

4Mx talaj-növény modell: alkalmazások, lehetőségek és kihívások

4Mx Soil-Plant Model: Applications, Opportunities and Challenges

Fodor Nándor¹

INFO

Received 29 Nov 2012

Accepted 15 Dec 2012

Available on-line 28 Dec 2012

Responsible Editor: Rajkai, K.

Keywords:

model, deterministic, education,
research, decision support

ABSTRACT

Crop simulation models describe the main processes of the soil-plant system in a dynamic way usually in a daily time-step. With the help of these models we may monitor the soil- and plant-related processes of the simulated system as they evolve according to the atmospheric and environmental conditions. Crop models could be successfully applied in the following areas: (1) Education: by promoting the system-oriented thinking a comprehensive overview of the interrelations of the soil-plant system as well as of the environmental protection related aspects of the human activities could be presented. (2) Research: The results of observations as well as of experiments could be extrapolated in time and space, thus, for example, the possible effects of the global climate change could be estimated. (3) Practice: Model calculations could be used in intelligent irrigation control and decision supporting systems as well as for providing scientific background for policy makers. The most spectacular feature of the 4Mx crop model is that its graphical user interface enables the user to alter not only the parameters of the model but the function types of its governing equations as well. The applicability of the 4Mx model is presented via several case-studies.

ÖSSZEFOGLALÓ

INFO

Beérkezés 2012. Nov. 29.

Elfogadás 2012. Dec. 15.

On-line elérés 2012. Dec. 28.

Felelős szerkesztő: Rajkai K

Kulcsszavak:

modell, determinisztikus,
oktatás, kutatás,
döntéstámogatás

A szimulációs növénytermesztési modellek a talaj-növény rendszer főbb folyamatait dinamikusan, általában napi léptékben, írják le. Segítségükkel folyamatos képet kaphatunk a meteorológiai/környezeti feltételek mellett a talajban és a növényben lejátszódó folyamatok alakulásáról. A szimulációs növénytermesztési modellek eredményesen használhatók az alábbi területeken: (1) Oktatás: A rendszerszemléletű gondolkodást előtérbe helyezve mutathatók be a talaj-növény rendszer sokrétű kölcsönhatásban lévő folyamatai és az emberi beavatkozások környezetvédelmi vonatkozásai. (2) Kutatás: Kísérletek és megfigyelések térbeli illetve időbeni kiterjesztése, többek között a globális klímaváltozás várható hatásainak feltérképezése. (3) Gyakorlat: Intelligens öntözésvezérlés illetve döntéstámogató rendszerek háttérszámításainak végrehajtása. Jogszabályalkotás szakmai háttérének biztosítása. A 4Mx szimulációs növénytermesztési modell különlegessége, hogy a működését szabályozó paraméterek értékén túl a szimulált folyamatokat leíró függvények típusának változtatására is lehetőséget kínál a felhasználói felülete. A 4Mx modell alkalmazhatóságát néhány esettanulmányon keresztül mutatjuk be.

1. Bevezetés

A világegyetemben megfigyelhető objektumok illetve jelenségek (összefoglalóan: valóság-elemek) többsége olyannyira bonyolult, hogy felfogásuk, áttekintésük illetve megértésük elképzelhetetlen valamilyen mértékű absztrakció nélkül. Az absztrakció során a szóban forgó valóság-elemet egy felépítésében és/vagy működésében hasonló, de egyszerűbb modellel helyettesítjük (Rosenblueth and Wiener, 1945). Ennél fogva a modellek fontos szerepet játszanak a tudományos megismerésben.

Azokat a modelleket, ahol az egyes folyamatokat leíró tudományos összefüggések egységes és működő rendszerbe kerülnek, és amelyekben a folyamatok időbeli és oksági kapcsolatai is leírásra kerülnek, szimulációs modellnek nevezzük. Ez komoly előrelépést jelent a sztochasztikus modellekhez képest, amelyek csupán a rendszer bemenő és kimenő változói közötti statisztikus kapcsolatot

¹ Fodor Nándor

MTA Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani és Agrokémiai Intézet
fodor.nandor@agrar.mta.hu

fogalmazzák meg. Elsősorban ennek köszönhető, hogy a szimulációs modellek magyarázó ereje felülmúlja a sztochasztikus modellekét. A szimulációs növénytermesztési modellek közvetlen célja az, hogy az igen bonyolult talaj-növény rendszer folyamatait, beleértve az emberi tevékenységet is, matematikai eszközökkel leírják, és számítógép segítségével szimulálják. A végső cél azonban az, hogy ezen modellek felhasználásával olyan kérdésekre kapjunk választ, amelyeket egyébként csak drága, időigényes esetleg kivitelezhetetlen kísérletek illetve megfigyelések segítségével kaphatnánk meg.

A rendszerszemléletű modellezés Forrester (1968) és Meadow (1972) munkáihoz nyúlik vissza. A gyakorlati szántóföldi növénytermesztést szolgáló rendszermodellezés az 1980-as években született meg az Amerikai Egyesült Államokban (Ritchie, 1985; Jones and Kiniry, 1986) Európában inkább elméleti megközelítésből, de lényegében hasonló felépítésű rendszermodell lett a fejlesztés eredménye (Diepen et al., 1989). Hazánkban kiemelendő Harnos (1985), Kovács (1995), Rajkai (2001), Huzsvai (2006) és Farkas et al. (2005) munkája, akik saját fejlesztésű vagy külföldi modellek adaptálásával igyekeztek modellezni a talaj-növény rendszer egészének vagy főbb részeinek működését.

