

# A pórusjellemzők P-hullámsebességre és jósági tényezőre gyakorolt hatása homokkőtárolóban

AKBAR M. N. A.<sup>1</sup>, SZABÓ N. P.<sup>1,2,@</sup>

<sup>1</sup>Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

<sup>2</sup>MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

@E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

A kutatás fő célja, hogy megismerjük a porózus kőzetekben mért akusztikus hullámterjedési sebesség és a jósági tényező kapcsolatát a hézagterfoggal, áteresztőképességgel és a pórusteret leíró legfontosabb geometriai jellemzőkkel. Átrendezve a Kozeny–Carman-egyenletet, a kőzeteket különböző csoportokba sorolhatjuk a pórusszerkezet hasonlósága alapján. A kifejlesztett csoportosítási módszer lehetővé teszi a nyomáshullám-sebességet és a jósági tényezőt leginkább befolyásoló tényezők meghatározását. A tanulmányhoz 67 db, különböző országból származó homokkőmintát dolgoztunk fel, melyekhez rendelkezésre álltak a következő kőzetfizikai paraméterek: porozitás ( $\phi$ ), áteresztőképesség ( $k$ ), agyagtartalom ( $V_d$ ), P-hullámsebesség ( $V_p$ ) és az ahhoz tartozó jósági tényező ( $Q_p$ ). A kőzeteket csoportokba soroltuk, és megadtuk azok Kozeny-állandóját. Ennek alapján kapcsolatot találtunk a  $V_p$  és  $Q_p$  paraméterek és a  $(k/\phi)^{0.5}$  és  $(k/\phi^3)$  mennyiségek között. Azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a  $V_p$  és  $Q_p$  paraméterek a Kozeny-állandóval növekednek. Megállapítottuk, hogy rögzített porozitásérték esetén (valamennyi csoportnál) az akusztikus jellemzők a Kozeny-állandó csökkenése esetén is jelentősen megnőnek. Mindez arra utal, hogy a  $V_p$  és  $Q_p$  mennyiségek nőnek mind a pórusszerkezet bonyolultságának növekedésével, mind pedig a fajlagos felület csökkenésével ugyanolyan fokú összetettség esetén. A fenti eredmények alapján új tapasztalati egyenleteket származtattunk, mellyel a homokkővek akusztikus terjedési sebessége és jósági tényezője a porozitás és a permeabilitás ismeretében meghatározható.

## Akbar, M. N. A., Szabó, N. P.: The effects of pore geometry and pore structure in characterizing the P-wave velocity and quality factor in sandstone reservoirs

The main purpose of this study is to investigate how acoustic velocity and quality factor correlate to porosity, permeability and internal pore structure in porous rocks. A rearrangement is made on Kozeny–Carman equation to perform rock typing on the basis of pore structure similarity. The proposed rock typing method allows to investigate the main influential factors that control compression velocity and quality factor. This study employs 67 sandstone core samples from different countries with measured parameters of porosity  $\phi$ , permeability  $k$ , clay content  $V_d$ , compression velocity  $V_p$  and quality factor  $Q_p$ . Several rock groups are resulted from rock typing with its Kozeny constant. The relations of  $V_p$  and  $Q_p$  versus  $(k/\phi)^{0.5}$  and  $(k/\phi^3)$  are constructed. The important finding is that  $V_p$  and  $Q_p$  tend to be high with an increase in Kozeny constant. However, for a given  $\phi$  for all the groups,  $V_p$  and  $Q_p$  increase remarkably with a decrease in Kozeny constant. These all mean that  $V_p$  and  $Q_p$  increase with either an increase in the complexity of pore systems or, at the same pore complexity, a decrease in specific internal surface area. Finally, the new empirical equations are derived to estimate velocity and quality factor of the sandstone as function of porosity and permeability.

*Beérkezett:* 2019. április 30.; *elfogadva:* 2019. június 19.

## Bevezetés

Az akusztikus hullámterjedési sebesség és a porozitás kapcsolatát elsőként Wyllie és szerzőtársai (1956) írták le. Az általuk kimutatott egyenes összefüggéssel szemben újabb tanulmányok a két mennyiség kapcsolatát nemlineárisnak

feltételezik (Raymer és szerzőtársai 1980). A rugalmas hullámok terjedését a kőzet heterogenitása is nagymértékben befolyásolja, legfőképpen az agyag mennyisége és térbeli eloszlása (Han és szerzőtársai 1986), amelyekre hatással van a szemcsék alakja és méreteloszlása, a pórusok közötti összeköttetés, valamint az ásványi összetétel és a kompak-

