

A TALAJNEDVESSÉG-SZABÁLYOZÁS ELMÉLETI ALAPJAI ÉS AZOK GYAKORLATI ALKALMAZÁSA*

KOVÁCS GYÖRGY**

AZ MTA LEVELEZŐ TAGJA

A talajnedvesség áramlását és tározódását befolyásoló folyamatok szabályozása fontos gazdasági érdek. A mezőgazdaság terméseredményei csak akkor növelhetők, ha a gyökérzóna pórusaiban megfelelő határok között tudjuk tartani a víz és a levegő arányát, és megakadályozzuk a káros sók felhalmozódását. A szabályozást biztosító rendszerek tervezéséhez és üzeméhez a folyamatok elméleti feltárása szükséges. A tanulmány ismerteti azt a geometriai, dinamikai és statisztikai modellekből felépített számítási rendszert, amelynek segítségével mind a telített, mind a telítetlen szemcsés rétegek vízzállító és tározó képessége elméletileg jellemezhető és ami a gyakorlat számára is megfelelő, könnyen kezelhető eljárást ad feladataink megoldásához. Külön nehézséget okoz a felszín közelében a finom szemcsék aggregálódása és ennek következtében egymástól nagyságrendekkel különböző elsődleges és másodlagos pórusok kialakulása. A javasolt módszer lehetőséget ad arra is, hogy az eredményeket ilyen kettős porozitású rétegek jellemzésére is általánosíthassuk.

1. Bevezetés

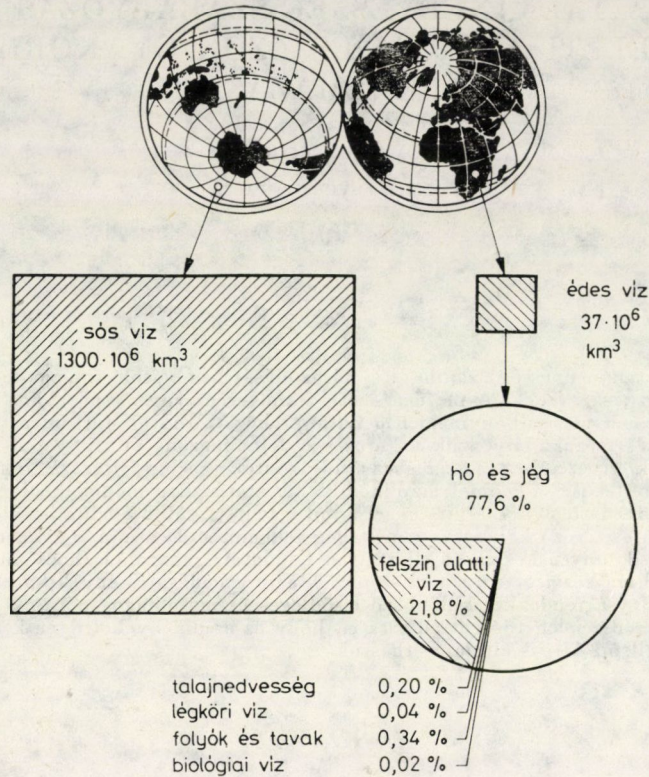
A talajnedvességnek a terepszinttől a talajvíztükörig terjedő zónája viszonylag elhanyagolhatónak tűnik, ha vastagságát a vizet tároló föld-köpeny méretéhez hasonlítjuk. Az itt visszatartott víz mennyisége sem jelentős, bolygónk édesvíz-készletének mindössze két ezreléke, és ez az arány tovább csökken, ha — számításba véve a tengerek és óceánok medencéiben felhalmozott sósvíz mennyiségét is — a teljes statikus vízkészlethez viszonyítjuk a talajnedvességként tárolt vizet (1. ábra).

A vizsgálatra kerülő zóna jelentősége azonban nem ítéhető meg térfogata, vagy az ott raktározott víz mennyiség alapján. A felszín közelében lévő talajnedvesség könnyen elérhető a párolgás és a növényzet számára, ezért a mozgását és tározódását befolyásoló folyamatok meghatározzák a tényleges evapotranspiráció mértékét. A felszíni lefolyás és a beszívargás mennyisége is függ a talajvíz fölötti réteg tulajdonságától és állapotától. A hidrológiai körforgalom szárazföldi ágának szíve tehát ez a zóna, ami szabályozza a keringést, megszabja a felszíni és a felszín alatti vizek járását.

A talajnedvesség vízháztartásának természetes, vagy emberi tevékenységgel befolyásolt mesterséges szabályozása nem csak hidrológiai szempontból

* Székfoglaló előadás. Elhangzott 1980. március 19-én.

** Dr. Kovács György, 1022 Budapest, Mihályfi Ernő u. 3/a.

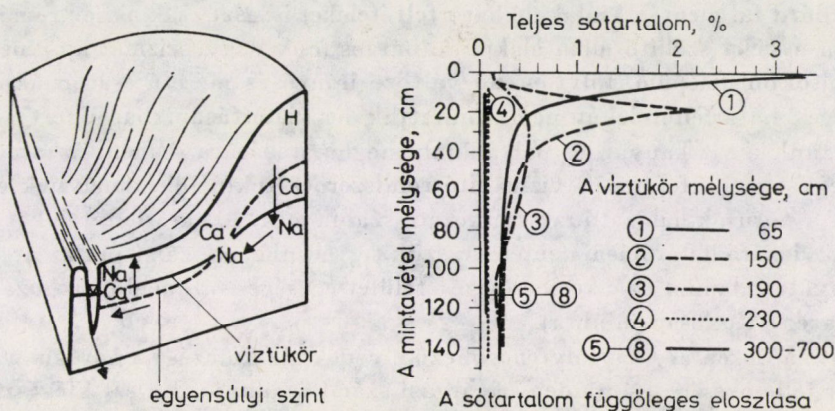


1. ábra

fontos, hanem jelentős gazdasági érdek is kapcsolódik hozzá. A növények által felhasználható víz mennyisége függ a víztükör fölötti talajszelvény tárolóképességétől és a talajnedvesség áramlásától. Így a mezőgazdasági termelés eredményességét is döntően befolyásolják a közvetlenül a talajfelszín alatt lezajló hidrológiai folyamatok, amelyek elemzésekor nem csak a tárolt víz mennyiségének ismerete szükséges, hanem a pórusok levegővel kitöltött hányadát is meg kell határoznunk, hiszen a legtöbb kultúrnövény megkívánja, hogy gyökérszónájában mind vízhez, mind levegőhöz hozzájusson. Megállapíthatjuk tehát, hogy a talajnedvesség-szabályozás célja az optimális víz-levegő arány biztosítása ebben a rétegben.

A talajban lévő sók migrációja szorosan kapcsolódik a víz szivárgó mozgásához, hiszen a talajnedvesség az oldott sók hordozója. A talaj kilúgozódása a várható folyamat azokban a szelvényekben, amelyekben a beszivárgás meghaladja az evapotranspirációt és ezért a függőleges vízmozgás eredője hosszabb idő átlagában lefelé irányul. A talajból kilúgozott sók a talajvízbe jutnak, és a talajvíz-áramlás a mélyfekvésű területek felé szállítja azokat. Ott az evapo-

transpiráció az uralkodó folyamat (mert a víztükör a felszínhez közel van), ezért a talajvíz és a talajnedvesség közötti vízcsera eredője felfelé mutat. Ez az emelkedő áramlás a sókat is a felszín közelébe hozza, ahol azok a párolgás következtében kicsapódnak és a só-felhalmozódási folyamat sós, szikes talajok kialakulását okozza (2. ábra). Minthogy a termőréteg fizikai és kémiai tulaj-



2. ábra

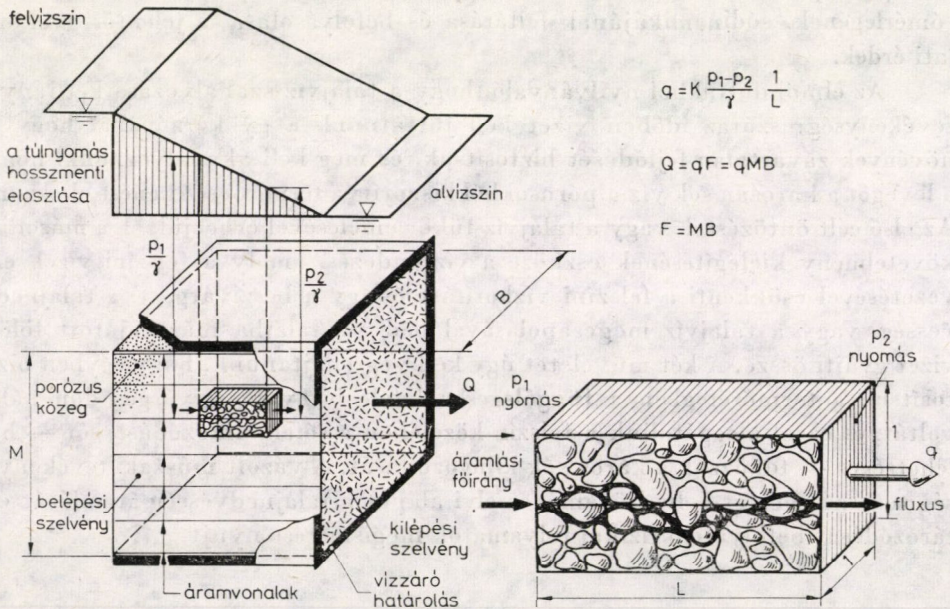
donsága jelentősen befolyásolja egy-egy terület termőképességét, a talajnedvesség állapotának vizsgálata és szabályozása, ehhez kapcsolódva a szelvény sómérlegének, sódinamikájának feltárása és befolyásolása is jelentős gyakorlati érdek.

