

Kőzetfizikai modell az akusztikus hiszterézis leírására

DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2,*}, SOMOGYINÉ MOLNÁR JUDIT¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

*E-mail: dobroka@uni-miskolc.hu

Közismert, hogy a kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebessége nemlineáris kapcsolatban áll a nyomással, és a kőzetek kvázisztatikus rugalmas tulajdonságai hiszterézist mutatnak. A hiszterézis jelenségének jellemzése azért fontos, hogy a fluidumok kitermelési folyamata során a tárolók mechanikai tulajdonságait jobban megértsük. A cikkben új kőzetfizikai modellt mutatunk be, mely leírja az akusztikus hiszterézist. A modell megadja az akusztikus hullám terjedési sebessége és a kőzetnyomás közti kapcsolatot mind fel- és leterhelési szakasz esetén. A modell (a nemzetközi irodalomban is elfogadott) alapelve, hogy a kőzetekben a felterhelés során bezáródott mikrorepedések újra kinyílnak a leterhelés során. A modellt szénhidrogén-kutató fúrásokból származó kőzetmintákon mért longitudinális hullámsebesség-adatrendszeren alkalmaztuk. A mérések során az impulzusátviteli módszert használtuk. A mérések különböző nyomáson történtek, és a modellparamétereket linearizált inverziós módszerrel határoztuk meg. Az inverziós eljárás keretében számított adatok jól illeszkednek a mért adatokhoz, ami azt bizonyítja, hogy az akusztikus hiszterézist leíró új kőzetfizikai modell a gyakorlatban jól alkalmazható.

Dobróka, M., Somogyi Molnár, J.: Petrophysical model for describing acoustic hysteresis

It is well known that the change of acoustic wave velocity propagating in rocks is nonlinear with respect to pressure and the quasistatic elastic properties of rocks are hysteretic. Characterization of hysteretic behaviour is important for a mechanical understanding of characteristics of reservoirs during depletion. In this paper a petrophysical model is presented which describes the acoustic hysteresis. The model provides the connection between the propagation velocity of acoustic wave and rock pressure both in case of pressurization and depressurization cycles. The model is based on the idea (accepted in the literature) that the microcracks in rocks close during pressurization and reopen during depressurization. The model was applied to acoustic P wave velocity data sets measured on core samples originated from oil-drilling wells. During the measurements the pulse transmission technique was used. Measurements were carried out at various incremental pressures and the model parameters were determined by linearized inversion methods. The calculated data in the inversion procedure matched accurately with measured data proving that the new rock physical model describing acoustic hysteresis applies well in practice.

Beérkezett: 2012. május 10.; *elfogadva:* 2012. augusztus 3.

Bevezetés

A Föld belső szerkezetéről, fizikai állapotáról főként szeizmikus adatok révén nyerünk információt. A szeizmikus/akusztikus hullámterjedés jellemzői a kőzetek fontos mechanikai tulajdonságairól hordoznak információt, ezért a kőzetparaméterek laboratóriumi és in situ vizsgálatában az akusztikus hullám sebességének meghatározása gyakori feladat. A szeizmikus adatok értelmezésénél jelentős szerepet játszik egy adott fizikai környezetben (nyomásállapot) lévő kőzetmintán

laboratóriumban mért szeizmikus/akusztikus tulajdonságok extrapolálása, ezért az akusztikus hullámsebesség nyomásfüggésének laboratóriumban történő tanulmányozása fontos információval szolgál a szeizmikus mérési adatok értelmezéséhez. A kutatók a kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebességét különböző módon, illetve pórusnyomás alkalmazása mellett több évtizede tanulmányozzák. Közismert, hogy a hullámsebesség növekvő nyomás mellett nő, amit számos kutató a kőzetekben lévő mikrorepedések nyomás alatti bezáródásával magyaráz (Somogyiné Molnár, Dobróka 2011).

