

Doktori (PhD) értekezés

Barta Károly

Szeged, 2004

Szegedi Tudományegyetem
Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

TALAJERÓZIÓS MODELLÉPÍTÉS A EUROSEM MODELL NYOMÁN

Doktori (PhD) értekezés

Barta Károly

Témavezető:
Dr. Mezősi Gábor

Szeged, 2004

1. Bevezetés, célkitűzések

A Föld felszínén globális problémát jelent a vízerózió. Míg a természetes körülmények között lejátszódó ún. geológiai erózió mértéke évente csupán 0,1-3 t/ha, addig a művelt területek eróziója ennek akár 6-100-szorosa is lehet (GOUDIE, A. 1995), jóval meghaladva ezzel a talajképződés éves ütemét. A talajvesztés helyszíni mérése nehézkes, idő- és munkaigényes folyamat, ezért egy-egy terület tényleges eróziójának kvantifikálására, illetve a mezőgazdasági tervezéshez szükséges talajeróziós veszteségek megbecslésére talajeróziós modelleket alkalmazunk. A modellek sokfélesége jól illusztrálja a változatos célokat és a modellezésben rejlő nehézségeket. A célok különbözőségét elsősorban a modellezett terület nagysága és jellege (parcella, vízgyűjtő), másrészt pedig a modellezni kívánt időtáv (egy csapadékesemény, egy hónap, egy év, stb.) jelenti, de még az azonos célok megvalósítására is számos modell készült. Ennek főleg az eróziót meghatározó tényezők rendkívüli térbeli és időbeli változatossága, számos paraméter mérésének nehézségei és az eróziót befolyásoló talajparaméterek között fennálló bonyolult összefüggésrendszer az oka. Ezért még a legegyszerűbb, matematikai egyenleteken alapuló modellek sem nélkülözhetik olyan táblázatok, nomogramok használatát, amelyek a nehezen mérhető paraméterek mérését hivatottak kiváltani. Ezek a több száz vagy több ezer mérés alapján megalkotott segédeszközök azonban korlátozott felhasználhatóságúak, csak a méréseknek helyet adó földrajzi környezetben (éghajlati viszonyok, talajtípusok, művelési mód, vegetáció) alkalmazhatók. Más területeken való alkalmazásuk alapvető feltétele ezen táblázatok és nomogramok adaptálása a helyi adottságokra, azaz a modell kalibrálása.

Hazánkban is mind a dombvidékeken, mind a nagyobb reliefű alföldeken egyaránt komoly gondot jelent a mezőgazdaság számára a talajerózió. Mérésére és modellezésére országszerte számos kísérlet folyik, melyek során a legkülönbözőbb talajú és művelési módú területek erózióját határozzák meg közvetlen terepi méréssel, illetve különböző talajeróziós modellek segítségével (VERŐNÉ W. M. 1996, KERTÉSZ Á. et al. 1997, HUSZÁR T. 1998, CSEPINSZKY B. 1999, KERTÉSZ Á. et al. 2000, CENTERI Cs. 2002b).

Munkám elsődleges célja a EUROSEM modell (MORGAN, R. P. C. 1992, 1993, 1998a, 1998b) hazai adaptálása volt. Választásom az alábbiak miatt esett éppen erre a modellre:

- egyesemenyes modell, így alkalmas egy-egy intenzív nyári zápor, illetve többórás csendes eső eróziós hatásának a jellemzésére is,

- dinamikus modell, ezért egy-egy csapadékesemény eróziós hatását nemcsak az összegzett lefolyással, illetve erózióval jellemzi, hanem bepillantást enged a folyamatok dinamizmusába is,
- nagy méretarányban, parcella, illetve kisvízgyűjtő szintjén dolgozik, azaz viszonylag jól definiált és előteremthető mennyiségű bemeneti paramétert igényel.

A modell kalibrálásához szükséges méréseket a Velencei-hegységben terveztem megvalósítani. Ehhez 1998 és 2002 között 5 éven keresztül végeztem különböző parcellákon és kisvízgyűjtőkön a helyi adottságokhoz és lehetőségekhez igazodó módszerekkel eróziós méréseket, melyek eredményeképpen egy olyan mért adatállományt hoztam létre, amely számos modell adaptálásán túlmenően, illetve azt követően a későbbiekben alkalmas lesz a hegység eróziós viszonyainak és anyagforgalmának a jellemzésére is, ezáltal a terület- és tájhasználati menedzsment számára is alapadatokat szolgáltathat.

A mért adatok segítségével teszteltem a EUROSEM modellt, de a kalibrálás nem volt elvégezhető, mivel a modell tesztelése és kalibrálása közben olyan algoritmikus, koncepcionális és egyéb problémák merültek fel, amelyek megkérdőjelezzik a modell jelenlegi formában történő használhatóságát. Sajnos a EUROSEM-mel foglalkozó szakirodalomban ezen problémák többségére még utalást sem találunk (QUINTON, J. N. 1997, QUINTON, J. N. et al. 1998, FOLLY, A. J. V. et al. 1999, VEIHE, A. et al. 2000a, 2000b). Még a modell matematikai háttérének ismeretében is ezen hibák okainak csak egy része deríthető fel, ezért a kalibrálás helyett új célként tűztem ki magam elé egy olyan új, dinamikus elméleti modell megalkotását, amely az alábbi tulajdonságokkal rendelkező részmodellekből áll:

1. A növényzeti részmodell a lehulló eső útját írja le a felszínig, középpontjában a növényzet késleltető szerepe és tartós csapadékraktározása áll. Részben azonos a EUROSEM-mel, alapegyenlete más.
2. A beszivárgási részmodell teljesen új alapokra épül, újszerűségét a *különböző talajrétegek* különböző vízgazdálkodási tulajdonságainak figyelembevétele és az egyes *paraméterekhez rendelt mérési módszerek* rögzítése jelenti.
3. A lefolyási részmodell a felszínen keletkező vízfilm térbeli és időbeli változását (vastagság, sebesség) írja le. Néhány egyszerűsítéstől eltekintve a EUROSEM-ből lett átvéve.
4. Az eróziós részmodell a EUROSEM-ben is használatos egyenletekre épül.

Az új modell felépítése természetesen több olyan kérdést is felvetett, amelyek közül a legfontosabbakat önálló kutatási célkitűzésként is össze lehet foglalni:

1. A talajok víznyelő és vízáteresztő képességének mérésére szolgáló módszerek összehasonlítása (duplakeretes beáztatás, állandó víznyomás módszere, Vér-féle csöves módszer, stb.)
2. A különböző módszerekkel mért értékek „kompatibilitásának” vizsgálata, azaz átszámítási képletek megalkotása a Darcy-törvény, a Horton-képlet és a Green-Ampt összefüggés segítségével
3. A létrehozott új eróziós modell tesztelése mérési adatokkal
4. A modell kalibrálása magyarországi mintaterületen.

A felsorolt négy feladatkörből jelen dolgozatban az elsőt egy külön alfejezet taglalja, a többi pedig a közeljövő feladataiként fogalmazható meg.

2. A talajeróziós modellezés általános jellemzése

2.1. A talajerózió fogalma és jelentősége

Erózió fogalmán a földfelszín valamilyen közeg (víz, levegő, jég) általi lepusztítását értjük (FUTÓ J. 1991, PÉCSI M. 1991, BORSY Z. 1993). Amennyiben ez a folyamat az emberiség számára hasznosítható (termékeny) talajréteget érinti, talajerózióról beszélünk. Eltekintve a nagyobb földtörténeti időtávlatokban is ritkábban jelentkező, de sokkal drasztikusabb, a talajtakaró pusztulásán jóval túlmutató jég- illetve gleccserelőrenyomulásoktól, természetesen gyakorlati szempontból csak a víz és a szél pusztító hatásával érdemes foglalkoznunk, ennek megfelelően víz- és szélerózióról beszélünk. Mind a nemzetközi, mind a hazai szakmai szóhasználatban is elterjedt – talán helytelenül –, hogy a közeg megjelölése nélkül használt *talajerózió* (soil erosion) kifejezés alatt sokszor csak a vízeróziót értjük (KERÉNYI A. 1991), míg a szél által okozott eróziót a ténylegesen ezt kifejező *szélerózió* (wind erosion) névvel illetjük. Ennek oka vélhetően a széleróziós kutatások mostohább helyzetében (SZATMÁRI J. 1999) keresendő. Mivel a dolgozat témája a víz által okozott erózió, ezért a későbbiekben is gyakran használt *talajerózió* kifejezés alatt minden esetben vízerózió értendő.

Bár a talajtakaró természetes fejlődése során kialakuló dinamikus egyensúly is sérülékeny (pl. klímaváltozások, tektonikus mozgások, erdőtüzek), a talajképződés ütemét tartósan meghaladó ún. gyorsított eróziót a rendszeres mezőgazdasági művelés hozta magával (THYLL SZ. 1992, KERÉNYI A. 1998). Már a bronzkorból vannak erózióra vonatkozó adataink (MERCER, R. et al. 1994), a római időkből pedig már számos bizonyítékunk van arra, hogy a földművelés és az erdőirtások óriási lehordódást eredményeztek a lejtős területeken, amely természetesen az adott terület vízgazdálkodására és a folyók, források vízjárására is nagy hatással volt (RENFREW, C. et al. 2000). Az erózió elleni védekezés legősibb formái (teraszolás, kősáncok rakása) már ekkor megjelentek. A középkori Európában – így hazánkban is – a 15-16. századtól kezdve találunk nagyobb számban olyan leírásokat, amelyekből egy-egy terület fokozott erodáltságára lehet következtetni (SZ. JÓNÁS I. 1993, TONK S. 2000, KARANCSI Z. 2002). Ezek általában az erdők drasztikus kiirtásával kapcsolatban említik a terület elkopárosodását, a tavak és a völgytalpak feliszapolódását.

Napjainkban bolygónkon az erózióknak köszönhetően évente 20 milliárd tonnára becsülik a termőföldről távozó talajmennyiséget, az ebből fakadó terméseszkökenést pedig 20 millió tonna szemesterményre, a teljes termelés 1 %-ára (DOWDESWELL, E. 1998).

2.2. A talajeróziós modellek főbb ismérvei

A természetben zajló folyamatokat leíró modellek rendkívül sokfélék lehetnek, de általában az alábbiak valamelyike teszi kidolgozásukat szükségessé:

- a folyamat kiindulási körülményei vagy legalábbis annak egyes részletei nem ismertek,
- a folyamat végeredménye nem ismert,
- a folyamat kiindulási körülményei és végeredménye közötti bonyolult összefüggésrendszer nem ismert,
- a fentiek valamilyen kombinációja.

A modellek célja pontosan az előzőekben feltüntetett ismeretlen tényezők meghatározása (CHORLEY, R. J. et al. 1967). A kiindulási körülményeket leíró kvantitatív vagy kvalitatív adatokat nevezzük bemeneti paramétereknek (input), a folyamat végeredményét jellemző adatokat kimeneti paramétereknek (output), míg a kettő közötti összefüggésrendszer megadása maga a modell. A valóság bonyolultságának és információhiányunknak köszönhetően a legtöbb modell *egyszerűsít*, azaz a folyamat kimenetele szempontjából kevésbé fontosnak vélt összefüggésektől és bemeneti paraméterektől eltekint, ez azonban nem mehet a folyamat *valóság* leírásának a rovására (MEZŐSI G. 1995). Az egyszerűsítések miatt viszont nagyon fontos megadni a modell *érvényességi körét* is. Ezek alapján tehát akkor nevezhetünk „jóknak” egy modellt, ha kezelhető mennyiségű (és előteremthető) input paraméterekkel dolgozik, minél szélesebb körben alkalmazható, ugyanakkor outputjaiban jól közelíti a valóságot (CHORLEY, R. J. et al. 1971).

A talajerózió folyamatát szinte kizárólag csak determinisztikus modellek írják le. Ezek **bemeneti paraméterei** között megtalálunk minden olyan tényezőt, amelyek befolyásolják az eróziót. Ez nagyon sokféle adattípust jelent, amelyek osztályozását alapvetően négyféleképpen tehetjük meg:

1. Az alapján, hogy a paraméter mely környezeti elemet jellemzi, megkülönböztetünk meteorológiai, növényzeti, topográfiai, talaj- és egyéb paramétereket (MORGAN, R. P. C. et al. 1992) (1. táblázat).

2. Kvantitatív és kvalitatív paraméterek. Kvantitatív például a lejtőhossz és a talaj nedvességtartalma, kvalitatív például az őszi búza - kukorica - szója vetésforgó vagy a lejtőre merőleges művelés (WISCHMEIER, W. H. et al. 1978). Természetesen ezen kvalitatív paraméterek is számszerűsítve fognak a modellbe kerülni.
3. Mérhető és „nem mérhető” paraméterek. A „nem mérhető” paraméterek fogalma itt nem azt jelenti, hogy nem létezik módszer a mérésükre, csupán azt, hogy mérésük a modellezni kívánt területeken a rendelkezésünkre álló lehetőségek keretein belül nem valósítható meg (pl. időhiány, technikai felszereltség hiánya, pénzhiány, vagy egyszerűen a paraméter térbeli és időbeli változékonysága miatt). A leírtakból is látszik, hogy ez a felosztás nem egzakt, vagyis a körülmények változásával változhat egy-egy paraméter besorolása, de szinte minden vizsgálatnál – bármilyen modellt alkalmazunk – számolnunk kell néhány ilyen paraméterrel.
4. Érzékeny és „nem érzékeny” paraméterek. Az eróziót befolyásoló paraméterek között lesznek olyanok, amelyek változása rendkívül érzékenyen érinti az erózió mértékét (pl. beszívargási ráta, csapadékinzintitás, erodibilitás), értelemszerűen ezeket nevezzük érzékeny paramétereknek (MORGAN R. P. C. et al. 1998b).

Paramétertípus	Példák
Meteorológiai paraméter	csapadékinzintitás, erozivitás, hőmérséklet, szél erősség
Növényzeti paraméter	felszínborítottság, csapadékraktározás, növényzet magassága
Topográfiai paraméter	lejtőhossz, lejtőszög, felszínérdesség
Talajparaméter	vízáteresztés, térfogattömeg, humusztartalom, fizikai talajféleség
Egyéb paraméter	vetésforgó típusa, erózió elleni védekezés módja

1. táblázat: Példák a talajeróziós modellekben használt input paraméterekre

A modellezés során a legtöbb problémát az érzékeny, de nem mérhető paraméterek okozzák. Ilyen esetben általában nincs más választásunk, mint korábbi, hasonló körülmények között (általában hasonló talajtípuson) elvégzett méréseken alapuló irodalmi adatokat használni fel. A legtöbb modell táblázat vagy nomogram formájában tartalmaz ilyen segédleteket, amint ezt már a bevezetőben említettem. Pontosan ezek a segédletek jelentik a modellek alkalmazhatóságának a korlátait is, illetve a korábban említett kalibrálás szükségességét a területi kiterjesztés érdekében. Ehhez mindenképpen rengeteg mérési adatra van szükségünk, hogy a mért erózióból meg tudjuk alkotni az adott alkalmazási területre vonatkozó táblázatokat és nomogramokat.

A **kimeneti paraméterek** között első helyen szerepel az eróziós ráta, amelyet a legtöbb modell t/ha-ban ad meg. Emellett a modell típusától és részletességétől függően leggyakrabban a lefolyt vízmennyiség (lefolyási részmodell eredményeként), annak időbeni alakulása (dinamikus modelleknél), a hordalékkoncentráció, a távozó talaj szemcseösszetétele, esetleg a tápanyagok, szennyeződések mennyisége (anyagforgalmi modelleknél), vagy a termés hozam (termésbecslést is végző modelleknél) szokott szerepelni outputként. A talajerózió gyakorlatias szemléletű modellezésénél célunk vagy az input paraméterek megadásával az erózió kiszámítása, vagy – mely technikailag ugyanezt fogja jelenteni – a kívánt eróziós ráta megadásával a bemeneti paraméterek optimalizálása. Ez utóbbi jelenti gyakorlatilag a termőhelyi adottságok figyelembevételével a termesztendő növényfaj, a művelési mód és az erózió elleni védelem módjának a megválasztását, azaz a területhasznosítás talajvédelemhez való alkalmazkodását.

Az input és az output adatok közötti **összefüggérendszer** definiálása adja általában a modellek mibenlétét. A rendkívül összetett és messzire vezető felosztásukból itt csak azt emelném ki, hogy amennyiben a modell nagyszámú mérés alapján felírt tapasztalati képleteken alapszik, és nélkülöz minden – a folyamat hátterét leíró – matematikai összefüggést, akkor *tapasztalati*, ha a folyamat hátterét leíró egzakt matematikai és fizikai egyenleteken alapszik, akkor *fizikai / elméleti* modellnek nevezzük (BEVEN, K. J. 1989).

A modellek **érvényességi körében** is óriási eltérések tapasztalhatóak. A bevezetőben már érintőlegesen említettek szerint három fő kérdéskört kell tisztázni egy modell alkalmazása előtt:

1. Időtényező: a legjobb felbontású modellek képesek perces pontossággal output adatokat produkálni (általában ezek az „egyesemenyes” modellek), vannak amelyek csak havi, évi, vagy még hosszabb időtávra alkalmazhatók.
2. Területméret, méretarány problémaköre: egyes modellek csak néhány ha-os, maximum néhány 10 ha-os területre alkalmazhatók, míg mások akár több ezer km²-re is.
3. Az előzővel szorosan összefügg a modellezhető terület jellege is: általában a kifejezetten parcellákra, mezőgazdasági táblákra kidolgozott modellek csak nagy méretarányban dolgoznak, míg a kisvízgyűjtőktől (max. néhány 10 km²) a nagyobb folyók vízgyűjtője (1000-10.000 km²) felé haladva a modellek felhasználhatósága is eltolódik az egyre kisebb méretarányok (felbontás) felé. A vízgyűjtőkre is alkalmazható modellekkel szemben ma már alapkövetelmény valamilyen GIS-modul megléte.

Általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb méretarányban, minél kisebb területre alkalmazható egy modell, annál többféle és pontosabb bemeneti paraméterre van szüksége, tehát alkalmazása annál gondosabb előkészületeket igényel. A nagyobb területekre alkalmazott, kis méretarányú modelleknél viszont a becslések és a generalizálás miatti információvesztés következtében a pontosság fog sérülni, illetve elveszítjük a kontrollmérések lehetőségét. A nagy területek erózióját hosszú távra (100 év felett) kiszámító modelleket már nem szoktuk a talajeróziós modellek közé sorolni, hanem felszínfejlődési modelleknek nevezzük őket.

Összegezve a leírtakat elmondható, hogy talajeróziós modellnek azokat a számítási módszereket, képleteket nevezhetjük, amelyek *jól definiált bemeneti paraméterek* segítségével outputként *számszerű becslést* adnak egy terület talajeróziójára vonatkozóan.

2.3. A talajeróziós modellezés irodalmának áttekintése

Mint a 2.1. fejezetben láthattuk, az erózió elleni védekezés rendkívül hosszú múltra tekint vissza, ennek ellenére tudományos kutatása csak az 1910-es években vette kezdetét. Az első eróziós parcellákat a Missouri Egyetemen állították be 1915-ben (CENTERI Cs. 2002b). A kutatásokat az Egyesült Államok Földművelési Minisztériumának Talajvédelmi Szolgálat (USDA SCS) támogatta, mivel az USA területén is óriási károkat okozott az erózió, s ezért egy olyan rendszer kidolgozását akarták megvalósítani, aminek segítségével a várható erózió előre jelezhető, így javaslatot tehetnek a gazdálkodóknak a megfelelő talajművelési módra (HUSZÁR T. 1998). Több évtizedes kísérletezések, próbálkozások, majd szisztematikus méréssorozatok eredményeképpen született meg a ma már **USLE** néven közismertté vált „Egyetemes Talajvesztési Egyenlet” (Universal Soil Loss Equation) végleges formája (WISCHMEIER, W. H. et al. 1978). A később sok eróziós modell alapjául is szolgáló USLE tulajdonképpen az első használható talajeróziós modell, hiszen eleget tesz az előző fejezetben megfogalmazottaknak. Legfőbb ismérvei az alábbiakban foglalhatók össze:

- az eróziót alapvetően az esőenergia alapján határozza meg,
- az esőenergiából nagyszámú mérés alapján felírt tapasztalati képletekkel számolja az eróziót, azaz tapasztalati modell,
- parcellára, illetve mezőgazdasági táblára alkalmazható,
- az éves talajpusztulás mértékét adja meg t/ha-ban az adott éghajlati viszonyok között,
- statikus modell, tehát az erózió időbeni lefolyásáról nem szolgáltat információt.

A hiányosságokkal és korlátokkal terhelt USLE továbbfejlesztése nem váratott sokáig magára. Elsőként az egyes faktorok módosításával alkalmassá tették a modellt az egyedi csapadékesemények eróziós hatásainak a jellemzésére is, megalkotva a **MUSLE**-t (Modified Universal Soil Loss Equation, WILLIAMS, J. R. et al. 1977). További jelentős módosítások után a modell már nemcsak szántóföldekre, hanem legelő- és erdőterületekre is alkalmazhatóvá vált (**RUSLE** – Revised Universal Soil Loss Equation, RENARD, K. G. et al 1991). A még mindig USLE-alapokon nyugvó **EPIC** (Erosion Productivity Impact Calculator, WILLIAMS, J. R. et al. 1990) modell kidolgozásának célja a farmerek számára egy olyan kis hardver- és szoftverigényű, könnyen kezelhető modell létrehozása volt, amely a vízerózió becslésén túl a szélerózió becslésére is alkalmas, és ezek alapján a terméshozamokat is előrejelzi. Segítségével a területhasznosítás optimalizálása is megoldható. Outputjai között szerepel pl. a lefolyás, az evapotranszspiráció, a talajvízszintváltozás is. Rendkívül sokoldalú használhatósága mellett továbbra is tapasztalati és statikus maradt (HUSZÁR T. 1998).

Az eróziós modellezés világméretű elterjedése új alapokon nyugvó modellek kidolgozásának szükségességét vonta maga után. Jó példa erre a zimbabwei méréseken alapuló, dél-afrikai területekre alkalmazható **SLEMSA** (Soil Loss Estimator for Southern Africa, ELWELL, H. A., 1981) megalkotása, mely még mindig kizárólag csak mérési tapasztalatokon nyugszik. A tapasztalati modellek rendkívül nagyszámú mérési szükséglete miatt a 80-as évek elejétől kezdődően a tapasztalati modellek helyett a dinamikus fizikai modellek ugrásszerű elterjedését figyelhetjük meg. Az utóbbi 25 évben több tucat eróziós modell látott napvilágot, amelyek közül a fontosabbak jellemzőit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A felsorolt fizikai és elméleti modellekre jellemző, hogy a lefolyást és az eróziót már képesek külön kezelni, többségük kétváltozós differenciálegyenletek segítségével írja le a lejtőmenti lefolyást (lefolyási vagy hidrológiai részmodell), majd a csepperóziót és a lefolyó víz hordalékszállítási dinamikájának matematikai leírásával határozza meg a talajvesztiséget. Használatuk nagyon széles körben elterjedt, ugyanakkor mind a nemzetközi, mind a hazai szakirodalomban a talajeróziós modellezésben még mindig jelentős szerepet töltenek be az USLE alapú alkalmazások, jobbára nagyobb területek talajeróziós viszonyainak térinformatikai eszközökkel történő jellemzése formájában (DESMET, P. J. J. et al. 1996, MEZŐSI G. et al 1997, KERTÉSZ, Á. et al. 2000, SANTORO, V. et al. 2000, CENTERI Cs 2002a, LICZNAR, P. 2003, stb.).

A modell neve	Területi érvényesség	Időbeli érvényesség	Forrás
ANSWERS ¹	vízgyűjtő	csapadékesemény	BEASLEY et al. 1980
CREAMS ²	összetett lejtő	csapadékesemény	KNISEL 1980
GUESS ³	parcella	csap. esemény - év	ROSE et al. 1983
WEPP ⁴	parcella, vízgyűjtő	csap. esemény - év	NEARING et al. 1989
KINEROS ⁵	parcella, vízgyűjtő	csapadékesemény	WOOLHISER et al. 1990
EUROSEM ⁶	parcella, vízgyűjtő	csapadékesemény	MORGAN et al. 1992
MEDRUSH ⁷	vízgyűjtő	1 óra - 100 év	KIRKBY 1992
AGNPS ⁸	vízgyűjtő	csap. esemény - év	YOUNG et al. 1994
EROSION2D/3D	parcella, vízgyűjtő	csapadékesemény	WERNER et al. 1996
LISEM ⁹	vízgyűjtő	csapadékesemény	JETTEN et al. 1996

¹ Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation, ² Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management System, ³ Griffith University Erosion Sedimentation System, ⁴ Water Erosion Prediction Project, ⁵ Kinematic Runoff and Erosion Model, ⁶ European Soil Erosion Model, ⁷ Mediterranean Runoff Simulation on Hillslopes, ⁸ Agricultural Non-Point-Source Pollution Model, ⁹ Limburg Soil Erosion Model

2. táblázat: A fontosabb fizikai / elméleti modellek áttekintése (MORGAN, R. P. C. 1996, HUSZÁR T. 1998, SCHMIDT, J. 1998, a http://soilerosion.net/doc/models_menu.html web-oldal és a feltüntetett források nyomán)

Magyarországon az eróziós modellezés kezdetének a Kazó-féle esőszimulátoros méréseket tekinthetjük (KAZÓ B. 1966, 1967). Ezek célja különböző talajtípusok esetén a lejtőszög és a növényborítottság lefolyásra, ezen keresztül erózióra gyakorolt hatásának a vizsgálata volt. Az USLE-t már fejlesztése alatt átvette a magyar talajvédelmi tervezés, és 1962 őszétől alkalmazta a gyakorlatban is (ERŐDI B. et al. 1965, 1974). Felhasználása a talajeróziós térképezésben egyre nagyobb teret nyert (KISS A. et al. 1972, MÁTÉ F. 1974), sőt a gyakorlati alkalmazáson túlmenően tudományos vizsgálatok is kezdődtek az USLE segítségével (DEZSÉNY Z. 1982). Az USLE-val kapcsolatos hazai kutatások több évtizede visszatérő problematikája a talajok erodálhatóságára vonatkozó K-tényező meghatározása talajainkra. Erődi et al. (1965), Stefanovits (1966), Kertész et al. (1997) és Mészáros et al. (2001) kísérletei (CENTERI Cs. 2002b) után CENTERI Cs. (2002b) munkájával talán megnyugtató választ adott a kérdésre.

Az USLE mellett természetesen más modellek adaptálása illetve felhasználása is jelen van a hazai eróziós modellezés történetében. Nemzetközi együttműködés keretében kezdődött 1988-ban az EPIC tesztelése (RICHTER, G. et al. 1990, MEZŐSI G. et al. 1991, KERTÉSZ Á. et al. 1997), de említhetnénk a MEDRUSH modell hazai adaptálását is, amelyben az elmúlt

években az MTA Földrajztudományi Kutatóintézete vett részt (TÓTH A. et al. 2001). Ők a Velencei-tó és a Balaton vízgyűjtőjén is végeznek eróziós méréseket (KERTÉSZ Á. et al. 1997, HUSZÁR T. 1998, KERTÉSZ Á. et al. 2000). Ez utóbbiak szükségességét megerősíti, hogy nagyobb tavaink komplex anyagforgalmának vizsgálatai kiemelt jelentőségűek, és ezen kutatásokban a mezőgazdasági területek eróziója különösen hangsúlyos szerepet kap. A Balaton részvízgyűjtői közül az Örvényesi-Séd (DEZSÉNY Z. 1982, HUSZÁR T. 1998), a Tetves-patak (DEZSÉNY Z. 1982, KERTÉSZ Á. et al. 1997), a Zala (DEZSÉNY Z. et al. 1986) és a Burnót-patak (JORDAN GY. et al. 2004) vízgyűjtőjének megkutatottsága emelhető ki. A Velencei-tó vízgyűjtőjéről is számos eróziós tanulmány látott már napvilágot (VERŐNÉ W. M. 1996, BARTA K. et al. 2000, CSATÓ SZ. et al. 2000, KERTÉSZ Á. et al. 2000).

A hazai tudományos műhelyek közül még mindenképpen meg kell említeni a Debreceni Egyetem Alkalmazott Tájföldrajzi Tanszékét, ahol Kerényi Attila vezetésével több mint húszéves múltra tekintenek vissza a talajeróziós kutatások. Ezek fókuszában a kvantitatív szemléletű talajeróziós térképezés és a csepperózió folyamatának matematikai-fizikai leírása állnak (KERÉNYI A. 1981, 1984, 1986, 1987, 1991, KERÉNYI A. et al. 1990).

Fontos kiemelni a Veszprémi Egyetem Georgikon Mezőgazdaságtudományi Karának a Vízgazdálkodási és Meliorációs Tanszékén folyó munkát is. A tanszéken Csepinszky Béla vezetésével 1991-től kezdődően számos együttműködés keretében végeznek esőszimulátoros méréseket (CSEPINSZKY B. 1999), mellyel a különböző hazai talajtípusokra a későbbiekben is felhasználható tudományos archívumot hívtak életre.

