

SZEMLE

A talajerózió modellezése

A talajvédelem a termelés fenntarthatóságának érdekében már régóta foglalkoztatja a mezőgazdaságból élő embereket. A talajpusztulással tudományos rendszerességgel azonban csak a múlt században kezdtek el foglalkozni (BROWNING, 1977). A talaj hazánk egyik legfontosabb – feltételelesen megújuló – természeti erőforrása; a többi természeti erőforrás hatásának integrátora, transzformátora (VÁRALLYAY, 1997). LÁNG és munkatársai (1983) szerint a magyar mezőgazdaság agroökológiai potenciálját a meteorológiai és hidrológiai viszonyokon túlmenően a talaj termékenysége és területi kiterjedése határozza meg. A fenntartható fejlődés és a nem okszerű, intenzív mezőgazdasági termelés közötti ellentmondás a talajerózió felgyorsulásában is megjelenik (LÁNG et al., 1995). A felgyorsult eróziós folyamatok környezetvédelmi problémáinak felismerése az 1950-es években már felvetette a folyamat részletes megismerése mellett az előrejelzés jelentőségét.

A talajfolyamatok leírása és modellezése a talajtani kutatásokon belül a kísérletes és mérési technikákkal párhuzamosan fejlődött és az utóbbi évtizedben már általánosan alkalmazott kutatási és előrejelzési módszerré lépett elő (RAJKAI, 2001). Ezzel összhangban a talajerózió mérésével egyidejűleg az eróziós folyamatok leírására és előrejelzésére különböző modelleket fejlesztettek ki. Az eróziós kár nagyságának megállapítására WISCHMEIER és SMITH (1958) megalkotta az Általános Talajvesztés-becslési Egyenletet/Egyetemes Talajvesztési Egyenletet (USLE) mezőgazdasági tábla nagyságú területek éves talajvesztésének becslésére. Annak ellenére, hogy az USLE amerikai kísérletek eredményeinek adatbázisára épül jelenleg is ez a legelterjedtebb talajeróziós modell.

A klímaváltozás hatására Magyarország éghajlatában a mediterrán, valamint a szemi-arid jelleg erősödik (KERTÉSZ, 1995). Ennek következménye, hogy a talajeróziót a ritkábban előforduló, rövid időtartamú, de nagy intenzitású csapadékesemények fogják meghatározni. A szemi-ariditás és a mediterrán típusú esők hatására megváltozó eróziós feltételek kapcsán időszerűvé vált a hazai gyakorlatban is alkalmazott egyetemes talajvesztési egyenlet érvényességének újraértékelése.

Talajerózió

A földrajztudományban az erózió tágabb értelemben a domborzat kivájását, feltagolását, a folyó, szél, hó, gleccser és a tenger hullámverésének pusztítását jelenti. A szakirodalom ezt a természetes körülmények között lejátszódó felszínpusztulást geológiai erózióknak nevezi (HUDSON, 1973; STEFANOVITS, 1964), szemben az emberi beavatkozás hatására felgyorsuló eróziós folyamattal (gyorsított erózió), amely meghaladja a

talajképződés ütemét. A talajpusztulás általában a talajszemcsék túlnyomórészt mechanikai (víz és szél) hatásra történő elszállítását jelenti. A hazai nevezéktanban a víz által okozott talajpusztulást (talaj)erózióknak, a szél által okozott talajpusztulást deflációnak nevezik. Talajtani értelemben STEFANOVITS (1977) szerint az erózió „... azon pusztító jellegű folyamatok összegzése, amelyek hatására a talaj felső rétege vagy fokozatosan elvékonyodik vagy gyorsan pusztul, ezáltal termékenysége leromlik, esetleg mezőgazdasági művelésre alkalmatlanná válik.”

Az erózió kiterjedésének és mértékének megbízható, pontos megállapítása nehéz feladat, továbbá rendkívül nehéz megbecsülni gazdasági és környezeti hatását. Ha azonban figyelembe vesszük a talajképződés átlagos ütemét – amely irodalmi források (LAL, 1994) szerint világviszonylatban nem haladja meg a 2,5 cm-t 150 év alatt – akkor az antropogén hatás miatt felgyorsult erózió súlyos veszélyt jelent Földünk talajkészletére. A talajerózió a szerves- és tápanyagban gazdag felső talajréteg pusztításával csökkenti a talaj termékenységét és súlyos környezetvédelmi problémákat okoz a lehordott talajjal mozgó és a lejtőn lefolyó vízzel lemosódó kemikáliákkal.

Talajeróziós modellek

Talajeróziós kutatások az Egyesült Államokban

A talajerózió hatásának elemzése, a károk felmérése és térképezése az Amerikai Egyesült Államokban a Mezőgazdasági Minisztérium Talajvédelmi Szolgálatának (United States Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS)) kezdeményezésére indult meg (BENNETT & CHAPLINE, 1928). A víz- és szélerózióval szembeni talajvédelemről az első tanulmány 1760-ban jelent meg (ELIOT, 1760). A probléma felismerését követően többen foglalkoztak az erózióval, de mivel még nem volt egységes módszer a talajvesztés mértékének és kiterjedésének mérésére, a károk számszerűsítése nagyon bonyolult feladatnak tűnt. A probléma megoldására különböző talajerózió-mérési módszerek és technikák születtek. Ezek között van egyszerű, olcsó és kevés terepi eszközt igénylő, de van bonyolult, drága és komoly terepi műszerezettségrel járó is. Az erózió mérésének egyszerű módszerei közé a talajfelszín változásának nyomon követésére kidolgozott technikák számítanak. A talajerózió mértékének meghatározására szabadföldi parcellás vagy nagyobb területek monitoring vizsgálatai alkalmaznak.

Az első hivatalos eróziós mérések Közép-Utah túllegeltetett területén 1912-ben történtek, majd 1917-ben Missouriban eróziós parcellás kísérleteket állítottak be (NICKS, 1996). Az erózió kutatás szövetségi szinten 1929-ben kezdődött meg 10 kutatóállomásból álló hálózat kiépítésével. 1930-tól 1960-ig az USDA kutatási programjában több helyen állítottak be eróziós parcellákat, ahol a természetes csapadékon kívül esőszimulátort is alkalmaztak. Az eróziós kísérletek során szerzett adatokat felhasználva megindult a különböző adottságú területek talajvesztésének előrejelzését szolgáló módszerek kidolgozása. A cél az volt, hogy egy olyan módszert dolgozzanak ki, amely segítséget nyújt a farmerek számára az optimális talajvédelmi terv kidolgozásában (BMP: Best Management Practice). Egy ilyen módszerrel a kézben a farmer kiszámolja a gazdaság területére a termesztendő növények és eljárások mellett jelentkező talajvesztést és ha ez az érték a tolerálható talajvesztés alatt van, akkor elfogadhatja, ha azonban a talajvesztés meghaladja az adott talajra vonatkozó értéket, akkor a talajeró-

zió mértékének csökkentése érdekében egy új gazdálkodási és talajvédelmi tervet kell a farm területére kidolgoznia. A tolerálható talajveszteség az erózió azon megengedett maximális mértéke, amely nyereséges termésmennyiség mellett biztosítja a talaj termékenységének hosszú távú megőrzését (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Az elmúlt több mint félévszázadban az erózió-előrejelző technológiák igen hasznosak voltak a különböző területrendezési, talajvédelmi és egyéb célú mérnöki munkák elkészítésében (TOY et al., 2002).