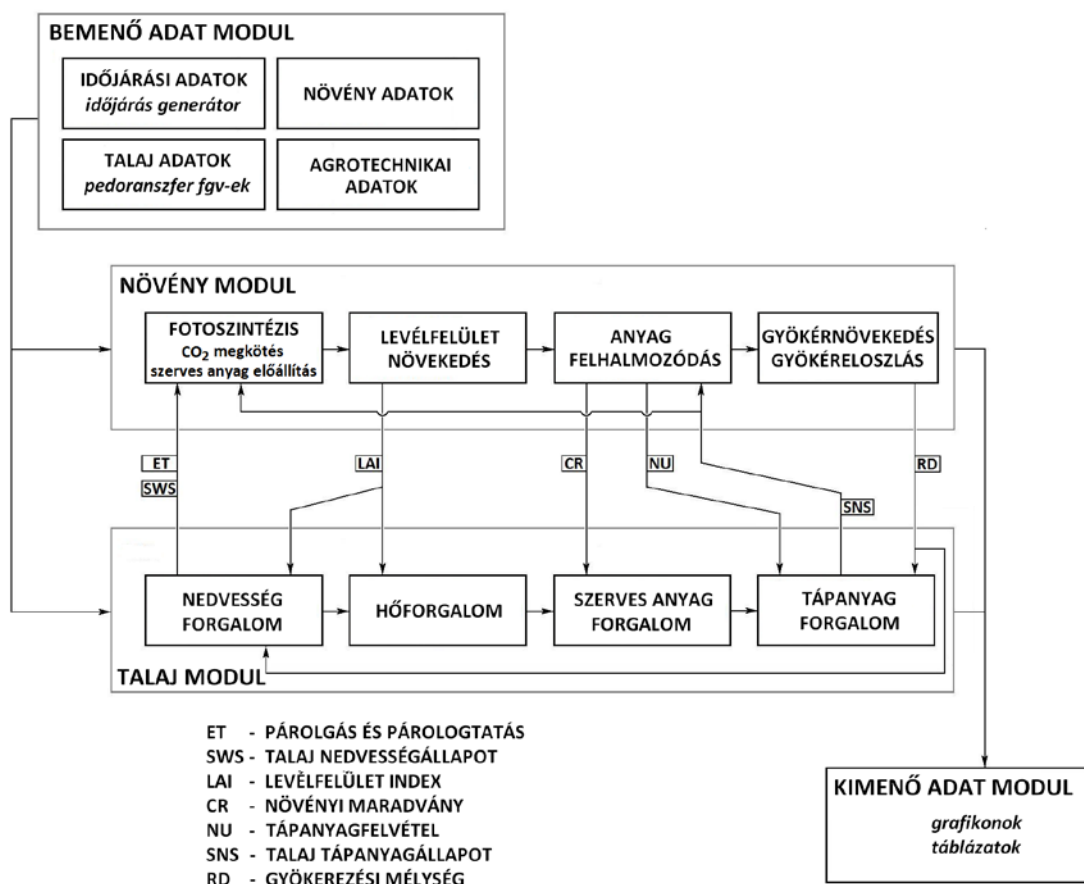
Az MTA Talajtani és Agrokémiai Intézetében az 1990-es évek elejétől használjuk a DSSAT szoftvercsomagba tartozó CERES és CROPGRO növénytermesztési modelleszaladót. Több tanulmány igazolja, hogy ezek a modellek sikeresen használhatók a kutatásban és gyakorlati problémák megoldásában is (Kovács et al., 1995; Jamieson et al., 1998). Az egyre gyarapodó kísérleti eredmények azonban szükségessé teszik ezen modellek fejlesztését is, amely bár elvileg kivitelezhető, hiszen a forráskódok hozzáférhetőek, a DSSAT fejlesztőcsapat még sem támogatja független/külsős csoportok fejlesztési kezdeményezéseit. Ennek okán, magyar kutatók egy kis csoportja (Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye: 4M) 2000-ben hozzákezdett egy hazai fejlesztésű növénytermesztési modell megalkotásához. Az első változat még tulajdonképpen csak egy Delphi-ben programozott CERES klón volt (Fodor et al., 2002). Azóta azonban a 4M modell több új modullal és kiegészítő alkalmazással bővült és számottevő szerkezeti átalakításokon ment át. Jelen tanulmány célja a legújabb 4M modell (4Mx) működésének bemutatása és néhány, a modell segítségével elért eredmény ismertetése.

2. A 4Mx modell leírása

4Mx napi léptékű, determinisztikus modell, amely számításait a légkör-talaj-növény rendszer számszerű (paraméterek és változók) jellemzői határozzák meg. A paramétereken túl, amelyek a rendszer fizikai, kémiai és biológiai jellemzőit definiálják, a főbb változók kezdő-, perem- és kényszerfeltételeit is meg kell adni a modell számára. A bemenő adatok között szereplő paraméterek a modell függvényeit és egyenleteit szabályozzák: a növények fejlődését és növekedését illetve a talaj nedvesség-, hő- és tápanyagforgalmát. A kezdőfeltételek közül a talajszelvény egyes rétegeinek nedvesség- és tápanyagtartalma a legfontosabb. A peremfeltételek tulajdonképpen a napi meteorológiai adatok, de idetartozik a talajvíz mélysége is. A kényszerfeltételek tulajdonképpen az emberi beavatkozás számszerű kifejeződései: trágyázással, vetéssel, öntözéssel és betakarítással kapcsolatos adatok. A növényi fejlődés és növekedés mellett a modell a talajnedvesség-, hő és tápanyagforgalmát is szimulálja. Ez utóbbi magába foglalja a három fő tápelem (NPK) átalakulási és migrációs folyamatait, beleértve a nitrátlemosódást és az NO_x típusú üvegház hatású gázok kibocsátásáért felelős denitrifikációt is (1. ábra).

A 4Mx szimulációs növénytermesztési modell különlegessége, hogy felhasználói felülete a működését szabályozó paraméterek értékén túl a szimulált folyamatokat leíró függvények típusának/képletének változtatására is lehetőséget ad, így elvben bármely növény szimulációjára alkalmassá tehető a forráskód manipulálása nélkül. Ezt a típust keretmodellnek hívják.

A növény fejlődése a hőmérséklettől függ, melyet hőidő (TT) formájában vesz figyelembe a modell. A hőidő a napi középhőmérséklet és a növénytől függő bázishőmérséklet különbsége, mértékegysége a hőfoknap (°Cd). A bázishőmérséklet az a hőmérséklet, amely alatt a növény már nem fejlődik. A fenológiai fázisok hosszát (hőfoknapban) a felhasználónak kell megadnia.



1. ábra. A 4Mx modell folyamatábrája.

A szervesanyag-képződést egy fény-anyag konverziós egyenlet [1] definiálja a modellben, amely fő paramétere a fényhasznosítási index (RUE). A napi asszimiláció mértéke (M) függ a beérkező globálisugárzás (R) mennyiségétől, a levélfelület indextől (LAI), az állománysűrűségtől (D), a hőmérsékleti (S_T), vízhiány (S_W) és nitrogénhiány (S_N) stressz-faktorok minimumától és a légköri CO_2 koncentrációtól.

$$(1) \quad M = RUE \cdot \frac{R \cdot (1 - e^{-0.55 \cdot LAI})}{D} \cdot \min(S_T, S_W, S_N) \cdot f(CO_2)$$

Az (1) képlet egy tapasztalati képlet, amelynek bal- illetve jobboldalán szereplő változók egy növényre illetve egységnyi területre vonatkoznak. Az egységnyi területről egy növényre történő 'áttérés' az állománysűrűséggel történő osztás biztosítja.

