

A JÓRÓZUS KÖZEG TRANSZPORTFOLYMATAINAK ÉRTELMEZÉSE
A PÓRUSKAPCSOLATOK ÉS A TÖBBFÁZISÚ ÁRAMLÁS EGYENLETETI
ALAPJÁN

Egyetemi doktori értekezés

Készítette: Dercsényi László tudományos munkatárs

Magyar Szénhidrogénipari Kutató-Fejlesztő Intézet

1982.

A PORÓZUS KÖZEG TRANSZPORTFOLYAMATAINAK ÉRTELMEZÉSE A PÓRUSKAPCSOLATOK
ÉS A TÖBBFÁZISU ÁRAMLÁS EGYENLETEI ALAPJÁN.

oldal

BEVEZETÉS, ELŐZMÉNYEK.	1
CÉLIKITÜZÉS, A MEGOLDÁS FELÉPÍTÉSE	3
1. A TRANSZPORTFOLYAMATOK M I K R O S Z K Ó P I K U S TÁRGYALÁSA..5	
1.1. E szemlélet jelentősége, helyzete	
1.2. Az egyensúly alapvető fizikai jelenségei.	6
1.2.1. Kapilláris jelenségek - felületi feszültség	
1.2.2. A nedvesítés	
1.3. Az elmozdulás tárgyalása a pórus mérettartományában	14
1.3.1. A kapilláris és viszkózus erők szerepe	
2. A TRANSZPORTFOLYAMATOK M A K R O S Z K Ó P I K U S TÁRGYALÁSA..21	
2.1. E szemlélet jelentősége, a porózus blokk kontinuitása	
2.2. Két, nem elegyedő folyadék egyensúlya a porózus blokkban	25
2.2.1. A kapilláris erő	
2.2.2. A kapilláris erő és telítettség kapcsolata	
2.2.3. A kapilláris erő mérési módszerei, a véghatás	
2.2.4. A hiszterézis jelensége, értelmezése	
2.2.5. Összefüggés a kapilláris erő, a felületi feszültség és a pórusszerkezet között	
2.3. Az áramlási törvény felállítása, jellege a porózus blokkban..52	
2.3.1. Az egyfázisú, viszkózus áramlás egyenlete	
2.3.2. Két, nem elegyedő folyadék stabilizált áramlása, a relatív áteresztőképesség fizikai tartalma	
2.3.2.1. A relatív áteresztőképesség hiszterézise	
3. TRANSZPORTFOLYAMATOK N A G Y K I T E R J E D É S Ű KÖZEGBEN ...66	
3.1. E szemlélet jelentősége	
3.2. Két, nem elegyedő folyadék áramlási egyenletének diszkussziója	
3.2.1. Kapilláris hatások a porózus közegben	
3.2.1.1 A véghatás effektus általánosítása	
3.2.1.2. A kapilláris erő és a tároló heterogenitásának kapcsolata	
KÖVETKEZTETÉSEK, TÉZISEK	74
HIVATKOZÁSOK , IRODALOM	77



BEVEZETÉS, ELŐZMÉNYEK

A szénhidrogénbányászat jelenlegi fázisában igen fontos az egyre nagyobb kihozatal, fokozatosan előtérbe kerülnek a másodlagos, harmadlagos leművelések; az alkalmas kőzeteket újra-tárolásra használják fel. Így különös jelentősége van a porózus kőzetmátrixban lezajló folyamatok ismeretének, a jellemző fizikai mennyiségek egyre pontosabb mérésének.

A szénhidrogén-telepek jelentős része porózus kőzetekből áll, ami azt jelenti, hogy a kőzetszemcsék között, egymással összeköttetésben lévő parányi térfogatok azaz p ó r u s o k vannak. A pórusok összessége adja azt a potenciális térfogatot, ami szénhidrogén tárolására alkalmas. Ez a pórustér a valóságban több egymással nem elegyedő fázist tartalmaz. Az egyik fázis a rétegvíz, a fennmaradó térfogatban találjuk a gázt vagy olajat vagy mindkettőt.

A rétegméretű áramlások értelmezését a mikroszkópikus és a makroszkópikus tárgyalásmód fizikai törvényei és laboratóriumi kísérletei alapozzák meg. A m i k r o s z k ó p i k u s közelítés mérete a pórusfal és a folyadékcsepp. Az alapvető fizikai jelenségek pedig a viszkozus elmozdulás, a kapilláris jelenségek és a nedvesítés. A több folyadék pórusbeli egyensúlyát és mozgását a mikroszkópikus szemléletben leíró fizikai törvények egyszerűek és ismertek. Nagyon fontos ezzel kezdeni a tárgyalást mert így az alapjelenségeket tisztázzuk, egy kvalitatív magyarázatát építhetjük fel a makroszkópos szemléletnek.

A m a k r a s z k ó p i k u s szemléletben egy porózus blokkra jellemző összefüggések, törvények megalkotására törekszünk. A tárgyalásmód alapja az, hogy a porózus közeget folytonos közegnek tekinthetjük; jellemezve egy bizonyos számú helyi paraméterrel, amelyek a közeggel kitöltött tér minden pontjában definiáltak.

A blokk viselkedése a pórusok viselkedéséből épül fel.

A közetfizikai laboratórium alapvetően a porózus blokk porozitásának, áteresztőképességének és maradék telítettségének meghatározását végzi a furási tevékenység során felszínre került kőzetmintákon. A blokk mérete kellően nagy egy pórus méretéhez viszonyítva / közel $5 \cdot 10^{10}$ pórust tartalmaz / de még mindig elenyésző a tároló méreteihez. Mégis ezeket az eredményeket, amelyeket a porózus blokkon végzett mérésekből kapunk kell tekintenünk a becsült potenciális és kinyerhető készletek számításánál felhasznált alapadatoknak. Láthatjuk egyáltalán nem közömbös az, hogy milyen mélységben ismertek a porózus blokk transzportfolyamatai.

Az 1975-ben elkezdett kutatómunkának az volt a célja, hogy ellenőrizzük a szakirodalomban közölt módszerek alkalmazási feltételeit, továbbfejlesszük azokat.

Főbb kérdésfelvetéseink az alábbiak voltak:

- milyen értelmező, kiértékelő eljárások szükségesek ahhoz, hogy a "nyers" méréseredményekből a porózus blokkra érvényes mennyiségeket kapjuk meg.
- mekkora az egyes paraméterek méréséhez szükséges reprezentatív minta térfogat
- az eddig mért paramétereket csoportosítsuk a tárolóméretű áramlások felépítésénél játszott fontosságuk alapján.

CÉLKITÜZÉS, A MEGOLDÁS FELÉPÍTÉSE

A disszertáció megírásának az volt a célja, hogy egységes keretbe foglalja azokat a kutatási eredményeket, mérésmethodikái, értelmezési továbbfejlesztéseket, amelyeket kapott a szerző részben CKGT ill. az SZKFI Kutatási Főosztályától kapott megbízások teljesítése során. A módszertani fejlesztésre azért volt szükség mert több esetben olyan minták kerültek a laboratóriumba, amelyeknél az addigi módszerek alkalmazása nem adott megnyugtató eredményt. Így egy olyan átfogó, az alapokig visszanyúló kutatási programot terveztünk és hajtottunk végre, amely az alapvető fizikai jelenségektől indul.

A feladat megoldása során a következő felépítést követtük.

Először áttekintettük a mikroszkópikus közelítés alapvető fizikai jelenségeit / nedvesítés, kapilláris jelenségek, stb./ az egy pórus méretében lejátszódó egyensúlyi és az elmozdulás kölcsönhatásait.

Ezután a porózus test kontinuumos leírásának lehetőségeit elemeztük, ami a makroszkópikus tárgyalásmód alapja. A porózus blokk méretében tanulmányoztuk több fázis egyensúlyi feltételeit. A porózus közegre érvényes egyfázisú, viszkozus áramlás egyenletét kísérletileg vizsgáltuk, milyen kapcsolatban van a porushálózatok felépítettségével.

A jelenségek tárgyalásánál több esetben szorítottunk kvalitatív felismerések, következtetések közlésére, mivel ezek a modellek igen egyszerű közelítései a valóságos porusrendszereknek, de mindenképp szükségesnek tartottuk felhívni a figyelmet a jelenségek közötti rokonságra.

A mérések során szerepet játszó tényezők ismeretében adaptáltuk, vagy alkottuk meg azt a laborálási methodikát és értelmezési eljárást, amely a tárclo méretü folyamatok értelmezéséhez ad alapadatokat. Az eredmények ipari alkalmazása 1981-től megtörtént.

Az irodalom, a hivatkozások ismertetésénél a közleményeket három csoportba osztottam, aszerint, hogy tartalmilag melyik tárgyalásmóddhoz tartozik. Az ismertetésre kerülő elvi megfigyeléseket, ahol kísérletileg ellenőriztük azt ott bemutatjuk, de a tömörség kedvéért a nagyszámu mérés közül csak az indokoltakat.

A disszertációban a SI mértékegységrendszer jelöléseit és egységeit használtam. A speciális, a szénhidrogénbányászatban használt mennyiségeknél a SPE / Society of Petroleum Engineers / által ajánlott jelöléseket alkalmaztam, amelyek megfelelnek a MNOSZ 4900-55 szabvány betűjeleinek.

1. A TRANSPORTFOLYAMATOK MIKROSZKÓPIKUS TÁRGYALÁSA

1.1. E szemlélet jelentősége, helyzete

A porozus közegben lejátszódó egyensúlyi és transzport állapotok lényegesen függenek a közeg pórusainak strukturájától és a pórusokban lévő folyadék fizikai tulajdonságaitól. Mivel az egyes pórusok viselkedése adja a porozus közeg integrális folyamatát első közelítésben vizsgáljuk egy folyadékcsepp - pórus kapcsolatot.

A p ó r u s a közetszemcsék között lévő térfogat elemi egysége. Felfogásunkban két pórust egymástól az un. "pórustorok" választ el egymástól, amit a pórusok közötti legszűkebb keresztmetszetként értelmezhetünk. Az üledékes kőzetekben, így pl. a homokkövekben, az aleurolitokban lévő pórusok mérete néhány tíz angstromtól század centiméterig változhat. Néhány kutató póruscsoportosítását a pórusok mérete szerint idézzük.

MANEGOLD szerint:

- szuperkapilláris / legkisebb kiterjedésében 1 mm-nél nagyobb/
- kapilláris / méretük $1...10^{-6}$ mm intervallumba esik /
- szubkapilláris / mérete 10^{-6} mm-nél kisebb /

A kapilláris mérettartományban megkülönböztet még

- mikroszkópius mérettartományt / mérete $1...10^{-3}$ mm /
- kolloid mérettartományt / mérete $10^{-3}...10^{-6}$ mm /

ELLIS szerint:

- kapilláris mérettartomány $5 \cdot 10^{-1}...2 \cdot 10^{-4}$ mm sugaru csövecskék szemcséközi porozitásu kőzeteknél;
- hasadékoknál $2,5 \cdot 10^{-1}...2 \cdot 10^{-4}$ mm a kapilláris mérettartomány

MUSKAT szerint:

a produktív homokkövek szemcsenagysága általában 0,05...0,5 mm, az átlag pórusátmérő ennek ötöde.

A pórusok egymásba kapcsolódása jellemző a porozus test felépülésére, amit a pórusfeltárás mérési módszereinél be is mutatunk.

Méretük kapilláris méret, függ a mérés módjától.

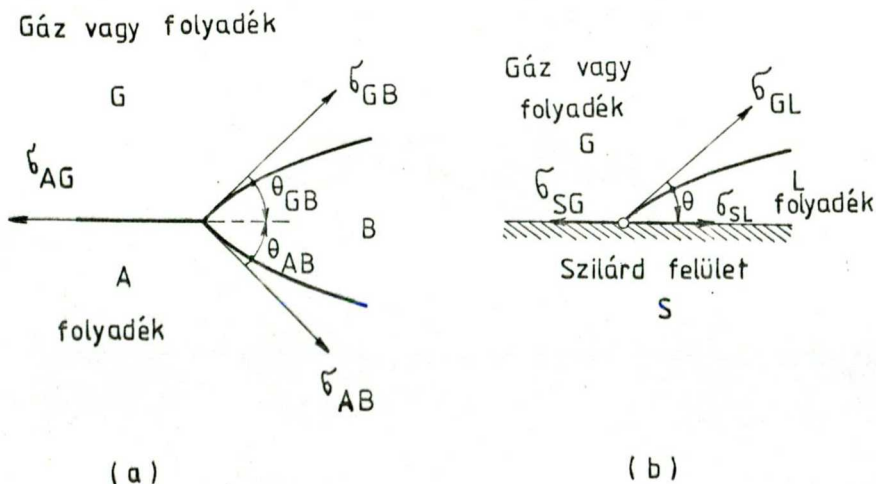
A folyadékcsepp rendelkezik felületi feszültséggel és/vagy nedvesíti vagy nem a pórus felületét. Mi a továbbiakban azt az esetet tárgyaljuk, amikor a pórusfelület víznedves.

Az alábbiakban egy pórustorkon keresztül történő átmozgás kvalitatív leírását adjuk meg, ami mikroszkóp alatt jól megfigyelhető. Ezután a jelenség matematikai leírását adjuk a dimenzió nélküli Π mennyiség bevezetésével PICKELL nyomán./ A.2./

1.2. Az egyensúly alapvető fizikai jelenségei

1.2.1. A felületi feszültség és nedvesítés

Egy folyadék felületén lévő molekulára ható erők eredője, amelyek más folyadékmolekuláktól erednek más mint egy olyan molekulára, amely a folyadék belsejében van. Ez a felületi energia testesül meg a felületi feszültség fizikai tartalmában, amelyet hosszúságegységre vonatkozó erővel, vagy területegységre vonatkozó munkával definiálunk.



1. ábra

Az 1.a. ábrán három fluidum A és B folyadékok, valamint G gáz kapcsolódását mutatjuk, amelyre az egyensúly egyenlete

$$\sigma_{AG} = \sigma_{AB} \cdot \cos \theta_{AB} + \sigma_{GB} \cdot \cos \theta_{GB} \quad / 1 /$$

Ha a $\sigma_{AG} < (\sigma_{AB} + \sigma_{GB})$, akkor egyensúly jön létre és a B folyadék lencse alakot vesz fel. Ha az előzővel ellentétes reláció érvényes, akkor egyensúly nem alakul ki, a B folyadék szétterül A és G között.

Vizsgáljuk meg most azt az esetet, amikor két nem elegyedő fluidum szilárd anyag felületével érintkezik / 1.b. ábra /. Ekkor θ azt a szöget jelöli, ami a szilárd fázis és a sűrűbb folyadék között keletkezik. Általában $0^\circ < \theta < 180^\circ$ és megfigyelés szerint a sűrűbb folyadékon keresztül mérjük.

Az egyensúly egyenlete:

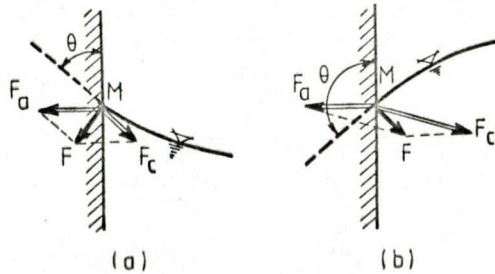
$$\sigma_{GL} \cdot \cos \theta = \sigma_{SG} - \sigma_{SL} \quad \cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{GL}} \quad / 2 /$$

Ezt az egyenletet YOUNG egyenletnek nevezzük, amely kifejezi azt, hogy $\cos \theta$ az érintkező felületek szabad energiáival egyértelműen meghatározott.

A YOUNG egyenlet második alakjából látható, hogy egyensúly akkor nem jöhet létre, ha $(\sigma_{SG} - \sigma_{SL}) / \sigma_{GL} > 1$, amikor is az L folyadék egyenletesen elterül a szilárd anyag felületén.

Ezzel a felfogással értelmezhetjük a nedvesítés fizikai tartalmát. A θ -t érintkezési szögnek nevezzük, a $\sigma_{GL} \cdot \cos \theta$ szorzatot pedig adhéziós feszültségnek.

A fogalmakat felhasználva nedvesítőnek fogjuk nevezni azt a folyadékot, amely $\theta < 90^\circ$ érintkezési szöggel ad egyensúlyt valamelyik szilárd anyaggal. Nem nedvesítőnek a $\theta > 90^\circ$ egyensúlyi állapottal jellemezhető folyadékokat nevezzük. Az elmondottakkal összhangban zéró adhéziós feszültség azt jelenti, hogy mindkét folyadéknak azonos az affinitása az adott felülethez. A 2. ábrán viz mint nedvesítő és levegő mint nem nedvesítő fázisok egyensúlyát szemléltetjük, a 2.b. ábra a higany - levegő



2 ábra

F_a = adhéziós erő

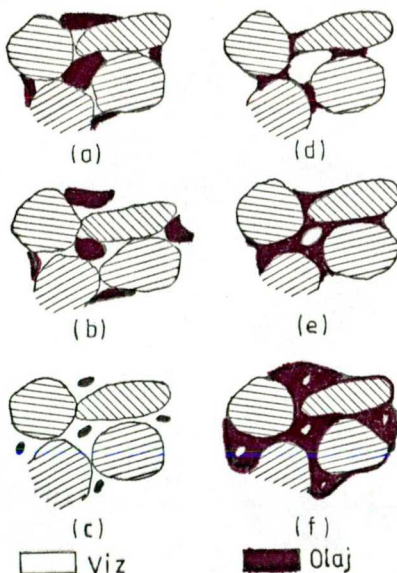
F_c = kohéziós erő

$$F = F_a + F_c$$

θ = érintkezési szög

egyensúlyát mutatja .

A felületi feszültség és a nedvesítés különbözhet ugyanazon érintkező fázisokra attól függően, hogy a folyadék - folyadék vagy folyadék-gáz érintkezési felülete előre halad vagy visszahúzódik a szilárd felületen. Ezt a jelenséget hiszterézisnek nevezzük, amiről később részletesen szólnunk a 2.2.4. fejezetben.



3. ábra

A nedvesítés fogalmának bevezetésével három típusu olajtelítettséget különböztetünk meg 0 % és 100 % telítettség intervallumban PIRSON / 1958/.

A 3.a. ábrán igen alacsony víztelítettséget szemléltet. A nedvesítő víz a pórusok szögleteibe van befűződve, nem ad folytonos vízfázist. A víz penduláris gyűrűket alkot, innen a penduláris, gyűrűs telítettség elnevezés. Gyakorlatilag nincs olyan nyomás, amellyel az egyik gyűrűt a másikhoz kapcsolhatnánk, egymástól elszigeteltek a befűzések.

Amint a nedvesítő fázis telítettsége növekszik, a penduláris gyűrűk kiterjednek amíg egy folyamatos nedvesítő fázist képeznek. Azt a telítettséget, amelyiknél ez bekövetkezik a nedvesítő fázisra vonatkozó egyensúlyi telítettségnek nevezzük.

Ekkor a vízfázis már mobilis, innen a funikuláris elnevezés / 3.b. ábra /. Tovább növelve a víztelítettséget, az már a nem nedvesítő fázis rovására terjeszkedik és ez a fázis szűnik meg folytonosnak maradni ; cseppekre szakad szét és a legnagyobb porusokban marad mozdulatlan / 3.c. ábra / .

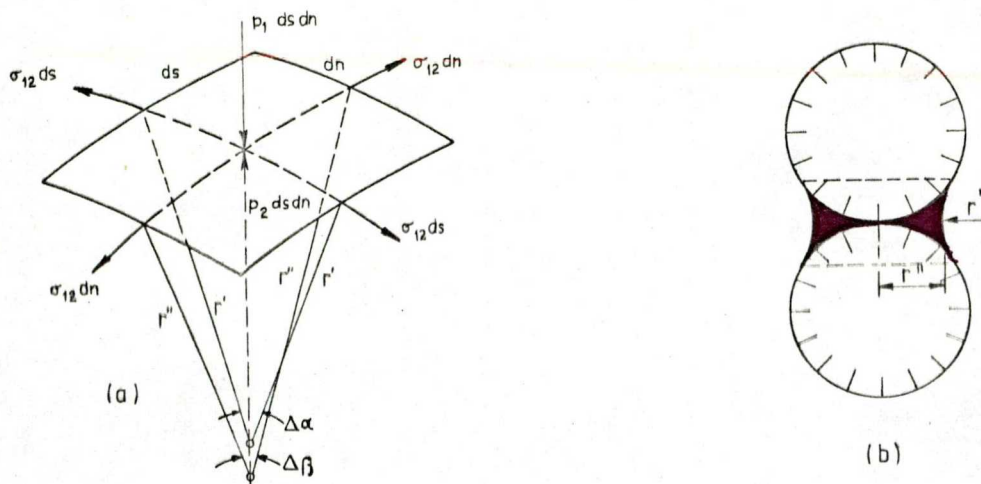
Ha a víz fázis mozog is, ezek a cseppecskék nem mozdulnak, csak akkor, ha a nyomáskülönbség képes átpréselni azt a kapilláris szűkület korlátján. A víz-levegő telítettség állapotaira meg kell említenünk egy esetet, amikor a porusok gyakorlatilag levegővel vannak telítve . A víz ekkor egy vagy több molekula rétegű vastagságban adszorptíve kötött a szemcsékhez . Ez a vízfilm folytonos vagy nem a szilárd felületen. Néhány esetben ezek a vízfilmek okozzák a vízfázis folytonosságát penduláris telítettségek mellett is STALLMAN /1964 /.

1.2.2. A kapilláris nyomás

Amikor két, nem elegyedő folyadékot hozunk kapcsolatba a porusok láncolatával nyomáskülönbség lép fel a határterület görbültsége miatt. A nem nedvesítő folyadék azon az oldalon helyezkedik el, amely a legkisebb sugaru görbület középpontját tartalmazza. Ebből az következik, hogy a határfelületen keresztül nyomás akadásnak / diszkontinuitás / kell léteznie, és hogy a nem-nedvesítő folyadéknak nagyobb nyomáson kell lennie a nedvesítő folyadékhoz képest.

A határfelületen létező nyomáskülönbség a kapilláris nyomás:

$$P_c = P_{hw} - P_w$$



4. ábra

ahol a p_{nw} a nem-nedvesítő fázisban, p_w a nedvesítő fázisbeli nyomás értéke. Az elemi terület egyensúlyát a 4. ábra alapján írhatjuk fel, ami a kapilláris nyomás LAPLACE egyenlete. Az r' és r'' , az egymásra merőleges fő, görbületi sugarak. Mindkettő pozitív, mert a görbületi középpontjuk a határfelület ugyanazon oldalán van.

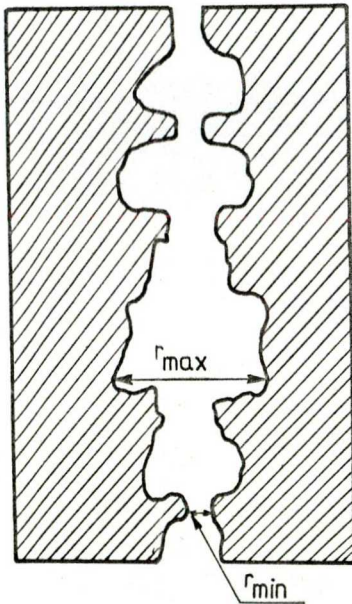
$$\Delta p = p_c = p_2 - p_1 = \sigma_{12} \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} \right) = 2 \sigma_{12} / r^* \quad / 4 /$$

Az r^* , az átlagos görbületi sugár a $2/r^* = 1/r' + 1/r''$ egyenlettel meghatározott. A zárójelben lévő kéttagu összeget effektív görbületi sugárnak is szokás nevezni. A kapilláris nyomás a porusláncolat szívóképeségének mértéke a nedvesítő fázisra vonatkozóan, vagy a nem nedvesítő fázisra a visszafüzdés mértéke.

Az 5.a. ábrán bemutatott poruslánc nem tárgyalható közvetlenül a LAPLACE egyenlettel, hiszen a felület és a fő görbületi sugarak pontról pontra változnak. Az összefüggések megállapítá-

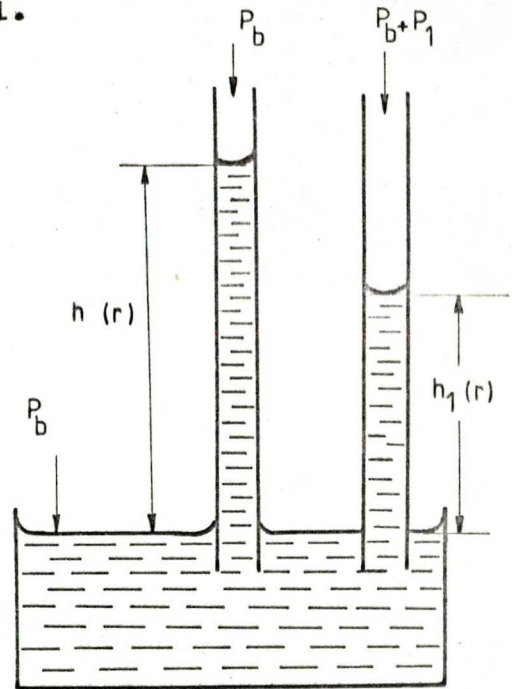
sához modelleket kell alkalmaznunk.

A legegyszerűbb modell az r sugaru párhuzamos falu kapilláris. Ebben az esetben a meniszkusz annál a h magasságnál jut egyensúlyba, ahol a nedvesítés felfelé ható húzóereje egyenlő lesz a folyadékoszlop súlyerejével.



egydimenziós póruslánc

a.)



r sugarú kapilláris

b.)

5. ábra

Ha θ -val jelöljük az r sugaru cső és a folyadék anyagi minősége által megszabott illeszkedési szöget a szűk csőben a meniszkusz $R = r / \cos \theta$ sugaru gömbfelületnek tekinthető. A görbületi nyomás így :

$$p_g = \frac{2 \sigma_{12}}{r^*} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r}$$

A felfelé ható erő ekkor

$$\bar{F}_h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \cdot r^2 \cdot \pi = \rho \cdot g \cdot h \cdot r^2 \cdot \pi \quad / 6 /$$

, ahol az egyenlet jobb oldala a ρ sűrűségű, h magasságú folyadékoszlop súlyereje. A /6/ összefüggés egyszerűsítésével

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad / 7 /$$

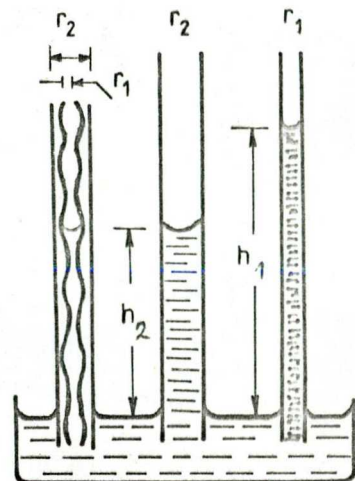
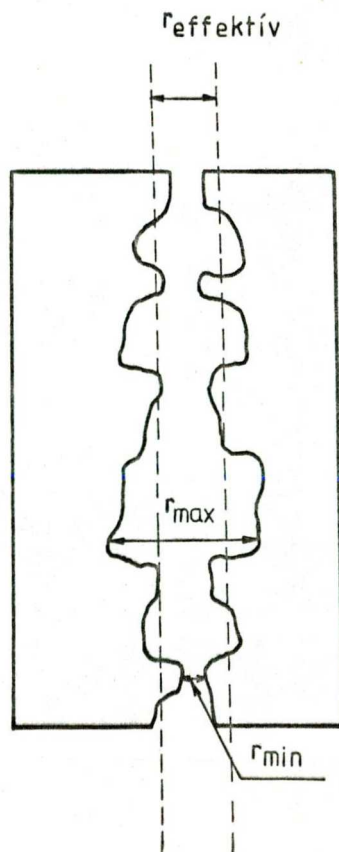
, ami vizre az alábbi egyszerű alakot veszi fel:

$$h_w = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad / 8 /$$

Valamilyen p_1 nyomást alkalmazva a kapillárisban, a folyadék szint

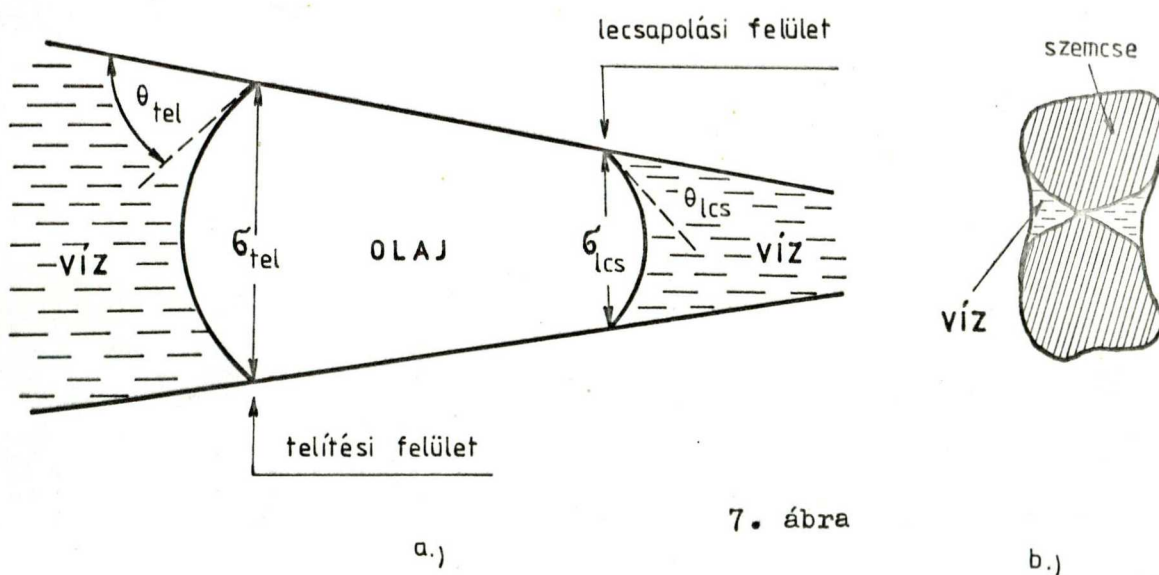
$$h_1 = h - \frac{p_1}{\rho \cdot g} \quad / 9 /$$

mértékben kiüzhető a kapillárisból.



A másik modell az "öblös csőmodell" amely két r_1 és r_2 sugaru kiöblösödések és szűkületek periodikus egymásutánja. / 6. ábra / Egy ilyen cső emelési magassága megegyezik egy r_1 sugaru kapilláris emelési magasságával, ha azt egyik végénél a folyadékba mártjuk. Nem ezt tapasztaljuk viszont akkor, ha a telítést úgy végezzük, hogy teljesen elmerítve a folyadékban kiemeljük azt. Ekkor annál a folyadékmagasságnál fog megállni a meniszkusz, ami az öblös cső másik jellemző méretével az r_2 sugaru kapilláris emelési magasságával egyenlő.

Az öblös csőmodell már jobban közelíti a kapilláris láncolatot, mivel érzékeny a histerézis jellegére.



7. ábra

Még egy modellt vizsgáljunk meg, amely a nem párhuzamos fa-
lu kapilláris modellje / 7.a. ábra /. Amint láttuk a kapillá-
ris erő mindig a meniszkusz görbületi középpontja felé mutat és
nagysága a görbületi sugárral fordított arányban áll. Így a kup
alaku kapilláris csőben a nedvesítő folyadék - a különböző su-
garak következtében - a szűkület felé törekszik. A modellel a
közetszemcsék érintkezési szűkületeinél fellépő befűződéseket
tárgyalhatjuk / 7.b. ábra /

Kvalitatíve megállapíthatjuk azt - ami a felületi feszültség
értelmezéséből adódik, hogy minél jobban növeljük a nem nedve-
sítő fázis energiáját, annál jobban követi a pórusláncolat
bonyolult felszínét.



1.3. Az elmozdulás tárgyalása a pórus mérettartományában

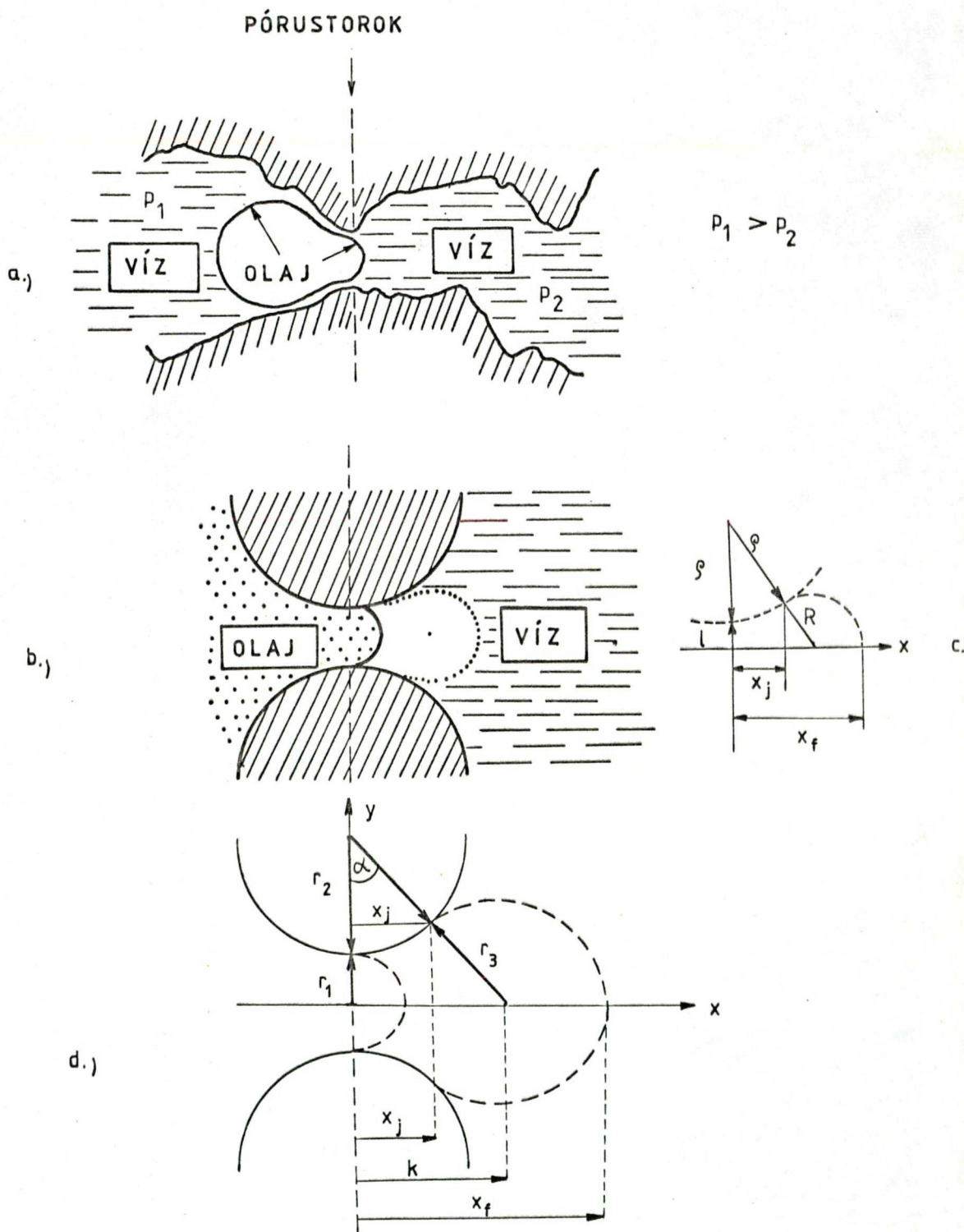
1.3.1. A kapilláris és viszkózus erők szerepe

Mielőtt egy olajcsepp viselkedését vizsgálnánk a porustorkon történő áthaladáskor / 8.a. ábra / a későbbiekben is használatos két alapvető folyamatot kell megkülönböztetnünk. Felszívási folyamatnak azokat a folyamatokat nevezzük, amelyeknél a nem nedvesítő fázis telítettsége növekszik, míg lecsapolási folyamatoknál e fázis telítettsége csökken. Felszívási folyamat ha olajjal hajtjuk ki a vizet, lecsapolás, ha vízzel hajtjuk ki az olajat / pl. 8.a. ábra lecsapolás / .