A JATE Természeti Földrajzi Tanszéke 1988-ban kapcsolódott be az EPIC modell tesztelésébe (RICHTER, G. et al. 1990, MEZŐSI G. et al. 1991), majd később számos USLE-alkalmazás is napvilágot látott intézetünkben. Ezek között egyaránt szerepel mátrai mintaterületen végzett erózióbecslés (MEZŐSI G. et al 1993, MEZŐSI G. et al 1997) és velencei-hegységi alkalmazás is (VÖRÖS H. 1996). 1998-ban vezetésemmel elkezdtük a EUROSEM modell adaptálását a Velencei-hegységben (BARTA K. 2001), 2001-től pedig – szintén velencei-hegységi mintaterületen – megkezdődött az EROSION2D/3D modell tesztelése is.

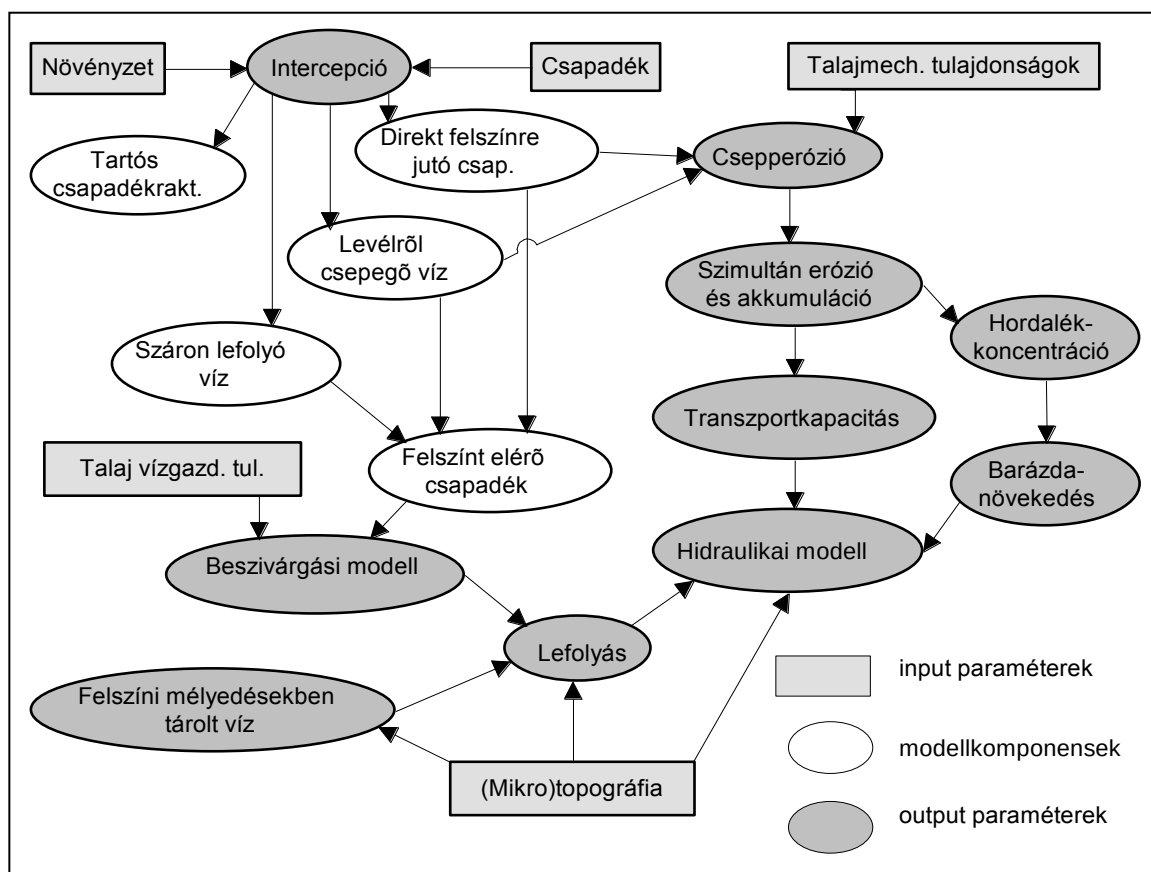
3. A EUROSEM modell összefoglaló jellemzése

3.1. A modell jellege és elvi alapjai

A EUROSEM (European Soil Erosion Model) talajeróziós modellt a 90-es évek elejére dolgozták ki az Egyesült Királyságban, Silsoe-ban a University of Cranfield, School of Agriculture, Food and the Environment kutatóinak vezetésével (MORGAN, R. P. C. et al. 1992, 1993, 1998a). Létrejöttében nagy szerepet játszott a 80-as évek második felében megerősödő „modellgyártási hullám”, a megalkotása idején azonban már működtek a CREAMS és a WEPP modellek. Ezen modellek azonban csak statikus outputtal rendelkeznek, azaz csak a vizsgált területről távozó vízmennyiséget és talajvesztiséget adják meg, továbbá számos olyan bemeneti paraméterrel dolgoznak, amelyek csak közvetett hatással vannak az erózióra (pl. evapotranszpiráció). Emiatt az európai országokban, ahol általában az éves talajvesztés döntő többségét egy-két nagyobb csapadékesemény okozza, alkalmazásuk nem szerencsés (MORGAN, R. P. C. et al. 1998a). Ezért az Európai Közösség 1986-os brüsszeli tanácskozásán Chisci és Morgan kezdeményezésére létrehoztak egy talajeróziós szakemberekből álló kutatócsoportot, amely célja az alábbi követelményeknek megfelelő talajeróziós modell megalkotása volt:

- alkalmas legyen az európai országok fent említett viszonyai között az erózió becslésére és előrejelzésére, azaz
- egyesemenyes dinamikus modell legyen,
- az eseményen belül is képes legyen a lefolyás és a hordalékmozgás időbeni jellemzésére,
- viszonylag kevés, csak egy-egy csapadékesemény során az erózióra direkt hatást gyakoroló input paramétereket használjon,
- nagy méretarányban dolgozzon,
- parcellákra, mezőgazdasági táblákra és kisebb vízgyűjtőkre is alkalmazható legyen (CHISCI, G. et al. 1988).

Az 1987 folyamán beindult munka több modell bevonásával illetve összegyűrásával (KINEROS - WOOLHISER, D. A. et al. 1989, 1990, MIKE SHE model - MORGAN, R. P. C. et al. 1998a) vezetett 1992-ben a EUROSEM megalkotásához (1. ábra).



1. ábra: A EUROSEM modell működési mechanizmusa (MORGAN, R. P. C. et al. 1998a alapján)

Az input paraméterek részletes jellemzését a 3.2. fejezetben adom meg, arra azonban már itt felhívnom a figyelmet, hogy nem véletlen szerepel az ábrán „csapadék” megjelölés, ugyanis az egyesemenyes modell egyik előnye pontosan ebben rejlik, hogy inputjai között nincsenek nehezen mérhető vagy nehezen hozzáférhető meteorológiai paraméterek (pl. besugárzás, párolgás, széljellemzők), hanem szinte csak csapadékjellemzők. Ugyanakkor hátrányt jelent egy egyesemenyes modellnél, hogy általában nincs lehetőség minden egyes modellezni kívánt eső előtt az összes érzékeny bemeneti paraméter direkt mérésére (MORGAN, R. P. C. et al. 1998a). Bár az output paraméterek részben leolvashatóak az ábráról, fontosnak tartom kiemelni, hogy a modell dinamikus voltának köszönhetően a lefolyt vízmennyiség és az eróziós ráta mellett a lefolyásintenzitás (vízhozam) és a lehordódásintenzitás (hordalékhozam) időbeni megadása (*hidrográf* és *szedigráf*) a további két legfontosabb paraméter. Ezeket akár félperces felbontással tudja kalkulálni a modell. Az output paraméterek tételes összefoglalását e fejezet második felében adom meg.

Az egyes tényezők közötti összefüggéseket nem tapasztalatokra alapozva, hanem fizikai törvényekkel írja le a modell, azaz a háttérét egzakt matematikai egyenletek adják (3.

táblázat). Mivel nem célunk a modell teljes matematikai hátterének ismertetése, itt a táblázatból csak az alábbiakat emelnénk ki:

1. A beszivárgást a modell a Horton-képlettel számítja (HORTON, R. E. 1933, 7. egyenlet)
2. A területiséget teljes egészében a KINEROS-ból veszi át (10-11. és 16. egyenlet)
3. A hordalékhozamot a vízhozam és a hordalékkoncentráció segítségével számolja (15. egyenlet).

Sorsz.	Egyenlet	Az egyenletben szereplő paraméterek	Forrás
1.	$I_C = R P_C$	I_C : növényzetre jutó csapadék (mm), R : csapadékmennyiség (mm), P_C : növényborítás aránya	Merriam 1973
2.	$I_S(t) = I_X (1 - e^{-R_C(t)/I_X})$	t : idő, I_S : csapadékraktározás (mm), I_X : maximális csapadékraktározás, R_C : kumulált csapadékmennyiség (mm)	van Elewijck 1989
3.	$S_{fg}(t) = 0.5 T_{if}(t) \cos P_a \sin^2 P_a$	S_{fg} : száron lefolyó víz füvek esetén (mm), T_{if} : növényzeten keresztül a felszínre jutó víz (mm), P_a : növényi száraz felszínnel bezárt átlagos szöge	van Elewijck 1989
4.	$S_{fo}(t) = 0.5 T_{if}(t) \cos P_a$	S_{fo} : száron lefolyó víz egyéb növényzet esetén (mm)	
5.	$G = 1/K_S \int_{-\infty}^0 K(\Psi) d\Psi$	G : kapilláris vízvezetés (mm), K_S : talaj vízáteresztő képessége (mm/min), $K(\Psi)$: hidraulikus vezetőképesség a mátrixpotenciál (Ψ) függvényében	
6.	$B = G (\Theta_s - \Theta_i)$	Θ_s : talaj maximális víztartalma (v/v), Θ_i : kezdeti víztartalom (v/v)	
7.	$F_C(t) = K_S (e^{F(t)/B} / (e^{F(t)/B} - 1))$	F_C : beszivárgási kapacitás (mm/min), F : kumulált beszivárgott csapadékmennyiség (mm)	Smith - Parlange 1978
8.	$K_{sv} = K_S (1 - P_b)$	K_{sv} : módosított vízáteresztő képesség, P_b : felszíni szárarány	Holtan 1961
9.	$a = s^{0.5}/n$	s : lejtőszög (m/m), n : Manning-féle n-érték ($m^{1/6}$)	
10.	$Q(t,x) = a h(t,x)^m$	Q : lefolyás (m^3/s), h : vízfilm vastagsága (m), $m = 5/3$, x : parcella tetejétől mért távolság (m)	Woolhiser et al. 1989
11.	$\partial h / \partial t + \partial Q / \partial x = q(x, t)$	q : lejtőirányú vízhozamnövekedés (fajlagos csapadékfelesleg, $m^3/s/m$)	Woolhiser et al. 1989
12.	$D_s = k K_e e^{-b h}$	D_s : csepperózió, k : talajerodibilitás (g/J), K_e : csapadék erozivitás (J/m^2), b : 1-3	Brandt 1989
13.	$K_e(DT) = 8.95 + 8.44 \log I$	$K_e(DT)$: direkt csapadék kinetikus energiája (J/mm), I : csapadékkintenzitás (mm/h)	Brandt 1989
14.	$K_e(LD) = 15.8 P_h^{0.5} - 5.87$	$K_e(LD)$: levélről csöpögő víz kinetikus energiája (J/mm), P_h : növényborítás magassága (m)	Brandt 1989
15.	$D_F(t) = \beta w v_s (C_m - C(t))$	D_F : folyó víz általi erózió (kg/s), β : talajkohézió (kPa), w : folyásszélesség (m), v_s : talajszemcsék ülepedési sebessége (m/s), C_m : maximális hordalékkoncentráció (m^3/m^3), C : hordalékkoncentráció (m^3/m^3)	Smith et al. 1995
16.	$\partial(AC)/\partial t + \partial(QC)/\partial x - e(x, t) = q_s(x, t)$	A : vízfolyás keresztmetszete (m^2), e : a mederágyból egységnyi távolságon felszedett hordalék ($m^3/s/m$), q_s : lejtőirányú hordalékhozamnövekedés (fajlagos hordaléknövekedés, $m^3/s/m$)	Bennett 1974, Kirkby 1980, Woolhiser et al. 1989

* A megadott egyenlet nyilvánvalóan hibás, a kitevőből lemaradt egy negatív előjel, de mivel az összes EUROSEM-re vonatkozó irodalomban így jelenik meg ez a képlet, célszerűbbnek tartottam eredeti formájában feltüntetni. A szoftverben az egyenlet negatív kitevős alakja szerepel.

3. táblázat: A EUROSEM által használt legfontosabb matematikai összefüggések (QUINTON, J. N. 1997 nyomán)

A EUROSEM által felhasznált egyenletekből a későbbiekben számunkra fontosakat az 5. és a 6. fejezetben fogjuk részletesen megismerni.

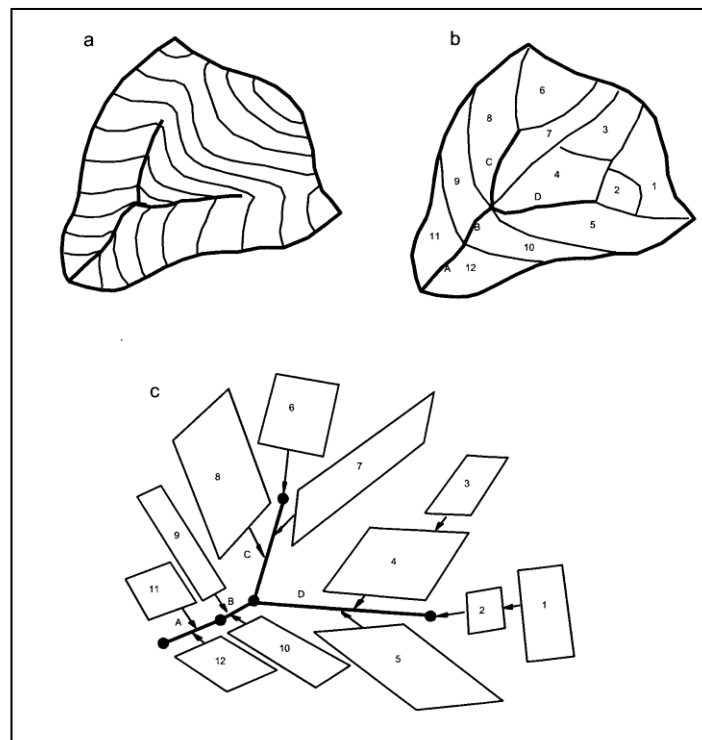
Az eddig leírt struktúra homogén parcellákra és mezőgazdasági táblákra alkalmazható. Ezeket a homogén, minden paraméterében egységes területeket a modell „plane element”-eknek nevezi. Magyarul a tájféldrajzi eredetű, de a hazai talajeróziós szakirodalomban már használatos *erotóp* kifejezés (RICHTER, G. et al 1995, HUSZÁR T. 1999) alkalmazása javasolt. Mivel a modell fejlesztői nem kapcsolták a modellt semmilyen geoinformatikai rendszerhez – bár erre később születtek példák (van DIJCK, S. et al.) –, így kisvízgyűjtőkre történő kiterjesztését az alábbi módon oldották meg:

1. A lineáris vízvezetést végző, barázdánál nagyobb méretű, önálló vízgyűjtővel rendelkező medrekre bevezették a „channel element” (mederegység) fogalmát, és az erotópokhoz hasonlóan paramétereket rendeltek hozzá. Természetesen ez új paraméterek alkalmazását is maga után vonta.
2. Ezek ismeretében a modellezni kívánt vízgyűjtőt felosztjuk erotópokra és mederegységekre (2. ábra a-b).
3. A létrehozott egységek között topológiát definiálunk (2. ábra c), melyben egyértelműen meghatározzuk az egységek közötti hidrológiai kapcsolatokat (kimondatlanul itt deklaráljuk, hogy a modell konvergens lefolyással dolgozik, azaz bármelyik egység csak egy egységnek adhatja tovább a vizét), és a térbeli elhelyezkedésüket (jobb- és baloldali egység megadása).
4. A modellt lefuttatjuk a topologikus egységekre (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b).

Bár nem tartozik a modell átfogó jellemzéséhez, hanem inkább technikai kérdéseket érint, mégis pár mondat erejéig érdemes kitérni a modell szoftverének a működésére. A DOS alatt futó program két input fájlt igényel, a csapadékfájlt és az egyéb paraméterek fájlját, kimenetként pedig három fájlt ad meg:

1. A statikus output fájl tartalmazza az összes erodálódott anyag mennyiségét kg-ban illetve t/ha-ban, a felszínre jutó csapadék össz mennyiségét és maximális intenzitását mm-ben illetve mm/h-ban, a lefolyás kezdetét és időtartamát percben, a maximális lefolyásintenzitást és időpontját mm/h-ban illetve percben, a maximális lehordódási intenzitást és időpontját kg/min-ben illetve percben, (6) a felszíni mélyedésekben tározódott vízmennyiséget egységtípusonként mm-ben, a beszivárgott vízmennyiséget egységtípusonként mm-ben és végül az összes lefolyt vízmennyiséget mm-ben illetve m³-ben.

2. A dinamikus output fájl ezeken kívül az általunk megadott felbontásban (általában percenként) az idő függvényében feltünteti a csapadékintenzitást mm/h-ban, a vízhozamot mm/h-ban illetve m³/min-ben (hidrográf), a hordalékkoncentrációt m³/m³-ben és a hordalékhozamot kg/min-ben (szedigráf).
3. A kiegészítő (auxiliary) output fájl tartalmazza azokat az eredményeket, amelyek tulajdonképpen az előzőekben felsorolt output adatok előállításánál során „háttér-eredményekként” keletkeztek, de a felhasználók számára is érdekesek lehetnek. Ezek közül a teljesség igénye nélkül csak a legfontosabbak pl. a közvetlenül, illetve a levelekről felszínre jutó csapadék kinetikus energiája az eső különböző intenzitású szakaszaiban, a növényzet csapadékraktározása és a száron lefolyó víz (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b).



2. ábra: Egy kisvízgyűjtő modell szerinti egységekre osztása (FOLLY, A. J. V. et al. 1999)

A modell legutóbbi verziója (3.6 jelű) 1998-ban jelent meg, és az alábbi honlapról bárki számára folyamatosan letölthető:

<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/nsri/research/erosion>

Összefoglalva a leírtakat, az alábbiakat érdemes kiemelni a modell főbb jellemzői közül:

- már egyetlen csapadékesemény eróziós hatását is képes modellezni,

- dinamikus modell, mely alkalmas a lefolyás, a hordalékkoncentráció és a lehordódás részletes jellemzésére,
- európai viszonyokra lett kifejlesztve,
- nagy méretarányban (max. 50 ha-ig) alkalmas parcellák és kisvízgyűjtők eróziós viszonyait meghatározni,
- viszonylag kevés bemeneti paramétert igényel,
- minimális szoftver- és hardverigényű.

3.2. A modellben használt input paraméterek

Ebben a fejezetben a EUROSEM által használt input paraméterek jellemzését foglaltam össze. A felhasznált források a modell különböző időpontokban megjelent *User Guide*-jai (*útmutatói*) voltak (MORGAN, R. P. C. et al. 1992, 1993, 1998b), ezért csak az ettől eltérő irodalmi hivatkozásokat tüntettem fel. A paraméterek *meghatározásával* kapcsolatos saját tapasztalataimat *megjegyzések* formájában fogalmaztam meg. Az ismertetés célja nem a modell működtetéséhez szükséges információk teljes közzlése, tehát nem egy magyar nyelvű „user guide” olvasható az alábbiakban, hanem a későbbiekben a modell alkalmazásáról írottak megértéséhez szükséges háttér összefoglalása. A bemeneti paraméterek listája ezért tehát nem teljes, a modell futtatásának beállításaihoz szükséges „technikai inputok” nem szerepelnek benne, csak az eróziót ténylegesen befolyásoló paraméterek. Szintén nem szerepelnek a kisvízgyűjtők leírásához szükséges topológiai faktorok, illetve a barázdákat és mederegységeket leíró paraméterek, mert vizsgálataim során mindig csak barázdamentes, individuális erotóra futtattam a modellt. Terjedelmük miatt nem mellékeltem továbbá a modell kidolgozói által összeállított táblázatokat (ún. standard-eket), amelyek egy-egy paraméter növényzettől, fizikai talajféleségtől vagy alkalmazott talajművelési módtól függő jellemző értékeit adják meg. A paraméterek modellben használt jelöléseit viszont fontosnak tartom megadni, mert a további fejezetekben, főleg a táblázatokban sokszor csak ezeket szerepeltetem. Az input paraméterek összefoglalása (4. táblázat) után azoknak a modell alkalmazhatósága szempontjából összeállított rövid jellemzése olvasható.

Csapadékpáráméterek			Növényzeti páraméterek		
A közel azonos intenzitású szakaszokra bontott csapadékeseményt a szakaszhatárok időpontjaival és a hozzájuk tartozó kumulált csapadékmennyiségekkel adjuk meg táblázatos formában. Tehát inputként időpontok és csapadékmennyiségek szerepelnek a modellben. Input páraméter még a hőmérséklet (TEMP, C°).			Név	Jel	M. egys.
			növényborítottság	COV	-
			max. csapadékraktározás	DINT	mm
			növényborítás magassága	PLH	cm
			felszíni szárarány	PBASE	-
			szárdölés	PLANG	fok
(Mikro)topográfiai páraméterek			levélalak-faktor	SHAPE	-
			Talajpáráméterek		
Név	Jel	M.egys.	Név	Jel	M. egys.
lejtőhossz	L	m	vízáteresztő képesség	FMIN	mm/h
lejtőszélesség	W	m	kapilláris vízvezetés	G	mm
lejtőszög	SIR	m/m	kezdeti talajnedvesség	THI	m ³ /m ³
lejtőirányú érdesség	RFR	cm/m	maximális talajnedvesség	THMAX	m ³ /m ³
lejtőre merőleges érdesség	RAS	cm/m	porozitás	POR	m ³ /m ³
besziv. visszahúzóási faktor	RECS	mm	Manning-féle n-érték	IRMANN	m ^{1/6}
			szemcseátmérő mediánja	D50	μm
			talajkohézió	COH	kPa
			csepperodibilitás	EROD	g/J
			térfogatos közetarány	ROC	m ³ /m ³
			felszíni közetarány	PAVE	-

4. táblázat: A modellben használt legfontosabb input páraméterek

CSAPADÉKPÁRAMÉTEREK

Alapadatok, melyek nagy pontosságú mérése elengedhetetlen. Az adatgyűjtéshez célszerű csapadékirót használni, ezzel a rendkívül változó intenzitású esők kivételével a mért adatok közvetlenül bevihetők a csapadékfájlba. A hőmérséklet kizárólag a víz dinamikai viszkozitásának a kiszámításához szükséges, a modell kimenete nem érzékeny rá.

NÖVÉNYZETI PÁRAMÉTEREK

Növényborítottság (COV):

A csepperózió szempontjából fontos az ismerete. Terepen jó közelítéssel becsülhető vagy felülről készített fotó segítségével számítható.

Maximális csapadékraktározás (DINT):

A növényzetnek a felszínre jutó vízmennyiséget tartósan csökkentő raktározási kapacitásának a maximuma. Mérése nehéz, standard-ból tudjuk meghatározni.

Megjegyzés: Egyesemenyes modellnél hibát okozhat, hogy a szél hatását nem tudjuk korrigálni. Közvetlenül egymást követő csapadékeseményeknél vagy mesterséges

esőztetésnél érdemes a standard-ben megadott értéket csökkenteni, mivel a raktározási kapacitás egy része már kihasznált.

Növényborítás magassága (PLH):

Szintén a csepperózió szempontjából fontos az ismerete, ezért nem a növényzet átlagos magasságát értjük rajta, hanem az esőcseppek energiáját megtörő legalsó szintet. Standard készült rá.

Megjegyzés: A standard helyett érdemes terepen mérni.

Felszíni szárarány (PBASE):

A talajba hatoló növényi szárok részesedése a talajfelszínből. A beszivárgásra van hatással. Mérése megoldható, de nehézkes, standard készült rá.

Szárdőlés (PLANG):

A felszín és a növényi szárok által bezárt átlagos szög. A száron lefolyó csapadékmennyiségért felelős. Monokultúránál meghatározása könnyebb, heterogén növényzetnél a standard használata javasolt, bár a megadott értékek rendkívül tág határok között mozognak.

Levéllalak- faktor (SHAPE):

Kvalitatív paraméter, keskeny levelek esetén (pl. tűlevél, egyszikűek többsége) 1, széles levelek esetén (pl. lombhullató fák, kétszikűek) 2. A csepperózió meghatározásához szükséges. Értékét standard-ből kereshetjük ki.

(MIKRO)TOPOGRÁFIAI PARAMÉTEREK

Lejtőhossz (L), lejtőszélesség (W), lejtőszög (SIR):

A legkönnyebben mérhető alapparaméterek, konvex vagy konkáv lejtőt érdemes a jellemző lejtőszögek alapján több erótóra bontani, különben sérül a homogenitás.

Lejtőirányú és lejtőre merőleges érdesség (RFR, RAS):

Az érdesség méréséhez 1 m hosszú, aprószemű láncot használunk, mely a felszínre fektetve megmutatja, hogy a felszín egyenetlenségeit követő lánc két végének légvonalbeli távolsága (Y cm) mennyivel rövidebb, mint a lánc ((100-Y) cm). Az érdességet a (100-Y) cm / 1 m arány adja. Az érdességek megállapításához legalább 10-10 mérést kell elvégezni, értelemszerűen lejtőirányban illetve lejtőre merőlegesen. Az érdességgel tudjuk definiálni a talajfelszín egyenetlenségeiből adódó felszíni vízraktározási kapacitást. A modell újabb, 3.6-os verziójában a lejtőre merőleges érdesség már nem szerepel (MORGAN, R. P. C. et al.

1998b). A lejtőirányú érdesség standard-jében a különböző talajművelési módokhoz tartozó érdességi értékek vannak feltüntetve.

Beszivárgás visszahúzóási faktor (RECS):

A lejtőre merőleges érdesség meghatározásánál az 1 m-en belül tapasztalt legnagyobb szintkülönbségek átlaga mm-ben. Ez adja meg a felszínen mozgó vízfilm átlagos maximális vastagságát, mely az eső elállta után a beszivárgási felület meghatározásán keresztül a beszivárgást módosítja. Nincs rá standard.

TALAJPARAMÉTEREK

Vízáteresztő képesség (FMIN):

A telített talaj vízvezető képessége, azaz a víznyelés minimuma. Az egyik legérzékenyebb paraméter! Mint a legtöbb talajparaméterre, fizikai talajféleségtől függő értékeit tartalmazó standard készült rá, de számos terepi és laboratóriumi módszer is van a mérésére (VÉR F. 1961, VÁRALLYAI GY. 1993b). A modell jelenlegi verziója laborban (növényzet és közet nélküli talajon) mért érték bevitelét javasolja, de terepi mérés esetén is van mód korrekcióra. Ez utóbbi az összetett hatótényezők miatt nagy körültekintést igényel.

Megjegyzés: A standard használata csak elméleti jellegű kutatásoknál javasolt. Mivel a lefolyásnak az egyik legfontosabb meghatározója, törekedni kell a minél pontosabb mérésére. Vizsgálataim során terepen duplakeretes módszerrel (VÁRALLYAI GY. 1993a), bolygatatlan mintákon Vér-féle módszerrel (VÉR F. 1961, 1963) és állandó víznyomás (VÁRALLYAI GY. 1993b) módszerével mértük, illetve az esőszimulátoros kísérletek során a lefolyásintenzitások és a csapadékintenzitások alapján számoltuk (CSEPINSZKY B. 1999). A különböző módszerek eróziós vizsgálatokban történő felhasználhatóságáról és az ezzel kapcsolatos módszertani problémákról a 6.3.1. fejezetben lesz szó részletesen.

Kapilláris vízvezetés (G):

A talaj hortoni víznyeléséből (HORTON, R. E. 1933) származtatott paraméter. Kiszámítását a 3. táblázat 5. egyenlete mutatja. Mérése nehéz, gyakorlatilag meghatározásánál csak a standard-re hagyatkozhatunk. Érzékeny paraméter!

Kezdeti talajnedvesség (THI):

Méréssel, ennek hiányában terepi becsléssel határozhatjuk meg. A terepi becslést megkönnyíti, ha ismerjük az adott talaj szántóföldi vízkapacitását és a hervadásponthoz tartozó nedvességtartalmát (holtvízérték). Érzékeny paraméter.

Megjegyzés: Meghatározásához bármilyen módszert használunk, kontrollként érdemes bolygatatlan mintán laboratóriumban is mérni a talajnedvességet.

Maximális talajnedvesség (THMAX):

Bár van standard-je, mérését mindenképpen célszerű elvégezni, mivel érzékeny paraméter.

Megjegyzés: Meghatározását bolygatatlan minta telítésével tartom a legcélszerűbbnek.

