

## KAPILLÁRIS NYOMÁS GÖRBE MEGHATÁROZÁSA HIGANYTELÍTÉSES POROZITÁSMÉRÉS ADATAIBÓL

### DETERMINATION OF CAPILLARY PRESSURE CURVE FROM MERCURY POROSIMETRY DATA

BÓDI TIBOR<sup>1</sup>–KOVÁCSNÉ FEDERER GABRIELLA<sup>2</sup>

**Absztrakt:** A kőolaj- és földgáziparban az olaj- és gázkészletek becslésénél fontos kérdés a tapadó víztelítettségének meghatározására. A tárolón belüli áramlásokat a kőzet petrofizikai paraméterei nagyban befolyásolják. A pórus szerkezet meghatározására általánosan használt eljárás a higany besajtolás melynek eredményéből meghatározható a pórustorok mérete és a higany-levegő kapillárisnyomás görbe. Módszerünkben újdonság, hogy a higany-levegő kapilláris nyomás görbe a víz-gáz rendszerre érvényes kapilláris nyomás görbére történő újraszámítása után határozzuk meg a tapadó víz telítettségét.

**Kulcsszavak:** kapilláris nyomás görbe, tapadó víztelítettség

**Abstract:** Determining the connate water saturation is an important question in the petroleum and gas industry. The reliability of the mentioned value has a decisive effect on defining the original oil and original gas in place. The filtration in oil and gas reservoirs is influenced by the petro physical parameters of the formation. A commonly used method of defining the pore structure is mercury injection measurement of which results can be used to determine the pore throat size distribution and mercury/gas capillary curve. The novelty in our method is that after recalculating the mercury-air capillary pressure to capillary pressure is valid to water gas system we recalculate the water saturation, too.

**Keywords:** capillary pressure curve, connate water saturation

#### 1. Bevezetés

A tapadó víz telítettségének meghatározására fontos kérdés a kőolaj- és a földgáz-bányászatban. Az elmúlt években a Miskolci Egyetem alkalmazott földtudományi kutatóintézetében nagyszámú higanybesajtolásos porozitásmérést végeztünk PASCAL 140 és PASCAL 440 típusú higanyos poroziméterrel. A mérés során a levákuumozott kőzetminta pórusait higanybesajtolással telítjük. A higanybesajtolás maximális 3500–4000 bar nyomása lehetővé teszi a nano méretű póruscsatornák telítését is. A besajtol

---

<sup>1</sup> DR. BÓDI TIBOR, igazgató  
Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet  
3515 Miskolc-Egyetemváros  
bodit@afki.hu

<sup>2</sup> KOVÁCSNÉ FEDERER GABRIELLA, tudományos segédmunkatárs  
Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet  
3515 Miskolc-Egyetemváros  
federer@afki.hu

higany mennyiség ismeretében meghatározható a minták makro (2 bar-ig) és mikro (3500–4000 bar-ig) porozitása. A mérés során regisztrált besajtolt higany mennyiség-besajtolási nyomás ismeretében felrajzolható a kőzetminta higany-levegő rendszerre vonatkozó kapilláris nyomás görbéje is. A nagyszámú mérési eredmény birtokában kifejlesztettünk egy közelítő számítási eljárást, ami lehetővé teszi a higany-levegő rendszerben felvett kapilláris nyomás görbe átszámítását víz-gáz rendszerre. A higany-levegő rendszerben mért kapilláris nyomás értékeket először átszámítjuk a víz-gáz rendszerre vonatkozó kapilláris nyomásokra  $P_{cw/g}$ . Ezután az általunk kidolgozott új számítási módszerrel a higany-levegő rendszerben mért telítettségértékeket is átszámítjuk víz-gáz rendszerre vonatkozó telítettségértékekre. Az átszámításhoz egy speciális átlagolási eljárást alkalmazunk, amellyel újraszámítjuk a mért higany telítettséget egy átlagos higany telítettségre  $S_{Hgav}$ , mely egy átlagos higany kapilláris nyomáshoz tartozik  $P_{cav}$ . Ezt az átlagos kapillárisnyomás értéket használjuk a gáz-víz rendszerű kapilláris nyomás meghatározáshoz. Mivel a kőzet pórusszerkezete mindkét számításnál azonos, ezért feltételezzük, hogy a víztelítettség  $S_w$  egyenlő  $1-S_{Hgav}$ . Az így átkonvertált víz-gáz rendszerű kapilláris nyomás görbéből az adott kőzetminta  $S_w$  tapadó víztelítettsége is meghatározható.

