

MODELLEK AZ AGRÁRIUM SZOLGÁLATÁBAN

című doktor mű

rövid összefoglalása (TÉZIS)

Fodor Nándor

Agrártudományi Kutatóközpont, Mezőgazdasági Intézet

Martonvásár, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Fogalmi és történeti áttekintés	3
2.1 Modellek típusai	3
2.2 Ökoszisztéma modellek felépítése és fejlesztése	4
2.3.1 Paraméterek meghatározása méréssel	5
2.3.2 Paraméterek meghatározása becsléssel	5
2.3.3 Modell kalibráció és validáció	5
2.3.4 Modellértékelés	5
2.3.5 Érzékenységvizsgálat	6
2.3.6 Modellezési eredmények hibája és bizonytalansága	6
2.3.7 Modellek fejlesztése és továbbfejlesztése	6
2.4 Ökoszisztéma modellezés történeti áttekintése	7
3. Modellek az agrárium szolgálatában	8
3.1 Ökoszisztéma modellek használatát támogató alkalmazások	8
3.1.1 TALAJTANonc, illetve SOILarium	8
3.1.2 S-shape globálsugárzás-becslő eljárás	8
3.1.3 MV-WG időjárás-generátor	8
3.2 Statisztikus modellek	9
3.2.1 Proplanta trágyázási szaktanácsadási rendszer	9
3.2.2 Az Egyesült Királyság tejtermelésének várható jövője	9
3.3 AgroMo modellezési keretrendszer	10
3.3.1 Az AgroMo felépítése és működése	14
3.3.2 Az AgroMo alkalmazása: trágyázási tilalmi időszak	17
3.3.3 Az AgroMo alkalmazása: ökoszisztéma szolgáltatások	17
3.3.4 Az AgroMo alkalmazása: alkalmazkodási stratégiák	20
3.3.5 Az AgroMo rendszer fejlesztésének lehetőségei	21
4. Legfontosabb eredmények	22
Irodalomjegyzék	23

1. Bevezetés

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. 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. 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 kiterjeszthetjük.

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 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.

A szárazföldi ökoszisztéma modellek közvetlen célja, hogy talaj-növény rendszer legfontosabb jellemzőit, illetve folyamatait matematikai eszközökkel leírják. 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 használják ezeket a modelleket klímaváltozással kapcsolatos elemzések és hatástanulmányok készítése során, mivel gyakorlatilag ezek kínálják az egyetlen tudományosan is megalapozott módszert arra, hogy kellő óvatossággal ugyan, de valamiképpen a jövőbe pillantsunk.

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.

2. Fogalmi és történeti áttekintés

2.1 Modellek típusai

A modellalkotás módja, illetve a jelenségek leírásának módszertana szerint három típust különböztethetünk meg: empirikus, teleologikus és mechanisztikus modelleket.

A megfigyelési adatokat, illetve a vizsgált jelenséget közvetlenül leíró modelleket **empirikus** (tapasztalati) modelleknek nevezzük. A kizárólag megfigyelési adatokra épülő, és valamilyen matematikai formulában testet öltő empirikus modellekben általában nem jut kifejezésre semmilyen alapvető fizikai vagy kémiai törvényszerűség, és a modell nem hordoz információt sem a rendszer felépítéséről sem annak működéséről. Az empirikus modellek jellemzően statikus modellek, az idő, mint független változó nem szerepel bennük.

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. Bár az elmúlt évtizedekben, a gyakorlati modellalkotásban, ezt a típust fokozatosan kiszorították az empirikus modellek, meglévő rendszermodellek almodelljeiként napjainkig használatosak.

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. A mechanisztikus modellek ezen alapvető törvényszerűségeket alkalmazzák a konkrét folyamatban szereplő változók közötti összefüggések, ok-okozati kapcsolatok leírására. 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. 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.

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. A **biogeokémiai** modellek olyan mechanisztikus modellek, amelyek szintén a talaj-növény rendszer folyamatait írják le, főként a talaj szén- és tápanyagforgalmára összpontosítva. Mára a növénytermesztési és a biogeokémiai modellek közötti határ elmosódott. Egyértelműen az a cél, hogy a modellek az ökoszisztémában zajló folyamatok lehető legszélesebb körét legyenek képesek leírni. Ehhez igazodva, a továbbiakban a szárazföldi ökoszisztémák modelljeire összpontosítunk, melyekre az egyszerűség kedvéért **ökoszisztéma modellként** vagy még pontosabban **növény-talaj modellként** hivatkozunk.

2.2 Ökoszisztéma modellek felépítése és fejlesztése

Összetettségétől függetlenül, valamennyi modell **tározók** és **folyamatok** rendszerével írja le az ökoszisztéma felépítését és változásait. Tározók reprezentálják a valóság elemeket (levél, talajréteg, stb.), pontosabban az azokban tárolt anyag mennyiségét (levél széntartalma, talajréteg nedvességtartalma, stb.). A tározók állapotát, a tárolt anyag mennyiségének aktuális értékét, a modellek **állapotváltozó**kban tárolják, de vannak állapotváltozó, 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 **időlépték**ének, illetve **időbeli felbontás**ának, ami ökoszisztéma modellek esetében általában egy nap, melynek valós időben vett megfelelője egy **számítási ciklus** időtartama, ami a számítógép teljesítményétől függ, de mára már az ezredmásodperces tartományban van. 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 felbontás**ával igyekeznek kezelni 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 folyamatok száma és jellege, valamint a folyamatok során figyelembe vett hatótényezők száma határozza meg.

Az ökoszisztéma modellek számításait a légkör, a talaj és a növény számszerű jellemzői határozzák meg. Két fajtájuk van, melyeket a modell **paramétere**inek, illetve **változó**inak nevezünk. A paraméterek értékei a modell működése/működtetése során nem változnak, a változó értékei viszont, ahogy az elnevezés is sejteti, változhatnak. A modell használatához szükség van az összes paraméter értékének megadására. Szükséges továbbá néhány állapotváltozó kezdeti értékének megadása, valamint a modellezett rendszer peremfeltételeit meghatározó változó (pl. meteorológiai adatok) időbeli alakulásának megadása. Ezeket az adatokat együttesen **bemenő adat**oknak hívjuk. A modell által számított változókat kimenő változóknak, **kimenő adat**oknak nevezük, melyek legfontosabb csoportja, a modellezett rendszer mindenkor állapotát meghatározó változó, az állapotváltozó. Azt az eseményt, amikor az ökoszisztéma egy térben és időben behatárolt egységének folyamatait, a rendszert jellemző változó értékeinek időbeli alakulását, egy szimulációs modell segítségével határozzuk meg **szimulációnak**, **in silico kísérletnek**, **modellfutásnak** vagy egyszerűen csak futásnak nevezük.