Porozitás (POR):

Mivel a modell a talajszemcsék sűrűségét $2,65 \text{ g/cm}^3$ -nek tekinti minden esetben, a porozitás és a térfogattömeg egymásba átszámítható. Értéke gyakorlatilag megegyezik a maximális talajnedvesség értékével. Meghatározása bolygatatlan mintán javasolt. Van standard-je is.

Manning-féle n-érték (IRMANN):

A felszínérdességnek egy olyan összevont mutatója, amelyben mind a talajszemcsék által okozott érdesség, mind a növényzet, mind a mikrotopográfia, mind a durva vázrészek hatása ötvözve van. Kiindulási értékét az $n = 0,041 \cdot D50^{0,167}$ összefüggéssel számolhatjuk ki, ahol n a Manning-féle n -érték, $D50$ a szemcseátmérő mediánja méterben. A fent említett további jellemzők módosító hatásainak figyelembevételével kapjuk meg a végső IRMANN értéket. Érzékeny paraméter, kalibrálást igényel. A talajeróziós modellekben az egyik legtöbb bizonytalanságot okozó paraméter. Csak standard-ből tudjuk meghatározni. A EUROSEM standard-je Petryk és Bosmajian (1975), Temple (1982) és Engman (1986) adatai alapján készült.

Szemcseátmérő mediánja (D50):

Értéke a szemcseösszetételi görbéről könnyedén leolvasható.

Talajkohézió (COH):

A lefolyó víz által elragadott hordalékmennyiségért felelős. Mérését kohéziómérővel (Soil Test CL-600) tudjuk elvégezni vízzel telített talajon. Nagy térbeli változékonyságának köszönhetően legalább 6-10 ismétlésben kell mérni. Standard-je a fizikai féleség függvényében laza és tömörödött talajokra is tartalmazza a közelítő értékeit, amelyeket a növényzet típusától függően a gyökerek kohéziónövelő hatásának figyelembevételével még korrigál. Érzékeny paraméter.

Megjegyzés: Átlagos értékének kiszámítását a keréknyomokban mért jóval magasabb értékek megnehezítik.

Csepperodibilitás (EROD):

A csepperózió g/J-ban kifejezett értéke. Mérése megoldható, de standard-je is van. Érzékeny paraméter.

Térfogatos kőzetarány (ROC):

A nagyobb kőzetdarabok térfogatos arányát adja meg. Szerepe a talaj víztározó kapacitásának és víznyelő képességének a csökkentésében fontos. Közvetlenül tömeg %-ban tudjuk mérni, az így kapott értéket pedig nomogram alapján tudjuk átkonvertálni.

Felszíni kőzetarány (PAVE):

A nem erodálható felszínek arányát adja meg. A csepperóziót ennek megfelelő mértékben csökkenti a modell. A beszivárgásra is hatással lesz.

4. Az eróziós mérési adatok megteremtése

4.1. A mérések kezdeti időszaka (1998)

Tanszékünk 1995 óta részletes geoökológiai térképezést folytat a Velencei-hegységben, ezért kézenfekvőnek tűnt, hogy a EUROSEM hazai adaptálásához szükséges megfelelő mennyiségű eróziós mérési adat előteremtésének is a Velencei-hegység adjon otthont. Döntésünk szakmai szempontjai közül az alábbiak a legfontosabbak:

- a hegység földrajzi és talajtani megkutatottsága megfelelő és továbbvihető háttérinformációkat biztosít munkánkhoz (VÍZRAJZI ATLASZ 1972, SZABÓ GY. 1980, ÁDÁM L. et al. 1988, ÁDÁM L. 1993, BARANYI S. et al. 1995, VERŐNÉ W. M. 1996);
- szintén alapozhatunk a tanszékünk által a hegységben több éve folytatott kutatások információbázisára (GODÓ R. 1996, VÖRÖS H. 1996);
- a változatos művelési módok és relief lehetőséget biztosít megfelelően diverz körülmények közötti nagyszámú eróziós mérés elvégzésére;
- az egész hazánkra is jellemző legtipikusabb területhasználatok (szántóföldi búza-, kukorica- és napraforgótermesztés, gyümölcsösök, szőlők, legelők, stb.) és ezek alapjául szolgáló talajok (lössön kialakult csernozjomok, barna erdőtalajok) megtalálhatók itt is;
- munkánk eredményei hasznos adatokat szolgáltathatnak a Velencei-tó vízgyűjtőjének komplex jellemzéséhez.

Természetesen ezek mellett nem volt elhanyagolható szempont az sem, hogy tanszékünk kapcsolatrendszerén keresztül megvalósítható a lefolyás és erózió méréséhez szükséges eszközök és berendezések biztonságos terepi kihelyezése.

1998 folyamán kísérleti jelleggel közel hét héten keresztül négy kisvízgyűjtőn működtettünk eróziós mérőállomásokat Pázmánd, illetve Pákozd határában (3. ábra). Célunk a mérési adatok gyűjtése mellett a – később ismertetendő – mérési módszer tesztelése és tökéletesítése volt. A mérőállomások 1998. május 18. és július 4. között működtek.

3. ábra teljesen új oldalra

A pázmándi 1. sz. és 2. sz. kisvízgyűjtőn végzett mérések

Mintaterületeink a pázmándi Barátság Tsz egyik kukoricatáblájában voltak, a falutól nyugatra, a Bágyom-ér egyik jobboldali mellékvölgyének az ÉK-i kitettséggű lejtőjén (3. ábra, 1. kép). Mindkét kisvízgyűjtő egy-egy barázdából kifejlődött eróziós árkot és azok oldallejtőit foglalta magába, az átlagosan 11 %-os lejtésű szántóföldön. A lejtőre merőleges művelésű kukorica alatt löszön kialakult, erősen erodált mészlepedékes csernozjom található. Az 1. sz. kisvízgyűjtő területe 1,8 ha, a EUROSEM kritériumrendszerének megfelelő (3.1. fejezet) 3 erotópból és egy mederegységből áll, a 2. sz. területe 1,3 ha, 2 erotóp és 1 mederegység építi fel.



1. kép: A pázmándi 1. sz. kisvízgyűjtő, alján a távozó szuszpenzió felfogására alkalmas árokkal

Mivel műszerezettségünk csak két mérőállomás korszerű felszerelésére volt elegendő, és azok a Pákozd feletti állomások voltak, itt csak egy-egy csapadékesemény hatására lefolyó összes vízmennyiség illetve összes hordalékmennyiség mérésére rendezkedtünk be, az eseményen belüli intenzitásadatokat meghatározására nem. Ez gyakorlatilag a kisvízgyűjtőkről kifutó mederegységek alján egy 6 (1. sz. kisvízgyűjtő), illetve egy 4 m³-es (2. sz. kisvízgyűjtő) tározókapacitású árok létesítését jelentette, amelyeket fóliával béleltünk ki. Egy-egy eső után az árkokban felhalmozódó szuszpenziót különböző mélységekből mintáztuk, majd meghatároztuk az össztérfogatát és eltávolítottuk a gödörből (2. kép). A minták térfogatának, kiszáritás előtti és utáni tömegének a meghatározásával el tudtuk különíteni a távozott víz és szediment mennyiségét. A csapadékadatokat egy Pázmánd belterületén elhelyezett analóg csapadékiróval rögzítettük.

A rendkívül heves júniusi zivatarok idején az árkok többször kis kapacitásúnak bizonyultak, és a lezúduló szuszpenzió túlfolyt rajtuk a szomszédos repceföldre. Mérési adatainkból a legfontosabbakat az 5. táblázatban foglaltuk össze.



2. kép: A szuszpenzió térfogatának meghatározása és eltávolítása az árokból

Időpont	1998. máj. 20.	1998. jún. 8.	1998. jún. 12.	1998. jún. 27.
Eső időtartama	9 óra	1,5 óra	2 óra	2,5 óra
Csapadékmennyiség	10,3 mm	26,5 mm	23 mm	16 mm
Átlagos intenzitás	1,14 mm/h	17,67 mm/h	11,5 mm/h	6,4 mm/h
Legnagyobb intenzitás	3,1 mm/h	51 mm/h	21 mm/h	78 mm/h
Lefolyt víz				
1. sz. kisvízgyűjtő	0,08 mm	> 0,33 mm	0,2 mm	> 0,33 mm
2. sz. kisvízgyűjtő	0,05 mm	0,14 mm	0,09 mm	> 0,3 mm
Eróziós ráta				
1. sz. kisvízgyűjtő	0,003 t/ha	?	0,73 t/ha	?
2. sz. kisvízgyűjtő	0,002 t/ha	1,58 t/ha	0,32 t/ha	?

5. táblázat: A pázmándi kisvízgyűjtőkön mért lefolyási és eróziós értékek

A pákozdi Kis- és Nagy-Fecskésben végzett mérések

Pákozdtól Ny-ÉNy-ra, a Kis- és Nagy-Fecskés elnevezésű völgyekben működtettük a másik két mérőállomásunkat (3. ábra), melyek a vastag gránitmurvával fedett Tompos-hegy déli lejtőjébe hátravágódó völgyek 6,8 illetve 14,5 ha-os völgyfőiből érkező víz- és hordalékmennyiséget hivatottak mérni, illetve összegyűjteni. A két azonos geomorfológiai

adottságú kisvízgyűjtő közül a nyugatabbra fekvő Nagy-Fecskés erdővel borított (akác, feketefenyő), a Kis-Fecskés legelő. Ennek megfelelően vízgazdálkodásuk is különböző, a Nagy-Fecskés június közepéig állandó vízfolyással rendelkezett, míg a Kis-Fecskésben csak nagyobb zivatarok alkalmával észleltünk vizet. Talajtakarójuk gránitmurván kialakult jó vízáteresztő képességű földes kopár, illetve erősen erodált, helyenként utólagosan gránitmurvával betakart Ramann-féle barnaföld. Rendre 14, illetve 6 egység (erotópok és mederegységek) építi fel őket. A csapadékmérést itt is analóg csapadékiróval végeztük, amelyet a mérőállomásoktól keletre, a pákozdi szőlőhegy egyik zártkertjében helyeztünk el. A lefolyás és a hordalék mérését viszont itt egy barlangi csepegő vizek és felszín alatti szivárgó vizek mennyiségének mérésére kifejlesztett (ZÁMBÓ L. 1999), általunk továbbfejlesztett komplett mérőállomással (3. kép) oldottunk meg, amelyet az újdonsága miatt részletesen ismertettünk.



3. kép: Mérőállomásunk a Nagy-Fecskésben

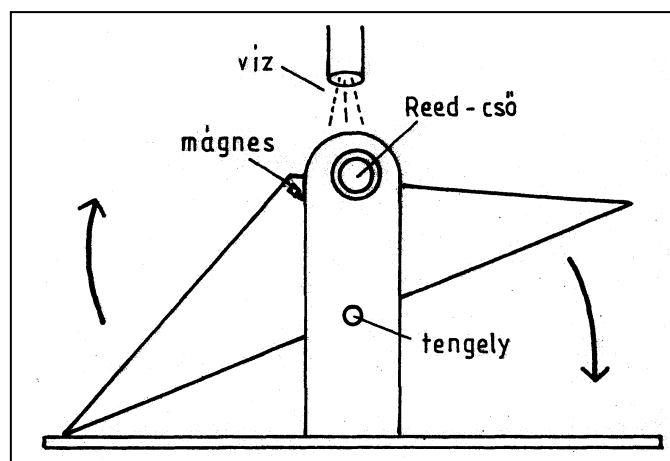
Alapja a Contromat Robottechnika Kft. által gyártott négycsatornás adattároló (databox), amely beállítástól függően 1-255 perces gyakoriságú mérésre képes. Egyszerre 2880 időpont mérési adatait tudja eltárolni, tehát maximum 2-510 naponként kell róla az adatokat lementeni (4. kép). A kiszolgáló szoftvere DOS alatt fut, és az adatokat Excelbe vagy dBase-be konvertálható formátumban menti el (DATABOX 1, 1998). Az egyes csatornákon hőmérsékletet, karbonáttartalmat, talajnedvességet vagy vízhozamot lehet mérni, ezek közül mi céljaink megvalósításához csak az utóbbi kettőt használtuk.

A talajnedvesség mérése egy 2,4 cm átmérőjű, 3,5 cm hosszú gipszfejbe ágyazott elektróddal történik. Mivel a nedvességtartalom meghatározása ellenállásméréseken alapszik, nemcsak a talajnedvesség, hanem a talajoldatok iontartalma is befolyásolni fogja az eredményt. Ezért, bár a szoftver a mért értékeket %-ban is megadja, minden egyes mérőhelyen szükséges kalibrálni a databox által mért értékeket. Mi ezt az adatmentésekkel egyidőben vett kontrollmintákkal végeztük el.



4. kép: Az adatok lementése, hátul a databox látható

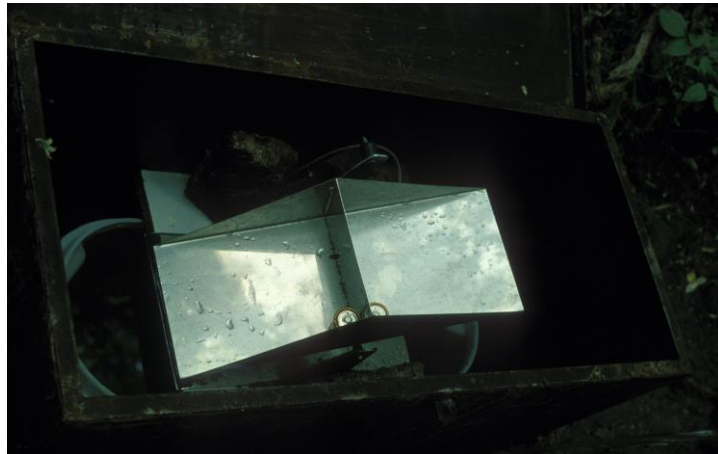
A zárt dobozban elhelyezett vízhozammérők (ún. billencsek) működési elvét a 4. ábrán mutatjuk be.



4. ábra: Vízhozammérő billencs. A nyilak az elmozdulás irányát mutatják a jobboldali kanál megtelésekor.

Átbillenésakor a közepén elhelyezett mágnes elhalad az álló részre erősített Reed-cső előtt, elektromos impulzust keltve benne. A databox a beállított mérési gyakoriság szerint tárolja el a bekövetkezett billenések számát. Az eredetileg használatos billencsek – céljuknak

megfelelően – maximum néhány liter/órás vízhozamok mérésére alkalmasak. A mérőállomások továbbfejlesztésének célja éppen ezen billencsek kapacitásának a megnövelése volt, hogy az 1-2 l/perces vízhozamoktól egészen a több 10 l/perces vízhozamokig alkalmasak legyenek mérésre. Az eredeti, néhány cm³-es kanalaktól eltérően 2,3 l-es kanalakkal rendelkező billencseket gyártattunk (5. kép), amely természetesen számos új megoldást igényelt (pl. erősebb alapanyag, tartószerkezet, más igénybevételnek kitett tengely, befoglaló doboz).



5. kép: Az eróziós mérésekre kidolgozott, a Nagy- és Kis-Fecskésben alkalmazott 2,3 l-es billencs

A billencsből kifolyó vizet 2 db 30 l-es műanyaghordóba vezettük, melyekből a hordalékot minden adatlementéskor begyűjtöttük. A terepi kihelyezés során még egy 90 x 90 x 40 cm-es fémdobozt, egy vízálló elektromos kapcsolószekrényt (a databoxnak), tölcsezt, 110-es és 50-es PVC-csöveket, szűkítőket, terelőlemezeket, stb. használtunk fel minden egyes állomásnál. A talajnedvességet 5 és 20 cm-es mélységben mértük, a databoxokat pedig 2 percenkénti adatrögzítésre állítottuk be. Az adatokat minden nap lementettük.

A módszer újszerűsége miatt a héthetes méréssorozat legfontosabb eredményeinek azokat a tapasztalatokat tekinthetjük, amelyek segítségével a következő években – számos módosítás végrehajtása után – három működő eróziós állomást tudtunk telepíteni a mintaterületen.

4.2. Eróziós mérőállomások működtetése (1999-2002)

Az 1998. évi nyári tapasztalatok alapján az év végére elkészítettük azokat a databoxokat és eszközöket, amelyekkel a több éven keresztül méréseket terveztük

megvalósítani. A három databox mindegyikén két csatorna vízhozammérésre, két csatorna pedig talajnedvesség mérésére volt alkalmas. Minden databoxon a vízhozammérő csatornák egyike az előzőekben leírt módon, tökéletesített, 1,08 dl-es kanalakból álló billencsek segítségével mérte a lefolyó vízmennyiséget. Figyelembevéve az alkalmazott parcellaméreteket (108, illetve 40 m²), az 1,08 dl-es kanalak 0,001 és 0,0027 mm-es érzékenységgű mérésre adtak lehetőséget. A másik vízhozammérő csatornához csapadékmérőt szerkesztettünk. A csapadékmérő a nagy billencsek mintájára készült jóval kisebb kivitelben, 10 cm³-es kanállal. A csapadékmérő billencset egy 10 cm átmérőjű bádoghengerbe építettük be, amelyet felülről egy tölcser zár le (6. kép). Az alkalmazott tölcser méretétől függően a legkisebb érzékelhető csapadékmennyiség 0,88-1,3 mm. A mérőállomások adatgyűjtési gyakoriságát általában 20 percre állítottuk, de július-augusztus hónapokban és télen gyakran hosszabb időket alkalmaztunk. Így általában 30-60 naponként mentettük le az adatokat a databoxokról, illetve gyűjtöttük be a hordalékot.



6. kép: A csapadékmérő billencs tölcserrel illetve tölcser nélkül

A hegységben három eróziós mérőállomást működtettünk 1999 és 2002 között. Az állomások helyének kijelölésénél a legfőbb szempont az volt, hogy egy-egy jellegzetes talajtípust, illetve területhasználati típust reprezentáljanak, de sajnos nem hagyhattuk figyelmen kívül a tulajdonviszonyokat és a nagyértékű műszerek biztonságos elhelyezésének a szempontjait sem. A mérőállomások három különböző területhasznosítású parcellára lettek telepítve (3. ábra), főbb ismérveiket az alábbiakban foglaljuk össze.

Szántó: A mérőállomást Székesfehérvár és Pátka között, Csalapuszta közelében telepítettük 1999. március 24-én. A 20 x 2 m nagyságú parcella egy deráziós völgyoldalban volt található (7. kép), annak a középső, legmeredekebb szakaszán ($7,5^\circ$). A parcellát kb. 20 cm magas föliakerítés különítette el környezetétől. A talajnedvességet 5 és 20 cm-es mélységben mértük. A vizsgálat minden évében (1999-2002) őszi búzát termeltünk a területen. A kézi művelés során a parcellát felásása után lejtőirányú sorokkal vetettük be. Az aratás is kézi erővel (kasza, sarló) történt mind a négy évben. Az állomás 2002. december 10-ig működött.



7. kép: A szántón kialakított parcella és az alján található gyűjtőláp

Talajának szelvényleírása:

(EOV-koord: x=211.820, y=607.088, z=152 m, felvételezés időpontja: 1999. március 24.)

A szelvény (8. kép) a későbbi eróziós parcella alsó végében készült. A felvételezés időpontjában néhány cm magas őszi búza jelentette a parcella növényzetét. A talajtípusa erősen erodált, löszön kialakult mészlepedékes csernozjom. A-szintje feltehetően teljes mértékben erodálódott.



8. kép: Talajszelvény a szántón

B-szinje 23 cm vastag, sötétbarna, humuszban gazdag szántott réteg. A felszíntől kezdve pezseg, alsó felében kevés 1-2 mm-es mészkonkréció is megjelenik. Fizikai talajfésésege homokos vályog (5. ábra).

B-C átmenete 23-tól 35 cm-ig tart. Átmenetet képez a B-szint és a löszös alapközet között, anyaga ennek megfelelően átkevert, humusztartalma lefelé haladva csökken, színe világosodik. Fizikai félesége homokos vályog.

C-szinje 35 cm alatt lösz, éles határral különülve el a fentebbi szinttől. Fizikai félesége homokos vályog. 4-5 mm átmérőjű mészgöbcecsek találhatóak a felső 20 cm-ében.

Barackos: A szántóra telepített állomás közelében a Pénzverő-völgy és a Pátkai-tározó közötti lejtőre telepítettük az állomást 1999. március 25-én. A 20 x 2 m nagyságú parcella a gyümölcsfasorokra merőlegesen, enyhe lejtésű területen ($2,8^0$) helyezkedett el. Morfológiailag a lejtőn található két enyhe hajlat (tengelyükben heves esőzések után eróziós barázdák alakulnak ki) közötti háton volt található a parcella, amely 3 művelt fasort (kajsziparack) és három füvesített sorközt foglalt magába (9. kép). A mérőállomás felett közvetlen füves sorköz helyezkedett el. A parcella végét kb. 20 cm magas földkerítéssel zártuk le, oldalait a művelés miatt szabadon hagytuk. Ez a sorok és sorközök érintkezési vonalánál a művelés során kialakulható sekély barázdák vízelvezetése miatt hibát okozhat. A rendszeresen nyírt füvesített sorközben a fű magassága néhány cm-től 25 cm-ig változott. A talajnedvességet 5 és 45 cm-es mélységben mértük. A szántón kialakított parcella közelsége miatt csapadékmérést itt külön nem alkalmaztunk. Az állomás 2002. augusztus 29-ig működött.



9. kép: A barackosban kialakított mérőállomás szomszédságában található eróziós barázdák meggyőzően bizonyítják a mérés szükségességét

Talajának szelvényleírása:

(EOV-koord: x=211.045, y=606.406, z=185 m, felvételezés időpontja: 1999. március 25.)

A szelvény (10. kép) a későbbi eróziós parcella alsó végében készült. A növényborítással nem rendelkező sorokat frissen füvesített sorközök választották el egymástól, a fű magassága 1-2 cm volt. Talajtípusa közepesen erodált, erős antropogén hatás alatt álló mészlepedékes csernozjom.

A-szinje 30 cm vastag, éles határral különül el a B-szinttől. Színe sötétbarna, humuszban gazdag, morzsás szerkezetű 1-1,2 cm-es aggregátumokkal. A szemmel látható erőteljes antropogén átkeverés mellett rendkívül nagymértékű az állati átkeverés is, sok helyen ez a B-szint világosabb színű anyagát is felhozta az A-szintbe. Koprolit nagy mennyiségben figyelhető meg. A szint a felszíntől pezség. Fizikai talajfélesége homokos vályog (5. ábra).

A B-szint 30-53 cm-es mélység között helyezkedik el. Színe világosbarna, szintén erőteljes biológiai aktivitás jellemzi. Mészlepedék jellemző a szintre. Fizikai talajfélesége homokos vályog.

A szelvény löszös alapkőzetten alakult ki, mely 53 cm alatt alkotja a C-szintet. Fizikai félesége homokos vályog, az átkeverés még 110 cm mélységig megfigyelhető. 65 cm mélyen a felszíntől idáig tartó tömődöttség hirtelen lecsökken. A C-szint teljes egészében mészben rendkívül gazdag, felső 15-20 cm-ében erősen mészlepedékes.



10. kép: Talajszelvény a barackosban

Szőlő: A mérőállomást a Pákozd és Sukoró között elhelyezkedő Gádé-hegy DNy-i lejtőjén (átlagos lejtés: 5°), egy kiskertben állítottuk fel 2001. április 20-án. Technikai problémák és a megfelelő terület kiválasztásának nehézségei miatt sajnos csak két évvel a másik két mérőállomás telepítése után tudtuk elkezdni a működtetését. A lejtőirányban művelt szőlőterületen két szőlősor között alakítottuk ki az 1,8 x 60 m-es parcellát (11. kép). A parcella hossz szerinti darabolását a művelhetőség nem tette lehetővé. Az évi egyszeri szántáson és trágyázáson kívül havi rendszerességgel rotálták a sorközt, aminek következtében a mérés teljes időtartama alatt a sorköz növényborítása gyakorlatilag 0 volt. A talajnedvességet 5 és 20 cm-es mélységben mértük. Az állomás 2002. október 10-ig működött.

Talajának szelvényleírása:

(EOV-koord: x=211.293, y=614.268, z=206 m, felvételezés időpontja: 2001. március 6.)

A szelvény (12. kép) a későbbi eróziós parcella alsó végében készült, a szőlő frissen szántott sorközében. Talajtípusa gránitmurván kialakult Ramann-féle barnaföld.



11. kép: A szőlőben kialakított eróziós parcella



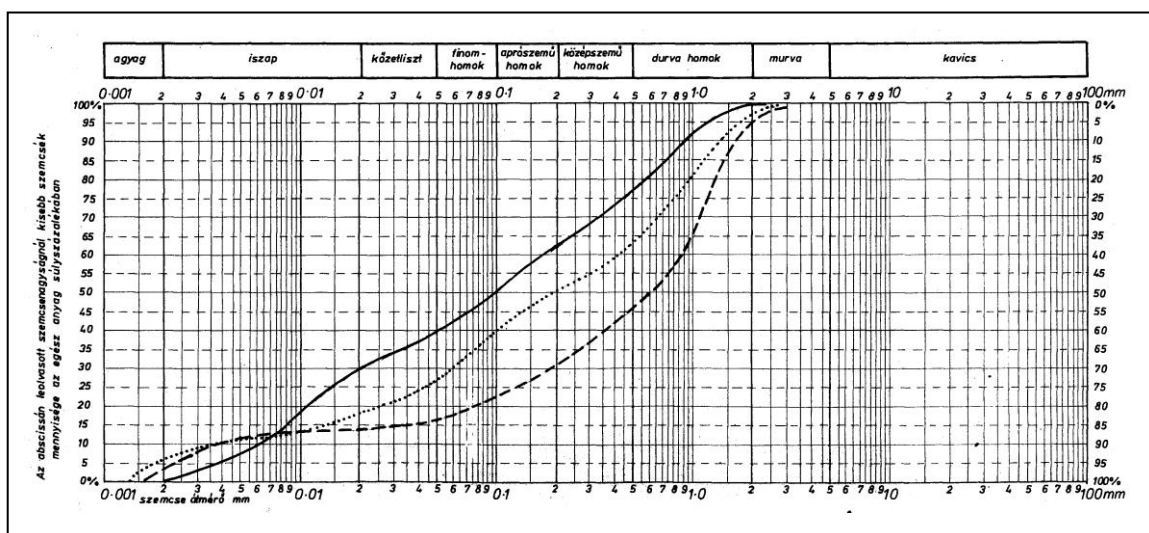
12. kép: Talajszelvény a szőlőben

A-szintje 40 cm vastag, homogén, murvát alig tartalmazó (5. ábra), agyagos megjelenésű barna színű talajszint. 20-40 cm között tömődött, szerkezete diós. Átmenete a B-szint felé rövid.

B-szintje 40-70 cm között helyezkedik el, az A-szintnél lényegesen kisebb szervesanyag-tartalomról tanúskodó világos barna színű. A szintben jelentősebb mennyiségű gránitmurva jelenik meg, a tömődöttség lecsökken.

B-C átmenete 70 cm-től 95 cm-ig tart. Legfőbb jellemzője a szervesanyag-tartalom és az agyagfrakció arányának csökkenése és a murva mennyiségének növekedése. Foltszerűen találunk benne a B-szintből bekevert részeket.

C-szintje világos színű, erősen mállott gránitmurva.



5. ábra: Az eróziós parcellák talajainak szemcseeloszlási görbéi

Jelmagyarázat: — szántó, gyümölcsös, - - - - - szőlő

A mérési eredmények közül a lefolyási és lehordódási értékek összefoglaló táblázatai az 1. és 2. sz. mellékletben találhatóak. Sajnos a technikai újdonságnak számító mérőállomások működése nem volt zökkenőmentes, ezért sok esetben vagy a csapadékadatok, vagy a lefolyásadatok nem voltak megfelelően informatívak. Táblázatainkban csak a további feldolgozásra alkalmas mérési eredményeinket közöljük. Mivel a szőlőn kialakított parcella távolabb helyezkedett el a másik két eróziós mérőállomástól, ezért a csapadékadatokban is lényeges eltérések mutatkoznak. Emiatt a sukorói parcellán mért adatokat külön táblázatban közöljük (2. sz. melléklet).

A mérési módszerből adódóan a kapott eredmények csak a hosszabb csapadékok hidrográfjait adják vissza valósághűen, a hordalékmennyiségeket legfeljebb csapadék-eseményekre lebontva tudjuk megadni.

4.3. Esőszimulátoros mérések (2000. június)

A 20 perces gyakoriságú adatsűrűséggel rendelkező, szedigráfot nem produkáló, természetes esők hatásának leírását célzó eróziós mérőállomásaim mellett szükségem volt olyan mérési eredményekre is, amelyek időben jobb felbontásúak, csapadékindenzitásuk illetve az általuk okozott víz- és hordalékhozam beállítható illetve pontosan mérhető. A 2000. június 16. és 19. között lebonyolított esőszimulátoros méréseknek a célja pontosan ilyen adatok produkálása volt.

Az esőztetést a Veszprémi Egyetem Georgikon Mezőgazdaságtudományi Kar Vízgazdálkodási és Meliorációs Tanszékének munkatársai végezték Pannon-R02 típusú esőszimulátorral (CSEPINSZKY B. 1999). E csoportos cseppképzésen alapuló berendezés (13. kép) 3 m magasságból képes 20-133 mm/h intenzitású csapadékokat szimulálni (14. kép).