A kőzetekben terjedő akusztikus hullám sebessége a nyomás nemlineáris függvénye, és a kőzetek kvázisztatikus rugalmas tulajdonságai ún. akusztikus hiszterézist mutatnak (a kőzetet a mechanikai felterhelés, ill. a leterhelés során eltérő hullámterjedési sebesség jellemzi). A hiszterézis jelenségének megismerése lényeges pl. a rezervoármechanika (a szénhidrogén-kitermelés során a tárolók mechanikai tulajdonságainak megértése) és az építőmérnöki mérések (az út alapjának vibrációs tömörítésének folyamata, valamint hidak ívszerkezetének süllyedésének vizsgálata) gyakorlatában (Rudenko, Robsman 2004). Az akusztikus hiszterézis laboratóriumban történő vizsgálata gyakori feladat (Jones, Wang 1981, Ji et al. 2002). A hiszterézis jelensége a mikrorepedések irreverzibilis záródásával (Birch 1960), a pórus-térfogat irreverzibilis csökkenésével (Jones, Wang 1981), valamint a kőzetben lévő kötőanyagok nemlineáris viselkedésével (Hill 1963, Hashin, Shtrikman 1963) magyarázható. A mikrorepedések irreverzibilis záródásának elképzelése szerint a felterhelés során bezáródott mikrorepedések a kőzetben nem nyílnak ki újra maradéktalanul a leterhelési szakaszban. Egy másik elgondolás (Jones, Wang 1981) alapján a magas nyomásértékek mellett a felterhelés során záródott pórusok a leterhelési ciklusban kis nyomásértékeknél már nem veszik fel az eredeti alakjukat és méretüket. Ez a folyamat inkább agyagos kőzetekben játszódik le, melyekben nem jellemzőek a jól körülhatárolható mikrorepedések (Scholz, Kranz 1974). A kőzetekben terjedő rugalmas hullámok sebessége a kőzetalkotó ásványok és kötőanyagok (kőzetváz) típusától, mennyiségétől és struktúrájától, a kőzet porozitásának mértékétől, a póruskitöltő anyagok fajtájától, mennyiségétől valamint a mikrorepedezettségtől is függ. Mikrorepedések és szemcsék környezetében képlékeny ásványok (például klorit, szericit vagy szerpetin) ágyazódhatnak be, ami megváltoztatja a kőzet rugalmas tulajdonságait. A kőzetben lévő szemcsék ugyanis tökéletesen rugalmas testként viselkednek, míg a szemcsék közti kötőanyagok gyakran nemlineárisan rugalmas tulajdonságot mutatnak. Ennek eredményeképpen a kőzet nemlineáris rugalmas viselkedést, hiszterézist mutat.

A kőzetekben terjedő akusztikus hullámsebesség nemlineáris kapcsolatban van a kőzetre ható nyomással (Yu et al. 1993, Best 1997). A nyomás–sebesség kapcsolat exponenciális függvénnyel jellemezhető legjobban (Wang et al. 2005, Singh et al. 2006). Számos empirikus modell létezik a longitudinális sebesség nyomásfüggésének jellemzésére, azonban ezek rendszerint egy alkalmasan választott formula paramétereinek matematikai regressziós eljárás alapján meghatározását adják, fizikai magyarázattal nem szolgálnak a nyomás–sebesség kapcsolatára (Wepfer, Christensen 1991, Ji et al. 2007). Laboratóriumi mérési adatok megfelelő értelmezéséhez olyan kvantitatív modell megalkotására van szükség, amely fizikai magyarázatot is ad a jelenségre. A jelen dolgozatban olyan kőzetfizikai modellt mutatunk be, mely megadja az akusztikus hullám terjedési sebessége és a kőzetnyomás közti kapcsolatot mind fel- és leterhelési szakasz esetén, azaz sikeresen írja le és egyben magyarázatot ad az akusztikus hiszterézisre is.

A nyomásfüggő sebesség modellje a felterhelési szakasz leírására

A hullámsebesség növekvő nyomás melletti növekedésének közismert jelenségét számos kőzetfizikai tanulmány vizsgálja. A nyomásfüggés jelenségének egyik legelfogadottabb kvalitatív magyarázata a növekvő nyomás hatására a kőzetben lévő mikrorepedések záródása (Walsh, Brace 1964). Erre a képre alapozva Somogyi Molnár és Dobróka (2011) kőzetfizikai modellt dolgozott ki az akusztikus hullámterjedési sebesség nyomásfüggésének kvantitatív leírására a felterhelési szakaszon. Ezt a modellt általánosítva a leterhelési szakaszra a hiszterézis jelensége egzaktul leírhatóvá válik.

