

DEBRECENI EGYETEM
Agrártudományi Centrum
Mezőgazdaságtudományi Kar
Földműveléstani Tanszék

MULTIDISZCIPLINÁRIS AGRÁRTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Doktori Iskola vezető:

Prof. dr. Nagy János
MTA doktora

Témavezetők:

Prof. dr. Nagy János
az MTA doktora

Dr. Kovács Géza
a biol. tud. kandidátusa

**A NEDVESSÉGFORGALOM MODELLEZÉSE NÖVÉNYTERMESZTÉSI
MODELLEKBEN**

Készítette:

Fodor Nándor
doktorjelölt

Debrecen
2002

1. BEVEZETÉS

A légkör-talaj-növény rendszer igen összetett. Egy Debrecenhez közeli szántóföld egy hektáros területére átlagos évben kb. 4 500 tonna csapadék esik. Eközben ugyanerre a területre több mint 4 TJ energia érkezik a Napból. Az elvetett néhány kilogramm vetőmagból néhány hónap alatt több mint 25 tonna tömegű növénytakaró fejlődik ki, miközben a rendszer összetevői számtalan módon hatnak egymásra.

A mezőgazdasági rendszermodellek célja, hogy a légkör-talaj-növény rendszer folyamatait matematikai eszközökkel leírják, és számítógép segítségével szimulálják választ keresve a fenti a kérdésekre. Ezen rendszermodellek különböző függvényekkel, differenciálegyenletekkel, illetve ezekből felépülő algoritmusokkal (eljárásokkal) írják le a rendszer folyamatait. Ezen eljárások egy része a 'modellezett' növény fejlődését és növekedését, más részük a talajban történő vízmozgást, megint más részük pedig a rendszer többi folyamatait (pl. nitrifikáció, denitrifikáció, transzspiráció stb.), írják le. A rendszer főbb részfolyamatait leíró modellösszetevőket almodelleknek (moduloknak) nevezzük.

A számítástechnika fejlődése csak a 1970-es években tette lehetővé, hogy a kutatók (és programozók) az addig felhalmozott természettudományos ismereteket számítógépes algoritmusokban megfogalmazva elkészítsék az első szimulációs modelleket.

Mivel a modellezett rendszer egyik fő eleme a víz, a szimulációs növénytermesztési modellek egyik legfontosabb része a talaj nedvességforgalmát leíró modul. Ennek megfelelően doktori dolgozatom céljai az alábbi pontokban foglalhatók össze.

1. Áttekinteni a szántóföldi rendszermodellek nedvességforgalmi almodelljeinek történeti fejlődését.
2. Összehasonlítani ezen modellek hatékonyságát valós mérési eredmények felhasználásával.
3. Áttekinteni a talaj nedvességforgalma modellezésének különleges problémáit. Például:
 - a. A modellek inputigényének kielégítése
 - b. Bi- és unimodális talajok
 - c. A talaj víztartó- és vízvezetőképességének hiszterézise
 - d. Bypass flow (elkerülő áramlás)

4. Felkutatni és bemutatni a fent konkrétan is említett problémák megoldására eddig született megoldásokat.
5. Megalkotni oktatási és kutatási célra egyaránt használható növénytermesztési modellt (4M), amely magában foglalja a talaj nedvességforgalmának modellezése területén eddig elért főbb eredményeket, és összehasonlíthatóvá teszi a különböző iskolák elméleti modellezési javaslatait.
6. Elvégezni a 4M modell nedvességforgalommal kapcsolatos paramétereire, illetve moduljaira vonatkozó érzékenységvizsgálatokat.
7. Összekapcsolni a 4M modellt olyan adatbázisokkal, amelyek lehetővé teszik a modell szélesebb körben történő felhasználását.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A 4M modell

2001 januárjában a Talajtani Társaság keretein belül megalakult a Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye (4M), amely egy magyar kutatók által fejlesztett növénytermesztési modell megalkotását tűzte ki célul. Kiindulásként a J.T. Ritchie vezetésével kifejlesztett CERES modellt választottuk, egyrészt mert nemzetközi (*Jamieson et al., 1998*) és hazai (*Kovács et al., 1995; Németh, 1996*) vizsgálatok már bizonyították ezen modell hatékonyságát, másrészt, mert a modell forráskódja elérhető volt számunkra. A CERES-t átírtuk egy modern programozási nyelvbe. Ezt a változatot neveztük 4M 0.0-nak.

A 4M magyarul (is) kommunikál, egyszerűen kezelhető, és új modulokkal könnyen bővíthető. Fejlesztésekor két cél elérésére törekszünk:

1. Célunk, hogy a modellezett rendszer egyes részfolyamataira a program több modult/eljárást kínáljon föl, melyek közül a felhasználó, a céljaitól és a rendelkezésére álló bemenő adatoktól függően, választhat.
2. Célunk, hogy olyan becslőeljárásokat építsünk be a 4M-be, melyek segítségével nehezen meghatározható bemenő adatok, egyszerűbben kivitelezhető mérések eredményeinek felhasználásával megbecsülhetők.

Mivel érdeklődésem elsősorban a talaj nedvességforgalmára irányult, a 4M-et ennek megfelelően kezdtem fejleszteni.

2.2. Különböző filozófiájú nedvességforgalom-modellek összehasonlítása

Az 1960-as évektől kezdődően három, lényegüket tekintve eltérő működésű nedvességforgalmi-modellt dolgoztak ki. Növénytermesztési modellekbe ágyazva a nedvességforgalmi-(al)modellek célja, hogy a gyökérzóna nedvességeloszlásának időbeli változását valósághűen írják le. Működésükhöz a modellezett talajszelvény fizikai tulajdonságain túl, természetesen a rendszer kezdő állapotának (talaj nedvességeloszlása, gyökéreloszlás stb.) ismerete is szükséges. Felépítésük és működési elvük egyszerűsége szerint az alábbi módon csoportosíthatók:

I. Mérleg modellek

II. Kapacitív modellek

III. Konduktív modellek

A 4M modellbe, a CERES-ből örökölt kapacitív almodell mellé beépítettem egy konduktív nedvességforgalmi modult.

2.2.1. Nedvességforgalmi modellek összehasonlítása a 4M segítségével

A növénytermesztési modellekben általában csak egyfajta nedvességforgalmi modul van. Különböző modelleket használni a különböző nedvességforgalmi modulok hatékonyságának vizsgálatára nehézkes, mert az összehasonlított modellekben többnyire más modulok is különböznek. A 4M modellben lehetőség nyílik olyan párhuzamos modellfutások végrehajtására, amelyekben egyedül a nedvességforgalmi modul különbözik.

Szabadföldi kísérletek/mérések eredményeit felhasználva, megvizsgáltam, hogy a 4M melyik nedvességforgalmi almodellel írja le pontosabban a talaj nedvességforgalmát. Ennek eldöntésére a mért és a modell által számított talajnedvesség-értékek átlagos eltérését használtam fel.

2.2.2. Korábbi mérési adatokból származtatott paraméterek

1993-ban Rajkai Kálmán vezetésével a Herceghalmi Kísérleti Gazdaság négy pontján megmérték a konduktív nedvességforgalmi modellek által igényelt paraméterek meghatározásához szükséges alapadatokat (pF adatok, mechanikai összetétel, térfogat tömeg, szerves anyag tartalom).