13. kép: A cseppképző fej

Az alkalmazott 41 kPa értékű víznyomás és a 3 m-es magasság elegendő ahhoz, hogy a felszínre érkező cseppek sebessége és becsapódási energiája (az eső erozivitása) nagyjából megegyezzen a természetes esők ugyanezen tulajdonságaival. A szimulátor 2x6 m-es terület öntözésére alkalmas.



14. kép: A barackosban és a szántón felállított esőztető berendezés

Ezen 12 m²-es kísérleti parcellát fémlapokkal különítjük el a környezetétől, és a parcella köré helyezett gyűjtőedényekben összegyűlt víz segítségével határozzuk meg a kiadagolt eső pontos intenzitását. A névleges és a tényleges intenzitás közötti különbséget a berendezés pontatlansága, a párolgás és a szél hatása eredményezi. A parcella alsó végén terelőlemezeket helyezünk el, amelyek 1-1 m széles sávból egy-egy csövön keresztül a parcella aljában ásott 1 m mély gödörben lévő gyűjtőedényzetbe vezetik a lefolyó vizet (15. kép). Az edények megtelésének időpontjait feljegyezzük, a bennük felfogott szuszpenziót pedig 15-25 l-es edényekben gyűjtjük.



15. kép: A gyűjtőedényzet működés közben a barackosban

A mérés befejeztével a szuszpenziót 1,5-2 napig üleptítjük, majd a szilárd és a folyadékfázis szétválasztása, lemérés és kiszáritás után meghatározzuk a parcelláról távozó víz- és hordalékmennyiség időbeni alakulását. A kapott nyers lefolyási adatok és a csapadékintenzitás különbségeiként adódó beszivárgási értékek segítségével megadjuk a víznyelés-vízáteresztés hortoni függvényét, amely alkalmas a vizsgált talaj természetes vízáteresztő képességének a meghatározására is (CSEPINSZKY B. 1999).

Az esőszimulátoros mérésekhez a szántón és a barackosban működtetett eróziós állomások közelében jelöltünk ki három olyan parcellát, amelyeken a berendezés felállítása technikailag kivitelezhető volt. A kiválasztott parcellák jellemzői (talajtípus, művelési mód) az alábbiakban felsorolt tulajdonságaik kivételével megegyeztek az eróziós parcellákéival (ld. 4.2. fejezet):

1. Barackos – füvesített sorköz (későbbiekben: gygy): A fasorokkal párhuzamosan művelt illetve lejtő 6 m hosszú és 1 m széles parcella lejtése 3,85 %. A 10 cm magas fű kb. 90 %-os növényborítottságot biztosított a területen.
2. Barackos – művelt fasor (későbbiekben: gym): Az előzővel érintkező 6 x 1 m-es parcella fellazított talaján néhány kétszikű gyomnövény jelentette a vegetációt, a 60 %-os felszínborítást pedig az elhalt növényi maradványok adták (13. kép).
3. Szántó (későbbiekben sz): a 13,5 %-os lejtésű 12 x 2 m-es parcellát aratás előtt álló, kb. 60 cm magas őszi búza borította. A művelés a lejtőre merőlegesen történt. A parcella növényborítottsága 100 %-os volt (14. kép).

Az alkalmazott intenzitások – a beáztató esőztetést követően – névlegesen 30, 40, 60, 90 és 130 mm/h voltak. Minden egyes csapadékintenzitással az esőztetést addig folytattuk, míg össze nem gyűlt legalább 4-5 lefolyási adat, melyekből a Horton-féle beszivárgási görbe megszerkesztéséhez már elegendő mennyiségű beszivárgási érték vált visszaszámolhatóvá, azaz mi sem csak a nyers lefolyási, lehordódási és az azokból nyert kumulált értékeket tekintettük méréseink végeredményének, hanem azok feldolgozásával a következő eredményekhez jutottunk:

1. A csapadékintenzitások és a mért lefolyásintenzitások különbségeire függvényt illesztve, többszörös iterációval megkaptuk a talaj hortoni víznyelési függvényét.
2. E függvény végtelenben vett határértékét a talaj vízáteresztő képességeként definiáltuk.
3. A víznyelési görbe alapján meghatároztuk a lefolyási függvényt.

4. A lefolyási függvény kumulálásával (integrálásával) meghatároztuk a lefolyt összes vízmennyiséget.

Az alkalmazott módszer gyakorlatilag a nyers lefolyási adatokból egy egyszerű modell segítségével (kumulált) beszivárgási és lefolyási függvényeket produkál, ami az alábbi problémákat veti fel:

1. Feltételezzük a hortoni beszivárgást.
2. A kapott beszivárgási görbe nem a talaj valós beszivárgására jellemző, hanem egy olyan összevont csapadékvisszatartási görbét ad, amelyben a beszivárgás mellett benne van a növényzet csapadékraktározása és az érdességnek megfelelő felszíni raktározás is.
3. Ez különösen rövid esőknél hibát okozhat, ahol a lefolyás alakításában az előbb említett két tényezőnek sokkal nagyobb hatása lehet a kezdeti lefolyásra, mint a beszivárgásnak, mely eredményeképpen a függvényillesztés során a valós beszivárgástól teljesen eltérő görbét kapunk, tévesen határozva meg ezzel az állandó vízáteresztést is.

Az esőztetéssel kapott eredmények a felsorolt hibák ellenére még így is messzemenően nagyobb adatsűrűséggel rendelkező lefolyási értékeket és a természetes vízáteresztést legjobban közelítő beszivárgási rátákat szolgáltatottak, mint akár az eróziós állomások adatsorai (ld. 4.2. fejezet), akár a más módszerrel mért víznyelési-vízáteresztési tulajdonságok (ld. 6.3.1. fejezet). Ezért a EUROSEM kalibrálásához a 18 db esőszimulátoros mérésből választottunk ki nyolcat. A nyolc kiválasztott csapadékesemény főbb jellemzőit a 6. táblázatban foglaltuk össze.

Csapadékesemény jele	gybea*	gygy30	gym30	gym40	gym130	sz30	sz40	sz90
Csapadékkintenzitás (mm/h)	40.1	20.2	27.7	39	128.5	22	27.6	84
Csap. hullás időtart. (perc)	60	60	60	31	11	60	24	9
Csapadékmennyiség (mm)	40,1	20,2	27,7	20,15	23,56	22	11,04	12,6
Mért lefolyás (mm)	0,71	2,2	0,38	2,06	10,85	0,66	1,8	5,6
Mért erózió (t/ha)	0.003	0.002	0.007	0.009	0.32	0.74	0.16	0.64

*gybea jelzi a gyümölcsös beáztató esőztetése során a füvesített sorközben mért adatokat

6. táblázat: Az esőztetés legfontosabb mérési eredményei

5. A EUROSEM tesztelése, kalibrálási kísérlete és eredményeik

A talajeróziós modellek kalibrálása – mint korábban már említettük – azért szükséges, mert standard-jeik érvényességi területe korlátozott. Ezért egy-egy modell más földrajzi környezetben történő felhasználása előtt mindenképpen szükségünk van az érzékeny és nehezen mérhető paramétereikhez tartozó standard-ek módosítására, olyan standard-ek kidolgozására, amellyel a modell az adott földrajzi környezetben is alkalmas pontos eróziós becslésekre (MORGAN R. P. C. et al. 1998b). Ezt a folyamatot nevezzük kalibrálásnak, amely az alábbi négy lépésben végezhető el:

1. Érzékenységi teszt: célja a modell által használt input paraméterek közül az érzékenyek kiválasztása. A későbbi tényleges kalibrálás során már csak ezeket a paramétereket kell figyelembe venni.
2. Modelltesztelés: ennek során a természetes esők vagy mesterséges esőztetések alkalmával mért eróziót illetve lefolyást vetjük össze a modell által szimulált értékekkel. Az eredmény arról fog minket tájékoztatni, hogy a kalibrálás nélküli modell mennyire képes az adott körülmények között visszaadni a valóságot. Nyilván minél közelebb vannak a mért és a szimulált értékek egymáshoz, annál nagyobb esélyünk van a kalibrálás korrekt elvégzésére.
3. Kalibrálás: nagyszámú konkrét mérés illetve szimulálás alapján meghatározzuk a fizikai talajféleség, a növényzet, a művelési mód stb. függvényében az érzékeny, de nehezen mérhető paraméterek jellemző értékeit, azaz standard-eket készítünk rájuk, illetve módosítjuk a már meglévő standard-eket.
4. Érvényességi (validitási) vizsgálat: ez tulajdonképpen a kalibrált modell újbóli tesztelése annak eldöntése céljából, hogy sikeres volt-e a kalibráció. Jó kalibrációt követően várható kimenete a szimulált és a modellezett értékek nagyfokú egyezése.

A EUROSEM modell részletes tesztelését, illetve kalibrálását eddig kidolgozásának helyszínén Angliában (QUINTON, J. N. 1997), Oklahomában (QUINTON, J. N. et al. 1998) és Hollandiában (FOLLY, A. J. V. et al. 1999) végezték el.

5.1. Érzékenységi teszt

A modell érzékenységi tesztjének az elvégzésére számos lehetőség kínálkozik az egyszerű paraméterérzékenységi vizsgálatoktól kezdve a Monte Carlo szimuláció segítségével történő érzékenységi tesztekig (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b, QUINTON, J. N. 1997, VEIHE, A. et al. 2000a, 2000b). Bármelyik módszert válasszuk is, dinamikus modelltől lévén szó mindegyiknél fontos szem előtt tartanunk, hogy nem elegendő a parcelláról távozó összes víz- és hordalékmennyiség vizsgálata, hanem ezek időbeni változását jellemző kimeneti paraméterek érzékenységét is be kell vonnunk a tesztelésbe. Ennek elhagyásával súlyos hibát követhetünk el (FOLLY, A. J. V. et al. 1999).

Az érzékenységi teszt elvégzését egyszerű paraméterérzékenységi vizsgálatokkal oldottuk meg az alábbiak szerint:

1. Input paramétereknek az 1999. június 9-i terepi felvételezésünk során az őszi búzával borított parcellánkon mért növényzeti, (mikro)topográfiai és talajparamétereket tekintettük. Ezeket neveztük *alapinputoknak*. Néhányat közülük mérés hiányában becsléssel vagy standard-ből határoztunk meg (6. táblázat).

Növényzeti par.		(Mikro)topográfiai par.		Talajparaméterek			
Jele	Értéke	Jele	Értéke	Jele	Értéke	Jele	Értéke
COV ¹	0,9	L	100 m	FMIN	10 mm/h	D50	100 µm
DINT ²	3 mm	W	100 m	G ²	200 mm	COH	14 kPa
PLH	80 cm	SIR	0,12 m/m	THI	0,33 m ³ /m ³	EROD ²	2 g/J
PBASE ¹	0,2	RFR	2 cm/m	THMAX	0,36 m ³ /m ³	ROC	-
PLANG ¹	85 fok	RAS	5 cm/m	POR	0,39 m ³ /m ³	PAVE	-
SHAPE ²	1	RECS	20 mm	IRMANN ²	0,1 m ^{1/6}		

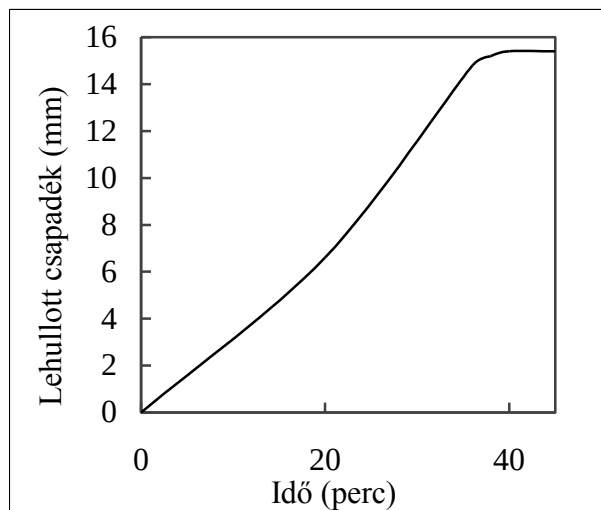
¹ becsült érték

² standard-ből

6. táblázat: Az érzékenységi teszthez használt alapinputok

2. Csapadékeseménynek az 1999. június 15-én mért heves nyári zivatarra választottuk (6. ábra).
3. Az alapinputokkal az előbb megjelölt zivatarra futtattuk a modellt, a kapott eredményeket tekintettük *alapoutputoknak*.
4. Minden egyes alapinput értékét – a többi paraméter változatlanul hagyása mellett – 10 %-kal megnöveltük, majd újból és újból lefuttattuk a modellt.
5. Az előzőhöz hasonlóan minden alapinput 10%-os csökkentése után ismét lefuttattuk a modellt minden megváltoztatott alapinputtal is.

6. Elvégeztük a kapott outputok és az alapoutputok összehasonlítását, mely alapján érzékeny paramétereknek neveztük azokat a paramétereket, amelyek *10%-nál nagyobb változást eredményeztek a vizsgált kimeneti adatok legalább egyikében*. A kimeneti adatok közül a parcelláról távozó összes vízmennyiséget, a parcelláról távozó összes hordalékmennyiséget, a lefolyás kezdetét, a vízhozam maximumát és a hordalékhozam maximumát vontuk be a vizsgálatba (7. táblázat).



6. ábra: Az érzékenységi vizsgálathoz használt csapadékesemény

Megjegyzendő, hogy az előbb ismertetett eljárástól néhány paraméter esetében eltértünk:

1. A tesztbe belevettük a hőmérsékletet (TEMP) is, 10 % helyett azonban itt ± 2 C°-os változtatást eszközöltünk. Kiindulási értéke 18 C° volt.
2. A jól mérhető topográfiai paraméterekre (L, W, SIR) nem végeztük el az érzékenységi tesztet. L-et és W-t az eredeti, 20x2 m-es parcellamérettől eltérően önkényesen 100-100 m-nek választottuk, hogy a talajeróziós ráta konvertálás nélkül t/ha-ban adódjon.
3. További két paramétert szintén kihagytunk a vizsgálatból: a lejtőre merőleges érdességet (RAS) és a levélalak-faktort (SHAPE). A RAS-sal a modell jelenlegi verziója sem számol, a SHAPE pedig egyrészt kvalitatív paraméter, másrészt értéke egyértelműen eldönthető.

Az érzékenységi teszt eredményeit a 7. táblázat foglalja össze. A teszt az érzékeny paraméterek kiválasztásán túlmenően arra is alkalmas, hogy segítségével az egyes paraméterekről eldönthessük, hogy csak az erózió befolyásolásában vesz részt, vagy a lefolyásra is hatással van. Természetesen ez utóbbi esetben a lefolyáson keresztül a lehordódást is módosítani fogja. Az általunk végzett egyszerű paraméterérzékenységi vizsgálatok

eredményei alapján csak az eróziót befolyásoló érzékeny paraméterek a D50, COH, a lefolyást is befolyásolóak pedig a COV, DINT, FMIN, G, THI, THMAX, IRMANN, ROC, PAVE.

Paramé- terek	% -os változás + 10%-os növelés esetén					% -os változás –10 %-os csökkentés esetén				
	Lefolyás ¹	Hordalék ²	LK ³	PFR ⁴	PSD ⁵	Lefolyás ¹	Hordalék ²	LK ³	PFR ⁴	PSD ⁵
TEMP	0	0	21	0	0	0	0	21	0	0
COV	-4,46	+15,2	21	-4,1	+29,3	+4,11	+1,93	21	+3,63	+2,9
DINT	-4,46	+26,9	21	-4,1	+1,31	+4,11	-0,05	21	+3,63	+0,7
PLH	0	+0,44	21	0	+0,5	0	-0,46	21	0	-0,5
PBASE	-4,75	-6,12	21	-4,35	-6,71	+4,48	+8,16	21	+4,03	+6,91
PLANG	0	+1,82	21	0	+2,1	0	-1,46	21	0	-1,6
RFR	-0,01	0	21	-0,01	0	0	0	21	0	+0,08
RECS	+1,18	+3,7	21	0	0	-1,32	-3,7	21	0	0
FMIN	-18	+4,2	21	-17	+7,2	+18,7	+6,47	21	+16	+4,7
G	-9,75	+17,5	21	-9,22	+21	+9,90	+2,05	21	+8,75	+2,5
THI ⁶	+66,1	+16,8	21	+48	+9,7	+18,7	-64,6	21	-76	-34,4
THMAX ⁷	-76,9	-47,7	26	-72,3	-47,8	+66,1	+16,8	21	+48	+9,7
POR ⁸	0	0	21	0	0	0	0	21	0	0
IRMANN	-3,54	-5,48	21	-7,5	-11,4	+3,57	+4,46	21	+6,64	+10,6
D50	0	+14,7	21	0	+15,1	0	-15,8	21	0	-15,3
COH	0	-62	21	0	-61,9	0	+294	21	0	+200
EROD	0	+0,87	21	0	+1	0	-0,87	21	0	-1
ROC	+9,9	+20,4	21	+8,75	+2	a kiindulási érték 0 volt				
PAVE	-17,92	-28,57	21	-17	-28,9	a kiindulási érték 0 volt				

¹ alapoutputja: 2,43675 mm

² alapoutputja: 49 kg/ha

³ lefolyás kezdete percben, alapoutputja: 21 perc

⁴ maximális vízhozam (peak flow rate), alapoutputja: 10,595 mm/h

⁵ maximális hordalékhozam (peak sediment discharge), alapoutputja: 2,2447 kg/min

⁶ +10 % helyett csak +6,06 %-kal (0,35-re) növeltük (maximális értéke THMAX lehet)

⁷ + 10% helyett csak + 8,3 %-kal (0,39-re), -10 % helyett csak –5,56 %-kal (0,34-re) változtattuk az értékét (POR illetve THI értéke miatt)

⁸ –10 % helyett csak –7,7 %-kal (0,36-ra) csökkentettük (minimális értéke THMAX lehet)

7. táblázat: Az érzékenységi teszt eredményei

Eredményeink nem teljesen egyeznek az irodalmi adatokkal (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b, VEIHE, A. et al. 2000a, 2000b), ott a COV és DINT nincs érzékeny paraméternek feltüntetve, míg nálunk viszont a felszíni szárarány (PBASE) és a csepperodibilitás (EROD) nem mutatkozott annak. Az adódó különbségek okát az *útmutatók* és a modell matematikai háttérét adó egyenletek (3. táblázat) áttekintésével a következőképpen tudjuk értelmezni:

- A növényborítottságnak (COV) az *útmutatók* szerint kizárólag a csapadék direkt illetve növényzeten keresztüli felszínre jutásában van szerepe, ezen keresztül pedig a növényborítás magasságának figyelembevételével a csepperóziót befolyásolja (ld. 3. táblázat 1., 12-14. egyenlet). A növényzet maximális csapadékraktározása (DINT)

pedig elsősorban a lefolyás csökkentésében játszik szerepet (ld. 3. táblázat 2. egyenlet). Ezeknek ellentmond az, hogy a hidrográfhoz kötődő outputok (lefolyás, maximális vízhozam) pontosan ugyanannyira érzékenyek a két paraméter változására, aminek az oka a két paraméter szorzat formájában történő megjelenésében rejlik. Mint erre más modelleknél is láthatunk példát, a EUROSEM esetében is tapasztalhatjuk, hogy a DINT standard-je 100 %-os növényborításra vonatkozik, és a 3. táblázat 2. egyenletében megjelenő I_x már a $DINT \cdot COV$ módosított értékkel egyezik meg (ld. később). Ezért ha a hidrográf kalibrálásába be akarjuk vonni e két paramétert, érdemes őket szorzat formájában kezelni. Ekkor a szedigráf kalibrálásába a növényborítást bevonva lehetőségünk nyílik a két paraméter egyedi értékeinek a meghatározására. Tesztünk során feltehetően azért mutatkoztak érzékeny paramétereknek, mert viszonylag rövid csapadékeseményt és nagy növényborítottságot alkalmaztunk. A DINT pontos szerepét a későbbiekben fogjuk részletesen megvilágítani.

- A PBASE feltehetően azért nem mutatkozott érzékeny paraméternek, mert értéke alacsony, így 10 %-os megváltoztatása nem jelentett komoly befolyást a modell kimeneti paramétereire. A PBASE-t illetően még a modell fejlesztői által megjelentetett publikációk is ellentmondásosak. Szerepét egyrészt abban fogalmazzák meg, hogy *csökkenti* a beszivárgási felületet, így a laborban, növényzet nélküli talajon végzett mérést automatikusan korrigálja a 3. táblázat 8. egyenlete ($FMIN_{korr} = FMIN \cdot (1 - PBASE)$) alapján (QUINTON, J. N. 1997) a modell, másrészt viszont a növényzet által okozott szervesanyag-többlet, illetve alacsonyabb térfogattömeg fokmérője, tehát *növeli* a beszivárgást (MORGAN, R. P. C. et al. 1998a, 1998b), ekkor az $FMIN_{korr} = FMIN \cdot (1 / (1 - PBASE))$ egyenlet használatos. A két szorzótényező éppen egymás reciproka, jelenleg az utóbbi egyenlettel számol a modell, amint az az érzékenységi tesztből is kiderül (PBASE növelésével a beszivárgás is nőtt, ezzel csökkent a lefolyás). A terepi és a laborbeli átszivárgásméréseink tapasztalatai viszont az első verziót támasztják alá.
- Az EROD érzékenységet valószínű azért nem mutatta ki tesztünk, mert a nagyarányú növényborítottság és annak alacsony magassága miatt szerepe alárendelt (ld. 3. táblázat 12-14. egyenlet).

A kalibráláshoz használandó paraméterek kiválasztásában, azaz a paraméterek mérhető illetve nem mérhető voltának a megítélésében is eltértünk az előbb említett forrásoktól. Mivel a modell – mint korábban már említettük – az eróziót a hordalékkoncentráció és a lefolyás

segítségével számolja, a szedigráf kalibrálásához nagyon fontos előfeltétel a hidrográf rendkívül precíz kalibrálása (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b). Ezért fontos körütekintően eljárni a kalibráláshoz használandó paraméterek összeválogatásánál. A hidrográf kalibrálásához a G és IRMANN paramétereket jelöltük ki. THI és THMAX paramétereket jól mérhetőeknek ítéltük, ezért nem terveztük a kalibrálás során a felhasználásukat, FMIN pedig olyan széles spektrumon mozoghat bármely fizikai talajféleség esetén, hogy pontos mérése nélkül a legprecízebb kalibráció után is csak nagy bizonytalansággal lenne alkalmazható a modell. Mérésének lehetőségeire és nehézségeire a 6.3.1. fejezetben térünk ki részletesen. A ROC és PAVE paramétereket pedig nem tudtuk bevonni a kalibrálásba, mivel az összes vizsgálati területünk kőmentes volt. A szedigráf kalibrálásához a COH és EROD paramétereket terveztük felhasználni, D50 jól mérhető.

További észrevételeink az érzékenységi teszt során a hőmérséklet (TEMP), a porozitás (POR) és a felszíni közetarány (PAVE) kapcsán vannak. A hőmérséklet és a porozitás nincs hatással semelyik outputra. A PAVE növekedésével mind a lefolyás, mind az erózió látványosan csökken, ami megintcsak ellentmond a mérési tapasztalatoknak. A PAVE modellbeli megítélése hasonló a PBASE-éhez (MORGAN, R. P. C. et al. 1998a, 1998b). Egyrészt a vízáteresztő felület redukálásával csökkenti a beszivárgást ($FMIN_{kor} = FMIN \cdot (1 - PAVE)$), másrészt a körülötte lévő makropórusokkal növeli azt ($FMIN_{kor} = FMIN \cdot (1 + PAVE)$). A modell régebbi verzióiban a terepi tapasztalatok alapján mód volt a fent említett két lehetőségnek megfelelő egyenletek közül választani (erre szolgált az ún. ISTONE paraméter), a jelenlegi verzió automatikusan a beszivárgásnövelő hatással számol.

5.2. A modell tesztelése

A modell teszteléséhez a 2000. június 16-19. között végzett esőszimulátoros mérések közül választottunk ki nyolcat. A kiválasztás alapjául az szolgált, hogy egyrészt mindhárom területtípus képviselve legyen, másrészt kisebb és nagy intenzitású csapadékesemények is szerepeljenek az összehasonlításban. Nem hagyhattuk figyelmen kívül továbbá azt sem, hogy az esőszimulátoros mérések is hibával dolgoznak (ld. 4.3. fejezet), ezért a nagy hibával terhelt eseményeket (pl. több víz folyt le a területről, mint a kijuttatott csapadékmennyiség) nem vehettük be a tesztbe.

A kiválasztott csapadékesemények jellemzőit és az általuk okozott lefolyást illetve eróziót – bár a 6. táblázatban is megadtuk – a jobb áttekinthetőség céljából a 9. táblázat első felében is részletezzük. A EUROSEM futtatásánál használt bemeneti paramétereket pedig csapadékeseményenként a 8. táblázatban foglaltuk össze, külön feltüntetve az egyes paraméterek meghatározásának a módját.

A modell futtatása a nyolc csapadékeseményre egyértelműen azt mutatta, hogy a EUROSEM *alulbecsli* a lefolyást (9. táblázat). A kisebb intenzitású csapadékeseményeknél (30-40 mm/h) a modell szerinti lefolyás – egy kivétellel – 0, a nagyobb intenzitású csapadékeseményeknél (90-130 mm/h) azonban a modellezett lefolyás nagyságrendje megegyezik a tényleges értékekével.

A modelltesztelés eredménye már előrevetítette, hogy feltételezhetően az eredeti standard-ek nagyfokú módosítása szükséges a kalibrálás folyamán.

