenek a helyszínre rendelkezésre álló, megfigyelésből származó adatsorok statisztikai jellemzőivel. Jóllehet használatuk egyre inkább háttérbe szorul a Regionális Klímamodellek (RCM) fejlődésének köszönhetően, alacsony számítási kapacitást igénylő megoldásként mind a mai napig alkalmazzák őket Általános Cirkulációs Modellek¹ (GCM) eredményeinek leskálázásához, helyspecifikus éghajlati forgatókönyvek készítéséhez illetve az azokra épülő éghajlatváltozási hatásvizsgálatokhoz, mezőgazdasági és hidrológiai kockázatelemzésekhez (Mukundan et al., 2019; Kinnell and Yu, 2020; Croce et al., 2021). A STICS modellt összekapcsolták a LARS-WG időjárás-generátorral (Semenov et al., 1998), hogy a determinisztikus növény-talaj modell kimeneteinek sztochasztikus jelleget adjanak (Dumont et al., 2015). Az MV-WG időjárás generátor (Fodor et al., 2010) Dobi Ildikó Ph.D. dolgozatának (Dobi, 2002) szoftveres implementációja, amely számos ponton meghaladta a legelterjedtebben használt LARS-WG generátor akkori verziójának (ver. 4.0) képességeit (3.1 táblázat). Mindkét generátor mesterséges adatsorai jól 'utánozták' a valós adatsorok havi átlagát és szórását, valamennyi változó esetében. A globálsugárzás tekintetében az MV-WG egyértelműen jobbnak bizonyult, ami a vonatkozó módszertani fejlesztéseknek köszönhető. Ugyanezt találtuk a vizsgált változók (napi értékek éves) szélsőértékeinek esetében. A két generátor szinte tökéletesen reprodukálta a csapadék szélsőértékeit de csak 50% körüli teljesítményre volt képes a minimum és maximum hőmérséklet esetében. A globálsugárzás szélsőértékeit az MV-WG lényegesen több esetben volt képes elfogadhatóan számítani. Tehát sikerült olyan időjárás-generátort fejleszteni, amely legalább olyan hatékony (ugyanakkora vagy kisebb hibát ad) mint a korábbi alkalmazások, egyszerűbb (kevesebb paramétert használ) azoknál a részeknél, ahol lehet egyszerűsíteni és összetettebb azoknál a részeknél, ahol a megfigyelések indokolják a részletesebb leírást (3.2 táblázat).

¹ Az Általános Cirkulációs Modelleket Globális Klímamodelleknek is hívják.

3.2 táblázat: A LARS-WG és az MV-WG időjárás generátorok közötti főbb különbségek

LARS-WG ver. 4.0	MV-WG
21 paraméteres tört-lineáris függvénnyel írja le a száraz és nedves időszakok hosszának eloszlását valamint a napi csapadékmennyiségek eloszlását	3 paraméteres Weibull függvénnyel írja le a száraz és nedves időszakok hosszának eloszlását valamint a napi csapadékmennyiségek eloszlását
5 meteorológiai változó idősorainak generálására képes: maximális és minimális hőmérséklet, globálsugárzás, napsütéses órák száma és csapadékmennyiség	9 meteorológiai változó idősorainak generálására képes: maximális és minimális hőmérséklet, globálsugárzás, napsütéses órák száma, csapadékmennyiség, relatív páratartalom, felhőzettség, szélesebesség és légnyomás
elhanyagolja a globálsugárzás és a hőmérséklet közötti korrelációt	lineáris korrelációt feltételez a globálsugárzás és az adott napi valamint az előző napi hőmérsékletek között
egész évben állandó kereszt-korrelációs együtthatót feltételez a napi maximális és minimális hőmérséklet között	havonta változó kereszt-korrelációs együtthatót feltételez a napi maximális és minimális hőmérséklet között
minden változóra egész évben állandó kereszt-korrelációs együtthatót feltételez az adott napi és az előző napi értékek között	minden változóra havonta változó kereszt-korrelációs együtthatót feltételez az adott napi és az előző napi értékek között

3.2 Statisztikus modellek

Jóllehet figyelmen kívül hagyják a talaj-növény rendszer összetevői és folyamatai közötti ok-okozati összefüggéseket, (viszonylagosan) kis adat- és számítási kapacitás igényük miatt, statisztikus modelleket (Lobell and Burke, 2010; Kern et al., 2018; Marton et al., 2020; Jahn and Hertig, 2022) mind a mai napig használnak környezetvédelmi, erőforrás-gazdálkodási és agrár-közgazdasági elemzésekben, valamint klímaváltozással kapcsolatos hatástanulmányokban. Számos előnyös

tulajdonságuk ellenére a mechanisztikus talaj-növény modellek csak korlátozottan képesek szimulálni az agro-technológia (nemesítés, vegyszerek, művelő eszközök, stb.) és az agro-mendzsment (képzési rendszer, agrártámogatási rendszer, stb.) folyamatos fejlődésének köszönhető hatásokat (**2.3 ábra**). Ugyanakkor ezen tényezők együttes hatását a statisztikus modellek jellemzően jól képesek leírni. Hibás megközelítés lenne az egyik vagy a másik modellezési gyakorlat felsőbbrendűségét megpróbálni igazolni. Ezek a modelltípusok inkább kiegészítik egymást. Elsősorban az adott kutatási érdeklődés/probléma határozza meg az alkalmazott modellezési stratégiát.

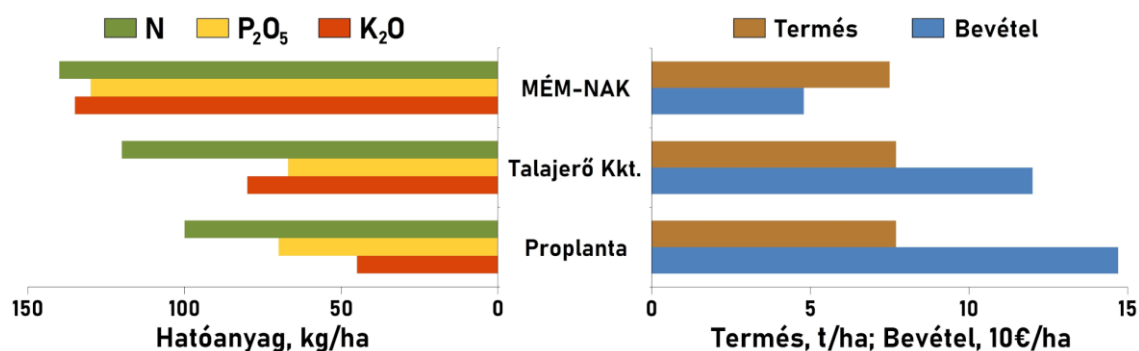
3.2.1 Proplanta trágyázási szaktanácsadási rendszer

A politikai, de főként a gazdasági változások az 1980-as évek végén és az 1990-es évek elején radikálisan megváltoztatták a magyar gazdálkodók tápanyag-visszapótlási gyakorlatát. A támogatások megvonása miatt a N-műtrágya felhasználás 80%-kal, míg a P- és K-műtrágya felhasználás több mint 95%-kal csökkent néhány év alatt, a korábbi szuperintenzív időszakhoz képest. Ebben a közgazdasági légkörben, egy új szemléletű, költség- és környezetkímélő trágyázási szaktanácsadási rendszer fejlesztése kezdődött meg a hazai agrokémiai iskolák által beállított tartamkísérletek publikált adatbázisának, számos magyarországi helyszínen, több évtizedes kísérleti adatainak, felhasználásával. A Proplanta rendszer (eredeti elnevezése: MTA TAKI – MTA MgKI környezet- és költségkímélő trágyázási szaktanácsadási rendszer: *Fodor et al., 2011; 2013*) központi eleme egy olyan statisztikus modell, amely több mint száz különböző kultúrnövényre megadja a fajlagos N-, P- és K-tartalmat a termésszint függvényében. A rendszer további moduljai számos más tényező módosító hatását számszerűsítik. Így a Proplanta a talaj kémiai tulajdonságait (humusztartalom, pH, stb.), illetve az elővetemény hozamát és betakarításának körülményeit valamint a szerves trágyázás jellemzőit is figyelembe veszi a számítások során. Olyan rendszer kidolgozása volt a cél, amely biztonságosan, a talaj és a környezet értékeinek megőrzésével teszi lehetővé nagy tervezett termésszintek elérését és a területegységre vonatkoztatott jövedelem maximalizálását. A matematikai összefüggéseken túl a Proplanta rendszer számos új szemléletbeli megközelítést is bevezetett a régi MÉM-NAK rendszerhez képest (**3.3 táblázat**). Jelenlegi változata magnézium, cink, réz és mangán utánpótlással kapcsolatos szaktanácsot is készít, amennyiben a bővített talajvizsgálati eredmények rendelkezésre állnak.

3.3 táblázat: Az intenzív MÉM-NAK és a környezet- és költségkímélő Proplanta trágyázási szaktanácsadási rendszerek szemléletbeli különbségei.

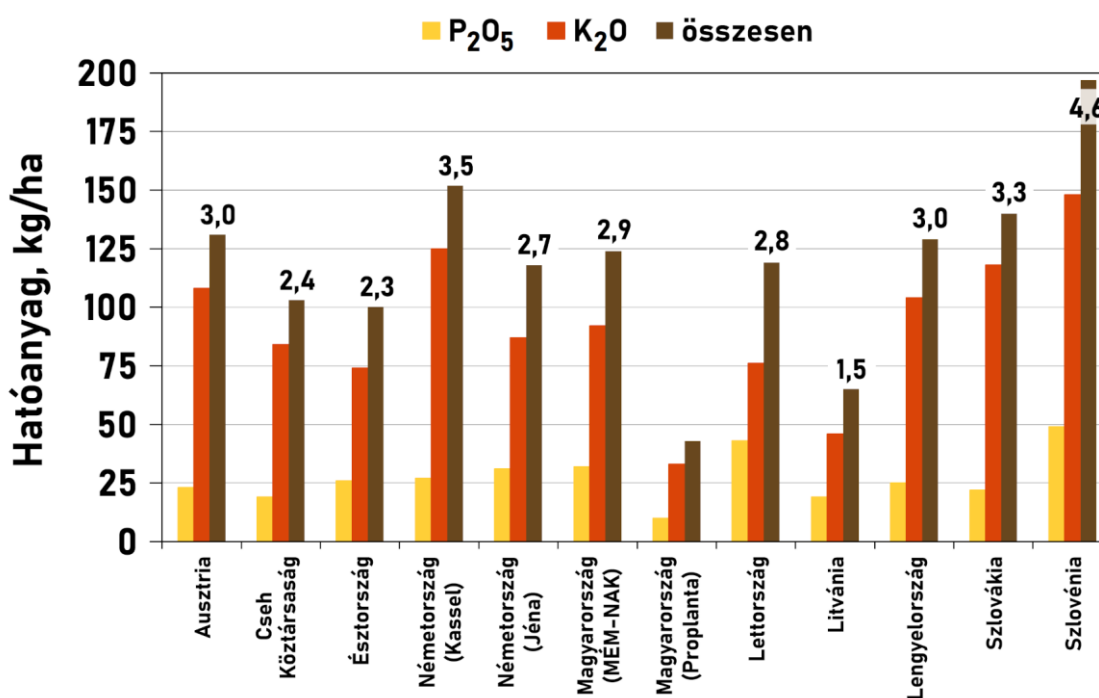
MÉM-NAK	Proplanta
Maximális termésszintre törekvés	Gazdaságos termésszintre törekvés
Minden évben PK-trágyázás	A vetésforgó (periodikus) PK-trágyázása
PK-trágyázás minden talaj PK-ellátottsági szinten	PK-trágyázás csak jó-közepes és annál gyengébb talaj PK-ellátottsági szinten
Magasabb talaj tápelem-ellátottsági határértékek	Alacsonyabb talaj tápelem-ellátottsági határértékek
Egységes talaj tápelem-ellátottsági határértékek	Növénycsoporttól függő talaj tápelem-ellátottsági határértékek
Nagyobb fajlagos tápelemtartalmak	Kisebb fajlagos tápelemtartalmak
A tervezett termésszinttől független fajlagos tápelemtartalmak	A tervezett termésszinttől függő fajlagos tápelemtartalmak

A Nemzetközi Foszfor Intézet (IMPHOS) finanszírozásával különböző hazai trágyázási szaktanácsadási rendszerek tesztelését végeztük el, egy hároméves program keretében őszi búza, kukorica és tavaszi árpa növényekkel, három jellegzetes talajon (barna erdőtalaj, csernozjom, réti talaj). Az IMPHOS tesztelési kísérletek mindhárom talajon, valamennyi növény esetében igazolták az új rendszer alapelveinek, a műtrágya adag számítási módszerének helyes voltát. Az intenzív MÉM-NAK rendszer összes NPK adag ajánlásainak esetenként 40-60%-ának kijuttatásával az új Proplanta rendszer a MÉM NAK ajánlásával kapottal azonos, nagy terméseket eredményezett (3.3 ábra).



3.3 ábra: NPK hatóanyagok, elért termés (gabonaegység) és a különböző kezelések jövedelemszintjei a régi (MÉM-NAK) és az új (Proplanta) szaktanácsadási rendszer szerint. Az IMPHOS-kísérletekben elért eredmények átlaga három helyszínen (csernozjom, barna erdő talaj, réti talaj) és három évre (2004-2006) vonatkozóan.

A közép- és kelet-európai országok növénytaplálási szakembereinek 19. találkozásiára Visegrádon került sor, 2007-ben. A konferencián több mint 30 növénytaplálási szervezet, illetve intézet szakértői vettek részt Európa 11 országából. A találkozó legfontosabb célja a résztvevő országok PK-műtrágya szaktanácsadási rendszereinek összehasonlítása volt. A 11 országból, országonként kettő jellemző talajból összesen 22 mintát gyűjtöttek. A talajminták adatait felhasználva, 12 szaktanácsadási rendszerrel (Magyarországról kettő rendszer is szerepelt) 6 növényre (őszi búza, repce, rozs, burgonya, kukorica, burgonya, kukorica és silókukorica) összesen $22 \times 6 = 132$ szaktanácsot készítettek. A **3.4 ábra** ezen szaktanácsok átlagait mutatja minden egyes rendszerre. Az elemzés alapján nyilvánvalóvá vált, hogy a részt vevő országok (kivéve Litvánia) továbbra is intenzív rendszereket alkalmaznak a PK-trágyázás tekintetében. A Proplanta rendszer lényegesen alacsonyabb PK-dózisokat javasolt, mint az összes többi rendszer.



3.4 ábra: A különböző tanácsadási rendszerek által kiszámított átlagos foszfor és kálium hatóanyag-mennyiségek, illetve ezek összegei 22×6 talaj \times növény kombinációra adott 132 ajánlás alapján. Az 'összesen' oszlopok feletti számok a Proplanta rendszerhez viszonyított szorzótényezőként adják meg a többi rendszer által javasolt mennyiségeket.

Én 2002-ben csatlakoztam a fejlesztőcsapathoz. A Proplanta rendszer szoftverét a kezdetektől én fejleszttem. Az első verzió 2003-ban készült el és 37 különböző szántóföldi növényre volt képes szaktanácsot készíteni. Az elmúlt 20 év során, a felhasználók/partnerek visszajelzései/igényei alapján, számos fejlesztést

hajtottunk végre a rendszeren, amely idő közben elnyerte a 2007. évi Innovációs Nagydíjat, 2021-ben nemzeti Minőség-Innováció díjat majd 2022-ben nemzetközi Minőség-Innováció díjat nyert. A folyamatos fejlesztőmunka eredménye egy olyan rendszer, amellyel jelenleg:

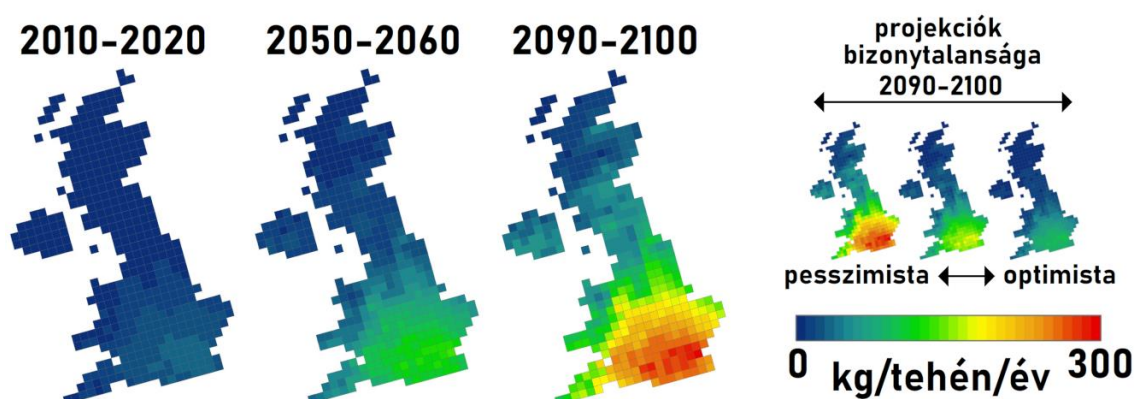
- 150 növényfajra adható szaktanács: 82 szántóföldi növény, 45 szántóföldi zöldségnövény, 22 gyümölcsfaj és szőlő.
- A szaktanácsok összhangban vannak a mindenkor hatályos jogszabályokkal (AKG programok, Nitrát rendelet, stb.)
- A szoftver képes kiszolgálni a precíziós gazdálkodás igényeit.

Jelenleg a Proplanta alkalmazásprogramozási felület (API) kialakításán dolgozunk, melynek segítségével mások által fejlesztett programok, az interneten keresztül hozzáférhetnek a szaktanácsadási rendszer szolgáltatásaihoz anélkül, hogy annak belső működését ismernék. A Proplanta API szolgáltatásra már több meghatározó cég is jelezte érdeklődését, hogy komplex szaktanácsadási rendszerükben, beépülő modulként, a Proplanta biztosítsa a növénytáplálással kapcsolatos számításokat.

3.2.2 Az Egyesült Királyság tejtermelésének jövője

A MACSUR2 projekt keretén belül (2015-2017), a Leeds-i Egyetem vendég-professzoraként, vezettem egy munkacsoportot, amely a klímaváltozás agrárszektorra gyakorolt várható hatását próbálta feltérképezni az Egyesült Királyságon (UK) belül. Munkánk egyik eredménye egy UK tejtermelésére vonatkozó hatástanulmány volt (*Fodor et al., 2018*), melyhez egy saját fejlesztésű statisztikai modellt használtunk. Az Egyesült Királyság tejtermelő ágazata körülbelül 1,6 millió tejelő tehénből áll, amely évente mintegy 14,6 milliárd liter tejet termel, mellyel a UK a 10. legnagyobb tejtermelő ország a világon. Az Egyesült Királyság tejtermelésének értéke körülbelül 4,6 milliárd fontot tesz ki évente, ami a bruttó mezőgazdasági teljesítmény mintegy 18%-a. Az egy tejelő tehenre jutó átlagos hozam valamivel több, mint 7500 liter évente. Mint szinte minden más szektort, a klímaváltozás várhatóan ezt is negatívan érinti majd. A termoneutrális (optimális) hőmérséklet felső kritikus értékénél magasabb környezeti hőmérséklet hőstresszhez vezet, ami a tehenek tejtermelésének csökkenését eredményezi. A hőstressz hatásának számszerűsítésére jónéhány empirikus modellt dolgoztak ki, amelyek a hőmérséklet és a relatív páratartalomból származtatott ún. hőmérséklet-páratartalom index (THI) függvényében adják meg a stressz mértékét (*NRC, 1971*;

Yousef, 1985). Hasonlóképpen számos modell létezik a (*St-Pierre et al., 2003; Bohmanova et al., 2007*) a stressz hatására bekövetkező tejtermelés csökkenésének (ML) becslésére. A szakirodalomban található THI és ML modellek kombinációjával 18 modellt alkottunk, amelyek a hőmérséklet és a relatív páratartalom alapján számítják ki a tejhozam csökkenést egyetlen tehénre vonatkozóan. Ezen modellek bemenő adatait 10 különböző, a teljes Egyesült Királyságot 25 km-es felbontásban lefedő napi léptékű adatokat a 2000-2100 időszakra szolgáltatató klímaprojekcióból (*Sexton et al., 2010*) származtatva, 180 lehetséges tejhozam csökkenési forgatókönyvet határoztunk meg. Ezeket a forgatókönyveket régió-specifikus, állománysűrűsége vonatkozó forgatókönyvvel kombináltuk, így az Egyesült Királyság nagyobb (NUTS-1) térségeire vonatkozóan hozamcsökkenési és bevételcsökkenési előrejelzéseket fogalmaztunk meg (**3.5 ábra, 3.4 táblázat**).



3.5 ábra: Átlagos éves tejhozamkiesés az Egyesült Királyságban a legpesszimistább projekció szerint, illetve a projekciók bizonytalansága a század végén, 180 lehetséges projekció alapján.

Az Egyesült Királyságban egy átlagos méretű tejgazdaság éves bevétele átlagosan 80.000 font körül mozog. A hőstressz okozta bevételkiesés az előrejelzések szerint még a legsúlyosabban érintett déli területeken is 7% alatt marad az évszázad vége felé is. Szélsőséges években azonban a bevétel csökkenése Délkelet-Angliában akár a 18%-ot is elérheti (**3.4 táblázat**), bár a tejelő tehénállomány sűrűsége ebben a térségben viszonylag alacsony. Délnyugat-Anglia a legérzékenyebb az éghajlatváltozásra, mivel ez a terület az a régió, amelyet magas tejelőállomány-sűrűség jellemez, és ezért nagy a potenciális hőstressz okozta tejveszteség kockázata. Ezen régió becsült, hőstresszel összefüggő éves bevételkiesése az évszázad végére átlagos években elérheti a 13,4 millió fontot, szélsőséges években pedig a 33,8 millió fontot, ha nem fogantatosítanak lépéseket a klímaváltozás hatásának mérséklésére.

3.4 táblázat: Az átlagos méretű tejgazdaságok (átlagos éves bevétel: 80.000 £) hőstressz eredetű bevétel-kiesése az Egyesült Királyság különböző NUTS-1 régióiban (£/év) átlagos és extrém meleg években, feltéve, hogy nem fogantatosítanak enyhítő intézkedéseket. Az extrém meleg év bekövetkezésének valószínűsége kevesebb, mint 10%.

Régió	Évtized	Átlagos év	Extrém év
Scotland	2010-es	89	219
	2050-es	37	663
	2090-es	177	2006
Northern Ireland	2010-es	5	192
	2050-es	67	593
	2090-es	289	1894
North West England	2010-es	46	668
	2050-es	231	1795
	2090-es	697	4200
North East England	2010-es	33	519
	2050-es	202	1481
	2090-es	658	3668
Yorkshire and the Humber	2010-es	79	896
	2050-es	390	2432
	2090-es	1064	5390
West Midlands	2010-es	264	2023
	2050-es	975	5119
	2090-es	2204	10123
East Midlands	2010-es	278	2019
	2050-es	991	5142
	2090-es	2178	9693
Wales	2010-es	93	1000
	2050-es	410	2691
	2090-es	1080	5796
East of England	2010-es	443	2703
	2050-es	1401	6501
	2090-es	2829	11573
South West England	2010-es	763	2105
	2050-es	2115	5565
	2090-es	4346	11190
South East England	2010-es	1266	3454
	2050-es	3166	8077
	2090-es	5833	14488

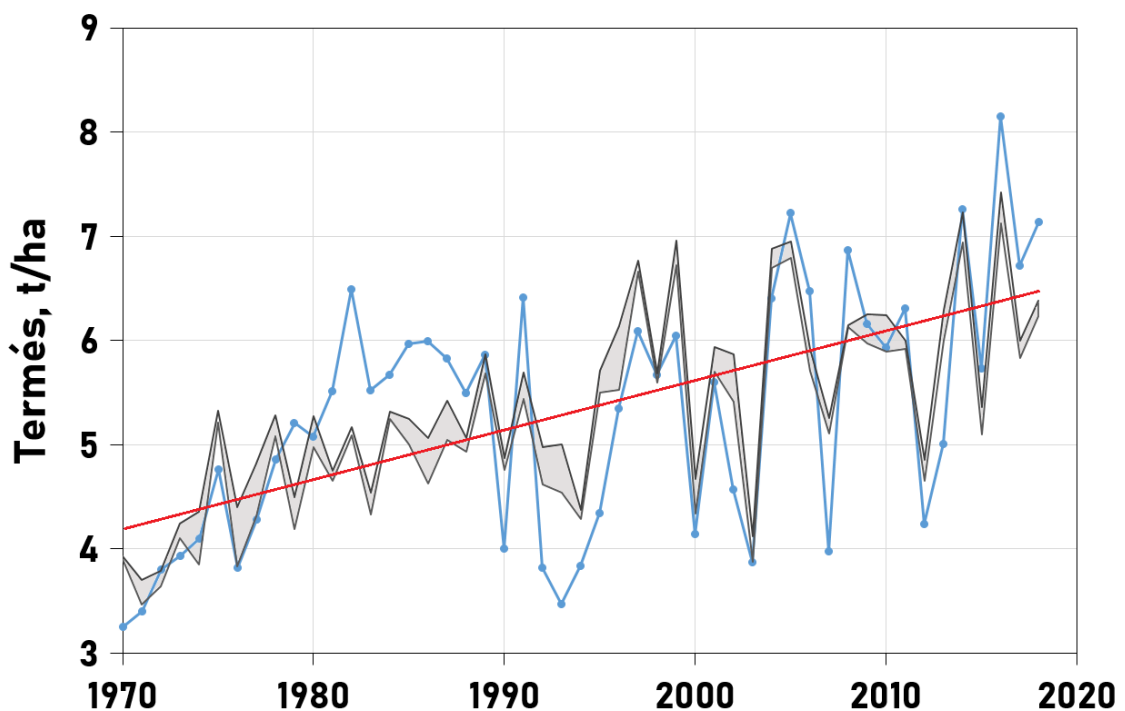
3.2.3 A magyarországi kukoricatermelés sorsa

Ezen modellezési munka során (Marton et al., 2020) négy adatbázist használtunk fel: DOSoReMI talaj adatbázis (Pásztor et al., 2020); FORESEE klíma adatbázis (Dobor et al., 2014) a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) által közölt kukorica hozam adatokat és az Agrárközgazdasági Intézet (AKI) tesztüzemi adatsorait (3.5 táblázat). A statisztikus modellek (M1-M6, 3.5 táblázat) számára a 10 km-es térbeli felbontást választottuk.

3.5 táblázat: A magyarországi kukoricatermelés lehetséges jövőjét előrejelző modellezési tanulmányban készített modellekhez (M1-M6) felhasznált adatbázisok és a modellek változói. A függőváltozó: termés (Y). Független változók: SOM a talaj szervesanyag tartalma; pH a talaj kémhatása; $Sand$ a talaj homoktartalma; GDD , GDD_{veg} , GDD_{rep} hőösszeg a tenyészidőszakban, vegetatív illetve reproduktív fázisban; RAD_{veg} sugárzásösszeg a vegetatív fázisban; RAD_{rep} sugárzásösszeg a reproduktív fázisban; P , P_{veg} , P_{rep} csapadékösszeg a tenyészidőszakban, vegetatív illetve reproduktív fázisban; NHD a hőségnapok száma a tenyészidőszakban.