Talajveszteség-becslési egyenletek

Az első eróziós egyenletet ZINGG (1940) közölte (1. táblázat). Az egyenlet megalkotásához eltérő talajtípusú területeken beállított, különböző parcellaméretű kísérletek eredményeit használta fel. A lejtőhossz és annak meredeksége alapján számolta ki a lepel- és barázdás erózió mértékét úgy, hogy a talaj és az eső hatását állandónak vette. Egy évvel később SMITH (1941) módosította Zingg egyenletét bevéve az egyenletbe a talajvédelmi beavatkozásokat, és az „a” konstans meghatározásánál figyelembe vette a talaj és az eső hatása mellett a növényi sorrendet és a talajművelést is. A felhasznált adatbázis egyetlen kísérleti állomás adataira épül, ezért más körülmények között az „a” konstans már feltehetően más értékekkel bír. A mérési eredmények alapján kimutatták, hogy az esőzés bármely 30 perces periódusában a csapadék maximális mennyisége és a csapadékesemény alatt bekövetkező talajerózió mennyisége között szoros az összefüggés (MUSGRAVE, 1947). Ez a felismerés vezetett a csapadék és a talajhatás szétválasztásához és egy újabb egyenlethez. Ez az egyenlet az első, amelyben a talajtényezőt meghatározott csapadék- és topográfiai viszonyokra határozták meg. Ez alapján a talajtényező éves talajveszteséget jelent adott lejtőhossz, -meredekség, és növényborítottság esetére. A talajtényező értékét 19 állomás 5–15 éves talajveszteség adataira építették, ahol a parcellák átlagos hossza 21,3 méter, meredeksége pedig 2 és 30 % között változott. Musgrave egyenletét az Egyesült Államok különböző területein 15 évig használták a talajvédelmi tervezésben.

1. táblázat

A talajvesztési egyenletek fejlődése (RÖMKENS, 1987)

Egyenlet	Szerző	Év-szám	Megjegyzés
$A = aS^{1,4}L^{0,6}$	Zingg	1940	Topográfia hatása (S, L faktorok)
$\frac{A}{P} = aS^{1,4}L^{0,6}$	Smith	1941	Talajvédelmi beavatkozás hatása (P faktor)
$A = R^{1,75}S^{1,35}L^{0,35}CP$	Musgrave	1947	Éghajlati körzetek hatása az esőtényezőre (R faktor)
$A = CSLKP$	Smith és Whitt	1948	A talajtényező szerepe az egyenletben (K faktor)
$A = RKLSCP$	Wischmeier és Smith	1960	Az egyenlet jelenlegi formája

Az Egyetemes Talajvesztési Egyenlet kifejlesztése és elterjedése

A kezdeti erózió-előrejelző modellek általános alkalmazása nem volt problémamentes. Ennek oka, hogy az egyenleteket egy termesztési körzet helyi viszonyaira dolgozták ki és más területeken nem tesztelték azokat. A modellek pontatlansága 1954-ben arra készítette az USDA szakembereit, hogy olyan erózió-előrejelző rendszert dolgozzanak ki, amely az USA különböző termesztési körzeteiben univerzálisan alkalmazható. A kutatás Wischmeier és Smith vezetésével kezdődött az USA keleti részén. Kezdetben 35, majd 1960-ra már 46 helyszínen állítottak be eróziós kísérleteket, ahol természetes körülmények között, ill. mesterséges esőztetéssel mérték a 22,1 m hosszú és 9 % lejtésű parcellákról (Wischmeier-parcellák) lefolyó víz és az elszállított talaj mennyiségét.

Az eróziós folyamatok becslésére WISCHMEIER és SMITH (1958) a csapadéktényező (R) fogalmát vezette be, amely a csapadék kinetikai energiájának (E) és a 30 perces maximális csapadék intenzitásának (I_{30}) szorzata. Egy meghatározott terület EI_{30} értékeinek évi átlaga a területre vonatkozó R-érték. Wischmeier és Smith megfigyeléseik alapján úgy találták, hogy az R-érték arányos a talajerózió mértékével. A csapadéktényező a záporok eróziópotenciálját jelenti művelt, de bevetetlen talajon. Ez a koncepció tette lehetővé az egyetemes talajvesztési egyenlet kifejlesztését.

A több mint tízezer kisparcellás eróziós kísérlet adata képezi annak az eróziós adatbázisnak alapját, amelyet a Meteorológiai Szolgálat adataival együtt faktoranalízis módszerével a Purdue Egyetemen dolgoztak fel. A feldolgozás eredményeként egy tapasztalati úton levezetett módszert alkottak meg. Az „egyetemes talajvesztési egyenlet”, az USLE (Universal Soil Loss Equation) jelenlegi formája:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P,$$

ahol:

A = az egységnyi területre számított évi átlagos talajvesztesség ($t \cdot ha^{-1} \cdot év^{-1}$);

R = esőtényező, erozivitás ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot év^{-1}$).

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (EI_{30})_n}{Y},$$

ahol: R a helyileg várható záporok eróziópotenciálja, megművelt, de bevetetlen talajon; E a csapadék kinetikai energiája; az I_{30} a 30 perces maximális intenzitás; és az Y az évek száma, amely alatt az N csapadékesemény történt.

K = a talaj erodálhatóságát kifejező tényező, erodálhatósági tényező ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$);

A K egy adott talajon mért talajvesztesség és a csapadék erozivitásának (R vagy EI_{30}) hányadosa. Így a K-tényező mértékegysége a tömeg per terület per erozivitás mértékegységeiből adódik. A K-tényező egy összevont paraméter, amely egy adott talaj eróziós és hidrológiai folyamatokkal szembeni reakcióját jellemzi éves átlagban. A K-tényező mérése USLE egységparcellán (22,1 m hosszú és 9 % lejtésű parcellák) történik az év mindig azonos időszakában. A parcellával szemben támasztott további követelmény, hogy a mérést megelőző két évben ne legyen rajta növényzet, a művelés hegy-völgy irányban történjen és a talajfelszínen ne legyenek nagyobb repedések, illetve növényi maradványok.