Ezen talajszelvények közelében 1993.05.18. és 1993.07.08, valamint 1994.06.01. és 1994.10.03. között, átlagban 10 naponként, kapacitív szondával, 10 cm-enként megmérték a talaj nedvességtartalmát. A vonatkozó időszakból, a szükséges időjárási adatok közül, rendelkezésünkre áll a helyben mért csapadékmennyiség és napi átlaghőmérséklet. A mért globálsugárzás-adatok nem álltak rendelkezésemre, ezért generált értékeket használtam a modellfutásokban. Az 1-es számú területen minkét évben búzát, a 4-es területen mindkét évben kukoricát vetettek. A nedvességmérés helyén a mérési előkészületek miatt, az állomány hiányzott. Ennek hatását a gyökéreloszlásban vettem figyelembe. Aktív gyökerek kismértékű jelenlétét feltételeztem 30 cm-nél nagyobb mélységben. Ennek azonban az 1-es terület esetében nem sok jelentősége van, mivel a nedvességmérések megkezdése után nem sokkal a búzát learatták. A kapacitív modul pontos működéséhez a talaj felszínéhez közel vékonyabb rétegek megadására van szükség. A szelvények szántott rétegét 5, 10 és 15 cm (1-es szelvény) illetve 5 és 15 (4-es szelvény) cm vastag rétegekre osztottam fel. A 4-es szelvény második (15 cm vastag) rétegének egy része a nedvességmérés szempontjából bizonytalan tartományhoz tartozik. Ezért a modulok összehasonlításához csak a 15-30, 30-50, 50-70 cm-es rétegek (1-es szelvény), illetve a 20-50 és 50-70 cm-es rétegek (4-es szelvény) nedvességadatait használtam fel.

A konduktív nedvességforgalmi modult a van Genuchten féle víztartókéesség függvénnyel használtam. A függvény Θ_s , Θ_r , α , n paramétereit a mért pF adatokra történő függvényillesztéssel határoztam meg. A hidraulikus vezetőképességet *Campbell* módszerével (1985) a talaj mechanikai összetételéből és térfogattömegéből becsültem meg. A kapacitív modul két bemenő adatát szintén a pF mérések alapján adtam meg. Feltételeztem, hogy a talajrétegekre jellemző maximális vízkapacitás értékek a $pF = 0,0$ -hoz tartozó nedvességtartalmakkal egyenlők, továbbá feltételeztem, hogy a holtvíztartalom értékek a $pF = 4,2$ -hez tartozó nedvességtartalmakkal egyenlők.

2.2.3. Saját mérések alapján meghatározott paraméterek

A herceghalmi területen a fent említett pontok közül kiválasztottam kettőt (1-es és 4-es számú), és az adott helyen meghatároztam a kapacitív nedvességforgalmi almodell által igényelt, még hiányzó, bemenő adatokat. A szabadföldi vízkapacitás és drénhányad értékeket egy egyszerű beöntözéses kísérlet segítségével határoztam meg. A vízállás megszűnése után, a párolgás megakadályozására, a talajt mezőgazdasági fóliával letakartuk. Egy nappal a letakarás után a szelvényeket 10 cm-es felbontásban, 150 cm mélységig megmintáztuk és a gyűjtött talajminták nedvességtartalmát gravimetriás módszerrel meghatároztuk. Ezek után, időről-időre, a kapacitív szondával, a felszíntől kezdve 10 cm-enként, megmértük a talaj nedvességtartalmát. Mivel csak azt az állapotot vártuk, amikor az egyes rétegek nedvességtartalma gyakorlatilag már nem változik, nem volt szükség a szondák kalibrálására. Miután már nem tapasztaltunk nedvességváltozást, mindkét szelvényt, két pontban, 10 cm-es felbontásban, 150 cm mélységig megmintáztuk. A talajminták nedvességtartalmát gravimetriás módszerrel meghatároztuk. Az így nyert nedvességtartalmak térfogattömegekkel való szorzatai adták a szabadföldi vízkapacitás értékeket.

Miután mindkettő nedvességforgalmi modul bemenő adatait előállítottam, mindkét szelvényre két modellfuttatást végeztem, amelyek egyedül a nedvességforgalmi modulban különböztek. A konduktív és kapacitív modulokkal történő futások eredményeit összehasonlítottam a mért nedvességtartalmakkal.

2.3. Érzékenység vizsgálatok

A növénytermesztési modellek különböző összetevőikre (Azok felépítésére, ha egy modulról van szó, illetve azok értékeire, ha egy paraméterről van szó.) különböző mértékben érzékenyek. Egyes paraméterek szinte mindegy, hogy milyen értékkel rendelkeznek, alig vannak hatással a modell eredményeire, más paraméterek értékeinek kis mértékű változásai is jelentősen befolyásolják a modell számításainak eredményét. Mivel a növénytermesztési modellek igen összetett rendszerek, érzékenységvizsgálatuk is bonyolult. A modell egy összetevőjének megváltozására, különböző időjárási körülmények között másképp reagál. Csapadékos években kevésbé érzékeny. Az érzékenységvizsgálatokat minden esetben egy 20 éves (1968-87) időjárási adatsor segítségével végeztem. A modell

minden beállításával 20 futtatást végeztem az időjárási adatsor éveinek megfelelően. Az inputváltoztatás outputra gyakorolt hatását (ΔO) az alábbi módon definiáltam: Minden évre képeztem az eredeti inputtal nyert output (o_i) és a módosított inputtal nyert output (o'_i) abszolútértékes különbségének és az eredeti inputtal nyert output hányadosát, és vettem ezen hányadosoknak a 20 évre vonatkozó átlagát százalékban:

$$[1] \quad \Delta O = \frac{\sum_{i=1}^{20} \frac{|o_i - o'_i|}{o_i}}{20} \cdot 100$$

A modellfutások minden év március elsején indultak. A vizsgálatban szereplő talajszelvények mindegyikénél feltételeztem, hogy kezdetben a hasznosítható nedvességtartalmuk 150 mm. Minden futásban kukorica jelzőnövényt használtam.

A modell érzékenységet minden esetben a legfontosabb kimenő adatokra (termés, biomassa, LAI maximuma) vonatkozóan vizsgáltam. Az érzékenységvizsgálatok legfőbb célja számomra a modell fejlesztési irányának kijelölése, amibe beleértem a modell működéséhez szükséges inputadatok minőségének/pontosságának kérdését is. Azokat a paramétereket, amelyekre a modell érzékeny, nagyobb pontossággal kell meghatározni, illetve azokat a modulokat kell elsősorban fejleszteni, amelyek nagyban befolyásolják a modell eredményeit.

2.3.1. Érzékenység a víztartókéesség függvény típusára

A víztartókéesség leírására, a 4M modell jelen változatában, csakúgy, mint a világon használt modellek túlnyomó többségében, a felhasználó a Brooks-Corey illetve a van Genuchten féle függvények közül választhat (*Brooks and Corey*, 1964; *van Genuchten*, 1980). Megvizsgáltam, hogy víztartókéesség leírására alkalmazott függvény típusa milyen különbséget okozhat a modell eredményeiben. A vizsgálathoz két eltérő vízgazdálkodású talaj adatait használtam fel: mészlepedékes alföldi csernozjom (Pusztaszabolcs), kovárványos barna erdőtalaj (Nyírlugos). A pF adatokra (*Rajkai et al.*, 1981, *Várallyay*, 1987) először Brooks-Corey féle függvényt illesztettem, és azok paramétereit adtam meg bemenő adatként, majd mindezt megismételtem a van Genuchten féle függvénnyel. A K_s paramétereket a mechanikai összetétel és térfogattömeg alapján *Campbell* (1985) módszerével becsültem meg.