Az elmondottakból nyilvánvaló, hogy a talajvíz szabályozása kétirányú tevékenység: száraz időben vizet kell juttatnunk a gyökérszónába, hogy a növények zavartalan fejlődését biztosítsuk, és meg kell akadályoznunk, hogy a levegőt a károsan sok víz a pórusokból kiszorítva termés-csökkenést okozzon. Az első célt öntözéssel, vagy a talajvíz-tükör emelésével érhetjük el, a második követelmény kielégítésének eszköze a vízrendezés, amely a felszíni vizek elvezetésével csökkenti a felszíni vízborítást és így a beszivárgást, a talajnedvesség, vagy a talajvíz megcsapolásával pedig a talajba már bejutott fölös vizet gyűjti össze. A két műveletet úgy kell végrehajtanunk, hogy egyben biztosítsuk a termőrétegben a függőlegesen lefelé irányuló szivárgás domináló voltát, és ezzel meggátoljuk a felszín közelében a sófelhalmozódást, sőt — ha lehetséges — fokozzuk a káros sók kilugozódását. A vázolt műszaki tevékenység tervezéséhez és helyes üzeméhez elvi alapot a talajnedvesség áramlását és tározódását befolyásoló fizikai folyamatok megismerése nyújt.

2. A talajnedvesség mozgása folytonos porózus közegben

A hidrodinamika két alapegyenletre épül: az energia megmaradását a mozgás-egyenlet (pl. a NAVIER-STOKES egyenlet) fejezi ki, az anyag megmaradását pedig a kontinuitási egyenlet. A kinematikai jellemzés érdekében ezt a két egyenletet kell megoldanunk, figyelembe véve egyidejűleg a folyadék és a szilárd fal mentén kialakuló határfeltételeket is. Ezt csak akkor remélhetjük, ha a vizet szállító elem alakja szabályos (cső, vagy prizmatikus meder). A pórusokból felépülő, folytonosan változó irányú és méretű csatornáknban a tényleges határfeltételeket nem vonhatjuk be számításainkba. Ezért sosem törekszünk a víz kanyargós pályájának meghatározására, hanem az áramlási teret egységes és folytonos vízszállító rendszernek tekintjük, amelynek ellenállását a pórusok hálózatának szerkezete szabja meg. A határfeltételeket csak a mező vízzáró határolása mentén vesszük figyelembe, és számítjuk az áramlás fő irányát, valamint az erre merőleges felület-egységen áthaladó vízhozamot, a rendszer q fluxusát (3. ábra).

Ez a közelítés — a folytonos mező elvének alkalmazása a porózus áramlási tér jellemzésére — minden szivárgási számítás alapja. Ha ezt kiegészítjük azzal a hipotézissel, hogy az áramlás lamináris (két erő dominál, a mozgást létrehozó és fenntartó gravitáció, valamint az ellene ható surlódás) a Navier—Stokes egyenlet a Darcy-féle összefüggésre egyszerűsíthető, amely szerint a fluxus egyenesen arányos a potenciál-magasság gradiensevel. KOZENY igazolta,

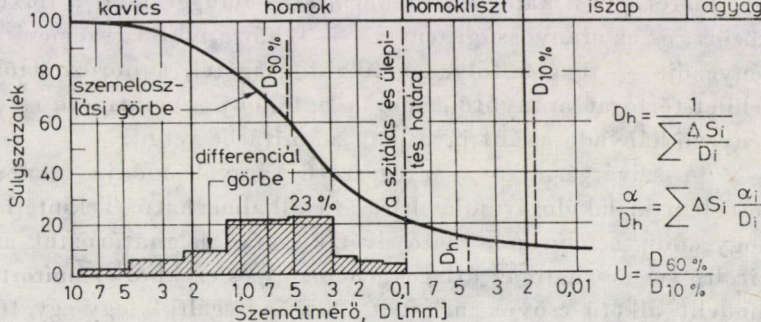


3. ábra

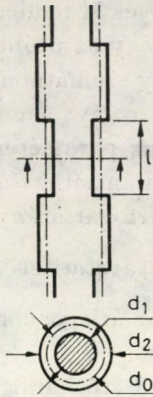
hogy az arányossági tényező az n porozitástól, valamint a szemcsék A felületének és V térfogatának hányadosától függ. Annak érdekében, hogy az utóbbit könnyen mérhető adatokból számíthassuk, bevezette a hatékony szemátmérőt (D_h ; az azonosan ilyen átmérőjű gömbökből alkotott minta A/V aránya azonos a jellemezni kívánt, különböző átmérőjű gömbökből álló halmaz paraméterével.) Hogy elgondolását nem gömb-alakú szemcsékre is általánosíthassuk, javasoltuk olyan alaki tényező alkalmazását, amely a felület-térfogat arányának és az átmérőnek a szorzata ($\alpha = \frac{A}{V} D$). Nagyszámú minta statisztikai elemzése alapján eljárást is adtunk a hatékony szemátmérő és az átlagos alaki tényező gyakorlati számítására (4. ábra).

Említettük már, hogy a szabálytalan csatornák mentén ható határfel-
tégeket nem vehetjük számításba. Olyan geometriai modellt kell keresnünk, amely viszonylag egyszerű elemekből épül fel és hidraulikailag egyenértékű az eredeti rendszerrel. Kielégítő eredményt kapunk, ha a járatokat az áramlással párhuzamos egyenes tengelyű csövekkel helyettesítjük, feltételezve, hogy egységnyi felületen N darab cső halad keresztül és a csövek kétféle átmérőjű,

átlagos folyóvízi üledék		8 - 11	9 - 12	10 - 15	12 - 17	15 - 50
agyag ásványok	montm.					70- 100
	Na montm.					700-1000
	illit					20- 60
	kaolinit					30- 70
	halloisit					40-100
csillám		20 - 50	20 - 50	20 - 50	20 - 50	
metamorf kőzet törmelék	folyóvízi	11 - 15				
	lejttö	12 - 20				
vulkáni kőzet törmelék	folyóvízi	9,5 - 11,5				
	lejttö	11 - 13				
homokkő	folyóvízi	9,5 - 11,5				
	lejttö	11 - 13				
mészkő	folyóvízi	10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 12
	lejttö	11,5 - 13,5	12 - 14			
kvarc	folyóvízi	8 - 10	9 - 11	9 - 11	9 - 11	9 - 11
	szélhordta		7 - 9	7 - 9	7 - 9	
	lejttö	9,5 - 11,5	10 - 12			
		kavics	homok	homokliszt	iszap	agyag



4. ábra

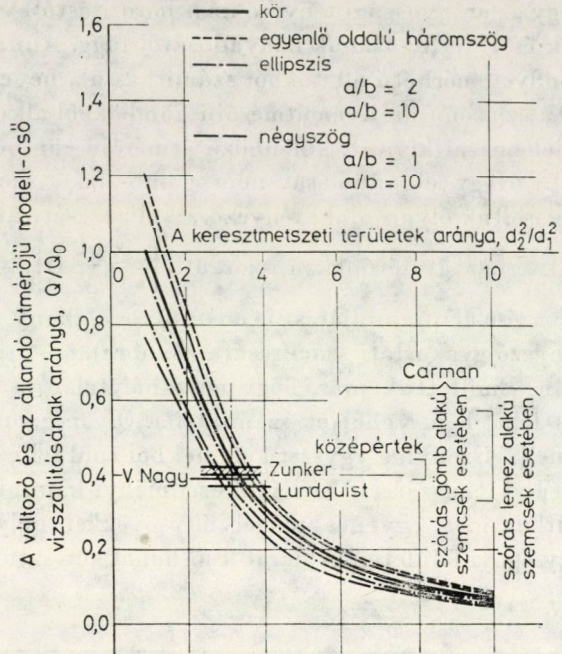


$$d_0 = 4 \frac{n}{1-n} \frac{D_h}{\alpha}; \quad N = \frac{4n}{d_0^2 \pi}$$

$$l = (1-1,5) d_0$$

$$d_1 = 0,667 d_0; \quad d_2 = 1,25 d_0$$

$$K = \frac{1}{5} \frac{g}{\nu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \left(\frac{D_h}{\alpha} \right)^2$$



5. ábra

rövid szakaszokból tevődnek össze (5. ábra). A d_0 átlagos csőátmérőt, a két tényleges méretet a d_1 és a d_2 átmérőt, valamint a csőszámot két feltétel figyelembe vételével számíthatjuk:

- a felület-térfogat arány a modellben és a tényleges rendszerben egyenlő legyen;
- a felület áttörtsége (a csövek számának és átlagos felületének szorzata) azonos legyen a közeg porozitásával.

