

A KÉTFÁZISÚ SZIVÁRGÁS

JUHÁSZ JÓZSEF

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA
KÖZPONTI VÍZGAZDÁLKODÁSI FELÜGYELŐSÉG

[Beérkezett 1967. július 19-én]

A kétfázisú szivárgás legfontosabb problémáját a mikroszivárgás tartományának fizikai-kémiai elméleti és kísérleti vizsgálatában és az áteresztőképességi, vagy szivárgási jellemző meghatározási módjában jelölhetjük meg. Az újabb vizsgálatok már a valószínű hibák vizsgálatára is kiterjednek. Egyre inkább látszik, hogy gyakorlati hidraulikai feladatok meghatározásához korszerű statisztikai módszerek szükségesek. A hasadékos közetekben végbemenő szivárgást illetően ÖLLŐS sík, majd térbeli laboratóriumi karsztmodellje mutatta meg az egyik jól követhető utat. A legközelebbi feladatnak ezen a téren a hasadékos közetek repedéses szerkezetének gondos vizsgálatát, a tehetetlenségi erőket figyelembe vevő szivárgási módszerek kidolgozását és a szivárgási tényezőt helyettesítő szivárgási egyenértékszám meghatározását kell tekintenünk.

1. Bevezetés

A közetben végbemenő kétfázisú szivárgás kutatása -- ami a vizsgálatoknál a legegyszerűbbnek látszik -- közel 250 éves múltja ellenére csak nehezen, lassan jutott előbbre. Azt mondhatjuk, hogy 1832 óta közel 100 éven keresztül egyedül a Darcy-képlet jelentette a kétfázisú szivárgással kapcsolatos minden ismeretünket. Ennek szivárgási tényezőjét próbálták kísérlet helyett a közet egyes jellemzői alapján (hézagterefogat, szemecsenagyság stb.) meghatározni.

Századunk második és harmadik évtizedében azután újabb minőségi ugrás következett. Kísérleti úton vizsgálni kezdték a Darcy-tétel alkalmazási területét és hamar elkülönítették a turbulens, majd az átmeneti szakaszt. Ezek a vizsgálatok még ma is fontos kutatási területei a hidraulikusoknak. Még számos finomítás, sőt alapvető megállapítás van hátra.

Jóval később -- a harmincas évek végén -- kezdtek foglalkozni a kis sebességek, a mikroszivárgás tartományával. Ez a kérdés még ma is megoldatlan, bár pl. Kovács igen értékes elméleti vizsgálatokkal gyarapította ismereteinket. A kétfázisú szivárgás legfontosabb problémáját a mikroszivárgás tartományának fizikai-kémiai elméleti és kísérleti vizsgálatában jelölhetjük meg. A másik igen fontos kérdéscsoport, az ugyancsak nem nagyon felderített átmeneti tartomány vizsgálata, amelynek különösen a kutak körüli áramlási tartomány vizsgálata terén van nagy jelentősége.

A vizsgálatok azonban nem zártak le az áteresztőképességi, vagy szivárgási jellemző meghatározási módjának felderítése terén sem. Az újabb vizsgálatok már a valószínű hibák vizsgálatára is kiterjednek. Egyre inkább látszik, hogy gyakorlati hidraulikai feladatok meghatározásához csak korszerű statisztikai módszerekkel meghatározott jellemzők használhatók kellő biztonsággal.

A háromfázisú telítetlen réteg szivárgása a hidraulika egyik legkevésbé ismert területe. Ma még a vizsgálati módokban sincs egységes vélemény. Akadályozza a kérdés felderítését — akárcsak a mikroszivárgásnál — a molekuláris erők szerepének nem elég pontos ismerete.

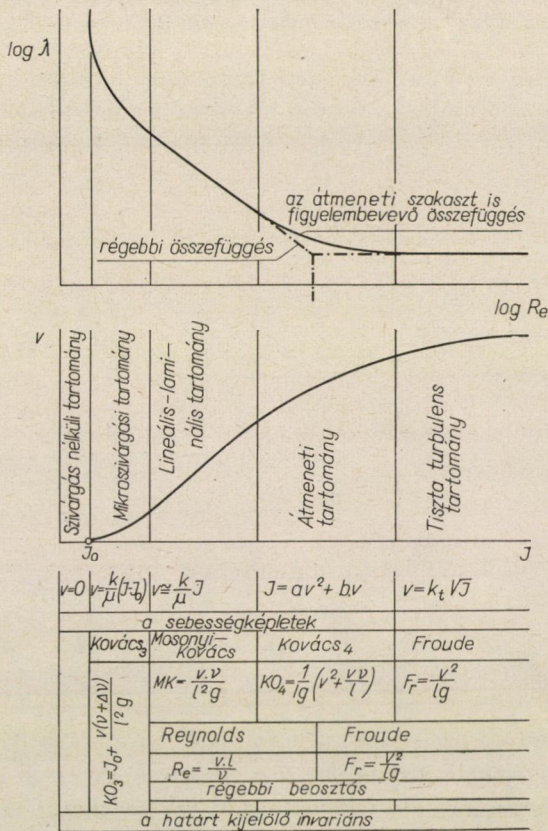
A hasadékos kőzetekben végbemenő szivárgás sok évtizede ismert és számított jelenség. Talán ez az a kérdéscsoport, ahol kizárólag tapasztalatokra voltunk utalva, néhány elméleti (LOMIZE-) eredményen kívül. Miután hamar kiderült, hogy a jelenségeket nehéz elemeiben vizsgálni, jórészt felhagytak az elemző, fizikai alapon álló kutatással, és hosszú évtizedeken át megelégedtek a természethől kapott adatokkal. Minőségi ugrást jelentett ezen a téren ÖLLŐS síkbeli, majd térbeli laboratóriumi karsztmodellje, amely megmutatta az egyik jól követhető utat.

A hasadékos kőzetek szivárgási vizsgálatát mindenekelőtt a karsztkőzetek repedéses szerkezetének gondos vizsgálatával kellene kezdeni, mert ameddig nem ismerjük az áramlási teret alaposan, addig nehéz lesz tovább lépni. A korszerű statisztikai feldolgozásnak itt még nagyobb tere nyílik, mint a természettudományok sok olyan ágában, ahol már kiterjedten használják. Ezzel párhuzamosan szükséges volna a tehetetlenségi erőket figyelembe vevő szivárgási módszereket továbbfejleszteni és a szivárgási tényezőt helyettesítő szivárgási egyenértékszám meghatározásának lehetőségét kellő biztonságúra emelni.

A számos probléma, fejleszteni való ismeret mellett ma már igen sok részletét ismerjük a kérdésnek, nem egyet éppen a legújabb kísérletek, elméleti vizsgálatok alapján. Az eddig elért eredményeket a következőkben megkíséreljük összefoglalni a teljességre való törekvés nélkül.

2. Az egyes szivárgási tartományok kijelölése

A régebbi vizsgálatok során szinte kizárólag a lineáris szivárgási törvényt alkalmazták, már csak egyszerűsége, könnyű és gyors kezelhetősége miatt is. A gyakorlati vizsgálatoknál legtöbbször nem is jelentett problémát — vagy azt nem vették észre —, hogy csak a lineáris összefüggést használták. Az újabb tudományos kutatási eredmények azonban felhívják a figyelmet arra, hogy a vizsgálatok során több szivárgási tartományt kell elkülöníteni, amelyekben az azonos domináló erők miatt a tartományon belül azonos jellegű lesz a vízmozgás.