Vezessük be a (nyitott) mikrorepedések térfogategységre vonatkozó számát (N)! A felterhelési szakaszra kidolgozott kőzetfizikai modell alapfeltevése, hogy a kőzetben $d\sigma$ nyomásnövekedés hatására a nyitott mikrorepedések számában bekövetkezett dN változás (a bezárt mikrorepedések száma) egyenesen arányos a $d\sigma$ nyomásnövekménnyel és a még nyitott mikrorepedések számával. A két alapfeltevést egyesíthetjük egy differenciálegyenletben

$$dN = \lambda N d\sigma, \quad (1)$$

melynek megoldása $N = N_0 \exp(-\lambda \sigma)$, ahol λ egy, az anyagra jellemző új kőzetfizikai paraméter, N_0 a feszültségmentes állapotban ($\sigma = 0$) nyitott repedések száma. A negatív előjel azt fejezi ki, hogy növekvő feszültségnél a repedések bezáródásával a nyitott mikrorepedések száma csökken.

A $d\sigma$ nyomásváltozás hatására a terjedési sebességben bekövetkező dv változás és a bezáruló mikrorepedések dN száma között egyenes arányosságot feltételezünk

$$dv = -\alpha dN, \quad (2)$$

ahol α arányossági tényező (anyagi minőségtől függő konstans), a negatív előjel pedig azt fejezi ki, hogy a sebesség csökkenő repedésszám esetén növekszik. Együttesen megoldva az (1) és (2) egyenleteket a longitudinális hullámsebesség nyomásfüggését leíró modellt kapjuk a felterhelési szakaszra (Somogyiné Molnár, Dobróka 2011)

$$v = v_0 + \Delta v_0 \{1 - \exp(-\lambda \sigma)\}, \quad (3)$$

ahol v_0 a kőzetben terjedő rugalmas hullám sebessége terheletlen állapotban ($\sigma = 0$) és Δv_0 egy új kőzetfizikai állandó (Dobróka, Somogyi Molnár 2012a). A modell keretében a terjedési sebesség a terhelésmentes állapottól (v_0) a nagy kőzetnyomással jellemzett állapotig ($v_{\max} = v_0 + \Delta v_0$) változhat, ahol az összes mikrorepedés zárva van. Tehát a Δv_0 állandót tekinthetjük a kőzetben terheletlen állapotban lévő mikrorepedések által okozott sebességesésnek (Ji et al. 2007). A λ anyagjellemző paraméter fizikai jelentése kétféleképpen is megadható. A $\Delta v = v_{\max} - v$ jelölés (a mikrorepedések jelenléte által okozott sebességesés σ nyomásnál) bevezetésével a (3) egyenlet így is felírható:

$$\Delta v = \Delta v_0 \exp(-\lambda \sigma). \quad (4)$$

Láthatjuk, hogy a σ^* karakterisztikus nyomásnál (ahol $\lambda \sigma^* = 1$) a Δv mennyiség a „kezdeti” Δv_0 értékéről az 1/e-ed részére csökken. A λ petrofizikai jellemző tehát a karakterisztikus nyomás reciproka (Dobróka, Somogyi Molnár 2012b). A λ paraméternek másik jelentést is adhatunk. A tapasztalat azt mutatja, hogy a különböző kőzetek eltérő mértékben „reagálnak” a kőzetnyomás változására, azaz különböző a sebesség nyomásérzékenysége. Az ún. érzékenységi függvényeket gyakran alkalmazzák a szeizmikus (Dobróka 1987, 1988), geoelektromos (Gyulai 1989), elektromágneses (Szalai, Szarka 2008) gyakorlatban, valamint a mélyfúrás geofizika (Dobróka, Szabó 2011) területén. Ennek mintájára vezessük be az $\Delta v = v_{\max} - v$ sebességés (logaritmikus) nyomásérzékenységet az

$$S(\sigma) = -\frac{1}{\Delta v} \frac{d\Delta v}{d\sigma} = -\frac{d \ln(\Delta v)}{d\sigma}.$$