## 2. A higanybesajtolásos porozitás mérés elve

A kőzetek porozitásának meghatározására számos mérési módszer dolgoztak ki, ezek között a higanybesajtolásos porozitásmérés egy széles körben alkalmazott eljárás. A mérés a higany azon tulajdonságán alapszik, hogy a higany a kőzetet nem nedvesíti. E tulajdonság miatt a higanyt a kőzet egyre csökkenő méretű pórusaiba csak egyre növekvő nyomással lehet besajtolni. Washburn összefüggése szerint a higany által elfoglalt pórus sugár fordítottan arányos az alkalmazott nyomással:

$$r = \frac{2\sigma_{Hg} \cos \theta_{Hg}}{p}, \quad (2.1)$$

ahol:  $r$  a pórus sugár, m;  $\sigma_{Hg}$  a Hg határfelületi feszültsége;  $\theta_{Hg}$  érintkezési szög;  $p$  az abszolút alkalmazott nyomás, Pa.

Amikor a mintát körülvevő higany nyomása eléri az  $r$  pórus torok méretű porózusminta kapilláris nyomását, a higany behatol a pórusokba, és telíti azokat.

Tehát az a nyomás, ami ahhoz szükséges, hogy a higany bejusson a kőzetminták egy bizonyos pórustérfogatába, egyenlő a minta adott pórustérfogatához tartozó higanyra vonatkozó kapilláris nyomással  $P_{cHg}$ . A kőzetminta pórustérfogata egyenlő a besajtolt higany mennyiségével. Így a minta porozitása a következőképpen számítható:

$$\phi = \frac{V_{Hg}}{V_B}, \quad (2.2)$$

ahol:  $V_{Hg}$  a besajtolt higany térfogata,  $m^3$ ;  $V_B$  a minta össztérfogata,  $m^3$ .

Nagyobb nyomás alkalmazásával a minta kisebb pórusai is elérhetőek, így pontosabb lesz a porozitásmérés is. A mérés során a besajtolt higany mennyisége és a hozzá tartozó

nyomás ismeretében a minta kapilláris nyomása  $P_{cHg}$  és az adott nyomáshoz tartozó higanytelítettség  $S_{Hg} = V_{Hg}/V_p$  számítható.

A 2.1 egyenlet alapján a pórusméret-eloszlás a besajtott mennyiségből számítható, így a pórusméret-eloszlás görbe is felrajzolható. A PASCAL poroziméter beépített számítógépi szoftvere segítségével a következő paraméterek határozhatók meg: az egy gramm kőzetanyagra jutó teljes besajtott higany mennyiség ( $cm^3/g$ ), a kőzetminta fajlagos felülete ( $m^2/g$ ), a minta számított sűrűsége, illetve a minta kőzetanyagának (mátrix) sűrűsége, a minta porozitása, valamint a minta pórusméret-elosztása.

### 3. A víz-gáz rendszerre vonatkozó kapilláris nyomás görbe meghatározása

A higany-levegő rendszerben mért kapilláris nyomás görbe nyomásértékei Purcell [1] szerint az alábbi összefüggés segítségével átszámíthatók víz-gáz rendszerre vonatkozó kapilláris nyomásértékekre  $P_{cw/g}$ :

$$P_{cw/g} = \frac{\sigma_{w/g} \cos \theta_{w/g}}{\sigma_{Hg/Air} \cos \theta_{Hg/air}} \cdot P_{cHg/Air}, \quad (3.1)$$

ahol:  $P_{cHg/Air}$  a Pascal 140 és 440-nel mért kapilláris nyomás;  $\sigma_{Hg/Air}$  a higany-levegő határfelületi feszültsége;  $\theta_{Hg/Air}$  a higany-levegő érintkezési szöge;  $\sigma_{w/g}$  a víz-gáz határfelületi feszültsége labor állapoton;  $\theta_{w/g}$  víz-gáz érintkezési szöge labor állapoton.