A modellek mindenképpen tartalmaznak egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat, melyek számítási hibához, a mért értékektől való eltéréshez vezetnek, melyet sokféle mérőszámmal jellemezhetünk (**2.3.4 fejezet**). A modellfejlesztés mindenkor 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, ahol a mélyebben elhelyezkedő, kisebb modulok kimenő adatai a nagyobb modulok bemenő adatai lesznek.

2.3.1 Paraméterek meghatározása méréssel

Ideális esetben a modell minden bemenő adatát a felhasználó adja meg, 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, ami a modelleredményekben is visszaköszön.

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. Paraméterbecslésre leggyakrabban magát a modellt használják, amelynek a paraméterét, paramétereit keressük. Ehhez egy mérési adatokat tartalmazó adatbázisra van szükség, amelynek tartalmaznia kell minden modellfuttatáshoz szükséges bemenő adatot és mért értékeit legalább egy olyan változónak, amely szerepel a modell kimenő adatai között. A módszert **inverz modellezés**-nek hívják, amely iterációs eljárás alapul. A keresett paraméterek értelmezési tartományának meghatározása után, minden iterációs lépésben rögzítjük a paraméterek véletlenszerűen kiválasztott értékét és lefuttatjuk a modellt. A modell eredményét egy célfüggvény 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 szélsőértéke tartozik. Ezen paraméter értékek a legjobb becsült (valós) értékek, mivel velük érhető el a legjobb egyezés a modellezett és a mért eredmények között.

2.3.3 Modell kalibráció és validáció

Azt a folyamatot, amikor a modellt összehangba hozzuk a valósággal kalibrációnak, paraméter-optimalizációnak vagy finomhangolásnak nevezzük, amely lényegét tekintve egy inverz modellezési folyamat. 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.

2.3.4 Modellértékelés

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).
- ii) Összefüggés-alapú mutatók, például a determinációs együttható (R^2).
- iii) Hatékonysági mutatók, melyek a különbség- és az összefüggés-alapú mutatók kombinálásával jöttek létre, például a Nash-Sutcliffe modellhatékonysági mutató (NSE).

iv) Komplexitás-alapú mutatók, melyek a modell összetettségére vonatkozó információt is hordoznak, például az Akaike-féle információs kritérium (AIC).

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.

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. 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, például a megfigyelt értékektől való (átlagos) eltérése, elsősorban a modell tökéletlenségéből fakad, hiszen minden modell tartalmaz egyszerűsítéseket, közelítéseket és elhanyagolásokat, amelyek jelenlegi tudásunk, technikai, illetve informatikai lehetőségeink korlátjainak következményei. A modelleredmények pontatlanságát nem elhanyagolható mértékben a bemenő adatok hibája is okozhatja, ami a szenzor mérési pontatlanságán túl a helytelenül telepített és/vagy nem megfelelően karbantartott érzékelő torzított eredményeiből vagy a mért közeg megbolygatásából fakadhat. Származtatott mennyiségek (pl. klímaprojekciók adatai) esetében az alkalmazott módszertan bizonytalansággal terheli meg a modell bemenő adatait. A bemenő adatok hibája, illetve bizonytalansága a modellszámítások során tovaterjed és modellezési hiba, illetve bizonytalanság formájában jelenik meg.

2.3.7 Modellek fejlesztése és továbbfejlesztése

Egy modell fejlesztését két tényező határozza meg leginkább, a (1) modellezni kívánt rendszer összetettsége és a (2) modell felhasználási célja. A modellfejlesztés főbb lépései az alábbiak:

- 1) Nyomon követni kívánt valóságelemek beazonosítása, és az azokat reprezentáló állapotváltozók 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 modell (továbbfejlesztése) egy soha véget nem érő folyamat, ahol a fő cél, hogy az ökoszisztémában lezajló folyamatok lehető legszélesebb körét legyen képes leírni modell a lehető legkisebb hibával.

2.4 Ökoszisztéma modellezés történeti áttekintése

A dolgozattal ellentétben itt csak a legfontosabb eseményeket emelem ki, évtizedenként, kivonatos formában.

Időszak	Meghatározó események	Fő referenciák
1961-1970	a fotoszintézis és a talajban történő vízmozgás, illetve nitrogénforgalom első (még össze nem kapcsolt) modelljei/moduljai	<i>de Wit, 1965; Keig and McAlpine, 1969</i>
1971-1980	nemzeti modellfejlesztő csoportok indulása; a már meglévő modulok összekapcsolása rendszermodellé	
1981-1990	első, működő, számítógépes talaj-növény és biogeokémiai modellek, amelyek már a talaj függőleges rétegzettségét is figyelembe veszik	<i>Wilkerson et al., 1983; Running and Coughlan, 1988; Diepen et al., 1989</i>
1991-2000	összetett, többfajta növény szimulációjára alkalmas modellek; több modell forráskódja nyilvánossá lesz; első klímaváltozással kapcsolatos modellalapú hatástanulmányok, modellhasználók számának ugrásszerű megnövekedése a személyi számítógépek elterjedésének köszönhetően	<i>Rosenzweig and Parry, 1994; McCown et al., 1996</i>
2001-2010	a magyar fejlesztésű 4M modell bemutatkozik; képzett informatikusok bevonása a modellfejlesztésbe; globális modellezési esettanulmányok; hálózatosodás: modellező csoportok nemzetközi szintű összefogása	<i>Fodor et al., 2003; Challinor et al., 2004 SEAMLESS FP6 projekt</i>
2011-	modellező csoportok munkájának nemzetközi szintű összehangolása az AgMIP és MACSUR projekteken keresztül; több modellt alkalmazó ún. 'ensemble modelling' alapú esettanulmányok; első Integrált Modellezési Keretrendszerek kialakítása eltérő célú modellek illetve adatbázisok összekapcsolásával	<i>Ewert et al., 2015; Webber et al., 2018</i>

3. Modellek az agrárium szolgálatában

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

3.1 Ökoszisztéma modellek használatát támogató alkalmazások

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 a legtöbb talaj-növény modellnek bemenő paraméterei is. A TALAJTANonc (*Fodor és Rajkai, 2005*), illetve SOILarium (*Fodor and Rajkai, 2011*) programokba a saját készítésű eljárásokon túl, ezeket hazai és külföldi fejlesztésű becslési eljárásokat építettük be a vonatkozó publikált képletek illetve eljárások leprogramozásával.