A mozgás lamináris, tehát a csövek vízszállítását meghatározhatjuk a gradiens függvényében, alkalmazva dinamikai modellként a Poiseuille-egyenletet. Ez a kapcsolat is lineáris összefüggést ad a fluxus és a gradiens között, és az arányossági tényező — tehát a telített szemcsés réteg szivárgási tényezője — függ a folyadék tulajdonságától, a porozitástól és a szemcsék felület-térfogat arányától, amit a hatékony szemátmérő és az átlagos alakú tényező hányadosaként javasolunk számításba venni.

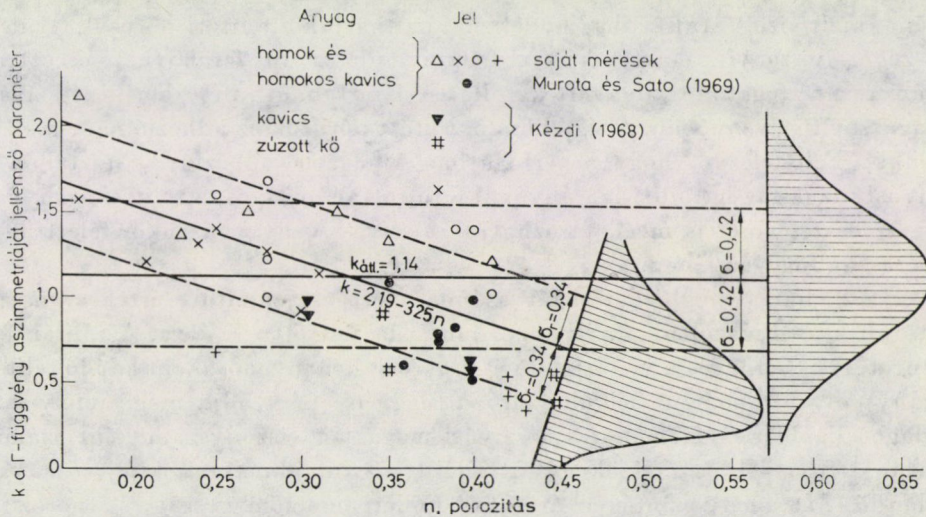
A szivárgásnak ez az egyszerű tárgyalásmódja azonban csak telített rétegben kialakuló áramlás leírására alkalmazható. Tekintetbe kell vennünk, hogy eddig a folytonos mező elvét követve meghatároztuk az áramlási teret kitöltő szemcsehalmaz átlagos jellemzőit és ezekből számítottuk a geometriai modellt alkotó csövek méreteit. Nem vizsgáltuk egy-egy térfogat-egységen belül a járatok átmérőjének változékonyságát, hiszen csak egy átlagos para-

méternek — a szivárgási tényezőnek — meghatározására törekedtünk, és ezért a modellt azonos csövekből építhettük fel. Ez az egyszerűsítés azonban két esetben nem fogadható el:

— ha a járatok mérete olyan nagymértékben változik, hogy ez már befolyásolja az egyes csatornában kialakuló áramlás jellegét (a mezőn belül egymás mellett találunk lamináris, átmeneti és turbulens mozgást);

— ha a tényleges áramlási keresztmetszetet, és ezzel a vizet vezető csatorna vízszállító képességét a járat mérete alapvetően befolyásolja.

Az egyedi szemcsékből felépülő szilárd váz tömegében a pórusok általában egyenletesen eloszlottak és véletlen jelleggel kapcsolódnak egymáshoz. Mérettartományuk sem túl nagy, a valószínűen nagy és kis pórusok átmérőjének aránya ritkán haladja meg az egy nagyságrendet. Telítetlen rétegben azonban a részleges telítés mértéke és így a vízszállítás jellege függ a pórus-mérettől: a kis pórusokat a kapillaritás teljesen kitölti vízzel, a nagyoknak csak a falát fedi adhéziós vízfilm. Módszert dolgoztunk ki, amely lehetőséget ad arra, hogy a járatok számának méret-szerinti valószínűségi eloszlását leíró statisztikai modellel egészítsük ki az előzőekben vázolt geometriai és dinamikai modellt. Ennek segítségével a szivárgás tárgyalását azokra az esetekre is kiterjeszthetjük, amelyekben a korábbi egyszerűsítés alkalmazását az említett két kizáró ok valamelyike gátolja. Úgy találtuk, hogy laza szemcsés üledék esetében a d átmérőjű pórusok számának az összes pórus-számhoz viszonyított arányát jellemző eloszlás Γ függvénnyel írható le, sőt — minthogy annak k paramétere közel egységnyi — az exponenciális függvény is kielégítő közelítést ad (6. ábra).

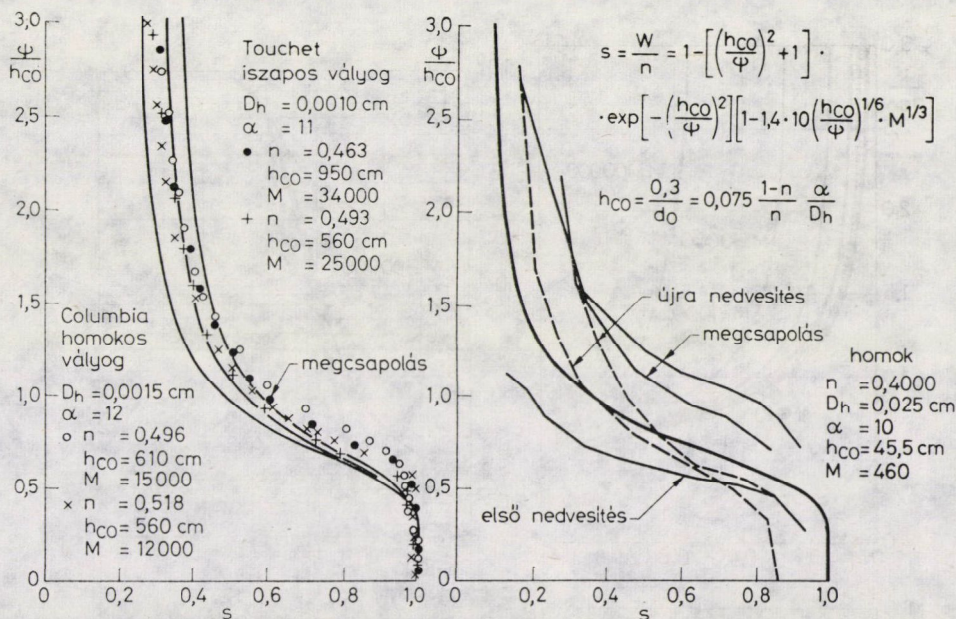


6. ábra

Figyelembe kell vennünk, hogy a két alapegyenlet szerkezete is változik, ha telítetlen rétegben kialakuló szivárgást vizsgálunk. Bár a folyadék-fázisban kialakuló konvektív áramláshoz viszonyítva a többi mozgás-forma (a diffúzív vízszállítás és a vízgőz áramlása) elhanyagolható, tehát a Darcy-törvény ekkor is alkalmazható, a potenciál-magasság azonban — amelynek gradiense a mozgást létrehozó hatás mérőszáma — ebben az esetben a geodéziai magasságnak és a szívási magasságnak a különbsége, az utóbbi pedig a vizsgált pont környezetének víztartalmától függ. A szivárgási tényező is kisebb, ha a közeg csak részlegesen telített, és értéke vagy a víztartalommal, vagy a szívással hozható kapcsolatba. Végül a kontinuitási egyenletben is figyelembe kell vennünk a telítettség mértékét, hiszen ebben a rendszerben az anyag megmaradását a fluxus térbeli változásának a víztartalom időbeli változásával való egyenlősége fejezi ki. Összefoglalásként tehát megállapíthatjuk, hogy a telítetlen talajrétegben, akár a víztartalom statikus egyensúlyát, akár áramlását kívánjuk jellemezni, ismernünk kell a három alapvető jellemző — a víztartalom, a szívás és a szivárgási tényező — közötti kapcsolatot. A javasolt geometriai, dinamikai és statisztikai modell együttes alkalmazásával ezeket az összefüggéseket meghatározhatjuk.