Paraméter	M.egys.	gybea	gygy30	gym30	gym40	gym130	sz30	sz40	sz90
COV ¹	-	0,9	0,9	0,6	0,6	0,6	1	1	1
DINT ²	mm	2,3	2,3	0,3	0,3	0,1	3	0,1	0,1
PLH ¹	cm	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,6	0,6	0,6
PBASE ¹	-	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
PLANG ¹	fok	40	40	10	10	10	80	80	80
SHAPE ³	-	1	1	1	1	1	1	1	1
L ⁴	m	6	6	6	6	6	6	6	6
W ⁴	m	1	1	1	1	1	2	2	2
SIR ⁴	m/m	0,0385	0,0385	0,0385	0,0385	0,0385	0,135	0,135	0,135
RFR ⁴	cm/m	5	5	3	3	3	10	10	10
RAS ⁴	cm/m	3	3	9	9	9	3	3	3
RECS ⁴	mm	5	5	12	12	12	20	20	20
FMIN ⁵	mm/h	15,26	16	27,1	28,4	30,5	20,58	19,52	19,78
G ²	mm	380	380	240	240	240	300	300	300
THI ⁴	m ³ /m ³	0,13	0,354	0,38	0,45	0,45	0,255	0,42	0,42
THMAX ⁴	m ³ /m ³	0,396	0,396	0,487	0,487	0,487	0,463	0,463	0,463
POR ⁶	m ³ /m ³	0,4	0,4	0,49	0,49	0,49	0,47	0,47	0,47
IRMANN ³	m ^{1/6}	0,03	0,03	0,014	0,014	0,014	0,01	0,01	0,01
D50 ⁴	µm	190	190	190	190	190	105	105	105
COH ⁴	kPa	43	43	12	12	12	16	16	16
EROD ²	g/J	2,6	2,6	1,7	3,1	3,1	1,7	3,1	3,1
ROC ⁴	m ³ /m ³	0	0	0	0	0	0	0	0
PAVE ⁴	-	0	0	0	0	0	0	0	0

¹terepi becsléssel, ²standard alapján becsülve, ³standard-ból, ⁴mért érték, ⁵lefolyásból visszszámolva, ⁶tetszőleges, THMAX-nál nagyobb érték beírva

8. táblázat: A modelltesztelésben részt vett parcellák eseményenkénti input adatai

Esemény jele	gybea	gygy30	gym30	gym40	gym130	sz30	sz40	sz90
Csap. intenzitás (mm/h)	40,1	20,2	27,7	39	128,5	22	27,6	84
Időtartam (perc)	60	60	60	31	11	60	24	9
Csap. mennyiség (mm)	40,1	20,2	27,7	20,15	23,56	22	11,04	12,6
Valós lefolyás (mm)	0,71	2,2	0,38	2,06	10,85	0,66	1,8	5,6
Modellezett lef. (mm)	0	0	0	0,8	11,39	0	0	3,27
Valós erózió (t/ha)	0,003	0,002	0,007	0,009	0,32	0,74	0,16	0,64
Modellezett erózió (t/ha)	0	0	0	1,16	3,53	0	0	0,367

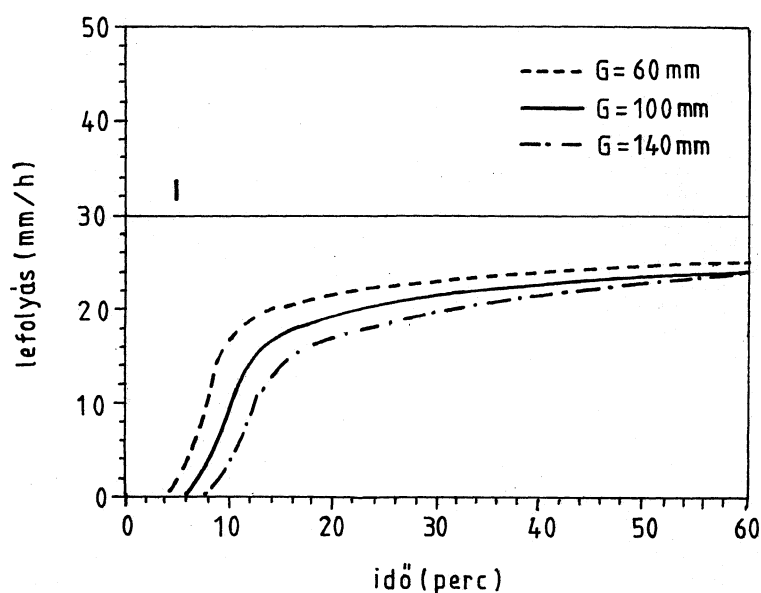
9. táblázat: A vizsgált nyolc csapadékesemény tényleges és modellezett hatása a kísérleti parcellákon

5.3. Kalibrálási kísérlet és eredmények

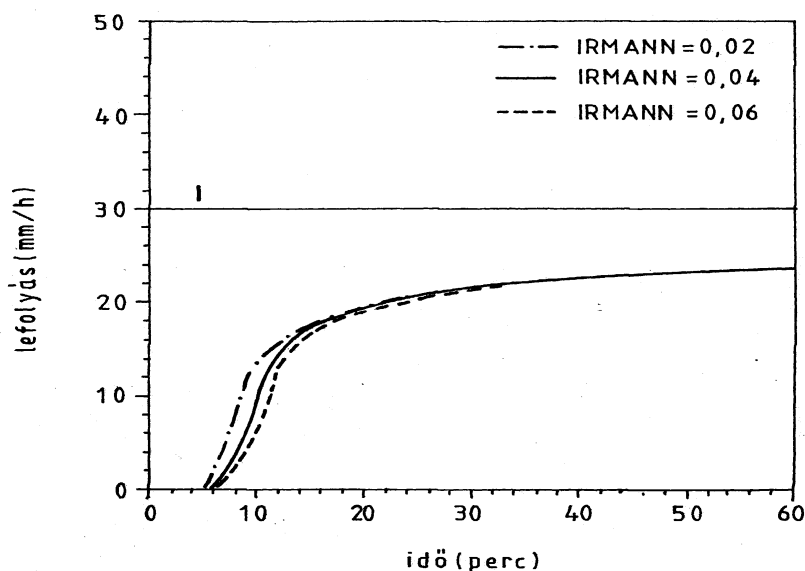
Mint korábban már említettük, a kalibrálás egyik sarkalatos pontja a mért és a szimulált hidrográfok precíz egymásra illesztése, de legalább ilyen fontos az egyes, kalibrálásban használandó érzékeny paraméterek hidrográfra és szedigráfra gyakorolt pontos hatásának az ismerete. Ezek szellemében a modell kidolgozói az alábbi kalibrálási sorrendet javasolják (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b):

1. FMIN beállítása hosszú, állandó intenzitású csapadékesemények vagy esőztetések segítségével. Hátterében az áll, hogy a növényzet, a talaj és a felszíni mikrodomborzat tározó kapacitásának a feltöltése után a lefolyás aszimptotikusan közelít a csapadékindenzitás (I) és a telített talaj vízvezető képességének (FMIN) különbségéhez.
2. G beállítása a hidrográf kezdeti szakaszának az illesztésével (7. ábra). A 3. táblázat 6-7. egyenlete teljes mértékben alátámasztja azt a tapasztalatot, miszerint a szimuláció során G értékét minél nagyobbobbnak választjuk, annál lassabban fog végbemenni a feltalaj telítése, annál lassabban áll be a vízáteresztés FMIN közeli értékre.
3. IRMANN kalibrálása a hidrográf első néhány perce alapján. A Manning-féle érdességi jelzőszám felelős a felszíni csapadékraktározásért, ezért értékétől függ az, hogy a lefolyás hirtelen növekedéssel (alacsony IRMANN) vagy lassan, a felszíni mikrotározók fokozatos feltöltésével párhuzamosan (magas IRMANN) indul meg (8. ábra). Ezzel a hidrográf kalibrálása befejezettnek tekinthető.
4. A szedigráf kalibrálására már nem kapunk ilyen egyértelmű „receptet”, itt a mért hordalékkoncentrációk eredetének ismeretében tudjuk az EROD és COH paramétereket kalibrálni. EROD a csepperózióért felelős, tehát a lefolyás kezdetén

okoz viszonylag nagy koncentrációt, és miután összefüggő vízfilm alakult ki a felszínen, jelentősége csökken. COH a vízfilm által elragadott hordalékmennyiséget határozza meg, tehát az eső későbbi szakaszában lesz szerepe. Ennek ismeretében a szedigráf kezdeti szakaszának az illesztését EROD, későbbi szakaszának illesztését COH változtatásával tudjuk megtenni. Érdekes itt is előbb hosszabb csapadékeseményekkel COH beállítását, majd EROD figyelembevételével a szedigráfok kezdeti szakaszainak illesztését elvégezni.



7. ábra: G hatása a hidrográfra (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b)



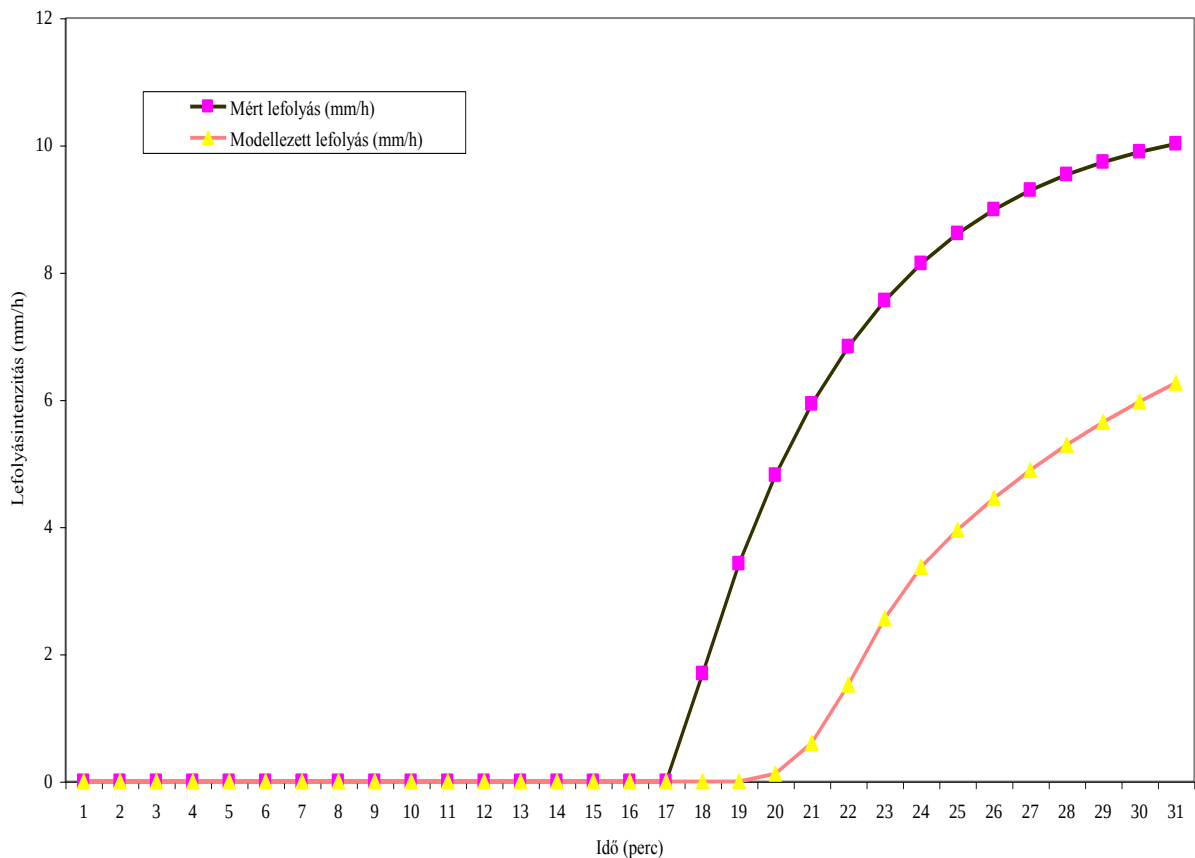
8. ábra: IRMANN hatása a hidrográf kezdeti szakaszára (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b)

E kalibrálási módszertől annyiban tértem el, hogy mivel FMIN-t az esőszimulátoros méréseknél a lefolyásból visszazámolt beszivárgási görbék végtelenben vett határértékeként definiáltuk, nem vontam be a vizsgálatba, hanem azonnal G-vel próbáltam illeszteni a hidrográfok kezdeti, meredek szakaszát. A teszteléshez használt 8 esőszimulátoros mérés eredményeit használtam fel a kalibráláshoz is.

A vizsgált csapadékesemények döntő többségénél G semmilyen értékére sem kerültek fedésbe a mért és modellezett hidrográfok. A hiba szisztematikusnak mutatkozott, G standard szerinti értékére a lefolyás később kezdődött meg mint a valóságban, és a talaj rendkívül lassan telítődött vízzel (9. ábra). G 60-75%-os csökkentésével el tudtam azt érni, hogy minden egyes csapadékeseménynél a modellezett és a mért lefolyás kezdete megegyezzen, de a talaj telítődése továbbra is elmaradt a valóstól. G további csökkentése a lefolyás kezdetét még előrébb hozta, de a valósánál jóval gyorsabb kezdeti emelkedés után is I-FMIN alatt stabilizálódott a lefolyás értéke. Hosszabb csapadékeseményekre futtatva a modellt a szisztematikus eltérések egyértelműen FMIN túlbecslésére utaltak. Ez felveti FMIN helytelen meghatározásának a lehetőségét, ezzel kalibrálásának a szükségességét, amit viszont FMIN esőztetés során alkalmazott kiszámolási módja zár ki, amint azt korábban már említettem.

Ezen a ponton az eredeti kalibrálási sorrendtől eltérve, a többi paraméter változtatásával kerestem a hiba okát. Számos kísérlet, modellfuttatás, próbálkozás után az okot abban tudtam megjelölni, hogy a modell a növényzet csapadékraktározását (3. táblázat 2. egyenlet) *nem statikus raktározási kapacitásként, hanem óránkénti intenzitásként* értelmezi. Ezt olyan – valós mérési adatoktól teljesen független – elméleti szimulációk segítségével láthatjuk be, amelyek bemeneti paramétereit a következőképpen válogattam össze:

- hosszú (minimum 1 órás) állandó intenzitású (pl. 30 mm/h) csapadékesemény,
- alacsony G érték (pl. 50 mm) és alacsony THMAX-THI különbség (pl. 0,01), hogy a talaj telítődése minél hamarabb végbemenjen,
- minimális érdesség (RFR és IRMANN, pl. 1 mm és 0,01), hogy a felszíni csapadékraktározás minél kevesebb legyen,
- PBASE, ROC és PAVE értéke 0, így nem módosítják FMIN-t,
- a felsorolt paramétereken, FMIN-en, DINT-n és COV-on kívül a többi paraméter tetszőlegesen választható (L-t és W-t 100-100 m-nek, a lejtőszöget 10 %-nak választottam).



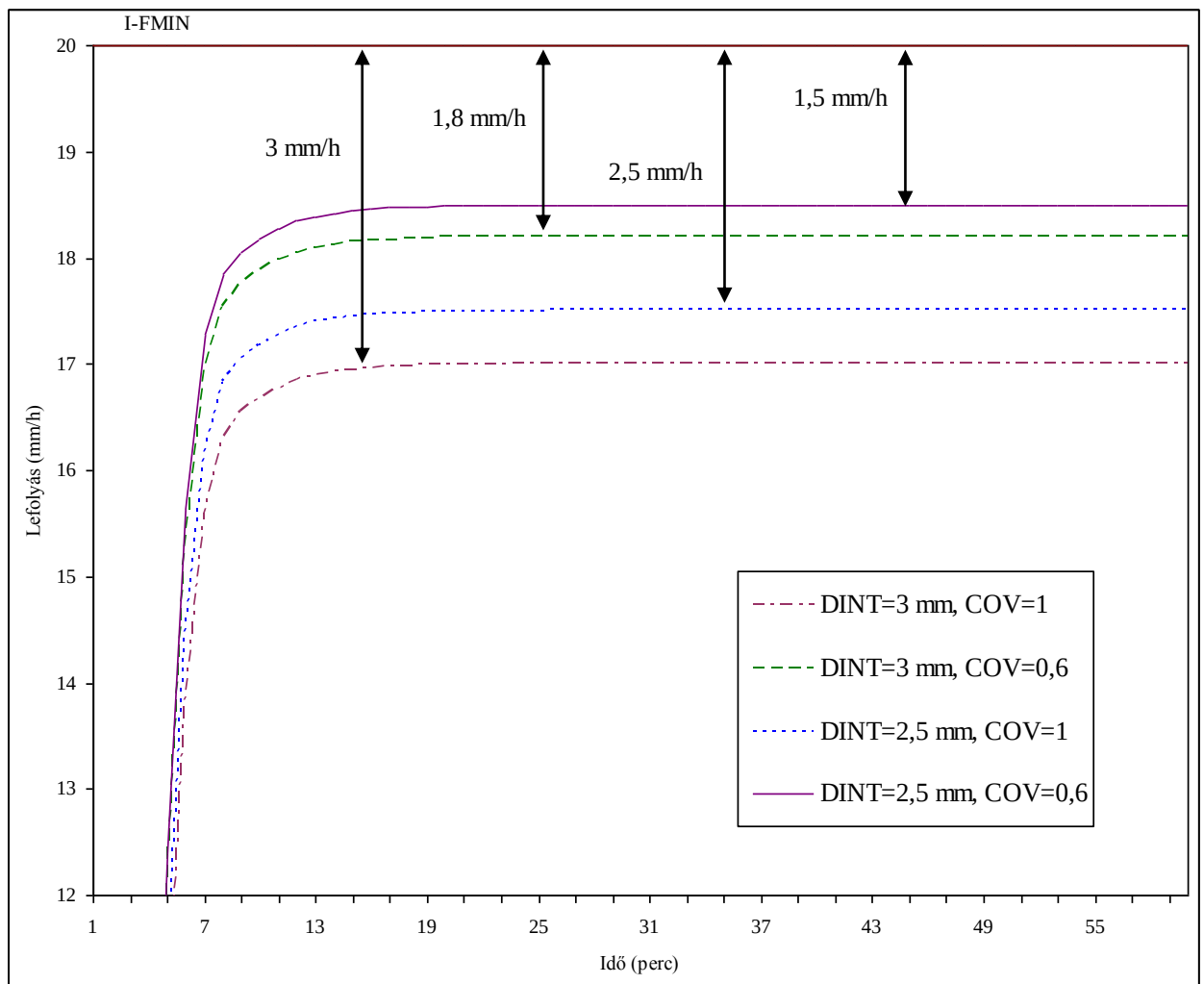
9. ábra: Példa a mért és modellezett hidrográfok között mutatkozó szisztematikus eltérésre (gym40-es jelű csapadékesemény)

A felsorolt feltételek mellett ha FMIN értékét pl. 10 mm/h-nak választjuk, akkor a lefolyási intenzitásnak viszonylag hamar 20 mm/h érték körül kell állandósulnia. Lefuttatva a modellt négy különböző DINT-COV kombinációra (DINT = 3 mm, COV = 1; DINT = 3 mm, COV = 0,6; DINT = 2,5 mm, COV = 1; DINT = 2,5 mm, COV = 0,6), a kapott hidrográfokat a 10. ábra szemlélteti.

Amint az ábrán is bejelöltük, jól látható, hogy a lefolyás minden esetben $DINT \cdot COV$ értékével alacsonyabb szinten állandósul, mint $I - FMIN$ különbsége, vagyis a növényzet fedettségétől függő maximális csapadékraktározása intenzitási értéként van jelen a modellben.

Összefoglalva a leírtakat, a kalibrálási kísérlet folyamán sikerült tényekkel bizonyítani azt, hogy *a valós és a szimulált hidrográfok már mérési eredményektől független elméleti megfontolások alapján sem illeszthetők egymásra*. Ez azt jelenti, hogy a modell jelenlegi verziójának szakmailag megalapozott *kalibrálása nem végezhető el a modell módosítása nélkül*. A legnagyobb algoritmikus hibát az okozza, hogy a növényzet tartós csapadékvisszatartását leíró egyenlet (3. táblázat 2. egyenlet) végeredményeként adódó

csapadékraktározást a modell *intenzitásként* értelmezi, nem pedig egy egyszer feltöltődő raktározási kapacitásként. Ezen kívül számos koncepcionális és egyéb probléma merült fel a tesztelés során, amelyeket, illetve megoldási javaslataikat az alábbiakban részletezünk:



10. ábra: A növényborítottság és a csapadékraktározás szerepe a hidrográf alakulásában

1. COV szerepe nincs tisztázva, sehol nincs rá utalás, hogy a csapadékmegosztásán kívül – amellyel a csepperóziót befolyásolja – máshol is megjelenne a modellben, pedig a növényzet csapadékraktározásánál is szerepel korrekciós szorzótényezőként, tehát a hidrográf (kezdeti szakaszának) alakításában is van jelentősége.
2. Az FMIN PBASE figyelembevételével történő módosításához használt képlet által adott eredmények nem egyeznek a mérési tapasztalatokkal. Természetesen általában a dúsabb vegetáció porózusabb talajt, nagyobb beszivárgást biztosít, de ennek nem lehet

fokmérője a felszíni szárarány, helyette célszerűbb lenne a felszínközeli gyökérzet arányát alkalmazni. Optimális megoldásnak a direkt terepi átszivárgásmérést tartanánk.

3. PAVE korábban említett kettős szerepéből a modell jelenlegi verziójában csak az egyik alkalmazható ISTONE rögzített volta miatt. Fontos lenne meghagyni a terepi tapasztalatok alapján a választási lehetőséget, vagy csak terepi mérést alkalmazni a beszivárgás meghatározására.
4. Az előzőek is megerősítik, hogy rögzíteni kellene az egyes paraméterek meghatározási módszerét. Különösen igaz ez a vízáteresztő képesség (FMIN) meghatározására, ahol mindenképpen valamely kényszervíznyomás nélküli terepi (pl. Kazó-féle gravitációs vagy esőszimulátoros) módszer a javasolt (BUZÁS I. 1993). Ezek előnye a bolygatatlan minták laborbeli vizsgálatával szemben, hogy a teljes talajszelvény vízáteresztését mérik, továbbá tényleges vízáteresztést mérnek, azt nem kell a PBASE, a ROC és a PAVE ismeretében módosítani. További előnyei, hogy a talaj víznyelési-vízáteresztési függvényét is megadják, amellyel a G paraméter kiváltható (vagy kiszámolható). Természetesen nincs reális lehetőség minden modellezni kívánt esemény előtt többórás terepi mérés elvégzésére, de a labormérések közül is azok használata fogadható csak el, amelyek a teljes vízáteresztési függvényt adják meg (pl. Vér-féle átszivárgásmérés, VÉR F. 1961, 1963). A fent részletezett kalibrálási kísérlet során ez nem okozott problémát, hiszen az esőszimulátoros mérések alapján meghatározott vízáteresztő képességet használtam a modellben, de az emellett elvégzett laboratóriumi mérések rávilágítottak arra, hogy a különböző módszerekkel mért vízáteresztési értékek óriási eltéréseket mutatnak. Erre a problémakörre a 6.3.1. fejezetben még visszatérünk.
5. A POR paraméter elhagyható a modellből, mert sehol nem kerül felhasználásra. Hasonlóan invariánsak a modell outputjai THI és THMAX abszolút értékére, csak a különbségük ismerete lényeges (3. táblázat 6. egyenlet). Ez a mérési módszerük egyszerűsíthetőségét jelenti, hiszen elegendő a bolygatatlan minták felvételi és vízzel való telítésük utáni tömegüket meghatározni.

A továbblépésre három lehetőség kínálkozik:

1. Csak átmeneti és részleges megoldás lehet, hogy a modell használata folyamán FMIN helyett mindig $FMIN + (DINT \cdot COV)$ értékét írjuk be, kiküszöbölve ezzel a hidrográfban legnagyobb hibát okozó tényezőt.
2. Felvenni a kapcsolatot a modell fejlesztőivel az észlelt problémák tisztázására (folyamatban).

3. Új modellt építeni fel, mely kiküszöböli az említett problémákat, ugyanakkor mind a EUROSEM-ből, mind egyéb talajeróziós modellekből átveszi a jól működő és „bevált” képleteket.

A dolgozat folytatásában ezt az utóbbi alternatívát mutatom be.

6. Új modell megalkotása

6.1. A modell koncepciója, érvényessége és felépítése

Amint a korábbiakban már részletesen taglaltuk, a EUROSEM tesztelése során jutottam el arra a következtetésre, hogy létre kellene hozni egy olyan új modellt, amely részben a EUROSEM egyenletein alapul, viszont módosításokkal és új elemek bevonásával kiküszöböli a EUROSEM használata során adódó problémákat. Az új dinamikus fizikai modell kialakításánál a fent említetteken túlmenően az alábbi szempontokat vettem figyelembe:

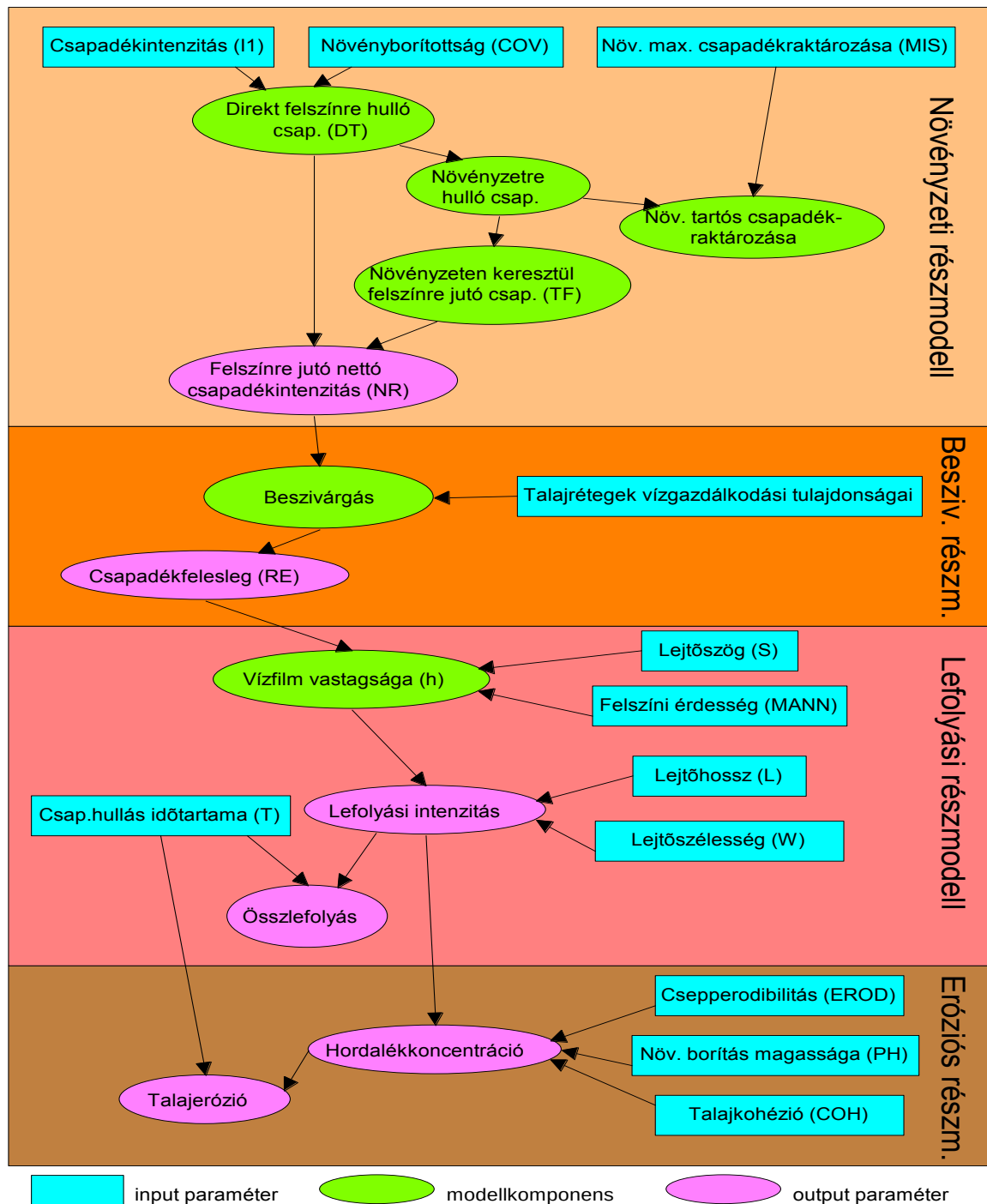
1. Csak olyan bemeneti paramétereket próbáltam beépíteni a modellbe, amelyek mérhetők.
2. A többféle módon mérhető inputokhoz rögzítettem az alkalmazott mérési módszereket.
3. A talajt rétegenként parametrizáltam.

A következőkben a modellnek egy olyan „0. verzióját” mutatom be, amely még elég korlátozott érvényességi körű, és számos folyamatnak csak az egyszerűsített leírásával dolgozik, de – mint azt a 7. fejezetben részletezni fogom – újabb paraméterek bevonásával és a folyamatok valósághű közelítésével jóval szélesebb körben válik majd alkalmazhatóvá. A modell érvényességi körét az alábbiak szerint lehet definiálni:

1. Csak állandó intenzitású csapadékeseményekre működik.
2. Barázdamentes parcellákra vagy homogén mezőgazdasági táblákra alkalmazható.
3. Abban a tipikus szántóföldi szituációban használható a modell, amikor a felső, kis térfogattömegű szántott réteg alatt egy tömődöttebb eketalpréteg helyezkedik el, mely alatt szintén jobb vízgazdálkodású talajrétegek vannak.

A megadott állandó csapadékintenzitásból négy, egymástól élesen elkülönülő, ugyanakkor szorosan egymásra épülő részmodell (11. ábra) számolja ki a felszíni lefolyás intenzitását, összmenyiségét, valamint a talajeróziót:

1. A növényzeti részmodell a lehulló eső útját írja le a felszínig, középpontjában a növényzet késleltető szerepe és tartós csapadékraktározása áll. A csapadékintenzitáson túlmenően inputjai növényzeti paraméterek. Részben azonos a EUROSEM-mel, de alapegyenlete más.



11. ábra: A modell algoritmus

2. A beszivárgási részmodell teljesen új alapokra épül, újszerűségét a *különböző talajrétegek* különböző vízgazdálkodási tulajdonságainak figyelembevétele és az egyes *paraméterekhez rendelt mérési módszerek* rögzítése jelenti.
3. A modellezett folyamatok a lefolyási részmodellben nyernek térbeliséget. A topográfiai és mikrotopográfiai paraméterek segítségével a parcelláról lefolyó vízfilm

vastagságának és mozgási sebességének az időbeli és térbeli alakulását jellemzi, melyből már könnyedén számolható a parcelláról távozó vízhozam. Teljes egészében megegyezik a EUROSEM lefolyási részmodelljével.

4. Az eróziós részmodell – mely szintén a EUROSEM-en alapszik – a hidrográf és a hordalékkoncentrációk segítségével határozza meg a talajerózió mértékét. Lényege az esőcseppek és a lejtőn mozgó vízfilm által okozott eróziónak a meghatározása.

Az egyes részmodellek részletes jellemzését a 6.2-6.5. fejezetek tartalmazzák. Mivel ezekből a két utolsó – a jelölések kivételével – teljes egészében megegyezik a EUROSEM megfelelő részmodelljeivel (MORGAN, R. P. C. et al. 1998a, 1998b), csak rövidített formában, a modell leírásának teljessége miatt kerültek be a dolgozatba, ezért apróbetűs részként szerepelnek. Az ismertetett modell első két részmodelljének programozását a *Maple 8* nevű számítógépalgebrai rendszerben végeztem el. A kimenetként adódó csapadékfeleslegre és a további két részmodellhez szükséges paraméterekre pedig a EUROSEM modellt futtattam. Az ezekkel kapcsolatos technikai részletek a 6.6. fejezetben találhatók.