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 szakirodalomban elérhető eljárások módszertani hiányosságait kiküszöbölve, talajfizikai analógiára épülő becslőeljárást dolgoztunk ki (*Fodor and Mika, 2011*) és validáltunk 109 meteorológiai állomás adatait felhasználva. A referencia módszerhez képest, a módszertani fejlesztések több mint 15%-os csökkenést eredményeztek a becslés átlagos abszolút hibájában.

3.1.3 MV-WG időjárás-generátor

Az időjárás-generátorok olyan sztochasztikus 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. Az MV-WG időjárás generátor (*Fodor et al., 2010*) számos ponton meghaladta a legelterjedtebben használt LARS-WG generátor akkori verziójának (ver. 4.0) képességeit. Mindkét generátor mesterséges adatsorai jól 'utánozták' a valós adatsorok havi átlagát és szórását, valamennyi változó esetében. A globálsugárzás (átlagai és szélsőértékei) tekintetében az MV-WG egyértelműen jobbnak bizonyult, ami a vonatkozó módszertani fejlesztéseknek köszönhető.

3.2 Statisztikus modellek

Jóllehet figyelmen kívül hagyják a talaj-növény rendszer összetevői és folyamatai közötti ok-okozati összefüggéseket, (viszonylag) kis adat- és számítási kapacitás igényük miatt, statisztikus modelleket mind a mai napig használnak környezetvédelmi, erőforrás-gazdálkodási és agrár-közgazdasági elemzésekben, valamint klímaváltozással kapcsolatos hatástanulmányokban.

3.2.1 Proplanta trágyázási szaktanácsadási rendszer

A rendszerváltozáskor beköszöntő 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*) központi eleme egy olyan statisztikus modell, amely különböző kultúrnövényekre, a talaj néhány jellemzőjének (humusztartalom, pH, stb.), illetve a tervezett termésszint függvényében, megadja a növény fajlagos N-, P- és K-tartalmát, illetve tápanyagszükségletét. A rendszer további moduljai számos más tényező módosító hatását számszerűsítik. Így a Proplanta, az elővetemény típusát, hozamát és betakarításának körülményeit valamint a szervestrágyázás 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. Több teszt-kísérlet igazolta, hogy az intenzív MÉM-NAK rendszer ajánlásainak esetenként 40-60%-ának kijuttatásával az új Proplanta rendszerrel is hasonlóan magas termések érhetők el.

Én 2002-ben csatlakoztam a fejlesztőcsopathoz. 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 növényre 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.

3.2.2 Az Egyesült Királyság tejtermelésének várható 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

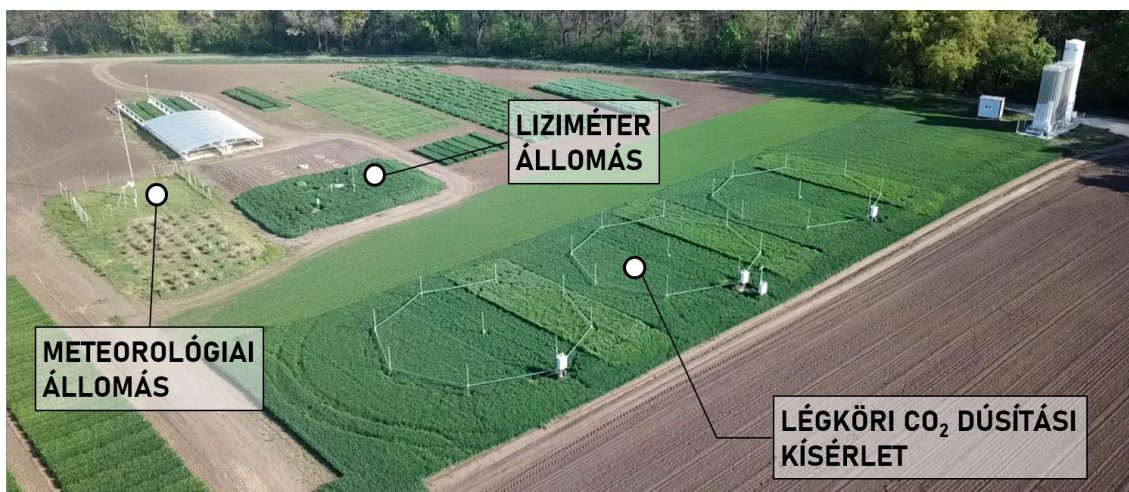
tejtermelésére vonatkozó hatástanulmány volt (Fodor et al., 2018) melyhez egy saját fejlesztésű statisztikai modell-együttest használtunk. A UK a 10. legnagyobb tejtermelő ország a világon; tejtermelésének értéke körülbelül 4,6 milliárd fontot tesz ki évente, ami a bruttó mezőgazdasági teljesítmény mintegy 18%-a. 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 több empirikus modellt is kidolgoztunk, amelyek a hőmérséklet és a relatív páratartalomtól származtatott ún. hőmérséklet-páratartalom index függvényében adják meg a stressz mértékét és a tejtermelés csökkenésének mértékét. A modellek bemenő adatait 10 különböző, 25 km-es felbontású, klímaprojekcióból (2000-2100) származtatva, 180 lehetséges tejhozam csökkenési forgatókönyvet határoztunk meg. Ezeket a forgatókönyveket régió-specifikus, állománysűrűségekre vonatkozó forgatókönyvvel kombináltuk, így az Egyesült Királyság nagyobb (NUTS-1) térségeire vonatkozóan hozamcsökkenési és bevétel-csökkenési előrejelzéseket fogalmaztunk meg. A hőstressz okozta átlagos 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. 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 tejvesztés 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.

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, amely a légkör-talaj-növény rendszerhez kapcsolódó hazai elméleti és gyakorlati (kísérletezős) szakértőket foglal magába az alábbi tudományterületekről: klimatológia, agro-meteorológia, talajfizika, talajkémia, talajbiológia, agronómia, növényélettan, növénynemesítés, genomika, statisztika, informatika, térinformatika, környezeti térképezés és közgazdaságtan.

(2) Holisztikus rendszerértelmezési szemléleten alapuló agro-pedo-klimatológiai kísérleti platformot (3.1 ábra) hoztunk létre Martonvásáron, amely ötvözi a tartamkísérletek hagyományait, illetve a klímakamrás stresszkutatások tapasztalatait a legmodernebb mérési és infokommunikációs technológiák által kínált lehetőségekkel.



