

DEBRECENI EGYETEM
Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma
Mezőgazdaság-, Élelméztudományi és Környezetgazdálkodási Kar

KERPELY KÁLMÁN Növénytermesztési, Kertészeti és Regionális Tudományok Doktori Iskola

Doktori Iskola vezetője:
Prof. Dr. Nagy János, az MTA doktora

Témavezetők:
Prof. Dr. Tamás János, az MTA doktora
Dr. Juhász Csaba, Ph.D.

VÍZVÉDELMI DÖNTÉSTÁMOGATÁSI RENDSZEREK ALKALMAZHATÓSÁGI ÉRTÉKELÉSE

Készítette:
Fehér János
doktorjelölt

Debrecen, 2010. március

VÍZVÉDELMI DÖNTÉSTÁMOGATÁSI RENDSZEREK ALKALMAZHATÓSÁGI ÉRTÉKELÉSE

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében
a növénytermesztési és kertészeti tudományágban,
talaj és környezet kutatási területen

Írta: Fehér János okleveles építőmérnök

Készült Debreceni Egyetem **Kerpely Kálmán Doktori Iskolája**
növénytermesztési és kertészeti tudományok doktori programja keretében.

Témavezetők: Prof. Dr. Tamás János, az MTA doktora
Dr. Juhász Csaba, Ph.D.

A doktori szigorlati bizottság:

	Név	Tud. fokozat
Elnök:	Prof. Dr. habil. Kátai János	C.Sc.
Tagok:	Prof. Dr. Várallyay György	az MTA rendes tagja
	Dr. Zsembeli József	Ph.D.

A doktori szigorlat időpontja: 2009. november 9.

Az értekezés bírálói:

Név	Tud. fokozat
Dr.	
Dr.	

A bíráló bizottság:

	Név	Tud. fokozat	Aláírás
Elnöke:	Dr.		
Tagjai:	Dr.		
	Dr.		
	Dr.		
	Dr.		
	Dr.		
Titkár:	Dr.		

Az értekezés védésének időpontja: 2010.

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS.....	1
2.	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	5
2.1.	Agrárkörnyezetvédelmi döntéstámogató rendszerek a vízvédelemben.....	9
2.2.	Talajokban lezajló oldattranszportot leíró modellek a szakirodalomban	11
2.2.1.	Empirikus összefüggések.....	12
2.2.2.	A mérlegegyenletet alkalmazó módszerek	12
2.2.3.	Determinisztikus modellek	14
2.2.4.	Sztokasztikus modellek.....	21
2.2.5.	Következtetések	23
2.3	Háromfázisú zónában lezajló nitrát-transzport modellezése	25
2.4.	Irodalmi áttekintés a klímaváltozás és a szikes talajjellemzők kapcsolatára vonatkozó tudásbázis kialakításához	28
3.	A VIZSGÁLATOK ANYAGA ÉS MÓDSZERE.....	30
3.1.	Az oldat-transzport modellek kiválasztása szakértői rendszerének (EXSOLUTE) kialakítására alkalmazott módszer	30
3.2.	A telítetlen talajzónában lezajló nitrát-transzport modell kialakításának módszere	33
3.2.1.	A modell koncepciója	33
3.2.2.	A modell matematikai felépítése	35
3.2.3.	A transzportegyenlethez kapcsolódó nitrogén-forgalmi elemek számítása..	42
3.2.4.	Alternatív modell a kukorica nitrogén felvételének számítására	44

3.3. A szikesedési változást leíró szakértői rendszer (SALINEXP) vizsgálati módszere	53
3.3.1. A SALINEXP rendszerben figyelembe vett változók	55
3.3.2. A rendszerben figyelembe vett szempontok	56
3.3.3. Szenáriók a tudásbázisban	57
4. EREDMÉNYEK.....	59
4.1. Szakértői rendszer a háromfázisú talajzónában lezajló oldat-transzport folyamatok modelljeinek kiválasztására	59
4.2. Menedzsment orientált táblaszintű oldat-transzport és nitrát modellel végzett vizsgálatok eredményei.....	63
4.2.1. Talajoszlopokon végzett nitrátbemosódási folyamatok modell-vizsgálata ..	68
4.2.2. Püspökszilágyi területére végzett modell-vizsgálatok	74
4.2.3. Az újkígyósi modell-vizsgálatok	79
4.3. Klímaváltozás okozta szikesedési folyamatok előrejelzése a SALINEXP rendszerrel.....	90
4.3.1. A SALINEXP alkalmazása a Közép-Tisza vidékére.....	97
5. ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	100
6. ÖSSZEFOGLALÁS	103
7. ÖSSZEFOGLALÁS (angolul)	107
8. IRODALOMJEGYZÉK	111
9. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN (Saját irodalom)	126
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	129
NYILATKOZAT	130

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. Döntéstámogató rendszerek általános szerkezete	6
2. ábra. A talajfelszínt elérő csapadék és hóolvadás számítási lépései	40
3. ábra. A növényi nitrogén felvételi modell paramétereinek értelmezése	42
4. ábra. Az EXSOLUTE szakértői rendszer felépítése	59
5. ábra. A DISNIT2 folyamatábrája (1. rész)	66
6. ábra. A DISNIT2 folyamatábrája (2. rész)	67
7. ábra. Mintavételi helyek a bolygatatlan szerkezetű talajoszlopon	69
8. ábra. A talajmintavételhez felnyitott halásztelki monolit szerkezete a kísérlet végén	69
9. ábra. Összegzett átfolyt vízmennyiségek (Halásztelki vályogos homok talaj)	73
10. ábra. Mért és számolt víztartalmak és NO ₃ -N koncentrációk (Halásztelek)	73
11. ábra. A vizsgált püspökszilágyi talajszelvény rétegenkénti pF görbéi	75
12. ábra. A csapadékvíz évi súlyozott átlagos trícium koncentrációja	76
13. ábra. A püspökszilágyi vizsgált talajszelvényben mért és a modellel számolt trícium koncentráció értékek (1991)	78
14. ábra. A Békéscsabán mért éves csapadékösszegek időszora	80
15. ábra. A Békéscsabán mért éves csapadékösszegek, valamint ezek 5 éves és 10 éves mozgóátlagai	80
16. ábra. Az Újkígyósi 1. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi	82
17. ábra. Az Újkígyósi 2. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi	82
18. ábra. Az Újkígyósi 3. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi	83
19. ábra. Az Újkígyósi 4. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi	83
20. ábra. Az újkígyósi területen kijuttatott hatóanyag mennyiségének éves átlagai ...	87
21. ábra. Az újkígyósi területen kijuttatott szerves trágya mennyiségek éves átlagai ..	87
22. ábra. Számított talajvízszintek az újkígyósi 1-4. talajszelvényben (1980-89)	88

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat. A kukorica nitrogén felvételi modelljének paraméterei különböző talajkötöttség mellett	43
2. táblázat. A búza nitrogén felvételi modelljének paraméterei különböző talajkötöttség mellett	43
3. táblázat. A halásztelki talajoszlop rétegenkénti talajhidraulikai paraméterei	72
4. táblázat. A püspökszilágyi talajszelvény rétegenkénti talajhidraulikai paraméterei	75
5. táblázat. A tríciumra vonatkozó diszperziós tényező tagjainak értékei a vizsgált talajszelvényben	78
6. táblázat. Az újkígyósi területre meghatározott talajszelvény típusok adatai	85
7. táblázat. A Közép-Tisza vidéken szikesedésnek kitett talajok jellemző paramétereinek tartományai	91
8. táblázat. Talajok szikesedési paramétereinek változása különböző klímaváltozási scenáriók esetében	92
9. táblázat. A SALINEXP szakértői rendszer által megadott szikesedés változási irányok különböző klímaváltozási scenáriók esetében	94
10. táblázat. A SALINEXP rendszer input fájl szerkezete a vizsgált esetre	97
11. táblázat. A SALINEXP rendszer eredmény fájlja a vizsgált esetre	99

VÍZVÉDELMI DÖNTÉSTÁMOGATÁSI RENDSZEREK ALKALMAZHATÓSÁGI ÉRTÉKELÉSE

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a számítógépek, de különösen a 1980-as évektől a személyi számítógépek megjelenésével korábban soha nem látott mértékben megnövekedett a bonyolult, komplex természeti és társadalmi jelenségek vizsgálatának és modellezésének lehetősége. A modellezés klasszikus megvalósítási célja a vizsgált jelenség matematikai formában történő leírása, és ennek felhasználásával a vizsgált jelenségre vonatkozó alternatív megvalósulási stratégiák (szcenáriók) hatásának számszerűsítése.

Eleinte a folyamatok megismerésén, ezek matematikai modell formában történő leírásán volt a fő hangsúly, később mindinkább előtérbe került a döntési folyamatok segítésére alkalmas rendszerek fejlesztése (*Loucks, 1995; Harmancioglu, 2008*). A számítógép alapú modelleket, amelyek interaktív felhasználói felülettel vannak ellátva, rendszerint döntéstámogató rendszereknek (DTR) is nevezik. Közös céljuk a DTR-eknek, függetlenül attól milyen megvalósítási keretet, módszertant vagy technológiát alkalmaznak, hogy a döntéshozók számára térben és időben megfelelő információt szolgáltatassanak. A döntéshozatali folyamatokban az átfogóbb és növekvő információs igény a DTR-ek kiterjedtebb fejlesztését motiválja. Ez irányú fejlesztések különösen intenzívekké váltak a hatékonyságban egyre növekvő, ugyanakkor elérhető árú személyi számítógépek elterjedésével.

Doktori értekezésemben áttekintem az agrárkörnyezetvédelemben alkalmazható vízvédelmi célú döntéstámogató rendszerek általános felépítését, fő elemeit és alkalmazásait. Bemutatom, hogy a vízvédelmi célú döntéstámogató rendszerek miként hasznosítják a matematikai és a verbális formában megfogalmazott tudást, szakmai ismereteket, melyek hasznos elemei lehetnek a döntési folyamatnak. Bemutatom, hogy a döntéstámogató rendszer struktúrájába illeszkedő több fontos elemhez dolgoztam ki megoldási módszereket és gyakorlati alkalmazhatóságukat vizsgálati példákkal igazolom.

Az értekezésben tárgyalt első kutatási területem: A vízvédelmi célú agrárkörnyezetvédelemben fontos szerepet kapott a talajokban és talajvizekben lejátszódó oldattranszport folyamatok megismerése. Az agrárgazdálkodás szempontjából elsődleges hatásúak a telítetlen talajzónában lejátszódó oldattranszport folyamatok, amelyeket számos összetett fizikai, kémiai és biológiai folyamat befolyásol. Azon célból, hogy minél pontosabban leírhatók és menedzselhetők legyenek a potenciálisan káros szennyezési folyamatok, nagyszámban fejlesztettek ki olyan matematikai modelleket, amelyek a talajban lejátszódó különböző transzport-folyamatokat írják le. A modellek döntő többsége konvektív-diszperzív transzportot ír le a folyadékfázisban egy- és többdimenziós formában. A konvektív-diszperzív transzport mellett, abban az esetben, amikor a modellezett talaj strukturált szerkezetű, a modellekben a következő felsorolt folyamatokból egy vagy több is szerepelhet a modellekben: egyensúlyi vagy kémiai-kinetikai szorpció, elsőrendű lebomlás, nullarendű reakció, és mátrix diffúziót. Ezen túlmenően, a modellek alkalmazhatóak eltérő kezdeti és peremfeltételekre, különösen, amikor egy modell analitikai megoldáson alapul.

A felsoroltakból is kitűnik, hogy egy oldat-transzport modell kiválasztása és alkalmazása több szakterület alapos elméleti és gyakorlati ismereteit kívánja meg, mint például a talajfizika, hidrológia, geokémia, mikrobiológia, matematika és a számítástechnika. Ma már az igen nagy számban elérhető kutatási és menedzsment célú modellek következtében a megfelelő modell kiválasztása és alkalmazása egy eset-specifikus problématerületre a legtöbb modell-alkalmazó számára egyre bonyolultabb feladat. A személyi számítógépekre adaptálható tudás megjelenítése a mesterséges intelligencia segítségével ugyanakkor lehetővé teszi szakértői rendszerek kifejlesztését, amelyek például megkönnyítik egy sajátos, probléma specifikus modell kiválasztását az oldat-transzport folyamatok, a domináns talajtulajdonságok, az alkalmazható kezdeti koncentráció eloszlás, és a talaj és talajvízrendszer meghatározta peremfeltételek figyelembevételével. *Kutatásaim során célként tűztem ki, hogy szabályrendszer algoritmust dolgozzon ki a telítetlen talajzónában lejátszódó oldattranszport folyamatok leírását adó modellek kiválasztásának elősegítésére. A disszertációban bemutatok egy általam kidolgozott szakértői rendszert (EXSOLUTE), amely segíti a felhasználót determinisztikus oldat-transzport modell(ek) kiválasztásában adott speciális problémára.*

Az értekezésben tárgyalt második kutatási területem: A környezetvédelem jelentős gondja a felszíni és a felszín alatti vizek nitrogén vegyületekkel (elsősorban nitráttal) történő szennyezettsége. E szennyeződések leginkább kommunális, ipari és mezőgazdasági forrásokból származnak. Az első két forrás-típus viszonylag egyszerűen azonosítható a kibocsátás pontszerű jellege következtében, és így adott esetben az innen származó szennyezések elkerülésére, vagy hatásának csökkentésére a rendszabályok meghozhatók. Ezzel szemben a mezőgazdasági eredetű szennyeződés, annak nem-pontszerű jellege, valamint a kapcsolatos összetett (részben természetes, részben az emberi tevékenységtől függő) folyamatok miatt nehezen azonosítható.

Hazánkban jelenleg is több száz település kútjainak vize nem felel meg az egészségügyi előírásoknak, többek között a határérték feletti nitrát-tartalom miatt. A felszín közeli vízbázisok nitrát terhelése alapvetően három okra vezethető vissza: (1) az 1970-es és 80-as években a mezőgazdaságban nagy mennyiségben alkalmazott nitrogén alapú műtrágyák vesztesége és talajvizekbe mosódása; (Meg kell jegyezni, hogy a gazdasági-társadalmi átalakulás következtében jelentős mértékben csökkent az elmúlt 10-15 évben ezen anyagok mennyiségének felhasználása, valamint az újabban egyre szélesebb körben elterjedő trágyázási tanácsadói rendszerek hatékonyabb tápanyag felhasználást segítenek elő, ezzel is csökkentve az ebből származó szennyezést okozható veszteségeket (Sulyok, 2006; Fodor et al., 2007; Tamás, 2008)). (2) az állattenyésztésben keletkező nagy mennyiségű hígtrágya és trágyalé elhelyezésének nagyrészt megoldatlan volta; (3) a települések kismértékű (bár az elmúlt évtizedben javuló mértékű) csatornázottsága. A talajból keletkező veszteségek következtében évi több tízezer tonna nitrogén juthat a talaj gyökérszóna alatti rétegeibe, idővel pedig a talajvizekbe (OMFB, 1986; Burkart és Fehér, 1996; Ángyán et al., 1999; Ligetvári et. al., 2000; Tamás, 2009). *Kutatómunkám során célul tűztem ki, hogy modell struktúrát dolgozzak ki a hazai klimatikus és talajviszonyokra alkalmazható mezőgazdasági táblaszintű nitrát bemosódási folyamatok leírására, majd bolygatatlan talajoszlopokon végzett bemosódásos liziméter kísérletek, illetve természetes térségi körülmények között végrehajtott mérési eredmények alapján igazolom a rendszer alkalmazhatóságát hosszú időszakú, telítetlen talajzónában lejátszódó oldat-transzport folyamatok előre jelzésére.*

Az értekezésben tárgyalt harmadik kutatási területem: Növekszik az aggodalom a klímaváltozás lehetséges hatásai miatt, melyet a környezetre és a gazdaságra, és azon belül is különösen a mezőgazdaságra gyakorolhat (Harnos, 2005; Vermes és Pálfai, 2007). Egyre inkább elfogadott, hogy a globális felmelegedés egész Európára kihatóan több °C átlagos hőmérsékletnövekedést fog előidézni a következő 50-80 év során (IPCC, 2007). Ezen túlmenően a csapadék növekedni fog mintegy 10 %-al, bár ennek időbeli és térbeli eloszlásának változása kevésbé ismert és nagyon nehéz ezt előre jelezni (Estrela et al., 2001; Láng et al., 2007; Nováky, 2007; Harnos és Csete, 2008). A tél valószínűleg nedvesebbé, a nyár szárazabbá válik, bár a nyári konvekciós csapadékok (zivatarok stb.) intenzitása növekedhet. A klíma változása átalakítja a környezetben lezajló természeti folyamatokat, és ennek egyik várható következménye lesz a szikes talajok szikesedési folyamatainak módosulása (Várallyay, 2008).

Magyarországon több mint egymillió hektár szikes terület található. Ez az ország területének mintegy 11% -át jelenti, és ez a legmagasabb arány Európában. Közel félmillió hektár természetes eredetű szikes terület, míg a másik félmillió hektár potenciális vagy másodlagosan szikes terület. A szikesedési folyamat összetettsége következtében jelenleg még nem alkalmaznak olyan matematikai modellt, amely a klímaváltozás hatását számszerűsítene és számszerűsítve jelezné az egyes szikes talajtípusok esetében a szikesedés mértékének a változását. *Kutatómunkám során célul tűztem ki, hogy a több évszázados magyarországi talajtani és szikesedési kutatások során felhalmozódott ismereteket, az ezen a területen dolgozó nemzetközileg is elismert vezető kutatók nem matematikai (verbális) formulában megfogalmazott ismereteit feldolgozva, döntési szabály- és paraméterrendszerrel dolgozok ki különböző klímaváltozási scenáriókra és a várható szikesedési állapotjellemzők változási irányainak leírására és ezt szakértői rendszerbe foglalom a változások irányainak előrejelzésére.*

A következő fejezetben áttekintem a megfogalmazott célkitűzések tématerületeit a szakirodalom tükrében. Ezt követően részletesen taglalom, a kutatási céloknak megfelelő bontásban, az alkalmazott módszereket, eredményeket és következtetéseket.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az 1980-as évek számítástechnikai fejlődése következtében rendkívüli mennyiségű adat elektronikus úton történő tárolására nyílt lehetőség. Ezek általában a szakértők által könnyen kezelhető szöveges vagy numerikus formában, számítógéppel feldolgozott és tárolt adatok. A szöveges formában tárolt adatok azonban nem előnyösek, amennyiben valamilyen konkrét információt próbálunk megkeresni, visszakeresni ezekben. Az adatokat ezért nagy adatbázisokba, információs rendszerekbe szükséges szervezni, és kategorizált formában tárolni. A kategorizált formájú adattárolás megkönnyíti az adatok, információk kezelését, amikor is hiteles információk keresésére van szükség valamely felmerülő problémával kapcsolatban.

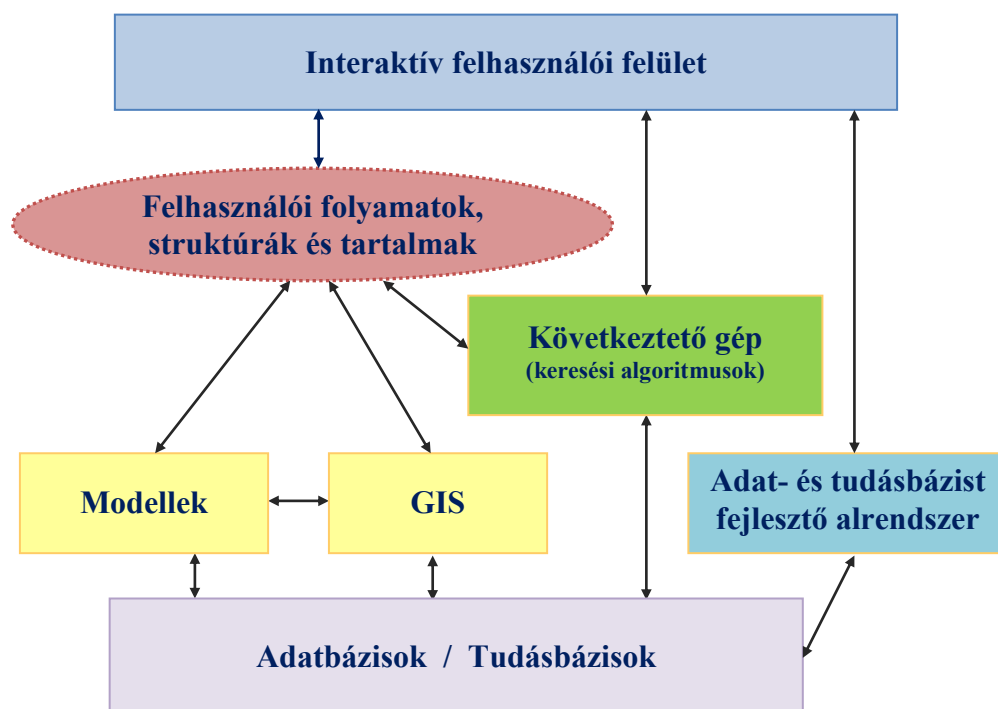
Mivel a tárolt adatok száma egyre gyarapodott és a technológiák egyre komplexebbé váltak, szükségessé vált, hogy az adathalmazokon történő keresést számítógépes programmal segítsék, amely programokba már bekódolták azokat az információkat, amelyek a felmerülő keresési problémák megoldását elősegítették. Az ilyen típusú programokat, a hozzá tartozó adatbázisokkal együttesen, döntéstámogató rendszereknek (DTR) nevezzük.

A döntéstámogató rendszerek megjelenésének és elterjedésének feltétele természetesen a hardver technológiák fejlődése volt. Mivel a DTR alapvetően interaktív rendszer, így szükség volt arra, hogy a felhasználók közvetlenül is hozzáférhessenek a számítógépekhez. A számítástechnika fejlődésének korai időszakát jellemző nagyméretű számítógépek korszakában ez nem volt lehetséges, így a DTR elterjedésének időszaka szorosan összefügg a személyi számítógépek 1980-as években kezdődött tömeges elterjedésével. Döntéstámogató rendszerek ma már a személyi számítógépektől kezdve a különböző kategóriájú nagy számítógépekig minden hardver eszközön futnak, de a legelterjedtebbek mégis a PC alapú modellek. Mivel egy DTR működtetése nagy feldolgozási sebességet és tárolókapacitást igényel, ezért a leggyakrabban nem önálló gépeken, hanem hálózatba kapcsolt számítógépekre történő kidolgozásuk a jellemző. Az interaktív hozzáférés a PC-k segítségével megoldott, a hálózatba kapcsolt nagyszámítógépek pedig szükség esetén biztosítják a nagyobb tárterületet és működési sebességet.

A következő fejlődési fázisban a DTR rendszerekkel szemben támasztott követelmények egyre nőttek, és a DTR rendszer definíciója is változott (*Sprague és Carlson, 1982*). Manapság DTR-nek nevezzük az olyan integrált számítógépes

eszközök összességét, amely *döntési modellek*, *adatbázisok* és a *döntéshozó saját ítélőképességének segítségével* interaktív módon nyújt segítséget a komplex döntések meghozatalában (Loucks, 1995; Bardos et al., 2002; Fehér et al., 2009).

A döntéstámogató rendszerekben a *döntés célja*, hogy valamilyen problémát, feladatot oldjunk meg. A ‘probléma’ értelmező szótárban található meghatározása: megoldásra váró elméleti vagy gyakorlati kérdés, tudományos kérdés, kutatási feladat. A döntéstámogató rendszerek általános struktúráját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Döntéstámogató rendszerek általános szerkezete

Ahhoz, hogy döntést hajtsunk végre, szükségünk van a probléma pontos leírására. A probléma leírásához rendelkezésre álló adatok legtöbb esetben papíron vagy elektronikusan tárolt dokumentumok, mérési eredmények, amelyeket tudásbázis (*knowledge-base*) néven fogunk a továbbiakban említeni.

A döntési folyamatba azonban szeretnénk bevonni a számítógépek segítségét, ezért célszerű a tudásbázis alapján a problémát a számítógépek által kezelhető formába önteni. Ezért a tudásbázis alapján felállítunk egy, a valóságról készített modellt, ahol a problémát olyan adatstruktúrákkal jellemezzük, amik csak igaz/hamis és numerikus értékeket tartalmaznak. A modellben meghatározzuk, hogy az adatstruktúrákban az

értékek milyen halmaza szerepelhet. Ezek variációinak összességét nevezzük problémátérnek. Egy variációt pedig a problémátér egy állapotának hívunk.

A problémátérbeli éppen aktuális állapotot, azaz tulajdonképp az adott problémát egy úgynevezett leíró listával (*fact list*) határozhatjuk meg egyértelműen, mely az előbb említett adattípusokból áll (*Bardos et al., 2002; Fehér et al., 2009*). A probléma megoldásához tehát a következő általános elemeket kell felhasználnunk:

Adatbázisok:

- állandó (a problémamegoldás során tartalma nem változik, mint pl. a kellékek leírása);
- változó (tartalma a problémamegoldás során változhat, mint pl. a sakkjátszma állása);

Szabályok: “ha <feltétel> akkor <következmény>” alakúak, ahol a feltételrész bizonyos adatbázis elemek felhasználásával kialakított kifejezés, a következmény pedig valamiféle transzformációt ír elő bizonyos adatbázis elemeken.

Vezérlési algoritmus: az alkalmazható szabályok kiválasztására, a szabályok végrehajtására, és a célállapot felismerésére, végső soron a probléma megoldásának keresésére szolgáló algoritmus. A továbbiakban gyakran *keresési algoritmusnak* is nevezzük. A keresési algoritmus lehet *kikereső típusú*, amikor a tárolt szabályok alapján keresi vissza a feladat megoldását jelentő tényeket és új tények vagy szabályok előállítására nem alkalmas. Az *extrapoláló típusú* keresési algoritmus a tárolt szabályok segítségével új tényeket tud előállítani, de szabályokat nem. Szabálykészletük csak külső beavatkozással módosítható. Ez a rendszer például alkalmas arra, hogy egy koordinátarendszerben kijelölt pontok között összefüggést találva azokra egy függvényt illesszen. A harmadik keresési algoritmus a tanulásra képes *szabály-extrapolációs* rendszer. A tárolt tények felhasználásával szabálykészletük új szabályok generálására alkalmas.

Az adatbázisból, szabályokból és keresési algoritmusból álló rendszer lényeges tulajdonsága, hogy - elvileg - tetszőleges probléma megoldását teszi lehetővé egyetlen vezérlési algoritmus segítségével. Ebből az következik, hogy konkrét esetekben elegendő a probléma leírását megváltoztatni ahhoz, hogy a rendszer működése megváltozzon, és az algoritmus átírása nem szükséges. Mindez a rendszer adatvezérelt működését eredményezi, az adatbázisok és szabályok új elemek hozzáadásával

bővíthetőek, így a rendszer képességei bővülnek a már meglévő elemek módosítása nélkül.

Ha meghatároztunk egy problémát, azaz a problémátér egy állapotát, a keresési algoritmus alkalmazásakor, az algoritmus minden állapotból egy vagy több újabb állapotot generál, majd ezekre az újabb állapotokra ismét alkalmazzuk, egészen addig, míg el nem jutunk a célállapothoz. Ahhoz, hogy a célállapotot mindenképp megtaláljuk, a keresési algoritmustól elvárjuk, hogy legyen *mozgáskeltő* (azaz a generált új állapotok között mindig legyen olyan, amely korábban még nem generálódott), *szisztematikus* (azaz, ha kell, a teljes problémateret legyen képes generálni) és lehetőség szerint *kerülje el a kombinatorikus robbanást* (azaz a problémátérnek ténylegesen minél kisebb részalmazát generálja).

A keresési algoritmus további jellegzetes tulajdonsága a *keresés iránya*. Előre láncolás (*forward chaining*) típusú keresési algoritmusok esetében a kiinduló állapotból haladunk a célállapot felé. A gyakorlat azt mutatja, hogy az előrejelzési, monitoring és irányítási problémák hatékonyan oldhatók meg ezzel a módszerrel. Előre láncolásos problémamegoldásnál, az aktuális állapot a kiinduló állapot. Először meghatározzuk a kiinduló állapotot leíró adatelemeket (*fact list*) a felállított modell alapján, egy rövid kéréssor megválaszolásával. Az aktuális állapotot leíró adatelemek később, ahogy mozgunk az állapotok között, változnak (bővül vagy törlődnek az elemei), és éppen az aktuális állapotot fogja tükrözni. Az aktuális állapotot leíró adatelemek a munkamemóriában (*working memory* - WM) tárolódnak.

A szakértői rendszerek “olyan számítógépes programok, amelyekbe olyan tudást és képességet építettek be, amelynek segítségével egy szakértő tudásszintjén tud működni” (*Feigenbaum és Mccorduck, 1984; Evers, 2007*). Mint *Denning, 1986* kimutatta, ezeket a programokat úgy tervezték, hogy szimulálni tudják a szakértők problémamegoldó képességét egy speciális területen. A szakértői programok különböznek a szokásos számítógépes programoktól, mivel a beépített tudás, melyet rendszerint szabályok képviselnek, eltérően van kezelve a szabályokat megoldó mechanizmustól (melyet “következtető” vagy más szóval “megoldó” motornak nevezhetünk). A szakértői rendszerek nem-algoritmikus, moduláris szerkezetük miatt viszonylag könnyebben kifejleszthetők és módosíthatók. A szabályok a szakértői rendszerben szöveges megjelenítési formái a tudásbázisnak, és elsősorban “*Ha-Akkor*” alakú feltételek szerint strukturáltak a döntésekhez. A szabályok lehetővé teszik a program számára, hogy következtetést (*döntést*) hozzon, amikor a “*megoldó*”

eljárást (*inference engine*) végrehajtja a program. A “megoldó” eljárás, mint említettük, lehet “visszafelé” haladó (*backward chaining*) vagy “előrefele” haladó (*forward chaining*) típusú. A visszafelé haladó megoldásnál a megoldó eljárás automatikusan ellenőrzi az összes szabályt, hogy megállapítsa van-e olyan, amely a kívánt információt meg tudja adni. Ezzel ellentétben az előrefele haladó megoldást általában nem célorientált szabályok ellenőrzésére alkalmazzák és olyan sorrendben, ahogyan azokat megadták (*Shapiro, 1989; Barr et al., 1990; Evers, 2007*).

2.1. Agrárkörnyezetvédelmi döntéstámogató rendszerek a vízvédelemben

A tudásbázis alapú döntéstámogató rendszereket az élet számos területén alkalmazzák, mint például az egészségügyben, orvosi diagnosztikában, ipari termelési folyamatok ellenőrzésében, erőművi biztonság és közlekedésbiztonság területén, a geológiai elemzésekben, a gazdasági döntéshozatalban, a katonai és honvédelmi területen, de ugyanígy a mezőgazdasági tevékenység különböző területein az öntözésirányítástól, a növényvédelem vagy a betakarítás szervezéséig. Az utóbbi 15-20 évben az agráriumban, illetve az agráriumhoz is kapcsolható környezetvédelmi és vízvédelmi céllal használható döntéstámogató rendszerek széles körét fejlesztették ki és ismertették a szakirodalomban (*Bardos et al., 2002; Baig et al., 2005; US EPA, 2005; Sieker et al., 2006; Evers, 2007*).

Az agráriumban alkalmazott rendszerek első csoportjába azok tartoznak, amelyek az alap agrárgazdálkodási tevékenységekhez kapcsolódnak. Ilyenek:

(i) A kártevők elleni védekezést segítő rendszerek, mint például a MAIZE/NAPRA rendszer (*McClure et. al., 1996*);

(ii) Gyom kontrol tanácsadó rendszerek (például SEMAGI program) (*Castro-Tendero és Garcia-Torres, 1995*);

(iii) Trágyázási tanácsadó rendszerek, melyek segítik például a gazdálkodókat farm szintű tápanyag-gazdálkodási tanácsokkal (*Robinson, 1996*). Kiemelkedő ebben a kategóriában a hazai körülményekre kidolgozott MTA TAKI - MTA MgKI új trágyázási szaktanácsadási rendszere (*Fodor et al., 2007*);

(iv) Komplex farmtervezési kérdésekhez nyújtanak segítséget (*Delgado, 1996*);

(v) Mezőgazdasági gépesítési tanácsadó rendszerek;

(vi) Talajeróziós szabályozási tervezést támogató rendszerek (*Baig et al, 2005*);

(vi) Növénytermesztési tanácsadó rendszerek. Ebben a kategóriában a Debreceni Egyetem kutatói által kidolgozott 4M-eco nevű szaktanácsadói rendszer az Észak-

alföldi régióban mezőgazdasági tevékenységet folytató vállalkozások számára nyújt olyan komplex döntéstámogatást, amellyel a gazdálkodók tevékenységük eredményességét, hatékonyságát növelni tudják. (Sulyok et al., 2006);

(vii) Agrártermeléshez kapcsolódó marketing és pénzügyi tanácsadó rendszerek (Uhring, 1989).

A felsorolt kategóriákba tartozó döntéstámogató rendszerek jellemzője, hogy úgynevezett tudás alapú szakértői rendszerek. Ezek a rendszerek szakemberek széles csoportja által megfogalmazott szaktudást formálnak számítógépes tudásbázisba, majd a szabályok felhasználásával oldanak meg a felhasználó által megfogalmazott problémákat.

A következő csoportja az agráriumban alkalmazott döntéstámogató rendszereknek érinti mind az agrártermelést, mind a környezet-, a talaj- és a vízvédelmet. Ilyen döntéstámogató rendszerek például: (a) Az öntözéssel kijuttatott tápanyag és növényvédőszer használatát segítő rendszerek (Rafea, 1996; Ladányi, 2006); (b) Agrárgazdasági szempontú természeti erőforrások védelmét szolgáló tanácsadó rendszerek (Baig et al., 2005), amelyen belül a rendszerek egy része a talajvédelemhez kapcsolódó kérdésekhez nyújt segítséget, mint például a talajok degradációjának megelőzése a túlzott műtrágya vagy növényvédőszer használat következtében, míg másik csoportja az agrárgazdálkodásból eredő szennyezés-terhelések csökkentéséhez és ezen keresztül a vízvédelemhez kapcsolódik (Rafea, 1996; Baig, et al, 2005; Sieker et al., 2006; Fodor et al., 2007; Tamás és Fehér, 2010). Ezen rendszerekre is jellemző, hogy kiterjedten támaszkodnak szabályalapú tudásbázisokra és a rendszerek által szolgáltatott döntések e tudásbázisokban meglévő szabályok megoldásán alapulnak.

Eltérő kategóriát képeznek az integrált vízkészlet-gazdálkodást, a vízgyűjtő-gazdálkodást - és ami szintén bizonyos területeken az agrárgazdálkodással is kapcsolatba hozható -, a szennyezett területek rehabilitációját segítő döntéstámogató rendszerek (Loucks, 1995; Bardos et al, 2002; US EPA, 2005; Evers, M., 2007; Harmancioglu, 2008; Tamás és Fehér, 2010). Ezen rendszerek a víz- és anyagforgalmat matematikai modellek alapján írják le a vizsgált térségre vonatkozóan (helyi lépték: például egy szennyezés körzete; vízgyűjtő lépték vagy regionális lépték) és csak kiegészítésként tartalmaznak szabályalapú tudásbázist egyes specifikus problémák kezelésére.

2.2. Talajokban lezajló oldattranszportot leíró modellek a szakirodalomban

A talajfelszíntől a talajvízszintig terjedő (az úgynevezett háromfázisú zóna) néhány tíz centiméteres vagy néhány tízméteres réteg, amely a Föld kérgének méretéhez képest elhanyagolhatóan kicsi, mégis fontos szerepet tölt be a víz természetes körforgásának folyamatában. Vízgazdálkodási szempontból a felszíni és a felszín alatti vizek (ebben a talajvizek, rétegvizek, mélységi vizek és a karsztvizek értendők) mennyiségi és minőségi vizsgálata a kiemelt feladat (*Vermes, 1997; 2006*). Az elmúlt néhány évtized tapasztalata azonban megmutatta, hogy az intenzív területhasználat (*Nagy, 2009*) - mezőgazdasági növénytermesztés, intenzív állattartás, szennyvízszikkasztás, hulladék-elhelyezés (*Molnár, 1994*) - szennyező hatásainak következtében Földünk számos térségében az első vízádóréteg (talajvíz) már jelentős mértékben elszennyeződött. A szennyeződési folyamat sok helyen már a mélyebb vízrétegek minőségét is veszélyezteti.

A háromfázisú zónában (mezőgazdasági szempontból - talajrétegben) és a növényi élet és a mezőgazdasági termelés szempontjából igen fontos gyökérzónában lejátszódó víz- és kémiai elemforgalom erős hatással van a talajvizek minőségére is (*Németh et al, 1993*). Több évtizede folynak már elméleti és gyakorlati vizsgálatok az ebben a zónában lejátszódó víz- és oldattranszport-folyamatok megismerésére, matematikai módszerekkel történő leírására. Ezen vizsgálatokat az is motiválja, hogy a számítási módszerek alapján, optimális módon lehessen szabályozni a mezőgazdasági talajok gyökérzónájának víz- és tápelem-ellátását, ennek következtében meg lehessen akadályozni a gyökérzóna sóval történő telítődését és a talajvizek valamint felszín alatti vizek elszennyeződését.

A számítógépek és különösen az egyre nagyobb teljesítményű és viszonylag olcsó személyi számítógépek elterjedésével gyorsuló ütemben nőtt meg azon modellek száma, amelyek a háromfázisú zónában lejátszódó oldat-transzport folyamatot írják le. A szakirodalomban számos összefoglaló, elemző cikk jelent meg a tárgykörben, hangsúlyozottan azzal a céllal, hogy rendszerezék az eddig végzett kutatásokat, az alkalmazott matematikai modelleket és a kifejlesztett számítógépes programcsomagokat. A teljesség igénye nélkül például: *van Genuchten és Alves, 1982; Addiscott és Wagenet, 1985; Nielsen et al., 1986; Vachaud et al., 1988; Wagenet et al., 1988., Rajkai et al., 2004.*

Az alábbiakban, a szakirodalomban leginkább használt terminológiák és kategorizálási módszer alapján tekintjük át röviden a létező modell típusokat, figyelemmel a későbbi fejezetekben bemutatásra kerülő modell-kiválasztási szakértői rendszeremben (*EXSOLUTE*) alkalmazottakra.

2.2.1. Empirikus összefüggések

Az 1950-es években az Amerikai Egyesült Államokban a jelentős sófelhalmozódású talajok javítása céljából vizsgálták a sókimosódási folyamatot (*Reeve et. al., 1955*). Empirikus összefüggést állapítottak meg a talajból történő sókimosódásra:

$$D_w/D_s = [0.2(EC_e)_o/(EC_e)] + 0.15 \quad (1)$$

ahol D_w az átszivárgó vízoszlop magassága; D_s a vizsgált talajréteg mélysége; $(EC_e)_o$ a víz átszivárgása előtt a D_s mélységű talajréteg oldat-kivonatának átlagos elektromos vezetőképessége; EC_e ugyanennek, a víz átszivárgása után mért értéke.

Az (1) egyenletet később módosították, bevezetve a felső 5-10 cm-es talajréteg egyensúlyi EC értékét. A módszert összességében sikerrel alkalmazták számos felszáraz területen talajjavítási beavatkozások meghatározásához.

Empirikus összefüggést fejlesztettek ki nemcsak a sótartalom kimosódására, hanem egyes kémiai komponensek kimosódásának számszerűsítésére is. A számos módszer közül egy példa erre a *Burns (1975)* által javasolt összefüggés a talaj felszínére kihelyezett nitrogén, talajrétegen átszivárgó mennyiségének számítására:

$$f = [I/(I + \Phi_{fc})]^h \quad (2)$$

ahol I a talajrétegen átszivárgó víz mennyisége; Φ_{fc} a talajréteg szabadföldi vízkapacitása; h a talajréteg vastagsága.

A vizsgálatok szerint a (2) egyenlet jó egyezést ad az irodalomban közölt adatokkal is és egyszerűsége miatt könnyen alkalmazható. Az (1) és (2) egyenletek az oldat-transzport folyamatáról nagyon általános képet adnak, nem alkalmasak azonban a folyamatok mélyebb elemzésére, ugyanakkor kevés területi adat esetében gyors elemzésekre nyújtanak lehetőséget.

2.2.2. A mérlegegyenletet alkalmazó módszerek

A mérlegegyenlet vagy általánosabban az anyagmegmaradás elvén alapuló módszer alkalmazása általánosabb leírását adja a talajréteg(ek)en keresztül történő oldat-

transzportnak. Az egyenlet általános alakja egy komponensre vonatkozik, amikor forrás vagy nyelő tagot nem alkalmazunk:

$$\begin{bmatrix} a \text{ komponens} \\ \text{tömege} \\ a \text{ rétegben} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \text{ komponens} \\ \text{tömege } a \\ \text{beszivárgó vízben} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a \text{ komponens} \\ \text{tömege az} \\ \text{eltávozó vízben} \end{bmatrix} \quad (3)$$

A (3) egyenlet által megfogalmazott általános leírás alapján felírható az egyrétegű talajszelvényre a mérlegegyenlet:

$$D_s e (\Delta C_{sw}) = (C_{iw} * D_{iw}) - (C_{dw} * D_{iw}) - (C_{dw} * \Delta D_{dw}) \quad (4)$$

ahol D_s a talajprofil mélysége; e a talajnedvesség térfogatszázalékban; C_{iw} és D_{iw} a kémiai komponens koncentrációja a beszivárgó vízben és a beszivárgó vízoszlop magassága; C_{dw} és D_{dw} az elfolyó vízben a vizsgált komponens koncentrációja és az elfolyó víz vízoszlopban kifejezett magassága.

Hasonlóan a (4)-es egyenlethez, felírható a mérlegegyenlet rétegezett talajprofilra is:

$$\sum_i D^i (e_{fc}^i C_{fc}^i - e_0^i C_0^i) = C_{iw} D_{iw} - C_{dw}^i [D_{iw} - \sum_i D_i^i (e_{fc}^i - e_0^i)] \quad (5)$$

ahol a még nem említett jelölések közül az i index az i -edik talajréteget jelöli; D_i az i -edik talajréteg vastagsága; az fc index a szabadföldi vízkapacitás víztartalmára utal és a kémiai komponens koncentrációra; a 0 index pedig a kezdeti víztartalomra, illetve az adott kémiai komponens koncentrációjára.

A (4) és (5) egyenlet szolgált alapul a legkorábban kifejlesztett modelleknek. Egyszerűségük ellenére 80-90 %-ban jól közelítették a kimosódási folyamatot. Hátránya a módszernek, hogy leginkább drénezett területekre alkalmazható, ahol meghatározható az átszivárgó víz mennyisége és koncentrációja.

A gyakorlatban az átszivárgó drénvizek koncentráció értékeinek ismerete igen fontos. *Van Der Molen, 1956* az (5) egyenletet használta alapul modelljénél, amellyel az elszivárgó drénvíz koncentrációját számította. Feltételezte, hogy a talajfelszínre jutó és beszivárgó víz (akár csapadék, akár öntözővíz) azonnal elkeveredik a legfelső talajrétegben már ott lévő vízzel és szabadföldi vízkapacitásig telíti a réteget. Ha több víz érkezik, mint ami a vízkapacitásig telítené a réteget, az tovább szivárog a következő rétegbe. Itt, a feltevés szerint szintén azonnal elkeveredik a már jelenlevő vízzel. Folytatva az eljárást, a legalsó vizsgált rétegre meghatározható az újlag kialakuló koncentráció.

A (3) egyenlet alapú modellek előnye, az empirikus összefüggésekkel szemben, hogy robosztus módon, de már követik az oldat-transzport dinamikáját. Nem kezelik viszont azokat a kiegészítő folyamatokat (pld. adszorpció, deszorpció, ioncsere, növényi hatások stb.), amelyek egyes esetekben jelentősen befolyásolják a transzportfolyamatot. Továbbá, mivel az idő, mint független változó nem szerepel az egyenletben, a modell eseményfüggő, nem adja folytonos leírását a transzportnak. A számítási rétegek vastagságának előzetes rögzítése befolyásolja a számított koncentráció értékét, ezzel numerikus diszperziót okozva. (A numerikus diszperzió problematikája a dinamikus modellek esetében is fennáll).