2.3.2. Érzékenység a víztartókéesség függvény paramétereire

Megvizsgáltam, hogy a van Genuchten féle víztartókéesség függvény paramétereinek megváltozására mennyire érzékeny a modell. Az előzőekben már említett csernozjom és barna erdőtalaj szelvények adatait használtam fel. Először a mért adatokból függvényillesztéssel (Θ_s , Θ_r , α , n) illetve becslésekkel (K_s) nyert inputadatokkal futtattam a modellt. A talajszelvények minden szintjének minden paraméterére megvizsgáltam, hogy értékük adott mértékű megváltozására (miközben minden más változatlan marad) a modell főbb outputjai hogyan reagálnak. A vizsgált talajok minden paraméterére, az eredeti értéktől $\pm 1\%$; $\pm 2\%$; $\pm 5\%$; $\pm 10\%$ -kal eltérő értékekkel végeztem modellfuttatásokat.

2.3.3. Érzékenység a histerézis figyelembevételére

A 4M modellbe beépítettem a *Kool* és *Parker* (1987) által kidolgozott eljárást a histerézis leírására. A módszer a van Genuchten (1980) által javasolt víztartókéesség függvényt használja. A módszer alapján fő száradási és fő nedvesedési görbe (paramétereinek) ismeretében a Θ_s és Θ_r értékének változtatásával, bármely köztes görbe (KG) paraméterei felírhatók. Megvizsgáltam, hogy a histerézis figyelembe vétele mennyiben módosítja a modell főbb kimenő adatait.

2.3.4. Érzékenység a bypass flow (elkerülő áramlás) figyelembevételére

Beépítettem a 4M modellbe egy olyan rutint, amely lehetővé teszi a duzzadó-zsugorodó talajokban lezajló elkerülő áramlások leírását. A modul működéséhez a konduktív vízmozgás modellek által igényelt bemenő adatokon túl az alábbi inputok szükségesek:

1. A talaj homogénnek tekinthető rétegeinek zsugorodási görbéje.
2. A talajfelszín egységnyi területén található repedések összhossza.
3. A repedések maximális mélysége.

Az eljárás működésének részletes ismertetésétől ezen a helyen eltekintek. Az eljárás teszteléséhez Tóth Tibor nyírólaposi szikes talajadatait (*Tóth and Jozefaciuk, 2002*) használtam fel. Két talajszelvényre elkészítettem a 4M talaj inputfájlját. Megvizsgáltam, hogy mekkora különbséget eredményez a modell eredményeiben ha az elkerülő áramlást figyelembe veszem.

2.3.5. Érzékenység a bimodalitás figyelembevételére

A 4M-ben a felhasználónak lehetősége van bimodális víztartókéesség függvény megadására. Ennek paraméterei egy speciális függvényillesztő eljárással határozhatók meg a mért pF adatokból. A TAKI adatbázisából (*Rajkai et al., 1981, Várallyay, 1987*) kiválasztottam egy talajszelvényt (Mezőtúr: réti csernozjom) melynek egyes szintjei (A, B1, BC) bimodális jelleget mutattak. Elkészítettem egy olyan inputfájl, amelyben minden szintnek a pF adatokra illesztett egyszerű (unimodális) van Genuchten függvény paramétereit adtam meg bemenő adatként, majd egy olyat, ahol a bimodális szinteknek bimodális van Genuchten függvény paramétereket adtam meg. A bimodális paramétereket tartalmazó inputfájlnak két változatát készítettem el. Az egyikben a talajmátrix és a makropóruster hidraulikus vezetőképességének ugyanazokat az értékeket adtam meg, a másik változatban feltételeztem, hogy a makropóruster hidraulikus vezetőképessége egy nagyságrenddel nagyobb a talajmátrixénál. Megvizsgáltam, hogy a bimodális paraméterekkel történő modellfutások eredményei mennyire térnek el az unimodális esettől.

2.3.6. Érzékenység a potenciális evapotranszpiráció számítás módjára

A 4M-ben három potenciális evapotranszpiráció számítási módszer közül választhat a felhasználó:

1. FAO-Penman féle (*Doorenbos and Pruitt, 1977*)
2. Priestley-Taylor féle (1972)
3. Szász féle (1973)

A rendelkezésemre álló pestlőrinci adatsor (1968-87) mindhárom eljárás inputjait tartalmazza. Segítségével megvizsgáltam, hogy mekkora eltérések jelentkeznek a modell outputjaiban attól függően, hogy a felhasználó melyik eljárást választja. Megvizsgáltam továbbá, hogy a Szász féle módszerrel a modell (4M) érzékeny-e a szélsőbesség illetve relatív páratartalom inputra, vagy esetleg helyettesíthetők valamiféle átlagértékkel. A 20 éves adatsor alapján minden hónapra megállapítottam az átlagos szélsőbességet illetve relatív páratartalmat. Megvizsgáltam, hogy mennyire változnak meg a modell főbb kimenő adatai ha ezeket az átlagértékeket használom a mért napi értékek helyett.

2.4. Pedotranszfer függvények alkalmazása talajadatok becslésére

A konduktív nedvességforgalmi modellek többsége számára, a talajszelvény minden rétegére, a víztartó- és vízvezetőképesség függvény Θ_s , Θ_r , α , n illetve K_s paramétereit kell megadni. Amennyiben rendelkezésünkre állnak a pF mérés eredményi (ez a legjobb eset), a Θ_s , Θ_r , α , n paraméterek a Θ_i - h_i pontokra történő függvényillesztéssel határozhatók meg. A hidraulikus vezetőképesség egy (elvben) egyszerű kísérlet segítségével megmérhető. Ha ezek a mérési eredmények hiányoznak a paraméterek pedotranszfer függvények (PTF) segítségével a talaj térfogattömegéből, szerves anyagtartalmából és szemcseméret-eloszlásából megbecsülhetők. A TAKI adatbázisában (Rajkai et al. 1981; Várallyay 1987) 34 helyről, 44 (1. táblázat) talajszelvényből származó 244 (összes só < 0,1 %) talajmintára rendelkezésünkre állnak a mechanikai összetétel (H – homok; I – iszap; A – agyag), térfogattömeg (TT), humusztartalom (SZA) és pF adatok.

Típus	db
Réti talaj	11
Réti	12
Csernozjom	16
Egyéb	5

1. táblázat: A szelvények talajtípus szerinti megoszlása.

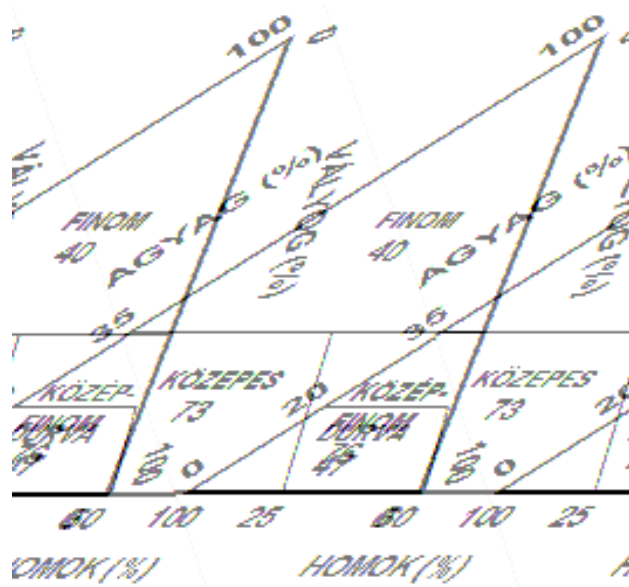
Ezt az adatbázist eddig még nem használták fel arra, hogy olyan pedotranszfer függvényeket készítsenek a segítségével, amelyekkel a van Genuchten féle víztartóképesség függvény paraméterei közvetlenül megbecsülhetők.