1. ábra. Az egyes szivárgási tartományok

A kutatások eredményeként az 1. ábrán mutatjuk be az egyes tartományokat. Ezek a nagy sebességtől a kis Reynolds-féle számok felé haladva:

- a tiszta turbulens szivárgás tartománya,
- az átmeneti tartomány,
- a lamináris-lineáris szivárgás tartománya,
- a mikroszivárgás tartománya,
- a szivárgás nélküli tartomány (ahol a tényleges esés kisebb a küszöbesésnél).

Az egyes szivárgási tartományokat a modelltörvények felhasználásával kísérleti eredmények alapján szokás kijelölni. Ma még igen kevés ilyen vizsgálatunk van, s azok is főleg a lamináris-lineáris tartomány felső határára vonatkoznak. A kérdés részletes vizsgálata is csak erre az esetre van kidolgozva. A következőkben azonban megkíséreljük mindegyik tartományra nézve valamilyen érvényességi határt adni.

a) *A négyzetes szivárgási tartomány alsó határa*

A tiszta turbulens és az átmeneti tartomány határán a tehetetlenségi és gravitációs erők mellett egyre fontosabb szerepet kap a súrlódási erő.

A tehetetlenségi és gravitációs erők főerő jellegét kifejező törvény a Froude-féle szám

$$Fr = \frac{v^2}{lg},$$

ahol

v — a szivárgási sebesség
 l — a jellemző hossz (pl. a szemátmérő vagy a mértékadó szemátmérő)
 g — a nehézségi gyorsulás.

A tiszta turbulencia tartományában tehát a sebesség összefüggés jellege, ha $Fr = Fr'I$,

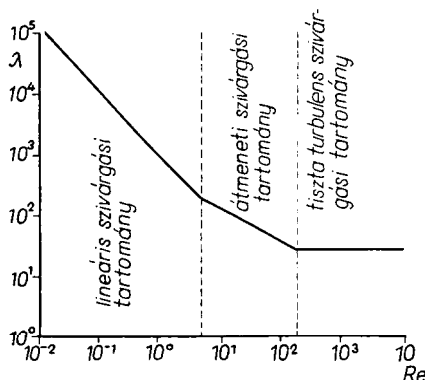
$$v = \sqrt[3]{Fr'lg} = k_l \sqrt[3]{I}.$$

Az esés és a sebesség kapcsolata pedig ennek alapján:

$$I = \frac{l}{Fr'lg} v^2 = \frac{1}{k_l^2} v^2.$$

A régebbi kutatások — ahogyan azt az 1. ábrán is láthatjuk, nem vették figyelembe az átmeneti tartományt — kivéve VERONESE vizsgálatait — s feltételezték, hogy a Froude-féle számmal jellemezhető tiszta turbulencia szakasz érintkezik a lamináris-lineáris szakasszal, amit a Reynolds-féle számmal jellemezhetünk. Ezért az 1. ábrán pontozott vonallal kihúzott szakaszt gondolták helyesnek.

VERONESE vizsgálatai derítették először fényt a tiszta négyzetes és a lineáris tartomány közötti átmeneti tartományra. A 2. ábra a vizsgálat ered-



2. ábra. VERONESE kísérleti összefüggése a súrlódási tényező és a Reynolds-féle szám között

ményét foglalja össze a mérési pontok elhagyásával. A gyors sebességszámítás érdekében VERONESE a sebesség-képleteket a szemátmérőhöz kötve (mértékadó szemátmérő) adta meg.

Egészen új szemlélettel közelítette meg a kérdést KOVÁCS. A különböző eddig használt leképzési — modell — törvényt kiegészítette úgy, hogy a legkülönbözőbb erőcsoportokból képzett invariánst. Ezeket az összefüggéseket alkalmasnak tartja a szivárgási vízmozgás egyes jellemző szakaszainak és az alkalmazható összefüggések érvényességi határainak kijelölésére is. A tiszta négyzetes tartományra a Froude-féle szám, az átmeneti tartományra a KO_4 -szám alkalmazandó. Így a tiszta négyzetes tartomány alsó határát a Froude-és a KO_4 - szám kapcsolatából lehet kijelölni.

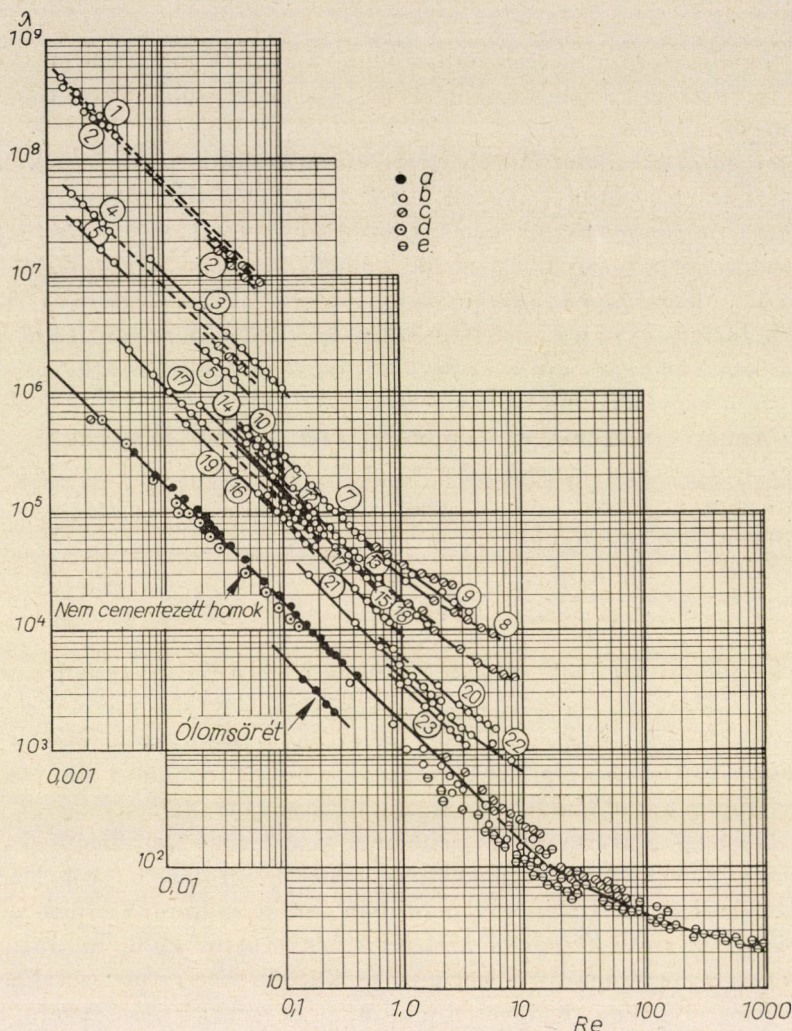
Az átmeneti tartomány — amint az az 1. ábrából is látszik, — a tiszta turbulens és a lineáris szakasz között található. Így az átmeneti tartomány felső határa megegyezik a tiszta turbulens tartomány alsó határával. Ezért ezzel külön nem foglalkozunk.

b) A lineáris szivárgási tartomány felső határa

A kísérleti és elméleti vizsgálatok nagy része a lineáris szivárgási tartomány felső határát kereste. A korábbi kutatások legtöbb esetben a lineáris szivárgási szakasz és a tiszta turbulens tartomány közös határát tételezték fel, s így a Reynolds-féle számmal jellemezték ezt a határt. Számos kutatás kísérleti alapon vizsgálta a problémát, nem is mindig azonos eredménnyel.