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

A kísérleti platformon 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 reakciójáról. A kísérleti platform legfontosabb elemei:

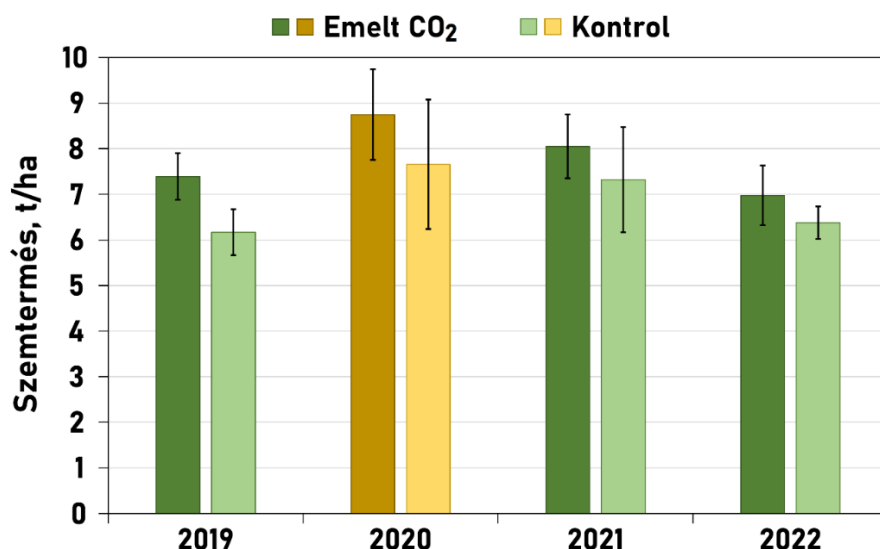
Légköri széndioxid-dúsítási kísérlet: ahol szenzorvezérelt CO₂ kijuttatás segítségével, a vegetációs időszakban, folyamatosan 600 ± 50 ppm légköri CO₂ koncentrációt tartunk fent a szabadföldi körülmények között (**3.1 ábra**).

Eddy-kovariancia állomások: amelyek a vegetáció és a légkör közötti, nagyobb térléptékű (kb. 1 ha) energia és nyomanyag-áramok (pl. vízgőz- és CO₂-forgalom) és mikro-meteorológiai változók 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.

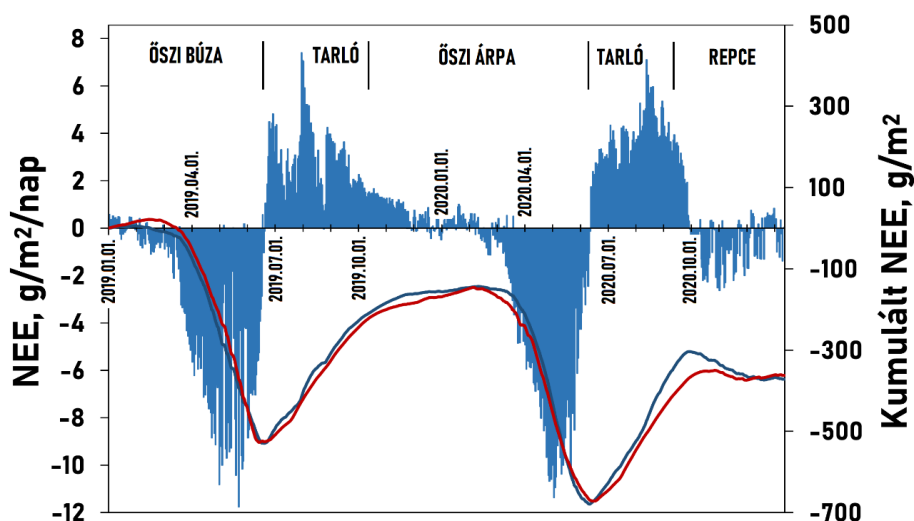
Liziméter állomás: amelyet tizenkét darab, egyenként 2 m mély és 1 m² keresztmetszetű, eredeti szerkezetű talajoszlop alkot, melyekbe oldalról, több mélységben nedvességmérőket, hőmérőket és tenziométereket helyeztünk el. Az oszlopokat három ponton felfüggesztett nagy pontosságú mérlegekre helyeztük, amelyek annak ellenére, hogy az oszlopok tömege 2,5 tonna körül van, 0,1 mm víz elpárolgását is érzékelni tudják (**3.1 ábra**).

Tartamkísérletek, továbbfejlesztve: Az ATK MGI Növénytermesztési Osztálya 15 hektáron, 14 tartamkísérlet, mintegy 2000 parcelláját kezeli, amelyek 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 került rögzítésre. 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 mérjük a levélfelület indexet.

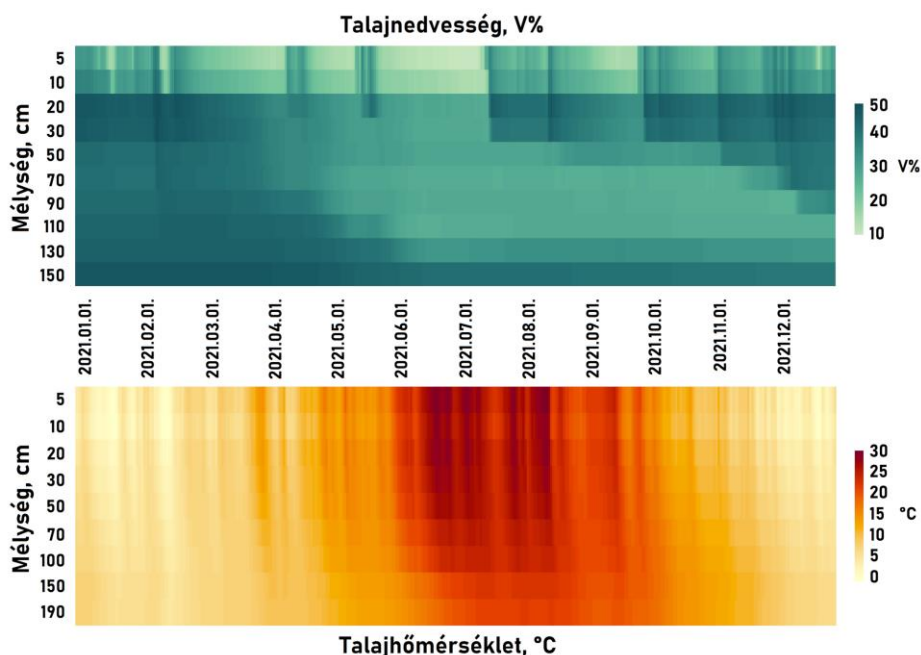
A kísérleti platform eredményeit elsősorban az AgroMo keretrendszer (3.3.1 fejezet) modelljének fejlesztésére és kalibrálására használjuk fel azzal a céllal, hogy a modell egyre pontosabban írja le az agro-ökoszisztéma folyamatait, beleértve az emberi tevékenység hatásait is. A kísérleti platform segítségével gyűjtött adatok kiértékelésének néhány eredményét a 3.2-5 ábrák foglalják össze.