- L = a lejtőhosszúság tényezője, (viszonyszám; L = 1, ha a lejtőhossz 22,1 m);
 S = a lejtőhajlás tényezője, (viszonyszám; S = 1, ha a meredekség 9 %);
 C = a növénytermesztés és gazdálkodás tényezője, (viszonyszám; a talajvesztesség aránya különböző talajfedettség és gazdálkodásmód esetén a fekete ugaréhoz viszonyítva, C = 1, ha művelt és nincs növényzet);
 P = a talajvédelmi eljárások tényezője, (viszonyszám; a talajvesztesség aránya vízszintes, sávós vagy teraszos művelés esetén a lejtőirányú műveléshez viszonyítva, P = 1, ha nincs talajvédelem).

2. táblázat
 Az USLE előnyei és hátrányai (FOSTER, 1982)

Előnyök	Hátrányok
egyszerűség	alkalmatlan a szedimentáció, a hordalékhozam becslésére
nagy adatbázis	pontatlanság a talajvesztés egyszeri csapadékesemény alapján való számítása esetén
készen elérhető paraméterértékek	nem számol az árkos erózióval

Az USLE, mint talajerózió-becslési egyenlet empirikus módon a tényezők szorzataként írja fel a talajvesztéséget. Az USLE-t a barázdaközi (felületi v. lepel) és a barázdás erózió esőenergián alapuló becslésére fejlesztették ki mezőgazdasági tábla nagyságú területekre. Az egyenlet egységnyi területről lehordott átlagos talajmennyiség becslését adja (tömegegység/egységnyi terület). Egységparcellák esetén a hordalékhozam a parcella területéről származó teljes talajvesztéséget (A) jelenti. Az egyenletben az általános/univerzális jelző azért szerepel, mert az összefüggés nem használ sem földrajzi, sem éghajlati megkötéseket, így a paraméterek „beállításával” elvileg a világ bármely pontján alkalmazható.

Az USLE a legismertebb erózióbecslő modell, amelyet a legtöbb országban, a legtöbb céllal és legtöbbször alkalmaztak. Ennek oka, hogy az empirikus adatbázis – amelyeket helyi körülményekhez igazítanak – könnyen kezelhető és az egyenletbe könnyen behelyettesíthető (2. táblázat).

Az USLE kritikája

Az USLE erősebb kritikája, hogy a bonyolult eróziós folyamatot tapasztalati alapon írja le. Az egyenlet egyszerű szorzat, melynek értéke lineáris kombináció eredménye, amelyben a hatótényezők hibája ismeretlen módon összegződik. Az USLE regionális problémák esetén korlátozott érvényűnek bizonyult (NEARING et al., 1994). A talajeróziót kiváltó és befolyásoló tényezők értékei amerikai ökológiai körzetekre vonatkoznak, ezért az Államok többi részén, illetve az USA-n kívüli területeken történő használatuk megkérdőjelezhető. Az USLE új területeken történő alkalmazása az adott körülmények között a modellhez szükséges adatbázis felépítését tenné szükségessé, ami idő- és költségigényes szabadföldi kísérletek beállítását jelentené. Az USLE nem számítja a lejtő egyes részein történő felhalmozódást, ezért túlbecsülheti az eróziót. Különösen nagyobb területeken okozhat ez a hiba pontatlanságot, mert nem számol a lejtőn maradó elmozdít-

tott anyaggal. A táblaméret növekedésével egyre nagyobb a szedimentációs területek részaránya, ami csökkenti a hordalékhozam nagyságát. Az USLE további hiányossága, hogy nem számol a vonalas eróziós formák közül a vízmosásos erózióval (árkos), illetve nem alkalmas az egyedi csapadékesemények hatására bekövetkező talajpusztulás modellezésére.

USLE fejlesztések

Az egyenlet 1958-ban jelent meg (WISCHMEIER & SMITH, 1958). Az elkövetkező években számos publikáció látott napvilágot (WISCHMEIER, 1959, 1974; USDA SCS, 1969, 1977) az egyenlet pontosítása érdekében. A mai formájában ismert egyenlet WISCHMEIER és SMITH (1978) nevéhez fűződik. Az USLE továbbfejlesztése a Purdue Egyetem és az USDA Mezőgazdasági Kutató Szolgálat (ARS: Agricultural Research Service) közreműködésével folytatódott. A módosított verzió MUSLE, ennek felülvizsgált változata pedig RUSLE néven vált közzismertté. A modell-továbbfejlesztésben az eső erózió hatásán kívül a felszíni lefolyást is figyelembe veszik. Az egyes faktorok módosításával a modell alkalmassá vált egyedi csapadékesemények által okozott talajpusztulás előrejelzésére. A C-faktor esetében a földhasznosítás, a művelési ág, a talajtakarás, a növényi lombzat és a felületi érdesség altényezők használata ajánlatos. WILLIAMS és munkatársai (1971) bevezették a hordalékszállítási arányszámot, amellyel hordalékhozamra az összes erodálódott talajmennyiség átszámolható. A hordalék-szállítási arányszám a lejtő adott pontján a hordalékhozam és a összes erodálódott anyag arányát fejezi ki (az összes erodálódott mennyiség osztva a lejtőn történő felhalmozódással). A modell továbbfejlesztésére tett próbálkozások azt mutatták, hogy az eső- és talajtényezők adatbázisból történő kiválasztása a hiba forrása (RENARD et al., 1991).

Az „új generációs” eróziós modellek

Az Egyesült Államokban – az USLE mellett – a talajeróziós folyamat fizikai törvényeken alapuló leírás modellezése is folyamatosan fejlődött. Az ilyen alapokon kifejlesztett előrejelző rendszerek matematikai egyenletekből állnak, amelyek a klimatikus, talajtani, topográfiai és földhasználati adatok beépítésével számolják a talajerózió változóinak értékeit. Egy matematikai eróziós modell négy tényező hatását veszi figyelembe a talajvesztésre és a hozzá kapcsolódó változókra. Talajerózió-modellezésnek nevezzük a matematikai egyenletek sorozatával leírt, a területen lefolyó vízzel történő talajszemcse elragadást, szállítást és ülepedést. A különféle eróziós modellek a talajvesztés, az ülepedés, a hordalékhozam és a szállított üledék becslésére alkalmasak.

A legújabb fejlesztésű modellek esetén alapvető követelmény, hogy kapcsolhatók legyenek a Földrajzi Információs Rendszerekhez (GIS: Geographic Information System). A követelménynek az általánosan elterjedt modelleknek is meg kell felelniük, ezért azok újabb verzióit már a GIS-hez illesztették. A GIS-rendszerrel való kapcsolat lényege, hogy a modell a digitális domborzatmodellek segítségével a felszín térbeli változatosságát leképezi és a lefolyási irányok is meghatározhatók segítségével.