ció. Ennek ellenére a szakirodalom kevés esetben számol be a szeizmikus sebesség és az áteresztőképesség között lévő erős korrelációról. A porózus kőzetek szerkezetének szeizmikus hullámterjedésre gyakorolt hatása a korábbiaknál átfogóbb vizsgálatot igényel. Nemcsak a pórusszerkezet és a szeizmikus sebesség (ill. porozitás) kapcsolatot, hanem annak a jósági tényezővel és a permeabilitással való viszonyát is meg kell határozni. A jósági tényező nyomásfüggésének leírására Dobróka és szerzőtársai (2014) új közzetfizikai modellt fejlesztettek, amelyből a jósági tényező hiszterézisére is következtetéseket lehet levonni. A kompressziós jósági tényezőt eddig főleg a porozitás, permeabilitás, víztelítettség és az agyagtartalom vonatkozásában vizsgálták. Például homokkőmintákon végzett ultrasonikus mérések alapján Han (1987) és Klimentos, valamint McCann (1990) kimutatták, hogy a csillapítási tényező ( $1/Q_p$ ) erősebb (szisztematikus) kapcsolatot mutat az agyagtartalommal, mint az akusztikus terjedési sebességgel. Ennek alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a csillapodás kulcsfontosságú az áteresztőképesség szeizmikus adatokból történő meghatározása szempontjából. Azonban a permeabilitás – jósági tényező összefüggés rendszerint gyenge, és valójában ismeretlen a jelenség magyarázata. Prasad (2003) a hidraulikus áramlási egység elnevezésű modellt alkalmazva sikeresen csoportosított kőzeteket, melynél erős kapcsolatot talált a P-hullámsebesség és a permeabilitás között. A permeabilitás – szeizmikus sebesség keresztmetszeten jól elkülönültek a különféle (hidraulikus egységgel megadott) csoportok, azonban a permeabilitás – jósági tényező viszony továbbra is kis korreláció mellett és jelentős átfedésekkel jelentkezett. A többértelműség feloldása a jól ismert Kozeny–Carman-egyenlet alkalmazásával lehetséges. Permadi és Susilo (2009) a póruseometriát és pórusszerkezetet vizsgálva származtatták a porozitást és a permeabilitást, melynek alapján egy új kőzetcsoportosítási eljárást javasoltak, a PGS (*Pore Geometry Structure*) diagramot. Telített magmintákon nagy nyomás alatt végzett kísérletek alapján sikerült különféle pórusszerkezetekre (PGS típusokra) kimutatni a jósági tényező és a kompressziós hullámterjedési sebesség kapcsolatát. Az olajipari gyakorlat számára ez azzal a haszonnal jár, hogy megbízható porozitás és áteresztőképesség adatok birtokában a hullámterjedési jellemzőket a fúrólukszelvények alapján a mélység függvényében folytonosan (*in situ*) meghatározhatjuk.

## Alkalmazott módszer és felhasznált adatok

A PGS módszert Wibowo és Permadi (2013) egyszerűsített formában közölték, ahol az egyes kőzettípusokat eltérő görbék képviselik. A pórusegeometria itt egyenértékű az átlagos hidraulikus sugárral (Harmsen 1955), és a pórusszerkezetet a fizikailag a póruster alakja, a tekervényesség és a fajlagos felület együttes hatásaként értelmezzük. A kőzettípus meghatározása a póruster szerkezet (pórusalak tényező és a tekervényesség) hasonlóságán alapul. E két jel-

lemző szorzatát Kozeny-állandónak nevezzük (Kozeny 1927). Az egyetlen különbség két azonos Kozeny-állandójú kőzetminta között a pórusméretben jelentkezik, melyet az átlagos hidraulikus sugárral jellemezhetünk. Alakítsuk át a Kozeny-féle egyenletet a következőképpen:

$$\left(\frac{k}{\phi}\right)^{1/2} = \phi \left[ \frac{1}{\tau F_s S_b^2} \right] \quad \text{vagy} \quad \frac{k}{\phi^3} = \frac{1}{\tau F_s S_b^2}, \quad (1)$$

ahol  $k$  jelöli az áteresztőképességet és  $\phi$  a hézagterfogatot. A fenti egyenletben szereplő  $(k/\phi)^{1/2}$  kifejezés a póruseometriát képviselő átlagos hidraulikus sugár, míg  $k/\phi^3$  mennyiség a pórusszerkezetet jellemző tag. Ez utóbbi a póruster valamennyi fizikai jellemzőjét tartalmazza. További paraméterek a tortuozitási (tekervényességi) tényező ( $\tau$ ), pórusalak tényező ( $F_s$ ) és a fajlagos felület ( $S_b$ ). A fenti két egyenletet kombinálva az alábbi triviális megoldás adódik:

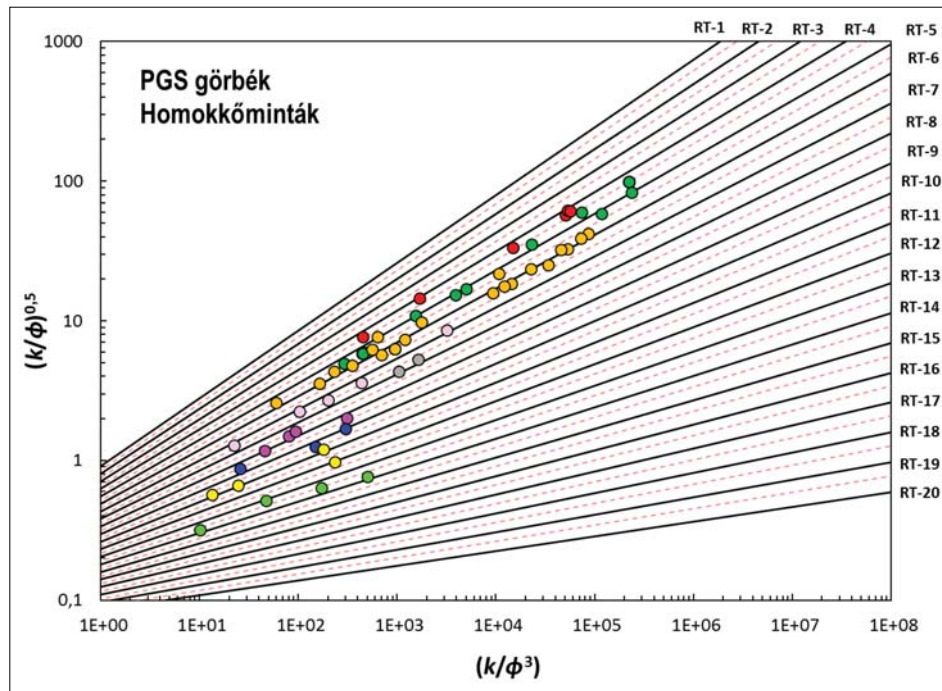
$$\left(\frac{k}{\phi}\right)^{1/2} = a \left(\frac{k}{\phi^3}\right)^b, \quad (2)$$

ahol az  $a = \phi$  és  $b = 0,5$ , ill. a szemcsék tökéletesen lekerekítettek (gömbszerűek), és a kapilláris csövek egyenesek. A gyakorlatban, amikor valódi tárolókőzeteket vizsgálunk, javasolható a fenti állandók tapasztalati megválasztása. Egy korábbi tanulmányban, Wibowo és Permadi (2013) szerint az előbbi a szabálytalan alakú pórusterben létrejövő terfogati áramlási hatékonyság, míg az utóbbit a póruster összetettsége befolyásolja. Ennek alapján csoportosítást végezhetünk a magadatok felhasználásával, majd az eredményeket kiterjeszthetjük a szeizmikus paraméterekre, ill. tapasztalati összefüggést kereshetünk a terjedési sebesség és a jósági tényező között.

Vizsgálatainkhoz a Függelék 1. táblázatában található, Prasad (2003) által közzétett adatrendszer használtuk fel, mely 67 db homokkőmintán mért, a terjedési sebességre és csillapítási tényezőre vonatkozó értékeket tartalmazza. A megfigyeléseket azonos nyomáson (~40 MPa) és desztillált vízzel telített mintákon végezték, a sebesség- és jósági-tényező-értékeket az ultrasonikus frekvenciatartományban mérték (0,5–1 MHz) az impulzusátviteli technika alkalmazásával (Prasad 1998). Az adatrendszer magában foglalja a minták porozitását és permeabilitását, melyek széles tartományon állnak rendelkezésre, lehetővé téve az akusztikus jellemzőkre gyakorolt hatásuk kiterjedt vizsgálatát. A magminták különböző földtani képződményekből származnak, melyek az Egyesült Királyságban, Kínában, Európában és az Egyesült Államokban találhatók.

## A P-hullámsebesség vizsgálata

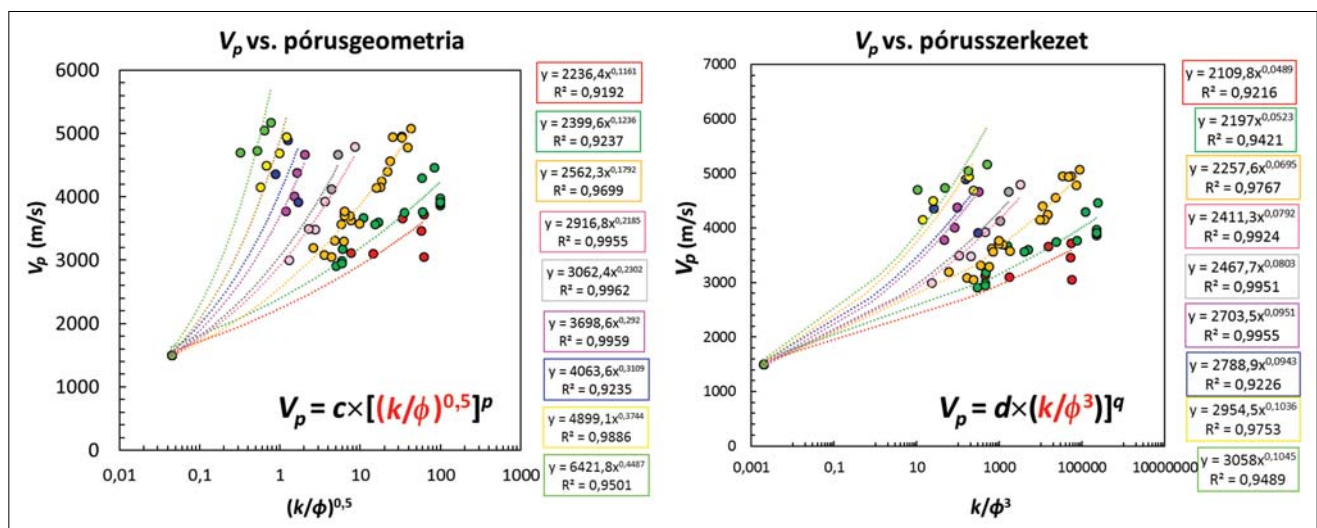
A nyomáshullám terjedési sebessége és a pórusegeometria/pórusszerkezet kapcsolatát a PGS módszer alkalmazásával állapítjuk meg. Az 1. ábra a rendelkezésünkre álló magadatok csoportosításának eredményét mutatja, ahol azokat az adatokat, melyek ugyanarra az egyenesre esnek, azonos