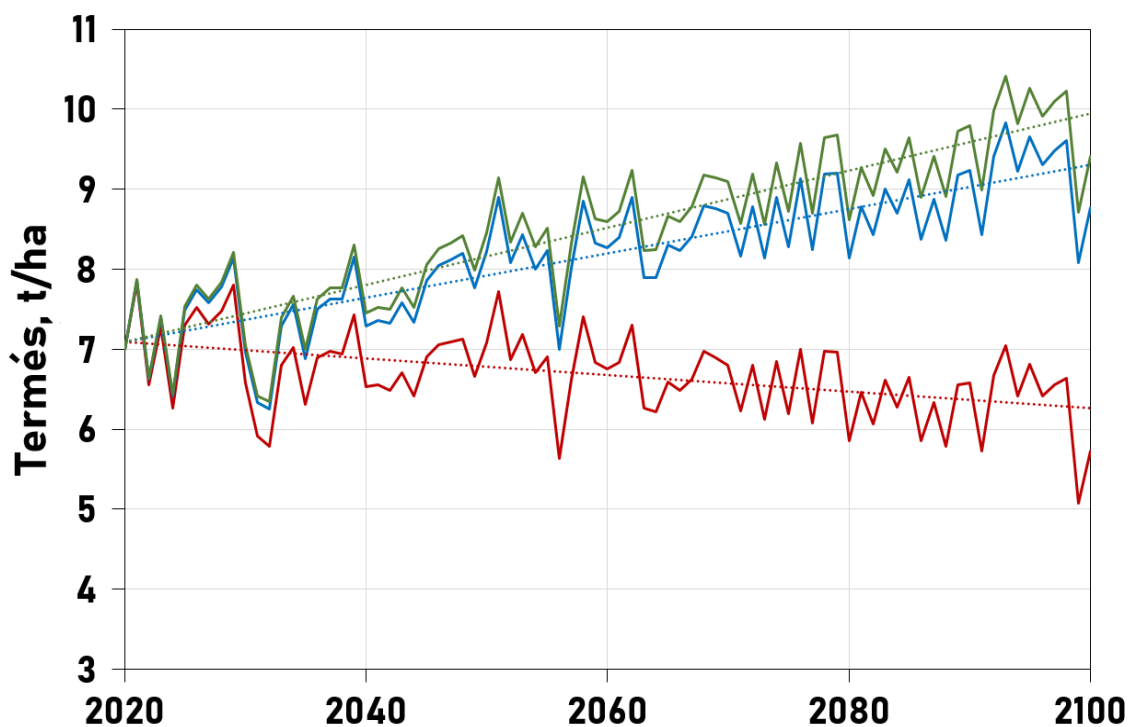
Adatbázis	Térbeli felbontás	Időszak	Változó	M1	M2	M3	M4	M5	M6	
DOSoReMI	100 m	n.r.	SOM			+	+	+	+	
			pH			+	+	+	+	
			$Sand$			+	+	+	+	
FORESEE	10 km	1951-2018	GDD	+		+		+		
			GDD^2	+		+		+		
			GDD_{veg}		+		+		+	
			GDD_{veg}^2		+		+		+	
			GDD_{rep}		+		+		+	
			GDD_{rep}^2		+		+		+	
			RAD_{veg}						+	+
			RAD_{veg}^2						+	+
			RAD_{rep}						+	+
			RAD_{rep}^2						+	+
			P	+		+		+		
			P^2	+		+		+		
			P_{veg}		+		+		+	
			P_{veg}^2		+		+		+	
			P_{rep}		+		+		+	
P_{rep}^2		+		+		+				
NHD	+	+	+	+	+	+	+	+		
KSH	NUTS-1	1971-2018								
AKI	kb. 2000 tesztüzem	2011-2018	Y	+	+	+	+	+	+	

Ehhez a finomabb felbontású talaj adatokat összegezni, a durvább felbontású hozam adatokat szétbontani kellett. A talaj adatok esetében minden 10 km-es cellát a bennük található 10.000 db 1 hektáros cella közül azzal reprezentáltunk, amely jellemzői legjobban közelítették a 10.000 cella átlagos jellemzőit. A megyei (NUTS-1) szintű hozam adatokat megyébe eső tesztüzemi hozamok térbeli mintázata (eloszlása) alapján bontottuk szét a megyébe eső 10 km-es cellákra vonatkozóan úgy, hogy cellák termésének átlaga visszaadja a KSH megyére vonatkozó hozamadatait, minden évre. A függő változó és a független változók között lineáris regressziós egyenletekkel teremtettünk kapcsolatot: a legegyszerűbb modellnek (M1) hat paramétere, míg a legbonyolultabbnak (M6) tizenhét paramétere volt. A KSH tényadataiban mutatkozó 46 kg/ha/év pozitív trend (**3.6 ábra**), a légköri CO₂ szintjének növekedéséből (*Weigel and Manderscheid, 2016* és *Castaño-Sánchez et al., 2020* munkája alapján +8 kg/ha/év) valamint az előnyös antropogén hatásokból (+38 kg/ha/év) ered. A tényadatok trendjének eltávolítása után, valamint a modellparaméterek 1971-2018 időszakra történő kalibrálása után, hat különböző projekcióból származó klimatikus adatokat adtunk meg bemenetként a modellek számára a 2021-2100 időszakra vonatkozóan. Így 6×6=36 magyarországi kukoricatermelés sorsára vonatkozó projekciót készítettünk (**3.7 ábra**).



3.6 ábra: Kukorica hozamok Magyarországon, 1970 és 2018 között. Kék vonallal a KSH tényadatai. A szürke vonalak a hat modell (**3.4 táblázat**) minimumát és maximumát jelölik. A piros vonal a teljes időszakra illesztett egyenes, melynek meredeksége 46 kg/ha/év.

Az előnyös antropogén hatások széles spektruma magába foglalja az agrotechnológia fejlődését (növénynemesítés, technikai fejlődés: gépesítés és hatékonyabb anyagok, stb.), az agrárpolitikai környezetet (támogatási politika, centralizáció, stb.) változásait, a K+F eredmények gyakorlatba történő átültetését, a tudástranszfert és az együttműködésre való hajlandóságot. Ezek együttes hatása kulcsfontosságú szerephez juthat a klímaváltozás negatív hatásainak csökkentésében, hiszen számításaink szerint ez a hatás a jövőben képes lehet ellensúlyozni az aszályok és a hóhullámok okozta egyre komolyabb termés kieséseket (3.6 ábra).



3.7 ábra: Kukorica hozamok várható trendjei Magyarországon 36 projekció alapján. Piros: a klímaváltozás hatása, antropogén hatások és a megemelkedett légköri CO₂ tartalom hatása nélkül; Kék: a klímaváltozás és az antropogén hatások eredője a CO₂ hatása nélkül; Zöld: mindhárom hatás eredője.

Az eredmények alapján a magyar kukoricatermesztési rendszer hosszú távon sérülékeny, de az antropogén hatások összessége képes lehet megfordítani az előre jelzett csökkenő tendenciát. A -10 kg/ha/év-es csökkenő trendből, az emberi tevékenységnek köszönhetően, +27 kg/ha/év-es növekvő trend érhető el. (3.7 ábra). Van tehát lehetőség a kukoricatermesztés fenntartható intenzifikálására Magyarországon, ahol a negatív trend megfordítsa a politikai döntéshozók, a gazdálkodók és a mezőgazdasági szövetkezetek szervezett fellépését igényli: a precíziós gazdálkodás elősegítését, nagyszabású öntözési infrastruktúra-fejlesztést, általánosságban az előnyösebb gazdálkodási feltételek biztosítását.

3.3 AgroMo modellezési keretrendszer

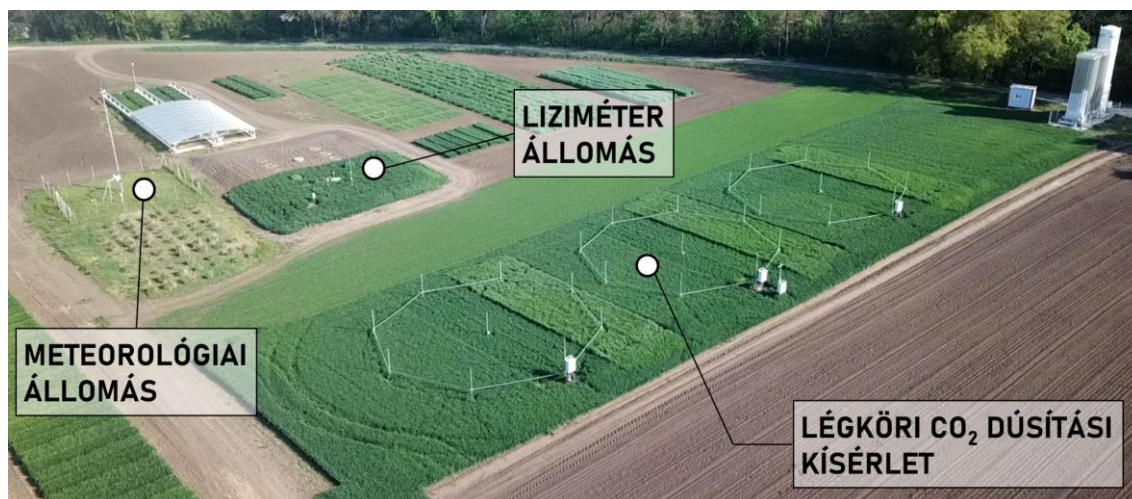
Az AgroMo modellezési keretrendszert a GINOP-2.3.2-15-2016-00028 projekt keretén belül hoztuk létre, amely az alábbi öt lépésben valósult meg:

(1) Kutatóműhely létrehozása:

Az Agrártudományi Kutatóközpont (ATK), az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE), az Ökológiai Kutatóközpont (ÖK) és az Agrárközgazdasági Intézet (AKI) munkatársainak bevonásával egy multidiszciplináris kutatóműhelyt hoztunk létre, amely a légkör-talaj-növény rendszerhez kapcsolódó hazai elméleti és gyakorlati (kísérletezős) szakértőket foglalja magába az alábbi tudományterületekről: klimatológia, agro-meteorológia, talajfizika, talajkémia, talajbiológia, agronómia, növényélettan, növénynevelés, genomika, statisztika, informatika, térinformatika, környezeti térképezés és közgazdaságtan.

(2) Kísérleti platform kialakítása:

Holisztikus rendszerértelmezési szemléleten alapuló agro-pedo-klimatológiai kísérleti platformot (3.8-15 ábra) hoztunk létre Martonvásáron, amely ötvözi a tartamkísérletek hagyományait, illetve a klímakamrás stresszkutatások tapasztalatait a legmodernebb mérési és infokommunikációs technológiák által kínált lehetőségekkel.



3.8 ábra: AgroMo kísérleti platform három kiemelkedő fontosságú eleme Martonvásáron.

A kísérleti platform segítségével a jelenkorin túl, több jövőbeli éghajlati helyzet és talajállapot is előállítható szántóföldi körülmények között, és a felhasznált terepi és laboratóriumi mérőeszközök illetve módszerek segítségével folyamatosan nyomon követhetők a talajban, a növényben illetve a légkör felszínközeli rétegében lezajló energia és anyag átalakulási és áramlási folyamatok; végeredményben

pedig átfogó képet nyerhetünk a fontosabb mezőgazdasági haszonnövények életfolyamatairól és változó környezeti feltételekre adott reakcióiról.

Kísérleti platform - Légköri széndioxid-dúsítási kísérlet:

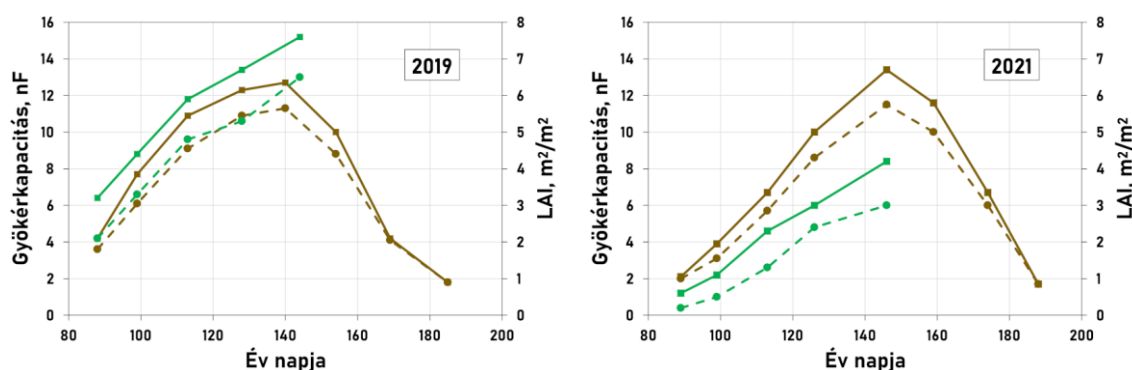
A szabadföldi szén-dioxid dúsítás (angolul "Free-Air Carbon dioxide Enrichment", rövidítve FACE) egy klímamanipulációs kísérlet, ahol a megemelkedett légköri CO₂ szint hatását vizsgálhatjuk a mezőgazdaság vonatkozásában. A FACE kísérlet lényege, hogy három, egyenként kb. 18 méter átmérőjű nyolcszög alakú gyűrűben, a gyűrű kerülete mentén elhelyezett hossz tengelyük mentén perforált PVC csövekből folyamatosan szén-dioxid gázt juttatunk a gyűrűkön belül elhelyezkedő növényállományba. A nyolcszög oldalait alkotó csövek önálló szeleppel és vezérléssel rendelkeznek. A szelepek nyitását és zárását, valamint a csövekbe engedett CO₂ nyomását és így a kijuttatás intenzitását mikroszámítógépek vezérlik a gyűrűk közepében elhelyezett széndioxid szenzorok és a gyűrűk szélére telepített szélesebbesség és szélirány szenzorok adatai alapján (**3.9 ábra**). A nyolc közül mindig az a három oldal van nyomás alatt, amelyekből széllal szemben áramlik ki a CO₂. Ezzel a megoldással a gyűrűkön belül, a vegetációs időszakban, folyamatosan 600 ± 50 ppm légköri CO₂ koncentrációt tartunk fent szemben a kontroll parcellákkal, ahol kb. 415 ppm a széndioxid szintje (NOAA GML, 2022).



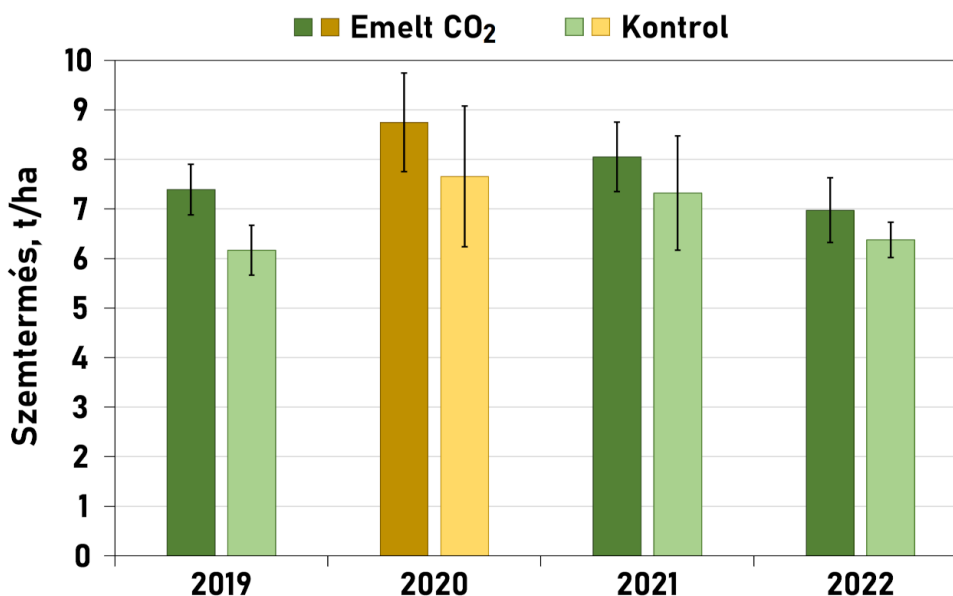
3.9 ábra: FACE: Légköri széndioxid-dúsítási kísérlet, Martonvásár, 2018.

Az eddigi eredmények alapján (Cseresnyés *et al.*, 2022) a megemelt légköri CO₂ szint a gyökér- és levélnövekedés dinamikájára és a termésre is szignifikáns pozitív hatást gyakorolt, főleg a magasabb (160 kgN/ha) műtrágyázási szinten (**3.10-11 ábra**).

Őszi búza esetében, évjárattól függően 10-20%-kal magasabb terméseredményt kaptunk megemelt légköri szén-dioxid szint mellett (3.11 ábra).



3.10 ábra: A gyökértömeggel arányos elektromos gyökérkapacitás (barnával) és a levélfelület index: LAI (zölddel) növekedési dinamikája őszi búza (Nemere fajta, 160 kgN/ha/év műtrágya) esetében a légköri széndioxid-dúsítási kísérletben, 2019-ben és 2021-ben, megemelt (folytonos vonal) és normál (szaggatott vonal) légköri CO₂ tartalom mellett.

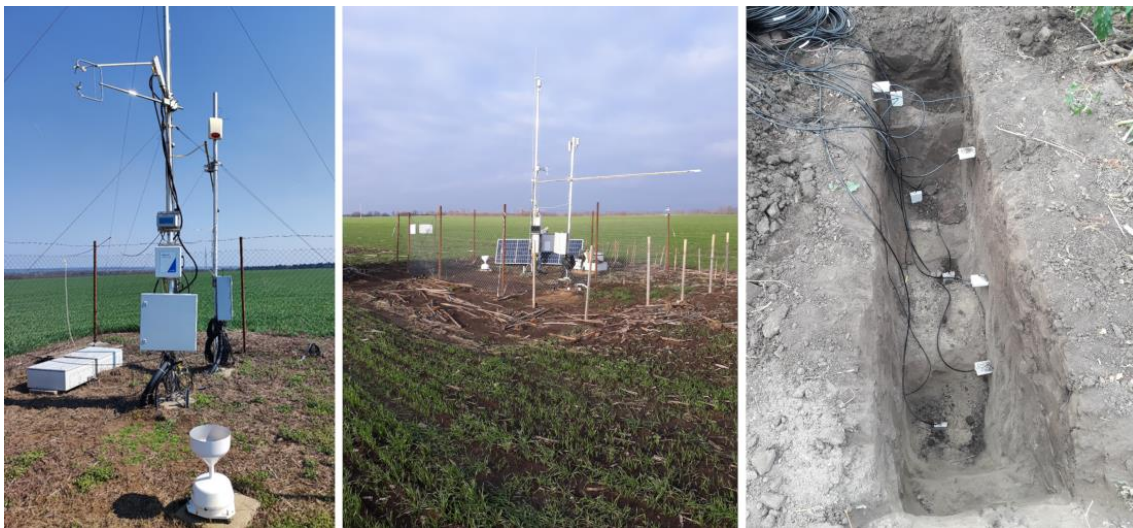


3.11 ábra: A légköri széndioxid-dúsítási kísérletben, magas nitrogén műtrágyázási szinten (160 kg/ha) elért őszi búza és kukorica (2020) terméseredmények és konfidencia tartományuk ($\alpha=0,05$) megemelt és jelenlegi légköri viszonyoknak megfelelő CO₂ szint mellett.

A légköri CO₂ mennyiségének növekedése közvetlenül előnyösen befolyásolja a növények produkcióját ugyanakkor áttételesen hozzájárul a hőstresszes és az aszályos időszakok valószínűségének növekedéséhez, amely hátrányosan érinti a termésképzést. Nagy kérdés, hogy a jövőben melyik tényező hatása válik meghatározóbbá és hogy ebbe a 'versengésbe' mennyire lesznek képesek beleszólni a növénynevelők.

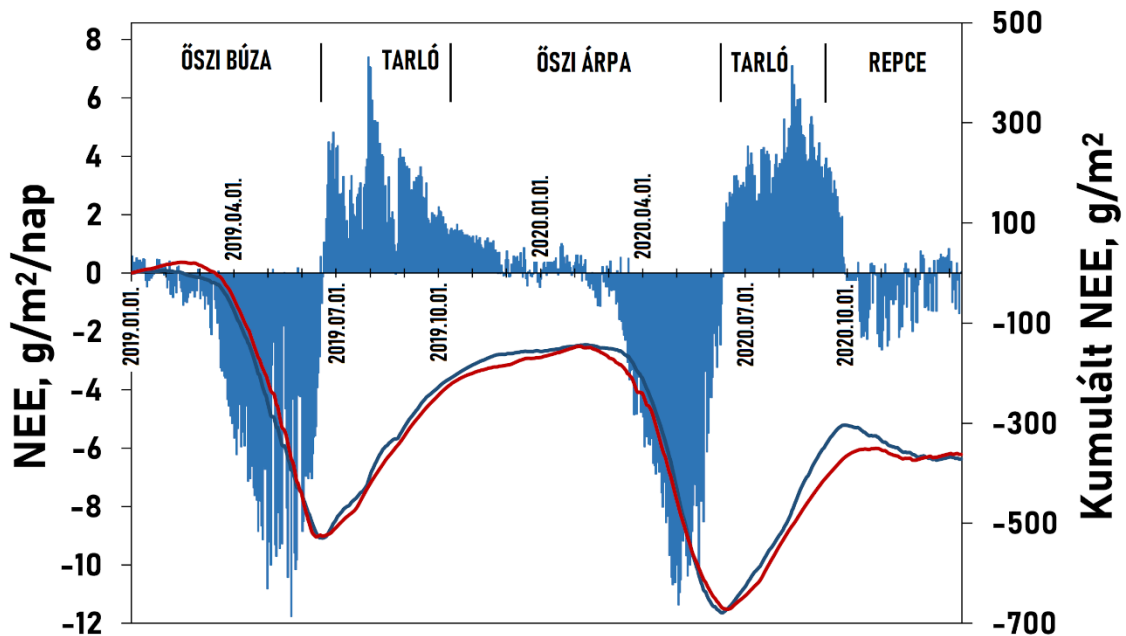
Kísérleti platform – Eddy-kovariancia állomások:

Martonvásár közelében (Pettenden és Kajászón), két nagyméretű (~100 ha) szántóföldi parcella közepére eddy-kovariancia mérőállomásokat telepítettünk (**3.12 ábra**), amelyek a vegetáció és a légkör közötti, nagyobb térléptékű (kb. 1 ha) energia és nyomanyag-áramok (így például a párologtatás és a CO₂-forgalom) és mikro-meteorológiai változók: sugárzási komponensek, léghőmérséklet és légnedvesség, talaj-hőáram, talajhőmérséklet és talajnedvesség-tartalom (1,5 m mélységig), illetve csapadékmennyiség párhuzamos mérésére szolgálnak. A párologtatás (evapotranszspiráció) a látens hőáramból számítható, a szénforgalmat a növényzet fotoszintézise révén felvett és a légzési folyamatok során kibocsátott szén-dioxid fluxusok eredője adja, amit nettó ökoszisztéma kicserélődésnek (NEE) nevezünk. Az eddy-kovariancia (direkt árammérés) módszerét ma már általánosan használják a főbb földhasználati-típusok (erdők, szántóföldek, gyepek) területei felett. Az ökoszisztéma skálájú fluxusok folyamatos mérése a biogeokémiai modellek fejlesztéséhez és a távérzékelés földi kontrolljához szükséges. A mért adatok segítségével a modellek vonatkozó paraméterei beállíthatók (kalibrálhatók), így a modellek hozzáigazíthatók a valósághoz (**3.13 ábra**). Az ábrán jól látható, hogy a teljes tömegben a területen hagyott melléktermés bomlásának köszönhetően, főként a július végi tarlóhántás követően, a búza- és árpatarló CO₂ kibocsátása is jelentős.



3.12 ábra: Eddy-kovariancia állomás, Kajászó, 2018. A szónikus szélességmérő és gázanalizátor kombinációja (baloldali kép) lehetővé teszi megfigyelt terület szénmérlegének precíz mérését. A hosszú, vízszintes karon az állomány fölé belógatott nettó sugárzásmérő (középső kép) lehetővé teszi az evapotranszspiráció pontos becslését. A több mélységben talajba telepített nedvesség- és hőmérők a gyökérszónában lezajló biológiai és kémiai folyamatok sebességének meghatározásához szolgáltatnak nélkülözhetetlen adatokat (jobboldali kép).

A **3.13 ábrán** bemutatott eredmények alapján látható, hogy az általunk fejlesztett modell (**3.3.1 fejezet**) jól képes lekövetni a szénmegkötés, illetve kibocsátás dinamikáját és kumulált mennyiségét, ami alapvető elvárás az ilyen típusú modellekkel szemben.



3.13 ábra: Mért ökoszisztéma kicserélődés (NEE) Kajászón, 2019-2020. A negatív, illetve pozitív napi értékek szénmegkötést, illetve szénkibocsátást jelentenek. Kékkel a megfigyelt, piros vonallal a Biome-BGCMuSo v6.2 modell segítségével szimulált, kumulált értékek kerültek megjelenítésre.

Kísérleti platform – Liziméter állomás:

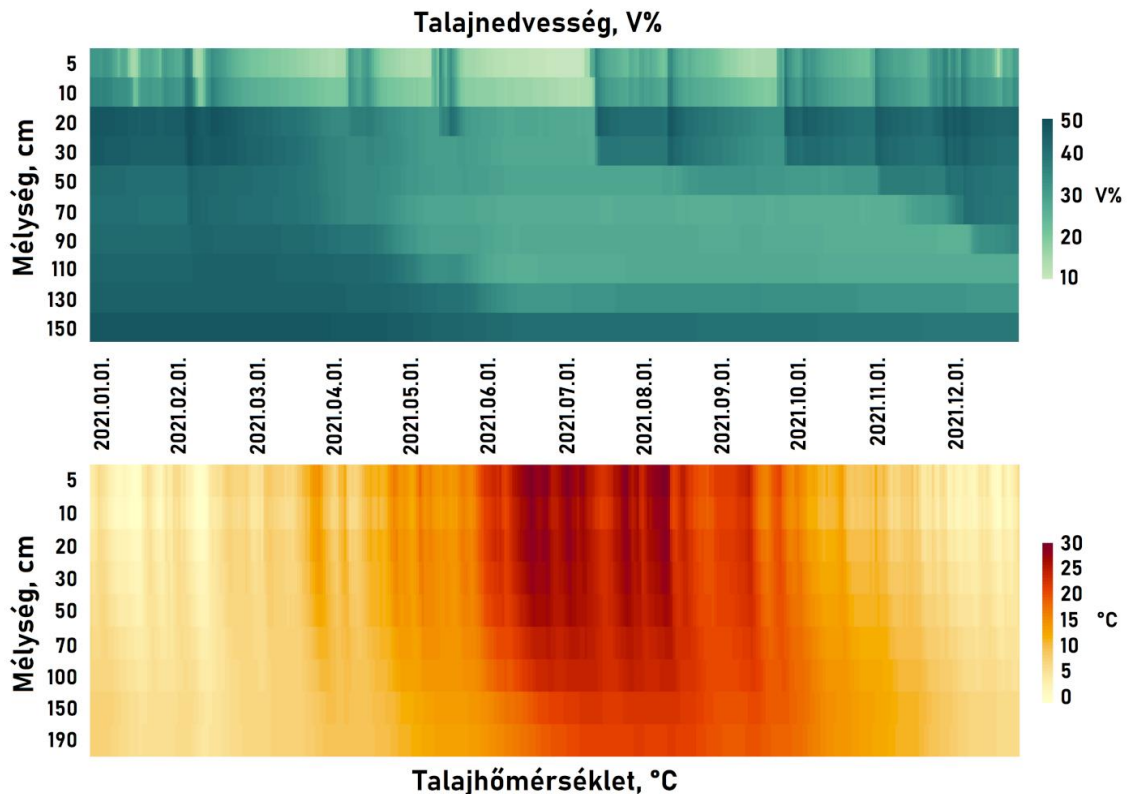
Az állomást tizenkét darab, egyenként 2 m mély és 1 m² keresztmetszetű, eredeti szerkezetű talajoszlop alkotja, melyekbe oldalról, több mélységben nedvességmérőket, hőmérőket és tenziométereket helyeztünk el. Az oszlopokat három ponton felfüggesztett nagypontosságú mérlegekre helyeztük, amelyek annak ellenére, hogy az oszlopok tömege 2,5 tonna körül van, 0,1 mm víz elpárolgását is érzékelni tudják (**3.14 ábra**). Az oszlopok alján kicsorgó vizet szintén nagy érzékenységgű mérlegekre helyezett edényekben fogjuk fel, amely kémiai elemzésre kerül. Így nem csak a drénvíz mennyiségének, de vegyi összetételének (pl. nitráttartalom) időbeli változásait is nyomon követhetjük. Az érzékelők és a mérlegek által percenként mért értékeket nagykapacitású adatgyűjtők tárolják és a naponta összegyűjtött adatokat interneten keresztül küldik el az ATK szerverére. A liziméterek segítségével gyűjtött adatok felhasználásával pontosabb képet kaphatunk a talajfelszín-közeli anyag- és energiaáramlási, illetve átalakulási

folyamatokról. Nyomon követhetjük a talaj felszínére érkező csapadék talajba szivárgását, a talajnedvesség elpárolgását illetve azt, hogy a napsugárzással érkező energia hogyan melegíti fel a mélyebben fekvő talajrétegeket. Mivel a nedvességtartalom és a hőmérséklet a talajban lezajló kémiai és biológiai folyamatok két legfontosabb tényezője, a gyűjtött adatok segítségével olyan modelleket fejleszthetünk, amelyek minden eddiginél pontosabban képesek szimulálni a talajban lezajló folyamatokat (3.15-16 ábra). A talaj nedvességprofil-változása segítségével nyomon követhető a gyökérzet növekedése, amely 2021-ben május végére érte el a 150 cm-es mélységet és mélyebbre már nem hatolt (3.15 ábra). A 3.16 ábrán jól látható hogy egy régebbi modellverzió jelentős mértékben felülbecsülte a feltalaj nedvességtartalmát. A mérési adatok segítségével beazonosítható volt, hogy milyen részfolyamat hibás modellezése okozta ezt az eltérést (3.3.1 fejezet). Ennek kijavításával a modell pontossága, a feltalaj felnedvesedési és kiszáradási folyamatainak szimulációja, jelentősen javult. A modell átlagos abszolútértékes hibája elérte a szenzoros mérés hibahatárát (~2 V%).

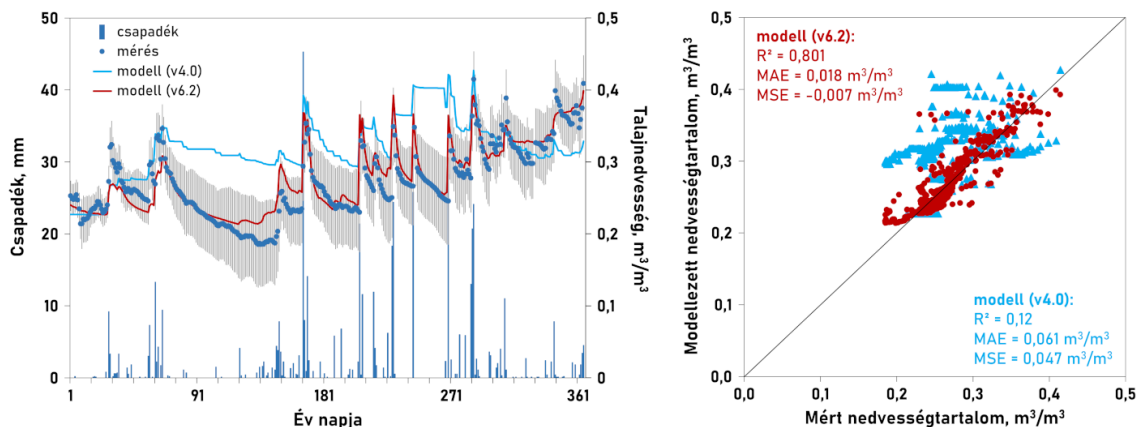


3.14 ábra: Felső sor: a liziméter állomás telepítése; Alsó sor: az adatgyűjtőket és a csurgalékvíz-gyűjtőket tároló akna; mérlegre állított csurgalékvíz-gyűjtők; és a saját meteorológiai állomással rendelkező, 'készre szerelt' liziméter állomás, Martonvásár, 2017.

Ha pedig az egyes liziméter oszlopokban mért nedvesséértékek bizonytalanságát/eltérését is figyelembe vesszük, akkor megállapíthatjuk, hogy a modellezett talajnedvesség-értékek minden esetben a mérések bizonytalansági határain belül mozogtak (3.16 ábra).