A talajeróziós modellek típusai

A talaj, mint hidrológiai rendszer, erózióját fizikai, kémiai és biológiai folyamatok alakítják. A talajeróziós modellek az erózió összetett folyamatát egyszerűsített formában, matematikai egyenletekkel írják le. A talajrendszer viselkedését leíró egyenletekben változók és paraméterek, valamint azok kapcsolatát leíró logikai állítások szerepelnek. A talajeróziós modellek közül a determinisztikus modellek azok, amelyekben az alkotó elemek tulajdonságai, a köztük lévő kapcsolat (kölcsonhatás) struktúrája és dinamikája, valamint összefüggései egyértelműen összekapcsolhatók. Az eróziós modellek egyenleteinek összetevői ötfélek: (i) független változók, (ii) függő változók, (iii) paraméterek, (iv) matematikai műveletek, (v) számítási és logikai sorrend. A független változók a rendszer azon alaptényezőit jellemzik – az eső erozivitást, a talajerodibilitást, a topográfiát, a növények árnyékoló hatását, a felszínborítást, a talajfelszín érdességét és a biomassza hatását –, amelyek együttesen határozzák meg az eróziót. Egy modell alkalmazása során a bemeneti (input) adatok – a független változók értékei – kimenő (output) adatokká alakulnak. A kimenő adatok, mint a talajpusztulás mértéke vagy egyéb információ (például az ülepedés, a hordalékhozam és/vagy az üledék szemcseösszetételét jellemző érték) a függő változókat alkotják. A változó rendszerjellemző mérhető és a különböző időpontokban történő mérésakor eltérő értékű. A paraméterek a rendszer időben állandó jellemzői, amelyek a független változók értékeit adják. A eróziós modellek csoportosítása (3. táblázat):

Összevont és térbeli eloszlás-modellek. – A talajerózió modellezésekor a talaj térbeli és időbeli változatosságát figyelembe kell venni. Az eróziót alakító független változónak is van tér- és időbeli változatossága. Az összevont modellek azonban nem veszik figyelembe a változók területi eloszlását, sem pedig a bemenő adatok időbeli változását. A területi eloszlást figyelembe vevő modellek az eloszlás hatását írják le az eróziós rendszer viselkedésére. A legösszetettebb modellek időben és térben diszkrét értékekkel számolnak, beleértve a csapadékesemények közötti, sőt az esőzések alatti időszakot is. Az adott pontra és időre kalkulált értékek azután integrálásra kerülnek és a talajvesztesség a lejtőre, táblára vagy akár a vízgyűjtőre is meghatározható.

Elméleti, fizikai és tapasztalati (empirikus) modellek. – Az elméleti modellek a fizikai és a tapasztalati modellek között helyezkednek el a víz- és hordalékszállítási egyenletek összevonása révén. A modell akkor elméleti, ha az inputváltozók a fizikai folyamatokat leíró összefüggésekben szerepelnek. A tapasztalati modellek statisztikai összefüggésekre alapozott megfigyelésekre épülnek. A tapasztalati modellek tehát kísérletekre épülnek, ezért ott alkalmazhatók leginkább, ahol a paramétereket meghatározták. A fizikai alapú modelleket az eróziós folyamatok leírására készítették. Az ilyen modellek előnye, hogy az egymástól független összetevőket a köztük lévő kapcsolat alapján írják le.

Folyamatos és eseménymodellek. – A folyamatos modell hosszabb, pl. egy év vagy még huzamosabb időszakra, az eseménymodell pedig csupán egyetlen csapadékeseményre vonatkozik. A szimulációs modellek általában egész éven keresztül folyamatosan írják le az eróziós folyamatok és állapotok (időjárás, növényfejlődés, gazdálkodás stb.) változását. Az eróziót nagymértékben meghatározó talajtani paraméterek (a növénymaradvány mennyisége, a növényfejlődés, a talajnedvesség-tartalom, a talajfelszín érdessége és a többi fontos paraméter) aktuális értéke havi, heti vagy akár napi

3. táblázat
A talajerosziós modellek csoportosítása (DE ROO, 1993)

Rövidítés	Összevont	Térbeli	Empirikus	Elméleti	Fizikai	Tábla	Lejtő	Vízgyűjtő	Folyamatos	Esemény	Lefolyás	Lehordás	Tápanyag	Peszticid	Produkció
USLE	✓		✓			✓			✓			✓			
MUSLE	✓		✓			✓				✓		✓			
RUSLE	✓		✓			✓			✓			✓			
RUSLE2	✓		✓		✓		✓		✓	✓		✓			
MUSLE87		✓	✓					✓	✓			✓			
DUSLE		✓	✓					✓	✓			✓			
SLEMSA	✓		✓			✓			✓			✓			
CREAMS	✓			✓				✓	✓	✓		✓	✓	✓	
EPIC	✓			✓		✓			✓	✓		✓	✓		✓
WEPP		✓			✓		✓		✓	✓		✓			
EROSION2D		✓			✓		✓			✓		✓			
ANSWERS	✓				✓			✓		✓		✓	✓		
AGNPS		✓	✓					✓		✓		✓	✓	✓	
EUROSEM	✓				✓			✓		✓		✓			
LISEM	✓				✓			✓		✓		✓		✓	
SWAT		✓			✓			✓	✓			✓	✓		

bontásban becsülhető. A modell minden esőzés előtt a becsült talajnedvesség-értékről indul. A fizikai eróziós modellek a folyamatos szimuláció mellett általában az egyszeri csapadékesemény szimulációját is tudják. Ebben az esetben a modell hidrológiai és eróziós összetevőiben szereplő összes paraméter (a csapadékesemény napján a pillanatnyi talajállapot-paraméterek, a növényborítottság, a talajfelszínen található növény-maradvány mennyisége, az utolsó talajművelés óta eltelt napok száma, a talajfelszín átlagos érdessége, a talajfelszín irány menti érdessége stb.) értékét a felhasználónak kell megadni. Tekintettel arra, hogy a folyamatos szimulációt végző „új generációs” modellek időjárás-generátort használnak, a csapadékesemény kezdetére érvényes talajtulajdonságot beállító paramétereket a modell maga számítja. Emiatt a kezdeti állapotot leíró paraméterekre a modell nem érzékeny. Az eseményalapú modellek viszont a kezdeti állapotot leíró paraméterekre nagyon érzékenyek. A csapadékesemény-alapú eróziós modellekben a bemenő adatok szerint alakul a csapadék időpontjára vonatkozó talajtulajdonság értéke, ezért a modell kimenetét a kezdeti értékek erősen meghatározzák.

Pontszerű és diffúz szennyezést szimuláló modellek.

Tábla, lejtő, kis- és teljes vízgyűjtő modellek.

Eróziós árok modellek.

Néhány eróziós modell rövid ismertetése

A *MUSLE* (*Modified Universal Soil Loss Equation*; WILLIAMS, 1975) az *USLE* egyik módosított verziója. Ezt a modellt kis vízgyűjtőkről egyedi csapadékesemények során elszállított hordalékok becslésére készítették. A *MUSLE* az *USLE*-től eltérően az esőenergia tényező (*R*) helyett lefolyási tényezőt használ. A lefolyási tényező az esőzés során képződött teljes lefolyási értéket és a csúcs lefolyási értéket együttesen tartalmazza. Az előrejelzés pontossága ezáltal megnőtt és szükségtelessé vált a hordalékszálítási arányszám használata. A modell további előnye, hogy alkalmazhatóvá vált az egyedi csapadékeseményekhez kapcsolódó hordalékhozam-számításokra is.

