

## Mesterséges eső ütéhatásának kvantitatív vizsgálata modellkísérletekben homokon

KERÉNYI ATTILA

Kossuth Lajos Tudományegyetem, Debrecen

A talajpusztulás több formában jelentkezik a természetben. STEFANOVITS [18] szerint az erózió három fő formája: 1. a felületi rétegerózió, 2. a barázdás erózió, 3. a vízmosásos erózió. E három forma közül a két utóbbi hazánkban is régóta kutatott, a felületi rétegerózió részfolyamatai (1. rejtett erózió vagy mikroszoliflukció; 2. csepperózió; 3. lepelerózió) azonban még ma sem tisztázták minden részletükben. A talajpusztulással foglalkozó külföldi szakirodalomban egyre több olyan dolgozattal találkozunk, amelynek témája az esőcseppek talajra gyakorolt ütéhatása, illetve e hatás következményeinek vizsgálata [1, 2, 3, 4, 7, 9, 13, 16]. (Ez a tágabb értelemben vett csepperózió, mely az ütéhatásra létrejött közvetlen anyagelmozduláson kívül magába foglalja az aggregátumok szétesésének, a talaj eliszapolódásának folyamatait is.)

A hazai szakirodalomban kevés a csepperózióval foglalkozó tanulmány. MÉSZÁROS [14, 15] meteorológus dolgozataiban a csepperózió meteorológiai feltételeivel: a természetes esők cseppméretének és cseppenergiájának meghatározásával foglalkozott. A cseppek talajra gyakorolt hatásáról az esőszerű öntözéssel foglalkozó szakemberek több tanulmányt írtak: [5, 6, 17, 19, 20, 21]. GÓCZÁN [10] a talajok esőáteresztő képességével kapcsolatban elemezte az esőcseppek ütéhatását.

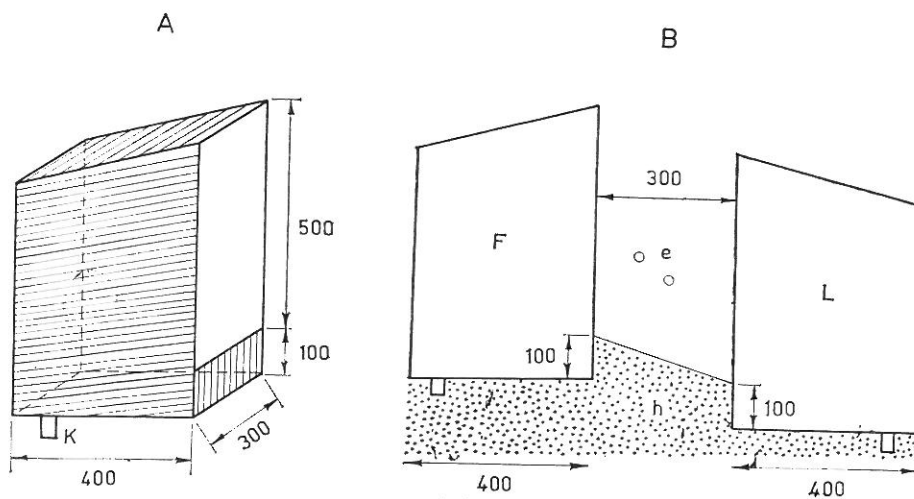
Ezek a hazai tanulmányok célkitűzésüknél fogva nem foglalkoznak az esőcseppek okozta közvetlen anyagelmozdulással, vagyis a szűkebb értelemben vett csepperózióval. Az angol nyelvű szakirodalom az erózióknak ezt a formáját soil splash-nek, a német szakirodalom Prallwirkung-nak nevezi. Magyarul a fröccsenéses erózió, az ütéhatás vagy az ütközési hatás kifejezés használatos, de a csepperózió fogalom szűkebb értelmezése is ennek felel meg. Ehhez a fogalomhoz csak azt a mozgásformát soroljuk, amelynek során a talajszemcsék az esőcseppek ütéhatása következtében a felszíntől elszakadva, röppályán mozognak. A csepperózió kifejezést a továbbiakban ebben az értelemben használom.

A csepperóziós kísérleteim során az ütéhatás következtében elmozdult talajmennyiségek mérését tűztem ki elsődleges célul. Vizsgáltam továbbá, hogy milyen összefüggés van a becsapódási energia és az elmozdult anyagmennyiség között homokon, valamint hogyan befolyásolja a lejtőszög ezt az anyagelmozdulást. Kísérleteket végeztem a csepperózió mechanizmusának pontosabb megismerése céljából, valamint arra vonatkozóan is, hogy milyen tényezők befolyásolják a talajpusztulás szempontjából lényeges csepperóziós küszöbenergia nagyságát.

## Kísérleti anyag és módszer

A kísérletek nagyobb részét a Kazó-féle [12] mesterséges esőztető készülékkel végeztem, amelyet a debreceni Növényvédelmi és Agrokémiaili Állomás bocsátott rendelkezésemre. A készülékből gravitáció hatására hullanak a 4 mm átmérőjű cseppek. Különböző cseppenergiájú „esőket” úgy állítottam elő, hogy az esési magasságot változtattam. A kísérleteket hétféle magasságon végeztem: 0,6 m, 1,0 m, 1,7 m, 2,5 m, 3,2 m, 4,0 m, 4,8 m. A cseppenergia meghatározásához szükség volt a cseppek sebességének ismeretére. Az esőcseppek végsebességét fototechnikai módszerrel határoztam meg. Ez a következőképpen történt: A Kazó-féle esőztető készülékre olyan — horganylemezből készült — árnyékoló maszkot erősítettem, amely csak 10 cm-es sávban engedte lehullani az esőcseppeket. A 10 cm-es sáv közepére mérőlecezt állítottam. Az esőcseppeket ellenfényben fényképeztem, Hasselblad-típusú fényképezőgéppel, 1/60, 1/125 és 1/250 expozíciós időt alkalmazva. A fényképeken az esőcseppek fehér csíkként látszottak. A csíkok hosszából és az expozíciós időből kiszámítottam a cseppek sebességét.