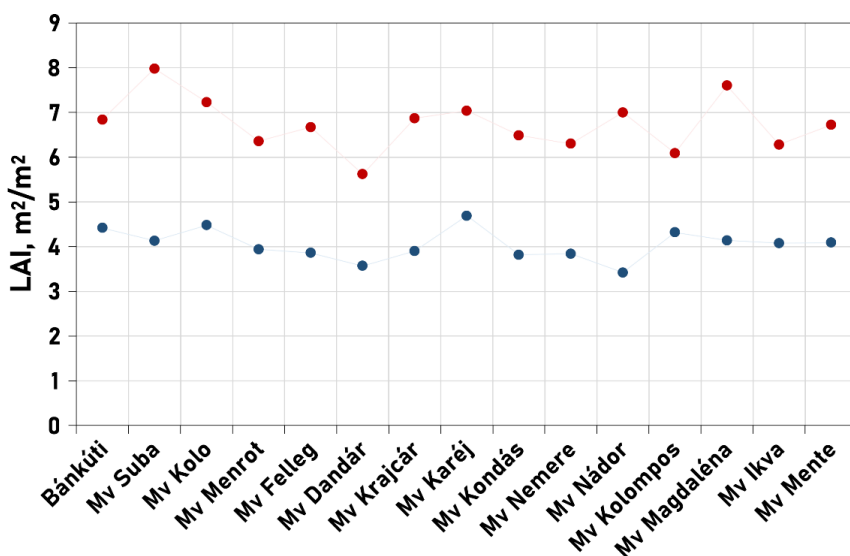
3.2 ábra: A légköri széndioxid-dúsítási kísérletben, magas nitrogén műtrágyázási szinten (160 kg/ha) elért őszi búza és kukorica (2020) terméseredmények és konfidencia tartományuk ($\alpha=0,05$) megemelt és jelenlegi légköri viszonyoknak megfelelő CO₂ szint mellett. Őszi búza esetében, évjárártól függően 10-20%-kal magasabb terméseredményt kaptunk megemelt légköri szén-dioxid szint mellett.



3.3 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. Az általunk fejlesztett modell (3.3.1 fejezet) jól képes lekövetni a szénmegkötés, illetve kibocsátás dinamikáját és kumulált mennyiségét, ami alapvető elvárás a talaj-növény modellekkel szemben.



3.4 ábra: A talajprofil nedvességtartalmának és hőmérsékletének Hovmöller diagramjai, 6 liziméter oszlop átlaga alapján, Martonvásár, 2021. A talaj nedvességprofil-változása segítségével nyomon követhető a gyökérszét növekedése, amely 2021-ben május végére érte el a 150 cm-es mélységet és mélyebbre már nem hatolt.



3.5 ábra: Levélfelület index (LAI) ceptométerrel mért értékei 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. 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. 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) 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 összes 10 klímaprojekciót

készítettünk, amelyek 10 km-es felbontásban (Magyarországot 1104 cellával lefedve) napi léptékű, hibakorrigált meteorológiai adatokat (globálsugárzás, minimális és maximális léghőmérséklet, csapadék, és párányomás hiány) tartalmaznak a 2020-2100 időszakra.

(4) Modellezési keretrendszer fejlesztése (3.3.1 fejezet)

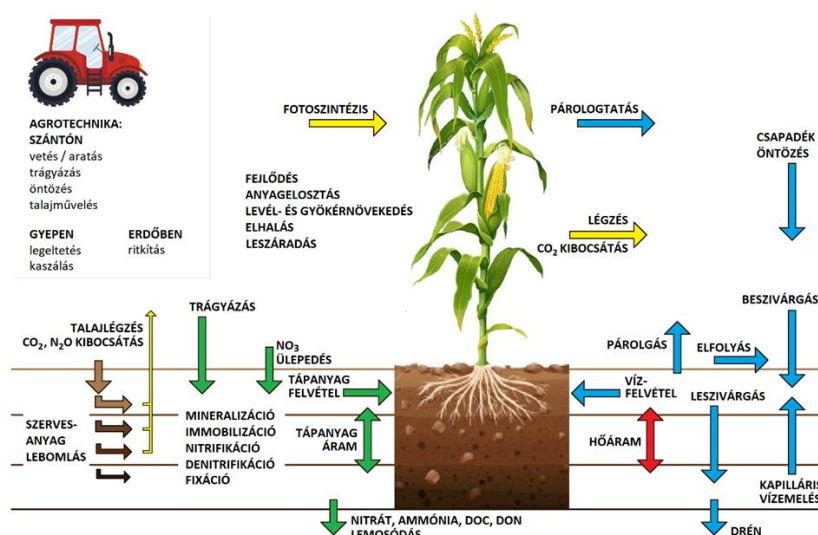
Rugalmasan adaptálható (moduláris, nyílt forráskódú) Integrált Modellezési Keretrendszert (AgroMo) készítettünk, amely a magyar mezőgazdasági rendszer működését szimulálja térben explicit módon, több lehetséges léptékben: parcella, farm, regionális és nemzetgazdasági szinten is.

(5) Alkalmazkodási stratégiák készítése (3.3.2 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 Biome-BGCMuSo modell a **3.6 ábrán** bemutatott folyamatok szimulációjára képes, bármely földhasználati típuson (szántó, gyeperdő), napi időléptékben. 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 kibővítsen 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, és lehetővé teszi a szimulációs eredmények változatos formában történő megjelenítését és elemzését.



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

Az AgroMo rendszerben két olyan fejlesztés is helyet kapott, amelyek világszerte is újdonságnak számítanak az Integrált Modellezési Keretrendszerekben.

AgroMo Modellkalibrációs modul: Az ún. 'feltételes tartománycsökkentő módszer' (CIRM, Conditional Interval Reduction Method, *Hollós et al. 2022*) 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. Másodszor a CIRM módszer 'döntési fa' eljárást használ a kalibrálandó paraméterek meghatározására. A CIRM módszer (1) meghatározza a paraméterter azon legszűkebb halmazát, amelyből választva a paramétereket a szimulációs eredmény garantáltan realiztikus lesz; (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. A CIRM, azontúl hogy jóval gyorsabb a hagyományos kalibrációs eljárásoknál, csak olyan paramétereket szolgáltat, amelyekkel a modell garantálta valósághű eredményeket ad, még ún. adatszegény környezetben történő alkalmazás esetén is.