1. ábra Homokkőminták osztályozása a porusjellemzők alapján a PGS módszer felhasználásával  
 Figure 1 Classification of sandstone samples based on their pore characteristics using the PGS rock typing method

kőzettípust jelölő számmal (RT) láttuk el. Ugyanaz a kőzet-típus azt jelenti, hogy a minták hasonló poruszerkezetűek, tehát hasonlóak a szemcseméret, osztályozottság, szögletesség, lekerékítettség, cementáltság, ill. egyéb texturális jellemzők vonatkozásában. Az ábrán látható, hogy a pontokat 9 csoportba sorolhatjuk (RT-4–RT-13). Általánosan igaz, hogy minél nagyobb az RT szám, annál kisebb az egyenes meredeksége, és annál bonyolultabb a poruszerkezet, ami rosszabb minőségű (tárolóképességű) kőzetet jellemez.

A minták osztályozása alapján kapcsolatot kereshetünk a P-hullámsebesség és a porusjellemzők között. Megfigyelhető, hogy valamennyi kőzettípust jelölő vonal mind a porusgeometria-, mind pedig a poruszerkezet-diagramon ugyanabban a pontban fut össze (2. ábra). Ezt konvergenciapontnak nevezzük, melynek fizikai jelentését Wibowo (2014) határozta meg: ezen a helyen a kőzettípust jelölő számot nem tudjuk megkülönböztetni. A szerző a konvergenciapontokat  $(k/\phi)^{0.5} = 0,045$  and  $k/\phi^3 = 0,002$  értékként állapította meg. Ebben a pontban azonos tulajdonságú porózus kőzeteket találunk, melyeknél a P-hullám-



2. ábra Akusztikus P-hullámsebesség kapcsolata a porusgeometriával és porusstruktúrával a PGS módszerrel való csoportosítás alapján  
 Figure 2 The relationships among P-wave velocity with pore geometry and pore structure grouped based on PGS method

sebesség értéke is egyforma. Mivel a konvergenciapontban nincs különbség az egyes közettípusok pórusgeometriája és pórusszerkezete között, azt feltételezzük, hogy ez az állapot végtelenül kis hajszálcsövekre és 100%-os porozitásra vonatkozik. Az akusztikus terjedési sebesség ekkor megegyezik a pórusokat kitöltő folyadék (desztillált víz) sebességével, amelyet  $V_p = 1500$  m/s-nak kapunk. A 2. ábrán szereplő keresztdiagramok esetén a konvergenciapontok helye:  $[V_p, (k/\phi)^{0,5}] = (1500, 0,045)$  és  $(V_p, k/\phi^3) = (1500, 0,002)$ . Mindkét diagramon az ábrázolt pontok jól elkülöníthető csoportokat (közettípust) alkotnak, és nagy determinációs együtthatóval ( $R^2 > 0,9$ ) jellemezhető függvénykapcsolatot figyelhetünk meg (az ábrán az  $x$  független változó a pórusjellemzőket, míg  $y$  az akusztikus terjedési sebességet jelöli). A fenti eredmények alapján, az alábbi tapasztalati (regressziós) egyenleteket alkalmazhatjuk homokkövek P-hullámsebessége becslésére:

$$V_p = c \left[ \left( \frac{k}{\phi} \right)^{1/2} \right]^p, \quad (3)$$

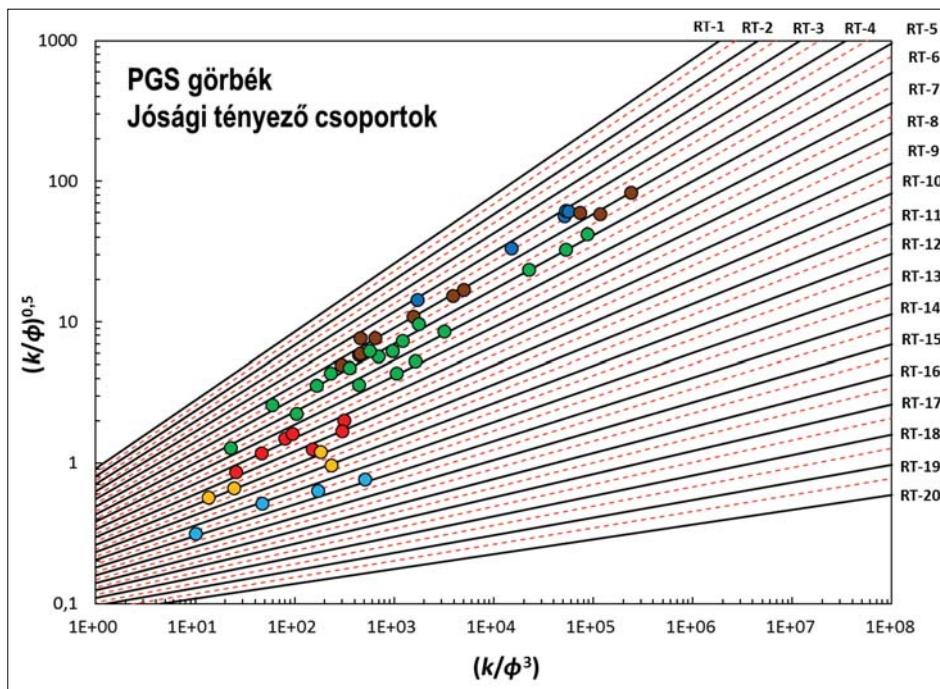
$$V_p = d \left( \frac{k}{\phi^3} \right)^q, \quad (4)$$

ahol  $c$  és  $d$  tapasztalati állandók, valamint a  $p$  és  $q$  kitevők a közettípustól függenek. A diagramokon szereplő közettípusok azonos viselkedést mutatnak, ui. a  $V_p$  értéke a Kozeny-állandó csökkenésével nő. Ez azt jelenti, hogy a  $V_p$  mennyiség nő vagy a pórusszerkezet bonyolultságának növekedésével, vagy pedig a fajlagos felület csökkenésével ugyanolyan fokú összetettség esetén. A (3)–(4) egyenletek sze-

rint a terjedési sebesség nő az átlagos hidraulikus sugárral, valamint a pórusszerkezetet jellemző  $k/\phi^3$  mennyiséggel. A rosszabb minőségű (tárolóképességű) kőzetek adatpontjainak elkülönítése az átfedés miatt kevésbé egyértelmű. Ez azért van, mert a pórusszerkezeti változók számszerű értékei e közettípusok esetén közel azonosak (Prakoso és szerzőtársai 2016). A kőzetek (2) egyenlet alapján való elkülönítése során azonos tekervényességet és pórusalakot feltételezünk valamennyi közettípus esetén. Következésképpen a  $k/\phi^3$  mennyiséget jelentősen befolyásolja a fajlagos felület ( $S_b$ ). A mintákat alkotó ásványi összetevők fajtájától eltekintve, a permeabilitás szeizmikus sebességre gyakorolt hatását valószínűleg elnyomja a növekvő porozitás és fajlagos felület sebességcsökkentő hatása.

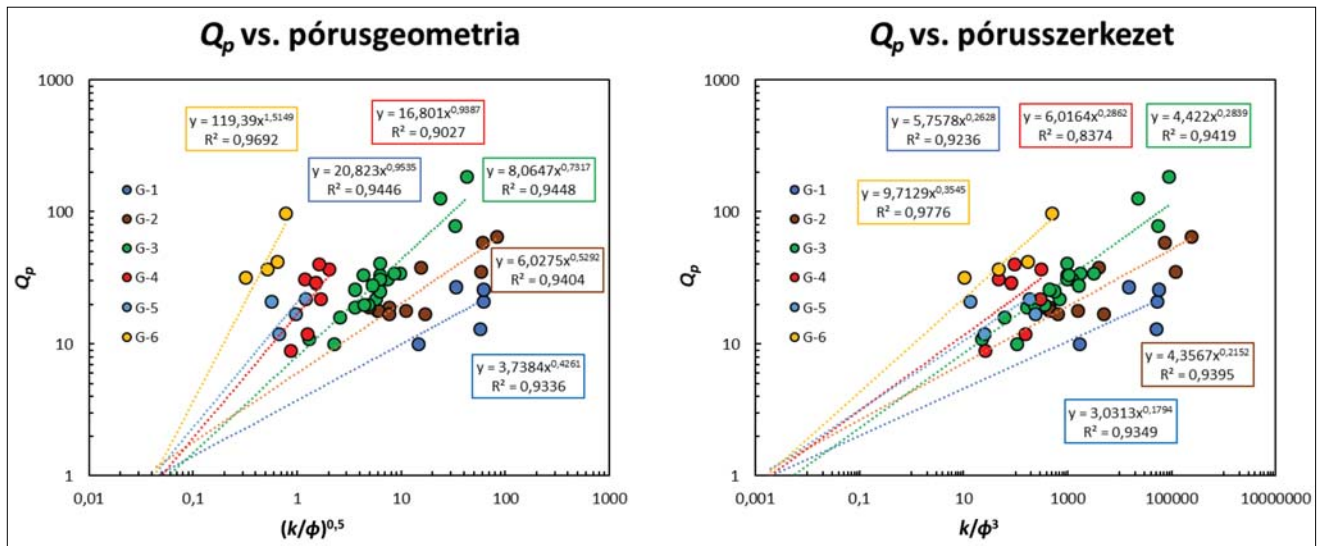
### A P-hullám jósági tényezőjének vizsgálata