Az esőztetett anyag a Nyírségből származó homok volt. (Részletesebb jellemzését lásd később.) Ez a szemcsék közötti csekély kohézió miatt alkalmas a csepperózió mechanizmusának vizsgálatára, ugyanis már kis cseppenergia esetén is mérhető az anyagelmozdulás. A homok arra is alkalmas volt, hogy kizárjam a felszíni elfolyást, így a cseppek ütéhatását más tényezők befolyásától mentesen vizsgálhattam. A homokból 30 cm hosszú sík (egyenes) lejtőt építettem (1. ábra). Minden esőztetés előtt közvetlenül mértem a homok nedvességtartalmát szárítószekrényes eljárással, hét helyről vett átlagmintából. A kísérletet minden esési magasságból a következő lejtőszögeknél végeztem: 3°, 7°, 10°, 14°, 20°. Az első négy lejtőszög-érték a mezőgazdaságban használatos „természetes lejtőkategória-határoknak” megfelelő [8], egész fokra



1. ábra

A csepperóziós kísérleteknél használt felfogó edények méretei mm-ben (A), helyzetük a kísérletek alatt (B). K: kivezető cső; L: a lejtő alján elhelyezett edény; F: a lejtő felső részén elhelyezett edény; e: esőcseppek; h: homok

kerekített érték, míg a 20°-os lejtőn bekövetkezett változásokat a lejtőszög további növekedésével kapcsolatos törvényszerűség megállapítása céljából vizsgáltam.

A homokfelszínre becsapódó vízcseppek a tér minden irányába szét-szórják a homokszemcséket, a lejtőpusztulás szempontjából azonban az a döntő, hogy milyen a lefelé és felfelé elmozduló anyagmennyiség különbsége. Ezért a lejtő alsó és felső végére saját tervezésű felfogó edényeket helyeztem (1. ábra). Ezek 30 cm-es szélességben és 50 cm magasságig fogták be a szét-csapódó szemcséket, így az edényekben felfogott anyagmennyiség 30 × 30 cm-es (0,09 m<sup>2</sup>) felületre vonatkoztatható.

A kísérletek során végig 35 mm/óra intenzitást alkalmaztam, és az esőzetést egy órán keresztül végeztem. A víz hőmérséklete 22 °C volt. Minden egyes kísérletet négyszeres ismétléssel végeztem el, így a fő kísérletsorozat 140 mérésből állt.

A csepperózió mechanizmusának vizsgálatában fontos szerepe volt a cseppek és a felszín között lejátszódó ütközés kísérleti tanulmányozásának. Erre a célra más típusú kísérletet alkalmaztam, amelyet a későbbiekben ismertetek.

A nagyszámú mérési adat értékelésénél középértéket ( $\bar{X}$ ), szórást (s) és variációs koefficiens (s%) számoltam.

A regressziós egyenesek paramétereit a legkisebb négyzetek módszerével, program felhasználásával határoztam meg. A programot dr. BÁBA ÁGOSTON a KLTE Elméleti Fizikai Tanszékének adjunktusa készítette.

### Az eredmények értékelése

Az első eredményeket az alkalmazott mesterséges eső cseppenergiájának meghatározása során kaptam. A cseppenergia az ismert  $E = \frac{1}{2}mv^2$  össze-

függés alapján számítható, amely számításhoz a csepp tömegének (m) és sebességének (v) ismeretére van szükség. A Kazó-féle esőzetítő készülék homogénen 4 mm átmérőjű cseppeket állít elő (1 csepp tömege: 33,5 mg). A különböző magasságokból hulló 4 mm-es cseppek végsebességét az ismertett fototechnikai módszerrel határoztam meg. 170 ilyen mérés alapján 13 esési magasságra megadtam a cseppsebességet (1. táblázat) és a hozzátartozó cseppenergiát. Mivel a külföldi szakirodalomban általánosan használják az eső energiájának közlését, a táblázatban feltüntettem az adott esési magasságból hulló 35 mm/h intenzitású mesterséges eső energiáját is J/m<sup>2</sup> · h-ban. Ezzel kapcsolatban megjegyzem, hogy a cseppmagasság szempontjából homogén eső esetén egyetlen esőcsepp energiája ugyanolyan törvényszerűség szerint változik esési magasságonként, mint az egy óra alatt lehulló eső energiája, így esetemben bármelyik alkalmas a becsapódási energia és az elmozdult anyagmennyiség közötti összefüggés vizsgálatára. Az öntözéssel kapcsolatos szakirodalom a J/m<sup>2</sup> · h-ban megadott értéket összes fajlagos cseppteljesítménynek nevezi [6], az eróziós irodalom azonban nem emeli ki külön az adat teljesítmény jellegét.

Az esési magasság és a cseppsebesség összefüggését koordinátarendszerben is ábrázoltam (2. ábra), így 4,8 m-es esési magasságig bármely magassághoz tartozó cseppsebesség leolvasható, ebből pedig a cseppenergia kiszámítható.

1. táblázat

Az esési magasság, a cseppsebesség és a cseppenergia összefüggése  
4 mm-es cseppátmérő esetén, álló levegőben

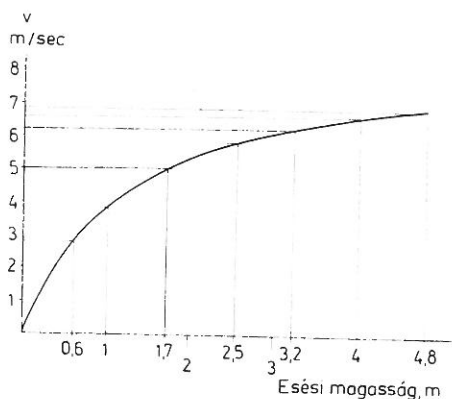
Esési magasság, m	Cseppsebesség, m/s	1 csepp energiája, erg	Az eső energiája, $i = 35 \text{ mm/h}$ $\text{J/m}^2 \cdot \text{h}$
0,3	1,70	484	50
0,45	2,30	886	93
0,6*	2,75	1267	132
0,8	3,30	1824	191
0,95	3,70	2293	240
1,0*	3,80	2419	253
1,15	4,05	2747	287
1,7*	5,00	4188	438
2,5*	5,80	5635	589
3,2*	6,20	6439	673
4,0*	6,60	7296	762
4,4	6,75	7632	797
4,8*	6,85	7860	821
$\infty$ **	8,86	13060	1364

A \*gal jelölt magasságokból történt az esőztetés.

\*\* GUNN és KINZER [II] adata.