Látható, hogy a (4) egyenlet alapján

$$\lambda = -\frac{d \ln(\Delta v)}{d\sigma} = S,$$

azaz a λ kőzetfizikai anyagjellemző a $\Delta v = v_{\max} - v$ sebességés logaritmikus nyomásérzékenysége, amely nem függ a nyomástól.

A bemutatott modell longitudinális akusztikus hullámokra egytengelyű terhelés esetén az elasztikus tartományban érvényes. Nagy feszültségek tartományában a kőzetben új mikrorepedések is keletkezhetnek, amit a mérések során azazl igyekeztünk elkerülni, hogy a kőzetmintákat csupán a törőszilárdság 20–30%-áig terheljük annak érdekében, hogy a reverzibilis tartományban maradjunk. A tartomány átlépésekor az ún. kritikus nyomást (Anselmetti, Eberli 1997) meghaladva, a minta roncsolódása miatt a terhelés hatására új repedések nyílnak, és a mérhető szeizmikus sebesség (a nyomás növekedésével) csökken. Ez a jelenség kívül esik vizsgálatainkon, leírására más modell megalkotása szükséges.

A nyomásfüggő sebesség modell a leterhelési szakasz leírására

A leterhelési szakasz jellemzéséhez bevezetjük a zárt mikrorepedések számát (n), amely előáll a kőzetben nyomásmentes állapotban lévő nyitott mikrorepedések N_0 számának és adott nyomásérték melletti nyitott mikrorepedések N számának a különbsége: $n = N_0 - N$. Ha egy felterhelt állapotban lévő kőzetmintán egy maximális σ_m nyomásértékről csökkentjük a nyomást, a zárt mikrorepedések újra elkezdnek kinyílni, így csökkenő hullámsebesség mérhető. A kőzetfizikai modell alapfeltételezéseként kijelentjük, hogy a zárt mikrorepedések számában bekövetkező változás (dn) egyenesen arányos a zárt mikrorepedések számával (n) és az alkalmazott $d\sigma$ nyomáscsökkenéssel

$$dn = \lambda' n d\sigma, \quad (5)$$

ahol λ' egy, a már bevezetett λ paramétertől különböző, az anyagra jellemző új kőzetfizikai paraméter. A fenti differenciálegyenletet megoldva

$$n = n_m \exp\{-\lambda'(\sigma_m - \sigma)\}, \quad (6)$$

ahol n_m a zárt mikrorepedések száma az alkalmazott maximális nyomás (σ_m) esetében. A (2) egyenletet a leterhelési szakaszra változatlan formában érvényesnek tekintjük, hiszen a sebességváltozás szempontjából csak a mikrorepedések számának változása lényeges, függetlenül attól, hogy milyen okból történt a változás. Az (5) és (6) egyenletek együttes megoldása a $dN = -dn$ formula felhasználása mellett

$$v = v_m - \alpha n_m [1 - \exp\{-\lambda'(\sigma_m - \sigma)\}] \quad (7)$$

adódik, ahol v_m az alkalmazott maximális nyomás mellett mérhető sebesség. Az $\alpha n_m = \Delta v_m$ jelölést alkalmazva megkapjuk a leterhelési szakaszra érvényes, a longitudinális hullámsebesség nyomásfüggését leíró modellegyenletet

$$v = v_m - \Delta v_m [1 - \exp\{-\lambda'(\sigma_m - \sigma)\}]. \quad (8)$$

A (7) egyenlet maximális nyomásértéknél (σ_m) a mérhető terjedési sebességet (v_m) adja, míg $\sigma = 0$ esetén a $v(0) = v_1$ jelölést alkalmazva