A mérlegegyenlet típusú modellek jól alkalmazhatók lassú változások leírásakor, szeretlen komponensek esetében, és ahol az egyéb járulékos hatások szerepe elhanyagolható.

2.2.3. *Determinisztikus modellek*

A háromfázisú zónában lejátszódó oldat-transzport folyamatot leíró modellek közül azokat soroljuk ebbe a kategóriába, amelyről feltételezzük, hogy a leírt rendszer válasza egy eseményre (inputra) egyértelműen meghatározott eredményt (outputot) ad. A determinisztikus modelleket két további csoportra lehet bontani. Megkülönböztetünk mechanisztikus és funkcionális modelleket (*Addiscott és Wagenet, 1985*).

2.2.3.1. *Determinisztikus és mechanikus típusú modellek*

A determinisztikus és mechanikus modellek csoportjába a szakirodalom azokat a modelleket sorolja, amelyek figyelembe veszik az oldat-transzport folyamat alapvető mechanizmusát azon a fokon, ahogyan az a jelenlegi ismeretek szerint feltárt. Így ezek a modellek alkalmazzák a Darcy-törvényt a vízmozgás leírására, az anyagáram egyenleteket, kombinálva a diffúziós-diszperziós folyamatok leírásával. A telítetlen talajzónán át történő függőleges irányú oldat-transzport modellezésénél, egydimenziós formában, a vízmozgásra a Darcy-egyenletre alapozott modellt alkalmazzák általánosan, melyet az irodalom Richards-egyenletként említ (*Richards, 1931*).

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right\} + A(z, t) \quad (6)$$

A Fick-törvényre alapozott, szintén egydimenziós transzport-egyenlet pedig a következő alakú:

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(eC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(e D_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (J_w C) + \sum \Phi_j \quad (7)$$

(a) (b) (c) (d) (e)

A (6) és (7) egyenletekben használt jelölések jelentése: h a víznyomás magassága (értéke pozitív telített rétegekben, negatív a telítetlen zónában); $C(h)$ a kapilláris kapacitás (vagy a retenciós görbe, $e(h)$) meredeksége; e a víztartalom térfogatszázalékban; $K(h)$ a talaj hidraulikus vezetőképessége; $A(z, t)$ a vízre vonatkozó forrás, illetve nyelő tagot jelöli; C és S a vizsgált anyagnak a talajban található oldat-koncentrációját, illetve a talajszemcsékhez adszorbeált szilárd formájának koncentrációját jelenti; D_s a diffúziós tényező, Φ_j az oldatra vonatkozó forrás vagy nyelő tag; t az idő; z a függőleges helykoordináta, amely pozitív lefelé mutatva és $J_w = -(e) * \frac{\partial e}{\partial z} + K(e)$.

A (7) egyenletben az (a) és (b) tag a megkötődött, illetve az oldat formájú anyag koncentrációjának időbeli változását jelöli; a (c) tag a hidrodinamikai diszperziót, a (d) a függőleges elmozdulás konvektív tagja, (e) pedig a kémiai reakciók összefoglaló jelentése.

Megvizsgálva a (6) egyenlet elméleti alapjait, kitűnik, hogy számos feltevése nem érvényes különböző gyakorlati körülmények között.

- i. Az egyenlet elhanyagolja a talajrétegek (talajmátrix) összenyomhatóságát és feltételezi, hogy az átszivárgó oldat fajsúlya független a koncentrációtól.
- ii. Ugyancsak elhanyagolja az oldat fajsúlyának térbeli változékonyságát.
- iii. Jelentősebb elhanyagolása a (6) egyenletnek, hogy elhanyagolhatónak tekinti a levegőfázis szerepét a telítetlen zónán keresztül történő folyadékáramlás során. Ezen utóbbi kérdés megoldására az 1950-es évek elején kezdték kifejleszteni az úgynevezett két-fázisú "víz-levegő" modelleket, főleg olyan esetekre, amikor a folyadékáramlás során a levegő nem tud szabadon távozni a háromfázisú rendszerből (pld. olajbányászat).
- iv. A (6) egyenlet alapvető feltevése, hogy a Darcy-törvény érvényes a háromfázisú áramlás során is, bár azt telített zónában történő áramlás esetére állapították meg eredetileg. Az irodalom számos esetben utal olyan kísérleti tapasztalatra, hogy például finom szemcsés talajokban, kis áramlási sebességek mellett létezik küszöbérték, amely alatt már nem jön létre áramlás. Ugyancsak kétséges a Darcy-törvény érvényessége háromfázisú áramlásnál nagy áramlási sebességek mellett (Childs, 1969; Bear, 1972; Nielsen et al, 1989).
- v. A (6) egyenlet által megfogalmazottaktól jelentősen eltérő áramlási viszonyok jönnek létre a repedezett talajok esetében. (Repedezett talajok fogalomkörébe számítja az irodalom azokat a körülményeket, amikor a talajban nagy, folytonos,

a természetes pórusjáratoktól nagyobb üregek, járatok, repedések alakulnak ki. Ennek oka lehet a talaj kiszáradásából adódó repedezettség, elhalt gyökérjáratok kialakulása, állatok ásta üregrendszerek, természetes aggregálódás stb.).

A repedezett talajrétegeken keresztül történő áramlás számítására kezdték kifejleszteni az úgynevezett *két-tartományú* modelleket. A módszer szerint a víz az egyik tartományban (a talajmátrixban) a konvencionális Darcy-törvény által megfogalmazott telítetlen vízmozgás szerint áramlik, míg a másik tartományban, amely lehet egyedi pórus, vagy pórusok statisztikus hálózata, a víz a gravitációs áramlás szabályai szerint mozog (*Yeh és Luxmoore, 1982; Germann és Beven, 1985*). A két-tartományú modell-koncepciót drénezett területek vízmozgásának leírására fejlesztette tovább *Wang és Narasimhan (1985)*. Modelljük leírja a részben telített pórusok fala mentén létrejövő áramlás és a telítetlen talajmátrix közötti áramlást is.

A legtöbb gyakorlati feladat megoldására alkalmazott modellnél abból a feltevésből indulnak ki, hogy a (6) egyenlet feltételezései érvényesek. A (6) egyenlet megoldásához alapvető ismerni a talaj telítetlen hidraulikai vezetőképesség-függvényét ($K(h)$) és a retenciós görbét ($e(h)$). Ezek meghatározási módszereinek valamint matematikai leírásának és a felmerülő még megoldatlan kérdéseknek a tárgyalása nem a mostani kutatási téma tárgyköre. Csak utalunk rá, hogy a telítetlen talajok hidraulikai tulajdonságait számos hatás befolyásolja, például: hiszterézis hatás, hőmérsékleti hatás, a talajoldat összes sótartalma. (*Childs, 1969; Bear, 1972; Constantz, 1982; Várallyay, 1988; Nielsen et. al., 1989; Rajkai és Várallyay, 1989; Rajkai és Kabos, 1999; Rajkai et al., 2004*). Áttérve az oldat-transzport leírását adó (7) egyenlet elemzésére, megállapítható, hogy az (a) és (e) tagján keresztül kapcsolódhat a kémiai átalakulásokat leíró modellekhez. Az elmúlt évtizedek során számos különböző típusú modellt fejlesztettek ki a vizsgált kémiai anyag(ok)tól, a talajtól, a klimatikus viszonyoktól és a modell, alkalmazási (kutatási, tervezési, management, előrejelzési stb.) céljától függően. A (7) egyenlethez kapcsolódó kémiai almodellek alapján, négy nagy csoportját különböztetjük meg a determinisztikus és mechanikus oldat-transzport modelleknek irodalmi vizsgálataink alapján:

- i) egyensúlyi transzport modellek;
- ii) nem-egyensúlyi transzport modellek;
- iii) repedezett talajokra kidolgozott transzport modellek és
- iv) szerves anyagok transzport modelljei.

i) Egyensúlyi transzport modellek

Ezeknél a modelleknél feltételezik, hogy az adszorpció és a cserefolyamat pillanatszerű és az $S(C)$ függvény egyensúlyi izotermával leírható. Az izoterma lehet lineáris, Freundlich, Langmuir vagy esetleg más típusú. Legáltalánosabban használt leírásmód a lineáris kapcsolat feltételezése:

$$S = K_d * C \quad (8)$$

ahol K_d az izoterma meredeksége, vagy más néven az eloszlási együttható.

Bár (8) egyenlet egyszerűsége megfelelő a könnyebb matematikai megoldás számára, a valóságban az adszorpciós és cserefolyamatok leginkább nemlineárisak (*Reardon, 1981; Miller és Benson, 1983; Valocchi, 1984*).

A forrás- és nyelő tagot (Φ_j) is gyakran közelítik első és/vagy nulladrendű tagokkal:

$$\Phi_j = -\mu_1 eC - \mu_s \rho S + \gamma_1 e + \gamma_s \rho \quad (9)$$

ahol a még nem említett jelölések: μ_1 és μ_s az elsőrendű átalakulási tagok sebességét meghatározó konstansok; a γ_1 és γ_s a nulladrendű tagokhoz tartozó konstansok.

Behelyettesítve (8) és (9) egyenletet a (7)-be a transzport-egyenlet a klasszikus lineáris konvektív – diszperzív egyenletté egyszerűsödik:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \mu C + \gamma \quad (10)$$

ahol R a visszatartási tényező, aminek az egyenlete:

$$R = 1 + \rho K_d / e \quad (11)$$

míg a μ és γ a következő alakú:

$$\mu = \mu_1 + \mu_s \rho K_d / e \quad (12)$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_s \rho / e \quad (13)$$

A (10) egyenlet módosított alakját alkalmazzák, amikor a szerves és szervetlen átalakulások folyamata jelentős a transzport során. A legegyszerűbb leírásmód az egymást követő átalakulások láncszerű megfogalmazása (*Nielsen et. al., 1986*).

A láncszerű leírásmód, melyet korábban főleg radioaktív anyagok esetében alkalmaztak, továbbfejlesztését adta *McLaren, 1970*, a nitrogénformák transzportjának leírásánál. A forrás / nyelő tagra a következő egyenletet alkalmazta:

$$\Phi_j \equiv \frac{\partial s}{\partial t} = -A \frac{\partial m}{\partial t} - Bm - \frac{\kappa \delta m s}{K_m + s} \quad (14)$$

ahol s a szubsztrátum koncentrációja; m a biomassa tömege; A konstans, mely egyenlő a produkció reciprokjával; B növekedési együttható; κ konstans; δ az egy-
ségnyi biomasszában található enzim mennyisége; K_m telítési konstans.

A (14) egyenlet alkalmazása bár megfelelőnek tűnik, mégis nem szükségszerűen pontos megfogalmazását adja a rendszernek. A biomassa (m) értéke magában foglalja a mikrobiológiai fajok sokaságát, melyek metabolikus tulajdonsága különböző lehet. A (14) egyenlet alkalmazása tehát erősen függ paramétereinek pontos meghatározásától, így erősen helyfüggővé válik az alkalmazása. A szakirodalmi tapasztalatok alapján állítható, hogy a mikrobiológiai transzformációs folyamatok feltártsága jóval alatta marad a fizikai és a kémiai folyamatokénál. További kutatás szükséges a tápelemek átalakulását (így a nitrogén-formákét) illetően.

Az egyensúlyi transzport modellekről megállapítható, hogy zavart (nem eredeti szerkezetű) talajoszlopok laboratóriumi transzportfolyamatainál, valamint zavartalan, homogén szabadföldi talajok esetében, amikor nem-reaktív anyagok mozgását vizsgáljuk, meglehetősen sikeresen alkalmazható. Erősen adszorbtív kémiai anyagok és aggregálódó talajréteg(ek) esetében nem adnak megfelelő leírást, hiszen nagy a valószínűsége annak, hogy ilyenkor a kémiai transzport nem-egyensúlyi jellegű.

ii) Nem-egyensúlyi transzport modellek

A leggyakrabban használt és a legegyszerűbb formája a nem-egyensúlyi transzport modelleknek, amikor elsőrendű lineáris kinetikát tételeznek fel:

$$\frac{\rho}{e} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (15a)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \alpha (K_d C - S) \quad (15b)$$

ahol α az elsőrendű kinetikai tényező. A (15a) és (15b) egyenletek bár pontosabb leírását adják a folyamatoknak, mint az egyensúlyi transzport modellek, de a tapasztalat azt mutatja, hogy abban az esetben alkalmazható sikeresen, amikor a pórusvíz kis sebességgel áramlik.

A nem-egyensúlyi modellek egy továbbfejlesztett változata a *két-módszeres* modellek csoportja. Ezeknél az adszorpció tag két részből tevődik össze. Az egyik részben egyensúlyi állapotot írnak le, míg a másik része az egyenletnek az elsőrendű kinetikai leíratot követi (*Selim et. al., 1976, Cameron és Klute, 1977; Nielsen, 1989*). Alapfeltevés, hogy a talaj szilárd fázisa különböző tulajdonságú anyagokat tartalmaz (talaj ásványokat, szerves anyagokat, vas- és alumínium-oxidokat stb.), és ezekkel a modellezett

kémiai komponens, különböző sebességgel reagál. Ezért a *két módszeres* modell egyik része pillanatnyi reakciót (lineárisan) tételez fel, másik része időben változó (nem-lineáris) átalakulással számol.

Példaként *Nkedi-Kizza et. al., 1984* által alkalmazott modellt mutatjuk be:

$$\left(1 + \frac{F\rho K_d}{e}\right) \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho}{e} \frac{\partial S_2}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (16a)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = \alpha[(1 - F)K_d C - S_2] \quad (16b),$$

ahol F a két rész arányát jelöli; a 2 index pedig a második részre utal.

Több megjegyzés található az irodalomban arra, hogy sajnálatosan F és α a legtöbb vizsgálat szerint függvénye a pórusvíz sebességének, ami így alkalmazásukat eléggé korlátozottá teszi (*Cameron és Klute, 1977; Nkedi-Kizza et. al., 1984*).

Egy érdekes változata a nem-egyensúlyi transzport modelleknek az úgynevezett fizikai nem-egyensúlyi modell típus. Ezek kialakításánál feltételezik, hogy a talajban levő víz két részre osztható. Az egyik rész mobil, vagyis mozog a szemcsék között, a másik immobil, mintegy kötött a szemcsék között. Az immobil víz, mint vízfilm és szegletvíz jelenik meg. A transzport-modellben elsőrendű anyagcsere-függvényt alkalmaznak a mobil és immobil vízrészek közötti anyagátadásra. Az elmélet szerint, a konvektív-diszperzív transzport csak a mobil tartományban játszódik le.

Van Genuchten és Wierenga, 1976 kiterjesztette a (17a) és (17b) egyenletekkel megfogalmazott modellt. A mobil és immobil vízterek kémiai anyagátadására egy Freundlich-típusú egyensúlyi folyamatot tételeztek fel. Az egyenletek alakja:

$$e_m R_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + e_{im} R_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = e_m D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - e_m v_m \frac{\partial C_m}{\partial z} \quad (17a)$$

$$e_{im} R_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha(C_m - C_{im}) \quad (17b)$$

ahol m és im index a mobil és az immobil tartományt jelöli; α az anyagátadási tényező a két víztér között; az R_m és R_{im} késleltetési tényezők (lásd (11) egyenletet) egyensúlyi adszorpciós folyamatra utalnak.

A (17a) és (17b) modellt számos anyagra (klorid, nehéz fémek, szerves komponensek) is alkalmazták, főleg laboratóriumi kísérletek leírására. Hátránya mind a két-fázisú, mind a két-tartományú modell típusnak, hogy az általuk leírt jelenségre külön-külön álló és független paraméter meghatározást kívánnak meg, és ez a gyakorlati esetek többségében igen jelentős nehézséget okoz. Az említett modell típusok jelenleg inkább kutatási és laboratóriumi célú vizsgálatokra alkalmasak.

Meg kell említeni, hogy a nem-egyensúlyi modellek csoportjába tartozóan *Gyarmati* az irreverzibilis folyamatok termodinamikájának lineáris, kvázi-lineáris és bizonyos nem-lineáris elméleteire vonatkozóan variációs elvet állított fel, amellyel a disszipációs transzport folyamatok térbeli-időbeli evolúciója leírható. Ennek a variációs elvnek az alkalmazhatóságát igazolta az, hogy belőle levezethetők a transzport folyamatok lineáris egyenletei, úgymint a hővezetésre a Fourier, a diffúzióra a Fick-, az áramlásra a Navier Stokes- és Reynolds egyenletek (*Gyarmati, 1967*).

iii) Repedezett talajokra alkalmazott modellek

Mint korábban is említettük a repedezett talajokban lejátszódó oldat-transzportok leírásánál feltételezik, hogy a kémiai oldat-transzport egyrészt a jól meghatározott póruson vagy üreg-rendszeren, másrészt pedig a talajmátrixon keresztül valósul meg. Így a repedezett talajok esetében a két-tartományú modelleket alkalmazzák. Számos analitikai és numerikus megoldást találni az irodalomban. (*Rasmuson és Neretnieks, 1980; Rao et. al., 1979, 1980; Tang et. al., 1981; Huyakorn et. al., 1983; Van Genuchten, 1985a, b*). A hivatkozott szerzők modelljei geometriailag meghatározott üreg-rendszert feltételeznek. Ezért alkalmazásukat ez bizonyos korlátok közé szorítja. További kutatások alapján (*Rao et. al., 1980; Baker, 1985; Rasmuson és Neretnieks, 1984*) a pórusok és a talajmátrix természetes változékonyságának leírását is alkalmazzák a két-tartományú modellekben.

iv) Szerves anyagok transzport modelljei

A szerves szennyezőanyagok fokozott elterjedése növekvő mértékben veszélyezteti a környezetet. Ez a tény impulzust adott azoknak a kutatásoknak, amelyek ezen anyagok vándorlását vizsgálják a felszíni, a felszín alatti vizekben és a talajrétegekben. A talajrétegekben lejátszódó szerves szennyezőanyag-transzport (pesticidek, olajszármazékok stb.) vizsgálatára leginkább az előzőekben felsorolt determinisztikus és mechanikus modelleket alkalmazzák a leggyakrabban. Eltérés az, hogy a vizsgált anyagok jellege miatt, a kémiai átalakulásokat leíró összefüggésekbe, kiegészítő tagokat is be kell vonni. Így például az illékonyságot, a vízzel való elegyedést és / vagy ennek ellentettjét, a fotokémiai transzformációt stb. (*Jury et. al., 1983, 1984; Abriola és Pinder, 1985; Faust, 1985*). Mivel a jelen értekezésben elsősorban a nem-pontszerűen alkalmazott nitrogénműtrágyák mozgását kívánjuk vizsgálni a háromfázisú zónában, itt csak utalunk rá,

hogy a szerves szennyezőkre vonatkozó átfogó elemzés megtalálható *McKay et. al. (1985)* és *Wagenet és Rao (1983)* munkáiban.

2.2.3.2. Determinisztikus és funkcionális típusú modellek

A determinisztikus és funkcionális típusú modellek csoportjába sorolják azokat, amelyeknél a (7) egyenletből elhagyják a szilárd fázis koncentrációjának időbeli változását leíró (a) tagot, a diszperziós (c) tagot, valamint a forrás és/vagy nyelő (e) tagot. Ekkor az egyenlet az úgynevezett „dugattyúáramlás” jelenségét írja le, megadva az áramlási front helyzetét. Ezeket a modelleket elsősorban tehát lökésszerű oldat-terhelések hatásának számítására alkalmazzák. Hátrányuk, hogy nem tudják figyelembe venni a heterogén talajprofilon keresztül történő transzportot, valamint nem veszik figyelembe azt a helyzetet, amikor a talajprofilban már van valamilyen koncentráció. Nem írják le a mobil és immobil vízfázisban kialakuló koncentrációkat sem.

2.2.4. Sztochasztikus modellek

Az előzőekben ismertetett modell-típusok mindegyike térben állandó paramétereket tételezett fel. Ugyanakkor a természetben a talajok erős térbeli változékonysággal rendelkeznek. Következésképpen az oldat-transzport is térben jelentősen eltérően játszódik le. Példa erre *Schulin et. al. (1987)* által végzett vizsgálat. Térben egyenletesen és pillanatszerűen kiadagolt nyomjelzőt (bór) alkalmaztak, hogy megállapítsák az anyag térbeli eloszlását bemosódás hatására. A 399 nappal a kiszórás után elvégzett mérések azt mutatták, hogy még térhálós mintázással is nehezen volt megállapítható a lefelé elmozdult jelzőanyag-front pontos helyzete a nagymértékű egyenetlen térbeli eloszlás miatt. Ez a kísérlet is felhívta a figyelmet arra, hogy egyrészt a helyszíni mérések pontos megtervezése (több pontban vett több minta alapján szükséges meghatározni a koncentrációt), és a mintavételezés végrehajtása fontos a modell eredményeinek összevetése érdekében, valamint másrészt arra, hogy a talajban lejátszódó oldat-transzport térben igen jelentős eltérésekkel zajlik le.

A sztochasztikus modelleket éppen ezért kezdték kifejleszteni, hogy a telítetlen talajzónán keresztül történő oldat-transzport folyamatot térbeli feladatoknál is jól lehessen modellezni. A sztochasztikus modelleket irodalmi vizsgálataink alapján három csoportba soroljuk:

- i) lépték elméleti modellek
- ii) Monte-Carlo módszerű modellek

iii) sztochasztikusan folytonos modellek.

Közös feltevése a sztochasztikus transzport modelleknek, hogy a paramétereik véletlen változók. A gyakorlatban azonban a sztochasztikus modelleket csak számos egyszerűsítés mellett lehet alkalmazni, így:

- a) a véletlen változójú modell paramétereinek ugyanaz a valószínűségi eloszlásfüggvénye van a terület minden pontján (az átlag és a szórás konstans);
- b) az ergoditási hipotézis érvényesül.

A terepi méretű áramlás és transzport-folyamatra alkalmazható *lépték-elméleti* sztochasztikus modellek a vizsgált területet különböző talajoszlop mozaikok sorozatából összeállónak tételezik fel. A részterületek különböznek hidraulikus tulajdonságaikban, olyan arányban, ahogyan a talajok mikroszkopikus geometriai szerkezetének jellemző hosszúságai aránylanak egymáshoz. A telítetlen hidraulikus vezetőképességet véletlen eloszlásúnak felvéve (általában lognormális eloszlást alkalmaznak) számítják a koncentráció értékeket. Kiterjeszthető a sztochasztikus leírás a transzport más paramétereire is (kapilláris diffuzivitás, diszperziós tényező stb.). Az egyes területekre meghatározott koncentrációk alapján számítják a teljes modellezett terület átlagát.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy például klorid esetében a lépték-elméleti modellel számított átlag és a számított értékek eloszlása jól közelítette a mérési eredményeket. *Wagenet és Rao (1983)* a módszert nitrát-koncentráció szimulálására kívánta használni, de a számított értékek lényegesen eltértek a terepen mértéktől. A szerzők valószínűsítik, hogy az eltérést főleg az okozta, hogy növényvel borított területen mértek és a növényi víz- és tápanyagfelvétel hatása erősen érvényesült, amit a modellben nem vettek figyelembe. Összegezve tehát megállapítható, hogy a lépték-elméleti sztochasztikus modellek nem kiforrott kísérletnek tekinthetők az oldat-transzport folyamat leírására.

A *Monte-Carlo módszer* alkalmazásakor feltételezik, hogy a vizsgált talajra vonatkozóan az áramlási és a transzport paraméterek véletlen változók, és ismert az eloszlásfüggvényük. Az eloszlásfüggvények alapján véletlen jelleggel kiválasztott paraméterekkel futtatják a modellt és számítják a koncentrációkat. Ezt sokszor megismételve, a számított értékek alapján, meghatározható a koncentrációk átlaga és szórása, amely jellemzi a területet.

A sztochasztikusan folytonos típusú modellek több változatát is kifejlesztették az elmúlt időkben. Az egyik megközelítés szerint, mely alapjaiban a determinisztikus és mechanikus modellre épül, a modell-változók helyére, azok átlaga és egy véletlen tag összegét helyettesítik. Ekkor egy új modellt kapunk az átlagértékekre, valamint a modell tartalmaz kiegészítő tagokat is, amelyek az eredeti (6) és (7) egyenletben nem szerepeltek. A kiegészítő véletlen jellegű tagokra elsőrendű közelítés alkalmazható, és Fourier transzformációval oldhatók meg az egyenleteket.

Egy másik változata ezeknek a típusú modelleknek, amikor mind a vízhozam számítására, mind a koncentrációra a transzfer függvényt alkalmazzák. A transzfer függvény típusú modell az anyagáramra (M), amely a vizsgált térbe belépő és kilépő mennyiségek között állít fel kapcsolatot a következő:

$$M_{out}(t) = \int_0^t (g(t - t'|t') M_{in}(t')) dt' \quad (18)$$

ahol $g(\tau|t')$ feltételes sűrűség függvénye az oldat átfolyási idejének a belépő és a kilépő szelvény között, vagyis annak valószínűségét adja meg, hogy egy vizsgált elemi molekula t' időpontban lép be a vizsgált térbe és azt $\tau = t - t'$ és $\tau + d\tau$ időpont között hagyja el. A lognormál típusú $g(\tau|t')$ függvény a legtöbb talajra alkalmazható. A függvény együttesen írja le a talajban lejátszódó valamennyi folyamat összegzett hatását (például konvekció, diszperzió, megkötődés, radioaktív lebomlás (ha van), biológiai átalakulás stb.). Hasonlóan az anyagáramra felírt egyenlethez, a koncentrációra is alkalmazni lehet a transzfer függvényt:

$$C_{out}(t) = \int_0^t g(t - t'|t') Q_{in}(t') C_{in}(t') / Q_{out}(t) dt' \quad (19)$$

ahol $Q(t)$ a vízhozamra utal.

A (19) modellt sikeresen alkalmazták egy 0,6 ha-os területre, ahol különböző mélységekben számították az elfolyó víz koncentrációit (*Jury és Stolzy, 1982*).

A transzfer-függvényre alapozott modellek alkalmasak a sztochasztikus típusú management modellek kialakítása számára egyszerűségük és kevés adat igényük miatt. Hátrányuk, hogy kalibrálásuk szükséges, valamint a határfeltételek erősen befolyásolják az eredményeket.

2.2.5. Következtetések

Áttekintve a telítetlen talajzónában lezajló oldat-transzport folyamatot leíró modelleket, a következő következtetések vonhatók le:

1. Minden modellezési feladat korrekt megoldhatóságának kritikus pontja a természetben észlelt vonatkozó mennyiségekkel való összehasonlítás. Fontos tehát a terepi mérési módszerek további fejlesztése, hogy mind a vízáramlás jellemzőit, mind a koncentráció értékeket a valósághoz jobban közelítően és részletesebben lehessen meghatározni.
2. Az oldat-transzport folyamat leírására igen jelentősen eltérő és sokfajta modellt használnak az irodalmi áttekintés tanulsága szerint. A modellek legtöbbjét egy-egy meghatározott probléma leírására alakítják ki, így komplexitásuk ennek megfelelően változik.
3. Az irodalomban legtöbb közölt modellt nem lehet más térségre módosítás nélkül alkalmazni, leginkább csak arra, amely körülményre kifejlesztették. Nagyon kevés modellt ellenőriztek tudományos alapossággal végrehajtott terepi mérések eredményeivel összevetve, illetve alkalmaztak más területre, mint amire a paramétereiket meghatározták.
4. A determinisztikus modellek nagyon fontos szerepet játszanak a kutatási és a management feladatok megoldásánál.

Az analitikus megoldású determinisztikus modelleket általában alapos laboratóriumi ellenőrző kísérletekkel igazolták. Specifikus kezdeti és peremfeltétel igényük korlátozza szélesebb körű alkalmazásukat.

A numerikus megoldású determinisztikus modellek sokkal rugalmasabban alkalmazhatók, mint az analitikusak. Terepi méretű feladatokhoz is felhasználhatók. Determinisztikus jellegük miatt korlátozottan követik a folyamatoknál a területen jelentkező térbeli változékonyságot és a talaj hidraulikus jellemzőinek helyi változékonyságát.
5. A sztochasztikus modellek különösen az átfolyási idő becslésére alkalmazhatók jól. Alkalmas eszközök a telítetlen zónán keresztüljutó területi átlagos szennyezőanyag-terhelés számítására. Kiterjedt, gondos mérések szükségesek, hogy alkalmazásuk érvényessége bizonyított lehessen, különösen mélyen fekvő talajvízszint esetén.
6. Valószínűbb leírás szükséges a biológiai lebomlási, átalakulási folyamatokra; a vízzel nem keveredő anyagokra; a repedezett és/vagy duzzadó talajrétegeken keresztül történő transzportra; valamint az együttesen jelenlevő ionok kölcsönhatásaira.

A személyi számítógépekre adaptálható tudás megjelenítése a mesterséges intelligencia segítségével ugyanakkor lehetővé teszi szakértői rendszerek kifejlesztését, amelyek például megkönnyítik az oldattranszport folyamatok egy sajátos modelljének kiválasztását, a domináns talajtulajdonságok, az alkalmazható kezdeti koncentráció eloszlás, és a talaj és talajvízrendszer meghatározta peremfeltételek figyelembe vételével. Szabályrendszer algoritmust dolgoztam ki a telítetlen talajzónában lejátszódó oldattranszport folyamatok leírását adó modellek kiválasztásának optimalizálására. A 3. fejezetben bemutatok egy szakértői rendszert (*EXSOLUTE*), amely segíteni tudja a felhasználót egy adott speciális problémára alkalmazható determinisztikus oldat-transzport modell(ek) kiválasztásában.

2.3 Háromfázisú zónában lezajló nitrát-transzport modellezése

Világszerte folytak mérések és kutatások, amelyek alapján a kutatók a háromfázisú talajzónában végbemenő oldat-transzport folyamatok pontosabb leírását kívánják elérni. A vizsgálatok fő célja, hogy az okokat feltárva intézkedéseket lehessen tenni a szennyeződések mértékének csökkentése érdekében (*Power és Schepers, 1989; Strebel et al., 1989, Rajkai et al., 2004*).

Az alapfolyamatok ismerete lehetővé teszi a talajban lejátszódó víz- és nitrogén-forgalom vizsgálatát matematikai modellek segítségével is, azon célból, hogy

- (a) a folyamatokat befolyásoló tényezők hatását fel lehessen tárni;
- (b) ki lehessen mutatni az eddig feltárt ismeretekben rejlő hiányosságokat,
- (c) ki lehessen terjeszteni az eredményeket más talajokra, és klimatikus viszonyokra;
- (d) előrejelzést tudjunk adni a mezőgazdasági területen folytatott beavatkozások hatásáról;
- (5) számítható legyen a talajban lezajló biológiai és kémiai folyamatokat szabályozó tényezők hatása; és
- (6) új hipotézisek megfogalmazását segítse elő.

Ezen célok vizsgálatára az elmúlt évtizedben több modellt is kidolgoztak, mint például – a teljesség igénye nélkül – a CREAMS (*Kniesel, 1980*), PRZM (*Carsel et al., 1984*), WATCROS/NITCROS (*Asyling and Hansen, 1985*), GLEAMS (*Leonard et al., 1986*), Opus (*Smith and Ferreira, 1986, 1987*), CERES-MAIZE (*Jones és Kiniry (Eds.), 1986*), vagy a RZWQM (*Rojas et al., 1988, 1989; Hebson and DeCoursey, 1987a, b*).

A modellek legtöbbje, a részletek aprólékos figyelembe vétele miatt nagyszámú paramétert és bemenő adatot igényel, illetve a kidolgozás körzetére vonatkozó helyfüggő leírásmódokat tartalmaz. Adaptálásuk ezért nem mindig oldható meg egyszerűen.

- *Mezőgazdasági kimosódás-veszteségi algoritmus* (Agricultural Leaching Loss Algorithm). A modell becsli a potenciális növényvédőszer kimosódást a mezőgazdasági termelés és a geográfiai tényezők függvényében az USA termővidékeire. A figyelembe vett jellemzők: regionális termésszerkezet változás; a növényvédőszer felhasználásban bekövetkező típusváltás; egyes területek művelésből történő kivonása. A modellt az 1987-es mezőgazdasági termelési adatokra kalibrálták és ennek alapján az egyes körzeteket növényvédőszer kimosódási potenciál szerint osztályokba sorolták. (Gustafson, 1989).

- *CREAMS: Chemicals, Runoff, Erosion from Agricultural Management Systems*. Mezőgazdasági táblaszintű gyökérzóna modell, amely számítja a tábláról történő talajleomosódást, kémiai anyagterhelést és lefolyást. Napi léptékben számítja a mezőgazdasági tábla vízmérlegét, eróziós hordalékhozamot, nitrogén, foszfor és növényvédőszer lemosódást oldat és üledékhez kötött komponens formában. Használója akár 50 éves időszakot is le tud írni 10 növényvédőszer komponensre és vizsgálni tudja alternatív gazdálkodási gyakorlat hatását (Kniesel, 1980).

- *EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator)*. A modell kis területekről, napi léptékben számítja az erózió okozta talajvesztiséget, a megváltozott termés hozamot és a kapcsolódó víz és tápanyagtranszportot. Az erózió és a talaj termőképesség elemzésére szolgáló modell. A fő komponensei: meteorológiai jellemzők, vízforgalmi jellemzők, erózió, tápanyagforgalom, növényi növekedés, talajhőmérséklet, talajművelés, növényvédelem, drénezés, öntözés, kártevővédelem, tarlómaradvány kezelés. A modell számítja az ásványi és szerves tápanyagok (N, P) szállított mennyiségét a felszíni lefolyással és a gyökérzóna alá jutó bemosódással. (Williams et. al., (1984).

- *GCMS (Generalized Crop Modeling System)*. Egydimenziós talajvíz-áramlási és nitrogén transzport modell, mely kiegészül nitrogén transzformációs, növényi felvételi és termés hozam blokkal. Számos nitrogén átalakulási és növény fejlődési almodellt önállóan hívható blokkokká (célfüggvényé) fejlesztettek, amely által ezek a felhasználó által definiált kombinációban használhatók egyes esetek vizsgálatára. A definiálható blokkok: egydimenziós vízmozgás, ammónium és nitrát áramlás; növényi víz- és tápanyagfelvétel; talaj pH, hőmérséklet; mikrobiológiai átalakulások (nitrifikáció, mineralizáció, immobilizáció). A vizsgálható növények: kukorica, árpa, burgonya és lucerna. (Crosby és Clapham, 1990.)

- *NLEAP (Nitrogen Leaching and Economic Analysis Package)*. Víz- és nitrát-nitrogén mérleget számít a talaj gyökérzónájára és a talajvízre. Számítja a nitrát-nitrogén kimo-

sódást mezőgazdasági területekről. Gyors, hatékony módszer a mezőgazdasági terület-ről kimosódó nitrát mennyiségének becslésére elsősorban farmerek, gazdálkodási tanácsadók (falugazdász) és döntéshozók részére. A modell egy sor mechanisztikus egyenletet használ a nitrát kimosódás és a vízádóréteg veszélyeztetettségének, a nitrogén felhasználás hatékonyságának, a víz- és nitrogén mérleg meghatározásához. Ezt követően javaslatokat ad alternatív beavatkozásokra a nitrát kimosódás csökkentésére (Shaffer et al., 1990).

- *NTRM (Nitrogen-Tillage-Residue Management model)*. A modell egydimenziós formában számítja a telítetlen zónában lezajló fizikai, kémiai és biológiai folyamatokat. A vízmozgást választható módon dugattyú áramlasként, illetve véges differencia módszerrel is leírja. További modellezett folyamatok: növény-növekedés, gyökér-növekedés, talajhőmérséklet és hőáram modellezése, anionok és kationok transzportjának számítása; szén és nitrogén átalakulások; nitrát kimosódás számítása élelmiszeripari és kommunális szennyvízkihelyezések következtében; elfolyó öntözővíz minőség számítása; mezőgazdasági és talajművelési beavatkozások hatásának számítása. (Shaffer és Larson, 1987)

- *DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)*. Integrált döntés segítő programcsomag, amely talaj, növény és meteorológiai adatbázist, növénytermesztési modelleket, víz- és tápanyag-transzport blokkokat tartalmaz. Referencia: DSSAT User's Guide for version 4.0, International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, HI, U.S.A., 2006.

A CERES-WHEAT, a CERES-MAIZE, a SOYGRO és a BEANGRO a DSSAT részét képező, de önállóan is alkalmazható szárazabb termesztési modellek. A felsorolt DSSAT modellek mind alkalmasak a mezőgazdasági tábla gyökérszónájából a mélyebb rétegek felé történő beszívargás és tápanyag-kimosódás leírására is.

Az irodalmi áttekintés alapján megállapításra került, hogy hiánypótló lehet a hazai gyakorlatnak, természeti környezetünknek és termelési feltételeinknek megfelelő, tudományosan megalapozott, egyszerű és stabil modell a mezőgazdasági tábla menedzsment célú hidrológiai és vízminőségi (elsősorban a vízzoldható nitrogénformák átalakulási) folyamatainak leírására alkalmas modell rendszer kifejlesztése.

Kutatási munkám alapján olyan modellstruktúrát dolgoztam ki, amely hazai klimatikus és talajviszonyokra alkalmazható, leírja a mezőgazdasági táblaszintű nitrát be-mosódási folyamatokat, és vonatkozó elemeiben a hazai kutatási eredményekre is alapul. A 3. fejezetben bemutatom a *DISNIT2* rendszer részletes felépítését, és a 4. fejezetben tárgyalom a modellel végzett kutatási és vizsgálati eredményeket.

2.4. Irodalmi áttekintés a klímaváltozás és a szikes talajjellemzők kapcsolatára vonatkozó tudásbázis kialakításához

Magyarországon több mint egymillió hektár szikes terület található, amely az ország területének 11% -át jelenti, a legmagasabb arányt képviselve Európában. Ez is magyarázza, miért is foglalkozott *Tessedik* már 1804-ben megjelent cikkében a talaj sótartalmának növénytermesztésre gyakorolt hatásával. Mindamellett, *Irinyi* 1839-ben publikált munkájában beszámolt a sóformákról és a sóformák, valamint a sótartalom és talajtulajdonságok közötti összefüggésekről, és a talajjavítás hatásáról szikes talajokon (*Irinyi, 1839*). A 19. század második fele óta számos cikket közöltek a magyarországi szikes talajféleségekről, azok viselkedéséről, jellemzőikről, formáikról, kiterjedéséről és térbeli eloszlásáról (*Szabó, 1861; Muraközy, 1902; Timkó, 1913; Treitz, 1924; 'Sigmond, 1928*). Egy áttekintő tanulmány értékelte a szikes talajokkal kapcsolatos nemzetközi kutatások történetét, amely ugyancsak részletesen foglalkozott az ez irányú magyar kutatásokkal (*Darab, 1992*).

'*Sigmond* azt találta, hogy a szikes talajok nagymennyiségű kicserélhető nátriumot tartalmaznak ('*Sigmond, 1928*). Felhasználva *Gedroic* illuviációs elméletét, kidolgozott egy osztályozási rendszert a szikes talajokra és bemutatta azt az Első Nemzetközi Agrogeológiai Konferencián 1909-ben, majd továbbfejlesztette azt ('*Sigmond, 1928; és 1934*). '*Sigmond* munkásságának nemzetközi következményét illusztrálni lehet azzal, hogy a U.S. Salinity Laboratory-ban kidolgozott szikesedési osztályozási rendszer felhasználta eredményeit. Még a későbbi magyar szikes talajokra vonatkozó osztályozási rendszer is '*Sigmond* eredményeire alapozódott (*Arany, 1929; Szabolcs és Jassó, 1961*), amely már felhasználta egyes magyarországi területeken történt felmérések eredményeit is (*Szabolcs et. al, 1969; Szabolcs, 1974*). '*Sigmond* munkája ösztönözte a talajok kémiai és kolloid-kémiai tulajdonságait feltáró (*Di Gleria, 1934*), valamint a szikes talajok sófelhalmozódási folyamatainak kutatását (*Mados, 1935*).

A korai 1950-es évektől egyre nagyobb figyelmet kapott a talajjavítás és a szikes talajok hasznosítása. A sóképződési folyamatokat Szabolcs vizsgálta a tiszántúli területeken (*Szabolcs et al., 1969*). *Várallyay* a Duna-völgyben tanulmányozta a talajok sófelhalmozódását (*Várallyay, 1967*). A különböző talajjavítási eljárások alkalmazását illusztrálta publikációiban *Arany (1929; 1956)*, *Herke és Harmati (1925)*, *Prettenhoffer (1964)*, *Ábrahám és Bocskai (1971)*. A talajjavítás és öntözés hatásának ellenőrzése megkívánta a szikes talajok só- és ion-mérleg analízisét. Ezen feladatok megoldása a talajok sómérlegének mérésén és számításán alapult (*Szabolcs és Jassó, 1961; Darab et al., 1980*;

Darab, 1992). Része volt ennek a feladatnak, hogy meghatározza a nagy sótartalmú talajvíz "kritikus mélységét". A kutatások eredményének egyike volt, hogy lehatárolásra kerültek azok a magyarországi területek, amelyeknél a talajvízszint kritikus szintet meghaladó emelkedése a talajok szikesedési folyamatát okozza. Ezt a folyamatot "másodlagos szikesedésnek" nevezzük (*Szabolcs és Jassó, 1961*).

Az elmúlt évtizedekben a magyarországi szikes talajok kutatásának két fő iránya volt. Az első egy gyakorlatiasabb irány volt, amely meliorációval és a szikes talajok és tájak hasznosításával foglalkozott a Debreceni Agrártudományi Egyetem Karcagi Kutató Intézetének koordinálásával (*Nyíri és Fehér, 1981; Blaskó, 1994*). A másik irány a szikes talajok folyadékfázisának fizikai-kémiai összetételét vizsgálta, valamint a Nemzeti Parkok és természetvédelmi területek, illetve azok szikes talajainak a feltérképezését végezte.

A talajok folyadékfázisának fizikai-kémiai vizsgálatának kutatási irányait illusztrálják *Rédly és Darab, 1981; Darab et al., 1979* valamint *Csillag et al., 1995* publikációi. A szikes talajokhoz hozzáadott kémiai javítóanyagok hatékonyságát feltáró kutatásokról *Darab és Rédly, 1977, Rédly és Darab 1981* valamint *Darab et al., 1979* számoltak be. A Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézete a Kiskunsági Nemzeti Park területének talajait 1978 és 1984 között 1:25 000 méretarányban térképezte fel és végezte el a szikes talajok felmérését ennek keretében. Ebben a térképezési munkában nem csak a talajtípusokat határozták meg, hanem a talajokra jellemző növénytársulásokat is (*Várallyay et al., 1985*). Még sajátos talaj és növény összefüggéseket is feltártak (*Rajkai és Molnár, 1981*). Ezen kívül a talajok és a növényzet területi mintázatát is tanulmányozták a Hortobágyi a szikes területeken (*Rajkai et al., 1988; Tóth és Rajkai, 1994; Tóth et al, 2001; Tóth és Szendrei, 2006*).

A fenti rövid áttekintés rávilágít arra, hogy mély történelmi gyökerei vannak a szikes talajokra vonatkozó ismereteknek, melyeket fel lehet használni egy olyan szakértői rendszer kialakításánál, amely előre jelzi a klímaváltozás hatására bekövetkező várható változásokat a magyarországi szikes területek kiterjedésében és termőképességében. Egy ilyen szakértői rendszer az első lenne ezen a területen és referenciaként szolgálna a világ más területeire való kiterjesztés lehetőségével.