6.2. Növényzeti részmodell

E részmodell határozza meg azt, hogy az állandó intenzitású csapadékból mennyi éri el a felszín („net rainfall”). Magyarul a „nettó csapadékmennyiség” helyett a „nettó csapadékintenzitás” kifejezéssel illettem, mivel ténylegesen intenzitásértékekről van szó. A részmodell bemeneti paraméterei:

1. Állandó csapadékintenzitás (I_1 , mm/perc)
2. A felszín növényborítottsági aránya (COV)
3. A növényzet maximális csapadékraktározása (MIS, mm)

A felszín növényborítottságát 1-2 m magasról készített fénykép segítségével, a csupasz talajfelszínek és a növényzettel borított felszínek elkülönítésével lehet meghatározni. A növényzet maximális csapadékraktározása nem tartozik a könnyen mérhető paraméterek közé, meghatározására számos gyakorlati táblázat készült (WISCHMEIER, W. H. et al. 1978, KIRKBY, M. J. et al. 1980, MORGAN, R. P. C. et al. 1993). Sajnos a táblázatok jelentős része nem tér ki arra, hogy milyen felszínborításra vonatkoznak a közölt adatok. Ennek kapcsán fontos megjegyezni, hogy az (1) és (3) összefüggések csak akkor érvényesek, ha olyan táblázatot használunk a maximális csapadékraktározás meghatározására, amelyben a közölt adatok 100

%-os növényborításra vonatkoznak. Ennek hiányában mindkét egyenletben e kitevőjének nevezőjéből a COV elhagyható.

A lehulló csapadék felszínre jutását is számos összefüggés írja le (WISCHMEIER, W. H. et al. 1978, KIRKBY, M. J. et al. 1980, KOVÁCS GY. 1981, MORGAN, R. P. C. et al. 1993, BERGSMA, E. 1996). A modellben a EUROSEM-ben helytelenül alkalmazott egyenlet (ld. 3. táblázat 2. egyenlet) módosított változatát használtam fel (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b után módosítva):

$$NR(t) = I1 * (1 - e^{-I1 * t / (MIS * COV)}) \quad (1)$$

$NR(t)$ jelöli a felszínre jutó csapadék intenzitását mm/percben (nettó csapadékintenzitás), t pedig a csapadékhullás kezdete óta eltelt időt percben.

Bár az (1) egyenletben szereplő $NR(t)$ adja a növényzeti részmodell végeredményét, illetve a beszivárgási részmodell kiindulási alapját, tehát ismerete elegendő a következő részmodellre való lépéshez, a háttérben meghúzódó összefüggéseket (DT , TF , ld. 11. ábra) mégis szükséges ismertetni, mivel a modell ezen komponenseit az eróziós részmodellben felhasználjuk. $NR(t)$ két tagból tevődik össze, egyik részét a direkt felszínre hulló csapadék adja ($DT(t)$, mm/perc), melyet a

$$DT(t) = I1 * (1 - COV) \quad (2)$$

összefüggés ír le, másik részét pedig a növényzetre hulló csapadéknak azon része adja ($TF(t)$, mm/perc), amely nem marad vissza a növényzeten tartós csapadékraktározás formájában, hanem az alábbi összefüggés (MORGAN, R. P. C. et al. 1998b után módosítva) szerint a növényzeten keresztül eléri a felszínt:

$$TF(t) = I1 * (COV - e^{-I1 * t / (MIS * COV)}) \quad (3)$$

A két tag szerepe a csepperózió meghatározásánál fog majd előkerülni.

6.3. Beszivárgási részmodell

6.3.1. A beszivárgás mérésének problematikája

Mint korábban többször utaltunk rá, a lefolyás és az erózió modellezésének egyik legsarkalatosabb pontja a beszivárgás pontos meghatározása. Enélkül a legjobb modellek sem

képesek valósághű eredményeket produkálni, hiszen a modellek kimenetei rendkívül érzékenyen reagálnak a beszivárgás változására. A meghatározással kapcsolatos problémák egyrészt – mint bármelyik másik talajjellemző esetén – a beszivárgás nagy térbeli változatosságából, másrészt pedig a mérési módszerek által mért értékek kompatibilitásából adódnak. Itt most csak ez utóbbi problémakörrel foglalkozunk.

A talajba szivárgó víz jellemzésére két paraméter szolgál, a telítetlen talaj víznyelőképessége és a telített talaj vízáteresztő képessége. Míg az első időben (nedvességtartalomtól függően) változik, addig a második elviekben egy adott talajra jellemző állandó értékkel bír. A legtöbb modell inputjai között szerepel e két paraméter, de például az EROSION2D/3D a szemcseösszetétel, a térfogattömeg és a szervesanyag-tartalom alapján automatikusan kalkulálja őket (MICHAEL, A. et al. 1996, WERNER, M. et al. 1996). Bár a két paraméterre a fizikai talajféleség függvényében készültek standard-ek, parcellaszintű modellezésnél mérésük mindenképpen javasolt. Mivel a víznyelőképesség időfüggő paraméter, nem érdemes egyetlen értékkel jellemezni – bár matematikailag ez is megoldható, mint pl. a EUROSEM-ben használt „G” paraméter, ami a mátrixpotenciálból származtatott improprius integrál (ld. 3. táblázat 5. egyenlet) –, hanem a teljes beszivárgási görbe meghatározására kell törekednünk, mely végtelenben vett határértékeként természetesen a vízáteresztő képességhez is hozzájuthatunk. A mérési adatokra a függvényillesztést leggyakrabban a Green-Ampt- vagy a Horton-képlet segítségével tesszük meg (DE ROO, A. P. J. 1992, GRAYSON, R. B. et al. 1992, KUTILEK, M. et al. 1994, MORGAN, R. P. C. 1995). A modellezés szempontjából történő alkalmazhatóság legnagyobb problémája az, hogy a viszonylag könnyen, nagy mennyiségben elvégezhető beszivárgásmérési módszerek (állandó illetve csökkenő víznyomás módszere, duplakeretes beáztatás, stb.) *egyike sem a természetes esőzések idején fellépő beszivárgási értékeket adja*. Azok a mérési módszerek, amelyek viszont alkalmasak lennének a csapadékhullás idején fellépő víznyelés és vízáteresztés mérésére (pl. esőszimulátorok alkalmazása), hazánkban sajnos valamilyen oknál fogva (eszközigény, időigény, stb.) nem tudtak elterjedni széles körben. Az ismertetett probléma nem új keletű, sőt a mért adatok inkompatibilitásának kimutatása a különböző módszerekkel mért vízáteresztési értékek terminológiai elkülönítését eredményezte: megszületett a természetes vízáteresztő képesség (GÓCZÁN L. et al. 1969, 1970) és az esőáteresztő képesség (GÓCZÁN L. 1974) fogalma. Bár a természetes vízáteresztő képesség *fogalma* meg tudott honosodni (VÁRALLYAY GY. 1993a), a gyakorlati alkalmazásokban sajnos még szinte kivétel nélkül mindig kritika nélkül használják a

rendelkezésre álló beszivárgási adatokat, függetlenül azok mérési módjától és a kitűzött kutatási céltól.

A hazánkban elterjedt módszerek előnyeit és hátrányait a 10. táblázatban foglaltam össze. Az egyes módszerek metodikai leírása megtalálható a megadott forrásokban, ezért itt részletezésüket mellőzöm. Amint a táblázatból is kiderül, a problémák három főbb jelenség köré csoportosulnak:

Módszer	Előnyök	Hátrányok
Terepi csöves módszer	- a talaj tényleges víznyelését illetve vízáteresztését méri	- van kényszervíznyomás - kérgesedéssel nem számol - definiálhatatlan a talajminta hossza - oldalirányú elszivárgás van
Duplakeretes módszer	- a talaj tényleges víznyelését illetve vízáteresztését méri	- van kényszervíznyomás - kérgesedéssel nem számol - definiálhatatlan a talajminta hossza - időigényes
Kazó-féle gravitációs módszer	- a talaj tényleges víznyelését illetve vízáteresztését méri - nincs kényszervíznyomás	- kérgesedéssel nem számol - jelentősen sérülhet a talajfelszín bolygatatlansága
Kazó-féle mesterséges esőztetés	- a mérés körülményei jól közelítik a természetes esők alatti körülményeket (nincs kényszervíznyomás, stb.) - 10-80 mm/h intenzitástartományban alkalmas mérésre	- a kérgesedés kis mértékű a kis, csupán 1 m-es esőztetési magasság miatt - eszközigényes
Pannon R-02 esőszimulátor	- a mérés körülményei a legjobban közelítik a természetes esők alatti körülményeket (nincs kényszervíznyomás, kérgesedés lép fel, stb.)	- csak nagy intenzitású csapadékokat szimulál (> 30 mm/h) - csak lejtős térszínen alkalmazható - idő-, munka- és eszközigényes
Állandó és csökkenő víznyomás módszere	- nagymennyiségű labormérést tesz lehetővé	- víznyelés mérésére nem alkalmas - kérgesedéssel nem számol - csak rétegenkénti vizsgálatoknál alkalmazható
Vér-féle módszer	- nagymennyiségű labormérést tesz lehetővé	- kérgesedéssel nem számol - csak rétegenkénti vizsgálatoknál alkalmazható

10. táblázat: A hazai gyakorlatban elterjedt módszerek összehasonlítása az eróziós modellezésben való használhatóságuk szempontjából (VÉR F. 1961, 1963, KAZÓ B. 1966, 1967, MSZ-08 0205-78, 1979, VÁRALLYAY GY. 1993a, 1993b, CSEPINSZKY B. 1999 nyomán)

1. *A minta hosszának problémaköre.* Mind a terepi csöves módszer, mind a duplakeretes módszer a mért beszivárgási értékekből a Darcy-törvény segítségével számolja a talajok víznyelő és vízáteresztő képességét. Ez két problémát vet fel. Egyrészt megkérdőjelezhető a Darcy-törvény használatának jogossága, hiszen elvileg ez az

összefüggés csak kétfázisú talajra alkalmazható, vagyis csak vízzel telített talajok esetében lehet vele a vízáteresztő képességet meghatározni. Másrészt a törvény alkalmazásakor helytelenül járunk el – különösen a duplakeretes módszernél –, ha a talajoszlop hosszának a mérőkeret felszín alatti hányadát tekintjük, hiszen ez a mélység nem jelenti sem a talajoszlop kontinuitásának a megszakadását, sem a beszivárgási folyamat megszűnését. A csöves módszernél tompítja ezt a hibát a cső vége alatti oldalirányú elszivárgás – amelyről azonban pontos adataink nincsenek. Kézenfekvő megoldásnak tűnik, hogy ne alkalmazzuk a Darcy-törvényt, hanem a mért beszivárgási értékeket enélkül számoljuk át mm/h-ban megadott víznyelési illetve vízáteresztési értékekre, ami viszont a kényszervíznyomás problémáját veti fel. (Megjegyzendő, hogy a Darcy-törvény alkalmazásának kérdése csak elviekben merül fel, mivel mindkét említett módszernél a talajoszlop elvi hossza és az alkalmazott vízoszlop magassága megegyezik, azaz hányadosuk 1.)

2. *Kényszervíznyomás.* A Darcy-törvény alkalmazásának az elvetése egyben azt is jelenti, hogy elveszítjük a lehetőségét annak, hogy a vízáteresztő képesség és a hidraulikus nyomáskülönbség – azaz a vízfilm vastagságának – ismeretében meghatározzuk a tényleges beszivárgást. Tovább nehezíti a fenti két módszer alkalmazását az a tény, hogy a természetes esőzések idején maximum néhány mm (a lefolyás megindulása előtt pedig gyakorlatilag 0 mm) vastag vízfilm borítja a felszínt, ugyanis hiába tételezzük fel – a Darcy-törvény szellemében – a beszivárgás és a kényszervíznyomás lineáris kapcsolatát, a vékony vagy hiányzó vízfilm esetében gyakorlatilag a beszivárgásra 0 közeli értéket kapnánk. Ez egyben azt is jelenti, hogy a fent említett két módszer jelenleg használatos formája által szolgáltatott eredmények a természetes esőzések idején fellépő beszivárgási-lefolyási viszonyok modellezésére nem alkalmasak, a két módszer csak az elárasztásos öntözés megtervezéséhez képes gyakorlatban is használható mérési eredményeket produkálni.
3. *Kérgesedés jelensége.* Számos szerző leírta, hogy csapadékhullás alkalmával, különösen nagy intenzitású esők folyamán a becsapódó esőcseppek szétrombolják a felszínen lévő aggregátumokat, s ezzel egy olyan eliszapolódott felszíni réteget (megszáradva kérget) hoznak létre, mely jelentősen lecsökkentheti a beszivárgás intenzitását (GÓCZÁN L. 1974, MORIN, J. et al. 1977, DE ROO, A. P. J. 1992, SCHRÖDER, R. 2000). Vagyis eróziós vizsgálatoknál mindenképpen célszerű olyan beszivárgásmérési módszert választani, ami az esőcseppek becsapódásának ezen

hatását sem hagyja figyelmen kívül. Ez csakis a 10. táblázatban feltüntetett két esőszimulátoros módszer valamelyike lehet. Közülük – mint azt a táblázatban is feltüntettem – a Kazó-féle esőztetés hátránya, hogy az alkalmazott 1 m-es magasság kevés az esőcseppek megfelelő felgyorsulásához. A másik indok, ami a Pannon R-02 szimulátor alkalmazása mellett szól, hogy az lényegesen nagyobb terület (12 m^2) esőztetésére alkalmas, így mind az oldalirányú elszivárgás, mind az esőztetett terület szélének bolygatása kisebb arányú hibát okoz.

A leírtakból nyilvánvaló, hogy parcellaszintű eróziós modellek bemeneti paramétereinek előállítására az esőszimulátoros mérések (Pannon R-06, Kazó-féle) a legalkalmasabbak. Amennyiben ezek nem megvalósíthatóak, úgy a Kazó-féle gravitációs (viszkózaszivacsos) vagy a Vér-féle csöves módszer javasolt, hiszen a felszíni kérgesedést létrehozó esőcseppek becsapódását kivéve az egyéb valós körülmények itt is adóttak (pl. nincs kényszervíznyomás). A többi felsorolt módszer alkalmazása a kényszervíznyomás (csöves, duplakeretes) illetve a víznyelés mérésére alkalmatlan volta (állandó és csökkenő víznyomás módszere) miatt parcellaszintű eróziós modellezésnél mindenképpen kerülendő.

A következőkben bemutatott, általam kidolgozott beszivárgási részmodellt a víznyelés-vízáteresztés Vér-féle meghatározására építettem fel.

6.3.2. *A beszivárgás*

A beszivárgási részmodell kiindulási alapja a felszínre jutó nettó csapadékintenzitás, melyből a talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságai alapján meghatározza, hogy ez a nettó csapadékintenzitás milyen arányban oszlik meg a beszivárgás és a felszíni lefolyás között. A beszivárgási függvény meghatározása a Horton-képlet segítségével (HORTON, R. E. 1933), talajrétegenként történik. Mint korábban említettem, a tetszőleges számú talajrétegre alkalmazható, átfogó modell létrehozásának első lépéseként egy olyan modellt dolgoztam ki, amely a legtipikusabb szántóföldi szituációban alkalmazható, vagyis amikor a felső, szántott réteg alatt egy jóval rosszabb vízgazdálkodási tulajdonságú eketalpréteg található. Feltételezve, hogy ez alatt szintén nagyobb vízáteresztő képességű rétegek vannak, a modellbe elegendő a két felső réteg vízgazdálkodási tulajdonságait beépíteni – feltételezve azok homogenitását.

A talajra vonatkozó bemeneti adatokként mindkét talajrétegre az alábbi talajfizikai-vízgazdálkodási paraméterek ismerete szükséges:

1. Talajréteg vastagsága (D , cm)
2. Maximális vízkapacitás (P , v/v)

4. Szántóföldi vízkapacitás (KP, v/v)
5. Gravitációs pórustér (GP = P-KP, v/v)
6. Kezdeti átlagos talajnedvesség (M, v/v)
7. Vízáteresztő képesség (K_c , mm/perc)
8. A talajréteg víznyelési-vízáteresztési függvénye

Ez utóbbit a

$$K(t) = K_c + (K_0 - K_c) e^{-At} \quad (4)$$

alakú Horton-képlet szerint adunk meg (DE ROO, A. P. J. et al. 1992, SCHRÖDER, R. 2000), ahol

$K(t)$: a talajréteg víznyelő illetve vízáteresztő képessége a beázás kezdetétől mért idő (t, perc) függvényében (mm/perc)

K_0 : a talajréteg kezdeti víznyelése (mm/perc)

A: a talajrétegre jellemző paraméter

A 2-6. paraméterek meghatározása 5 cm hosszúságú, 100 cm³-es térfogatú bolygatatlan mintákon történik az alábbi lépésekben:

1. Tömegmérés (1.) a kezdeti talajnedvesség meghatározásához
2. A minta telítése vízbe merítéssel és folyamatos vízszintemeléssel 3-4 nap alatt
3. Újbóli tömegmérés (2.) a maximális vízkapacitás meghatározásához
4. Nagylyukú szitára helyezés minimum 4-5 napig a súlyállandóság eléréséhez
5. Újbóli tömegmérés (3.) a szántóföldi vízkapacitás meghatározásához
6. A minta kiszáritása
7. A száraz minta tömegének lemérése (4.)

Tekintettel arra, hogy a bolygatatlan mintánk 100 cm³-es, és a víz sűrűsége 1 g/cm³, az 1. és a 4. tömegmérés különbsége a kezdeti nedvességtartalom értékét, a 2. és a 4. tömegmérés különbsége a maximális vízkapacitás értékét, a 3. és a 4. tömegmérés különbsége pedig a szántóföldi vízkapacitás értékét adja meg térfogatszázalékban.

A vízáteresztés és a $K(t)$ függvény meghatározása – mint arra a 6.3.1. fejezetben utaltam - a Vér-féle módszerrel történik, szintén bolygatatlan mintákon. A modell nem számol a talajvízből felemelkedő kapilláris víz beszivárgást módosító hatásával, mivel eróziós modellről lévén szó a modellezni kívánt területek lejtéséből feltételezhető a mélyen elhelyezkedő talajvízszint. A továbbiakban a szántott rétegre vonatkozó paramétereket alsó indexben 1-es, az eketalprétegre vonatkozóakat alsó indexben 2-es jelöli.

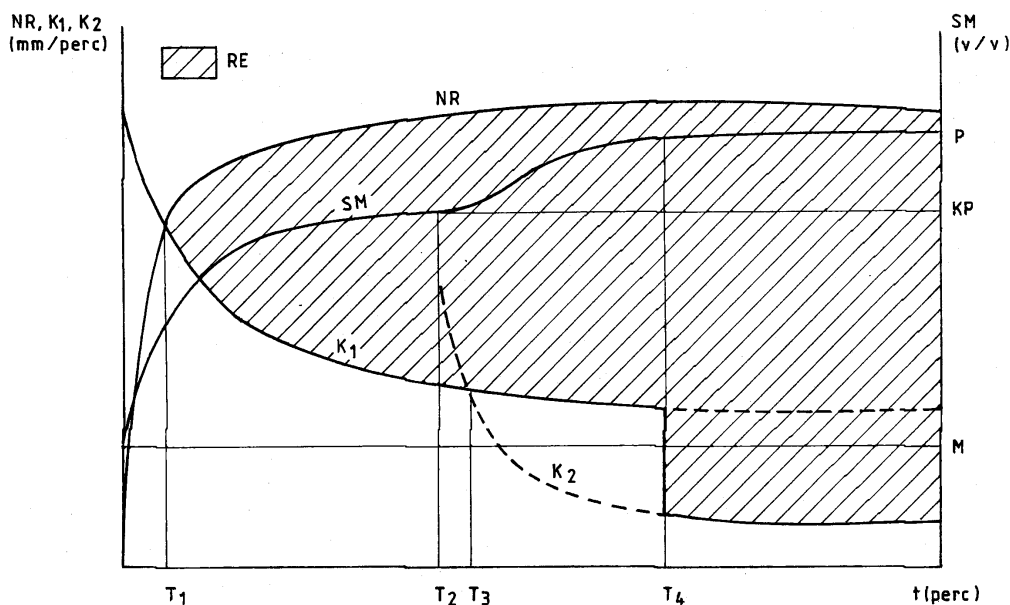
Mivel célom dinamikus modell kidolgozása volt, ezért a beszivárgási folyamatokat minden esetben az idő függvényében határoztam meg. A csapadékhullás a $t = 0$ időpontban kezdődik, és az alábbi „jelentős” időpontokat különítettem el a beszivárgás illetve a lefolyás változásaiban (12. ábra):

T₁: A növekvő NR(t) függvény értéke meghaladja a csökkenő K₁(t) értékét, azaz a talaj víznyelése a nettó csapadékkéntesség alá csökken. Ekkor indul meg a felszínen a csapadékfelesleg („rainfall excess”) képződése (RE(t), mm/perc), s ezzel párhuzamosan a lefolyás.

T₂: A víznyelés eredményeképpen a felső talajréteg feltelik szántóföldi vízkapacitásig, a beázási mélység eléri az eketalpréteget. A csapadékfeleslegre ennek nincs hatása, de megkezdődik az eketalpréteg víznyelése.

T₃: Az eketalpréteg gyorsan csökkenő víznyelése a felső réteg vízvezetése alá csökken. Az eketalpréteg visszaduzzasztó hatásának köszönhetően megindul a szántott réteg gravitációs pórusterenek gyorsütemű feltöltődése.

T₄: A felső réteg eléri maximális vízkapacitását. Ettől kezdve a felszíni lefolyást az eketalpréteg víznyelése-vízáteresztése határozza meg.



12. ábra: A szántott réteg telítődésének elvi sémája a „jelentős” időpontok feltüntetésével (SM jelöli a szántott réteg talajnedvességét)

A négy időpont sorrendisége természetesen nem feltétlenül így alakul, valós körülmények között gyakran $T_1 = 0$, azaz már a kezdeti víznyelés mellett is fellép felszíni

lefolyás, ami pedig még ennél is gyakoribb, hogy az eketalpréteg kezdeti víznyelése is kisebb a szántott réteg vízáteresztésénél, azaz T_3 jelentőségét veszti.

A fent definiált T időpontok meghatározásához két különböző módon felírtam a két talajréteg különböző nedvességtartalmainak eléréséhez szükséges összvízmennyiségeket:

1. A rétegek vastagsága, víztartalmuk, szántóföldi vízkapacitásuk és porozitásuk alapján
2. A Horton-képletből származtatott határozott integrálok segítségével

Ez utóbbi esetben az integrálási tartományok felső vége – ismeretlen időpontként – definiálja a meghatározandó T -ket, így a kétfajta felírási mód egyenlővé tételével kapott egyenleteket megoldva tudjuk kiszámolni a T -ket.

A térfogatos víztartalmak kiszámítása

A kezdeti talajnedvesség, a szántóföldi és a maximális vízkapacitás eléréséhez szükséges rétegenkénti vízmennyiségeket mm-ben, azaz l/m^2 -ben adom meg.

A kezdeti nedvességtartalom mm-ben kifejezett értéke (MT) a modell jelenlegi verziójában nem kerül felhasználásra, mivel a felvételi víztartalommal elvégzett víznyelési mérések – a horton függvény felírása – „kiváltja” azt. Jelentősége akkor kerül majd előtérbe, amikor a víznyelési függvényt más nedvességtartalmú állapot esetén akarjuk alkalmazni:

$$MT = 10 \cdot D \cdot M \quad (5)$$

A kezdeti talajnedvességtől (M) a szántóföldi vízkapacitás (KP) eléréséhez szükséges vízmennyiség (KT , mm) az alábbi képlet szerint számolható:

$$KT = 10 \cdot D \cdot (KP - M) \quad (6)$$

A szántóföldtől (KP) a maximális vízkapacitás (P) eléréséhez szükséges vízmennyiséget (GT , mm) teljesen hasonlóan az alábbi képlet szerint számolhatjuk ki:

$$GT = 10 \cdot D \cdot (P - KP) = 10 \cdot D \cdot GP \quad (7)$$

A "jelentős" időpontok meghatározása

T_1 az

$$NR(t) = K_1(t) \quad (8)$$

egyenlet megoldásaként adódik (12. ábra). A $t = 0$ és $t = T_1$ időpontok között csapadékfelesleg nem keletkezik, azaz $RE(t) = 0$.

T_1 és T_2 között a csapadékfelesleg

$$RE(t) = NR(t) - K_1(t) \quad (9)$$

egyenlet szerint alakul. A T_2 meghatározását az alapján végezzük, hogy egyenlővé tesszük a szántóföldi vízkapacitás eléréséhez szükséges vízmennyiséget (ld. (6) egyenlet) a $K_1(t)$ függvény $(0, x)$ intervallumon vett integráljával, és ezen egyenletet oldjuk meg x -re, mint ismeretlenre:

$$KT_1 = \int_0^x K_1(t) dt (= CK_1(x)) \quad (10)$$

T_2 -kor indul meg az eketalpréteg víznyelése (12. ábra). Feltételezve, hogy ez kezdetben gyorsabb mint a felső réteg vízvezetése (T_3 időpontig), a

$$K_1(t) = K_2(t - T_2) \quad (11)$$

egyenlet megoldásaként adódó T_3 jelöli majd azt az időpontot, amikor a visszaduzzasztás elkezdődik a felső rétegbe. Amennyiben a (9) egyenletnek nincs megoldása, vagy $T_3 < T_2$ adódik, ebben az esetben T_3 -mat egyenlőnek tekintjük T_2 -vel. A T_2 és T_3 közötti időszakban egyébként a csapadékfelesleg képződése továbbra is a (9) egyenlet szerint zajlik.

T_3 -mat követően is még a (9) szerint fog zajlani a csapadékfelesleg képződése, egészen a T_4 időpontig, a szántott réteg maximális vízkapacitásának eléréséig (ld. (7) egyenlet). T_4 az alábbi egyenlet x -re való megoldásaként adódik:

$$\int_{T_3}^x K_1(t) dt - \left[\int_{T_2}^x K_2(t - T_2) dt - \int_{T_2}^{T_3} K_1(t - T_2) dt \right] = GT_1 \quad (12)$$

Az első tag adja meg, hogy T_3 -tól kezdve mennyi víz jutott összesen a talajba, az utolsó két tag pedig megadja, hogy ebből összesen mennyi szivárgott le az eketalprétegbe.

T_4 után a csapadékfelesleg képződési üteme megváltozik,

$$RE(t) = NR(t) - K_2(t - T_2) \quad (13)$$

szerint zajlik. T_4 -nél a csapadékfelesleg képződésében ugrásszerű változás áll be (12. ábra), ami a természetben nyilvánvalóan tompítva jelentkezik. Az $RE(t)$ függvény folytonossá tétele céljából ezért $T_4 - 0,05 \cdot (T_4 - T_1)$ és $T_4 + 0,05 \cdot (T_4 - T_1)$ között a függvényt linearizáltam. A későbbiekben a lineáris függvénnyel definiált intervallum hosszának a megválasztása kontrollméréseink eredményeitől függően módosulhat.

A részmodell outputja az $RE(t)$ függvény lesz, mely a felszíni csapadékfelesleg időbeni alakulását írja le. Ez egyben a lefolyási részmodell kiindulási függvénye is.

6.4. Lefolyási részmodell

Amennyiben a felszínre jutó nettó csapadékmennyiség meghaladja a beszivárgást, a felszínen csapadékfelesleg képződik ($RE(t)$). Ez a csapadékfelesleg a lejtőszögnek, a felszíni érdességnek a függvényében megindul a felszínen lefelé. A lefolyási részmodell a topográfiai és mikrotopográfiai paraméterek segítségével a lejtőn lefolyó vízfilm vastagságát, sebességét és vízhozamát határozza meg, azaz a területen képződő csapadékfelesleg lefolyásának tér- és időbeli alakulását írja le.

Felhasznált (mikro)topográfiai paraméterek:

1. A parcella hossza (L , m)
2. A parcella szélessége (W , m)
3. A parcella lejtése (S , m/m)
4. Az érdességet jellemző Manning-féle n -érték (MANN, $m^{1/6}$)

A EUROSEM az alábbi kétváltozós, parciális deriváltakat tartalmazó differenciálegyenlet megoldásaként adódó h függvénnyel adja meg a lefelé mozgó vízfilm vastagságát:

$$\frac{dh(x, k)}{dk} + \frac{5}{3} \cdot \frac{S^{0,5}}{\text{MANN}} \cdot h(x, k)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{dh(x, k)}{dx} = 1000 \cdot \text{MRE}(k) \quad (14)$$

ahol:

x : a parcella felső végétől mért távolság (m)

k : a csapadékhullás kezdetétől eltelt idő másodpercben ($k = t \cdot 60$)

$h(x, k)$: a vízfilm vastagsága a parcella felső végétől x m-re k időpontban (m)

$\text{MRE}(k)$: a csapadékfelesleg a másodpercben megadott idő függvényében ($\text{MRE}(k) = RE(t)$, mm/perc)

Az egyenlet a Newton-Raphson technika segítségével négyponthoz implicit módszerrel oldható meg. Kiindulási feltétele: $h(0, 0) = 0$.

A $h(x, k)$ függvény ismeretében meghatározható a lefelé mozgó vízfilm sebessége is:

$$v(x, k) = \frac{S^{0,5}}{\text{MANN}} * h^{\frac{2}{3}}(x, k) \quad (15)$$

ahol $v(x, k)$ jelöli a sebességet m/s-ban.