$$v_1 = v_m - \alpha n_m [1 - \exp(-\lambda' \sigma_m)]$$

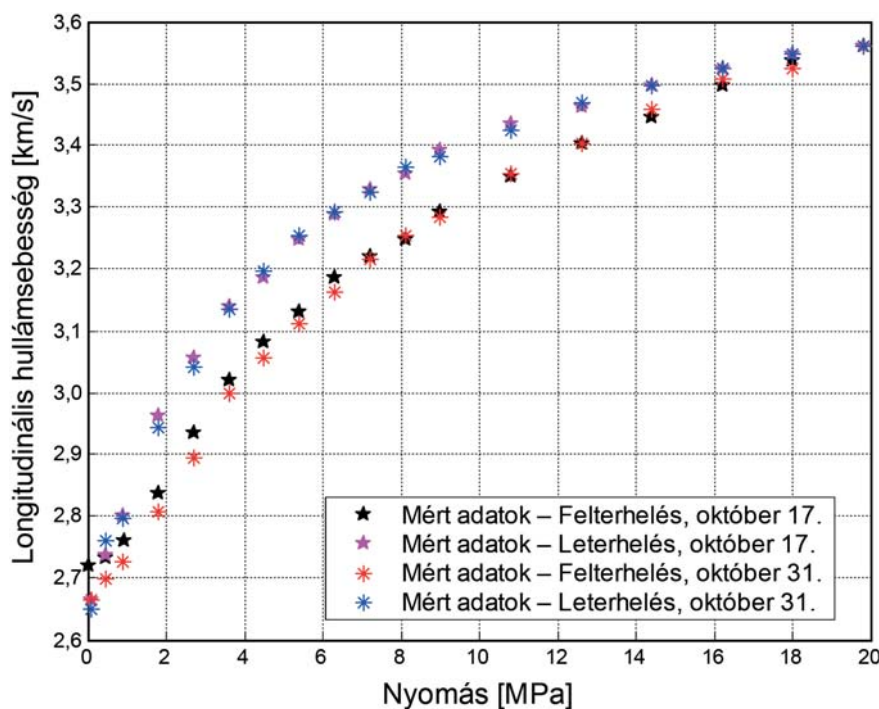
adódik. Bevezetve a $\Delta v_1 = -\alpha n_m \exp(-\lambda' \sigma_m)$ formulát, a (8) egyenlet a leterhelési szakaszt leíró modellegyenletet adja vissza

$$v = v_1 + \Delta v_1 [1 - \exp(-\lambda' \sigma)]. \quad (9)$$

Az akusztikus hiszterézis bemutatása laboratóriumban mért hullámsebesség-adatok alapján

Azért, hogy a kőzetfizikai modellek gyakorlatban való alkalmazhatóságát igazoljuk, a modelleket laboratóriumban mért akusztikus sebességadatokon teszteltük. Az akusztikus hullám terjedési sebességét az impulzusátviteli módszerrel mértük (Toksöz et al. 1979). A kőzetmintákat egytengelyű terhelés alatt vizsgáltuk a ME Bányászati és Geotechnikai Tanszékének elektromechanikus anyagvizsgáló berendezésével. A terhelés változtatása mind felterhelés, mind leterhelés alatt kis lépésekben (1 kN) történt, és minden nyomáson megmértük a terjedési időt. A kőzetminták törési szilárdságai ismertek voltak a mérések során, melyeket nem közelítettük meg, nehogy újabb repedéseket okozzunk a kőzetmintákban. A mérések során az eltérő törési szilárdság következtében mintánként eltérő volt a maximális terhelés értéke. A mérések során számos különböző kőzetminta (melyből kettőt mutatunk be a cikkben) nyomásfüggő longitudinális sebességét határoztuk meg.

A mérési berendezés és a kísérletek megbízhatóságát jellemző fontos kérdés a mérések reprodukálhatósága. Ezért az



1. ábra | Ismételt mérések eredménye az A jelű kőzetminta esetében a hiszterézis reprodukálhatóságának vizsgálatának céljából
Figure 1 | Results of repeated measurements of sample A for studying reproducibility of hysteresis

A jelű minta esetében megismételtük a mérést. Az eredményt az 1. ábra mutatja, melyen látható, hogy a második mérés igen jó közelítéssel egyező eredményt adott, tehát a jelenség jól reprodukálható.