3. A VIZSGÁLATOK ANYAGA ÉS MÓDSZERE

E fejezetben bemutatom, hogy a megfogalmazott három fő célkitűzést milyen módszerek alkalmazásával valósítottam meg, majd az ezt követő fejezetben tárgyalom mindhárom területre vonatkozóan az elért eredményeket.

3.1. Az oldat-transzport modellek kiválasztása szakértői rendszerének (EXSOLUTE) kialakítására alkalmazott módszer

Az EXSOLUTE szakértői rendszer fejlesztésének a legfontosabb része egy kategorizálási rendszer (esetünkben a oldattranszport modellekre) kidolgozása volt, amely konzisztens a tudásbázisba szervezhető szabályokkal. Mint a szakirodalomi fejezetben bemutattam, az oldat-transzport modelleket számos módon lehet kategorizálni. A modellek két nagy csoportját lehetett elkülöníteni: az egyik a determinisztikus (vagy másképpen folyamat orientált) modelleké, míg a másik a sztochasztikus modelleké. (*Addisott és Wagenet, 1985; Nielsen et al., 1986*). Az EXSOLUTE kifejlesztésénél a determinisztikus modelleket vettem figyelembe és ezek közül az időben állandó áramlási viszonyokat leírókat (*Fehér et al., 1989; Fehér et al., 1991a*).

EXSOLUTE rendszer a modelleket különböző osztályokba sorolja az alábbi szempontok szerint:

1. A modellben figyelembe vett *ionok száma* szerint. A modelleket megkülönböztethetjük aszerint, hogy egy iont írnak le, vagy több iont is képesek kezelni. Egy relatíve egyszerű több-ionos modell például le tudja írni a radioizotópokat, amelyek egymásra épülő elsőrendű lebomlási láncot képeznek.
2. *A modell geometriája*. A transzport modelleket osztályozni lehet:
 - (a) a modellezési probléma geometriája,
 - (b) az alkalmazott koordinátarendszer (pld. derékszögű, sugaras, henger) típusa, és
 - (c) a koordinátatengelyek mérete (véges, fél-végtelen, vagy végtelen) alapján.
3. *Transzportfolyamatok*. Ez a szempontrendszer figyelembe veszi az oldat-transzport folyamatot leíró parciális differenciálegyenlet valamennyi tagját, melyek:
 - (a) vízzel mozgó konvektív transzport,
 - (b) diffúzió vagy hidrodinamikai diszperzió,
 - (c) szorpció vagy kicserélődés,
 - (d) páratranszport,

- (e) párolgás, illékonyság,
- (f) termelődés,
- (g) lebomlás,
- (h) mátrix (vagy aggregátok közötti) diffúzió repedezett kőzetekben vagy makropórusos talajokban,
- (i) beszivárgás, és
- (j) forrás vagy nyelő.

Az *EXSOLUTE* figyelembe veszi mind a konvektív-diszperzív transzportot, valamint konvektív transzport hiányában az oldatdiffúziót. A szorpciót és kicserélődést tovább osztja lineáris és nem-lineáris folyamatra (pld., Freundlich vagy Langmuir típusú adszorpció-deszorpció), és egyensúlyban levő, valamint időben változó (kémiai-kinetikai) folyamatra. A legegyszerűbb formája a nem-egyensúlyi szorpciónak az elsőrendű kinetikai típusú, amelyet gyakran elsőrendű szorpciós modellnek is neveznek. Ugyancsak beépítettem a rendszerbe a másodrendű nem-egyensúlyi szorpciós modell típust, amely feltételezi, hogy a talajban lejátszódó szorpciót két részre lehet bontani, és mindkét résznek megvan a saját egyensúlyi vagy kinetikus adszorpciós jellegzetessége. Elméletileg bármilyen kombinációja a lineáris, nem-lineáris, egyensúlyi és kinetikus szorpciós vagy kicserélődés folyamatot figyelembe lehet venni egy adott transzport modellnél.

Az általam kidolgozott *EXSOLUTE* szakértői rendszer a nulladrendű kinetikát is figyelembe veszi. A lebomlás esetében mind elsőrendű, mind magasabb rendű folyamatokat is alkalmaz a rendszer. Végezetül, a modell dimenziójától függően különböző típusú forrás és nyelő tagokat is figyelembe vesz a rendszer, melyek alakja lehet pontszerű, vonal menti, négyszög vagy paralelepipedon alakú, esetleg hengeres.

4. *Talajtulajdonságok.* Modell-alkalmazási szempontból a talaj vagy a víztartó réteg megfelelő jellemzése az egyik kritikus feladat. Szakértői rendszerem két fő kategóriát alkalmaz. Az egyik osztályozói szempont jellegzetessége, hogy a talaj rétegzett vagy nem rétegzett (azonos) felépítésű. Ezen eltérő rétegzettség típusok eltérő matematikai megoldásokat tesznek szükségessé. Eltérő transzport modellekre van szükség, amikor a talajprofil nem homogén, de strukturált, aggregált, vagy amikor a talajvízrendszer töredezett. Az aggregátok (vagy ta-

lajmátrix blokkok) különböző geometriáját lehet feltételezni, beleértve a gömb vagy a szilárd hengeres alakot. Ugyancsak figyelembe vesszem a rendszerben azokat az eseteket, amikor a talaj szögletes repedéseket vagy hengeres alakú makropórusokat tartalmaz.

Ezeken túlmenően, a szakértői rendszer lehetőséget biztosít mobil – immobil típusú (két-régiós) modell-típusok figyelembe vételére. Lényegében ezek a modell-típusok feltételezik, hogy a talajaggregátok geometriája nem ismert vagy nem releváns, és a diffúziós kicserélődés a mobil (aggregátok közötti) és a nem-mobil (aggregátokon belüli) folyadékrégióban közelíthető kvázi-empirikus első-rendű anyagátadási egyenlettel.

5. *Az alkalmazott kezdeti feltétel típusa.* A kezdeti feltétel lehet konstans vagy lépcsős, impulzus függvény, négyszög, parrallelopipedon vagy gömb alakú, exponenciális vagy egyéb tetszőleges függvény a vizsgált tartományon.
6. *Az alkalmazott peremfeltételek típusa.* Három peremfeltétel típust különböztetek meg a rendszerben, úgymint
 - (a) elsőrendű- vagy koncentráció típusú peremfeltételt, amely Dirichlet feltétel néven ismert,
 - (b) második típusú peremfeltételek konstans koncentráció gradienst tételeznek fel, valamint a
 - (3) harmadik- vagy fluxus-típusú (vagy más néven Cauchy-típusú) peremfeltételeket.Az első- és a harmadik-típusú feltételeknél megkülönböztethetők konstans, lépcsős, impulzus, exponenciális vagy tetszőlegesen meghatározott időtől függő függvények a peremfeltételi koncentrációra.
7. *Az alkalmazott matematikai megoldás típusa.* A rendszer osztályozási módszertana mind analitikai, mind numerikus megoldástípusokat is figyelembe vesz. A numerikus technikák alkalmazása általában a nem-lineáris szorpció, rétegzett talajprofilok, és tetszőlegesen meghatározott kezdeti- és peremfeltételek esetében szükséges. Néha szükség lehet eltérő megoldási technikák összevetésére, például amikor az analitikai és numerikus megoldási típusok pontosságát kívánjuk összehasonlítani.

3.2. A telítetlen talajzónában lezajló nitrát-transzport modell kialakításának módszere

Az OTKA program keretében folytatott kutatásom célkitűzése volt, hogy a hazai gyakorlatnak, saját természeti környezetünknek és termelési feltételeinknek megfelelő, tudományosan megalapozott, egyszerű és stabil lefutású modellt alakítsunk ki, amely leírja a mezőgazdasági táblán lezajló hidrológiai és vízminőségi (elsősorban a vízőldható nitrogénformák átalakulási) folyamatait.

3.2.1. A modell koncepciója

A természetben a nitrogén bonyolult körforgalomban vesz részt, melynek egyik döntő fázisa a talajban, azon belül is a gyökérzónában, játszódik le. Ugyanakkor nem lehet figyelmen kívül hagyni a gyökérzóna és a talajvízszint közötti úgynevezett háromfázisú zónát sem, mert ez a zóna jelentős szerepet játszik a vízforgalomban és az oldat-transzportban. A talajban lejátszódó nitrogén-transzformáció fizikai, kémiai és biológiai folyamatok összessége. A *fizikai* folyamatok magukban foglalják a nitrogén (a) *talajba jutását* a légkörből száraz kihullással, valamint nedves bevitel a csapadékkal, öntöző vízzel, valamint szerves és/vagy műtrágyával; (b) a nitrogénformák *talajprofilon belüli elmozdulását* (transzportját); (c) a gáz halmazállapotú nitrogén *eltávozt* a talajból. A *kémiai* folyamatok a különböző nitrogénformák *egymásba alakulását*; a talaj váz-szerkezetébe történő *beépülést*, illetve az onnan történő *feltáródást* jelentik. A *biológiai* folyamatok közé elsősorban a *növények nitrogén felvétele*, valamint a *mikroorganizmusok nitrogénfelvétele és transzformációs tevékenysége* tartozik.

A talaj nitrogénforgalmát legjelentősebben befolyásoló tényező a víz, ezért a nitrogén, azon belül is főként a nitrát-forgalom leírása mindig csak a vízforgalom leírásával együttesen történhet.

A háromfázisú talaj víz-forgalma általánosan az (20) egyenlettel írható le.

$$P + I + R_i + CR = R_o + G + ET \pm \Delta W \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

ahol P a csapadék; I az öntözővíz; R_i felületi hozzáfolyással érkező víz; CR a talajvíz kapilláris emelkedésével érkező víz; R_o a felszíni lefolyás; G a talajvízbe történő elszívárgás; ET az evapotranspiráció; ΔW pedig a talajnedvesség változás. Mindegyik változó vízoszlop mm dimenziójú az egyenletben, mely egységnyi területre vonatkozik a vizsgált időperióduson belül.

A nitrogén-forgalmat általánosan a (21) egyenlet írja le.

$$N_{SZ} + N_p + N_i + N_{Ri} + N_{CR} + N_{org} + N_{SO} + N_F = N_{Ro} + N_G + N_G + N_V + N_{SI} \quad (21)$$

ahol N_{SZ} a száraz kihullással a területre érkező nitrogén; N_p a csapadékkal érkező nitrogén; N_i az öntözővízzel érkező nitrogén; N_{Ri} a felszíni hozzáfolyással érkező nitrogén; N_{CR} a talajvízből kapilláris úton felemelkedő N; N_{org} szerves eredetű N; N_{SO} a talajból feltáródó N; N_F a bejuttatott szerves és/vagy műtrágya mennyisége; N_{Ro} a felszíni elfolyással távozó N mennyisége; N_G a talajvízbe bemosódó N; N_V növényi N felvétel és N_{SI} a talaj váz-szerkezetébe beépülő N.

Az OTKA támogatta kutatási program keretében kidolgoztam egy számítógépes modellt (*DISNIT2*) a mezőgazdasági tábla víz- és nitrogén-forgalmi folyamatainak leírására (*Kienitz és Fehér, 1989; Fehér, 1990*). A modell koncepciója szerint alkalmas több éves időszak folyamatainak számítására, figyelemmel a (20) és (21) egyenletben megfogalmazott víz- és nitrogén-forgalmi elemekre. A modell felépítésénél alapvető követelmény volt, hogy az alkalmazásához szükséges adatok rutinszerűen gyűjtött adatokból legyenek meghatározhatók, vagy egyszerű mérési módszerekkel mérhetők.

A modell napi léptékben számítja a víz- és nitrogén-forgalmat a talaj felszínétől a talajvízig. A felszíni peremfeltételnél veszi figyelembe a csapadékból beszivárgó víz-mennyiséget. A *DISNIT2* vizsgálja, van-e hótakaró a területen, és ha igen, az újabb csapadék növeli-e annak vastagságát, azaz mennyi csapadékból lesz beszivárgó víz. A modell ugyancsak számolja a napi párolgást. Értékét külön módszerrel határozza meg abban az időszakban, amikor nincsen növény a területen (ezen belül megkülönböztetve azt az esetet, amikor a párolgást csak a légköri felvevőképesség szabályozza és külön azt, amikor a talajprofil nedvességszállító vagy páraszállító képességű). Az Antal-képlet alapján számolja a párolgás és transpiráció együttes összegét a tenyészidőszakban (*Antal, 1968*). A számított evapotranspiráció hatását a növény gyökéreloszlása alapján veszi figyelembe a talajprofilban. A gyökérzóna mélységét és eloszlását a növényi fenofázis szerint számítja a program. A hótakarás időszakára párolgási veszteséget nem vesz figyelembe. A beszivárgást eltérő módszerrel számítja a program a tenyészidőszakban és a tenyészidőszakon kívül. Itt is különbséget tesz a csapadék nagyobb intenzitása és a beszivárogtató időszak között. Figyeli a modell, marad-e egy-egy számítási

periódus (egy nap) után fölösleges víz a területen. Meghatározható, hogy ennek a fölös víznek mekkora része folyik el a talajfelületről. A talajprofil alsó pereménél előírható akár a drénhozam (konstans vagy időben változó), akár az, hogy a potenciál gradiens értéke egyenlő nullával (szabad kifolyás), vagy a talajnedvesség potenciál értéke állandó a modellező által meghatározott mennyiségben.

A nitrogén-felvétel számításánál feltevésünk volt, hogy a tápanyag mindig elegendő a növények számára, de a vízhiány korlátozhatja annak felvételét.

A gyökérszónában lezajló nitrogén-transzformációs folyamatok számítása szintén része a teljes szimulációs rendszernek. Ennek során számítjuk i) a mineralizációt, ii) az immobilizációt, iii) a nitrifikációt, valamint iv) a denitrifikációt az egyes rétegekben.

A víz- és nitrogén-forgalom számításának alap időléptéke az egy nap. A transzport modell ugyanakkor a numerikus megoldás formulája szerint csökkenti a számítási időléptéket, amikor a potenciál gradiens jelentősen változik. A numerikus megoldás időlépték növekedhet is egészen az egy napos léptékig, ha a változások sebessége ezt megengedi.

3.2.2. A modell matematikai felépítése

A *DISNIT2* modell alapfeltevései a vízmozgás leírására: (1) a folyadékmozgás egydimenziós, izotermális és Darcy törvény szerinti; (2) a gázfázis, valamint a szilárd és folyadékfázis kölcsönhatása a vízmozgásra elhanyagolható; (3) a talajt porózus közegnek tekintjük, a repedések és pórusjáratok hatásától eltekintünk (makropórusos áramlást nem veszünk figyelembe).

Alapfeltevések az oldat transzport leírására: (1) az advekción és a diszperzió egydimenziós jellegű; (2) a folyadék tulajdonságai függetlenek a koncentrációtól; (3) a diffúziós/diszperziós transzport a Fick törvény szerint játszódik le.

A modell alapegyenletei

A modell a telítetlen és a telített talajzónában lejátszódó vízmozgást a Richards egyenlet alapján egydimenziós formában írja le, amelyhez kiegészítésként egy idő és helyfüggő forrás tagot ad:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} - K \right) - S_c \frac{\partial h}{\partial t} - S_t = 0 \quad (22)$$

ahol $h(x,t)$ a talajnedvesség potenciálja; $K(x,t)$ hidraulikus vezetőképesség; $S_c(x,t)$ a talaj fajlagos vízkapacitása; x helykoordináta (pozitív lefelé); t idő és $S_t(x,t)$ hely- és időfüggő forrás tag (*Richards, 1931*).

A talaj fajlagos vízkapacitását telített vagy telítetlen közeg esetében a következőképpen számítjuk:

$$S_c = \frac{\theta}{\varepsilon} S_s + \varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial h} \quad (23)$$

ahol $\theta(x,t)$ a talaj víztartalma térfogatszázalékban; $\varepsilon(x)$ porozitás; $S_s(x)$ fajlagos tározási együttható és $S_w(x,t)$ telítettségi fok.

Teljes telítettség mellett a (23) egyenlet jobb oldali második tagja nullával egyenlő. Telítetlen talaj esetében az S_s -t tartalmazó tag szignifikánsan kisebb a második tagnál. Ezért telítetlen talaj esetében S_c jól közelíthető a víztartalom – nyomómagasság (retenciós) görbe ($\theta(h)$) gradiensevel (*van Genuchten, 1978a*):

$$S_c \cong \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (24)$$

A *DISNIT2* a telítetlen zónában lejátszódó oldat-transzportot a klasszikus konvektív-diszperziós egyenlettel írja le.

$$\frac{\partial(\theta c + \rho s)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial x} - qc \right) + \theta \mu c = 0 \quad (25)$$

ahol $c(x,t)$ az oldat koncentráció; $s(x,t)$ az adszorbeált anyag koncentrációja; $\theta(x,t)$ a víztartalom térfogatszázalékban; $\rho(x)$ a talaj térfogatsúlya; $q(x,t)$ a fajlagos vízszállítás; $\mu(x)$ az elsőrendű lebomlási együttható és $D(x,t)$ a diszperziós tényező.

A diszperziós tényező a következő alakban definiált:

$$D = D_o \tau + \gamma \left| \frac{q}{\theta} \right| \quad (26)$$

ahol D_o a vizsgált anyagra jellemző molekuláris diffúziós tényező; $\tau(x)$ a talaj mátrix anyagi jellemzője (kanyargósság); $\gamma(x)$ a vizsgált anyagtól és a talajmátrix tulajdonságától függő diszperzivitási tényező.

A (22) és (25) egyenletek megoldásához a víztartalom (θ) és a hidraulikus vezetőképesség (K) talajnedvesség potenciáltól (h) való függésének matematikai formáját szükséges ismerni. A *DISNIT2* modell a *van Genuchten (1980)* által ismertett $\theta(h)$ és $K(h)$ zárt alakú függvényeket alkalmazza.

A víztartalom és a talajnedvesség potenciál közötti kapcsolat (*van Genuchten, 1980*):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (27)$$

ahol $\theta(x,t)$ a víztartalom térfogatszázalékban; θ_r a reziduális víztartalom térfogatszázalékban; θ_s a telítési víztartalom térfogatszázalékban; α empirikus konstans; n empirikus konstans; m empirikus konstans, esetünkben $m = 1-(1/n)$ (Mualem, 1976).

A telítetlen hidraulikus vezetőképesség leírása a Mualem (1976) által javasolt modellnek a (27) egyenlettel összhangban levő, redukált víztartalomra vonatkozó formáján alapul.

$$K(S_e) = K_s \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (28)$$

ahol K_s telítettségi hidraulikus vezetőképesség és $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ a redukált víztartalom.

A fajlagos vízszállítást a Darcy törvény alapján számoljuk:

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} + K \quad (29)$$

A leíró alapegyenletek numerikus megoldása

Lineáris véges-elem módszert alkalmaztunk mind a vízmozgás, mind az oldat transzport egyenlet megoldására van Genuchten, 1978a és 1978b által leírtak szerint. Az alábbiakban csak a legfontosabb elemekre mutatunk rá.

■ A vízmozgás egyenletének numerikus sémája

Az alkalmazott véges-elem módszer a függő változót (esetünkben a talajnedvesség potenciálját) egy véges sorozattal közelíti hálópontonként:

$$h \cong \hat{h}(x,t) = \sum_{j=1}^{nn} \varphi_j a_j \quad (30)$$

ahol $\hat{h}(x,t)$ a talajnedvesség potenciál közelítő megoldása; $\varphi_j(x,t)$ alap függvény a j -ik hálóponttra; $a_j(t)$ a numerikus megoldást reprezentáló együttható a j -ik hálópontban és nn a hálópontok száma.

A Galerkin eljárást alkalmazva, az eredeti vízmozgás egyenlet a következő alakúvá válik:

$$\int_0^\ell \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} - K \right) - S_c \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right] \varphi_i \right\} dx = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (31)$$

Behelyettesítve a (30) egyenletet a (31)-be és tagonként elvégezve az integrálást, egy mátrix egyenletet kapunk, amely n darab teljes differenciál egyenletet tartalmaz nemlineáris együtthatókkal. Véges differencia sémát alkalmazunk az időbeli változás köze-

lítésére, amely n darab iteratíván megoldható algebrai egyenletre vezet. A konvergencia gyorsítása érdekében tömegösszegzést végzünk. Az időszerinti derivált hálóponti értékeit a teljes áramlási-tartomány menti súlyozott átlaggal képeztük (van Genuchten, 1987) alapján:

$$\int_0^\ell \frac{\partial h}{\partial t} \varphi_i dx \cong \frac{\partial h_i}{\partial t} \int_0^\ell S_c \varphi_i dx \quad i = 1, \dots, n \quad (32)$$

ahol h_i a talajnedvesség potenciál az i -ik hálópontban.

■ A transzportegyenlet numerikus sémája

A transzportegyenlet numerikus megoldása hasonló a vízmozgás egyenletéhez. Azonban, hogy elkerüljük a koncentráció eloszlásban esetleg fellépő oszcillálást vagy a koncentráció front elmosódását kis D értékek mellett, a (6) egyenletbe a diszperzióra korrekciós tényezőket alkalmazta *van Genuchten (1978b)*.

$$\frac{(\theta R c)^{t+\Delta t} - (\theta R c)^t}{\Delta t} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D^- \frac{\partial c}{\partial x} - qc \right) \right]^{t+\Delta t} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D^+ \frac{\partial c}{\partial x} - qc \right) \right]^t + \frac{1}{2} [(\theta \mu c)^{t+\Delta t} + (\theta \mu c)^t] = 0 \quad (33)$$

ahol

$$D^- = D - \frac{q^2 \Delta t}{6 \theta^2 R} \quad (34)$$

és

$$D^+ = D + \frac{q^2 \Delta t}{6 \theta^2 R} \quad (35)$$

amelyekben Δt az időlépés, D^- és D^+ a diszperzió korrekciós tényezői. A (33) egyenlet bevezetésével az eredeti parciális differenciálegyenlet helyett algebrai egyenletekhez jutunk, de ezek közvetlenül megoldhatók a koncentrációra (c) vonatkozó linearitásuk miatt.

Kezdeti feltételek

Kezdeti feltételnek a vízmozgás számításánál bármilyen általános talajnedvesség-potenciál ($h(x,0) = h_i(x)$) vagy víztartalom eloszlás ($\theta(x,0) = \theta_i(x)$) alkalmazható. A transzportegyenlet megoldásánál a kezdeti koncentráció-eloszlás általános alakú lehet.

Peremfeltételek

Mind a talaj felszínén, mind a vizsgált talajprofil alsó pereménél (például a talajvíztüknél) meg kell adni vagy a fajlagos vízhozamot, vagy a talajnedvesség potenciálját. A peremfeltétel a talajprofil felszínén a vízmozgás-egyenlet megoldásához:

$$\left(-K \frac{\partial h}{\partial x} + K\right)_{x=0} = q_0(t) \quad (36)$$

ahol $q_0(t)$ nettó fajlagos vízzállítás a talaj felszínén keresztül.

Az alsó peremfeltételre vonatkozó egyenletek analógok.

$$\left(-K \frac{\partial h}{\partial x} + K\right)_{x=\ell} = q_\ell(t) \quad (37)$$

vagy

$$h(\ell, t) = h_\ell(t) \quad (38)$$

ahol $q_\ell(t)$ nettó fajlagos vízzállítás a talajprofil alsó peremén; $h_\ell(t)$ talajnedvesség potenciál az alsó peremnél. Szabad elfolyású talajprofil esetében feltételezhetjük, hogy a talajnedvesség-potenciál gradiense az alsó peremnél nulla. Ez magában foglalja, hogy a fajlagos vízzállítás értéke az alsó peremnél ekkor azonos lesz a hidraulikus vezetőképességgel.

$$\frac{\partial h}{\partial x}(\ell, t) = 0 \quad (39)$$

ahol ℓ az alsó perem mélysége.

A transzportegyenlet felső peremfeltétele:

$$\left(-\theta D \frac{\partial c}{\partial x} + qc\right)_{x=0} = \begin{cases} q_0 c_0 & \text{if } q_0 > 0 \\ 0 & \text{if } q_0 \leq 0 \end{cases} \quad (40)$$

ahol $c_0(t)$ oldat koncentráció a talaj felszínén.

A transzport egyenlet alsó peremfeltétele esetében a koncentráció egyenlő a talajvíz koncentrációjával a talajvízből felfelé irányuló áramlás esetében. Lefelé irányuló áramláskor nulla koncentráció gradienst írunk elő az alsó peremen.

$$c(\ell, t) = c_\ell \quad (41)$$

vagy

$$\left.\frac{\partial c}{\partial x}\right|_{x=\ell} = 0 \quad (42)$$

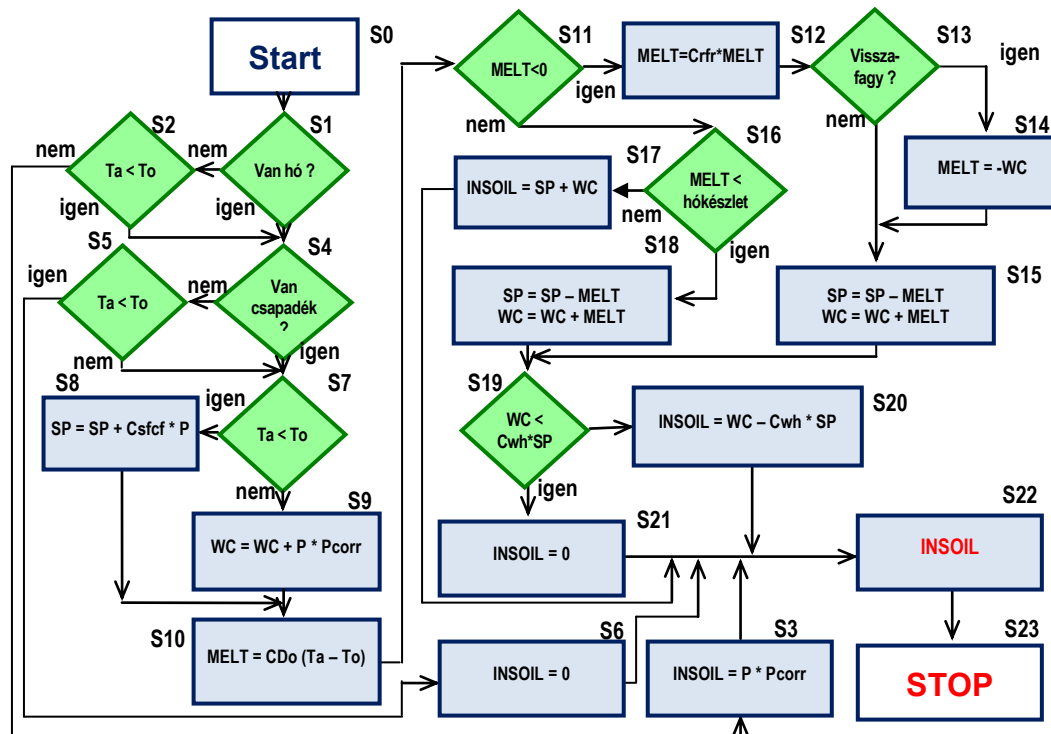
ahol $c_\ell(t)$ az oldat koncentráció az alsó peremen (talajvíztükörnél).

A peremfeltételhez tartozó vízforgalmi elemek számítása

** A talajfelszínt elérő hóolvadék és csapadék*

A SNOW subroutin napi léptékben számítja a csapadék, a léghőmérséklet, az előző napi hóvastagság és hóvíztartalom függvényében a talajfelszínre kerülő (beszivárogható és/vagy lefolyásra kerülhető) vízmennyiséget mm dimenzióban. Az így számolt érték része a (17) egyenletben megadott felső peremfeltételnek.

A SNOW subroutine számításának lépései (2. ábra): S1: Megvizsgáljuk van-e hóréteg a táblán. S2: Ha nincs hóréteg, de a napi átlagos léghőmérséklet (T_a) alacsonyabb a hóolvadási hőmérsékleti küszöbértéknél (T_o), akkor a csapadékból hó keletkezhet. A számítás az S4 pontnál folytatódik. S3: Ha van hóréteg és T_a magasabb, mint T_o , akkor, ha van csapadék, az eléri a talajfelszín. S4: Megvizsgáljuk van-e az adott napon csapadék. S5: Megvizsgáljuk, hogy T_a magasabb-e a küszöbértéknél. S6: Ha nincsen hóréteg, nincs csapadék és T_a is magasabb a küszöbértéknél, akkor nem kerül víz aznap a talajfelszínre. S7: Ha van hóréteg és van csapadék, megvizsgáljuk, hogy T_a nagyobb-e mint T_o . S8: Amikor van hóréteg és csapadék is, de T_a kisebb, mint T_o , a hóréteg vastagsága növekszik. S9: Ha van hóréteg és csapadék is, de T_a nagyobb, mint T_o , a hóréteg víztartalma megnövekszik a csapadékkal arányos mennyiséggel. S10: Akár a hóréteg víztartalma, akár annak vastagsága növekedett, a hóolvadék mennyiségét számolni szükséges. Ennek mennyisége arányos $T_a - T_o$ értékével. S11: Az olvadákvíz mennyisége lehet akár pozitív, akár negatív is, attól függően milyen az előjele az előbbi hőmérséklet különbségnek. S12: Ha az olvadék előjele negatív, akkor mennyiségét a visszafagyási tényezővel módosítjuk. S13: Megvizsgáljuk van-e visszafagyás. S14: Ha van visszafagyás, akkor a visszafagyott víz mennyisége egyenlő az olvadéknak számolttal.



2. ábra. A talajfelszínre elérő csapadék és hóolvadás számítási lépései

S15: Számoljuk az új hóréteg vastagságot és a hóvíztartalmat. S16: Az olvadékvíz mennyiségének előjele pozitív, megvizsgáljuk, hogy ez kisebb-e, mint a hóréteg vastagsága. S17: Ha a számított olvadék mennyisége nagyobb, mint a hóréteg vastagsága, akkor a talajfelszín ténylegesen elérő vízmennyiség egyenlő a hóréteg vastagság és hóvíztartalom összegével. S18: Ha a számított olvadékvíz mennyisége kisebb, mint a hóréteg vastagsága, akkor a hórétegvastagság értéke az olvadék mennyiségével csökken, míg a hóvíztartalom az olvadék értékével növekszik. S19: Megvizsgáljuk, hogy az újólag számolt hó víztartalmat a hóréteg tartani tudja-e. S20: Ha a hóréteg számított víztartalma magasabb, mint amennyit az adott hóréteg tartani tud, a különbség eléri a talajfelszínre. S21: Ha a számított hóvíztartalom kisebb, mint amennyit az adott hóréteg tartani képes, a hórétegből nem kerül víz a talajfelszínre. S22: A talajfelszínre elérő vízmennyiség.

* *Evapotranspiráció*

A DISNIT2 modell a számítások során megkülönbözteti azokat a periódusokat, amikor növényborítás van a területen, illetve azokat, amikor a talajfelszín fedetlen. A növényborításos időszakban az Antal formula alkalmazásával összevontan számolja a növényi transpirációt és a talajfelszínről történő párolgást (Posza és Stollár, 1983).

$$ET = \frac{rwc+bc}{1+bc} \times rwc \times ET_p \quad [\text{mm/day}] \quad (24)$$

ahol ET a napi tényleges evapotranspiráció; ET_p a napi potenciális evapotranspiráció; rwc a relatív talajnedvesség ($rwc = (\theta_a - HV) / DV$); bc biológiai konstans; θ_a tényleges talajvíztartalom; HV holtvíztartalom és DV diszponibilis víztartalom.

* *Párolgás növényborítás nélküli talajfelszínről*

A növényborítás nélküli talajfelszínről (ha a felső talajréteg legalább vízkapacitásig telített) történő kumulatív párolgás folyamatát egy kezdeti konstans, majd ezt követően egy folyamatosan csökkenő sebességű szakasz jellemzi (Ritchie, 1972; Hillel, 1980, Rajkai et al., 2004). A konstans szakasz (melyet legtöbbször lineárisnak tekinthetünk) relatíve rövid és a felső talajréteg tulajdonságaitól függően néhány órától néhány napig tart. A párolgás értéke ekkor a potenciális párolgás értékével azonosnak vehető. A második szakaszban a felszíni talajréteg víztartalma már lecsökkent egy küszöbérték alá, így a párolgás a felső talajréteg vízzállító képességétől függ. A csökkenő sebességű párolgási szakasz a folyamat kezdete óta eltelt idő négyzetgyökével és a talaj hidraulikus tulaj-

donságaitól függő empirikus konstanssal arányos. A *DISNIT2*-ben alkalmazott algoritmusom a fenti megfontolásokon alapul.

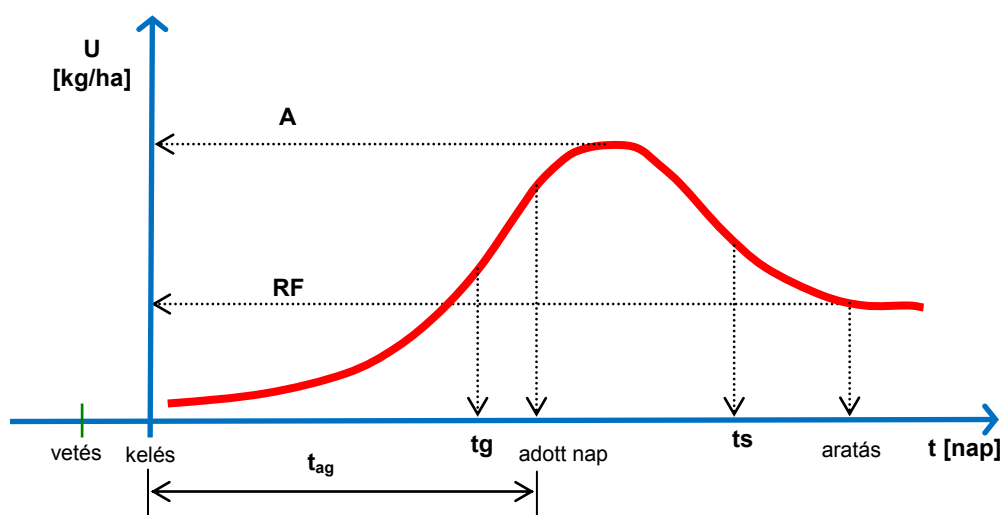
3.2.3. A transzportegyenlethez kapcsolódó nitrogén-forgalmi elemek számítása

- *Növényi nitrogén felvétel*

A *DISNIT2* modell számítja a tenyészidőszak során a keléstől a növényben akkumulált összes nitrogén mennyiségét a (44) egyenlet, illetve 3. ábra szerint megfogalmazott *FITPED* modellel (Biczók et al., 1988).

$$U = \frac{A}{1 + e^{-b \times (t_{ag} - t_g)}} - \frac{RF}{1 + e^{-s \times (t_{ag} - t_s)}} \quad [\text{kg/ha}] \quad (44)$$

ahol U a keléstől az adott napig a növény által felvett tápelem mennyisége; A a táp-



3. ábra. A növényi nitrogén felvételi modell paramétereinek értelmezése

elemnek a termőhelyen, az adott klimatikus környezetben, a növény által a tenyészidőszakban felvenni képes legnagyobb mennyisége; b a növényre vonatkozó pufferekapacitás; t_g a növényre vonatkozó tápanyag-felvételi konstans; RF a reflux várható legnagyobb értéke; s reflux pufferekapacitás; t_s reflux konstans; t_{ag} az adott számítás nap és a kelés között eltelt idő.

A (44) egyenlet paramétereit (A , b , t_g , RF , s , t_s) az országos hazai kukorica és őszi búza adatbázisra támaszkodva határoztuk meg az Arany-féle kötöttségi szám szerinti talajcsoportokban (1-2. táblázat).

A *FITPED* modell általánosított alakja lehetővé teszi, hogy a *DISNIT2*-ben alkalmazott kukorica és őszi búza növényeken kívül más növények tápanyag-felvételi dinamikájá-

nak leírására is alkalmazható legyen, ha azon növényekre a paraméterek ismertek, és/vagy meghatározásra kerültek. A kutatási munka kiegészítő eredményeként a kukorica nitrogén felvételének számítására egy alternatív modellt is beépítettünk a *DISNIT2*-be.

1. táblázat: A kukorica nitrogén felvételi modelljének paraméterei különböző talajkötöttség mellett

Arany-féle kötöttségi szám	< 30	30	33	39	46	50
<i>A [kg/ha]</i>						
Adatszám	56	1	15	32	6	2
Átlag	215,09	256,98	202,04	218,76	244,73	144,35
Variancia	3 902,7		2 819,3	4 602,9	1 608,29	
Minimum	64,20		72,73	64,20	173,10	97,30
Maximum	362,30		265,10	362,30	288,35	191,41
<i>b [T⁻¹]</i>						
Adatszám	56	1	15	32	6	2
Átlag	0,0761	0,0738	0,0511	0,0870	0,0891	0,0525
Variancia	0,0018		0,0009	0,0018	0,0024	0,0030
Minimum	0,03		0,0385	0,0300	0,0400	0,0400
Maximum	0,171		0,1388	0,1710	0,1625	0,0647
<i>tg [T]</i>						
Adatszám	56	1	15	32	6	2
Átlag	91,15	87,72	93,68	89,16	93,73	97,78
Variancia	258,10		191,93	272,87	446,34	456,01
Minimum	61,73		69,75	62,02	61,73	82,68
Maximum	129,59		124,77	129,59	118,44	112,88
<i>RF [kg/ha]</i>						
Adatszám	13	1	0	9	3	0
Átlag	75,42	72,83		68,58	96,80	
Variancia	2 595,44			3 575,2	372,19	
Minimum	25,90			25,9	85,60	
Maximum	186,80			186,8	119,08	
<i>s [T⁻¹]</i>						
Adatszám	13	1	0	9	3	0
Átlag	0,2764	0,4009		0,2480	0,3198	
Variancia	0,0925			0,0893	0,1837	
Minimum	0,0210			0,0210	0,0210	
Maximum	1,0000			1,0000	0,8110	
<i>ts [T]</i>						
Adatszám	13	1	0	9	3	0
Átlag	150,70	141,03		150,46	154,65	
Variancia	967,61			946,85	1 947,78	
Minimum	105,29			107,49	105,29	
Maximum	190,30			179,84	190,30	

2. táblázat: A búza nitrogén felvételi modelljének paraméterei különböző talajkötöttség mellett

Arany-féle kötöttségi szám	< 30	30	33	39	46	50
<i>A [kg/ha]</i>						
Adatszám	54	1	18	26	6	3
Átlag	149,94	241,90	113,18	170,16	106,79	250,90
Variancia	6 118,8		3 876,6	7 956,0	3 659,2	3 514,8
Minimum	54,90		54,90	55,30	59,50	209,40
Maximum	379,30		164,51	379,30	220,20	318,80

Arany-féle kötöttségi szám	< 30	30	33	39	46	50
<i>b [T⁻¹]</i>						
Adatszám	54	1	18	26	6	3
Átlag	0,0828	0,0400	0,0570	0,0998	0,1070	0,0567
Variancia	0,0073		0,0003	0,0128	0,0070	0,0004
Minimum	0,0330		0,0330	0,0400	0,0400	0,0400
Maximum	0,4999		0,1039	0,4999	0,2547	0,0800
<i>tg [T]</i>						
Adatszám	54	1	18	26	6	3
Átlag	218,68	257,25	210,19	224,18	209,65	227,24
Variancia	659,51		107,42	963,26	399,59	1 385,52
Minimum	183,80		191,69	183,80	187,49	191,27
Maximum	277,46		233,42	277,46	232,50	265,60
<i>RF [kg/ha]</i>						
Adatszám	17	0	3	11	3	0
Átlag	90,33		56,11	105,58	68,64	
Variancia	3 227,10		1 1140,0	4 114,6	364,30	
Minimum	17,19		17,19	45,40	53,00	
Maximum	264,58		77,21	264,58	89,91	
<i>s [T⁻¹]</i>						
Adatszám	17	0	3	11	3	0
Átlag	0,2320		0,2329	0,2629	0,1184	
Variancia	0,0574		0,0350	0,0080	0,0007	
Minimum	0,0500		0,1224	0,0500	0,0090	
Maximum	0,8900		0,4490	0,8900	0,1424	
<i>ts [T]</i>						
Adatszám	17	0	3	11	3	0
Átlag	245,43		263,28	243,41	235,0	
Variancia	143,83		66,54	82,65	7,40	
Minimum	230,56		258,06	230,56	233,12	
Maximum	272,68		272,68	259,21	238,12	

3.2.4. Alternatív modell a kukorica nitrogén felvételének számítására

A TAPFMK modell kialakításánál feltételeztük, hogy a kukorica nitrogén felvétele folyamatos a keléstől az érésig (Fehér, 1990; Fehér et al., 1991d). A folyamat csak a becsült maximális potenciális terméstől és egy növényfajtára jellemző biológiai tényezőtől függ.

$$NPLUPT = \frac{VMAXTRM \times PLPAR}{1 + e^{-0.1 \times (tx - tz)}} \quad [\text{kg/ha}] \quad (45)$$

ahol NPLUPT a növényi nitrogén felvétel a vizsgált napig (A NH_4^+ -N és NO_3^- -N összege); VMAXTRM a területre becsülhető maximális szemtermés, PLPAR növényi tényező; tx a keléstől az adott napig terjedő időszak hossza; tz a kelés és a címerhányás közötti időszak időtartama.

A számítás során VMAXTRM értéke nem változik mindaddig, amíg a tenyészidőszakban egy száraz periódus nem alakul ki. Száraznak tekintjük azt a napot, amikor a gyö-

kérzőna átlagos nedvességtartalma nem éri el a holtvíztartalom másfélszeresét. A száraz periódus hosszát az egymást követő száraz napok száma adja. Feltételként vesszük figyelembe, ha két száraz periódus között nem volt legalább 5 egymást követő nap, amelyeket nedvesnek tekintünk, akkor ezeket a napokat is a száraz periódus részeként vesszük számításba. VMAXTRM értékét a szárazság hatására csökkentjük. $VMAXTRM = VMAXTRM * DROUGHT$, ahol DROUGHT a szárazság okozta termés kiesés tényezője. Empirikus képlete:

$$DROUGHT = \begin{cases} 1 - B, & \text{ha } DRGDUR > 0 \\ 1, & \text{ha } DRGDUR \leq 0 \end{cases} \quad (46)$$

$$\text{ahol } B = \frac{e^{-\frac{tdrx^2}{2} \times 0.0132}}{\frac{7.99}{DRGDUR} + 1.33} + \frac{e^{-\frac{(tdrx-18)^2}{2} \times 0.01}}{\frac{25.38}{DRGDUR} + 4.23} + \frac{e^{-\frac{(tdrx-38)^2}{2} \times 0.081}}{\frac{61.1}{DRGDUR} + 10.19} + \frac{e^{-\frac{(tdrx+21)^2}{2} \times 0.01}}{\frac{103.4}{DRGDUR} + 17.24}$$

és DRGDUR a száraz periódus hossza, tdrx a száraz periódus közepe és a címerhányás közötti időszak hossza. A DROUGHT tényezővel csökkentjük A értékét a kukorica nitrogén felvételének számítása során a FITPED modellben is szárazság esetén.

A napi teljes nitrogén felvétel mennyiségéből a NH_4^+ -N és NO_3^- -N felvételt a következők szerint számítja a DISNIT2 modell.

$$NPLUPT_{NH_4-N} = \frac{RNUP \times RSNCON}{1 + RNUP \times RSNCON} \times NPLUPT_n \quad (47)$$

$$NPLUPT_{NO_3-N} = NPLUPT_n - NPLUPT_{NH_4-N} \quad (48)$$

ahol $NPLUPT_{NH_4-N}$ a napi NH_4^+ -N felvétel mennyisége, $NPLUPT_{NO_3-N}$ a napi NO_3^- -N felvétel mennyisége, $NPLUPT_n$ napi összes nitrogén felvétel, RSNCON a gyökérzőna NH_4^+ -N és NO_3^- -N tartalmának aránya, RNUP a talajra és a növényre jellemző potenciális NH_4^+ -N / NO_3^- -N felvételi arány.