A szívás és a nedvességtartalom közötti kapcsolatot általában a retenciós görbével (pF görbével) jellemezzük. Minthogy a gravitáció hatását két molekuláris erő — a kapillaritás és az adhézió — ellensúlyozza, a görbét két komponens összegzéseként kell megszerkesztenünk. A kapillárisan telített pórusok arányát annak figyelembe vételével számíthatjuk, hogy a kapilláris magasság fordítottan arányos a pórus-átmérővel. A pórusok teljes száma adott magasságban (vagy adott szívás esetében) egy határ-átmérővel két csoportra osztható, a kisebbeket a kapillaritás teljesen kitölti, a nagyobbakban nincs kapillárisan emelt víz. A statisztikai modellel számíthatjuk a telített pórusok területösszegét, viszonyítva azt a keresztmetszet teljes pórus-felületéhez, és ezt az arányt, a térfogatban kifejezett kapilláris víztartalmat kifejezhetjük a szívási magasság függvényében. Az így ki nem töltött pórusok az adhézió hatása alatt állnak. Feltételezve, hogy a térfogatban kifejezett adhéziós víztartalom a szívási magasság hatodik hatványával fordítottan arányos, a telítési aránynak ezt az összetevőjét is meghatározhatjuk a szívás, vagy a víztükör felett mért magasság függvényében.

Az eljárás megbízhatóságát számos mért és számított értéksor összehasonlításával igazoltuk. Ezek közül mutat be kettőt a 7. ábra. Az ábrán feltüntetett összefüggés a víztartalom és a porozitás hányadosaként adódó telítési arányt olyan dimenzió nélküli változó függvényeként adja meg, amelyet az átlagos kapilláris vízemelés és a szívási magasság viszonzyszámaként számíthatunk. Szerepel ezen kívül egy, a szilárd váz tulajdonságait kifejező anyagi állandó (M), amely szintén az átlagos kapilláris emelőmagasság és a porozitás függvénye. Meghatároztuk a kapilláris emelőmagasság és a szemcsés réteg

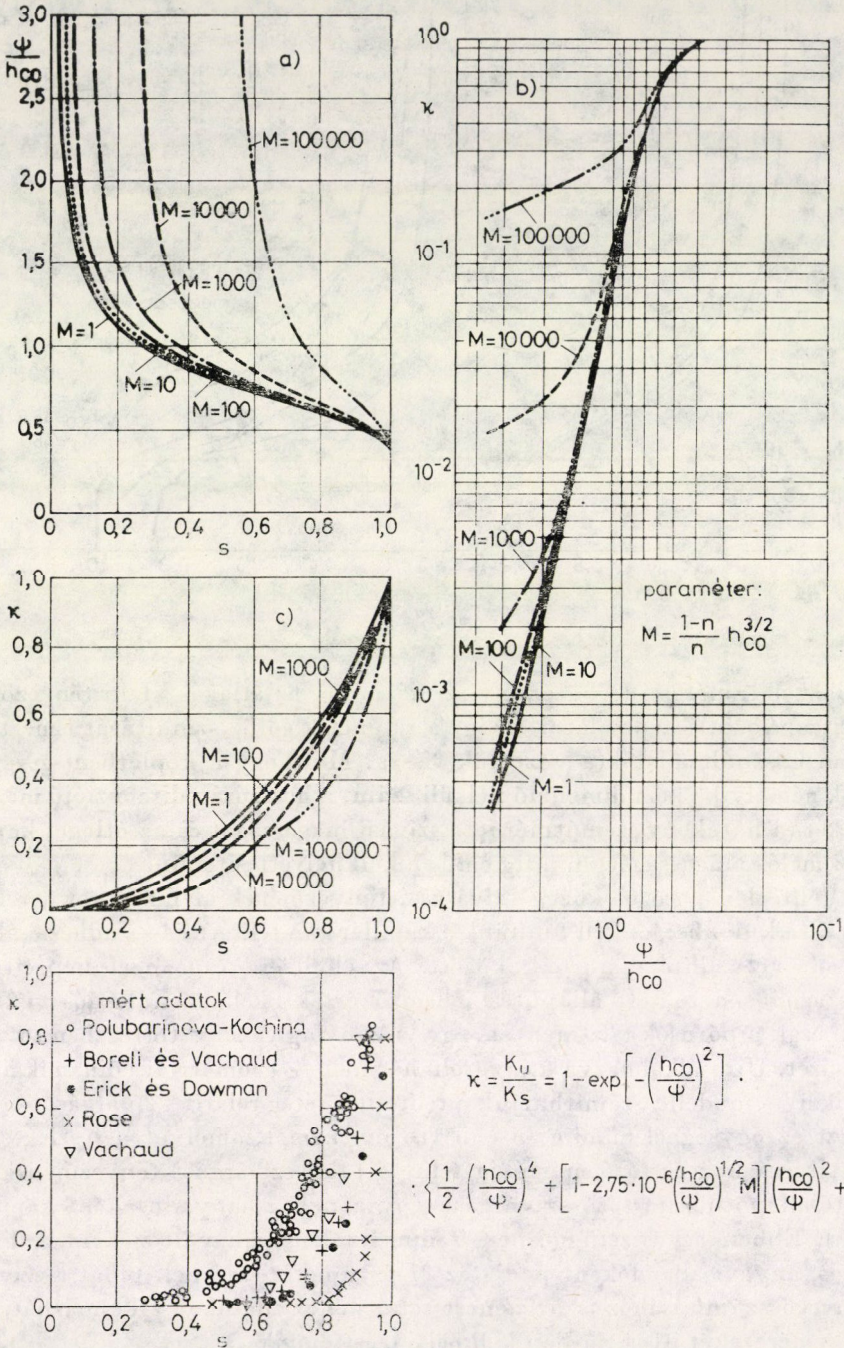


7. ábra

talajfizikai paramétereit (a hatékony szemátmérőt, az átlagos alakú tényező és a porozitás) közötti kapcsolatot is, így a retenciós görbe számítását ismert és általában használt adatokra vezettük vissza. Minthogy a képletben szereplő állandók némelyike nem dimenzió nélküli szám, a hosszúság dimenziójú mennyiségeket (a hatékony szemátmérőt, a szívási magasságot és az átlagos kapilláris vízemelés magasságát) mindig cm-ben kell helyettesítenünk.

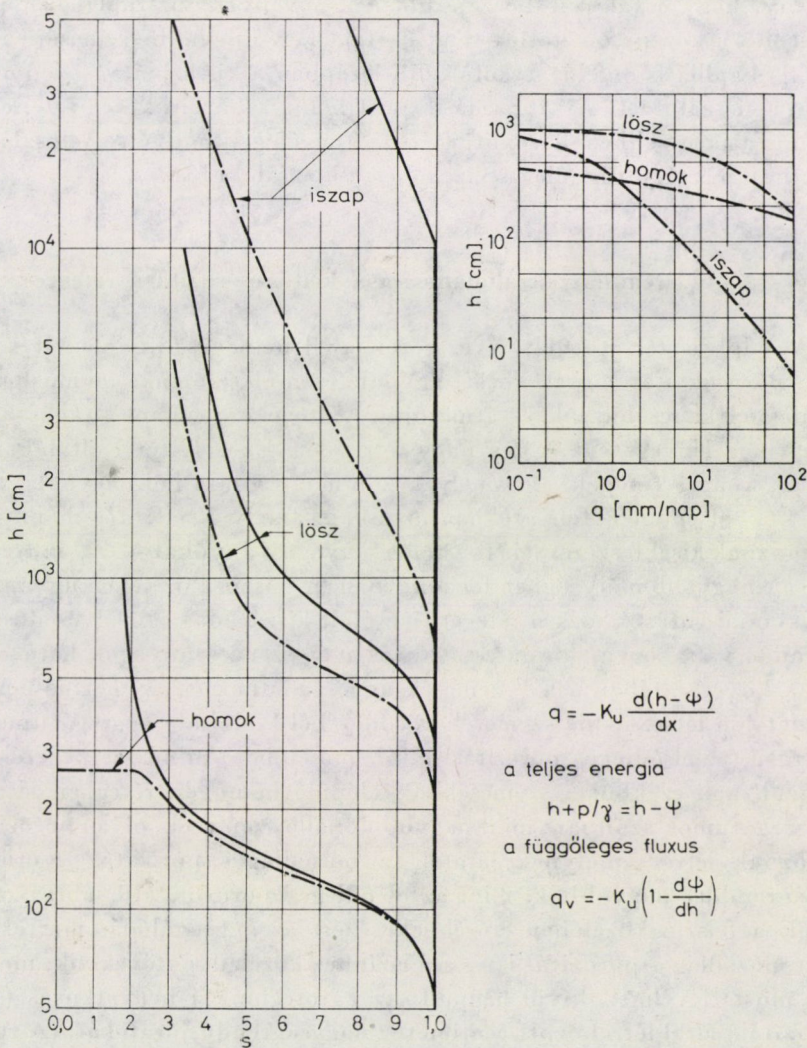
A telítetlen porózus közeg szivárgási tényezőjének elemzésekor a rendszerben újra különbséget kell tennünk a kapillárisan telített és az adhézió által befolyásolt vízszállító csatornák között. Az előbbieket transzport kapacitása ugyanis azonos a telített állapotra jellemző értékekkel, az adhéziós vízfilm azonban csak a pórusok fala mentén, egy viszonylag vékony rétegben továbbítja a vizet. Újra alkalmazva a javasolt hármas — geometriai, dinamikai és statisztikai — modellt, számíthatjuk a telítetlen réteg relatív szivárgási tényezőjét, azt az egységénél mindig kisebb viszonyszámot, amelyet a részlegesen, az adott sziváshoz tartozó mértékig telített talaj szivárgási tényezőjének és a telített állapothoz tartozó szivárgási tényezőnek a hányadosaként kapunk (8. ábra). Ebben az összefüggésben is dimenzió nélküli változóként a h_{CO}/ψ hányados, anyagi állandóként pedig az M paraméter szerepel, tehát a szivárgási tényező számításához is az ismert talajfizikai adatokat alkalmazhatjuk, és a hosszúságokat itt is cm-ben kell helyettesítenünk.