A növényben keletkező anyag a növény 4 fő része (gyökér, levél, szár, termés) között kerül megosztásra. A megosztás arányai fejlődési szakaszonként változnak. Kukorica esetében például, korai szakaszban a friss anyag nagy része a gyökérbe és a levelekbe kerül, míg a fejlődés végén szinte kizárólag a termésbe.

A levelekbe kerülő anyagmennyiségből a levélfelület-növekmény kiszámítása a fajlagos levélfelülettel való szorzással történik. Ezen paraméter értéke is változik a növény fejlődése során. Minden levélfelület-rész kora, amely napról-napra hozzáadódik a teljes levélfelülethez, az aktuális napi hőidővel növekszik. Az a levélfelület-rész, amely kora meghaladja a 'levél élettartama' paraméter értékét elhal, és többé nem vesz részt a fotoszintézisben.

A lefelé történő gyökérnövekedés mértéke [2] a napi hőidő (TT_d) illetve a vízhiány (S_W) és nitrogénhiány (S_N) stressz-faktorok minimumának függvénye. Az 'a' paraméter értéke változhat a növény fejlődése során. A gyökéreloszlás alakját a felhasználó állítja be.

$$(2) \quad RE = a \cdot TT_d \cdot \min(S_w, S_N)$$

A nedvességforgalmi modul az alábbi részfolyamatokat számítja: felszíni elfolyás, párolgás, párologtatás, lefelé illetve felfelé szivárgó víz mennyisége. A talajt egymás alatt elhelyezkedő víztartályok sorozataként modellezi, amelyeket 4 paraméterrel jellemez: maximális vízkapacitás (Θ_{max}), szabadföldi vízkapacitás (Θ_{fc}), hervadás ponti vízkapacitás (Θ_{wp}) és hidraulikus vízvezetőképesség (K_s). Ha a rétegbe érkező víz telíti a réteget ($\Theta > \Theta_{max}$), a víz felesleg visszatorlódik az eggyel fentebbi rétegbe és adott esetben a felszínre, ahol elfolyik. Ha a réteg nedvességtartalma (Θ) nagyobb, mint a szabadföldi vízkapacitás ($\Theta_{max} \geq \Theta > \Theta_{fc}$) a víz egy része (Q) az eggyel lejjebbi rétegbe kerül [3].

$$(3) \quad Q = DC \cdot (\Theta - \Theta_{fc}) \cdot \Delta z$$

DC az ún. drénkonstans, amely a hidraulikus vízvezetőképességből származtatható az alábbi képlettel [4] Δz pedig a réteg vastagsága.

$$(4) \quad DC = 0,1122 \cdot K_s^{0,339}$$

Ha a réteg nedvességtartalma nem éri el a szabadföldi vízkapacitást ($\Theta_{fc} \geq \Theta > \Theta_{wp}$) nincs lefelé történő vízmozgás, habár a réteg nedvességtartalma csökkenhet a növényi vízfelvételnek köszönhetően. Amennyiben a réteg nedvességtartalma a hervadás ponti vízkapacitás értéke alá csökken a növényi vízfelvétel is megszűnik.

Adott mélységben (x) az aktuális talajhőmérséklet (T_{soil}) kiszámításakor a modell figyelembe veszi, hogy a sugárzó energia a talaj felszínét éri és a hőnek időre van szüksége ahhoz, hogy mélyebb rétegekbe is eljusson, miközben egy része elnyelődik. A felszínre érő energia hatása nagyobb mélységekben késleltetve és gyengítve jelentkezik. A késleltetés és a gyengülés mértéke a feltalaj átlagos nedvességtartalmának (Θ_{avg}) és térfogattömegének (BD_{avg}) függvénye. A modell feltételezi, hogy a talajfelszín hőmérsékletének szinuszos éves menete van, amelyet egy albedóból, a napi maximum és minimum hőmérsékletekből és a globálsugárzásból számított faktor ötnapos mozgó átlagával (F_{D5}) módosít [5].

$$(5) \quad T_{soil}^i(x) = \left(T_{avg} + \frac{T_d \cdot T_{amp} \cdot \cos\left(0,0174 \cdot (i - I) + x \cdot f_1\left(\Theta_{avg}, BD_{avg}\right)\right)}{2} + F_{D5} \right) \cdot e^{x \cdot f_2\left(\Theta_{avg}, BD_{avg}\right)}$$

T_{avg} és T_{amp} a hely átlaghőmérsékletét és átlagos hőingását, míg i az év napját jelöli. I értéke az északi illetve déli féltekén 200 illetve 20.

A modell tápanyagforgalmi modulja egyszerű egyenletekkel írja le a nitrogén mérleg be- és kimeneti oldalon szereplő tényezőit: légköri ülepedés, trágyázás, mineralizáció, nitrifikáció, immobilizáció, denitrifikáció, növényi felvétel és nitrátkimosódás. A légköri eredetű nitrogén mennyisége a csapadékmennyiség lineáris függvénye. A szerves és szervesetlen trágyából származó nitrogénformákat a modell eltérő módon kezeli. A mineralizáció üteme a talaj humusz- és nedvességtartalmának illetve hőmérsékletének függvénye. A talaj nedvességtartalma és hőmérséklete befolyásolják a nitrifikáció illetve denitrifikáció ütemét is, amelyek a talaj NH_4 illetve NO_3 tartalmának függvényei. A növényi nitrogén felvétel potenciális mértéke függ a talajban található gyökér mennyiségétől és egy talajnedvesség-függő faktortól. A tényleges nitrogénfelvétel függ a növény igényétől, amely az adott napon előállított anyag és a növény fajlagos nitrogéntartalmának szorzata. Az utóbbi a növény fenológiai fejlődése során változik. A nitrát-lemosódás mértéke arányos a talaj nitrát koncentrációjával és a gyökérvíz lefelé elhagyó víz mennyiségével. A modell szervesanyag-forgalmi (SOM) modulja Parton et al. (1987) munkáján alapszik.

3. Alkalmazási lehetőségek, akadályok és kisegítő modulok

A szimulációs növénytermesztési modellek, így a 4Mx is eredményesen használható az alábbi területeken: (1) Oktatás (az élet- föld-, és agrártudományok kurzusaiban): A rendszerszemléletű gondolkodást előtérbe helyezve mutathatók be a talaj-növény rendszer sokrétű kölcsönhatásban lévő folyamatai és az emberi beavatkozások környezetvédelmi vonatkozásai. (2) Kutatás: Kísérletek és megfigyelések térbeli illetve időbeni kiterjesztése, többek között a klímaváltozás várható hatásainak feltérképezése. (3) Gyakorlat: Intelligens öntözésvezérlés illetve döntéstámogató rendszerek háttérszámításainak végrehajtása. Jogszabályalkotás szakmai háttérének biztosítása. Az eredmények fejezetben mindhárom területről bemutatunk egy-egy példát.