Vizsgáljuk most a lecsapolási folyamatot. Bizonyos nyomásra van szükség ahhoz, hogy a folyadék-folyadék határfelületet egy olyan alakba kényszerítsük, amely áthalad a porózus közegbe vezető legnagyobb belépési pontokon. Nagyobb nyomások további besajtolott térfogatokat eredményeznek, ami a folyadék-folyadék határfelületek egyre görbültebb alakját kívánják. Ez azt is jelenti egyben, hogy a nem-nedvesítő folyadék határfelületek energiája növekszik. A kísérlet végrehajtásakor energiát viszünk a rendszerbe, ami arra használdik fel, hogy a folyadék-folyadék határfelületeket megváltoztassa.

Az energia mintában kétféle módon tárolódhat. Egyrészt a pórusokba lefűződött nem nedvesítő fázis határfelületi területének megváltozásával, másrészt a nedvesítés megváltozásával.

Tekintsük mostmár a nem nedvesítő folyadék besajtolását egyetlen pórusba /8. ábra /. Amint a nem-nedvesítő folyadékot a szűkületbe kényszerítjük / ld. porustorok / a besajtolási nyomás a maximális értékig növekszik, amikor a front a legszűkebb pontnál van. A további besajtolás a nyomás csökkenését eredményezi, mivel a torok után a front görbületi sugara nőni fog / 8.b ábra / A lecsökkent nyomás nem tartja az effektív görbületi sugarat, így egy bizonyos értéknél a "folyadékszál" szétszakad. A besajtolási front a szűkület bal oldalára visszahúzódik és egy nem



8. ábra

nedvesítő folyadékcsapp elszigetelten visszamarad a szűkület jobb oldalán / "lefűződés" /. A nem nedvesítő fázis felülete nőtt, a rendszerbe általunk bevitt munka a megnőtt felületi energiában tárolódik. Megjegyezzük, hogy ez a csapp-leválási hatás figyelhető meg a lázmérők szűkületénél, ahol a kapilláris a szűkület után kitér.

1.3.1. Az olajcsapp átsajtolásának matematikai tárgyalása

Vizsgáljuk most egy olajcsapp áthaladását egy pórustorkon. Tegyük fel, hogy a pórus eredetileg vízzel telített, így a csapp lassu előre mozgása során egy nagyon vékony vízfilm képződik a pórus falán / 8.a. ábra /, ami azt jelenti, hogy a pórusfal és az olaj között az érintkezési szög zéró marad. A 9.b. ábra pórusmodelljére felírt LAPLACE egyenlet:

$$p_c = \sigma \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right) \quad / 10 /$$

,ahol r_a és r_b a tórusz fő görbületi sugarai.

Definiáljuk a $\mathcal{H}$ dimenzió nélküli mennyiséget PICKELL nyomán az alábbi egyenlettel - felhasználva 8.b. ábra jelöléseit

$$\mathcal{H} = \frac{p_c \cdot r_1}{\sigma} \quad / 11 /$$

A /10/ és /11/ egyenlet alapján a következő általános összefüggést kapjuk

$$\mathcal{H} = \frac{1}{r_a / r_1} + \frac{1}{r_b / r_1} \quad / 12 /$$

Az előre haladó front alakja gömbfelület. A 8.b. ábrán egy létrejött kiterjedését r_3 -al jelöltük. A dimenzió nélküli $\mathcal{H}_f$

az olajfrontra felírva

$$\pi_f = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{2}{R} \quad \text{és} \quad R = \sqrt[3]{r_1} \quad / 13 /$$

A pórustoroknál a fő görbületi sugarak ℓ és $-\rho$ / a negatív előjel azt mutatja, hogy a az olajfelület külső oldalához irányított / 8.c. ábra / és nagysága $\rho = r_2/r_1$. Ennélfogva π értéke a toroknál

$$\pi_t = \frac{1}{\ell} - \frac{1}{\rho} \quad / 14 /$$

Egy adott pórusban valamely két érintkező folyadékfelületre vonatkozóan π_f arányos a kapilláris nyomással. A pórustorokon áthaladó olajfrontot az $x_f = R = 1$ egyenlet jellemzi. Ekkor

$$\pi_f = \frac{2}{R} = 2 \quad > \quad \pi_t = \frac{1}{\ell} - \frac{1}{\rho} \quad / 15 /$$

, ami kifejezi, hogy a torokba préselt nem nedvesítő felületre a nyomáskülönbség a maximális. A front pórusba mozgásával ez a különbség csökken.

Vizsgáljuk meg részletesen a π_c , π_f , és π_t közötti kapcsolatot egy konkrét pórusban. Esetünkben ρ legyen egyenlő négygel ℓ pedig egységnyi. π_c a szűkület torkában a legnagyobb, ahol

$$\pi_c = \pi_t = \frac{1}{\ell} - \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1} - \frac{1}{4} = 0,75 \quad / 16 /$$

π_c értékei az olajjal telített torok és a határfelület közötti kapcsolatot adják meg. Számolásainkhoz a

$$\frac{\tau_a}{\tau_1} = \frac{\rho (\rho + \ell)}{\sqrt{\rho^2 + x^2}} - \rho \quad / 17 /$$

illetve

$$\frac{\tau_b}{\tau_1} = -\rho \quad / 18 /$$

helyettesítéseket használtuk fel. A /17/ és /18/ egyenletek / 12 / egyenletbe írva $x = 0$ -nál, ami a frontot a torokban rögzíti valóban $\pi = \pi_c = 0,75$ értéket adja.

A π_f függvény viselkedését, ahogy az olajfront mozog előre a 8.d. ábra jelöléseivel adhatjuk meg. Felhasználva a /13/ egyenletet és r_1 -et, a torok sugarát egységnyinek választva

$$\pi_f = \frac{2}{\frac{\tau_3}{\tau_1}} = \frac{2}{\tau_3} \quad \text{és} \quad \tau_3 \leq 1 \quad / 19 /$$

Az olajfront görbületének r_3 kifejlődésű állapotát adtuk meg a 8.d. ábrán, amelyre a következő geometriai összefüggéseket írhatjuk fel.

$$\sin \alpha = \frac{x_j}{\tau_2} \quad \text{ill.} \quad \sin \alpha = \frac{k}{\tau_2 + \tau_3} \quad / 20 /$$

Felírható még a görbületi sugár középpontjának a toroktól vett k távolságára egy PYTHAGORAS tétel

$$k^2 = (\tau_2 + \tau_3)^2 - (\tau_2 + \tau_1)^2 \quad / 21 /$$

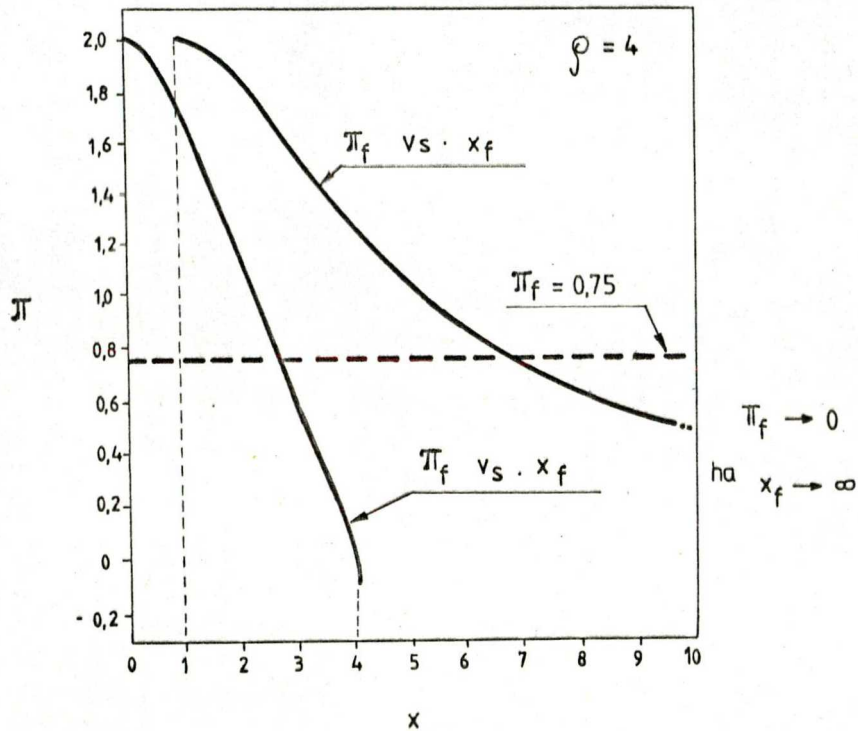
A /20/ és /21/ egyenletekből x_j -re és x_f -re az alábbi egyenleteket kapjuk

$$x_j = \frac{k \cdot \tau_2}{\tau_2 + \tau_3} \quad / 22 /$$

$$x_f = k + \tau_3$$

Az x_j mennyiség a szilárd határoló felület görbületét még éppen követő pont távolodását adja a pórutoroktól, x_f pedig

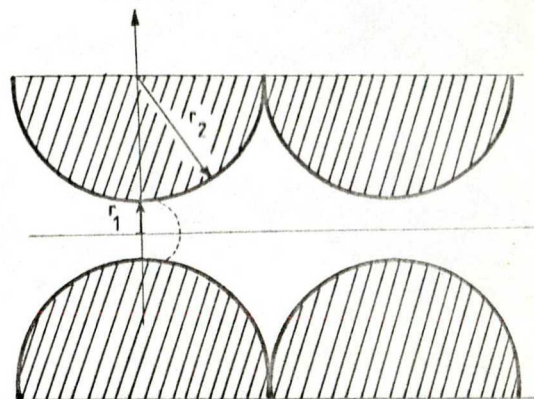
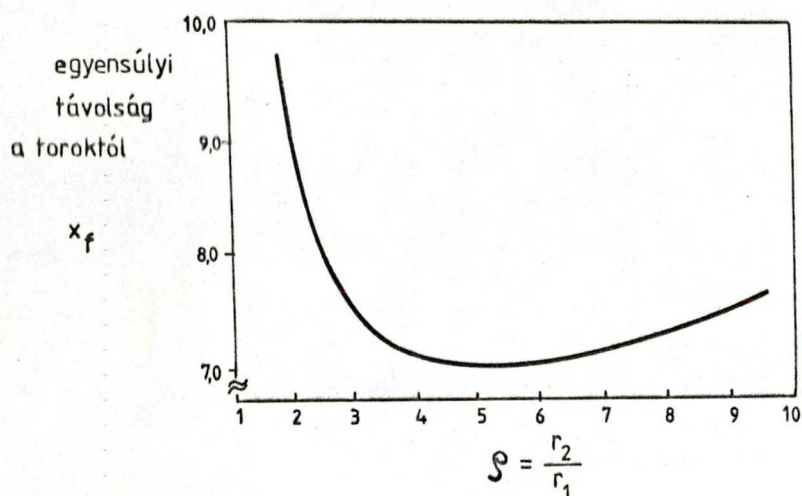
a határfelületi front mozgását adja. Amikor a csepp a leggömbültebb felületet veszi fel $k = 0$; $x_f = r_3 = 1$ lehet minimálisan.



10.ábra

Láthatjuk, hogy a π_f függvénye az x_f és az x_j redukált távolságoknak / 8.c. ábra / és amint azt már megjegyeztük $\pi_f > \pi_t$ a torok közelében. Az olaj előrehaladását kifejező π_f mennyiség fokozatosan csökken, ahogy távolodunk a pórus-toroktól / 10.ábra / . $\pi_f \rightarrow 0$, ha $x_f \rightarrow \infty$ a vizuális megfigyeléssel összhangban. A π_f monoton csökken a 0,75 értékig és $x_j = 2,65$ értéknél $x_f = 7,07$. Az olaj balról csak addig az értékig tud mozogni az x tengely mentén, ameddig van utánpótlása azaz az x_f nem válik 7,07 értéké. Nagyobb távolságoknál a kapilláris nyomás kisebb lesz mint a torokban, így az olaj nem mozog a szűkületben. A szűkület relatív mértéke - a ρ megadja a front előre mozgását a $\pi_f = \pi_t$ értékig.

Levonhatjuk azt a fontos következtetést, hogy a pórus geometriája, a két pórustorok közötti távolság és az öblösödés mértéke jellemző, befolyásolja az olaj elmozdulását.

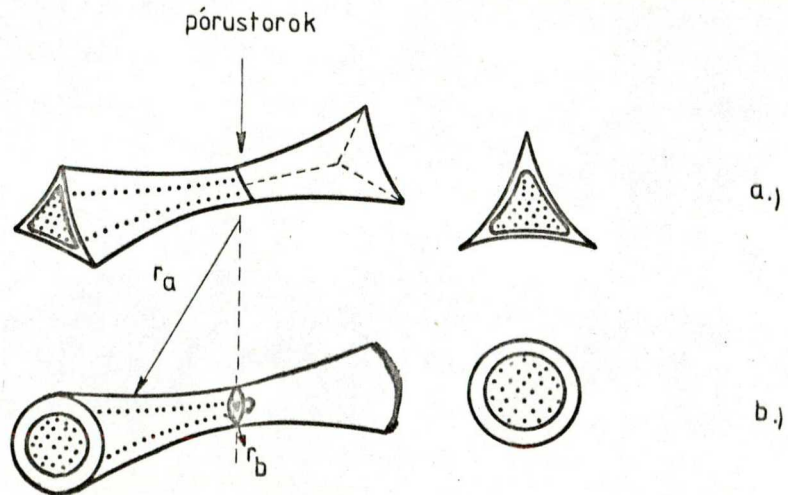


11. ábra

Továbbfejlesztve PICKELL modelljét és kísérleti eredményeit abból a célból, hogy adott pórustorokhoz mekkora öblösödés tartozik a következőket állíthatjuk. A ρ értéke egyben kifejezi azt is, hogy két szűkület milyen távolságra következik egymástól azaz a szűkülethez milyen mértékű öblösödés tartozik modellünkben / 11. ábra /. A π_f mennyiség egyensúlyba jutását a pórus geometria szabta meg. A 11. ábra az egyensúlyi távolság és a pórusgörbület kapcsolatát szemlélteti. $\rho = 5$ értéknél minimuma van a görbének. Az ennél gyakoribb $\rho < 5$ és ritkább $\rho > 5$ pórus egymásra következés nem befolyásolja jelentősen az egyensúlyi távolságot $3 < \rho < 10$ intervallumban. Ennek az a jelentősége, hogy az 5.a. ábra pórusláncolatának rendszeretlen pórusváltakozását - adott r_{min} és r_{max} kompaktságon belül egységesen kezelhetjük, ami megalapozza a csoportosítást.

Az előbbi következtetéseinket kör keresztmetszetű szűkületre alkottuk meg. Vizsgáljuk meg egy bonyolultabb modell

hatását az olajcseppre, amelyet a 9.a. ábrán szemléltetünk.



9. ábra

Ahogy az olajfront mozog a háromszög keresztmetszetű szűkületben mindhárom szegmens szorításának hatására a torokban a profil közelítőleg kör alakúvá válik.

Összefoglalva: a valódi pórusokban bekövetkező mozgások leírására modelleket alkalmaztunk. A folyadék mozgása erősen függött a pórus geometriájától. A pórusláncolat felépítettségére megfigyeltünk egy együtt kezelhetőséget. Az öblösödések mértéke arányos a torok keresztmetszetével, mintegy 4-6 szorosa, amit a folyadék mozgásának elemzéséből állapíthattunk meg.

A pórus méretében lejátszódó folyamatokat a kapilláris erők befolyásolják alapvetően.

2. A TRANSPORTFOLYAMATOK MAKROSZKÓPIKUS TÁRGYALÁSA

2.1. E szemlélet jelentősége, a porózus blokk kontinuitása

Gyakorlatilag nincs teljesen tömör közet. A leülepedéskor egymással érintkező szemcsék az egyre mélyebbre temetődés során cementálódnak és így kapilláris méretű póruskapcsolatok hálózata alakul ki a közetben.

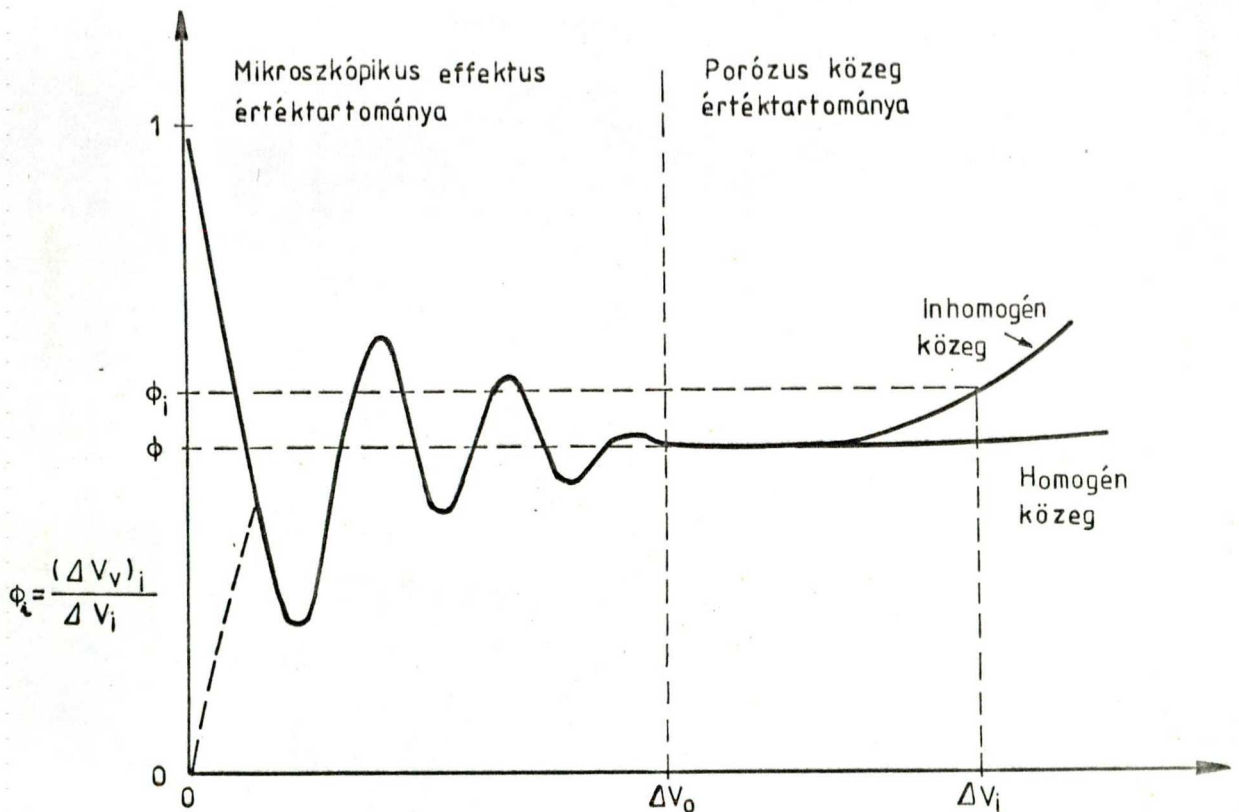
A makroszkópikus szemléletben kellően nagyszámu, egymással véletlenszerűen kapcsolódó pórusrendszerek transzportfolyamatait vizsgáljuk, amikor is kellően nagy az elemi pórusok száma ahhoz, véges számu pórus elhagyása vagy addíciója a paraméter átlagát ne befolyásolja jelentősen. Azt a térfogatot, amely az átlagparaméter stabilitását megadja *r e p r e z e n t a t i v* térfogatnak nevezzük.

Ez a megfontolás nem új, ezt alkalmazzák az összes makroszkópikus fizikai elméletben; pl. egy elektromosan töltött test állapotainak leírásához használják a töltés-sűrűség fogalmát. Ez a mennyiség minden pontban definiálható, mint az elemi térfogatban lévő összes töltés határértéke, mikor a térfogatelem határértéke csökken. Mégisincs jogunk ebben a megfogalmazásban a zérus határértékről beszélni, az elemi térfogatnak elég nagynek kell lenni ahhoz, hogy a konvergencia stabilitása kielégítő legyen.

Ugyanezzel a körülménnyel találjuk szembe magunkat a porózus közeg tanulmányozásakor. Egy porózus tömbnek az átlagos porozitása egyenlő a blokk nem szilárd térfogattal kitöltött térfogatának és teljes blokk térfogat hányadosával. Ha a blokkban a jellemzők változnak a ΔV térfogatelem választásától, akkor az eljárást úgy finomíthatjuk, hogy a helyi porozitást meghatározzuk a blokk minden pontjában a következő módon.

Vesszünk egy térfogat elemet az illető pont körül és vesszük ennek az elemnek az átlagos porozitását. A ΔV elemnek elég kicsinek kell lenni ahhoz, hogy a közeg helyi jellemzőjét

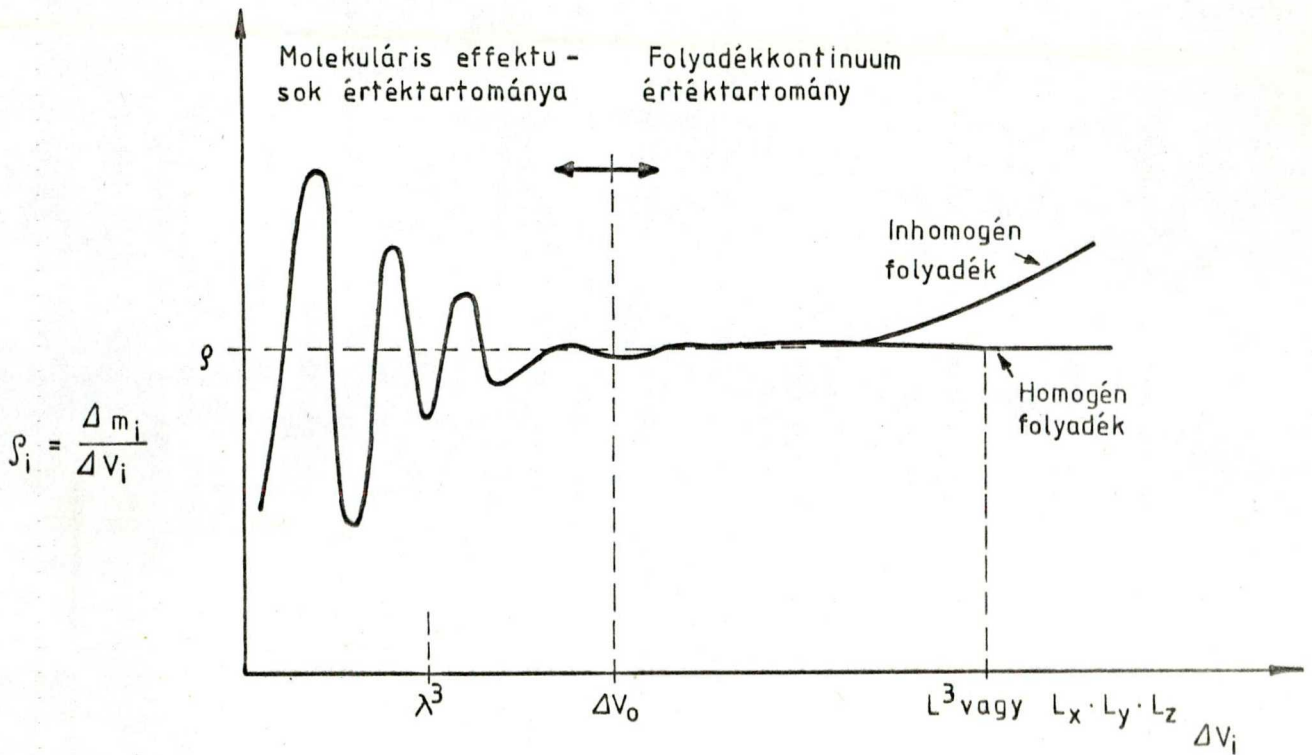
meghatározhatjuk de elég nagynak is a pórusok méretéhez viszonyítva. Ha pl a tekintett pont körül elemi térfogatnak egy gömböt választunk - melynek középpontja az adott pont - és változtatjuk az r sugarat, akkor a porozitásnak a 12.b. ábrán bemutatott változását tapasztaljuk. A térfogat elem $\Delta V > \Delta V_1$ választása esetén



12.b. ábra

a térfogat elem túl nagy a lokális porozitás megadására, viszont a bevezetett hányados alkalmas a homogén és inhomogén közeg elválasztására. Ez analóg a 12.a. ábra homogén és inhomogén folyadék szétválasztásával.

Amikor a $\Delta V < \Delta V_0$, vagyis a térfogat elem túl kicsi - nem tartalmaz elégséges számú pórust ahhoz, hogy az átlagképzés kellő stabilitással rendelkezzen, a porozitás szabálytalan váltakozást mutat. Határértéke zérus vagy egy attól függően, hogy a pont egy szilárd szemcsében, vagy egy pórusban lett felvéve.



12.a. ábra

El lehet képzelni olyan porózus közeget is, melyek annyira heterogének, hogy nem lehetséges a helyi porozitás meghatározása. Mielőtt elemeznénk a / 25/ összefüggéssel definiált ϕ_i hányados stabilitását becsüljük meg mennyi az 1 cm³ köztérfo-
 gatban lévő pórusok száma. Tegyük fel, hogy a szilárd térfogat és a pórusok térfogata 4/5 ill. 1/5 arányban oszlik meg. Te-
 kintsük a pórusokat kicsiny gömböknek $\bar{r} = 10^{-4}$ cm átlagos su-
 gárral, akkor egy pórus térfogata

$$V_{p,1} = \frac{4 \bar{r}^3 \cdot \pi}{3} \approx 4 \cdot (10^{-4})^3 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3 \quad / 23 /$$

és az 1 cm³ térfogat pórustere

$$N_p = \frac{0,2 \text{ cm}^3}{4 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3} = 5 \cdot 10^{10} \quad / 24 /$$

darab pórust tartalmaz.

Megjegyezzük, hogy a normál állapotú gáz 1 cm^3 -ében jóval több, $3 \cdot 10^{19}$ molekula van, mégis sz. itt becsült pórusszám elegendő ahhoz, hogy a porózus blokkot kontinuumnak tekinthessük és bevezessük a porozitás fogalmát. Ez a gondolatmenet analóg PRANDTL és TIEFJENS / 1934 / gondolatmenetével, akik a folyadék kontinuumos közelítésénél vizsgálták a $\rho_i = \Delta m_i / \Delta V_i$ hányados stabilitását. / B.1. /

Legyen P egy pont a porózus közeg által elfoglalt tartomány belsejében. Tekintsünk P körül egy V_i térfogatot, amely gömb alakú és jóval nagyobb egy egyedi pórusnál. Erre a térfogatra felírhatjuk az alábbi hányadost:

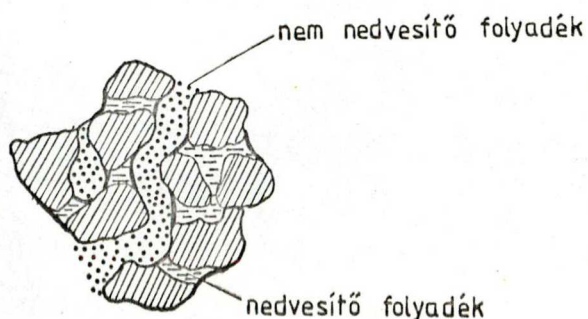
$$\phi_i = \frac{(\Delta V_v)_i}{\Delta V_i} \quad / 25 /$$

, ahol $(\Delta V_v)_i$ a ΔV_i térfogaton belüli üres tér térfogata. A ϕ_i hányados stabilitását, azaz a porozitás változását a térfogattal a 12.b. ábrán szemléltetjük. A porózus blokk mérete adja a ϕ_i hányados ingadozás nélküli tartományát. Csökkentve a vonatkoztatási térfogatot ϕ_i nullához vagy egyhez tart. A térfogat növelésével ϕ_i elveszíti a lokális tulajdonságát, azaz nem azonos rétegek porozitásának átlagolását adja. Az inhomogenitás azt jelenti, hogy ϕ_i már nem a homokkőkifejlődésekre jellemző porozitási érték.

Az alábbiakban megvizsgáljuk az egyensúly és folyadékmozgás jelenségeit a porózus blokk méretében. Ez a térfogat néhány köbcentimétertől $60 - 70 \text{ cm}^3$ értékig változik aszerint, hogy a reprezentatív mintatérfogat mekkora az egyes paraméterek meghatározásánál. Részletesen elemezzük a maradék telítettség / S_m / és az áteresztőképesség stabilitásához tartozó reprezentatív térfogatok a pórusfelépítettség, a pórusszerkezet függvényében.

2.2. Két nem elegyedő folyadék egyensúly a porózus blokkban

2.2.1. A kapilláris erő



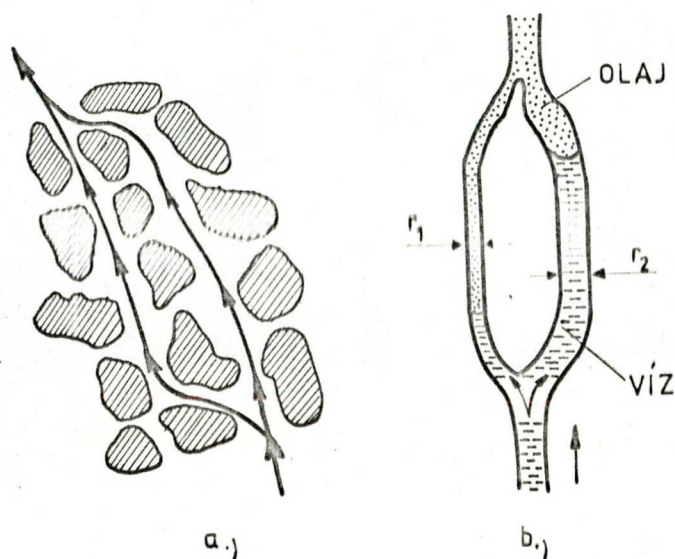
13. ábra

Az eddigi tapasztalataink alapján két fázis elhelyezkedését a 13. ábrán megadott módon tételezzük fel, ami mikroszkóp alatt meg is figyelhető. A szilárd szemcsék között lévő pórusláncolat a nem nedvesítő, a pórus szegmensek pedig a nedvesítő /viz/ folyadékkal vannak kitöltve.

Mindaddig amíg az áramlás nem számottevő, azaz egyensúlyi jelenséggel állunk szemben a kapilláris erők játszanak szerepet. A kapilláris erők fontosságát és kapcsolatát a viszkózus erőkkel a 14.b. ábrán bemutatott elágazó kapillárisal vizsgálhatjuk. A porózus közeget felépítő szilárd részecskék szabálytalan méretű póruscsatornákat építenek ki, amelyek adott irányu elmozdulás szerint válnak pórusláncolatokká. A 14. a. ábra póruskapcsolatait a 14.b. ábrán szemléltetjük, ami megfelel egy r_1 és r_2 sugaru először szétágazó, majd egymásba kapcsolódó kapilláris rendszernek. Tegyük fel, hogy a kapillárisok kezdetben olajjal voltak telítve. A víz mint kiszorító közeg a nyíl irányából lép a közös, kezdeti kapillárisba. Amikor a meniszkusz eléri az elágazást két meniszkuszra válik szét és a két kapillárisban egymástól elválasztva halad előre. Amikor a víz eléri a másik elágazást az olaj, ami még a másik kapillárisban maradt véglegesen elzártnak tekinthető. Ez a jelenség különösen jól megfigyelhető, amikor az elágazás tulsó végén egy kicsiny szűkület van. A folyadék összenyomhatatlanságától eltekinthetünk, a nyomáskülönbség a két ágba



megegyezik.



14. ábra

Mindkét kapillárisra vonatkozó tényleges, az elmozdulást befolyásoló

$$P_{c,1} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_1} \quad \text{illetve} \quad P_{c,2} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_2} \quad / 26 /$$

kapilláris hatást figyelembe kell venni.

A kísérlet tapasztalata az, hogy ha a nyomásdifferencia kicsi a kapillári hatás jelentős, így a kisebb átmérőjű csőben a front előrehaladása a nagyobb. Minél nagyobb a rendszer két végén alkalmazott nyomásdifferencia, úgy csökken a kapilláris hatás jelentősége és növekszik a kisebb átmérőjű csőben az olajzárvány térfogata. Ez a kísérleti tapasztalat is mutatja, hogy a maradék telítettség mértéke függ a kiszorítás sebességétől.

2.2.2. A kapilláris erő és telítettség kapcsolata

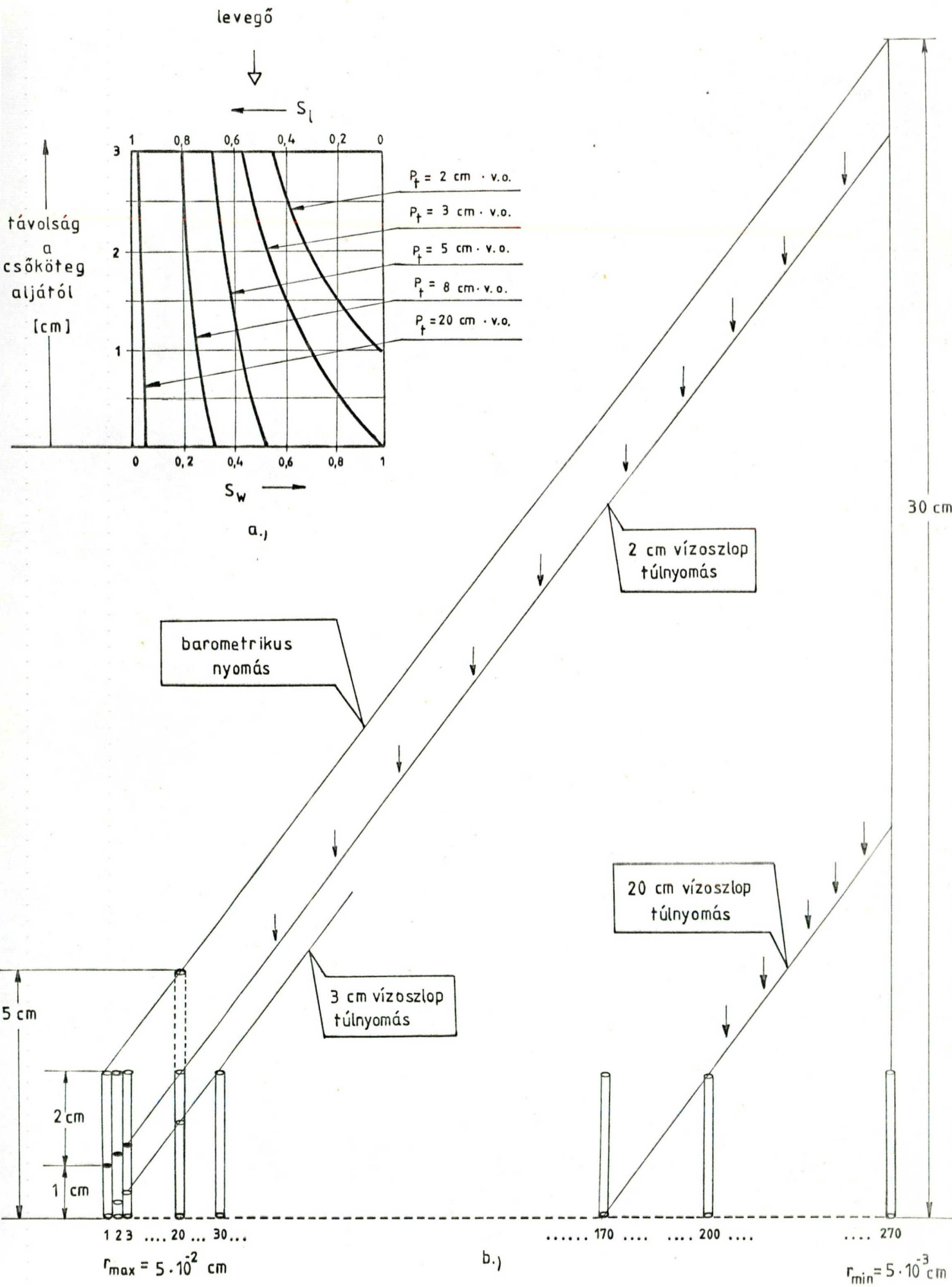
Mielőtt tanulmányoznánk a porózus blokkban a kapilláris hatás és telítettség kapcsolatát végezzük el az alábbi gondolat kísérletet.

Tekintsünk nagyszámu, különböző sugaru és egymással párhuzamos kapillárisokból álló csököteget. Legyen a kapillárisok hossza egységesen 3 cm. Válasszunk három olyan csököteget, amelyeknél a legkisebb és a legnagyobb sugaru kapillárisokhoz tartozó felemelkedési magasság aránya éppen tíz és mindegyik csökötegben 270 kapilláris legyen. Az egyes kapillárisok sugara úgy növekedjék, hogy a legkisebb és a legnagyobb sugaru kapillárisok között az összes többi csövhöz tartozó felemelkedési magasság lineárisan változzék. Hozzuk kapcsolatba egy nedvesítő folyadékkal a kapillárisokat. Az üveg-víz-levegő fázisok érintkezése esetén az emelkedési magasságot közelíthetjük a gyakorlatot kielégítő pontossággal az alábbi egyenlettel / STAKMAN 1966 /.