Az így meghatározott összefüggések birtokában az alapegyenletekbe mind a szivárgási tényezőt, mind a víztartalmat a szivás függvényeként helyet-



8. ábra

tesíthetjük. Így olyan differenciál-egyenlet rendszerhez jutunk, amely a helykoordinátáktól — és nem permanens mozgás esetében az időtől — függően a feladat jellegét megszabó határ- és kezdeti-feltételek figyelembe vételével, minden pontban számíthatóvá teszi a szívás értékét, ennek ismeretében pedig meghatározhatjuk a keresett hidraulikai paramétereket: az áramlás sebességét és fluxusát, valamint a vizsgált térben a potenciál eloszlását. Ezzel jellemezhetővé válik a gravitáció és a feszültség-különbség hatására létrejövő bármilyen irányú és jellegű vízmozgás. A megoldás csak az egyszerű esetekben adható meg zárt analitikai alakban, a numerikus eljárások azonban lehető-



9. ábra

séget adnak arra, hogy minden, a gyakorlatban felmerülő kérdésre választ adjunk.

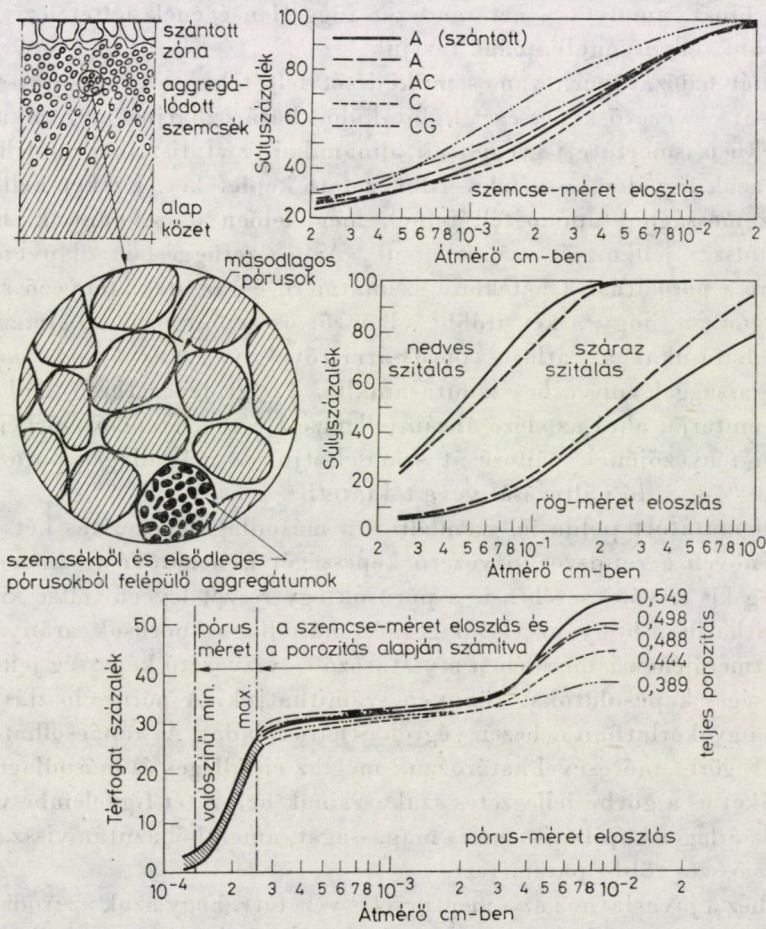
A 9. ábrán egy egyszerű áramlási forma számszerű jellemzését mutatjuk be. A talajvíz tükréről függőlegesen felfelé irányú permanens áramlást vizsgálunk annak szemléltetésére, hogy ez a folyamat milyen mértékben vehet részt a növények vízigényének fedezésében a réteg minőségétől és a víztükör mélységétől függően. Három különböző talajt — homokot, lösz réteget és finom iszapot — hasonlítunk össze. A vizsgálat első része azt szemlélteti, hogy átlagosan $pF = 3, 0$ értékű szívást tételezve fel a felszínen (illetőleg a gyökérszónában) hogyan változik a fluxus a víztükör mélységétől függően. Érdekes eredmény, hogy a talajvíz hozzájárulása a növények víz-táplálásához a legjelentősebb a közepesen kötött talaj esetében. A durvább szemcséjű rétegekben a kis kapillaris emelés, a kötöttebb iszapban a kis szivárgási tényező korlátozza a vízszállítást. Az ábra másik grafikonja a három közeg retenciós görbáját mutatja és ehhez hasonlítja azt a függőleges nedvesség-eloszlást, ami 10 mm/nap mértékű függőleges vízemelés esetén alakul ki.

3. Az eredmények általánosítása kettős-porozitású rétegre

Az eddig ismertetett elvi levezetések egyik lényeges kiinduló feltétele volt, hogy a pórusok a szemcsék között egyenletesen eloszlottak, egymáshoz véletlen jelleggel kapcsolódnak és átmérőjük változékonyságának tágassága nem haladja meg lényegesen az egy nagyságrendet. Ez a feltétel általában kielégített azokban a rétegekben, amelyek zömmel 0,1 mm-nél nagyobb átmérőjű részecskékből épülnek fel, azokban azonban, amelyek jelentős mennyiségben tartalmaznak kisebb szemcséket — főleg agyagásványokat — az említett közeletés csak nagyobb mélységben fogadható el. A felszín közelében ugyanis olyan fiziko-kémiai hatások érik a réteget (ismételt kiszáradás és nedvesedés, fagyás és olvadás váltakozva, humusz-savak és más szerves anyagok hatása), amelyeknek következtében a kis szemcsék aggregálódnak és így kettős porozitású szerkezet jön létre. A kis szemcsék kötődéséből kialakuló aggregátumok belső porozitása (az elsődleges porozitás) mind méretében, mind szerkezetében azonos azzal, ami ezekből a szemcsékből felépülő homogén rétegben létrejönne. Az aggregátumok azonban, mint nagyobb önálló szemcsék, olyan porózus közeget hoznak létre, amelynek járatai (a másodlagos porozitás) esetleg több nagyságrenddel nagyobbak, mint az elsődleges pórusok (10. ábra). A külső hatások a felszín közelében erősebbek, ezért az aggregálódás mértéke — és ezzel a másodlagos porozitás is — a felszínhez közeledve növekszik, még akkor is, ha most figyelmen kívül hagyjuk az agrotechnikai beavatkozás (szántás, mélylazítás) által létrehozott centiméter nagyságrendű járatokat. (A rendszernek ezt a harmadlagos porozitását, amely a legfelső néhány dm mély rétegre

jellemző, azért nem vizsgáljuk most részleteiben, mert általános az a vélemény, hogy a talajnedvesség zónájának fizikai vizsgálatába nem vonhatjuk be azoknak a jelenségeknek az elemzését, amelyek a megművelt legfelső rétegben alakulnak ki. A szerkezet módosulásán kívül kizárja ezt a hatótényezők változása is, a fiziológiai — biológiai és kémiai — folyamatok dominánsá válnak itt és az izotermális állapot feltételezése sem elfogadható).

A másodlagos porozitás alakulását a talajszelvényben jól szemlélteti a különböző szintekre jellemző pórus-méret eloszlási görbék összehasonlítása (10. ábra). A vizsgált esetben az egyedi szemcsék által közrezárt elsődleges pórusok — amelyek jellemzőek mind az anyakőzetre, mind az aggregátumok belső porozitására — a teljes térfogatnak mintegy 30%-át adják ($n_1 = 0,30$ elsődleges porozitás). Ezeknek a pórusoknak mérete $1 \cdot 10^{-4}$ és $3 \cdot 10^{-4}$ cm között változik. Az aggregátumok közötti csatornákból alkotott másodlagos porozitás



