

Matematikai módszer a márga minták kialakítása során keletkező mikrorepedések hatásának eliminálására

REMECZKI FERENC okl. olajmérnök, PhD hallgató, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, Miskolci Egyetem



A cikk egy újszerű megközelítést igyekszik bemutatni rendkívül tömött, nem hagyományos szénhidrogén tárolóként definiált délkelet-magyarországi mészmárga formációból származó sérült minták laboratóriumi körülmények közötti áramlási viszonyainak meghatározására.

Bevezetés

Az elmúlt évtizedben fokozatosan nőtt az igény a nem konvencionális szénhidrogén-tárolók tulajdonságainak meghatározása iránt. A Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézete (ME AFKI) jelentős részét valósítja meg a GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság-növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektnek, amelynek keretein belül nem hagyományos tárolókból származó kőzetminták kőzetfizikai és kőzetmechanikai megismerése, kutatása zajlik termeltethetőségük megítélése céljából.

Az egyik vizsgált terület a Pannon-medence délkelet-magyarországi részén található üledékes képződményekben mélyített kutakkal határolható le. A kutatási program a litológiai besorolást tekintve, az Endrődi Formáció részét képező Tótkomlói Tagozat – továbbiakban EFTK – mészmárgáit, illetve márgáit célozta meg. Ezek a képződmények többnyire vékony kifejlesztésű tömör üledékek, amelyek a Pannon-medencét északról feltöltő törmelkes és delta üledékektől távol jöttek létre. Ebben a környezetben a szedimentáció mértéke rendkívül alacsony, ellenben a karbonáttartalom magas (70% körüli). Az itt létrejött mészmárgák litológiai változékonysága nem számottevő, helyenként finomszemcsés iszapos üledékek figyelhetők meg az összletben, amelyek a rétegek alsóbb részein találhatók. A mészmárga formációk egészen az állandósult környezet végéig tartanak, pontosabban, amíg a deltafront üledékek el nem érik a területet. Ebben az esetben, a márga jött létre először, később a turbidit homokok és végül a delta üledékek, így megtörténhetett a feltöltődés. A formációk állapotát tekintve azonban számos különböző mészmárga különíthető el, amelyek sekély-, közép- és mélytengeri környezetben ülepedtek le. A vizsgált minták közép- és mélytengeri környezetből származnak. Kőzetfizikai szempontból az eddigi tapasztalatok alapján, a márgák tulajdonságai a kialakulási környezet mélyülésével romlanak. Fontos azonban megemlíteni, hogy elsődleges porozitásukon felül fizikai tulajdonságaikat nagyban befolyásolja az ezekben a kőzetekben gyakran előforduló mikrorepedés rendszer.

Az EFTK márga mintái döntő részben mikro- és nanoméretű póruscsatornákkal rendelkeznek. Laboratóriumi mérések nagy fegyelmet és körültekintést igényelnek. Az EFTK márgái sokszor különös módon reagálnak feszültség viszonyaik megbomlására, így a mintatestek kifúrása, előkészítése során sajnos könnyen megsérülhetnek, széteshetnek.

Az ME AFKI-ban a porózus rendszerek gázra vonatkoztatott áteresztőképességének mérésére két eszköz áll rendelkezésre. Az egyik a ME AFKI kísérleti tapasztalatai és az API-RP27 alapján kifejlesztett nitrogén permeaméter, a másik egy Nano-K permeaméter, amely azért különleges eszköz, mert rendkívül kifinomult térfogatáram-mérővel és speciális, nagyon tömör kőzetekhez kifejlesztett kiértékelő szoftverrel rendelkezik.

A várható mérési eredmények alapján a mérési program tervezési alapja a Nano-K eszköz volt, amelynek mérési tartománya a műszaki leírása szerint 10^{-3} mDarcy – 1 attoDarcy (10^{-15} mDarcy) közötti. A mérési határon lévő és a 10^{-3} mDarcy-nál kissé kedvezőbb tulajdonságú porózus rendszerek jellemzése azonban más megoldást igényel.

A rendkívül kis permeabilitás a tároló kőzetek pórusszerkezetének a következőképpen, ezekben a kőzetekben a pórustér meghatározó részét mikro-, sőt nanoméretű pórusok és póruscsatornák alkotják, az átlagos pórusugár a néhány nanométertől (10^{-9} m) néhány mikrométerig terjed (10^{-6} m).