A szimulációs növénytermesztési modellek használatának és fejlesztésének három fő akadálya van: (1) a modell szoftverének kötöttsége; (2) a modell hardverigénye és az (3) adathiány.

A szoftver kötöttségéről már szó esett a bevezetőben. A modellek felhasználói felületei csak néhány paraméter módosítására adnak lehetőséget. A többi paraméter a forráskódban van rögzítve, amely egy átlag felhasználó számára nem hozzáférhető. Például a CERES modellben a fényhasznosítási index (RUE) a kukorica esetében 4 g/MJ-ban van rögzítve, pedig a legfrissebb kísérleti adatok szerint a RUE értéke 3,5 és 4 között változik. A modellfejlesztők nem veszik észre, hogy az általuk készített szoftverbe, 'fejlesztésre' hivatkozva bárki belenyúljon. Ezért a modellek forráskódjai legtöbb esetben nem hozzáférhetők. A modellekről közzétett leírások pedig sok esetben nem egyértelműek vagy csak vázlatosak, amelyek a modell programjának elkészítését nem teszik lehetővé. Azokban az esetekben, amikor a forráskód nyitott, komoly informatikai ismeretek szükségesek a kívánt változtatások/fejlesztések végrehajtásához.

Egy átlagos kutató számára, a személyi számítógépek számítási képességei egészen a 2000-es évek elejéig nem tették lehetővé, hogy a modelleket olyan problémák (finom térbeli felbontású és/vagy hosszú idősoros esettanulmányok, paraméter-optimalizálás, stb.) megoldására használja, amelyek nagyszámú futást igényelnek (1. táblázat). Mivel a 4Mx un. keretmodell a futási ideje hosszabb, mint egy átlagos növénytermesztési modellé, hiszen a számítások elvégzése során a felhasználó által megadott függvényeket értelmeznie kell a számítógépnek. Egy teljes országra kiterjedő klímaváltozással kapcsolatos hatástanulmány során, ahol több száz meteorológiai cella és tucatnyi talajféleség illetve növényfajta kombinációjára 100 éves szimulációk átlageredményeire vagyunk kíváncsiak, még a leggyorsabb PC-knek is napokba telik az összes számítás elvégzése.

1. táblázat. Egy kukorica tenyészidőszak (5-6 hónap) végigszámolása valós időben

Processzor (Intel)	A processzor megjelenésének éve	Futási idő (CERES)	Futási idő (4Mx)
286	1982	10 óra	-
386	1985	7 perc	-
486	1989	4 perc	-
Pentium-I	1993	30 mp	-
Pentium-IV	2000	5 mp	27 mp
Core i7	2011	0,3 mp	1,5 mp

A három fő akadály közül az adathiány jelenti a legkomolyabb problémát. Megfelelő minőségű és mennyiségű adat nélkül a modellek kalibrációja és validációja nem kivitelezhető. Ezek nélkül pedig a modellek egy számítógépes játék szintjén maradnak. Teljes és homogén adatbázisokra van szükség ahhoz, hogy a modellek tesztelés során ki tudjuk szűrni a modellbe kódolt elméleti tudás gyengeségeit, hiányosságait. A teljes azt jelenti, hogy minden adatot, amelyre a modell kalibrálásához és validálásához szükség van, mérésel határozzuk meg. A homogén azt jelenti, hogy mindent a megfelelő helyen és időben, a megfelelő térbeli és időbeli léptékben mérünk. Ott és úgy mérünk, ahol és ahogy kell, amibe a műszerek rendszeres karbantartása is beletartozik. Régebben beállított és/vagy nem modellezők által beállított kísérletek adatbázisa esetében szinte kivétel nélkül az a helyzet, hogy egy vagy több kulcsfontosságú adat hiányzik a szimulációs modell alkalmazásához.

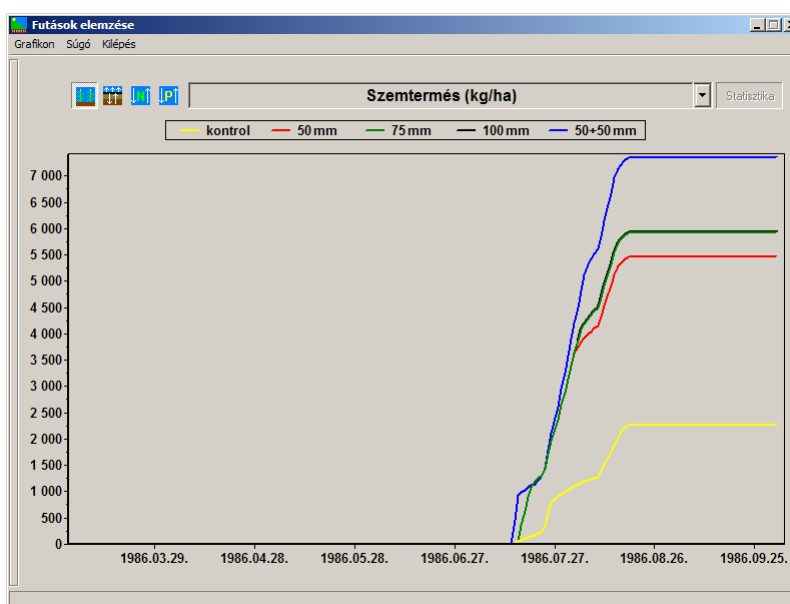
Az adathiány leküzdésének két lehetséges módja az adatpótlás és az adatgenerálás. Ennek megfelelően a 4Mx növénytermesztési modell szoftvercsomagban helyet kapott egy talaj-paraméterek becslésére alkalmas modul (Fodor és Rajkai, 2011), egy globálisugárzás-becselő eljárás (Fodor és Mika, 2011) és egy sztochasztikus időjárás-generátor (Fodor et al., 2010). A két meteorológiai vonatkozású eljárás egy nagy észak-amerikai adatbázison került tesztelésre kiváló eredménnyel. Ezekről rövid összefoglalót az Eredmények fejezetben adunk.