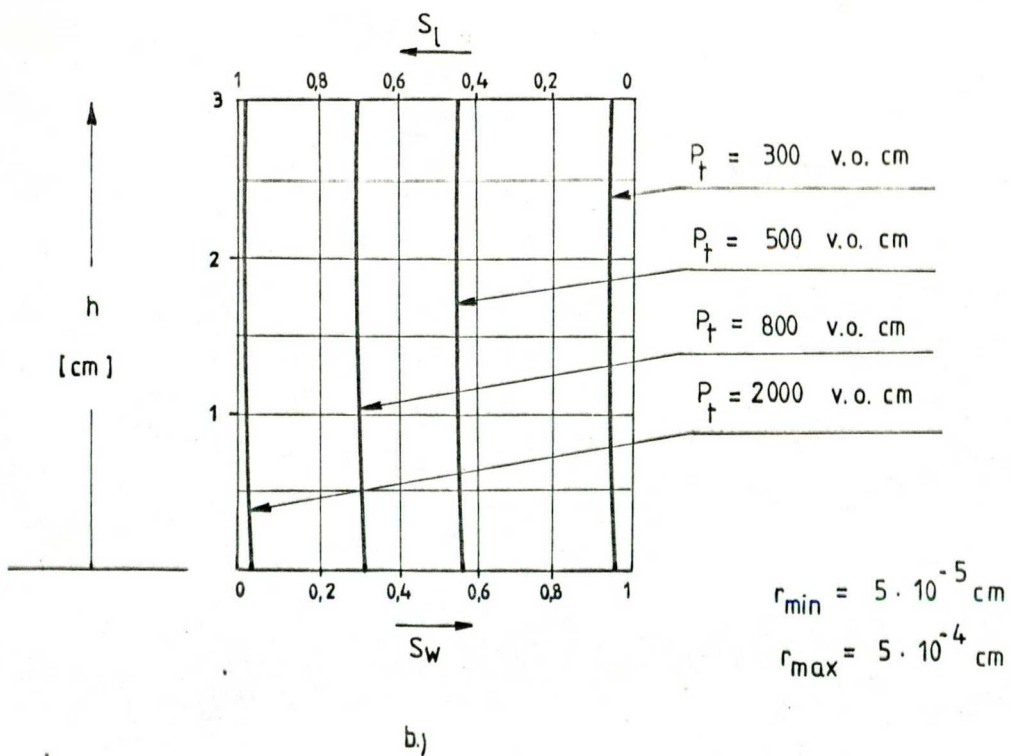
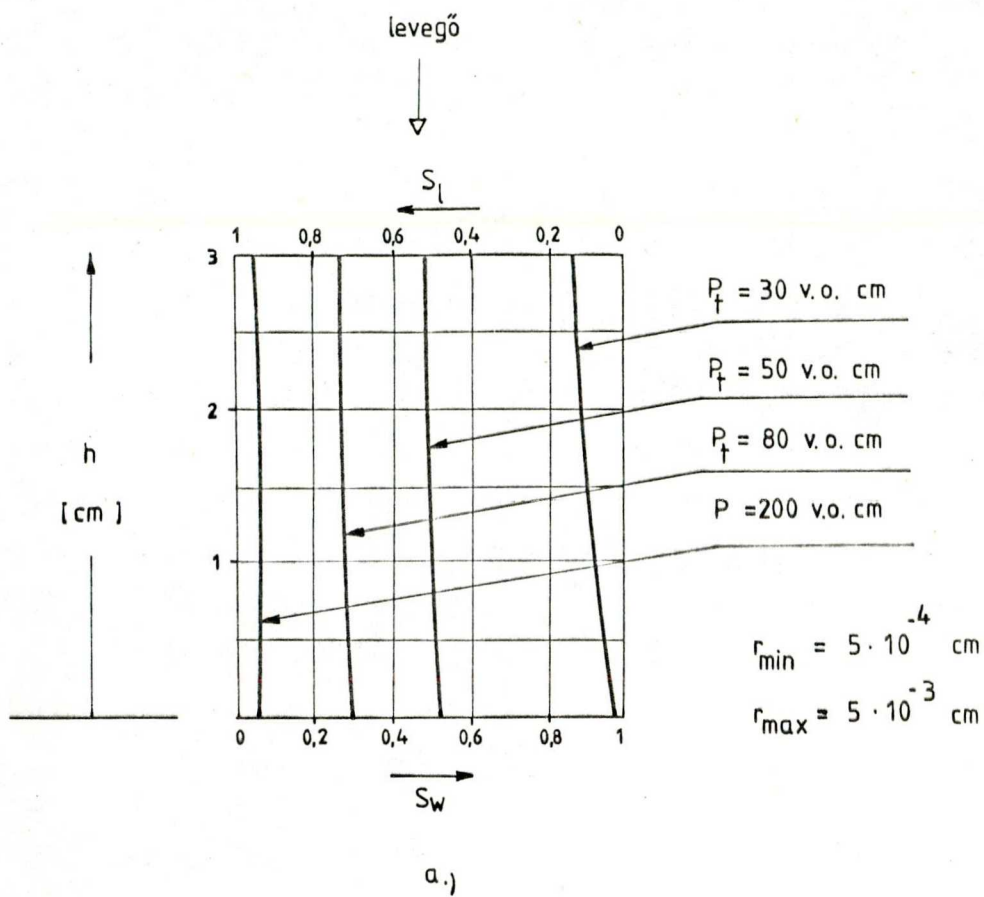
$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} = \frac{0,30}{d} \quad / 27 /$$

Az állandó ebben a formában cm^2 dimenzióju, így ha az átmérőt cm-ben helyettesítjük a kapilláris feszültséget vizoszlopcentiméterben kapjuk.

1. Az első esetben olyan csököteget vizsgáljunk, ahol a legnagyobb sugaru kapillárisához tartozó emelési magasság éppen 3 cm, a legkisebbhez tartozó pedig 30 cm / 15. ábra /. Ez méretben $r_{\min} = 5 \cdot 10^{-3}$ cm és $r_{\max} = 5 \cdot 10^{-2}$ cm kapilláris sugarat jelent. Ha a csököteg felső végén kis tulnyomást / P_t / hozunk létre a gázfázisban a legnagyobb sugaru csőben fog a meniszkusz a legalább szállni. Ha a tulnyomás 2 cm vizoszlop hidrosztatikai nyomása, a legnagyobb sugaru csőben még 1 cm magasságban áll a meniszkusz. Abban a kapillárisban, amelyhez 5 cm emelési magasság tartozott a folyadék még éppen mozdulatlan marad. E két kapilláris méret között éppen 20 kapilláris rendelkezik



15. ábra



16. ábra

közbülső rádiusz értékkel, amelyekben a meniszkusz különböző szintekre süllyed le. Ahogy növeljük a tulnyomást, úgy üzzük ki egyre inkább a kisebb sugaru kapillárisokból is. A csőköteg átlagos gáztelítettségének $/ \bar{S}_1 /$ a levegővel töltött térfogatok és a kapillárisok össztérfogatának hányadosát nevezzük.

A telítettséget a csőköteg hossz tengelyére merőlegesen készített metszetben is definiálhatjuk $/ S_1 /$, ami a metszet levegővel ill. folyadékkal telített területek aránya. A különböző nyomásokon kialakult telítettség eloszlásokat a $h = 0$ helykoordinátától - a csőköteg aljától - számítva a 15.a. ábrán mutatjuk.

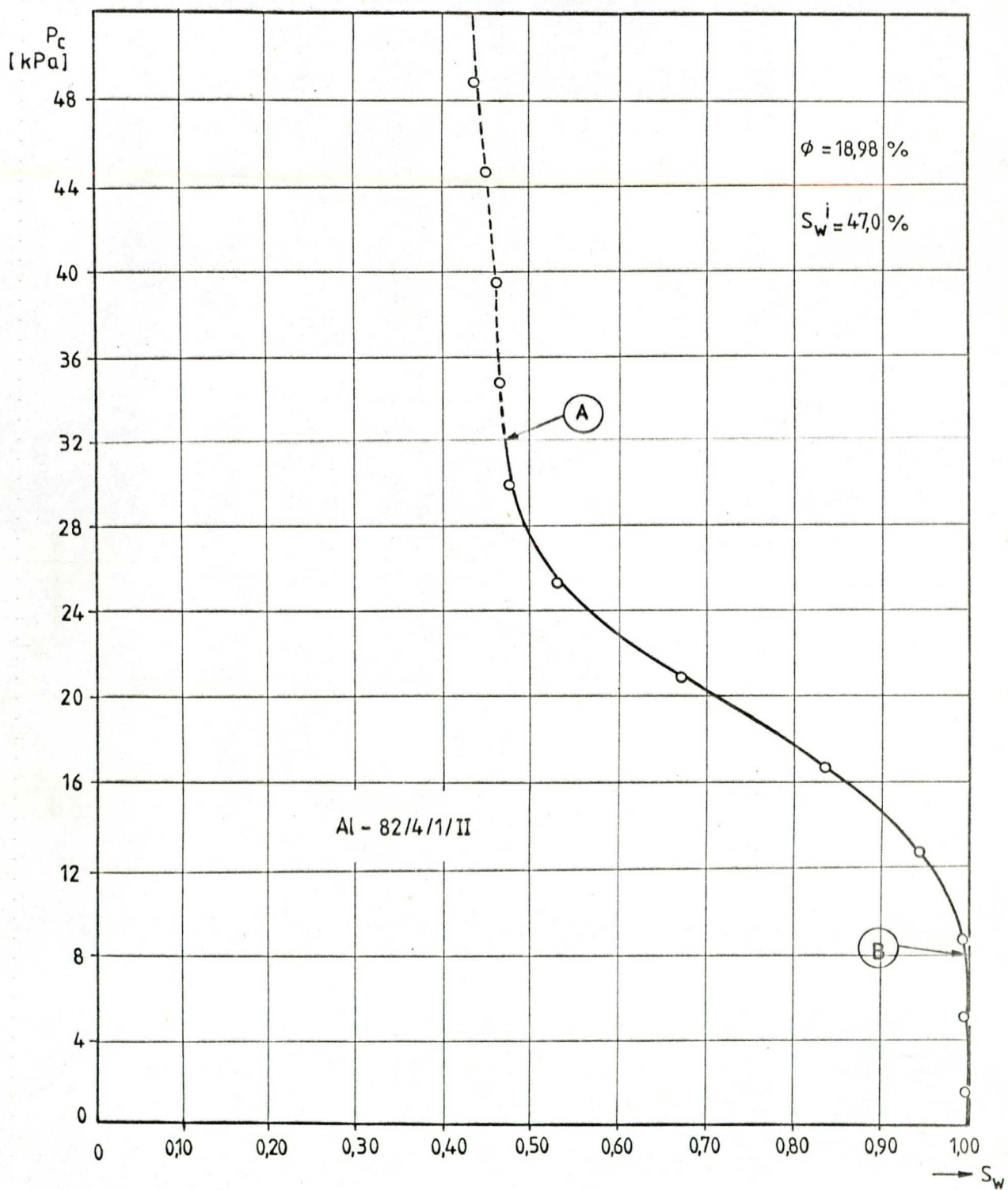
2. A második esetben legyen a legnagyobb sugaru csőhöz tartozó emelési magasság 30 cm a legkisebbéhez tartozó 300 cm. Ismét 270 kapillárist vizsgálunk 3 cm hosszúsággal. Alkalmazzunk rendre 30, 50, 80, és 200 cm vizoszlop tulnyomásokat. A kialakult telítettség eloszlásokat a csőköteg aljától viszonyítva a 16.a. ábrán szemléltetjük.

3. A harmadik esetben a 3 cm hosszúságu kapillárisok olyan sugárral rendelkezzenek, hogy a legnagyobb sugaru csőhöz 300 cm a legkisebbhez pedig 3000 cm emelési magasság tartozzon. A telítettség eloszlásokat a 16.b ábra adja meg.

Levonhatjuk azt a fontos következtetést, mely szerint a csőköteg hossza mentén akkor kapunk állandó - vagy közel állandó - telítettség eloszlásokat, ha a csőköteg hossza nagyságrendekkel rövidebb, mint a kapillárisokhoz tartozó emelési magasság.

Ez egyben azt is jelenti, hogy ha az átlagtelítettségekből és a csőköteg végén alkalmazott nyomásokból akarjuk a cső sugar eloszlást meghatározni, csak akkor kapunk reális eredményt, ha a köteg hossza elhanyagolható az emelési magassághoz képest. A továbbiakban azt a kapcsolatot, amikor az átlagtelítettségeket az alkalmazott nyomás függvényében ábrázoljuk kapilláris nyomásgörbének fogjuk nevezni.

Vizsgálatainkat terjesszük ki a porózus blokkra és tekintsünk



17. ábra

egy kapilláris nyomásgörbét / 17. ábra /, amelyet un. "centrifuga módszerrel" kaptunk. A mérési módszert a 2.2.3 részben tárgyaljuk, most a görbe jellegzetes szakaszainak értelmezésére szorítkozunk. A minta pórusterét a centrifugálás előtt 5 g/l NaCl oldattal telítettük.

A görbe első szakasza a B pontig tart, ami azt jelenti, hogy a vízvesztés még nem következett be. A külső nyomás kisebb volt, mint ami szükséges ahhoz, hogy a sósvíz a pórusokból megmozduljon. Ezt a nyomást küszöbnyomásnak is szokás nevezni. A B pont a legnagyobb sugaru pórusláncolatokra ad információt.

A görbe második szakasza az A pontig tart. Ebben a szakaszban a minta átlagos telítettsége fokozatosan csökken. Egy lendületes telítettség csökkenés után egyre nehezebben veszíti el azt, ahogy az egyre kisebb sugaru kapillárisok deszaturálódnak.

A görbe harmadik, közel függőleges szakasza az A ponttól kezdődik, amikor a minta pórusaiban lévő víz egyre inkább a penduláris telítettség állapotába kerül. A vízfázis már nem mobilis, a szegmensekbe befűződött.

A kapilláris nyomásgörbe egyes szakaszait a 2.2.5. pontban értelmezzük részletesen.

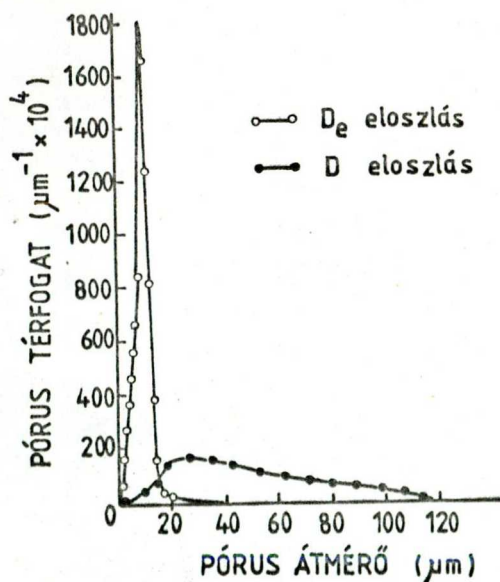
2.2.3. A kapilláris erő mérési módszerei, a véghatás

A transzportfolyamatok szempontjából fontos, makroszkópikus mérhető mennyiségek elsősorban a pórusméret eloszláshoz kapcsolódnak. A pórusméret eloszlás kísérleti úton történő vizsgálata a kapilláris nyomás mérések segítségével történhet. Maga a "pórusméret" fogalma egy porózus blokkon belül meglehetősen nehezen definiálható. Az elméleti kutatások eredményei és a porózus blokk fizikai paraméterei által kiváltott reális hatások között még nincs megfelelő összhang /B. 5, 16, 17 / Ez azt jelenti, hogy a mennyiségeket csak valószínűségi modellekkel becsülhetjük.

A pórusméret eloszlás és a kapilláris nyomásgörbe között feltételezett szoros kapcsolat nyilvánvalósága ellenére félempirikus egyenleteknél jobb leírási módszereket nem találunk / B. 54, 75, 80-98 /. Nem láttuk jelentőségét annak, hogy az egyenletek számát statisztikai módszerekkel szaporítsuk, inkább típusokba rendszereztük a kapilláris nyomásgörbéket pórusgeometriai jegyek alapján.

A pórusok geometriájának, alaki jellemzőinek feltárására két módszer kínálkozik; a fotomikrografikus módszer és a kapilláris nyomásgörbe kimérésével. Az előbbi lényege, hogy kellő számú csiszolaton elemzik a pórusok kerületét, mélységét, a pórusok felületi eloszlását, majd ezeket statisztikai módszerekkel értelmezik.

A kapilláris nyomásgörbéken keresztül a kummulativ pórusméret eloszlást kapunk. A pórusfeltárást kísérletileg vagy egy nem-nedvesítő folyadék besajtolásával végezzük, vagy úgy, hogy egy nedvesítő folyadékkal telített porózus blokk körül növeljük a nem-nedvesítő fázis nyomását.



18. ábra

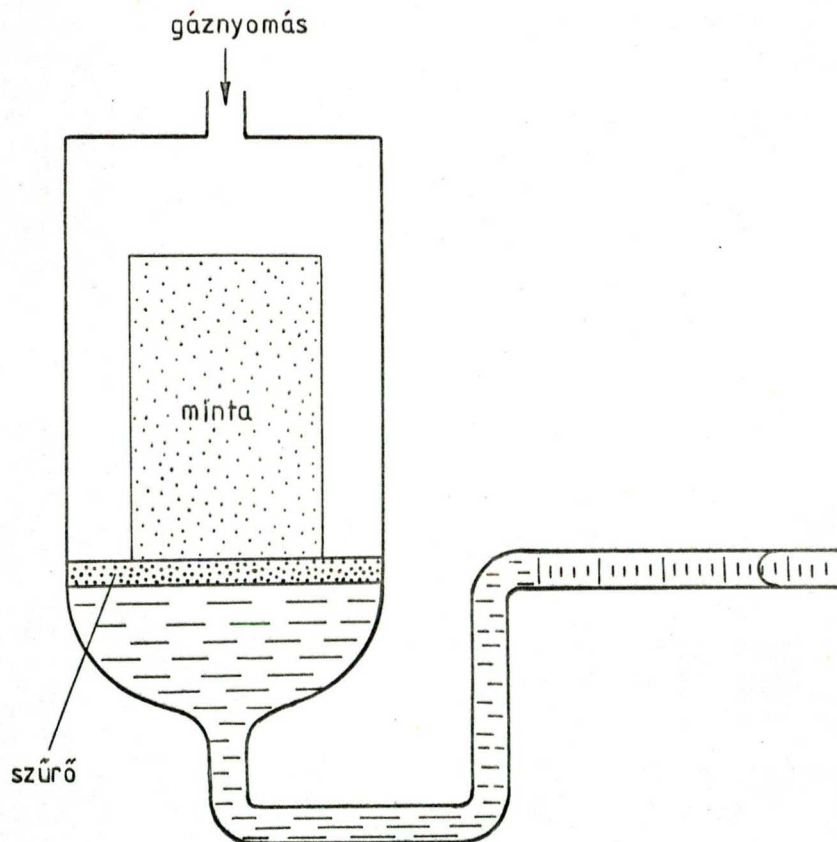
DULLIEN / B.4. / mutatott rá arra, hogy amíg a fotomikrografikus eljárással nyert pórusméret eloszlás egyenletes, nagy tartományban huzódik, addig a higany-besajtolással nyert eloszlás egy karakterisztikus maximumtól jobbra és balra erősen csökkenő / 18. ábra /. A jelenséget azzal magyarázhatjuk, hogy a higany besajtolással a pórustorkok eloszlását kapjuk. Ezzel szemben a fotomikrografikus módszer az öblösödések metszeteit méri elsősorban.

Logikusnak látszik KNÖLL azon következtetése, miszerint az áramlási paraméterek szempontjából

elegendő a / relative ! / nagy pórusok figyelembe vétele, kimérése a kapilláris nyomásgörbék segítségével. PEK kritikus értéként $1,2 \cdot 10^{-4}$ cm értéket valószínűsít, ami csak egy adott közegcsoportra tekinthető érvényesnek.

2.2.3.1. A szűrős kapilláris nyomás mérés / diafragnás módszer /

A módszer lényege, fizikai tartalma az, hogy egy porozus mintát nedvesítő folyadékkal telítenek, majd kapilláris kontaktusba hoznak egy szűrővel / B. 3, 6, 12 / / 19. ábra /. A minta kö-

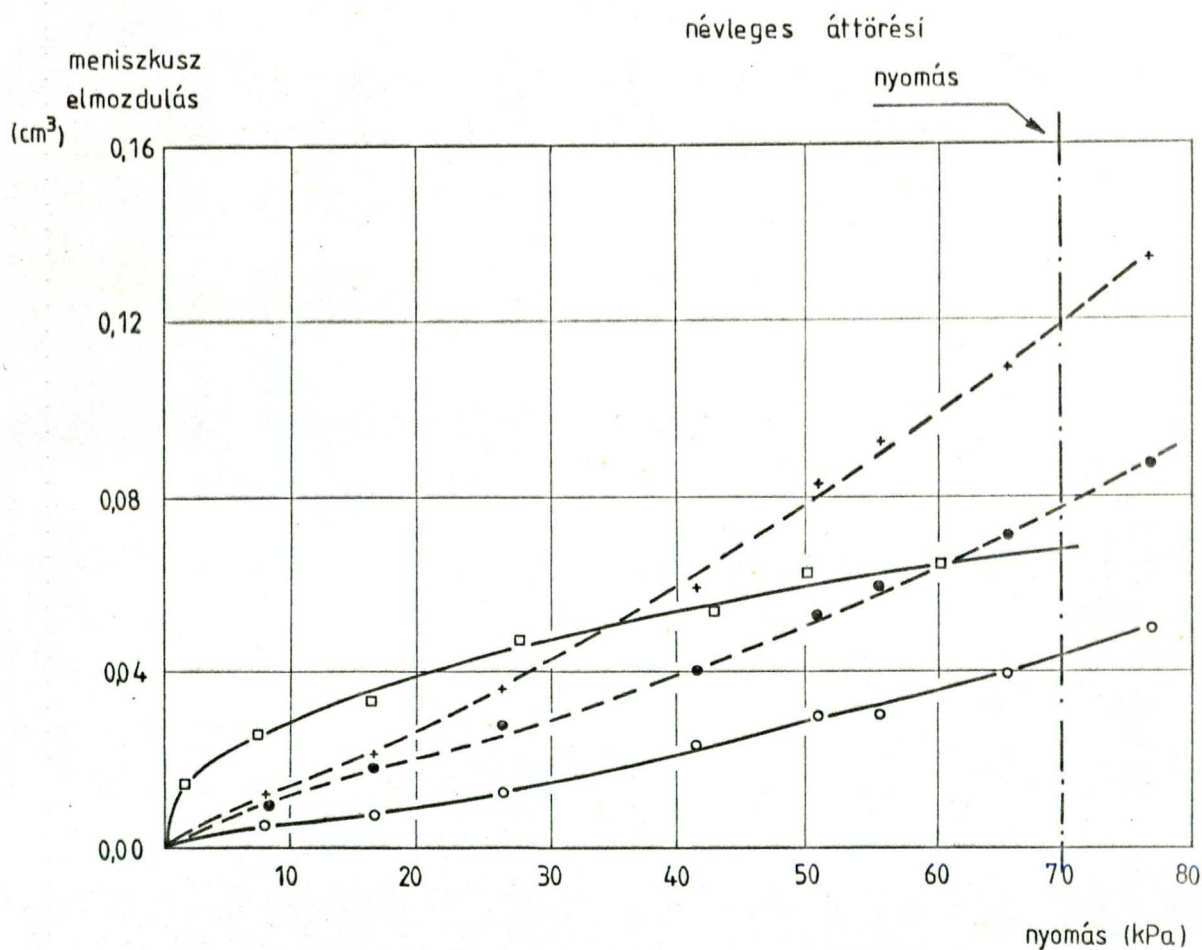


19. ábra

rül a nem nedvesítő fázis nyomását növelve a nedvesítő fázis a szűrőn át a mintából távozik míg a nem nedvesítő fázis /pl. levegő / a szűrőn nem tud áthaladni. Az egyes nyomásokhoz tartozó

folyadékvesztéséget egy kalibrált kapilláris csövön leolvashatjuk és ebből számoljuk a minta átlagtelítettségét. Ezt a telítettséget ábrázoljuk a minta körül uralkodó gáznyomáshoz.

A kapilláris nyomásgörbe felvételének határt szab a szűrő áttörési nyomása. Ezt megelőzően azonban minden szűrőben kísérletileg kimutatható deszaturáció jön létre. A jelenség magyarázata az, hogy minden szűrő rendelkezik egy bizonyos pórusméret eloszlással, ami eredményezi a gáz bejutását a szűrő legnagyobb pórusaiba. Ez a leolvasó meniszkusz elmozdulását okozza. A kapilláris nyomásgörbe számolásánál ezt a korrekciót figyelembe kell venni, mivel igen kis térfogatok mérésére van szükség. Különböző felhasznált JÉNA G 5 jelű szűrők korrekciós görbéit a 20. ábrán



20. ábra

szemléltetjük, ami igazolja, hogy a korrekciós görbét szűrőnként kell felvenni.

A mérés előnye az igen nagyfoku pontosság, de ezzel arányban nő a mérés időigényessége / több nap / . Az áttörési nyomás 70 kPa nyomástól 1500 kPa-ig változhat a szűrő fajtájától függően. A mérést körülményessé teszi a kapilláris kontaktus létrehozása, amelyet kovafölddel vagy szűrőpapírral valósíthatunk meg.

2.2.3.2. A centrifuga módszer

Már az 1930-as évektől történtek kísérletek arra, hogy centrifugát alkalmazzanak porózus rendszerek telítettségének tanulmányozására. / B. 11, 7, 13, 8. / HASSLER és BRUNNER munkássága jelentett nagy előrelépést, akik először adtak eljárást arra hogyan lehet átszámítani a centrifugával nyert adatokat a diafragma módszerrel kapott adatokká. A centrifuga módszert a diafragma módszer hátrányainak kiküszöbölésére fejlesztették, de mindenkor annak kontroláló felhasználásával az utóbbi nagy elméleti biztonsága miatt.

Ha egy kapillárisban h magasságra emelkedik a folyadék, akkor $P_c = h \mu = h g \rho$ nyomást kell alkalmazni ahhoz, hogy a folyadékszál az edény folyadékszintjébe süllyedjen. Ezt a felismerést általánosíthatjuk egy H magasságu minta hossza mentén fellépő nyomáskülönbség felírására a nedvesítő és nem nedvesítő fázisban.

$$P_c = h \cdot \Delta p \cdot a \quad / 28 /$$

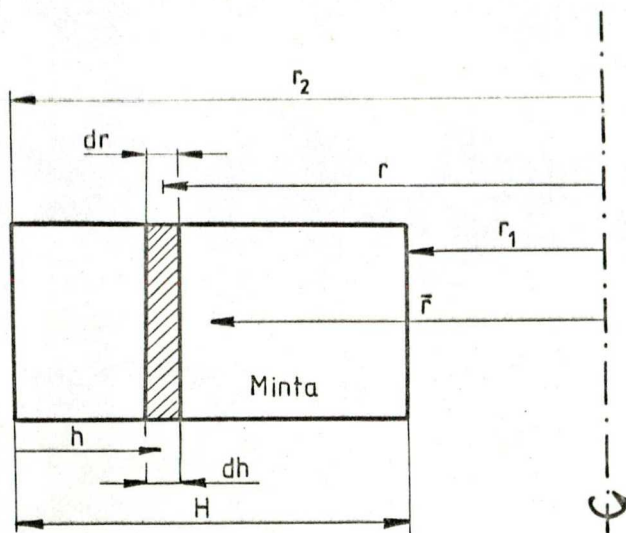
ahol h , H , r értelmét a 21. ábra adja. Felhasználva az

$$\omega = \frac{2\pi \cdot h}{60} \quad \text{ill.} \quad \Delta p = \frac{\Delta h}{g} \quad / 29 /$$

összefüggéseket a centrifuga erőterében lévő minta kapilláris nyomásának eloszlását a

$$p_c = 1,117 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta \rho \cdot \omega^2 \cdot r \cdot h \quad / 30 /$$

egyenlet írja le. A kapilláris nyomás eloszlását megadó egyenletet



21. ábra

$r = r_2 - h$ felhasználásával / 21. ábra / az alábbi alakura hozzuk

$$\frac{dp_c}{dh} = 1,117 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta \rho \cdot \omega^2 \cdot r = 1,117 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta \rho \cdot \omega^2 (r_2 - h) \quad / 31 /$$

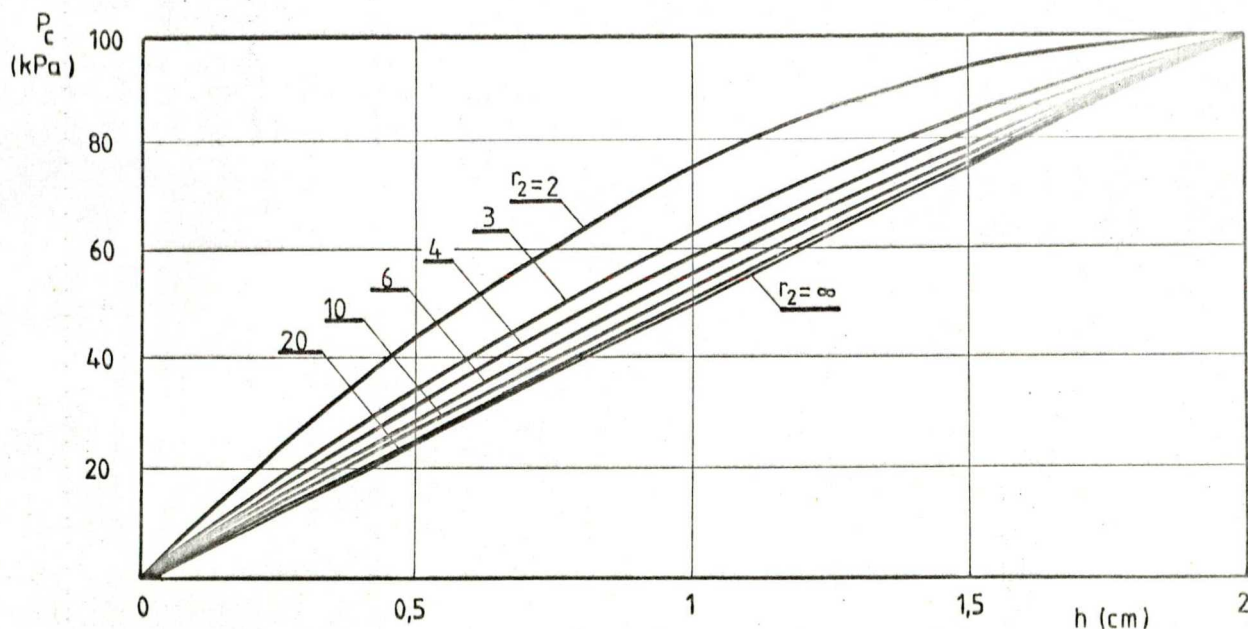
A változók szétválasztásával kapjuk

$$\int dp_c = 1,117 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta \rho \cdot \omega^2 \int_{h=0}^h (r_2 - h) dh \quad / 32 /$$

Az integrálást elvégezve

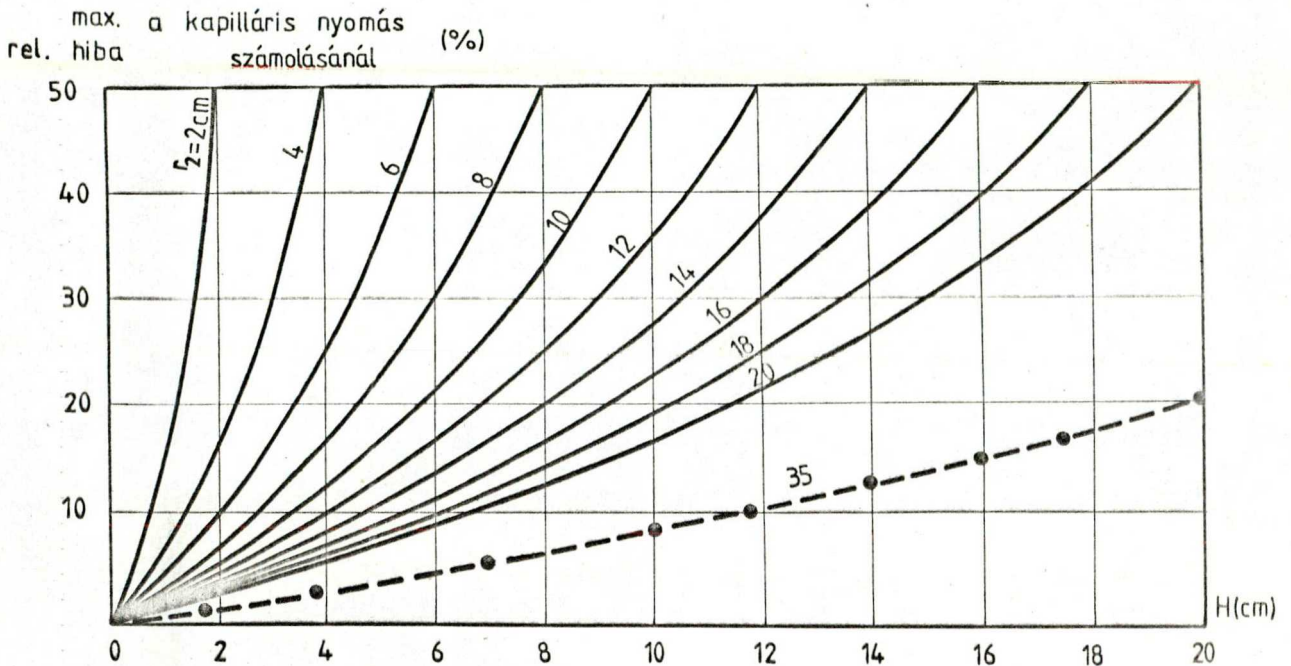
$$p_c = 1,117 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta \rho \cdot \omega^2 \left(r_2 \cdot h - \frac{h^2}{2} \right) \quad / 33 /$$

egyenletet kapjuk, ami a minta véglapjaira ugyanazt az eredményt adja mint a /30/ egyenlet. A /33/ összefüggés felhasználásával a minta belsejében számolható a kapilláris nyomás, ami egy másodfoku parabola mentén változik. Megvizsgáltuk, hogy a lineáris változás feltételezése mekkora hibát okoz a kapilláris nyomás számításában. A 22. ábrán szemléltetjük a kapilláris nyomás eloszlást



22. ábra

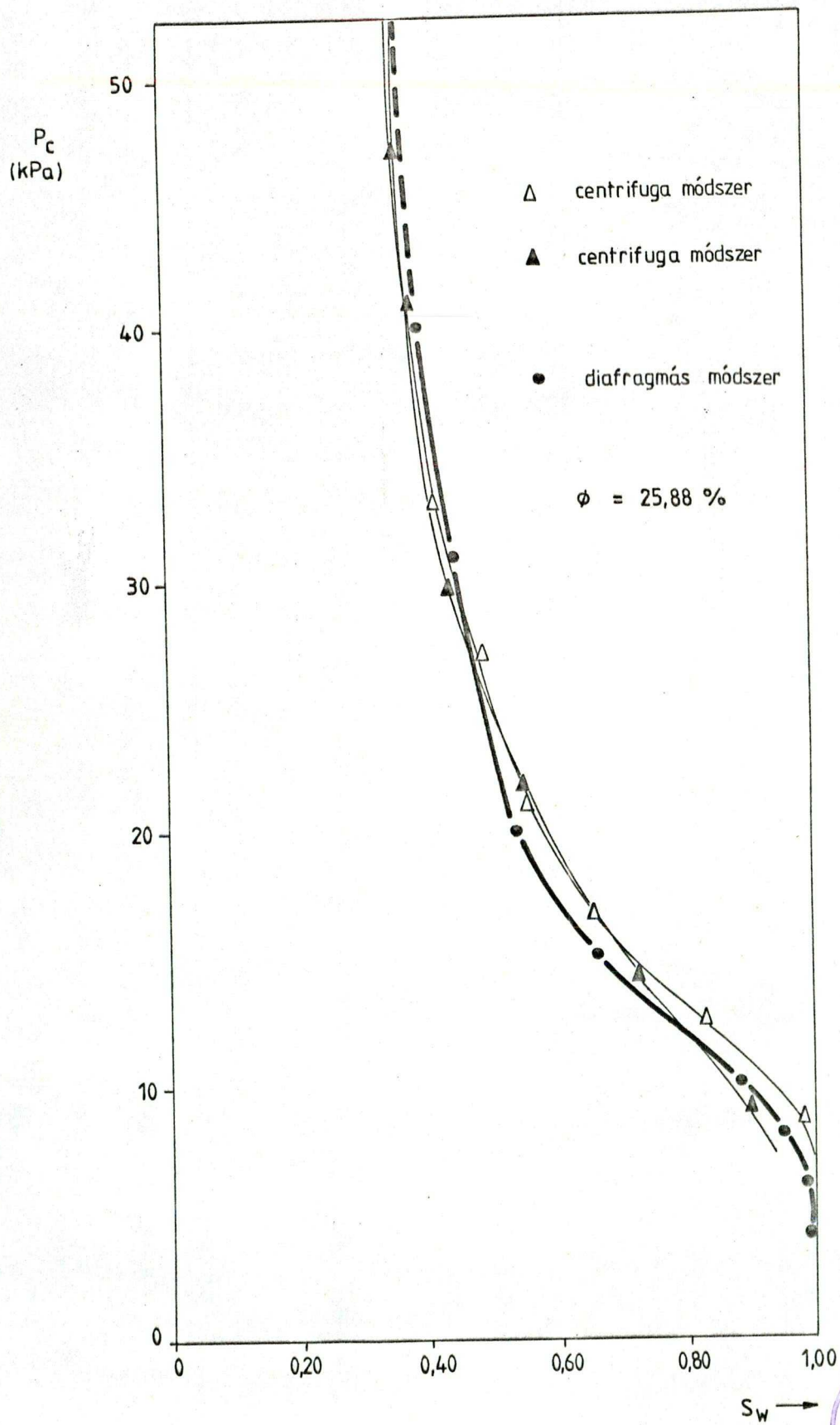
a minta hossza mentén, különböző r_2 választásnál. Minél közelebb van a minta alja a forgástengelyhez / 21. ábra / és a fordulatszámot úgy megválasztva, hogy a minta tetején a maximális kapilláris nyomás mindig ugyanaz marad látható, hogy az eltérés a minta felezőpontjánál lesz a legnagyobb. Ha a legnagyobb eltérést elosztjuk az $r_2 = \infty$, lineáris közelítéssel a minta közepére számolt kapilláris nyomással megkaphatjuk a maximális hiba függvényét. A 23. ábrán különböző r_2 és H értékek esetén érvényes maximális hibát ábrázoltuk. A 23. ábra folytatásával, vagy felhasználásával bármilyen maghosszuság és r_2 távolságra a hiba számolható.