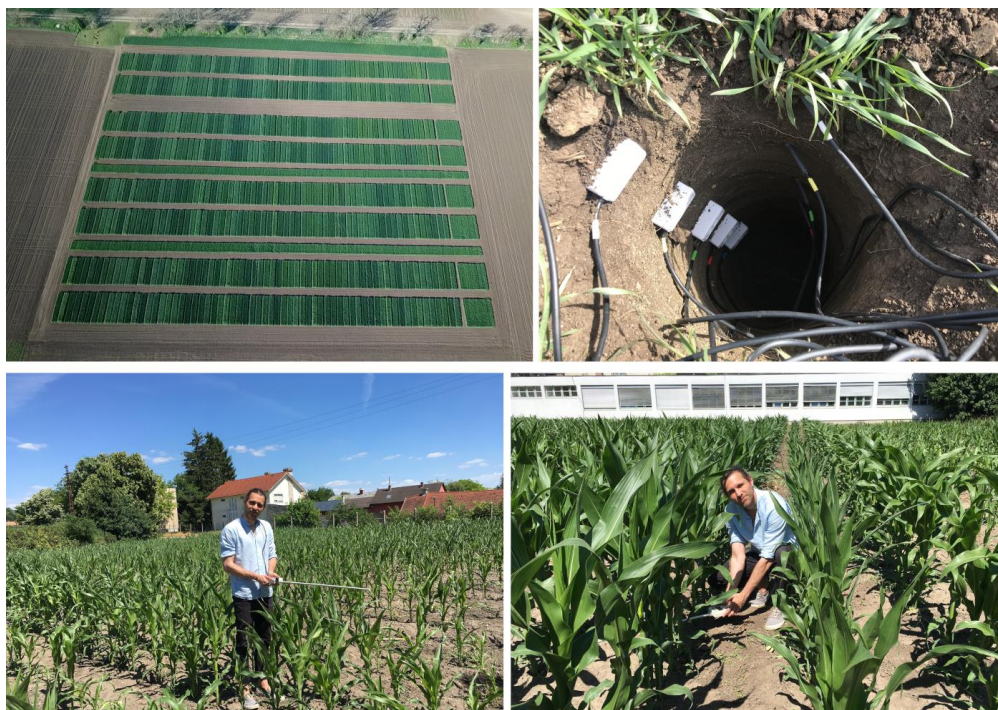
3.15 ábra: A talajprofil nedvességtartalmának és hőmérsékletének Hovmöller diagramjai, 6 liziméter oszlop átlaga alapján, Martonvásár, 2021.



3.16 ábra: Csupasz, növényborítás nélküli talaj felső 10 centiméteres rétegének mért és két modellváltozattal szimulált nedvességtartalma a liziméter állomás megfigyelései alapján (Martonvásár, 2020). A mért értékek körüli függőleges sávok 6 liziméter oszlopban mért adatok tartományát jelölik. A fejlesztésnek (v4.0 → v6.2) köszönhetően jelentősen javult a modell megbízhatósága. R^2 : determinisztikus koefficiens, MAE: átlagos abszolútértékes hiba, MSE: átlagos előjeles hiba (bias).

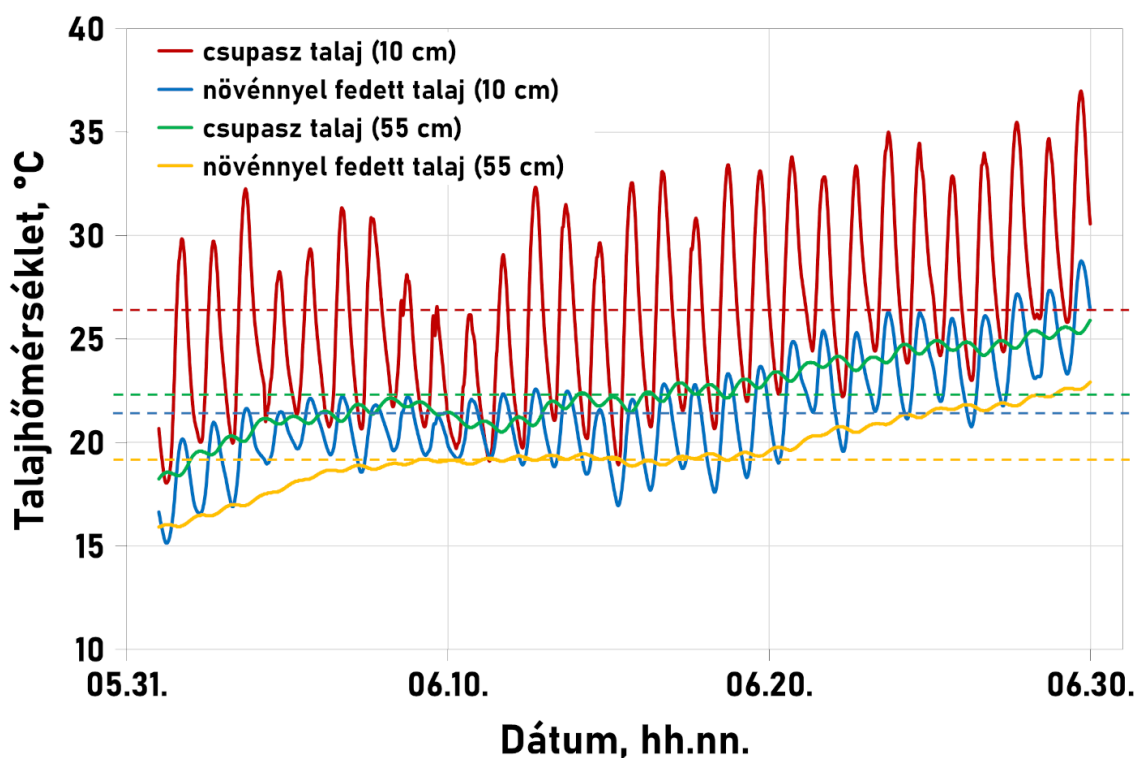
Kísérleti platform – Tartamkísérletek, továbbfejlesztve:

Az ATK Mezőgazdasági Intézet, Növénytermesztési Osztálya kezeli a hazánkban (még) zajló tartamkísérletek 30 százalékát: 15 hektáron, 14 tartamkísérlet, mintegy 2000 parcelláját, melyek közül a legrégebbiek már több mint 60 évesek. Ezek a kísérletek óriási értéket képviselnek, hiszen egyedülálló lehetőséget biztosítanak a klíma és a kísérletekben vizsgált tényezők (növényfajta/hibrid, műtrágya adag, szerves trágya adag, vetésforgó, vetési idő, tőszám, talajművelés) különböző kombinációinak hatásvizsgálatára. Ugyanakkor, ezekben a kísérletekben, az évek túlnyomó többségében, a virágzási időn és a termés mennyiségén túl más adat nem kerül rögzítésre. Azért, hogy a növénynövekedés dinamikájáról, annak fajta-, és kezelésfüggő eltéréseiről illetve a talajban történő folyamatokról is képet kapjunk, 2018-tól kezdődően több tartamkísérletbe talajnedvesség és talajhőmérséklet szenzorokat telepítettünk (5, 15, 25, 35 és 45 cm mélységbe), valamint a tenyészidőszakban kb. 10 napos rendszerességgel megmértük a levélfelület indexet (LAI) is (**3.17 ábra**). Az utóbbi méréshez LP-80 ceptométert használtunk, amely a növények roncsolása nélkül, a lomb fölött és alatt (a talaj felszínén) mért fotoszintetikusan aktív sugárzásértékek arányából határozza a LAI értékét. A talajnedvesség illetve talajhőmérséklet értékeit GS1 illetve RT-1 szenzorok (METER Group, Inc.) segítségével mérjük, egy órás időközönként.

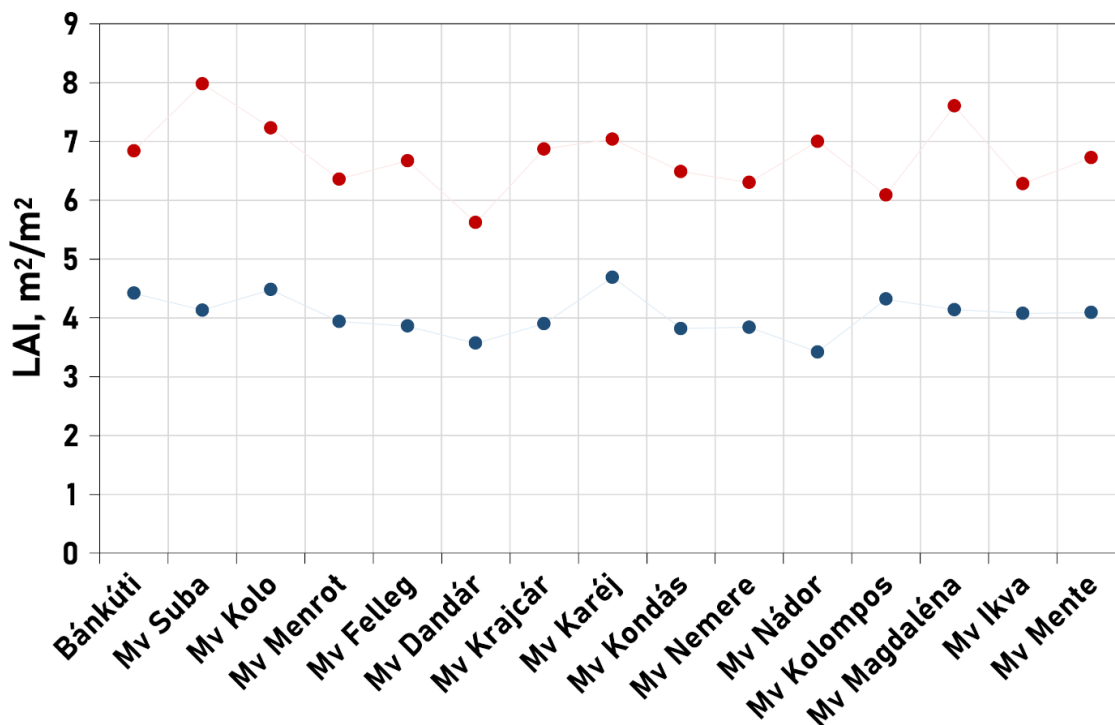


3.17 ábra: Felső sor: A martonvásári Koltay vetésforgó tartamkísérlet drónról fényképezve és az egyik parcellába telepített talajnedvesség (GS1) és talajhőmérséklet (RT-1) szenzorok; Alsó sor: levélfelület index meghatározása LP-80 ceptométerrel: egy mérés az állomány felett és még egy az állomány alatt.

A tartamkísérletekben alkalmazott telepített és kézi érzékelők olyan értékes, új adatokat szolgáltatnak, melyek segítségével továbbfejleszthető a kutatócsoportunk által készített talaj-növény modell (3.3.1 fejezet). Például, kidolgozhatóvá válik a növényborítás hőháztartás módosító hatásának algoritmus (3.18 ábra), és lehetővé válik fajtaspecifikus növényparaméterek megállapítása (3.19 ábra). Méréseink szerint, a csupasz és a növényvel borított feltalaj átlagos hőmérsékletkülönbsége akár 5 °C is lehet, de a napi menetek eltérései miatt a pillanatnyi hőmérséklet-különbség csúcstérteke a 10 °C-ot is meghaladhatja (3.18 ábra). A ceptométer segítségével kimutatható és számszerűsíthető a kezeléshatás és a fajták közötti különbség is. Különböző őszi búza fajták átlagos maximális levélfelület indexe (6,7) jó nitrogénellátottság mellett, akár több mint 60%-kal meghaladhatja a gyengén ellátott fajták maximális LAI (4,0) értékét (3.19 ábra). Nitrogénellátottságtól függetlenül, a fajták maximális LAI értékei között kb. 40%-os legnagyobb eltérést (8,0 vö. 5,6 illetve 4,7 vö. 3,4) tapasztaltunk (3.19 ábra).



3.18 ábra: Talajhőmérséklet az állományban (növényvel fedett talaj) és az állományon kívül (csupasz talaj) a martonvásári Koltay vetésforgó tartamkísérletben (őszi búza, 2022 június). A vízszintes szaggatott vonalak a mért értékek átlagait jelölik.

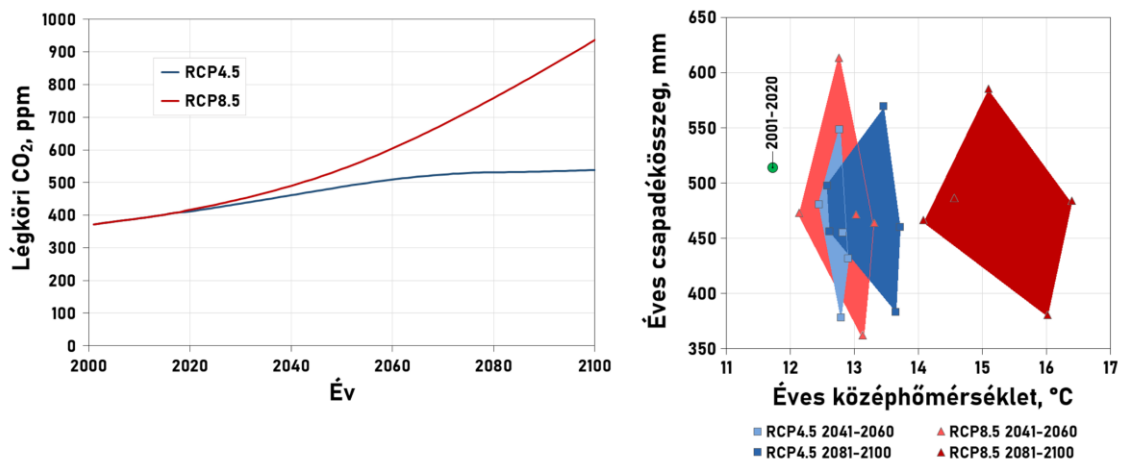


3.19 ábra: Levélfelület index (LAI) értékek eltérő őszi búza fajták és eltérő nitrogén ellátottság esetében a martonvásári Koltay vetésforgó tartamkísérletben, 2022.05.03. Kékkel: 0 kgN/ha/év; Pirossal: 200 kgN/ha/év kezelés.

A kísérleti platform eredményeit elsősorban az AgroMo keretrendszer (3.3.1 fejezet) modelljének fejlesztésére és kalibrálására használjuk fel azzal a céllal, hogy a modell egyre pontosabban írja le az agro-ökoszisztéma folyamatait, beleértve az emberi tevékenység hatásait is. A kísérleti rendszer, 'Szabadföldi és Virtuális Agrár-Környezetszimulációs Platform' névvel NKFIH 'Emerging Research Infrastructure' minősítést szerzett 2021-ben.

(3) Korszerű klímaprojekciók készítése

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz) munkatársainak bevonásával korszerű éghajlati projekciókat készítettünk, amelyek segítségével megbízhatóbb becslések készíthetők a mezőgazdasági termelés jövőbeli alakulására vonatkozóan. Az RCP4.5 és RCP8.5 széndioxid kibocsátási forgatókönyvek (IPCC, 2013) alapján, 5-5, azaz összesen 10 klímaprojekciót készítettünk, amelyek 10 km-es felbontásban (Magyarországot 1104 cellával lefedve) napi léptékű, hibakorrigált meteorológiai adatokat (globálisugárzás, minimális és maximális léghőmérséklet, csapadék, és párányomás hiány) tartalmaznak a 2020-2100 időszakra (3.20 ábra).



3.20 ábra: A légköri széndioxid koncentráció, valamint az éves középhőmérséklet, illetve az éves csapadékösszeg alakulása az AgroMo rendszerben elérhető tíz (5 RCP4.5 és 5 RCP8.5 alapú) klímaprojekciókra vonatkozóan, a referencia időszakhoz (2001-2020) képest.

(4) Modellezési keretrendszer fejlesztése (3.3.1 fejezet)

Rugalmasan adaptálható (moduláris, nyílt forráskódú) Integrált Modellezési Keretrendszert (AgroMo) készítettünk, amely a magyar mezőgazdasági rendszer működését szimulálja térben explicit módon, több lehetséges léptékben: parcella, farm, regionális és nemzetgazdasági szinten is. A gyűjtött adatok segítségével több jelentős fejlesztést hajtottunk végre a beágyazott szimulációs modellen és elvégeztünk annak kalibrálását, így minden eddiginél pontosabb és átfogóbb módon számszerűsíthetjük a klímaváltozás agro-ökoszisztémára gyakorolt várható hatásait. Az AgroMo számára felhasználóbarát grafikus kezelőfelületet készítettünk, amely megkönnyíti a modell használatát és a szimulációs eredmények értelmezését.

(5) Alkalmazkodási stratégiák készítése (3.3.4 fejezet)

A várható hatások ismeretében, az AgroMo modellezési keretrendszer segítségével, olyan alkalmazkodási stratégiákat dolgoztunk ki az agrárszektor szereplői számára, melyek segítségével lényegesen csökkenthetők a klímaváltozás negatív hatásai és a mezőgazdasági eredetű környezeti károk kockázata. Az AgroMo segítségével gyakorlatilag bárki számára elérhetővé válik a rendszerbe foglalt szaktudás, amely szabadon felhasználható oktatási, szaktanácsadási és döntéstámogatási célokra. Az AgroMo rendszer több szinten is elősegíti a digitális mezőgazdaság kiterjesztést, valamint a fenntartható, környezet- és klímatudatos erőforrás-gazdálkodás megvalósítását.

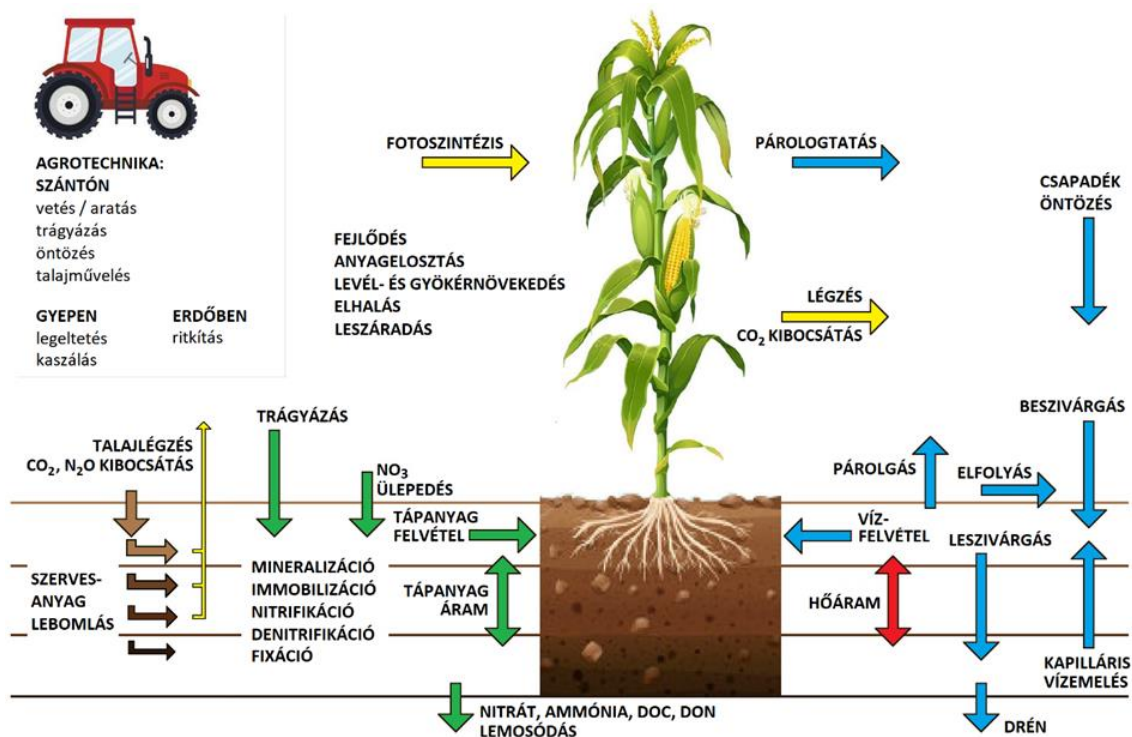
3.3.1 Az AgroMo felépítése és működése

Az AgroMo rendszer központi eleme a Biome-BGCMuSo v6.2 (*Hidy et al., 2022*) szimulációs ökoszisztéma modell, amely a 4M növénytermesztési modell (*Fodor et al., 2014*) és a Biome-BGCMuSo v4.0 biogeokémiai modell (*Hidy et al., 2016*) egyesítésével jött létre, ötvözve a két modell előnyös tulajdonságait.

A 4M modell a CERES és CROPGRO modelleket magába foglaló DSSAT modellcsomag (*Tsuji et al., 1994*) filozófiáját követő alkalmazás, amely a két eredeti modell algoritmusainak Delphi programozási nyelvben történő újraírásával keletkezett. A szántóföldi kultúrák szimulációjára kidolgozott DSSAT rendszert Kovács Géza professzor honosította meg Magyarországon az 1980-as évek végén, és az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetén kívül, fokozatosan több egyetemen is használni kezdték: Debreceni Egyetem (*Megyes, 2001*); Szent István Egyetem (*Harnos, 2008*); Széchenyi István Egyetem (*Nyéki et al., 2013*). A DSSAT program használata nagyon nehézkes volt, elsősorban DOS-os kezelőfelülete és bonyolult bemenő adatszerkezete miatt. Programkódja FORTRANban készült, amelyben saját fejlesztési ötleteinket nem tudtuk implementálni. Ezért döntöttünk 1999 végén az újraprogramozás mellett. A 4M (Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye) első változata 2001-ben készült el. A folyamatosan fejlődő alkalmazást oktatásban, kutatásban és számos agrárszektorra érintő probléma döntés-előkészítési folyamatában használtuk (*Fodor and Kovács, 2005; Fodor, 2006; Fodor et al., 2011; Máthé-Gáspár and Fodor, 2012; Fodor et al., 2014; Koós et al., 2021*).

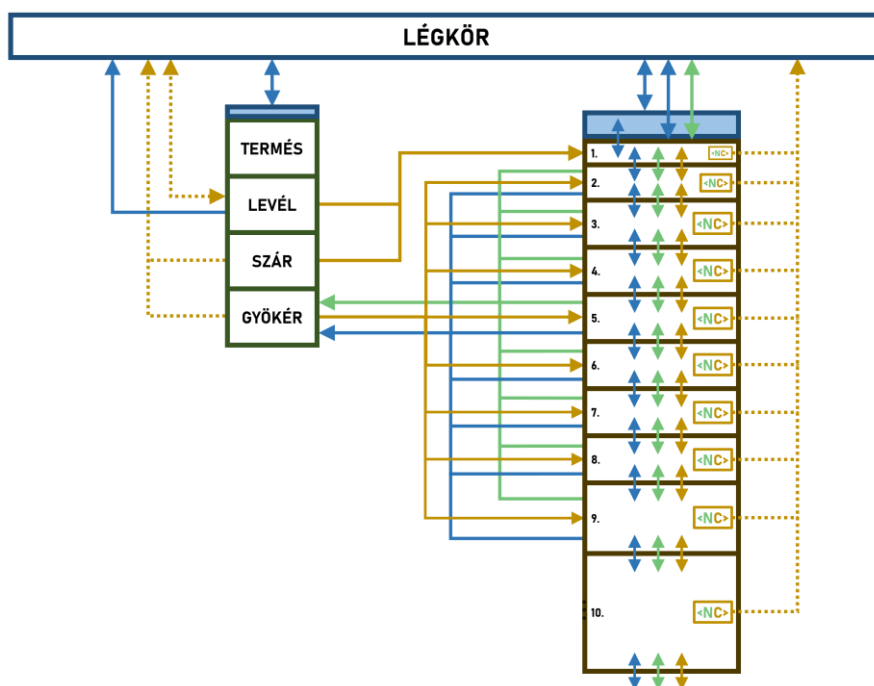
Az eredetileg erdők szimulációjára kidolgozott FOREST-BGC biogeokémiai modellt (*Running and Coughlan, 1988*) a Montanai Egyetem kutatói jelentősen továbbfejlesztették, és Pascal-ról C programozási nyelvre áttérve, létrehozták a BIOME-BGC modellt (*Running and Hunt, 1993*), amely valamennyi természetes, szárazföldi ökoszisztéma víz-, szén-, és nitrogénforgalmának szimulációjára képes volt. Két évtizednyi intenzív használat és sok módosítás illetve fejlesztés után, melyekről *Hidy et al. (2016)* átfogó szemlét írt, elsősorban az Eötvös Loránd Tudományegyetem munkatársainak köszönhetően derült fény a modell számos módszertani gyengeségére. Barcza Zoltán vezetésével, a C programozási nyelvet megtartva, számos, a modell szerkezetét is érintő fejlesztést hajtottak végre, melyekhez jónéhány a 4M modellben már sikeresen alkalmazott modellezési eljárást felhasználtak, jelentős mértékben javítva a BIOME-BGC hatékonyságát (*Hidy et al., 2012*). A BIOME-BGC ezen változata a Biome-BGCMuSo nevet kapta. A MuSo (Multi-layer Soil) utótag arra utal, hogy ez a verzió már több alrétegre bontva kezeli a talaj tározóit és szimulálja a tározók közötti anyagforgalmat. A 4M modell megfelelő moduljainak C programozási nyelvbe történő átültetésével és a

kódrészletek Biome-BGCMuSo kódba történő illesztésével, a két modell Biome-BGCMuSo v4.0 néven egyesült 2016-ban (Hidy et al., 2016). A Biome-BGCMuSo folyamat alapú, szimulációs, talaj-növény modell, amely az agro-ökoszisztéma legfontosabb tározóinak és folyamatainak matematikai, illetve számítógépes reprezentációja (3.21 ábra): eljárásokba illetve modulokba szervezett közönséges vagy parciális differenciálegyenletek és empirikus egyenletek rendszeréből áll, ahol az egyes eljárások kimenetei más eljárások bemeneteként szolgálhatnak, és a modell egésze képes leírni a rendszer kulcsfontosságú jellemzőinek időbeli változását. A Biome-BGCMuSo modell az alábbi folyamatok és azok kölcsönhatásainak szimulációjára képes, bármely földhasználati típuson (szántó, gyep erdő), napi időléptékben (3.21 ábra).

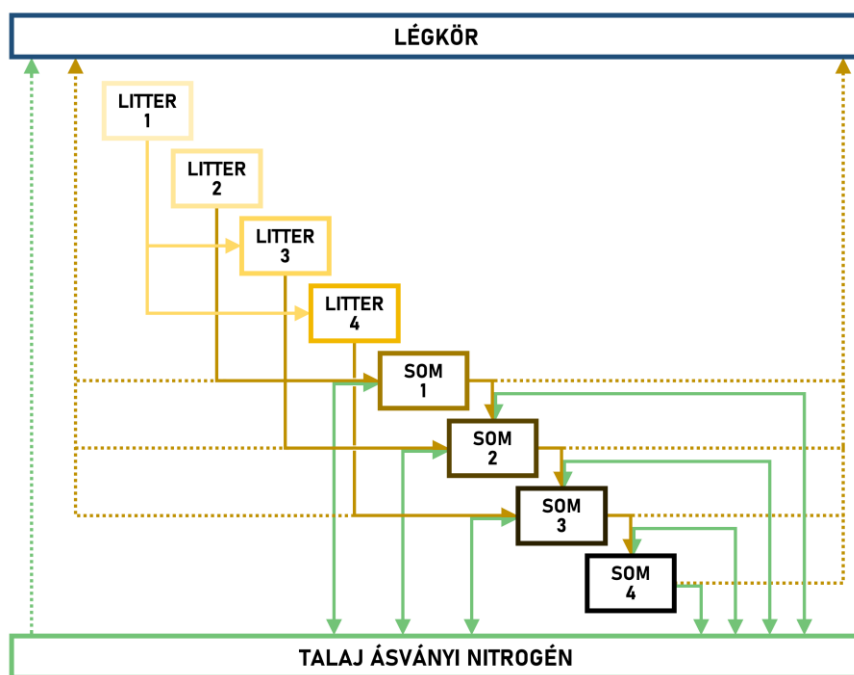


3.21 ábra: Biome-BGCMuSo v6.2 szimulációs talaj-növény modellben szereplő legfontosabb folyamatok.

A modell által nyomon követett folyamatok szimulációja 1 m²-es, (talaj- és növénytakaró szempontjából) homogénnek tekintett területegységre vonatkozik, és a modellben meghatározott (legrögzített) tározók közötti anyagáram intenzitásának [g/nap] meghatározását, illetve néhány tározó esetében, a tározó tömegváltozásának megfelelő egyéb jellemzők (gyökerezési mélység, levélfelület, stb.) változásának meghatározását jelenti. A modell két fő modulja: a talajban (3.22-23 ábra) és a növényben lejátszódó vízmozgási, illetve szén-, és nitrogéntranszport valamint szén-, és nitrogén-átalakulási folyamatokat írja le.



3.22 ábra: Biome-BGCMuSo v6.2 modell felépítése: főbb tározói és folyamatai. A kék, zöld, illetve barna nyilak a víz, a nitrogén, illetve a szénáramokat jelölik. A 10 talajrétegen belül, a <NC> téglalapok az egyes rétegekben lejátszódó nitrogén- és szénforgalmi folyamatokat (3.23 ábra) jelölik.



3.23 ábra: Biome-BGCMuSo v6.2 modellben (talajrétegenként külön-külön) szimulált nitrogén- és szénforgalmi folyamatok. LITTER: növényi maradvány, SOM: talaj szervesanyag. Az 1-4 tározók az egyre lassabban bomló formákat, a zöld, illetve barna nyilak a nitrogén, illetve a szénáramokat, a szaggatott vonalak a N₂O illetve CO₂ áramokat jelölik. Az egyes folyamatok intenzitása a nedvesség és hőmérséklet függvénye, melyeket a modell minden rétegre minden napra vonatkozóan kiszámít.