A 4Mx modell egyik legújabb felhasználási lehetőségét az MM5 mezo-skálájú meteorológiai modellel (Oncley and Dudhia, 1995) történő összekapcsolása jelenti. Ezáltal megvalósítható a talaj illetve a földhasználati viszonyok klímára gyakorolt hatásának vizsgálata is.

4. Eredmények

4.1. 4Mx az oktatásban

Az elmúlt 10 év során a 4M modellt a Debreceni Egyetemen, a Corvinus Egyetemen és az Eötvös Loránd Tudomány Egyetemen is bevezettük az oktatásba. Az elméleti felkészítés után, a diákok gyakorlati foglalkozások során próbálhatják ki a modellezésről szerzett ismereteiket. A gyakorlati foglalkozások végén nagy népszerűségnek örvend az ún. virtuális növénytermesztési verseny, melynek során egy adott talaj, év illetve növény adatait felhasználva kell a lehető legnagyobb termést elérni. A verseny során a társaság elég gyorsan két csapatra bomlik: (számítógépes szerepjáték hasonlattal élve) a 'mágusok'-ra illetve 'technokraták'-ra. A 'mágusok' igyekeznek a klimatikus viszonyokat megváltoztatni a modell segítségével: több esőt juttatnak a növényeknek, megnövelik a légköri CO₂ koncentrációt, sőt egyesek még a sugárzás mennyiségét is megemelik. Őket természetesen figyelmeztetni kell a bolygónk Naphoz viszonyított helyzetéből adódó korlátokra. A 'technokraták' az agrotechnikai adatokat igyekeznek manipulálni. Számukra tanulságos tapasztalat például annak a megállapítása, hogy egy menetben fölösleges egy adott mennyiségnél több öntözővizet kijuttatni, a több víz nem eredményez terméstöbbletet (2. ábra).

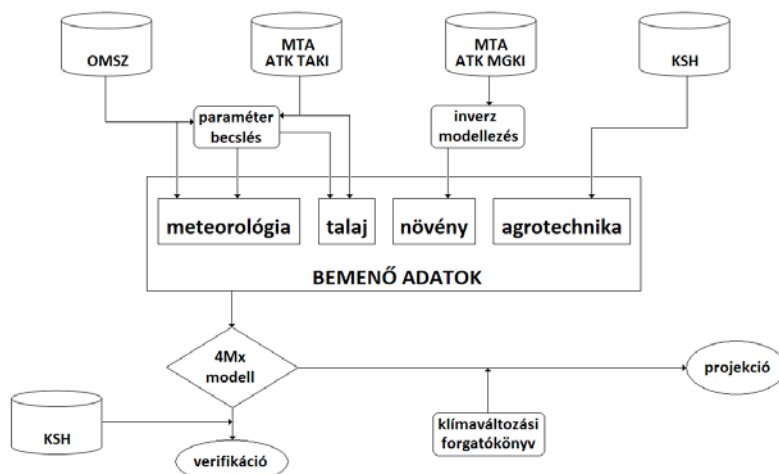


2. ábra. Virtuális öntözési kísérlet eredménye a 4Mx modellben.

4.2. 4Mx a kutatásban

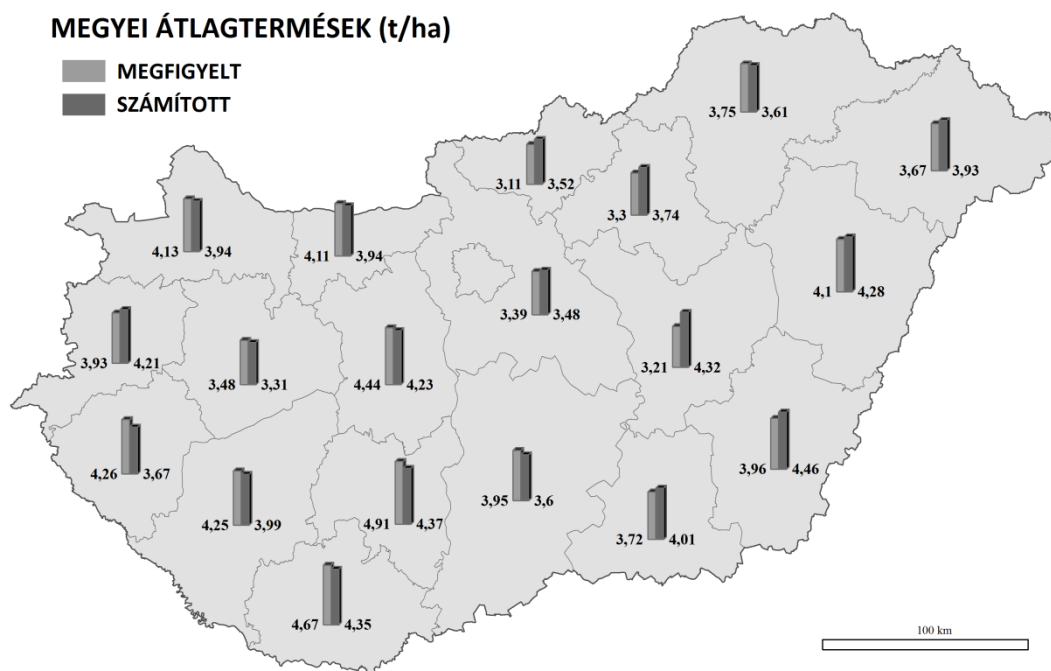
A szimulációs növénytermesztési modelleket elsősorattal használják klímaváltozással kapcsolatos hatástanulmányokban. Ilyenkor nagy kihívást jelent a modell inputigényének kielégítése illetve a modell előzetes validálása. Egy Magyarországra elvégzett hatástanulmány (Fodor et al., 2012) esetében a 4Mx bemenő adatait hazai adatbázisokból kiindulva, becselőeljárások illetve inverz

modellezés segítségével állítottuk elő (3. ábra). A felhasznált meteorológiai illetve talaj adatbázisok 10×10 illetve 1×1 km felbontásúak voltak.



3. ábra. A 4Mx modell alkalmazása egy klímaváltozási hatástanulmányban.