Nitrogén transzformáció

A talajban a nitrogénformák bonyolult kölcsönhatásban vannak egymással, melyet fizikai, kémiai, fizikai-kémiai, biokémiai, biológiai és mikrobiológiai folyamatok befolyásolnak. A nitrogénformák közötti átalakulások a környezeti feltételeknek (hőmérséklet, nedvességtartalom, a különböző nitrogén-formák koncentrációja, C/N arány stb.) megfelelően mennek végbe.

A nitrogén transzformációs folyamatok közül megkülönböztetünk olyanokat, melyek az adott rendszerben ásványi N-formák képződésével járnak (mineralizáció) és olyanokat,

melyek hatására a nitrogén a rendszerben marad ugyan, de az ásványi formából eltűnik (immobilizáció, fixáció).

A talajban a nitrogén transzformációs folyamatokat olyan történések is befolyásolják, melyek kívülről juttatnak nitrogént a rendszerbe ásványi vagy szerves formában (szerves és műtrágyázás, növényi maradványok, mikroszervezetek légköri N-kötése, légköri száraz és nedves ülepedés, felszíni ráfolyás). Ugyanakkor a rendszerből nitrogén távozik is a növények nitrogén felvételével, denitrifikációval, felszíni elfolyással, ammónium volatilizációval és kimosódással.

Egy adott rendszer nitrogén transzformációs folyamatainak megítéléséhez, a folyamatok irányának és nagyságának számításához a matematikai modellek jó segítséget adnak. E modellek nitrogén transzformációs blokkjának kialakításához különböző módszereket lehet választani. A *DISNIT2* modellbe két számítási módot is beépítettem. A két nitrogén transzformációs modell párhuzamosan szerepel, és a *DISNIT2* használatakor alternatívan lehet választani közülük.

Az első modell (*MINERAL1*) olyan egyenletrendszerrel dolgozik, melynek paramétereit három hazai talajtípuson végzett kísérletsorozatokban Dr. Biczók Gyula laboratóriumi mérései alapján határoztunk meg (Biczók et al., 1988; Fehér, 1990; Fehér et al., 1991d). A három talaj: (1) a Csepel-szigeten, Halásztelek környéki humuszosodó lepelhomokkal elfedett csernozjom jellegű homok; (2) a Dél-Alföldön, Medgyesbodzás környékén levő típusos mészlepedékes csernozjom; (3) a Kis-Alföldön, Kapuvár térségében található karbonátos többrétegű humuszos öntés talaj. Az alternatív második nitrogén transzformációs modell (*MINERAL2*) empirikus, explicit egyenletek sorozatát alkalmazza a részfolyamatok leírására, melyet a közös OTKA kutatási programunk keretében Dr. Kovács Géza, az MTA TAKI kutatója alakított ki a CERES modellek alapján, és mely egyenletekbe korlátozó feltételeket épített be, majd e részfolyamatok eredményeit összegeztem a modellben.

- *Nitrogén-transzformációs modell (MINERAL1)*

Az egyenletrendszerben öt tényező (talajhőmérséklet, nedvesség-tartalom, N-műtrágyaadag és eltérő C/N arányú két növényi maradvány) ammónium, nitrát, széndioxid produkció és szacharáz-aktivitás változására gyakorolt hatását írja le különböző típusú talajokra. (Az egyenlet időfüggően változó paraméterkészlete talaj specifikus.)

A kezelés kombinációkban a tetszőleges időpontok között történő ammónium és nitrát koncentráció változás alapján nemcsak a nitrifikáció erősségére, hanem az adott időszakban lezajlott mineralizációra vagy immobilizációra is következtetni lehet.

A CO₂-C produkció és a szacharáz-aktivitás mérésével a folyamatok minőségéről, a rendszerben levő mikrobióták élettevékenységéről is adatokat kapunk.

A nitrogén transzformációs folyamatokat leíró egyenletrendszer az alábbi (Biczók et al, 1988; Fehér et al., 1991b):

$$Y = b_0 + b_1 * T + b_2 * W + b_3 * N + b_4 * S + b_5 * M + \\ + b_6 * T * W + b_7 * T * N + b_8 * W * N + b_9 * T * S + b_{10} * W * S + \\ + b_{11} * N * S + b_{12} * T * M + b_{13} * W * M + b_{14} * N * M + b_{15} * S * M + \\ + b_{16} * T * T + b_{17} * W * W + b_{18} * N * N + b_{19} * S * S + b_{20} * M * M$$

ahol

Y = a mért tulajdonság (NH₄-N, NO₃-N, széndioxid
produkció, szacharáz-aktivitás)

b_i = számított paraméterek, i = 0 ... 20

T = talajhőmérséklet [C°]

W = talajnedvesség-tartalom a VK_{max}%-ában [g/100g]

N = adagolt nitrogén mennyisége [mg/kg]

S = szója növénymaradvány [g/100g]

▪ Alternatív nitrogén-transzformációs modell (MINERAL2)

E nitrogén transzformációs modell az alábbi alapvető feltevésekkel dolgozik (Fehér et al., 1991b; Kovács et al., 1996):

- i) a talajba kerülő N forrása a növényi maradvány, a mikroba szervezetek lebomlása, a trágyázás, ülepedés és ráfolyás;
- ii) a számítások során az ammóniumot és a nitrátot vizsgálja elsősorban;
- iii) a mineralizáción a szerves formában levő nitrogén NH₄-N-é alakulását érti, az immobilizáción a mikrobiológiai megkötést;
- iv) a nitrifikáció az ammónium oxidációja nitritté, majd azonnal nitráttá; A nitrifikációt korlátozó tényezők: ammónium és oxigén mennyisége, a talaj kémhatása, hőmérséklete és széndioxid tartalma,

- v) a denitrifikáció folyamata mikrobák által szabályozott, a nitrát nitrogén gázzá és nitrogén oxidokká redukálódik.

A MINERAL2 fő számítási lépései:

(1) Ha az alkalmazott műtrágya karbamid, vagy karbamid és ammóniumnitrát akkor számoljuk a karbamid hidrolízisének folyamatát rétegenként (*Fehér et al., 1991b; Kovács et al., 1996;*):

$$\text{UHIDR UREA}(\ell) \times \text{AK} \times \min(\text{SWF}, \text{TF}) \quad (49)$$

ahol

UREA(ℓ) az ℓ . rétegben levő karbamid mennyisége

$$\text{AK} = -1.2 + 1.31 \cdot \text{OC}(\ell) + 0.203 \cdot \text{pH}(\ell) - 0.155 \cdot \text{OC}(\ell) \cdot \text{pH}(\ell)$$

$$\text{SWF} = (\text{SL}\theta(\ell) - \text{HV}(\ell)) / (\text{FC}(\ell) - \text{HV}(\ell)) + 0.2, \quad \text{ha} \begin{cases} \text{SWF} < 0, & \text{SWF} = 0 \\ \text{SWF} > 1, & \text{SWF} = 1 \end{cases}$$

$$\text{TF} = (\text{ST}(\ell) / 40.0) + 0.2 \quad \text{ha} \begin{cases} \text{TF} < 0, & \text{TF} = 0 \\ \text{TF} > 0, & \text{TF} = 1 \end{cases}$$

OC(ℓ) az ℓ . rétegben levő szerves széntartalom

ST(ℓ) az ℓ . réteg átlagos napi hőmérséklete

pH(ℓ) a talaj pH-ja

SL θ (ℓ) a talajréteg víztartalma térfogatszázalékban

FC(ℓ) a talajréteg szántóföldi vízkapacitása térfogatszázalékban

HV(ℓ) holtvíztartalom térfogatszázalékban

A karbamid műtrágya hidrolízisének folyamata maximálisan 21 napig tarthat.

(2) Mineralizáció az ℓ . rétegben

A lebomlás első feltétele, hogy a C:N arány eltérő legyen 25-től. Ez egyfajta egyensúlyi aránynak felel meg, amikor nem történik nettó mineralizáció vagy immobilizáció. A mineralizációs sebesség a 25-ös aránytól való eltéréssel exponenciálisan változik.

$$\text{HUM}(\ell, t) = \text{HUM}(\ell, t - 1) - 17.2 \times \text{RHMIN} + \frac{0.2 \times \text{GRNOM}}{0.04} \quad (50)$$

és

$$\text{NHUM}(\ell, t) = \text{NHUM}(\ell, t - 1) - \text{RHMIN} + 0.2 \times \text{GRNOM} \quad (51)$$

ahol

HUM(ℓ, t) a stabil szervesanyag (humusz) mennyisége az ℓ . talajrétegben

NHUM(ℓ, t) a humuszban levő nitrogén mennyisége

GRNOM bruttó nitrogén mineralizáció

ahol

$$\text{GRNOM} = \sum_{jp=1}^3 G1 \times \frac{\text{FPOOL}(\ell, jp)}{\text{FOM}(\ell)} \times \text{FON}(\ell) \quad (52)$$

amiben

$$G1 = \text{TF} * \text{MF} * \text{CNRF} * \text{RDECR}(jp) \quad \text{ha } \text{FOM}(\ell) > 5.0$$

$$G1 = 0 \quad \text{ha } \text{FOM}(\ell) < 5.0$$

$\text{FOM}(\ell)$ friss szervesanyag mennyisége az ℓ . rétegben

$\text{FON}(\ell)$ a friss szervesanyagban levő N mennyisége

$\text{FPOOL}(\ell, jp)$ friss szervesanyag pool az ℓ . rétegben

$jp = 1$ hidrokarbonát

$jp = 2$ cellulóz

$jp = 3$ lignin

TF a nitrifikáció sebességének hőmérsékleti tényezője

$$\text{TF} = (\text{ST}(\ell) - 5.0) / 30.0$$

MF nedvességi tényező

$$\text{ha } \text{SL}\theta(\ell) < \text{FC}(\ell): \text{MF} = (\theta(\ell) - \text{HV}(\ell) * \text{SWEF}) / (\text{FC}(\ell) - \text{HV}(\ell) * \text{SWEF})$$

$$\text{ha } \text{SL}\theta(\ell) > \text{FC}(\ell) : \text{MF} = 1.0 - (\text{SL}\theta(\ell) - \text{FC}(\ell)) / (\theta_s(\ell) - \text{FC}(\ell)) * 0.5$$

$$\text{ha } \text{MF} < 0.0 \text{ akkor } \text{MF} = 0.0$$

CNRF C:N tényező a lebomlás folyamatához

$$\text{CNRF} = e^{(-0.693 * (\text{CNR} - 25) / 25.0)}$$

$$\text{ha } \text{CNRF} > 1.0 \text{ akkor } \text{CNRF} = 1.0$$

$$\text{ahol } \text{CNR} = (0.4 * \text{FOM}(\ell)) / (\text{FON}(\ell) + \text{TOTN})$$

TOTN összes ásványi nitrogén a rétegben

$$\text{TOTN} = \text{SNO3}(\ell) + \text{SNH4}(\ell) - 0.5 / \text{FAC}(\ell)$$

$\text{SNO3}(\ell)$ nitrát nitrogén mennyisége a rétegben

$\text{SNH4}(\ell)$ ammónium nitrogén mennyisége a rétegben

$\text{FAC}(\ell)$ váltószám mg N/kg-ról kg N/ha-ra

$$\text{FAC}(\ell) = 10 * \rho(\ell) * \text{DLAYR}(\ell)$$

$\rho(\ell)$ száraz térfogatsúly

$\text{DLAYR}(\ell)$ a talajréteg vastagsága

$\text{ST}(\ell)$ a talajréteg napi átlagos hőmérséklete

RHMIN a humuszból mineralizálódott nitrogén mennyisége az ℓ . rétegben

$$\text{RHMIN} = \text{NHUM}(\ell, t-1) * \text{DMINR} * \text{TF} * \text{MF} * \text{DMOD}$$

ahol

DMINR a humusz lebomlási sebessége

$$\text{DMINR} = 0.000083 \text{ [1/d]}$$

DMOD a mineralizáció sebességi tényezője

(3) Immobilizáció az ℓ . rétegben

A bruttó immobilizáció mennyisége elsősorban attól függ, hogy mennyi nitrogén kell egységnyi friss szervesanyag elbontásakor a mikrobák testének felépítéséhez. Több mikroba nem épülhet fel, mint amennyihez a lebomlott anyagokból felszabaduló szén elégséges. A mikrobák azonban nem tudják az összes felszabaduló szenet visszaforgatni testükbe. A mikrobák szén-visszaforgatási hatékonysága 40 %-os. A C:N arány a mikroba szervezetekben átlagosan 0,125. Így a bruttó lebomlott (mineralizálódott) szervesanyag tömegének 2 %-a adja a teljes rendelkezésre álló szénhez szükséges mennyiséget.

$$\text{RNAC} = \min \left(\text{TOTN}, \text{GRCOM} \times \left(0.02 - \frac{\text{FON}(\ell)}{\text{FOM}(\ell)} \right) \right) \quad (53)$$

$$\text{ha RNAC} < 0 \text{ akkor RNAC} = 0.0$$

ahol

RNAC bruttó immobilizációs sebesség a növénymaradványok lebomlásakor

GRCOM a szervesanyag mennyiségének összes csökkenése

$$\text{GRNOM} = \sum_{jp=1}^3 G1 \times \text{FPOOL}(\ell, jp) \quad (54)$$

Az RNAC és GRNOM közötti különbség határozza meg, hogy nettó mineralizáció vagy immobilizáció jön létre. A szerves forrásokból történő nettó nitrogén kibocsátás:

$$\text{NNOM} = 0.8 \times \text{GRNOM} + \text{RHMIN} - \text{RNAC} \quad (55)$$

Csak a GRNOM 80 %-a megy át ebbe a pool-ba, mivel a maradék 20% beépült a NHUM(ℓ)-be.

A felújított ammónium készlet: $\text{SNH4}(\ell, t) = \text{SNH4}(\ell, t-1) + \text{NNOM}$

(4) Nitrifikáció az ℓ . rétegben

A McLaren (1970) által javasolt Michaelis-Menten függvény a kiindulási alap a nitrifikáció napi sebességének meghatározásánál. A függvényt Godwin (1989) módosította, hogy becsülni lehessen az ammónium készlet nitrifikációval módosult arányát is.

$$\text{RNTRF} = \min (\text{B}, \text{SNH4}(\ell)) \quad (56)$$

ahol

RNTRF a napi nitrifikáció mértéke

$$B = (A * 40.0 * \text{SLNH4}(\ell)) / (\text{SLNH4}(\ell) + 90.0) * \text{SNH4}(\ell)$$

ahol

$$A = \min(\text{RP2}, \text{WFD}, \text{TF}, \text{PHN}(\ell))$$

ahol

RP2(ℓ, t) relatív nitrifikációs potenciál

$$\text{RP2}(\ell, t) = \text{CNI}(\ell, t-1) * e^{(2.302 * \text{ELNC})}$$

ahol

CNI($\ell, t-1$) megelőző napi mikrobiális nitrifikációs index

miután RP2(ℓ, t) -t számítottuk: CNI (ℓ, t)=RP2(ℓ, t)

ELNC a nitrifikáció kapacitási tényezője

$$\text{ELNC} = \min(\text{TF}, \text{WFD}, \text{SANC})$$

WFD a nitrifikáció nedvességi tényezője

ha $\text{SL}\theta(\ell) \leq \text{FC}(\ell)$: akkor $\text{WFD} = (\text{SL}\theta(\ell) - \text{HV}(\ell)) / (\text{FC}(\ell) - \text{HV}(\ell))$

ha $\text{SL}\theta(\ell) > \text{FC}(\ell)$: akkor $\text{WFD} = 1.0 - (\text{SL}\theta(\ell) - \text{FC}(\ell)) / (\theta_s(\ell) - \text{FC}(\ell)) * 0.5$

ha $\text{WFD} < 0.0$ akkor $\text{WFD} = 0.0$

SANC a nitrifikációs kapacitást befolyásoló ammónium ellátottsági tényező

$$\text{SANC} = 1.0 - e^{(-0.01363 * \text{SNH4}(\ell))}$$

PHN(ℓ) pH index [-]

ha $\text{PH}(\ell) < 4.5$ vagy $\text{PH}(\ell) > 9.0$: $\text{PHN}(\ell) = 0.0$

ha $4.5 < \text{PH}(\ell) < 6.0$: $\text{PHN}(\ell) = (\text{PH}(\ell) - 4.5) / 1.5$

ha $6.0 < \text{PH}(\ell) < 8.0$: $\text{PHN}(\ell) = 1.0$

ha $8.0 < \text{PH}(\ell) < 9.0$: $\text{PHN}(\ell) = 9.0 - \text{PH}(\ell)$

A talajrétegben az adott napon az ammónium és nitrát mennyisége:

$$\text{SNH4}(\ell, t) = \text{SNH4}(\ell, t-1) - \text{RNTRF}$$

$$\text{SNO3}(\ell, t) = \text{SNO3}(\ell, t-1) + \text{RNTRF}$$

A mikrobiális nitrifikáció index új értéke ezek után:

$$\text{CNI}(\ell, t) = \text{CNI}(\ell, t) * \min(\text{XW}, \text{XT}, \text{SARNC})$$

ahol

$$\text{XW} = \max(\text{WFD}, \text{WFY}(\ell))$$

ahol

WFY(ℓ) a nitrifikáció előző napi nedvességi tényezője

$$X_T = \max(T_F, \text{TFY}(\ell))$$

ahol

TFY(ℓ) a nitrifikáció előző napi hőmérsékleti tényezője

$$\text{SARNC} = 1.0 - e^{(-0.01362 * \text{SNH4}(\ell))}$$

(5) Denitrifikáció az ℓ . rétegben

A denitrifikáció elemi feltétele, hogy legyen nitrát legalább 1 mg/kg koncentrációban és redukációs folyamatok uralkodjanak. A redukációs folyamathoz a szántóföldi vízkapacitás feletti víztartalom kell legyen a rétegben, valamint a réteg hőmérséklete 5 °C feletti legyen. A szénforrás számításánál a humusz 58 %-os széntartalmát is felhasználjuk.

$$\text{DNRATE} = 0.00006 \times \text{CW} \times \text{SLNO3}(\ell) \times \rho(\ell) \times \text{FW} \times \text{FT} \times \text{DLAYR}(\ell) \quad (57)$$

ahol

DNRATE denitrifikáció sebessége

CW a szénforrás tényező

$$\text{CW} = \text{FAC}(\ell) * (0.0031 * \text{SOILC} + 0.4 * \text{FPOOL}(\ell, 1)) + 24.5$$

ahol

$$\text{SOILC} = 0.58 * \text{HUM}(\ell)$$

FW a denitrifikáció nedvességi tényezője

$$\text{FW} = 1.0 - (\theta_s(\ell) - \text{SL}\theta(\ell)) / (\theta_s(\ell) - \text{FC}(\ell))$$

FT a denitrifikáció hőmérsékleti tényezője

$$\text{FT} = 0.1 * e^{(0.046 * \text{ST}(\ell))}$$

SLNO3(ℓ) a talajréteg átlagos nitrát koncentrációja

$\rho(\ell)$ a talajréteg száraz térfogatsúlya

DLAYR(ℓ) a talajréteg vastagsága

Megvizsgáljuk, hogy a napi denitrifikáció mennyisége nem lépte-e túl a jelenlevő nitrát mennyiségét, illetve biztosítjuk, hogy egy minimális érték maradjon a rétegben, mert a denitrifikáció folyamata nem dolgozik 100 %-os hatásokkal.

A DNRATE számítása után a réteg új nitrát készlete:

$$\text{SNO3}(\ell, t) = \text{SNO3}(\ell, t-1) - \text{DNRATE}$$

(6) Az ℓ . talajréteg hőmérséklete

$$ST(\ell) = TAV + \left(\frac{AMP}{2.0} \times \cos(ALX + ZD) + DT \right) \times e^{ZD} \quad (39)$$

ahol

$ST(\ell)$ a réteg napi átlagos hőmérséklete

TAV évi átlagos léghőmérséklet

AMP az átlagos havi léghőmérsékletek amplitúdója

ALX az adott nap az éven belül radiánban kifejezve

$$ALX = (XI - HDAY) \times 0.017214$$

ahol

XI az adott nap sorszáma az éven belül

HDAY az év legmelegebb napjának sorszáma

Feltételezés: HDAY = 200 az északi Földrészen

HDAY = 20 a déli Földrészen

ZD talajmélységi tényező

DT hőmérsékleti tartomány (max-min)

A 4. *Eredmények* fejezetben ismertetem a *DISNIT2* modell alkalmazásából származó eredményeket, amikor az első esetben hengerliziméterekben végzett nitrát-bemosódási kísérletek eredményeit vettem össze a modell-számításokkal és becsültem a különböző talajoszlopokon keresztül lemosódó nitrát mennyiségét. A második vizsgálat során a csapadékból származó természetes nyomjelzőanyagot felhasználva modelleztem Püspökszilággy területére a talaj telítetlen zónáján keresztüli beszivárgás sebességét és becsültem a talajvízszint elérés idejét. A harmadik esetben megvizsgáltam egy jelentős dél-alföldi felszín alatti vízbázist annak megállapítása érdekében, hogy a talaj felszínén alkalmazott szerves trágyából illetve műtrágyából milyen mértékű terhelés éri el az első telített talajvízréteg szintjét.

3.3. A szikesedési változást leíró szakértői rendszer (SALINEXP) vizsgálati módszere

A szakértői rendszer számítógépes program formában archiválja az adott szakmai területre vonatkozó ismeretet, tudást, ami így dokumentált, könnyen reprodukálható, következetesen alkalmazható és a nem szakemberek által is hasznosítható. Egy szakértői rendszer erőssége a beprogramozott tudás, az pedig az ismeretanyag minőségétől és mennyiségétől függ. Következésképpen döntéstámogató rendszer, illetve azon belül egy szakértői rend-

szer kifejlesztése alapértelmezés szerint sem lehet egyszemélyes feladat. Ilyen rendszer kidolgozása szakemberek felhalmozott tudásának összegzését kívánja meg. Ezt a feladatot egy úgynevezett tudásmérnök (knowledge engineer) látja el. A tudásmérnök az adott problémátéren belül elérendő eredmény érdekében a megoldás algoritmusának kidolgozását végzi el. A tudásmérnöknek nem kell feltétlenül az adott szakterület kiemelkedő ismerőjének lennie, de szakismerete kell legyen a tárgykörhöz és képesnek kell lennie a szakemberek által megfogalmazott ismeretek tudásbázisba szervezésére és a szabályrendszer programozására.

A 2. fejezetben bemutatam, hogy a feltárt szakirodalom alapján hiány volt olyan szakértői rendszerből, amely a klímaváltozás hatására a szikes talajok jellemző paramétereire, illetve a szikesedés folyamatában lejátszódó változások irányát, erősségét és ennek kapcsán a területen termesztett növények átlagos várható terméshozamainak változását írta volna le. Ezért felhasználva a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetében és a Debreceni Egyetemen és annak kutató állomásán dolgozó szakemberek több évtizedes ez irányú szakmai ismereteit, egy európai kutatási program keretében kutatást folytattam egy olyan szabály- és ismeretrendszer kidolgozására, amely leírja, illetve előrejelzést ad a klímaváltozás hatására a szikes talajokban lejátszódó változások irányáról.

A kutatási programot, melyet az Euro ACCESS – AgroClimatic Change and European Soil Suitability kutatási project keretében valósítottuk meg, és a fent nevezett szakember csapat mellett a tudásmérnök feladatait láttam el. A disszertáció felépítésével bizonyítom, hogy szakmai ismereteket szereztem a telítetlen talajzónában lezajló oldattranszport folyamatok vizsgálatában (liziméteres kísérletek), modellezésében (a *DISNIT2* modell kifejlesztése és alkalmazása különböző összetettségű problémakörre), valamint az oldattranszport modellezést segítő szakértői rendszer kidolgozásával (*EXSOLUTE*) a szakértői rendszer számítógépes megvalósításában.

Ezen ismeretek előzetes birtokában irányítottam a tudásbázis kidolgozását, amelynek során négy kiemelt feladatot kellett megoldani a szakértői rendszer (*SALINEXP*) fejlesztése során azon célból, hogy előre lehessen jelezni a klímaváltozás hatására a szikes talajok szikesedési szintjének módosulását, valamint e területeken termesztett növények termőképességének változását:

- i) Meg kellett határozni azokat a változókat / paramétereket, amelyek nagymértékben leírják a talaj szikességének állapotát;
- ii) Azonosítani kellett a klímaváltozási scénáriók jellemző paramétereit;

- iii) Ki kellett dolgozni a tudásbázist, a releváns szabályrendszerrel;
- iv) Számítógépes programot kellett megírni.

3.3.1. A SALINEXP rendszerben figyelembe vett változók

A szakértői csoporttal folytatott konzultációk, tudásmérnökként irányított kérdőíves felmérések alapján, az elérhető tudományos ismereteket figyelembe véve meghatároztuk a szikesedésnek kitett talajok állapotjellemzőit, a vizsgált talajtípusok, a klímaváltozást milyen jellemzőkkel vesszük figyelembe, valamint a szikesedési folyamat előrejelzésében melyek az úgynevezett célváltozók.

A szikesedésnek kitett talaj állapotának jellemzői

Öt állapotváltozó csoport került meghatározásra a szakértői rendszer kialakítása során, amelyekkel jellemezni kívántuk a szikesedésnek kitett talaj kezdeti állapotát (Fehér et al., 1999).

A csoport - *Talaj jellemzők*: a talaj típusa, a talaj altípusa, a kicserélhető Na% maximumának mélysége a B szintben, kation kicserélési kapacitás, textúra, humusz-tartalom, térfogattömeg, hidraulikus vezetőképesség a B szintben, a kicserélhető Na% maximum értéke a B szintben, összes sótartalom, a sótartalom maximumának mélysége, pH a B szintben, kritikus talajvíz mélység, összes porozitás, vízkapacitás víztartalom, hervadási pont víztartalma.

B csoport - *Talajvíz paraméterek*: átlagos talajvíz mélység, éves talajvízszint változás, a talajvíz összes sótartalma, a talajvíz Na% tartalma, a talajvíz sómegkötő képessége, a talajvíz pH-ja.

C csoport - *Klíma jellemzők*: szezonális átlagos levegőhőmérséklet, szezonális átlagos potenciális evapotranspiráció, és szezonális átlagos csapadék.

D csoport - *Növényi jellemzők*: a termesztett növény típusa, és átlagos várható hozam.

E csoport - *Öntözővíz jellemző*: éves átlagos öntözővíz mennyisége.

Vizsgált talajtípusok

Három talajtípust veszünk figyelembe a rendszerben, nevezetesen *régi szolonyec*, *régi talaj*, és *régi csernozjom* talajokat. Ezen fő típusok mellett öt altípust is megkülönböztetünk az összefüggés-rendszerben, úgymint: *közepes*, *mély*, *styeppesedő* és *szolonyeces*, valamint *mélyben sós* altípusokat. A talaj textúra esetében *homokos*, *vályogos homok*, *homokos vályog*, *vályog*, *agyagos vályog*, *vályogos agyag* valamint *agyag* kategóriákat veszünk figyelembe, amelyek szikes területeken előfordulhatnak. A növények esetében a legjel-

lemzőbben termesztett típusokat vontuk be a szabályrendszerbe: *búza, kukorica, napraforgó, cukorrépa, repce és szója*.

A klímaváltozást jellemző változók

A *SALINEXP* rendszer négy domináns paraméterrel jellemzi a klímaváltozást: (a) a szezonális átlagos levegőhőmérséklet változása; (b) a szezonális átlagos potenciális evapotranspiráció változása; (c) a szezonális átlagos csapadék változása és (d) az átlagos talajvízszint mélységének változása.

A szikesedési folyamat előrejelzésének változói

A kezdeti állapotváltozók figyelembe vételével a *SALINEXP* rendszer előrejelzést ad a kialakuló új szikességi állapot változási irányára, melyet öt célváltozóval ír le: (i) a kicserélhető Na% értékének változása, (ii) a kicserélhető Na% maximális értéke mélységének változása, (iii) az összes só mennyiségének változása a sófelhalmozódási rétegben, (iv) az összes só maximuma mélységének változása, és (v) a várható terméshozam változása.

3.3.2. A rendszerben figyelembe vett szempontok

Számos feltételezést tettünk az előrejelzés meghatározásával kapcsolatban:

- a) A talajprofil maximális mélységét 1,5 m-nek tekintettük vagy csak az állandó talajvízszintig, amennyiben az állandó talajvízszint magasabban található, mint a 1,5 méteres mélységi szint.
- b) A talajprofil rétegekből áll, és mindegyik réteget homogénnek tekintünk. Feltesszük, hogy egy nagyobb térséget horizontálisan homogén, vertikálisan rétegzett talajprofilokkal (pedonokkal) lehet jellemezni.
- c) A talajok szikesedésének és ezek változásának valószínűsége a klímaváltozás mértékétől függ. Az öntözés hatására bekövetkező szikesedést nem veszi figyelembe a rendszer. Ezt azt jelenti, hogy az úgynevezett másodlagos szikesedést kizárja a lehetséges esetek közül.
- d) A talajok hosszú időszak során történt művelésének hatását szintén kizárja a lehetséges esetek közül. Feltételezzük, hogy a talajrétegeket jellemző paraméterek a természetes úton kialakult rétegződést jellemzik, és ezért nincs mesterséges tömörödés a rétegekben.

- e) Ugyancsak feltesszük, hogy az új klimatikus helyzet legalább 15 éven keresztül hat majd folyamatosan a talajra, és az adott Szenárió paraméterek átlagos értékeket képviselnek a teljes időperióduson belül.

3.3.3. Szenáriók a tudásbázisban

A tudásbázis részeként a Közép-Tisza vidék szikesedésnek kitett talajainak jellemző paraméterei kerültek figyelembe vételre. A vizsgált talajok a réti szolonyec, a réti talaj, és a réti csernozjom. Más talajokat nem vettünk figyelembe, mert azok vagy nem voltak jellemzőek a vizsgált régióra vagy nem voltak szikesedésnek kitett talajok.

Egy több-dimenziós döntési tér került kialakításra, amely megadja a változások irányát a talajok állapotváltozóira a különböző feltételezett klímaszenáriókra. Az alábbi klímaszenáriókat alkalmazzuk a rendszerben:

1. Szenárió: Ez az eset az elméleti kezdeti feltétel, amelynél semmilyen formában nem történik változás.
2. Szenárió: Csak a talajvízszint emelkedik a területen, de nem változik a klíma egyik jellemző paraméterében sem.
3. Szenárió: Csak a talajvízszint csökken, nem változnak a klíma paraméterek.
4. Szenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és potenciális evapotranspiráció növekszik; a tenyészidőszaki átlagos csapadék csökken, de az átlagos talajvízszint nem változik.
5. Szenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekszik; a tenyészidőszaki csapadék csökken, de a csapadék csökkenését öntözéssel pótolják. A talajvízszint átlagos értéke nem változik.
6. Szenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekedni fog, a tenyészidőszaki átlagos csapadék csökken, de a csökkenést az öntözéssel kompenzálják. Az átlagos talajvíz szintje emelkedni fog.
7. Szenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekszik, a csapadék és a talajvíz átlagos szintje nem változik.
8. Szenárió: A tenyészidőszak átlagos léghőmérséklete és a potenciális evapotranspirációja növekedni fog, a csapadék átlagos értéke nem változik. A talajvíz átlagos szintje csökken.

9. scenárió: A tenyészidőszak átlagos léghőmérséklete és a potenciális evapotranspirációja növekedni fog, a csapadék átlagos értéke nem változik. A talajvíz átlagos szintje emelkedik.
10. scenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet nem változik, a csapadék átlagos értéke növekszik. A potenciális evapotranspiráció valószínűleg kis mértékben növekszik. A talajvízszint emelkedik.
11. scenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet nem változik, de a csapadék növekedni fog. A potenciális evapotranspiráció valószínűleg kis mértékben növekszik. A talajvízszint átlagos szintje csökken.

A döntési mechanizmus módszere három szinten keresztül valósul meg a *SALINEXP* szakértői rendszerben. Az első szinten a rendszer ellenőrzi a bemenő adatokat tartalmazó fájlt. Ekkor a paraméterek tartományának ellenőrzése történik meg, különös tekintettel a talaj típusára és a klímaváltozási scenáriót meghatározó paraméterekre.

- Ha a *SALINEXP.IN* input fájl nem áll rendelkezésre az aktuális könyvtárban, akkor a *SALINEXP* program figyelmeztetést ad, és létrehoz egy üres input fájlt a rendszer használatának megkönnyítésére.
- Ellenőrzi, hogy bármely paraméternek van-e negatív értéke a bemenő adatok között, és ha igen, akkor a rendszer hibaüzenetet ad.
- Ha a klímaváltozási scenárió értékei nem megfelelően meghatározottak, hibaüzenet jelenik meg.
- Ha a talajtípust nem tartalmazza a bemenő adatállomány, a program megpróbálja más állapot változókból megállapítani azt.
- Ha ezt követően sem elégséges a megadott információ a talaj típusának meghatározásához, akkor is hibaüzenetet ad a program. Ugyancsak hibaüzenet jelenik meg, ha a klímascenárió adatai hiányoznak. Ekkor a program futása befejeződik.
- Ha a talaj típusa adott, a program összehasonlítja a megadott más kezdeti feltétel értékeit a talaj típusra jellemző értéktartománnyal. Ha ellentmondást fedez fel, hibaüzenettel befejeződik a program futása.

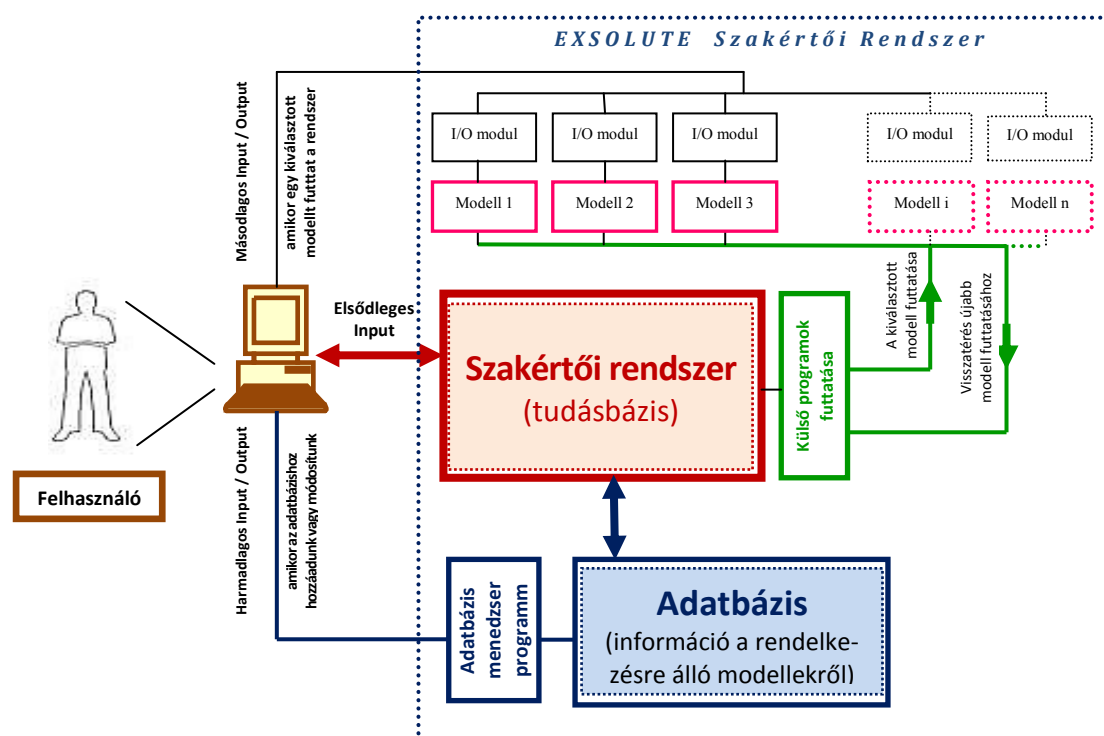
Amikor az első szintű ellenőrzési eljárás sikeresen végrehajtódott, a *SALINEXP* megkezdheti a második szintű ellenőrzést, megvizsgálva, hogy a megadott klímascenárió változók lehetségesek-e. Ha ellentmondást talál, hibaüzenettel befejeződik a program futása.

Végül a harmadik szint a döntéshozatali folyamat, amikor a megadott bemenő adatok értékelése történik. A *SALINEXP* program meghatározza az állapot változók valószínűsíthető változási irányát, és szöveges formában leírja a kialakulható szikesedési szintet, valamint leírja a várható növénytermesztési potenciál változását is.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Szakértői rendszer a háromfázisú talajzónában lezajló oldat-transzport folyamatok modelljeinek kiválasztására

A 4. ábra bemutatja a háromfázisú talajzónában lezajló oldat-transzport folyamatok modelljeinek kiválasztására kidolgozott *EXSOLUTE* szakértői rendszerem fő összetevőit: (A) egy tudás bázis a modellek kiválasztására, (B) egy adatbázis a rendelkezésre álló modellek tulajdonságairól, és (C) a modellek. A felhasználó határozza meg minden modell jellemzőjét a tudásbázisban. A rendszer által képviselt tudás: (1) hogyan válasszunk ki egy adott modellt a felhasználó által meghatározott követelmények alapján; (2) hogyan helyettesítsünk egy meghatározott modell-típust egy másikkal, ha egyik rendelkezésre álló modell sem alkalmazható megfelelő szinten a felhasználó által specifikált probléma körre; és (3) hogyan határozzuk meg a konfidencia szintet azon modellek esetében, amelyek nem teljes mértékben illeszkednek a megkívánt modell-típushoz, de mégis valamilyen megszorítással alkalmazhatók lehetnek.



4. ábra. Az EXSOLUTE szakértői rendszer felépítése

A "következtetés motor" irányítja a felhasználónak feltett kérdéseket, amikor a motor a szabályokat elemzi a felhasználói válaszok alapján. *EXSOLUTE* a következő funkció-

kat hajtja végre működése során: (a) Kérdésről kérdésre számítja a konfidencia értéket minden egyes modellre, amely addig még megfelelt a felhasználói követelményeknek és a rendszerben rendelkezésre áll. (b) Ha az éppen kiszámított konfidenciaszint alatta marad a felhasználó által meghatározott küszöbértéknek, *EXSOLUTE* az adott modellt elveti a további vizsgálatokból. (c) Amikor egy vagy több modellt talál a rendszer, amelyek kielégítik a felhasználó által megadott követelményeket, a rendszer riportot készít ezekről a külső keretprogram számára. (d) Ha kevés számú modellt tartalmaz az adatbázis, előfordulhat, hogy a rendszer nem tud egy modellt sem találni, amely megfelel a felhasználó által specifikált körülményre. Ekkor a keretprogram felajánl egy egyszerű módszert arra vonatkozóan, hogyan könnyítsen a követelményeken, és azonnal megengedi a felhasználónak, hogy újra lefuttassa a kiválasztási fázist. (e) A következtetés motor figyelmezteti a felhasználót, amikor a megadott bemenő adat belső ellentmondást tartalmaz vagy következetlen, és alternatívát ad a bemenő adat módosítására.

Modell információ

Az *EXSOLUTE* részét képezi egy adatbázis, amely minden releváns információt tartalmaz a rendelkezésre álló modellekről. Új modelleket egyszerűen lehet a rendszerhez hozzáadni, mivel a szakértői rendszerhez tartozik egy külső adatbázis is. A felhasználói felületen keresztül a program interaktívan kéri be a kategorizálás adatait. Amikor a felhasználó befejezi az input adatok megadását, a rendszer tárolja az adatokat. Amikor a következtetés motor a tudásbázist lefuttatja, közvetlenül kommunikál a tudásbázissal és az adatbázissal.

Általános modell interface

Amikor egy vagy több modellt talál a rendszer a tudásbázis alapján, a keretprogram egy listát készít a feltételeknek megfelelő modellekről. Ezt követően a felhasználó le is tudja futtatni a modell(ek)e)t bármilyen sorrendben. A rugalmas és könnyen változtatható általános modell interface (GMI) programot fejlesztettünk ki, amely felhasználóbarát adatbevitelt és adat megjelenítést tesz lehetővé az újonnan a rendszerbe illesztett modellekre. A GMI egy grafikus, egér vezérelt adatbeviteli és adatmegjelenítő program, amely lefuttatja a transzport modelleket. Ezeket a modelleket bármilyen programnyelven meg lehet írni, mivel a rendszer feltételezi, hogy végrehajtható, futtatható formában

állnak rendelkezésre. A rendszer szintén feltételezi, hogy egy-egy modell ASCII input fájlt használ a bemenő adatokra és ASCII output fájlt készít az eredményekről.

A konfigurációs információkból az általános modell interface program adatbeviteli formátum lapot készít, hasonlóan, mint egy táblázatkezelő program, és lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy közös adatbeviteli formátumban vigyen be adatot vagy adat mátrixot ASCII fájlba. A GMI ezután lefuttatja a modellt a háttér memóriában, és így a felhasználó fel sem ismeri, hogy a modellt egy külön programként futtatta. A modell ezt követően létrehozza az ASCII eredmény fájlt, melyet a GMI beolvas. Az eredmény fájl adatait a felhasználó legördülő formában olvashatja, vagy grafikus módon megjelenítheti a számítógép képernyőjén. Négy grafikont lehet egyidejűleg megjeleníteni. Az eredményt fájl direktben is megjeleníthető. A GMI-be egy fájl-menedzser is beépítésre került, amellyel a felhasználó átnevezheti, másolhatja, törölheti vagy megtekintheti az adat fájlokat.

Az EXSOLUTE-ban található oldat-transzport modellek

Nagyszámú oldattranszport modellt tartalmaz az *EXSOLUTE* szoftver csomag. Ezen modellek legtöbbje analitikai megoldásokat tartalmaz, amelyeket a U.S. Salinity Laboratory-ban fejlesztettek ki.

A *modellek első csoportja* számos analitikai megoldást ad a klasszikus egy ionos konvektív-diszperzív egyenletre, amely figyelembe veszi a lineáris egyensúlyi adszorpciót, zero-rendű produkciót és az első-rendű lebomlást (*van Genuchten, 1981; van Genuchten és Alves, 1982*):

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - R \frac{\partial c}{\partial t} = \mu c - \gamma \quad (59)$$

ahol c az oldat koncentrációja D a diszperziós tényező, v az átlagos pórusvíz sebesség, R a késleltetési faktor a lineáris egyensúlyi adszorpciónál, μ az első-rendű lebomlási sebességi konstans, γ a zero-rendű produkciós konstans, x a távolság, és t az idő.

A *modellek második csoportja* az *EXSOLUTE*-ban a több-ionos transzportot írja le egymásra épülő első-rendű lebomlási folyamatok sorozatával. A modellek e típusait például radioaktív anyagok transzportjának leírására használják, valamint egymással kölcsönhatásba kerülő anyagok párhuzamos transzportjára, mint például nitrogénformák, szerves foszfor, vagy növényvédőszer. Négyanyagú lebomlási láncfolyamatot feltételezve a leíró parciális differenciálegyenleteket *van Genuchten, 1985a* az alábbiak szerint adta meg:

$$R_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_1}{\partial x} - \mu_1 R_1 c_1 \quad (60a)$$

$$R_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_i}{\partial x} + \mu_{i-1} R_{i-1} c_{i-1} - \mu_i R_i c_i \quad (i = 2, 3, 4) \quad (60b)$$

A harmadik csoportja a modelleknek az EXSOLUTE rendszerben analitikai és numerikus megoldásokat ad két-tartományú (mobil-immobil) oldat-transzportra kettős porozitású (strukturált) anyagmátrixra. Ezek a modellek feltételezik, hogy a folyadékfázist két részként lehet megkülönböztetni, úgymint mozgó (áramló) és mozdulatlan (stagnáló) tartományokat. A konvektív-diszperzív transzport a mobil fázisra korlátozódik, míg ellenben a diffúzió típusú kicserélődés a mobil és immobil folyadék tartományok között első-rendű anyagátadási egyenlettel van leírva. A transzport egyenleteket a mobil és immobil tartományokra az alábbi egyenletekkel lehet leírni (*van Genuchten és Wierenga, 1976; Parker és van Genuchten, 1984*):

$$\theta_m R_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x} \quad (61a)$$

$$\theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}) \quad (61b)$$

ahol az m és im alsó indexek a mobil, illetve immobil tartományokra utalnak, θ a térfogati víztartalom, és α az első-rendű anyagátadási együttható a diffúziós kicserélődésre a mobil és immobil folyadékfázisok között.