Wösten és munkatársai (1999) több mint 5.000 európai (magyarországi nem volt köztük) talajminta adatai alapján olyan pedotranszfer függvényeket állítottak fel, amelyek a van Genuchten féle függvény paramétereire adnak becslést. A TAKI adatbázisán összehasonlítottam a Wösten féle PTF-ek becsléseit az általam készített PTF-ekével. Megvizsgáltam, hogy az általam készített PTF-ek becsléseivel helyettesíthetők-e a mérésből származó talaj-inputadatok a 4M növénytermesztési modellben.

2.4.1. A pedotranszfer függvények (PTF-ek) előállítása

A TAKI adatbázisában szereplő talajokat szemcseméret-eloszlásuk alapján 4 osztályba soroltam (1. ábra), melyek kialakításánál azt is figyelembe vettem, hogy az osztályok

elegendően nagy számú talajmintát tartalmazzanak. A talajok pF adataira van Genuchten féle függvényeket illesztettem. Az így kapott Θ_s , Θ_r , α , n paramétereket az osztályokon belül talajonként, regressziós egyenletek (pedotranszfer függvények) segítségével kapcsolatba hoztam az adatbázis H, I, A, LEI, TT, SZA adataival illetve ezek egyszerű függvényekkel (pl.: $\ln(A)$, H^2) származtatott értékeivel.



1. ábra: A TAKI adatbázisában szereplő 244 (nem szikes) talajmintájának csoportosítása háromszögdiagram segítségével. (Durva: 47 db...)

2.4.2. PTF-ek összehasonlítása

A TAKI adatbázisának 244 talajára megvizsgáltam, hogy pF adatokra illesztett van Genuchten féle függvény ugyanazon pF értékekre ($pF = 0; 0,4; 1; 1,5; 2; 2,3; 2,7; 3,4; 4,2; 6,2$) előjelesen mekkora eltérést ad a mért nedvességtértekhöz képest. Minden pF értékre ezen (felfelé és lefelé való) eltérések maximumát használtam fel annak eldöntésére, hogy egy talajminta esetében, az adott szívóerőkre, elfogadhatók-e a PTF-ekkel nyert becslések. A Wösten féle valamint az általam előállított (Fodor féle) pedotranszfer függvények segítségével, meghatároztam a TAKI adatbázisa 244 talajának Θ_s , Θ_r , α és n paramétereit. Megvizsgáltam, hogy az így nyert víztartókéesség függvények értékei a $pF = 0; 0,4; 1; 1,5; 2; 2,3; 2,7; 3,4; 4,2; 6,2$ szívóerők mellett mennyire térnek el a mért nedvességtértektől, és hogy ez az eltérés az elfogadható tartományon még belül van-e. Egy független, 10 talajt

tartalmazó adatbázison (*Rajkai et al. 1981; Várallyay 1987*) szintén elvégeztem a fenti összehasonlítást.

2.4.3. PTF-ek becslései, mint modell inputok

Mivel a K_S paraméterek nem álltak rendelkezésemre, azokat *Campbell* (1985) módszerével a talaj térfogattömegéből és szemcseméret-eloszlásából, mind a 244 talajra megbecsültem. Mind a 44 szelvény számára elkészítettem az alábbi négy talaj input fájlt a 4M modell számára:

1. A talajszelvény minden rétegére a pF-mérési adatokból függvényillesztéssel nyert paramétereket adtam meg. (Ez a lehető legjobb eset.)
2. A C szint rétegeire PTF-ekkel becsült paramétereket adtam meg, a többi számára illesztésből származó paramétereket.
3. A B és C szint rétegeire PTF-ekkel becsült paramétereket adtam meg, a többi számára illesztésből származó paramétereket.
4. A talajszelvény minden rétegére PTF-ekkel becsült paramétereket adtam meg.

Az 1968-87 között Pestlőrincen mért meteorológiai adatokat felhasználva, megvizsgáltam, hogy a 2-4. inputfájlokkal végrehajtott modellfutások főbb eredményei (virágzás dátuma, LAI maximuma, termés stb.) mennyire különböznek az 1. inputfájllal kapott eredményektől. Minden talaj inputfájllal 20 (modell)futtatást végeztem az időjárás fájl évei számának megfelelően. Minden futás ugyanabból a kezdőállapotból indult, kukorica jelzőnövényt. Ez az összes talajszelvényre vonatkozóan (inputfájl típusonként) 880 modellfutást jelentett (2. táblázat).

Típus	Futások száma
Réti talaj	220
Réti csernozjom	240
Csernozjom	320
Egyéb	100
Összesen	880

2. táblázat: **Modellfutások száma talajtípusok szerint (inputfájl-típusonként).**

Debreceni kisparcellás kísérletekben az ismétlések között a megfigyelt növényi jellemzők (termés, biomassza, szentömeg stb.) 5-10 %-os eltérését tapasztalták (Huzsvai, 2000). A 4M alapját képező CERES modell kifejlesztője szerint egy modell eredményei akkor tekinthetők elfogadhatóknak ha a megfigyelt értékektől legfeljebb 10%-kal térnek el (Ritchie, 2000). Ennek megfelelően a PTF-ek becsléseit akkor tartom elfogadhatónak, amikor a segítségükkel kapott paraméterekkel a modellfutás eredményiben 10 %-nál kisebb eltérés adódik a nem-becsült (1. típusú talaj input fájl) paraméterekkel történő futáshoz képest. Összesítve és talajtípusonként megvizsgáltam, hogy a 2.-4. inputfájlokkal az összes futásból (2. táblázat) hány esetben volt elfogadható a PTF-ek becslése.

2.5. Talajparaméterek becslése a Shao-Horton módszerrel

Megvizsgáltam egy a van Genuchten féle víztartókéesség-függvény paramétereinek meghatározására nemrégiben kidolgozott, beszivárgási kísérleten alapuló módszer (Shao and Horton, 1998) becslési pontosságát. A mérésekhez nyíregyházi homok illetve látóképi csernozjom (vályog) felső 30 cm-éből vett talaját használtam fel. A homokot 1,4 a vályogot 1,3 g*cm⁻³ térfogattömegre betöltve meghatároztam mindkét talaj pF görbét és meghatároztam a talajok mechanikai összetételét, és szervesanyag-tartalmát. A Fodor féle pedotranszfer függvényekkel valamint a Shao-Horton módszerrel meghatároztam (két ismétlésben) mindkét talaj van Genuchten típusú víztartókéesség függvényének paramétereit.

Mivel a Shao-Horton módszer a pF mérés során alkalmazott eljárástól nagyon eltérő folyamat alapján határozza meg a paramétereket, elképzelhető, hogy az ily módon nyert paraméterek értékei jelentősen eltérnek a pF mérésből származó értékektől. A pF mérés során tulajdonképpen a fő száradási görbét határozzák meg, míg a Shao-Horton módszer egy száraz talaj nedvesedési folyamatát használja. A hiszterézis jelensége miatt a fő nedvesedési görbe esetében az α paraméter értéke minden esetben nagyobb mint, a fő száradási görbe esetében. Megvizsgáltam, hogy a Shao-Horton módszerrel meghatározott víztartókéesség-függvény, a fő száradási vagy a fő nedvesedési görbéhez áll-e közelebb. Megvizsgáltam továbbá, hogy a pedotranszfer függvényekkel vagy a Shao-Horton módszerrel nyert víztartókéesség függvények illeszkednek jobban a mért pF pontokra.