23. ábra

Szaggatott vonallal az általunk használt JANETZKY gyártmányú K 70 típusú centrifuga rotor $r_2 = 35$ cm mintatávolsághoz tartozó görbét jelöltük.

A kapilláris nyomásgörbéket minden esetben úgy ábrázoltuk, hogy az átlagos telítettséget, amelyet súlyméréssel határoztunk meg a minta $h = H$ helyettesítéssel kapott, a minta tetejére vonatkozó kapilláris nyomáshoz vonatkoztattuk. A 24. ábrán ugyanannak a porózus bloknak centrifuga módszerrel, ill. diafragma módszerrel felvett kapilláris nyomásgörbéjét mutatjuk be. A pontok egybeesése mutatja a két mérési mód egyenértékűségét. Egybeesést csak akkor kapunk, ha valamely fordulatszámra létrejött a rá jellemző átlagtelítettség. Ennek meghatározására a telítettség időbeli változását is kimértük, amiből megállapítható volt / 25. ábra/

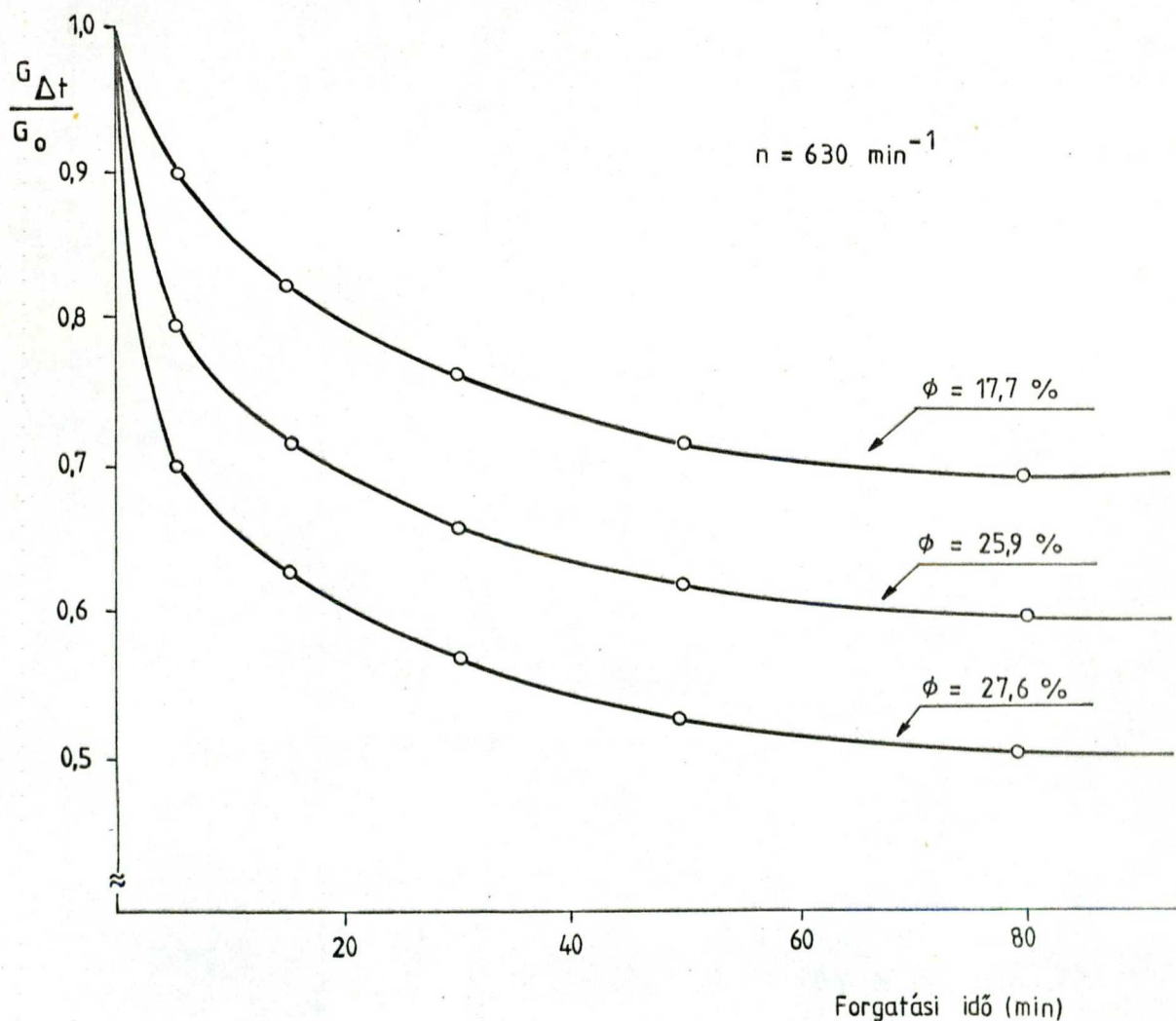


24. ábra



,hogy 80 perces forgatási idő szükséges különböző porozitású minták sulyállandósulásához - $n = 630 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámnál. A kísérleti megvalósításnál egy-egy fordulatszámra 2 órás forgatási időt szabtuk meg annak érdekében, hogy a sulyállandósulást biztos elérjük.

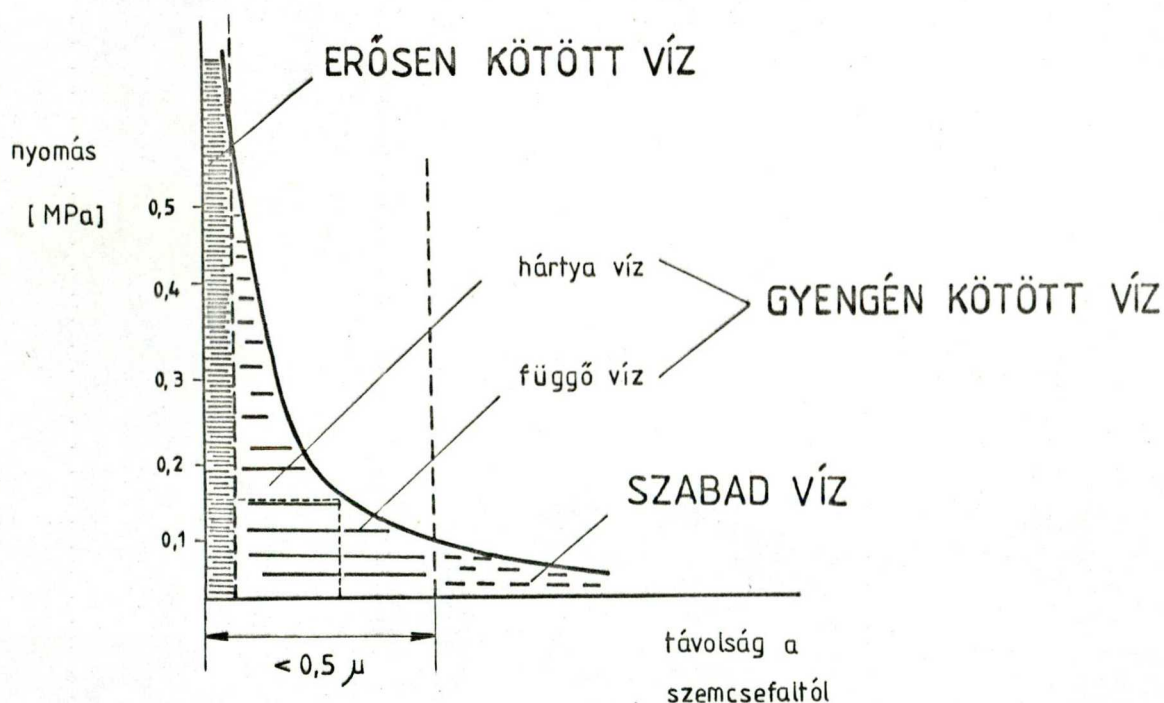
A centrifuga rotortere temperálható volt, így a viszkozitás és a felületi feszültség hőmérséklet változás miatti korrekciójától eltekinthettünk.



25. ábra

2.2.3.3. A higanybesajtolás módszere // PURCELL módszer //

A pórusfeltárás első két módszerénél hallgatólagosan feltételeztük, hogy a szilárd szemcsék és azok felületén megtapadt ásványok kémiai tulajdonsága nem befolyásolja az egyensúlyi telítettséget. A feltevés jogossága vitatható, vízmolekulák poláros jellege és a kvarcsemmék közötti agyagásványok elektrosztatikus kölcsönhatása miatt. A maradék telítettségben és a kapilláris nyomás-görbében ennek kifejeződésre kell jutni, azaz nem mindig a valódi pórusméret eloszlást mérjük. A molekuláris kölcsönhatást döntően a van der Waals-féle erő szabja meg, amely az ásványtani és kémiai jellegtől függetlenül a szilárd faltól mért távolság hatodik hatványával fordítottan arányos / 26. ábra / KÉZ III 1962.



26. ábra

Az erősen kötött vízarányok vizsgázból történő kialakulásánál az első adszorbeált vízmolekulákat a közetszemcse már 1 %-os

relatív páratartalomnál megköti s a mintegy 40 %-os telítettségig a folyamat folytatódik / B.33 / E felett jelentkezik a vizfázisban mobilis, vagy gyengén kötött viz, amelyet a kapilláris erők tartanak vissza. A gyengén kötött viz felső rétege a függőviz / 26. ábra /, amely 1 - 1,5 bar-ral kötött, az alsó réteg a hártya viz, amely 3-5 bar-ral kötött.

VAGELER szerint / B.34 / a vizfázisban mobilis vízréteg 50 bar nyomással kötött. Ennél kisebb víztartalom mellett a víz csak vizgőz formájában mozog, vizfázisként nem mobilis.

A rétegvizek egy része filmképző hajlamu. Szoba hőmérsékleten a vízfilm vastagsága $0,06 \mu$, ami mintegy 100 min alatt alakul ki / MEKENINSZKAJA /. A hőmérséklet növekedésével a vízfilm vastagsága csökken.

A gyengén kötött vízfilm szélének távolsága kisebb $0,5 \mu$ -nál, ami megegyezik a pórusláncolat keresztmetszetének méretével. Minél kisebb a pórusláncolat sugara, annál jelentősebben befolyásolja a vízzel végzett deszaturációs kísérletek eredményét. A kapilláris hatás mellett a molekulárisan kötött víz is kifejezésre jut a maradék víztelítettségben. Ez egyben megadja az előző két módszer és a higanybesajtolás módszerével kapott pórusfeltárás közös intervallumát.

Adott pórusláncolatra:

$$\frac{P_{c, Hg}}{\sigma_{Hg} \cdot \cos \theta_{Hg}} = \frac{P_{c, ov}}{\sigma_{ov} \cdot \cos \theta_{ov}} \approx 5 \quad / 34 /$$

,ami azt jelenti, hogy ugyanakkora víz-olaj rendszerű, mint higany-levegő rendszerű telítettség eléréséhez közel ötször akkora nyomás szükséges a Hg besajtolásnál, mint a víz deszaturációjához. A pórusfeltárás higanyos módszerénél a higany a pórusfelülettel érintkezik közvetlenül, ami nem eredményezi a pórusláncolat keresztmetszetének leszűkítését.

A besajtolással elsősorban a pórustorkok, tehát a legszűkebb metszetek eloszlását kapjuk meg. A higany minden oldalról telíti a mintát. A mérőküvetta két részből áll, amelyikből az egyik egy precíziós r sugaru kapilláris. A mintába hatolt higany mennyiségét ennek a meniszkusznak elmozdulásával mérjük és számoljuk át térfogattá a kapilláris sugarának ismeretében.

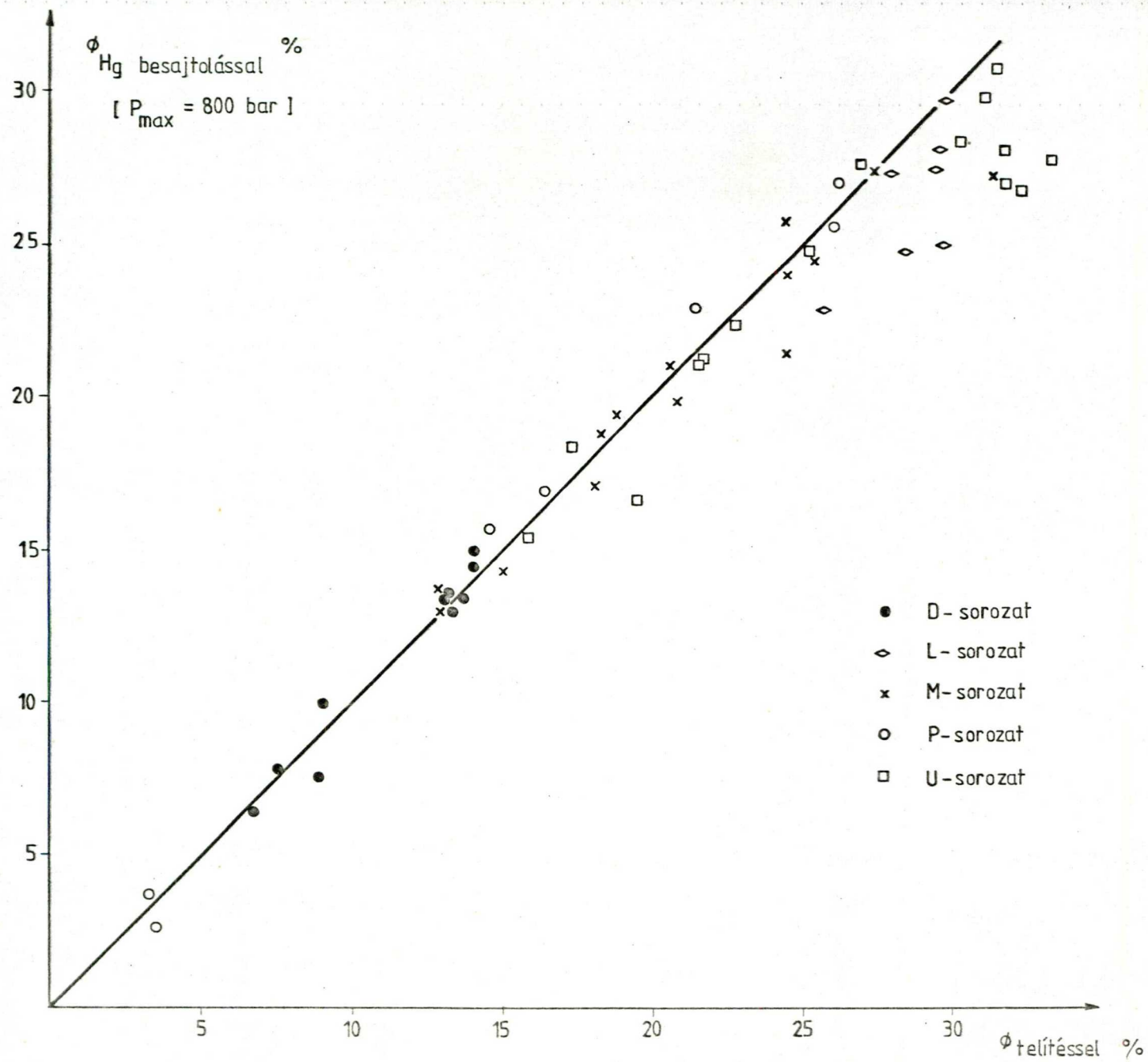
A mérés két tartományra bontható. A makrotartomány $7,5 \mu$ -nál nagyobb pórustorkok összessége. Mérésénél kivákuozzuk a minta pórusterét $0,02$ torr nyomásig, majd rögzítjük a meniszkusz értékeit a barometrikus nyomás eléréséig. A mikrotartomány mérésekor a maximális nyomás 2000 bar. A nyomásemelés üteme akkora, hogy a higanyfront képes elrendeződni a pórusláncolatokban történő előrehaladásakor. A pórustorkok eloszlásának számolására elfogadtuk a Carlo Erba cég 200-as sorszámú poroziméterének műszerkönyvében ajánlott értékelő formulát.

$$r = \frac{75.000}{p} \quad / 35 /$$

,ahol, ha a nyomást bar-ban helyettesítjük, a pórustorkok sugarait Angströmben kapjuk. A formula konstansát úgy adták meg, hogy a higany illeszkedési szögét több anyagra kimérték röntgensugaras módszerrel, valamint figyelembe vették a Hg felületi feszültségének hőmérséklet függését is. A 200-as poroziméterrel $37,5 \text{ \AA}$ -tól $10^6 \text{ \AA}$ intervallumban végezhetünk pórusfeltárást - ami megfelel közel $10^{-2} - 10^2 \mu$ méretnek. Ezzel egy eloszlásfüggvényt kapunk, amely megadja, hogy az $(r, r + dr)$ intervallumba eső pórustorkokkal határolt pórusok a porozitás hányadrészt képviselik / differenciális porozitás / .

A kísérleti munka során először azt vizsgáltuk meg, hogy jelentősen eltér-e egymás melletti mintatérfogatnak a higany besajtolással mért, ill. a nedvesítő folyadékkal végzett telítés után kapott porozitása.

Az eredményt a 27. ábrán szemléltetjük.



27. ábra

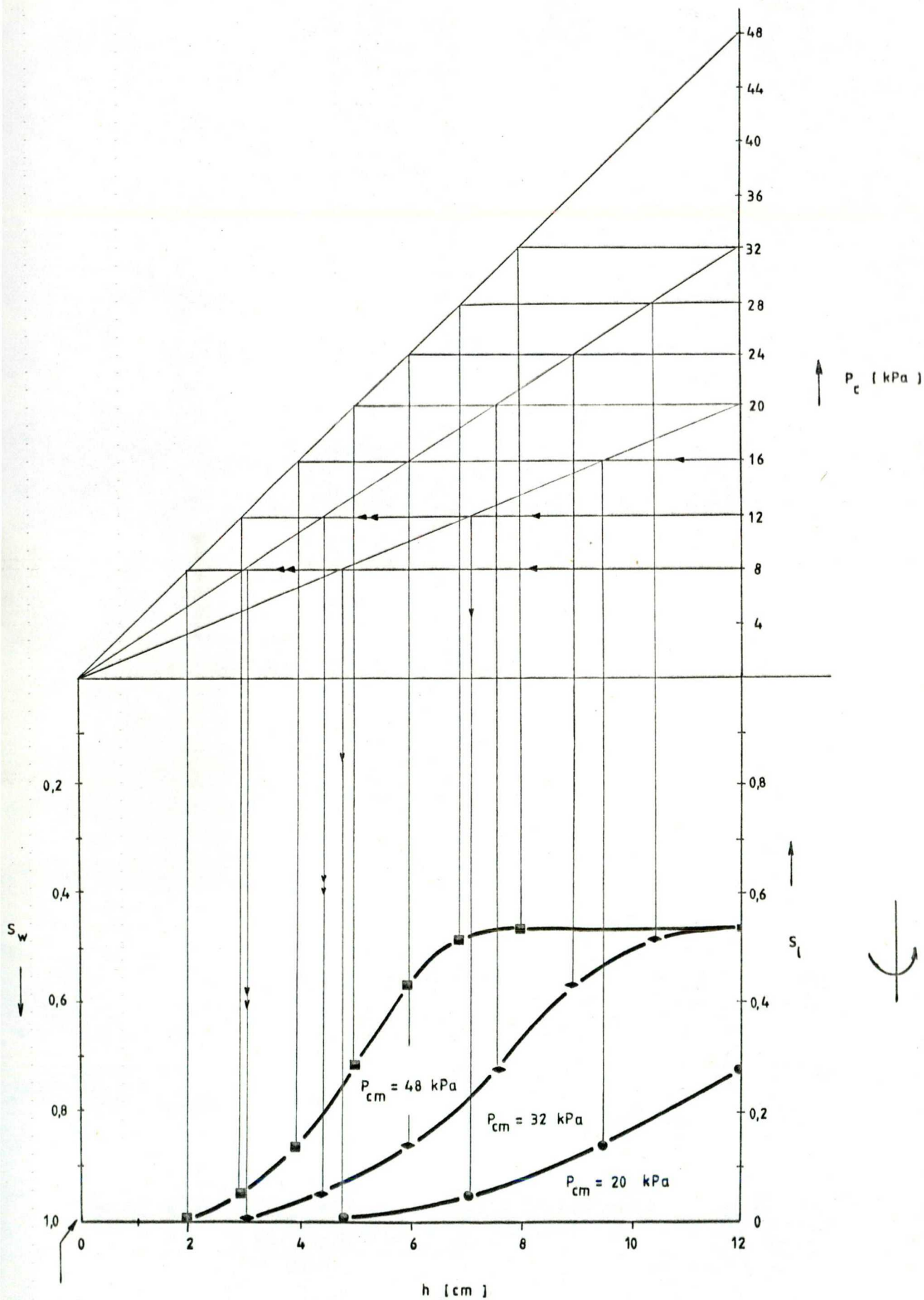
A vizsgált mintákat több csoportra osztottuk, részben a növekvő aleurolitttartalom, részben a homokkövek szemcsenagyságának csökkenése szerint. Mindkét hatás a porozitás csökkenését eredményezi. A csoportokon a kétféle módszerrel mért porozitás értékek tendenciájukban jó egyezést mutatnak, a higanybesajtolással kapott értékek általában kisebbek mint a folyadék telítéssel kapottak. Az eltérés annál jelentősebb, minél nagyobb a minta porozitása. Logikusnak tűnik az a magyarázat, hogy a nagy porozitású minták nagy pórustorok átmérőjű részei már a legkisebb alkalmazott nyomásnál telítődnek higannyal, amit az értékelésnél nem tudunk figyelembe venni.

Másrészt vizsgáltuk, hogy a higanybesajtolással nyert mérések milyen kapcsolatban vannak a diafragma ill. a centrifuga módszerrel kapott kapilláris nyomásgörbékkel. Az egyes nyomástartományokban a / 34 / összefüggés alapján az ekvivalencia kimutatható-e? Következtetéseink az alábbiak:

- a higanybesajtolás módszere a legelőnyösebb a porusméret eloszlás meghatározásához, mivel nem kell számolni a filmképződéssel.
- mind a diafragma, mind a centrifuga módszerrel jelentős korlátot jelent a mérés alsó és felső nyomáshatára a porózus blokkban feltárható porusméret tartományra, így a kapilláris nyomásgörbe teljességére is
- a higanybesajtolás módszerével - érzékenysége miatt - külön választhatók az azonos porusfelépítettségű minták.
- a méréskor a mintaméret néhány cm^3 / 3-5 cm^3 /

2.2.3.4. A véghatás

Vizsgáljuk meg a minta lecsapolás irányu hosszában a telítettség eloszlásának változását ha az átl. gtelítettség és nyomás kapcsolatát a 17. ábra szemlélteti. A minta aljától számított h távolságu metszet / 21. ábra / telítettségét a kapilláris

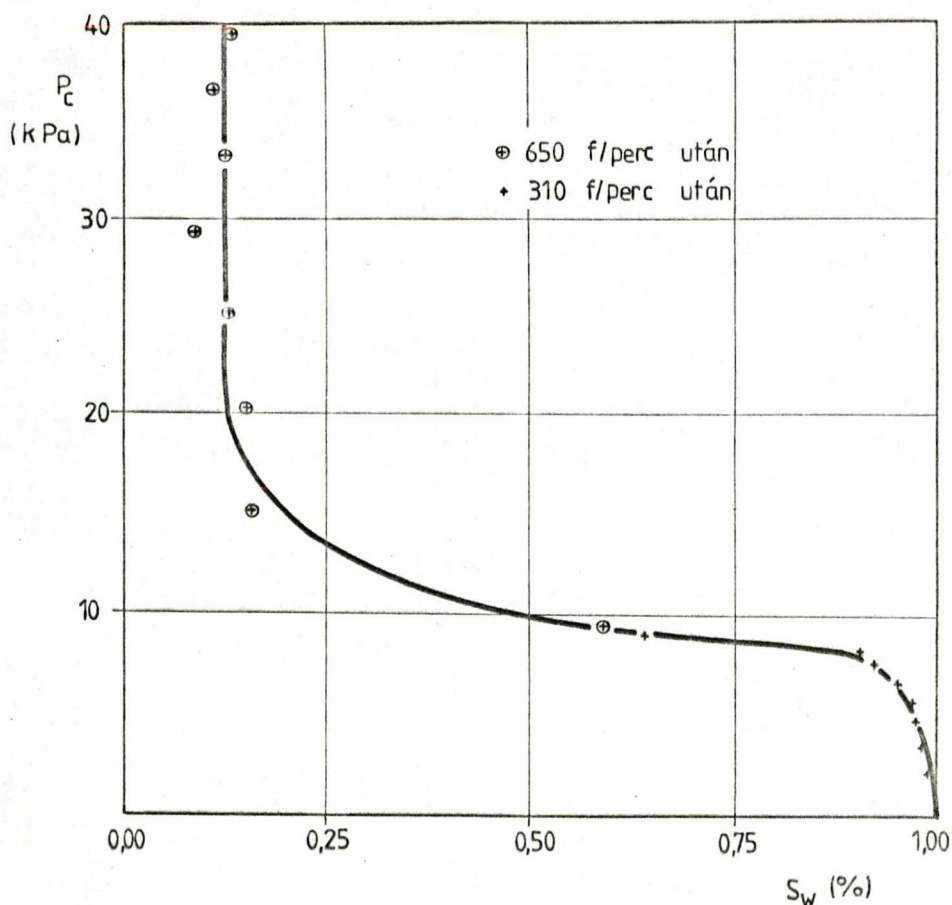


A minta alja
a
víztározás oldala

28. ábra

csőkötegnél mondtak szerint szerkeztettük meg és a 28. ábrán mutatjuk be valódi poluskapcsolatban. A minta forgástengelytől távolabb eső vége jelentősen telített még, noha a penduláris telítettségű tartomány húzódik a minta alja felé. A 48 , 32 és 20 kPa terhelő nyomásnál kapott telítettség eloszlások jól mutatják, hogy a 48 kPa nyomás esetében a minta felső 8-12 centiméterben már kialakult a maradék telítettség. A valóságban még innen is távozik víz, de igen kis mértékben csak. A minta 2 és 8 centiméterében részlegesen telített állapotban van, míg az alsó két centiméterében 100%-os a telítettség. Ezzel a szerkesztéssel képet kaphatunk a minta hosszirányú telítettség eloszlásáról, de csak abban az értelemben, amennyire közelíti a párhuzamos csőköteg a valódi pórusláncolatot. A szerző szerint a minta alján sem 100%-os a telítettség, hiszen elképzelhető olyan effektív sugaru láncolat, amelyből az alkalmazott nyomás már kiűzte a vizet. A valódi porusok egymással hol elágazó, hol egymáshoz kapcsolódó szerkezete csak közelítés és felhívja a figyelmet a kapilláris nyomásgörbe alakja és a pórusláncolat heterogenitásából adódó hosszanti telítettségeloszlás közötti kapcsolatra. Minél nagyobb nyomásintervallum jellemzi az A B pontok távolságát, annál heterogénebb a pórusláncolatok összessége. A heterogenitás okozza azt is, hogy amíg 15. ábra 2 cm v.o. nyomáshoz tartozó görbéje meredeken metszi az $X = 1$ értékhez tartozó függőlegest, addig 17. ábrán B ponthoz alulról konkávan simul a görbe.

A minta alján a pórusláncolat megszakad. Ennek hatására a nedvesítő fázis a minta alján összegyűlik, ami késlelteti a nyomásra jellemző telítettség kialakulását. Ennek kiküszöbölésére egy műfogást javasol /Szabó M 1972 / a véghatás adszorber alkalmazását. Ennek az a lényege, hogy kapilláris kontaktusba hoznak a minta alján, egy azzal azonos szerkezetű porózus blokkot. Az együttes kisöprésnél csak a minta telítettség változását vizsgálják / Szabo M / az együtt centrifugált közetszeleteket. Kelő fordulatszámnál feltételezése szerint lesz olyan szelet, amely már a maradék telítettséget tartalmazza csak.

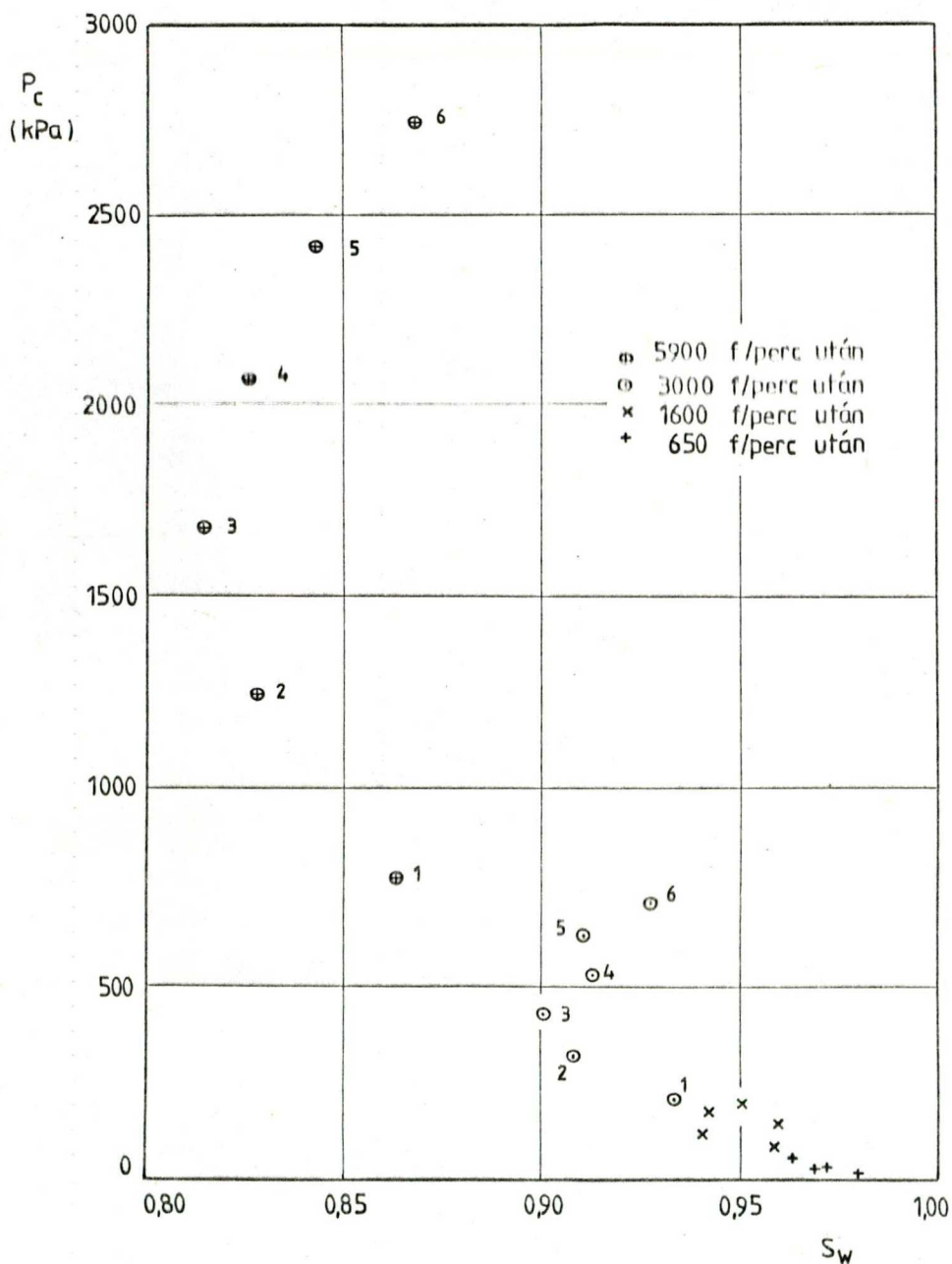


29. ábra

A módszer elemzésére két ábrát idézünk. A 29. ábrán Ultra F F típusu mesterséges homokkő nyolc szeletének együttes centrifugálásakor kapott kísérleti eredményt adjuk. Az egyes szeletek porozitása 0,4815 és 0,4955 között változott. / Megjegyezzük, hogy egy valódi homokkő porozitása maximum 30-35 %.