AgroMo SQL¹ 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 SQL lekérdezések segítségével kimutatásokat készítsünk az adatainkról, megkönnyítve azok elemzését és értelmezését. 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 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 []

¹ Structured Query Language (strukturált lekérdezőnyelv)

zárójelek segítségével jelöljük. A sablonok használatának az az előnye, hogy egyetlen sablonnal és néhány választási lehetőséggel nagyszámú lekérdezést definiálhatunk.

LEKÉRDEZÉSEK:

- TÉRKÉP | HŐSSZEG: Hősszeg (Tb={5: 8}) [1: átlaga] a(z) [2: 4] - [3: 9] hónapokra a(z) [2001-2020] időszakban a(z) [4: FORESEE40] adatforrás alapján
- TÉRKÉP | [1: ÁTLAGOS] (CSOPORT) ÖNTÖZŐVÍZ CELLÁNKÉNT a(z) [T-1] időszakban a(z) [2: *tables*] szimuláció alapján
- TÉRKÉP | KV (CSOPORT)HATÁSA A NPP-ra CELLÁNKÉNT a(z) [T-1] időszakra a(z) [1: *tables*] szimuláció alapján
- TÉRKÉP | (CSOPORT) ÁTLAG PROFIT a(z) [T-1] időszakban a(z) [1: *tables*] szimuláció és a(z) [2: 0.] ökonómiai forgatókönyv alapján

LEKÉRDEZÉS ALIAS: HOOSSZEG_NYAR

LEÍRÁS: Nyári félév átlagos hősszege (JELEN, 2001-2020)

től-ig: 2001 - 2020 (5): 8

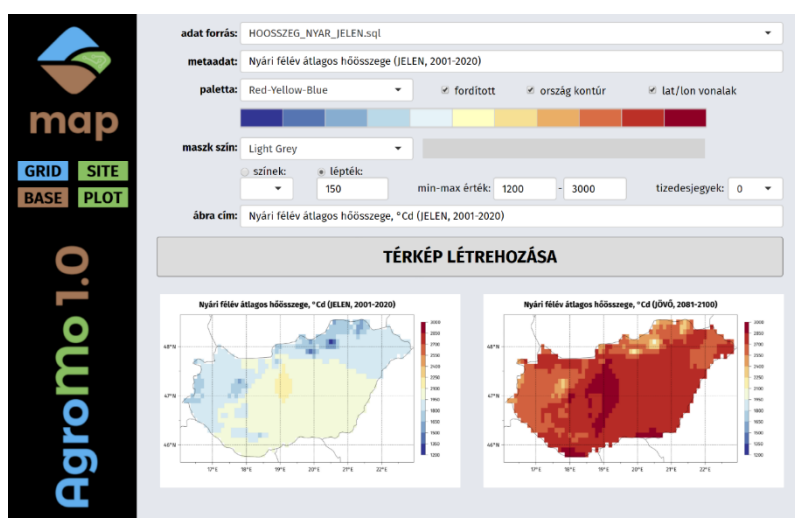
(1):	átlaga	(6):	NA
(2):	4	(7):	NA
(3):	9	(8):	NA
(4):	FORESEE40	(9):	NA

LEKÉRDEZ
JELENTÉS
mutat & ment
TÉRKÉP

3.7 ábra: Az Agromó SQL moduljának grafikus kezelőfelülete, melynek segítségével a felkínált sablonokból konkrét lekérdezések szerkeszthetők. A kiemelt lekérdező mondat sablonnak az alábbi SQL lekérdezés sablon felel meg. Színkódolt részek jelzik a sablonokban megváltoztatható/beállítható értékeket.

```
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;
```

A térképet eredményező lekérdezések esetében, a lekérdezés a cellaazonosítókat 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 (**3.8 ábra**).



3.8 ábra: Az Agromó klíma adatbázisára vonatkozó, **3.7 ábrán** bemutatott lekérdezés eredménye a jelenre és a jövőre vonatkozóan.

Gyakorlati problémák megoldására történő felhasználása előtt, az Agromó rendszerbe ágyazott Biome-BGCMuSo modell legfontosabb paramétereit (gyökérelasztási paraméter, specifikus

levélfelület, stressz-érzékenység valamint a fejlődési fázisok hossza, illetve a fázisokra jellemző elosztási paraméterek) a szántóföldi növények esetében, a KSH adatai segítségével állítottuk be. Kalibráció után, az 1994-2018 időszakra kapott megfigyelt és szimulált termékek átlagosan kevesebb, mint 10%-os eltérést mutattak a kukorica, a napraforgó, az őszi búza, az őszi árpa és a repce esetében is. Gyepes esetében a kalibrációt az ELKH ÖK adatai alapján végeztük el, míg erdők esetében a modellparamétereket szakirodalmi adatok alapján állítottuk be.

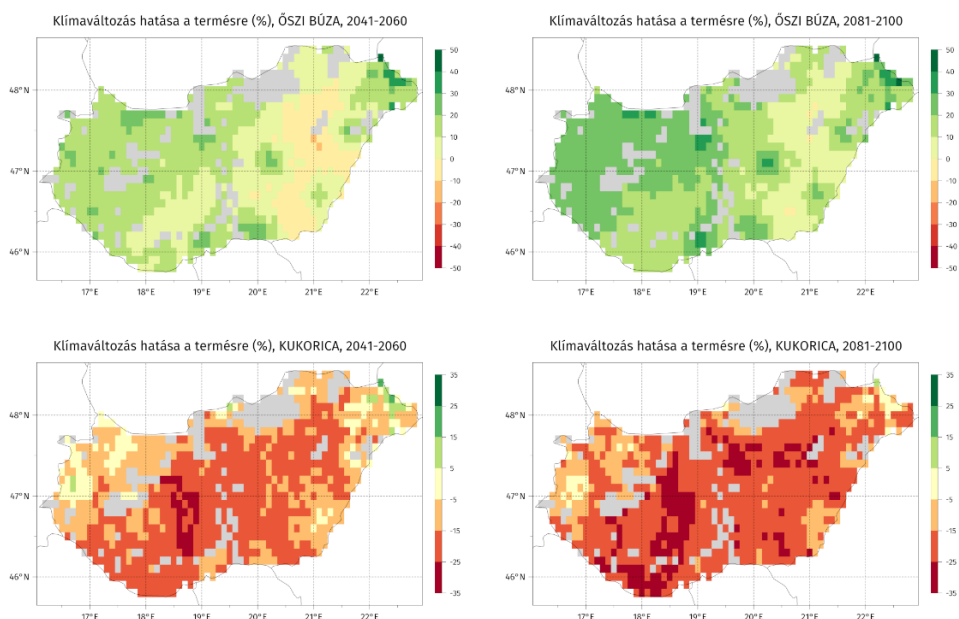
3.3.2 Az AgroMo alkalmazása: trágyázási tilalmi időszak

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 őszi 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-lemosódás 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 nitrátleamosódás értékek az ország területének több mint 99%-án kevesebb, mint ± 5 kg/ha/év-vel tértek el.