2.5.1. A fő nedvesedési görbe meghatározása

Légszáraz talajokkal 5 cm átmérőjű, homok esetében 80 cm, vályog esetében 110 cm magas oszlopot töltöttem meg. Az oszlopokat egy lapos edényben vízbe állítottam, amelybe egy Mariott-palack segítségével folyamatos vízutánpótlást biztosítottam. Az oszlopok tetejének letakarásával megakadályoztam a párolgást. Ugyanígy megakadályoztam, hogy a lapos edényben a vízszint a párolgás miatt csökkenjen. Megvártam, amíg a Mariott-palackban a vízszint egy héten keresztül állandó maradt. Ezután az oszlopokat 3 cm vastag szeletekre vágtam, és gravimetriás módszerrel meghatároztam az egyes talajszeletek nedvességtartalmát. A szeletek nedvességtartalmát a az oszlop aljától mért távolságuk függvényében ábrázolva a fő nedvesedési görbét kapjuk.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Nedvességforgalmi modellek összehasonlítása a 4M segítségével

1. Néhány kivételtől eltekintve mindkét modul a mérési hibán belül modellezte a vizsgált talajszelvények nedvességforgalmát.
2. A két modul hatékonysága a vizsgált szelvények nedvességforgalmának modellezésére gyakorlatilag megegyezik.
3. A mért és a modellezett nedvességértékek között nagyobb eltérések adódtak:
 - 1-es szelvény, 15-30 cm mélység, 1994 (30. ábra)
 - 4-es szelvény, 20-50 cm mélység, 1994 (33. ábra)
 - 4-es szelvény, 50-70 cm mélység, 1994 (34. ábra)

3.1.1. Az eltérések lehetséges okai

Az 1-es szelvény esetében adódó eltérések nagy valószínűséggel a felszíni vízfolyás miatt adódtak. A nyári intenzív esőzések esetében az elfolyást számító modul alábecsülte a felszíni vízfolyás mértékét. A lefolyási paraméter értékének növelésével (70 → 80) ez az eltérés jelentősen csökkenthető, de még mindig igen nagy mértékű marad.

Szembetűnő azonban a 202. nap (1994). Az ezt megelőző 3 nap folyamán 29,1 mm csapadék esett (ebből 25,1 mm egy napon a mérés előtt két nappal), ennek azonban semmi nyomát nem lehet látni a 0-30 cm-es mélység mérési adatai szerint. A 0-10, 10-20, 20-30 cm-es mélységre vonatkozó 202. napi mérések mind kisebb nedvességértéket mutattak, mint az 192. napi mérések. A 192. napon 5,3 mm eső esett, előtte 10 napon keresztül nem esett eső mégis a talaj felső 30 cm-es rétegében a nedvességmérések szerint több nedvesség van, mint a 202. napon. Vagy még nagyobb mértékű felszíni elfolyás történt vagy a 25,1 mm-es eső érkezett sávos zápor formájában és a csapadék mérés helyén több eső esett, mint a talajszelvénynél.

Az 1994-es évben 4-szer is előfordult (12-ből), hogy esős napon mértek. A 181. napon (06.30.) 11,6 mm esett. Ezen a napon nagy eltérés mutatkozik a mért és számított nedvességtartalmak között (4-es szelvény, 20-50 cm-es mélység). Elképzelhető, hogy a nedvességmérő szonda számára a talajba helyezett csövek mellett a csapadék elérte ezt a mélységet (egyfajta mesterséges elkerülő áramlás).

A 4-es szelvény esetében (1994, 50-70 cm-es mélység) a 160. naptól (06.10.) kezdődően mind mérések szerint mind a modulok eredményei szerint jól láthatók a növényi vízfelvétel jelei. A réteg nedvességtartalma fokozatosan csökken. A mérések szerint $0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ körül, a számítások szerint $0,18 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ körül (hibahatáron kívül) állandósul. Ezen réteg hervadás pontja: $0,18 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Bár elképzelhető, hogy mérőszonda kalibrálásával vagy pF méréssel volt probléma, mégis valószínűbbnek tartom, hogy ez a különbség annak a bizonyítéka, hogy a hervadásponthoz nem feleltethető meg a laborban mért $pF = 4,2$ -höz tartozó nedvességtartalomnak.

Jelen vizsgálat jól mutatja, hogy mennyire bonyolult a rendszer, amit modellezni igyekszünk. A legfontosabb következtetés, amit levonhatunk, hogy a bár a kapacitív modul egyszerűbben meghatározható bemenő adatokkal, egyszerűbb számításokkal és gyorsabban dolgozik, mint a konduktív modul, mégis gyakorlatilag ugyanolyan jól képes leírni a talaj nedvességforgalmát.

Fontos megjegyezni, hogy a kapacitív modulok csak a talajvíz hatásától mentes szelvények vízforgalmának leírására alkalmasak. Véggkövetkeztetésem is csak ilyen körülmények között állja meg a helyét.

3.2. Érzékenység vizsgálatok

3.2.1. Érzékenység a víztartókéesség függvény típusára

Minden futás esetében a Brooks-Corey féle víztartókéesség függvénnyel kaptam nagyobb biomassza-, illetve terméseredményeket. Ennek oka az, hogy a közepes szívóerő-tartományban ($pF = 1,5 - pF = 2,7$) ez a típusú függvény az esetek túlnyomó többségében nagyobb nedvességtartalmat ad, mint a van Genuchten féle függvény. A két függvénnyel nyert eredmények igen nagy mértékben eltérnek. Egyáltalán nem mindegy tehát, hogy milyen víztartókéesség függvényt használok a nedvességforgalom modellezése során. Nedvességforgalmi modulban a van Genuchten féle függvény használatát javaslom, mert az szinte kivétel nélkül jobban illeszkedi a mért pF adatokra.

3.2.2. Érzékenység a víztartókéesség függvény paramétereire

A modellfutások eredményei alapján az alábbi általános megfigyelések tehetők:

1. A talaj felszínéhez közeli rétegek (A szint) paramétereinek megváltozására a modell érzékenyebben reagál.
2. A modell érzékenyebb azon rétegek paramétereire, amelyek a modellezett talajszelvény nagyobb hányadát teszik ki. A csernozjom esetében az A szint 24,4 %-át, a B szint 25,6 %-át, a C szint 50 %-át tette ki a szelvénynek. A barna erdőtalaj esetében ezek az arányok: A szint 13,9 %, B szint 13,9 %, C szint 72,2 %. Ennek megfelelően a barna erdőtalaj C szintjének paramétereire a modell sokkal érzékenyebb volt, mint csernozjom C szintjének paramétereire.
3. Minél nagyobb mértékű egy paraméter megváltozása annál nagyobb mértékben módosulnak a modell eredményei is.
4. A paraméterek az alábbi módon rendezhetők sorba annak megfelelően, hogy mennyire érzékeny rájuk a modell: Θ_r , K_S , α , Θ_S , n . Az n paraméterre a legérzékenyebb
5. Bár vizsgálat szerint a modell nem érzékeny a K_S paraméterre, a tapasztalat szerint ugyanazon talajból származó minták (ismétlések) hidraulikus vezetőképessége között akár nagyságrendi eltérés is lehet. A K_S paraméter ilyen mértékű megváltozása a csernozjom

talaj esetében 1-10 %-os változást eredményezett az outputban, míg a barna erdőtalaj esetében a változás 5-20 % között mozgott. Az erdőtalaj esetében valószínűleg azért kaptam nagyobb mértékű változásokat, mert a K_s eredeti értéke nagyobb abszolútértékű volt ($25-140 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$).