A jósági tényező vizsgálatát hasonló módon végezzük, mint a P-hullámsebesség PGS paraméterekkel való összehasonlítása esetén. Ebben az esetben azonban csak hatféle közettípust sikerült elkülönítenünk. A  $Q_p$  tényező az ásványi összetétel változására (agyag jelenlétére) érzékeny mennyiség, és a növekvő RT értékek általában nagyobb agyagtartalomhoz tartoznak. Mivel a jósági tényező is érzékeny a rugalmas hullám frekvenciájára (itt 0,5–1 MHz), ezért lehetőség jelentkezik a pórusjellemzőkkel való kapcsolatának meghatározására, ill. megfelelő számú minta esetén a kőzetek csoportosítására. A 3. ábrán látható, hogy RT-4 az I. csoportot és RT-5 a II. csoportot egyértelműen meghatározza, míg a III. csoportot az RT-6, RT-7 és az RT-8 értékek kombinációja adja. A IV. csoportot az RT-9



3. ábra | Homokkőminták osztályozása a jósági tényező alapján alapján a PGS módszer felhasználásával

Figure 3 | Classification of sandstone samples based on the quality factor using the PGS rock typing method



4. ábra | A jósági tényező kapcsolata a pórusgeometriával és pórusstruktúrával a PGS módszerrel való csoportosítás alapján

Figure 4 | Crossplots between  $Q_p$  versus pore geometry and pore structure grouped based on PGS method

és RT-10 számokkal, az V. csoportot RT-11 és RT-12-vel, míg a VI. csoportot az RT-13 és RT-14 értékekkel képezzük.

Miután a kőzeteket csoportokba soroltuk, megvizsgálhatjuk a jósági tényező kapcsolatát a pórusjellemzőkkel. A 4. ábrán látható, hogy a jósági tényező hasonlóan viselkedik, mint az akusztikus hullámterjedési sebesség (2. ábra). A  $Q_p$  mennyiség valamennyi csoport esetén egyenes kapcsolatban áll a permeabilitással, ill. nő az átlagos hidraulikus sugárral. Nagyobb csoportszámok esetén a jósági tényező nő a kőzetszerkezet összetettségével, azaz a tekervényességgel. Azonos csoporton belül, melyet ugyanaz a tortuozitás és pórusalak tényező jellemez, a jósági tényező fordított kapcsolatot mutat a fajlagos felülettel. A fenti eredmények alapján az alábbi tapasztalati egyenleteket alkalmazhatjuk homokkővek jósági tényezőjének becslésére:

$$Q_p = g \left[ \left( \frac{k}{\phi} \right)^{1/2} \right]^r, \quad (5)$$

$$Q_p = h \left( \frac{k}{\phi^3} \right)^s, \quad (6)$$

ahol  $g$  és  $h$  tapasztalati állandók, valamint az  $r$  és  $s$  kitevők a kőzettípustól függenek. Az (5)–(6) egyenletek felhasználásával a mért porozitás- és áteresztőképességi adatok ismeretében a P-hullám jósági tényezője meghatározható.

## Következtetések

A tanulmányban bemutatott PGS módszerrel hatékonyan feltárható a pórusszerkezet és a szeizmikus terjedési sebesség és jósági tényező kapcsolata. A nagy nyomással terhelt

és folyadékkal telített minták megfelelő kísérleti körülményeket teremtenek a tekervényesség és a pórusalak tényező szeizmikus hullámterjedési jellemzőkre gyakorolt rendszeres hatásának vizsgálatára. A rendelkezésre álló minta alapján kilenc csoportot sikerült elkülönítenünk az akusztikus P-hullámsebesség, míg hatot a jósági tényező jellemzése céljából. Azonos kőzettípus esetén vagy a pórusgeometria, vagy a pórusszerkezet növekedése a fajlagos felület és a porozitás csökkenése miatt növekszik, de a növekvő átlagos hidraulikus sugár a telített homokkő P-hullámsebességének és jósági tényezőjének növekedését eredményezi. E minőségi megállapításon túl a csoportosítási eljárás lehetővé teszi, hogy a porozitás- és permeabilitás-adatok ismeretében becslést végezzünk a terjedési sebességre és a jósági tényezőre.