Az esőcseppek a homokfelszínhez való ütközésük során a homokszemcsék szétfröccsenését eredményezték. A fő kísérletsorozatban ezt az elmozdult anyagmennyiséget mértem hét különböző cseppenergia esetén. A mérések eredményeit a 2. táblázatban közlöm. L-lel jelöltem a lejtőn lefelé, F-fel pedig a fölfelé elmozdult anyag mennyiségét. A két adat különbsége ( $L - F$ ) az erózió mértékét fejezi ki, míg az  $L + F$  adatok voltak a legalkalmasabbak a cseppenergia és az anyagelmozdulás kvantitatív törvényszerűségeinek vizsgálatára. A legkisebb és a legnagyobb esési magasságnál mértem az összes anyagelmozdulást is: tehát az erózió szempontjából lényegtelen, oldalirányban mozgó homokszemcséket is felfogtam. Az oldalirányba elmozdult homok tömegét a táblázatokban Ol-lal jelöltem.

Méréseim azt bizonyították, hogy az összes anyagelmozdulást tükröző  $L + F + Ol$  értékeket nem befolyásolja a lejtőszög. A 2. táblázatból az is egyértelműen kiderül, hogy az oldalirányban elmozdult anyag mennyisége a lejtőszög növekedésével csökken, mégpedig olyan mértékben, ahogyan az  $L + F$  érték nő, így összegük — ugyanolyan cseppenergia esetén — állandó. Az állandóságot úgy értem, hogy az egyes mérések közötti eltérések nem haladják meg a mérése-



2. ábra

A 4 mm átmérőjű cseppek sebessége különböző esési magasságok esetén.  $v$ : cseppsebesség (m/sec). Vízszintes tengely: esési magasság, m

2. táblázat

Az esőcseppek ütőhatására elmozdult anyagmennyiségek különböző lejtésű homokon, 35 mm/h intenzitás esetén

Esési magasság, m	Az eső energiája, J/m <sup>2</sup> · h	Lejtőszög, fokokban	Nedvesség, súly %	Elmozdult anyag, g					
				L	F	L - F	L + F	Ol	L + F + Ol
0,6	132	3	13,5	26,12	16,15	9,97	42,27	29,41	71,68
		7	14,8	30,82	12,79	18,03	43,61	27,16	70,77
		10	13,2	35,43	10,26	25,17	45,69	25,79	71,48
		14	14,8	40,10	8,07	32,03	48,17	25,63	73,80
		20	15,2	46,21	5,25	40,96	51,46	21,64	73,09
1,0	253	3	13,6	48,41	32,52	15,89	80,93	—	—
		7	12,8	57,04	25,61	31,43	82,65	—	—
		10	13,3	66,72	21,22	45,50	87,94	—	—
		14	14,1	77,54	16,26	61,28	93,80	—	—
		20	12,6	95,67	11,43	84,24	107,10	—	—
1,7	438	3	13,3	87,48	59,71	27,77	147,19	—	—
		7	12,9	99,95	46,45	53,50	146,40	—	—
		10	13,7	114,26	41,05	73,21	155,31	—	—
		14	13,7	131,31	32,48	98,83	163,79	—	—
		20	14,2	162,42	20,60	141,82	183,02	—	—
2,5	589	3	14,4	105,37	76,96	28,41	182,33	—	—
		7	14,5	131,26	63,64	67,62	194,90	—	—
		10	13,8	142,77	57,57	85,20	200,34	—	—
		14	13,8	167,62	49,92	117,70	217,54	—	—
		20	13,9	193,58	30,81	162,77	224,39	—	—
3,2	673	3	13,7	127,31	94,84	32,47	222,15	—	—
		7	14,3	154,28	77,12	77,16	231,40	—	—
		10	13,8	174,22	70,48	103,74	244,70	—	—
		14	13,8	199,73	61,13	138,60	260,86	—	—
		20	13,0	247,30	38,79	208,51	286,09	—	—
4,0	762	3	16,0	152,46	116,42	36,04	268,88	—	—
		7	14,0	180,71	95,95	84,76	276,66	—	—
		10	13,7	198,05	83,95	114,10	282,00	—	—
		14	13,9	231,38	74,90	156,48	306,28	—	—
		20	13,7	269,00	49,14	219,86	318,14	—	—
4,8	821	3	15,7	159,19	124,18	35,01	283,37	223,57	506,94
		7	15,1	185,09	100,33	84,76	285,42	223,26	508,68
		10	16,9	212,65	94,13	118,52	306,78	205,84	512,62
		14	15,5	237,15	79,12	158,03	316,27	210,27	526,54
		20	15,9	279,38	52,50	226,88	331,88	184,49	516,37

L = a lefelé elmozdult anyag mennyisége.  
 F = a felfelé elmozdult anyag mennyisége.  
 Ol = az oldalirányban elmozdult anyag mennyisége.

im során tapasztalt átlagos hibaszázalékot. Bizonyos tendencia látszik érvényesülni abban, hogy nagyobb lejtőszögeknél az L + F + Ol értékek minimális mértékben nőnek — azonban ezek a különbségek is a mérési hibahatáron belül maradnak, így ezt a jelenséget inkább a mérések véletlenszerű eltéréseinek tekintem, mintsem törvényszerű változásnak.

Az  $L + F + Ol$  érték meghatározása jóval idő- és munkaigényesebb, mint az  $L$  és  $F$  értéké, amelyekből az  $L + F$  és az  $L - F$  adat egyszerűen számítható. A kísérletek azt bizonyították, hogy az  $L + F$  érték szoros korrelációban van az  $L + F + Ol$  értékkel, így az is alkalmas a becsapódási energia és az elmozdult anyagmennyiség közötti összefüggés vizsgálatára. Mivel az erózió mértékének a meghatározásához is csupán az  $L$  és az  $F$  érték ismeretére van szükség, a továbbiakban elsősorban ezeket az eredményeket elemzem.

Mérési adataimat koordináta-rendszerben ábrázolva, elfogadhatónak tűnik az az első közelítés, hogy a pontsorok egy-egy egyenes mentén helyezkednek el (3. ábra). Ezért a cseppenergia és a mérési értékek közötti lineáris kapcsolatot vizsgáltam a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva.