A nem konvencionális tárolók kezdeti nemzetközi termelési adatai és tapasztalatai azt mutatták, hogy az ilyen típusú kőzetekből a gáztermelés több volt a vártnál, a nagyon kis Darcy-áteresztőképességük ellenére. A rendkívül kis permeabilitású formációkból történő szénhidrogének termelésének növekedésével párhuzamosan a nemzetközi szakirodalomban egyre komplexebb tanulmányok foglalkoztak a pala és tömött homokkő porózus rendszerekben kialakuló transzportfolyamatok kérdéskörével [1, 2]. A kutatók egyetértettek abban, hogy a nanoméretű póruscsatornában a *Darcy-jellegű áramláson* kívül fontos szerephez jut a diffúziós jellegű, úgynevezett *Knudsen áramlás* is. Megállapítható, hogy a mikro- és nanoméretű pórus-

csatornában lejátszódó áramlásra (különösen laboratóriumi körülmények között) már nem, vagy csak korlátozottan érvényes a hagyományos és széleskörűen alkalmazott Darcy-jellegű áramlási modell.

Tömött kőzetek porózus rendszerében kialakuló gázáramlás jellemzésére a *Javadpour* és társai [3, 4] által közölt megoldás ad lehetőséget. Jelen cikkben bemutatott módszer alkalmas a sérült vagy a 10^{-4} – 10^{-3} mDarcy-nál kissé kedvezőbb átteresztőképességű minták jellemzésére. A számított eredmények kiegészítik és/vagy pótolják a ME AFKI által jelenleg mérőműszerrel az eszköz hiányából vagy a minta méretéből, sérüléséből stb. adódóan nem mérhető tartományban történő méréseket, továbbá a Nano-K mérési eredményeivel megegyező struktúrát eredményeznek.

Elméleti alapok

A *Darcy egyenlet*, egyszerűsége miatt, hosszú időn keresztül elfogadott volt. Az egyenletet szükségességéből többször módosították, még abban az esetben is, ha a formulában foglaltak torzítják az egyenlet alapfeltételezéseit. Ez a probléma is hasonló; egy porózus rendszer leírása Darcy-jellegű egyenlettel, annak ellenére, hogy a kialakuló áramlási rendszer fizikai alapjai eltérők.

A Darcy és a Knudsen típusú diffúziós áramlás elkülönítésére egy dimenzió nélküli paraméter, az úgynevezett *Knudsen szám*, K_n használható. *Javadpour* és társai a *Navier-Stokes egyenlet* alapján a két áramlás elkülönítésére a Knudsen számot ajánlják.

A porózusokban kialakuló áramlás teljes tömegáram fluxusa (J) a nyomáskülönbség vezérelte tömegáram (advekción) fluxusának (J_a) és a Knudsen típusú diffúzió (J_D) fluxusának összege. Az advektív tömegáram fluxusát egy kör keresztmetszetű porúscsatornában lamináris áramlásnál a *Hagen-Poiseuille egyenletből* határozhatjuk meg. *Roy* és társai [5] megmutatták, hogy a nano porózusokban kialakuló Knudsen diffúzió nyomásgradiens formájában leírható. *Brown* és társai [6] egy elméleti dimenzió nélküli paramétert (F) vezettek be a porúscsatorna falán jelentkező siklás figyelembevételére. A gázáramlás teljes tömegfluxusa az alábbi módon írható fel:

$$J = D_K \frac{M}{RT} \frac{\Delta p}{L} + F \frac{\rho_{avg} r^2}{8\mu} \frac{\Delta p}{L} = \left(\frac{2r}{3} \frac{M}{RT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} + F \frac{\rho_{avg} r^2}{8\mu} \right) \frac{\Delta p}{L} \quad (1)$$

Összenyomható közeg térfogatáram fluxusa a megfelelően módosított Darcy egyenlet felhasználásával a következő alakot ölti:

$$\frac{q}{A} = \left(\frac{k_D \rho_{avg}}{\mu} \right) \frac{(p_1 - p_2)}{L} \quad (2)$$

Fenti összefüggés alkalmazhatóságának alsó kor-

látja a tízes-százás mikrométer (μm) nagyságrendbe eső porústorok méreteknél van. A nano porózusokban létrejövő gázáramlás térfogatfluxusa a következő módon írható fel:

$$\frac{q}{A} = \left(\frac{2r}{3 \cdot 10^3} \frac{M}{RT \rho_{avg}} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} + F \frac{r^2}{8\mu} \right) \frac{(p_1 - p_2)}{L} \quad (3)$$