A negyedik csoportja a modelleknek analitikai megoldást ad a konvektív-diszperzív oldat-transzportra jól meghatározott hengeres vagy szögletes pórusrendszeren keresztül vagy összekapcsolódott üregeken keresztül hengeres vagy gömb alakú aggregátumokban. Példaként, a hengeres makropórusokat tartalmazó talajokban lejátszódó oldat-transzport leíró egyenletei (*van Genuchten et al., 1987*):

$$\theta_m R_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x} \quad (62a)$$

$$c_{im}(x, t) = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b r c_a(x, r, t) dr \quad (62b)$$

$$R_{im} \frac{\partial c_a}{\partial t} = \frac{D_a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right) \quad c_m(x, t) = c_a(x, a, t) \quad (62c)$$

ahol c_a a helyi koncentráció a talajmátrixban az r sugárkoordináta függvényében, a a makropórus sugara, b a makropórust körülvevő talajhenger véges hengerköpeny sugara, és D_m a talajra vonatkozó ionos vagy molekuláris diffúziós tényező. Megjegyezzük, hogy a (62a) egyenlet azonos a (61a) egyenlettel és, mint előbb, c_{im} az átlagos koncentrációt jelenti az immobil folyadékfázisra vonatkozóan a (62b) egyenletben.

4.2. Menedzsment orientált táblaszintű oldat-transzport és nitrát modellel végzett vizsgálatok eredményei

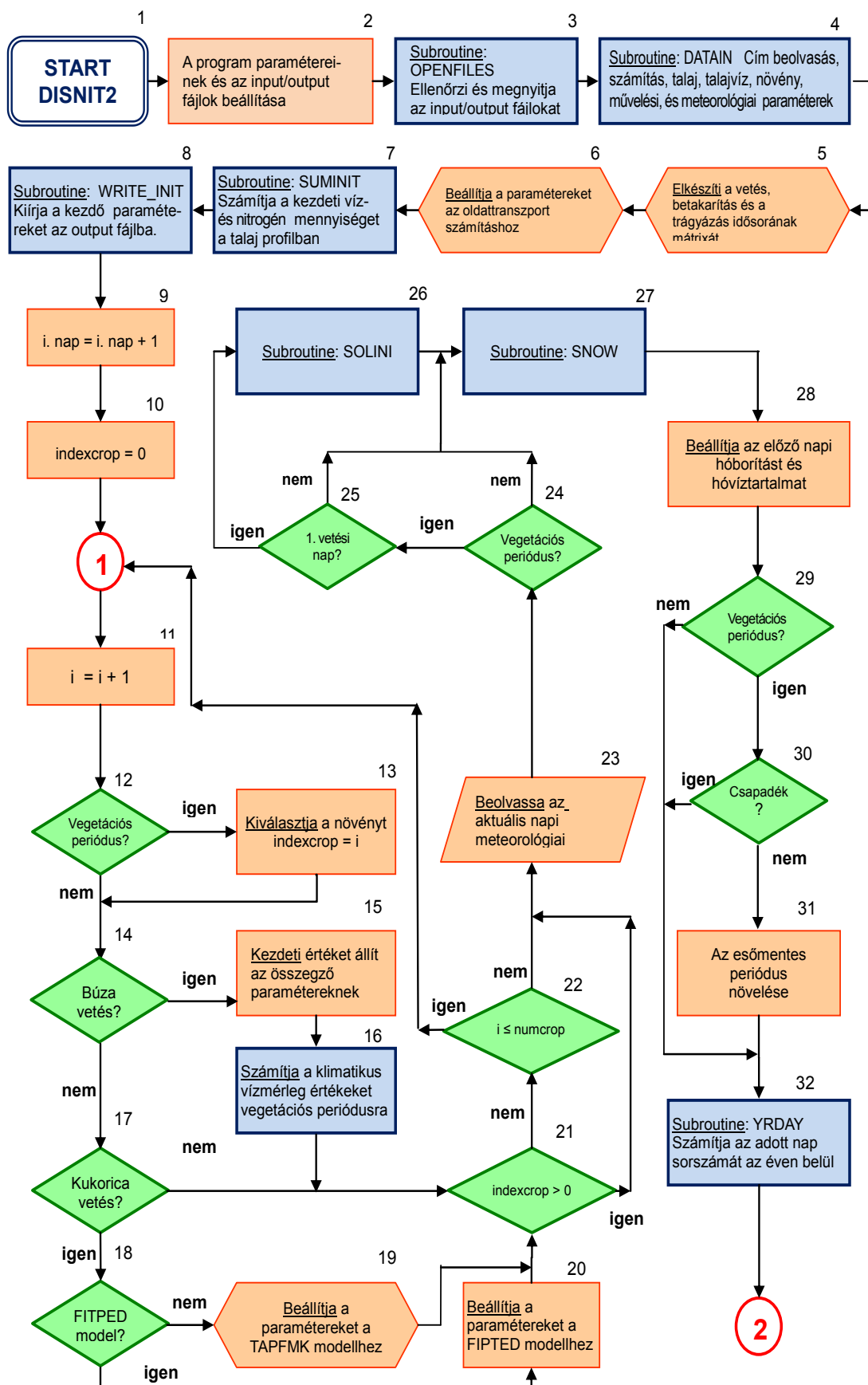
A *DISNIT2* modellel végzett vizsgálatok eredményeinek ismertetése előtt tekintsük át a modell alkalmazásának fő lépéseit, valamint az 5. és 6. ábrán bemutatom ennek folyamatábráját is.

A DISNIT2 modellel végrehajtható szimuláció főbb lépései

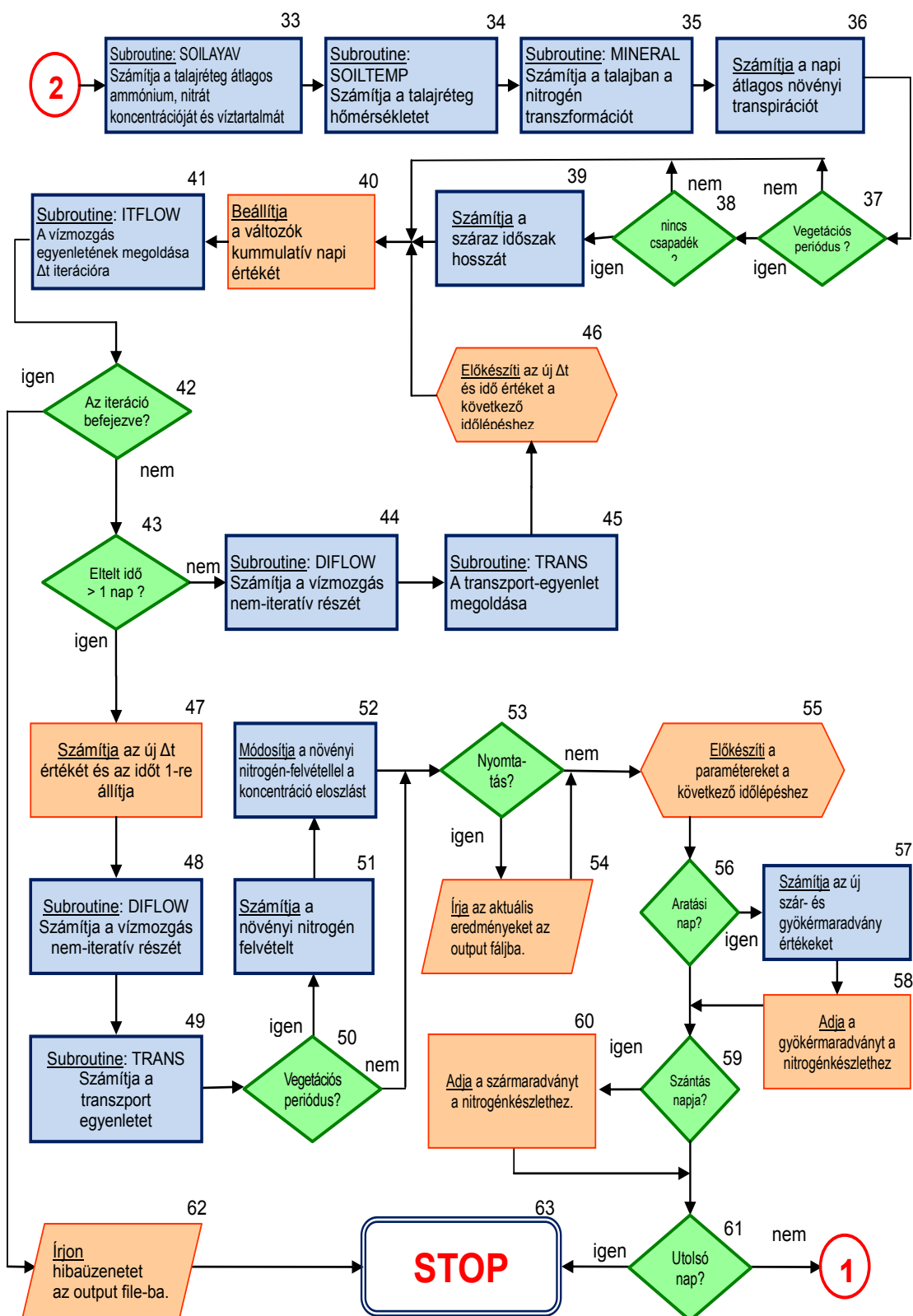
- 1) A számítás kezdete.
- 2) A számítógépi környezet rendszerparamétereinek beállítása.
- 3) A bemenő és az eredmény fájlok megnyitása és ellenőrzése.
- 4) A bemenő adatok (talaj adatok, talajvíz adatok, növényi paraméterek, talajművelési adatok, meteorológiai adatok, számítási paraméterek) beolvasása.
- 5) A szimulációhoz szükséges számítási paraméterek és kezdeti feltételek kinyomtatása az eredmény fájlba.
- 6) A talajprofilban található kezdeti víz- és nitrogén-mennyiségek számítása.
- 7) Az oldat transzport számítás paramétereinek beállítása.
- 8) A bemenő adatként megadott vetési, betakarítási és trágyázási időpontok átszámítása a számítási ciklus napjaira.
- 9) A számítási időciklus változójának (iday) beállítása.
- 10) Feltételezzük, hogy nincs növény a területen. A növényfajta indexének kinullázása.
- 11) Ciklusváltozó értékének beállítása területen vetett növény meghatározásához.
- 12) Megvizsgáljuk, hogy a vizsgált napon már van-e vetett növény a területen.
- 13) Ha van vetett növény, és ez az első nap, beállítjuk a növényt jellemző index változót.
- 14) Megvizsgáljuk, hogy az adott napon (iday) vetettek-e búzát.
- 15) Ha igen, akkor számítjuk a növény gyökér-növekedésének meghatározásához szükséges paramétereket.
- 16) Számítjuk a növény vegetációs periódus alatti klimatikus vízmérleget.
- 17) Ha az adott napon nem vetettek búzát, megvizsgáljuk vetettek-e kukoricát.
- 18) Ha igen, megvizsgáljuk a *FITPED* modellel számítjuk-e a növényi tápanyagfelvételt.

- 19) Ha nem, akkor beállítjuk a *TAPFMK* alternatív növényi tápanyag-felvételi modell paramétereit.
- 20) A *FITPED* modell a kijelölt tápanyag-felvételi modell. Beállítjuk a számítási paramétereit.
- 21) Van már növény a területen?
- 22) Van még más növény, amit nem vizsgáltunk? Ha nem, visszalépünk a 11. ponthoz.
- 23) Beolvassuk az adott napi meteorológiai adatokat.
- 24) Van növény a területen?
- 25) Ha igen, ez az első növény vetésének a napja?
- 26) Ha ez az első növény vetésének a napja, számítjuk a talaj nitrogén átalakulási folyamatainak paramétereit.
- 27) Megvizsgáljuk, hogy a csapadék milyen formában hullott és abból mennyi áll rendelkezésre a beszivárgáshoz.
- 28) Beállítjuk az előző napi hóvastagság és hóvíztartalom értékeket.
- 29) Van-e növény a területen?
- 30) Esett-e csapadék?
- 31) Ha van növény és nem esett csapadék újra számítjuk a csapadékmentes időszak hosszát.
- 32) Beállítjuk az adott napi számítási ciklus indexét.
- 33) Számítjuk a számítási hálópontok alapján a talajrétegek átlagos ammónium és nitrát koncentrációját, valamint víztartalmát.
- 34) Meghatározzuk a talajrétegek átlagos hőmérsékletét.
- 35) Számítjuk a nitrogénformák egymás közötti átalakulásának napi mértékét.
- 36) Ha növény van a területen, számítjuk a napi evapotranspiráció értékét.
- 37) Vegetációs periódusban vagyunk?
- 38) Ha igen, vizsgáljuk vajon a mai napot száraznak lehet-e minősíteni a talaj víztartalma alapján?
- 39) Ha a vizsgált nap száraz (nincs sem csapadék, sem hóolvadás), növeljük a száraz periódus hosszát.
- 40) Beállítjuk a kumulatív változókat.
- 41) Számítjuk a vízmozgás egyenletét iteratív módon.
- 42) Megvizsgáljuk az iterációban történt-e megszakítás.

- 43) Ha nem, megvizsgáljuk az iterációs időlépéssel meghaladtuk-e a napi számítási ciklust.
- 44) Ha nem, számítjuk a vízmozgás nem-iteratív változóit.
- 45) Számítjuk a transzport egyenletet az iteratív időlépésre.
- 46) Beállítjuk az új iteratív időlépést és visszatérünk a 40. ponthoz.
- 47) Az iterációt követően meghaladtuk a napi számítási ciklust ezért visszaszámolunk az egy nap végére.
- 48) Számoljuk a vízmozgás nem-iteratív változóit.
- 49) Visszaszámoljuk a transzportot a nap végére.
- 50) Van növény a területen?
- 51) Ha igen, számítjuk a napi növényi nitrogén-felvétel értékét.
- 52) A növényi N-felvétel hatásával módosítjuk a koncentráció értékeket.
- 53) Megvizsgáljuk szükséges-e az eredmények nyomtatása.
- 54) Ha igen, az adott állapot eredményeinek nyomtatása az eredmény fájlba.
- 55) A következő időlépés paramétereinek beállítása.
- 56) Megvizsgáljuk, hogy van-e ma betakarítás.
- 57) Ha igen, számítjuk az új gyökérmaradvány és szármaradvány tömegét.
- 58) A gyökérmaradvány tömegéből számítjuk a talajba került új nitrogén mennyiségeket.
- 59) Megvizsgáljuk van-e szántás az adott napon.
- 60) Ha igen, a szármaradvány tömegéből számítjuk a talajba került új nitrogén mennyiségeket.
- 61) Megvizsgáljuk elértük-e a szimulációs periódus végét.
- 62) Ha az iteráció során túlléptük a megengedett lépés-számot, hibaüzenet kerül az eredmény fájlba.
- 63) A program futása befejeződik.



5. ábra. A DISNIT2 folyamatábrája (1. rész)



6. ábra. A DISNIT2 folyamatábrája (2. rész)

A *DISNIT2* típusú modellek alkalmas eszközök tervezésre vagy arra, hogy elemzéseket végezzenek velük, például specifikus liziméteres vagy terepi kísérletek kiértékelését végezzük el velük. Megfelelő kalibrálás után eszközül szolgálhatnak arra, hogy vizsgálatok eredményeit extrapolálni lehessen a vizsgálatokban alkalmazott talajoktól eltérő típusú más talajokra, növényekre és klimatikus viszonyokra. Szintén segítenek alternatív talajgazdálkodási és vízgazdálkodási tervek hatásainak összehasonlítható kiértékelésében, illetve vegyszerhasználati módszerek növények hozamára és talajvizek minőségére gyakorolt hatásának bemutatásában.

Az alábbi három alfejezetben – “a puding próbája” filozófiát követve – a *DISNIT2* alkalmazhatóságának értékelését mutatom be három eltérő jellegű, fokozatosan összetettebb feladat megoldása alapján.

4.2.1. Talajoszlopokon végzett nitrátbemosódási folyamatok modell-vizsgálata

A KVM G-10 Környezetgazdálkodási Programirodája megbízása alapján az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete (MTA TAKI) és a VITUKI közösen kutatást végzett az OKKFT G-10 "Talajhasználat hatása a környezetre, a talaj valamint a felszíni és a felszínalatti vizek minőségére" című program keretében. Ennek során az MTA TAKI Örbottyáni Kísérleti Telepén 150 cm magas, 38 cm átmérőjű, eredeti talajszelvények (nagy átmérőjű monolitok) felhasználásával, liziméteres terheléses kísérletek kerültek végrehajtásra a nitrát szennyezőanyag transzportja paramétereinek elemzése érdekében. A bolygatatlan szerkezetű 6 db talajmonolitot készítettek három fontosabb felszínalatti vízbázis (nevezetesen a Csepel-szigeten Halászteleknél, a Dél-Alföld-i Maros hordalékúpon Medgyesbodzásnál és a Kisalföldön Kapuvárnál) területén található legjellemzőbb talajprofiljaiból. A vízbázisonkénti 2-2 talajoszlopot a helyszínen három komponensből összekevert műgyantapalásttal burkolták oly módon, hogy az összekeverés után folyékony halmazállapotú anyagot üvegszövetre kentek és ezt a körbe ázott oszlopokra több rétegben vitték fel. A műanyagpalást a talajjal érintkezve megakadályozta, hogy a későbbi terheléses kísérletek során falhatás alakulhasson ki (*Németh et al., 1989 és 1991*). A műanyag megszilárdulását követően a körülásott oszlopot kiemelték és az oszlopokat a kísérleti telepre szállították. A telepre szállított oszlopokat az oszlop palástjának készítésével megegyező módon műgyantával fenekelték, majd oszlopok palástján keresztül a talajban történő közvetlen mérésre és mintázására alkalmas csöveket építettek be (7. ábra).

A monolitok aljától 5 cm-re 1 cm átmérőjű csövet építettek be. A csövek az oszlopok közepéig értek be és perforáltak voltak. A kísérlet időtartama alatt ezeken a csöveken keresztül történt az oszlopok desztillált vízzel való feltöltése, valamint az oszlopban levő felesleges víz leengedése gravitációs úton. A csöveket csappal el lehetett zárni. A bolygatatlan talajszerkezet megtartásával a kísérlet közben is mintázni lehetett a monolitokat. Az 7. ábrán azok a mintavételi helyek láthatóak, melyeken keresztül talajmintákat vettek az oszlopokból.

A kísérlet befejezését követően a monolitokat kiemelték a helyükről és szétbontották oly módon, hogy függőleges irányú, a hengerpaláston kb. 120 fokot jelentő un. ablakot vágtak ki a monolit teljes magasságában (8. ábra). Ezen az ablakon keresztül mintázták a monolitot 10 cm-es rétegenként, kb. a monolit szélességének a feléig. A mintavételt követően meghatározták a rétegenkénti talajnedvesség-, ammónium-N, nitrát-N és össz-N tartalmakat.



7. ábra. Mintavételi helyek a bolygatatlan szerkezetű talajoszlopon



8. ábra. A talajmintavételhez felnyitott halászelki monolit szerkezete a kísérlet végén

A fentiekben leírtak szerint előkészített talajmonolitokon vízforgalmi és nitrogénforgalmi vizsgálatokat végeztek.

Vízforgalmi vizsgálatok

Az oszlopokat a beépített csövön keresztül desztillált vízzel alulról feltöltötték. A feltöltés menete a következő volt: az oszlop teteje fölé 10 cm-rel elhelyeztek egy 25 literes desztillált vízzel töltött műanyagkannát, melyből a víz gravitációsan jutott az oszlop alján elhelyezett üveg vagy műanyag csövön keresztül az oszlopba. Ez a víznyomás kíméletes feltöltést biztosított. A feltöltést addig folytatták, míg az oszlop tetejét a víz 0,5 cm-es rétegben nem borította. Ezt követően indították a méréseket.

i) Először a telített oszlopban történő vízmozgást mérték oly módon, hogy a 0,5 cm-es vízborítást tartva addig öntöttek desztillált vizet az oszlopra, míg az oszlop alján a kifolyó víz mennyisége, időegységre vetítve, konstans értéket nem ért el.

ii) A konstans érték elérése után az oszlopra további vizet nem öntöttek, hanem az alsó csap nyitva hagyásával engedték, hogy a feleslegben levő víz az oszlopból gravitációsan eltávozzon (ez alatt is folyamatosan mérték az időegység alatt kifolyó vízmennyiséget). A kifolyó víz nitrát-N tartalmát a helyszínen kolorimetriás módszerrel, majd a laboratóriumban vízgőz-desztillációs módszerrel határozták meg.

iii) Miután a csapon a vízkifolyás abbamaradt, az oszlopot a fent leírtak szerint szétbontották, mintázták, majd meghatározták a minták talajnedvesség-, ammónium-N és nitrát-N tartalmát.

Nitrogén-forgalmi vizsgálatok

A nitrogén-forgalmi vizsgálatokra kijelölt 2. oszlopokon is elvégezték a vízforgalmi méréseket addig a pontig, mikor már több víz nem folyt ki az oszlopból. A leeresztéssel a rétegekben így kialakuló víztartalmak jó közelítéssel jellemezték a szántóföldi vízkapacitást. Ezt az állapotot elérve adták ki a nitrogént az oszlopok felszínére és folytatták a kísérletet az alábbi módon:

i) Az oszlop felületére 5 mm-es csapadéknak megfelelő mennyiségű desztillált vizet öntöttek, majd ezután 15 perccel 2,5 mm-es csapadéknak megfelelő vízmennyiségben feloldva adták ki oszloponként az 1756 mg nitrogént N-15 jelzett káliumnitrát formájában. (Ez a dózis 150 kg hektáronkénti nitrogén adagnak felelt meg.) A KNO_3 oldatot úgy készítették el, hogy az 4,647 N atom% jelzett nitrogént tartalmazott.

ii) A nitrogén kijuttatását követően 12 órán keresztül 10 mm/h-nak megfelelő mennyiségű csapadék lehullását imitálták oly módon, hogy 15 percenként 2,5 mm-nek megfelelő desztillált vizet öntöttek az oszlopra. A kísérletnek ebben a szakaszában az

alsó csap végig nyitva volt. Itt felfogták az átfolyó vizet és mennyiségét időegységenként mérték. A 12 óra letelte után a víz adagolását abbahagyták és tovább mérték a kifolyó víz mennyiségét egészen addig, amíg az átfolyás meg nem szűnt. A vízminták nitrát-N tartalmát a helyszínen kolorimetriás, a laboratóriumban vízgőz-desztillációs módszerrel elemezték.

iii) A kísérletnek ebben a fázisában a monolitokból, a hengerpalást átfűrésével talajmintákat is vettek. A mintavétel után a mintavevő csöveket bennhagyták az oszlopban és a monolitot kívülről újból szigetelték (7. ábra). A mintákat a laboratóriumba szállították és mérték a talajnedvesség-, ammónium-N, nitrát-N és össz-N tartalmukat. A nitrogénformák mennyiségének meghatározását követően mérték a mintákból az N-15/N-14 arányt.

iv) Ezt követően újabb, ezúttal 6 órás csapadékot imitáltak, szintén 10 mm/h intenzitással, az előzőekben leírt technikával. A kifolyó víz mennyiségét és nitrát-N koncentrációját ekkor is folyamatosan mérték. A 6 óra letelte után megvárták, amíg több víz gravitációsan már nem folyik ki az oszlopból, ezután a nitrogénnel kezelt monolitot is bontották és mintázták (Németh *et al.*, 1991).

Modell vizsgálatok a terhelési kísérletek alapján

A fentiekben leírt természetes állapotú talajmonolitokon végrehajtott vízforgalmi és nitrát terheléses kísérletek eredményei szolgáltatott adatokat a *DISNIT2* rendszer ellenőrzésére. A modell-vizsgálatok célja annak megállapítás volt, hogy gyakorlatilag laboratóriumi körülmények között beállított vízforgalmi és nitrát-forgalmi helyzet mellett, ugyanakkor természetes állapotú rétegzett talajprofilokat használva, milyen pontossággal lehet a modellel számítani a vízmozgást és nitrát-transzportot, ha a modell számára a talajrétegek jellemzéséhez szükséges paraméterek a terheléses kísérletek adataitól független módon határozzuk meg. Ez a független módon történő meghatározás azért fontos, mert terepi körülményekre alkalmazva a modellt, nem állhatnak rendelkezésre víz- és oldattranszport terheléses kísérleti sorozatok adatsorai, amelyekre a modell paramétereit kalibrálni lehetne. A *DISNIT2*-ben alkalmazott (27) és (28) egyenletekhez szükséges paramétereket ennek megfelelően nem a mérési adatsorokból, hanem a talajrétegekből vett zavartalan mintákból méréssel meghatározott pF görbék alapján becsültük (Fehér *et al.*, 1991c; Simonffy *et al.*, 1991). A kiterjedt modell-vizsgálatokból most a halásztelki vályogos homok talajoszlop rétegeire meghatározott talajhidraulikai paraméte-

reket adom meg a 3. táblázatban, és az erre az oszlopra végzett modell-vizsgálatot tárgyalom a 9. és a 10. ábrában bemutatott eredmények alapján.

3. táblázat. A halásztelki talajoszlop rétegenkénti talajhidraulikai paraméterei

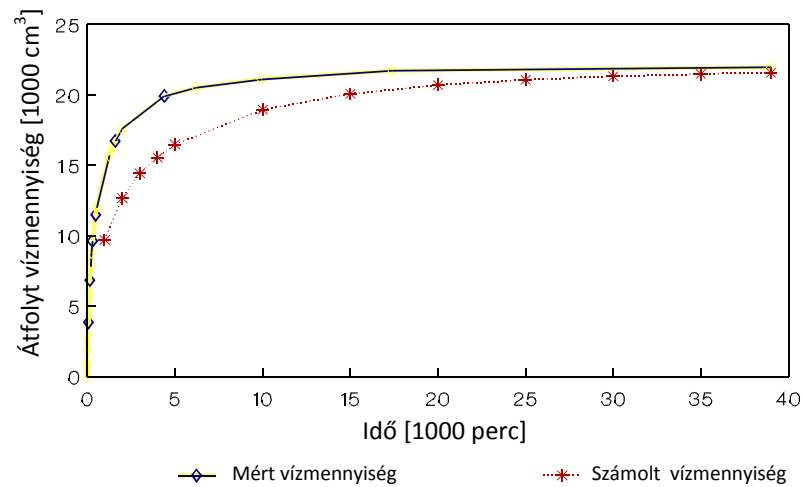
Réteg	Megnevezés	K_s	Θ_s	Θ_r	α	n	ℓ
[cm]		[cm/d]	[cm ³ /cm ³]	[cm ³ /cm ³]	[cm ⁻¹]	[-]	[-]
0-42	vályogos homok	70,0	0,459	0,0	0,02520	1,315	-2,17
42-82	homokos vályog	50,0	0,47	0,0	0,00994	1,341	-0,96
82-150	iszapos homok	100,0	0,524	0,0	0,00754	1,420	3,05

Modell-vizsgálati eredmények

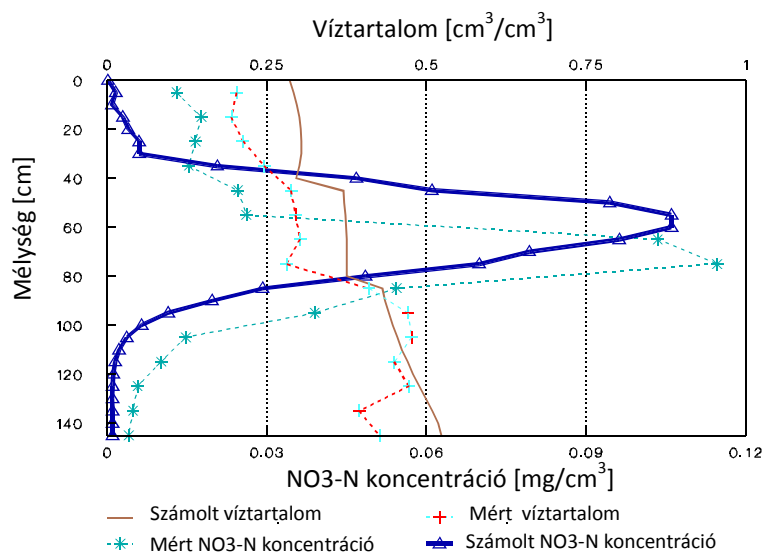
Kezdeti feltételnek a $h(x,0)=x$ alakú függvényt alkalmaztam, amely időben állandó, teljes telítettséget jellemez az oszlop feltelítését követő gravitációs leeresztés kezdetén. A talajoszlop tetején a $q(0,t)=0$ *felső peremfeltételt* alkalmaztam, ami beszivárgás nélküli állapotot ír le, míg alsó peremfeltételként az oszlop alján ($x=L$, ahol L az oszlop teljes magassága) a teljes telítési állapotkor a $h(L,t)=0$ feltételt adtam meg. A számítások során ugyancsak feltételként kellett előírni az *alsó peremnél*, hogy nem lehet felfelé irányuló fluxus, mivel az oszlopok szilárd fenékkal rendelkeztek.

A *vízforgalmi modellezési vizsgálatok* eredményei azt mutatták, hogy a halásztelki vályogos homoktalaj jellegű oszlopon számolt összegzett átfolyt vízmennyiség időbeli görbéje nem az eredetileg a pF görbéből becsült α értékkel (3. táblázat) közelítette meg legjobban a mért görbét, hanem amikor α értékét 2,7-szeresre növelve számoltam. Az eredeti α értékkel számol esetben a szimulációs időszak végére csak a mért átfolyt vízmennyiség 52%-át számolta a modell, míg a 2,7 α érték alkalmazása mellett az eltérés csupán 2% volt (9. ábra).

A *nitrát-terheléses modell vizsgálatok* eredményei szerint a mérési időszak végén meghatározott és a számított víztartalom értékek relatívan jól illeszkedtek a halásztelki vályogos homok talajoszlopok esetében (10. ábra). A legnagyobb eltérés mértéke a nitrát koncentráció csúcs értékében mintegy 8%-os volt és annak számított mélység menti eloszlása is jól követte a mért értékeket.



9. ábra. Összegzett átfolyt vízmennyiségek (Halásztelki vályogos homok talaj)



10. ábra. Mért és számolt vízértartalmak és $\text{NO}_3\text{-N}$ koncentrációk (Halásztelki vályogos homok talaj)

Következtetésekként megállapíthatók a következők: Az oszlopkísérletekben szimulált körülmények jó közelítéssel megfeleltek a magyarországi télvégi, tavasz eleji kondícióknak, amikor a talaj magas, akár telítés közeli vízértartalommal rendelkezik, hóolvadásból vagy csapadékból további beszivárgás lehetséges. A mérések és a modell szimuláció is bizonyította, hogy vályogos homoktalajok esetében akár két jelentősebb csapadékesemény is már 60-80 cm mélyre tudja lejuttatni a felszínre kihelyezett nitrát hatóanyag jelentős részét, míg a nitrát bemosódás frontja akár 120-150 cm mélyre is lejuthat.

4.2.2. Püspökszilágyi területére végzett modell-vizsgálatok

A DISNIT2 egydimenziós víz- és oldat-transzport modellt alkalmaztam a Püspökszilágy körzetében végett trícium profil vizsgálatok verifikálására. Vizsgálatom célja volt, hogy számítógépes modell-vizsgálatokkal becsüljem a csapadékvíz mélybeszivárgási sebességét és meghatározzam az eltérő talajprofilok esetében a diszperziós tényezőt egy nagyobb térség átlagos viszonyait figyelembe véve, amikor a modell alkalmazásához szükséges paramétereket csak közvetett úton lehet becsülni, valamint az alsó és felső peremen alkalmazott feltételeket csak becsült módon lehet meghatározni.

A program használatához szükséges adatokat összegyűjtöttük, rendszereztük, értékeltük és számítógépi adathordozóra vittük az alábbi főbb csoportok szerint.

Meteorológiai adatok

A szimulációs vizsgálatokat az 1952-89-es időszakra végeztük el napi csapadék és hőmérsékleti adatsorokat felhasználva.

Talajszelvény adatok

A püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló (RHFT) területén a VITUKI 1991. augusztus 12-e és szeptember 5-e között talajszelvény feltárást végzett. A következő jellemzők kerültek rétegenként meghatározásra: víztartalom, plastikus index, mértékadó szemnagyság, a 10%-hoz tartozó szemnagyság, egyenlőtlenségi együttható, hézagtenyező, telítettségi fok, térfogatsűrűség természetes állapotban, egyirányú nyomószilárdság, vízáteresztő-képességi együttható, a talaj mésztartalma, mértékadó hézagtenyező, izzítási veszteség.

A feltárás során a 20 m mély szelvényben 12 mélységi pontban, mérőpontonként 3-3 bolygatatlan minta vételére is sor került. Ezen bolygatatlan mintákból pF görbe és hidraulikus vezetőképesség görbe mérések készültek. A felsorolt mérések eredményeit felhasználva meghatároztuk a (26), (27) és (28) egyenletekben szereplő paramétereket. Ezek alapján hat réteget különböztettünk meg hidraulikai szempontból. A rétegek jellemzőit a 4. táblázatban adjuk meg.

Alsó peremfeltétel

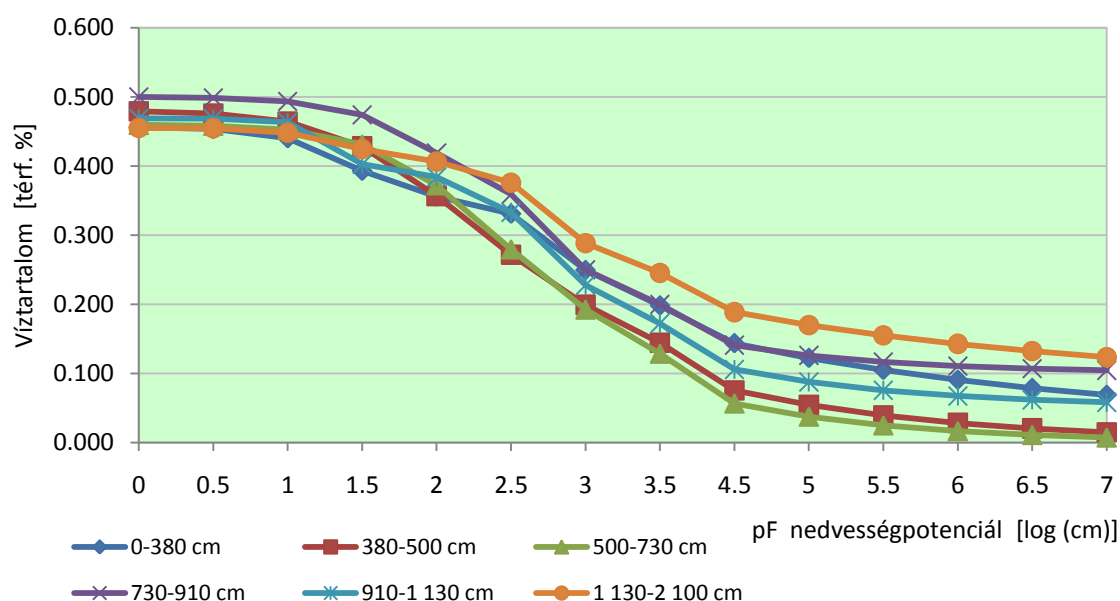
A vizsgált területen a talajvízszint átlagosan 19 és 21 m mélységben található. Szimulációs vizsgálatunkba a maximum 11 m mélységig tartó talajszelvényt vontuk be. En-

nek megfelelően a számításokban a szabad elfolyás hidraulikai feltételét alkalmaztuk az alsó peremnél.

4. táblázat. A püspökszilágyi talajszelvény rétegenkénti talajhidraulikai paramétereit

Réteg	Megnevezés	K_s	Θ_s	Θ_r	α	n	ℓ
[cm]		[cm/d]	[cm ³ /cm ³]	[cm ³ /cm ³]	[cm ⁻¹]	[-]	[-]
0-380	sárga iszap	7,0	0,49	0,02	0,02	1,28	0,5
380-500	világosbarna iszap	3,0	0,48	0,0	0,022	1,23	0,5
500-730	sárga iszapos homokliszt	4,3	0,46	0,0	0,011	1,28	0,5
730-910	sárga sovány agyag	0,8	0,50	0,1	0,011	1,30	0,5
910-1130	sárga iszapos homokliszt	2,0	0,44	0,0	0,011	1,25	0,5
1130-2100	sárga sovány agyag	0,8	0,54	0,1	0,007	1,32	0,5

Az egyes talajrétegek pF görbéit a 11. ábra mutatja be.



11. ábra. A vizsgált püspökszilágyi talajszelvény rétegenkénti pF görbéit

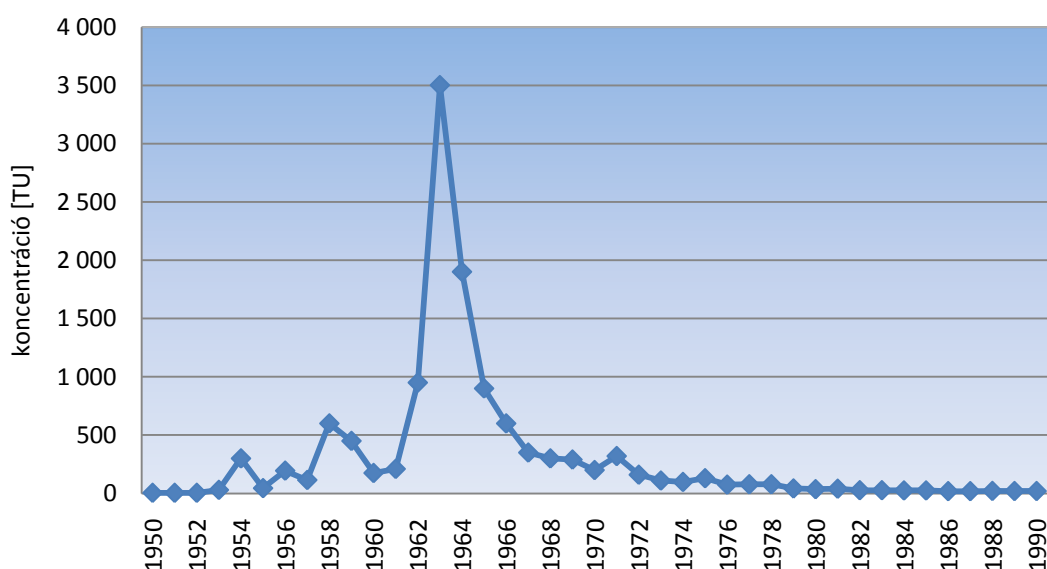
Felső peremfeltétel

A felső peremfeltételként a területre hulló csapadék mennyisége mellett figyelembe vettük a csapadékvíz trícium koncentrációját. A magyarországi csapadékvíz évi súlyozott átlagos trícium koncentrációjának idősorát a 10. ábrán adjuk meg (Deák és Deseő, 1991; Deák és Horváthné, 2009).

Kezdeti feltétel

A szimulációs vizsgálatokat az 1952-es évből indítva kívántam kezdeni, mely év még a légköri mért átlagos háttér trícium koncentrációval jellemezhető. Ezt követően intenzív légköri atomrobbantási kísérletek zajlottak különböző kontinenseken, aminek következtében szélsőséges mértékben megnövekedett a légkör és a kihulló csapadék trícium koncentrációja Magyarországon is.

Mérési eredmény nem állt rendelkezésre a vizsgált területen sem a talajszelvény víztartalmára, sem annak Püspökszilágynál területén mért trícium koncentrációra. Kiindulási állapotnak a talajprofil egyensúlyi víztartalmi állapotát választottam, míg feltételeztem, hogy a trícium koncentráció a talajszelvény teljes mélysége mentén az 1 TU kimutathatósági értéken van. Erre utal az, hogy 10 m mélységtől kezdődően a trícium koncentráció közelítőleg a 1 TU értékű.



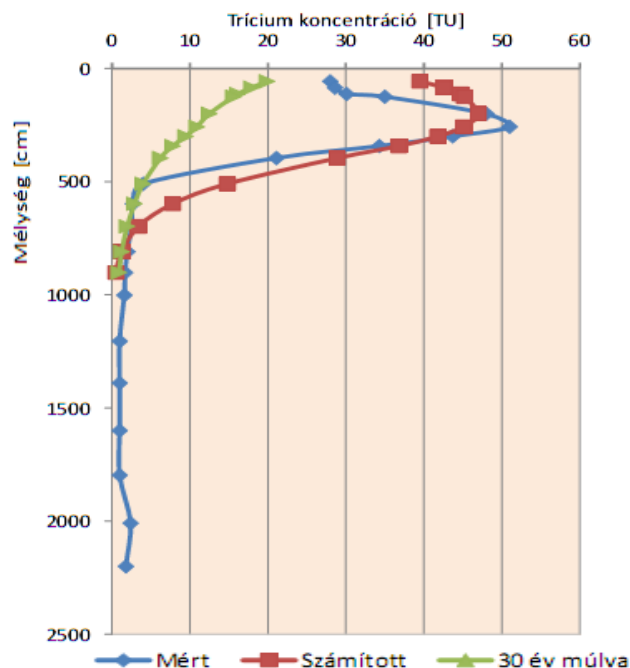
12. ábra. A csapadékvíz évi súlyozott átlagos trícium koncentrációja

A püspökszilági modell-vizsgálatok eredményei és következtetések

Az 1952. január 1. és 1989. december 31. közötti 38 éves időszakra elvégzett napi léptékű modellszámítások azt mutatják, hogy a kiinduló egyensúlyi víztartalomhoz viszonyítva a beszivárgási front 910 cm mélyre jutott. A beszivárgás sebessége nem volt egyenletes a számítások szerint a 38 év alatt. Az 1952. január 1. és 1961. december 31. közötti 10 éves időtartamban a leszivárgás frontja elérte a 415 cm-es mélységet. Ezt követő 10 évben, 1962. január 1. és 1971. december 31. között csak az 500 cm-es mélységig jutott le a víz a számítások szerint. Ennek okai egyrészt az eltérő meteorológiai

körülmények, másrészt a 380-500 cm mélységben található kisebb vízáteresztő-képességű réteg. A harmadik évtizedben – 1972. január 1. és 1981. december 31. között - ismét gyorsabban haladt a beszivárgási front. Az időszak végére elérte a 810 cm-es mélységet. Az utolsó 8 év alatt a számítások szerint a 910 cm-es mélységet érte el a beszivárgó víz frontja. Összevetve a szimulációs eredményeket a trícium mérések alapján meghatározható beszivárgási fronttal, megállapítható, hogy a modell által szolgáltatott eredmény kissé mélyebbre számítja a front helyzetét. Ennek oka lehet a hidraulikus vezetőképesség, illetve pF görbék meghatározásában rejlő bizonytalanság, a talajminta-vétel nem reprezentatív volta, a paraméter meghatározás bizonytalansága, a területi párolgás mértékének alábecsülése, vagy a mérésekben esetleg rejlő hiba.