Az *USLE* egy másik módosított verziója a *MUSLE87* (HENSEL & BORK, 1988). A modell vízgyűjtő szintű modellezésre készült. Olyan paramétert használ a lejtőhossz tényező (*L*) helyett, amely minden egyes rastercellára kiszámolt talajvesztést jelent. Ezt a modellt használták SCHWERTMANN és munkatársai (1987) közép-európai körülmények között.

A *dUSLE* (*differentiated Universal Soil Loss Equation*; FLACKE et al., 1990) az *USLE* egy olyan változata, amelyet kifejezetten a közép-európai körülményekre dolgoztak ki. A *dUSLE* *TIN* (*Triangulated Irregular Network*) reprezentációjú digitális terepmodellt (*DTM*) alkalmaz. A lejtőhosszúság és lejtőhajlás tényezője (*LS*) az összetett lejtők geometriájának megfelelően differenciált.

Az új generációs modellek mellett a *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*; RENARD et al., 1997) modellt az *USLE* helyettesítésére fejlesztették ki és használták a Talajvédelmi Szolgálatban talajvédelmi tervek készítéséhez. A *RUSLE* és az *USLE* tényezői azonosak. Bár a *RUSLE* ugyanazt az alapstruktúrát használja, mint az *USLE* (empirikus úton közelíti meg a problémát) mégis előrelépést jelent. Az újabb kutatási eredmények alapján módosításra került az *USLE* kézikönyv is (WISCHMEIER & SMITH, 1978). A *RUSLE* már számítógépen fut és új adatállományokat használ. A *RUSLE*-ban a *K*-tényező már figyelembe veszi a talajerodibilitás szezonálitását és a csapadékesemény ideje alatt történő intenzitás-változást a parcellán mért talajvesztés és esőerózió-index (*EI*) arányában kifejezve. Az *LS*-tényező pedig a lejtőn megjelenő barázdás és a barázdaközi erózió arányát fejezi ki (RENARD et al., 1991).

A *RUSLE2* (*Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2*) modellt 2003-ban vették be az Egyesült Államokban a *RUSLE* helyett. A *RUSLE2* talajvesztés-becslési egyenlete a felületi rétegeróziót és a barázdás eróziót éves szinten becsli a tényezők napi értéke alapján. A csapadéktényező (*R*) napokra bontott havi értékekből áll. A talajrodálhatóságot kifejező tényező (*K*) a napi hőmérséklet és csapadék alapján követi a talaj szezonális dinamikát.

A *CREAMS* (*Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*; KNISEL, 1980) modell mezőgazdasági táblák kémiai, lefolyási és eróziós viszonyainak meghatározására szolgál. A modell hidrológiai részmodellje kétféle módon becsli az esőzés hatására bekövetkező lefolyást. Ha a csapadékadatok csak napi szinten állnak rendelkezésre, akkor a Talajvédelmi Szolgálat függvénygörbéje alapján, ha a csapadék minden órában rögzítésre került, akkor a Green és Ampt beszivárgási egyenlet (RAWLS et al., 1989) felhasználásával. A modell kémiai részmodellje becsli a lefolyó vízben oldott és adszorbeált kemikáliák mennyiségét. Az eróziós részmodell a talajszemcsék

elmozdítását az USLE egyszeri csapadékeseményre vonatkozó módosított egyenletével írja le. A szállítóképeség kiszámítása a lejtőhossz függvényében hordalékszállítási egyenlettel történik (YALIN, 1963). Mivel az eróziós részmodell az USLE-n alapul, a felhasználás korlátait is ez adja. A modellt szántóföldi táblán lefolyó víz által okozott tápanyag- és peszticidveszteség előrejelzésére fejlesztették ki, így a kimenő adatok is csak egy táblára vonatkoznak.

Az *ANSWERS* (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation; BEASLEY et al., 1980) csapadékesemény orientált, változói pedig térbeli eloszlásúak. A modell a különböző gazdálkodási stratégiák és talajvédelmi eljárások talajeróziós hatását jelzi előre. Az *ANSWERS* a vízgyűjtőt uniform négyzetrácsalórá osztva kezeli. A cellák meghatározásakor a földhasznosítás, a lejtőviszonyok, a talajtulajdonságok, a tápanyagtartalom, a termesztett növény és gazdálkodás kategóriái kerülnek elemzésre. A modell a vízgyűjtő heterogén mintázatát és a különböző termőhely-specifikus gazdálkodási formák hatását is figyelembe veszi. A modellt YALIN (1963) módszere szerint módosították, hogy az üledékszállításban követhető legyen az erodált üledék szemcseméret eloszlása is (BEASLEY & HUGGINS, 1982). A módosított verzió már a GIS-rendszerekhez is kapcsolható (REWERTS & ENGEL, 1991). A modell legújabb verziója az *ANSWERS-2000* (BOURAOUI & DILLAHA, 1996).

Az *AGNPS* (AGricultural Non-Point Source Pollution Model; YOUNG et al., 1985) modellt a mezőgazdasági vízgyűjtőkön történő „nem pontszerű” szennyezőanyag-kibocsátás becslésére fejlesztették ki. A modell eseményalapú. A felszíni lefolyást az USDA SCS görbe alapján, a csúcs lefolyási arányt, a hordalékhozamot és a tápanyagszállítást pedig a *CREAMS* modell rutinjai felhasználásával végzi. Az *AGNPS* modellt olyan vízgyűjtőkön használják, ahol nem állnak rendelkezésre adatok a szennyező anyagokról.

Az *EPIC* (Erosion Productivity Impact Calculator; WILLIAMS et al., 1984) felhasználói szempontú eróziós modell. A farmerek igényei alapján olyan könnyen kezelhető, minimális hardver- és szoftverigényű, az egész Egyesült Államokra kiterjedő meteorológiai és talajtani adatbázist alkalmazó és tartalmazó modellt készítettek, amely a felhasználó gazdákat fontos földterületre vonatkozó információkhoz juttatta. Az *EPIC* modellel a talaj- és szélerózió szimulálása, a termesztett növények átlagos hozamának és a termelés nyereségének becslése végezhető. Az *EPIC* segítségével a talaj termékenységét megőrző, a legnagyobb fajlagos bevételt biztosító területhasznosítási rendszer tervezhető. Az eróziót fizikailag jól megalapozott paraméterekkel becsli. A modell mezőgazdasági tábla méretű vizsgálatokra alkalmas, amely a talajpusztulás számításakor az USLE-n kívül a *MUSLE*-t használja.