Az eredmények alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

1. Növénytermesztési modellek számára kritikus a talajszelvény A szintje paramétereinek pontos meghatározása. Vékony termőrétegű szelvények esetében a mélyebben fekvő rétegek paramétereinek pontos meghatározása is elengedhetetlen.
2. Az α és n paraméterek értékét (általában) homokoknál a $pF = 0,4$ és $pF = 2,0$ vályogoknál a $pF = 1,5$ és $pF = 3,4$ agyagoknál a $pF = 2,3$ és $pF = 4,2$ közötti tartományba eső szívóerők mellett mért nedvességtartalmak határozzák meg. Ennél fogva adott talajra, a megfelelő tenziótartományban, különösen fontos a pontos pF mérés. Ezen paraméterek pontosabb meghatározását az is elősegíthetné, ha a megfelelő szívóerő-tartományban megnövelnék a mérési pontok számát.
3. Bimodális talajok esetén a Θ_s , α és n paraméterek értéke igen más attól függően, hogy a mért pF adatokra unimodális vagy bimodális víztartóképeség függvényt illesztünk. Az α paraméter ilyen esetekben akár egy nagyságrenddel is eltérhet az unimodális esettől. Az α paraméter ilyen mértékű megváltozása esetén a modell outputok 10-20 %-os megváltozását tapasztaltam. Mivel a modell éppen a Θ_s és n paraméterekre a legérzékenyebb, és az α paraméter ennyire eltérhet a bi- és unimodális esetben, a nedvességforgalom modellezésében, bimodális talajok esetén, a bimodális víztartóképeség függvény használata elengedhetetlen.

3.2.3. Érzékenység a hiszterézis figyelembevételére

A hiszterézis figyelembe vételének hatása a csernozjom esetében minimális, a szélsőséges vízgazdálkodású barna erdőtalajra sokkal jelentősebb. Érdekes lenne kísérleti úton eldönteni, hogy valószínű-e ez az eredmény. Ennek eldöntésére igazolni kellene, hogy a hiszterézist leíró modul a valóságnak megfelelően működik. Az eszköz (4M) minden esetre már készen áll. Az érzékenységvizsgálat alapján kijelenthető, hogy normális

vízgazdálkodású talajok esetében a hiszterézis modellezése elhagyható növénytermesztési modellekben.

3.2.4. Érzékenység az elkerülő áramlás figyelembevételére

A modellfutások kimenő adatainak elemzéséből kiderült, hogy bár a repedések jelen voltak a 006-os szelvény esetében soha sem fordult elő akkora eső, amelyet a talajmátrixon keresztül ne tudott volna beszivárogni. Ez nem meglepő, hiszen a talaj legfelső rétegének hidraulikus vezetőképessége ezt lehetővé tette. A 249-es szelvény felszíni vezetőképessége sokkal kisebb de itt is csak a legnagyobb esők idején került víz a repedésekbe és okozott eltérést a modelleredményekben. Ennek oka az, hogy mivel csak napi csapadék adatok állnak rendelkezésünkre, feltételeztem, hogy a csapadék a nap folyamán egyenletesen eloszolva érkezik a talajfelszínére. (Ezt a feltételezést valamennyi növénytermesztési és vízgazdálkodási modell alkalmazza, amennyiben a csapadék napon belüli eloszlása nem ismert.) Így viszont nagyon kicsi lesz a fluxus, ami azt eredményezi, hogy csak kis mértékű felszíni elfolyás adódik, és csak kevés víz jut a repedésekbe.

Végeztem olyan modellfuttatást is, melynek során feltételeztem, hogy a nyári hónapokban a 25 mm-nél nagyobb esők zivatar során hullottak. Ezekről azt feltételeztem, hogy mindössze 20 percig tartottak. Megvizsgáltam, hogy ebben az esetben miként módosul a talaj (249-es szelvény) nedvességforgalma. Az eredményekből az tűnik ki, hogy az elkerülő áramlást leíró modul realisztikusan működik. Kísérleti adatokon való teszteléséhez azonban a napi csapadék napon belüli eloszlásának ismerete szükséges. Az elkerülő áramlás figyelembevétele a nedvességforgalom modellezésében csak akkor lehetséges, ha a napi csapadék napon belüli eloszlása is ismert.

3.2.5. Érzékenység a bimodalitás figyelembevételére

A futások eredményi alapján egyértelmű, hogy a különbséget leginkább a víztartóképesség függvény alakjának (paramétereinek) eltérése okozza. A modell kimenő adatának eltérése meglehetően nagy. Nagyobb, mint a hiszterézis esetében. Mivel a bimodalitás figyelembevételével a számítások alapját képező víztartóképesség függvény leírása válik pontosabbá a modell számítási pontossága is egyértelműen jobb kell, hogy legyen. A modell ilyen irányú fejlesztése tehát mindenképpen előremutató, ugyanakkor viszonylag egyszerű.

3.2.6. Érzékenység a potenciális evapotranszpiráció számítás módjára

A vizsgálat egyik fő eredménye, hogy a rendelkezésre álló bemenő adatoktól függően a modell futtatása előtt mindenképpen kell potenciális evapotranszpirációt számító modult választanunk. Amennyiben minden bemenő adat rendelkezésre áll, a Szász féle eljárást javasolom használni, mivel az kimondottan a magyarországi körülményeknek megfelelő tapasztalati számítási módszer. Relatív páratartalom adatok hiányában a FAO-Penman algoritmust javasolom, mivel az elméletileg jobban megalapozott, szélsébség adatok hiányában pedig kizárásos alapon a Priestley-Taylor féle eljárás marad.

A Szász féle algoritmusban egyedül a szélsébség bemenő adatok helyettesíthetők a többéves havi átlagértékekkel, és küszöbölhetők ki. A modell megfelelő működéséhez a mért napi relatív páratartalom értékekre mindenképpen szükség van.

3.3. Pedotranszfer függvények alkalmassága talajadatok becslésére

Megállapítható, hogy a közepes tenziótartományban ($pF = 1,0 - pF = 3,4$) az általam kidolgozott jobb nedvességbecslést ad, mint a Wösten féle, míg a két szélső tartományban a közelítőleg egyforma eredményt adnak (3. táblázat). Ebből a statisztikai összehasonlításból nem derül ki az, hogy az általam felállított pedotranszfer függvények becsléseivel mennyire helyettesíthetők a konduktív nedvességforgalmi modulok működéséhez szükséges talajfizikai paraméterek. Ám kimutatható a PTF-ek fő gyengesége, ami érdekes módon ugyanaz, mint a bennük rejlő nagy lehetőség.

pF	Elfogadható becslések aránya (%)	
	Fodor	Wösten
0,0	96,3	98,3
0,4	92,1	97,9
1,0	92,9	87,1
1,5	90,0	68,8
2,0	80,4	62,1
2,3	89,2	66,7
2,7	85,8	67,9
3,4	89,6	85,0
4,2	80,4	78,8
6,2	96,3	91,7

3. táblázat: A két féle pedotranszfer függvénnyel nyert víztartóképeség függvények által, az adott pF értékeknél adott, elfogadható becslések aránya (244 talajból).