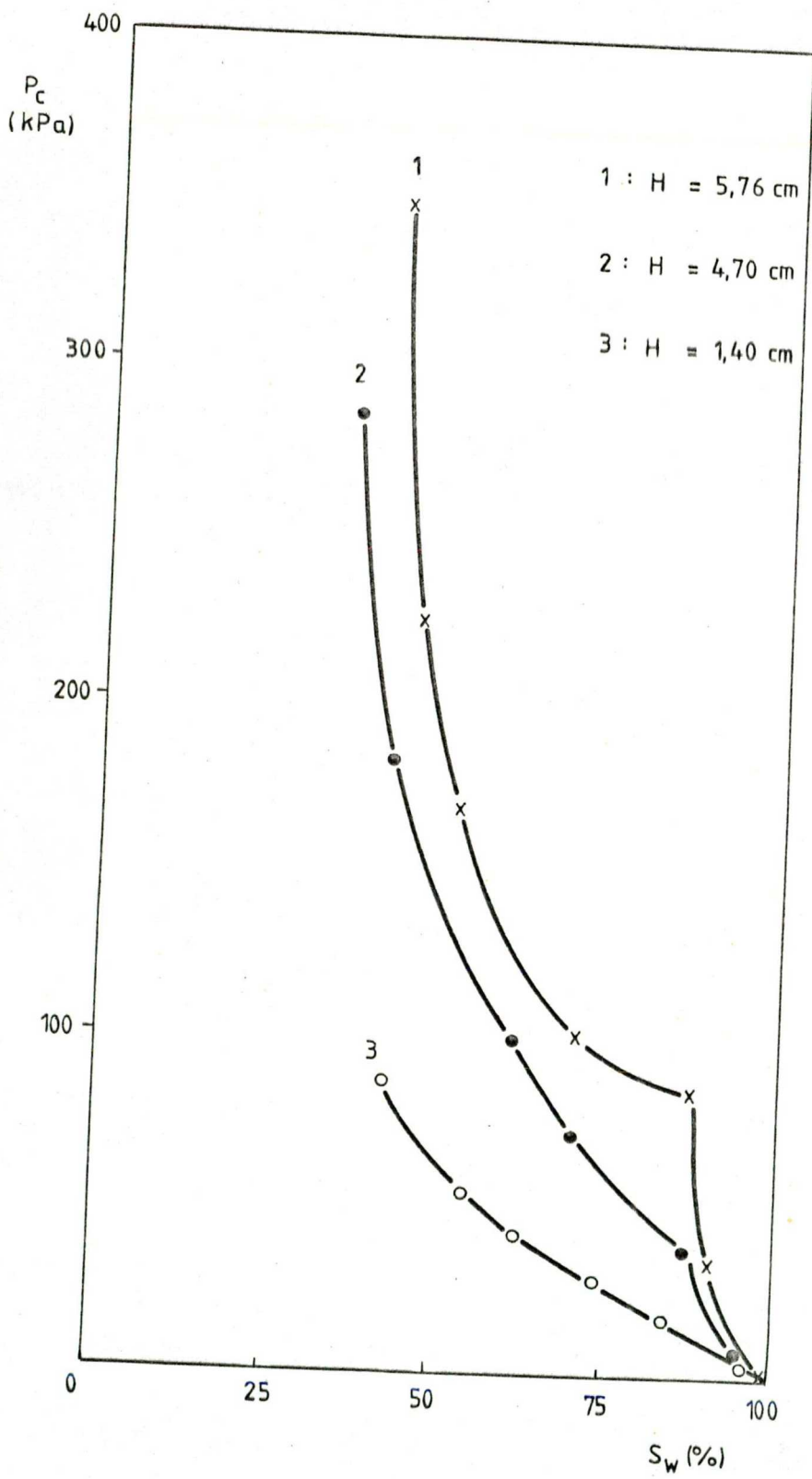
A 30. ábrán valódi, finomszemű homokkő 6 szeletének együttes centrifugálásakor kapott átlagtelítettségeket és a minták tetejére vonatkozó kapilláris nyomásokat ábrázoltuk. A két ábra alapján levonhatjuk azt a következtetést, hogy a módszer csak a jó átjárású mintáknál ad kapilláris nyomásgörbét. A pontok szórt helyzete egyben felhívja a figyelmet a kapilláris kontaktus kialakulásának esetlegességére.



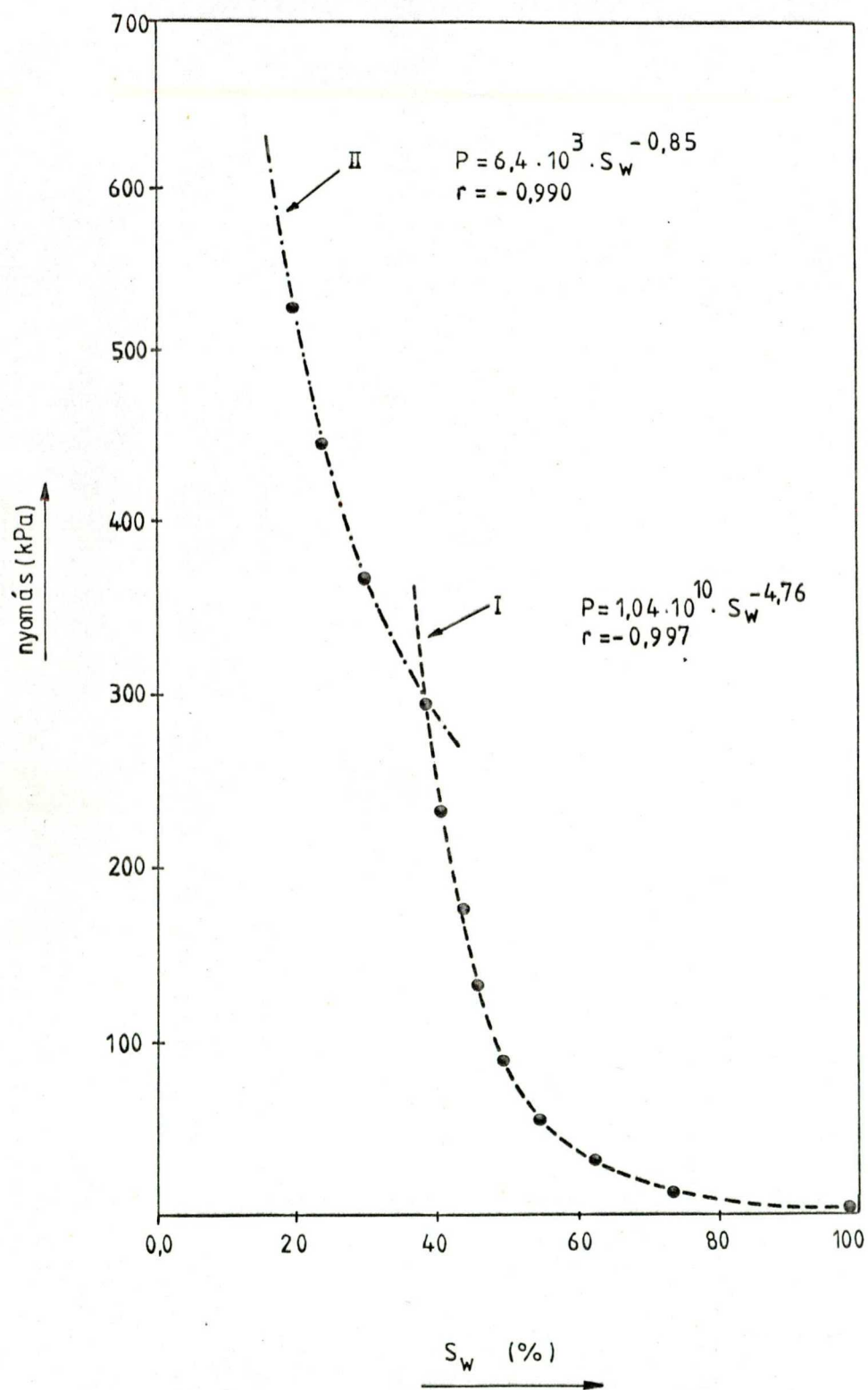


30. ábra

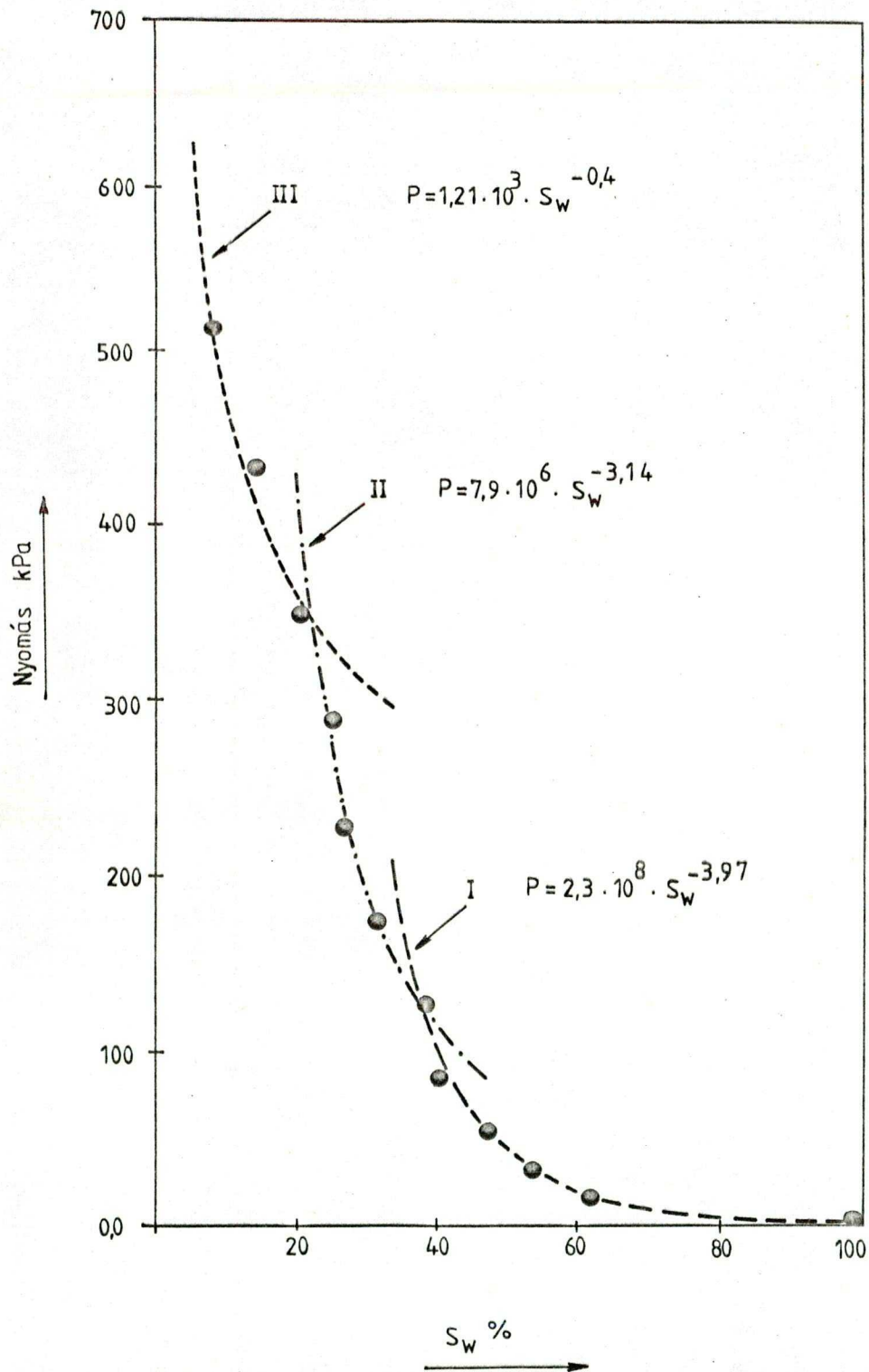
Feltételezzük, hogy az egymással összeköttetésben levő pórusok láncolatai különböző csoportokat, populációkat képeznek. Ezeknek elkülönítésére olyan kapilláris nyomásgörbét vettünk fel,



31. ábra



32. ábra



33. ábra

amelyeknél nem alkalmaztunk véghatás adszorbert. Feltételeztük, hogy először a lecsapolás irányába levő nagy effektív sugaru / 6.a. ábra / kapilláris porusláncolatokból távozik a víz.

Az oldalágakból, a növekvő nyomás hatására ezekbe a csatornába fokozatosan belépnek újabb vízcseppek, amelyek kellő mértékben felgyűlve ismét egy intenzív átlagos telítettség csökkenést okoznak. Ezt a jelenséget tapasztaljuk az ablakra eső cseppeknél is. Az összegyűlt cseppek egy idő után lefolynak, ami a helyi telítettség értéket rohamosan lecsökkenti. A kísérleti megvilágításnál több centiméter hosszúságu mintából indultunk ki.

Majd a minta egy részével ismételtük meg a kísérletet /31. ábra/.

A kísérleti eredmények igazolták feltételezésünket

A kapilláris nyomásgörbe több, egymástól jól elválasztható részekre bomlott, kellő mintahosszuságnál.

Az egyes részeit közelítettük a görbének, a $p = A/S_w^b$ függvény-nyel abból kiindulva, hogy a hővezetés, az elektromos vezetőképesség között analógia áll fent. GARDNER szerint a kapilláris potenciál és telítettség között

$$\gamma = \frac{A}{S_w} + B$$

/ 36/

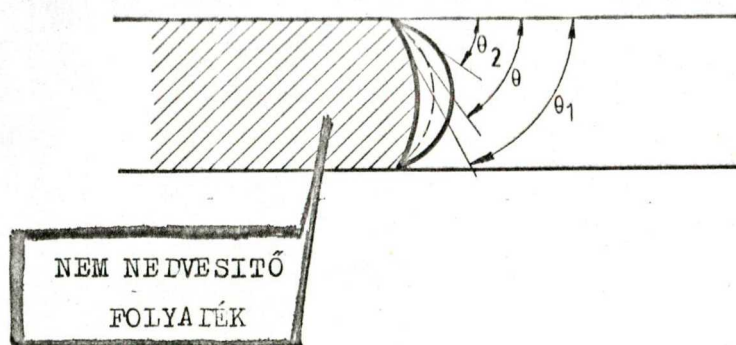
alakú összefüggés létezik. Az általunk kapott igen magas korreláció együttható értékek alátámasztják a jelenségek közötti rokonságot. / 32. és 33. ábra /

Összefoglalva : a kapilláris nyomásgörbe alakja függ annak meghatározási módjától. A porózus blokkban " a priori "létező porus szerkezeti felépítést a higanybesajtolás módszerével lehet a legjobban feltárni amikor is a porustörtek, a szűkületek eloszlásfüggvényét kapjuk.

A szerző előnyös tulajdonsága alapján a higanybesajtolás módszerét részesíti előnyben a másik két mérési módszerrel szemben, amelyet alátámaszt a módszerek között kimutatott ekvivalencia is.

2.2.4. A hiszterézis jelensége, értelmezése

A θ érintkezési szög értékét befolyásolja az állapot. Három eset lehetséges: a nyugalom, a nedvesítő fázis előrenyomulása vagy visszahúzódása. A 34. ábrán θ -val a nyugalmi



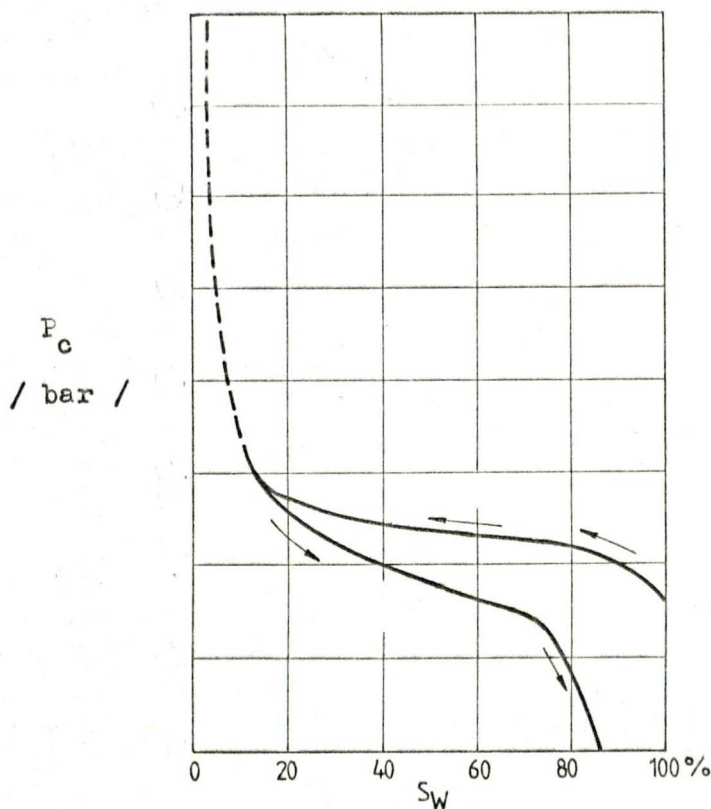
34. ábra

állapotban jellemző érintkezési szöget jelöltük. Ennél nagyobb a θ_1 szög, amely akkor érvényes, ha a nedvesítő folyadék szorítja ki a nem-nedvesítőt, kisebb viszont, ha a nem nedvesítő fluidum szorítja ki a nedvesítő fluidumot / θ_2 /.

A telítettségi hiszterézist feltételezésünk szerint befolyásolja az is, hogy a pórusláncolat nem egy párhuzamos csövi kapilláris. Erre utaltunk már az "öblös csőmodell" / 6.b. ábra /, és kupos kapilláris tárgyalásánál / 7.a. ábra /. A telítési ill. lecsapolási folyamat során kapott telítettségeknél szerepet játszó "előélet" az öblös csőmodell-nél a legszembetűnőbb.

Vizsgálatainkat kiterjesztve a porózus blokkra elméletileg vártuk a hiszterézis jelenségének bekövetkezését. A fenti két modell alapján a nyomás-telítettség értékpárok eltolódása annál jelentősebb egy porózus blokkban minél nagyobb az eltérés a pórustorok és kiöblösödés mérete között / 35. ábra /.

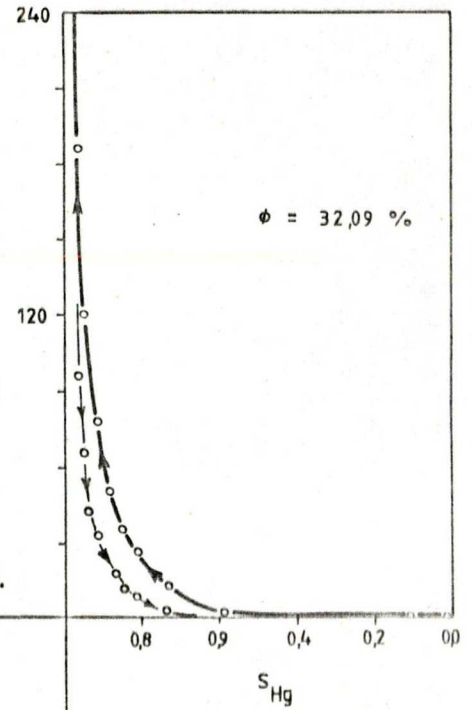
Feltételeztük továbbá azt is, hogy a porozitás növekedésével ez a méretkülöbség csökken, azaz minél nagyobb a blokk porozitása, annál kiegyenlítettebb pórusláncolat, annál közelebb esik $r_{\min}$ és $r_{\max}$.



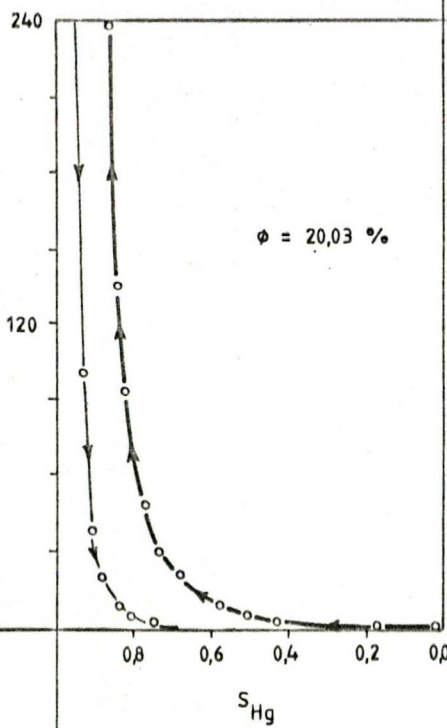
35. ábra

A kísérleti tapasztalatainkat a 36. ábrán mutatjuk be, amely az elmélettel szorosan összefüggő bizonyítást adott feltételezésünkre. A kapilláris nyomásgörbéket higanybesajtolással kaptuk, amelyeknek csak a maximálisan 240 bar nyomásnál alacsonyabb részét szemléltetjük. Így nem a teljes telítettségi histerézist ábrázoltuk, de már ennyi is elegendő annak bizonyítására, hogy minél kisebb egy porózus blokk porozitása annál jelentő-

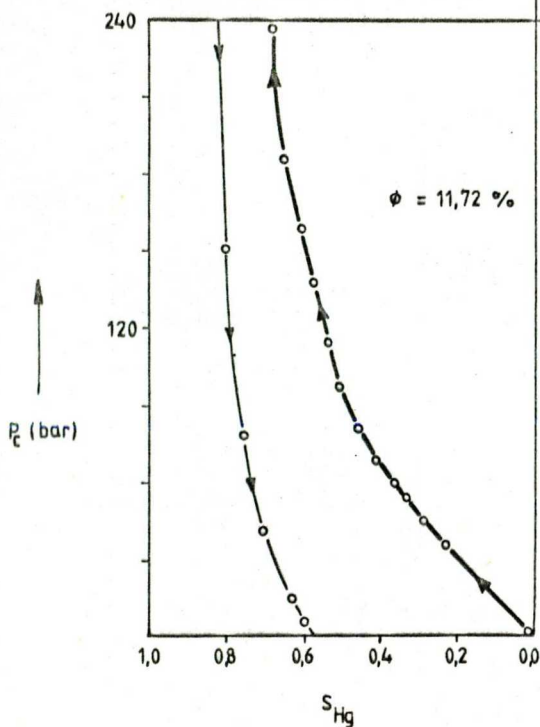
KISMARJA - 12 1.



NAGYKÖRÜ - 11 3.



SÁNDORFALVA - I 17/2.



sebb az azt átjárt pórusláncolatok minimális és maximális pórusszűkület közötti különbség, nagyobb a hiszterézis területe.

A három, különböző ülepedési körülmények között keletkezett homokkő pórustorok eloszlását a 37.a.b.c. ábrán látjuk. Az ábra jól szemlélteti, hogy a hazai kifejlődésű homokkővek pórustorokeloszlása 10^{-2} és $10^2 \mu$ közötti tartományba esik.

A 36. és 37. a.b.c. ábrák alapján levonhatjuk azt a következtetést, hogy a porózus blokkban létező pórusláncolatok osztályozottságára a telítettségi hiszterézis információt ad. Tendenciájában jellemző, hogy minél nagyobb a blokk porozitása, annál kevésbé jelentős a szűkületek és a kiöblösödések mértéke különbsége, annál jobban közelíti a pórusláncolat az öblös csőmodell szabályos periodicitását, avagy a párhuzamos kapilláris cső modelljét.

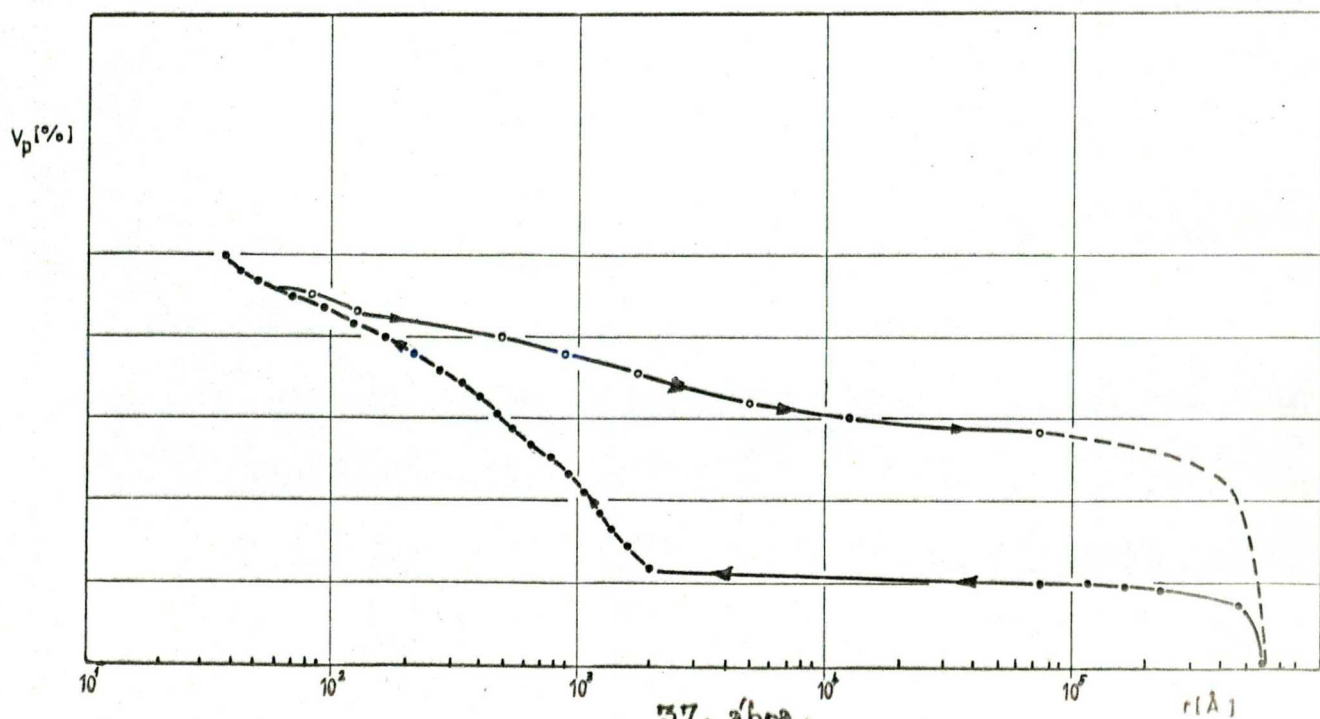
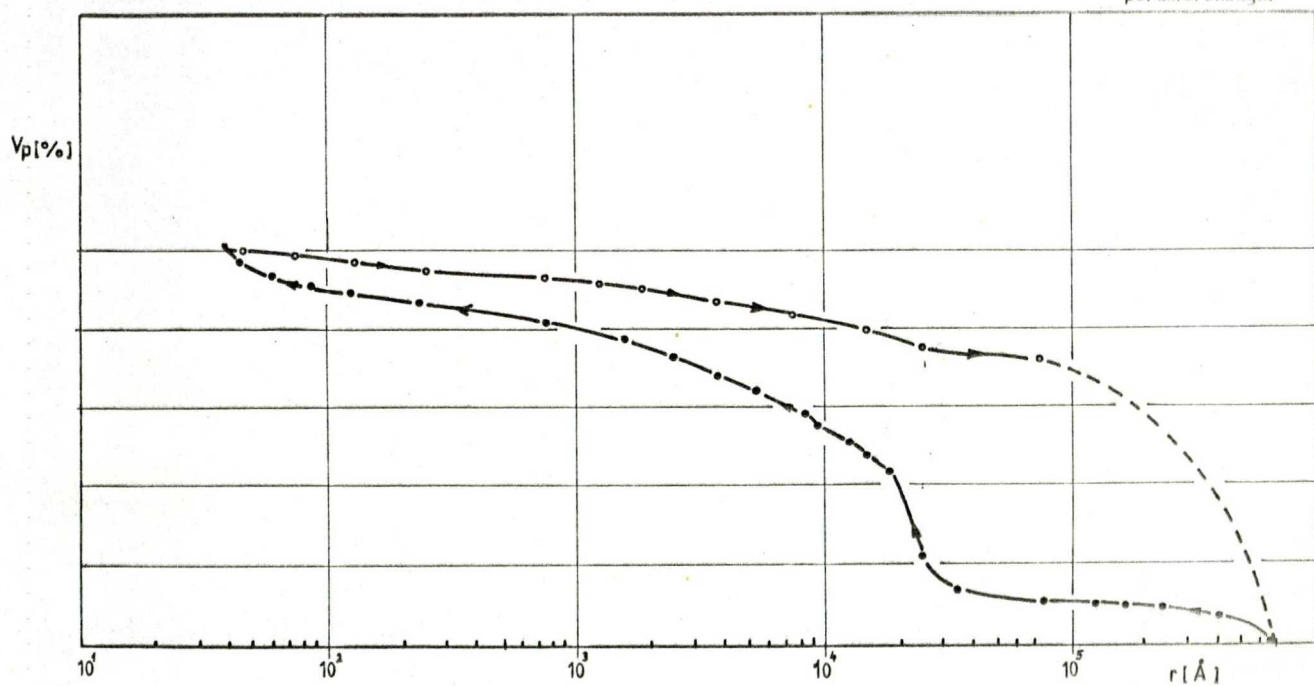
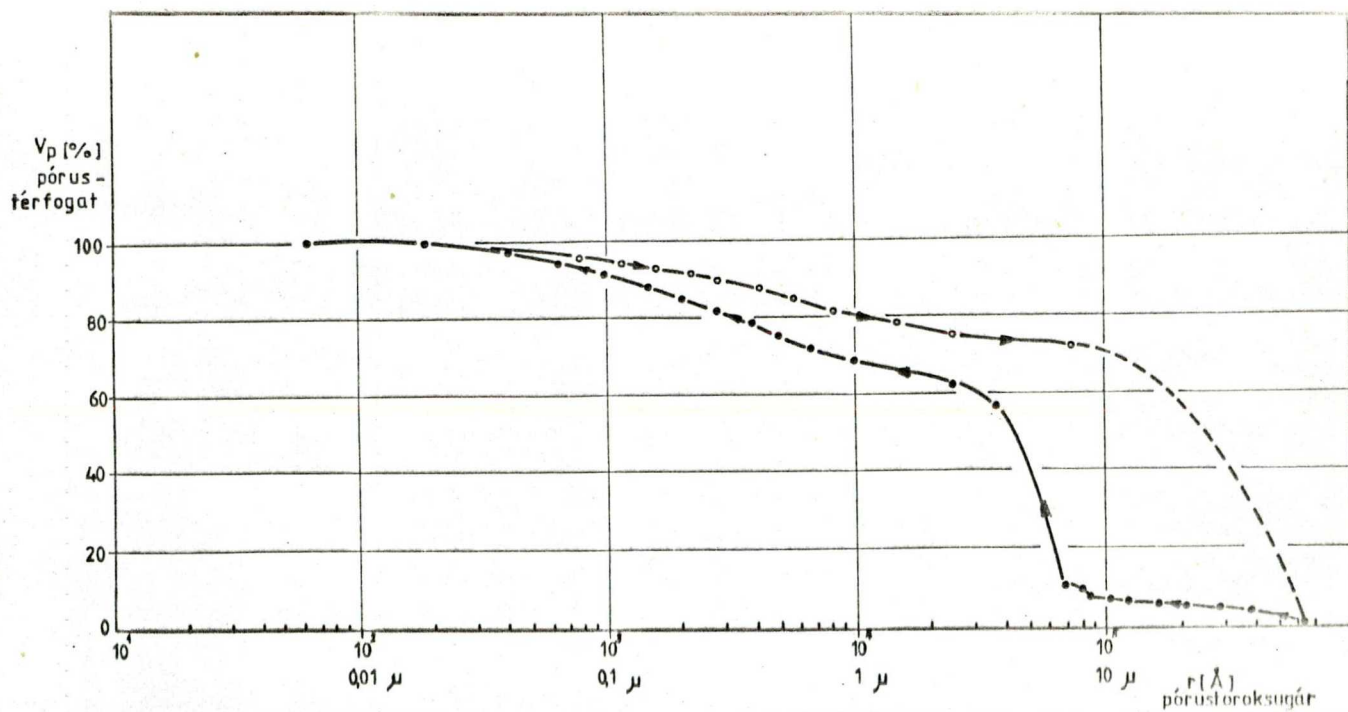
2.2.5. Összefüggés a kapilláris erő, a telítettség és a pórusfelépítettség között

Az ipari gyakorlat számára az jelentette a problémát a maradék viztelítettség $/S_{lm}/$ meghatározásánál, hogy több olyan kapilláris nyomásgörbét kaptunk, amely nem jellemezhető a három jellegzetes szakasszal. Hol a B pontnál lévő küszöbnyomás hiányzott, hol az A pont után nem kaptuk meg a gyakorlatilag nyomásfüggetlen telítettséget. /17. ábra /.

A kapilláris nyomásgörbék pórusszerkezeten alapuló csoportosításához a szerző egy egységes koordinátarendszert javasol.

A nyomás felső határa 250 bar, mivel a szakirodalom /B.18./ 300 Å felett javasolja elfogadhatónak a higanyos méréseket. A higany-levegő rendszer és a víz-olaj rendszer közötti 5-ös faktorial számolva maximális nyomásként 50 bar-t kapunk, ami jól egyezik a WAGELER-féle, a vízfázisként mobilis eset felső határával.

A közös koordináta rendszerben elemezhetjük a kapilláris nyomásgörbék lefutását, ugyanakkor együtt ábrázolhatjuk a különböző rendszerű mérések transzformációját is.



Az alsó néhány bár nyomásig használható a diafragmás és centrifugás módszer. A higanyos módszer előnye egyértelmű, totális porusfeltárást ad, nem kell számolni elektrosztatikus kölcsönhatással, mérés gyors, és biztosan a nyomásra jellemző egyen-súlyi átlagtelítettséget ad. Az egységes koordinátarendszerben pedig a higanyos mérésből könnyen elkészíthető a viz-olaj rendszerű transzformált a már említett 5-ös faktorial. / 34 /

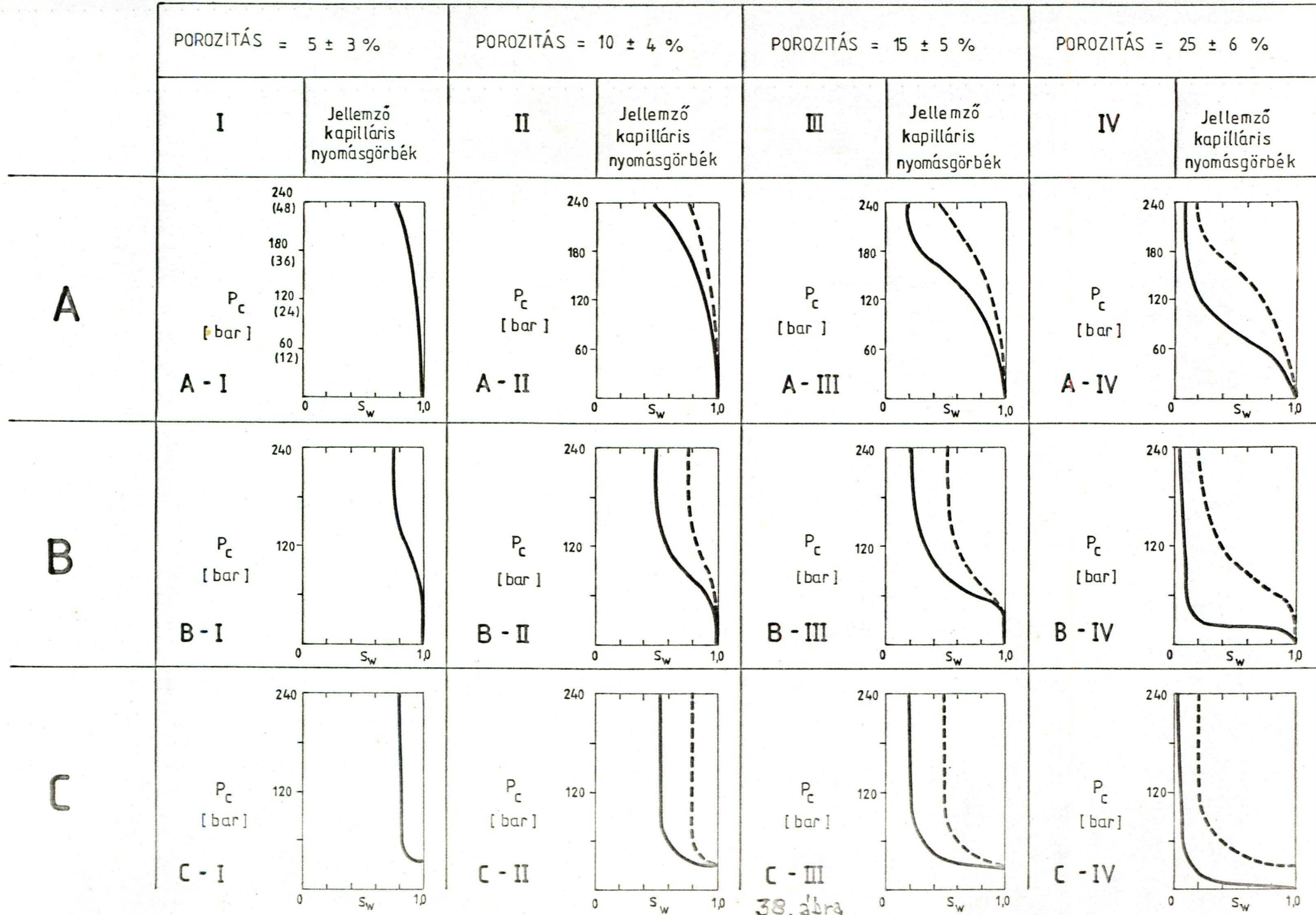
Karbonátos, repedezett tárolókra G.V. CHILINGAR et. al. elkészítették a kapilláris nyomásgörbék rendszerező áttekintését. Az alábbiakban a szerző a magyarországi homokkő kifejlődéseken mért kapilláris nyomásgörbéket foglalja rendszerbe.

Alapfelfogásunk a kőzetről, hogy kvarc- és kalciumszemcsékből áll, amelyek a fokozatos mélyebbre településsel egymással cementálódtak. A szemcsék nem azonos méretűek, hanem adott eloszlással jellemezhetők. A pórustér fogat rovasára, a szemcsék felületén anyagásványok vannak, valamint a szemcsék s így a pórusok is osztályozottsággal rendelkeznek.