A 2. táblázat adatai alapján az elmozdult anyagmennyiség és a cseppenergia közötti összefüggést lejtőszögenként vizsgáltam. Program felhasználásával meghatároztam minden pontsorhoz a legjobban illeszkedő regressziós egyenes jellemző adatait: az  $E_0$ -t (az  $x$  tengellyel való metszéspontját, amely esetenben energia) és  $b$ -t (az  $y$  tengellyel való metszéspontját). Az eredményeket a 3. táblázat tartalmazza. Ezeknek az adatoknak a felhasználásával

3. táblázat

A mérési adatokhoz ( $L + F$ ) a legkisebb négyzetek módszerével illesztett regressziós egyenesek paraméterei

	Lejtőszög				
	3°	7°	10°	14°	20°
$E_0$	22,82	22,15	21,50	18,85	1,14
$b$	-7,98	-7,95	-8,09	-7,50	-0,47

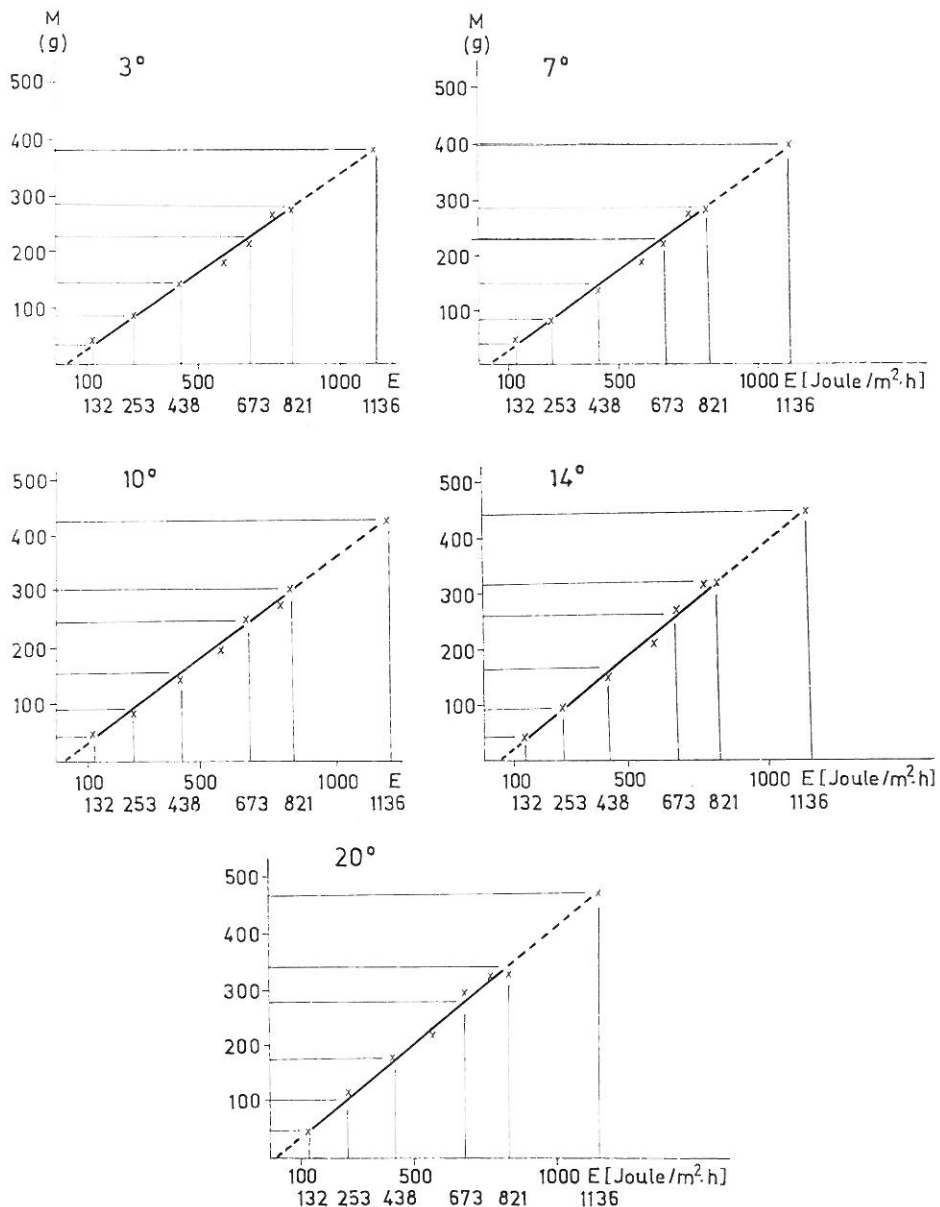
lejtőszögenként megszerkesztettem a regressziós egyeneseket (3. ábra). A numerikus módszer a későbbiekben elemzett extrapolálást is pontosabbá tette, mintha szubjektív grafikus kiértékelést alkalmaztam volna.

A 3. ábra és 3. táblázat adatai alapján megállapítható, hogy az egyenesek nem az origón haladnak keresztül, hanem kivétel nélkül pozitív  $E_0$  értékeknél. Tekintettel arra, hogy az  $x$  tengelyen az energia-adatokat ábrázoltam, az  $E_0$  értékek is energiát jelentenek, amelyet  $J/m^2 \cdot h$ -ban adtam meg. Ez a jelenség arra hívta fel a figyelmemet, hogy létezik egy kis nagyságrendű energia-tartomány, amelynél még nem történik anyagelmozdulás, tehát nem játszódik le a csepperózió jelensége. *Azt az energiaértéket, amelynél először észlelhető a talajszemcsék röppályán történő elmozdulása, csepperóziós küszöbenergiának nevezem.* (Megjegyzem, hogy a csepperóziós küszöbenergiára vonatkozóan egyetlen csepp energiáját is megadom, mivel a csepperóziós folyamat és küszöbenergia-méréseim jellegéből adódóan ez reálisabb értelmezést tesz lehetővé.)

Az is egyértelmű a 3. táblázatban, hogy az  $L + F$  adatokhoz illesztett egyenes  $E_0$  értékei a lejtőszög növekedésével csökkennek. Ez azt jelentené, hogy a 3°, 7°, 10°, 14° és 20°-hoz tartozó egyedi cseppekre vonatkozó küszöbenergiák rendre 218, 212, 206, 180 és 11 erg nagyságúak. (Ezeknek megfelel a 22,82–22,15–21,50–18,85 és 1,14  $J/m^2 \cdot h$  energiájú eső.) Mivel a kísérleti hibákat okozó tényezők mindegyike elvileg véletlenszerűen válto-

zott, a viszonylag nagyszámú kísérlet alapján egzakt matematikai módszerrel szerkesztett egyenesek a fontosabb tendenciákat tükrözik.