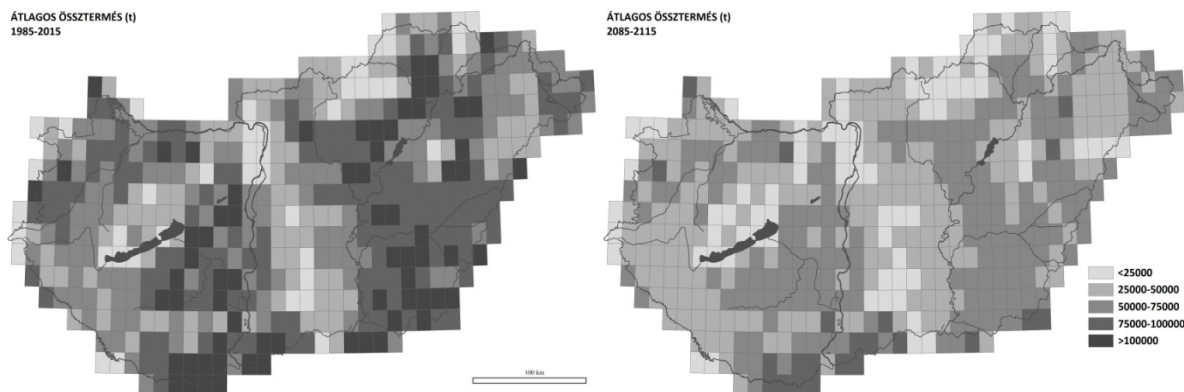
A bemenő adatok előállítását és a parametrizálás után, a modell verifikálást a 2002-2006-os időszakra végeztük el. Kukorica, őszi búza, napraforgó, tavaszi árpa és repce gabonegységben kifejezett számított termésátlagait hasonlítottuk össze a KSH hasonló adataival Magyarország 19 megyéjére (4. ábra).



4. ábra. A 4Mx modell által számított és a KSH adatbázisból kigyűjtött termésátlagok, 2002-2006.

A modell verifikálása után jelenkori majd egy klímaváltozási forgatókönyv (IPCC SRES A1B) alapján módosított meteorológiai adatsor alapján meghatároztuk a terméseredmények jelenkori és a jövőben (2100 körül) várható területi eloszlását (5. ábra). A szimulációs eredmények szerint a termésátlagok csökkenése várható az elkövetkező 100 évben, amely két fő oka a nyári csapadékmennyiség nagymértékű (~30 %) csökkenése illetve az átlaghőmérséklet jelentős (~3 °C) emelkedése miatt megnövekvő evapotranszspiráció. Úgy tűnik, hogy ezeket a negatív hatásokat a CO₂ növekedésének fotoszintézist serkentő hatása nem tudja ellensúlyozni. A terméseredmények ingadozásának növekedése további problémát jelent majd a gazdaságos termelés szempontjából.

Fontos megjegyeznünk, hogy a klímával együtt várhatóan a termesztés-technológia is változáson megy majd keresztül, pl. valószínűleg előbbre tolódik a tavaszi vetésű növények vetésideje. Az agrotechnika várható változásait a modellezés során nem vettük figyelembe.

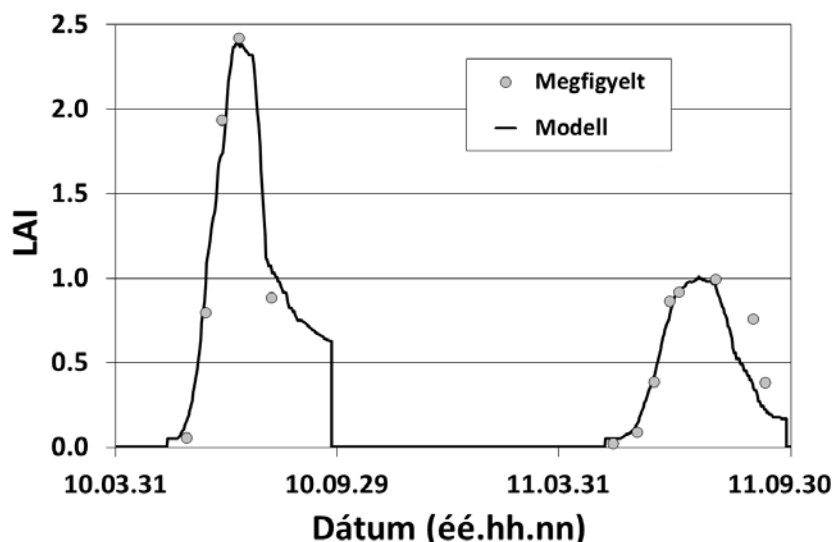


5. ábra. A 4Mx modell által számított jelenkori és jövőbeli, cellákra vonatkozó termésátlagok.

A hőmérséklet az egyik legfontosabb változó, melyet a talaj állapotának szimulációja során a modell nyomon követ. A talajhőmérséklet befolyásolja a csírázás sebességét, a növény növekedését, a tápanyagok felvételét, a talajlégzést, a talajpárolgást és a talajban lezajló fizikai, kémiai és biológiai folyamatok sebességét. Ennek ellenére a CERES és az utódjának tekinthető 4Mx modell talajhőmérséklet modulját, amely az empirikus modellek kategóriájába tartozik, még nem tesztelték hazai adatokon.

2010 márciusában egy agro-meteorológiai állomás kezdte meg működését az MTA ATK TAKI Őrbottyáni kísérleti telepén: összesen 8 parcellán, két kezelés (öntözött-nem öntözött; optimálisan trágyázott-nem trágyázott) két ismétlésben. A kísérlet indulásakor minden parcellán 3 ismétlésben talajfizikai és talajkémiai feltárást végeztünk. A 0-30, 30-60 és 60-90 cm mélységben található rétegekből származó bolygatatlan és bolygatott minták segítségével meghatározásra kerültek az alábbi talajjellemzők: térfogattömeg, humusztartalom, mechanikai összetétel, pF, K_s , pH, Arany-féle kötöttség, AL- P_2O_5 , AL- K_2O , $CaCO_3$, Mg_{KCl} , EDTA-Zn, EDTA-Cu és EDTA-Mn tartalom. Parcellánként 3 TECANAT béléscsővet helyeztünk el melyek segítségével 0-90 cm mélységben, TDR technikán alapuló precíziós talaj-nedvességmérést tudunk végezni. A béléscsőbe helyezhető TRIME-FM3 szenzorral, 10 cm-es felbontásban, 7-10 napos gyakorisággal mérjük a parcellák talajának nedvességtartalmát. Minden parcella közepén 5 db adatgyűjtős talajhőmérőt helyeztünk el, amelyek 15 perces gyakorisággal mérik a hőmérsékletet 5, 10, 20, 40 és 60 cm-es mélységben. A parcellák mellett felállítottunk egy meteorológiai állomást, amely 5 perces gyakorisággal rögzíti a sugárzás, szélsébség és -irány, léghőmérséklet és relatív páratartalom valamint a csapadék adatokat. Az elmúlt három évben kukorica növényvel folytak a megfigyelések. A növények magasságát, levélfelületét, főbb részeinek (levél, szár, termés) tömegét az eltávolított mintanövényeken végzett mérésekkel határoztuk meg, 7-10 napos gyakorisággal.