A Biome-BGCMuSo v6.2 modell lehetőséget biztosít számos ellátó és szabályozó ökoszisztéma szolgáltatás számszerű meghatározására, klímaprojekciókkal való összekapcsolása révén pedig ezen ökoszisztéma szolgáltatások jövőbeli alakulásának előrejelzésére.

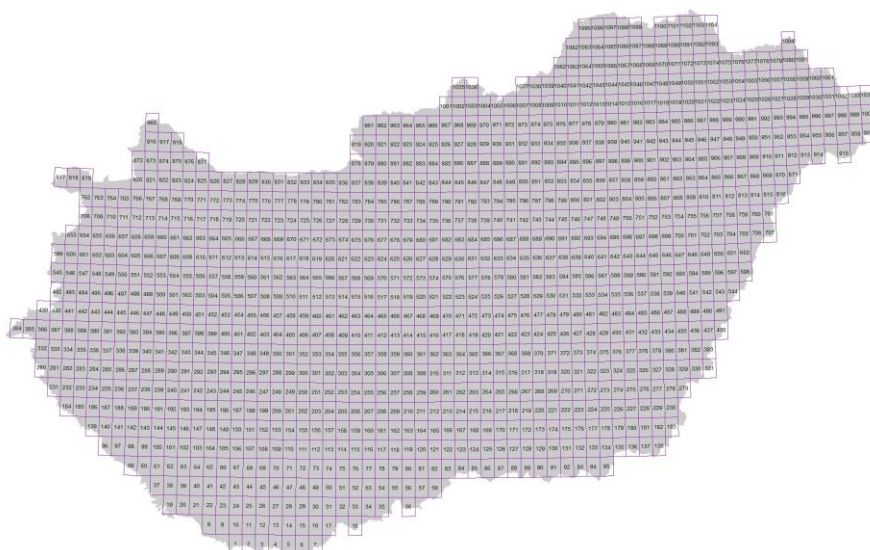
A Biome-BGCMuSo modell rengeteg bemenő adatot igényel, és rengeteg kimenő adatot állít elő, amellyel részletes leírását adja a talaj-növény rendszer változásainak, de csak számok formájában és csak egy homogénnek tekintett területegységre vonatkozóan. Az AgroMo modellezési keretrendszer célja, hogy megkönnyítse a Biome-BGCMuSo modell fejlesztését és használatát illetve kibővítse annak felhasználási körét elsősorban azért, hogy zökkenőmentes adatáramlást biztosít a modell és a felhasználó között. Az AgroMo környezet teszi lehetővé a modell több szálon történő, párhuzamos futtatását maximálisan kihasználva a számítógép számítási kapacitását, lehetőséget biztosítva nagy kiterjedésű, homogénnek már nem tekinthető területek szimulációjára. Az AgroMo környezet teszi lehetővé, hogy a modell bármilyen földhasználat-váltás szimulációjára is képes legyen. Az AgroMo több adatbázissal is összekapcsolja a modellt: megkönnyíti a modell-paraméterek kalibrációját, bemenő adatokat biztosít a modell számára és lehetővé teszi a szimulációs eredmények változatos formában történő megjelenítését és elemzését. Az új funkciókat az RBBGCMuso fejlesztő környezetben hozzuk létre és csak körültekintő tesztelés után véglegesítjük az AgroMo rendszerben. Név szerint szeretném kiemelni Barcza Zoltánt, Hidy Dórát és Hollós Rolandot, aki velem együtt messze a legtöbbet tették azért, hogy Biome-BGCMuSo v6.2 modell illetve az AgroMo modellezési keretrendszer elkészülhessen. Az AgroMo kialakítását és működését Hollós Roland *Agrárkörnyezet-gazdálkodási döntéstámogató rendszer kialakítása* című PhD dolgozat tárgyalja teljes részletességében.

AgroMo Adatbázisok:

Az AgroMo rendszerben helyet kapott a:

(1) FORESEE klíma adatbázis (*Kern et al., 2022; Dobor et al., 2014*), amely egy 0,1 fokos (kb. 10 km) felbontású rács valamennyi cellájára (**3.24 ábra**), az 1951-2100 időszak minden napjára, az alábbi meteorológiai adatokat tartalmazza: globálsugárzás, minimális és maximális léghőmérséklet, csapadék, és nappali párányomás hiány. Az 1951-2022 időszakra vonatkozóan az adatok forrása az OMSz megfigyelő hálózata. A tényadatokat térben interpolálva állították elő a cellák középpontjaira vonatkozó adatsorokat, a MISH-MASH módszer segítségével (*Szentimrey et al., 2007*). A 2023-2100 időszakra vonatkozóan összesen 28 hibakorrigált és szakadásmentesített projekció adatsorai elérhetők, melyeket 2

forgatókönyv (RCP4.5 és RCP8.5) alapján 14 klímamodell (GCM-RCM páros)² segítségével állítottak elő. A 28 projekcióból 10-et a korábbiakban említett GINOP projekt keretében állítottunk elő.



3.24 ábra: Az AgroMo rács: az AgroMo rendszer talaj és meteorológiai adatainak közös rácsa, amely 1104 cellával fedi az országot, és minden cellára vonatkozóan tartalmazza a beágyazott Biome-BGCMuSo modell futtatásához szükséges adatokat.

(2) DOSoReMI talaj adatbázis (Pásztor *et al.*, 2020), amely 100 méteres felbontásban, egy egyenközű rács valamennyi cellájára tartalmazza a 0-30, 30-60, 60-100 és 100-200 cm mélyen elhelyezkedő talajrétegek következő adatait: szervesanyag tartalom, térfogattömeg, pH, mésztartalom, homok/vályog/agyag frakció, maximális vízkapacitás, szabadföldi vízkapacitás és hervadásponti nedvességtartalom. Mivel egy-egy országos szimuláció (a modell lefuttatása valamennyi 100×100 méteres cellára) végrehajtása még a leggyorsabb számítógépünk segítségével is hetekig tartott volna, a klíma adatbázis felbontásához igazodva, elkészítettük a talaj adatbázis 10 kilométeres felbontású változatát (3.25 ábra). Minden 10 km-es cellát a bennük található legfeljebb³ 10.000 db 1 hektáros (al)cella közül azzal reprezentáltunk, amely jellemzői legjobban közelítették az (al)cellák átlagos jellemzőit. Először minden cella mind a négy talajrétegre kiszámítottuk az (al)cellák az átlagos térfogattömegét, szervesanyag-, homok-, iszap- és agyagtartalmát. Majd megkerestük és kiválasztottuk azt az (al)cellát, amelyre az alábbi összefüggés értéke (wD - az átlagoktól való súlyozott, kumulált eltérés) a legkisebbnek adódott. Minden

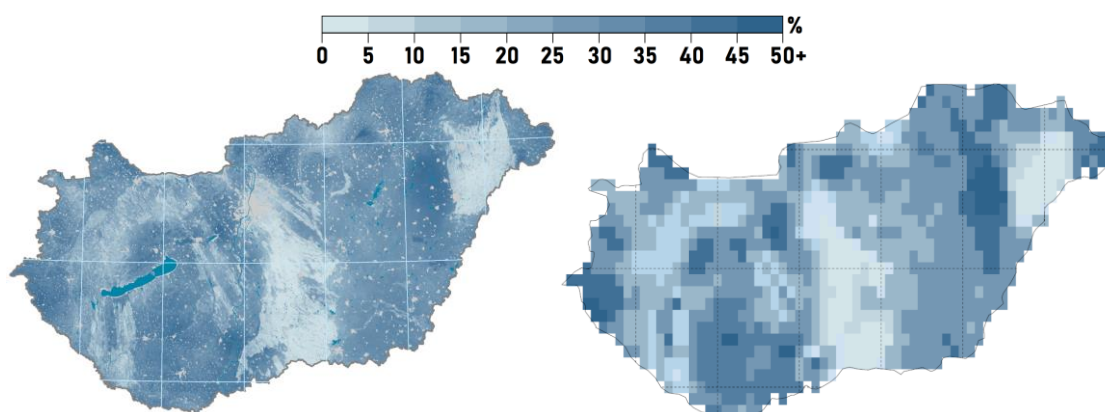
² GCM – General Circulation Model (Általános Cirkulációs Modell); RCM – Regional Climate Model (Regionális Klíma Modell)

³ Az országhatárra eső 10 km-es cellákban (pl. 1. cella, 3.23 ábra) kevesebb, mint 10.000 db 1 hektáros cella helyezkedik el.

10 km-es cella valamennyi talajparaméterének értékét a bennük található, kiválasztott 100 m-es (al)cella megfelelő értékeivel tettünk egyenlővé.

$$E.3.2 \quad wD = \frac{\sum_{k=1}^4 w_k \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{10000} \frac{P_{i,j,k} - \bar{P}_{j,k}}{\bar{P}_{j,k}}}{11}$$

ahol $P_{i,j,k}$ az i . (al)cella k . rétegének j . paraméterét jelöli. $\bar{P}_{j,k}$ jelöli a k . réteg j . paraméterének (al)cellákra vonatkozó átlagát, és w_k jelöli a k . rétegre vonatkozó súlytényezőt (a mélyebben található rétegeket, fentről lefelé $w_k = 5, 3, 2$, illetve 1 súllyal vettük figyelembe). A paraméterek esetében $j = 1, 2, 3, 4$, illetve 5 indexszel a térfogattömeget, szervesanyag-, homok-, iszap-, illetve agyagtartalmat jelöltük.



3.25 ábra: Az AgroMo talaj adatbázisának 100 méteres és 10 kilométeres felbontású változatai a feltalaj (0-30 cm) vályogtartalmára vonatkozóan.

(3) a Központi Statisztikai Hivatal által közölt megyei (NUTS-3) vetésterület és termésátlagok az 1971-2020 időszakra, őszi búza, kukorica, őszi árpa, napraforgó, repce, zab, rozs, cukorrépa, burgonya, borsó és bab növényekre vonatkozóan.

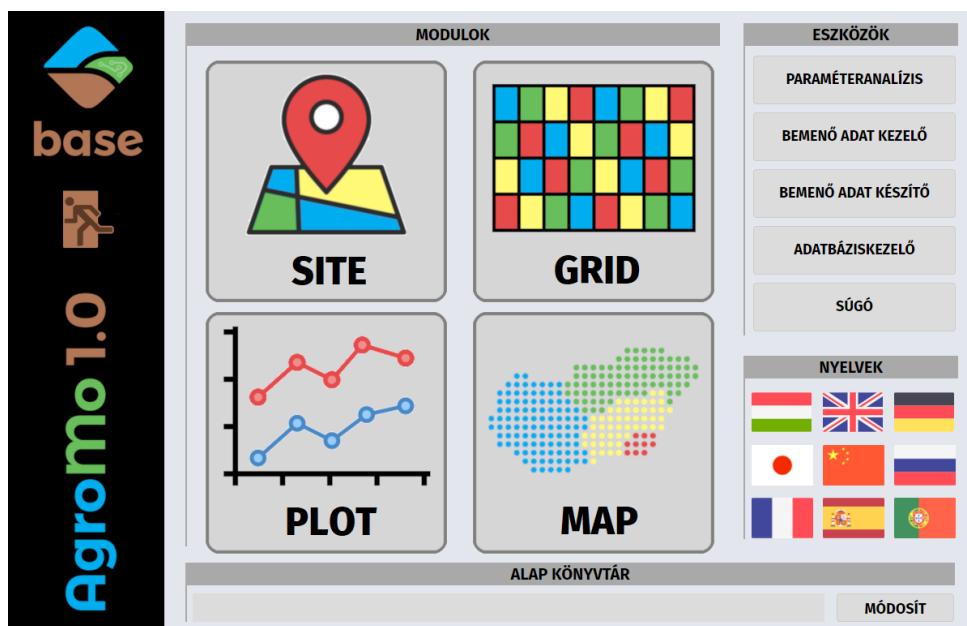
(4) a CORINE (CLC 2018) földhasználat-típus adatbázis, amely az AgroMo adatrács (3.24 ábra) minden cellájára megadja a szántó-, gyepl- és erdőterületek cellán belüli részarányát.

(5) az AgroMo kísérleti platform adatai, köztük az ATK Mezőgazdasági Intézetében zajló tartamkísérletek agrotechnikai, virágzási idő és termés adatai az 1981-2021 időszakra.

A kapcsolt adatbázisok segítségével az AgroMo rendszer lehetővé teszi a Biome-BGCMuSo modell növényi paramétereinek kalibrálással történő meghatározását illetve modell futtatását Magyarország tetszőleges pontjára vonatkozóan.

AgroMo Grafikus kezelőfelület:

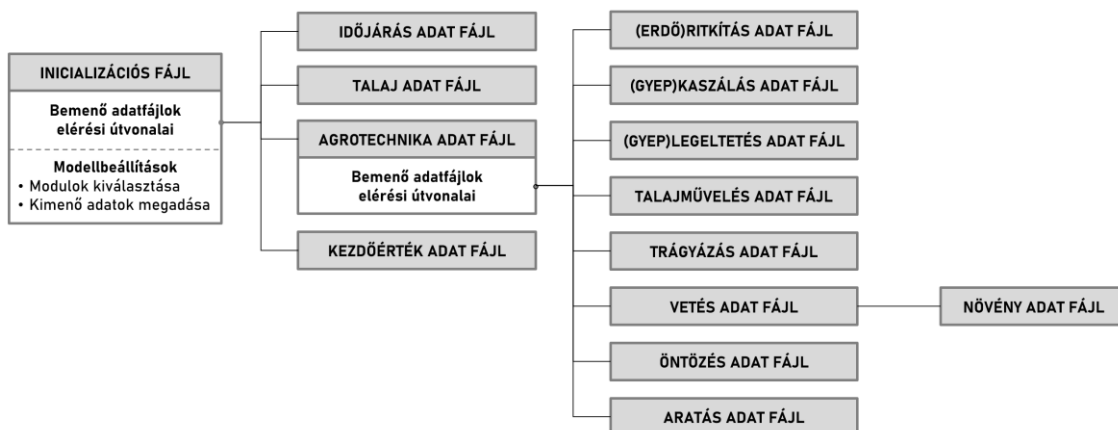
A modellezési keretrendszer egy grafikus felhasználói felülettel (GUI) rendelkezik, amely könnyű és felhasználóbarát elérést biztosít az AgroMo rendszer funkcióihoz és adataihoz. Az alkalmazás fejlesztéshez R programozási nyelvet, illetve az R-Shiny csomagot valamint JavaScript programozási nyelvet használtunk. Az alkalmazás egy hordozható Chromium alapú böngészőben nyílik meg, ami biztosítja a platform-független használatot. Az alkalmazása elindítása után a felhasználó az AgroMo Base nyitófelülettel találkozik (3.26 ábra), ahol kiválaszthatja, hogy a felület feliratai milyen nyelven jelenjenek meg. Jelenleg magyar, angol, német és kínai változatok elérhetők.



3.26 ábra: Az AgroMo grafikus felhasználói felületének nyitó oldala.

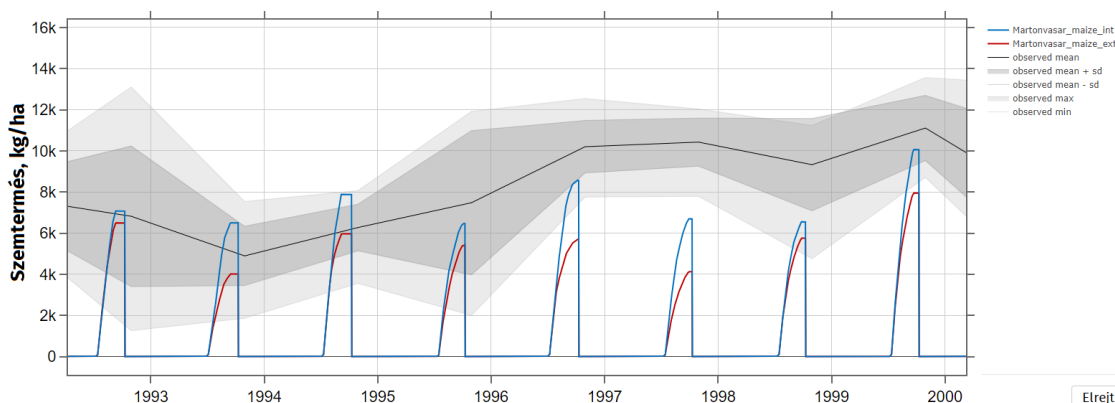
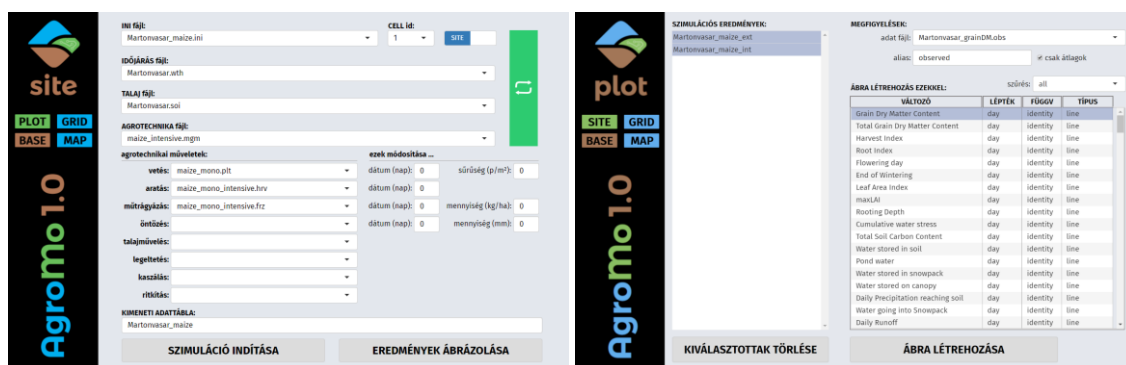
A felhasználói felület kezeléséről az AgroMo GitHub oldalán közzelünk részletes leírást: <https://github.com/hollorol/AgroMo/blob/master/README.md>

Az AgroMo keretrendszer lehetőséget biztosít a modell lokális, parcella léptékű futtatására és a szimulációs eredmények idősoros grafikonokon történő ábrázolására. Ebben az esetben a modell bemenő adatait néhány adatfájlban kell megadni (3.27. ábra), melyek közül a legfontosabb az inicializációs fájl, amely minden további fájlhivatkozást és a modellbeállításokat határozza meg, és amelyet a kezelő felület legelső legördülő menüjéből választhat ki a felhasználó (3.28 ábra). Ez a legördülő menü azokat az előre elkészített fájlokat mutatja, amelyek az AgroMo rendszer megadott mappájában találhatóak.



3.27 ábra: Az AgroMo rendszerbe ágyazott Biome-BGCMuSo modell egy pontra (homogén területegységre) vonatkozó szimulációját meghatározó fájlok rendszere.

A szimuláció eredményei egy adatbázis adattáblájába kerülne. Grafikon(ok) legfeljebb öt adattábla és azokon belül egy (vagy több) változó kiválasztása után hozható(k) létre, mely(ek)re ha léteznek a szimulációhoz tartozó megfigyelési adatok, akkor azok is felhelyezhetők (3.28 ábra).



3.28 ábra: Egy pontra (homogénnek tekintett területegységre) végzett szimuláció beállítása (bal, fent) és az eredmények megjelenítése az AgroMo rendszer segítségével. A fekete vonal, és a szürke sávok a több ismétlésben mért eredmények átlagát, szórását illetve legkisebb és legnagyobb értékét jelenítik meg.

Egy homogénnek tekintett terület egység (szimulációs értelemben egy pont) adott időszakára vonatkozó szimulációt egy inicializációs fájl segítségével definiálhatunk az AgroMo rendszerben. Létrehoztunk egy új, ún. forgatókönyv fájl típust, amelyben tetszőleges számú pont tetszőleges számú, de kötelezően egymást követő, időszakára adhatunk meg inicializációs fájlokat. A forgatókönyv fájl tulajdonképpen egy lista, amelynek minden sorában egy inicializációs fájl (név), egy sorszám és két évszám található. A sorszám azt adja meg, hogy az adott helyre vonatkozó szimuláció-sorozat hányadik tagját határozza meg az adott inicializációs fájl, az évszámok pedig ezen, konkrét szimuláció kezdetének és végének dátumát adják meg. Ezzel a funkcióval tetszőleges (inhomogén) terület lefedhető homogénnek tekintett terület egységekből (jellemzően téglalap alakú cellák) felépített ráccsal, ahol az egyes cellák számára megadott inicializációs fájlok sorozata akár igen összetett (jelentős agrotechnikai változás vagy földhasználat-váltás) művelés-történetet is képes leírni. Egyetlen forgatókönyv fájl segítségével egy korlátlan méretű terület tetszőleges térbeli felbontású⁴ szimulációja elvégezhető, elemi, pontszerű szimulációk összegzésével, melyek során a vízszintes irányú anyag- és energiaáramokat figyelmen kívül hagyjuk. Ezen térbeli szimulációkat az AgroMo GRID moduljával hajthatjuk végre, amely arra is képes, hogy ha bizonyos bemenő adatokra több alternatív forrás is rendelkezésre áll, pl. eltérő klímaprojekciókból származó meteorológiai adatok a 2023-2100 időszakra, akkor az adott forgatókönyvet valamennyi opcionális adatforrás felhasználásával végrehajtja. Az AgroMo rendszerben olyan forgatókönyveket készítettünk, amelyek Magyarország területét egy 10 km-es felbontású (**3.24 ábra**) ráccsal fedi le. Valamennyi cellára elkészítettük a forgatókönyvek végrehajtásához szükséges valamennyi bemenő adatfájlt. Illetve olyan megjelenítő modult fejlesztettünk (AgroMo MAP), amely a forgatókönyvek szimulációs eredményeit térképek formájában képes megjeleníteni. Az AgroMo rendszerben három olyan fejlesztés is helyet kapott, amelyek világviszonylatban is újdonságnak számítanak az Integrált Modellezési Keretrendszerekben.

(1) A talajvíz hatásának modellezése:

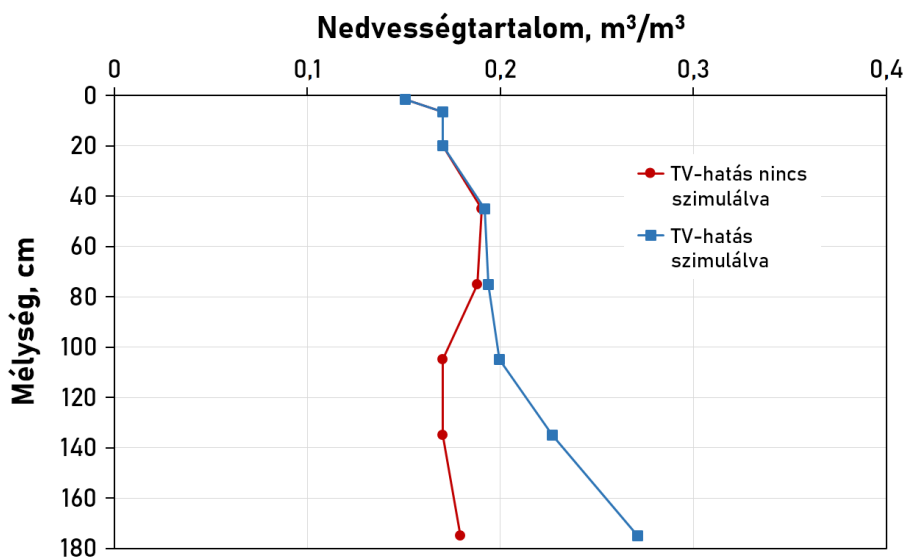
A legtöbb talaj-növény modell úgynevezett kaszkád (al)modellt (**ld. 20. oldal**) használ a talaj nedvességforgalmának leírására. Ez a módszer azonban csak a gravitáció hatására lefelé áramló víz mozgását képes leírni, a talajvízből a kapillárisokon felfelé történő nedvesség mozgását nem. Egyszerű talajfizikai megfontolásokra alapozva, a talajrétegek szabadföldi vízkapacitását (VK_{sz}) a réteg talajvíz-tükörtől vett távolságának (d_{TVT}) függvényében változtatva olyan modellt

⁴ A szimulációk térbeli felbontását a bemenő adatok felbontása határozza meg.

dolgoztam ki, amely valóságghűen képes leírni a kapilláris vízemelés folyamatát, a talajvíz közelében lévő talajrétegek nedvességtartalmának növekedését. A modell lényege, hogy a talaj tényleges szabadföldi vízkapacitása (VK_{sz}^*) a talajvíz közelében megnövekszik (E.3.3) és a talaj nedvességtartalma erre a megnövekedett értékre áll be, amelyhez szükséges vízmennyiség a talajvízből származik. A felfelé áramlás sebessége, illetve a VK_{sz}^* értékre történő feltöltődés ideje a talaj mechanikai összetételétől, végső soron pedig a talaj víz-vezetőképességétől függ.

$$E.3.3 \quad VK_{sz}^* = \begin{cases} VK_{sz} & d_{TVT} > 200 \text{ cm} \\ VK_{sz} + (VK_{max} - VK_{sz}) \cdot \frac{200 - d_{TVT}}{200} & 0 < d_{TVT} < 200 \text{ cm} \\ VK_{max} & d_{TVT} \leq 0 \text{ cm} \end{cases}$$

Az (al)modell előnye, hogy nem igényel új bemenő paramétereket. A működéséhez természetesen szükséges megadni a talajvíz-mélység napi értékeit a szimuláció teljes idejére, melyet a meteorológiai adatokhoz hasonlóan, mint peremfeltétel kell biztosítani a modell számára. A 3.29 ábrán a talajnedvesség függőleges eloszlását mutatom be az új almodell, valamint annak kifejlesztését megelőző modellváltozat számításai alapján.



3.29 ábra: Talaj nedvességtartalmának függőleges eloszlása 2 méter mélyen található talajvíz hatásának figyelmen kívül hagyásával, a régi modellváltozattal szimulálva (piros), illetve a talajvíz hatásának figyelembe vételével, az új modellváltozattal szimulálva (kék).

(2) AgroMo Modellkalibrációs modul:

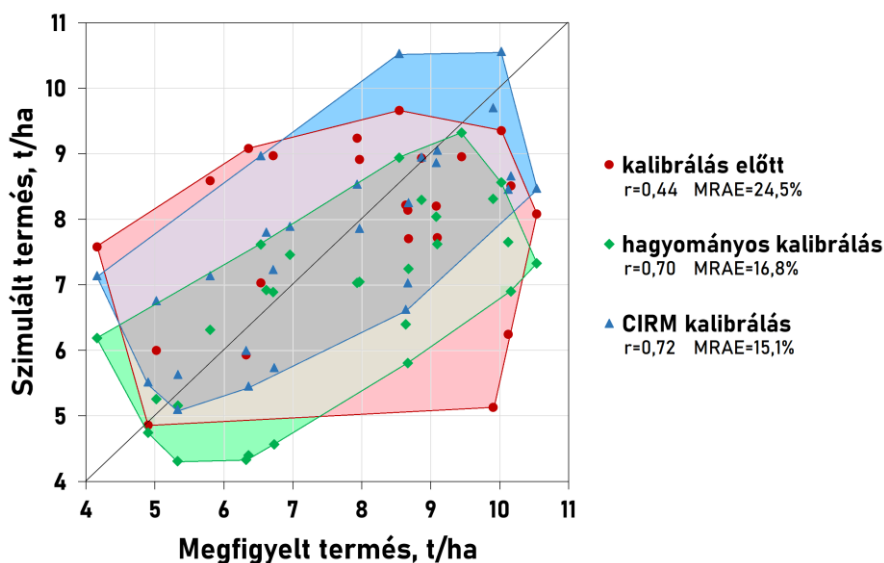
Módszertanát tekintve a folyamat alapú talaj-növény modellek kalibrációja (2.3.3 fejezet) nem bonyolult, viszont annál nagyobb számítási igényű feladat. Ennek során néhány kiválasztott paraméter értékét, előre rögzített tartományon belül,

véletlenszerűen addig változtatják, amíg a modell elfogadható eredményt nem nyújt néhány (de a gyakorlatban legtöbbször csak egy) változóra vonatkozóan, a változó megfigyelt értékeivel való összehasonlításban. A módszer egyik gyenge pontja, hogy ha túl szélesre állítjuk be a tartományokat, ahol a paraméterek lehetséges értékeit keressük, akkor még nagyszámú próbálgatással sem kaphatunk elfogadható eredményt, hiszen egy 'tűt keresünk a szénakazalban' azaz optimális paraméterkombinációk egy szűk halmazát egy sokkal-sokkal nagyobb paraméterterben, amely mérete a kalibrálandó paraméterek számával exponenciálisan növekszik. A másik, még kritikusabb módszertani gyengeség, hogy elfordulhat olyan végeredmény, hogy (bekalibrált) paraméterekkel a modell irreális kimenő adatokat állít elő olyan változókra vonatkozóan, amelyeket nem vontunk be a kalibrációs folyamatba. Például a bekalibrált modell elfogadható pontossággal szimulálja a kukoricatermést egy magyarországi területre vonatkozóan, azonban a levélfelület index maximumának átlaga a modellfutások alapján 6 fölött van, ami hazai megfigyelések között csak elvétve fordul elő. Ez a jelenség ('good result from wrong reason' – 'jó eredmény rossz okból') különösen gyakran fordul elő ún. adatszegény környezetben, amikor viszonylag sok paraméter értékét szeretnénk beállítani úgy, hogy viszonylag kevés adat áll rendelkezésre a kalibrációhoz. Az általunk kifejlesztett eljárás (Hollós *et al.*, 2022) mindkét módszertani hiányosság elhárítására megoldást kínál. Az ún. 'feltételes tartománycsökkentő módszer' (CIRM, Conditional Interval Reduction Method) először is olyan feltételek megfogalmazását kéri a felhasználótól, amelyek nem feltétlenül kötődnek az aktuális kalibrációs feladathoz, de amelyek teljesülését joggal várhatjuk el a modelleredmények tekintetében. Például egy 30 éves kukorica monokultúra szimuláció (ld. martonvásári vetési idő tartamkísérlet) esetében kiköthető, hogy csak akkor minősüljön elfogadhatónak a szimulációs eredmény, ha teljesülnek az alábbi feltételek:

- i. A harvest index átlaga 0,45 és 0,55 közé esik
- ii. A levélfelület index maximumának átlaga 3,0 és 4,5 közé esik
- iii. A gyökerezési mélység maximumának átlaga 140 és 180 cm közé esik
- iv. A virágzás kezdődátumának átlaga június 30 és július 10 közé esik

Ezek a feltételek a szakirodalmi adatok és/vagy saját megfigyelések és/vagy egyéb szakértői becslések alapján fogalmazhatók meg a modell tetszőleges kimenetére vonatkozóan. Másodszer a CIRM módszer 'döntési fa' eljárást (decision tree, pl. *Di Castro and Bertini*, 2019) használ a kalibrálandó paraméterek eredetileg beállított tartományain belül olyan szűkebb résztartományok meghatározására, melyek kombinációja (a paramétereket ezen résztartományokból választva) a legnagyobb

valószínűséggel eredményez elfogadható pontosságú szimulációkat az első lépésben megfogalmazott feltételek teljesülése mellett. A CIRM módszer tehát (1) meghatározza a paraméterter azon legszűkebb halmazát, amelyből választva a paramétereket a szimulációs eredmény garantáltan realiztikus lesz, azaz megfelel a megszabott feltételeknek; (2) fontossági sorrendbe állítja a kalibrációs paramétereket aszerint, hogy a modell számításai mennyire érzékenyen reagálnak a paraméterérték megváltozására; (3) meghatározza a paraméterek optimális értékét, melyekkel a modell vizsgált kimenetei a lehető legjobban közelítik a megfigyelt értékeket (3.30 ábra).