A diszperziós tényező meghatározása szempontjából megállapítható, hogy a modellel igen jó közelítéssel kaptam meg a trícium profil alakját, különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a kezdeti feltétel megválasztásánál csak közelítést tudtam alkalmazni 1952-ből származó mérések hiányában, és napi léptékben modelleztem a vizsgált 38 évet (13. ábra). A (26) egyenlet alapján számoltam a tríciumra vonatkozó diszperziós tényezőt. Az egyenlet első tagja a molekuláris diffúziós tényező és a talajmátrix anyagi jellemzője, a kanyargósság szorzata, míg a második tagja függ a diszperzivitástól valamint a pórus-középsebességtől. A modellben alkalmazott diszperziós tényező számítási módszer nagy előnye, hogy nem konstans értéket ad meg egy adott rétegre, hanem a réteg adott időpontbeli pórus-középsebessége függvényében állítja elő a diszperziós tényezőt. Ugyanakkor lehetőség van a vizsgált anyag (esetünkben a trícium) anyagi jellemzőinek a figyelembe vételére a molekuláris diffúziós tényezőn és a diszperzivitáson keresztül. A 5. táblázatban megadom a vizsgált talajszelvényre a modell 38 éves időtartamú napi adatsorra történt futtatásával kapott legjobb közelítés esetére a diszperziós tényező jellemzőit.



13.ábra. A püspökszilágyi vizsgált talajszelvényben mért és a modellel számolt trícium koncentráció értékek (1991)

5. táblázat. A tríciumra vonatkozó diszperziós tényező tagjainak értékei a vizsgált talajszelvényben

Réteg [cm]	Megnevezés	$D_0\tau$ [cm/d]	γ [cm]
0-380	sárga iszap	3,3	0,01
380-500	világosbarna iszap	3,3	0,01
500-730	sárga iszapos homokliszt	3,2	0,009
730-910	sárga sovány agyag	3,5	0,015
910-1130	sárga iszapos homokliszt	3,2	0,009
1130-2100	sárga sovány agyag	3,5	0,015

Hangsúlyozom, hogy a megadott értékek tríciumra vonatkoznak és meghatározási módjuk a mélység menti trícium eloszláson alapult, a legjobb közelítés módszerével. Az itt megadott értékek más anyagra csak közelítő módon alkalmazhatók. Más szennyező-anyagra vonatkozó rétegenkénti diszperziós tényező megállapításához külön vizsgálatok, például helyszíni bemosódási vizsgálat, vagy laboratóriumi átfolyásos oszlopkísérletre van szükség.

4.2.3. Az újkígyósi modell-vizsgálatok

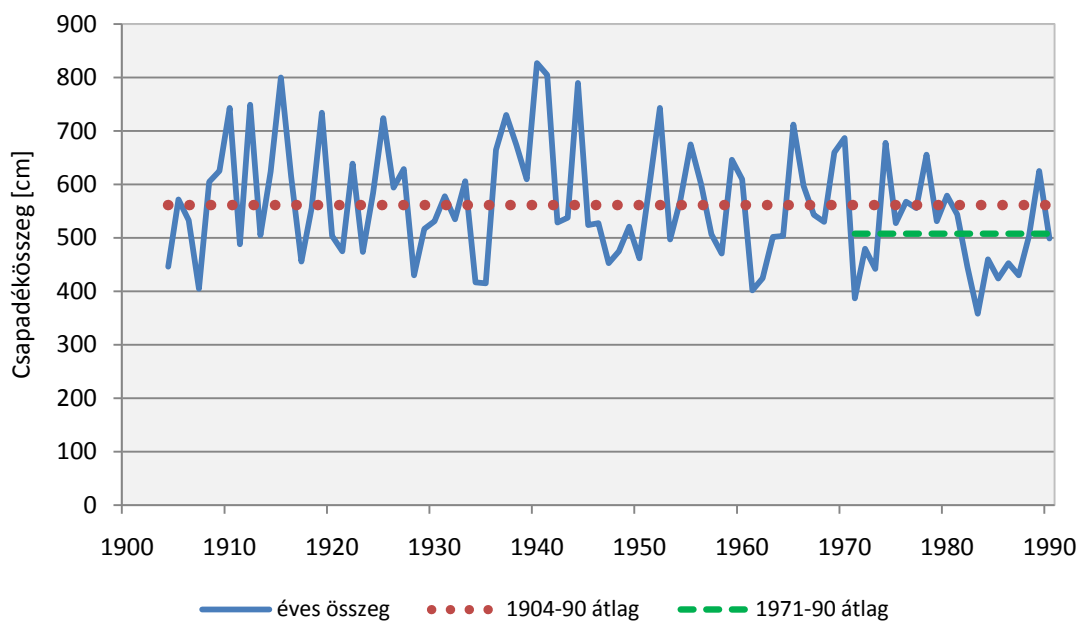
A "Felszín alatti vízbázisok vízminőségi veszélyeztetettségének előrejelzése" címet viselő kutatási programon belül célvizsgálatot végeztünk a Békés megyei Újkígyós község közelében található vízmű vízbázisát veszélyeztető hatások felmérésére és a veszély mértékének előrejelzésére. A célvizsgálatok során vizsgáltam: (1) a leszivárgási folyamatok számítógépes modellezése révén a talajvízbe történő vízbeszivárgás mértékét, (2) ugyancsak számítógépes modellezés segítségével a nitrát bemosódási folyamat dinamikáját, a talajvizet elérő nitrát terhelés nagyságát. A számítógépes vizsgálatokat a *DISNIT2* modellel végeztem el (*Fehér et. al., 1991a; Fehér et. al., 1991b*).

Meteorológiai adatok

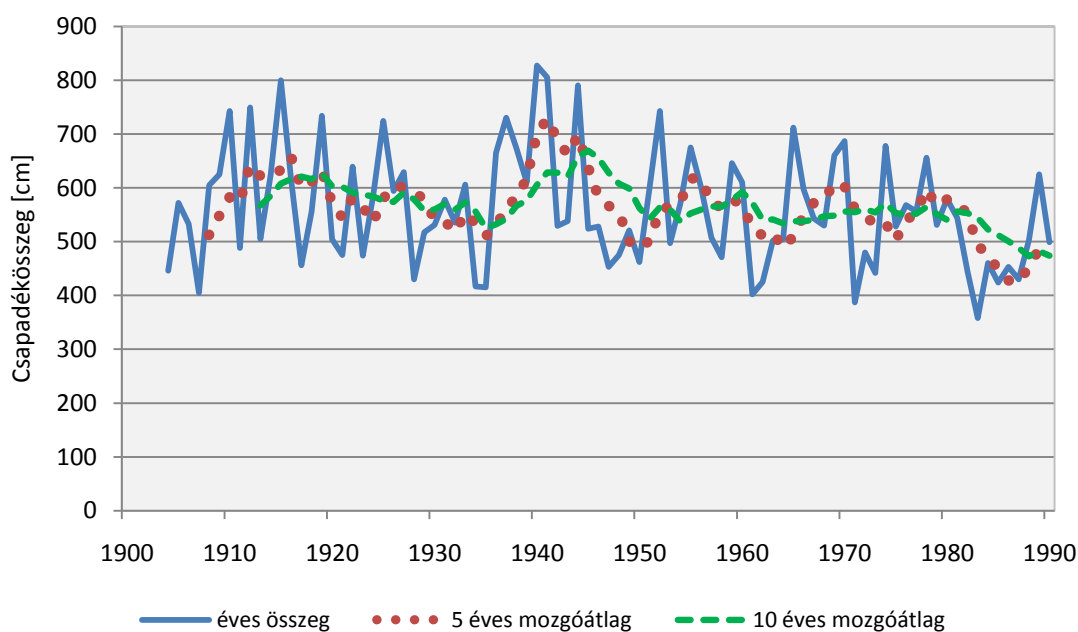
A vizsgált terület térbeli közelsége miatt a modellezéshez a békéscsabai meteorológiai állomás adatait használtam fel. Az 1904-1990 közötti időszak éves csapadékösszegeinek idősorát jellegzetes periodicitás jellemzi. A számítások során figyelembe vett utolsó 20 év adatsora tendenciájában csökkenő éves csapadékmennyiséget mutat. Az 1904-90-es és az 1970-90-es időszak átlagai között 54 mm a különbség (14. ábra). A csökkenő csapadékmennyiséget a csapadékosabb évek csúcsainak tendenciája is jelzi, valamint az ötéves és tízéves mozgóátlagok görbéi is (15. ábra).

Jellemző talajszelvények az újkígyósi vízbázis környezetében

A termőréteg területi változékonyságát az MTA TAKI talajtani térképe és a Békés megyei NTSz adatai alapján elemeztük. A fedő egyéb rétegei elemzésének alapját pedig a MÁFI sekély fúrások adataira szerkesztett térképei (2 m, 5 m és 10 m mélyen található képződmények) adták, amelyet a vízmű környezetében mélyített észlelő kutak és feltáró fúrások rétegsorai alapján pontosítottunk, illetve ellenőriztünk. A különböző mélységekhez tartozó területi változékonyságot együttesen vizsgálva kijelöltem azokat a területe részeket, amelyek azonos talajszelvénnel jellemezhetők. A 2 m-es mélységben jelzett homokos rétegeket, illetve az 5 m mélyen található iszapos agyagos rétegeket összevontam, illetve a szintén 5 m mélyen az iszapos agyagos rétegbe beágyazódó kisebb kiterjedésű homokos réteget elhanyagoltam. Így négy eltérő talajszelvény alkalmazását javasoltam. Az egyes rétegek vastagságát a fúrás-szelvények alapján állapítottuk meg.



14. ábra. A Békéscsabán mért éves csapadékösszegek időszora



15. ábra. A Békéscsabán mért éves csapadékösszegek, valamint ezek 5 éves és 10 éves mozgóátlagai

1. szelvénytípusú terület: A vízműtől Délre, Dél-Nyugatra jó vízvezetőképességű homokos rétegek találhatók. Az agyagos iszapos rétegek - egyéb fúrások adatai alapján - 15-20 m mélyen jelentkeznek. (A műtrágyából származó nitrát bemosódás vizsgálatához a szelvényt csak 8 m-es mélységig vettem figyelembe.)

2. szelvénytípusú terület: Az 1-es típusú területtől északra lévő rész lényegében azonos az 1-es területtel, kivéve, hogy 10 m mélységben már megjelenik egy gyengén át-eresztő agyagos homokliszt réteg.
3. szelvénytípusú terület: A község és a vízmű közötti terület termőrétege homokos vályog, ami alatt közepesen, illetve gyengén át-eresztő iszapos homokliszt és iszapos agyag rétegek találhatók. A vízzáró fekünek tekinthető agyagréteg 6-7 m és 8-10 m között jelentkezik, majd ez alatt 10-15 m mélységig ismét agyagos homoklisztet találunk.
4. szelvénytípusú terület: A vízműtől Keletre a termőtalaj agyagos vályog (helyenként erősen szikes), amelyet a 3. szelvényhez hasonló agyagos-iszapos homokliszt rétegek követnek. Itt viszont 2 m mélységben vékony agyagréteg települt. Az agyag fekü mélységét ebben a szelvényben is 6.5 m mélyen állapítottuk meg, vastagsága azonban nagyobb, mint a 3. szelvényben.

A talajvízszint jellemzői

A talajvíz terep alatti mélységének területi eloszlását az 1991. májusi felmérés adatai alapján határoztuk meg. Ezek szerint a talajvíz terep alatti mélysége az egyes talajszelvény-típusok által jellemzett területen a következő:

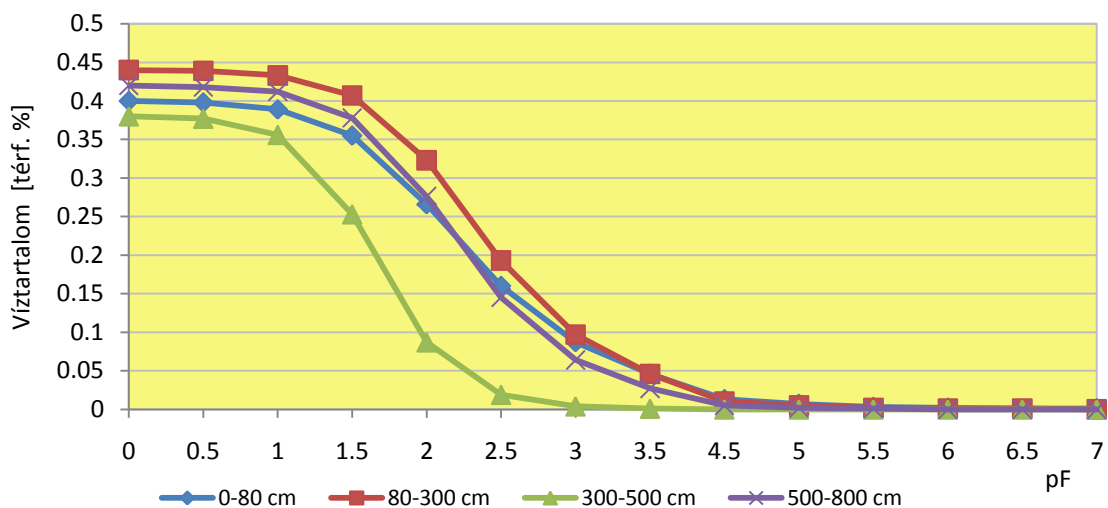
1. szelvénytípus: 4.0-4.5 m a terep alatt.
2. szelvénytípus: 4.2-4.5 m a terep alatt.
3. szelvénytípus: 4.0-5.0 m a terep alatt.
4. szelvénytípus: 3.5-4.0 m a terep alatt.

A 433. számú újkígyósi és 436. számú szabadkígyósi talajvízkút éves átlagainak adatai alapján megállapítható, hogy a talajvízszintben tendenciózus eltérések 1955-1990 közötti időszak adatai alapján nem tapasztalhatók (*Fehér, 1991*). Feltételezhető tehát, hogy a talajvízszint a teljes szimulációs időszakban egy, a teljes időszakra azonosnak tekinthető átlag körül ingadozik.

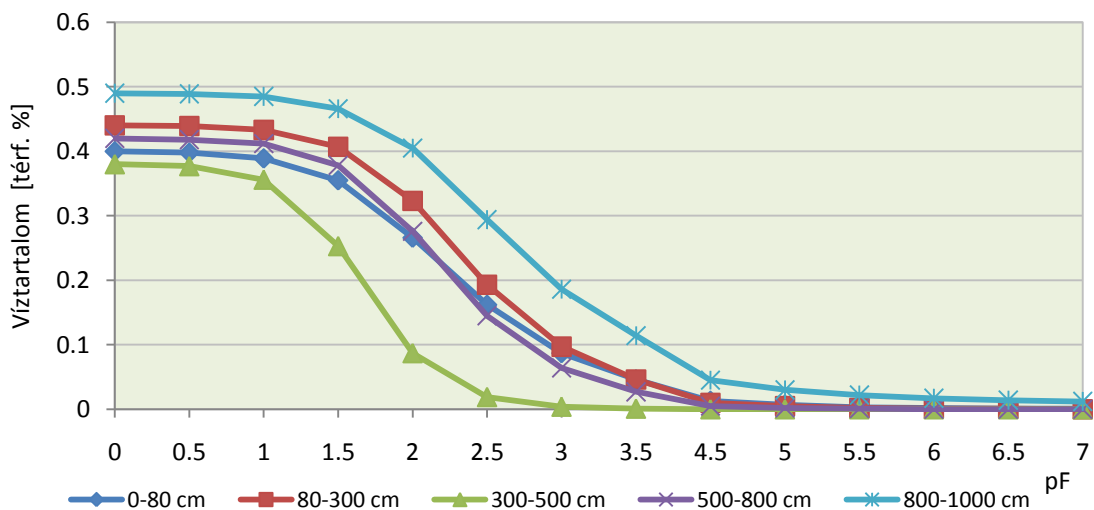
Talajhidraulikai paraméterek

A *DISNIT2* modellben használt talajhidraulikai függvények paramétereit közvetlen retenciós görbe és hidraulikus vezetőképesség görbe mérések hiányában közvetett úton határoztuk meg. Ehhez felhasználtuk az egyes feltáró furások során rétegenként meghatározott szemeloszlási görbéket, irodalmi adatokat, korábbi vizsgálatok során a közeli

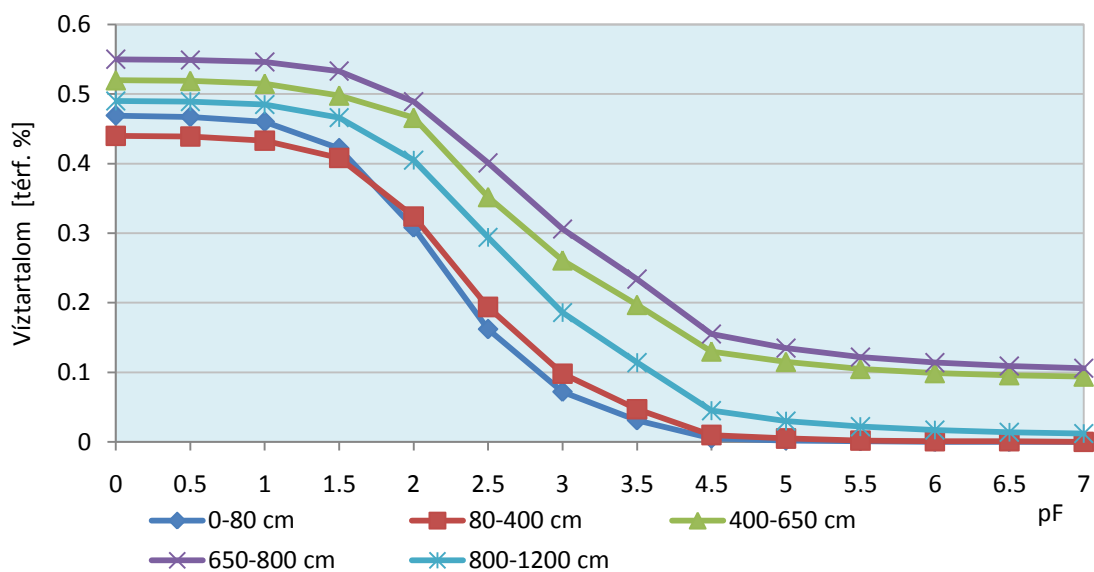
Medgyesbodzásán vett bolygatatlan talajoszlopok rétegeire kimért retenciós és hidraulikus vezetőképességi görbékre meghatározott paramétereket a (27) egyenlet szerint. A fent leírt négy talajszelvény típusra rétegenkénti paraméter sorokat az 6. táblázatban foglaltam össze. Az 1-4. talajszelvények rétegenkénti pF görbéjét a 16-19. ábrákban adom meg.



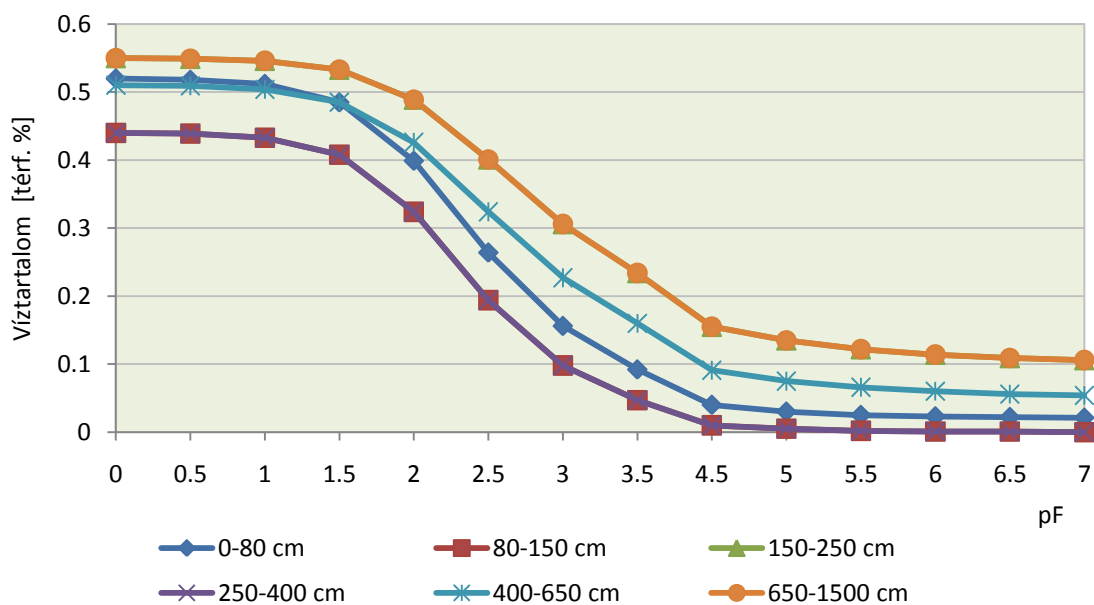
16. ábra. Az Újkígyósi 1. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi



17. ábra. Az Újkígyósi 2. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi



18. ábra. Az Újkígyósi 3. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi



19. ábra. Az Újkígyósi 4. szelvénytípus rétegenkénti pF görbéi

Alsó peremfeltételek

A modellezési vizsgálatok egyik feltétele, hogy ismerni szükséges a számítási profil alsó pereménél fellépő állapotokat. A rendelkezésre álló információk alapján mind a négy kiválasztott szelvénytípus esetében a kijelölt alsó peremnél az átszivárgó víz hozamát írtam elő számításaim során. Az alsó perem terep alatti mélységét szelvénytípusonként a következők szerint határoztam meg:

1. szelvénytípus: 8.0 m a terep alatt.
2. szelvénytípus: 10.0 m a terep alatt.
3. szelvénytípus: 6.5 m a terep alatt.
4. szelvénytípus: 6.5 m a terep alatt.

Az 6. táblázatban közölt adatok és a korábbi rétegleírások alapján a 3. és 4. szelvénytípus esetében $q_{(t)} = 0$ fluxust írtam elő alsó peremfeltételként, feltételezve, hogy a nagy vastagságú agyagréteg gyakorlatilag vízzáró hatású. Az 1. és 2. szelvények esetében a kiválasztott alsó perem mélységében ilyen vízzáró réteg nincsen. Ugyanakkor a fluxus előírása tűnt alkalmazhatóbb módszernek, mert az ezen a rétegszinten érvényesülő nyomásviszonyokról közelítő ismeretek sem álltak rendelkezésre, figyelemmel a területre kiható vízkitermelésre.

Az 1. talajszelvény jó áteresztőképességi tulajdonságai miatt feltételeztem, hogy az alsó peremen a területre jellemző éves átlagos beszivárgással arányos fluxus érvényesül, melyet a vízkitermelés gradiens növelő hatása változtathat. Ennek alapján három időszakot különböztettem meg beszivárgás szempontjából. Az 1970-75 között 100 mm/év konstans értéket, 1975-83 között 100 mm/év-ről lineárisan 180 mm/év értékre növekvő szakaszt, míg 1983-90 között 180 mm/év értékről szintén lineárisan 150 mm/év értékre csökkenő szakaszt különítettem el. Az 1975-83 évek között az újkígyósi vízműtelepen jelentős mértékű kitermelés növelés történt, majd az 1983-as évtől kezdve a kitermelt éves vízmennyiség értéke fokozatosan csökkent (*Fehér, 1991*). Az alsó perem idősorának megválasztása ezt a tényt tükrözi.

A 2. szelvénytípus lényegében azonos felépítésű, mint az 1-es, azzal a különbséggel, hogy a 10 m-es szintre választott alsó perem fölött egy 2 m-es gyenge áteresztőképességű agyagos homokliszt található. Ennek figyelembe vételével az alsó peremre érvényes fluxus értékei tizede az 1. szelvényre megadottakénak. Hangsúlyozom, hogy az itt megadott beszivárgási fluxus értékek közelítő számítással meghatározottak. Szimulációs vizsgálataim egyik célja volt, hogy ezen értékek megbízhatóságát ellenőrizsem, illetve ha szükséges a reális határokon belül módosítsam őket.

Kezdeti feltétel

A szimulációs vizsgálatokat 20 évvel megelőző időpontról indítva kezdtem el. Ezen időpontra nem állnak rendelkezésre a vizsgált területen egyetlen talajprofilra sem víztartalom vagy nedvességpotenciál értékek, sem nitrogén koncentráció értékek. Ezért a kiindulási állapot megválasztásánál gyakorlati szempontból jó közelítést adó, tavaszi, vízkapacitásig telített állapotot megközelítő helyzetet tételeztem fel.

6. táblázat. Az újkígyósi területre meghatározott talajszelvény típusok adatai

Réteg	Megnevezés	K_s	Θ_s	Θ_r	α	n	ℓ
[cm]		[cm/d]	[cm ³ /cm ³]	[cm ³ /cm ³]	[cm ⁻¹]	[-]	[-]
1. szelvénytípus							
0-80	vályogos homok	100	0,40	0	0,015	1,4	0,5
80-300	iszapos homokliszt	10	0,44	0	0,0094	1,45	0,5
300-500	középszemű homok	500	0,38	0	0,02522	1,8	0,5
500-800	iszapos homok	70	0,42	0	0,012	1,5	0,5
2. szelvénytípus							
0-80	vályogos homok	100	0,40	0	0,015	1,4	0,5
80-300	iszapos homokliszt	10	0,44	0	0,0094	1,45	0,5
300-500	középszemű homok	500	0,38	0	0,02522	1,8	0,5
500-800	iszapos homok	70	0,42	0	0,012	1,5	0,5
800-1000	agyagos homokliszt	5	0,49	0,1	0,08	1,35	0,5
3. szelvénytípus							
0-80	homokos vályog	20	0,47	0	0,012	1,5	0,5
80-400	iszapos homokliszt	10	0,44	0	0,0098	1,45	0,5
400-650	iszapos agyag	1,0	0,52	0,09	0,0085	1,32	0,5
650-800	agyag	0,5	0,55	0,1	0,007	1,3	0,5
800-1200	agyagos homokliszt	5,0	0,50	0,01	0,008	1,35	0,5
4. szelvénytípus							
0-80	agyagos vályog	2,0	0,52	0,02	0,01	1,4	0,5
80-150	iszapos homokliszt	10	0,44	0	0,0098	1,45	0,5
150-250	agyag	0,5	0,55	0,1	0,007	1,3	0,5
250-400	iszapos homok	10	0,44	0,0	0,0098	1,45	0,5
400-650	iszap	3,1	0,51	0,05	0,009	1,32	0,5
650-1500	agyag	0,5	0,55	0,1	0,007	1,3	0,5

A táblázatban szereplő jelölések: K_s telített hidraulikus vezetőképesség; Θ_s telítési víztartalom térfogatszázalékban; Θ_r reziduális víztartalom térfogatszázalékban; α empirikus konstans; n empirikus konstans; ℓ póruskapcsolati paraméter.

Mezőgazdasági adatok

A vízmű hatásterületén működő mezőgazdasági üzemektől kapott éves hatóanyag felhasználási adatok alapján a vizsgált 1970-90 közötti időszakban a nitrogén hatóanyagban

kifejezett műtrágya átlagos felhasználásának mennyisége közel konstans értéket mutat (20. ábra). Megjegyezem ugyanakkor, hogy a statisztikai jelentésekből nyert adatoktól eltérő műtrágya felhasználási arányokról számoltak be az érintett termelészövetkezet növénytermesztési szakemberei személyes adatgyűjtésünk alkalmával. Az elmondottak alapján a vízmű területén lévő táblákon az alábbi műtrágya felhasználási trendet vázolhatjuk fel a vizsgálataink szempontjából fontos nitrogén hatóanyag esetében:

1965-70 között: 50 - 100 kg N/ha

1970-75 között: 150 - 200 kg N/ha

1975-87 között: 250 - 300 kg N/ha

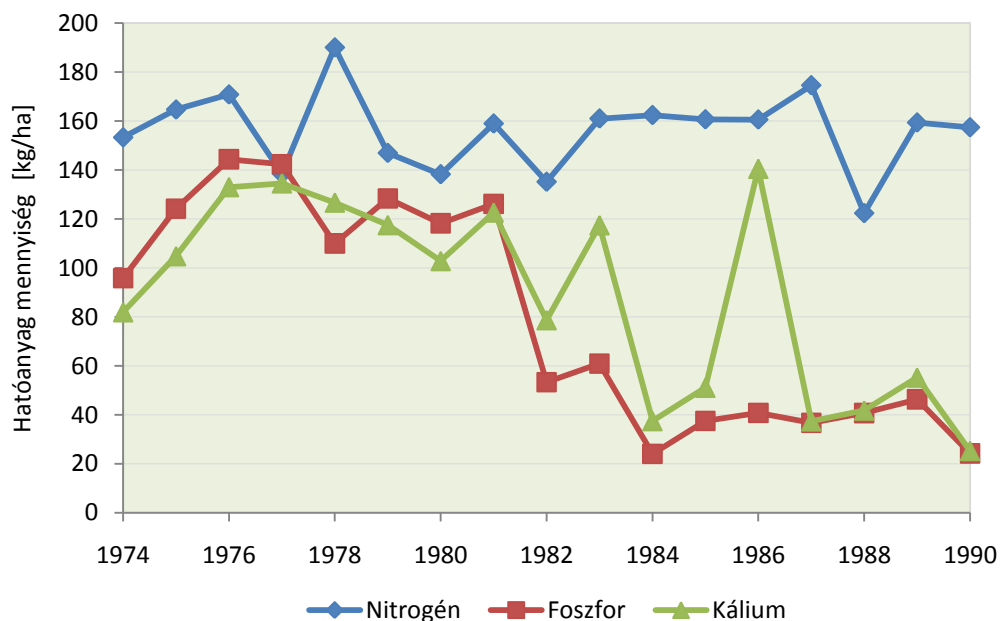
1987-90 között: 200 - 220 kg N/ha.

A mezőgazdasági szövetkezet teljes területére vonatkozó szerves trágya kijuttatás éves össz mennyiségeit az 1974-90-es időszakra a 21. ábra mutatja. Ezen értékek jelentős ingadozást mutatnak, de trendjellegük közel konstans az évi 48 000 kg/ha érték körül.

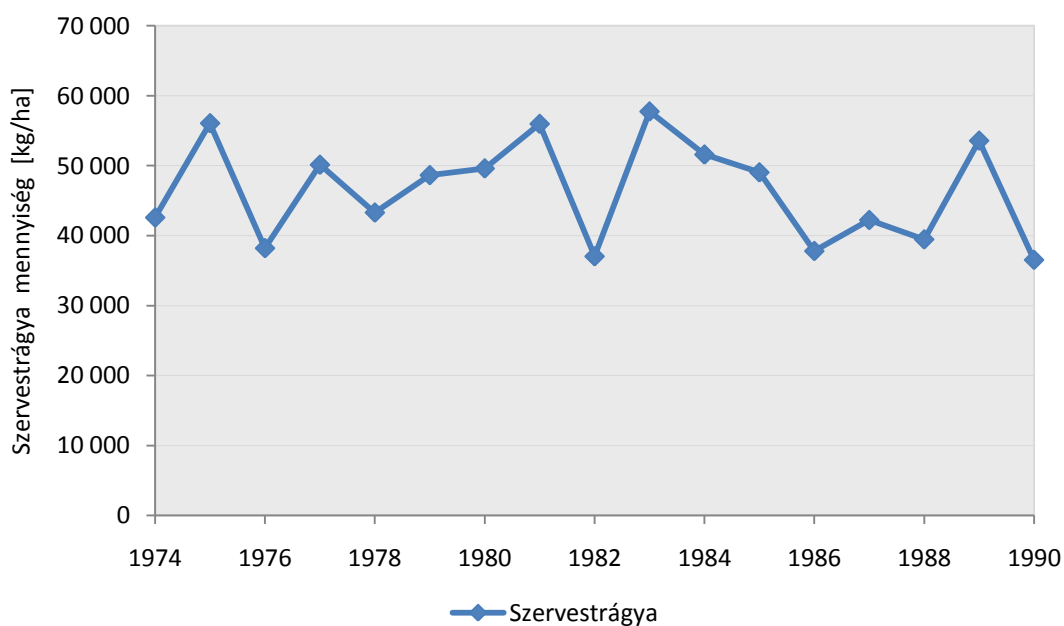
Az újkígyósi modell-vizsgálatok eredményei

Hidraulikai vizsgálatok

A számítógépes modellvizsgálatokat két részre osztva végeztem el. Először a meghatározott négy szelvénytípusra az előzetesen becsült kezdeti és peremfeltételeket alkalmazva számítottam az 1980-89-es tíz éves időszakban kialakuló talajvízszintet. Az eredmények azt mutatták, hogy a 2., 3. és 4. szelvénytípusra megválasztott alsó peremfeltétel mellett jó közelítéssel számolta a modell a kb. ± 50 cm-es vízszintingadozást, amelyek a vizsgált területen levő talajvízszint megfigyelő kút adatai alapján határozhatók meg (22. ábra). Hangsúlyozni kell azonban, hogy a számítás során a jó egyezést nem a vízkapacitásig telített talajprofilú kezdeti feltételből való kiindulás esetén kaptuk, hanem amikor egyensúlyi állapotot tételeztünk fel a számítások kezdetén. Ez a tény is rámutat arra, hogy valószínűleg a téli, csapadékosabb félévet követően sem emelkedik a telítetlen zóna víztartalma a vízkapacitás érték közelébe.



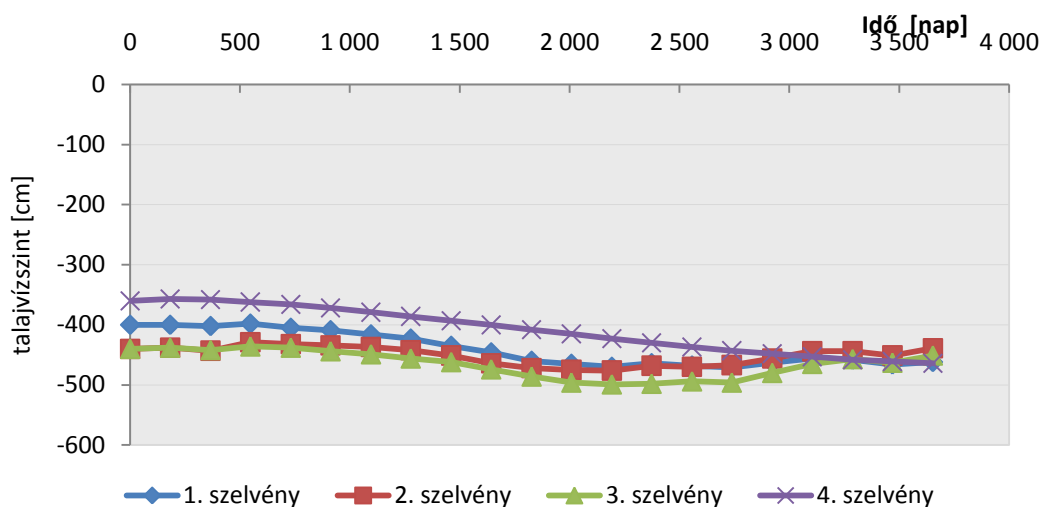
20. ábra. Az újkígyósi területen kijuttatott hatóanyag mennyiségének éves átlagai



21. ábra. Az újkígyósi területen kijuttatott szerves trágya mennyiségek éves átlagai

A *DISNIT2* modell alapkonceptiója szerint leírja a mezőgazdasági tábla víz- és nitrogén forgalmát. A modell eredeti változata a vízforgalom számításakor feltételezte, hogy a napi csapadékból a párolgási veszteséget követően csak annyi szivárog be a talajba, amennyi a talaj felső rétegének pillanatnyi befogadóképessége alapján maximálisan számításba vehető. Amennyiben a napi csapadék mennyisége ezt az értéket meghalad-

ja, a különbséget felszíni lefolyásnak tekinti a program és feltételezi, hogy ez a mennyiség el is folyik a tábláról.



22. ábra. Számított talajvízszintek az újkígyósi 1-4. talajszelvényben (1980-89)

A *DISNIT2* modellel végzett számításokban, figyelemmel a területi lefolyás természetére és az alsó perem fluxus értékének pontosabb számítása érdekében, módosítottam a *DISNIT2* programot. Alternatív számítási lehetőséget építettem be, amely lehetővé teszi a csapadék és a beszivárogó vízmennyiség különbsége a területen maradjon, és a következő napon szivároгjon be a talajba. Vagyis ebben az esetben a feltételezés az, hogy sík terület lévén, nincs a területről elfolyás, csak felszíni tározódás.

Fokozatosan csökkentve az alsó peremnél alkalmazott mélybeszivárgás idősorának értékét, a mért vízállás idősorhoz hasonló trendű számított idősort akkor kaptam, amikor az eredetileg becsült alsó peremfeltétel értékének negyedrészt alkalmaztam. Ennek megfelelően az elfogadott beszivárgás értéke 1980-ban 26.25 mm/év, 1985-ben 35 mm/év és 1989-ben 30 mm/év a referencia szintnek választott 8 m-es mélységben, míg az egyes évek között lineárisan interpolált értéket veszünk figyelembe. Ezen alsó peremfeltételek alkalmazása mellett, valamint a napi csapadékból beszivárogni nem képes felesleg területen maradását feltételezve elvégzett számítások azt mutatták, hogy ekkor is csak néhány cm-rel magasabb számított vízszintet kaptunk. Lényegében nem befolyásolta ez a feltétel a számítási eredményt. Megállapításra került, hogy a vízfogalom számítására az alsó peremfeltétel értéke dominánsan hat.

Nitrát bemosódási vizsgálatok

Az előzőekben meghatározott hidraulikai feltételek mellett végeztem a nitrát bemosódási számításokat. A biztonság javára történő elhanyagolást alkalmaztam, amikor a potenciálisan lehetséges maximum számítása érdekében elhanyagoltam a növényi felvételt és csak a nitrogén átalakulási folyamatokat vettem figyelembe a számításoknál. Mind a felszíni lefolyást, mind a felületi tározódás lehetőségét feltételezve végeztem számításokat. Az eredmények azt mutatták, hogy a "Mezőgazdasági adatok" fejezetben ismertetett éves nitrogén műtrágya kiadagolás, a területre jellemző meteorológiai, talajhidraulikai és beszivárgási körülmények mellett, nem okoz a talajvízre többlet terhelést. A kijuttatott műtrágya a felső 60-150 cm-es zónában halmozódik. A számítási eredmény összhangban van a területen végzett talajkémiai feltáró mérésekkel, melyek alapján szintén a felső max. 1 m-es zónában van felhalmozódás, a talajvízhez közeli szinten pedig 3-6 mg/kg közötti $\text{NO}_3\text{-N}$ értékekkel számolhatunk.

Az 1. talajszelvényű területen két feltáró fúrást végeztünk és ezekből meghatároztuk a $\text{NO}_3\text{-N}$ koncentráció értékeit. A két mérés eltérést mutat a mért koncentrációk nagyságrendjében. Az 1. mérés gyakorlatilag konstans értékű a feltárt 350 cm-es mélységig, kivételt csak a 280 cm-es mélységben vett minta 2.2-es értéke képvisel. A 2. mérés az 50-150 cm rétegben mutat nitrát felhalmozódást. A modell-számítás is erre a mélységi tartományra mutat felhalmozódást. Meg kell jegyezni, hogy a számított idősor lényegesen rövidebb időszakú, mint a területen folytatott gazdálkodás eddigi időtartama. Ez is oka lehet, hogy a számított görbe csúcsa még nem érte el a mérési adatsorokét. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a modell-számításokban alkalmazott egyenletek nem veszik figyelembe a makroporozitásból, inhomogenitásból, gyökér és feregjáratok kialakulásából, a felső 40 cm-re jellemző talajművelésből kialakuló preferenciális folyadékáramlást. Az irodalmi és saját kísérleti tapasztalataink is azt mutatják, hogy bizonyos körülmények (főleg telítetlen talajréteg magas víztartalma, intenzív csapadék) mellett a preferenciális áramlás jelentős lehet.

Összefoglalóként megállapítható volt, hogy a modell-vizsgálatok alapján az 1. talajszelvény típusú területről kb. 25-35 mm/év mélybeszivárgási fluxussal számolhatunk a 8 m-es mélységben figyelembe vett alsó peremnél. A 2. talajszelvény típusnál 10-18 mm/év a mélybeszivárgási fluxus értéke, míg a 3. és 4. területen 0 mm/év érték alkalmazandó a felvett alsó peremnél. A területre kihelyezett nitrogén műtrágya, még az erős biztonsággal alkalmazott számítások szerint sem jut le a talajvízszintig a területre jellemző meteorológiai és beszivárgási viszonyok mellett.

4.3. Klímaváltozás okozta szikesedési folyamatok előrejelzése a SALINEXP rendszerrel

Szenárió analízist végeztem a magyarországi Közép-Tisza vidékére, hogy előre jelezzünk egy valószínű klímaváltozási szenárió hatását a kukorica és búza várható terméshozamára (*Fehér és Rajkai, 1996a; Fehér és Rajkai, 1996b*). A klíma adatok változására azt tételeztük fel, hogy az átlagos léghőmérséklet és – ennek következményeként – a potenciális evapotranspiráció növekedni fog, a csapadék mennyisége csökken és a talajvíz szintje nem fog változni lényegesen.

A 7. táblázatban feltüntettem a térség talajainak jellemző paramétereinek tartományait, míg a 8. táblázat összegzi azt, hogy a különböző klímaváltozási szenáriók mellett milyen változási irányok valószínűsíthetők a talajok jellemző paramétereinek értékéiben. A táblázatban piros színű nyíl jelöli a csökkenő irányú változást, míg zöld színű nyíl a növekvő irányú változást. A változások iránya a szakértői csoport tagjainak átlagos véleményét tükrözi.

A 9. táblázatban a *SALINEXP* szakértői rendszerben alkalmazott szikesedést jellemző négy fő paraméter [(1) max. kicserélhető Na%; (2) a kicserélhető Na% max. értékéke mélységbeli helyzete; (3) az összes sómennyiség a sófelhalmozódási szinten; (4) a sótartalom maximumának mélysége] változási irányait összegeztem különböző klímaváltozási szenáriók esetére. A táblázat tartalmazza a négy legjellemzőbb termesztett növényre (kukorica, búza, repce, napraforgó) a várható átlagos terméshozam változási irányát is. Piros színű nyilakkal megadott változási irányok a szikesedési folyamat növekedését jelentik, illetve a növényi esetében hozamok csökkenését jelölik. A zöld színű nyilakkal megadott változási irányok a szikesedési folyamat csökkenését, illetve a növényi hozamok javulását jelentik.