A pedotranszfer függvények olyan talajokra működnek jól, amelyekhez volt 'hasonló' abban az adatbázisban, amelynek segítségével a PTF-eket felállították. A Wösten féle PTF-ek kidolgozásakor 'hiába' használtak fel több mint 5.000 talajminta adatát, egy sem volt köztük Magyarországról származó. A másik véglet: az általam kidolgozott pedotranszfer függvények felállításához kizárólag magyarországi talajok adatait használtam. A kevesebb adaton alapuló PTF-ek azért nyújthattak jobb teljesítményt, mert az összehasonlítást is magyarországi talajokra történt. Amennyiben sikerülne a TAKI adatbázisát egy olyan nagyságú és változatosságú talajadatbázissá bővíteni, amely kellőképpen reprezentatív a magyarországi talajok tekintetében, még jobb pedotranszfer függvényeket készíthetnénk.

3.3.1. PTF-ek becslései modell inputként

Az általam készített pedotranszfer függvényekkel becsült talajadatokkal végzett modellfuttatások eredményeit összehasonlítottam azokkal a modelleredményekkel, amelyeket a mérésből illesztéssel nyert paraméterekkel végeztem. A TAKI adatbázisában szereplő minden szelvényre elvégeztem az összehasonlítást, hogy a lehető legárnyaltabb képet kapjam.

A futási eredmények alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

1. A modell által számított termésértékek reagáltak legérzékenyebben a talajadatok becsült értékekkel való helyettesítésére. A növény fejlődésének zavartalanságát jelző maximális LAI értékek a legkevésbé. A LAI maximumát csak a virágzás előtti nedvességforgalom befolyásolja. A talajadatok becslése rövidebb időszak alatt kisebb mértékű változást eredményez a talaj vízháztartásának modellezésében.
2. A csernozjom típusú talajok esetében 10-20 %-kal hatékonyabbak a becslések, mint más talajok esetében. Az adatbázisban a csernozjom talajok voltak többségben (1. táblázat). Ez megerősít abban a következtetésben, hogy az adatbázis további bővítésével megnövelhető a pedotranszfer függvények becslési hatékonysága.
3. Csapadékos évben 5-15 %-kal több elfogadható becslést produkáltak a pedotranszfer függvények. A növény számára, nem az a kérdés, hogy a víz mikor és hogyan került a talajba, hanem az, hogy van-e vagy nincs. Csapadékos évben, a talajban általában van elég víz a nedvességforgalom mikéntjének (így annak pontos modellezésének)

fontossága háttérbe szorul. Csapadékos évben a pedotranszfer függvények becslései nagyobb biztonsággal használhatók növénytermesztési modellekben.

4. A modell eredményeiben nagyobb eltérés adódik, ha az A vagy B szint talajparamétereit becsült értékekkel helyettesítjük, mint ha a C szinttel tesszük ugyanezt. Akár 10 %-kal is több elfogadható becslést kaphatunk, ha az A szintre mérésből származó paramétereket adunk meg, a B és C szintekre pedig becslőket ahhoz képest, amikor a teljes szelvényre becsült paramétereket használunk. Az esetek többségében elegendő, ha csak az A szint paramétereit határozzuk meg méréssel a többi szintre becsléseket is alkalmazhatunk.
5. Amennyiben csak a biomassa növekedésének és fejlődésének modellezése a cél, a pedotranszfer függvények becslései több mint 85 %-os (csapadékos évben több, mint 90 %) biztonsággal helyettesíthetik a méréssel meghatározandó talajparamétereket csernozjom talajok esetében. Egyéb talajok esetében csak 70 %-os (csapadékos évben 80 %) biztonsággal használhatók a PTF-ek becslései.

3.4. Talajparaméterek becslése a Shao-Horton módszerrel

A módszer vizsgálata során az alábbi következtetésekre jutottam:

1. A pedotranszfer függvényekkel nyert víztartókéesség függvények mindkét talaj esetében jobb közelítést adták a méréssel meghatározott pF-görbéknek (száradási görbe). A különbség különösen hangsúlyos, ha a természetben leggyakrabban előforduló $pF = 1,0 - pF = 3,4$ tartományt vizsgáljuk. A vizsgálat alapján a pedotranszfer függvényeket jobb módszernek tartom a pF-görbe becslésére.
2. A Shao-Horton féle módszerrel nyert víztartókéesség-függvény a homoktalaj esetében szembetűnő hasonlóságot mutat a fő nedvesedési görbével. A becsléssel nyert függvény még hangsúlyosabb hiszterézist mutat, ami valószínűleg a meniszkusz illeszkedési szögének megnövekedése miatt van. A vályog talaj esetében a Shao-Horton féle módszerrel kapott víztartókéesség-függvény csak nagyobb szívóerőkre mutat hasonlóságot a fő nedvesedési görbével.

3. A vizsgálat eredményei alapján a Shao-Horton módszert nem tartom alkalmasnak a pF-görbe (fő száradási görbe) becsléssel történő meghatározására, aminek valószínűleg a módszer elméleti kidolgozásakor alkalmazott közelítések és a hagyományos módszertől való igen eltérő elv az oka. A módszer további gyengéje, hogy csak bolygatott talajokra alkalmazható.

3.5. A 4M MODELL ÖSSZEKAPCSOLÁSA A SOTER ADATBÁZISSAL

A 4M modell térbeli kiterjesztésének első lépéseként a modellt egy felhasználóbarát kezelőfelületen keresztül összekapcsoltam a SOTER (Soils and Terrain Digital Database) adatbázissal. A modell által bemenő adatként igényelt, adatbázisból hiányzó értékeket az adatbázis meglévő adatai segítségével becslő eljárások segítségével pótoltam. A modell által felkínált digitális térképre kattintva, Magyarország bármely SOTER egységének (unit-jának) talajadatai betölthetők, és számítógépes szimulációban felhasználhatók.

3.6. A 4M modell főbb jellemzői

A dolgozat írásával párhuzamosan, folyamatos fejlesztéssel, elkészült a 4M 2.0-ás változata. A Debreceni Egyetemen a szoftver már oktatásban is kipróbáltuk. Lentebb röviden összefoglalom a jelenlegi változat főbb jellemzőit.

** -gal jelöltem azokat a jellemzőket, amelyek már a CERES-ben is megvoltak.

* -gal jelöltem azokat a jellemzőket, amelyek algoritmusát mások fejlesztették, de a 4M-be történő beépítését (programozását) én végeztem.

A többi összetevő saját fejlesztésű és programozású.

1. A 4M felhasználóbarát kezelőfelülettel rendelkezik, amely magyar és angol nyelven kommunikál.
2. Tartalmazza a Szász féle* (1968) és Fodor féle (Fodor et al., 2000) globálsugárzás becslő eljárásokat.
3. Három modult tartalmaz a potenciális evapotranszspiráció kiszámítására: *FAO-Penman* féle** (1989), *Pristley-Taylor* féle** (1972), *Szász* féle* (1973).
4. Kukorica, búza és árpa modellezésére képes.**
5. Kapacitív** és konduktív* nedvességforgalmi modult is tartalmaz.