Továbbá ezek segítségével az egységnyi széles sávra vonatkoztatott vízhozam ($MQ(x, k)$, m^3/s) is számolható:

$$MQ(x, k) = \frac{S^{0,5}}{\text{MANN}} * h^{\frac{5}{3}}(x, k) \quad (16)$$

A modell lefolyási részmodelljének a felhasználók számára fontos outputjai a következőképpen írhatók fel:

1. Dinamikus outputként a lefolyási intenzitás (vízhozam):

$$\frac{Q(t) * 3600 * 1000}{L} \quad \text{mm/h-ban vagy} \quad (17)$$

$$Q(t) * 60 * W \quad m^3/\text{percben (egész parcelláról)}, \quad (18)$$

ahol $Q(t)$ a percben megadott idő függvényében felírt, 1 m széles sávra vonatkozó vízhozam a parcella alján ($Q(t) = MQ(L, k)$, m^3/s).

2. Statikus outputként az összlefolyás mm-ben (19) vagy az egész területről m^3 -ben (20):

$$\frac{1000}{L} * \int_0^{60T} MQ(L, k) dk \quad (19)$$

$$W * \int_0^{60T} MQ(L, k) dk \quad (20)$$

ahol T jelöli a csapadékhullás időtartamát percben.

A lefolyási részmodell eredményei közül az eróziós részmodell a vízfilm vastagságának és a vízhozamnak a tér- és időbeli alakulását leíró $h(x, k)$ és $MQ(x, k)$ kétváltozós függvényeket használja fel.

6.5. Eróziós részmodell

Az eróziós részmodell – mint azt a 3.1. fejezetben említettem – a hordalékhozam időbeni alakulását a vízhozam és a hordalékkoncentráció segítségével számolja (3. táblázat 15. egyenlet, illetve (28) egyenlet). A kiindulási paramétereit, függvényeit a 11. táblázatban találhatjuk. Az új inputok részletes leírása a 3.2. fejezetben található meg. A csepperózió meghatározását sajnos kénytelenek vagyunk standard alapján elvégezni ebben az esetben is, de a másik három paraméter könnyen mérhető.

A részmodell a következő lépéseken keresztül határozza meg a hordalékhozamot és az eróziós rátát:

1. II , DT , TF és PH ismeretében meghatározza a felszínre hulló vízcseppek kinetikus energiáját ((23) egyenlet)

2. Ebből és a talajra jellemző csepperodibilitás értékéből (EROD), az egyre vastagodó vízfilm tompító hatásának figyelembevételével kiszámolja a csepperózió térbeli és időbeli alakulását ((24) egyenlet)
3. Meghatározza a vízfilm által elragadott hordalék mennyiségét ((25) egyenlet)
4. Az eddigiek és a vízfilm jellemzőinek (vastagság, vízhozam) segítségével meghatározza a hordalékkoncentráció térbeli és időbeli alakulását ((26) egyenlet)
5. A modell outputjaiként a hordalékkoncentráció és a vízhozam szorzataként adódik a hordalékhozam, melyből a parcelláról a csapadékesemény során távozó összhordalékmennyiség is meghatározható ((27)-(30) egyenletek).

Korábbi részmodellekben is használt input paraméterek	Új input paraméterek
Csapadékkintenzitás (I1, mm/perc)	Növényborítás magassága (PH, m)
Manning-féle n-érték (MANN, m ^{1/6})	Csepperodibilitás (EROD, g/J)
Parcella lejtése (S, m/m), hossza (L, m), szélessége (W, m)	Talajkohézió (COH, kPa)
Csapadékhullás időtartama (T, perc)	Szemcseátmérő mediánja (D50, μm)
Növényzeti részmodellből átvett függvények	Lefolyási részmodellből átvett függvények
Direkt felszínre hulló csapadék (DT(t), mm/perc)	Vízfilm vastagsága (h(x, k), m)
Növényzeten keresztül a felszínre jutó csapadék (TF(t), mm/perc)	Vízfilm sebessége (v(x, k), m/s)
	Vízhozam (MQ(x, k), m ³ /sec)

11. táblázat: Az eróziós részmodellben felhasznált összefüggések és paraméterek

A felszínt elérő vízcseppek kinetikus energiájának a meghatározása

Mind a közvetlen felszínre hulló esőcseppek, mind pedig a növényzetről csöpögő vízcseppek kinetikus energiájának (KEDT és KETF) a meghatározására egy-egy tapasztalati képlet szolgál:

$$KEDT = 8,95 + 8,44 \cdot \ln(I1) \quad (21)$$

$$KETF = \begin{cases} 0, & \text{ha } PH < 0,14 \text{ m} \\ 15,8 \cdot PH^{0,5} - 5,87, & \text{ha } PH > 0,14 \text{ m} \end{cases} \quad (22)$$

ahol KEDT és KETF mértékegysége is J/m²/mm.

A növényzeti részmodellben kapott csapadékmennyiségek ismeretében a m²-enkénti kinetikus energia (KE(t), J/m²/perc) az alábbiak szerint számolható:

$$KE(t) = DT(t) \cdot KEDT + TF(t) \cdot KETF \quad (23)$$

A csepperózió meghatározása

A kapott kinetikus energia ismeretében az alábbi képlettel határozza meg a modell a lejtőn mozgó vízfilm által egységnyi távolságon, 1 m széles lejtőn, egységnyi idő alatt felvett, csepperózióból származó hordalékmennyiséget (DET (x, k), m³/s/m):

$$DET(x, k) = \frac{EROD}{2,65 * 10^3} * MKE(k) * e^{-2*h(x,k)} \quad (24)$$

ahol MKE(k) jelöli a másodpercben megadott idő függvényében felírt kinetikus energia nagyságát ($MKE(k) = KE(t)$, J/m²/perc).

A vízfilm által elragadott hordalék mennyiségének meghatározása

A vízfilm által egységnyi idő alatt, egységnyi távolságon, 1 m széles parcellán elragadott hordalék tér- és időbeli alakulását ($DF(x, k)$, m³/s/m) az alábbi összefüggés szerint számolja a modell:

$$DF(x, k) = \beta * v_s * (TC(x, k) - MC(x, k)) \quad (25)$$

ahol $\beta = 0,79 * e^{-0,85 * COH}$,

v_s a hordalékszemcsék átlagos ülepedési sebessége (m/s), mely D50 ismeretében a Stokes-képlettel számolható,

$TC(x, k)$ a vízfilm transzportkapacitása m³/m³-ben, mely a vízfilm és a felszín jellemző paramétereiből (vastagság, sebesség illetve lejtőszög, érdesség, stb.) számolható,

$MC(x, k)$ pedig a hordalékkoncentráció m³/m³-ben, mely a (26) egyenlet megoldásaként fog adódni.

A hordalékkoncentráció meghatározása

Az előzőekben kapott $DET(x, k)$ és $DF(x, k)$ összege megadja az 1 m széles parcellán, egységnyi idő alatt egységnyi távolságon felvett hordalék mennyiségét ($e(x, k)$, m³/s/m). Az $e(x, k)$ függvény megadásában szereplő $MC(x, k)$ hordalékkoncentráció-függvény az alábbi kétváltozós parciális differenciálegyenlet megoldásaként adódik:

$$\frac{d(h(x, k) * MC(x, k))}{dk} + \frac{d(MQ(x, k) * MC(x, k))}{dx} = e(x, k) \quad (26)$$

Az eróziós részmodell outputjai

A EUROSEM eróziót jellemző dinamikus outputjai a parcella alján mért hordalékkoncentráció ($C(t)$, m³/m³) és hordalékhozam ($E(t)$ kg/perc), statikus outputjai pedig a terület talajvesztése kg-ban (CE) illetve az ebből számolt eróziós ráta t/ha-ban (CE_{ha}):

$$C(t) = MC(L, k) \quad (27)$$

$$E(t) = Q(t) * 60 * W * MC(L, k) * 2650 (=Q(t) * 60 * W * C(t) * 2650) \quad (28)$$

$$CE = \int_0^T E(t) dt \quad (29)$$

$$CE_{ha} = \frac{10 * CE}{L * W} \quad (30)$$

6.6. A modell technikai háttere

Amint a 6.1. fejezet végén említettem, a létrehozott új modell első két részmodelljének programozását a *Maple 8* nevű számítógép-algebrai rendszerben végeztem el. A tesztelésként beírt adatokkal futtatott program kinyomtatott változata a 3. sz. mellékletben található. Ebben grafikus formában láthatjuk az outputként adódó csapadékfelesleg ($RE(t)$) függvényét, amely a EUROSEM csapadékfájljának alapját adja. E csapadékfájl – amint ezzel már a 4. táblázatban is találkozhattunk – az adatokat egy olyan kétszlopos táblázat formájában képes kezelni, amely első oszlopában az azonos csapadékkéntiségű szakaszok közötti töréspontok (percben), második oszlopában pedig az ezekhez tartozó kumulált csapadékmennyiségek (mm-ben) vannak feltüntetve. Ennek megfelelően az $RE(t)$ függvény integrálfüggvényét ($CRE(t)$, ez adja meg a kumulált csapadékfelesleg értékeit) is egyenes szakaszokkal kell közelíteni, amelyet a görbe különböző szakaszain különböző módon végeztem el (ld. 3. sz. melléklet vége):

1. $CRE(t)$ értéke 0 és T_1 között 0, azaz itt nincs szükség közelítésre.
2. A görbe T_1 és $(T_4 - 0,05 \cdot (T_4 - T_1))$ közé eső szakaszán öt töréspontot különítettem el: az intervallum kezdő és végpontját, valamint felező illetve negyedelő pontjait.
3. A görbe $(T_4 - 0,05 \cdot (T_4 - T_1))$ és $(T_4 + 0,05 \cdot (T_4 - T_1))$ közötti szakaszát – rövidsége miatt – egyetlen egyenes szakasznak tekintettem.
4. A $(T_4 + 0,05 \cdot (T_4 - T_1))$ -tól a csapadékhullás végéig tartó időintervallumban $RE(t)$ görbéje – az eketalpréteg exponenciálisan csökkenő vízáteresztésének köszönhetően – ellaposodik, így itt $CRE(t)$ közel lineáris növekedésűvé válik, ezért elegendőnek találtam az intervallum felezőpontjához betenni egy töréspontot.

Az így létrehozott kilenc időpontot a hozzájuk tartozó kumulált csapadékfelesleg értékekkel vittem át a EUROSEM csapadékfájljába (4. sz. melléklet). Az utolsó adatpár (130 perc – 129,21 mm) beírására csak a EUROSEM technikai sajátosságai miatt van szükség.

A EUROSEM paraméterfájlját annak figyelembevételével kell kitölteni, hogy a növényzeti és a beszivárgási részmodell eredményeit már megkaptuk a *Maple*-ben, így az ezekben szereplő input paraméterek egy része (vízáteresztő képesség, növényzet maximális csapadékraktározása) 0 értéket kapjanak. Ennek következtében a többi növényzeti és vízgazdálkodási paraméter (pl. PBASE, G, THI, stb.) értékét már tetszőlegesen választhatjuk, mert nem lesznek hatással a modell outputjaira. A EUROSEM paraméterfájljában feltüntetett paraméterek új modellben betöltött szerepét az 5. sz. mellékletben tanulmányozhatjuk.

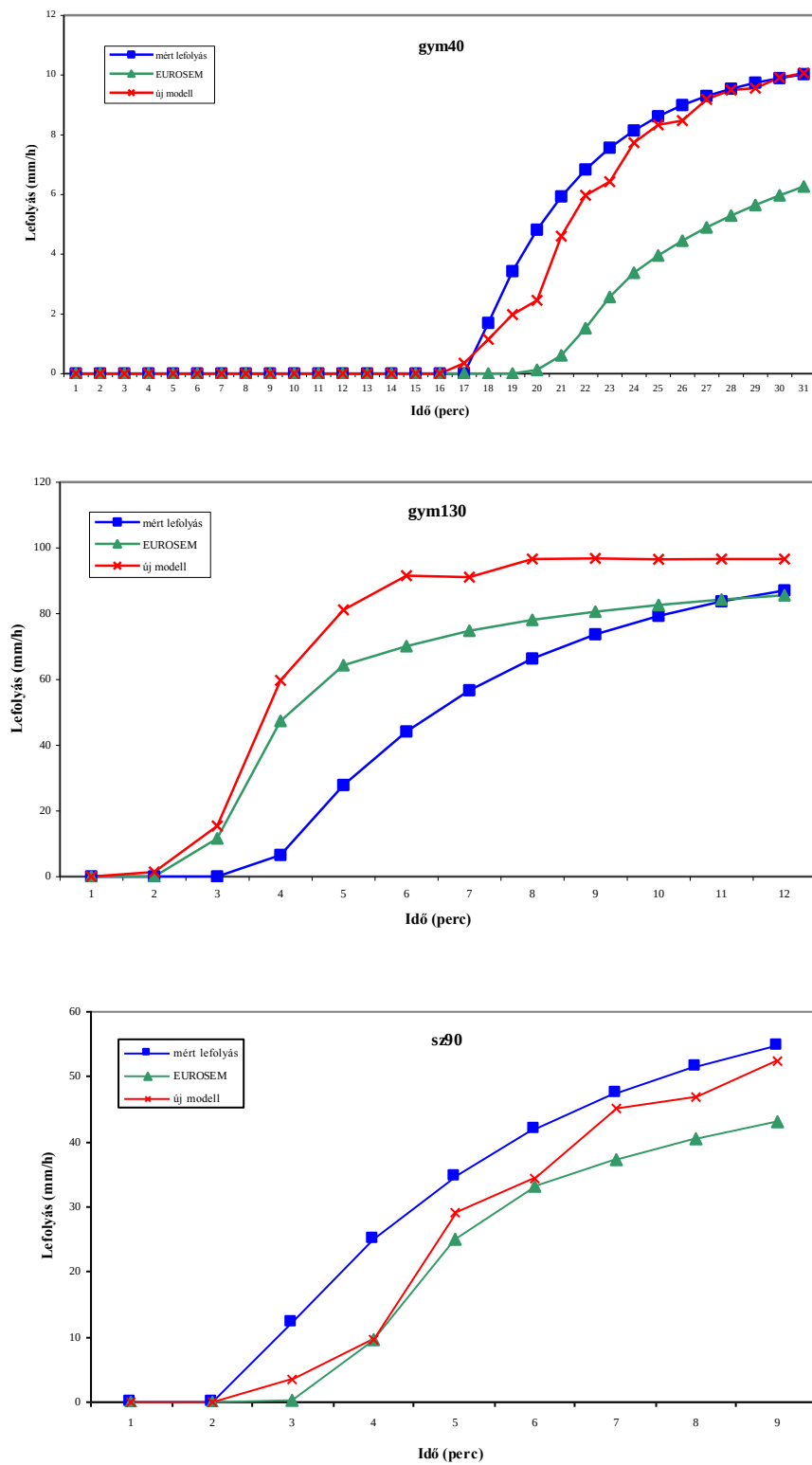
A EUROSEM-et futtatva az előzőekben részletesen leírtak szerint létrehozott csapadék- és paraméterfájlra a modell outputjait a 3.1. fejezet végén ismertetett formában kapjuk meg (6. sz. melléklet).

6.7. A modell tesztelése

Bár a megalkotott új modell – mint korábban említettem – még számos módosításnak és bővítésnek néz elébe, mégis elkészülte után elemi igényként merül fel a „kipróbálása”, azaz valós eseményekre történő futtatása. Kézenfekvőnek tűnt olyan eseményeket választanom, amelyekre nemcsak a valós lefolyási és lehordódási értékek állnak rendelkezésemre, hanem egyben a EUROSEM-mel történő összehasonlításra is lehetőséget biztosítanak. A EUROSEM kalibrálásához felhasznált nyolc esőszimulátoros esemény közül azt a hármat választottam ki, amelyekre a EUROSEM nullától különböző lefolyási értékeket produkált (gym40, gym130, sz90). Az új modell futtatását nehezítette, hogy bemeneti paraméterei között az eketalpréteg vízgazdálkodási jellemzői is szerepelnek, különösen a víznyelési-vízáteresztési függvényének ismerete szükséges. Mivel a fent említett esőzötetések közel szaturált körülmények között történtek, feltételeztem, hogy a lefolyásokból visszaszámolt beszivárgási görbék az eketalpréteget jellemzik. Az új modell algoritmus szerint e feltételezés azt jelenti, hogy a szántott réteg teljes telítődését jelentő T_4 időpont az eső kezdete után maximum egy-két perccel bekövetkezik. A felső réteg víznyelési-vízáteresztési függvényét a rendelkezésre álló Vér-féle átszivárgásmérések eredményeiből szerkesztettem ki. Az outputok közül nemcsak az összlefolyásokat és az eróziós rátákat (12. táblázat) hasonlítottam össze, hanem az egyes események valós és modellezett hidrográfjait is (13. ábra).

Esemény jele	gym40	gym130	sz90
Csapadékkéntesség (mm/h)	39	128,5	84
Időtartam (perc)	31	11	9
Csapadékmennyiség (mm)	20,15	23,56	12,6
Valós lefolyás (mm)	2,06	10,85	5,6
EUROSEM-mel számolt lefolyás (mm)	0,8	11,39	3,27
Új modellel számolt lefolyás (mm)	1,72	13,95	3,96
Valós erózió (t/ha)	0,009	0,32	0,64
EUROSEM-mel számolt erózió (t/ha)	1,16	3,53	0,367
Új modellel számolt erózió (t/ha)	0,164	1,95	0,36

12. táblázat: A tesztelésbe bevont három csapadékesemény valós és modellezett outputjai



13. ábra: A tesztelésbe bevont három csapadékesemény valós és modellezett hidrográfjai

A kapott eredményekből semmiképpen sem szabad messzemenő következtetéseket levonnunk, hiszen ehhez rendkívül kevés eseményt vizsgáltunk, valamint az új modellhez szükséges paraméterek meghatározására sem fektettünk még elég hangsúlyt a közel négy évvel ezelőtti esőszimulátoros méréseknél. A dolgozatban ismertetett modellhez hasonló, elméleti úton kidolgozott fizikai modellek közvetlen tesztelésénél azonban az elsődleges kérdés csupán annyi, hogy képes-e a modell valós bemeneti paraméterekkel *reális* outputokat produkálni. Ebben az esetben viszont azt mindenképpen megállapíthatjuk, hogy az új modell által kalkulált lefolyási értékek nemcsak nagyságrendileg egyeznek meg a valós értékekkel, hanem mindhárom esetben jóval 50 % alatt marad az eltérésük. Ugyanezt tapasztalhatjuk a hidrográfok alapján is, a gym130 jelű esemény kivételével a másik két esetben a EUROSEM-nél jobban közelíti a tényleges lefolyást reprezentáló görbét a bemutatott modell.

7. Összefoglalás és továbblépési lehetőségek

7.1. Az eredmények összefoglalása

Munkám eredeti célja a EUROSEM nevű talajeróziós modell hazai adaptálása volt. E cél megvalósítása két fronton zajlott. Egyrészt törekedtem a modell minél teljesebb megismerésére, mely a felhasználói oldalon túlmenően – a célnak megfelelően – a modell működési mechanizmusának, matematikai hátterének a megismerését is magába foglalta. Másrészt öt éven keresztül (1998-2002) méréseket folytattam a Velencei-hegységben, mellyel céloom a kalibrációhoz szükséges hazai adatok megteremtése volt.

A modell tesztelése során a mért és modellezett értékek közötti különbségből már sejteni lehetett, hogy a kalibráció a standard-ek nagyfokú módosítását feltételezi. A tényleges kalibráció alatt azonban sajnos az is kiderült, hogy a standard-ek átírásával nem lehet egymásra fedetni a mért és modellezett hidrográfokat és szedigráfokat, mivel több algoritmikus hiba is kétségesse teszi a EUROSEM által szolgáltatott outputok valóságosságát. A teljesség igénye nélkül példaként csak a növényzet maximális csapadékraktározásának az értelmezését említeném meg, amelyet a modell intenzitásként kezel.

A EUROSEM-mel kapcsolatos problémák felvetették egy új modell megalkotásának szükségességét. A létrehozott új modellről a dolgozat második felében számolok be, itt csupán egy rövid összefoglalót adok a modell főbb ismérveiről:

- állandó intenzitású csapadékesemények hatását képes szimulálni,
- barázdamentes szántóföldi parcellákra alkalmazható, ahol a felső, szántott réteg alatt egy rosszabb vízgazdálkodási tulajdonságú eketalpréteg található,
- növényzeti, beszivárgási, lefolyási és eróziós részmodellek építik fel, melyek közül az első kettő született önálló munkaként, a lefolyási és az eróziós részmodell a EUROSEM-ből lett átvéve,
- a növényzeti részmodell alapját egy, a növényzet csapadékraktározási kapacitásának a feltöltődését jellemző negatív kitevős exponenciális függvény adja,
- a beszivárgási részmodell a szántott és az eketalpréteg térfogatos víztartalmainak a Horton-képlet szerinti feltöltődésével számol,
- az egyes bemeneti paraméterek meghatározásához rögzített mérési módszerek tartoznak.

A munkám során elért, jelen dolgozatban közölt eredményeket az alábbi öt pontban tudnám összefoglalni:

1. Sikerült új módszert kidolgoznom a kisméretű parcellákról lefolyó víz időbeli alakulásának a mérésére.
2. Jól dokumentált mérési körülmények között számos lefolyási és lehordódási adatot mértem a Velencei-hegységben. Ezeknek mind a terület jellemzésében, mind az optimális művelési mód kiválasztásában, mind pedig az eróziós modellek területi adaptálásában nagy szerepe lehet.
3. Rámutattam a EUROSEM modell alkalmazhatóságának korlátaira, ezt tényekkel alátámasztottam, és megadtam azok megoldási javaslatait is.
4. Új lefolyási és eróziós modellt dolgoztam ki, mely újdonságát a növényzeti és a beszivárgási részmodelljei adják.
5. Rámutattam arra, hogy a sokszor kritika nélkül alkalmazott különböző módszerekkel mért vízáteresztő képességek az egyes módszereket terhelő hibákon túl sem adhatják ugyanazt az értéket, mivel elvi alapjaik különbözőek, sőt sajnos néha hibásan alkalmazottak.

7.2. Tovább lépési lehetőségek

Mint korábban említettem, a létrehozott új modell a kiindulási alapja egy későbbi eróziós modellnek, amely – terveim szerint – már jóval szélesebb körben lesz alkalmazható. A továbbfejlesztés alapvető feltételének tartom, hogy a teljes modell egy egységes szoftver keretein belül működjön, túllépve a jelenlegi „munkaverzió”. A modell tartalmi bővítéséből pedig az alábbiak a legfontosabbak:

1. Változó csapadékintenzitású esőkre is kiterjeszteni az alkalmazást.
2. A hortoni víznyelési függvényt minimális kiindulási nedvességtartalom esetén kellene felírni, és a víznyelés időbeli alakulásához térfogatos nedvességtartalmakat is rendelni. Ezzel kiváltható a modellezni kívánt események előtti beszivárgásmérés szükségessége, mivel lehetővé válik a vizsgált csapadékesemény kezdeti nedvességtartalmától „indítani” a víznyelési görbét.
3. A beszivárgási részmodellbe be kellene építeni a felszín alatti lefolyást, mely döntő többsége az eketalpréteg visszaduzzasztását követően a szántott réteg alsó részében

jelentkezik. A lejtőszög, a horizontális vízvezető képesség és a hidraulikus nyomáskülönbség ismeretében jól modellezhető.

4. A beszivárgási részmodellen belül a jelenlegi verzió mellett létre kellene hozni több részmodult, melyek használata közül a felhasználó dönt az alkalmazott beszivárgásmérési módszer ismeretében. A jelenlegi, Vér-féle csöves módszerrel történő rétegenkénti meghatározás mellett a Kazó-féle gravitációs módszerhez és az esőszimulátoros mérésekhez lenne szükség egy-egy részmodulra.

A modell ily módon kibővített változatát pedig mindenekelőtt valós adatokkal kell tesztelni, és a tesztelés eredményének függvényében további módosításokat eszközölni a modellben, mint például a szántott réteg vízzel való teljes feltöltődése utáni ugrásszerű lefolyásnövekedés valóság-hű tompítása (korábban a csapadékfelesleg görbéjének ezen töréspontja körüli linearizálásról már volt szó). Ezt a kalibrálásnak kell követnie, mely célja a nehezen mérhető paraméterek (pl. növényzet maximális csapadékraktározása, Manning-féle n -érték, stb.) standard-jeinek a módosítása illetve létrehozása.

A modellel kapcsolatos további teendőkön túllépve rendkívül fontos és hiánypótló feladatnak tartom a víznyelő-vízáteresztő képesség mérésére szolgáló módszerek kompatibilitásának a vizsgálatát, és olyan átszámítási képletek megalkotását, amelyekkel a különböző módszerekkel mért értékeket gyakorlati felhasználásra is alkalmas beszivárgási adatokká tudjuk konvertálni. Ennek kapcsán már végeztünk méréseket (HORVÁTH M. 2002, SAVANYA T. 2002), de tudományos szintű következtetések levonásához még nem rendelkezünk elegendő mérési adattal. Ennek részeként érdemes lenne például a duplakeretes beáztatást különböző vízszintek mellett elvégezni, és függvényszerű kapcsolatot állapítani meg az alkalmazott víznyomás és a beszivárgási ráta között, hiszen – mint korábban már utaltam rá –, a Darcy-törvényben foglalt lineáris kapcsolat 0-hoz közelítve sérülni fog.

A felsorolt feladatok elvégzését egy néhány éves kutatási program keretében tervezem megvalósítani.

Köszönetnyilvánítás

Dolgozatom végén szeretném köszönetemet kifejezni mindazoknak, akik munkájukkal, tudásukkal, tanácsaikkal, lehetőségeikkel vagy egyszerűen csak türelmükkel, jelenlétükkel segítettek többéves munkámat. Külön szeretném megköszönni dr. Mezősi Gábornak, témavezetőmnek a szakmai segítségét és a kutatásaimhoz szükséges anyagi és infrastrukturális háttér biztosítását.

Köszönettel tartozom Szabó Józsefnek, Havas Tamásnak és Ferencz Józsefnek, amiért lehetővé tették és segítettek, hogy területükön éveken keresztül eróziós mérőállomásokat működtessenek. Köszönöm Szabóné Kele Gabriellának a Velencei-hegységben nyújtott sokoldalú segítségét. Szeretném hálámat kifejezni dr. Zámbo Lászlónak, aki a birtokában lévő mérőeszközök és tudás átadásával segített abban, hogy működőképes eróziós mérőállomást fejleszthessek ki. Köszönöm Csepinszky Bélának, Jakab Gergelynek és Csiszár Bélának, hogy teljes szakmai odaadással végezték a velencei parcelláimon az esőszimulátoros méréseket és azok adatainak feldolgozását. Köszönöm Bódis Katalinnak és dr. M. Tóth Tivadarnak a készülő dolgozat többszöri, részletes átolvasását és jótanácsaikat.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném köszönetemet kifejezni mindazon kollégáimnak, diákjaimnak, barátaimnak, akik részt vettek a sokszor embert próbáló körülmények közötti terepi munkálatokban.

Abstract

Building a model based on the EUROSEM soil erosion model

Erosional investigations play great role in the soil conservation. There are dozens of infiltration and erosion models that attempt to describe more or less exactly these processes. More and more models are adopted to different regions in order to estimate any changes in erosion conditions. There are some models (e.g. USLE, WEPP, EPIC) which were calibrated in Hungary and they have been used for many years in our country as well. My first aim was the calibration of the EUROSEM soil erosion model to Hungarian conditions. In order to collect enough data for the calibration I ran different erosion measurement stations in the Velence Hills between 1998 and 2002. The measurements happened on plots and small catchments with different land uses (arable land with winter wheat and corn, forest, pasture, orchard and vineyard). The measurement methods were quite variable from the simple settling potholes to the automatic measurement stations. These last ones were developed by myself from former constructions applied for dropping and penetrating waters in caves.

During the process of the calibration I have shown that the EUROSEM has got some algorithmic, conceptional and other problems and they result that it is impossible to fit the modeled and measured data. So it was arisen the idea to make a new model based on the EUROSEM. The basic conception of the new model is that it should avoid the problems arisen in the EUROSEM but it should apply the usable part of the same model. It means that my modified aim is to build up a dynamic mathematical model which is suitable to model the effect of a rainfall event on a plot to the infiltration, runoff and erosion.

The results of my work can be summarize in the following points:

1. I elaborated a new method for erosional measurements. The method is feasible to measure runoff from small plots, rainfall and soil moisture in two different depths even minute by minute.
2. I have created database about the erosional conditions of the typical soils and land uses in the Velence Hills. The database includes runoff and erosion records of both natural rainfalls and both rainfall simulations. The results were measured on 12-108 m² plots under winter wheat, orchard and vineyard.