Az ábra alapján egyben azt is megállapíthatjuk, hogy a fel- és leterhelési görbék között szignifikáns eltérés mutatkozik. Birch (1960) nyomán az akusztikus hiszterézis magyarázataként azt az egyszerű képet fogadjuk el, hogy a felterhelési szakaszban bezárult mikrorepedések a terhelés csökkentésével (a leterhelési szakaszban) nem nyílnak meg maradéktalanul, egy bizonyos irreverzibilitás mindig jelen van. Ennek következtében a leterhelési szakaszban kevesebb a nyitott mikrorepedés, mint azonos nyomásnál a felterhelési szakaszban, azaz a terjedési sebesség nagyobb. A kőzetfizikai modellekben ezt az irreverzibilitást a két különböző λ paraméter fejezi ki.

A hiszterézisről az előzőekben mondottak alapján azt váránk, hogy a leterhelési szakasz végén (zérus nyomásnál) is vannak zárva maradt mikrorepedések, azaz a sebesség nagyobb, mint a felterhelési szakasz kezdetén. Ezzel szemben azt láthatjuk, hogy a leterhelési görbe a kis feszültségek tartományában metszi a felterhelési görbét, az alá esik (az egyes mintáknál eltérő mértékben). Annak ellenére, hogy a mérés kezdetén már közelítőleg ismert volt a minta törőszilárdsága (melynek megközelítőleg 20–30%-áig terheljük a próbatesteket, hogy a rugalmas tartományban maradjunk) a mérések tanúsága szerint kis mértékben ugyan, de túllépünk a linearitás tartományán, és ezzel új mikrorepedéseket hoztunk létre a kőzetmintában. A mérési nyomástartomány csökkentésével elkerülhető lett volna a hiszterézis jelensé-

gének tanulmányozását „zavaró” új mikrorepedések létrehozása, de ekkor a sebesség–nyomás kapcsolatának vizsgálata is csupán egy szűkebb terhelési tartományban történhetett volna, ami csökkentette volna a gyakorlat számára releváns következtetések levonásának esélyét.

A kőzetmodellek alkalmazása mért adatrendszeren

A fentiekben bevezetett kőzetfizikai modellek megteremtik annak a lehetőségét, hogy a kőzet ($v_0, \Delta v, \lambda, v_0', \Delta v', \lambda'$) paramétereinek ismeretében a (3) és (8) egyenlet segítségével tetszőleges nyomásnál meg tudjuk határozni a terjedési sebességértékeket külön le- és felterhelési szakasz esetén. A geofizikai inverzió terminológiájával fogalmazva ezek az egyenletek a direkt feladat megoldását jelentik. A kőzetfizikai modellekben szereplő modellparamétereket laboratóriumi mérési adatok alapján linearizált inverziós eljárásokkal (Menke 1984) határoztuk meg. Mivel az adatrendszerek kismértékű zajt tartalmaztak, és az inverz probléma jelentősen túlhatározott, a paraméterek meghatározására a legki-

1. táblázat. | A vizsgált kőzetminták leírása

Minta	Leírás
B	Finom, középszemcsés homokkő
C	Finomszemcsés homokkő

2. táblázat. Akusztikus terjedési sebességadatok inverziós feldolgozása alapján kapott modellegyenletek

Minta	Felterhelési szakasz	Leterhelési szakasz
B	$v = 2,69 + 0,96 \{1 - \exp(-0,1094 \sigma)\}$	$v = 2,69 + 0,89 \{1 - \exp(-0,1889 \sigma)\}$
C	$v = 2,60 + 0,86 \{1 - \exp(-0,1334 \sigma)\}$	$v = 2,56 + 0,81 \{1 - \exp(-0,2988 \sigma)\}$

sebb négyzetek módszerét alkalmaztuk. A cikkben két kiválasztott közetminta adatainak inverziós feldolgozását mutatjuk be. A minták jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

A mintákon mért akusztikus terjedési sebesség adatrendszerek inverziós feldolgozásával határoztunk meg a modellparamétereket. A paraméterek ismeretében a (3) és (9) formulák segítségével felírhatóak a mintákra vonatkozó modellegyenletek külön a fel- és leterhelési szakaszokra (2. táblázat).