Az USLE-t helyettesítő új modell, a *WEPP* (Water Erosion Prediction Project; NEARING et al., 1989). A *WEPP* már determinisztikus, fizikai alapú, térbeli eloszlást jellemző modell, amely hosszabb távra vagy csapadékeseményre napi adatokból dolgozik. Előnye, hogy a folyamatos, rövid-, közép- és hosszú távú szimuláció mellett csapadékeseményekhez kapcsolódó folyamatok is modellezhetők. A *WEPP* a talajeróziós folyamatok között kiemelten foglalkozik a felszíni lefolyás megindulásával, illetve a lejtő alján történő hordalék-lerakódással. A modell előnye, hogy a talajveszteség térbeli és időbeli eloszlását is figyelembe veszi. A modell az egyszeri csapadékeseményt alapul véve számolja a lejtőn lefolyó víz és lehordott talaj mennyiségét, amely a lejtőn akár

pontról pontra akár hidro- és/vagy szedimentográfia mérhető is. A WEPP a lejtő teljes hosszán számítja a talajvesztést, a lejtő alján pedig – a hordalékhozamot figyelembe véve – a barázdaközi (lepel) eróziós folyamatok mellett a barázdás (lineáris) eróziós formákat. A WEPP jelentőségét növeli, hogy megjelent a GIS-hez kapcsoló interface a *GeoWEPP* (The *Geo*-spatial interface for *WEPP*; RENSCHLER, 2003), amellyel a modell domborzati adatbázisa építhető fel. A *GeoWEPP* digitális földrajzi információkat használ a modellhez szükséges input-paraméterek értékadására. Megvalósíthatóvá válik ezáltal például a termőhely-specifikus talajvédelmi tervek elkészítése a különböző művelésű ágyú és talajtulajdonságú lejtőkre, részvízgyűjtőkre és kis vízgyűjtőkre.

A *SWAT* modell (Soil and Water Assessment Tool; ARNOLD et al., 1998) az eróziós modellek legújabb generációjához tartozik. A modell folyóvölgyre, medencére vagy akár egész vízgyűjtőre számítja a különböző földhasználati módok hatását a lejtőn lefolyó víz- és hordalékmenyiségre, illetve a mezőgazdasági kemikáliák kilúgzását, illetve felhalmozódását. Figyelembe veszi a terület domborzati és talajtani heterogenitását is az eróziós folyamatokban.

Európai talajeróziós modellek

Az amerikai talajeróziós modellek dominanciája a nyolcvanas évekig tartott. Az a körülmény, hogy az amerikai modellek a világ más területein sok esetben sikertelennek bizonyultak, a talajeróziós modellek Amerikán kívüli kidolgozását ösztönözte. Ennek eredményeként az eróziós modellek egész sora jelent meg (*SLEMSA*: Soil Loss Estimator for Southern Africa; az *USLE* európai adaptációja, SCHWERTMANN et al., 1987; *EUROSEM*: European Soil Erosion Model, MORGAN et al., 1997; a mediterrán területek vízgyűjtőire alkalmazott lefolyásmodell a *MEDRUSH*: Mediterranean Runoff Simulation on Hillslopes, KIRKBY & MCMAHON, 1999).

A *LISEM* (*L*imburg *S*oil *E*rosion *M*odel; TAKKEN et al., 1999) fizikai alapú eróziós modellt kutatási és talajvédelmi célokra dolgozták ki. A modell a hidrológiai és üledék-szállítási folyamatokat a csapadékesemény idején és azt követően szimulálja. A *LISEM* fejlesztőit az az elv vezérelte, hogy a modell ne tartalmazzon előre megadott paramétert, hanem a felhasználó adjon meg minden, a talajeróziót befolyásoló értéket (pl. beszivárgás, talajfelszín érdessége stb.). A *LISEM* a GIS-hez kapcsolt és képes raszteres állományok kezelésére. Segítségével a térbeli változatosság erózióra gyakorolt hatásai is jól nyomon követhetők.

Az *EUROSEM* (*EURO*pean *S*oil *E*rosion *M*odel; MORGAN et al., 1997) európai viszonyokra kifejlesztett, fizikai törvényszerűségeken alapuló, folyamatorientált modell. Matematikai egyenletek segítségével írja le a talajeróziót, figyelembe véve a lejtő irányú anyagmozgásban az idő és a lejtőpozíció szerepét. Az *EUROSEM* a csapadékeseményt alapul véve jelzi előre a mezőgazdasági tábláról vagy kis vízgyűjtőről lefolyó víz- és lehordott talajmenyiséget. A modell nem csak a lejtő egészéről történő talajlehordással, hanem a hordalékszállítás során a lejtő egyes szakaszain végbemenő hordaléklerakással (szedimentációval) és továbbszállítással is számol. A lejtő profilján pontról pontra egy hidro- és egy szedimentográf segítségével a lerakódási és szállítási folyamatot kijelzi. A folyamatos szimuláción alapuló modellektől (*USLE*, *RUSLE*, *EPIC*, *SWAT*) eltérően az *EUROSEM* csapadékesemény-alapú, mert a kutatások alapján Európában az éves talajpusztulást többnyire egy-két nagyobb csapadék eredményezi. A csapadékes-

mény-alapú megközelítéshez kevesebb meteorológiai adat szükséges, ami egy járulékos előny, azonban több talajparaméter szükséges a kezdeti értékek leírásához. Különösen fontosak a talaj pillanatnyi állapotát leíró talajfizikai jellemzők (mint például a talajnedvesség-tartalom, a vízbefogadó és vízáteresztő képesség). Néhány amerikai modell (MUSLE, ANSWERS, CREAMS) is képes egyszeri csapadékesemény hatásának szimulációjára, azonban azok csupán a lehordás teljes mennyiségét adják meg és nem modellezik a „csúcs szedimentszállítást” továbbá nem veszik figyelembe az esőintenzitás változását sem.

Az *EROSION 2D/3D* (SCHMIDT, 1991) fizikai alapú modell a lefolyás és a hordalék-szállítás lejtőn és/vagy vízgyűjtőn történő szimulációjára. A modell egységnyi területre számolja a talajeróziót és szedimentációt a lejtő geometriája alapján. Az üledékszállítás csapadékesemény-alapú, de lehetőség van tágabb időszak (hónap, év) eseményeinek a meghatározására is.