A 3.1. egyenlettel a higanybesajtolásos porozitásmérés adataiból a víz-gáz rendszerre vonatkozó kapilláris nyomások meghatározhatók. Az így kapott nyomásértékeket  $1-S_{Hg}$  függvényében ábrázolhatjuk feltételezve, hogy az  $1-S_{Hg}$  telítettség megegyezik  $S_w$  víztelítettség értékkel. Ez az eljárás azonban csak a nyomások átszámítását teszi lehetővé, az így átszámított kapilláris nyomás görbe továbbra is  $S_w = 0$  telítettséghez tart, azaz a kőzetminta tapadó víztelítettsége még nem határozható meg.

Purcell [1] a Poiseuille's és a Darcy-törvényből a kör alakú póruscsatornákból felépített elméleti kőzetminta permeabilitásának meghatározására az alábbi egyenletet vezette be:

$$k = \frac{(\sigma \cos \theta)^2 \phi}{2} \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{P_{ci}^2}, \quad (3.2)$$

ahol:  $\sigma$  a határfelületi feszültség;  $\theta$  az érintkezési szög;  $S_i$  i-edik kapilláris cső telítettsége;  $P_{ci}$  kapilláris nyomás, aminél i-edik kapilláris higanyal telítődik;  $\phi$  porozitás,  $k$  permeabilitás. Tekintettel arra, hogy a természetes kőzetek póruscsatornáinak átmérője, amiben a fluidum mozog, helyről helyre változik, és a póruscsatornák nem is kör keresztmetszetűek, a fenti összefüggést egy úgynevezett litológiai faktor,  $F$  bevezetésével módosítani szükséges:

$$k = \frac{(\sigma \cos \theta)^2 \phi F}{2} \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{P_{ci}^2}. \quad (3.3)$$

Tételezzük fel, hogy a kapilláris nyomás  $\mathbf{P}_{c1}$ -ről  $\mathbf{P}_{c2}$ -re történő változásának hatására a telítettség változása  $\Delta\mathbf{S}$ . Ebben a nyomás intervallumban minden pórus úgy kezelhető, mint egy olyan  $\mathbf{r}$  átlagos sugarú pórus, melynek kapilláris nyomása az átlagos kapilláris nyomással  $(\mathbf{P}_c)_{av}$  azonos. Ha feltételezzük, hogy a kőzet  $\mathbf{N}$  darab különböző  $\mathbf{r}$  átlagos sugarú póruscsatornából áll, akkor a  $j$ -edik intervallumba eső póruscsatornára felírhatók az alábbi összefüggések:

$$\sum_{i=1}^{n_j} \frac{S_i}{(p_{ci})^2} \cong \left[ \frac{\Delta S}{(p_c)_{av}^2} \right]_j \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{S_i}{(p_{ci})^2} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \frac{S_i}{P_{ci}^2} = \sum_{j=1}^r \left[ \frac{\Delta S}{(p_c)_{av}^2} \right]_j \quad (3.5)$$

$$\lim_{\substack{\Delta S \rightarrow 0 \\ r \rightarrow \infty}} \sum_{j=1}^r \left[ \frac{\Delta S}{(p_c)_{av}^2} \right]_j = \int_{s=0}^1 \frac{dS}{P_c^2} = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{P_{ci}^2} \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j} \frac{S_i}{(p_{ci})^2} = \int_{s=0}^1 \frac{S_i}{(p_{ci})^2} \cdot \quad (3.7)$$