10. ábra

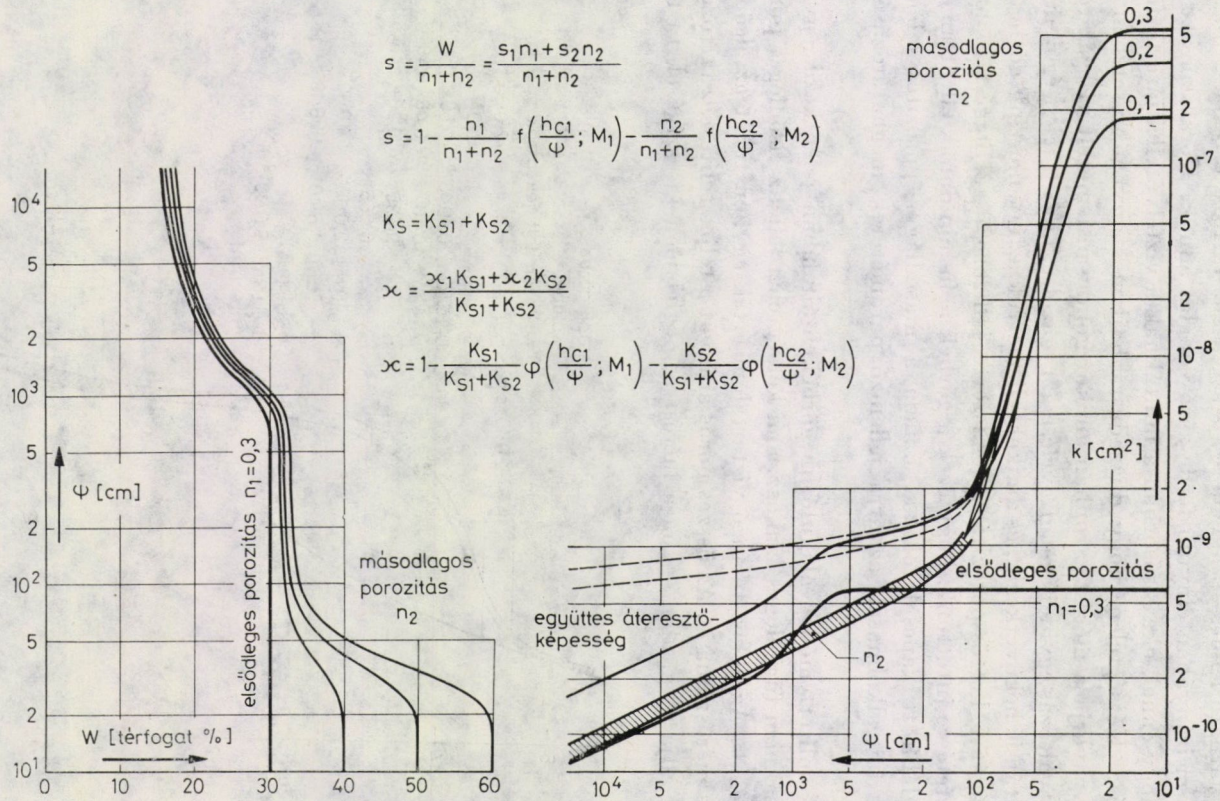
zérustól $n_2 = 0,25$ -ig növekszik, amint az alaprétegtől a felszín felé haladunk. Ezeknek a másodlagos pórusoknak a mérete is jelentősen nagyobb, mint az elsődlegeseké ($4 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2}$ cm), méretük azonban jelzi azt is, hogy az agrotechnikai eszközökkel létrehozott nagy járatok nincsenek figyelembe véve ebben a vizsgálatban.

Annak érdekében, hogy az eddig bemutatott kapcsolatokat kettős porozitású közegre is általánosíthassuk, tételezzük fel, hogy a két pórus-rendszer egymástól független, egymás mellett párhuzamosan működő járat-hálózatot alkot. A retenciós görbe szerkesztésekor ez a közelítés ellentetés nélkül elfogadható, hiszen a pórusok telítődésében a szomszédos járatoknak viszonylag kevés szerepük van, legfeljebb a folyamat időbeli lefolyását befolyásolják. Az áramlás alakulásában viszont már jelentős lehet az a tény, hogy a nagyobb járatok a kis pórusok hálózatát megszakíthatják. Minthogy azonban az utóbbiak vízszállító képessége nagyságrendekkel kisebb, mint a másodlagos porozitásé, a hibát, amelyet a két rendszer függetlenségének feltételezésével elkövethetünk, elhanyagolhatónak tartjuk.

A két hálózat párhuzamos működését feltételezve, azok vízvisszatartó kapacitását és vezető-képességét külön-külön határozhatjuk meg, alkalmazva az előzőekben ismertetett geometriai, dinamikai és statisztikai modellt, valamint az azok figyelembe vételével levezetett képleteket. Ezeket kell azután a párhuzamosságból adódó feltételnek megfelelően összevonnunk, hogy az eredő rendszer jellemzőit számíthassuk. Az összefüggésben alapvető paraméterként a porozitás, a hatékony szemátmérő és az alaki tényező szerepel. Láttuk azonban, hogy a két utóbbi jellemzőt összevontan is alkalmazhatjuk, együttes hatásukat az átlagos pórus-átmérővel, vagy az átlagos kapilláris emelőmagassággal vonva be számításainkba. Az így levezethető képleteket a 11. ábra mutatja, ahol az előző ábrán jellemzett réteg retenciós görbéjének és szívárgási tényezőjének változását szemléltetjük a másodlagos porozitásnak zérustól 30%-ig való változását véve tekintetbe.

A bemutatott példa jól szemlélteti a másodlagos porozitás két jelentős hatását: növeli a rendszer vízvezető képességét és lehetővé teszi, hogy már viszonylag kis szívás esetében is a pórusok egy részét levegő töltse ki. Azt is megállapíthatjuk, hogy az elsődleges és másodlagos pórusok arányának és átlagos átmérőjének ismeretében a víztározó és vízvezető képesség jellemzéséhez szükséges kapcsolatokat könnyen számíthatjuk. A pórus-eloszlás mérése azonban a gyakorlatban nehezen végrehajtható feladat. Az tanácsolható tehát, hogy a pF görbe mérésével határozzuk meg az elsődleges és másodlagos porozitás értékét és a görbe jellegzetes szakaszainak helyzetét figyelembe véve becsüljük az átlagos kapilláris emelés magasságát, amelyből azután visszaszámíthatjuk az összes többi paramétert.

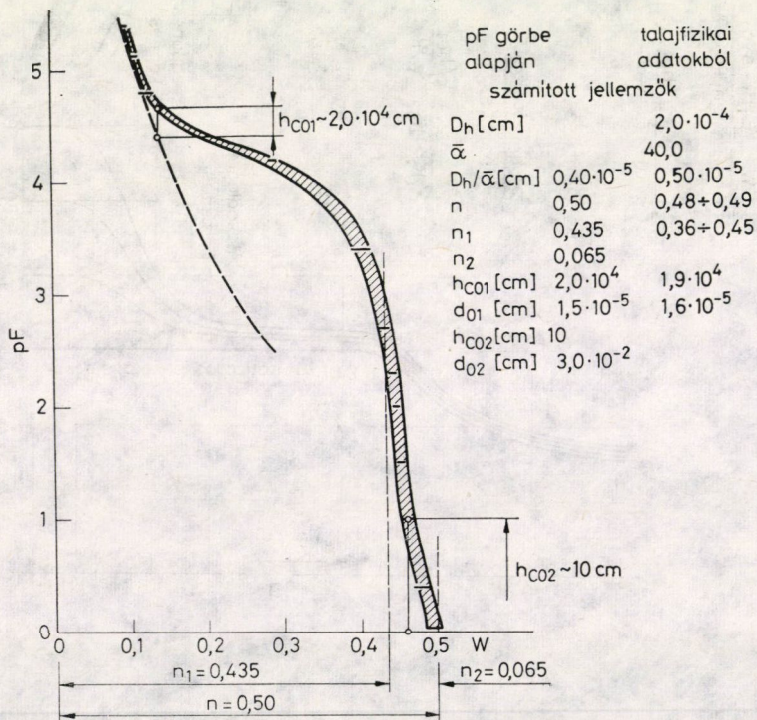
Ehhez a javaslatához az a megfigyelés vezetett, hogy azok az irodalomban közölt pF görbék, amelyeket a homok-frakciónál finomabb szemcséjű anyago-



11. ábra

kon mérték, a legtöbbször nem záródnak határozott függőleges szakasszal valamely meghatározott porozitás-értékeknél — amint ez homogén szemcsehalmaz esetében várható lenne —, hanem a kis szíváshoz tartozó értékek a nagyobb víztartalom irányában elnyúló ferde záró-vonalat adnak. Korábban azt gondoltuk, hogy ennek oka elsősorban a mintáknak a vízfelvétellel járó térfogatnövekedése. Kétségtelen, hogy duzzadásra hajlamos anyagok esetében ez a folyamat zavarja a mérést, azonban amikor gondosan ismételt vizsgálatok és a térfogatváltozás egyidejű megfigyelése azt igazolta, hogy a jelenség nem duzzadó mintán is bekövetkezik, és amikor felismertük az így mért pF görbe nagyhasonlóságát a kettős-porozitású rendszerre jellemző összefüggéshez, arra a következtetésre jutottunk, hogy ezek a görbék nem mondanak ellent az elméletileg felállított kapcsolatoknak, hanem a másodlagos porozitás jelenlétét jelzik, és így alkalmasak az arra jellemző paraméterek meghatározására is (12. ábra).