3.30 ábra: A Biome-BGCMuSo modell teljesítménye a martonvásári vetési idő tartamkísérletben megfigyelt termésadatok alapján (1991-2020). Piros kör: kalibráció előtt. Zöld rombusz: hagyományos kalibráció után. Kék háromszög: CIRM - 'feltételes tartománycsökkentő módszer'-rel történő kalibráció után. A kis r a korrelációs együtthatót, MRAE az átlagos relatív abszolút hibát jelöli.

(3) AgroMo SQL modul:

Az AgroMo rendszer minden adatot: a bemenő (klimatikus és talaj) adatokat és a kimenő adatokat (a szimulációk eredményeit) adatbázisban tárol. Ez megteremti annak a lehetőségét, hogy SQL⁵ lekérdezések segítségével kimutatásokat készítsünk az adatainkról, megkönnyítve azok elemzését és értelmezését. Egy lekérdezéshez azonban az adatbázisban tárolt adatok azonosítóin túl az SQL nyelv ismeretére is szükség van. Azért, hogy a lekérdezések által nyújtott funkciókhoz bármely felhasználó hozzáférhessen, egy ún. 'SQL metanyelv'-et hoztunk létre és implementáltunk az AgroMo rendszerben. A metanyelv 'szótára' összetartozó *lekérdező mondat sablon – SQL lekérdezés sablon* párokból áll, ahol a közérthető

⁵ Structured Query Language (strukturált lekérdezőnyelv)

nyelven megfogalmazott lekérdező mondatához a vele azonos jelentésű, de az SQL szabályai szerint megfogalmazott lekérdezés tartozik. A szabványos SQL utasítások illetve a lekérdezett adatbázis mező azonosítói kivételével az SQL lekérdezés sablon valamennyi eleme és a lekérdező mondat sablon ezeknek megfelelő részei megváltoztathatók. Ezeket a részeket a sablonokban { } és [] zárójelek segítségével jelöljük. A sablonok használatának az az előnye, hogy egyetlen sablonnal és néhány választási lehetőséggel nagyszámú lekérdezést definiálhatunk. Az alábbi sablonpárral és a felkínált opciókkal például több mint 320 millió különböző lekérdezés készíthető. A lekérdező mondatok opciói közérthető kifejezések ún. alias-ok formájában érhetőek el, melyekhez egyértelmű módon, az SQL lekérdezésbe illeszthető értékek tartoznak. Például:

lekérdező mondat sablon:

Hőösszeg (Tb={1}°C) {2} a(z) {3}. - {4}. hónapokra a(z) [T1]-[T2] időszakban a(z) {5} adatforrás alapján

alias-ok:

- {1}: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- {2}: átlaga, minimuma, maximuma
- {3}: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
- {4}: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
- {5}: 'FORESEE', 'PROJEKCIO1', ... , 'PROJEKCIO10'
- [T1]: 1951, 1952, ... , 2100
- [T2]: 1951, 1952, ... , 2100

SQL lekérdezés sablon:

```
SELECT cell_id, {1}(heatsum)
FROM (SELECT cell_id, SUM(max(0.5*(Tmax+Tmin)-{2},0)) AS heatsum
      FROM climate.data
      WHERE datasource_id={5} AND month BETWEEN {3} AND {4}
      AND year BETWEEN [T1] AND [T2]
      GROUP BY year, cell_id)
GROUP BY cell_id;
```

értékek:

- {1}: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- {2}: AVG, MIN, MAX
- {3}: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
- {4}: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
- {5}: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
- [T1]: 1951, 1952, ... , 2100
- [T2]: 1951, 1952, ... , 2100

Az AgroMo grafikus felületén (3.31 ábra) néhány kattintással kiválasztható a megfelelő lekérdező mondat sablon és a megfelelő alias-ok; így konkretizálható a lekérdező mondat. Ezzel egy időben, a felhasználó választásának megfelelő SQL lekérdezés sablonból és a választott alias-oknak megfelelő értékekből elkészül a

konkrét SQL lekérdezés is, melyet a benne definiált adatbázis megfelelő adattáblájára alkalmazva zárul a folyamat.

A lekérdezés egy kérdés formájában indul, amelyre a felhasználó keresi a választ. A kérdés rendszerint átfogalmazásra szorul azért, hogy a megválaszolásához szükséges minden részletinformáció explicit módon megjelenjen a kérdésben. Az átfogalmazott kérdéshez a felkínált lekérdező mondat sablonok közül kell kiválasztani azt, melyet megfelelően kiegészítve (alias-okkal konkretizálva) választ tud adni a felhasználó kérdésére. A jobb megértés kedvéért tekintsük a következő példát:

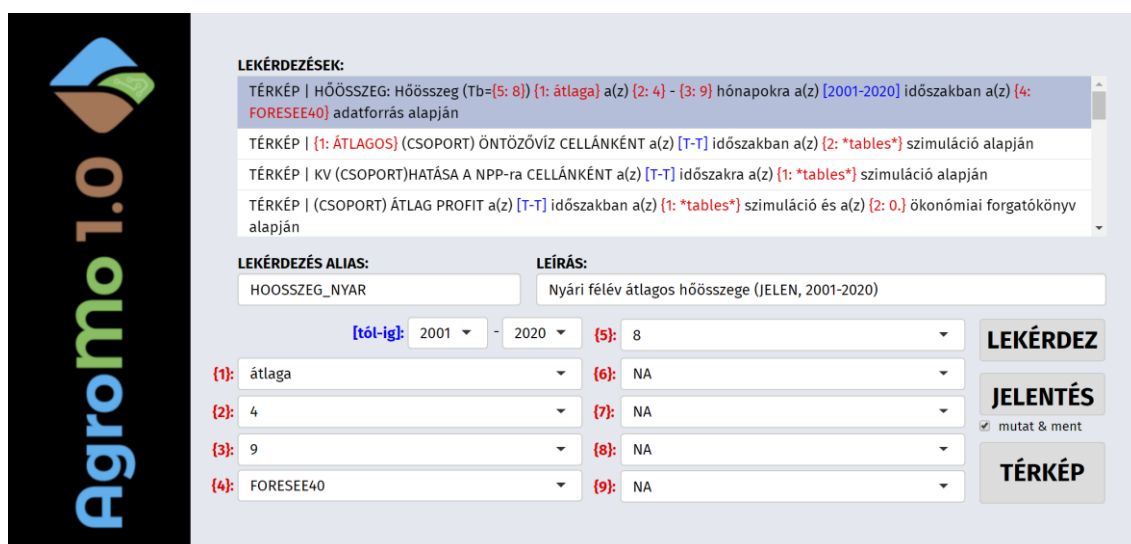
induló kérdés:

Jelenleg mennyi a nyári félév átlagos hőösszege kukorica növényre vonatkozóan?

átfogalmazott kérdés:

Mennyi az április elejétől szeptember végéig tartó időszakok átlagos hőösszege (8 °C bázishőmérsékletet alapul véve) a 2001-2020 időszakban?

Erre a kérdésre az AgroMo rendszerben elérhető lekérdező mondat sablonok közül a **3.31 ábrán** jelölt sablon tudja megadni a választ. A sablonban található számozás illetve színkódolás alapján beazonosítható, hogy a { } illetve [] zárójellel jelölt opcionális részekhez melyik legördülő menüből választhatók ki az induló kérdésnek megfelelő alias-ok. Így a sablon a **3.31 ábrán** látható formában konkretizálódik, a háttérben pedig az alábbi SQL lekérdezés készül el.

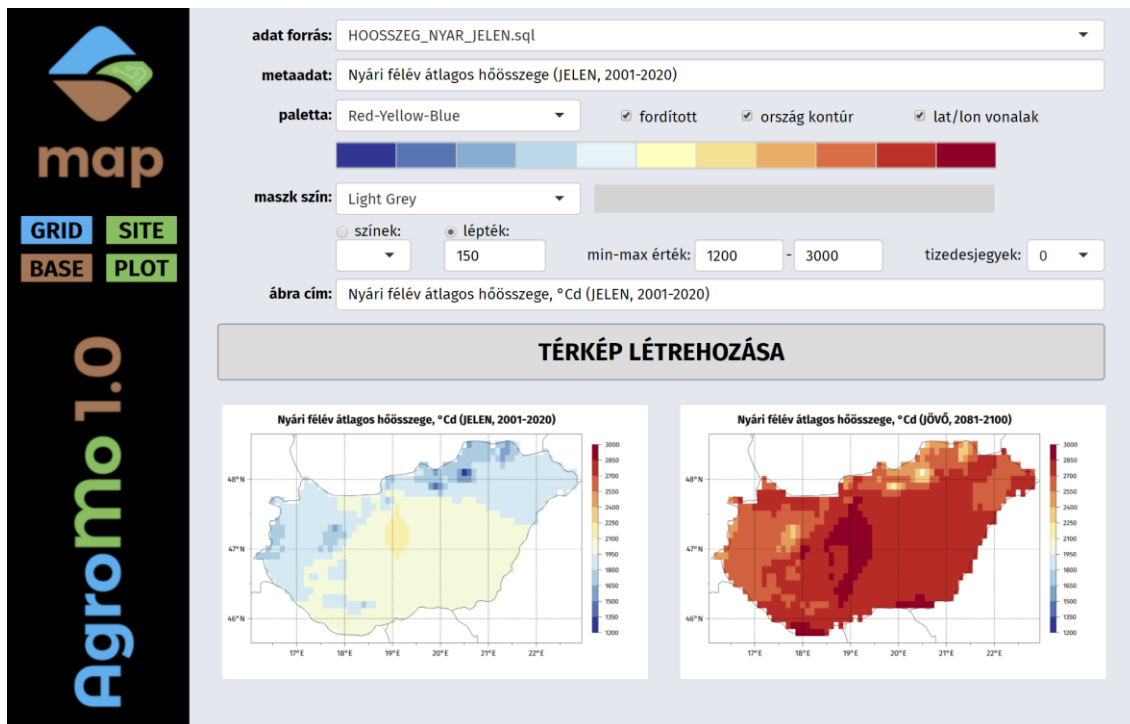


3.31 ábra: Az AgroMo SQL moduljának grafikus kezelőfelülete melynek segítségével a felkínált sablonokból konkrét lekérdezések szerkeszthetők.

SQL lekérdezés:

```
SELECT cell_id, AVG(heatsum)
FROM ( SELECT cell_id, SUM(max(0.5*(Tmax+Tmin)-8,0)) AS heatsum
FROM climate.data
WHERE datasource_id=1 AND month BETWEEN 4 AND 9
AND year BETWEEN 2001 AND 2020
GROUP BY year, cell_id)
GROUP BY cell_id;
```

A sablonok elején található leírás utal arra, hogy milyen jellegű (TÉRKÉP vagy TÁBLÁZAT) és milyen változóra (a fenti példában: hőösszeg) vonatkozó eredménye lesz a lekérdezésnek. A térképet eredményező lekérdezések esetében, a lekérdezés a cellaazonosítókat (3.24 ábra) is visszaadja a vonatkozó értékekkel együtt. Mivel a cellák mérete és középpontjuk földrajzi elhelyezkedése ismert a cellákhoz tartozó eltérő értékekhez eltérő színárnyalatot rendelve látványos ábrák készíthetők. Ez a művelet az AgroMo rendszer MAP moduljával végezhető el, amellyel a fenti lekérdezés (jelenre: 2001-2022 és jövőre: 2081-2100) vonatkozó eredményét felhasználva az alábbi térképek készíthetők (3.32 ábra).



3.32 ábra: Az AgroMo klíma adatbázisára vonatkozó, 3.31 ábrán bemutatott lekérdezés eredménye a jelenre és a jövőre vonatkozóan.

Az AgroMo-ban számos előre elkészített lekérdező mondat sablon könnyíti meg a felhasználó munkáját, melyek egy része a bemenő adatokra vonatkozik (pl. **3.31-32 ábra**), másik része pedig a szimulációs eredmények feldolgozását hivatott elősegíteni. Például a **3.3.2 fejezet** térképei is ilyen sablonok segítségével készültek. Az előírt szerkesztési szabályok betartásával a rendszer saját sablonokkal tovább bővíthető.

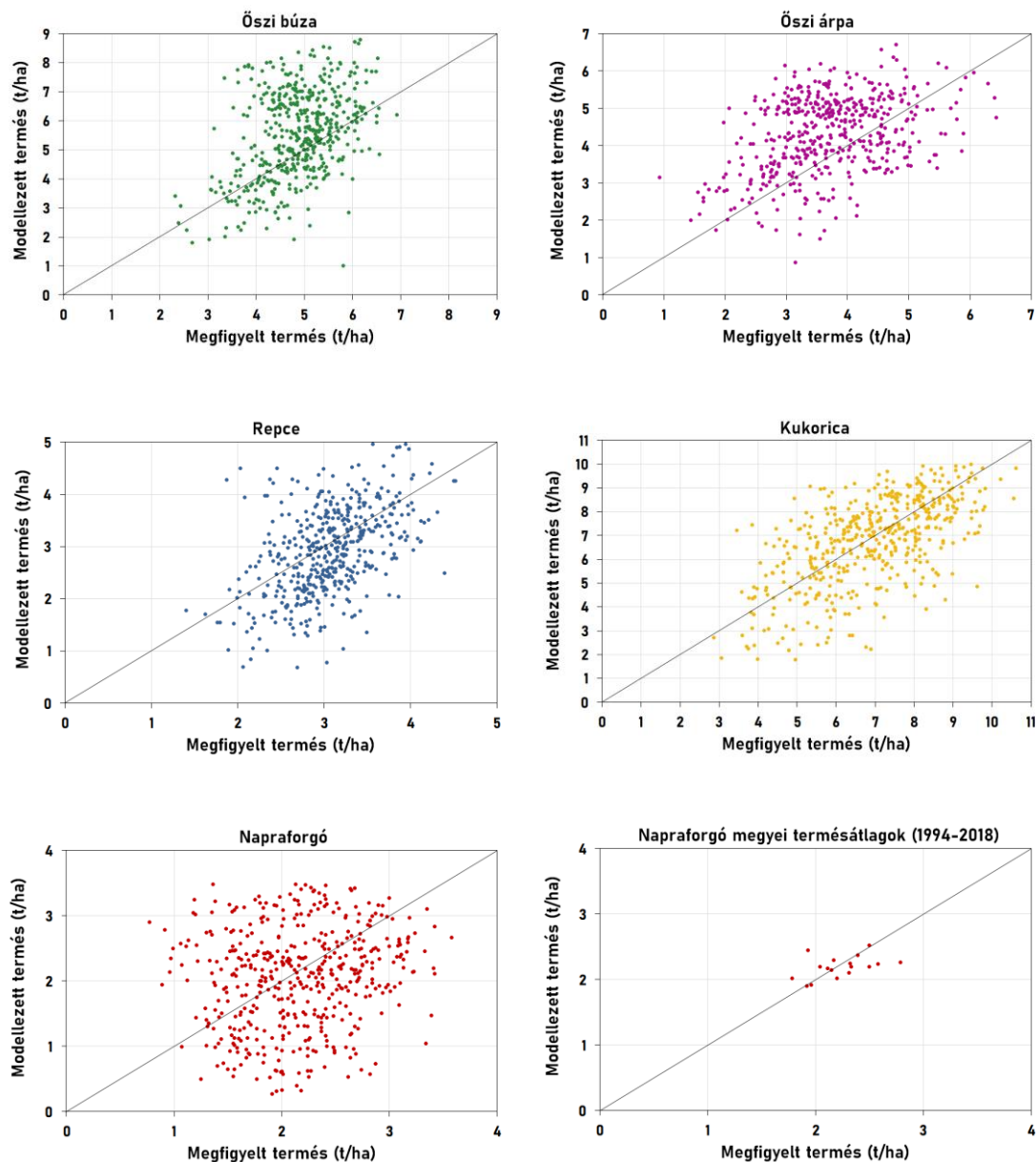
A következő alfejezetekben az AgroMo modellezési keretrendszer gyakorlati felhasználási lehetőségeit mutatom be a beágyazott Biome-BGCMuSo talaj-növény modell segítségével végrehajtott in silico kísérletek eredményein keresztül. Az in silico kísérletek előtt, a modellt kalibráltuk: megfigyelés-alapú adatok segítségével, a modell meghatározó talaj és növény paramétereit beállítottuk úgy, hogy a modelleredmények a lehető legpontosabban visszaadják a mért értékeket. A modell többi paramétereit a szakirodalmi adatok alapján állítottuk be. A modellkalibrációhoz az AgroMo rendszer adatbázisain túl az alábbi adatforrásokat használtuk fel:

- Eddy-kovariancia állomás, Hegyhátsál (*Barcza et al., 2003*)
- ELKH Ökológiai Kutatóközpont mérései, Fülöpháza (*Ónodi et al., 2018*)
- MODIS műholdas távérzékelési produktumok (<https://modis.gsfc.nasa.gov>)

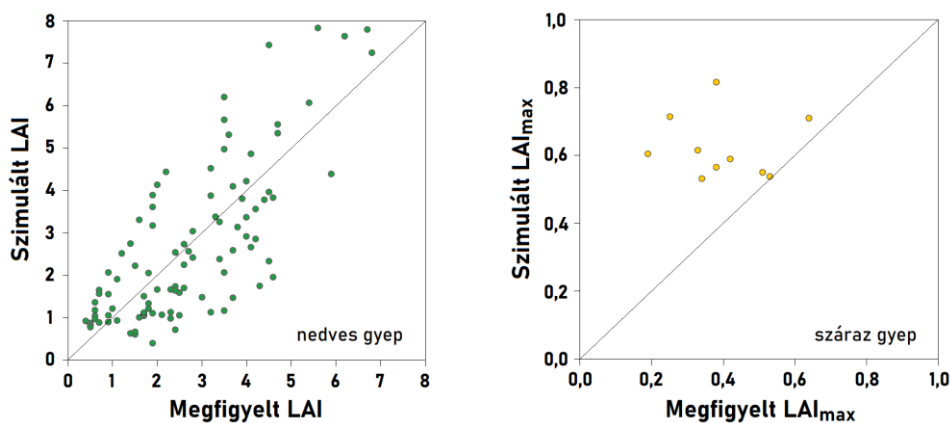
Főbb szántóföldi növényeink legfontosabb paramétereit (gyökérelszlási paraméter, specifikus levélfelület, stressz-érzékenység valamint a fejlődési fázisok hossza, illetve a fázisokra jellemző elosztási paraméterek) a KSH adatai segítségével állítottuk be. A megyei éves termésátlagok megfigyelt és szimulált értékeinek összehasonlítása során, az átlagos relatív abszolút hiba őszi búza, őszi árpa, repce, kukorica és napraforgó esetében: 24,6; 30,6; 20,4; 18,3 és 36,5% volt a kalibráció után, ami különösen a napraforgó esetében számít rossz eredmények (**3.33 ábra**). Konkrét évek megyei termésátlagát csak ilyen mértékű átlagos hibával képes megbecsülni a modell. Mivel a modellt hosszú távú trendek kimutatására használtuk az alábbi esettanulmányok során, azt is megvizsgáltuk, hogy hosszabb időszakok termésátlagát milyen pontossággal képes meghatározni. Napraforgó esetében, az éves összehasonlításban kapott 36,5%-os átlagos hiba 7,8%-ra csökkent, amikor az 1994-2018 időszakra kapott megfigyelt és szimulált termések átlagát hasonlítottuk össze (**3.33 ábra**). Ezen eredmények alapján, modell nagyobb térbeli és időbeli léptékben, hosszú távú trendek megállapítására nagy biztonsággal alkalmazható.

A gyepterületekre vonatkozóan a szántóföldi növényeknél már felsorolt paraméterek értékeit kalibráltuk mért levélfelület adatok felhasználásával. A megfigyelt és szimulált produkciót először egy jó csapadék-ellátottságú (nedves

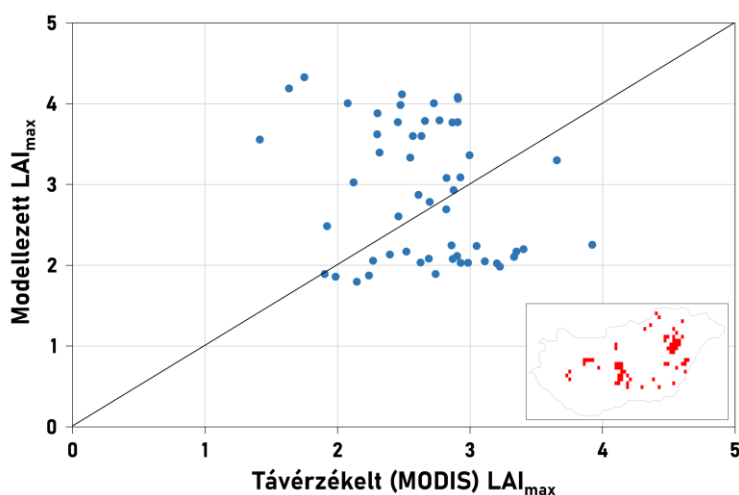
gyep, Hegyhátsál) valamint egy száraz gyep (Fülöpháza) területre hasonlítottuk össze (3.34 ábra), majd pedig az AgroMo adatrács (3.24 ábra) azon celláira, ahol a gyepterületek aránya elérte vagy meghaladta az 50 százalékot (3.35 ábra).



3.33 ábra: Kalibráció utáni modellezett terméseredmények összevetése a KSH megyei termésátlag adataival (1994-2018). Az első öt grafikon az évenkénti terméseket, az utolsó (jobb alsó) a vizsgált időszakra vonatkozó (napraforgó) megyei termésátlagokat hasonlítja össze.



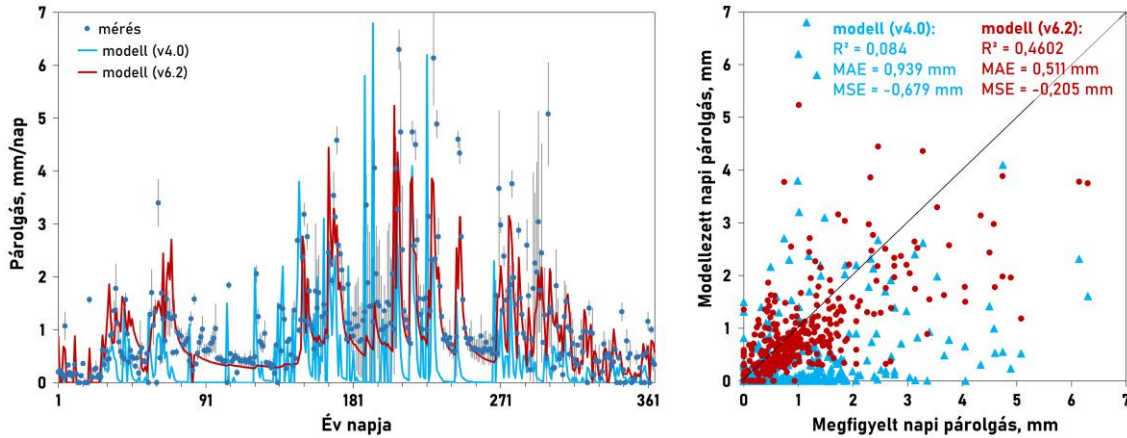
3.34 ábra: Modellezett levélfelület index (LAI, m^2/m^2) összevetése a hegyhátsági eddy-kovariancia állomás (nedves gyepek) és az ELKH ŐK fülöpházai (száraz gyepek) megfigyeléseivel. A LAI mérése mindkét helyen LP-80 ceptométerrel történt.



3.35 ábra: Gyepterületek (beágyazott térkép cellái) levélfelület index értéke éves maximumainak (LAI_{max}) többéves átlaga (2001-2020): modellezett értékek összevetése műholdról távérzékelt (*MODIS Web, nasa.gov*) adatokból származtatott értékekkel.

Szembetűnő, hogy a modell különösen nagymértékben felülbecsli az alacsony LAI értékeket. Tapasztalataink szerint azonban éppen ezekben az esetekben a mérések hibája is átlagon felüli (*Pokovai and Fodor, 2019*). Tudva azt, hogy a gyepterületek szimulációi számos bizonytalansággal terheltek (gyepek pontos elhelyezkedése a 10×10 km-es cellákon belül, termesztés-technológiai ismeretének hiánya, stb.), már az is biztató eredménynek számít, hogy a megfigyelt és a modellezett LAI_{max} értékek átlagai (2,65 vö 2,89) csak kis mértékben tértek el egymástól. A növényi produkcióval kapcsolatos változókon túl a víz- és szénmérleggel összefüggő jellemzőkön keresztül is megvizsgáltuk a modell teljesítményét. A nettó ökoszisztéma kicserélődés (**3.13 ábra**) és a feltalaj nedvességtartalmának (**3.16 ábra**) alakulásán keresztül már korábban bemutattuk, hogy a modell elfogadható

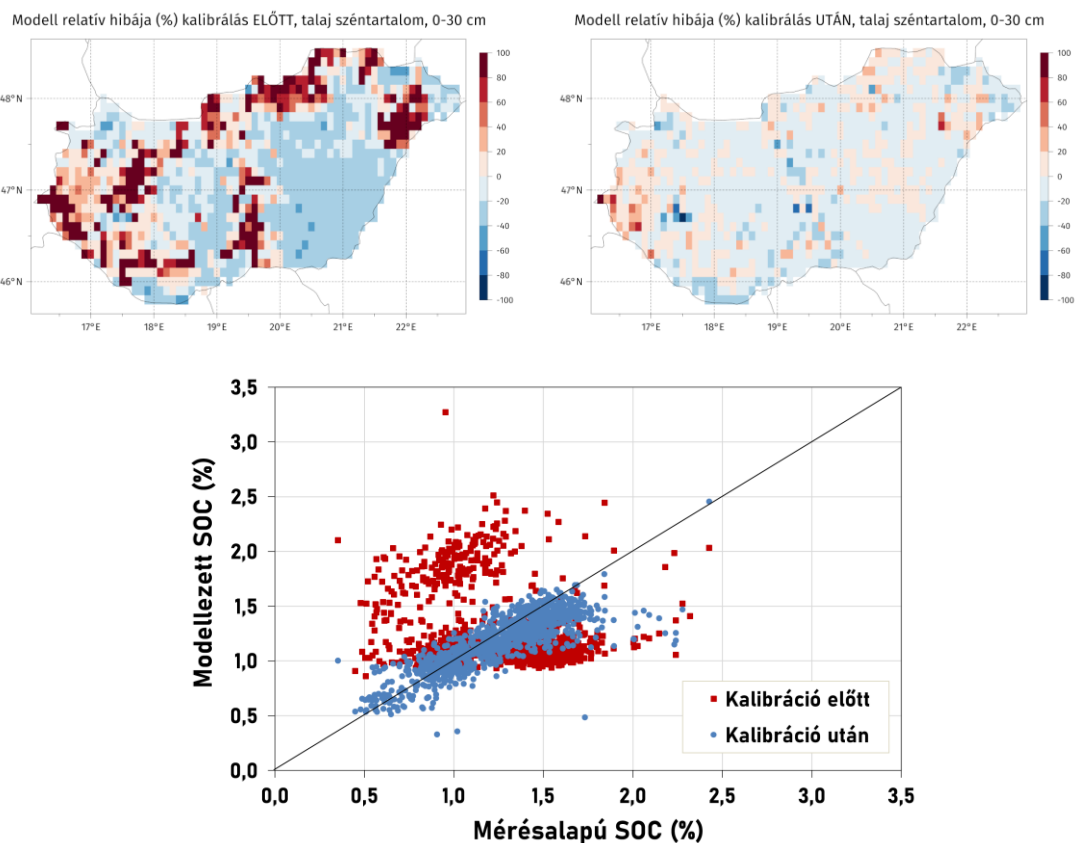
pontossággal képes leírni a szénmegkötés, a csapadék-beszivárgás folyamatait. A vízmérleg másik meghatározó tényezőjével, a párolgással kapcsolatos modellezési eredményeket, illetve a modellfejlesztés eredményét a liziméterek (3.13 ábra) segítségével mért párolgásértékek felhasználásával mutatja be a 3.36 ábra.