6. Segédprogramot tartalmaz a pF adatokra történő, *van Genuchten*, *Brooks-Corey* valamint *Ahuja-Swartzendruber* féle víztartókéesség függvény illesztéshez*. Bimodális *van Genuchten* féle függvényt is képes a pF adatokra illeszteni.
7. Képes bimodális talajok nedvességforgalmának leírására.
8. Két becslőeljárást (PTF) tartalmaz a hidraulikus vezetőképesség talajfizikai adatokból történő meghatározására: *Campbell* féle* (1985) és *Wösten* féle* (1999).
9. Három becslőeljárást tartalmaz a víztartókéesség függvény meghatározására: *Rajkai* féle* (1987), *Wösten* féle* (1999) és *Fodor* féle (3.4.1. fejezet).
10. Két becslőeljárást tartalmaz a maximális és szabadföldi vízkapacitás, illetve a hervadásponthatározására: *Ritchie* féle* (1999) és *Rajkai* féle* (1987)
11. Tartalmaz egy modult a hiszterézis leírására: *Kool-Parker* féle* (1987)
12. Tartalmaz egy modult az elkerülő áramlás leírására (3.3.4. fejezet).
13. Lehetővé teszi a mű- és szerves trágyázás, valamint az öntözés hatásának modellezését.**
14. Akár 100 éves időszak modellezésére is képes (vetésforgóval is).
15. A modell eredmények grafikus ábrázolására is lehetőséget kínál. Egyszerre 5 futás két különböző kimenő adatát képes megjeleníteni.

4. ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- 1) A CERES modell továbbfejlesztésével olyan számítógépes növénytermesztési modellt alkottam (4M), amely számos új modullal illetve segédprogrammal bővebb elődjénél és könnyebben kezelhető. A 4M oktatási és kutatási célra egyaránt használható. Magába foglalja a vonatkozó szaktudományokban eddig elért főbb eredményeket, és összehasonlíthatóvá teszi a különböző iskolák elméleti modellezési javaslatait. A 4M modellt összekapcsoltam a SOTER adatbázissal.
- 2) Érzékenység vizsgálatokat végeztem a beépített algoritmusokra illetve azok paramétereire. Ezek során megállapítottam:
 - a) A talaj nedvességfogalmának megfelelő modellezéséhez kritikus a talajszelvény A szintje paramétereinek pontos meghatározása, illetve bimodális talajok esetén, a bimodális víztartókéesség függvény használata elengedhetetlen.

- b) Nem szélsőséges vízgazdálkodású talajok esetében a hiszterézis modellezése elhagyható növénytermesztési modellekben.
 - c) Az elkerülő áramlás figyelembevétele a nedvességforgalom modellezésében csak akkor lehetséges, ha a napi csapadék napon belüli eloszlása is ismert.
- 3) Pedotranszfer függvényeket (PTF) készítettem a van Genuchten féle víztartókéesség függvény paramétereinek becslésére a TAKI adatbázisában található 244 talajminta adatait felhasználva. Az általam készített PTF-ekkel nyert víztartókéesség függvények 80-95 %-os biztonsággal adtak elfogadható nedvességbecsléseket. A PTF-ek becsléseit modellinputként is kipróbáltam. Amennyiben csak a biomassa gyarapodásának modellezése a cél, a pedotranszfer függvények becslései több mint 85 %-os (csapadékos évben több mint 90 %-os) biztonsággal helyettesíthetik a méréssel meghatározandó talajparamétereket csernozzom talajok esetében.
- 4) A megvizsgált Shao-Horton féle módszert nem találtam alkalmasnak a talajok víztartókéesség-függvényének becsléssel történő meghatározására. Összehasonlítás alapján a pedotranszfer függvényeket jobb módszernek tartom a pF-görbe becslésére.
- 5) Megállapítottam, hogy az egyszerűbben meghatározható bemenő adatokkal, egyszerűbb számításokkal és gyorsabban dolgozó kapacitív nedvességforgalmi modul gyakorlatilag ugyanolyan jól képes leírni a talaj nedvességforgalmát, mint a konduktív modul. Ez alól kivételt képeznek azok az esetek, amikor a modellezett talajszelvény talajvízhatás alatt áll.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK JEGYZÉKE

5.1 Tudományos dolgozatok

1. **FODOR N., KOVÁCS G. J., KARUCZKA A. (2001)** A CERES modell továbbfejlesztése I. A Richards egyenlet beépítése után, összehasonlítás az eredeti változattal. Agrokémia és Talajtan 50:35-46.
2. **FODOR N., KOVÁCS G. J. (2001)** A CERES modell továbbfejlesztése II. A Richards egyenlet paramétereinek meghatározása mérések ill. pedotranszfer függvények segítségével. Agrokémia és Talajtan 50:47-61.
3. **FODOR N., GABRIELLA MÁTHÉNÉ-G., KLÁRA POKOVI AND GÉZA J. KOVÁCS (2002)** 4M - software package for modelling cropping systems. European J. of Agr. 00:000

4. MÁTHÉNÉ GÁSPÁR G., DOBOS A., **FODOR N.** (1999) A termőhely és az agrotechnika hatása kukoricahibridek szemtermésének víztartalom-dinamikájára. *Növénytermelés* 48: (4) 413-420.
5. KOVÁCS G.J. ÉS **FODOR N.** (2001) A biomassza termelés érzékenysége a sugárzási energia változékonyságára hazánkban. A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai 169-176. OMSZ, Budapest, 2001

5.2. Előadások és poszterek konferenciákon

1. **FODOR N.**, KOVÁCS G.J., RITCHIE J.T. (2000) A New Solar Radiation Generator for Hungary. Poster. ASA-CSA-SSSA, Annual Meetings. November 5-9, 2000, Minneapolis, MN, Abstract pp. 23.
2. **FODOR N.**, G.J. KOVÁCS (2001) 4M: an educational model to simulate agricultural systems. Book of proceedings 225-226., 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems, Florence, 16-18 July, 2001, Italy
3. KOVÁCS, G.J., RITCHIE, J.T., MÁTHÉNÉ, G.G., NAGY, J., DOBOS, A., **FODOR, N.** (1999) Modelling the process of drying of maize kernels. Proceedings of the ESA International Symposium Modelling Cropping Systems, Lleida, 21-23 June, 1999, Spain, 95-96.
4. NAGY, J., HUZSVAI, L., MIKA, J., DOBI, I., **FODOR, N.**, KOVÁCS G.J. (1999) A Method to Link General Circulation Model to Weather Generator and Crop Models for Long Term Decisions, MODSS'99 Conference, Brisbane, Australia 1-6 August, 1999.
5. KOVÁCS G.J., **FODOR N.** 2000. Application of Agronomic Modeling in Research, Education, and Practice. ASA-CSA-SSSA, Annual Meetings November 5-9, (2000) Minneapolis, MN, Abstract pp. 30.
6. KOVÁCS G.J., NÉMETH T., ZSIGRAI GY., MÁTHÉ-GÁSPÁR G., **FODOR N.**, POKOVI K. (2000) CERES Applications in Research of Nitrogen in the Environment and Production. Poster. ASA-CSA-SSSA, Annual Meetings November 5-9, 2000, Minneapolis, MN, Abstract pp. 24.
7. TIBOR TÓTH, D. SUAREZ, **N. FODOR**, G. VÁRALLYAY, L. BLASKÓ, G. CRESCIMANNO AND G. SZENDREI (2001) Short and Long Term Changes in Soil Salinity in Hungary. Oral. International Union of Soil Science, Sub-commission A, Bouyoucos Conference on Sustained Management of Irrigated Land for Salinity and Toxic Element Control, Jun. 25-27, University of California, Center for Water Resources George E. Brown Jr. Salinity Laboratory, USDA-ARS