A lineáris — Darcy-féle — sebességi képlet kísérleti ellenőrzése során KEUTNER nagyméretű homokmodelljeivel megállapította, hogy a Darcy-féle képlet kísérletileg semmilyen tartományban sem igazolható. Szerinte valamely homokréteg vízvezető képessége az ismert tényezőkön kívül az átszivárgási keresztmetszet nagyságától, a belépési és kilépési keresztmetszetekben levő vízmennyiségtől is függ. Különösen igen nagy és igen kis eséseknél a hidraulikus eséssel való lineáris kapcsolat még közelítőleg sem érvényes.

Lényegében ellenkező véleményre jutott VENZEL. Természetes és mesterséges rétegben végzett kísérletei szerint a talajvíz áramlása csak akkor nem követi Darcy törvényét, ha az áramlás igen gyors. Ilyen sebességek azonban, megállapítása szerint, a természetben nem fordulnak elő. Hasonló megállapításra jutott KAMESZKIJ is. Szerinte a lineáris összefüggés a gyakorlat számára elegendő pontossággal alkalmazható finom és durva homoknál, sőt kavicsnál is $1000 \text{ m}^3/\text{nap}$ alatti sebességek esetében. Az elméleti megfontolások mellett igen kiterjedt vizsgálatokat is végzett LUDEWIG homok- és kavicsrétegekben, $d = 0,2 \div 15,0 \text{ mm}$ határok között egyenlő szemcsékre és különböző szemcséből álló halmazokra egyaránt. Vizsgálatai megállapították a szemcsealak, szemnagyság, felületi érdesség, szemeloszlás, szemnagyságok gyakoriság-eloszlása, hézagterfogat, stb hatását külön-külön.



3. ábra. A lineáris szivárgási tartomány meghatározása FANCHER, LEWIS és BARNES kísérleteivel

A kísérletek szerint az adott rétegekben a Darcy-törvény a vizsgált legkisebb gradiensekig ($I = 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-3}$) érvényesnek bizonyult.

Az elméleti kutatások legnagyobb része is a felső határ vizsgálatát tűzte ki célul. A vizsgálatok lényege mindegyiknél a csőben való vízmozgás analógiájára a Reynolds-féle szám határértékének meghatározása volt.

Kiemelkedőek e téren FANCHER, LEWIS és BARNES klasszikus kísérletei. A vizsgálat során mérték az l úton bekövetkező Δp nyomáskülönbséget, az átfolyó vízmennyiséget, Q -t, és ismerték F -et, az átfolyási felületet. A feldolgozáskor keresték az összefüggést a λ hidraulikus ellenállási tényező és a Reynolds-féle szám között a csőben való vízmozgás ismert ellenállási képlete segítségével (3. ábra).

Vizsgálati eredményeiket nem lehet összehasonlítani a csőben való vízmozgás eredményével, mert a szivárgási sebességet mechanikusan felcserélték a cső áramlási középsebességével, a D csőátmérő helyébe pedig a szemcsék d_e effektív átmérőjét tették. Így sem λ , sem a R_e nem azonos fogalom a cső-hidraulikában használatos értékkel, hanem egy-egy szorzóval eltérnek tőlük. Kísérleteik eredménye szerint homoknál és ólomsöréteknél $R_e \leq 4$, ill. cementeződött homoknál $R_e \leq 1$ határig a lineáris szivárgási törvény érvényes.

PAVLOVSKIJ a csőre érvényes Reynolds-féle számból indul ki. Az abban szereplő áramlási sebességet és a csőátmérőt a hézagterfoggal, a szivárgási sebességgel és a szemcseátmérővel fejezi ki:

$$R_e = \frac{1}{0,75 n + 0,23} \cdot \frac{vd}{\nu}$$

Ebből

$$v_{kr} = \frac{(0,75 n + 0,23) \nu R_e}{d}$$

A $R_e = 7,5 \div 9$ értéket találta kritikusnak.

SCSELKACSEV a szemátmérőt a Slichter-féle számmal fejezte ki, s ezt helyettesítette be vizsgálatai során a Reynolds-féle számba:

$$R_e = \frac{10}{n^{2,3}} \frac{v \sqrt{k}}{\nu}$$

Vizsgálata szerint a kritikus érték $R_e = 1 \div 12$.

MILLIONCSIKOV a R_e -ben és a λ -ban a d szemátmérő helyébe a „közvetlen belső jellegű” kifejező $L = \sqrt{k/n}$ értéket helyettesítette. Felhasználta BARNES, FANCHER és LEWIS kísérleteit, s a szemátmérő kiejtésével a kísérleteket ábrázoló vonalak mind egyetlen egyenesbe tömörültek. A kritikus értéket $R_e = 0,022 \div 0,29$ -nél kapta. (Ezek azonban L behelyettesítése következtében nem hasonlíthatók össze közvetlenül az előző és szokásos kísérletek kritikus Reynolds-féle számával.)

Legújabbán KOVÁCSNAK az előző fejezetben megadott összefüggései adnak elméleti alapot a lineáris és az átmeneti tartomány meghatározására. A Mosonyi—Kovács-féle szám és a KO_4 -szám közötti függvény adja a keresett határértéket.

c) A lineáris szivárgási tartomány alkalmazhatóságának alsó határa

A felső határnál sokkal nehezebb és eddig nem megoldott kérdésnek bizonyult a kis sebességek felé az elhatárolás, ahol a súrlódási főerő mellé belép a molekuláris főerő is már a mikroszivárgási tartomány felé. Ennek a

határnak a megállapításakor igen fontos az „aktív keresztmetszet” kérdésének a tisztázása.

A porózus kőzetek szemcséi körül bizonyos vastagságú, különböző módon kötött vízréteget találhatunk a higroszkópos víztől egészen a gyengén kötött vízkapacitásnyi vízmennyiség külső széléig. Ha kétfázisú kőzetről van szó — a kapilláris feszültségen kívül — minden vízlekötési mód megvan, tehát amikor a szivárgás megindul, a szemcsék falára merőlegesen van kötve különböző erővel a víz vagy annak egy része. Önként kínálkozó gondolat, hogy a viszkózus víz e miatt a kötött vízréteg miatt csak a *szabad hézagterefogatban* közlekedik, amelyek összességét egy szelvényben *aktív keresztmetszetnek* nevezzük.

TERZAGHI tiltakozik az aktív keresztmetszet fogalmának bevezetése ellen, mert véleménye szerint a kőzet teljes hézagterefogatában levő víz részt vesz a szivárgásban és leghatározottabban elítéli a csökkentett hézagterefogat gondolatát. KÉZDI szerint a szemcséket a normális víztől eltérő tulajdonságú vízfilm veszi körül, így a víz szivárgására rendelkezésre álló hézagok mennyisége csökken, „mert a szivárgás csak a feszültségmentes hézagterefogaton keresztül történik”. A kísérletek valószínűleg jobban megközelítenék a számítást, ha ezt a tényt figyelembe tudnák venni.

Részletesen vizsgálja a kérdést könyvében MÜLLER—DELITS. Itt már kvalitatív értékelést kapunk a keresztmetszet csökkentéséről. A szűkülést a szemcsékhez kötött vízzel magyarázza. A kötött víz figyelembevételére azonban nem sikerült sem elméleti, sem empirikus módszert kidolgozni.

KOVÁCS 1957-ben ugyancsak az aktív keresztmetszet mellett foglal állást, sőt kvalitatív megoldásokat is adott a számításokhoz. Abból a megfontolásból indult ki, hogy a kőzetszemcsék felületükhöz kötnek bizonyos vízréteget nyugalmi helyzetben is. Ez a kötés elektrokémiai jellegű, ami azt jelenti, hogy a szemcsék körül elektromágneses tér van. Ha az e térben levő vízrézecsékét csak a tér erővonalaira merőlegesen kívánjuk elmozdítani, akkor is a térerősségtől függő állandó erőre van szükség. KOVÁCS a szükséges elmozdító erőt a szemcsék felületétől lineárisan, ill. négyzetesen csökkenőnek veszi.