A tanulmányban bemutatott közzefizikai mennyiségek statisztikai elven alapuló (automatikus) csoportosítását klaszterelemzéssel végezhetjük el. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén intenzív kutatás folyik a többváltozós (feltáró) statisztikai módszerek (faktoranalízis, klaszteranalízis) fejlesztése, robusztifikálása és olajipari alkalmazása terén. A tanszéki kutatásokhoz kapcsolódva erre mutat be példát Akbar (2019) diplomamunkájában, melyben a nem-hierarchikus csoportosítási eljárással vizsgálta a pórusgeometriai/pórusszerkezeti és szeizmikus jellemzők kapcsolatát szénhidrogén-tároló homokkőekben és karbonátokban. A robusztus és nagy statisztikai határfokú leggyakoribb érték (MFV) módszerrel (Steiner 1991) kombinált K-középpontú klaszteranalízist alkalmazva jelentős javulás érhető el az egyes kőzetcsoportok elkülönítése esetén. Kimutatható, hogy az MFV módszer hatékonyabban működik a hagyományos euklideszi távolságmetrikán alapuló klaszterelemzéshez képest, mely a szeizmikus jellemzők vonatkozásában is erősebb korrelációt biztosít. Az  $L_2$  normán alapuló klaszterelemző eljárás meglehetősen érzékeny a porozitás-permeabilitás kapcsolatokra jellemző

kiugró értékek jelenlétére, melyeket a tárolókőzetben általában az agyagok és az aktív mikrorepedések megjelenése okozhat. Az MFV módszer ezzel szemben – a kiugró adatokkal szembeni rezisztens viselkedése miatt – hatékonyabban alkalmazható a csoportok elkülönítésére és a közetfizikai jellemzők (optimális) meghatározására.

### Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A szerzők köszönetet mondanak *Dobróka Mihály* professzornak (Miskolci Egyetem) és *Szabó István* (MOL Nyrt.) közetfizikus szakértőnek a szakmai támogatásért.

### A tanulmány szerzői

Muhammad Nur Ali Akbar, Szabó Norbert Péter

### Hivatkozások

Akbar M. N. A. (2019): On the influence of internal pore structure on compressional sonic wave characteristics in reservoir rocks. MSc Thesis, University of Miskolc.

Best A. I., McCann C., Sothcott J. (1994): The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks. *Geophysical Prospecting*, 42, 151–178.

Dobróka M., Molnár J. S., Szűcs P., Turai E. (2014): Pressure dependence of seismic Q – a microcrack-based petrophysical model. *Near Surface Geophysics*, 12, 427–437.

Harmsen G. J. (1955): The concept “hydraulic radius” in porous media. *Petroleum Transactions, AIME* 204, 274–277.

Han D. H., Nur A., Morgan D. (1986): Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51, 2093–2107.

Han D. (1987): Effect of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments. PhD Dissertation, Stanford University.

Klimentos T., McCann C. (1990): Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones. *Geophysics*, 55, 998–1014.

Kozeny J. (1927): Über kapillare Leitung des Wassers im Boden (Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung). *Sitzungsber. Akad. Wiss., Wien, Math-Naturwiss.*, KL 136, 271–306.

Martin N. W. (1996): Are P- and S-wave velocities and attenuations related to permeability? Ultrasonic seismic data for sandstone samples from the Writing-On-Stone Provincial Park in Alberta. MSc Thesis, University of Calgary.

Permadi P., Susilo A. (2009): Permeability prediction and characteristics of pore structure and geometry as inferred from core data. SPE/EAGE Abu Dhabi, 19–21 October, SPE 125350-PP. DOI: 10.2118/125350-MS.

Prakoso S., Permadi P., Winardhie S. (2016): Effects of pore geometry and pore structure on dry P-wave velocity. *Modern Applied Science*, 10, 117–133.

Prasad M. (1998): Empirical trends in velocity and quality factor properties of reservoir rocks. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 17(1).

Prasad M. (2003): Velocity–permeability relations within hydraulic units. *Geophysics*, 68, 108–117.

Raymer L. L., Hunt E. R., Gardner J. S. (1980): An improved sonic transit time-to-porosity transform, SPWLA Transactions, 21st Annual Logging Symposium, Paper P.

Steiner F. (1991): The most frequent value: Introduction to a modern conception of statistics. *Akadémiai Kiadó*.

Wibowo A. S. (2014): Karakterisasi batuan karbonat berdasarkan geometri dan struktur pori-pori. Doctoral dissertation, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

Wibowo A. S., Permadi P. (2013): A type curve for carbonates rock typing. *Proceedings of the IPTC Beijing, China*, 26–28 March, IPTC-16663.

Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner I. W. (1956): Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 12, 41–70. A P-hullám jósági tényezőjének vizsgálata

## Függelék

1. táblázat. A tanulmányban felhasznált homokkő adatrendszer (Prasad, 2003)

| Minta sorszáma | $\phi$ (%) | $V_d$ (%) | $V_p$ (m/s) | $Q_p$ | $k$ (mD) | Minta sorszáma | $\phi$ (%) | $V_d$ (%) | $V_p$ (m/s) | $Q_p$ | $k$ (mD) |
|----------------|------------|-----------|-------------|-------|----------|----------------|------------|-----------|-------------|-------|----------|
| 1              | 3,41       | 6,76      | 5171        | 97    | 0,02     | 35             | 17,18      | 15        | 4362        | 9     | 0,13     |
| 2              | 3,46       | 0         | 5091        | 62    | 0,005    | 36             | 21,19      | 15        | 3700        | 31    | 11,42    |
| 3              | 4,89       | 0         | 5048        | 42    | 0,02     | 37             | 21,73      | 22        | 3572        | 22    | 7,1      |
| 4              | 6,36       | 26,2      | 4695        | 17    | 0,06     | 38             | 22,2       | 25        | 3500        | 10    | 1,13     |
| 5              | 7,52       | 0         | 4735        | 37    | 0,02     | 39             | 25,41      | 20        | 3314        | 20    | 5,78     |
| 6              | 9,79       | 9,75      | 3917        | 22    | 0,28     | 40             | 26,32      | 20        | 3299        | 25    | 10,27    |
| 7              | 13,4       | 0         | 4126        | 33    | 2,51     | 41             | 27,12      | 25        | 3000        | 11    | 0,45     |
| 8              | 17,35      | 2,71      | 3780        | 31    | 0,24     | 42             | 27,33      | 5         | 3666        | 27    | 305,8    |
| 9              | 19,1       | 10        | 3488        | 8     | 1,4      | 43             | 27,39      | 23        | 2952        | 10    | 9,3      |
| 10             | 23,2       | 10        | 3580        | 34    | 22       | 44             | 27,73      | 17        | 3090        | 19    | 3,5      |
| 11             | 23,4       | 5         | 3751        | 19    | 295      | 45             | 27,87      | 17        | 2990        | 18    | 9,59     |
| 12             | 23,9       | 9         | 3601        | 17    | 68       | 46             | 27,96      | 15        | 3675        | 18    | 33,67    |
| 13             | 25,2       | 9         | 3466        | 13    | 818      | 47             | 28,04      | 20        | 3181        | 18    | 10,05    |
| 14             | 26,9       | 4         | 3726        | 21    | 1030     | 48             | 28,79      | 18        | 3056        | 20    | 5,47     |
| 15             | 8,96       | 6         | 4947        | 22    | 0,13     | 49             | 28,87      | 23        | 2909        | 19    | 7,03     |
| 16             | 9,96       | 7         | 4705        | 32    | 0,01     | 50             | 30,31      | 12        | 3627        | 17    | 17,77    |
| 17             | 10,22      | 9         | 4895        | 12    | 0,16     | 51             | 33,59      | 15        | 3195        | 16    | 2,25     |
| 18             | 11,39      | 6         | 4666        | 37    | 0,46     | 52             | 35,09      | 30        | 3108        | 10    | 73,26    |
| 19             | 13,11      | 7         | 4666        | 28    | 3,67     | 53             | 36,04      | 16        | 3121        | 19    | 21,16    |
| 20             | 13,47      | 14        | 4498        | 12    | 0,06     | 54             | 20,3       | –         | 3754        | 33    | 8        |
| 21             | 13,72      | 0,5       | 4950        | 613   | 87,65    | 55             | 20,3       | –         | 3707        | 31    | 8        |
| 22             | 14,15      | 1         | 4960        | 79    | 150,7    | 56             | 20,3       | –         | 3771        | 41    | 8        |
| 23             | 14,37      | 1         | 5078        | 185   | 255,9    | 57             | 20,9       | –         | 3867        | –     | 2040     |
| 24             | 14,47      | 0,2       | 4788        | 712   | 220,9    | 58             | 20,9       | –         | 3976        | 48    | 2040     |
| 25             | 15,13      | 4         | 4794        | 34    | 11,06    | 59             | 20,9       | –         | 3903        | –     | 2040     |
| 26             | 15,18      | 0,7       | 4942        | 394   | 160,4    | 60             | 20,9       | –         | 3921        | –     | 2040     |
| 27             | 15,41      | 15        | 4246        | 19    | 52,42    | 61             | 24,6       | –         | 3572        | 38    | 58       |
| 28             | 15,46      | 15        | 4152        | 21    | 0,05     | 62             | 21         | 4         | 4400        | 100   | 100      |
| 29             | 15,72      | 5         | 4564        | 127   | 87,55    | 63             | 21         | 4         | 4400        | 100   | 100      |
| 30             | 16,11      | 15        | 4152        | 20    | 50,51    | 64             | 17         | <1        | 4460        | 65    | 1170,7   |
| 31             | 16,5       | 15        | 4149        | 18    | 41,74    | 65             | 17,1       | 1         | 4300        | 35    | 587,8    |
| 32             | 16,65      | 12        | 4010        | 29    | 0,37     | 66             | 22,1       | 1         | 3770        | 59    | 794,2    |
| 33             | 16,71      | 8         | 4381        | 40    | 0,44     | 67             | 25,9       | 3         | 3060        | 26    | 977,1    |
| 34             | 17,13      | 12        | 3933        | 26    | 2,21     |                |            |           |             |       |          |