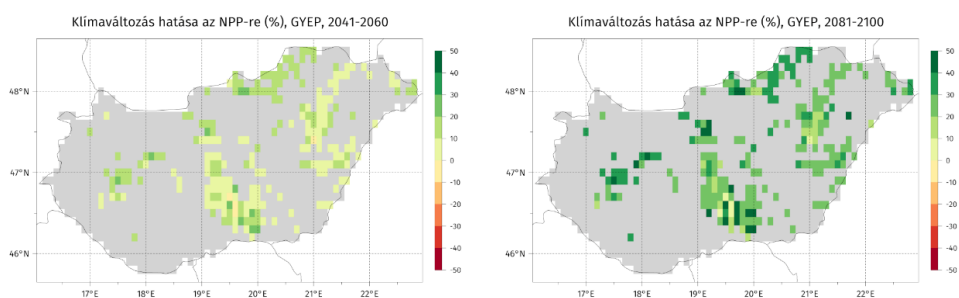
3.3.3 Az AgroMo alkalmazása: ökoszisztéma szolgáltatások

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, gyepesekre és erdőkre vonatkozó szimulációkat csak azon területegységekre hajtottam végre, ahol a vonatkozó földhasználati típus aránya elérte vagy meghaladta a cella 20 százalékot. Az alábbi térképek készítéséhez kizárólag az AgroMo rendszert használtam. Első lépésben azt vizsgáltam meg, hogy a jelenlegi termesztési körülmények fenntartása mellett² a klímaváltozás milyen hatással lesz az **Ellátó Ökoszisztéma Szolgáltatásokra**: a szántók hozamára (az őszi vetésű növényeket a búza, a tavaszi vetésűeket a kukorica példáján keresztül bemutatva), a gyepes és lombhullató erdők produkciójára (3.9-11 ábra).

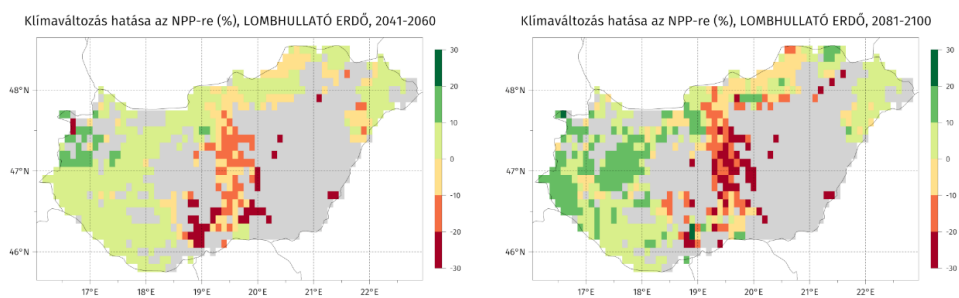
² Az angol 'Business As Usual' kifejezés nyomán, ezeket a szimulációkat a BAU rövidítéssel jelöltem.



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



3.10 ábra: A klímaváltozás várható hatása a gyepek által felvett szén nettó (autotróf légzés után megmaradó) mennyiségére (NPP³) a jelenlegi (2001-2020) átlagos NPP-hez képest, a 2041-2060 és 2081-2100 időszakokra vonatkozóan.



3.11 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:

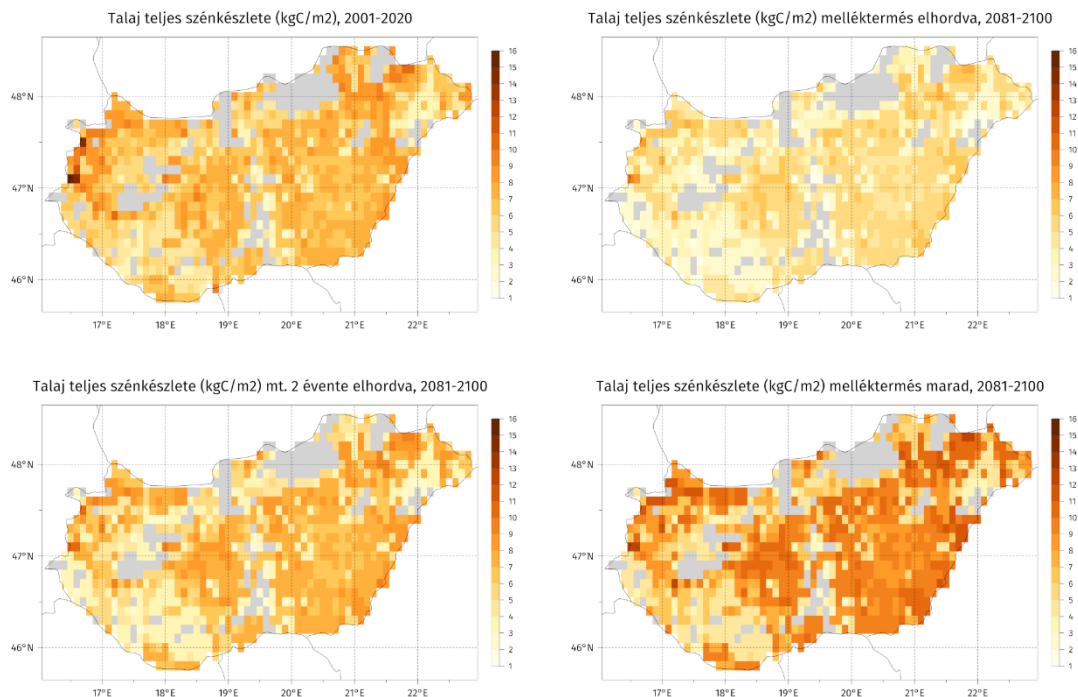
- Az őszi vetésű növények hozama várhatóan növekszik a klímaváltozásnak köszönhetően.
- A tavaszi vetésű növények hozama várhatóan csökken a klímaváltozásnak köszönhetően.

³ Az NPP jelölés az angol 'Net Primary Production' kifejezésből származik.

- 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.