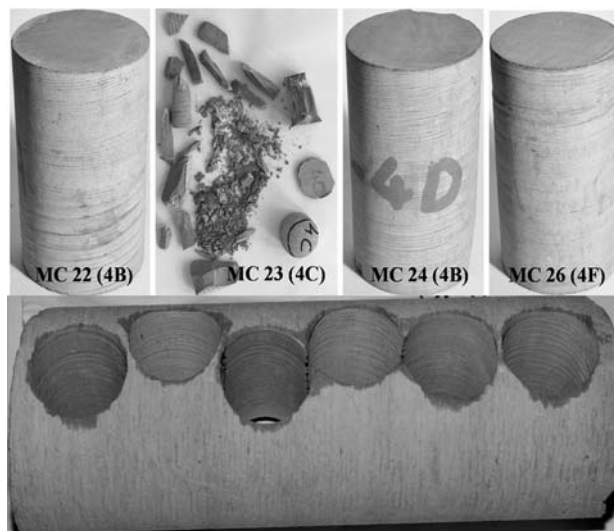
Megfigyelve az (2) és (3) egyenletek alakját jól látható, hogy bevezethető az úgynevezett látszólagos permeabilitás, k_{app} (apparent permeability) paraméter:

$$k_{app} = \frac{2r}{3} \frac{\mu M}{RT \rho_{avg}^2} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} + F \frac{r^2}{8\rho_{avg}} \quad (4)$$

A látszólagos és a Darcy permeabilitás hányadosának ábrázolása alkalmas a Knudsen típusú diffúziós áramlás hatásának elemzésére:

$$\frac{k_{app}}{k_D} = \left[\frac{2}{3} \frac{\mu M}{10^3 RT \rho_{avg}^2} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \frac{8}{r} + \sqrt{\frac{8\pi RT}{M}} \frac{\mu}{\rho_{avg} r} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \frac{1}{\rho_{avg}} \quad (5)$$

Az (5) egyenlet alapján megállapítható, hogy minél kisebb a porúscsatorna sugara és/vagy az áramlás átlagos nyomása, annál nagyobb lesz a különbség a k_{app} látszólagos és k_D Darcy permeabilitás között. Az összefüggés egyben azt is mutatja, hogy a Knudsen diffúzió aránya a gáz teljes tömegáramhoz kisebb nyomásokon jelentősebb. A k_{app} és k_D hányadosa megközelíti az 1-et, ha vagy a porúscsatorna vagy a hőmérséklet megnő. A jelenség magyarázatát a Knudsen szám nyomás és hőmérséklet függésében találjuk. A Knudsen szám a gáz molekula közepes szabad úthosszának és a porúscsatorna átlagos átmérőjének a hányadosa, adott hőmérsékleten és nyomáson.



1. ábra: A vizsgálatban szereplő mintatestek

A Javadpour és társai által kifejlesztett matematikai modell alkalmazása megfelelő körülményeket és alapos megfontolást igényel.

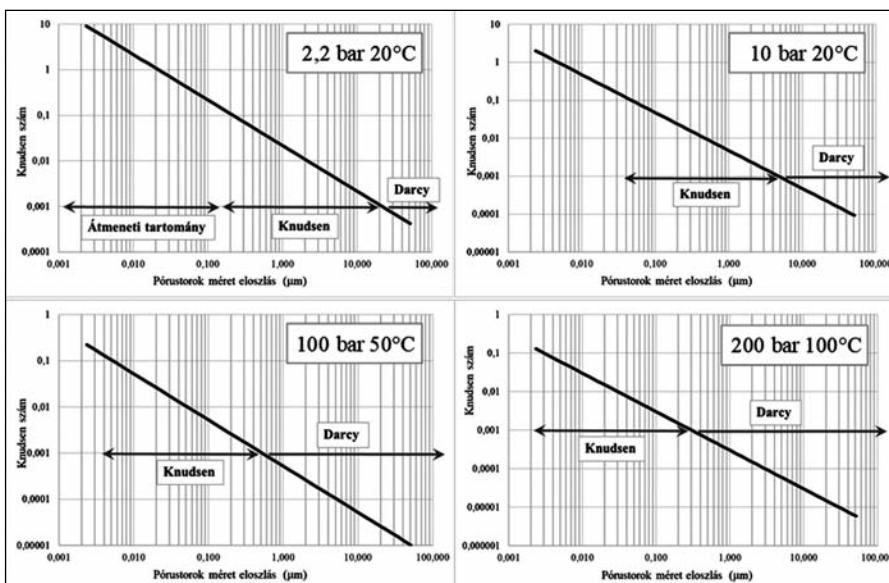
A modell és modell minták bemutatása

A bemutatott elméleti modell alapján elkészíthetők az úgynevezett modellminták, melyek a higany poroziméterrel mért pórustorok méret-tartomány eloszlás alapján, eltérő átmérőjű csövekből épülnek fel.