Az  $L + F + OI$  értékek esetében a kísérleteket hússzoros ismétléssel végeztem — habár csak két energiaértéknél. A 20-20 adatból számolt két



3. ábra

Az eső energiája (E) és az elmozdult anyag (L + F) mennyisége (M) közötti összefüggés 0,09 m<sup>2</sup>-es terület esetén különböző lejtőszögeknél



közéértéken átfektetett egyenes  $20,2 \text{ J/m}^2 \cdot \text{h}$ -nál (1 csepp energiája 192 erg) metszi az  $x$  tengelyt, tehát meglehetősen jó egyezést mutat a  $3^\circ$ -,  $7^\circ$ - és  $14^\circ$ -os lejtőszög  $E_0$  értékeivel (3. táblázat). A  $20^\circ$ -os lejtőszög  $E_0$  értéke amellet, hogy a megállapításomat — miszerint a lejtőszög növekedésével csökken a küszöbenergia értéke — alátámasztja, mégis jelentősebben eltér a többi adattól, ami ebben az esetben valószínűleg a mérési hibák nem teljesen véletlenszerű eloszlásából fakad. Így a küszöbenergiára vonatkozóan a matematikai feldolgozás alapján helyesebb azt a megállapítást tennünk, hogy az a  $0-220 \text{ erg}$  ( $0-24,75 \text{ J/m}^2 \cdot \text{h}$ ) közötti tartományba esik a kísérletek során alkalmazott viszonyok között.

A csepperóziós küszöbenergia kérdése fontos a talajpusztulás elleni védekezés szempontjából. Ha ugyanis sikerül mesterséges beavatkozással ez alá az érték alá szorítani az esőcseppek energiáját, akkor megszüntethető, vagy annak közelébe kerülve legalábbis minimálisra csökkenthető a csepperózió. Jelentőségére való tekintettel további kísérleteket végeztem a csepperóziós küszöbenergiára vonatkozóan, majd ugyanilyen típusú kísérletekkel adatokat nyertem a csepperózió mechanizmusának finomabb részleteiről is.

Ezekre a vizsgálatokra a következő módszert dolgoztam ki. A homok felszínét — amelynek nedvességtartalmát közvetlenül a kísérlet előtt szárítószekrényes eljárással meghatároztam — egy horganylemezből vágott körgyűrűvel letakartam. A gyűrű közepén 17 mm átmérőjű nyílást hagytam, ahol az esőcsepp akadálytalanul a homokra eshetett. A lemezre egy — a nyakánál elfűrészelt, fejfelé fordított — üvegtölcsért helyeztem úgy, hogy a tölsér kisebb átmérőjű nyílása a körgyűrű nyílása fölé kerüljön (4. ábra). Ezután megfelelően kiválasztott és állványon rögzített pipettával 4 mm átmérőjű esőcseppeket ejtettem a homokfelszínre. Az üvegtölcséren át jól megfigyelhető volt a felszín változása.

Az első kísérletsorozatban a csepperóziós küszöbenergia mérését végeztem különböző nedvességtartalmú vízszintes homokfelszínnek esetén. Az esési magasságot 5 cm-től növeltem 2–3 cm-enként addig a pontig, amíg az első szétcsapódó szuszpenziószemcsék a fémlemezre vagy az üvegtölcsér falára nem repültek. Minden esőcsepp az eredeti nedvességtartalmú felszínre esett, tehát minden cseppentésnél változtattam a becsapódás helyét. Amikor elértem a küszöbenergia-értéket, a homokfelszín 8–10 pontján ellenőriztem azt — tekintettel a homok inhomogenitására. Így egy viszonylag szűk csepperóziós küszöbenergia-intervallumot adhattam meg a homok száraz (a légköri páratartalommal egyensúlyt tartó) állapotától az erősen nedves állapotig (5. ábra).

A másik kísérletsorozatban analitikai mérleggel  $0,0001 \text{ g}$  pontossággal megmértem az üvegtölcsér és a fémgűrű súlyát, majd az esőcseppeket 10 másodpercenként ugyanarra a helyre ejtve az első szétfröccsenéstől számítva 5–10 csepp becsapódását vártam meg. A szétfröccsenő szuszpenzió az üvegtölcsér falára és a fémgűrűre tapadt (4. ábra). Ezek együttes súlyát azonnal (másodperceken belül) megmértem analitikai mérleggel, majd  $105^\circ\text{C}$ -on kiszárítva az anyagot, meghatároztam, hogy a felszínre hullott esőcseppekből milyen mennyiségű víz repült szét a homokszemcsékkel együtt, és milyen mennyiségű víz szivárgott be a talajba. (A cseppméretből és a cseppek számából az összes lehullott vízmennyiség egyszerűen számítható.) A kísérletet 0,6 m, 1,0 m és 1,7 m magasságból hulló cseppeknél végeztem el, és a felszín különböző részein magasságonként nyolcszor ismételttem meg. A mérések során



4. táblázat

A kísérleti anyag (a Nyírségből származó homok) mechanikai összetétele, súly %

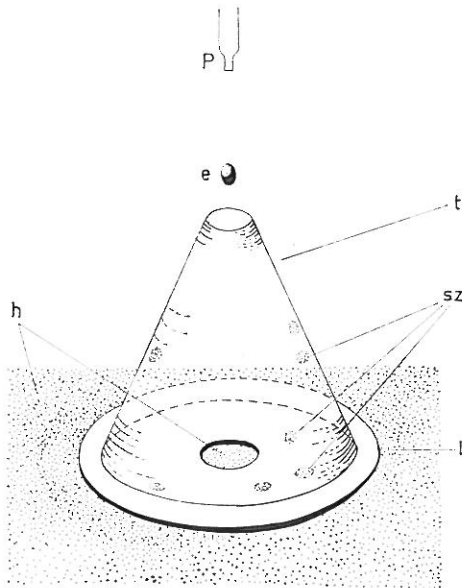
Szemcseméret, mm											
>1	1-0,8	0,8-0,63	0,63-0,32	0,32-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,02	0,02-0,01	0,01-0,005	0,005-0,002	0,002>
0,01	0,02	0,05	2,07	15,53	66,21	13,91	0,80	0,50	0,40	0,30	0,20

figyelembe vettem a párolgási veszteséget és a homokfelszín eredeti nedvességtartalmát is.

E kétféle kísérletsorozat eredményeinek ismeretében a következőképpen értelmezem a küszöbenergia kérdését és a cseppek felszínhez való ütközését.