Az AgroMo segítségével, a klímaváltozás **Szabályzó Ökoszisztéma Szolgáltatásokra** gyakorolt várható hatásait is megvizsgáltuk (**3.12 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 (**3.12 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%



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

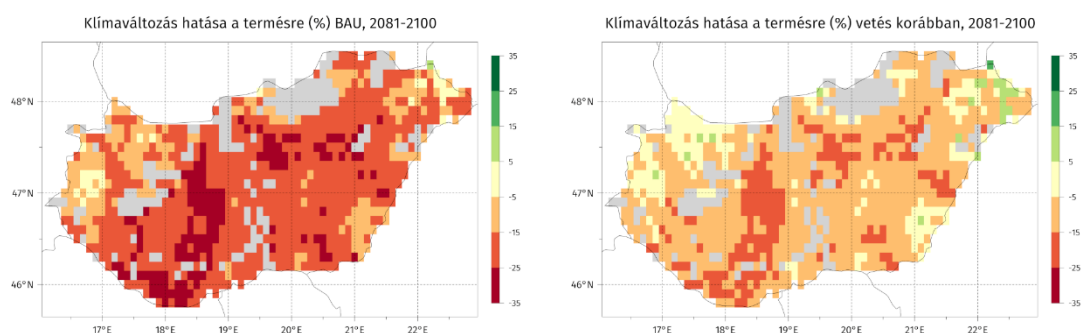
Tudatos mező- és erdőgazdálkodással elérhető, hogy ezen ágazatok, negatív visszacsatolást eredményezzenek a klimatikus folyamatokra és szénmegkötés révén enyhítsék/lassítsák a klímaváltozás folyamatát.

3.3.4 Az AgroMo alkalmazása: alkalmazkodási stratégiák

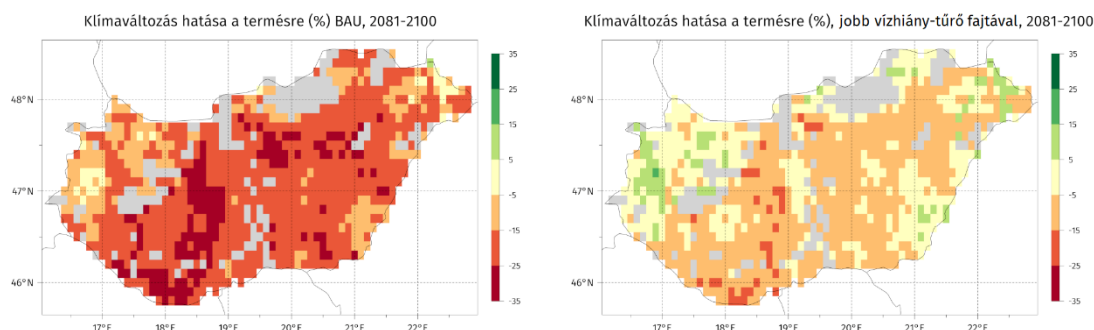
A klímaváltozás várható hatásai első sorban a tavaszi vetésű szántóföldi növényeinkre jelentenek kockázatot (3.9 ábra). Ennél fogva, a lehetséges alkalmazkodási stratégiák vizsgálata során ezen növényekre összpontosítottunk. Az alábbiakban a kukorica termesztésére vonatkozó eredményeket mutatom be.

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 (3.13 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 terméskiesések számottevő mértékben csökkenthetők (3.14 ábra).



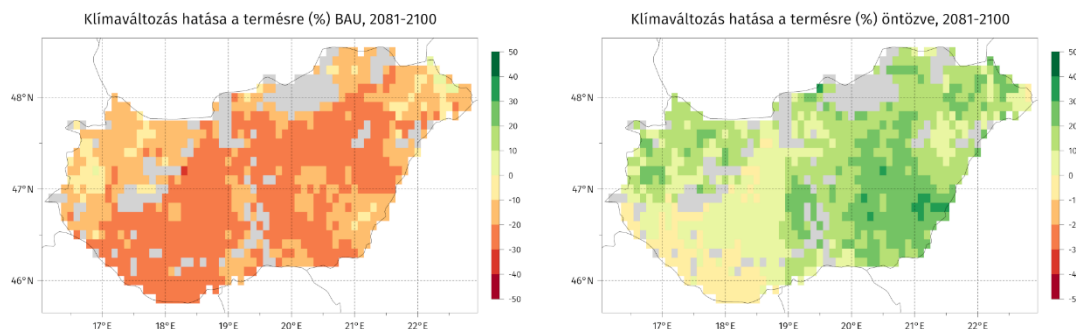
3.13 ábra: Kukorica termésátlagainak változása jelen időszakhoz (2001-2020) képest, alkalmazkodás nélkül (BAU) illetve három héttel korábbi vetéssel.



3.14 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 terméskiesés 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 termékek is elérhetők, még a távolabbi, 2081-2100 időszakban is (3.15 ábra).



3.15 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. Az előnyös antropogén tényezők együttes hatása kulcsfontosságú szerephez juthat a klímaváltozás negatív hatásainak csökkentésében, és képes lehet ellensúlyozni az aszályok és a hóhullámok okozta egyre komolyabb termés kieséseket.

3.3.5 Fejlesztési lehetőségek

A Biome-BGCMuSo modell számítási pontosításának javításhoz és használati körének bővítéséhez kapcsolódó fejlesztések:

- A modell jelen változata csak a nedvesség- és hőstressz hatását képes szimulálni. Fontos fejlesztési irány a különböző biotikus stresszek hatásának modellbe építése.
- Szántóföldi növényeink közül a egyenlőre csak az őszi búza, őszi árpa, repce, kukorica és napraforgó paramétereinek kalibrációja készült el. Kiemelt fejlesztési cél az, hogy a modell minél több növény szimulációjára legyen képes.

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

- 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.

- 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.
- 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.

4. Legfontosabb eredmények

- 4.1 Ökoszisztéma modellek használatát támogató alkalmazásokat fejlesztettem, amelyek segítségével fontos bemenő adatok határozhatóak 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 Innovációs Nagydíjat és nemzeti illetve 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.
- 4.5 Rugalmasan adaptálható Integrált Modellezési Keretrendszert (AgroMo) készítettünk, amely a magyar mezőgazdasági rendszer működését szimulálja térben explicit módon, több lehetséges léptékben.
- 4.6 Az AgroMo rendszerben végrehajtott in-silico kísérletek segítségével klímaváltozási hatástanulmányt készítettem, 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.

Irodalomjegyzék

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.

de Wit, C.T. (1965) Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural Research Report no. 663*, PUDOC, Wageningen, The Netherlands. 57 pp.

Diepen, C.A., van, Wolf, J. and Keulen, H., van, 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5: 16-24.

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.

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.

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

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

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., 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.

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.

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.

- 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.
- 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.
- Rosenzweig, C., Parry, M.L. (1994) Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367: 133–138.
- 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.
- 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.
- Wilkerson, G.G., Jones, J.W., Boote, K.J., Ingram, K.T., Mishoe, J.W., 1983. Modeling soybean growth for crop management. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 26, 63–73.