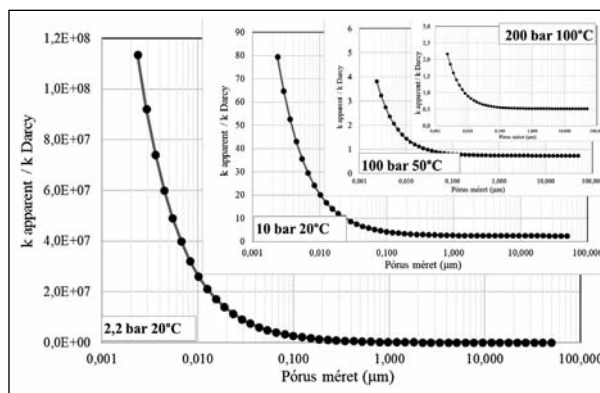
Alapbeállításban a 'laboratóriumi' körülmények (p , Δp , T), a 'szimulációs mérésben' alkalmazott gáz (nitrogén), valamint a minták hossza megegyezik a Nano-K permeaméter mérési körülményeivel. A modellezés alapja egy olyan mintatest lehet, amely rendelkezik héliumos és higanyos porozimetriai, valamint Nano-K permeametriai eredményekkel. Szigorú feltételrendszer alkalmazásával az ilyen adatokkal rendelkező minta környezetéből származó, sérült vagy a Nano-K eszközön nem mérhető mintatestek 'tömegáram átbocsajtó' értéke meghatározható.

Sikerrel került alkalmazásra a módszer az alábbiakban bemutatott esetben. Az 1. ábrán látható minták mérései és eredményeinek értékelése közben az volt tapasztalható, hogy bizonyos minták esetében a Nano-K eszközzel nem lehetett elvégezni a mérést. A hagyományos permeaméteren mért értékek viszont nagyságrendekkel nagyobbak adódtak. A feltételben szereplő alapadataik rendelkezésre álltak és nagy hasonlóságot mutattak, mondhatni ideális körülmények alakultak ki a modell alkalmazására.

Az alap modellminta az MC 26 (4F) jelű minta volt. A modellezés a higany poroziméterrel mért pórustorok méreteloszlás alapján kialakított modell