A különböző kifejlődésű homokkővek kapilláris nyomásgörbéinek 12 családja van, amelyeket 4 típusba sorolhatunk az inproduktívától az igen jó tárolóig / 38. ábra /. A görbék lefutása jellemző az ülepedés során kialakult pórusrendszerre. Az egyes típusok esetében a jellemző kapilláris nyomásgörbékén túl megadjuk mind a porozitást, mind az áteresztőképesség intervallumát is. A séma nem a legáltalánosabb, az alapkoncepció szerint lett megalkotva. Az egyes típusok görbéi családokba tartoznak jellemző alakokkal és az X, Y tengelyektől vett távolságokkal. Szaggatott vonallal azt a tartományt jelöltük, amelyben a kapilláris nyomásgörbe lefutása valószínű.

Például az I-A csoport görbéje a legfinomabb szemcséjű homokkő kifejlődéshez tartozó görbe. Ahogy haladunk jobbra a kőzetek úgy válnak durvább szeműekké, megtartva balról konkáv jellegüket; noha a konkáv tartomány egyre nagyobb része ábrázolható - és ki-mérhető - az egységesen javasolt koordináta rendszerben.





Az A családra jellemző, hogy finomszemcsés, de osztályozott homokköveket jelöl. Nincsenek nagy sugaru pórusok, a kapilláris nyomásgörbék az γ tengelyt 20 % alatt is megközelíti, azaz ennél kisebb pórustérfogat-százalékból is kinyerhető a nedvesítő fluidum. A balról konkáv jelleg megmarad.

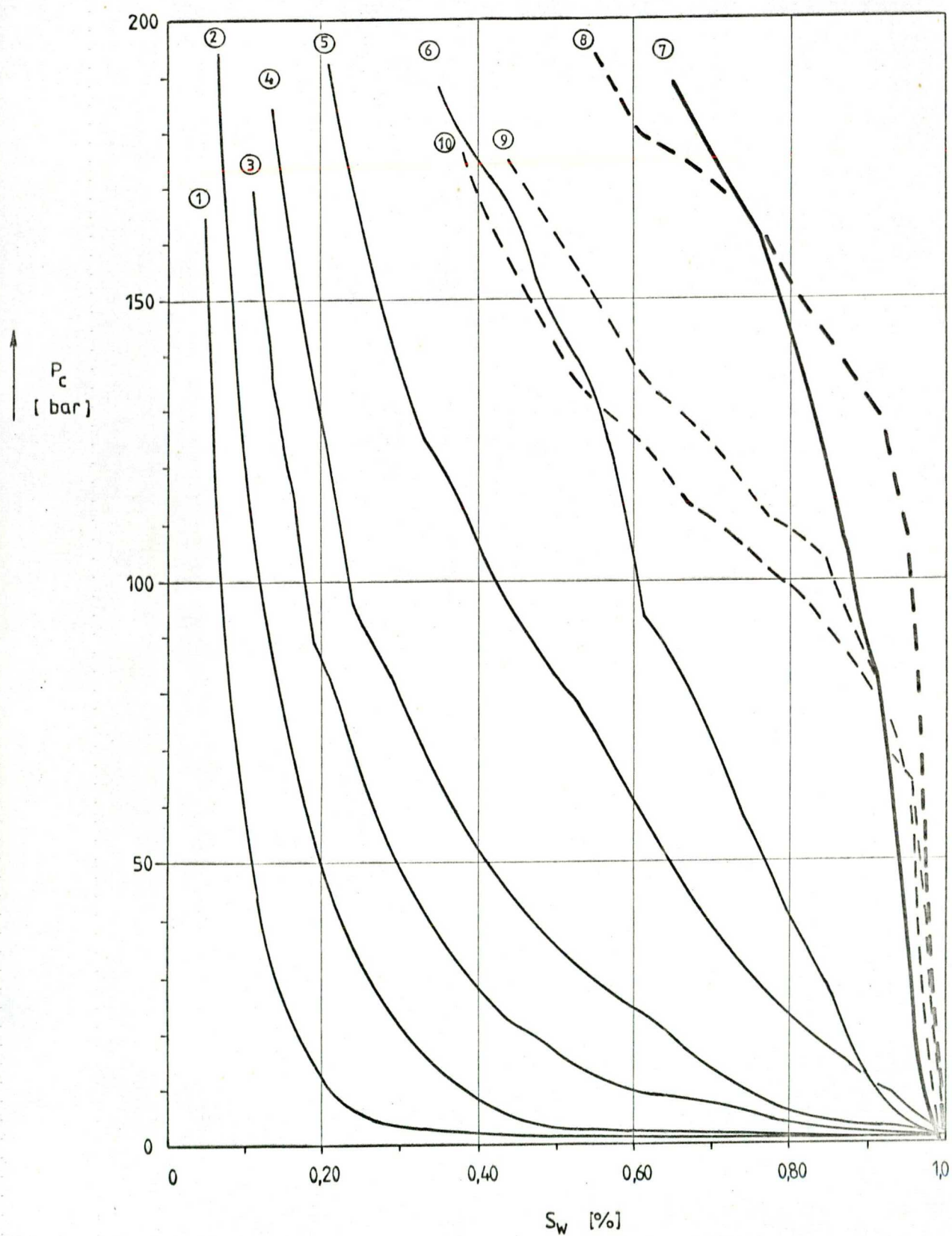
A B családra jellemző, hogy ezek nem azonos osztályozottságúak, vagy finomszerű homokkövek. Heterogén felépítésűek, mindkét szemcseméret található. Osztályozatlannak nevezhetők. Jellemző rájuk, hogy jól átjárható pórusterük nincs, ami vagy az osztályozatlanságuknak, vagy a pórusfalra tapadt agyagásványoknak tudható be. Hasonló jellegű az aleurolit-tartalom növekedése is. Ez magyarázza azt, hogy a görbék kettős jelleggel bírnak és a küszöbnyomással rendelkező görbétől az alig jelentős küszöbnyomású görbéig kapilláris nyomásgörbe előfordul a családban.

A C családra jellemző az osztályozottság, de jelentősebb szemcséjű homokkövek tartoznak ide. Kapilláris nyomásgörbéi egy intenzív telítéscsökkenés után gyakorlatilag nyomásfüggetlen szakasszal rendelkeznek. A kapilláris görbék jobbról konkávok.

Egy tárolóban megnyilvánuló heterogenitás miatt laboratóriumba mérhető, jellegzetes kapilláris nyomásgörbéket szemléltet a 39. ábra, illetve a 40. ábrán azok pórustorokeloszlását adtuk meg. Látható, hogy - a 38. ábra A-IV, B-IV, C-IV, jellegzetes kapilláris nyomásgörbék megtalálhatók egy valódi tároló porózus blokkjának mérésénél. Szaggatott vonallal a 7-nél nagyobb sorszámú görbéket jelöltük, amelyek az A-III típusba sorolhatók.

Összefoglalás:

- porózus blokk egymással összeköttetésben lévő pórusrendszerét feltárva a differenciális porozitáshoz, vagy más szavakkal az η eloszlásfüggvényhez jutunk. A hazai kifejlődésű homokkövek pórustorok eloszlása 0,01-100 μ mérettartományba esnek. Ez a mérettartomány egyrészt lehetővé teszi a kapilláris jelenségek létrejöttét, másrészt a pórusfelületen megkötött fluidum befolyásolja a kapilláris nyomásgörbe lefutását.



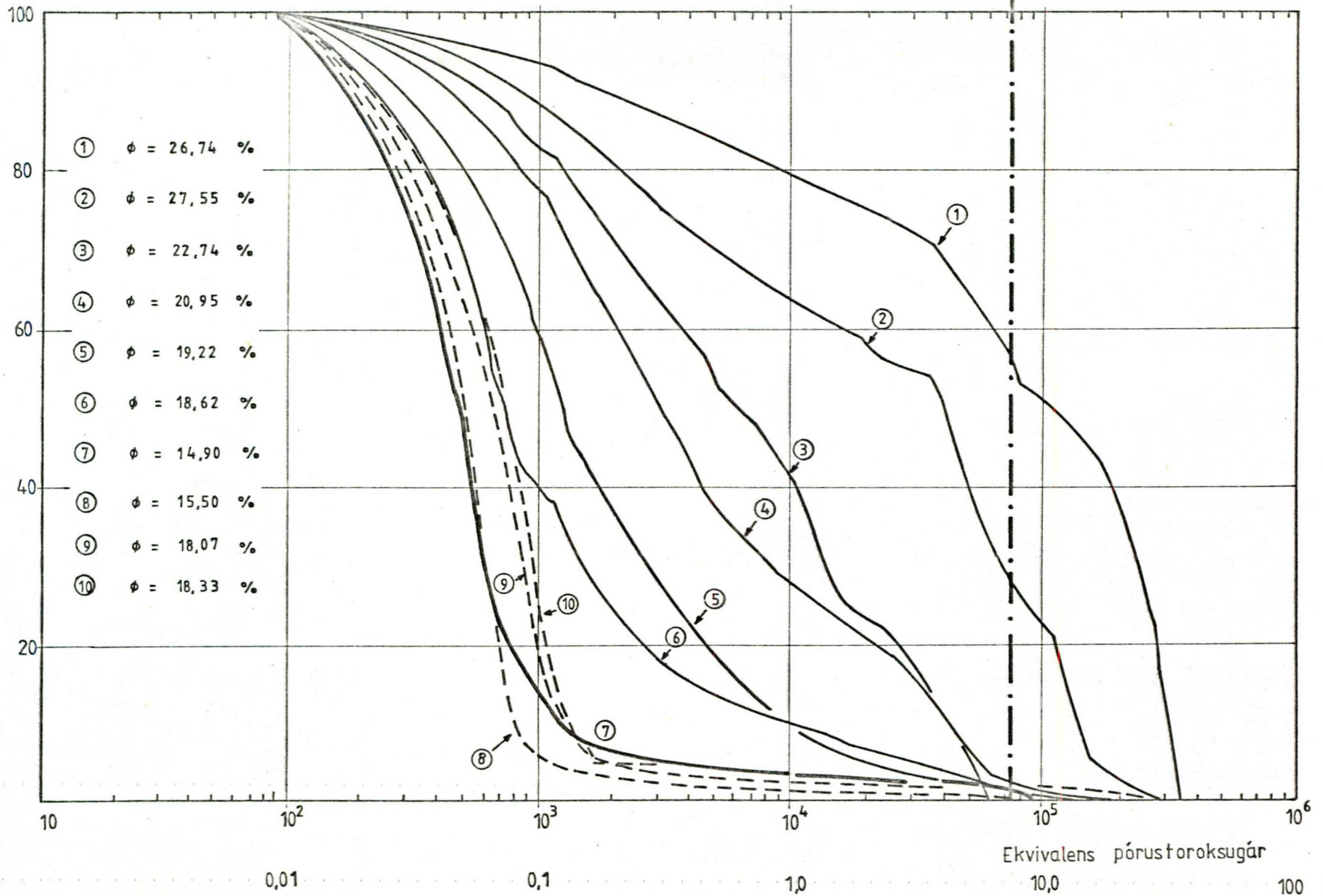
39. ábra

Pórustérfogat
[%]

$P_{\max} = 1000 \text{ bar}$

Mikro
tartomány

Makro
tartomány

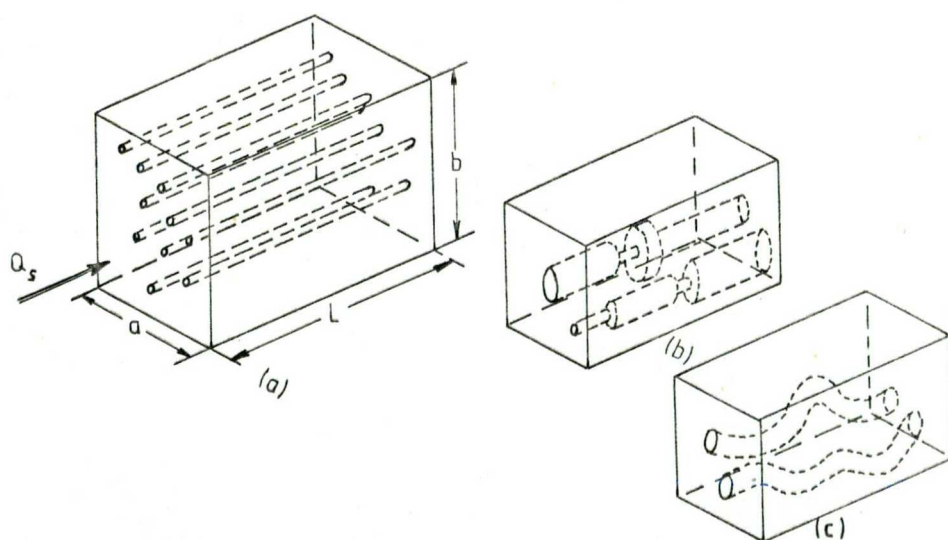


- kísérletileg igazoltuk, hogy a kapilláris nyomásgörbe alakja, az ebből származtatható pórusméret eloszlás függ a meghatározás módjától . A porózus blokkban " apriori " létező pórusméret-eloszlás meghatározására szerintünk a higanybesajtolás mód-szere a legalkalmasabb.
- a mikroszkópikus tárgyalásmódnál bemutatott mennyiségek /felületi feszültség, nedvesítési szög, stb. / transzponálhatók a porózus blokk reális hatásainak értelmezésében.
- a póruskapcsolatok felépítésénél rámutattunk arra, hogy csak egyes esetekben sikeres próbálkozás a kapilláris nyomásgörbe analitikus alaku függvényvel történő leírása . A szerző által javasolt egységes koordináta rendszer egyrészt a mérések ekvivalenciáján alapul, másrészt a kapilláris nyomásgörbére egységes értelmezését teszik lehetővé.
- a kapilláris erőnek két hatása létezik : a kapilláris zóna és a véghatás. Hatásuk annál jobban érvényesül, minél lassabb az elmozdulás, minél kisebb a fázisok viszkozitása és a pórus-torok eloszlás tartománya és minél nagyobb a fázisok felületi feszültsége. A kapilláris hatása pórusméret csökkenésével átadja szerepét a felületi jelenségeknek. Viz esetében ez a kritikus méret kisebb, mint $0,5 \mu$.
- a hiszterézis jelenségének tanulmányozása is felhívta a figyelmet arra a tényre, hogy közel azonos porozitású blokkok jelentős belső, póruskonnektivitás, szerkezetfelépítési különbséggel rendelkeznek . 10 %-os porozitás különbség azonban már kísérletileg kimutatható változását adja a telítettségi hiszterézis huroknak.



2.3. Az áramlási törvény felállítása, jellege a porózus blokkban

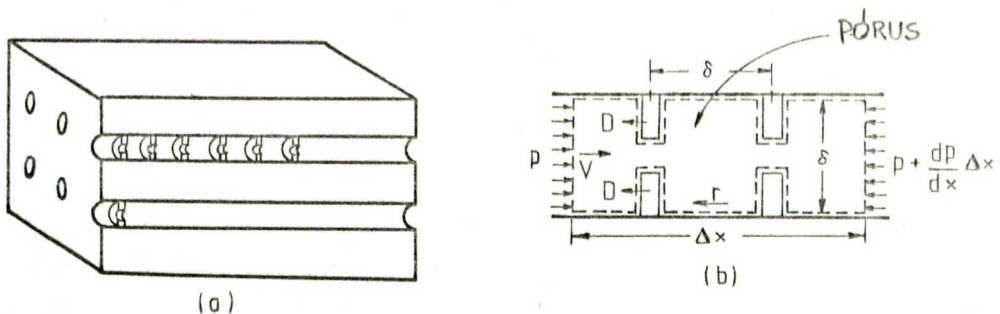
A porozitással kapcsolatos gondolatmenetünk arra a következtetésre indít bennünket, hogy a kőzetminta pórushálózatának periodikus bővülése, szűkülése mértékét a körüláramlott szemek közötti tér szögleteiben megkötött és részben a kapilláris erőkkel is szabályozott, a mozgás szempontjából tapadóvíznek nevezhető vizhányad lényegesen csökkenti a mozgó folyadék keresztmetszetét. Kézenfekvő tehát az a gondolat, hogy a szivárgó mozgást igen kis átmérőjű csövekben végbemenő mozgással hasonlítsuk össze. Így felmerül az a kérdés is, hogy a szivárgó mozgás haladási irányával párhuzamos alkotókkal elhatárolt hengeres kőzetminta teljes keresztmetszetéből mekkora rész jut a hézagokra és mekkora részt foglal el a szilárd váz. A porózus blokk bemeneti és kimeneti oldala közötti póruskapcsolatot leíró szivárgási modellek közül a legegyszerűbb a kapilláris csőköteg modell, amelyet felhasználtunk a kapilláris nyomás értelmezésénél.



41. ábra

A kapillárisokban az áramlást a HAGEN-POISSEUILLE egyenlettel írják le.

A kapilláris blokk közelítésének következő lépése, hogy a kapillárisokat nem tekintik azonos átmérőjűnek a minta teljes hosszában. Ezzel a modellel a maradék telítettség és a hiszterézis már értelmezhető, mivel a modellek szűkületek és öblösödések váltakozásából áll. Az áramlási egyenletek alkalmazásánál mindig valamilyen rendezettséget / periodicitást / tételezünk fel, a valóságos porózus rendszerek azonban rendezetlenek.



42. ábra

Az egyszerűsítés oka az, hogy a NAVIER-STOKES egyenletek megoldása rendezetlen rendszerekre szinte reménytelen. Mégis, hogy a rendezetlenség hatását valamiképpen figyelembe lehessen venni, a statisztikai mechanika eszközeihez kellett folyamodni. Így alakultak ki a statisztikai modellek.

E csoportban is nagyon sok megoldást találunk, amelyek közül jelentősebbek a BAER-BACHMAT modell, az anizotróp általános esetre is kiterjesztette de JOSSELIN DE JONGE modell / /, továbbá SCHEIDEGGER statisztikai modellje /, amelyben a szerző a véletlenszerűséget, a rendezetlenséget, magához a szilárd közeghez kapcsolja.

A statisztikai modellek fő és általános jellemvonása az átlag paraméterek bevezetése és alkalmazása, ami lényegében a modellek célkitűzése is.

Ugyancsak átlagértékkel dolgoznak a NAVIER-STOKES egyenletek átlagolásán alapuló modellek, amelyekben a porózus közeg elemi térfogatára vonatkozóan eltérő módszerekkel, de a NAVIER-STOKES egyenletek átlagolásával írják fel összefüggéseket. A póruscsatornák térhálós rendszerét alapul véve, WHITAKER / / egy anizotróp közegekre érvényes megoldást közöl. A NAVIER-STOKES egyenleteket a belső tagok nélkül átlagolja WHITAKER-hez hasonlóan HUBBERT / /. A belső tagokat is figyelembevéve átlagol IRMAY / / és végeredményben visszakapja a DARCY-törvényt, a KOZENY-egyenlettel megfogalmazva. Számos olyan együtthatót vezet azonban be, amelyek kísérleti meghatározása nehézkessé teszi a modellt. Összefoglalva: valamennyi modellre jellemző, hogy az elemi térfogat, tehát a közeg fizikai pontjának definíciójával megelégszenek, ezt a továbbiakban valamilyen egyszerűsített geometriával vagy átlagos paraméterekkel leképezettnek tekintik. Számos folyamat szempontjából, például a hiszterézis jelenségek, vagy a kapillárkondenzáció szempontjából azonban ezek a leírási módok, tehát ezek a modellek, nem adnak olyan részletes, belső képet, ami a jelenségek jobb interpretálását lehetővé tenné. Öncélú és értelmetlen lenne egy olyan modell felállítása, amely nem visz közelebb az említett kérdések leírásához, csupán eggyel szaporítja a modellek nagy számát. Nem mehetünk azonban el az olyan igények mellett, amelyek a szűkületek hatását feltétlenül figyelembe veendőnek tartják /B.27, 28/, ami egyúttal a pórusok belső terének részletes mikroszkópikus leírását kívánja meg.

2.3.1. Az egyfázisú viszkózus elmozdulás egyenlete

Tekintsünk a porózus közeg valamely pontjában az áramlás általános irányára merőlegesen egy síkot és abban egy P pont olyan környezetét, amelyben N számú póruskeresztmetszet van. Legyen az i -edik póruskeresztmetszet felülete A_i , az ott érvényes sebességvektornak a felvett sík normálisába eső komponense v_i akkor az elhatárolt keresztmetszeten átszivárgó q_i folyadékhozam,

$$q_i = \sum_i A_i v_i \quad / 37 /$$

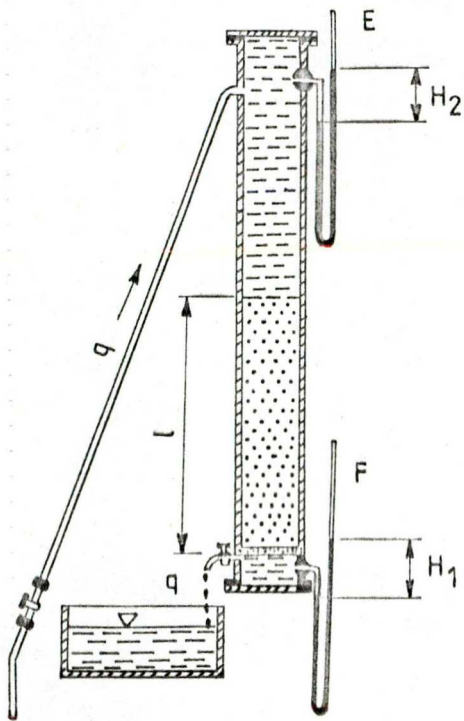
és így a pont környezetében értelmezhető középsebesség:

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_i A_i v_i}{\sum_i A_i} = \frac{q_i}{A_p} \quad / 38 /$$

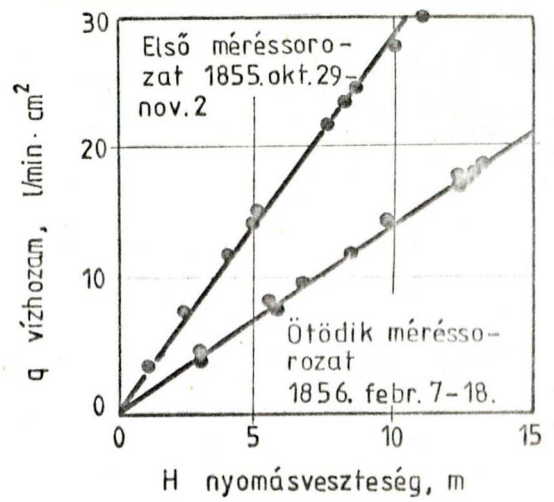
Az így értelmezett középsebességet, amelynek nagysága pontról pontra változhat, helyi átlagsebességnek nevezzük. Bár ez a helyi átlagsebesség elvileg a legjobban megközelíti a szivárgó folyadék valóságos sebességét, a mozgást befolyásoló geometriai és mechanikai tényezőkkel való összefüggésének felderítése azonban legyőzhetetlen akadályokba ütközik. Mind elméleti mind gyakorlati szempontból célravezetőbb a közeg bonyolult pórushálózatában végbemenő valóságos szivárgó mozgás leírása helyett olyan folytonos folyadékközeg mozgását vizsgálni, amely a legközvetlenebbül ellenőrizhető kinematikai jelenség - a folyadékhozam szempontjából - a valóságos, a pórusláncolatokban végbemenő mozgást helyettesítheti.

Mínthogy folytonos közeg mozgásánál a folyadékhozam és sebesség kapcsolatában a teljes keresztmetszettel kell számolni:

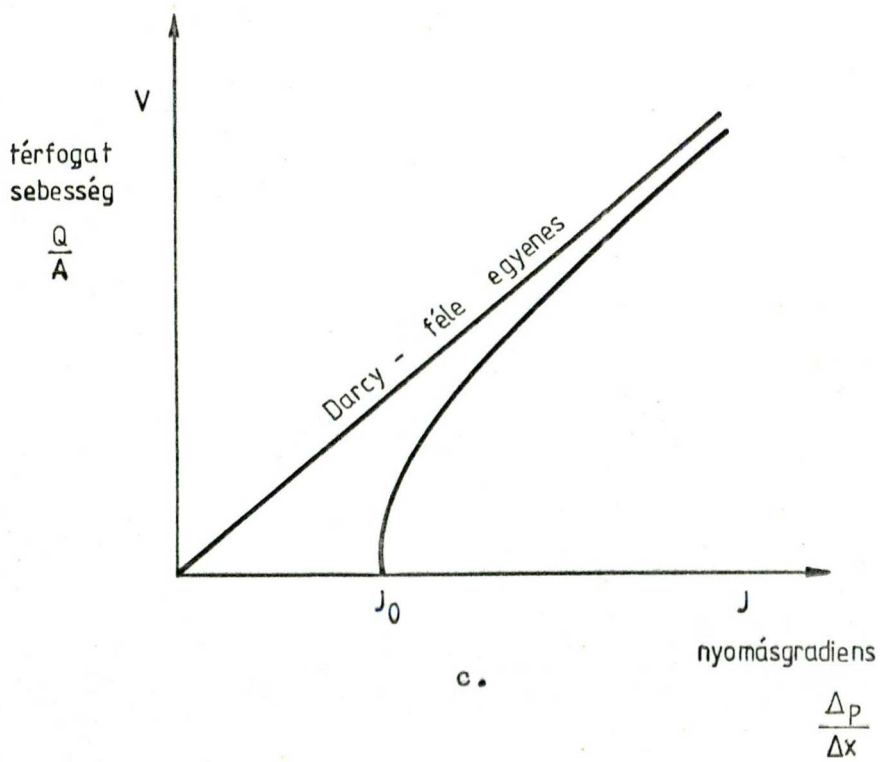
$$V = \frac{Q}{A} \quad / 39 /$$



a.



b.



c.

43. ábra

ennélfogva / 38 / és / 39 / összefüggések egybevetésével $\bar{v}_1$ a helyi átlagsebesség és a helyettesítő vagy modellfolyadékmozgás v sebessége között a

$$v = \phi \bar{v}_1 \quad / 40 /$$

összefüggés állapítható meg.

A modellfolyadékmozgásnak így definiált sebességét, amely nem valószínű, hanem csak képzelte sebesség, szivárgási sebességnek nevezzük.

Hogy ilyen modellfolyadékmozgás bevezetése a valósággal összeegyeztethető eredményekre vezet, azt DARCY HENRIK nagy körültekintéssel végzett kísérletei mutatták meg / 43 .b. ábra /.

DARCY ezeknek a kísérleteknek a során, amelyekkel száz esztendőre kijelölte a talajvíz és a rétegfluidumok mozgására vonatkozó kutatások módszerét formailag tulajdonképpen nem a szivárgási sebességre vonatkozóan tett megállapításokat, hanem a / 43. ábra / vázolt készülékben azt vizsgálta, hogy az abban elhelyezett l magasságú kavicsöltet egységnyi keresztmetszeten az E és F manométerekkel ellenőrzött $(H_2 - H_1)$ nyomáskülömbőség hatására az időegység alatt mekkora q folyadékhozam szivárog át.

DARCY nagyszámu kísérletének eredményei táblázatosan dolgoztatta fel, és arra a következtetésre jutott, hogy a felületegységen, és a szivárgási út egységére vonatkozó fajlagos hozam q , és a fajlagos nyomáscsökkenés között lineális összefüggés áll fenn. Két kísérletsorozatának eredményét / 43.b. ábrán / mutatjuk be. Az egyenesek két különböző áteresztőképességű homoktalaj esetében mutatják a lineális kapcsolatot.

$$q = \frac{H_2 - H_1}{l} k = k \frac{dH}{dl} = k J \quad / 41 /$$

A DARCY- törvény értelmében, összenyomhatatlan közeg szivárgása esetén a szivárgás sebessége arányos az alkalmazott nyomás-gradi-
enssel.

$$v = K \cdot \frac{\Delta p}{H} \quad / 42 /$$

ahol a K arányossági tényező részben a porózus közeg póruskap-
csolataitól, részben a benne mozgó közeg tulajdonságaitól függ.
E két tényező figyelembe vételére K -t a következő módon defi-
niálhatjuk :

$$K = \frac{k}{\mu} \quad / 43 /$$

ahol a k a porózus közeg áteresztőképessége, μ pedig a folya-
dék viszkozitása.

Az áteresztőképesség egysége CGS egységrendszerben :

$$\begin{aligned} 1 D &= \frac{1 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right] \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right]}{1 \left[\text{cm}^2 \right] \cdot 1 \cdot 1,01325 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right]} = \\ &= 9,899 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 = 1 \mu\text{m}^2 \quad / 44 / \end{aligned}$$

A statisztikai átlagolással kapott DARCY-törvény a következő alak-
ba írható előző egyenleteink felhasználásával :

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta p}{\mu H} \quad / 45 /$$

Ez az egyenlet formailag is teljesen analóg a POISEUILLE törvény-
nyel

$$Q = \frac{\eta \cdot \pi R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \mu H} \quad / 46 /$$

alakjával, ami kifejezi n db R sugaru kapilláris által adott folyadékhozammal p nyomáskülönbség esetén. L -el a kapillárisok hosszát jelöltük.

A párhuzamos kapillárisok modelljét felhasználtuk a kapilláris nyomás értelmezésénél is. Egy ilyen rendszer "porozitása" :

$$\phi = \frac{\kappa \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L}{A \cdot L} = \frac{\kappa R^2 \cdot \pi}{A} \quad / 47 /$$

amelynek felhasználásával az " ekvivalens pórusugárra " kapunk összefüggést.

$$R = \sqrt{8} \cdot \sqrt{\frac{k}{\phi}} \quad / 48 /$$

Ebből látható, hogy minden porózus blokk áramlási tulajdonsága alapján egy R sugaru kapillárisal ekvivalens. Az egyenlet kifejezi azt a várt összefüggést, hogy minél nagyobb egy minta porozitása, annál nagyobb áteresztőképességgel rendelkezik.

Az elméleti megfontolások kísérleti tanulmányozásakor először vizsgáltuk, hogy egy kapillárisban milyen térfogatsebességek jönnek létre különböző nyomás differenciák alkalmazásakor a mérés eredményeit, eltérését a DARCY féle egyenestől a 43.c. ábrán szemléltetjük. A kapilláris mérete $r = 0,183 \text{ mm} = 1,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ volt, ami a 40. ábra tanúsága szerint szerepel a porózus blokk pórusméretei között.

A linearitás jó közelítéssel a $\frac{1}{p_1^2} - \frac{1}{p_b^2} \approx 2$ értéktől valódi, ami megfelel $p = 0,7 \text{ bar}$ nyomáskülönbségnek a

$$(p_b + \Delta p)^2 - p_b^2 = 2 \quad \text{azaz} \quad (\Delta p)^2 + 2 p_b (\Delta p) - 2 = 0 \quad / 49 /$$

másodfoku egyenlet megoldásával. / A behelyettesítéseket CGS egységrendszerben végeztük és felhasználtuk : $1 \text{ D} = 9,899 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2$

Azt az esetet, amikor a pórusszegmensekben nincs jelen a tapadóvíz, amely leszűkítené az áramlás szempontjából határos kereszt-

metszetet az alábbi kísérlet-sorozat speciális esetének tekintettük. Kiindultunk az $S_w = 1$ teljesen telített pórusterű mintából, majd N_2 gázzal próbáltuk a vízfázist kisöpörni. Egyre nagyobb nyomáskülönbséget alkalmazva a minta bemeneti oldalán mértük a kimeneti oldalon a gázhozamot. A kimeneti oldal nyomását ebben az esetben is barometrikus nyomásúnak tekinthetjük, mivel az általunk kidolgozott hozammérési módszer azt tette lehetővé. A térfogatmérésre használt módszerünk az ún. "szappanhártyás" térfogatmérés volt. Egy tölcsér alakú, előzetesen kalibrált üvegedény falát megnedvesítve a szappanhártya elmozdulása mint egy meniszkusz alkalmas a t idő alatt, a mintán átáramlott gáz mennyiség rögzítésére. A mérés közben a tölcsér csőszerről végződésével lefelé rögzített. Az ide csatlakozó kis gumilabdacsban tárolt mosószeres folyadék alkalmas a hártaképzésre is és a tölcsérfal folyamatos nedvesítésre is. A regisztrálás intervallum $0,01$ mD-től darcy nagyságrendig terjed.

Kísérleteinknél közel 8 cm^3 térfogatu igen laza, várhatóan 1 darcynál nagyobb áteresztőképességű minták mellett század millidarcy / mD / áteresztőképességű mintákat is vizsgáltunk abból a szempontból mekkora nyomásértéknél állandósul a gáz áramlása. Fellép-e olyan stabilitás az áteresztőképesség értékében a porozitás makroszkópikus bevezetésénél tapasztaltunk.