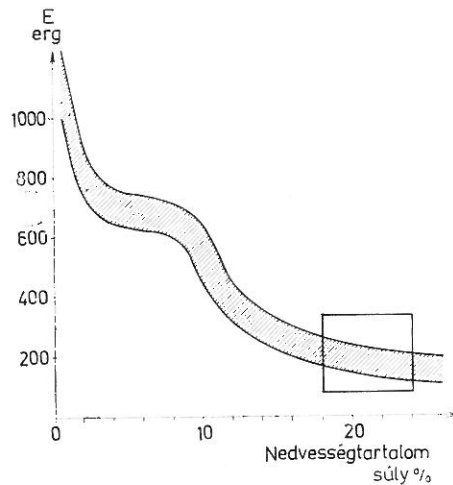
Mindenekelőtt hangsúlyozni kell, hogy a kísérleti anyag, a Nyírségből származó homok – mint minden talaj és üledékes közet – *inhomogén összetételű*. Az inhomogenitás fogalmán itt egyrészt azt értem, hogy a kolloid méretű szemcséktől az 1 mm-nél is nagyobb szemcseátmérőig minden szemcseméret előfordul (4. táblázat), másrészt, hogy ezek térben véletlenszerű elrendeződésben találhatók. A felszínre érkező azonos méretű, kicsiny energiájú esőcseppek attól függően, hogy milyen elrendeződésű szemcsehalmazzal ütköznek, egyik esetben anyagelmozdulást eredményeznek, másik esetben nem.

Az esetek egy részében az átlagosnál nagyobb átmérőjű szemcsékből álló halmazzal történik az ütközés. Ilyen esetben a küszöbenergia is nagyobb



1. ábra

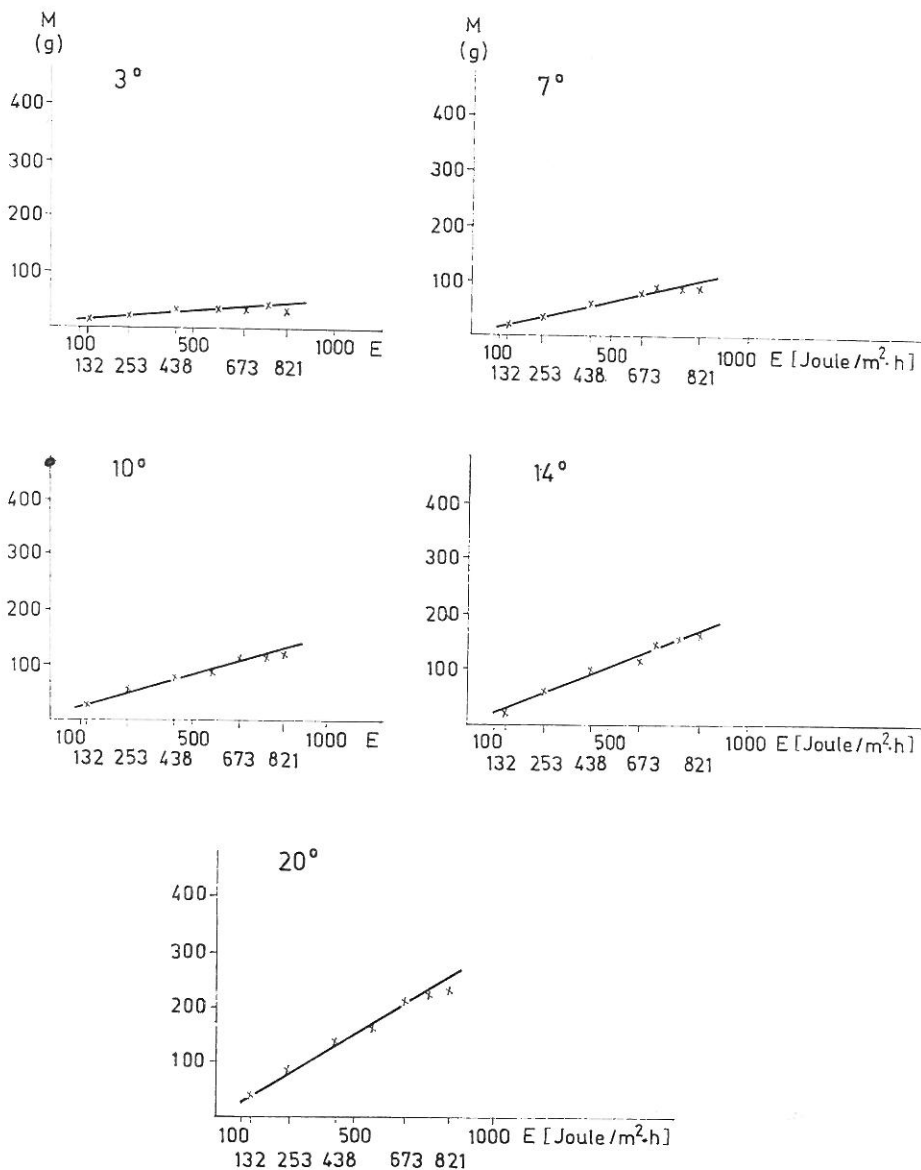
Üvegtölcséres kísérlet a csepperózió mechanizmusának tanulmányozására. P: pipetta; e: esőcsepp; t: üvegtölcsér; h: homok; l: fémlemez; sz: víz és homok szuszpenzió



5. ábra

A kísérleti anyag (homok) csepperóziós küszöbenergiájának (E) változása a nedvességtartalom függvényében

lesz, mint a kisebb átmérőjű szemcsékkel való ütközéskor — feltéve, ha azonos mennyiségű „kötőanyag” tartja össze a szemcséket. Ez a „kötőanyag” általában a kolloid tartományba tartozó humuszból (0,04%) és a szerves kolloidokból (0,2%) áll. Esetünkben ezek mennyisége minimális, mégis számolni kell velük, mint a küszöbenergiát befolyásoló tényezővel. Mivel a kolloidok



6. ábra

A csepperózió mértékét kifejező  $L - F$  adatok ( $M$ ) változása az eső energiájának ( $E$ ) függvényében különböző lejtőszögeknel ( $L$  és  $F$  lásd 1. ábra)

eloszlása sem abszolút homogén, a szemcséket összetartó erők sem egyenlő nagyságúak.