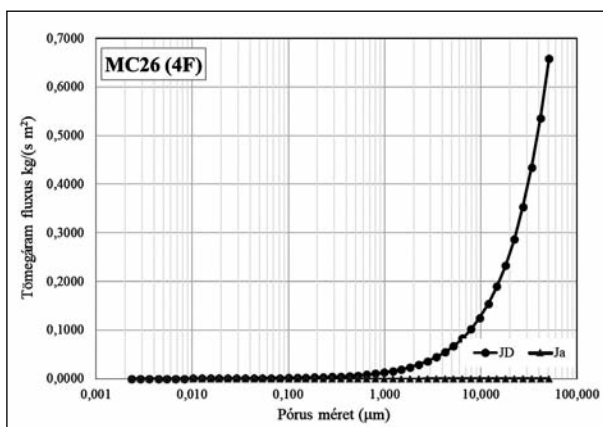


2. ábra: Áramlási tartományok eltérő pT körülmények között

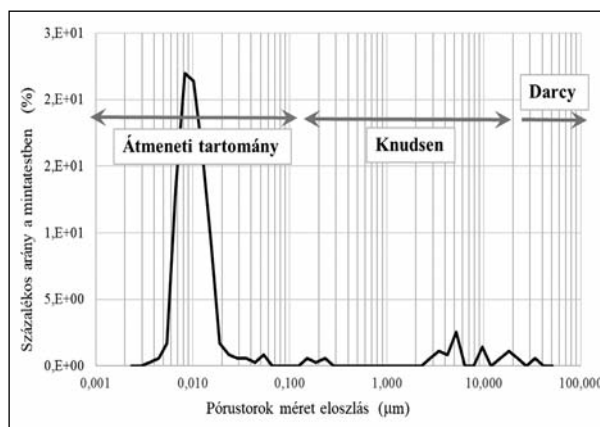


3. ábra: k_{app} és k_D hányadosok eltérő pT körülmények között

minták póruscsatornáit jellemző Knudsen-szám meghatározásával kezdődött. A Knudsen-szám értéke alapján meghatározható a kialakuló áramlás típusa. A 2. ábra az MC 26 modellmintán meghatározott áramlási tartományokat mutatja eltérő nyomás és hőmérséklet-viszonyok között (2,2 bar/20 °C, 10 bar/20 °C, 100 bar/50 °C, 200 bar/100 °C).



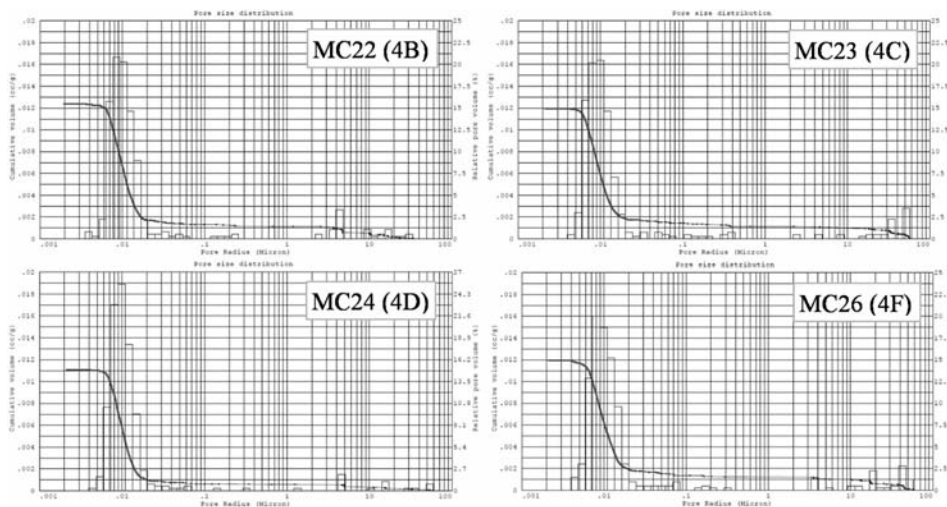
4. ábra: A Knudsen (J_D) és az advektív (J_a) tömegáram fluxusainak részaránya



5. ábra: Pórustorok tartományok eloszlása az MC 26 modellmintán

1. táblázat: A mintatestek főbb petrofizikai jellemzői

Minta neve	Mélység tartomány (m)		Higanyos porozitás (%)	Átlagos pórusátmérő (µm)	Fajlagos felület (m ² /g)	Teljes porozitás (%)	Mátrix sűrűség (g/cm ³)
MC 22	2178,4	2178,7	3,222	0,008495	2,291	3,222	2,605
MC 23	2178,4	2178,7	3,080	0,009856	2,281	3,080	2,578
MC 24	2178,4	2178,7	2,894	0,009912	2,139	2,894	2,613
MC 26	2178,4	2178,7	3,079	0,008054	2,238	3,079	2,584



6. ábra: A minták póruszorok méret eloszlása

Az ábrán látható diagramok a póruszorok méretel-
oszlásának (mikrométer) függvényében ábrázolják a
Knudsen szám értékeket. Jól követhető, hogy a növekvő
nyomással és hőmérséklettel a Knudsen áramlási
tartomány egyre kisebb pórusok felé tolódik el. Ez a
magyarázata annak, hogy kis nyomású, valamint laboratóriumi
körülmények között 10–1 mikronos pórus-
torok méret alatt már nem érvényes a Darcy áramlási
modell. A Knudsen áramlási tartományon túl, a 0,1
mikron alatti póruserekben a Knudsen áramlási
modell érvényessége is megszűnik. A nano pórusterek
felé haladva az átmeneti tartomány majd a szabad
molekula mozgás tartománya következik.