Az aktív keresztmetszet léte mellett foglaltunk állást, Szerző is 1957-ben. Vizsgálatait az eddigiektől eltérő módon végezte. Alapfeltétele az volt, hogy a víz nem abszolút gördülékeny, hanem minden más anyaghoz hasonlóan van belső statikus súrlódása is. A teljes csúsztatófeszültséget ezért a kúszó folyadékoknál használt módon lehet leírni:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dr}.$$

A szemcsék felületének kötőerejét VAGELER kutatásai szerint vette fel. Ilyen megfontolással mennyiségi, számítási módszert tudott adni az aktív keresztmetszetre, ill. annak figyelembevételére a számításokban.

A két eljárás közötti különbség az, hogy amíg Kovács szerint az aktív keresztmetszet csak a porózus réteg anyagi tulajdonságától függ, addig Szerző szerint a rétegben uralkodó nyomástól is.

A lineáris szivárgási tartomány alsó határának meghatározására Kovács legújabb vizsgálatai szerint a Mosonyi — Kovács-féle és a KO_3 -szám összevetése alkalmas. Miután azonban a kísérleti vizsgálatok még hiányoznak, ez az elméleti megállapítás használatba vétel előtt további kiegészítésre szorul.

Azt mondhatjuk tehát, hogy ma még számszerűen nem ismerjük a lineáris szivárgási tartomány alkalmazhatóságának alsó határát, de a kutatás elméleti alapját már több irányból megközelítettük.

d) A küszöbesés mint a mikroszivárgási tartomány alsó határa

Az aktív keresztmetszet szélső értékei a teljes hézagterfogattól nulláig terjedhetnek, amint arra Roza kísérletei is világosan rámutattak. Agyagban végzett áteresztőképesség vizsgálataiban $I = 30 \div 40$ esésig nem volt szivárgás, míg ennél nagyobb eséseknél megindult. Ezek és az ehhez hasonló vizsgálatok rámutattak arra, hogy az aktív keresztmetszet létezik és szélső esetben zérus is lehet. Az aktív keresztmetszet zérus értékhez tartozó esést *küszöbesésnek* nevezték el.

A küszöbesés meghatározását Kovács már idézett 1957. évi dolgozatában elméletileg megoldotta. Ez az eljárás a szükséges mérési adatok megszerzése után a gyakorlatba is bevezethető lesz. A küszöbesés meghatározását Szerzőnek említett vizsgálatai is lehetővé teszik.

2. A szivárgási sebességszámítás az egyes tartományokban

A tiszta turbulens tartomány számítására általánosan a

$$v = \frac{k_t}{\mu} I^m \quad (1)$$

képlet használatos, ahol

k_t — a turbulens szivárgás áteresztőképessége

I — a hidraulikus esés

μ — a víz viszkozitása

m — a hatványkitevő

illetve

$$I = \left(\frac{\mu}{k_t} \right)^{1/m} v^{1/m}.$$

A számos kísérleti vizsgálat eredményeként KRASZNOPOLSZKIJ $m = 0,5$ értéket állapított meg. PUZIREVSKIJ szerint $m = 0,5 \div 1,0$, Kovács elméleti vizsgálatai szerint $m = 0,5$.

A tiszta turbulens, átmeneti és lamináris szakasz elkülönítésével végezte vizsgálatait VERONESE is. A sebesség fenti ismert alakjából indult ki, de a szivárgási tényezőt a *Slichter*-féle számmal írta fel:

$$v = \frac{Ad^n}{\mu} I^m. \quad (2)$$

A három ismeretlen állandót (A , m és n) a csőszúrlódási veszteség alapján határozta meg:

$$h_v = \frac{l}{d} \lambda \frac{v^2}{2g} \quad \text{illetve} \quad \frac{v^2}{2g} = \frac{d}{4} I \frac{l}{\lambda},$$

ahol

$$I = \frac{h_v}{l}$$

d = a csőátmérő.

A λ súrlódási tényező értékét VERONESE is a Reynolds-szám függvényében adja meg. A $0,01 < Re < 5$ értékek tartományában lamináris, az $5 < Re < 200$ szakaszon átmeneti és a $Re > 200$ -tól tiszta turbulens a vízmozgás jellege a porózus közetekben.

A 2. ábrán felrajzolt összefüggés egyeneseinek az egyenlete:

a lineáris sziv. tartományban	$\lambda R_e = 1150,$
az átmeneti tartományban	$\lambda R_e^{0,73} = 720,$
a tiszta turbulens tartományban	$\lambda = 15,5 = \text{konst.}$

A lineáris szakaszon tehát

$$R_e = \frac{1150}{\lambda} = \frac{vd}{\nu},$$

s így

$$\lambda = \frac{1150 \cdot \nu}{v \cdot d}.$$

Ezt behelyettesítve a (2) összefüggésbe, azt kapjuk, hogy

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{d}{4} I \frac{v \cdot d}{1150},$$

vagyis

$$v = \frac{2g \cdot l}{1150 \cdot 4} \cdot \frac{1}{\nu} d^2 I = 0,0436 \frac{1}{\nu} \cdot d^2 I, \quad (3)$$

ahol most már d a szemátmérő és $A = 1/22,9$, a *Slichter*-féle szám. Az átmeneti szakaszon — a részletezést mellőzve —

$$v = 9,53 \cdot I^{0,787} \cdot d^{1,36}. \quad (4)$$

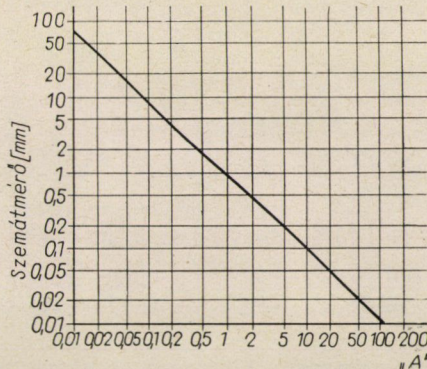
Végül a tiszta turbulens tartományra

$$v = 5,63 d^2 \sqrt{I}. \quad (5)$$

A (3) és (4) összefüggésekben a számértékek az A/v kifejezést jelentik. Általában

$$v = k_t \cdot I^m.$$

PUZIREVSKIJ durva törmelékes üledékben $k_t = 35$ értéket ajánl, m -re 0,5-öt. KRASZNOPOLSZKIJ repedéses kőzetre is a fenti képletet ajánlja, de szerinte



4. ábra. Az „A” függvény a Zamarin-féle mértékadó szemátmérő megállapításához

k_t értékét kísérlettel kell meghatározni. SZMRÉKER az áramlás jellegétől, a közet tulajdonságaitól függően m -re $1 \div 0,5$ érték közöttit ajánl, ezzel már belenyúlva az átmeneti tartományba is.

A már ismertetett elméleti megfontolások alapján KOVÁCS is tett javaslatot a tiszta turbulens tartományban a sebességképletre. Szerinte

$$v = \sqrt{gd Fr'} \sqrt{I},$$

ahol

- Fr' — a Froude-féle szám és a hidraulikus esés hányadosa
- g — nehézségi gyorsulás
- d — a szemátmérő.

A gyakorlat számára az (1) összefüggés megfelelő azzal, hogy $m = 0,5$ és k_t értékét kísérlettel kell meghatározni.