A méréseim alapján szerkesztett 5. ábra azt mutatja be, hogy azonos nedvességtartalom esetén egy viszonylag szűk intervallumon belül változik a küszöbenergia, amely a kísérleti anyag inhomogenitására vezethető vissza, és nagyobb mértékű változást okoz a talaj nedvességtartalma. Nem tisztázott kérdés még, hogy miért lépcsőszerű az ábrán látható szalagszerű görbe. A 2. táblázatban a homok kísérlet előtti nedvességtartalmát tüntettem fel. Kísérlet közben a kezdeti nedvességtartalom néhány percen belül 20% fölötti értékre emelkedett. Mivel a homok nedvességtartalma az 1 órás esőztetés folyamán nőtt, a 5. ábra szerint a küszöbenergia értéke csökkent, így a cseppek az esőztetés kezdetén csak nagyobb becsapódási energia esetén okoztak anyagelmozdulást, mint a végén. Ezért is indokolt az egyedi cseppekre vonatkozó küszöbenergia közlése, és kevésbé tükrözi a tényeket a  $J/m^2 \cdot h$ -ban megadott, az egész esőre vonatkozó energiaérték. A 2. táblázatban szerepelnek a homok kísérlet előtti nedvességtartalmának adatai, az 5. ábráról pedig leolvashatók a hozzájuk tartozó energiaértékek.

Az ábrán bekereteztem azt a tartományt, ami a kísérleteimre vonatkozó küszöbenergia-értékeket a kezdeti, rövid ideig tartó alacsonyabb nedvességtartalom kivételével felöleli. Adatokkal jellemezve: 100–240 erg közötti értékekről van szó. Valószínű, hogy nagyobb lejtőszögek esetén 100 erg alatti küszöbenergiával is kell számolnunk, ezek mérésére azonban módszerem nem volt alkalmas. Kísérleteim azonban így is igazolták, hogy a nagyszámú mérés alapján egzakt matematikai módszerrel történt extrapoláció jó közelítéssel kijelölte azt a küszöbenergia intervallumot, ami a kísérleti anyagra a leírt viszonyok között jellemző. A küszöbenergia változásának okaira és e változások mértékére vonatkozóan azonban csak a közvetlen mérések adtak felvilágosítást.

A 0,0001 g pontosságú mérések, valamint a „tölcséres” kísérletek során tett megfigyelések lehetővé tették, hogy a csepperóziós folyamat legfontosabb szakaszára, az esőcseppek becsapódásának folyamatára részletes magyarázatot adjak.

Az esőcsepp becsapódásának *első fázisa* felfogható úgy is, mint egy rugalmatlan test (vízcsepp) ütközése rugalmas testekkel. Ez a szakasz rendkívül rövid ideig tart, csupán addig, amíg a víz felületi feszültsége a cseppet alkotó víztömeget egyetlen egységben tartja össze. A felszín ez alatt az idő alatt a deformálódott csepp horizontális méretének megfelelő területen enyhén bemélyed, és a szemcsék egymáshoz való ütközése eredményeként e mélyedés pereme a korábbi térszín fölé emelkedik.

Az ütközés *második fázisában* a vízcsepp nagyobb része bepréselődik a homokszemcsék közé, kisebb része apró cseppek formájában a peremi kiemelkedés irányában szétcsapódik, miközben homokszemcséket is magával ragad. (Kötöttebb talajon természetesen a beszivárgó rész és a szétfröccsenő rész aránya más.) Minél nagyobb a becsapódás energiája, annál kisebb az azonnal beszivárgó víz mennyisége, és annál nagyobb a homokszemcsékkel együtt szétrepülő vízcseppek összes tömege. Erre vonatkozóan méréseim számszerű adatokkal szolgálnak (5. táblázat).

Az azonnal beszivárgó víz a felszín *közvetlen vagy elsődleges benedvesedését* okozza, míg a szétcsapódó vízmennyiség a *másodlagos benedvesedést* eredményezi. Nagyobb cseppenergia esetén az erőteljesebb másodlagos benedvesedés

5. táblázat

Az ütközés során elmozdult anyag víz : homok aránya 22 °C-os vízhőmérsékleten és vízszintes felszínen (4 mm-es cseppátmérő)

Esési magasság, m	A homok kezdeti nedvességtartalma, súly %	Cseppek		Beszivárgott víz	Szétfücsent		
		száma	tömege, g		víz	homok	víz az összes víz %-ában
0,6	11,2	52	1,7420	1,6015	0,1405	0,0968	8,1
1,0	11,8	56	1,8760	1,7080	0,1680	0,1355	9,0
1,7	10,9	51	1,7085	1,4529	0,2556	0,1934	15,0

a talaj vékony felszíni rétegének gyorsabb benedvesedését eredményezi ugyanolyan vízmennyiséggel, mint kisebb cseppenergiánál. Ez utóbbi esetben viszont kisebb mértékben, de valamivel vastagabb felszíni réteg nedvesedik át ugyanolyan vízmennyiség hatására. Ez a jelenség végső soron oda vezet, hogy a felszíni elfolyás hamarabb indul meg nagyobb cseppenergiánál azonos talaj esetén is. Ehhez természetesen hozzájárul a nagyobb energiájú ütközések talajtömörítő hatása is. A cseppenergia mesterséges beavatkozással való csökkentése tehát a felszíni elfolyás késleltetése szempontjából is fontosnak látszik.

Végül a 6. ábrán bemutatom az erózió mértékét kifejező L — F értékeknek az eső energiájával és a lejtőszöggel való kapcsolatát. Az ábrán jól látható, hogy a lejtőszög növekedésével egyre meredekebbek a regressziós egyenesek, ami a csepperózióval elszállított anyag tömegének nagymértékű növekedését jelenti. Az adatok értékeléséhez azt a megjegyzést fűzöm, hogy azok nem jelentenek olyan mértékű lepusztulást, mint a barázdás erózió esetében, amely alkalmával a teljes anyagmennyiség eltávozik a vizsgált területről. Csepperózió esetében a szemcsék különböző távolságra mozdulnak el, és csak részben távoznak el a lejtőről, másik részük pedig kisebb távolságra mozog. A szemcsék (vagy aggregátumok) röppályájának hosszúra vonatkozóan csak újabb kísérletek alapján közölhetek majd számszerű adatokat.

### Összefoglalás

Laboratóriumi körülmények között vizsgáltam a csepperózió folyamatát. Kísérleteim célja a csepperóziós folyamat tanulmányozásán kívül az volt, hogy adatokat kapjak arra vonatkozóan, milyen nagyságrendű anyagelmozdulást eredményez az esőcseppeknek a talajfelszínre történő becsapódása, valamint milyen összefüggés van a becsapódási energia és az elmozdult anyagmennyiség között. Azt is vizsgáltam, hogy ezt az anyagelmozdulást hogyan befolyásolja a lejtőszög. A szorosabb értelemben vett csepperóziót: a becsapódás hatására történt közvetlen anyagelmozdulást mértem.