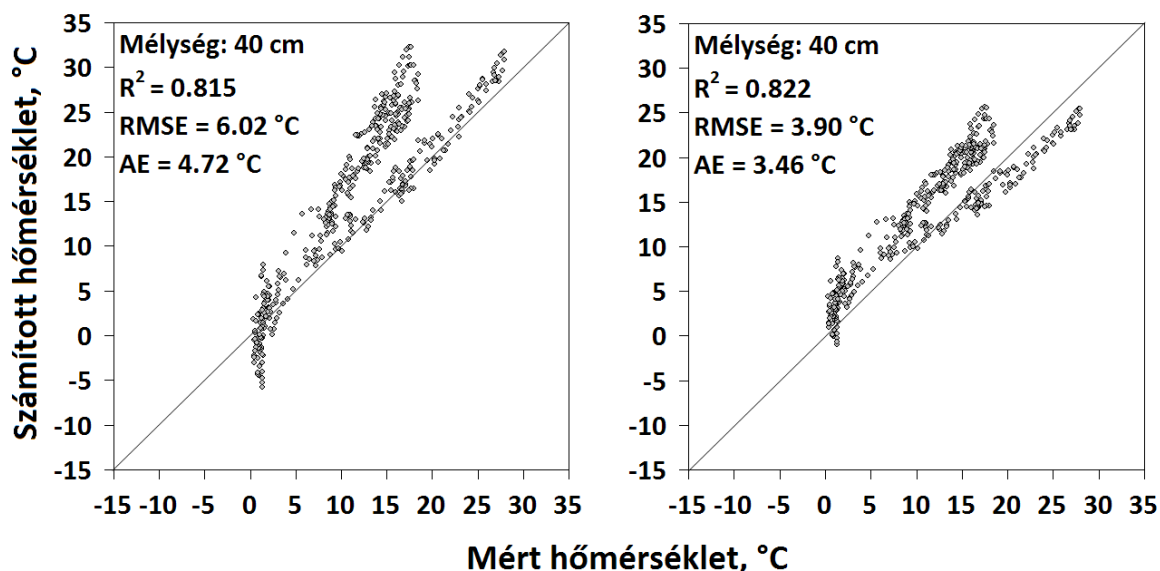
A 4Mx modell talajhőmérséklet modulját az Őrbottyáni megfigyelő állomás adatai segítségével teszteltük. Mivel minden modell által igényelt meteorológiai és talaj adat rendelkezésre állt a helyi mérések alapján, egyedül a növényi paramétereket kellett beállítani úgy, hogy a megfigyelt és számított LAI értékek a lehető legjobb egyezést mutassák (6. ábra). Azért választottuk a LAI-t a paraméteroptimalizálás cél-változójának, mert a növényállomány fejlettsége döntő módon befolyásolja a talaj hőmérsékletének alakulását.



6. ábra. A levélfelület index időbeli alakulása az MTA ATK TAKI Őrbottyáni telephelyén beállított öntözési kísérlet egyik kontrol (nem trágyázott és nem öntözött) parcelláján.

Két év, két teljes tenyészidőszak adatai állnak rendelkezésre: 2010 és 2011. 2010-ben közel 2,5-szer több csapadék esett a kukorica tenyészidőszakában, mint 2011-ben (722 ill. 295 mm). Ennek megfelelően a levélfelület index szezonális alakulása lényegesen eltérő volt a két évben (6. ábra). A növényi paraméterek beállítása után összehasonlítottuk a modell által számított és a megfigyelt talajhőmérséklet értékeket. Az összehasonlítás során nyilvánvalóvá vált, hogy nagyobb mélységeken a modell jelentősen felülbecsli a hőmérsékletet. Egy korrekciós tényező beépítésével ('c' paraméter az [5] képletből származtatott [6] egyenletben) sikerült számottevően javítani a modell teljesítményén (7. ábra). Az új paraméter természetesen hozzáférhető a modell felhasználói felületén keresztül.

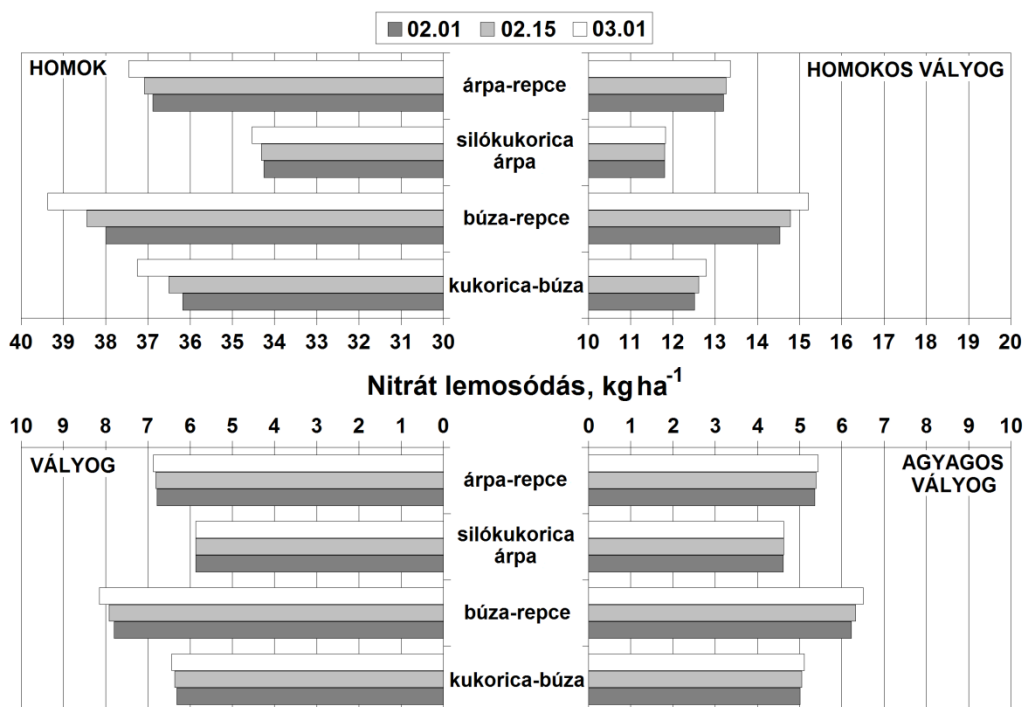
$$(6) \quad T_{\text{soil}}^i(x) = T_d \cdot e^{c \cdot x \cdot f_2(\Theta_{\text{avg}}^i, BD_{\text{avg}})}$$



7. ábra. Mért illetve a 4Mx modell eredeti (baloldali ábra) és módosított (jobboldali ábra) talajhőmérséklet modulja által számított értékek az MTA ATK TAKI agro-meteorológiai állomásának egyik parcelláján.