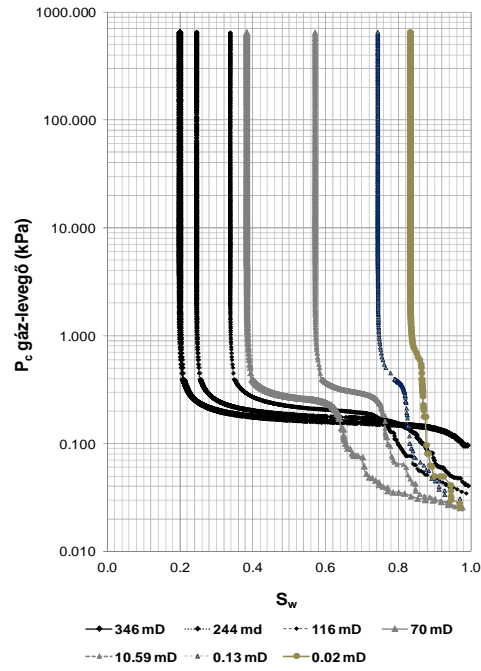
A 3.7 egyenletben szereplő integrál a kapilláris nyomás görbe alatti terület planimetrálásával, Simpson-szabállyal vagy más numerikus integrálási szabállyal meghatározható. A 3.7 egyenlet megoldásához trapézformulát alkalmazva a higanytelítettség átszámítható egy átlagos higany kapilláris nyomásnak megfelelő  $\mathbf{P}_{cav}$  átlagos higany telítettségére  $\mathbf{S}_{Hgav}$ . Az átlagos  $\mathbf{P}_{cav}$  higanyra vonatkozó kapilláris nyomást  $\mathbf{P}_{cw/g}$  víz-gáz kapilláris nyomásra átszámítva, feltételezve, hogy a víztelítettség  $\mathbf{S}_w$  egyenlő  $1 - \mathbf{S}_{Hgav}$  megkapjuk az új módosított víz-gáz rendszerre vonatkozó kapilláris nyomás görbét, amely a telítettség értékek átszámításának eredményeképpen most már az  $\mathbf{S}_{wc}$  tapadó víztelítettséghez tart aszimptotikusan.

#### 4. Az átszámítási eljárás alkalmazása

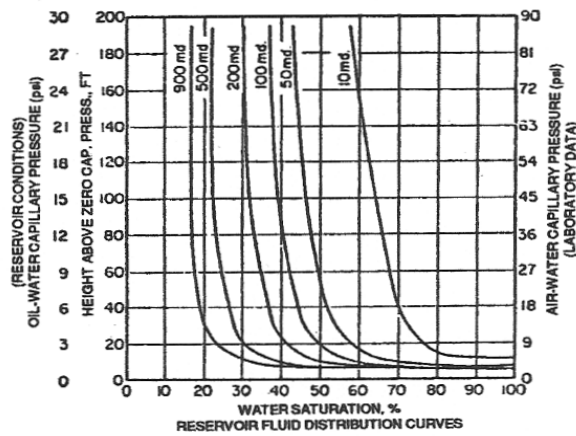
Az elmúlt években az AFKI-ben számos porózus homokkő mintán végeztünk vizsgálatokat. A tesztelt homokkövek átlagos permeabilitása 0,01 és 346 mD közé esett. A higanyos porozitás mérésadatait használva az előzőekben bemutatott módszerrel átszámoltuk a higany-levegő kapilláris nyomást víz-levegő kapilláris nyomásra. Az így átszámolt kapilláris nyomás görbék egy válogatott sorozata látható az 1. ábrán.

A számítási módszer érvényességét ellenőrizendő, az általunk meghatározott görbét összevetettük egy, a szakirodalomban jól ismert kapilláris nyomás görbére (2. ábra) [2].

Az ábrákat tanulmányozva és egyéb mért kőzetparamétereket figyelembe véve (abszolút permeabilitás, átlagos és leggyakoribb pórusugár, makro- és mikroporozitás), azt találtuk, hogy a mért és az általunk számolt tapadó víztelítettségek realisztikus képet mutatnak.



1. ábra. A kapillaris nyomás görbék sorozata, a permeabilitás és a víztelítettség függvényében



2. ábra. A kapillaris nyomás görbék sorozata, a permeabilitás függvényében  
 Forrás: Wright és Woody [2]

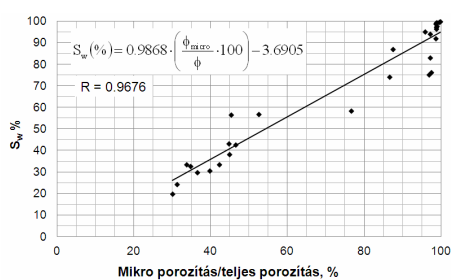
Az ábrákon tisztán látszik, hogy a 10 mD permeabilitáshoz tartozó tapadó víztelítettség 60% vagy nagyobb. Az általunk mért permeabilitások között 10 mD-nál, sőt 0,1 mD-nál is kisebb értékek szerepelnek, ezért nem meglepő, hogy ezek tapadó víztelítettség értékei a 80%-ot is meghaladják.