A kísérleteket a Kazó-féle mesterséges esőztető készülékkel végeztem. A készülékből a gravitáció hatására esik az eső, a cseppek átmérője 4 mm. A kísérleti anyag homok volt (4. táblázat). Ez az anyag a szemcsék közötti csekély kohézió miatt alkalmas a csepperózió mechanizmusának tanulmányozására. A kísérletek során nem volt felszíni elfolyás, így a becsapódás hatására

elmozdult anyagmennyiséget más tényezők befolyásától mentesen mérhettem. Méréseim 0,09 m<sup>2</sup>-es területre vonatkoznak.

Az esőcseppek becsapódási energiáját olyan módon változtattam, hogy a készüléket különböző magasságokba helyeztem (0,6 m, 1,0 m, 1,7 m, 2,5 m, 3,2 m, 4,0 m, 4,8 m). Minden magasságból azonos intenzitással (35 mm/h) egy órán keresztül esőttem. Az esőcseppek végsebességét fototechnikai módszerrel határoztam meg. A sebesség és a cseppméret ismeretében kiszámítottam a cseppenergiát (1. táblázat). Az eső mindig lejtős sík homokfelszínre esett (1. ábra). Minden esési magasság esetén öt lejtőszögnél — 3°, 7°, 10°, 14°, 20° — vizsgáltam az erózió mértékét. Minden kísérletet négyszer ismételttem, így a fő kísérletsorozat 140 kísérletből állt. Az esőcseppek ütközésének hatására szétrepülő homokszemcskéket az erre a célra tervezett edényekben fogtam fel. A fő kísérletsorozat eredményeit a 2. táblázat tartalmazza.

A cseppenergia és az elmozdult anyagmennyiség közötti összefüggést grafikusan ábrázoltam. Első közelítésben a cseppenergia és a mérési értékek közötti lineáris kapcsolatot vizsgáltam (3. ábra), a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva, program felhasználásával. A programot HP 67 számítógépen futtattam le. A numerikus értékelés felhívta figyelmemet arra az energia-tartományra, amelynél nem következett be anyagelmozdulás. Ezt csepp-eróziós küszöbenergia alatti tartománynak neveztem. A küszöbenergia változásaira vonatkozóan újabb — saját tervezésű — kísérleteket végeztem (4. ábra). Ezek során mérésekkel bizonyítottam, hogy a küszöbenergia függ a kísérleti anyag szemcseösszetételétől, a kolloidok anyagi minőségétől és a nedvességtartalmától (5. ábra). További kísérletekkel vizsgáltam a csepperózió finomabb mechanizmusát (5. táblázat). Megállapítottam, hogy a homokfelszín benedvesedésének gyorsaságában szerepet játszik az esőcseppek becsapódási energiája.

Végül az erózió mértékét kifejező L — F értékek nagvságrendjét elemeztem (6. ábra).

### Irodalom

- [1] BARNETT, A. P. & DOOLEY, A. E. Erosion potential of natural and simulated rainfall compared. Transactions of the ASAE. **15**. 1112—1114. 1972.
- [2] BORK, H., BORK, H. R. & ROHDENBURG, H.: Determination of total runoff and total erosion by simulated heavy rainfall in small watersheds. Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg-Colmar 20—23. Sept. 1978. 247—248. 1979.
- [3] BRYAN, R. B.: A simulated rainfall for the prediction of soil erodibility. Z. Geomorphologie Suppl. **21**. 138—150. 1974.
- [4] BUBENZER, G. D. & JONES, B. A.: Drop size and impact velocity effect on the detachment of soil under simulated rainfall. Transactions of the ASAE. **14**. 625—628. 1971.
- [5] CSEKŐ, G.: Az esőszerű öntözés minőségének javítása a cseppenergia figyelembevételével. Agrártud. Közlem. **35**. 593—607. 1976.
- [6] CSEKŐ, G.: Tervezhető cseppenergiájú esőtető öntözés. Kandidátusi értekezés. Gödöllő. 1977.
- [7] EKERN, P. C.: Problems of raindrop impact erosion. Agric. Engng. **34**. 23—28. 1953.
- [8] ERŐDI, B. & HORVÁTH, V.: Természetes lejtőkategóriahatárok meghatározása az erózióintenzitás-függvényazonosság alapján. In: A szárazföldi erózió problémái. 12—22. (A Nemzetközi Hidrológiai Társaság Bariban, 1962. okt. 1—4-én tartott szimpóziuma anyagának kivonatos ismertetése.) OMgK. Budapest. 1963.

- [9] FREE, G. R.: Soil movement by raindrops. *Agric. Engng.* **33**. 491—496. 1952.
- [10] GÓCZÁN, L.: Vízáteresztő képesség—esőáteresztő képesség. *Földr. Értesítő.* **23**. 401—404. 1974.
- [11] GUNN, R. & KINZER, G. D.: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteorology.* **6**. 243—248. 1949.
- [12] KAZÓ, B.: A talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak meghatározása mesterséges esőztető készülékekkel. *Agrokémia és Talajtan.* **15**. 239—252. 1966.
- [13] KILINC, M. & RICHARDSON, E. V.: Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. *Hydrology Papers. Colorado State University, Fort Collins. USA. No. 63.* 1973.
- [14] MÉSZÁROS, E.: Az esőcsepp-spektrum mérésének módszerei. *Időjárás.* **63**. 51—52. 1959.
- [15] MÉSZÁROS, E.: Az esőcseppek eróziója. *Időjárás* **65**. 212—215. 1961.
- [16] PALMER, R. S.: Waterdrop impact forces. *Transactions of the ASAE.* **8**. 69—72. 1965.
- [17] SÁGI, K.: Az esőszerű öntözés talajtömörítő hatása. *Agrártud. Egyetem Mg. Kar Közleményei. Gödöllő.* 93—100. 1960.
- [18] STEFANOVITS, P.: *Talajtan. Mezőgazd. Kiadó. Budapest.* 1975.
- [19] SZALAI, GY.: Lejtő hatása a vízadagolásra öntözómódszereknél. *Kandidátusi értekezés. Gödöllő.* 1969.
- [20] VARGA, S.: Talajkímélő esőszerű öntözés. *Hidrol. Közöny.* **42**. 394—398. 1962.
- [21] VARGA, S.: Szórófejek minősítése új mutatók bevezetésével. *Agrártud. Egyetem Mg. Kar Közleményei. Gödöllő.* 1965.

*Érkezett: 1981. május 6.*