3. I have shown the limit of the applicability of the EUROSEM model and I have given proofs of the model's mistakes. I have drawn up the suggestions to avoid these mistakes.
 - 3.1. The maximum interception storage of the vegetation is meant as an intensity and not as a storage capacity filling up once at the beginning of the rainfall. This results that even theoretically it is not possible to fit the measured and modeled data. It is possible to demonstrate it to run the model for a few-hour-long rainfall event with the alteration of the maximum interception storage and the vegetation cover. The calculated runoff is systematically less with the product of the above mentioned two inputs than the difference between the rainfall intensity and the saturated hydraulic conductivity.
 - 3.2. There is no reference in the user's guides whether the maximum interception storage applies to 100 % vegetation cover or to the cover conditions suggested by the standard. We can know that it applies to 100 % cover from only the above described model test.
 - 3.3. In the opinion of the model parallel to increasing the proportion of surface covered by impermeable materials (PAVE) and percentage basal area of the vegetation (PBASE) the infiltration increases as well and it is just opposite of the measurement experiences.
 - 3.4. There is no importance of the porosity and the direct values of the initial and maximum soil moisture in the model. It can use only the difference between the maximum and the initial soil moisture. Its practical consequence is that it is enough to measure this difference and it is not necessary to record all of the soil hydraulic and physical parameters.
4. I have built up a new runoff and erosion model. For the theoretical base of the model I have chosen the most typical situation on arable land, namely we can apply the model on soils with two different layers: the cultivated topsoil and the more compacted plough-pan beneath. This first version of the model can be used only in the case of permanent rainfall intensity and deep soil water table with no effect to the infiltration. The model consists of four sub-models:
 1. The vegetation sub-model describes the way of the rainfall until the surface (interception, leaf drainage, throughfall, stemflow). The newness of this part of the model is that it can rids the main algorithmic problem of the EUROSEM, it takes the

maximum interception storage of the vegetation in good sense. The sub-model's output parameter is the "net rainfall intensity".

2. The infiltration sub-model can show the temporal distribution of the net rainfall between the infiltration and runoff. It is built up on absolutely new bases. The most important flavours of the sub-model are the followings:

- The infiltration is determined by the characteristics of the *different* soil layers, for e.g. saturated/unsaturated hydraulic conductivity, soil moisture, different water capacities.
- I have used almost only such soil parameters as input data that are possible to measure or calculate exactly.
- I have fixed and ordered the measurement methods to each applied parameters.
- The hydraulic conductivity for each soil layer is described by a Hortonian function.
- Based on the Hortonian equation I have characterized the saturation and infiltration of the different soil layers with mathematical functions.

The processes of the modeled infiltration are realized through the following steps:

1. The topsoil is filled up until its field capacity.
2. The plough-pan starts to shallow water.
3. Parallel to it water is dammed back into the topsoil.
4. After the topsoil reaches its maximum soil moisture the infiltration rate of the plough-pan will determine the surface runoff.

All intervals between these moments can be ordered different functions of infiltration and runoff. The sub-model can compute with equalizing the water amounts needed to fill the soil layers until field capacity and maximum soil moisture with definite integrations derived from the Hortonian equation. The above mentioned moments are the upper limit off the integrals as the unknown parameters of the equations. The sub-model's output parameter is the "surface rainfall excess".

3. The runoff sub-model describes the runoff intensity in space and time. It is based on the EUROSEM's equations.
4. The erosional part of the model was adopted from the EUROSEM also. The sediment yield is given by the product of the water runoff and the sediment concentration.

The first two sub-models were programmed in Maple 8 and the output rainfall excess can be transported to the EUROSEM's rainfall file as its input parameters.

5. I have made an overall comparison of the infiltration measuring methods used in Hungary. It gives us possibility to develop formulae for converting the results measured with different methods to each others.

Felhasznált irodalom

- ÁDÁM L. – MAROSI S. – SZILÁRD J. (szerk.), 1988: A Dunántúli –középhegység, B). Regionális tájföldrajz. Akadémiai Kiadó Bp., p.494.
- ÁDÁM L., 1993: A Velencei-hegység fejlődéstörténete és felszínalakítása. Földrajzi Értesítő 42/1-4. pp. 93-110.
- BARANYI S. – PAPP J., 1995: Csapadék és lefolyás a Velencei-tó vízgyűjtőjén. Vízügyi Közlemények 77/1-2. pp. 126-143.
- BARTA K. - FARSANG A., 2000: The effect of structural changes in agriculture on soil degradation processes (case study in Hungary). In: Abstracts Book. Man and Soil at the Third Millennium. 28 March - 1 April, 2000. Valencia. p. 63.
- BARTA K., 2001: A EUROSEM talajeróziós modell tesztelése hazai mintaterületen. In: A földrajz eredményei az új évezred küszöbén. Magyar Földrajzi Konferencia. Szeged, 2001. október 25-27. (CD)
- BEASLEY, D. B. – HUGGINS, L. F. – MONKE, E. J., 1980: ANSWERS: A model for watershed planning. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 23. pp. 938-944.
- BERGSMAN, E. (ed.), 1996: Terminology for soil erosion and conservation. Wageningen. p. 313.
- BEVEN, K. J., 1989: Changes Ideas in Hydrology: The Case of Physically-based Models. Journal of Hydrology 105. pp. 157-172.
- BORSY Z. (szerk.), 1993: Általános természetföldrajz. Nemzeti Tankönyvkiadó Bp., p. 832.
- BUZÁS I. (szerk.), 1993: Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. Inda 4231 Kiadó Bp. p. 357.
- CENTERI CS., 2002a: A talajeródálhatóság terepi mérése és hatása a talajvédő vetésforgó kiválasztására. Növénytermelés 51/2. pp. 211-222.
- CENTERI CS., 2002b: Az általános talajvesztés becslési egyenlet (USLE) K tényezőjének vizsgálata. Doktori értekezés. Gödöllő, SZIE. p. 162.
- CHISCI, G. – MORGAN, R. P. C., 1988: Modelling soil erosion by water: why and how. In: Erosion Assessment and Modelling (ed: Morgan, R. P. C. et al.). Commission of the European Communities Report No. EUR 10860 EN. pp. 121-146.
- CHORLEY, R. J. – HAGGETT, P., 1967: Models in geography. Methuen, London. p. 816.
- CHORLEY, R. J. – KENNEDY, B. A., 1971: Physical Geography. A system approach. London.
- CSATÓ SZ. – BARTA K. – FARSANG A., 2000: Az elmúlt húsz év tájhasználati változásai és azok hatásai velencei-hegységi mintaterületen. In: A táj változásai a Kárpát-medencében a történelmi események hatására (szerk: Fülek Gy.). Budapest – Gödöllő. pp. 222-227.
- CSEPINSZKY B., 1999: A Vízgazdálkodási és Meliorációs Tanszék története. Georgikon Kiskönyvtár, Tudománytörténeti Füzetek (8). Keszthely. p. 87.
- DATABOX 1. Kezelési leírás. Contromat Robottechnika Kft. Budapest. p. 7.
- DE ROO, A. P. J. – RIEZEBOS, H. Th., 1992: Infiltration Experiments on Loess Soils and Their Implications for Modelling Surface Runoff and Soil Erosion. Catena 19, pp. 221-239.
- DESMET, P. J. J. – GOVERS, G., 1996: A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation 51/5. pp. 427-433.
- DEZSÉNY Z., 1982: A Balaton részvízgyűjtőinek összehasonlító vizsgálata az erózióvesztélyeztetettség alapján. Agrokémia és Talajtan 31/3-4. pp. 405-425.
- DEZSÉNY Z. – LENDVAI Z., 1986: A Zala vízgyűjtőjének eróziós viszonyai és hatásuk a felszíni vizek minőségére. Agrokémia és Talajtan 35/3-4. pp. 363-382.
- DOWDESWELL, E., 1998: Extent and impacts of Soil Degradation on a Worldwide Scale. XIV-XV. In: Towards Sustainable Land Use. Furthering Cooperation Between People and Institutions. Selected papers of the 9th Conference of the ISCO (ed.: Blume, H. -P. – Eger, H. – Fleischhauer, E.). Catena Verlag Reiskirchen, Germany, pp. 44-53.
- ELWELL, H. A., 1981: A soil loss estimation technique for southern Africa. In: Soil conservation: problems and prospects (ed: Morgan, R. P. C.). Chichester, Wiley. pp. 281-292.
- ERŐDI B. – HORVÁTH V. – KAMARÁS M., 1965: Talajvédő gazdálkodás hegy- és dombvidéken. Mezőgazdasági Kiadó, Bp. p. 403.
- ERŐDI B. et al. 1974: Irányelvek a hegy- és dombvidéki területek üzemi meliorációs tervezéséhez. MÉM, Bp.
- FOLLY, A. J. V. - QUINTON, J. N. - SMITH, R. E., 1999: Evaluations of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, The Netherlands. Catena 37/3-4. Special Issue of Catena. pp. 507-519.
- FUTÓ J. (szerk.), 1991: Általános természeti földrajz. Tankönyvkiadó Bp., pp. 380-381.
- GÓCZÁN L. – KAZÓ B., 1969: A mérnökgeológiai-vízgazdálkodási térképezés új módszere és felhasználási területei. Földrajzi Értesítő 18/4. pp. 409-417.

- GÓCZÁN L. – SZÁSZ A. F., 1970: Hidrológiai függvények megközelítései telítetlen Hermite-interpoláció segítségével és alkalmazásai az agronómiai és műszaki vízgazdálkodásban. Földrajzi Értesítő 19/3. pp. 233-260.
- GÓCZÁN L., 1974: Vízáteresztő képesség – esőáteresztő képesség. Földrajzi Értesítő 23/3. pp. 401-404.
- GODÓ R., 1996: Hulladékelhelyezés a Velencei-tó vízgyűjtő területén. Szakdolgozat. Szeged. p. 44.
- GOUDIE, A., 1995: The Changing Earth. Rates of Geomorphological Processes. Blackwell Oxford, pp. 131-139.
- GRAYSON, R. B. – MOORE, I. D. – McMAHON, T. A., 1992: Physically Based Hydrologic Modeling 1-2. Water Resources Research 26-28, No. 10, pp. 2639-2666.
- HORTON, R. E., 1933: The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Am. Geophys. Union 14. pp. 446-460.
- HORVÁTH M., 2002: A talajok vízáteresztő képességének mérésére szolgáló módszerek összehasonlító elemzése. Évfolyamdolgozat. Szeged. p. 18.
- HUSZÁR T., 1998: A talajerózió térképezése és modellezése magyarországi mintaterületeken térinformatikai módszerekkel. PhD értekezés tézisei. Budapest.
- HUSZÁR T., 1999: Talajerózió-becslés az EPIC-EROTÓP módszerrel. Földrajzi Értesítő 48/1-2. pp. 189-198.
- JETTEN, V. – BOIFFIN, J. – DE ROO, A., 1996: Defining monitor strategies for runoff and erosion studies in agricultural catchments: A simulation approach. European Journal of Soil Science 47. pp. 579-592.
- JORDAN GY. – ROMPEY, v. A. – SZILASSI P. – CSILLAG G. – MANNAERTS, C., 2004: Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in a small catchment. Kézirat.
- KARANCSI Z., 2002: Természetes és antropogén eredetű környezetváltozás a Medves-térség területén. Doktori (PhD) értekezés. Szeged. p. 131.
- KAZÓ B., 1966: A talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak meghatározása mesterséges esőztető készülékkel. Agrokémia és Talajtan 15/2. pp. 239-252.
- KAZÓ B., 1967: Új módszer a talajpusztulás térképezésére mesterséges esőztetés útján. Földrajzi Értesítő 16/3. pp. 375-386.
- KERÉNYI A., 1981: A csepperózió törvényszerűségeinek kvantitatív vizsgálata kísérleti körülmények között. Földrajzi Értesítő 30/1-2. pp. 205-233.
- KERÉNYI A., 1984: A hagyományost kiegészítő kvantitatív talajeróziós térképezés. Agrokémia és Talajtan 33/3-4. pp. 458-486.
- KERÉNYI A., 1986: A talajerózió és a lejtőfejlődés kapcsolatáról mérési eredmények alapján. Földrajzi Értesítő 35/1-2. pp. 43-56.
- KERÉNYI A., 1987: Az iniciális erózió laboratóriumi vizsgálata barna erdőtalajokon és löszön. Földrajzi Értesítő 36/1-2. pp. 53-74.
- KERÉNYI A., 1991: Talajerózió. Akadémiai kiadó Bp., p. 219.
- KERÉNYI A., 1998: Általános környezetvédelem. Mozaik Oktatási Stúdió Szeged, pp. 203.
- KERÉNYI A. – KOCSISNÉ H. E., 1990: Löszpusztulási formák és folyamatok kvantitatív vizsgálata szőlőterületeken. Földrajzi Értesítő 39/1-4. pp. 29-54.
- KERTÉSZ Á. – RICHTER, G. – SCHMIDT, G. – BRAUNSCHWEIG, W. – HUSZÁR T. – LÓCZY D. – SCHÄFER A. – MÁRKUS B. – VARGA G. – HENZLER, B., 1997: The Balaton Project. ESSC Newsletter 2-3. Bedford, p. 37.
- KERTÉSZ Á. – HUSZÁR T. – TÓTH A., 2000: Soil Erosion Assessment and Modelling. In: Physico-geographical Research in Hungary (ed: Kertész Á. et al.). Studies in Geography in Hungary 32. Geographical Research Inst. HAS, Budapest. pp. 63-74.
- KIRKBY, M. J. – MORGAN, R. P. C. (ed.), 1980: Soil Erosion. J. Wiley & Sons, New York. p. 312.
- KIRKBY, M. J., 1992: An erosion-limited hillslope evolution model. Catena Supplement 23. pp. 157-187.
- KISS A. – PRÍMÁS A. – REGŐS F., 1972: Irányelvek lejtős területek üzemi meliorációs tervezéséhez. OMMI Bp. p. 170.
- KNISEL, W. G., 1980: CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report 26.
- KOVÁCS GY., 1981: A talajnedvesség vízháztartásának elemzése. Földrajzi Értesítő 30/2-3. pp. 179-204.
- KUTILEK, M. – NIELSEN, D. R., 1994: Soil Hydrology. Catena Verlag, Cremlingen. pp. 133-174.
- LICZNAR, P., 2003: Delivery ratio of agricultural catchment in the southwestern Poland. In: COST 623 Final Meeting and Conference. Books of Abstracts and Field Guide. 5-8 July 2003, Budapest Hungary. p. 47.
- MÁTÉ F., 1974: Eróziós veszélyeztetettség térképezés. In: Az MTA TAKI 25 éve. MTA TAKI Bp. pp. 29-32.
- MERCER, R. – TIPPING, R., 1994: The Prehistory of Soil Erosion in the Northern and Eastern Cheviot Hills, Anglo-Scottish Borders. In: The History of Soils and Field Systems (ed: Foster, S. et al.). Scottish Cultural Press. pp. 1-25.
- MEZŐSI G. – RICHTER, G., 1991: Az EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) modell tesztelése. Agrokémia és Talajtan 40/3-4. Bp. pp. 461-468.

- MEZŐSI G. – BÁRÁNY-KEVEI, I. – MUCSI L. – BALOGH I., 1993: First results of GIS based geoecological mapping. *Acta Geographica Szegediensis* 31. Szeged. pp. 71-82.
- MEZŐSI G., 1995: A modellek és földrajzi alkalmazásai. In: *Modellek a természetföldrajzban* (szerk.: Mezősi G. – Szatmári J.). JATE Szeged. pp. 5-14.
- MEZŐSI G. – DORMÁNY G., 1997: Talajerózió modellezése mátrai mintaterületen. Hazai térinformatikai példatár-CD. OM Budapest.
- MICHAEL, A. - SCHMIDT, J. – SCHMIDT, W. A., 1996: Erosion 2D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Band II. Parameterkatalog Sachsen Anwendung. Freiberg. p. 150.
- MORGAN, R. P. C., 1995: Soil Erosion and Conservation. Longman, Harlow. pp. 8-9.
- MORGAN, R. P. C. - QUINTON, J. N. - RICKSON, R. J., 1992: EUROSEM: Documentation Manual. Silsoe College. p. 84.
- MORGAN, R. P. C. - QUINTON, J. N. - RICKSON, R. J., 1993: EUROSEM: A User Guide. Silsoe College. p. 83.
- MORGAN, R. P. C., 1996: Soil Erosion and Conservation. Longman London. p. 198.
- MORGAN, R. P. C. - QUINTON, J. N. – SMITH, R. E. – GOVERS, G. – POESEN, J. W. A. – AUERSWALD, K. – CHISCI, G. – TORRI, D. – STYCZEN, M. E. 1998a: The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23. pp. 527-544.
- MORGAN, R. P. C. - QUINTON, J. N. – SMITH, R. E. – GOVERS, G. – POESEN, J. W. A. – AUERSWALD, K. – CHISCI, G. – TORRI, D. – STYCZEN, M. E. – FOLLY, A. J. V., 1998b: The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6, July 1998. Silsoe College, Cranfield University. p. 89.
- MORIN, J. – BENYAMINI, Y., 1977: Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resource Research* 13/5. pp. 813-817.
- MSZ-08 0205-78, 1979: A talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata. MÉM Ágazati Szabvány, Bp. p.39.
- NEARING, M. A. – FOSTER, G. R. – LANE, L. J. – FINCKNER, S. C., 1989: A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 32. pp. 1587-1593.
- PÉCSI M., 1991: Geomorfológia és domborzatminősítés. MTA FKI, Bp., pp. 9.
- QUINTON, J. N., 1997: Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). *Catena* 30. pp. 101-117.
- QUINTON, J. N. - MORGAN, R. P. C., 1998: EUROSEM: an evaluation with single event data from the C5 watershed, Oklahoma, USA. *Proceedings from the GTCE modelling exercise*, in Oxford, UK, September 11-14, 1995. pp. 55-63.
- RENARD, K. G. – FOSTER, G. R. – WEESIES, G. A. – PORTER, J. P., 1991: RUSLE – revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46. pp. 30-33.
- RENFREW, C. – BAHN, P., 2000: *Archaeology: Theories Methods and Practice*. Thames and Hudson London. p. 640.
- RICHTER, G. – KERTÉSZ Á. – MÁRKUS B., 1995: Assessment of soil erosion in a small watershed covered by loess. *GeoJournal* 36/2-3. pp. 285-288.
- RICHTER, G. – MEZŐSI G., 1990: Bodenerosion, Winderosion und Bodenfruchtbarkeit – eine quantitative Näherung mit EPIC Model. *Acta Geographica Szegediensis* 28-30. Szeged. pp. 67-81.
- ROSE, C. W. – WILLIAMS, J. R. – SANDER, G. C. – BARRY, D. A., 1983: A mathematical model of soil erosion and deposition process I. Theory for a plane element. *Soil Science Society of Am. Journal* 47. pp. 991-995.
- SANTORO, V. – AMORE, E. – MODICA, C. – NEARING, M. A., 2000: Application of two soil erosion models to a large Sicilian basin. In: *Abstracts Book. Man and Soil at the Third Millennium*. 28 March - 1 April, 2000. Valencia. p. 310.
- SAVANYA T., 2002: A talajok vízáteresztő képességének mérésére szolgáló módszerek összehasonlító elemzése. *Évfolyamdolgozat*. Szeged. p. 19.
- SCHMIDT, J. 1998: Modellbildung und Prognose zur Wasserosion. In: *Bodenerosion* (ed: Richter, G.). pp. 137-151.
- SCHRÖDER, R., 2000: Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. *Bonner Geographische Abhandlungen* 101. Asgard-Verlag, Sankt Augustin. pp. 138-139.
- SZ. JÓNAS I., 1993: Természet és technika a középkori Európában. In: *Európa híres kertje* (szerk: R. Várkonyi Á. et al.). Orpheusz Könyvkiadó Bp. pp. 24-43.
- SZABÓ GY., 1980: A Velencei-tó vízgyűjtőjének vízháztartási vizsgálata. *Hidrológiai Közöny* 60/7. pp. 285-290.

- SZATMÁRI J., 1999: Elfújta a böjti szél. In: Az Alföld a XXI. század küszöbén (szerk: Baukó T.). Nagyalföld Alapítvány Békéscsaba. pp. 391-394.
- THYLL SZ. (szerk.), 1992: Talajvédelem és vízrendezés dombvidéken. Mezőgazda Kiadó Bp. p. 350.
- TONK S., 2000: Táj és ember az erdélyi Mezőségen. In: Táj és történelem (szerk: R. Várkonyi Á.). Osiris Bp. pp. 142-155.
- TÓTH A. – SZALAI Z. – JAKAB G. – KERTÉSZ Á. – BÁDONNYI K. – MÉSZÁROS E., 2001: Talajpusztulás modellezése MEDRUSH modell alkalmazásával. Földrajzi Értesítő 50/1-4. pp. 127-136.
- YOUNG, R. A. – ONSTAD, C. A. – BOSCH, D. D. – ANDERSON, W. P., 1994: Agricultural Non-Point-Source Pollution Model (AGNPS). User's Guide (Version 4.03). USDA, Agricultural Research Service, Washington.
- VÁRALLYAY GY., 1993a: A talaj víznyelő és vízáteresztő képességének meghatározása. In: Buzás I. (szerk): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. Inda 4231 Kiadó Bp. pp. 173-186.
- VÁRALLYAY GY., 1993b: A vízzel telített (kétfázisú) talaj hidraulikus vezetőképességének (K) meghatározása. In: Buzás I. (szerk): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. Inda 4231 Kiadó Bp. pp. 187-204.
- VEIHE, A. - QUINTON, J., 2000a: Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation I: hydrological, soil and vegetation parameters. Hydrological Processes 14. pp. 915-926.
- VEIHE, A. - QUINTON, J., - POESEN, J., 2000b: Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation II: the effect of rills and rock fragments. Hydrological Processes 14. pp. 927-939.
- VERÓNÉ W. M., 1996: Távérzékelés alkalmazása talajerózió becslésében pázmándi mintaterületen. Agrokémia és talajtan 45/1-2. pp. 31-41.
- VÉR F., 1961: A talaj szerkezetének és vízgazdálkodásának vizsgálata eredeti szerkezetű talajmintán "Vér-féle" szerkezeti mintavevő csövekben. Mezőgazdasági Kiadó Bp. p. 87.
- VÉR F., 1963: A talaj szerkezetének és vízgazdálkodásának vizsgálata az öntöző üzemben. Mezőgazdasági Kiadó Bp. p. 71.
- VÍZRAJZI ATLASZ sorozat 12, 1972: A Velencei-tó és vízgyűjtője. VITUKI Bp.
- VÖRÖS H., 1996: A talajerózió számításának néhány módszere. Szakdolgozat. Szeged. p. 50.
- WERNER, M. – SCHMIDT, J., 1996: Erosion-3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. In: Sächs. Landesanst. f. Landwirtsch. u. Sächs. Landesamt f. Umwelt und Geol.: Erosion 2D/3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Bd. 3, Dresden. p.135.
- WILLIAMS, J. R. – DYKE, P. T. – FUCHS, W. W. – BENSON, V. W. – RICE, O. W. – TAYLOR, E. D., 1990: EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator: 2. User Manual. USDA Technical Bulletin 1768. p. 127.
- WILLIAMS, J. R. - BERNDT, H. D., 1977: Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of American Society of Agr. Eng. pp. 1100-1104.
- WISCHMEIER, W. H. - SMITH, D. D., 1978: Predicting Rainfall Erosion Losses. Agricultural Research Service Handbook No. 282. United States Department of Agriculture, Washington. p. 58.
- WOOLHISER, D. A. – SMITH, R. A. – GOODRICH, D. C., 1989: KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. U.S.D.A., A.R.S.
- WOOLHISER, D. A. – SMITH, R. A. – GOODRICH, D. C., 1990: KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA, Agricultural Research Service ARS-77.
- ZÁMBÓ L., 1999: Monitoring system for karst corrosion phenomena on the Aggtelek Plateau. In: Investigations of Karst Corrosion on the Aggtelek-Plateau (ed: Zámbo L. et al.). ELTE Department of Physical Geography Budapest. pp. 9-14.

Felhasznált web-oldalak:

<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/nsri/research/erosion> (a EUROSEM honlapja)

<http://www.geog.uu.nl/pcraster/runoff/eurosem/> (van DIJCK, S. – KARSSSENBERG, D.: EUROSEM in PCRaster)

http://soilerosion.net/doc/models_menu.html (talajeróziós modellek)

Segédlet a dolgozatban többször előforduló rövidítések és jelölések értelmezéséhez

EUROSEM bemeneti paramétereit:

COH	talajkohézió (kPa)
COV	növényborítottság
D50	szemcseátmérő mediánja (μm)
DINT	maximális csapadékraktározás (mm)
EROD	csepperodibilitás (g/J)
FMIN	vízáteresztő képesség (mm/h)
G	kapillaris vízvezetés (mm)
I	csapadékintenzitás (mm/h)
IRMANN	Manning-féle n-érték ($\text{m}^{1/6}$)
L	lejtőhossz (m)
PAVE	felszíni közetarány
PBASE	felszíni szárarány
PLANG	szárdólás (fok)
PLH	növényborítás magassága (cm)
POR	porozitás (m^3/m^3)
RAS	lejtőre merőleges érdesség (cm/m)
RECS	beszivárgás visszahúzóási faktor (mm)
RFR	lejtőirányú érdesség (cm/m)
ROC	térfogatos közetarány (m^3/m^3)
SHAPE	levélalak-faktor
SIR	lejtőszög (m/m)
TEMP	hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)
THI	kezdeti talajnedvesség (m^3/m^3)
THMAX	maximális talajnedvesség (m^3/m^3)
W	lejtőszélesség (m)

Csapadékesemények:

gybea	barackos füvesített sorközének beáztató esőztetése
gygy30	barackos füvesített sorközének esőztetése névlegesen 30 mm/h intenzitással
gym30	barackos művelt fasorának esőztetése névlegesen 30 mm/h intenzitással
gym40	barackos művelt fasorának esőztetése névlegesen 40 mm/h intenzitással
gym130	barackos művelt fasorának esőztetése névlegesen 130 mm/h intenzitással
sz30	szántó esőztetése névlegesen 30 mm/h intenzitással
sz40	szántó esőztetése névlegesen 40 mm/h intenzitással
sz90	szántó esőztetése névlegesen 90 mm/h intenzitással

Új modellben használt jelölések:

A jelöléseknél az alsó indexben szereplő 1-es a szántott rétegre, 2-es az eketalprétegre vonatkozó paramétereket, függvényeket jelöli.

A	talajrétegre jellemző paraméter
COH	talajkohézió (kPa)
COV	növényborítottsági arány
CRE	eső kezdete óta képződött felszíni csapadékfelesleg (mm)
D	talajréteg vastagsága (cm)
D50	szemcseátmérő mediánja (μm)
DET	a vízfilm által egységnyi távolságon, 1 m széles lejtőn, egységnyi idő alatt felvett, csepperózióból származó hordalékmennyiség ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)
DF	a vízfilm által egységnyi távolságon, 1 m széles lejtőn, egységnyi idő alatt elragadott hordalékmennyiség ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)
DT	direkt felszínre hulló csapadék intenzitása (mm/perc)
EROD	csepperodibilitás (g/J)
GP	talajréteg gravitációs pórustere (v/v)
GT	szántóföldtől a maximális vízkapacitás eléréséig szükséges vízmennyiség (mm)
h	felszínen lefolyó vízfilm vastagsága (m)
I1	állandó csapadékintenzitás (mm/perc)
k	csapadékhullás kezdete óta eltelt idő (másodperc)
K	talajréteg víznyelési-vízáteresztési függvénye (mm/perc)
K ₀	talajréteg kezdeti víznyelése (mm/perc)
K _c	talajréteg vízáteresztő képessége (mm/perc)
KE	felszínre jutó nettó csapadékintenzitás kinetikus energiája ($\text{J}/\text{m}^2/\text{perc}$)
KEDT	közvetlenül a felszínre hulló esőcseppek kinetikus energiája ($\text{J}/\text{m}^2/\text{mm}$)
KETF	növényzeten keresztül a felszínre jutó vízcseppek kinetikus energiája ($\text{J}/\text{m}^2/\text{mm}$)
KP	talajréteg szántóföldi vízkapacitása (v/v)
KT	kezdetitől a szántóföldi vízkapacitás eléréséig szükséges vízmennyiség (mm)
L	lejtőhossz (m)
M	talajréteg kezdeti átlagos talajnedvessége (v/v)
MANN	Manning-féle n-érték ($\text{m}^{1/6}$)
MC	felszínen lefolyó vízfilm hordalékkoncentrációja (m^3/m^3)
MIS	növényzet maximális csapadékraktározása (mm)
MQ	egységnyi széles sávon lefolyó vízhozam (m^3/s)
NR	felszínre jutó nettó csapadékintenzitás (mm/perc)
P	talajréteg maximális vízkapacitása (v/v)
PH	növényborítás magassága (m)
Q	a parcella alján egységnyi széles sávon távozó vízhozam (m^3/s)
RE	csapadékfelesleg (mm/perc)
S	lejtőszög (m/m)
t	csapadékhullás kezdete óta eltelt idő (perc)
T	csapadékhullás időtartama (perc)
T ₁	felszíni csapadékfelesleg-képződés kezdetének időpontja (perc)
T ₂	szántott réteg szántóföldi vízkapacitásig való feltöltődésének időpontja (perc)
T ₃	eketalpréteg visszaduzzasztásának kezdete (perc)
T ₄	szántott réteg telítődésének időpontja (perc)
TF	növényzeten keresztül felszínre jutó csapadék intenzitása (mm/perc)
x	parcella felső végétől mért távolság (m)
W	lejtőszélesség (m)