A legnehezebb kérdés az átmeneti tartomány sebesség-összefüggéseinek meghatározása. A korábbi vizsgálatok közül meg kell említeni THIEM képletét

$$I = av^2 + bv^{1.5},$$

VELIKANOV javaslatát

$$I = a_1 v + a_2 v^2$$

és FORCHEIMER képletét

$$I = cv^m,$$

ahol

$$1 < m < 2.$$

Ez esetben az állandó együtthatókat — és FORCHEIMER képletében a kitevőt — kísérletekkel kell meghatározni. Egyszerűsíti a kérdést ZAMARIN, aki a

$$v = 173 \left(\frac{d}{90} \right)^m \quad (6)$$

összefüggést ajánlja, ahol

$$m = \frac{0,8 + d}{0,8 + 2d} < 1.$$

Természetesen az átmeneti tartomány összefüggései szélső esetekben átmennek a lineáris, illetve a tiszta turbulens szakasz összefüggésébe.

Igen figyelemre méltó sebességszámítási javaslatot tesz CHARDABELLAS. Az átmeneti szakasz ismert

$$I = av + bv^2 \quad (7)$$

összefüggését használja és kiterjedt kísérletekkel, valamint elméleti megfontolásokkal meghatározza a és b értékét.

Az a értéke a lineáris szakaszon — ahol $bv^2 = 0$ — tulajdonképpen μ/k -val egyenlő. Ez a tényező vizsgálatai szerint az

$$a = \frac{1}{K_T \varepsilon^3 d_n^2}$$

összefüggésből számítható. Itt K_T jellegszám, a kőzet petrográfiai adottságaitól, a nehézségi erő és a viszkozitás arányától függ. Értéke $t = 10$ C°-ú víz esetében $K_T = 230 \text{ l/cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ (k -t cm/sec-ban mérve.), ε pórusjellegszám [$\varepsilon = n/(1-n)$], n hézagterfogat és

$$d_n = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n G_i/d_i}$$

G_i és d_i az integrál szemeloszlási görbe egyes pontjaihoz tartozó szemátmérő és súlyszázalék.

A b értékét a $bv^2 \gg av \cong 0$, tiszta turbulencia tartományra vonatkozó összefüggésből számíthatjuk:

$$b = \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{d_n} \cdot \frac{1}{c_g},$$

ahol c_g a gyorsulástól függő együttható, melyet a szemcsefelület és a szem-szerkezet befolyásol. Értéke CHARDABELLAS vizsgálatai szerint 350 cm/sec^2 ha $b \text{ sec}^2/\text{cm}^2$ és $d_n \text{ cm}$.

Igen érdekes és az elméleti meggondolásokat jól alátámasztja KOVÁCS ismertetett modell invariánsaiból kapható összefüggés:

$$I = \frac{1}{KO'_4 \cdot dg} v^2 + \frac{v}{KO'_4 \cdot d^2 g} v, \quad (8)$$

ahol KO'_4 a Kovács 4 szám és a hidraulikus esés hányadosa.

Speciálisan vizsgálta meg VERONESE az átmeneti szakaszt — amint láttuk a 2. ábrán — és összefüggését (4) a kiegyenlítő vonal alapján adta meg.

A *lineáris szivárgási szakasz* sebesség képletei között a legelső a Hagen — Poiseuille-féle, később a Darcy-féle volt. Általános alakja ezeknek az összefüggéseknek

$$v = \frac{k_{ah}}{\mu} I = \frac{A \cdot d^2}{\mu} I, \quad (9)$$

ahol

- k_{ah} — a vízszintes áteresztőképességi tényező,
- μ — a kinematikus viszkozitás,
- A — a Slichter-féle szám és
- I — a hidraulikus esés.

Tulajdonképpen ezt az összefüggést használják a gyakorlatban legtöbbször.

Az egyes számítási eljárások abban különböznek egymástól, hogy más-ként határozzák meg a Slichter-féle számot és másként a d mértékadó szem-átmérőt. Néhány számítási módot az I. táblázatban adunk. Akik csak Slichter-száma tettek javaslatot a II. táblázatban következnek.

Durva szemű anyagokra sajátos megoldást dolgozott ki PALAGYIN és BEYER. Eljárásukra helyszűke miatt itt nem térünk ki.

KOVÁCS a lineáris tartományban a sebességösszefüggést ugyancsak a modellezési invariáns közül a Mosonyi — Kovács-féle számból vette:

$$v = MK' \cdot \frac{d_g^2}{v} I,$$

ahol MK' a Mosonyi — Kovács-szám és a hidraulikus esés hányadosa.

I. táblázat

A szerző	A Slichter-féle szám	A mértékadó szemátmérő	A jelek magyarázata	Megjegyzés
HAZEN	$116 \cdot \mu$	$d = d_{10}$	d_{10} a 10%-os szemátmérő	laza településű tiszta szűrőhomokra alkalmas
JÁKY	$100 \cdot \mu$	$d = D'_0 \exp \times \left[\frac{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{8}{p^2}} \right) p^2}{4} \right]$	$p = \ln \frac{D_0}{d_{37}}$ D'_0 az elméletileg legnagyobb szemátmérő (extrapolálással) D_0 a ténylegesen legnagyobb szemátmérő d_{37} a 37 súly%-hoz tartozó szemátmérő	
ZAMARIN	$4 \cdot 100 \frac{n^3}{1-n}$	$a^2 \frac{1}{d_2} = A_1 G_1 + A_2 G_2 + \dots + A_m G_m$	n a hézagterfogat a 1,275—1,5 n exponenciális függvény értéke a 4. ábrán látható G_1 az integrál szemeloszlási görbe kis intervallumaiban a szemcsék súlyszázaléka $\sum_{i=1}^m \Delta G_i = 1$	

A mikroszivárgás tartományában alkalmazható KOVÁCS

$$v = \frac{d^2 g}{\nu + \Delta \nu} (KO'_3 I - I_0) \quad (10)$$

összefüggése, ahol KO'_3 , a KO_3 módosított változata.

Szerző a mikroszivárgás tartományában a szivárgási sebesség meghatározására abból kiindulva vezetett le összefüggést, hogy a víz nem newtoni folyadék, hanem inkább Bingham-féle test a porózus közetekben végbemenő szivárgásnál. Ennek megfelelően a csúsztatófeszültség a

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dl}$$

összefüggésből számítható, ahol τ_0 a nyugalmi súrlódás értéke. Ennek értéke a $\tau_0 = \alpha p$ összefüggésből állapítható meg, amelyben α a súrlódási tényező, mely víznél 10^{-12} nagyságrendű — a tényleges mérésekkel való összehasonlításból meghatározva. Ezt a feltevést elfogadva, a sebességeképlet

$$v = \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{p_1 - p_2}{4l} (r_0^2 - r^2) + \alpha [C \cdot S - p_r (r_0 - r)] \right\}, \quad (11)$$