A nagyszámú mérés lehetővé tette, hogy a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazó regressziós vizsgálatokat végezzünk az általunk vizsgált kőzetminták tapadó víztelítettségének és más, mért közetfizikai paraméterek kapcsolatára is. Vizsgálataink alapján elmondható, hogy:

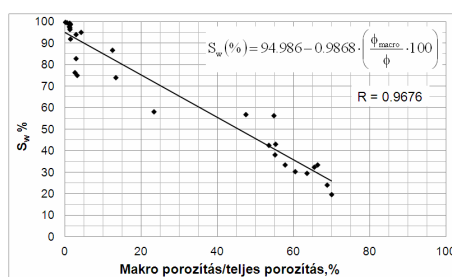
A tapadó víztelítettség  $S_{wc}$  és a mikroporozitás-teljes porozitás aránya  $\frac{\phi_{micro}}{\phi}$  között lineáris a kapcsolat van (3. ábra). Ugyancsak lineáris kapcsolatot találtunk a tapadó víztelítettség  $S_{wc}$  és a makroporozitás-teljes porozitás aránya  $\frac{\phi_{macro}}{\phi}$  között is (4. ábra).

A vizsgált minták pórusszerkezete (átlagos pórus sugár) és a tapadó víztelítettség közötti kapcsolatot legjobban egy másodrendű polinom írja le (5. ábra).

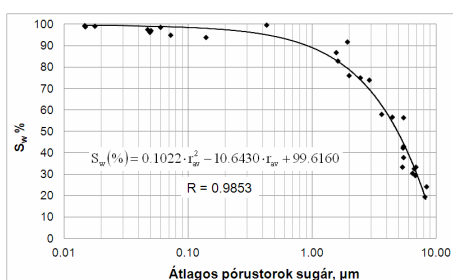
Míg az átlagos légpermeabilitás és tapadó víztelítettség kapcsolata fél logaritmikus összefüggéssel közelíthető (6. ábra).



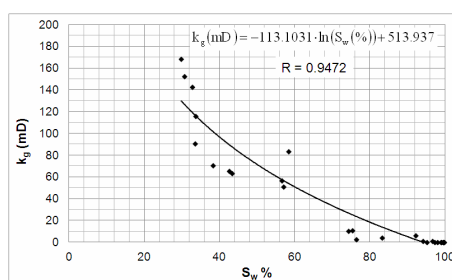
3. ábra



4. ábra



5. ábra



6. ábra

## 5. Összefoglalás

Az ismertetett számítási módszer használatával a higany-levegő rendszerben mért kapilláris nyomások átszámolhatóak víz-gáz rendszerre érvényes kapilláris nyomásra. Saját eredményeinket az irodalmi adatokkal összehasonlítva, széles permeabilitás intervallumot figyelembe véve, arra a következtetésre jutottunk, hogy az általunk tesztelt mintákra végzett számításaink valósak, és jól korrelálnak a korábbi irodalmi eredményekkel.

A minták petrofizikai paramétereit tanulmányozva azt kaptuk, hogy szoros kapcsolat van a pórusszerkezet, a kapilláris tulajdonságok és a közet tapadó víztelítettsége között.

### Köszönetnyilvánítás

„A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.”

### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Purcell, W. R.: *Capillary Pressures – Their Measurement Using Mercury and the Calculation of Permeability There from*. Petroleum Transactions, AIME, Texas, 1956.
- [2] Wright, H. T. Jr.–Wooddy, L. D. Jr.: *Formation Evaluation of the Borregas and Seelingson Fields, Brooks and Jim Wells Counties, Texas*. Symp. of Formation Evaluation., AIME (October 1955) p. 135.
- [3] Li, K.–Horne, R. N.: *Experimental Verification of Methods to Calculate Relative Permeability Using Capillary Pressure Data*. Society of Petroleum Engineers 76757, 2002.
- [4] Pirson, S. J.: *Oil Reservoir Engineering*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York Toronto London, 1958., pp. 372–382.