3.36 ábra: Csupasz, növényborítás nélküli talaj mért és két modellváltozattal szimulált napi párolgásértékei a liziméter állomás megfigyelései alapján (Martonvásár, 2020). A mért értékek körüli függőleges sávok 6 liziméter oszlopban mért adatok tartományát jelölik. A fejlesztésnek (v4.0 → v6.2) köszönhetően jelentősen javult a modell megbízhatósága. R^2 : determinisztikus koefficiens, MAE: átlagos abszolútértékes hiba, MSE: átlagos előjeles hiba (bias).

A DOSoReMI (Pásztor *et al.*, 2020) talajadatbázis kivételes lehetőséget nyújt a talaj-szénforgalom modellezésének, a Biome-BGCMuSo modell talaj szervesanyag (SOM) bomlását leíró moduljának (3.22 ábra) tesztelésére illetve kalibrálására. Az AgroMo adatrács minden cellájára az uralkodó fölhasználat-típusnak megfelelő növényborítást feltételezve, a SOM bomlását befolyásoló paraméterek (szakirodalomból vett) alapértékének $\pm 10\%$ -os környezetében keresve az optimális értékeket úgy kalibráltuk be az egyes SOM tározók (3.23 ábra) közötti áramok potenciális sebességét illetve az átalakulási folyamatok nedvesség- és hőmérséklet-függését megadó paramétereket, hogy a talaj modell által szimulált szerves széntartalmának (SOC) egyensúlyi állapota minél kisebb eltérést mutasson a DOSoReMI adatbázis megfigyelés alapú értékeihez képest (3.37 ábra). A modell paramétereinek finomhangolását követően jelentős mértékben javult a modell teljesítménye.

Miután a modell legfontosabb paramétereit kalibráltuk, és számos szempontból összevetettük a modell eredményeit mérési adatokkal, konkrét agrárvonatkozású problémák megoldására használtuk fel az AgroMo rendszert.

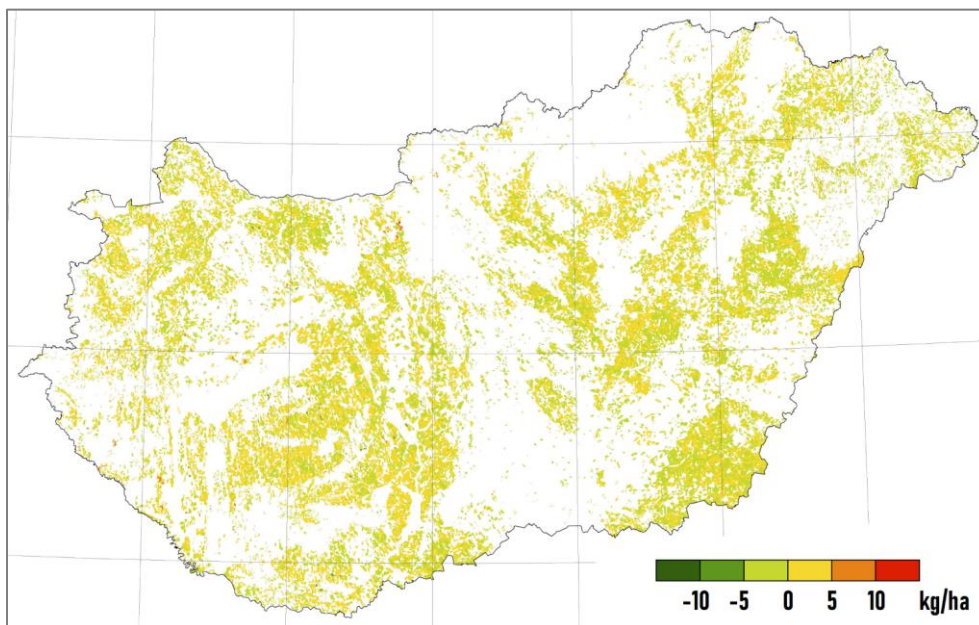


3.37 ábra: A feltalaj (0-30 cm) modellezett széntartalmának (SOC) összevetése a DOSoReMI adatbázis megfigyelés alapú adataival.

3.3.2 Az AgroMo alkalmazása: trágyázási tilalmi időszak

Az Európai Unió szakértői rendszeresen felülvizsgálják a nitrát-rendelet (91/676/EEC, illetve 59/2008. (IV. 29.) FVM rendelet) gyakorlati megvalósítását az egyes tagországokban. Az összegyűjtött tapasztalatok alapján az EU az irányelv módosítására tesz javaslatot a tagállamok számára, hogy a lehető legkisebbre csökkentse a mezőgazdasági eredetű nitrát-lemosódás kockázatát. A növény- és talaj-specifikus műtrágyaadag-maximumok bevezetése után a trágyázási időszak esetleges megrövidítése is rendszeresen napirendre kerül, amely azonban jelentős terhet róhat a növénytermesztési ágazatra. Ha pl. a tavaszi starter trágyázás egy hónapot késne a rendelet javasolt módosítása miatt, az akár termés kiesést is okozhat az ősszel vetett növényeknél, mivel a korai vegetatív szakaszban nem feltétlenül lenne biztosított az elegendő mennyiségű tápanyag a talajban. 2011-ben, az akkor még különálló 4M modell felhasználásával (Fodor *et al.*, 2011) majd tíz évvel később az akkor már az AgroMo rendszer moduljaként működő modellel (Koós *et al.*, 2021) megvizsgálásra került, hogy a trágyázási tilalmi időszak akár őszi akár tavaszi, egy hónappal történő meghosszabbítása csökkentené-e a nitrát-

leemosódás kockázatát. Az in silico kísérletek alapján az EU mindkét, hosszabbítást javasoló indítványára elutasító választ tudtunk megfogalmazni mivel rövidebb illetve hosszabb tilalmi időszakot feltételezve a szimulált nitrátleemosódás értékek az ország területének több mint 99%-án kevesebb, mint ± 5 kg/ha-ral tértek el (3.38 ábra).

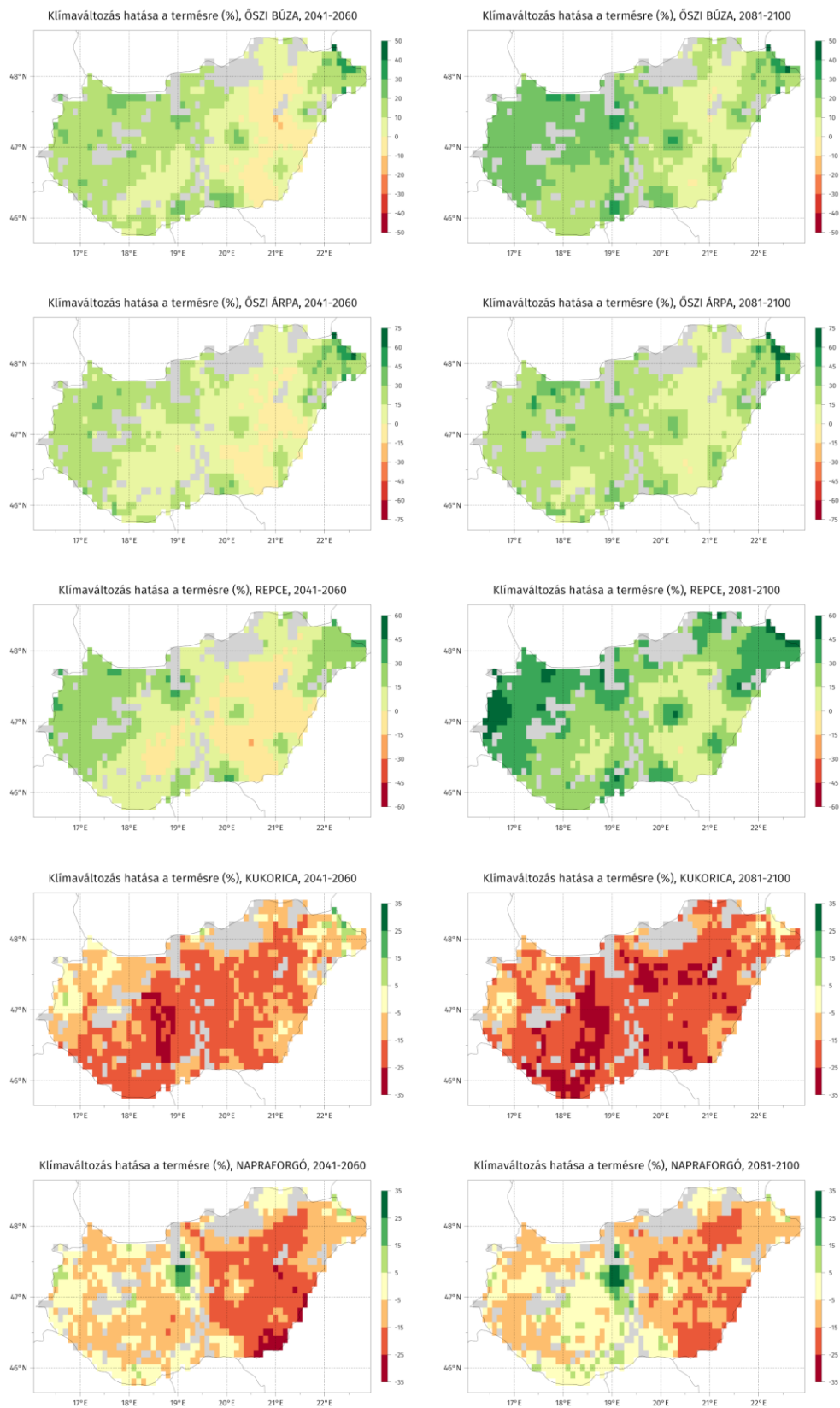


3.38 ábra: A 90 cm-nél mélyebbre lemosódott nitrát mennyiségének különbsége két trágyázási tilalmi időszakra vonatkozó forgatókönyv felhasználásával elvégzett szimulációk eredményei alapján. A hosszabb tilalmi időszakkal (Október 31 – Február 15) és a rövidebb tilalmi időszakkal (November 30 – Február 15) kapott éves lemosódás értékek 2016-ban.

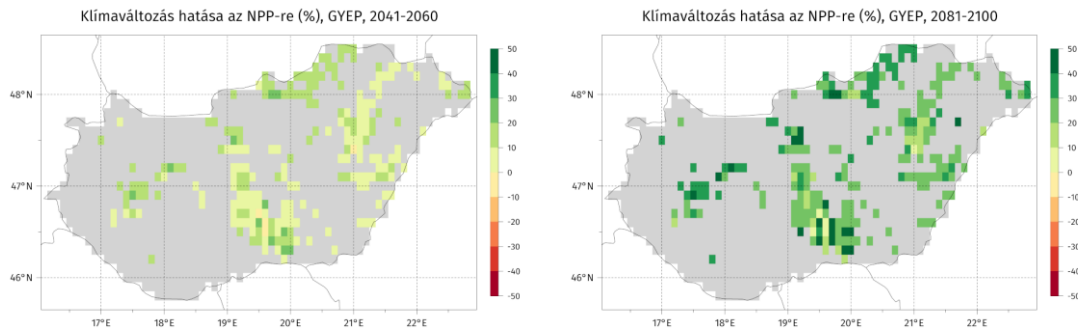
3.3.3 Az AgroMo alkalmazása: ökoszisztéma szolgáltatások

Minden szimulációt tíz különböző klímaprojekcióból (3.20 ábra) származó tíz eltérő időjárási adatsorral hajtottam végre. A bemutatott eredmények minden esetben tíz összetartozó szimuláció (amelyek kizárólag az időjárási bemenő adatokban különböztek) csoportátlagai. A szántóföldi növényekre, gyepekre és erdőkre vonatkozó szimulációkat az AgroMo rács (3.24 ábra) csak azon celláira hajtottam végre, ahol a vonatkozó földhasználati típus elérte vagy meghaladta a cella területének 20 százalékát. Az alábbi térképek készítéséhez kizárólag az AgroMo rendszert használtam. Első lépésben azt vizsgáltam meg, hogy a jelenlegi termelési körülmények fenntartása mellett⁶ a klímaváltozás milyen hatással lesz az **Ellátó Ökoszisztéma Szolgáltatásokra**: a szántók hozamára, a gyepek és lombhullató erdők produkciójára (3.39-41 ábra).

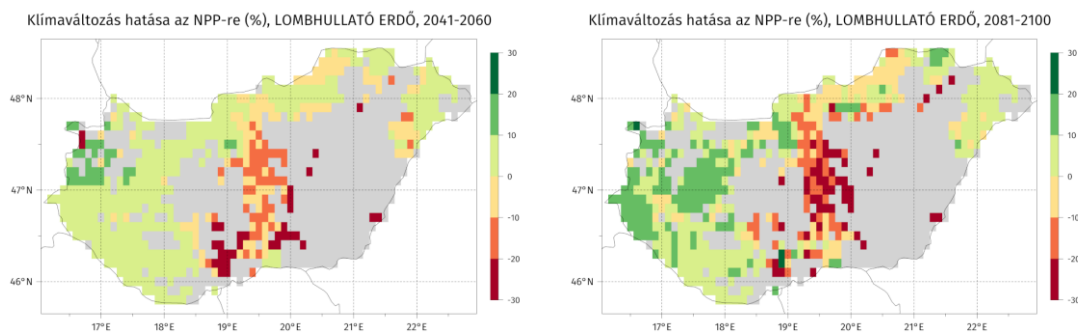
⁶ Az angol 'Business As Usual' kifejezés nyomán ezeket a szimulációkat a BAU rövidítéssel jelöltem.



3.39 ábra: A klímaváltozás várható hatása fő szántóföldi növényeink hozamára a jelenlegi (2001-2020) termésátlagokhoz képest, a 2041-2060 és 2081-2100 időszakokra vonatkozóan.



3.40 ábra: A klímaváltozás várható hatása a gyepek által felvett szén nettó (autotróf légzés után megmaradó) mennyiségére (NPP⁷) a jelenlegi (2001-2020) átlagos NPP-hez képest, a 2041-2060 és 2081-2100 időszakokra vonatkozóan.



3.41 ábra: A klímaváltozás várható hatása a lombhullató erdők által felvett szén nettó (autotróf légzés után megmaradó) mennyiségére (NPP) a jelenlegi (2001-2020) átlagos NPP-hez képest, a 2041-2060 és 2081-2100 időszakokra vonatkozóan.

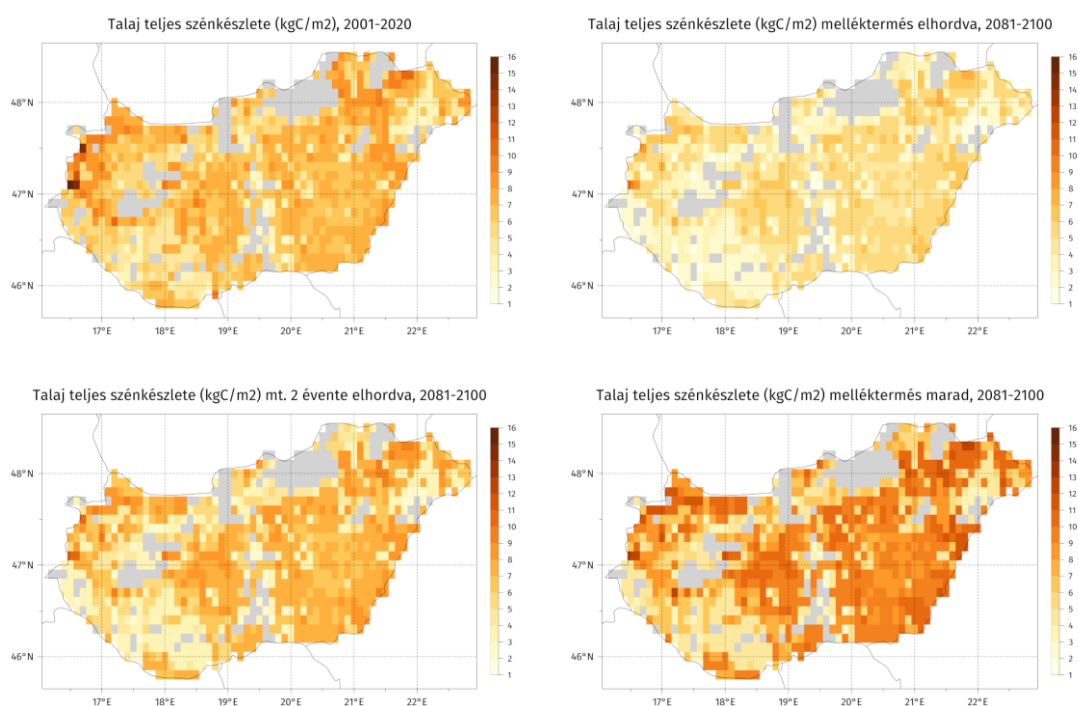
Összhangban *Webber et al. (2018)* eredményeivel, a szimulációk alapján:

- Az őszi vetésű növények hozama várhatóan növekszik a klímaváltozásnak köszönhetően.
- A tavaszi vetésű növények hozama várhatóan csökken a klímaváltozásnak köszönhetően.
- A legsérülékenyebb területek, ahol a klímaváltozás várhatóan a legkomolyabb hozamcsökkenéseket eredményezi majd, az ország középső és déli vármegyéiben található: Pest, Jász-Nagykun-Szolnok, Bács-Kiskun, Csongrád-Csanád és Békés vármegyében.
- A természetes gyepek produkciója várhatóan növekszik az ország teljes területén.
- A lombhullató erdők faállományában évi 5-8 tonna szén kerül megkötésre hektáronként. Az alföldi erdők produkciójának jelentős csökkenése várható.

⁷ Az NPP jelölés az angol 'Net Primary Production' kifejezésből származik.

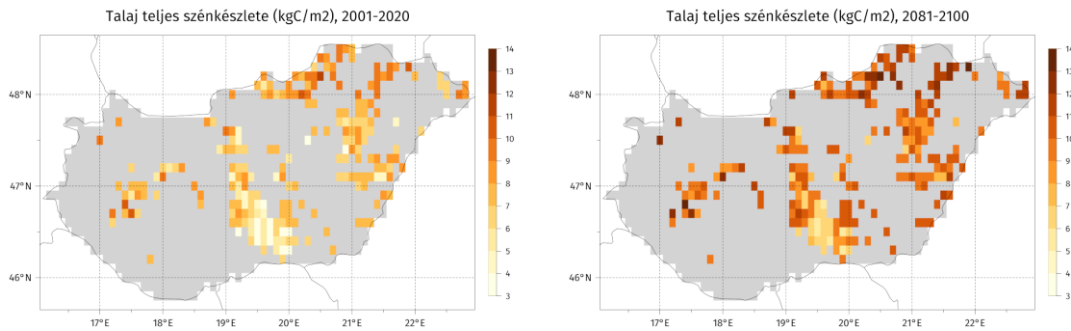
Az AgroMo segítségével, a klímaváltozás **Szabályzó Ökoszisztéma Szolgáltatásokra** gyakorolt várható hatásait is megvizsgáltuk (**3.42-44 ábra**). Szántóterületeken, a talaj szénmegkötése szempontjából meghatározó tényezőnek tűnik a melléktermés sora. A szimulációk alapján, amennyiben a melléktermés minden évben a területen marad, a talaj teljes szénkészlete fokozatosan növekszik. Ellenkező esetben a szénkészlet csökkenése várható (**3.42 ábra**). Országos átlagban, a talaj-szénkészlet változása (2081-2100 vö. 2001-2020):

- a melléktermést a területen hagyva: +19,6%
- a melléktermést a területről lehordva: -32,6%
- a melléktermést minden második évben lehordva: -4,1%

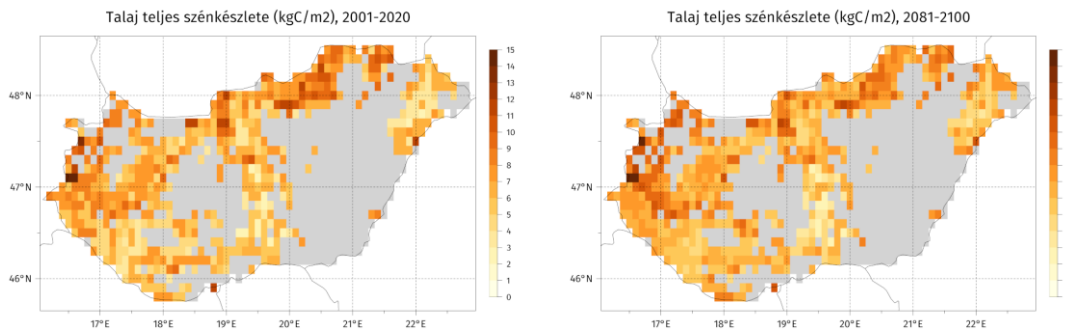


3.42 ábra: A talajtakaró szénkészletének alakulása szántóterületeken, eltérő melléktermés-kezelési forgatókönyvek mellett, in silico kísérletek eredményei alapján.

A szimulációk alapján a természetes gyepek nettó szénmegkötők és produkciójuk várhatóan növekszik a jövőben. Ezekre a területekre, országos átlagban, a talaj-szénkészlet változása (2081-2100 vö. 2001-2020): +35,3% (**3.43 ábra**). A lombhullató erdők talajában elhanyagolható mértékű a széntartalom növekedése; országos átlagban (2081-2100 vö. 2001-2020): +6,65% (**3.44 ábra**).



3.43 ábra: A talajtakaró szénkészletének alakulása természetes gyepterületeken in silico kísérletek eredményei alapján.

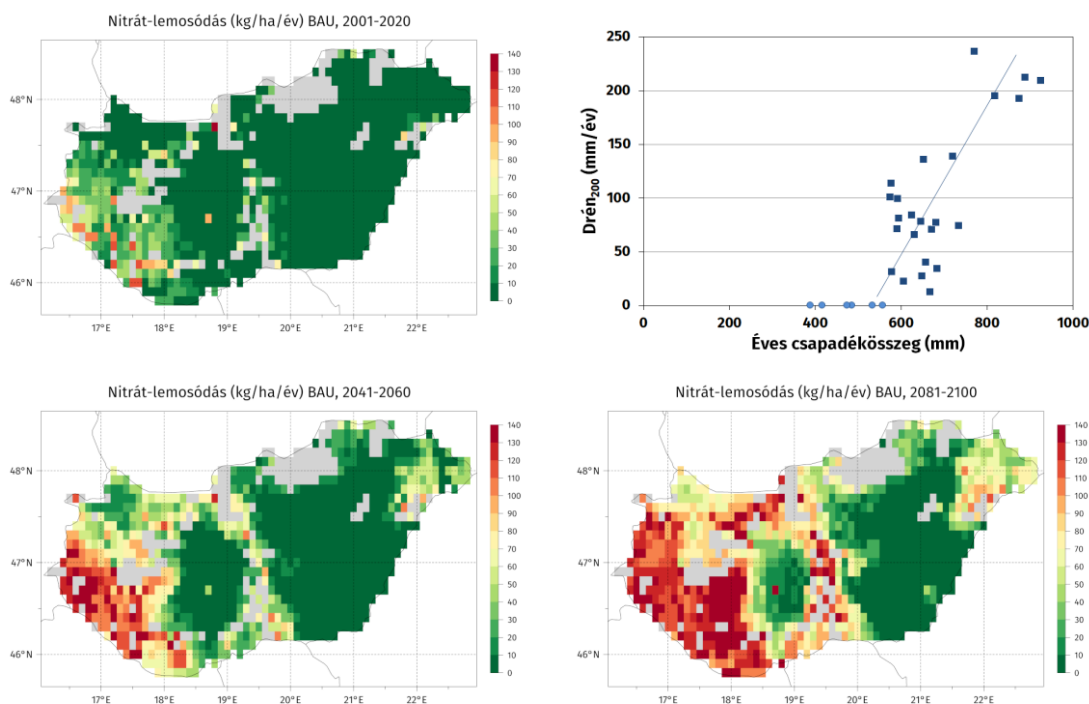


3.44 ábra: A talajtakaró szénkészletének alakulása erdőterületeken in silico kísérletek eredményei alapján.

Tudatos mező- és erdőgazdálkodással elérhető, hogy ezen ágazatok, negatív visszacsatolást eredményezzenek a klimatikus folyamatokra és szénmegkötés révén enyhítsék/lassítsák a klímaváltozás folyamatát.

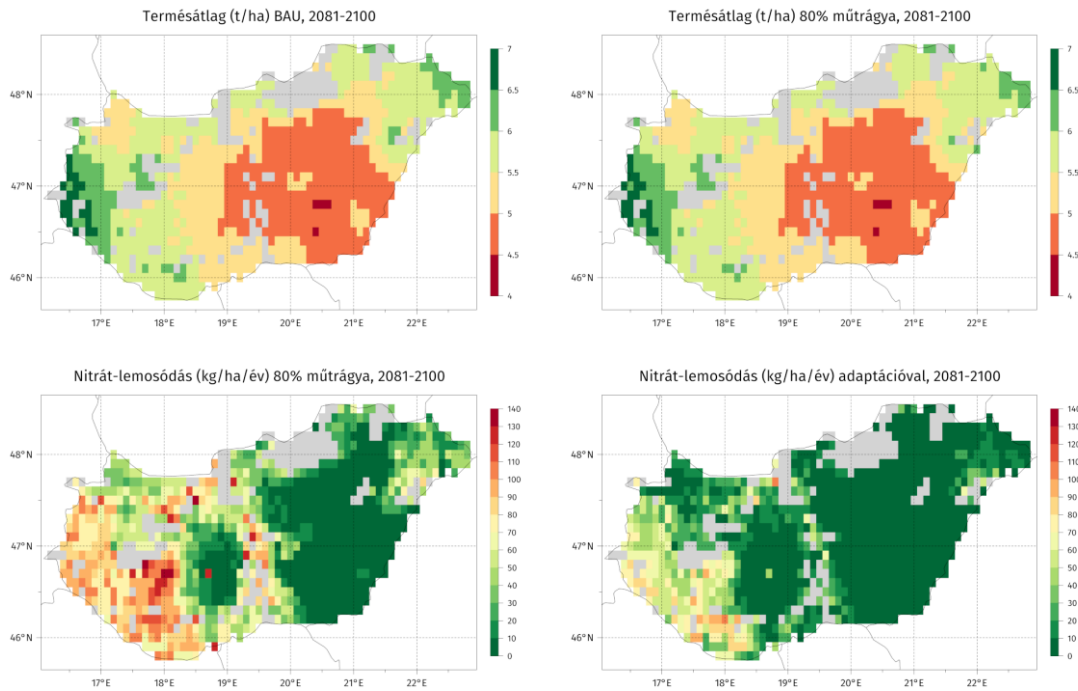
Megvizsgáltuk, hogy intenzív kukorica termesztési körülmények között, hogyan alakul a lemosódó nitrát mennyisége a jövőben. Az 'intenzív' ebben az esetben az jelentette, hogy minden területre a nitrát-rendelet által maximálisan megengedett mennyiségű nitrogén kijuttatásának következményeit szimuláltuk, ami csernozjom, erdő-, réti-, illetve homoktalajok esetében évi 190, 190, 180, illetve 150 kg/ha hatóanyag kijuttatását jelentette évente. A **3.45 ábrán** az évenkénti nitrátleemosódás mennyiségének csúcértékeit jelentettük meg, amelyek az 5-7 évente bekövetkező átlagosnál lényegesen csapadékosabb évekhez kapcsolódnak, amikor a csapadék mennyisége meghaladja a talaj tárolókapacitását, és a köztes, 4-6 éves időszakban a gyökérszónában felhalmozódó nitrát nagy mennyiségben lemosódik a drén-vízben oldva. Ez a lemosódás elsősorban a gyengébb vízgazdálkodású, alacsonyabb szabadföldi vízkapacitású, homok és barna erdőtalajokra jellemző és ezekre is csak azokban az években, amikor a csapadékösszeg meghaladja a 600 mm-t. (**3.45 ábra**). Ezekben a területeken, a jövőben várható termésnövekedések miatt, a magas nitrogén

adagokból egyre több, a növények által fel nem vett nitrát halmozódik fel a talajban és mosódik ki extrém csapadékos években, növekvő környezetvédelmi és egészségügyi kockázatot eredményezve.



3.45 ábra: Az évenkénti nitrátleamosódás mennyiségek csúcstértékei a jelölt szimulációs időszakokban intenzív kukoricatermesztés esetén. A jobb-felső grafikon a 200 cm-nél mélyebbre szivárgó drén-víz mennyiségét ábrázolja az éves csapadékmennyiség függvényében egy Dél-Nyugat Magyarországi (piros) cellára vonatkozóan.

A nitrát-lemosódás mértékét két módon mérsékelhetjük: a kijuttatott nitrogén mennyiségének csökkentésével vagy a növényi nitrogén-felvétel, végső soron a termésátlagok növelésével. In-silico kísérletek eredményei alapján mind a nitrogénadagok 20%-os csökkentésével, mind a hozamok növelését célzó adaptációs megoldások (ld. **3.3.4 fejezet**) segítségével jelentős mértékben mérsékelhető a lemosódó nitrát mennyisége, anélkül, hogy az első fajta beavatkozás csökkentené a hozamokat (**3.46 ábra**), mivel a klímaváltozással visszaeső növényi produkció illetve nitrogén-igény kielégítéséhez kevesebb nitrogén is elegendő. Megállapítható, hogy a jövőben tovább nő a helyi klimatikus és talaj adottságokhoz, és azok esetleges változásához is igazodó tápanyag-visszapótlás fontossága. Okszerű műtrágya adagokkal csökkenthető a termelési költség és a környezetterhelési kockázat.



3.46 ábra: Kukorica termésátlagok és az évenkénti nitrátleemosódás mennyiségek csúcértékei a 2081-2100 időszakban, csökkentett nitrogén adagok, illetve adaptációs módszerek (3.3.4 fejezet) szimulációja alapján.