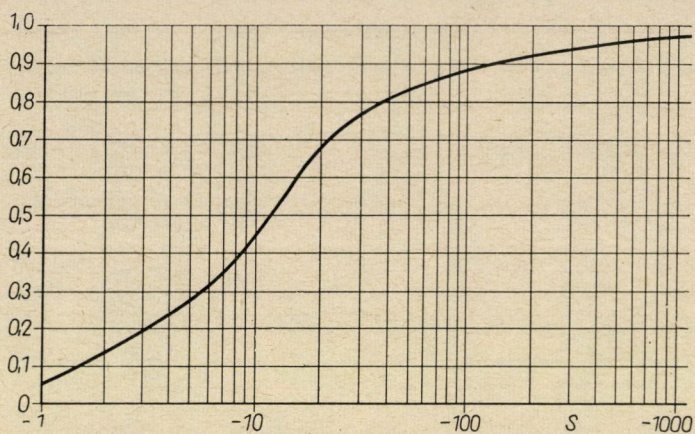
II. táblázat

Szerző	A Slichter-féle szám	A jelek magyarázata
SLICHTER	$\frac{m^2}{96(1-n)}$	$m = \frac{\sin \alpha - \pi/4}{\sin \alpha}$ α — a szemcsék középpontján át húzott egyenesek hajlásszöge
LEIBENZON	$0,01068 n^{3,3},$ $\frac{1}{120} \frac{n^3}{1-n^2}$	n hézagtérfogat
LAPUK	$\frac{n}{2(1-n^2)}$	
TERZAGHI	$C \left(\frac{n-n_0}{\sqrt[3]{1-}} \right)^2$	n_0 tapasztalatok alapján 0,13 C sima felületű homokban = 10,5 szögletes felületű homokban = 6,0
KOZENYI	$\beta \frac{n^3}{1-n^2}$	$\beta = \frac{\xi g}{C_1 \Delta^2}$ ξ a viszkozitástól, a közet nedvességtartalmától, a teljes felülettől függő számérték C_1 a szivárgási keresztmetszet alakjára jellemző dimenzió nélküli állandó Δ a diszperziós tényező: a térfogat és a felület viszonya
ZAMARIN	$\frac{8,4(1,275 - 1,5 n)^2 n^3}{1-n_2}$	
FAIR-HATSH	$C_2 \frac{n^3}{1-n^2}$	C_2 állandó; táblázatból veendő
KRÜGER	$1,44 \cdot 10^6 \frac{n}{H^2}$	H az 1 cm ³ közetben foglalt részecskék együttes felülete cm ² -ben
BACHMETEFF-FEDOROV	$2 \frac{n^{4/3}}{C^3}$	C_3 kísérlettel meghatározott egyformaság index, értéke 710–640 között változik
KRUMBEIN-MONK	$C_4 \exp(-a_1 \sigma_\phi)$	C_4 kísérlettel meghatározott együttható a_1 szemcsék alakjára jellemző tényező σ_ϕ a differenciál szemeloszlási görbe négyzetes eltérése
JUHÁSZ	$4,2 e^{2,8}$	e hézagtérfogató

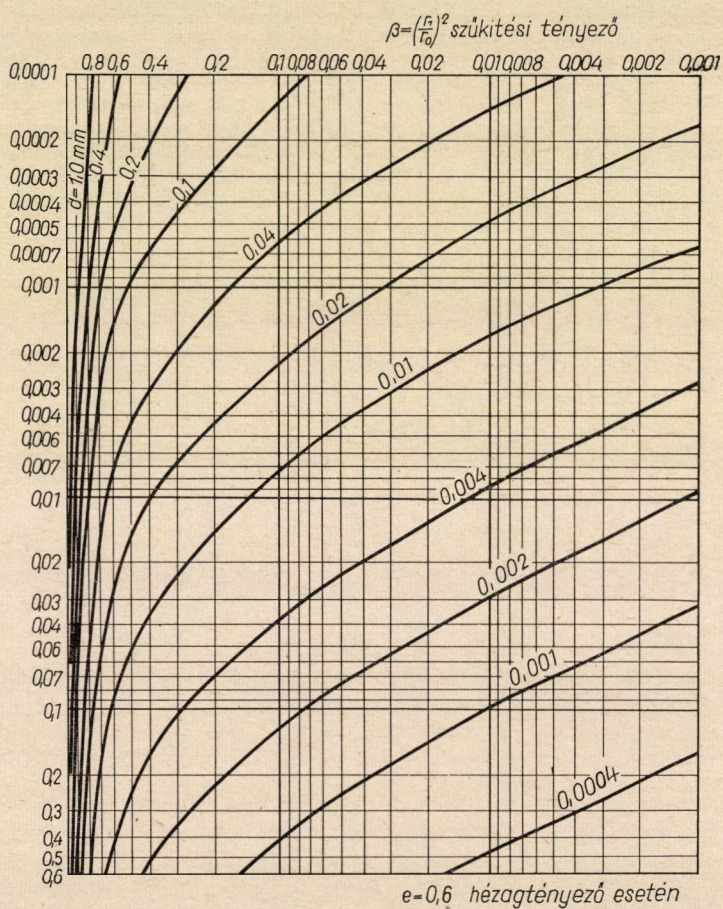
ahol

$$C = 2,82 \cdot 10^{-2} \left(1 + \frac{1}{2e} \right)^6 \cdot \sqrt[4]{r_0}, \quad (12)$$

S értékét pedig az 5. ábrából vehetjük.



5. ábra. A sebességeképlet transzcendens tényezője



6. ábra. A szűkítési tényező

A sebességképlet alkalmazására grafikonokat használhatunk legegyszerűbben (6. ábra). Ezek a grafikonok nem közvetlenül a sebességet, hanem az ún. szűkítési tényezőt, vagyis a

$$\beta = \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2$$

érdeket adják meg. Ennek megfelelően a vízhozamot a felszín közeli vízmozgásoknál, ahol a nyomás (p_r) elhanyagolható a $Q = \beta \cdot F \cdot v$ összefüggéssel számíthatjuk. Itt v a klasszikus módon számított sebesség érték.

SÁROSI (1966) a τ_0 értékének közvetlen kísérleti meghatározására rotációs viszkoziméteren mérhető elmozdulási határfeszültség vizsgálatát javasolja a nagy fajlagos felületű — pelites — üledékeknél. A vizsgálat érdekében a pelites üledékekből szuszpenziót készít, amit behelyez a rota-viszkoziméterbe. Bizonyos idejű várakozás után elnyírja és az elnyírásakor mérhető adatokból a szemcsék közötti folyadékokban feltételezett feszültségeloszlásból számítja τ_0 értékét.

A küszöbeses meghatározására alkalmas KOVÁCS összefüggése (10), amelyből I_0 kifejezhető. E célra alkalmas a Szerző által javasolt összefüggés (11) is, amelyből a p_r rétegnyomástól is függő küszöbeses az alábbi módon számítható:

$$I_0 = \frac{\alpha}{33,6 r_0 e^3} (p_r - C \cdot s). \quad (13)$$

A szivárgási sebesség számítása az egyes tartományokban nem azonos biztonsággal történik, mert az együtthatókat nem tudjuk egyforma pontosan meghatározni. Leginkább kidolgozott a lineáris szivárgási tartomány összefüggése, ezért a gyakorlati szakemberek, ha csak lehet, ezt használják még az átmeneti és a mikroszivárgási tartomány egy-egy részére kiterjesztve is. Nagyon kell vigyázni azonban, hogy az így elkövetett hibák ne legyenek nagyobbak a megengedhetőnél. Ezért gondosan ügyelni kell arra, hogy minden esetben a helyes — a ténylegesen fellépő — szivárgási tartományokkal dolgozzunk. Kettős rendszer esetén mindkét tartományt lehetőleg alkalmazni kell. Ha nincsenek elegendő ismereteink az egyes tartományok geometriai elkülönítésére, úgy azt az összefüggést használjuk, amelyik a vizsgált tér legnagyobb részére érvényes.