A bemutatott modellek többsége a talajeróziót fizikai alapon és folyamatosan számítja. Ezek a modellek egy időszak (pl. egy év) eróziós eseményeit összegzik a lejtő minden egyes pontjára, amely alapján az átlagos évi lefolyás és/vagy talajvesztés becsülhető. A folyamatos szimuláció eredménye tehát időszakra vonatkozó integrált erózióbecslés. E megközelítés hiányossága, hogy nem szolgáltat információt az egy-egy csapadékeseményre bekövetkező talajerózióról. A folyamatos szimuláció csak akkor megbízható, ha a meteorológiai adatok megfelelő időbontásban állnak rendelkezésre. Az eseményalapú modellek kezdeti állapotának beállítása nem szimulációs eredmény, hanem modellezői feladat. Következésképp szükség van minden olyan talajtani paraméter ismeretére, amely a talajeróziót befolyásolja. Az összevont modellek nem számítják a lejtő egyes részein történő szedimentációt, csupán az egész területre (pl. egy lejtőre vagy táblára) vonatkozó „effektív” értékszámokat. A térbeli eloszlás-modellek az erózióval összefüggő tényezők tér- és időbeli megjelenítésére is képesek.

Az eróziómodellezési szakirodalom áttekintése egyik lényeges megállapításának tekintjük, hogy a használni kívánt modellt a felhasználás előtt minden esetben tesztelni és érvényesíteni szükséges (MORGAN & MORGAN, 1981).

Az Általános Talajvesztés-becslési Egyenlet hazai bevezetése és bírálata

Az USLE hazai szabványtervezete 1998-ban készült el (MSZ 20133:1998). Jelenleg ez a magyar eróziós szabvány. Ennek ellenére az USLE-t hazánkban a talajvédelmi tervezés és kivitelezés már 1962 ősze óta alkalmazza (ERŐDI et al., 1965). STEFANOVITS (1966) a Mezőgazdasági Mérnöktovábbképző Intézet talajvédelmi tanfolyamán javaslatot tett a hazai talajtípusok K-tényező értékének elfogadására, illetve ERŐDI és munkatársai (1965) az egyes fizikai talajféleségekre vonatkozóan adnak meg értékeket. Az 1966 óta eltelt idő alatt a Földrajztudományi Kutatóintézet végzett K-tényező meghatározására vonatkozó méréseket (GÓCZÁN & KAZÓ, 1969).

Az általános talajvesztés-becslési egyenlet használatával kapcsolatban hazánkban is több publikáció jelent meg. SALAMIN (1980) megjegyzi, hogy a talajerózió modellezésekor a folyamat fizikai jellegének vizsgálata lényeges. Magyarországon az egyetemes talajvesztési egyenletet és annak később átdolgozott változatait lényegében nem

tesztelték, a tényezőket az amerikai mérésekre hagyatkozva becsléssel határozták meg és alkalmazták erózióbecslésre (CENTERI, 2002). A talajpusztulás folyamatának helyi sajátosságai miatt KERÉNYI (1991) az általános kutatások mellett a regionális vizsgálatokra hívja fel a figyelmet. Megjegyzi, hogy az „általános”-nak nevezett talajvesztésbecslési egyenlet a regionális problémák megoldásakor több esetben korlátozott érvényűnek bizonyult.

Összefoglalás

A talajerózió becslésére világszerte leginkább elterjedt egyetemes talajvesztési egyenletről (USLE) több irodalmi forrás is megállapítja, hogy az USA-n kívüli területeken csak érvényesítés után használható sikeresen. Az USLE az erózió összetett folyamatát egyszerű képletben összegzi, amelyben a szorzótényezők függetlenek és az erózió éves összegként jelenik meg.

Az USLE módosítására és helyettesítésére több kísérlet történt. A fejlesztések során a vízgyűjtők területén lezajló egyszeri csapadékeseményre bekövetkező felszíni lefolyás és talajlehordás térbeli és időbeli előrejelzésére tettek kísérletet. Az empirikus USLE mellett a folyamat fizikai jellegét figyelembe vevő mechanisztikus modellek is megjelentek. A számítástechnika és a GIS rohamos fejlődésével lehetőség nyílt a talajerózió lejtő- vagy táblaszintű, illetve vízgyűjtő léptékű becslésére.

Hazánkban a talajerózió előrejelzésére – a klímaváltozás várható jellegzetességei miatt – az empirikus, táblaszintű, éves talajvesztésbecslő USLE modell helyett a fizikai törvényekre épített, csapadékeseményhez kötött modellek felhasználása ajánlható. Tekintettel arra, hogy a modellek érvényessége lokális a felhasználás előtt minden egyes modellt a helyi viszonyokra érvényesíteni szükséges.

Összefoglalásképpen megállapítható, hogy a mezőgazdasági termelés fenntarthatósága érdekében a talajerózió előrejelzésére új hazai rendszer kiépítése és érvényesítése szükséges.

Irodalom

- ARNOLD, J. G. et al., 1998. Large area hydrologic modeling and assesment. I. Model development. *J. Am Water Resour. Assoc.* **34**. 73–89.
- BEASLEY, D. B. & HUGGINS, L. F., 1982. ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency Report No. 905/9–82–001. Chicago.
- BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F., & MONKE, E. J., 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Trans. ASAE*. **23**. 938–944.
- BENNETT, H. H. & CHAPLINE, W. R., 1928. Soil erosion – a national menace. USDA Agric. Circ. No. 33. U.S. Government Printing Office. Washington, D. C.
- BOURAOUI, F. & DILLAHA, T. A., 1996. ANSWERS-2000: Runoff and sediment transport model. *Journal of Environmental Engineering*. **122**. 493–502.
- BROWNING, G. M., 1977. Developments that led to the universal soil loss equation: a historical review. In: *Soil Erosion: Prediction and Control*. (ED.: FOSTER, G. R.) 3–5. Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa.
- CENTERI Cs., 2002. Az általános talajvesztésbecslési egyenlet (USLE) K tényezőjének vizsgálata. Doktori értekezés. Szent István Egyetem. Gödöllő.