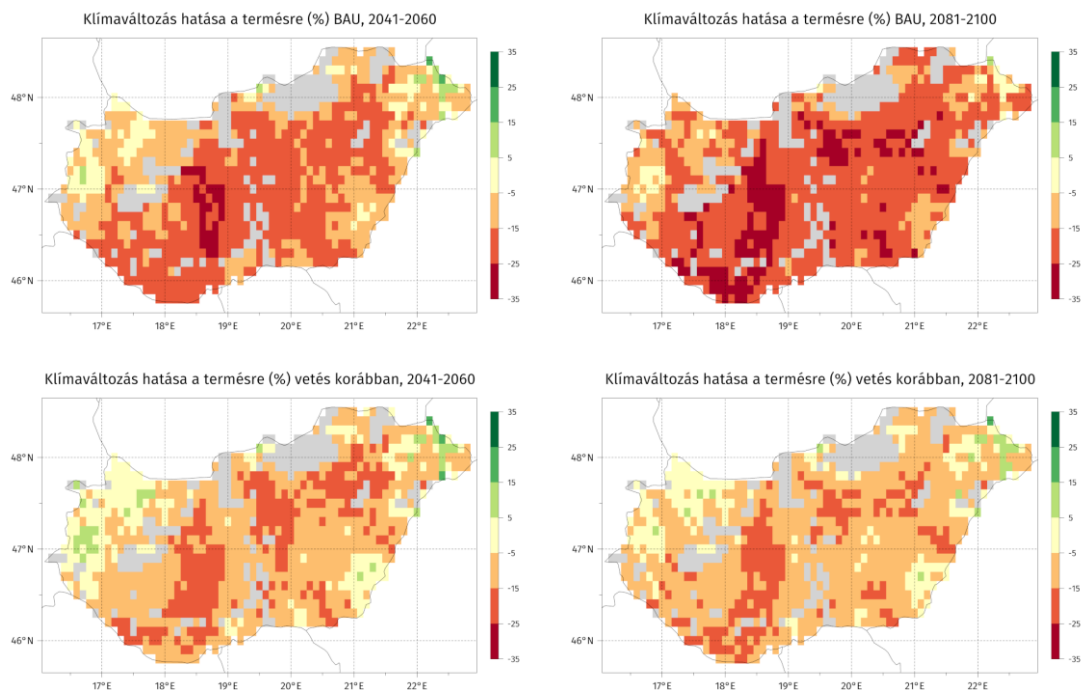
3.3.4 Az Agromó alkalmazása: alkalmazkodási stratégiák

A klímaváltozás várható hatásai első sorban a tavaszi vetésű szántóföldi növényeinkre jelentenek kockázatot (3.39 ábra). Ennél fogva, a lehetséges alkalmazkodási stratégiák vizsgálata során ezen növényekre összpontosítottunk. Az alábbiakban a kukorica termesztésére vonatkozó eredményeket mutatom be.

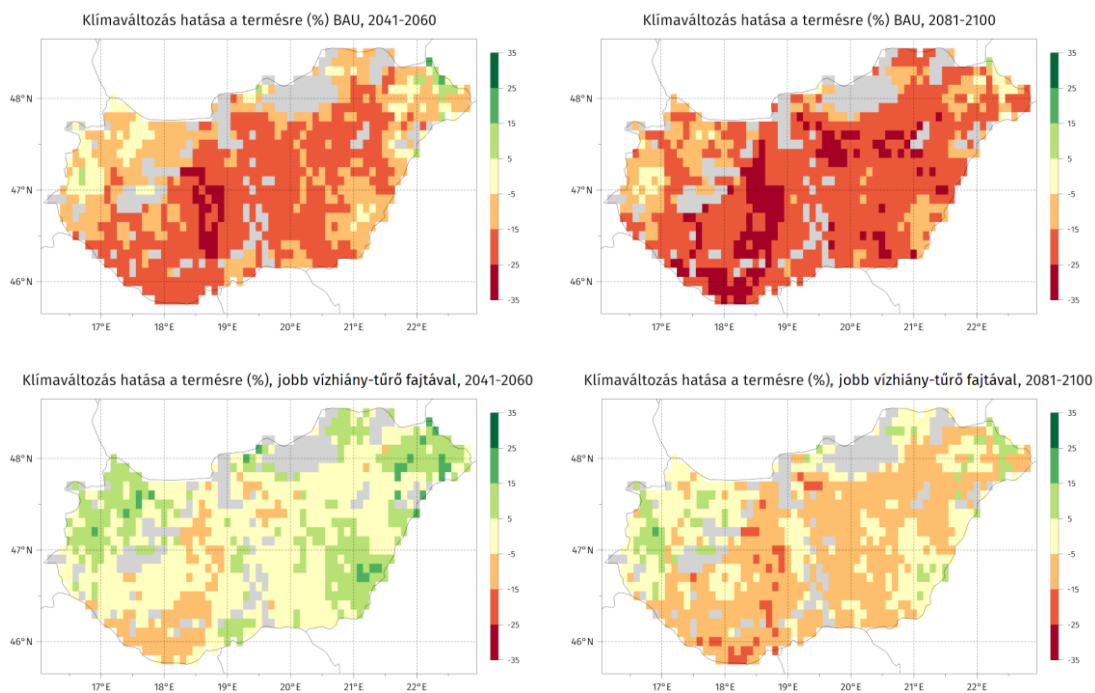
A kukorica terméskieséseit első sorban a virágzás időszakában egyre nagyobb valószínűséggel bekövetkező aszályos és/vagy hőstresszes körülmények okozzák a jövőben. Ennek elkerülésének egyik lehetséges módja a korábbi vetés, amelyre a havi átlaghőmérsékletek fokozatos emelkedése okán elmaradó áprilisi fagyok is lehetőséget biztosítanak. A szimulációk eredmények alapján a vetési idő három héttel történő előrehozásával (04.20. → 03.31.) jelentős mértékben mérsékelhető a terméskiesés. Országos átlagban, a 2081-2100 időszakra vonatkozóan, az alkalmazkodás nélküli 19,3%-os terméscsökkenés, korábbi vetéssel, 9,9%-osra mérsékelhető (3.47 ábra).

A martonvásári nemesítés egyik fő iránya az egyre jobb vízhasznosítású illetve a vízhiányt egyre jobban tűrő hibridek létrehozása. A Biome-BGCMuSo modellben egyetlen paraméterrel jellemezzük a növényeket stressz-tűrés szempontjából. Ennek az értékén 10%-ot javítva, azaz jobb vízhiány-tűrő kukoricával végzett in-

silico kísérletek alapján, ezzel az alkalmazkodási módszerrel a várható termés kiesések számottevő mértékben csökkenthetők (3.48 ábra).



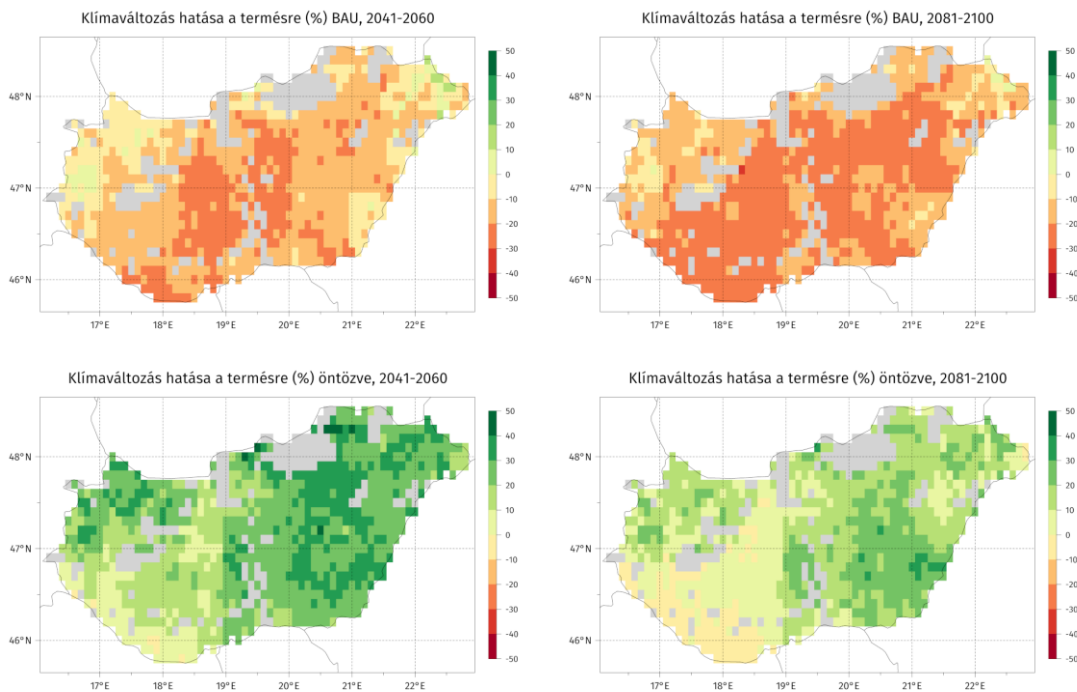
3.47 ábra: Kukorica termésátlagainak változása jelen időszakhoz (2001-2020) képest, alkalmazkodás nélkül (BAU) illetve három héttel korábbi vetéssel.



3.48 ábra: Kukorica termésátlagainak változása jelen időszakhoz (2001-2020) képest, alkalmazkodás nélkül (BAU) illetve a vízhiányt jobban tűrő fajta vetésével.

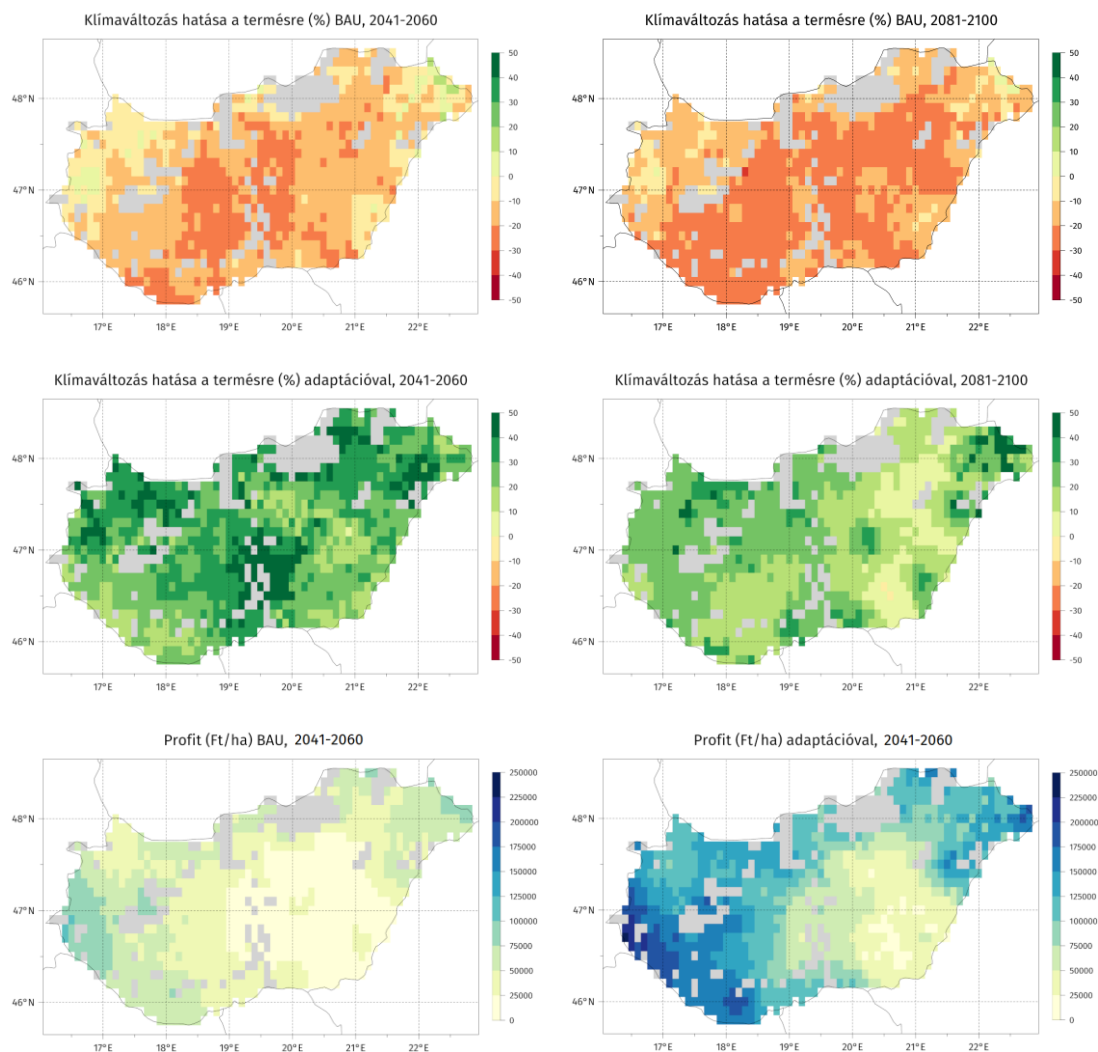
Országos átlagban, a 2081-2100 időszakra vonatkozóan, az alkalmazkodás nélküli 19,3%-os termés kiesés 5% alá csökkenthető.

A kukorica hozamkieséseinek fő oka a nyári félév csapadékmennyiségének illetve a csapadékeloszlás egyenletességének várható csökkenése. A vízhiány kiküszöbölésének legkézenfekvőbb módja az öntözés, ami azonban a gyakorlatban sok helyen a környezeti és/vagy anyagi feltételek miatt nem megvalósítható. Ezen akadályok figyelmen kívül hagyásával megvizsgáltuk, hogy gazdaságos mennyiségű öntözővíz felhasználásával, a klímaváltozás negatív hatásai az ország teljes területén kiküszöbölhetők és a jelenleginél akár 30%-kal magasabb termések is elérhetők, még a távolabbi, 2081-2100 időszakban is (**3.49 ábra**).



3.49 ábra: Kukorica termésátlagainak változása jelen időszakhoz (2001-2020) képest, alkalmazkodás nélkül (BAU) illetve gazdaságos mennyiségű öntözővíz felhasználásával.

A legkedvezőbb képet természetesen akkor kapjuk, ha mindhárom előzőekben bemutatott alkalmazkodási stratégiát egyszerre alkalmazzuk. Ezek segítségével, az in-silico kísérletek alapján, az ország teljes terület jelentős hozamnövekedés érhető el a kukorica változatlanul nyereségesen termelhető hazánkban (**3.50 ábra**). Összhangban a **3.2.3 fejezet**ben bemutatott statisztikai modell eredményeivel, az előnyös antropogén tényezők együttes hatása kulcsfontosságú szerephez juthat a klímaváltozás negatív hatásainak csökkentésében, és képes lehet ellensúlyozni az aszályok és a hőhullámok okozta egyre komolyabb termés kieséseket.



3.50 ábra: Kukorica termésátlagainak változása jelen időszakhoz (2001-2020) képest, valamennyi adaptációs módszer (korábbi vetés, jobb vízhiány-tűrő fajta, öntözés) együttes alkalmazásával. A profit meghatározásához a 2001-2020 időszak bevétel- és költség-oldali változásait vetítettük előre lineáris trendet feltételezve.

3.3.5 Fejlesztési lehetőségek

A fejlesztések első csoportja a Biome-BGCMuSo modell számítási pontosításának javításához és használati körének bővítéséhez kapcsolódik.

- A szakirodalmi adatok és saját méréseink is azt mutatják, hogy a növény főbb részeinek szén:nitrogén aránya a tenyésztési időszak során számottevően változik. Ennek megfelelően, a modell következő változataiban fejlődési fázis függő C:N paramétereket adhat meg a felhasználó a megfelelő bemenő adatfájlban.
- A modell jelen változata csak a nedvesség- és hőstressz hatását képes szimulálni. Fontos fejlesztési irány a különböző biotikus stresszek hatásának

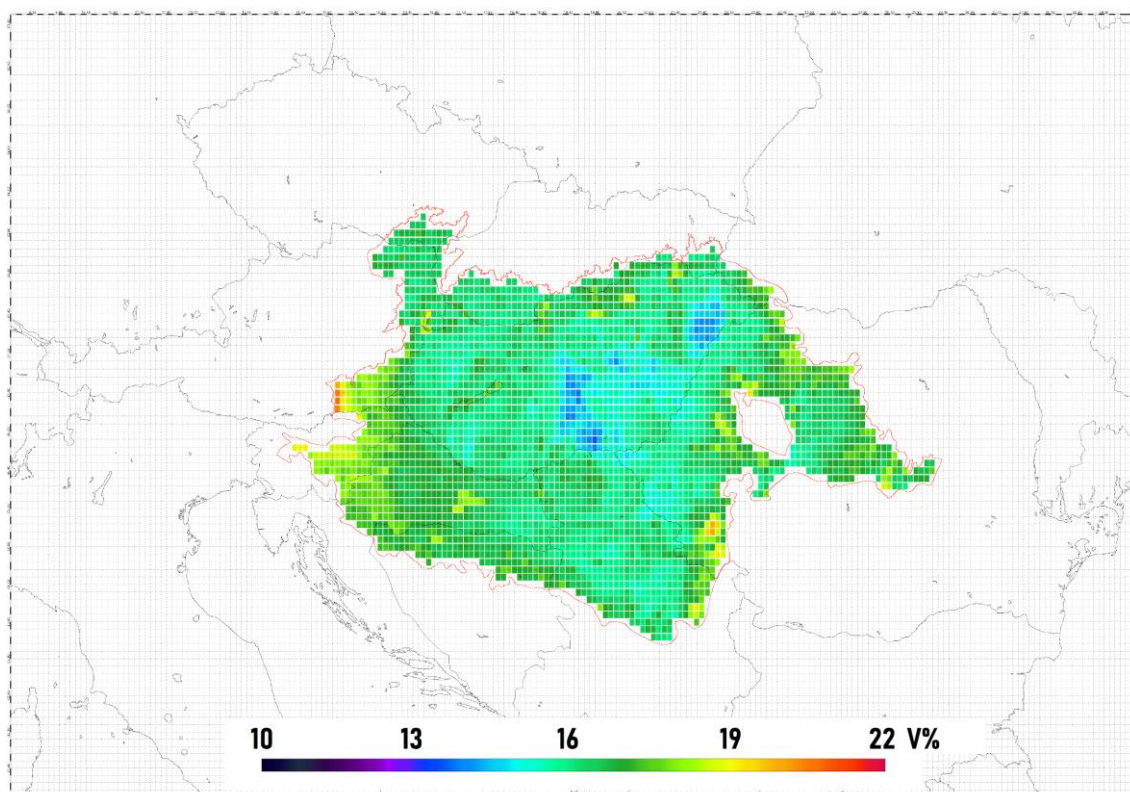
modellbe építése. A legkönnyebben azon stresszfajták hatásának szimulációja megoldható, amelyek a fotoszintetizáló levélfelület csökkentése révén fejtik ki hatásukat.

- Kiemelt fejlesztési cél az, hogy a modell minél több növény szimulációjára legyen képes. Szántóföldi növényeink közül a egyenlőre csak az őszi búza, őszi árpa, repce, kukorica és napraforgó paramétereinek kalibrációja készült el. A KSH megyei termésadatai valamint a CIRM kalibrációs eljárás (**3.3.1 fejezet, 77. oldal**) felhasználásával a burgonya, a zab, a rozs, a szója, a bab, a borsó és a cukorrépa paramétereit tervezzük meghatározni a közeljövőben.

Az AgroMo keretrendszer fejlesztésével szintén tovább bővíthető a beágyazott talaj-növény modell felhasználási köre, míg más fejlesztésekkel a modell használatát tervezzük megkönnyíteni.

- A természetes ökoszisztémákat általában több növényfaj alkotja, ahol a különböző fajok, eltérő környezeti feltételek mellett fejlődnek és növekednek a legintenzívebben. Ezért az ún. vegyes növényállományok szimulációja nagy kihívás. *Pulina et al. (2018)* módszere időben változó növényi paraméterek alkalmazásával oldja meg ezt a feladatot. Mivel több összehasonlításban is ígéretes eredményeket produkált, az AgroMo rendszerben is tervezzük az alkalmazását.
- A kalibráció akkor tud igazán eredményes lenni, megbízható modell paramétereket szolgáltatni, ha minél több fajta adatot használunk a folyamat során. Ezért készítjük majd el a CIRM módszer azon változatát, amely egyszerre több célfüggvény optimumát keresi. Az így kalibrált modell valamennyi részfolyamatot elfogadható pontossággal szimulál; nem fordulhat elő például az, hogy a termés mennyiségének számítása megfelelő pontosságú, de közben a növényi vízfelvétel túlbecsült és így a talaj nedvességtartalmának szimulációja is pontatlan.
- A nagyobb területre vonatkozó, rácsalapú szimulációk esetén, a vízszintes irányú energia- és anyagáramokat elhanyagolják, a modellben nincs információ csere a rács celláira vonatkozó szimuláció között; tulajdonképpen nagyszámú, független, 1 dimenziós szimuláció történik. A Biome-BGCMuSo és egy kétdimenziós hidrológiai modell összekapcsolásával tervezzük megvalósítani az AgroMo-2D rendszert, amely a víztest-talaj-növény rendszer egyes részfolyamatira már kidolgozott és működő modelleket egyetlen integrált modellezési keretrendszerbe foglalja. Ennek köszönhetően az AgroMo-2D többek között árhullámok hatásának és a talajerózió szimulációjára is képes lesz.

- Az AgroMo rendszert úgy készítettük el, hogy tetszőleges modell bemenő és kimenő adatait kezelni tudja. Mivel számos modell futtatható állománya és dokumentációja szabadon elérhető terveink között szerepel egy olyan egyedülálló megoldás (super-ensemble), amely egyetlen keretrendszeren belül több modell futtatását is lehetővé teszi és a modell-eredmények átlagával vagy mediánjával írja le a modellezett ökoszisztéma működését.
- Összekapcsoljuk az AgroMo rendszert az ECMWF (klíma), SoilGrids (talaj), és a Sentinel-2 műholdas távérzékelte adatokat tartalmazó adatbázisokkal. Így az AgroMo rendszer modelljei a Föld felszínének tetszőleges pontjára futtathatók lesznek, sőt a távérzékelte adatok segítségével még a helyspecifikus kalibrációjuk is megoldható. Ennek első tesztje egy olyan esettanulmány, amely a dolgozatban is bemutatott módszertan **(3.3.3-4 fejezet)** teljes Kárpát-medencére történő kiterjesztése lesz, amelyhez természetesen ezt a területet lefedő adatbázisokra is szükség van.
- Az előző pontban felvázolt fejlesztéshez igazodva, az AgroMo térképes megjelenítő moduljának következő változata már tetszőleges méretű és felbontású adatrács megjelenítésére is alkalmas lesz **(3.51 ábra)**.



3.51 ábra: A talaj felvehető vízkészlete (V%) a Kárpát-medencében, a SoilGrids adatbázis alapján. Térbeli felbontás: 0,1°

4. Legfontosabb eredmények

- 4.1 Ökoszisztéma modellek használatát támogató alkalmazásokat fejlesztettem, amelyek segítségével fontos bemenő adatok határozhatók meg, mért értékek hiányában.
- 4.2 Proplanta néven elkészítettem a MTA TAKI – MTA MgKI környezet- és költségkímélő trágyázási szaktanácsadási rendszer szoftver változatát. A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően, a Proplantával ma már 150 növényfajra adható szaktanács, és a rendszer idő közben elnyerte a 2007. évi Innovációs Nagydíjat, 2021-ben nemzeti Minőség-Innováció díjat majd 2022-ben nemzetközi Minőség-Innováció díjat nyert.
- 4.3 Statisztikai modelleket fejlesztettem, melyek segítségével előre jeleztük az Egyesült Királyság tejelő szarvasmarha, valamint Magyarország kukorica termesztési ágazata teljesítményének jövőbeli változásait.
- 4.4 A vezetésemmel, a régióban egyedülálló agro-pedo-klimatológiai kísérleti platformot hoztunk létre Martonvásáron, amely ötvözi a tartamkísérletek hagyományait, illetve a klímakamrás stresszkutatások tapasztalatait a legmodernebb mérési és infokommunikációs technológiák által kínált lehetőségekkel. A kísérleti platform eredményeit elsősorban az AgroMo modellezési keretrendszer modelljének fejlesztésére és kalibrálására használjuk fel azzal a céllal, hogy a modell egyre pontosabban írja le az agro-ökoszisztéma folyamatait.
- 4.5 Terveim alapján és szakmai irányítással, rugalmasan adaptálható (moduláris, nyílt forráskódú) Integrált Modellezési Keretrendszert (AgroMo) készítettünk, amely a magyar mezőgazdasági rendszer működését szimulálja térben explicit módon, több lehetséges léptékben. Az AgroMo rendszerben három olyan fejlesztés is helyet kapott, amelyek világviszonylatban is újdonságnak számítanak: (1) Talajvíz hatásának figyelembe vétele kaszkád nedvességforgalmi modell esetében; (2) CIRM modell-kalibrációs modul, amellyel adatszegény környezetben is elvégezhető a kalibráció, és amely kizárólag realiztikus eredményeket szolgáltató paraméter-készleteket eredményez; (3) SQL metanyelv, amely hatékonyabbá teszi a modell eredmények értelmezését.
- 4.6 Az AgroMo rendszerben végrehajtott in-silico kísérletek segítségével klímaváltozási hatástanulmányt készítem, valamint alkalmazkodási stratégiákat dolgoztam ki és vizsgáltam meg, melyek alapján:
- Az **őszi/tavaszi** vetésű **növények hozama** várhatóan **növekszik/csökken**
 - Megfelelő alkalmazkodási módszerekkel **a kukorica termésszintjei** gazdaságosan **növelhetők**, és a nitrát lemosódás mértéke is csökkenthető
 - Szántóföldi növénytermesztés mellett is növelhető a talaj összes széntartalma; **a szántóterületek is lehetnek nettó szénmegkötők.**
 - A természetes **gyepek nettó szénmegkötők** és produkciójuk várhatóan növekszik
 - A **lombhullató erdők** talajában elhanyagolható mértékű a széntartalom növekedése, azonban a faállományban **évi 5-8 tonna szén kerül megkötésre hektáronként.** Az alföldi erdők produkciójának jelentős csökkenése várható.

5. Irodalomjegyzék

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Bartholy, J. (2003) Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 55: 187–196.

<https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16695>

Bassu, S., Brisson, N., Durand, J-L. Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., M. Adam, C. Baron, B. Basso, C. Biernath, H. Boogaard, S. Conijn, M. Corbeels, D. Deryng, G. De Sanctis, S. Gayler, P. Grassini, J. Hatfield, S. Hoek, C. Izaurrealde, R. Jongschaap, A.R. Kemanian, K.C. Kersebaum, S-H. Kim, N.S. Kumar, D. Makowski, C. Müller, C. Nendel, E. Priesack, M.V. Pravia, F. Sau, I. Shcherbak, F. Tao, E. Teixeira, D. Timlin, K. Waha. (2014) How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology* 20(7): 2301–2320.

<https://doi.org/10.1111/gcb.12520>

Beer (1852) Determination of the absorption of red light in colored liquids. (in German) *Annalen der Physik und Chemie* 162(5): 78–88.

<https://doi.org/10.1002/andp.18521620505>

Bechini, L., Ducco, G., Donatelli, M., Stein, A. (2000) Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 81: 29–42.

[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00170-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00170-5)

Bellocchi, G., Acutis, M., Fila, G., Donatelli, M. (2002) An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. *Agronomy Journal* 94(6): 1222–1233.

<https://doi.org/10.2134/agronj2002.1222>

Bellocchi, G., Rivington, M., Matthews, K., Acutis, M. (2015) Deliberative processes for comprehensive evaluation of agroecological models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 589–605.

<https://doi.org/10.1007/s13593-014-0271-0>

Bohmanova, J., Misztal, I., Cole, J.B. (2007) Temperature-Humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *Journal of Dairy Science* 90: 1947–1956.

<https://doi.org/10.3168/jds.2006-513>

Boote, K.J., Jones, J. W., Hoogenboom, G. (1998) Simulation of crop growth: CROPGRO model. Chapter 18. In Peart, R.M., Curry R.B. (eds.), *Agricultural systems modeling and simulation* (pp. 651–692). Marcel Dekker, Inc. ISBN 9780367400859

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S.,

Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.M., Delécolle, R. (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311–346.
<https://doi.org/10.1051/agro:19980501>

Bristow, R.L., Campbell, G.S. (1984) On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 31: 159–166.
[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)

Buckingham, E. (1907) *Studies on the Movement of Soil Moisture*. US Department of Agriculture, Bureau of Soils No. 38.

Burnham, K.P., Anderson, D.R. (2002) *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach (Second Edition)*. Springer, New York. ISBN: 978-0-387-22456-5

Campbell, G.S. (1974) A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science* 117: 311–314.
<https://doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>

Castaño-Sánchez, J.P., Rotz, C.A., Karsten, H.D., Kemanian, A.R. (2020) Elevated atmospheric carbon dioxide effects on maize and alfalfa in the Northeast US: A comparison of model predictions and observed data. *Agricultural and Forest Meteorology* 291: 108093.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108093>

Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Slingo, J.M., Craufurd, P.Q., Grimes, D.I.F. (2004) Design and optimization of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 124: 99–120.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.01.002>

Coleman, D.C., Swift, D.M., Mitchell, J.E. (2004) From the frontier to the biosphere: a brief history of the USIBP grasslands biome program and its impact on scientific research in North America. *Rangelands* 26(4): 8–15.
<https://www.jstor.org/stable/4001870>

Coughenour, M.B., McMaughton, S.J., Wallace, L.L. (1984) Modelling primary production of perennial graminoids - uniting physiological processes and morphometric traits. *Ecological Modelling* 23: 101–134.
[https://doi.org/10.1016/0304-3800\(84\)90121-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90121-2)

Croce, P., Formichi, P., Landi, F. (2021) Enhancing the Output of Climate Models: A Weather Generator for Climate Change Impact Studies. *Atmosphere* 12: 1074.
<https://doi.org/10.3390/atmos12081074>

Crochemore, L., Perrin, C., Andréassian, V., Ehret, U., Seibert, S.P., Grimaldi, S., Gupta, H., Paturel, J-E. (2015) Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal* 60(3): 402–423.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.903331>

Curry, R.B., Peart, R.M., Jones, J.W., Boote, K.J., Allen Jr., L.H. (1990) Response of crop yield to predicted changes in climate and atmospheric CO₂ using simulation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 33: 1383–1390.
 doi: 10.13031/2013.31484

Cseresnyés, I., Pokovai, K., Barcza, Z., Marton, T.A., Fodor, N. (2022) Root electrical capacitance as an indicator of wheat growth and yield in a free-air carbon dioxide enrichment (FACE) experiment. *Plant and Soil* 474: 321–335.
<https://doi.org/10.1007/s11104-022-05336-1>

Dane, J.H., Puckett, W.E. (1992) Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: van Genuchten, M. Th. et al. (eds.) *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. 389–403. University of California. Riverside, CA.