4.3. 4Mx a gyakorlatban

Az EU szakemberei, minden tagállamban így hazánkban is, öt évente felülvizsgálják a Nitrát Rendelet (91/676/EEC) gyakorlati megvalósulását. Az összegyűjtött tapasztalatok alapján módosítási javaslatokat fogalmazznak meg a tagállamok számára a nitrátleemosódás kockázatának csökkentése érdekében. A legújabb, Magyarország számára megfogalmazott javaslat szerint meghosszabbítanák a téli trágyázási tilalmi időszakot. Jelenleg február 1-ig tart a tilalmi időszak, amelyet március 1-ig hosszabbítanának meg. Félő azonban, hogy az őszi vetésű növények tavaszi starter trágyázásának megkezdésében ez az egy hónapos 'kényszerű késlekedés' számottevő termés kieséshez vezethet. Ugyanakkor, ahogy az EU szakemberei érvelnek, minél hamarabb kerül ki a trágya tavasszal, annál nagyobb valószínűsége a nitrátleemosásnak. A trágyázási tilalmi időszakra vonatkozó módosítási javaslat kapcsán az alábbi kérdés fogalmazható meg: A tavasszal korábban kijuttatott trágya valóban megnöveli-e a nitrátleemosódás kockázatát? A kérdés megválaszolására a 4Mx modellt használtuk fel. A modell bemenő adatait a 4.2. fejezetben vázolt módszerrel (3. ábra) állítottuk elő. Négy eltérő talajféleségen, négy különböző vetésforgó esetében vizsgáltuk a nitrátleemosódás mennyiségét attól függően, hogy a starter trágyázás dátuma február 1, február 15 vagy március 1 volt. A szimulációs eredmények szerint, talajféleségtől függetlenül, a későbbi starter trágyázás szignifikáns termés kieséshez vezetett, ugyanakkor a nitrátleemosódás mennyisége nem csökkent, sőt kis mértékben növekedett (8. ábra). Az, hogy kötöttebb talajokon kevesebb a nitrátleemosódás magától értetődő, hiszen ezek a talajok nagyobb víztartóképeséggel rendelkeznek, így bennük a gyökérszóna alá szivárgó víz és a benne szállított nitrát mennyisége is kevesebb. Koratavasszal az őszi vetésű növény gyökérszete intenzív növekedésbe kezd. Amennyiben az ehhez szükséges tápanyagokból hiány van a feltalajban (pl. késői trágyakihelyezés miatt) a növény növekedésében visszamarad, és tenyészidőszaka alatt kevesebb tápanyagot vesz fel, mint egyébként. Ebből következően több tápanyag marad vissza a talajban, amely megnöveli a lemosódás kockázatát. Ezek alapján a téli trágyázási tilalmi időszak meghosszabbítása környezetvédelmi szempontból sem indokolt.



8. ábra. Számított átlagos, évi nitrát lemosódás értékek 4 különböző vetésforgóban és talajféleségen annak függvényében, hogy a tavaszi első műtrágyázás mely napon (hh.nn) történt.

Köszönetnyilvánítás

Jelen tanulmány az OTKA K-81432 pályázat támogatásával készült.

Hivatkozások

- Diepen, C. A., J. van Wolf, H. van Keulen 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5: 16-24.
- Farkas, Cs., R. Randriamampianina, J. Majercak. 2005. Modelling impacts of different climate change scenarios on soil water regime of a Mollisol. *Cereal Research Communications* 33(1): 185-188.
- Fodor, N., G. Máthéné-Gáspár, K. Pokovai, G. J. Kovács. 2002. 4M - software package for modelling cropping systems. *European J. of Agr.* 18(3-4): 389-393.
- Fodor, N., I. Dobi, J. Mika, L. Szeidl. 2010. MV-WG: a new multi-variable weather generator. *Meteorology and Atmospheric Physics* 107: 91-101.
- Fodor, N., K. Rajkai. 2011. Computer program (SOILarium 1.0) for estimating the physical and hydrophysical properties of soils from other soil characteristics. *Agrokémia és Talajtan* 60: 27-40.
- Fodor, N., J. Mika. 2011. Using analogies from soil science for estimating solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 78-85.
- Fodor, N., L. Pásztor, T. Németh. 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*, DOI:10.1080/17538947.2012.689998
- Forrester, J. W. 1968. *Principles of systems*. Cambridge, Mass., U.S.A.: Wright-Allen Press.
- Harnos, Zs. 1985. Az agroökológiai adottságok rendszerének matematikai modellezése. Doktori értekezés, Budapest
- Huzsvai, L. 2006. A kukorica potenciális termésének modellezése. In *Környezetkímélő növénytermesztés – minőségi termelés*, 80-92. J. Nagy, A. Dobos, eds. Debrecen.: Debreceni Egyetem ATC
- Jamieson, P. D., J. R. Porter, J. Goudriaan, J. T. Ritchie, H. van Keulen, W. Stol. 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.
- Jones, C. A., J. R. Kiniry. 1986. *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development*. Texas, U.S.A.: Texas A&M University Press
- Kovács, G. J. 1995. A CERES modell felhasználása szakterületünkön. *Agrokémia és Talajtan*. 44: 249-262.
- Kovács, G. J., T. Németh, J. T. Ritchie. 1995. Testing Simulation Models for the Assessment of Crop Production and Nitrate Leaching in Hungary. *Agricultural Systems* 49: 385-397.
- Meadow, D. L. 1972. *The limits to growth*. New York, U.S.A.: Universe Books
- Oncley, S. P., J. Dudhia. 1995. Evaluation of surface fluxes from MM5 using observations. *Mon. Wea. Rev.* 123: 3344-3357.
- Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole, D. S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1173-1179.
- Rajkai, K. 2001. Modellezés és modellhasználat a talajtani kutatásban. *Agrokémia és Talajtan* 53: 469-508.
- Ritchie, J. T., 1985. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. In *Wheat Growth and Modeling*, W. Day, R. K. Atkin, eds. New York, U.S.A.: Plenum Publishing Corp.
- Rosenblueth, A., N. Wiener. 1945. The Role of Models in Science. *Philosophy of Science* 12(4): 316-321.