7. táblázat. A Közép-Tisza vidéken szikesedésnek kitett talajok jellemző paramétereinek tartományai

Kód	Paraméter	Mértékegység	Talajok				
A. TALAJJELLEMZŐK							
A.1	Talaj típusa	[szöveges]	réti szolonyec	réti szolonyec	réti szolonyec	réti talaj	réti csernozjom
A.2	Talaj altípusa	[szöveges]	közepes	mély	sztyeppesedő	szolonyeces	mélyben sós
A.3	A kicserélhető Na% max. mélysége a B horizonton	[cm]	10 - 30	15 - 40	30 - 60	30 - 40	80 - 120
A.4	Kation kicserélési kapacitás	[mg eé/100 g]	20 - 40	20 - 40	20 - 40	25 - 40	20 - 30
A.5	Textúra	[szöveges]	agyagos vályog	agyagos vályog	agyagos vályog	vályogos agyag	vályog
A.6	Humusz tartalom	[%]	1.5 - 2.0	1.5 - 2.0	1.5 - 3.0	2 - 4	2.5 - 5.0
A.7	Térfogattömeg	[g/cm³]	1.4 - 1.6	1.4 - 1.6	1.4 - 1.6	1.3 - 1.45	1.3 - 1.45
A.8	Hidraulikus vezetőképesség	[cm/d]	< 0.01	< 0.1	< 1.0	< 1.0	1 - 10
A.9	Max. kicserélhető Na% a B horizonton	[%]	25 - 70	25 - 65	25 - 40	5 - 15	1 - 5
A.10	Összes sótartalom	[%]	0.2 - 0.7	0.2 - 0.7	0.1 - 0.4	0.05 - 0.2	0.05 - 0.2
A.11	A sótartalom maximumának mélysége	[cm]	25 - 50	50 - 70	70 - 140	50 - 100	100 - 150
A.12	pH a B horizonton	[-]	> 8.5	7.5 - 9.0	7.5 - 9.0	7.5 - 8.5	7.0 - 8.0
A.13	Kritikus talajvíz mélység	[cm]	számított	számított	számított	számított	számított
A.14	Összes porozitás	[térf. %]	55 - 65	50 - 60	50 - 60	50 - 55	45 - 50
A.15	Vízkapacitási víztartalom	[térf. %]	40 - 45	35 - 40	35 - 40	40 - 45	35 - 40
A.16	Hervadási pont víztartalma	[térf. %]	30 - 35	25 - 30	25 - 30	30 - 35	20 - 25
B. TALAJVÍZ JELLEMZŐK							
B.1.	Átlagos talajvízmélység	[cm]	100 - 200	150 - 250	200 - 300	300 - 400	300 - 500
B.2	A talajvízszint éves ingadozása	[cm]	80 - 120	80 - 120	100 - 120	100 - 120	60 - 80
B.3	A talajvíz összes sótartalma	[mS/cm]	3 - 8	3 - 8	2 - 7	1 - 5	1 - 5
B.4	A talajvíz Na%-a	[%]					
B.5	A talajvíz SAR értéke	[mg eé/l ^{1/2}]	0.5 - 4.0	0.5 - 4.0	1.5 - 2.5	0.5 - 2.0	0.5 - 2.0
B.6	A talajvíz pH-ja	[-]	> 8.5	8.0 - 8.5	7.5 - 8.5	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0

8. táblázat. Talajok szikesedési paramétereinek változása különböző klímaváltozási scenáriók esetében

			Klímaváltozási scenáriók					
			1	2	3	4	5	6
C.1 Léghő-mérséklet			Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C
C.2 Pot. evapotransp.			Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	+ 25%	+ 25%	+ 25%
C.3 Csapadék			Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	- 25%	- 25% és öntözés	- 25% és öntözés
C.4 Talajvíz mélysége			Nincs változás	Növekszik	Csökken	Nincs változás	Nincs változás	Növekszik
A.1	Talaj típusa	[szöveges]	—	—	—	—	—	—
A.2	Talaj altípusa	[szöveges]	—	—	—	—	—	—
A.3	A kicserélhető Na% max. mélysége a B horizonton	[cm]	—	↘	↗	—	—	↘
A.4	Kation kicserélési kapacitás	[mg eé/100 g]	—	—	—	—	—	—
A.5	Textúra	[szöveges]	—	—	—	—	—	—
A.6	Humusztartalom	[%]	—	↘	↗	↘	—	↘
A.7	Térfogattömeg	[g/cm ³]	—	↗	↘	—	—	↗
A.8	Hidraulikus vezetőképesség	[cm/d]	—	↘	↗	—	—	↘
A.9	Max. kicserélhető Na% a B horizonton	[%]	—	↗	↘	—	—	↗
A.10	Összes sótartalom	[%]	—	↗	↘	—	—	↗
A.11	A sótartalom maximumának mélysége	[cm]	—	↘	↗	—	—	↘
A.12	pH a B horizonton	[-]	—	↗	↘	—	—	↗
A.13	Kritikus talajvíz mélység	[cm]	—	—	—	↗	—	—
A.14	Összes porozitás	[térf. %]	—	↗	↘	—	—	↗
A.15	Vízkapacitási víztartalom	[térf. %]	—	↗	↘	—	—	—
A.16	Hervadási pont víztartalma	[térf. %]	—	↗	↘	—	—	—
B.1	Átlagos talajvízmélység	[cm]	—	↗	↘	—	—	↗
B.2	A talajvízszint éves ingadozása	[cm]	—	↘	↗	—	—	↘
B.3	A talajvíz összes sótartalma	[mS/cm]	—	magas	magas	—	—	magas
B.4	A talajvíz Na%-a	[%]	—	magas	magas	—	—	magas
B.5	A talajvíz SAR értéke	[mg eé/l ^{1/2}]	—	magas	magas	—	—	magas
B.6	A talajvíz pH értéke	[-]	—	magas	magas	—	—	magas
D.1	A termesztett növény	[szöveges]	—	kevesebb típus	több típus	kevesebb típus	több típus	kevesebb típus
D.2	Átlagos várható terméshozam	[t/év]	—	↘	↗	↘	↗	↘
E.1	Éves átlagos öntözés	[mm/év]	—	—	—	—	↗	↗

Jelmagyarázat: — = Nincs változás; ↘ = Csökkenés; ↗ = Növekedés.

8. táblázat (folytatás)

			Klimaváltozás szcenárió				
			7	8	9	10	11
		C.1 Léghőmérséklet	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	Nincs változás	Nincs változás
		C.2 Pot. evapotranspiráció	+ 25%	+ 25%	+ 25%	Enyhén növekszik	Enyhén növekszik
		C.3 Csapadék	Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	+ 25%	+ 25%
		C.4 Talajvíz mélysége	Nincs változás	Csökken	Növekszik	Növekszik	Csökken
A.1	Talaj típusa	[szöveges]	–	–	–	–	–
A.2	Talaj altípusa	[szöveges]	–	–	–	–	–
A.3	A kicserélhető Na% max. mélysége a B horizonton	[cm]	–	–	↘	↘	↗
A.4	Kation kicserélési kapacitás	[mg eé/100 g]	–	–	–	–	–
A.5	Textúra	[szöveges]	–	–	–	–	–
A.6	Humusztartalom	[%]	–	–	↘	↘	↗
A.7	Térfogattömeg	[g/cm³]	–	↘	↗	↗	↘
A.8	Hidraulikus vezetőképesség	[cm/d]	–	↗	↘	↘	↗
A.9	Max. kicserélhető Na% a B horizonton	[%]	–	↘	↗	↗	↘
A.10	Összes sótartalom	[%]	–	⊖	↗	↗	↘
A.11	A sótartalom maximumának mélysége	[cm]	–	↗	↘	↘	↗
A.12	pH a B horizonton	[-]	–	–	↗	↗	↘
A.13	Kritikus talajvíz mélység	[cm]	–	–	–	–	–
A.14	Összes porozitás	[térf. %]	–	↘	↗	↗	↘
A.15	Vízkapacitási víztartalom	[térf. %]	–	↘	↗	↗	↘
A.16	Hervadási pont víztartalma	[térf. %]	–	↘	↗	↗	↘
B.1	Átlagos talajvízmélység	[cm]	–	↘	↗	↗	↘
B.2	A talajvízszint éves ingadozása	[cm]	↘	↘	↗	↗	↘
B.3	A talajvíz összes sótartalma	[mS/cm]	–	–	magas	magas	–
B.4	A talajvíz Na%-a	[%]	–	–	magas	magas	–
B.5	A talajvíz SAR értéke	[mg eé/l ^{1/2}]	–	–	magas	magas	–
B.6	A talajvíz pH értéke	[-]	–	–	magas	magas	–
D.1	A termesztett növény	[szöveges]	kevesebb típus	–	több típus	több típus	kevesebb típus
D.2	Átlagos várható terméshozam	[t/év]	↘	–	↗	↗	↗
E.1	Éves átlagos öntözés	[mm/év]					

Jelmagyarázat: – = Nincs változás; ↘ = Csökkenés; ↗ = Növekedés.

9. táblázat. A SALINEXP szakértői rendszer által megadott szikesedés változási irányok különböző klímaváltozási scenáriók esetében

		Klimaváltozási scenáriók					
		1	2	3	4	5	6
	C.1 Léghőmérséklet	Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C
	C.2 Pot. evapo-transp.	Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	+ 25%	+ 25%	+ 25%
	C.3 Csapadék	Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	- 25%	- 25% és öntözés	- 25% és öntözés
	C.4 Talajvíz mélysége	Nincs változás	Növekszik	Csökken	Nincs változás	Nincs változás	Növekszik
OV.1 (A.9)	Változás a kicserélhető Na%-ban	–	↗	↘	–	–	↗
OV.2 (A.3)	Változás a kicserélhető Na% max. értéke mélységbeli helyzetében	–	↘	↗	–	–	↘
OV.3 (A.10)	Változás az összes sómennyiségben a sófelhalmozási szinten	–	↗	↘	–	–	↗
OV.4 (A.11)	Változás az összes sótartalom mélységében	–	↘	↗	–	–	↘
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban, (kukorica)	–	↘	↗	↘	↗	↘
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (búza)	–	–	↗	–	↗	–
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (repce)	–	–	↗	–	↗	–
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (napraforgó)	–	–	↗	↘	↗	–

		Klimaváltozás scenárió				
		7	8	9	10	11
	C.1 Léghőmérséklet	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	+ 2,5 °C	Nincs változás	Nincs változás
	C.2 Pot. evapo-transpiráció	+ 25%	+ 25%	+ 25%	Enyhén növekszik	Enyhén növekszik
	C.3 Csapadék	Nincs változás	Nincs változás	Nincs változás	+ 25%	+ 25%
	C.4 Talajvíz mélysége	Nincs változás	Növekszik	Csökken	Növekszik	Csökken
OV.1 (A.9)	Változás a max. kicserélhető Na%-ban	–	↘	↗	↗	↘
OV.2 (A.3)	Változás a kicserélhető Na% max. értéke mélységbeli helyzetében	–	–	↘	↘	↗
OV.3 (A.10)	Változás az összes sómennyiségben a sófelhalmozódási szinten	–	–	↗	↗	↘
OV.4 (A.11)	Változás az összes sótartalom mélységében	–	↗	↘	↘	↗
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (kukorica)	↘	↘	↘	↘	↗
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (búza)	–	–	–	–	↗
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (repce)	–	–	–	–	↗
OV.5 (D.2)	Változás a várható átlagos hozamban (napraforgó)	–	↘	–	–	↗

Jelmagyarázat: – = Nincs változás; **Piros** színű nyilakkal megadott változási irányok a szikesedési folyamat növekedését, illetve a növényi hozamok csökkenését jelentik. **Zöld** színű nyilakkal megadott változási irányok a szikesedési folyamat csökkenését, illetve a növényi hozamok javulását jelentik. A **telt színű** nyilak az igen intenzív változást jelentik.

A szöveges értékelés a célváltozók változási irányairól a következő:

Az 1. scenárió bekövetkezése esetében, amely szerint a jelenlegi klimatikus viszonyok és a talajvízszint jellemzők nem változnak, ennek következtében nem lesz változás a szikesedés mértékében, és a termés hozam kockázatok sem változnak.

Ha a 2. scenárió következne be, amikor csak a talajvízszint emelkedik meg, viszont nem változnak a klíma paraméterek, a következő változások várhatóak: a szikesedési szint növekszik a talajprofilban. A növénytermesztési feltételek romlanak, elsősorban a kukorica esetében, míg a búza, repce és napraforgó termés hozamában lényeges változás nem valószínűsíthető. (A szikesedési és növénytermesztési feltételekben beálló változások csak sós talajvíz esetében érvényesek.)

A 3. scenárió esetében, mivel a talajvízszint csökken, de nem változnak a klíma paraméterek, a változások várható irányai szerint a szikesedés szintje csökken a talajprofilban. Ennek következtében a növénytermesztési feltételek javulnak mind a négy vizsgált növény esetében. (A szikesedési és növénytermesztési feltételekben beálló változások csak sós talajvizek esetében érvényesek.)

A 4. scenárió szerint a tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és potenciális evapotranspiráció növekszik, a tenyészidőszaki átlagos csapadék csökken, de az átlagos talajvízszint nem változik. A változások várható iránya: a szikesedési szint nem változik, vagy legfeljebb nagyon enyhén növekszik. A növénytermesztési feltételek a csapadékigényesebb kukorica és napraforgó esetében romlanak, míg búza és repce esetében nem változik a hozamvárakozás.

Az 5. scenárió feltételezi, hogy a tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekszik. A tenyészidőszaki csapadék csökken, de a csapadék csökkenését öntözéssel pótolják. A talajvízszint átlagos értéke nem változik. Ezek együttes hatásaként a változások várható iránya, hogy a szikesedés szintje nem változik, ugyanakkor a növénytermesztési potenciál javulni fog. Több fajta növényt lehet az adott talajon termeszteni és a várható hozamok magasabbak lesznek mind a négy vizsgált növény esetében.

A 6. scenárió hasonló, mint az 5. változat, vagyis a tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekedni fog, a tenyészidőszaki átlagos csapadék csökken, de a csökkenést az öntözéssel kompenzálják. Viszont az átlagos talajvíz szintje emelkedni fog. A változások várható hatása: A szikesedés szintje növekedni fog, ha a talajvíz sós. A növénytermesztési potenciál csökkenni fog kukori-

cára, de alig változik búzára, repcére és napraforgóra. Ugyanakkor kevesebb növénytypust lehet termesztetni és ezek várható hozamai valamivel alacsonyabbak lesznek.

- A 7. scenárió esetében a tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekszik, a csapadék és a talajvíz átlagos szintje nem változik. A változások várható iránya azt mutatja, hogy a szikesedés szintje nem változik, de a növénytermesztési potenciál inkább csökkeni fog. Kevesebb növénytypust lehet termesztetni és a várható hozamok is alacsonyabbak lesznek.
- A 8. scenárió szerint a tenyészidőszak átlagos léghőmérséklete és a potenciális evapotranspirációja növekedni fog, de a csapadék átlagos értéke nem változik. A talajvíz átlagos szintje ugyanakkor csökken. A változások várható iránya alapján a szikesedés szintje csökkeni fog. (A csökkenés kevésbé intenzív, mint a 3. scenárió esetében). Általánosságban a növénytermesztési potenciál nem változik, de kukorica és napraforgó esetében enyhe csökkenés valószínűsíthető.
- A 9. scenárió hasonló, mint a 8., vagyis a tenyészidőszak átlagos léghőmérséklete és a potenciális evapotranspirációja növekedni fog, a csapadék átlagos értéke nem változik. Viszont itt a talajvíz átlagos szintje emelkedik. A változások összhatásaként a szikesedés szintje intenzíven növekedni fog. (A növekedés sokkal intenzívebb lesz, mint a 2. scenárió esetében.) A növénytermesztési potenciál nem változik, a kukorica esetében erős csökkenés valószínűsített.
- A 10. scenárió: A tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet nem változik, a csapadék átlagos értéke növekszik. A potenciális evapotranspiráció valószínűleg kis mértékben növekszik. A talajvízszint emelkedik. A változások várható iránya: a szikesedési szint növekszik a talajprofilban. (A hatás hasonló a 2. scenárióhoz.) A növénytermesztési potenciál csökken.
- A 11. scenárió szerint a tenyészidőszaki átlagos léghőmérséklet nem változik, de a csapadék növekedni fog. A potenciális evapotranspiráció valószínűleg kis mértékben növekszik. A talajvízszint átlagos szintje csökken. A változások várható iránya: a szikesedés szintje intenzíven csökken a talajprofilban. (A csökkenő hatás sokkal intenzívebb, mint a 3. scenárió esetében). A növénytermesztési potenciál intenzíven javulni fog.

4.3.1. A SALINEXP alkalmazása a Közép-Tisza vidékére

A SALINEXP szakértői rendszert futtattam a Közép-Tisza vidéki talajokra. A 10. táblázat bemutatja az egyik vizsgált esetre a bemenő adatokat.

A talajjellemzők csoportjába 16 tulajdonság tartozik. Nem feltétlenül szükséges minden talajjellemző megadása. A szakértői rendszer részlegesen kitöltött input táblázattal is működhet, azonban hibajelzést ad, ha olyan lényeges talajtulajdonság hiányzik, mint amilyen pl. a talaj típusa, vagy az annak azonosításához szükséges jellemzők értéke.

10. táblázat. A SALINEXP rendszer input fájl szerkezete a vizsgált esetre

a) Fő cím (maximum 60 karakter)	
b) Hely neve (maximum 37 karakter)	
c) Tábla neve (maximum 37 karakter)	
A. TALAJ JELLEMZŐK	
A.1 Talajtípus	Réti szolonyec
A.2 Talaj altípus	Mély
A.3 A kicserélhető Na _{max} mélysége [cm]	40.00
A.4 Kation kicserélési kapacitás [mg eé/100 g]	30.00
A.5 Textúra	agyagos vályog
A.6 Humusz tartalom [%]	2.50
A.7 Térfogattömeg [g/cm ³]	1.40
A.8 B szint hidraulikus vezetőképessége	0.20
A.9 Kicserélhető Na _{max} a B szinten [%]	30.00
A.10 Összes sótartalom [%]	0.23
A.11 A sótartalom max. mélysége [cm]	60.00
A.12 pH a B szinten [-]	8.50
A.13 Kritikus talajvíz mélység [cm]	350.00
A.14 Összes porozitás [%]	45.00
A.15 Vízkapacitási víztartalom [%]	40.00
A.16 Hervadási pont víztartalma [%]	35.10
B. TALAJVÍZ JELLEMZŐK	
B.1 Átlagos talajvízmélység [cm]	140.00
B.2 A talajvízszint éves ingadozása [cm]	100.00
B.3 A talajvíz összes sótartalma [mS/cm]	4.00
B.4. A talajvíz Na%-a [%]	65.00
B.5. A talajvíz SAR értéke [mg eé/l ^{1/2}]	5.29
B.6. A talajvíz pH értéke [-]	7.80
C. ÉGHAJLATI JELLEMZŐK	
C.1 Átlagos évi középhőmérséklet [°C]	10.50
C.2. Átlagos pot. evapotranspiráció [mm/év]	790.00
C.3 Átlagos csapadék [mm/év]	580.00
D. NÖVÉNYI JELLEMZŐK	
D.1 A termesztett növény	Kukorica
D.2 Átlagos várható termés [t/ha]	6.00
E. ÖNTÖZÉS	
E.1 Éves átlagos öntözés [mm/év]	120.00
F. ÉGHAJLATI VÁLTOZÁS JELLEMZŐK	
F.1 A léghőmérséklet változása [°C]	2.00
F.2 Átlagos pot. evapotranspiráció változás [%]	10.00
F.3 Átlagos csapadék változás [%]	0.00
G. TALAJVÍZ VÁLTOZÁS	
G.1 Talajvízszint változás [cm]	- 40.00

A talajvíz (B) paramétercsoportban 6 jellemző található. A leglényegesebb ezek közül a talajvíz átlagos mélysége, amely egyben a talajtípus egyik jellemzője.

A három *éghajlati jellemző* (C) kezdeti értéke szintén informatív a változások azonosítása szempontjából.

A *termesztett növény* (D) és az *öntözővíz* (E) *jellemzők* akkor fontosak, ha a felhasználó a növénytermesztési potenciálra is becslést kíván kapni.

Az éghajlatváltozás jellemzőinek megadását nem lehet kihagyni. Amennyiben megadásuk elmarad, a program nem fut le, és hibaüzenet keletkezik.

Fontos arra is ügyelni, hogy a paraméterek értékei a megadott mértékegységben szerepeljenek. Ellenkező esetben a program futása téves eredményeket szolgáltat.

Eredmény fájl

Az Eredmény fájl tartalma három részre osztható, úgymint *I. Helyi adatok*, *II. Az előrejelzés eredménye*; *III. Az objektív változók összegzése*. A 11. táblázat szemlélteti a vizsgált esetre a rendszer által szolgáltatott eredményeket.

A rendszer futtatása alapján a Közép-Tisza vidékét jellemző talajokra az előrejelzés a klímaváltozási esetek legtöbbjében a következőképpen alakult:

- a szikesedés szintje csak kis mértékben növekszik, de a növénytermesztési potenciál csökkenni fog;
- a régió talajai esetében a szikesedést jellemző állapotváltozókban nem lesz szignifikáns változás;
- a várható növénytermesztési potenciálban csökkenés fog bekövetkezni a vízhiány és a talajnedvesség csökkenése következtében. Ezt kompenzálni lehet öntözéssel, de ez megnöveli a termesztési költségeket valamint növeli a talajok másodlagos szikesedésének a valószínűségét.

11. táblázat. A SALINEXP rendszer eredmény fájlja a vizsgált esetre

I. HELY ADATOK			
b) Helység	= Hely neve (maximum 37 karakter)		
c) Tábla neve	= Tábla neve (maximum 37 karakter)		
C. ÉGHAJLATI JELLEMZŐK	Kezdeti érték	Változások iránya	
C.1 Átlagos évi léghőmérséklet [°C]	10.50		
C.2 Átlagos évi pot. evapotranspiráció [mm]	790.00		
C.3 Átlagos évi csapadék [mm]	580.00		
F. ÉGHAJLATI VÁLTOZÁSOK			
F.1 Átlagos évi léghőm. változás [°C]	2.00		
F.2 Átlagos évi pot. ET változás [%]	10.00		
F.3 Átlagos évi csapadék változás [%]	0.00		
G. TALAJVÍZ VÁLTOZÁS			
G.1 Átlagos talajvízszint változás [cm]	- 40.00		
II. A SALINEXP ELŐREJELZÉSI EREDMÉNYE			
A. TALAJJELLEMZŐK			
A.1. Talaj típusa	Réti szolonyec		
A.2. Talaj altípus	Mély		
A.3. A kicserélhető Na _{max} mélysége [cm]	40.00	Csökken	↘
A.4. Kation kicserélési kapacitás [mg eé/100 g talaj]	30.00		
A.5. Textúra	Agyagos-vályog		
A.6. Humusz tartalom [%]	2.50	Csökken	↘
A.7. Térfogattömeg [g/cm ³]	1.40	Nő	↗
A.8. B szint hidraulikus vezetőképessége [cm/nap]	0.20	Csökken	↘
A.9. Kicserélhető Na _{max} a B szinten [%]	30.00	Nő	↗
A.10. Összes sótartalom [%]	0.23	Nő	↗
A.11. A sótartalom max. mélysége [cm]	60.00	Csökken	↘
A.12. pH a B szinten [-]	8.50	Nő	↗
A.13. Kritikus talajvíz mélység [cm]	350.00		
A.14. Összes porozitás [%]	45.00	Nő	↗
A.15. Vízkapacitási víztartalom [%]	40.00	Nő	↗
A.16. Hervadási pont víztartalma [%]	35.10	Nő	↗
B. TALAJVÍZ PARAMÉTEREK			
B.1. Átlagos talajvízmélység [cm]	140.00	Nő	↗
B.2. A talajvízszint éves ingadozása [cm]	100.00		
B.3. A talajvíz összes sótartalma [mS/cm]	4.00		
B.4. A talajvíz Na%-a [%]	65.00		
B.5. A talajvíz SAR értéke [mg eé/l ^{1/2}]	5.29		
B.6. A talajvíz pH értéke [-]	7.80		
D. NÖVÉNYI JELLEMZŐK			
D.1. Termesztett növény	Kukorica		
D.2. Átlagos várható terméshozam [t/ha]	6.00	Csökken	↘
E. ÖNTÖZŐVÍZ			
E.1. Éves átlagos öntözés [mm/év]	120.00		
Jelmagyarázat: Üres = Nincs változás			
III. AZ OBJEKTÍV VÁLTOZÓK ÖSSZEGZÉSE			
a) Változás a B szint kicserélhető Na % maximumában	NŐ		↗
b) Változás a kicserélhető Na% _{max} mélységében	CSÖKKEN		↘
c) Változás az összes sótartalomban	NŐ		↗
d) Változás az összes sótartalom mélységében	CSÖKKEN		↘
e) Változás a termésmennyiségben	CSÖKKEN		↘
IV. AZ EREDMÉNYEK SZÓBELI ÉRTÉKELESE			
a) Éghajlat változás: Az átlagos léghőmérséklet és a potenciális evapotranspiráció növekedni fog. A csapadék nem változik. A talajvízszint emelkedni fog.			
b) A változások várható iránya: A szikesség mértéke jelentősen növekszik. A növénytermesztési potenciál csökken.			

5. ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1) Doktori értekezésemben áttekintettem a döntéstámogató rendszerek általános felépítését, fő elemeit és alkalmazásait az agrárkörnyezetvédelem területén vízvédelmi célok eléréséhez. Bemutattam, hogy a vízvédelmi célú döntéstámogató rendszerek miként hasznosítják a matematikai és a nem matematikai (verbális) formában megfogalmazott tudást, szakmai ismereteket, melyek hasznos elemei lehetnek a döntési folyamatnak. Kimutattam, hogy szabály alapú tudásbázis szükséges eleme kell legyen a szakértői rendszereknek, azon összefüggéseknek, amelyek matematikai formában nem adhatók meg.

2) Szabályrendszer algoritmust dolgoztam ki a telítetlen talajzónában lejátszódó oldat-transzport folyamatok leírását adó modellek kiválasztásának optimalizálására. Az algoritmus alapján modell-kiválasztási szakértői rendszert dolgoztam ki (*EXSOLUTE*), amely segíteni tudja a felhasználót determinisztikus oldat-transzport modell(ek) meghatározásában speciális problémára, függően a telítetlen talajréteg(ek) talajfizikai tulajdonságaitól, a modellezési probléma geometriájától, a modellezendő anyag jellemzőitől, valamint a figyelembe veendő kezdeti és peremfeltételektől.

3) A telítetlen talajzónában lejátszódó oldat-transzport folyamatok modellezésében mezőgazdasági táblaszintű, menedzsment célú, a nitrát bemosódását leíró modell-struktúrát fejlesztettem ki, amely alkalmas napi léptékben számolni a mezőgazdasági táblára kihegyezett szerves trágyából és műtrágyából a nitrát talajba történő bemosódásának folyamatát, figyelemmel a táblára hulló csapadék (eső vagy hó) beszívargására, illetve felszínen történő tározódására vagy lefolyására (*DISNIT2* modell).

4) A kifejlesztett *DISNIT2* modell alkalmazhatóságának értékelésére szimulációs vizsgálatokat végeztem három eltérő jellegű, fokozatosan összetettebb problémakörre. Az első esetben bolygatatlan talajmonolitikon laboratóriumi körülmények között beállított vízfogalmi és nitrát bemosódási kísérletek eredménye alapján számítottam a talajoszlopokban a víztartalom és nitrát koncentráció változását, illetve az oszlopok alján elfolyt mennyiségeket. Megállapítható volt, hogy az oszlopkísérletekben szimulált körülmények jó közelítéssel megfeleltek a magyarországi télvégi, tavasz eleji kondícióknak, amikor a talaj magas, akár telítés közeli víztartalommal rendelkezik, hóolvadásból vagy

csapadékból további beszivárgás lehetséges. A mérések és a modell szimuláció is bizonyította, hogy vályogos homoktalajok esetében akár két jelentősebb csapadékesemény is már 60-80 cm mélyre tudja lejuttatni a felszínre kihelyezett nitrát hatóanyag jelentős részét, míg a nitrát bemosódás frontja akár 120-150 cm mélyre is lejuthat.

5) A második esetben a Püspökszilágy térségében található talajokban lejátszódó beszivárgási folyamat sebességének meghatározását végeztem el. A csapadék tríciumkoncentrációja több évtizedes idősorának felhasználásával modell számítási analízist végeztem. Megállapítottam a talajprofil jellemző rétegek tríciumra vonatkozó diszperziós tényezőit. A diszperziós tényezők alapján modellezhető volt 38 éves időszakra a beszivárgási front lefelé történő mozgásának mértéke. Megállapítottam, hogy a beszivárgási front 910 cm mélyre juthat le és a 38 éves időtartamon belül elkülöníthetők voltak – 10 éves időszakonként, a meteorológiai viszonyoktól függően - az eltérő beszivárgási sebességű időszakok.

6) A harmadik esetben, a kifejlesztett modellel a Dél-Alföldön található Újkígyósi felszín alatti vízbázis területére folytatott vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy hosszú időszakot figyelembe véve, a mezőgazdasági szerves trágya és műtrágyahasználatból származó nitrát nem okoz a felszín alatti vízkészletre többlet-terhelést a területre jellemző meteorológiai, talajhidraulikai és beszivárgási körülmények mellett. A felszínre kijuttatott szerves- és műtrágyából a nitrát a felső 60-150 cm-es zónába halmozódik fel.

7) Meghatároztam a klímaváltozás hatására, a különböző talajtípusokban bekövetkező szikesedési mérték változásának előrejelzésére, szakértői csoport tagjaitól kérdőíves felméréssel kapott válaszok alapján meghatározott talajprofil szikesedést jellemző paraméterek és a várható terméshozamot legjobban befolyásoló független paraméterek (kicserélhető N%, a kicserélhető N% mélysége, az összes sómennyiség változása a sófelhalmozódási szinten, az összes sótartalom mélységbeli helyváltozása) szakértői rendszerben történő alkalmazhatósági módját.

8) Összefüggésrendszert határoztam meg kérdőíves felméréssel, szakértői csoport tagjaitól kapott válaszok alapján, hogy 11 klímaváltozási scenárió esetében miként változ-

nak a talajok szikesedési szintjei, valamint miként változnak a szikesedés változás hatásként a területen termesztett legfontosabb szántóföldi növények (kukorica, búza, repce és napraforgó) várható átlagos terméshezamai. A megállapított összefüggésrendszer alapján szakértői programot fejlesztettem (*SALINEXP*), amely meg tudja adni a klímaváltozási scenáriók eseteiben várható szikesedési változás növekvő vagy csökkenő irányát, valamint erősségét.

9) A kidolgozott (*SALINEXP*) szakértői rendszerrel a Közép-Tisza vidékét jellemző talajokra készített előrejelzés szerint a klímaváltozási esetek legtöbbjében:

- a szikesedés szintje csak kis mértékben növekszik, de a növénytermesztési potenciál csökkeni fog;
- a régió talajai esetében a szikesedést jellemző állapotváltozókban nem lesz szignifikáns változás;
- a várható növénytermesztési potenciálban csökkenés fog bekövetkezni a vízhiány és a talajnedvesség csökkenése következtében. Ezt kompenzálni lehet öntözéssel, de ez megnöveli a termesztési költségeket valamint növeli a talajok másodlagos szikesedésének a valószínűségét.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A személyi számítógépek megjelenésével korábban soha nem látott mértékben megnövekedett a bonyolult, komplex természeti és társadalmi jelenségek vizsgálatának, modellezésének lehetősége. A számítógép alapú modellek mind komplexebb kifejlesztése, döntést segítő tudásbázissal, valamint interaktív felhasználói felülettel való kiegészítése döntéstámogató rendszerekhez (DTR) vezetnek. Közös céljuk a DTR-eknek, függetlenül attól milyen megvalósítási keretet, módszertant vagy technológiát alkalmaznak, hogy időben megfelelő információt szolgáltatassanak az adott tárgykörben, és az adott döntési szintre vonatkozóan a döntéshozók számára. Doktori értekezésemben áttekin tettem a döntéstámogató rendszerek általános felépítését, fő elemeit és alkalmazásait az agrárkörnyezetvédelem területén vízvédelmi célok eléréséhez. Bemutattam, hogy a vízvédelmi célú döntéstámogató rendszerek miként tudják hasznosítani a matematikai és a nem matematikai (verbális) formában megfogalmazott tudást, szakmai ismereteket, melyek hasznos elemei lehetnek a döntési folyamatnak.

Doktori értekezésem vezető motívuma, kutatási célkitűzése és eredménye a klímaváltozás hatására a különböző talajtípusokban bekövetkező szikesedési mérték változásának előrejelzésére kidolgozott paraméterrendszer és szabályrendszer, valamint ezek szakértői rendszerbe történő megvalósítása. Mivel ehhez a szükséges anyag és eszközrendszerként a szakértői rendszer kifejlesztésének anyag és módszertanát kell alkalmazni, ezért azt az utat választottam, hogy

- (1) egyrészt beillesztettem a feladatot egy szélesebb szakmai feladatkörbe. Megvizsgáltam milyen vízvédelmi célú döntéstámogató rendszereket dolgoztak ki, és ezeket miként lehet az agrárkörnyezetvédelemben felhasználni;
- (2) megvizsgáltam, hogy az alkalmazott döntéstámogató rendszerek (DTR) általános felépítésében támaszkodnak-e a szakértői rendszerek alkalmazására.
- (3) bemutattam a szakértői rendszerek főbb tulajdonságait, és hogy milyen feladattípusra alkalmazzák az agrárkörnyezetvédelemben;
- (4) rámutattam arra, hogy a DTR-eken belül a szakértői rendszer(ek) kifejlesztése nem egyszemélyes feladat, csapatmunkában lehetséges csak elvégezni, és ebben a struktúrában a tudásmérnöknek speciális szerepe van. A tudásmérnök a felelős a szakértői rendszerben megfogalmazott célok megvalósításához szükséges tudás és ismeret összeszerkesztéséért, tudásbázisba foglalásáért, majd a tudásbázis

alapján a szakértői rendszer döntési mechanizmusának működését biztosító szabályrendszer kidolgozásáért és beprogramozásáért.

Doktori értekezésem felépítésében követi kutatásaim időrendjét, egymásra épülését. Fő kutatási célkitűzésként a talajok szikesedésének változását vizsgáltam a klímaváltozás hatására és szabályrendszert dolgoztam ki a folyamatok előrejelzésére - a tématerületen szakértői, kutatói munkát végző kiemelkedő szakemberek álláspontjának elemzése alapján. Ahhoz, hogy tudásmérnökként a kitűzött célt meg tudjam valósítani, előzetes tárgykörbeli ismeretekre volt szükségem. Az értekezésemben tárgyalt kiegészítő kutatási célokhoz kapcsoló kutatási eredmények bemutatásával bizonyítom előzetes felkészültségemet a tudásmérnöki feladatra.

Első kutatási területként a vízvédelmi célokhoz kapcsolódó, az agrárkörnyezetvédelemben is fontos folyamatokkal, a talajokban, a talajok telítetlen talajzónájában lejátszódó oldattranszport folyamatokkal és azok matematikai modellezésével foglalkoztam. Szabályrendszer algoritmust dolgoztam ki a telítetlen talajzónában lejátszódó oldattranszport folyamatok leírását adó modellek kiválasztásának optimalizálására. Bemutattam egy szakértői rendszert (*EXSOLUTE*), amely segíteni tudja a felhasználót determinisztikus oldat-transzport modell(ek) kiválasztásában adott speciális problémára.

Az első kutatási terület folytatásaként a telítetlen talajzónában lejátszódó oldattranszport folyamatok modellezésében mezőgazdasági táblaszintű, menedzsment célú, a nitrát bemosódást leíró modellstruktúrát fejlesztettem ki, amely alkalmas napi léptékben számolni a mezőgazdasági táblára kihelyezett szerves trágyából és műtrágyából származó nitrát talajba történő bemosódásának folyamatát, figyelemmel a táblára hulló csapadék (eső vagy hó) beszivárgására, illetve felszínen történő tározódására vagy lefolyására (*DISNIT2* modell).

A kifejlesztett *DISNIT2* modell alkalmazhatóságának értékelésére szimulációs vizsgálatokat végeztem három eltérő jellegű, fokozatosan összetettebb problémakörre. Az első esetben bolygatatlan talajmonolitikon laboratóriumi körülmények között beállított vízfogalmi és nitrát bemosódási kísérletek eredménye alapján számítottam a talajoszlopokban a víztartalom és nitrát koncentráció változását, illetve az oszlopok alján elfolyt

mennyiségeket. A modell szimulációval is bizonyítottam, hogy vályogos homoktalajok esetében akár két jelentősebb csapadékesemény is már 60-80 cm mélyre tudja lejuttatni a felszínre kihelyezett nitrát hatóanyag jelentős részét, míg a nitrát bemosódás frontja akár 120-150 cm mélyre is lejuthat.

A második esetben a Püspökszilágy térségében található talajokban lejátszódó beszivárgási folyamat sebességének meghatározását végeztem el. A csapadék trícium-koncentrációjának több évtizedes idősorának felhasználásával modell analízist végeztem annak megállapítására, hogy milyen diszperziós tényezők jellemzik az adott anyagra a talajprofilt (a mért és a számított eredmények összevetéséből meghatározott értékek analízise), valamint milyen sebességgel mozog a beszivárgott trícium front, és mikor érheti el a mélyen található telített zónát, utalva ezzel a terület sérülékenysége felszíni szennyezések esetében.

Végül vizsgálatot folytattam a Dél-Alföldön található újkígyósi felszín alatti vízbázis területére annak megállapítására, hogy a mezőgazdasági szerves trágya és műtrágyahasználatból milyen nitrát-terhelés érheti a felszín alatti vízkészletet. Összefoglalóként megállapítható volt, hogy a modell-vizsgálatok alapján az 1. talajszelvény típusú területről kb. 25-35 mm/év mélybeszivárgási fluxussal számolhatunk a 8 m-es mélységben figyelembe vett alsó peremnél. A 2. talajszelvény típusnál 10-18 mm/év a mélybeszivárgási fluxus értéke, míg a 3. és 4. területen 0 mm/év érték alkalmazandó a felvett alsó peremnél. A területre kihelyezett nitrogén műtrágya, még az erős biztonsággal alkalmazott számítások szerint sem jut le a talajvízszintig a területre jellemző meteorológiai és beszivárgási viszonyok mellett.

A fentiekben ismertetett témákban végzett kutatásaim biztosították a háttérrel ahhoz, hogy a disszertációban megfogalmazott fő célkitűzést, a klímaváltozás hatására a különböző talajtípusokban bekövetkező szikesedési mérték változásának előrejelzésére kidolgozott paraméterrendszert és szabályrendszert és ezek szakértői rendszerbe történő megvalósítását ki tudjam dolgozni. Természetesen hangsúlyoznom kell, hogy ehhez egy nagy szakmai tapasztalattal rendelkező kutatócsoport szaktudásának összegzését kellett elvégezni, mint a szakértői rendszer fejlesztésének tudásmérnöke.

A klímaváltozás hatására talajokban bekövetkező szikesedési folyamatok előrejelzésére szolgáló szakértői rendszert (*SALINEXP*) dolgoztam ki. A rendszerben szakértői tudásbázist hoztam létre – kérdőíves felméréssel szakértői csoport tagjaitól kapott válaszok alapján - amelynek során négy kiemelt feladatot kellett megoldani azon célból, hogy előre lehessen jelezni a klímaváltozás hatására a szikes talajok szikesedési szintjének módosulását, valamint e területeken termesztett növények termőképességének változását. (i) Meghatároztam azokat a változókat / paramétereket, amelyek nagymértékben leírják a talaj szikesedésének állapotát; (ii) Meghatároztam azokat a legfontosabb szikesedést jellemző paramétereket, amelyek legnagyobb mértékben befolyásolják a területen termesztett növények várható terméshozamát; (iii) Azonosítottam a klímaváltozási scenáriók jellemző paramétereit; (iv) Tudásbázist és szabályrendszert dolgoztam ki a változók közötti összefüggésekre. Végül számítógépes programot (*SALINEXP*) készítettem a tudásbázisra és szabályrendszerre épülő előrejelzés számítására.

A kidolgozott *SALINEXP* szakértői rendszerrel a Közép-Tisza vidékét jellemző talajokra készített előrejelzés szerint a klímaváltozási esetek legtöbbjében:

- a szikesedés szintje csak kis mértékben növekszik, de a növénytermesztési potenciál csökkenni fog;
- a régió talajai esetében a szikesedést jellemző állapotváltozókban nem lesz szignifikáns változás;
- a várható növénytermesztési potenciálban csökkenés fog bekövetkezni a vízhiány és a talajnedvesség csökkenése következtében. Ezt kompenzálni lehet öntözéssel, de ez megnöveli a termesztési költségeket valamint növeli a talajok másodlagos szikesedésének a valószínűségét.

7. ÖSSZEFOGLALÁS (angolul)

With the presence of personal computers, investigation and modelling opportunities of complicated, complex natural and societal phenomena have been increased to a never before seen level. The development of more and more complex computer based models linked with decision support knowledge bases and framed with interactive user interfaces resulted in decision support systems (DSS). The common objective of the DSSs, independently what performance frame, methodology or technology they use, that they should provide timely suitable information in the given topic, which is relevant to the decision level and decision makers. In the dissertation I have surveyed the general set up of the decision support systems, their main elements and applications in the field of agro-environment protection with focus on water protection. I have presented how the water protection oriented decision support systems can utilize the knowledge, the professional experiences formulated in mathematical and non-mathematical (verbal) forms, which are useful elements of decision processes.

In the dissertation the main motive, research objective and results are the development of a parameter system and a rule system and incorporation of them into an expert system, which was elaborated to predict changes of salinity level in different climate change effected soil types. As for this purpose the material and method for developing an expert system had to be used, thus I selected the followings:

- (1) on the one hand, the task was embedded into a wider professional scope of task. I surveyed what kind of water protection oriented decision support systems were developed, and how these were used in the field of agro-environmental protection.
- (2) I studied how the decision support systems utilized expert systems in their structure.
- (3) I have presented the main features of expert systems and on what fields they can be used in agro-environmental protection;
- (4) I pointed out that within DSSs the development of expert system block is not a one-man task. It requires team work, and in that structure the knowledge engineer has special task. The knowledge engineer is responsible for the accumulation of knowledge necessary for realizing the objectives the expert system is formulated for; framing the knowledge into knowledge base; thereafter the development and

programming of the rule base, which ensures the operation of the decision mechanism of the expert system.

The structure of the dissertation follows the chronological order of my research work. The main objective of my research work discussed in the dissertation was to develop a rule system about the changes of salinization of soils affected by climate change, which work was based on analyses and summarization of the views of prominent experts and researchers working on this field. As for this purpose I could act as knowledge engineer, preliminary knowledge had to be gained. The realization of the supplementary objectives, with the presentation of relevant research results I proved my preparedness for the task of knowledge engineer.

In the first research field related to the purpose of water protection I dealt with solute transport processes in soils and unsaturated soil layers and their mathematical modeling, which were important to agro-environmental protection. I developed a rule based algorithm to optimize the selection of unsaturated soil zone solute transport processes. I have presented an expert system (*EXSOLUTE*), which can assist the users in the selection of deterministic solute transport model(s) for their special problem.

As the continuation of the first research field in the modelling of solute transport processes in the unsaturated soil layers I developed a management oriented solute transport model structure capable of describing nitrate leaching through the unsaturated soil zone. The system can calculate, in daily time step on agricultural field scale, the nitrate leaching from organic manure and fertilize applied on the field and taking into account the infiltration from precipitation (rain or snow), as well as storage or runoff (*DISNIT2* model).

For the evaluation of the usability of the *DISNIT2* model I have carried out simulations for three different, gradually more complicated cases. In the first case I made model calculations to describe water content and nitrate concentration distributions within undisturbed soil columns and the accumulated amount of drainage water and leached amount of nitrate at the bottom of these columns using results of water and nitrate leaching experiments, which were carried out under laboratory conditions. I proved

with model simulation that in the case of loamy sand soils only with two heavier rainfall events the surface applied nitrate could be washed down to 60-80 cm depth and the nitrate front could reach 120-150 cm in the soil.

In the second case I investigated the speed of the infiltration process in the Püspökladány area. Using the multi-decade long tritium concentration time series of the precipitation I made a model analysis to estimate what dispersion parameters characterized the soil profiles in the area (analysis of the measured and calculated concentration distributions), as well as with what velocity the tritium infiltration front moves and when it could reach the deep laying groundwater table, which result could characterize the vulnerability of the area to surface pollution.

Finally I made an investigation for the Újkígyós subsurface water resources area located in South-Hungarian Plain to determine what load could be estimated from agricultural fertilizer usage that reaches the groundwater table in the area. As a summary of the modelling evaluation it was concluded that at the area of the 1. soil profile type approx. 25-35 mm/y infiltration flux could be estimated at 8 m deep lower boundary level. For the 2. type soil profile the infiltration flux value varies between 10 to 18 mm/y, while for 3. and 4. soil type areas 0 mm/y flux could be applied at lower boundary. It was concluded that from the surface applied nitrogen fertilizer no material reaches the groundwater table in the meteorological and infiltration circumstances that are common in the Újkígyós region.

The research work outlined above gave good background to the main objectives of the dissertation to develop rule knowledge and expert system about the changes of salinization of soils affected by climate change. Naturally I have to emphasize that this knowledge engineer work was based on analyses and summarization of the views of experts and researchers working on this field.