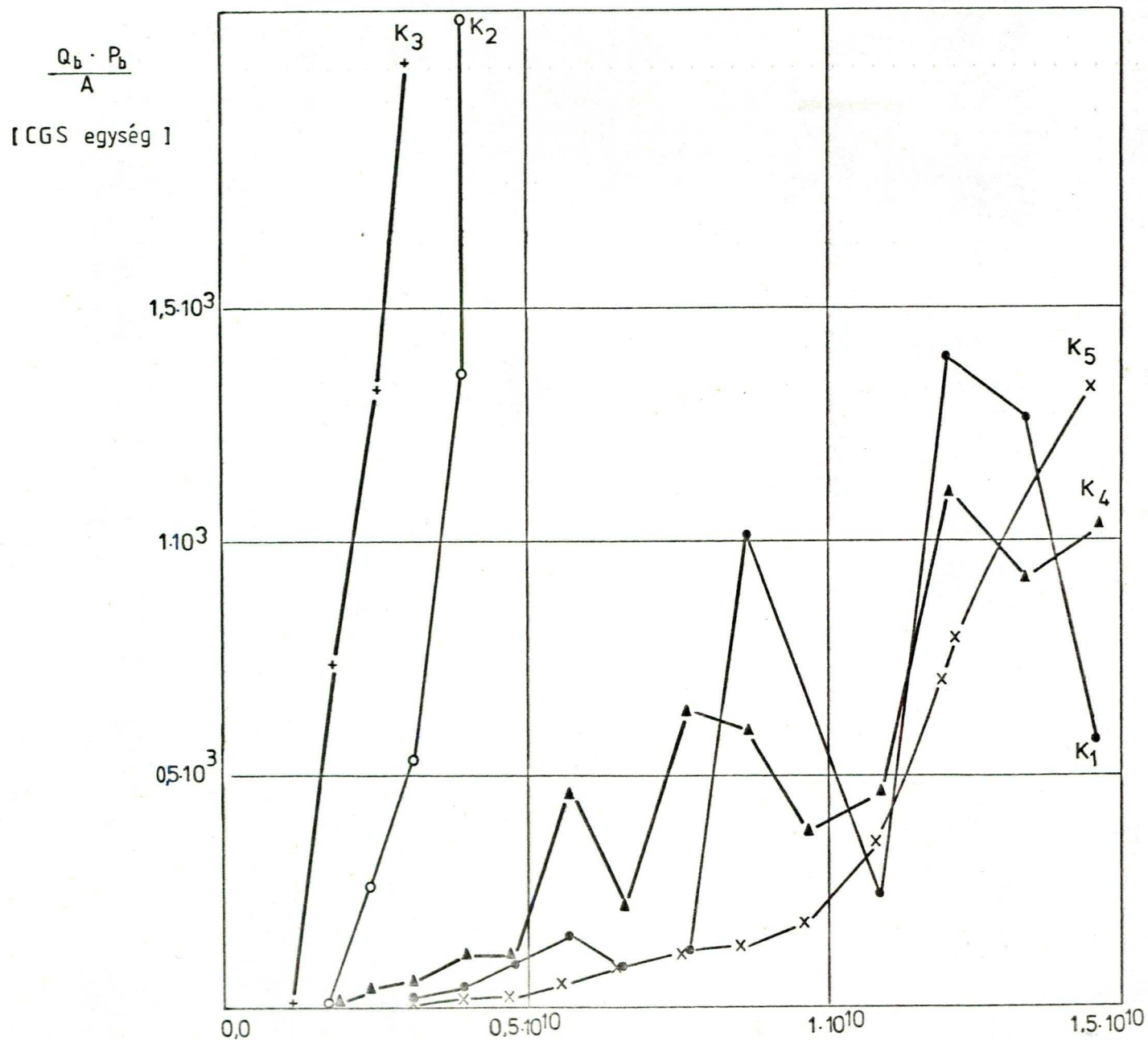
A kísérleti eredmények értelmezésénél a DARCY-törvény gázra vonatkozó alábbi alakját használtuk fel.

$$\frac{Q_b \cdot P_b}{A} = \frac{k}{\mu} \frac{(P_b + \Delta P)^2 - P_b^2}{2H} \quad / 50 /$$

ahol A a minta mérés irányra merőleges felülete, H a minta mérés irányu hossza, Q_b a barometrikus kimeneti oldali nyomáson átment gáz mennyisége μ a gáz viszkozitása.

$$\mu_{N_2}^{25^\circ} = 0,0183 \text{ mPa s}$$

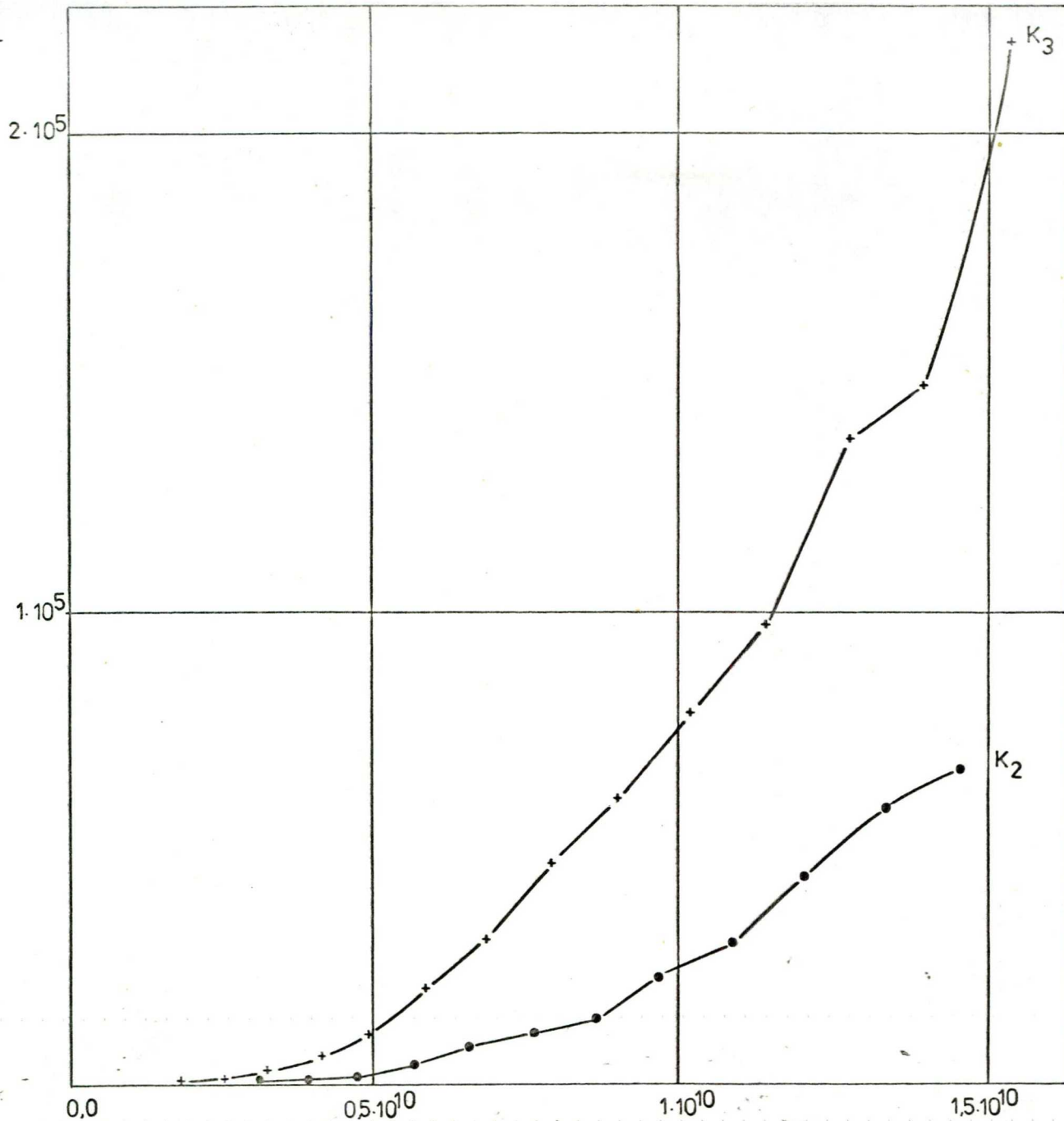
Alkalmas koordináta rendszer választásával az egyenlet ekvivalens egy



44. ábra

$$\frac{(P_b + \Delta p)^2 - P_b^2}{2H} \quad [\text{CGS egység}]$$

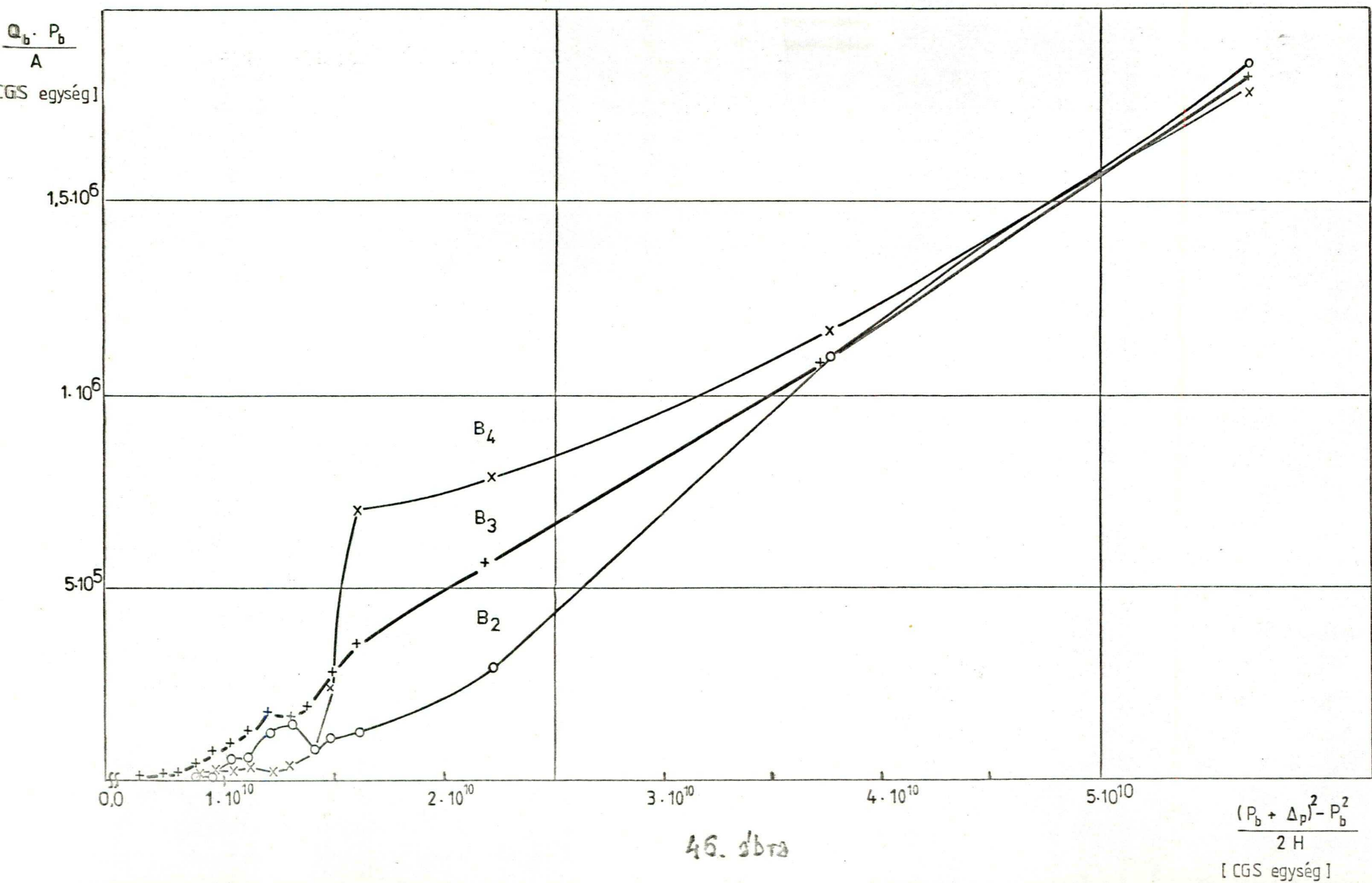
$\frac{Q_b \cdot P_b}{A}$
[CGS egység]

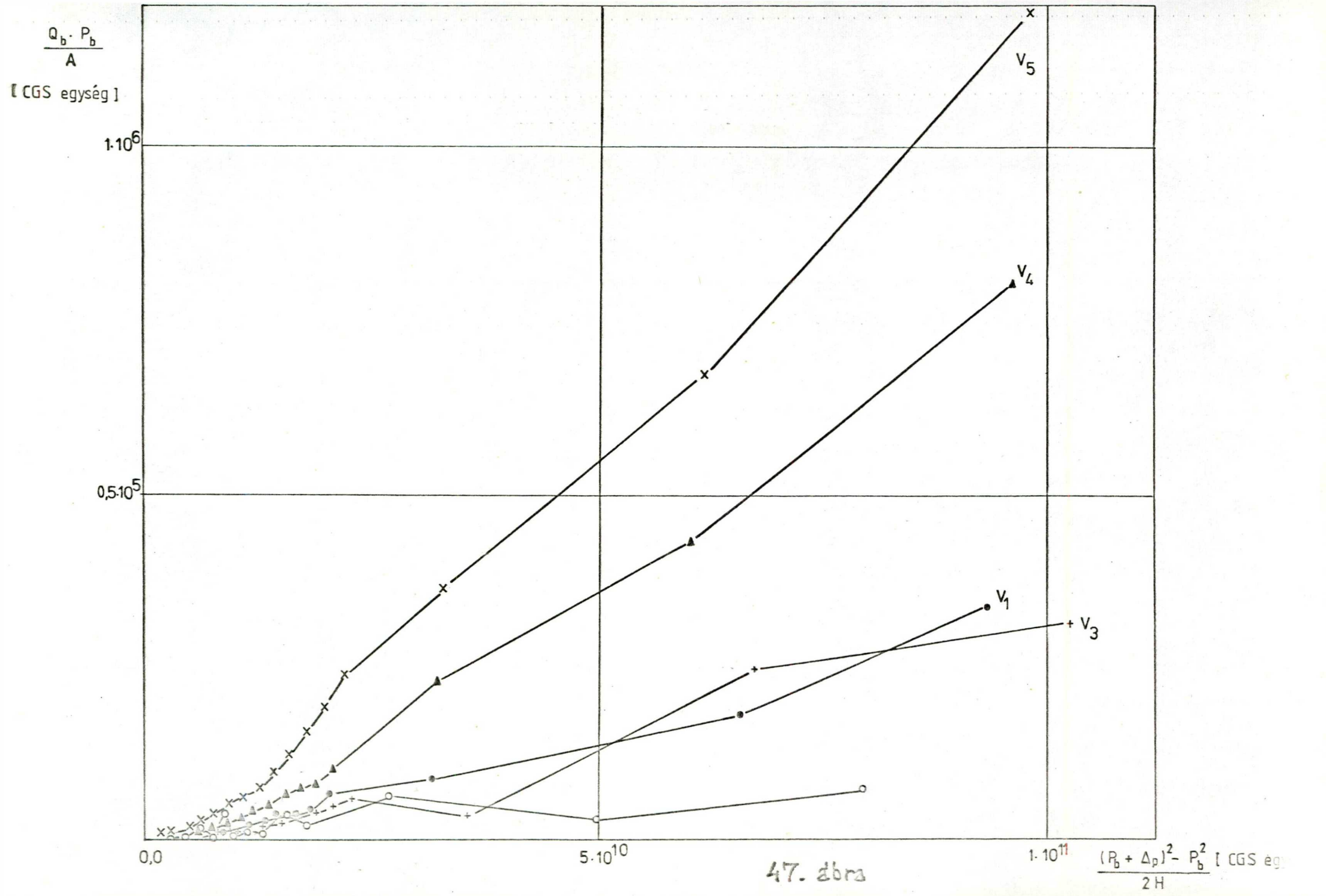


45. ábra

$\frac{(P_b + \Delta_p)^2 - P_b^2}{2H}$ [CGS egység]







$$\gamma = \mu x$$

/ 51 /

alaku egyenlet, amikor is az egyenes meredekségére igaz

$$\mu = \frac{k}{\mu} = \frac{k}{\mu}$$

/ 52 /

A 44 - 47. ábrák jól mutatják a 31. ábrán centrifugával is kimutatott mikroheterogenitás hatásokat a porózus blokk áteresztőképességében. A DARCY törvény linearitása csak :

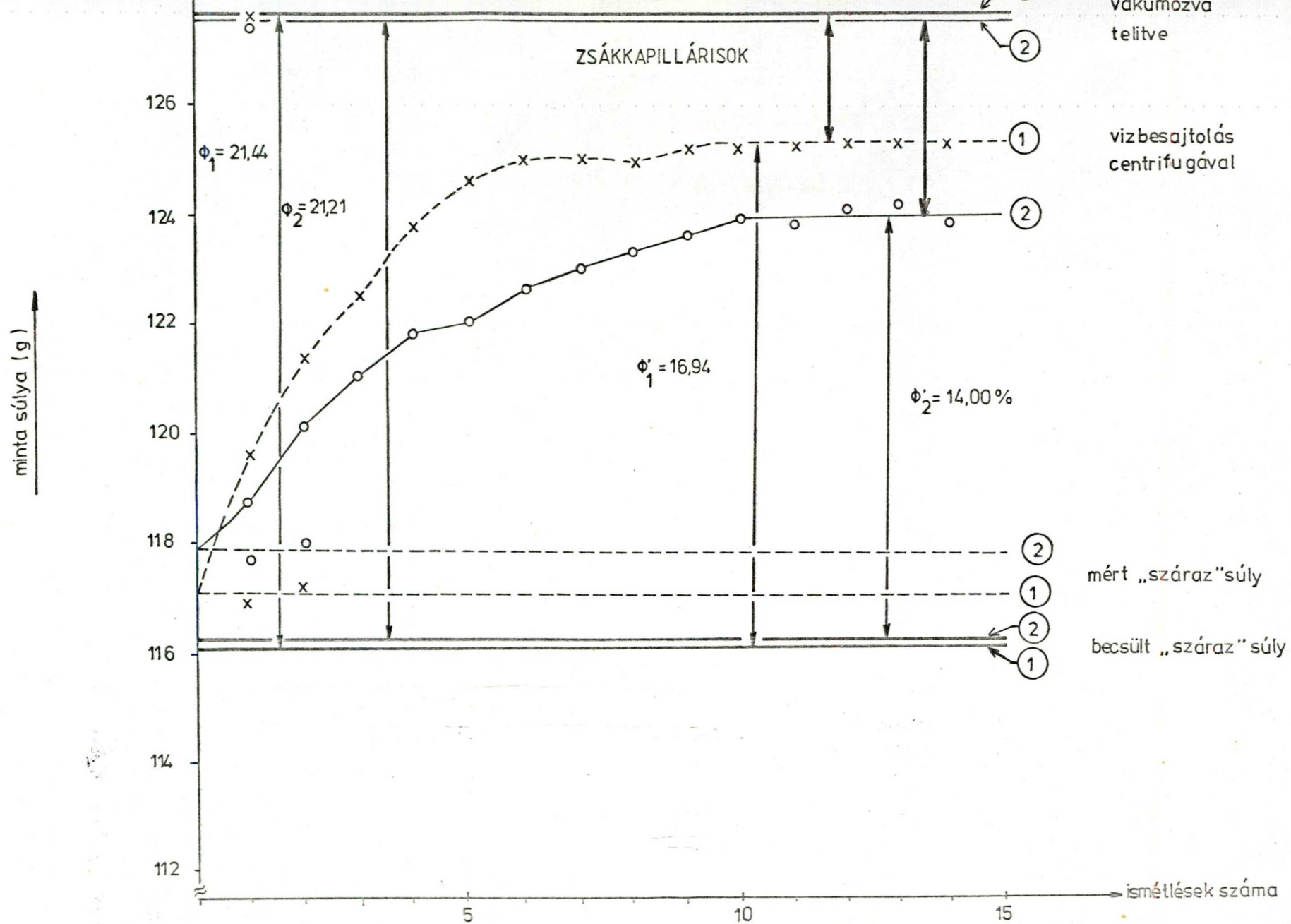
$$\frac{(P_b + \Delta P)^2 - P_b^2}{2H} > 2,5$$

/ 53 /

feltétel mellett teljesül. A minta pórusrendszerének heterogenitásától függően ennél kisebb értékek is adhatnak megbízható eredményt, ez egy felső korlát. Az áteresztőképesség stabilitása a 44. ábra K_4 jelű mintájánál még nem állt be, a középső szakasz $0,5 \cdot 10^{10} < x < 1 \cdot 10^{10}$ / értékelésével az áteresztőképesség 190 mD körüli érték.

Ugyanezen ábra K_2 és K_3 jelű görbéinek egy jóval tágabb intervallumú interpretációját adjuk a 45. ábrán kis ingadozásoktól eltekintve az áteresztőképesség már számolható a bemutatott módszerünkkel / K_3 mintánál mintegy 2,5 D értékű /.

Kimutattuk kísérletileg, hogy adott kísérleti körülmények között az áteresztőképesség állandósul. Az áramlási irányra nyitott póruscsatornák hol " eldugulnak ", hol ismét kapcsolódva vezetőképessé válnak. A porózus blokk anizotropitásának igazolására mutatjuk be a 48. ábrát, ahol szemléltetjük a vakuumozás után minden irányban telített minta porozitásának különbözőségét attól az esettől, amikor a 4 cm magas és átmérőjű henger alakú minta palástját lezárva telítjük azt. Nemcsak a porozitás számértékében, hanem az áteresztőképességben kefejezésre jutó póruskapcsolatokra is felhívja ez a tény a figyelmet / itt utalunk a 14.b ábra értelmezésénél mondottakra /



48. ábra

A 44 - 47 ábrák x tengelyének értékében szerepel a H mintahosszuság is, ami azt jelenti, hogy egy $H + H$ hosszúságú minta esetében a kísérlet körülményei megváltoznak, mivel más pórusláncolatok lesznek "nyitva" a bemeneti és a kimeneti oldal között.

A 47. ábra V_5 jelű mintáján jól nyomon követhető a póruskapcsolatok populációba rendeződése, amit a 32, 33 ábrákon már tapasztaltunk. Mivel a minta belsejében lévő póruskapcsolatok is mutatják ezt a jelenséget még inkább el kell vetni azt az álláspontot, miszerint a véghatásadszorber használatával általánosan kiküszöbölhető a nedvesítő fázis felhalmozódása a kimeneti oldal közelében.

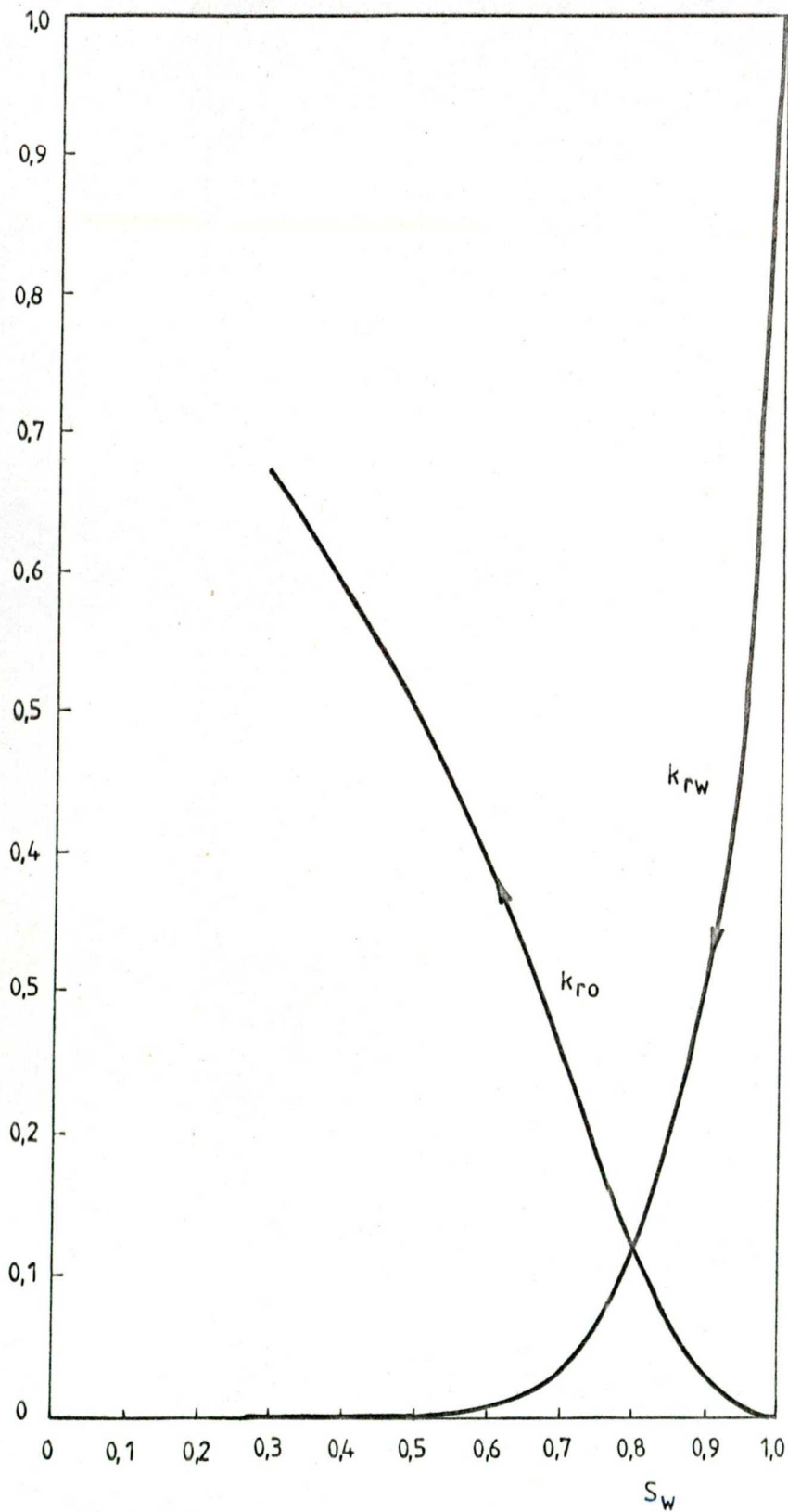
Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy az áteresztőképesség mérésekor létezik egy stabilizált, az áramlásba bevont pórusrendszer, de ez esetlegesen jön létre. Az áteresztőképességnél is jelentős szerepet játszanak a póruskapcsolatok populációba rendeződése. A lecsapolás irányára nézve stagnáló zsebek kísérleti kimutatása a 48. ábra alapján a maradék telítettség újfajta értelmezését adja.

2.3.2. Két nem elegyedő folyadék stabilizált áramlása a relatív áteresztőképesség fizikai tartalma

Az eddigi szemléletünkben valamelyik fázist nyugalomban lévőnek tekintettük. Az alábbiakban vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a pórussteret kitöltő mindkét fázis együttes áramlása lép fel. A minta bemeneti oldalán egymással nem elegyedő két folyadékot sajtolunk be az 1 és 2 jelű folyadékokat. A kimeneti oldalon mérve a fázisonkénti hozamokat, a k_1 és k_2 áteresztőképességeket a DARCY-törvény általánosításával kapjuk:

$$Q_1 = \frac{k_1 \cdot A}{\mu_1} \cdot \frac{\Delta P_1}{H}$$

$$Q_2 = \frac{k_2 \cdot A}{\mu_2} \cdot \frac{\Delta P_2}{H}$$



$$S_{wirr} = 0,29$$

$$\phi = 0,1476$$

$$V_p = 9,8146 \text{ cm}^3$$

$$\mu_w = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_o = 2,073 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$k = 7,26 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$$

$$d = 3,90 \text{ cm}$$

$$L = 5,555 \text{ cm}$$

$$\mu_{N_2} = 0,017 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

, ahol a ΔP_1 ill. ΔP_2 nyomáscsökkenés az 1-es ill. 2-es folyadékban, H pedig a nyomásmérések közötti távolság; μ_1 és μ_2 a két folyadék viszkozitása.

Definiálva a relatív áteresztőképességet a következő egyenletekkel

$$k_{r,1} = \frac{k_1}{k} \quad \text{ill.} \quad k_{rw} = \frac{k_w}{k} \quad / 55 /$$

$$k_{r,2} = \frac{k_2}{k} \quad \text{ill.} \quad k_{ro} = \frac{k_o}{k} \quad / 56 /$$

, amelyekbe k_1 és k_2 az effektív áteresztőképességeket jelöli.

A fenti egyenletek felhasználásával megszerkesztettük a két fázisra / olaj és víz / az áteresztőképesség változását a vízfázis telítettségének függvényében. A minta pórustere a kísérlet kezdetén vízzel teljesen telített volt, amiből számolhattuk az abszolút folyadékos áteresztőképességet; $k = 7,26 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Fokozatosan növeltük a beszajtott olaj mennyiségét, így a vízre vonatkozó áteresztőképesség csökkent, hiszen a pórustér egy részét az olaj foglalta el. Az $S_{lm} = 0,29$ értéknél a vízfázis mozgása megszűnt és csak olajfázist kaptunk a kimeneti oldalon. A 49. ábra szemlélteti, hogy valamely telítettséghez tartozó relatív áteresztőképességek összege kisebb mint egység, amit a zsákkapillárisok jelenlétével magyarázhatunk.

Vizsgáljuk most meg ugyanazon mintatérfogat kapilláris nyomásgörbéjéből és relatív áteresztőképességének méréséből kapott eredményeket. Az 50. ábrán közel azonos porozitású, minták mérésének eredményeit ábrázoltuk azonos telítettség-tengelyen. A közel azonos porozitás ellenére jelentős a két fázis együttlámlásának különbsége. Az a. görbén mintegy 17 - 45 % víztelítettség intervallumban jellemző a közös fázismozgás, ugyanakkor a b. ábra tanúsága szerint a másik mintánál 40-65 % ez az intervallum.

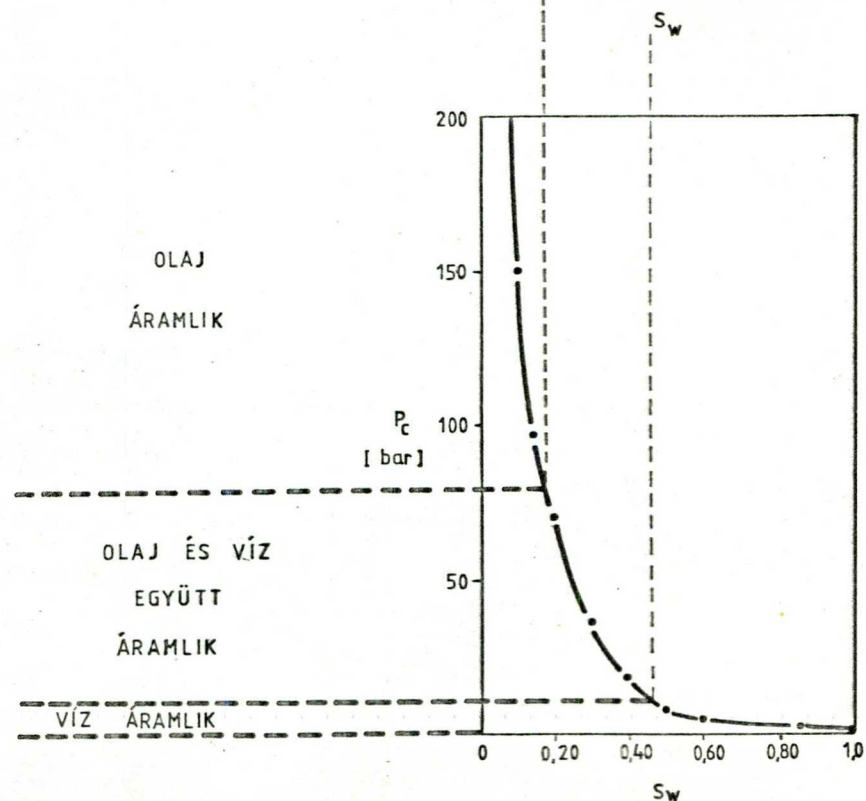
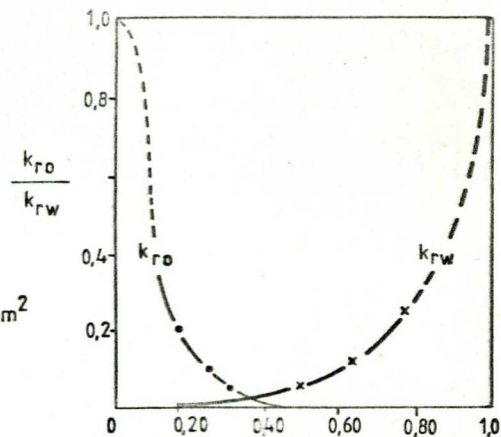


$$S_w^{irr} = 0,168$$

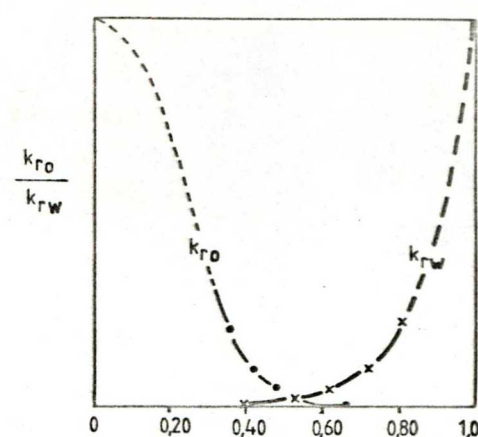
$$S_o^m = 0,45$$

$$\phi = 27,4 \%$$

$$k = 37,4 \cdot 10^{-3} \mu m^2$$



VÍZ - TELÍTETTSÉG A
PÓRUSTÉRFOGATBAN

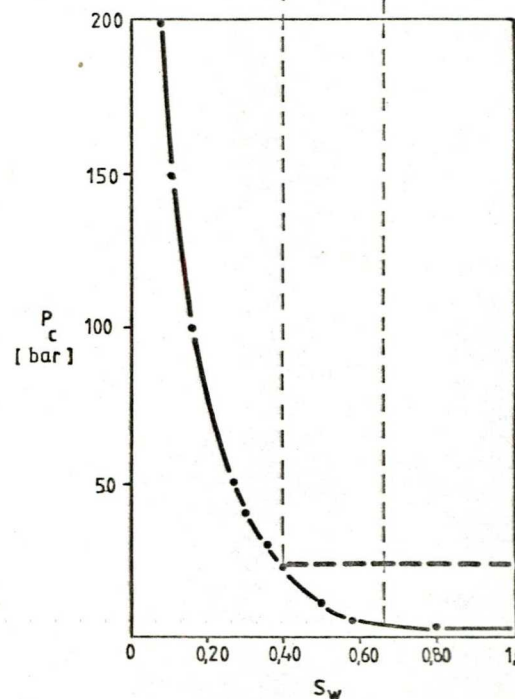


$$S_w^{irr} = 0,40$$

$$S_o^m = 0,65$$

$$\phi = 32,9 \%$$

$$k = 46,8 \cdot 10^{-3} \mu m^2$$



VÍZ - TELÍTETTSÉG A
PÓRUSTÉRFOGATBAN

50. ábra

Ebből az is következik, hogy a kapilláris nyomásgörbét csak pórusméret eloszlás megadására szabad felhasználni, a fázisok mozgására nem következtethetünk, mivel annak értéke függ azok fizikai tulajdonságaitól a pórustér geometriáján túlmenően.

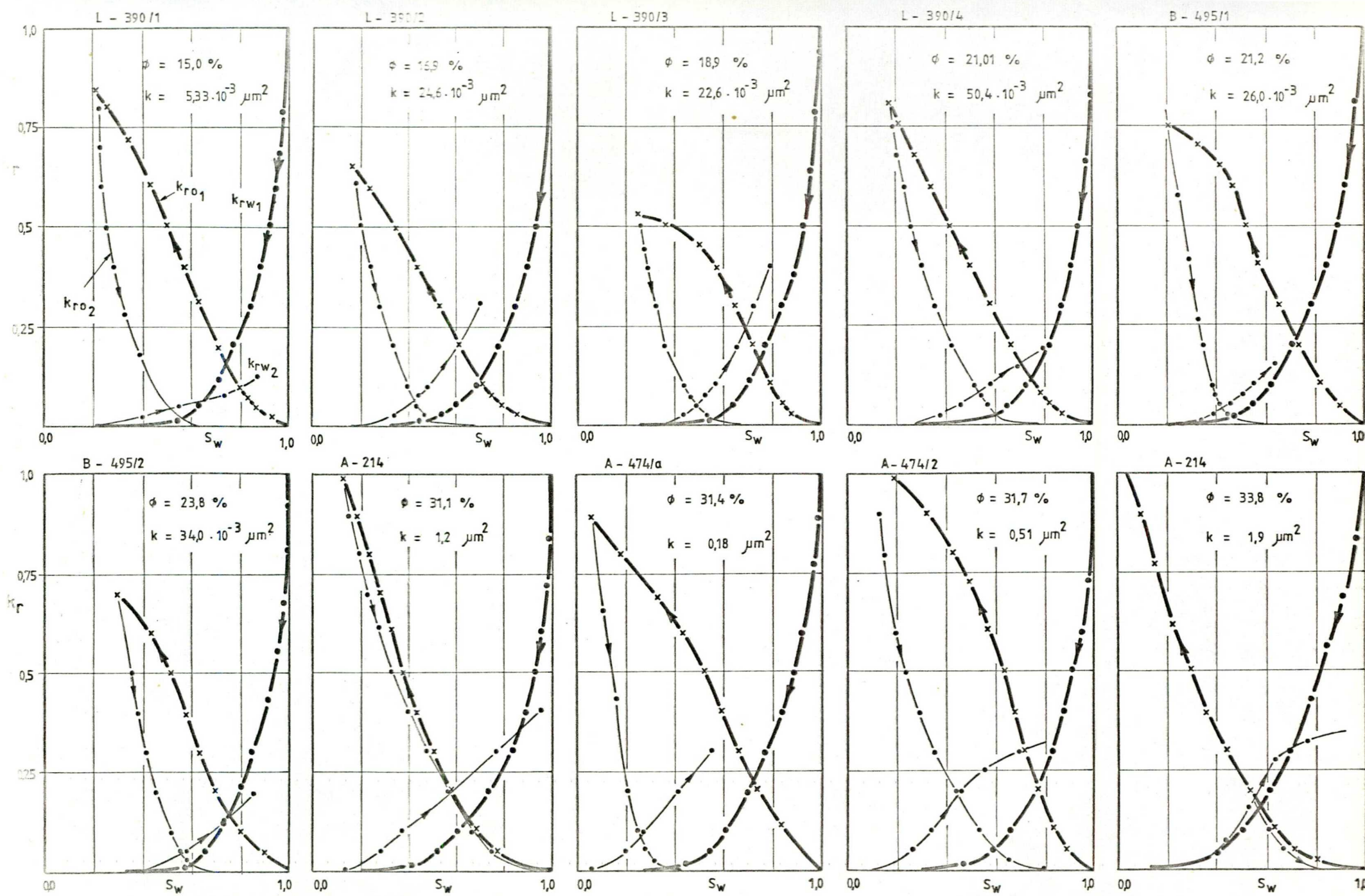
2.3.2.1. A relatív áteresztőképesség hiszterézise

Megvizsgáltuk különböző pórusfelépítettségű homokkövekben azt a jelenséget, hogy a relatív áteresztőképességnek milyen eltolódását eredményezi a hiszterézis jelensége.

A mérési eredményeket un. kiszorítási vizsgálattal kaptuk 5 cm átmérőjű és 4 cm magasságú hengeres mintákon, amelyek vízszintes elhelyezkedésűeknek tekinthetők a rétegben. A mérést olyan Δp állandó nyomáskülönbségen végeztük, amelynél a kapilláris nyomásgradiens hatása a kapilláris kiszorításra már elhanyagolható és ezen feltétel mellett elhanyagolható a véghatás is. Meghatározva a kiszorító fluidum és a kiszorított fluidum besajtolási és kinyerési mennyiségeit a számítást a LEVERETT, BUCKLEY-LEVERETT valamint a WELGE által kifejtett egyenletek segítségével végeztük el.