Az említett módon alakuló pF görbéken általában jelentkezik egy közbenső, csaknem függőleges szakasz, ami kétségtelen jele az elsődleges pórusok telítődésének. Az ehhez tartozó víztartalom érték egyben tehát az elsődleges porozitás mérőszáma is. Az összes pórus arányát a teljes telítéshez tartozó víztartalom adja meg, ahol — ha a mérést a megfelelően kis szívások tartomá-



12. ábra

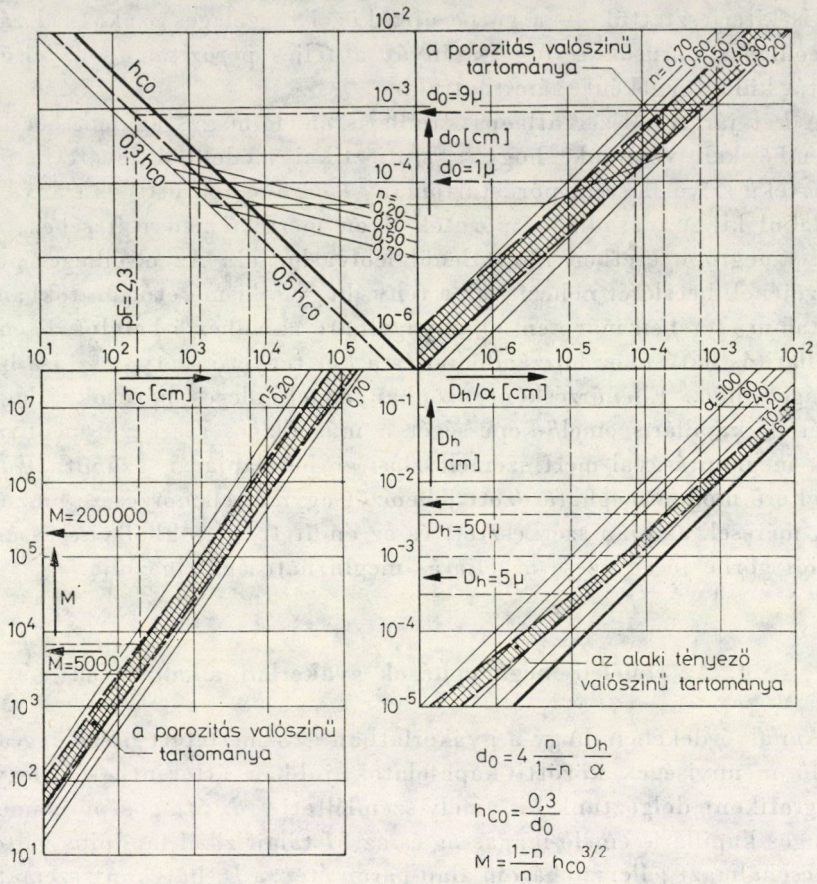
nyára is kiterjesztettük — a görbe újra közel függőleges szakasszal záródik. A másodlagos pórusok térfogat-arányát a teljes porozitás és az elsődleges porozitás különbségeként számíthatjuk.

A két járatrendszer átlagos kapilláris emelő-magasságának becslésekor figyelembe kell vennünk, hogy a statisztikai modellből levezethetően az egyenértékű szívás a saját pórustartomány $\sim 1/3$ -os telítettségi aránya esetében alakul ki. A másodlagos pórusok ilyen mértékű nedvesítéséhez tartozó szívást a legtöbb esetben közvetlenül leolvashatjuk. Az elsődleges pórusok jellemzőjének becslését nehezíti az a tény, hogy a kisméretű járatokban ilyen víztartalom esetében már nem elhanyagolható az adhézió befolyása sem, ami a kapillaritás hatásához hozzáadódik, és a két tényező szétválasztása bizonytalanságot okoz. Ellenőrzésként azonban az elsődleges pórusok átlagos átmérőjét és kapilláris emelő-képességét a másodlagos szerkezet peptizálással történt megbontásával mért szemeloszlási görbe alapján is számíthatjuk, így a két eltérő módon meghatározott jellemzőt egymás ellenőrzésére használhatjuk. A mérések alapján szerkesztett és az említett adatokból visszaszámított retenciós görbe jó egyezése az eljárás megbízhatóságát igazolja.

4. Az elméleti megállapítások gyakorlati alkalmazása

Annak érdekében, hogy a gyakorlatban az ismertetett összefüggésekben szereplő mennyiségek közötti kapcsolatok jobban áttekinthetők legyenek, olyan grafikont dolgoztunk ki, amely szemlélteti a d_0 átlagos pórus-méret, a h_{co} átlagos kapilláris emelő-magasság és az M talajfizikai modulus változását a szemcsehalmazt jellemző három alap-paraméter: a D_h hatékony szemátmérő, az α átlagos alaki tényező és az n porozitás függvényében (13. ábra).

Az ábrát kiegészítettük még egy kapcsolati vonal-sereggel, amely a levegő-felvétel kezdetéhez tartozó szívási magasságot adja meg az átlagos pórusátmérő függvényében. Ez az a határérték, amelynél kisebb szívás esetében a pórusok teljesen, vagy csaknem teljesen vízzel telítettek (a zárt kapilláris zóna magassága). Meghatározása a kevéssé kötött talajokban nagyon egyszerű: több vizsgálat igazolta, hogy nagyságát az átlagos kapilláris szívás 0,3-szorosára becsülhetjük, bár a gyakorlat számára inkább a 0,5 h_{co} határ figyelembe vétele javasolható, amely fölött a pórusok levegő-tartalma az 5%-ot már meghaladja. Finomabb szemcséjű rétegekben, amelyeknek M modulusa $200\,000\text{ cm}^{3/2}$ értéknél nagyobb ($d_0 < 0,6 \div 2\ \mu$ és $D_h < 3 \div 10\ \mu$), az adhézió a kapillaritás hatását már elfedi, a vízfilm telíti azokat a pórusokat is, amelyek kapillárisan telítetlenek maradnának. Ebben a tartományban a levegőtlen állapot határát jellemző szívás a pórusméret csökkenésével rohamosan növekszik és függvénye porozitásnak is. A levegő-ellátottság jellegében bekövetkező változást figyelembe véve javasolható, hogy a talajok osztályo-



13. ábra

zásakor az erősen kötött talajok tartományának határát ennek a jelenségnek az alapján jelöljük ki. Bár a hatékony szemátmérő nem rendelhető egyértelműen meghatározott súlyszázalékhoz — az eloszlás egyenletességétől függően értéke általában a 10%-os és a 20%-os átmérő között helyezkedik el — átlagos adottságokat véve számításba, a gyakorlat számára rögzíthetjük, hogy a csak elsődleges porozitással rendelkező rétegben a levegőfelvételhez tartozó szívást az adhéziós erő határozza meg, ha a halmazban az 5 μ-nál kisebb szemcsék aránya a 15 súlyszázalékot meghaladja, ezeket a talajokat nevezzük tehát erősen kötötteknek.

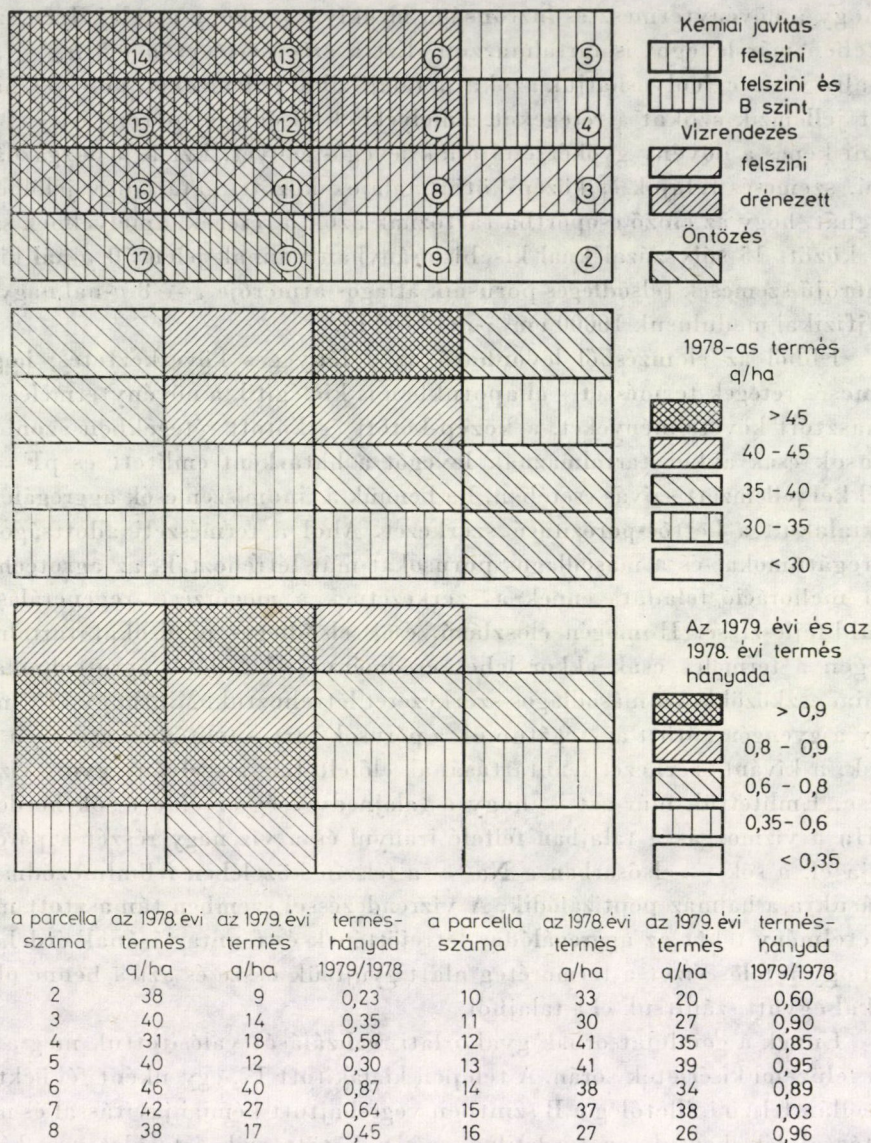
A gyakorlat számára másik fontos megállapításhoz jutunk, ha a levegőfelvételhez tartozó határszívás abszolút értékét vizsgáljuk. Ismeretes, hogy a vízkapacitást általában a $pF = 2,3$ értékhez tartozó (tehát 200 cm-es vízoszloppal egyenértékű) szívás hatására kialakuló víztartalommal azonosítják,