I developed an expert system knowledge base based on questionnaire survey responses received from a group of specialists. During its development I had to resolve four major problems in order to be able to predict climate change induced changes in the salinity / alkalinity level of soils as well as productivity changes of crops grown on such soils: (i)

The variables / parameters that are the most important to characterize salinity / alkalinity level of soils were determined; (ii) The most important variables which significantly influence yields of crops grown on such soils; (iii) I have identified the characteristic variables of climate change scenarios used in the system; (iv) I have elaborated a knowledge base and a rule system to characterize relationships among the variables. Finally, I developed a computer system for the prediction of changes (*SALINEXP*), which used the previously developed knowledge base and rule system.

After running the expert system programme for the Middle-Tisza Region soils, the prediction in the majority of the cases were as follows:

- the salinity/alkalinity level will increase only slightly, but the cropping potential will decrease;
- there would be no significant change in the state of salinity/alkalinity in the soils located in the region;
- the expected cropping potential decrease will occur as a consequence of water and soil moisture shortage in the soils. It can be compensated by irrigation, but this will increase production costs and raise the likelihood of secondary salinization of the soils.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- Abriola, L. M. - Pinder, G.F.*: 1985. A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds. 1. Equation development. *Water Resources Research*. 21.(1). 11-18.
- Addiscott, T. M. - Wagenet, R. J.*: 1985. Concepts of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. *Journal of Soil Science*. 36. 411-424.
- Antal E.*: 1968. Az öntözés előrejelzése meteorológiai adatok alapján. Kandidátusi értekezés. MTA. Budapest. 147.
- Ángyán J., Fésűs I., Podmaniczky L., Tar F. (szerk.)*: 1999. Nemzeti Agrárkörnyezetvédelmi Program a környezetkímélő, a természet védelmét és a táj megőrzését szolgáló mezőgazdasági termelési módszerek támogatására. FVM. 174.
- Arany S.*: 1929. Some data for liming process of soils and magnesium content of salt-affected soils. *Mezőgazdasági Kutatások*. Budapest. 2. 1-12.
- Arany S.*: 1956. A szikes talaj és javítása. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- Asyling, H. C. - Hansen, S.*: 1985. Radiation, water and nitrogen balance in crop production. Field experiments and simulation models WATCROS and NITCROS. Hydrotechnical Laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen.
- Ábrahám L. - Bocskai J.*: 1971. A szikes talajok javítása. Országos Mezőgazdasági Minőségvizsgáló Intézet, 4. Budapest.
- Baig, F., Nawaz, N., Saif-Úr-Rehman*: 2005. Expert systems for decision making in agricultural sector. *Journal of Agriculture & Social Sciences*. Vol. 1. No. 2. 208-211.
- Bardos, P., Lewis, A., Nortcliff, S., Marotti, C., Marot, F., Sullivan, T.*: 2002. Review of decision support tools for contaminated land management, and their use in Europe. CLARINET project report, funded by the European Commission, DG Research. Published by the Umweltbundesamt GmbH, Wein, Austria. 116. p.
- Barr, A., Cohen, P. R., Feigenbaum, E. A. (Eds.)*: 1990. The Handbook of Artificial Intelligence, Volume I-IV. Addison-Wesley Press.
- Bear, J.*: 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier Science, New York.

- Biczók Gy., Lásztity B., Ruda M.*: 1988. Dynamics of nutrient uptake and aboveground phytomass in some winter wheat varieties at major growing site of Hungary. *Acta Agronomica Hungarica*. 37. (1-2). 3-18.
- Blaskó L.*: 1994. The possibilities and limits of amelioration of salt-affected soils with structural B-horizon. [In: Proc. of Conference on 'Problems and Management of Soil Salinization-Alkalization in Europe']. Budapest & Karcag. 26-30.
- Burkart, M.R. - Fehér J.*: 1996. Regional estimation of ground water vulnerability to nonpoint sources of agricultural chemicals. *Water Science & Technology*. Vol. 33. No. 4-5. 241-247.
- Burns, I. G.*: 1975. An equation to predict the leaching of surface-applied nitrate. *Journal of Agricultural Science*. 85. 443-454.
- Cameron, D.A. - Klute, A.*: 1977. Convective-dispersive solute transport with a combined equilibrium and kinetic adsorption model. *Water Resources Research*. 13.(1). 183-188.
- Carsel, R. F., Smith, C. N., Mulkey, L. A., Dean, J. D., Jowise, P. P.*: 1984. Users manual for the Pesticide Root Zone model (PRZM). Release 1, EPA Report 600/3-84-109, US-EPA, Athens, GA, USA.
- Castro-Tendero, A.J., Garcia-Torres, L.*: 1995. SEMAGI – An expert system for weed control decision making in sunflowers. *Crop Protection*. 14. 543-548.
- Childs, E.C.*: 1969. *The Physical Basis of soil Water Phenomena*. Wiley-Interscience. New York. 493. p.
- Crosby, C. J. - Clapham, W. M.*: 1990. A simulation modeling tool for nitrogen dynamics using object oriented programing. *AI Applications in Natural Resources Management*. Vol. 4. 94-100.
- Csillag J., Tóth T., Rédly M.*: 1995. Relationships between soil solution composition and soil water content of Hungarian salt-affected soils. *Arid Soil Res. & Rehabilitation*. 9. 245-260.
- Darab K.*: 1992. Chemistry and physico-chemistry of salinization. (Historical review). *Agrokémia és Talajtan*. 41. 103-126.
- Darab K. - Rédly M.*: 1977. A kationkicserélő kapacitás és a kicserélhető kationok meghatározása szikes talajokban. *Agrokémia és Talajtan*. 26. 123-162.
- Darab K., Rédly M., Csillag J.*: 1979. Az ionaktivitás mérése és számítása szikes talajok telítési kivonatában. *Agrokémia és Talajtan*. 28. 399-410.

- Darab K., Csillag J., Pintér I.*: 1980. Studies on the ion composition of salt solution and of saturation extracts of salt-affected soils. *Geoderma*. 23. 95-111.
- Deák, J. - Deseő, É.*: 1991. A felszínalatti vizek védettségének vizsgálata környezeti izotóp elemzések alapján. Budapest. Kézirat.
- Deák J. – Horváthné Deák Emese*: 2009. Trícium – A nukleáris technika melléktermékének vízföldtani alkalmazása. *Nukleon*, II. évf. 27. 1-5.
- Delgado, R.*: 1996. SEPA: An expert system for farm planning. [In: F. S. Zazueta (Ed.) Proc. of 6th Int. Conf. on Computers in Agriculture]. Cancun, Mexico. American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Denning, P. J.*: 1986. The science of computing - Expert systems. *American Scientist*, Vol. 74. 18-20.
- di Gleria, J.*: 1934. Az adszorpciós jelenségek és a koaguláció kolloidikai magyarázata. [In: 'Sigmond E., Általános talajtan. Budapest].
- Estrela, T., Menéndez, M., Dimas, M., Marcuello, C., Rees, G., Cole, G., Weber, K., Grath, J., Leonard, J., Ovesen, N. B., Fehér J.*: 2001. Sustainable water use in Europe. Part 3, Extreme hydrological events, floods and droughts. European Environmental Agency. Environmental Issue Report. 21. ISBN 92-9167-306-4.
- Evers, M.*: 2007. Requirements for decision support in integrated water resources management. Proceedings of "REAL CORP 007: To plan is not enough" 12th International Conference on Urban Planning and Spatial Development in the Information Society. Vienna (AT). 695-702.
- Faust, C.R.*: 1985. Transport of immiscible fluids within and below the unsaturated zone: A numerical model. *Water Resources Research*. 21.(4). 587-596.
- Fehér J.*: 1990. A "Hidrológiai és vízminőségi folyamatok mezőgazdasági táblaszintű, környezetvédelmi célú modell-vizsgálta" című 1493 nyilvántartási számú OTKA pályázat zárójelentése. Kutatási jelentés. Budapest/Riverside, CA, USA.
- Fehér J.*: 1991. Felszín alatti vízbázisok vízminőségi veszélyeztetettségének előrejelzése. Kutatási jelentés. VITUKI. Témaszám: 7611/3/1704-F.
- Fehér J. - van Genuchten, M. Th.*: 1989. A PC-based expert system for modelling solute transport in soil and aquifer systems. *Hydrological Science and Technology*. Volume 5. Number 1-4. 183-189.

- Fehér J. - Rajkai K.*: 1996a. An expert system to predict climate change induced soil salinity / alkalinity processes. *Journal of International Agrophysics*. 10. 209-223.
- Fehér J., Rajkai K.*: 1996. Risk modelling, SALINEXP - An expert system program to predict salinization/alkalinization of the Middle Tisza Region in Hungary. [In: P.J. Loveland and M.D.A. Rounsevell (eds.) *Euro ACCESS - AgroClimatic Change and European Soil Suitability*]. Soil Survey and Land Research Centre, Cranfield Univ., UK. ISBN 1-871651-17-4. 95-103.
- Fehér J., van Genuchten, M. Th., Alves, W. J.*: 1989. An expert system approach for deterministic modeling of solute transport in soils and aquifers during steady-state water flow. *EOS Transactions. American Geophysical Union*. Vol. 70.
- Fehér J., van Genuchten, M. Th., Alves, W. J., Joyce, D. W.*: 1991a. Solute transport modeling assisted by a knowledge-based system. [In: C.A. Brebbia and A.J. Ferrante (eds.) *Reliability and Robustness of Engineering Software II*], Elsevier Applied Science, New York. ISBN 1-85312-132-0. 243-252.
- Fehér J., van Genuchten, M. Th., Kienitz G., Németh T., Biczók Gy., Kovács G.*: 1991b. DISNIT2, a root zone water and nitrogen management model. [In: G. Kienitz, P. C. D. Milly, M. Th. van Genuchten, D. Rosbjerg and W. J. Shuttleworth (eds.) *Hydrological Interactions Between Atmosphere, Soil and Vegetation*, Publ. No. 204.] Int'l. Assoc. of Hydrological Sci., IAHS Press, Wallingford, UK, ISBN 0-947571-13-2. 197-205.
- Fehér J., van Genuchten, M. Th., Németh T.*: 1991c. Nitrogen leaching from Agricultural Soils - A Comparison Of Measured And Computer-Simulated Results. [In: L. C. Wrobel and C. A. Brebbia (eds.) *Water Pollution: Modelling, Measuring and Prediction*], Elsevier Applied Science, New York, ISBN 1-853121-46-0. 27-41.
- Fehér J., Németh T., Kovács G., Biczók Gy., Kienitz G., van Genuchten, M. Th.*: 1991d. Egydimenziós transzport modell és számítógépi programja a talaj telítetlen zónájában lezajló nitrogén mozgás számítására. *Országos Környezetvédelmi Konferencia I. Tanulmánykötet*. pp. 146-154. Balatonaliga.
- Fehér J., Rajkai K., Molnár E.*: 1999. A SALINEXP szakértői rendszer. *Agrokémia és Talajtan*. 48. No. 3-4. 491-500.
- Fehér J., Bardos P., Fehér G., Dargai Zs.*: 2009. Interface between the MOKKA Decision Support Tool and EUGRIS: An inter-linkage approach. *Land Contamination & Reclamation*. Vol. 17: Parts 3-4. 719-730.

- Feigenbaum, E. A. - McCorduck, P.*: 1984. The fifth generation. New American Library, New York, N.Y.
- Filep Gy.*: 1988. Talajkémia. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Fodor N., Csathó P., Árendás T., Németh T.*: 2007. MTA TAKI - MTA MgKI új trágyázási szaktanácsadási rendszere az NVT agrár-környezetgazdálkodási program eredményes megvalósításáért. Acta agronomica Óváriensis. 49. évf. 2/1. 141-145.
- Germann, P.F. - Beven. K.*: 1985. Kinematic Wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores. Water Resources Research. 21.(7). 990-996.
- Godwin, D. C.*: 1989. Simulation of nitrogen dynamics in wheat cropping systems. Ph.D. Thesis. University of New England, NE, USA
- Gustafson, D.I.*: 1989. Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability. Environmental Toxicology and Chemistry. Vol. 8. 339-357.
- Gyarmati I.*: 1967. Nem-egyensúlyi termodinamika. Műszaki Könyvkiadó. Budapest.
- Hebson, C. S. - DeCoursey, D. S.*: 1987a. Structured analysis and design techniques applied to a hydro-ecosystem model. [In: Proc. 7th Annual AGU-CSU Hydrology Days. Dept. of Civil Engineering. Colorado State University. Ft. Collins, CO, USA]. 95-109.
- Hebson, C. S. - DeCoursey, D. G.*: 1987b. A model for assessing agricultural management impact on root zone water quality. 93rd American Chemical Society National Meeting (Symposium on Surface Runoff of Chemicals from Agricultural Watersheds). Denver, CO, USA.
- Harmancioglu, N. B.*: 2008. Integrated information base for sustainable water resources management. [In: Coskun HG, Cigizoglu HK, Maktav MD (Eds.) Integration of Information for Environmental Security. Book Series: Nato Science for Peace and Security Series C - Environmental Security]. 407-442.
- Harnos Zs.*: 2005. A klímaváltozás és lehetséges hatásai a világ mezőgazdaságára. Magyar Tudomány. Vol. 7. 826-832.
- Harnos Zs. - Csete L. (szerk.)*: 2008. Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom. Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház. ISBN 978-963-9736-87-0.

- Herke S. - Harmati, I.*: 1925. Amelioration and utilization of alkali soils of the solonchak and solonchak - solonetz types in the region between the rivers Danube and Tisza (Hungary). *Agrokémia és Talajtan*. 14. Suppl. 313-322.
- Hillel, D.*: 1980. *Applications of Soil Physics*. Academic Press. New York, NY.
- Huyakorn, P.S., Lester, B.H., Mercer, J.W.*: 1983: An efficient finite element technique for modeling transport in fractured porous media, 1. Single species transport. *Water Resources Research*. 19.(3). 841-854.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*: 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)]. IPCC. Geneva, Switzerland.
- Irinnyi J.*: 1839. *A Konyári tó*. Atheneum, Pest.
- Jones, C. A. - Kiniry, J. R. (Eds.)*: 1986. *CERES-MAIZE. A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M University Press. College Station. USA.
- Jury, W.J. - Stolzy, L.H.*: 1982. A field test of the transfer function model for predicting solute transport. *Water Resources Research*. 18. 369-375.
- Jury, W. J., Spender, W.F., Farmer, W.J.*: 1983. Behavior assessment model for trace organics in soil. I. Model description. *Journal of Environmental Quality*. 12. 558-564.
- Jury, W. J., Farmer, W. J., Spender, W.F.*: 1984. Behavior assessment model for trace organics in soil. II. Chemical classification and parameter sensitivity. *Journal of Environmental Quality*. 13. 567-572.
- Kienitz G. - Fehér J.*: 1989. The root zone's water/nitrogen household modelling for operational purposes in Hungary. [In: Abriola, L. M. (Ed.) *Groudwater Contamination. Proceedings of the Symposium held during the Third IAHS Scientific Assembly*]. Baltimore, MD, USA, IAHS Publ. No. 185. ISBN 0-947571-17-5. 109-116.
- Kniesel, W. G. (ed.)*: 1980. *CREAMS: a field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. Conservation Research Report. No. 26. USDA, Tifton, GA, USA.

- Kovács G. J., Németh T., Radimsky L., Szili-Kovács T.*: 1996. Modeling of nitrogen transformation in the soil. [In: Progress in Nitrogen Cycling Studies. Ed: O. Van Cleemput et al.], Kluwer Academic Publishers, the Netherlands. 419-424.
- Kovács G. J.*: 1998. Estimation of the Effect of Global Warming on Yields and Environment of Arable Crops in Hungary. *Agrokémia és Talajtan* 47. (1-4.) 133-144.
- Kovács G. J.*: 2004. Applying models to decision support tools. [In: Hatfield, J.L. (Ed.): Improving the Balance Between Economic Agricultural Production and Environmental Quality through Enhanced Decision Making]. OECD. Ames, USA. 77-112.
- Ladányi M.*: 2006. Folyamatszempléti lehetőségek az agro-ökoszisztémák modellezésében. Doktori (PhD) értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék. 148. p.
- Láng I., Csete L., Jolánkai M. (szerk.)*: 2007. A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok. A VAHAVA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház. Budapest.
- Ligetvári F., Deseő É., Horváth V., Steindl Zs.*: 2000. Magyarország felszíni és felszín alatti vizeinek minősége. *ÖKO XI.*(1-2.) 106-120.
- Loucks, D.P.*: 1995. Developing and implementing decision support systems: A critique and a challenge. *Journal of the American Water Resources Association*. Volume 31. Issue 4. 571-582.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., Still, D. A.*: 1986. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. American Society of Agricultural Engineers Winter Meeting. Chicago, IL
- Mados L.*: 1935. Effect of increasing sodium saturation on the physical characteristics of the soil. *Mezőgazdasági Kutatások*. 8. 141-147.
- McClure, J. E., Calvin, D. D., Esh, V.*: 1996. Pest management choices: Integrated pesticide toxicity data with a crop management expert system. Proc. of 6th Int. Conf. on Computers in Agriculture. Cancun, Mexico. Edited by F. S. Zazueta. American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- McLaren, A. D.*: 1970. Temporal and vectorial reactions of nitrogen in soil: a review. *Canad. J. Soil. Sci.* 50. 97-109.

- Miller, C. W. - Benson, L. V.*: 1983. Simulation of solute transport in a chemically reactive heterogeneous system: Model development and application. *Water Resources Research*. 19.(2). 381-391.
- Molnár E.*: 1994. Soil pollution and risk management in Central and Eastern Europe. [In: W. Salamons (Ed.): EERO course for environmental management. EERO], Wageningen University, Hollandia. 87-120.
- Mualem, Y.*: 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. Vol. 12. No. 3. 513-522.
- Muraközy, K.*: 1902. A talajról. *Természettudományi Közlöny*. 33. 593-713.
- Nagy J.*: 2009. Magyarország földhasználatának változása 1868-2008. [In: Nagy J. – Jávör A.: 2009. Debreceni álláspont az agrárium jelenéről, jövőjéről. Magyar mezőgazdaság Kft., Debrecen, ISBN 978-963-88233-04], 5-18.
- Németh T., Kovács G., Fehér J., Simonffy Z.*: 1989. Nitrátbemosódási vizsgálatok bolygatatlan homok talajon hengerliziméterekben. *Agrokémia és Talajtan*. 38. 239-242.
- Németh T., Radimsky L., Fehér J., Simonffy Z.*: 1991. Bolygatatlan talajoszlopokkal végzett víz- és nitrogénforgalmi vizsgálatok. [In: Környezetgazdálkodási Kutatások 8. G-10 Környezetgazdálkodási Programiroda]. 1-16.
- Németh T., Molnár E., Csillag J., Bujtás K., Lukács A., Pártay G., Fehér J., van Genuchten, M. Th.*: 1993. Mobility of some heavy metals in soil-plant systems studied on soil monoliths. *Water Science & Technology*. Vol. 28. No. 3-5. 389-398.
- Nielsen, D. R., van Genuchten, M. Th., Biggar, J. W.*: 1986. Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone. *Water Resources Research*. Vol. 22. No. 9. 89-108.
- Nielsen, D. R., van Genuchten, M. Th., Jury, W. A.*: 1989. Transport processes from soil surfaces to groundwater. [In: Abriola, L. M. (Ed.): Groundwater Contamination. Proceedings of the Symposium held during the Third IAHS Scientific Assembly], Baltimore, MD, USA. IAHS Publ. No. 185. ISBN 0-947571-17-5. 99-108.
- Nkedi-Kizza, P., Biggar, J. W., Selim, H. M., van Genuchten, M. Th., Wierenga, P. J., Davidson, J. M., Nielsen, D. R.*: 1984. On the equivalence of two conceptual models for describing ion exchange during transport through an aggregated oxisol. *Water Resources Research*. 20.(8). 1123-1130.

- Nováky B.: 2007. Az ENSZ Éghajlat-változási Kormányközi Testületének jelentése az éghajlatváltozás várható következményeiről. KLÍMA-21 Füzetek. 50. 6-11.
- Nyiri L. - Fehér F.: 1981. Effects of Chemical Amelioration and Soil Moisture Regulation on Various Types of Salt-Affected Soils. *Agrokémia és Talajtan*. 30. 139-147.
- OMFB 9-8303 –Kt.: 1986. A felszínalatti vizek nitrátosodása és a védekezés módjai. 18-43.
- Parker, J. C. - van Genuchten, M. Th.: 1984. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Bulletin 84-3. Virginia Agric. Exp. Sta., Blacksburg, Virginia. 91 p.
- Posza I. - Stollár A.: 1983. A tényleges párolgás számításához használt növénykonstan-sok értékei többévi mérések alapján. *Időjárás*. 87.(3). Budapest.
- Power, J. F. - Schepers, J. S.: 1989. Nitrate contamination of groundwater in North America. *Agriculture. Ecosystems and Environment*. 26. 165-187.
- Prettenhoffer I.: 1964. Amelioration of non-calcareous alkali soils (meadow solonchaks) by subsoil loosening in Hungary. *Trans. 8th Int. Congr. Soil Sci.* 2. 881-889.
- Rafea, A.: 1996. "Natural Resources Conservation and Crop Management Expert Systems", Proceedings of "Decision Support Systems for Sustainable Development" Workshop, UNU/IIST, Macau. 26 February - 8 March, 1996.
- Rajkai K. - Molnár E.: 1981. Soil-water-plant relations in a salt-affected area of the Great Hungarian Plain. *Agrokémia és Talajtan*, 30. (Suppl.) 97-104.
- Rajkai K. - Várallyay Gy.: 1989. Estimative calculation of hydrophysical parameters from the simply measurable soil properties. *Agrokémia és Talajtan*. 38. 634-640.
- Rajkai K. - Kabos S.: 1999. A talaj víztartóképeség-függvény (pF görbe) tulajdonságok alapján történő becslésének továbbfejlesztése. *Agrokémia és Talajtan*. 48. 15-33.
- Rajkai K., Marchand, D., Oertli, J.J.: 1988. Study of the Spatial Variability of Soil Properties on Alkali Soils. *Proc. Int. Symp. on Solonchak Soils; Problems, Properties, Utilization*. Osijek, Yugoslavia. 150-155.
- Rajkai K., Szász G., Huzsvai L.: 2004. *Agroökológiai modellek*. Egyetemi jegyzet. Debreceni Egyetem, Mezőgazdaságtudományi Kar. ISBN 963 472 856 1.
- Rao, P. S. C., Davidson, J. M., Selim, H. M.: 1979. Evaluation of conceptual models for describing nonequilibrium adsorption-desorption of pesticides during steady-state flow in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43.(1). 22-28.

- Rao, P. S. C., Rolston, D. E., Jessup, R. E., Davidson, J. M.:* 1980. Solute transport in aggregated porous media: Theoretical and experimental evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44.(6). 1139-1146.
- Rasmuson, A. - Neretnieks, I.:* 1980. Exact solution for diffusion in particles and longitudinal dispersion in packed beds. *J. Am. Inst. Chem. Eng.* 26. 686-690.
- Reardon, E. J.:* 1981. K_d 's - Can they be used to describe reversible ion sorption reactions in contaminant migration? *Ground Water*. 19. 279-286.
- Reeve, R. C., Pillsburg, A. F., Wilcox, L. V.:* 1955. Reclamation of a saline and high boron soil in the Coachella Valley of California. *Hilgardia*. 24. 69-91.
- Rédly M. - Darab K.:* 1981. The evaluation of physico-chemical processes from the point of view of alkali soil amelioration. *Agrokémia és Talajtan*. 30. 173-188.
- Richards, L.A.:* 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, I. USA. 318-333.
- Ritchie, J. T.:* 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. Vol. 8. No. 5. 1204-1213.
- Robinson, B.:* 1996. Expert systems in agriculture and long term research. *Canadian J. Plant Science*. 76. 611-617.
- Rojas, K. W., Hebson, C. S., DeCoursey, D. G.:* 1988. Modeling agricultural management subject to subsurface quality constraints. [In: *Proc. ASAE International Symposium on Modeling Agricultural, Forest, and Rangeland Hydrology*]. Chicago, IL, USA. 108-116.
- Rojas, K. W. - Hebson, C. S.:* 1989. An unsaturated zone water quality model for management of agricultural systems. [In: *Abriola, L. M. (Ed.) Groundwater Contamination. Proceedings of the Symposium held during the Third IAHS Scientific Assembly*]. Baltimore, MD, USA. IAHS Publ. no. 185. ISBN 0-947571-17-5. 117-126.
- Schulin, R., van Genuchten, M. Th., Fluhler, H., Ferlin, P.:* 1987. An experimental study of solute transport in a stony field soil. *Water Resources Research*. 23. 1785-1794.
- Sieker, H., Bander mann, S., Schröter, K., Ostrowski, M., Leichtfuss, A., Schmidt, W., Thiel, E., Peters, C., Mühleck, R.:* 2006. Development of a decision support system for integrated water resources management in intensively used small watersheds. *Water Practice & Technology*. Vol. 1. No. 1.

- Selim, H. M., Davidson, J.M., Mansell, R. S.:* 1976. Evaluation of a two-site adsorption-desorption model for describing solute transport in soils. Proceedings of 1976 Summer Simulation Conference. Washington, D.C. 444-448.
- Shaffer, M. J. - W. E. Larson (eds.):* 1987. NTRM, a soil-crop simulation model for nitrogen tillage, and crop-residue management. USDA-ARS Conservation Research Report. 34-1. National Technical Information Service. Springfield, VA.
- Shaffer, M. J., Halvorson, A. D., Pierce, F. J.:* 1990. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): Model description and application. Chapter 13. [In: R. F. Follet, et al. (Eds.) Managing Nitrogen for Ground Water Quality and Farm Profitability. Soil Science Society of America. Madison, WI.]
- Shapiro, S. C. (Ed.):* 1989. Encyclopedia of Artificial Intelligence. Volume I. Wiley, New York, N.Y.
- 'Sigmond, E.:* 1928. The classification of alkali and salty soils. Proc. and Papers, First Intern. Congr. Soil Sci. 1. 330-344.
- 'Sigmond, E.:* 1934. Characterization and classification of the salt-affected soils of the Hungarian Plain. [In: Magyar Szikések.] 3-20. Pátria, Budapest.
- Simonffy Z., Fehér J., Németh T.:* 1991. Modelling nitrate accumulation and leaching in unsaturated soils. Ann. Geophysicae Suppl. Volume 9. pp. 464-465.
- Smith, R. E. - Ferreira, V. A.:* 1986. Effect of soil hydraulic properties on root zone transport processes. [In: Proc. 6th Annual AGU-CSU Hydrology Days]. Dept. of Civil Engineering. Colorado State University. Ft. Collins, CO, USA.
- Smith, R. E. - Ferreira, V. A.:* 1987. Effect of soil adsorption kinetics on agricultural pesticide fate. 93rd American Chemical Society National Meeting (Symposium on Surface Runoff of Chemicals from Agricultural Watersheds). Denver, CO, USA.
- Sprague, R. H. - Carlson, E. D.:* 1982. Building effective decision support systems. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall. ISBN 0-130-86215-0
- Strebel, O., Duynisveld, W. H. M., Böttcher, J.:* 1989. Nitrate pollution of groundwater in Western Europe. Agriculture, Ecosystems and Environment. 26. 189-214.
- Sulyok D. (szerk.):* 2006. 4M-eco, a mezőgazdasági szaktanácsadó rendszer jelentősége napjaink növénytermesztési gyakorlatában. Debreceni Egyetem Földhasznosítási és Területfejlesztési Tanszéke és az MTA DE Földművelési Kutatócsoport, Debreceni Egyetem.

- Szabó J.*: 1861. Description of geological conditions and soil types. I. Békés and Csanád County. MGE. Pest.
- Szabolcs I.*: 1974. Salt affected soils in Europe. Martinus Nijhoff and RISSAC, The Hague and Budapest.
- Szabolcs I. - Jassó F.*: 1961. Genetic types of salt-affected soils and regularities of their locations in the region between Danube and Tisza Rivers. *Agrokémia és Talajtan*. 10. 173-194.
- Szabolcs I., Darab K., Várallyay Gy.*: 1969. Methods of Predicting Salinization and Alkalinization Processes due to Irrigation on the Hungarian Plain. *Agrokémia és Talajtan*. 18. 351-375.
- Tamás J. (szerk.)*: 2008. Agrárium és környezetgazdálkodás. Mezőgazda Kiadó. p. 315. ISBN 978-963-286-455-6.
- Tamás J.*: 2009. Az átalakuló mezőgazdasági vízgazdálkodás helyzete. [In: Nagy J. – Jávör A.: 2009. Debreceni álláspont az agrárium jelenéről, jövőjéről]. Magyar mezőgazdaság Kft. Debrecen, ISBN 978-963-88233-04. 85-108.
- Tamás J. - Fehér J.*: 2010. Víziközmű fejlesztések regionális értékelése. [In: Környezetipar, újraiparosítás és regionalitás Magyarországon. Szerkesztő: Baranyi Béla - Fodor István], Kiadó: MTA Regionális Kutatások Központja, Debrecen-Pécs. (Nyomtatás alatt.)
- Tang, D. H., Frind, E. O., Sudicky, E. A.*: 1981. Contaminant transport in fractured media: Analytical solution for a single fracture. *Water Resources Research*. 17.(3). 555-564.
- Tessedik, S.*: 1804. Über die Kultur und Benützung der sogenannten Székes Felder in der Gegend an der Thers Patriotisches Wochenblatt für Ungarn. III. Pest.
- Timkó I.*: 1913. The Hungarian Puszta and the Southern steppe. *Földrajzi Közlemények*. 41. 20.
- Tóth T. - Rajkai K.*: 1994. Soil and plant correlations in a solonchic grassland. *Soil Science*. 157. 253-262.
- Tóth T., Kuti L., Kabos S., Pásztor L.*: 2001. Az Alföldi szikes talajok elterjedését meghatározó agrogeológiai tényezők térinformatikai elemzése 1:500 000 méretarányban. Földrajzi Konferencia Kiadványa, Szeged.

- Tóth T. - Szendrei G.: 2006.* A hazai szikes talajok és a szikesedés, valamint a sófelhalmozódási folyamatok rövid jellemzése. *Topographia Mineralogica Hungariae*. Vol. IX. 7-21.
- Treitz P.: 1924.* Natural history of sodic and salt-affected soils. Pátria, Budapest.
- US EPA.: 2005.* Decision Support Tools – Development of a Screening Matrix for 20 Specific Software Tools. EPA Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Report. 68-W-02-034. Washington, D.C., USA.
- Vachaud, G., Vaulin, M., Addiscott, T. M.: 1988.* Solute transport in the vadose zone: A review of models. *Proc. of Int. Symp. on Water Quality Modelling of Agricultural Non-point Sources.*, Utah.
- Van Der Molen, W. H.: 1956.* Desalination of saline soils as a column process. *Soil Science*. 81. 19-27.
- van Genuchten, M. Th.: 1978a.* Numerical solutions of one-dimensional saturated unsaturated flow equation. Research Report 78-WR-09. Water Resources Program. Dept. of Civil Engineering. Princeton University. Princeton. New Jersey, USA.
- van Genuchten, M. Th.: 1978b.* Mass transport in saturated-unsaturated media: Onedimensional solutions. Research Report 78-WR-11. Water Resources Program. Dept. of Civil Engineering. Princeton University. Princeton. New Jersey, USA.
- van Genuchten, M. Th.: 1980.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. 892-898.
- van Genuchten, M. Th.: 1981.* Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero-order production and first-order decay. *Journal of Hydrology*. 49. 213-233.
- van Genuchten, M. Th.: 1985a.* Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions. *Computers and Geosciences*. 11.(2). 29-147.
- van Genuchten, M. Th.: 1985b.* A general approach for modeling solute transport in structured soils. *Proc. 17th. Int. Congress, "Hydrology of Rocks of Low Permeability"*. *Memoires Int. Assoc. Hydrogeology*. 17.(2). 513-526.

- van Genuchten, M. Th.*: 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report No. 121. USDA ARS U.S. Salinity Laboratory. Riverside, California, USA.
- van Genuchten, M. Th. - Wierenga, P. J.*: 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media: I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40.(4). 272-278.
- van Genuchten, M. Th. - Alves, W. J.*: 1982. Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation. Technical Bulletin. 1661. U. S. Dept. of Agriculture . ARS. Washington.
- van Genuchten, M. Th. - Wierenga, P. J.*: 1984. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40.(4). 473-480.
- Várallyay Gy.*: 1967. A dunavölgyi talajok sófelhalmozódási folyamatai. *Agrokémia és Talajtan.* 16. 327-349.
- Várallyay Gy.*: 1988. A talaj vízgazdálkodása. Akadémiai doktori értekezés. MTA, Budapest.
- Várallyay Gy.*: 2008. Talaj–víz kölcsönhatások a klímaváltozás tükrében. *Talajvédelem.* Különszám. (szerk.: Simon L.). 17-30.
- Várallyay Gy., Molnár E., Rajkai K.*: 1985. Talajtani kutatások. Az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet kutatásai. [In: Tóth K. (ed.): *Tudományos kutatások a Kiskunsági Nemzeti Parkban. (1975-1984)*]. HUNGEXPO. Budapest. 59-95.
- Vermes L. (szerk.)*: 1997. *Vízgazdálkodás.* Szaktudás Kiadó Ház Zrt. ISBN 978-963-356-21-8X.
- Vermes L. (2006)*: A Nemzeti Aszály Stratégia – „AGRO-21” Füzetek. 48. 30-33.
- Vermes L. – Pálfi I.*: 2007. Aszályok az újkori történelemben – Magyarország és Európa – História, XXIX (5-6). 53-55.
- Wagenet, R. J. - Rao, B.K.*: 1983. Description of nitrogen movement in the presence of spatially-variable soil hydraulic properties. *Agric. Water Manag.* 6. 227-242.
- Wagenet, R. J., Shaffer, M.J., Green, R.E.*: 1988. Predictive approaches for leaching in the unsaturated zone. *Proc. of Int. Symp. on Water Quality Modelling of Agricultural Non-point Sources.* Utah.
- Williams, J. R., Jones, C. A., Dyke, P. T.*: 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE* 27. (1). 129-144.

- Wang, J.S.Y. - Narasimhan, T. N.:* 1985. Hydrologic mechanisms governing fluid flow in a partially saturated, fractured, porous media. *Water Resources Research*. 21.(12). 1861-1874.
- Yeh, G.T. - Luxmoore, R. J.:* 1982. Chemical transport in macropore-mesopore media under partially saturated conditions. In: *Symposium on Unsaturated Flow and Transport Modeling*, edited by E. M. Arnold, G. W. Gee, and R. W. Nelson, pp. 263-281, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C.
- Zsembeli J.:* 2003. Methodological assessment of a weighing lysimeter experiment. *Einladung zur 10. Gumpensteiner Lysimetertagung. Austria*. 239-240.

9. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN (Saját irodalom)

9.a. Tudományos közlemény magyar nyelvű lektorált folyóiratban, könyvben

Németh T., Kovács G., Fehér J., Simonffy Z.: 1989. Nitrátbemosódási vizsgálatok bolygatatlan homok talajon hengerliziméterekben. *Agrokémia és Talajtan.* 38. 239-242.

Fehér J., Rajkai K., Molnár E.: 1999. A SALINEXP szakértői rendszer. *Agrokémia és Talajtan.* 48. 491-500.

9.b. Tudományos közlemény idegen nyelvű lektorált folyóiratban, könyvben

Fehér J., van Genuchten, M. Th.: 1989. A PC-based expert system for modelling solute transport in soil and aquifer systems. *Hydrological Science and Technology.* Volume 5. Number 1-4.: 183-189.

Fehér J., van Genuchten, M. Th., Alves, W. J., Joyce, D. W.: 1991a. Solute transport modeling assisted by a knowledge-based system. [In: C.A. Brebbia and A.J. Ferrante (eds.) *Reliability and Robustness of Engineering Software II*], Elsevier Applied Science, New York. ISBN 1-85312-132-0. 243-252.

Fehér J., van Genuchten, M. Th., Kienitz G., Németh T., Biczók Gy., Kovács G.: 1991b. DISNIT2, a root zone water and nitrogen management model.

[In: G. Kienitz, P. C. D. Milly, M. Th. van Genuchten, D. Rosbjerg and W. J. Shuttleworth (eds.) *Hydrological Interactions Between Atmosphere, Soil and Vegetation*, Publ. No. 204.] Int'l. Assoc. of Hydrological Sci., IAHS Press, Wallingford, UK, ISBN 0-947571-13-2. 197-205.

Fehér J., van Genuchten, M. Th., Németh T.: 1991c. Nitrogen leaching from Agricultural Soils - A Comparison Of Measured And Computer-Simulated Results. [In: L. C. Wrobel and C. A. Brebbia (eds.) *Water Pollution: Modelling, Measuring and Prediction*], Elsevier Applied Science, New York, ISBN 1-853121-46-0. 27-41.

Simonffy Z., Fehér J., Németh T.: 1991. Modelling nitrate accumulation and leaching in unsaturated soils. *Ann. Geophysicae Suppl.* Volume 9. 464-465. IF: 1.347

Németh T., Molnár E., Csillag J., Bujtás K., Lukács A., Pártay G., Fehér J., van Genuchten, M. Th.: 1993. Mobility of some heavy metals in soil-plant systems studied on soil monoliths. *Water Science & Technology*. Vol. 28. No. 3-5. 389-398. IF: 0,573

Fehér J., Rajkai K.: 1996. An expert system to predict climate change induced soil salinity/alkalinity processes. *Journal of International Agrophysics*. 10. 209-223.

Burkart, M.R., Fehér J.: 1996. Regional estimation of ground water vulnerability to nonpoint sources of agricultural chemicals. *Water Science & Technology*. Vol. 33. No. 4-5. 241-247. IF: 0,622

Estrela, T., Menéndez, M., Dimas, M., Marcuello, C., Rees, G., Cole, G., Weber, K., Grath, J., Leonard, J., Ovesen, N. B., Fehér J.: 2001. Sustainable water use in Europe. Part 3, Extreme hydrological events, floods and droughts. European Environmental Agency. Environmental Issue Report. 21. ISBN 92-9167-306-4.

Fehér J., Bardos, P., Fehér G., Dargai Zs.: 2009. Interface between the MOKKA Decision Support Tool and EUGRIS, An inter-linkage approach. *Land Contamination & Reclamation*. Vol. 17: Parts 3-4. 719-730.

9.c. Idegen nyelvű lektorált konferencia kiadvány

Kienitz G., Fehér J.: 1989. The root zone's water/nitrogen household modelling for operational purposes in Hungary. [In: Abriola, L. M. (Ed.) *Groundwater Contamination. Proceedings of the Symposium held during the Third IAHS Scientific Assembly*]. Baltimore, MD, USA, IAHS Publ. No. 185. ISBN 0-947571-17-5. 109-116.

Fehér J., Rajkai K.: 1996. Risk modelling, SALINEXP - An expert system program to predict salinization/alkalinization of the Middle Tisza Region in Hungary. [In: P.J. Loveland and M.D.A. Rounsevell (eds.) *Euro ACCESS - AgroClimatic Change and European Soil Suitability*]. Soil Survey and Land Research Centre, Cranfield Univ., UK. ISBN 1-871651-17-4. 95-103.

9.d. Magyar nyelvű referált konferencia kiadvány

Fehér J., Németh T., Kovács G., Biczók Gy., Kienitz G., van Genuchten, M. Th.: 1991.

Egydimenziós transzport modell és számítógépi programja a talaj telítetlen zónájában lezajló nitrogén mozgás számítására. [In: Országos Környezetvédelmi Konferencia I. Tanulmánykötet. Balatonaliga]. 146-154.

Németh T., Radimsky L., Fehér J., Simonffy Z.: 1991. Bolygatatlan talajoszlopokkal végzett víz- és nitrogénforgalmi vizsgálatok. [In: Környezetgazdálkodási Kutatások 8. G-10 Környezetgazdálkodási Programiroda]. 1-16.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki mindazon kollégáknak, szakmai partnereknek, akik doktori értekezésem témájához tartozó kutatásaim során partnereim voltak és segítették munkámat.

Nagyon köszönöm témavezetőimnek, *Prof. Dr. Tamás János* tanszékvezető egyetemi tanár és *Dr. Juhász Csaba* egyetemi docens uraknak a doktori értekezés megírásához nyújtott hathatós ösztönzésüket és hasznos tanácsaikat.

Doktori értekezésemben összefoglalt szakmai eredmények megalapozása úgy kezdődött, hogy *Dr. Németh Tamással* és *Dr. Kovács Géza Jánossal*, akik akkor az MTA TAKI tudományos főmunkatársai voltak, valamint *Simonffy Zoltán* tudományos főmunkatárssal, akivel a VITUKI-ban dolgoztam akkoriban együtt, nitrát bemosódási liziméteres kísérleteket végeztünk hetekig tartó, éjszakákba nyúló mérési sorozatokkal a VITUKI Komlói Imre Kísérleti Telepén henger- és kompenzációs liziméterekben. A mai napig jó emlékeket őrzök ezekről a vizsgálatokról, és nagyon köszönöm nekik a közös méréseket és szakmai együttműködésüket.

Elismerő köszönetemet fejezem ki *Dr. Kienitz Gábornak*, *Dr. Kovács Géza Jánosnak* és *Dr. Biczók Gyulának*, hogy tanácsaikkal, módszereikkel segítették a DISNIT2 rendszer egyes elemeinek kialakítását.

Hálás köszönettel tartozom *Prof. Dr. Rien van Genuchtennek*, akinek személyes meghívására két és fél évet dolgozhattam mellette a U.S. Salinity Laboratory-ban, a kaliforniai Riverside városában, és akivel folytatott együttműködés inspirált az EXSOLUTE szakértői rendszer kidolgozására, valamint tanácsaival és modelljével segítette a DISNIT2 rendszer kialakítását.

A SALINEXP - mint szakmai csapatot igénylő szakértői rendszer - nem jöhetett volna létre a szikesedési szakterület emblematisztikus, nagy tudású kutatóinak támogató együttműködése nélkül. Tisztelettel köszönöm, hogy a szikesedéskutatás nemzetközi hírű tudósai, *Prof. Dr. Várallyay György*, *Dr. Rédly Mariann*, *Dr. Rajkai Kálmán* és *Dr. Molnár Endre* az MTA TAKI-ból, néhai *Prof. Dr. Filep György* és *Dr. Blaskó Lajos* a Debreceni Egyetemről partnerüknek fogadtak, barátságukat tisztelték meg, és lehetővé tették számomra, hogy több évtizedes tapasztalataikat szakértői rendszerbe foglaljam.

Tisztelettel köszönöm az intézeti vita opponenseinek, *Prof. Dr. Németh Tamás* akadémikus úrnak és *Prof. Dr. Sinóros-Szabó Botond* úrnak, az MTA doktorának, hogy alapos odafigyeléssel átolvasták doktori értekezésemet, és értékes észrevételeikkel segítettek végső tartalmának és formájának kialakítását.

Végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom családomnak, feleségemnek *Máriának* és gyermekeimnek, *Gábornak* és *Anikónak*, akik tökéletes családi háttérrel biztosítottak munkámhoz.

NYILATKOZAT

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Karán a Kerpely Kálmán Növénytermesztési, Kertészeti és Regionális Tudományok Doktori Iskola keretében készítettem el a Debreceni Egyetem AMTC MÉK doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2010. március.

.....
Fehér János jelölt

NYILATKOZAT

Tanúsítjuk, hogy Fehér János doktorjelölt 2008. szeptembere és 2010. márciusa között a fent nevezett Doktori Iskola keretében irányításunkkal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult, az értekezés a jelölt önálló munkája. Az értekezés elfogadását javasoljuk.

Debrecen, 2010. március.

.....
Prof. Dr. Tamás János
témavezető

.....
Dr. Juhász Csaba
témavezető