Az 51. ábrán 10 mérés kiértékelt eredményét mutatjuk be, amelyből néhány alapvető következtetést vonhatunk le. Az idézett ábrán balról jobbra haladva növekvő porozitás szerint ábrázoltuk a relatív áteresztőképesség görbéit átfogva azt a porozitás intervallumot, mely a tárolókban jellemző $15\% < \phi < 35\%$. Megállapítható, hogy kauzális összefüggés nem létezik a porozitás és áteresztőképesség között az eddig elmondott pórusgeometriai következtetéseinkkel összhangban.

A heterogén pórustérben felépülő, fázisponkénti áramlás két ciklusát vonalvastagsággal különböztettük meg - az első ciklust vastag vonallal jelöltük. Mindegyik mintára megállapítható az, hogy



a második ciklus az elsőből balra azaz a kisebb víztelítettség tartományában helyezkedik el. Az eltolódás méretéke nem a porozitáshoz kapcsolható, hanem a pórusméret eloszláshoz vagy a differenciális porozitáshoz.

A folyamat első szakaszában a pórustér teljesen telített vízzel. Ahogy nő az olaj mennyisége, úgy terjeszkedik a víz rovására a pórustérben, mintegy beszorítva a vizet a pórusszegmensekbe. A porozitástól függetlenül a pórustér 20-30 %-os telítettségéig szorul vissza a víz mennyisége. Ujra növelve a víz besajtott mennyiségét, jelentősebb a vízfázis mozgásának felépülése, azaz a $k_{r,w2}$ görbe a $k_{r,w1}$ görbe felett helyezkedik el, de több esetben metszi azt méréseink szerint. Megállapítható az is, hogy ez a metszéspont k_r egyre kisebb értéknél következik be, ahogy csökken a porozitás. Ez azt jelenti, hogy gyorsabban épül fel a vízre vonatkozó áramlás és ez stabilizálódik is, azaz egy darabig könnyen kisöpri a póruszűkületeken keresztül a pórus öblösödésekből az olajat, viszont egy idő után állandósul a szivárgás. A víz körülszivárogya az olajcseppet a pórusokban, nem ragadja magával. Ez az érték porozitástól függetlenül $S_o = 30\%$ érték körüli. 30 % fölötti porozitásnál a ciklusban jól látható a kiegyenlítődés mivel a növekvő víztelítettség ág kezd vízszintessé válni. Megjegyezzük, hogy ez a telítettség érték csak a kísérlet körülményeiből adódó szivárgási sebességre jellemző. Megállítva a folyamatot majd újra beindítva más egyensúlyi telítettséget kapunk.

Összefoglalva:

- A Darcy-összefüggés állandójának szétválasztásával definiált k áteresztőképességre - laboratóriumi körülmények között - hasonló stabilitás érvényes mint a porozításra.
- az áteresztőképesség a minta bemeneti és kimeneti oldala közötti póruskapcsolatot reprezentálja. A szivárgás felépülése esetleges; más pórusláncolatok vonhatók be a szivárgásba a ún. "steady state" állapot megszüntetésével.

- kísérletileg kimutattuk, hogy két, nem elegyedő fázis, adott nyomáskülönbségen képes a saját szivárgási csatornáit kialakítani, ami elsősorban az η eloszlás függvénye. A porozitás növekedésével nem nő szükségszerűen az átteresztőképesség értéke, amit elsősorban a stagnáló zsebek jelenlétével magyarázhatunk.
- az áramlásban részt nem vevő - de a porozításban kimérhető zsákkapillárisok szerepe nyilvánul meg abban, hogy azonos telítettséghez tartozó relatív átteresztőképesség értékek összege kisebb az egynőlemnél. Ez egyben azt is jelzi, hogy a fázisok egymás rovására szűkítik az átteresztőképességben realizálható keresztmetszetet.
- kísérletileg igazoltuk azt a dimenzióanalízis módszerével kapott következtetést, miszerint a relatív átteresztőképesség elsősorban a pórusfelépítettség függvénye
- ugyanazon mintatérfogat kapilláris nyomásgörbéje és relatív átteresztőképessége közötti kapcsolatot vizsgáltuk, és kaptuk, hogy a porózus blokkban "a priori" létező pórusméreteloszlás fel tárható, de csak ennek felhasználása a maradék telítettség becslésében helytelen, helyes következtetésekre a pórusfel-tárás és a relatív görbe együttes értelmezése vezet.

3. TRANSZPORTEFOLYAMATOK N A G Y K I T E R J E D É S Ű K Ö Z E G B E N

3.1. E szemlélet jelentősége

Az előző fejezetben láttuk, hogy két nem elegyedő folyadék porózus közegbeli mozgását a makroszkópikus szemléletben a relatív áteresztőképesség egyenleteivel tárgyalhatjuk. Ezek az egyenletek a Darcy-törvény általánosításának foghatók fel.

A valóságban adott egy ismert geometriájú tároló. Szükséges a fázisok eloszlásának, mennyiségének ismerete a termelés megindításakor. Kérdés az, hogy a laboratóriumi mérésekkel megismert makroszkópikus közelítés mennyiben használható a fenti probléma megoldásánál, hogyan építhető fel egy tároló pórusmorfológiája, hogyan általánosíthatók a makroszkópikus közelítés mennyiségei.

Két fázis együttes jelenléte a pórusokban számos problémát vet fel, kezdve a fázisok térbeli és magában a pórusban eloszlásától. Figyelembe véve a felületek nedvesíthetőségét ez meghatározó, de fel kell vetni a nedvesítés időbeli stabilitásának problémáját. Ha a változás olyan lassu, hogy nem jelentős a leművelés időtartama mellett, akkor elhanyagolható a változás ténye, viszont befolyásolhatja a fázisok eloszlását a telítettség változásának történetében.

A fázisok mozgásánál a nagykiterjedésű közeg méretében tanulmányozni kell az együttlét módját a tér egy adott tartományában és azok termodinamikai kapcsolatát biztos, hogy az adott gáz kiterjedésénem hagyható figyelmen kívül a tároló energetikai, áramlási viszonyainak vizsgálatánál. Ugyan akkor a porózus közeg heterogenitása lehetővé teszi a besajtott gáz elkülönült áramlását. Az első esetben az áramlás együtt értelmezhető a és folyadék fázisra -fizikailag egy megváltozott paraméterű folyadék áramlását jelenti - a második esetben két, egyfázisú áramlás játszódik le a porózus közegben.

Amíg a relatív áteresztőképesség fogalma alkalmas a porózus blokk méretében lejátszódó, többfázisú áramlás tárgyalá-

sára, addig a rétegméretű áramlásokra még nem rendelkezünk fizikailag is megalapozott egyenletekkel.

A felületi feszültség és a kapilláris erő fogalmának általánosítása sem egyértelmű az áramlás alatt. A folyadék viszkozitása is egy viszonylagos "csuszást" eredményez és az áramlás alatt az általa keltett surlódás visszahat a nyomásvesztésre.

A relatív áteresztőképességet úgy kell tekinteni, mint a rétegméretű áramlások, laboratóriumi méretekben, kísérletileg vizsgálható közelítését.

A fenti problémákhoz kapcsolódik még az a tény, hogy a porózus közeggel kitöltött tér nem izotrop. Az általános egyenleteket különböző formákban írhatjuk fel, amelyekkel vizsgálhatjuk az áramlás tulajdonságait. Az alábbiakban az egydimenziós elmozdulás egyenletén keresztül mutatjuk be a két, nem elegyedő fluidum együttáramlásában szerepet játszó tényezőket. Bemutatjuk az egyenlet egy speciális megoldásának kapcsolatát a kísérleti eredményekkel.

3.2. Két, nem elegyedő folyadék egydimenziós áramlási egyenletének diszkussziója

Tekintsünk egy hengeres, függőleges OX tengelyű porózus testet. Legyen az áramlás iránya párhuzamos az OX tengellyel és az erre merőleges metszetekben a telítettség identikus. A test egyik végén az 1 és 2 fázist állandó hozammal sajtoljuk be.

Feltesszük, hogy a két folyadék összenyomhatatlan és viszkozitásuk állandó. A kapilláris hatást tartalmazó egyenlet a $P_2 - P_1 = p_c / S_1$ alakú, ami a kísérletileg is igazolt összefüggés a kapilláris erő és telítettség között. A problémát C.M. MARLE nyomán tárgyaljuk.

Az egyes fázisokra vonatkozó áramlási egyenletek, amelyeket a DARCY-törvény általánosításaként, a relatív áteresztőképesség fogalmának bevezetésével kaptunk az alábbiak:



$$u_1 = - \frac{k k_{r1}}{\mu_1} \left(\frac{\partial p_1}{\partial x} - \rho_1 \cdot g \right)$$

$$u_2 = - \frac{k k_{r2}}{\mu_2} \left(\frac{\partial p_2}{\partial x} - \rho_2 \cdot g \right)$$

/ 57 /

A fenti egyenleteken túl érvényesek a következő egyenletek :

$$S_1 + S_2 = 1$$

/ 58 /

azaz a porustérben csak ez a két fázis van jelen, továbbá

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \phi \frac{\partial S_1}{\partial t} = 0$$

/ 59 /

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} + \phi \frac{\partial S_2}{\partial t} = 0$$

ahol u_1 és u_2 a szűrődési sebesség skalár mennyiségei;
a k_{r1} és k_{r2} a relatív permeabilitás értékei, amelyek- kísér-
leti tapasztalataink szerint - az S_1 telítettség jól meghatározott
függvénye.

Uj változók bevezetésével

$$u = u_1 + u_2 \quad ; \quad f_1 = \frac{u_1}{u} \quad ; \quad f_2 = \frac{u_2}{u} = 1 - f_1 \quad / 60 /$$

valamint

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = \rho_1 \cdot g - \frac{\mu_1 \cdot f_1 \cdot u}{k k_{r1}}$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial x} = \rho_2 \cdot g - \frac{\mu_2 (1 - f_1) u}{k k_{r2}}$$

/ 61 /

felhasználásával

$$f_1 = \frac{\frac{\mu_2}{k_{r2}} + \frac{k (\rho_1 - \rho_2) g}{u}}{\frac{\mu_1}{k_{r1}} + \frac{\mu_2}{k_{r2}}} + \frac{k}{u} \frac{1}{\frac{\mu_1}{k_{r1}} + \frac{\mu_2}{k_{r2}}} \cdot \frac{\partial p_c}{\partial x} \quad / 62 /$$

amelyet φ_1 és γ_1 mennyiségek bevezetésével az alábbi

$$\varphi_1 = \frac{\frac{\mu_2}{k_{r2}} + \frac{k(p_1 - p_2)q}{u}}{\frac{\mu_1}{k_{r1}} + \frac{\mu_2}{k_{r2}}}$$

/ 63 /

$$\gamma_1 = \frac{k}{u} \cdot \frac{1}{\frac{\mu_1}{k_{r1}} + \frac{\mu_2}{k_{r2}}} \cdot \frac{dP_c}{dS_1}$$

áttekinthető alakot nyerjük

$$f_1 = \varphi_1 + \gamma_1 \cdot \frac{\partial S_1}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\frac{u}{\phi} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial S_1}{\partial t} = 0$$

/ 64 /

vagy az utolsó egyenlet bővebben írva:

$$\frac{u}{\phi} \left[\frac{d\varphi_1}{dS_1} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_1 \cdot \frac{\partial S_1}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial S_1}{\partial t} = 0$$

, amelyekből a $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ egyenlet mutatja, hogy u egy állandó mennyiség, amely nem függ sem x -től sem t -től. Továbbá látható az is, hogy a bevezetett f_1 kifejezés $f_1 = f_1 / k_{r1} / S_1 //$ a relatív átbocsátóképesség értékén keresztül csak az S_1 telítettség függvénye.

Tehát

$$\frac{u}{\phi} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial S_1} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial x} + \frac{\partial S_1}{\partial t} = 0$$

/ 65 /

egyenlet egy elsőrendű, nem lineáris, parciális differenciál egyenlete S_1 telítettségnek.

A minta hosszában létrejövő telítettség eloszlást a 28. ábrán már szemléltettük. Legyen w az S_1 telítettségű metszet előrehaladásának sebessége, ekkor

$$\frac{\partial S_1}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial S_1}{\partial t} dt = 0 \quad / 66 /$$

A $w = \frac{dx}{dt}$ felhasználásával a /66/ egyenlet az alábbi:

$$w \cdot \frac{\partial S_1}{\partial x} + \frac{\partial S_1}{\partial t} = 0 \quad / 67 /$$

, amelyet /65/ egyenlettel összevetve kapjuk azt az alapvető eredményt, hogy

$$w = \frac{u}{\phi} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial S_1} \quad / 68 /$$

Látható tehát, hogy a w előrehaladási sebesség csak az S_1 telítettség függvénye. A telítettséget, eddigi kísérleti tapasztalataink alapján a pórusláncolatok felépítése, az $r_{\min}$ és $r_{\max}$ közötti eltérés mértéke erősen befolyásolja. Minél heterogénebb a porózus anyagban lévő pórusok eloszlása annál jelentősebb a kapilláris hatások szerepe, annál széttagoltabbá válik a különböző telítettségű zónák sebessége. Ezt a jelenséget "ujjasodásnak" nevezzük.

3.2.1. Kapilláris hatások a porózus közegben

A levezetés részletezése nélkül megadjuk C.M MARLE nyomán az 1-es fázisra vonatkozó áramlását leíró alapegyenletet.

$$\frac{u}{\phi} \left[\left(\frac{dF_1}{dS_1} + \Gamma \frac{dG_1}{dS_1} \right) \frac{\partial S_1}{\partial x} + \sum \frac{\partial \left(H_1(S_1) \frac{\partial S_1}{\partial x} \right)}{\partial x} \right] + \frac{\partial S_1}{\partial t} = 0 \quad / 69 /$$

ahol

$$F_1(S_1) = \frac{1}{1 + \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{k_{r2}}{k_{r1}}} \quad / 70 /$$

$$G_1(S_1) = k_{r2} \cdot F_1(S_1)$$

$$H_1(S_1) = \frac{d(\pi(S_1))}{dS_1} \cdot G_1(S_1)$$

Megjegyezzük F_1 , G_1 és H_1 az S_1 telítettség dimenzió nélküli függvénye, míg a

$$\Gamma = \frac{k(\rho_1 - \rho_2)g}{\mu_2 \cdot u_1} \quad / 71 /$$

egy dimenzió nélküli mennyiség, mely a nehézségi és a viszkozitási erők relatív súlyát jellemzi. A $\Gamma = 0$ feltétel azt jelenti, hogy a nehézségi erő elhanyagolható.

$$\Sigma = \frac{k \sigma}{\mu_2 \cdot u_1 \cdot l}$$

/ 72 /

$$\frac{m^2 \cdot \frac{N}{m}}{\rho_a \cdot s \cdot \frac{m}{s} \cdot m} = \frac{m^2 \cdot N}{m} : \frac{\frac{N}{m^2} \cdot s \cdot \frac{m}{s} \cdot m}{1} = \frac{m^2 \cdot N}{m \cdot N} = m$$

kifejezi, hogy Σ nem dimenzió nélküli, dimenziója: hosszúság.

fizikai tartalmában a kapilláris erő relatív fontosságát adja a viszkozus erőkhez.

3.2.1.1. A véghatás-effektus általánosítása

Tekintsük most azt az esetet, amikor a nedvesítő 2-es fázist /víz/ a nem nedvesítő 1-es fázissal /levegő/ szorítjuk ki. Ekkor a kilépési felület közelében a porózus közeg visszatartja a nedvesítő fázist, így annak felhalmozódása figyelhető meg a minta alapján.

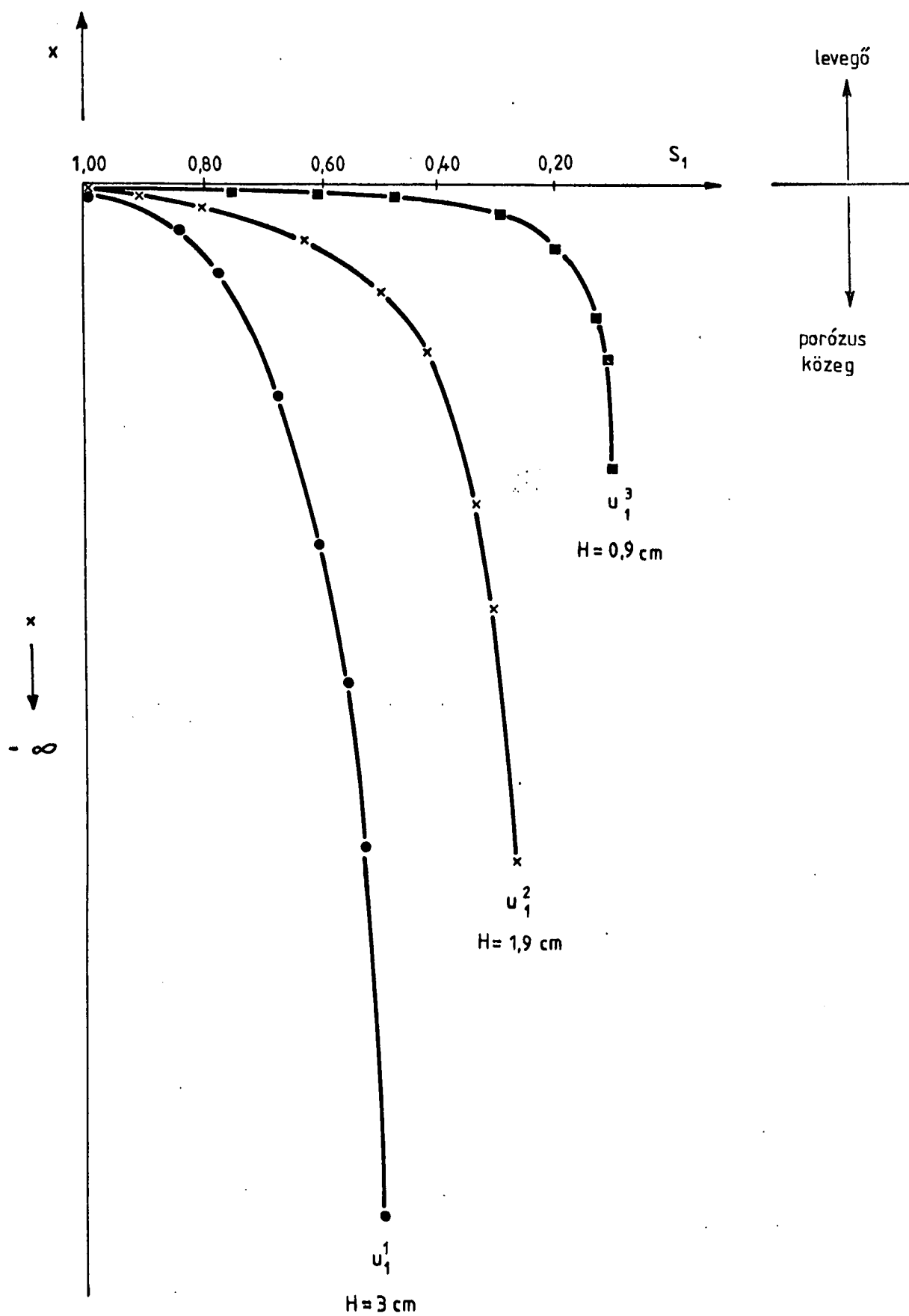
A minta hosszában kialakult és állandósult telítettségű profilt az alapegyenlet segítségével számolhatjuk ki, amely ebben az esetben a következőre redukálódik:

$$\frac{d}{dx} \left[F_1 + \Gamma G_1 + \Sigma H_1 \frac{ds_1}{dx} \right] = 0 \quad / 73 /$$

Az egyenlet első integrálja:

$$F_1(s_1) + \Gamma G_1(s_1) + \Sigma H_1 \cdot \frac{ds_1}{dx} = 1 \quad / 74 /$$

, ahol az integrációs állandó $f_1 = \frac{u_1}{u} = \frac{u_1}{u_1 + 0} = 1$



52. ábra

Az egyenlet integrálásával kapjuk $\int_0^x (\bar{F}_1 + \Gamma G_1 - 1) dx = - \int_0^{s_1} \Sigma H_1 ds_1$

$$x = - \int_0^{s_1} \frac{\Sigma H_1(s_1)}{\bar{F}_1(s_1) + \Gamma G_1(s_1) - 1} ds_1 \quad / 75 /$$

, amiből $x \rightarrow -\infty$ -nél $s_1 \rightarrow s_{1M}$ értékhez.

Az elméleti eredmény kapcsolatát a kísérleti tapasztalatokkal vizsgáltuk és azt tapasztaltuk, hogy azoknál a mintáknál, mely k porustere nem erősen heterogén az elméleti megoldással jó egyezést kapunk. A telítettségi profil alakját az 52. ábra mutatja. Három különböző hosszúságú minta lecsapolását mutatjuk be, amelyet az azonos ülepedési körülményekből adódó azonos póruméret-eloszlás fenntartása érdekében egy $H = 3$ cm hosszúságú minta fokozatos darabolásával valósítottunk meg.

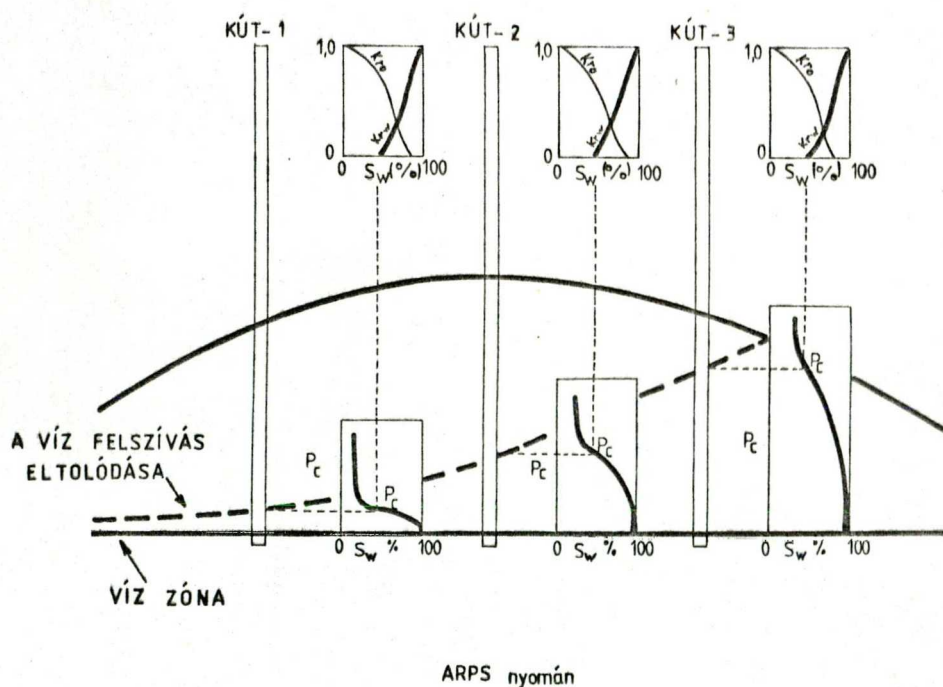
A kialakult telítettségi profil függvénye az u értéknek azaz ha u nagy, akkor a visszatartott nedvesítő fázis mennyisége kisebb. Az u szivárgási sebesség növelését kísérletileg a minta lecsapolás irányu hosszának rövidítésével valósítottuk meg, csökkentve ezzel a retardáltságot. Mivel u tartalmazza $\frac{\partial p}{\partial x}$ értéket, ami a bemeneti és kimeneti oldal közötti nyomásradiens, a $\frac{\Delta p}{L}$ értéke nő, ha L csökken. Az u mennyisége viszont $\frac{\Delta p}{L}$ értékével egyenes arányban változik.

Megjegyezzük, hogy a minta belépési felületénél is van egy bizonyos véghatás, mely függvénye a két fázis besajtolási módjának. A két fázis nem szükségképp egyenletesen oszlik meg a belépési felület közelében. A kiszorítás csak egy bizonyos távolság után - ami a porus heterogenitás függvénye - tekinthető valóban egydimenziósnak.

3.2.1.2. A kapilláris erő és a tároló heterogenitásának kapcsolata

Az eddigi tapasztalataink szerint a pórusok egymásba kapcsoló-

dása, a pórusméreteloszlás jelentős befolyással van a fázisok eloszlására a porózus blokkban. Joggal tételezhetjük fel, hogy a fluidumok eloszlása a tárolóban a pórusméret, a pórusfelépitettség függvénye. Az 53. ábrán azt kívánjuk szemléltetni, milyen eltolódást jelent a kapilláris nyomásgörbék alakjának megváltozása a vízfelszívás mértékének megváltozása a szabad vízfelszínhez képest.



53. ábra

KÖVETKEZTETÉSEK, TÉZISEK

A szénhidrogénbányászat jelenlegi fázisában igen fontos az egyre nagyobb kihozatal, fokozatosan előtérbe kerülnek a másodlagos, harmadlagos leművelések; az alkalmas kőzeteket újra-tárolásra használják fel. Így különös jelentősége van a porózus kőzetmátrixban lezajló folyamatok ismeretének, a folyamatot hordozó fizikai mennyiségek ismeretének, a laboratóriumi mérések korlátainak - lehetőségeinek egyre pontosabb megismerésének.

A dolgozat csak az ún. "elsődleges" vagy szemcséközi porozitású rendszerek viselkedésével foglalkozik, elsősorban a viznedves homokkővek reális hatásainak értelmezését érinti.

Alapfelfogásunk a kőzetről a következő: a leülepedés során egymással érintkező kőzetszemcsék az egyre mélyebbre temetődés során cementálódnak egymással, minek következtében kialakul az egymással összeköttetésben lévő pórusok / pórusláncolatok / hálózata. A laboratóriumi vizsgálatok jelentősége abban van, ha létezik az egyes paraméterek meghatározásához szükséges és elegendő mintatérfogat alpadatokat szolgáltat a folyamatosan új igényekkel rendelkező ipari gyakorlat számára.

A kőzetszemcsék között létrejövő pórustér fizikai jellemzéséhez modellekre van szükségünk, akár mennyiségi akár minőségi következtetések levonására törekszünk. A reprezentatív mintatérfogat elegendő számú pórust illetve annak véletlenszerűen felépülő láncolatát tartalmazza ahhoz, hogy a szénhidrogén-termelés szempontjából fontos mennyiségek laboratóriumi mérése lehetővé váljon. Következtetéseinket először a pórusra vonatkozóan adjuk meg, majd elemezzük a porózus blokk reális hatásait és ezek szerepét a rezervár értelmezésében.

1. A valódi pórusokban bekövetkező egyensúlyok és mozgások leírására modelleket alkalmaztunk. A valóság közelítéseiből is kitűnt az a tény, hogy a folyadék mozgása erősen függött a modell geometriájától.



2. Bemutattuk az "öblös csőmodell"-t, amellyel a hiszterézis jelensége tanulmányozható. Megállapítottuk, hogy a pórus méretében lejátszódó folyamatokat a kapilláris erők befolyásolják alapvetően.
3. Továbbfejlesztve PICKELL modelljét és kísérleti eredményeit megállapítottuk, hogy a póruszűkület alapvetően befolyásolja a nem nedvesítő fázis elmozdulását, valamint adott szűkület után azzal rányos méretű kiöblösödés következik a pórusok láncolatában, annak mintegy 4-6 szorosa.
4. A szabálytalan pórusláncolatban a periódicitást mindenképp fel kell tételezni, a front előrehaladására merőleges szűkületek kör alakú profilt alakítanak ki, ami a modell-alkotásnál nyújt segítséget.

Kísérleti eredményekkel bizonyítottuk azt a megállapítást, mely szerint a kapilláris nyomásgörbe alakja függ annak meghatározási módjától de az azonos nyomásintervallumban kimérhető az ekvivalencia. A hazai kifejlődésű homokkövek póruszűkületének eloszlása 10^{-2} ill. 10^2 μ mérettartományba esik. A porózus blokkban "a priori" létező pórusméret eloszlás feltárására a higanybesajtolás módszerét javasolja a szerző.

5. A póruskapcsolatok felépítésénél rámutattunk arra, hogy csak egyes esetekben sikeres próbálkozás a kapilláris nyomásgörbe analitikus alakú függvényvel történő leírása. A szerző által javasolt egységes koordináta rendszer a kapilláris nyomásgörbék egységes értelmezését, tipizálását teszi lehetővé.
6. A kapilláris erőnek két hatása létezik: a kapilláris zóna és a vég hatás. Hatásuk annál jobban érvényesül, minél lassabb az elmozdulás, minél kisebb a fázisok viszkozitása és a pórusok eloszlásának tartománya és minél nagyobb a fázisok felületi feszültsége. A kapilláris hatás a pórusméret csökkenésével átadja szerepét a felületi jelenségeknek. Viz esetében ez a kritikus méret kisebb mint 0,5 μ .
7. Részletesen tanulmányoztuk a porózus blokkban megnyilvánuló hiszterézis jelenségét. Közel azonos porozitású blokkok

jelentős belső, póruskonnektivitási, szerkezetfelépítési különbséggel rendelkeznek. 10 %-os porozitás különbség azonban már kísérletileg kimutatható változását adja a telítettségi hiszterézisnek.

Az áteresztőképesség mérésekor létezik egy stabilizált pórusrendszer kapcsolat, ami azonban esetlegesen jön létre a minta bemerítési és kimeneti oldala közötti nyomásdifferencia levezetésére. Az áteresztő-képességnél is jelentős szerepet játszanak a póruskapcsolatok populációba rendeződése, amelyet befolyásol a mozgás irányára nézve stagnáló zsebek jelenléte.

8. A DARCY-összefüggés állandójának alkalmas szétválasztásával definiált k áteresztőképességre laboratóriumi körülmények között hasonló stabilitás érvényes és kísérletileg kimutatható mint a porozitásra - "steady state" állapot.
9. Kísérletileg kimutattuk, hogy két, nem elegyedő fázis adott nyomáskülönbségen képes saját szivárgási csatornáit kialakítani, ami elsősorban az η pórusszűkület-eloszlás függvénye. A porozitás növekedésével nem nő következetesen az áteresztőképesség, amit a zsákkapillárisok jelenlétével magyarázhatunk. Ugyancsak erre vezethető vissza az a tapasztalat, hogy azonos telítettséghez tartozó relatív áteresztőképességek összege mindig kisebb egynél. Ez egyben azt is jelzi, hogy a fázisok egymás rovasára szűkítik az áteresztőképességbe bevont pórusláncolatokat.
10. Ugyanazon mintatérfogat kapilláris nyomásgörbéje és relatív áteresztőképessége közötti kapcsolatot vizsgálva megállapítottuk, hogy a porózus blokkra jellemző pórusméret eloszlás a higanybesajtolás módszerével feltárható, de ennek önálló felhasználása a maradék telítettség becslésére helytelen, a megoldást a pórusfeltárás és a relatív görbe együttes értelmezése adja.
11. Megvizsgáltuk különböző pórusfelépítésű homokkövekben a relatív áteresztőképesség hiszterézisét / 51. ábra / és megállapítottuk azt, hogy a második ciklus az elsőtől balra

azaz a kisebb viztelítettség tartományban helyezkedik el, a porozitás értékétől függetlenül. Megállapítható az is, hogy a vizre vonatkozó áteresztő-képesség gyorsabban épül fel a második ciklusban a 30 % körüli porozitású minták esetében de egyben vízszitessé is válik a relatív görbe. Ez azt jelenti, hogy egy darabig könnyen kisöpri a pórusszűkületeken keresztül a víz az olajat, viszont egy idő után az állandósult szivárgás körüláramolja az olajcseppet, ami a pórusöblösödésben marad. Az állandósult szivárgás megváltozik, ha megbontjuk az egyensúlyi állapotot azzal, hogy leállítjuk a víz sebességét vagy megváltoztatjuk azt.

Vizsgáltuk a szivárgási sebesség hatását a maradék telítettségre, azonos ülepedési körülmények között kialakult mintákon. Az általános egyenlet matematikai megoldásával összhangban lévő kísérleti eredményeket kaptunk, úgy hogy a szivárgási sebességet a minta lecsapolás irányu hosszának csökkentésével valósítottuk meg.

11. A lecsapolás sebességére megállapíthatjuk, hogy minél nagyobb annál gyorsabban tör előre a kiszorító fázis a nagyobb póruscsatornáknak nem hagyva lehetőséget a legnagyobb mértékű kihozatal realizációjához.

HIVATKOZÁSOK, IRODALOMJEGYZÉK

- A.1. Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publishing Company; New York, 1972.
2. Collius, R. E.: Flow of Fluids through Porous Materials, New York, 1961.
3. Amyx, J. W. et al.: Petroleum Reservoir Engineering, McGraw-Hill Book Co. 1960.
4. Budó, Á. - Pócsa, J.: Kísérleti fizika I, II, Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
5. Pickell, J.J. et al.: Application of Air-Mercury and Oil-Air Capillary Pressure Data in the Study of Core Structure and Fluid Distribution; SPEJ, March 1966.
- B.1. Barnett, M. J.: Proc. Int. Symp. on Surface Area; Butterworths, London, 1970.
2. Coxeter, H.S.M.: Illinois J. Math., 2, 1958.
3. Greenkorn, R. A.: "Proc. Sec. Symp. Fundam. of Transp. Phen. in Porous Media", Univ. of Guelph, Ontario, Canada, Aug. 7-11, 1972. p.27.
4. Dulien, F. A. D. - Batra, V. K.: Flow through Porous Media, American Chemical Society Publications, 1970.
5. Adam, N. K.: Discussion of The Faraday Soc., No. 3. 1948.
6. Whitaker, S.: AIChE Journal, 3. 1967.
7. Zisman, W. A. and Ellison, A. H.: Journal Phys. Chem. Ithaca, 1954.
8. Németh, E.: Hidromechanika, Tankönyvkiadó; Budapest, 1963.
9. Leverett, M. O.: Capillary Behaviour in Porous Solids; Trans AIME, vol. 142. 1941.
10. Juhász, J.: Hidrogeológia; Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976.
11. Purcell, W. R.: Capillary Pressures - their Measurement Using Mercury and the Calculation of Permeability Therefrom; AIME Tech. Pub. 2544
12. Hassler, G. L. and Brunner, E.: Measurement of Capillary Pressures in Small Core Samples; Trans. AIME, vol. 160. 1945. p. 114-123

- B.13. Dulien, F. A. L.: Effects of Pore Structure on Capillary and Flow Phenomena in Sandstones; The Journ. of Petr. Techn., July-Sept., 1975 Montreal.
14. Kusakov, N. M. and Mekeninszkaja B. I.: A Study of The State of Connate Water in Oil Reservoirs; Consultant Bureau, New York, 1936.
15. Dercsényi, L.: A tárolókőzetek telítettség viszonyainak vizsgálata, valamint a kísérleti eredmények összehasonlító kőolajföldtani értelmezése, OGIL jelentés I, II. 1974, 1975.
16. Kózdí, Á.: Talajmechanika I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1960.
17. Killins, C. R. - Neilsen, R.F. - Calhoun J. C. : Capillary Desaturation and Imbibition in Porous Rocks; Producers Monthly 1953. vol. 18.
18. McCullough, J.J. - Albaugh, F. W. - Jones, P. H. : Determination of the Interstitial Water Content of Oil and Gas Sand by Laboratory Tests of Core Samples; API Drilling and Production Practice, 1944.
19. Popovich, M. J.: A Study of Relationship between Grain Size and Capillary Pressure, Producers Monthly ,1947 okt. p. 27.
20. Rose, W. D. - Bruce, W. A.: Evaluation of Capillary Character in Petroleum Reservoir Rock.; Trans. AIME 1949 vol. 186.
21. Ritter, H. L. - Drake, L. C. : Ind. Eng. Chem. 1945.
22. Flood, E. A.: The Structure and Properties of Porous Materials; Butterworths, London, 1958.
23. Knöll, H.: Kolloid-Zeitschrift, vol 90. 1940.
24. Pakula, R. J. - Greenkorn, R. A. : AIChE Journal, 17. 1971.
25. Carman, P. C.: Flow of Gases Through Porous Media, Butterworths, London 1956.
26. Rummer, R. R.: Resistance to Flow Through Porous Media; Academic Press, New York, 1969.
27. Hubbert, H. K.: Trans. AIME, 1956.
- C. 1. Marle, C. M.: Multiphase Flow in Porous Media, 1981.
2. Chilingar, G. V. et al.: Oil and Gas Production from Carbonate Rocks; Elsevier, New York, 1972.