és hogy a növénytermesztés biztonsága megkívánja, hogy a talaj ilyen szívás esetében már levegőt is tartalmazzon. Ezt a szívásértéket a $0,5 h_{co}$ v. s. d_0 vonalra vetítve, leolvashatjuk azokat a talajfizikai jellemzőket, amelyek határként jellemzik azokat a rétegeket, amelyeknek elsődleges porozitása is biztosítani képes a növény gyökérzónájának levegő-igényét. Ezt a jó vízgazdálkodású, szemcsés talajok és közép-kötött talajok közötti határt úgy jelölhetjük ki tehát, hogy az előző csoportba tartoznak azok a rétegek, amelyeknek szemcséi között 15 súlyszázaléknál kisebb arányban vannak jelen 50μ -nál kisebb átmérőjű szemcsék (elsődleges pórusaik átlagos átmérője $7 \div 8 \mu$ -nál nagyobb, talajfizikai modulusuk $10000 \text{ cm}^{3/2}$ -nél kisebb).

Ebből az elemzésből levonható az a lényeges következtetés, hogy a szemcsés rétegek természetes állapotukban is kielégítik a növénytermelés által támasztott követelményeket, a közép-kötött és kötött rétegekben azonban a pórusok csak akkor tartalmazznak levegőt a határként említett és $pF = 2,3$ értékkel jellemzett szívás esetében, ha bennük a finom szemcsék aggregálódtak és kialakult a kettős-porozitású szerkezet. Ahol a természeti adottságok az aggregátumokat és a másodlagos pórusokat már létrehozták, az agrotechnika és a melioráció feladata ennek a szerkezetnek a megőrzése, regenerálása és továbbfejlesztése. Homogén eloszlású, csak elsődleges pórusokat tartalmazó rétegen a termelés csak akkor lehet eredményes, ha előbb agrotechnikai és kémiai eszközökkel a másodlagos szerkezetet létrehoztuk. Minthogy közismert, hogy a gyengén kötött aggregátumok a pórusok tartós telítődése esetében szét-esnek, a kívánt szerkezet fenntartásának előfeltétele a szelvény gyors víztelepítése. Említettük már azt is, hogy a talajnedvesség az oldott sók hordozója is. Ha a vízmozgás a talajban felfelé irányul és a víz nagy részét a párolgás vonja el, a sók — elsősorban a Na — a felszín közelében felhalmozódnak és hatásukra a halmaz peptizálódik. A vízrendezéssel szemben támasztott másik követelmény tehát az aggregálódás létrejöttének és fenntartásának érdekében az, hogy a fölös vizet a termőréteg alatt gyűjtsük össze és azt a benne oldott sókkal együtt szállítsuk el a talajból.

Ennek a gondolatsornak gyakorlati realizálását valósítottuk meg a karcagi félüzemi kísérletek során. A telepen kialakított 17, egyenként fél hektáros parcellán felszíni, illetőleg a B szintben végrehajtott kémiai javítással és mélylazítással létrehoztuk az eredetileg erősen kötött szikes területen a kívánt szerkezetet. Néhány parcellán különböző sűrűségű drénhálózattal, illetőleg a felszín rendezésével a fölös víz elvezetésének többféle változatát valósítottuk meg. Mindegyik beavatkozást két parcellán azonosan hajtottuk végre, az egyiket öntözést, a másikon szárazgazdálkodást alkalmazva. A kontroll-parcellán csak digózást és mélylazítást végeztünk.

A kísérleti telep kiépítése mintegy három évet igényelt. Az első termést (őszi búzát) 1978-ban takarítottuk be. 1979-ben az előre tervezett vetésforgónak megfelelően ugyancsak őszi búza volt a területen. Korai lenne két éves



14. ábra

terméseredményből mélyreható következtetések levonása, az adatok azonban máris utalnak néhány valószínűsíthető összefüggésre (14. ábra):

— a korábban terméketlen, legelőnek sem alkalmas kerges szikesen az agrotechnikai, a kémiai és a vízügyi melioráció hatására átlagosan 37 (szélső értékben 27—46) mázsa őszi búza volt betakarítható az első évben (a tenyészidőszak nagy csapadéka az öntözés alkalmazását szükségtelessé tette);

— nem mutatkozott szignifikáns eltérés a különböző módon kezelt területek között, bár általában a drénezett területek az átlagnál jobb eredményt adtak, azokról a parcellákról pedig, amelyeken a vízrendezés csak a felszíni elvezetést segítette, vagy amelyeken vízrendezés egyáltalán nem volt, átlagos vagy annál kisebb terményt takarítottunk be, a kis, mintegy 20%-os szórás azonban lehet a helyi adottságok következménye is;

— a második év terméseredményei azonban már határozottan csoportosultak a beavatkozási módok szerint: a csak agrotechnikai és kémiai úton kezelt táblák átlagos hozama az 1978. évinek mindössze 30%-a volt; ott, ahol egyfajta vízügyi beavatkozást is alkalmaztak, ez az arány lényegesen jobb volt, felszíni vízrendezés esetében 40%, öntözés esetében 50%, drénezés esetében pedig 75%; végül ott, ahol gondoskodtunk mind a fölös víz elvezetéséről, mind a vízhiány öntözéses pótlásáról, az 1978. és az 1979. évi termés-eredmény gyakorlatilag azonos volt;

— a teljes hidromelioráció egyes módszereit összehasonlítva, szembe-
tűnő, hogy az öntözést akár felszíni vízrendezéssel, akár drénezéssel — az utóbbit 5 m-es, 10 m-es vagy 15 m-es dréntávolsággal alkalmazva — kiegészítjük, hasonló terméseredményt kapunk, tehát indokolt annak vizsgálata, hogy melyik az a legolcsóbb vízrendezési beavatkozás, amellyel az optimális termés-eredmény még elérhető.

A felsorolt megfigyelések, továbbá a vízrendezéssel elvezetett víz nagy Na tartalma arra utalnak, hogy az agrotechnikai és kémiai beavatkozás a kívánt másodlagos szerkezetet létrehozta, ez azonban tartósan csak ott maradt meg, ahol a fölös vizet és ezzel együtt a káros sók nagy részét is elvezettük. A víz elvonása azonban aszályos évben — mint amilyen az 1979. év volt — vízhiányt okoz és az ezzel járó termésesökkenés csak öntözéssel védhető ki. Csupán az öntözést alkalmazva a hidrotechnikai módszerek közül, a második év termése felére csökkent, feltehetően a talajszerkezet romlása miatt.

Újra utalunk arra a megfigyelésre, hogy a teljes terméseredmény biztosítható volt függetlenül a vízrendezés módjától, ha a fölös vizet elvezettük, a hiányzót pedig öntözéssel pótoltuk. Ebből arra következtethetünk, hogy a mélylazítás a tábla megfelelő esése esetében biztosítja a felső réteg függőleges átmosását és a nagy sótartalmú víz oldalirányú elvezetését. Kétirányú esést hozva létre kisméretű tereprendezéssel a táblát homogénné tehetjük és csak az így létrejövő közbenső vápák alá kell drént helyoznünk, hogy ezek elvezetése a gépek mozgását ne akadályozza. Úgy véljük, hogy ilyenmódon kialakíthatjuk végül a kifejtett elméleti alapok figyelembe vételével az agrotechnikai, a kémiai és a vízügyi meliorációs módoknak azt a legelőnyösebb kombinációját, amely kielégíti a nagyüzemi mezőgazdaság gyakorlati követelményeit, és gazdaságosan biztosítja nemcsak a termésátlagok növelését, hanem a terméseredményeknek a klíma-adottságoktól függően évről-évre tapasztalható szórásának csökkentését is.