A 3. ábra a modellmintán ugyanezen körülményen-
ken számított k_{app} és k_D hányadosok értékeit mutatja a
póruszorok átmérő függvényében.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a Knudsen diffúzió
miatt a k_{app}/k_D hányadosok értékei kisebb nyomáso-
kon jelentősen nagyobb értékűek. Ebből következően
a Knudsen áramlás rész-
aránya a teljes tömeg-
áramban kisebb nyomá-
sokon jelentősebb. A pó-
ruscsatorna méretek függ-
vényében a Knudsen
(J_D) és az advektív (J_a)
tömegáram fluxusainak
részarányát a teljes flu-
xusban (J) mutatja be a
4. ábra.

2. táblázat: Számítási eredmények

Minta neve (cm ³ /sec)	Számított térfogatáram (cm ³ /sec)	Mért térfogatáram (mD)	Hagyományos permeabilitás (mD)	Nano-K permeabilitás
MC 22	0,0000603			
MC 23	0,0000718			
MC 24	0,0000355		X*10 ⁺²	
MC 26	0,0000731	0,000146937		Y*10 ⁻¹

A 2,2 bar-on és 20 °C-on végzett számítás
eredményei mutatják a
Knudsen áramlás (J_D)
egyértelműen magasabb
hozzájárulását.

Az 5. ábrán az MC
26 minta pórusméret el-
oszlását mutatja, melyen
az áramlási tartományok
is feltüntetésre kerültek.
A 2,2 bar-on és 20 °C-on
végzett számítás eredmé-
nyei mutatják, hogy
ilyen körülmények kö-
zött a póruszorok méret
tartomány jelentős része
a mérés során érdemben
nem vesz részt a tömeg-
áramban. Visszautalva a
bevezetésben leírtakra és
a 2. ábrára érthetővé
válik, hogy tároló körü-
lmények között – az
áramlási tartományok
elcsúszása miatt – miért
növekszik meg a Knud-
sen zóna jelentősége.

A módszer alkalmazása

A számítások eredményei az alábbiakban foglal-
hatók össze. A vizsgált mintatestek petrofizikai mérés-
sekből származó eredményeit az 1. táblázat mutatja.

A mintavételek helyeinek közelsége (1. ábra),
valamint a petrofizikai mérési eredmények (1. táblázat)
nagyfokú hasonlósága alátámasztják a modellezés
alkalmazhatóságát és lehetővé teszik az illesztés fino-
mitását. A pórusméret eloszlásgörbék lefutásának
egyvezései (6. ábra) alapozzák meg a modellminták
mikrorepedéseinek eliminálását.

A modellezés során, a modellminták felületi
mikrorepedéseinek eliminálása a higany piknometria
póruszorok-méret eloszlásainak első, maximum a má-
sodik tartományát érintő korrekcióval történik. Az
eredeti minta mért és a korrigált minták számított
tömegáram értékeit a 2. táblázat mutatja:

Az adatok elemzése – főként az MC 22 jelű minta higany porozimetriás eredményei – alátámasztják, hogy az MC 26 jelű minta felületén kismértékben mikro méretű repedések vannak jelen. Tekintettel arra, hogy az MC 22 jelű minta első 3 pórutorokméret-tartománya hiányzik, feltételezhető, hogy ez a minta reprezentálja az eredeti tulajdonságokat. Ennek megfelelően az MC 26 minta modellje is korrigálásra került, eredeti mérési eredménye mellett a táblázat – az összehasonlító elemzésre alkalmas – számított térfogatáram oszlopában a korrekcióval meghatározott értéke is szerepel.

Konklúzió

Az Endrődi Formáció részét képező Tótkomlói Tagozat márgáinak bizonyos mintái esetén a minta kialakítás és előkészítés mikrorepedések megjelenését okozza. A repedések jelenléte eltorzítja a mérési eredményeket vagy akár ellehetetleníti a mérés végrehajtását. A bemutatott matematikai módszer, megfelelő adatok birtokában, alkalmas szintetikus mérési eredmények előállítására. A számított térfogatáramok támogatják a mérési eredmények értelmezését és így a márgák megismerhetőségét.