- DE ROO, A. P. J., 1993. Modelling Surface Runoff and Soil Erosion in Catchments Using Geographical Information Systems; Validity and Applicability of the 'ANSWERS' Model in Two Catchments in the Loess Area of South-Limburg (The Netherlands) and One in Devon (UK). Netherlands Geographical Studies No. 157. Utrecht.
- ELIOT, J., 1760. Essays Upon Field Husbandry in New England. Edes and Gill. Boston, MA.
- ERŐDI B. et al., 1965. Talajvédő gazdálkodás hegy- és dombvidéken. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- FLACKE, W., AUERSWALD, K., & NEUFANG, L., 1990. Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena*. **17**. 383–397.
- FOSTER, G. R., 1982. Modeling the erosion process. In: Hydrologic Modeling of Small Watersheds (Eds.: HAAN, C. T., JOHNSON, H. P. & BRAKENSIEK, D. L.) 297–380. American Society of Agricultural Engineers. Monograph No. 5. St. Joseph, MI.
- GÓCZÁN L. & KAZÓ B., 1969. A mérnökgeológiai-vízgazdálkodási térképezés új módszerei és felhasználási területei. *Földrajzi Értesítő*. **18**. 409–417.
- HENSEL, H. & BORK, H. R., 1988. EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der Modifizierten Universal Soil Loss Equation. *Landschaftsökologisches Messen und Auswerten*. **2**. (2/3) 107–136.
- HUDSON, N., 1973. Soil Conservation. Batsford. London.
- KERÉNYI A., 1991. Talajerózió. Térképezés, laboratóriumi és szabadföldi kísérletek. Akadémiai Kiadó. Budapest.
- KERTÉSZ, Á., 1995. Aridification in a region adjacent to the Mediterranean. Objectives and outline of a scientific programme, MEDALUS Working Paper 65. King's College. London.
- KIRKBY, M. J. & MCMAHON, M. L., 1999. MEDRUSH and the CATSOP basin – the lessons learned. *Catena*. **37**. 495–506.
- KNISEL, W. G., 1980. CREAMS: A Field-scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Report No. 26. U.S. Department of Agriculture. Washington, D. C.
- LAL, R., 1994. Sustainable land use systems and soil resilience. In: Soil Resilience and Sustainable Land Use. (Eds.: GREENLAND, D. J. & SZABOLCS, I.) 41–67. CAB International. Wallingford, U. K.
- LÁNG I., CSETE L. & HARNOS Zs., 1983. A magyar mezőgazdaság agroökológiai potenciálja az ezredfordulón. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- LÁNG I., CSETE L. & JOLÁNKAI M., 1995. Az agrárgazdaság fenntartható fejlődésének tudományos megalapozása, AGRO-21 füzetek. 12. Budapest.
- MORGAN, R. P. C. & MORGAN, D. D. V., 1981. Problems of validating a Meyer–Wischmeier type soil erosion model with field data. In: Soil Conservation. (Ed.: MORGAN, R. P. C.) 327–334. John Wiley & Sons. Chichester.
- MORGAN, R. P. C. et al., 1997. The European soil erosion model (EUROSEM): A process-based approach for predicting soil loss from fields and small catchments. *Earth Surface Processes*. **23**. 527–544.
- MUSGRAVE, G. W., 1947. The quantitative evaluation of factors in water erosion – a first approximation. *J. Soil and Water Cons.* **2**. 133–138.
- NEARING, M. A., LANE, L. J., & LOPES, V. L., 1994. Modeling soil erosion. In: Soil Erosion Research Methods. (Ed.: LAL, R.) 127–155. 2nd ed. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. Ankeny, IA.
- NEARING, M. A. et al., 1989. A process-based soil erosion model for USDA–Water Erosion Prediction Project technology. *Transaction American Society of Agricultural Engineers*. **32**. 1587–1593.
- RAJKAI K., 2001. Modellézés és modellhasználat a talajtani kutatásban. *Agrokémia és Talajtan*. **50**. 469–508.

- RAWLS, W. J. et al., 1989. Green and Ampt Infiltration Parameters for Furrow Irrigation. Paper No. 89. Am. Soc. Agric. Eng. St. Joseph, MI.
- RENARD, K. G. et al., 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *J. Soil and Water Conserv.* **46**, 30–33.
- RENARD, K. G. et al., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703. U.S. Gov. Printing Office. Washington, D. C.
- RENSCHLER, C. S., 2003. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. *Hydrol. Process.* **17**, 1005–1017.
- REWERTS, C. C. & ENGEL, B. A., 1991. ANSWERS on GRASS: Integrating a Watershed Simulation with a GIS. ASAE Paper No. 91-2621. ASAE. St. Joseph, MI.
- RÖMKENS, M. J. M., 1987. The soil erodibility factor: A perspective. In: *Agricultural Soil Loss*. (Eds.: HARLIN, J. M. & BERARDI, G. M.) 125–150. Westview Press. Boulder–London.
- SALAMIN P., 1980. A víz szerepe a magyarországi sík-, domb- és hegyvidékek felszínének alakulásában. *Földrajzi Közlemények.* **28**, 308–330.
- SCHIMDT, J., 1991. A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena. Suppl.* **19**, 101–109.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & KAINZ, M., 1987. Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl. Ulmer. Stuttgart.
- SMITH, D. D., 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agr. Eng.* **22**, 173–175.
- SMITH, D. D. & WHITT, D. M., 1948. Evaluating soil losses from field areas. *Agr. Eng.* **29**, 394–398.
- STEFANOVITS P., 1964. Talajpusztulás Magyarországon. OMMI. Budapest.
- STEFANOVITS P., 1966. Mezőgazdasági Mérnöktovábbképző Intézet talajvédelmi tanfolyama. Egyetemi Jegyzet. Gödöllő.
- STEFANOVITS P. (szerk.), 1977. Talajvédelem, környezetvédelem. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- TAKKEN, I. et al., 1999. Spatial evaluation of a physically based distributed erosion model. *Catena.* **37**, 431–447.
- TOY, T. J., FOSTER, G. R. & RENARD, K. G., 2002. Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control. Wiley. New York.
- USDA SOIL CONSERVATION SERVICE, 1969. Engineering Field Manual for Conservation Services. Washington, D. C.
- USDA SOIL CONSERVATION SERVICE, 1977. Preliminary Guidance for Estimating Erosion on Area Disturbed by Surface Mining Activities in the Interior Western United States. Interim Final Report. EPA–908/4–77–005.
- VÁRALLYAY GY., 1997. A talaj és funkciói. *Magyar Tudomány.* **XLII**, (12) 1414–1430.
- WILLIAMS, J. R., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. ARS.S–40. 244–252. US Gov. Printing Office. Washington, D. C.
- WILLIAMS, J. R., HILER, E. A., & BAIRD, R. W., 1971. Predicting sediment yields from small watersheds. *Trans. ASAE.* **14**, 1157–1162.
- WILLIAMS, J. R., JONES, C. A., & DYKE, P. T., 1984. The EPIC model and its application. In: *Proc Intern. Symp. on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer*. 111–121. ICRISAT Center. Hyderabad, India.
- WISCHMEIER, W. H., 1959. A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **23**, 246–249.
- WISCHMEIER, W. H., 1974. New development in estimating water erosion. In: *Proc. 29th Annual Meeting, Soil Conservation Society of America*. 179–186. Ankeny, Iowa.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Am. Geophys. Union.* **39**, 285–291.

- WISCHMEIER, W. H., & SMITH, D. D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. USDA Agriculture Handbook No. 537. U.S. Government Printing Office. Washington, D. C.
- YALIN, M. S., 1963. An expression for bed-load transportation. Journal of Hydraulics Division. ASCE. **98**. (HY3). 221–250.
- YOUNG, R. A. et al., 1985. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model. A Guide for Model Users. Research Dept., USDA, Agricultural Research Service. Morris, MN.
- ZINNG, A. W., 1940. Degree and length of slope as it affects soil loss in runoff. Agr. Eng. **21**. 59–64.

Érkezett: 2003. szeptember 12.

LÁSZLÓ PÉTER és RAJKAI KÁLMÁN

MTA Talajtani és Agrokémiai
Kutatóintézet, Budapest