Darcy, H. (1856) *Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon*. Victor Dalmon, Paris.

de Wit, C.T. (1965) *Photosynthesis of leaf canopies*. Agricultural Research Report no. 663, PUDOC, Wageningen, The Netherlands. 57 pp.
<https://edepot.wur.nl/187115>

de Wit, C.T., Brouwer, R., Penning de Vries, F.W.T. (1970) The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik I. (ed.), *Prediction and management of photosynthetic productivity*, *Proceedings of the International Biological Program/Plant Production Technical Meeting*, Trebon, PUDOC, Wageningen, The Netherlands (1970), pp. 47–70.
<https://edepot.wur.nl/198106>

de Wit, C.T. et al. (1978) *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, The Netherlands (1978), p. 148.
<https://edepot.wur.nl/172216>

de Wit, C.T., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., Supit, I., van der Wijngaart, R., van Diepen K. (2019) 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems* 168: 154–167.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018>

Di Castro, F., Bertini, E. (2019) Surrogate decision tree visualization interpreting and visualizing black-box classification models with surrogate decision tree: 2019 Joint ACM IUI Workshops, ACM IUI-WS 2019. *CEUR Workshop Proceedings* 2327.

Dobi, I. (2002) Napi meteorológiai idősorok többdimenziós sztochasztikus modellezése. Ph.D. doktori értekezés. Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Matematika Doktori Iskola, Alkalmazott Matematika Program.

Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Havasi, Á., Horváth, F., Ittész, D., Bartholy, J. (2014) Bridging the gap between climate models and impact studies: The FORESEE Database. *Geoscience Data Journal* 2:1–11.
<https://doi.org/10.1002/gdj3.22>

Donatelli, M., Campbell, G.S. (1998) A simple model to estimate global solar radiation. In: *Proceedings of the Fifth European Society of Agronomy Congress*, vol. 2, The Slovak Agricultural University, Nitra, Slovak Republic, pp. 133–134.

Donatelli, M., Cerrani, I., Fanchini, D., Fumagalli, D., Rizzoli, A. (2012) Enhancing Model Reuse via Component-Centered Modeling Frameworks: the Vision and Example Realizations. In: *Managing Resources of a Limited Planet: Pathways and Visions under Uncertainty*. 6th International Congress on Environmental Modelling and Software, July 2012; Leipzig (Germany).
<https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1789&context=iemssconference>

Drude, P. (1900). Zur Elektronentheorie der Metalle. *Annalen der Physik*. 306: 566–613.
<https://doi.org/10.1002/andp.19003060312>

Dumont, B., Basso, B., Leemans, V., Bodson, B., Destain, J-P., Destain, M-F. (2015) Systematic analysis of site-specific yield distributions resulting from nitrogen management and climatic variability interactions. *Precision Agriculture* 16: 361–384.
<https://doi.org/10.1007/s11119-014-9380-7>

Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A., Hanau, R. (1967) A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia* 38(4): 181–205.
 DOI:10.3733/hilg.v38n04p18

Ewert, F., Rötter, R.P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., van Ittersum, M.K., Janssen, S., Rivington, M., Semenov, M.A., Wallach, D., Porter, J.R., Stewart, D., Verhagen, J., Gaiser, T., Palosuo, T., Tao, F., Nendel, C., Roggero, P.P., Bartošová, L., Asseng, S. (2015) Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environmental Modelling & Software* 72: 287–303.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.003>

Fodor, N. (2002) A nedvességforgalom modellezése növénytermesztési modellekben. Ph.D. értekezés. Debreceni Egyetem.

Fodor, N., Máthéné-Gáspár, G., Pokovai, K., Kovács, G.J. (2003) 4M-software package for modelling cropping systems. European Journal of Agronomy 18: 389–393.

[https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00126-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00126-0)

Fodor, N., Kovács, G.J. (2005) Sensitivity of crop models to the inaccuracy of meteorological observations. Physics and Chemistry of the Earth 30: 53–57.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.020>

Fodor, N., Rajkai, K. (2005) Számítógépes program a talajok fizikai és vízgazdálkodási jellemzőinek egyéb talajjellemzőkből történő számítására (TALAJTANonc 1.0). Agrokémia és Talajtan 54(1-2): 25–40.

Fodor, N. (2006) 4M - Software for modelling and analysing cropping systems. Journal of Universal Computer Science 12: 1196–1207.

DOI: 10.3217/jucs-012-09-1196

Fodor, N., Dobi, I., Mika, J., Szeidl, L. (2010) MV-WG: a new multi-variable weather generator. Meteorology and Atmospheric Physics 107(3-4): 91–101.

<https://doi.org/10.1007/s00703-010-0074-z>

Fodor, N., Mika, J. (2011) Using analogies from soil science for estimating solar radiation. Agricultural and Forest Meteorology 151: 78–86.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.006>

Fodor, N., Rajkai, K. (2011) Computer program (SOILarium 1.0) for estimating the physical and hydrophysical properties of soils from other soil characteristics. Agrokémia és Talajtan 60(Suppl): 27–40.

Fodor, N., Máthéné, G.G., Árendás, T., Csathó, P. (2011) To ban or not to ban February fertilization in Hungary? Applied Ecology and Environmental Research 9: 245–252.

DOI: 10.15666/aeer/0903_245252

Fodor, N., Csathó, P., Árendás, T., Németh, T. (2011) New environment-friendly and cost-saving fertiliser recommendation system for supporting sustainable agriculture in Hungary and beyond. Journal of Central European Agriculture 12: 53–69.

<https://doi.org/10.5513/JCEA01/12.1.880>

Fodor, N. Sándor, R., Orfanus, T., Lichner, L., Rajkai, K. (2011) Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. Geoderma 165(1): 60–68.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.004>

Fodor, N., Pásztor, L., Németh, T. (2012) Coupling the 4M crop model with national geo-databases for assessing the effects of climate change on agro-ecological characteristics of Hungary. International Journal of Digital Earth 7: 391–410.

<https://doi.org/10.1080/17538947.2012.689998>

Fodor, N., Csathó, P., Árendás, T., Radimszky, L., Németh, T. (2013) Crop Nutrient Status and Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Balances Obtained in Field Trials Evaluating Different Fertilizer Recommendation Systems on Various Soils and Crops in Hungary. Communications in Soil Science and Plant Analysis 44: 996–1010.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2012.747611>

Fodor, N., Foskolos, A., Topp, C.F.E., Moorby, J.M., Pásztor, L., Foyer, C.H. (2018) Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts of climate change on the milk production of dairy cows in the United Kingdom. PLOS ONE 13: e0197076.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197076>

Fodor, N., Pásztor, L., Németh, T. (2014) Coupling the 4M crop model with national geo-databases for assessing the effects of climate change on agro-ecological characteristics of Hungary. International Journal of Digital Earth 7(5): 391–410.

<https://doi.org/10.1080/17538947.2012.689998>

Franke, J.A., Müller, C., Elliott, J., Ruane, A.C., Jägermeyr, J., Snyder, A., Dury, M., Falloon, P.D., Folberth, C., François, L., Hank, T., Izaurralde, R.C., Jacquemin, I., Jones, C., Li, M., Liu, W., Olin, S., Phillips, M., Pugh, T.A.M., Reddy, A., Williams, K., Wang, Z., Zabel, F., Moyer, E.J. (2020) The GGCM Phase 2 emulators: global gridded crop model responses to changes in CO₂, temperature, water, and nitrogen (version 1.0), Geoscientific Model Development 13: 3995-4018.

<https://doi.org/10.5194/gmd-13-3995-2020>

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1982) Estimating potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 108: 225–230.

<https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>

Harnos, Zs. (2008) Climate change and some impact on the environment and agriculture modelling case study. “Klíma-21” Füzetek 55: 5–22.

Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Pintér, K., Nagy, Z. (2012) Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. Ecological Modelling 226: 99–119.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008>

Hidy, D., Barcza, Z., Marjanovic, H., Ostrogovic Sever, M. Z., Dobor, L., Gelybó, G., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S., Thornton, P., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., Nagy, Z., (2016) Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development* 9: 4405–4437.

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-4405-2016>

Hidy, D., Barcza, Z., Hollós, R., Dobor, L., Ács, T., Zacháry, D., Filep, T., Pásztor, L., Incze, D., Dencső, M., Tóth, E., Merganicova, K., Thornton, P., Running, S., Fodor N. (2022) Soil-related developments of the Biome-BGCMuSo v6.2 terrestrial ecosystem model. *Geoscientific Model Development* 15: 2157–2181.

<https://doi.org/10.5194/gmd-15-2157-2022>

Hoffmann, H., and 32 others (2016) Impact of Spatial Soil and Climate Input Data Aggregation on Regional Yield Simulations. *PLOS ONE* 11(4): e0151782.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151782>

Hollós, R., Fodor, N., Merganičová, K., Hidy, D., Árendás, T., Grünwald, T., Barcza, Z. (2022) Conditional interval reduction method: a possible new direction for the optimization of process based models. *Environmental Modelling & Software* 158: 105556.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105556>

IBP (1964) The International Biological Program (IBP), 1964-1974, <http://www.nasonline.org/about-nas/history/archives/collections/ibp-1964-1974-1.html> (megtekintve: 2020. 10. 29.)

IPCC (2013) Climate Change 2013: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jahn, S., Hertig, E. (2022) Using Clustering, Statistical Modeling, and Climate Change Projections to Analyze Recent and Future Region-Specific Compound Ozone and Temperature Burden Over Europe. *GeoHealth* 6(4): e2021GH000561.

<https://doi.org/10.1029/2021GH000561>

Jamieson, P.D., Porter, J.R., Goudriaan, J., Ritchie, J.T., van Keulen, H., Stol, W. (1998) A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2, and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crop Research* 55: 23–44.

[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00060-9)

Johnson, I., Thornley, J.H.M. (1983) Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence and applied to grass. *Plant, Cell & Environment* 6: 721–729.

https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11588103_6_9

Keig, G., McAlpine, J. R. (1969) WATBAL, a computer system for the estimation and analysis of soil moisture regimes from simple climatic data. CSIRO, Division of Land Research, Canberra.

Kern, A., Barcza, Z., Marjanović, H., Árendás, T., Fodor, N., Bónis, P., Bognár, P., Lichtenberger, J. (2018) Statistical modelling of crop yield in Central Europe using climate data and remote sensing vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology* 260-261: 300–320.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.009>

Kern, A., Dobor, L., Hollós, R., Marjanović, H., Torma, Cs.Zs., Kis, A., Fodor, N., Barcza, Z. (2022) Climate data for 1951–2100 for scientific, societal and policy purposes in Central Europe: the FORESEE database. In: Book of abstracts: Natural resources, green technology and sustainable development. p. 32

Kimball, B.A., Thorp, K.R., Boote, K.J., Stöckle, C., Suyker, A.E., Evett, S.R., Brauer, D.K., Coyle, G.G., K.S., Copeland, G.W., Marek, P.D., Colaizzi, M., Acutis, S., Alimaghani, S., Archontoulis, F., Babacar, Z., Barcza, B., Basso, P., Bertuzzi, J., Constantin, M.DeA., Migliorati, B., Dumont, J-L., Durand, N., Fodor, T., Gaiser, P., Garofalo, S., Gayler, L., Giglio, R., Grant, K., Guan, G., Hoogenboom, Q., Jiang, S-H., Kim, I., Kisekka, J., Lizaso, S., Masia, H., Meng, V., Mereu, A., Mukhtar, A., Perego, B., Peng, E., Priesack, Z., Qi, V., Shelia, R., Snyder, A., Soltani, D., Spano, A., Srivastava, A., Thomson, D., Timlin, A., Trabucco, H., Webber, T., Weber, M., Willaume, K., Williams, M., van der Laan, D., Ventrella, M., Viswanathan, X., Xu, W., Zhou (2023) Prediction of Evapotranspiration and Yield of Maize An Inter-comparison among 41 Maize Models. *Agricultural and Forest Meteorology* 333, 109396.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109396>

Kinnell, P.I.A., Yu, B. (2020) CLIGEN as a Weather Generator for Predicting Rainfall Erosion Using USLE Based Modelling Systems. *Catena* 194: 104745.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104745>

Koós, S., Pirkó, B., Szatmári, G., Csathó, P., Magyar, M., Szabó, J.[‡], Fodor, N., Pásztor, L., Laborczi, A., Pokovai, K., Szabó, A. (2021) Influence of the Shortening of the Winter Fertilization Prohibition Period in Hungary Assessed by Spatial Crop Simulation Analysis. *Sustainability* 13: 417.

<https://doi.org/10.3390/su13010417>

Kropff, M.J., van Laar, H.H., Matthews, R.B. (eds.) (1994) ORYZA1: An ecophysiological model for irrigated rice production. SARP Research Proceedings, Wageningen.

Maxwell, J.C. (1865) A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 155: 459–512.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>

Lang, A.R.G. (1987) Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology* 41: 179–186.
[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(87\)90078-5](https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90078-5)

Liu, D.L., Scott, B.J. (2001) Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 106: 41–59.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00173-8)

Lobell, D.B. and Burke, M.B. (2010) On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1443–1452.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>

Luxmore, R.J. (1989) Modeling chemical transport, uptake, and effects in the soil-plant-litter system. In: Johnson, D.W. and Van Hook, R.I. (eds.) *Analysis of biogeochemical cycling processes in Walker Branch Watershed*. Springer, New York, pp 351–384.

Marton, T.A., Kis, A., Zubor-Nemes, A., Kern, A., Fodor, N. (2020) Human Impact Promotes Sustainable Corn Production in Hungary. *Sustainability* 12: 6784.
<https://doi.org/10.3390/su12176784>

Martre, P., D. Wallach, S. Asseng, F. Ewert, J.W. Jones, R.P. Rötter, K.J. Boote, A.C. Ruane, P.J. Thorburn, D. Cammarano, J.L. Hatfield, C. Rosenzweig, P.K. Aggarwal, C. Angulo, B. Basso, P. Bertuzzi, C. Biernath, N. Brisson, A.J. Challinor, J. Doltra, S. Gayler, R. Goldberg, R.F. Grant, L. Heng, J. Hooker, L.A. Hunt, J. Ingwersen, R.C. Izaurralde, K.C. Kersebaum, C. Müller, S.N. Kumar, C. Nendel, G. o'Leary, J.E. Olesen, T.M. Osborne, T. Palosuo, E. Priesack, D. Ripoche, M.A. Semenov, I. Shcherbak, P. Steduto, C.O. Stöckle, P. Stratonovitch, T. Streck, I. Supit, F. Tao, M. Travasso, K. Waha, J.W. White, J. Wolf. (2015) Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global Change Biology* 21: 911–925.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12768>

Máthé-Gáspár, G., Fodor, N. (2012) Modeling the phosphorus balance of different soils using the 4M crop model. *Plant Soil and Environment* 58: 391-8
<https://doi.org/10.17221/100/2012-PSE>

McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M. (1996) APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* 50: 255–271.
[https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)

MDI (2022) Mini Disk Infiltrrometer – Unsaturated Hydraulic Conductivity.
WEB: <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/mini-disk-infiltrrometer-unsaturated-hydraulic-conductivity> (megtekintve: 2022.07.14)

Megyes, A. (2001) Növénytermesztési tényezők értékelése a CERES-Maize 3.5 modellel talajművelési tartamkísérletben. Ph.D. értekezés. Debreceni Egyetem.

Minoli, S., Müller, C., Elliott, J., Ruane, A.C., Jägermeyr, J., Zabel, F., Dury, M., Folberth, C., François, L., Hank, T., Jacquemin, I., Liu, W., Olin, S., Pugh, T.A.M. (2019) Global Response Patterns of Major Rainfed Crops to Adaptation by Maintaining Current Growing Periods and Irrigation. *Earth's Future*, 7(12): 1464–1480.
<https://doi.org/10.1029/2018EF001130>

Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12: 513–522.
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

Mukundan, R., Acharya, N., Gelda, R.K., Frei, A., Owens, E.M. (2019) Modeling streamflow sensitivity to climate change in New York City water supply streams using a stochastic weather generator. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 21: 147–158.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.01.001>

Müller, C., Franke, J., Jägermeyr, J., Ruane, A.C., Elliott, J., Moyer, E., Heinke, J., Falloon, P.D., Folberth, C., François, L., Hank, T., Izaurrealde, R.C., Jacquemin, I., Liu, W., Olin, S., Pugh, T.A.M., Williams, K., Zabel, F. (2021) Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and CMIP5 and CMIP6 climate scenarios. *Environmental Research Letters* 16(3): 034040.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd8fc>

NOAA GML (2022) Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases: <https://www.gml.noaa.gov/ccgg/data/> (Elérés dátuma: 2022.11.18)

NRC (1971) National Research Council. A guide to environmental research on animals. National Academy Press. Washington DC.

Nyéki, A., Milics, G., Kovács, A.J., Neményi, M. (2013) Improving yield advisory models for precision agriculture with special regards to soil compaction in maize production. In: Stafford, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '13*. pp. 443–448.
<https://doi.org/10.3920/978-90-8686-778-3>

Ónodi, G., Botta-Dukat, Z., Kröel-Dulay, Gy., Lellei-Kovács, E., Kertész, M. (2018) Reduction in primary production followed by rapid recovery of plant biomass in response to repeated mid-season droughts in a semiarid shrubland. *Plant Ecology* 219: 517–526.
<https://doi.org/10.1007/s11258-018-0814-6>

Pásztor, L., Laborczi, A., Takács, K., Illés, G., Szabó, J., Sztamári G. (2020) Progress in the elaboration of GSM conform DSM products and their functional utilization in Hungary. *Geoderma Regional* 21. ISSN 2352-0094.

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00269>

Pokovai, K. and Fodor, N. (2019) Adjusting Ceptometer Data to Improve Leaf Area Index Measurements. *Agronomy* 9(12): 866

<https://doi.org/10.3390/agronomy9120866>

Pulina, A., Lai, R., Salis, L., Seddaiu, G., Roggero, P.P., Bellocchi, G. (2018) Modelling pasture production and soil temperature, water and carbon fluxes in Mediterranean grassland systems with the Pasture Simulation model. *Grass and Forage Science* 73(2): 272–283.

<https://doi.org/10.1111/gfs.12310>

Rajkai, K., Kabos, S., van Genuchten, M.Th. (2004) Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil and Tillage Research* 79(2): 145–152.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.003>

Rajkai, K., Várallyay, Gy., Pacsepszki, J.A., Cserbakov, R.A. (1981) pF-görbék számítása a talaj mechanikai összetétele és térfogattömege alapján. *Agrokémia és Talajtan* 30: 409–438.

Ramankutty, N., Evan, A.T., Monfreda, C., Foley, J.A. (2008) Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles* 22: GB1003.

<https://doi.org/10.1029/2007GB002952>

Rawls, W.J., 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science* 135: 123–125.

DOI: 10.1097/00010694-198302000-00007

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P. (2011) RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*. 109: 33–57.

<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>

Richards, L.A. (1931) Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. *Journal of Applied Physics* 1: 318–333.

<https://doi.org/10.1063/1.1745010>

Richter, K., Atzberger, C., Hank, T.B., Mauser, W. (2012) Derivation of biophysical variables from Earth observation data: validation and statistical measures. *Journal of Applied Remote Sensing* 6(1): 063557.

<https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.063557>

Ritchie, J.T. (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5): 1204–1213.

<https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>

Ritchie, J.T. and Otter, S. (1985) Description and performance of CERES-wheat: a user-oriented wheat yield model. In: *ARS Wheat Yield Project (Chapter 10)*, ARS-38. National Technical Information Service, Springfield, Missouri, pp. 159–175.

<https://archive.org/details/CAT86858886/page/n5/mode/2up>

Ritchie, J.T. (1985) A User-Orientated Model of the Soil Water Balance in Wheat. In: Day, W., Atkin, R.K. (eds.) *Wheat Growth and Modelling*. NATO ASI Science (Series A: Life Sciences), 86. Springer: Boston, MA.

https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3665-3_27

Ritchie, J.T., Gerakis, A., Suleiman, A. (1999) Simple model to estimate field measured soil water limits. *Transactions of the ASAE*. 42: 1609–1614.

DOI: 10.13031/2013.13326

Rithcie, J.T. (2002) Szóbeli közlés

Rosenblueth, A. and Wiener, N. (1945) The Role of Models in Science. *Philosophy of Science* 12: 316–321.

Rosenzweig, C., Parry, M.L. (1994) Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367: 133–138.

<https://doi.org/10.1038/367133a0>

Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Antle, J., Elliott, J., Ashfaq, M., Chatta, A.A., Ewert, F., Folberth, C., Hathie, I., Havlik, P., Hoogenboom, G., Lotze-Campen, H., MacCarthy, D.S., Mason-D'Croz, D., Contreras, E.M., Müller, C., Perez-Dominguez, I., Phillips, M., Porter, C., Raymundo, R.M., Sands, R.D., Schleussner, C-F., Valdivia, R.O., Valin, H., Wiebe, K. (2018) Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5°C and 2.0°C assessments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 376: 20160455

<https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0455>

Ruane, A.C., Hudson, N.I., Asseng, S., Camarrano, D., Ewert, F., Martre, P., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., A.J. Challinor, J. Doltra, S. Gayler, R. Goldberg, R.F. Grant, L. Heng, J. Hooker, L.A. Hunt, J. Ingwersen, R.C. Izaurrealde, K.C. Kersebaum, S.N. Kumar, C. Nendel, G. O'Leary, J.E. Olesen, T.M. Osborne, T. Palosuo, E. Priesack, D. Ripoche, R.P. Rötter, M.A. Semenov, I. Shcherbak, P. Steduto, C.O. Stöckle, P. Stratonovitch, T. Streck, I. Supit, M. Travasso, K. Waha, D. Wallach, J.W. White, and J. Wolf (2016) Multi-wheat model ensemble responses to interannual climate variability. *Environmental Modelling & Software* 81: 86–101.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.008>

Ruane, A.C., C. Rosenzweig, S. Asseng, K.J. Boote, J. Elliott, F. Ewert, J.W. Jones, P. Martre, S. McDermid, C. Müller, A. Snyder, P.J. Thorburn (2017) An AgMIP framework for improved agricultural representation in integrated assessment models. *Environmental Research Letters* 12(12): 125003.

DOI: 10.1088/1748-9326/aa8da6

Rubinstein, R.Y., Kroese, D.P. (2007) *Simulation and the Monte Carlo method*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 978-0-470-1 7794-5

Running, S.W. and Coughlan, J.C. (1988) A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42: 125–154.

[https://doi.org/10.1016/0304-3800\(88\)90112-3](https://doi.org/10.1016/0304-3800(88)90112-3)

Running, S.W. and Gower, S.T. (1991) FOREST BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology* 9: 147–160.

<https://doi.org/10.1093/treephys/9.1-2.147>

Running, S.W. and Hunt, E.R.J. (1993) Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: Ehleringer, J.R. and Field, C. (eds.) *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press, San Diego, 141–158.

SAMSON (2009) NOAA/NREL Solar and Meteorological Surface Observational Network 3-volume CD-ROM. Letölthető:

<https://owncloud.atk.hu/index.php/s/AXFSfivCCH5u2Jx>

Sándor, R., Lichner, L., Filep, T., Balog, K., Lehoczky, É., Fodor, N. (2015) Spatial variability of hydrophysical properties of fallow sandy soils. *Biologia* 70(11): 1468–1473.

<https://doi.org/10.1515/biolog-2015-0182>

Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., Richardson, C.W. (1998) Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research* 10: 1616–1572.

DOI: 10.3354/cr010095

Sexton, D.M.H., Harris, G., Murphy, J. (2010) UKCP09: Spatially coherent projections. Met Office Hadley Centre, Exeter.

Simon, H., Baker, K.R., Phillips, S. (2012) Compilation and interpretation of photochemical model performance statistics published between 2006 and 2012. *Atmospheric Environment* 61: 124–139.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.012>

Smolin, L. (2011) *Mi a gubanc a fizikával? - A hűrelmélet problémái és a lehetséges kiutak.* ISBN: 9789632520360

Soltani, A., Sinclair, T.R. (2015) A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research* 175: 37–46.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019>

Stockle, C.O., Martin, S.A., Campbell, G.S. (1994) CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* 46: 335–359.
[https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)90006-2)

St-Pierre, N.R., Cobanov, B., Schnitkey, G. (2003) Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science* 86: 52–77.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73583-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73583-8)

Suleiman, A.A., Ritchie, J.T. (2001) Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. *Transactions of the ASAE*. 44: 235–239.
 DOI: 10.13031/2013.4683

Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S. (2007) Comparison of Geostatistical and Meteorological Interpolation Methods (What is What?). In: Dobesch, H., Dumolard, P., Dyras, I. (eds) *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology.* pp. 45-56. London: ISTE Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9780470612262.ch4>

Thomson, A., Calvin, K., Smith, S., Kyle, P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M., Clarke, L., Edmonds, J. (2011) RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109: 77–94.
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>

Thornley, J.H.M. (1998) *Grassland Dynamics: An Ecosystem Simulation Model.* CAB International.

Thornton, P.E., Running, S.W. (1999) An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology* 93: 211–228.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00126-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00126-9)

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574–582.
<https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>

Tsuji, G.Y., Uehara, G., Balas S. (eds.) (1994) A Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT, Version 3, Vol. 1-3. University of Hawaii, Honolulu.

Van Dyne, G.M., Anway, J.C. (1976) A research program for and process of building and testing grassland ecosystem models. *Journal of Range Management* 29: 114–122.

<https://doi.org/10.2307/3897406>

van Genuchten, M.Th. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *SSS of America Journal* 44: 892–898.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Vautard, R., Kadygrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., Coppola, E., Corre, L., van Meijgaard, E., Nogherotto, R., Sandstad, M., Schwingshackl, C., Somot, S., Aalbers, E., Christensen, O.B. Ciarlo, J.M., Demory, M-E., Giorgi, F., Jacob, D., Jones, R.G., Keuler, K., Kjellström, E., Lenderink, G., Levavasseur, G., Nikulin, G., Sillmann, J., Solidoro, C., Sørland, S.L., Steger, C., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V. (2021) Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126: e2019JD032344

<https://doi.org/10.1029/2019JD032344>

Verbeeck, H., Samson, R., Verdonck, F., Lemeur, R., (2006) Parameter sensitivity and uncertainty of the forest carbon flux model FORUG: a Monte Carlo analysis. *Tree Physiology* 26: 807–817.

<https://doi.org/10.1093/treephys/26.6.807>

Wang, E., Martre, P., Zhao, Z., Ewert, F., Maiorano, A., Rötter, R.P., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Aggarwal, P.K., J. Anothai, B. Basso, C. Biernath, D. Cammarano, A.J. Challinor, G. De Sanctis, J. Doltra, B. Dumont, E. Fereres, M. Garcia-Vila, S. Gayler, G. Hoogenboom, L.A. Hunt, R.C. Izaurrealde, M. Jabloun, C.D. Jones, K.C. Kersebaum, A.K. Koehler, L. Liu, C. Müller, S. Naresh Kumar, C. Nendel, G. O’Leary, J.E. Olesen, T. Palosuo, E. Priesack, E. Eyshi Rezaei, D. Ripoche, A.C. Ruane, M.A. Semenov, I. Shcherbak, C. Stöckle, P. Stratonovitch, T. Streck, I. Supit, F. Tao, P. Thorburn, K. Waha, D. Wallach, Z. Wang, J. Wolf, Y. Zhu, S. Asseng (2017) The uncertainty of crop yield projections is reduced by improved temperature response functions. *Nature Plants* 3: 17102.

DOI: 10.1038/nplants.2017.102

Watts, D.G., Hanks, R.J. (1978) A Soil-Water-Nitrogen Model for Irrigated Corn on Sandy Soils. *Soil Science Society of America Journal* 42(3): 492–499.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030024x>

Webber, H., Ewert, F., Olesen, J.E., Müller, C., Fronzek, S., Ruane, A.C., Bourgault, M., Martre, P., Ababaei, B., Bindi, M., Ferrise, R., Finger, R., Fodor, N., Gabaldón-Leal, C., Gaiser, T., Jabloun, M., Kersebaum, K-C., Lizaso, J.I., Lorite, I.J., Manceau, L., Moriondo, M., Nendel, C., Rodríguez, A., Ruiz-Ramos, M., Semenov, M.A., Siebert, S., Stella, T., Stratonovitch, P., Trombi, G., Wallach, D. (2018) Diverging

importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications* 9:4249.

<https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>

Weigel, H.J., Manderscheid, R. (2016) Thünen à la carte 4a, FACE with Crops: Data for Climate Change Impact Models.

DOI:10.3220/CA1455111790000

Williams, J.R., and Renard, K.G. (1985) Assessments of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). In: Follett, R.F. and Stewart, B.A. (eds.) Soil Erosion and Crop Productivity. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 67–103. 533 pp.

Wösten, J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas, C. (1999) Development and use of dataset of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169–185.

[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)

Xevi, E., Gilley, J., Feyen, J. (1996) Comparative study of two crop yield simulation models. *Agricultural Water Management* 30(2): 155–173.

[https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01218-4](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01218-4).

Yousef, M.K. (1985) Stress physiology in livestock. Volume 1, Basic principles. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.