4. A szivárgási tényező meghatározása laboratóriumban

Nagyon elterjedt az elmúlt évtizedekben a szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása. Lényege az, hogy előre meghatározott tömörségre bedöngölt, vagy kiszúrt magmintán vizet — újabban sokszor gázt (levegőt) —

bocsátanak keresztül, miközben mérik a nyomáskülönbséget, az átszivárgó vízhozamot, a minta hosszát és keresztmetszeti területét. Kétféle laboratóriumi kísérleti mód terjedt el: az állandó nyomáskülönbségű és a változó nyomáskülönbségű eljárás.

A laboratóriumi kísérlet pontosságát a magminta pontos kiszúrása mellett a falmenti hatás és a minta hossza mentén jelentkező inhomogenitás hatásának csökkentésével, tehát a minták nagyságának növelésével lehet elérni. Kisméretű minta vizsgálatokor számos tényező lényegesen lerontja a pontosságot (falhatár, inhomogenitás, szerkezeti torzulás, kimosódás stb.).

Minthogy a lamináris átmeneti, illetve a turbulens szakasz szivárgási jellemzői nem egyenlőek egymással ugyanazon közetnél sem, a laboratóriumban ugyanolyan szivárgási tartományban kell vizsgálni a szivárgási tényezőt, mint amelyet a valóságban is kialakítunk, mert másként téves adatokat kapunk. A változó nyomáskülönbséggel dolgozó permeabiméter a kísérlet során több szivárgási tartományt is érinthet, ezért azt egyéb okokkal együtt — kis mintaméret stb. — nem helyes használni.

5. A szivárgási tényező meghatározása a helyszínen

A laboratóriumi permeabiméteres vizsgálatot és a szemcseösszetételi görbék alapján meghatározott szivárgási tényezőt többek között a mintavétel hibája is terheli. Jelenleg még nem rendelkezünk olyan gyorsan és gazdaságosan üzemelő berendezéssel, amely a laza, szemcsés kőzeteket a fúrási munka során nagyobb mélységből természetes állapotban a felszínre tudná hozni. A vízvezető rétegből vett, laboratóriumban vizsgált anyagok „zavart” minták, amelyek sem tömörség, sem finom frakció súlyarány szempontjából nem egyeznek az eredeti állapottal. Rossz minta esetében az eredmény is pontatlan. Ezért igyekeztek a helyszíni vizsgálatokat fejleszteni.

A helyszíni vizsgálatok két nagy csoportba sorolhatók: 1. infiltrációs vizsgálatok (kis felületű és nagy felületű infiltróméterrel, esetleg aknapárral); 2. furatban végzett vizsgálatok.

Ez utóbbiakat lehet vízfeltöltéssel (pl. Khafagi-féle eljárás) és lehet vízkitermeléssel, majd visszatöltődéssel végezni (pl. PORSHET, ERKIN). Legpontosabb a próbaszivattyúzás, ami lehetőleg minden esetben észlelőkutakkal készüljön. A próbaszivattyúzás során — aszerint, hogy a távolhatás elérte-e a tápterület határát, vagy sem — stacionér, illetve instacionér esettel van dolgunk. A gyakorlatban sokszor megteszik, hogy egy-két napos próbaszivattyúzást, amelynél a vízszintek az észlelőkutakban már beálltnak tekinthetők, stacionér szivárgásnak vesznek, anélkül, hogy a távolhatás elérte volna a tápterületet. Pontosabb adatokra való törekvésnél, ilyenkor az instacionér esetre kidolgozott összefüggéseket kell használni.

6. A szivárgási tényező meghatározási pontosságának összehasonlítása

A gyakorlati feladatok során a szakemberek rendszerint megelégszenek a részletes elméleti vizsgálatoktól független egyetlen olyan értékkel, amelyet a megfelelő összefüggésbe helyettesítve, számítás útján kellő pontossággal meghatározhatják a fellépő szivárgási sebességet, hozamot vagy nyomásokat.

A gyakorlat pontosság-igénye nagyon különböző lehet, ezért igen sokféle helyszíni és laboratóriumi meghatározási mód terjedt el. Ezek között dönteni sokszor igen nehéz. SCHMIEDER a szivárgási tényező néhány meghatározási módszerének pontosságát összehasonlította. Két próbaszivattyúzott kút-csoport nyolc rétegeének mérésadataiból a különböző meghatározási módszerek pontosságát a legvalószínűbb átlagos szivárgási tényezők abszolút értékével és középhibájával való összehasonlítás segítségével végezte el.

Háromlépcsős próbaszivattyúzáshoz számított szivárgási tényező átlagértékét $\pm 8\%$ -os hiba terheli, ami az egyes lépcsős vizsgálati átlagára vonatkoztatva $\pm 13\%$ -os szórást jelent. Az átlagértékek szórása igen kedvező. A kútcsoportos próbaszivattyúzás pontos vizsgálati módszer. *Egylépcsős próbaszivattyúzáskor* az átlagértékét már $\pm 30\%$ -os hiba terheli, amiből megállapítható, hogy a vízhozam lépcsők számának csökkenése a hibát növeli. A vizsgálatok kimutatták, hogy megbízható szivárgási tényező számításához legalább 3 db kút mérésadatának ismerete szükséges. Ebből következik, hogy — a meghibásodásra, rétegegyenlőtlenségre stb.-re számítva — legalább négy észlelőkút telepítése szükséges 1—1 próbaszivattyúzáshoz.

Amennyiben a *víztermelő kút adataiból* számítunk szivárgási tényezőt, úgy annak értékét a szűrőkiképzés jósága, a kút állagának időszakos változása és a skinhatás oly nagymértékben megváltoztatja, hogy azt vízszintsüllyesztés tervezésekor hidraulikai számításhoz nem szabad felhasználni. Az adatok relatív szórása a kísérletben $+126\%$ és 285% -os volt. Ha a szűrőkút viszonylagos termelékenységet ismerjük (amint az a kísérletnél volt), azaz, ha

$$\varepsilon = 0,366 \frac{q}{k'_0 MS'_0} \cdot \log \frac{R}{r}$$

ismert, ahol

- e — a kút viszonylagos termelékenysége,
- q — a kút hozama,
- k'_0 — a réteg valódi szivárgási tényezője (pl. az észlelőkutak adatai alapján meghatározva),
- M — a vízvezető réteg vastagsága,
- S'_0 — a kútban fellépő depresszió,
- R — a kút távolhatása,
- r — a kút sugara,

akkor a kútellenállásokból adódó szabályos hibát kiküszöbölhetjük. De még ekkor is $\pm 40\%$ körül ingadozik a szórás.

Minthogy a szűrőkútban végzett méréseket igen nagy, és előre nem becsülhető, szabályos hiba terheli, a Porchet-féle módszert is csak nagyságrendi közelítő eljárásnak szabad tekinteni. A szórás $+ 105\%$ és $- 285\%$ között változik.

A vizsgálat során SCHMIEDER megállapította azt is, hogy ha a *laboratóriumi szivárgási tényező* meghatározása közönséges vagy zavart minták felhasználásával történt, akkor annak eredményét a tervezéshez nem lehetett felhasználni. A szórás $- 400$ és $+ 3500\%$ közöttinek mutatkozott.

A vizsgálatokban nem szerepelt a teljes szemeloszlási görbe alapján meghatározott — számított — szivárgási tényező vizsgálata. Az NDK külfejtésein és hazai mérnökgeológiai munkákon végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a szélső pontosságra törekvő száraz fúrásból vett minták alapján számított szivárgási tényezőt kb. $\pm 50\%$ hiba terheli, ami mintánként véletlen hibának vehető, s így nagyszámú minta meghatározásakor a szórás $\pm 20\%$ -ra, sőt ez alá is leszorítható.