- [1] *F. Chivan, C. S. Rai, C. H. Sondergeld*: Shale gas permeability and diffusivity inferred by improved formulation of relevant retention and transport mechanisms. *Transport Porous Media* (2011) 86-925-944 DOI 10.1007/s11242-010-9665-x. Published online: 14 October 2010 Springer Science + Business Media B.V. 2010
- [2] *N. G. Hadjiconstatinou*: The limits of Navier-Stokes Theory and Kinetic extensions for describing small-scale gaseous hydrodynamics, *Physics of Fluids*, vol. 18. No. 11. pp. 11301-11320, November 2006.
- [3] *F. Javadpour*: Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone) *Journal of Canadian Petroleum Technology*, August 2009, Volume 48, No. 8.
- [4] *F. Javadpour, D. Fisher, M. Unsworth*: Nanoscale gas flow in shale gas sediments *Journal of Canadian Petroleum Technology*, October 2007, Volume 46, No. 10.
- [5] *Roy S., Raju R., Chuang H. F., Cruden B. A., Meyyappan M.*: Modeling gas flow through microchannels and nanopores, *Journal of Applied Physics*. 93 (2003) 4870–9.
- [6] *Brown G.P., Dinado A., Cheng G.K., Sherwood T.K.*: The Flow of Gases in Pipes at Low Pressures; *Journal of Applied Physics*, Vol. 17, pp. 802-813., October 1946.

REMECZKI FERENC a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán végzett 2018-ban okleveles olajmérnöként. 2016 óta az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet munkatársa.

Energetika, klímavédelem a Mérnökújságban

A Mérnökújság 2020. áprilisi számában több cikk is foglalkozik a klímapolitikával.

„A második félidő előtt” címmel *Dubniczky Miklós* főszerkesztő interjúja olvasható (25-27. old.) *Botos Barbarával*, az Innovációs és Technológiai Minisztérium klímapolitikáért felelős helyettes államtitkárával, a januárban elfogadott nemzeti energiastratégiáról és éghajlatváltozási cselekvési tervről, a nemzeti energia- és klímatervről, valamint a klíma- és természetvédelmi akciótörvéről. A 2050-re elerendő „klímasemlegesség” 1990-hez képest 95%-os csökkentést kíván elérni a CO₂ kibocsátásban, a maradék 5%-ot pedig új erdőtelepítéssel ellensúlyozza. Ezt elsősorban a villamosáram-termelés CO₂ mentesítésével (atom+zöld), az elektromobilitással (személyautók és városi buszok) és a fűtési igények csökkentésével, megújulóakra alapozásával szándékozzák elérni.

Az „első félidőben” 32%-kal mérsékeljük a kibocsátást, ezzel Magyarország az első 9 ország között van.

Az államtitkár konkrét kérdésre a következőket mondta: „*A Mátrai Erőmű zöld jövőképeinek gyakorlatba ültetésével a következő évtized talán legnagyobb klímavédelmi és kiemelt régiófejlesztési projektjét fogjuk megvalósítani. A létesítmény a térség legnagyobb foglalkoztatója, működése, fejlesztése létfontosságú nemcsak a 2100 közvetlen munkavállaló és családjaik számára, hanem ellátásbiztonsági szempontból sokkal szélesebb körben, országosan is.*”

„Az új energia stratégia a gázipar szemszögéből” c. cikkében (28-30. old.) *Csallóközi Zoltán* – a Főgáz Zrt. ny. igazgatója, a MMK Olajipari Tagozat elnöke – fogalmazott meg észrevételeket, kritikákat a kormány januárban elfogadott új „Nemzeti energiastratégiájával” kapcsolatban. Elemezve a hazai gázellátást (termelést és importot), gázhálózatot, tárolót és fogyasztókat a következőket állapította meg:

– Az import 80-ról 70%-ra csökkentése nem valósítható meg a hazai termelési korlát miatt.

– A tervezett felhasználás-csökkentés évi 10 Mrd m³-ről 8,7 Mrd m³-re nem valósítható meg (a lakossági fűtésekre csak elenyésző hatásúak, mert újabb földgázra kötött lakásépítések folynak, és a földgáztüzelésű erőművekre pedig szükség van a rendszer kiegyensúlyozására). Az európai országokban is a gázfogyasztás növekedésével számolnak.

„A klímaváltozás színe és fonákja” c. cikkében *Bezege András*, a Magyar Ipari Ökológiai Társaság elnöke a Föld felmelegedésének fizikai okait mutatja be (besugárzás-kisugárzás-üvegházhatás). Az üvegházhatás növelésével az ember fokozza a felmelegedést. Megemlíti a csökkentés lehetőségeit (CO₂ kivonás-tárolás, fásítás), ill. további reményekre adhat okot a nukleáris hulladéktól mentes fűzési reaktorok tervezett, ill. folyamatban lévő építése (Franciaország, Nagy-Britannia).

HJ-PT