A *nyeletési vizsgálatot* SCHMIEDER igen pontos módszernek találta: a szórás mindössze $\pm 15\%$ volt. Szerző tapasztalatai szerint a nyeletésnél jelentkező kolmatáció és szűrőzés esetén a kútellenállás a megadottnál sokkal nagyobb hibahatárokon belül dolgozik.

7. A hasadékos kőzetbeli vízmosások

A vizsgálatok még porózus kőzetben is igen sok nehézséget jelentenek és a pontatlanságok, mint láttuk, nagyon is tekintélyesek lehetnek, ha a szivárgó hozamra érzékeny berendezést tervezünk. Még hatványozottabban nagyobbak a nehézségek repedéses kőzetekben végbemenő hidraulikai folyamatok jellemzésekor.

Ezekben a folyamatokban a sebesség és hidraulikus esés közötti arányossági tényezőt — amit porózus kőzetben szivárgási tényezőnek nevezünk — már nem helyes így nevezni, hiszen csak a tér átlagos viszonyait jellemzi és a tér kisebb részeiben értelme megszűnik — pl. üregekben-, ill. sok nagyságrenddel változik. Végül a szivárgási tartományok egymás mellett, egymással igen bonyolult kapcsolatban fordulnak elő. Ezért a „*k*” tényező fizikai jelentése megszűnik és csak arányossági tényezővé degradálódik. Helyes tehát, ha más szóval is jellemezzük: „szivárgási egyenértékszám” vagy „áteresztőképességi egyenértékszám” — ha a víz viszkozitása nem szerepel benne.

Jelenleg még csak kezdetén vagyunk a hasadékos kőzetben lejátszódó vízmozgások helyes megismerésének és leírásának. Ezért rendszerint a porózus kőzetbeli számítási eljárásokat vetítik át — általában mechanikusan — a repedéses kőzetben kialakuló szivárgási viszonyok jellemzésére. Nyilvánvaló, hogy nagy területek együttes vizsgálatakor — az egyéb bizonytalanságok

miatt — egyre inkább alkalmazhatjuk a porózus kőzeteknél használt összefüggéseket. Minél kisebb területet kapcsolunk azonban be a vizsgálatokba, annál inkább el kell térni ettől. A repedezett kőzetbeli, sokféle befolyásoló tényező hatásaként jelentkező vízmozgások jellemzéséhez természetesen megfelelően alátámasztott, helyes fizikai szemlélettel készülő összefüggések ismerete szükséges. Laza üledékes kőzetekben az előbbieken feltételeztük, hogy a kőzet mindenütt és minden irányban azonos, tehát homogén és izotróp. Ez a valóságban általában nincs így, ami kétséggé teszi a számítások alkalmazhatóságát. Még sokkal nehezebb azonban a helyzet szilárd összeálló kőzetek esetében, mert itt a víz csak a repedések, üregek, járatok hálózatában mozoghat. Ha tektonikai folyamatok ismeretében a járatok általános irányára vonatkozóan felismerhetünk is valamilyen szabályosságot, vetődések és egyéb helyi körülmények, pl. járatok eltömődése, elagyagosodása stb. a víz útját lényegesen befolyásolhatják.

A jelenségek bonyolultsága és esetlegessége, helyi anomáliái miatt jelenleg még nem ismerünk a gyakorlat számára is használható, tudományos szempontból is alátámasztott módszert a repedezett kőzetekben végbemenő szivárgás meghatározására. Ezért a gyakorlatban a törmelékes kőzetekre megállapított összefüggéseket extrapoláljuk a repedezett kőzetekre is, esetleg apróbb módosítással. Pl. BABUSKIN szerint

$$k = 0,366 \frac{Q}{l \cdot s} \log \frac{1,32 l}{r_0},$$

ahol

- l — a kutatófúrás behatolásának hossza a repedezett kőzetretegbe,
- s — a kút depressziója,
- r — a kutatófúrás sugara,
- Q — a kitermelt vízhozam.

A nagyobb, érdes falú hézagokban, a kőzetek repedéseiben végbemenő vízmozgást közelítőleg LOMIZE módszerével számíthatjuk. Ő $0,5 \div 1,0$ cm vastagságú, kapilláris jelenségeket már nem mutató, érdes falú repedésben az egységnyi szélességre eső q vízhozamra a következő összefüggést adja:

$$q = b \sqrt{g b J} \left(2,6 + 5,1 \log \frac{b}{2e} \right),$$

ahol

b a repedés vastagsága cm-ben, e a repedés falainak abszolút érdessége cm-ben, J az esés.

Olyan esetben, ha az igen kis esések miatt még az ilyen repedések mentén is lamináris vízmozgás alakul ki, az alábbi számítási módszert adja:

$$q = \frac{gb^3 J}{\nu 12} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{e}{b}\right)^{3/2} \cdot 6},$$

ahol ν a víz kinematikai viszkozitása, a többi jelölés pedig megegyezik az előbbivel.

Ha a repedések fala sima, akkor turbulens áramlás esetén a vízhozam LOMIZE szerint

$$q = 4 \cdot 76 \sqrt[7]{\frac{g^4}{\nu} \cdot b^5 J^4},$$

ha pedig a repedésekben lamináris vízmozgás van, akkor

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J.$$

A számítással nem megközelíthető hasadékos kőzetrendszer hidraulikáját ÖLLŐS sík, majd térbeli modellen vizsgálta kitűnő eredménnyel az utóbbi években. Különösen érdekes eredményeket kapott az egy ponton megcsapolt karsztrendszer nyomás- és vízhozamviszonyainak elemzése terén. A sikeres kísérletek folytatását a hazai karsztos alaphegységű barnakőszénbányászat tovább folytatja.

Érdekes kísérlet van folyamatban a dunántúli karsztra települt bauxitbányászat aktív vízszintsüllyesztése kapcsán is. Egy olyan grafitos elektromos síkmodellt szerkesztett KISS, amelynek segítségével megismételt mérésorozatokkal a depresszió időbeni távolhatását is követni tudják.

IRODALOM

1. SÁROSI L.: Reológiai vizsgálatok felhasználása a szivárgó vízmozgás dinamikai jellemzésénél. *A szivárgás és a kúthidraulika kérdései-ankét*, Budapest 1966 I/A témacsoport.
2. PAPPALVY, F.: A szivárgási tényező meghatározására szolgáló módszerek egyes kérdései. *Ugyanott.*
3. KOVÁCS, Gy.: Dynamic Investigation of Seepage by Invariant Numbers. *Ugyanott.*
4. SMIDER, A.: Nadezsdnoszty i szoposztavlenija nyekotorüh metodov opredelenija koefficienta filtracii. *Ugyanott.*
5. ÉLIÁS E.—JUHÁSZ J.: Az anizotrópia tényező meghatározása. *Ugyanott.*
6. SZABÓ L.—SZEKRÉNYI B.: A drénezés és mélylazító hatása a nyugat-magyarországi pszeudoglejes erdőtalaj vízvezető képességére. *Ugyanott.*
7. BONDARENKO, N. F.: O prirode filtracionnüh anomalij zsidkosztyej. *Ugyanott.*
8. PANAJOTIS—CHARDABELLAS: Kennzahlen für den Übergangsbereich von der zähigkeitsbedingten zur trägheitsbestimmten Filterströmung in grobdispersen Medien. *Ugyanott.*
9. MANFRED—LUDEWIG: Untersuchungen über die Gültigkeitsgrenzen des Darcyschen Gesetzes bei körnigen Lockersedimenten. *Ugyanott.*
10. IJJAS, I.: A vízszintessel $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ -os szöget bezáró irányú kapilláris emelkedés vizsgálata. *Ugyanott.*