Az egyenletekkel tetszőleges nyomáson számíthatunk terjedési sebességértékeket. A számított és mért értékeket a 2-3. ábrán láthatjuk. Az ábrákon a folytonos vonalak a számított sebesség–nyomás függvényeket mutatják fel- és leterhelési szakasz esetén, míg a mérési adatokat a szimbólumok szemléltetik.

Az ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy a számított adatok jól illeszkednek a mért adatokhoz, ami bizonyítja, hogy a kőzetfizikai modellek a gyakorlatban jól használhatóak. A modellegyenletek egyaránt jól jellemzik a fel- és leterhelési szakaszt. A görbéken jól látható az akusztikus hiszterézis jelensége. A kőzetfizikai modelleket számos közetminta esetében tesztelve hasonlóan jó egyezést kaptunk.

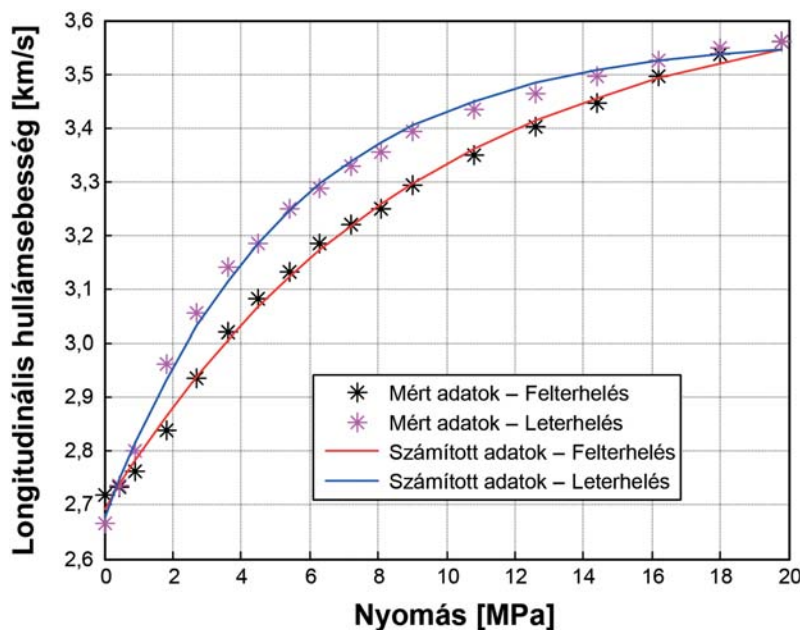
Az eljárás pontosságának jellemzése érdekében adattérbeli illeszkedési hibát (Somogyi Molnár, Dobróka 2011) számoltunk:

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_k^{(m)} - d_k^{(sz)}}{d_k^{(sz)}} \right)^2} \cdot 100 [\%],$$

ahol $d_k^{(m)}, d_k^{(sz)}$ a k -adik nyomásérték mellett mért, ill. számított terjedési sebesség. Az inverziós eljárás a B jelű mintára 0,48%, míg a C jelű minta esetében 0,66% illeszkedési hibát adott. Ezek az eredmények alátámasztják az inverziós paraméterbecslés pontosságát és megerősítik a kifejlesztett kőzetfizikai modellek alkalmazhatóságát.

Összefoglalás

A cikkben olyan kőzetfizikai modellt mutattunk be, mely megadja a kőzetnyomás és az akusztikus hullám terjedési sebességének kapcsolatát mind a fel- és leterhelési szakasz esetén, azaz sikeresen írja le és egyben magyarázatot is ad az akusztikus hiszterézisre is. A felterhelési szakaszban a terjedési sebesség a nyomás növekedésével nő. A növekedés üteme kis nyomásértékeknél nagy, azonban nagy nyomásértékek esetén a növekedés üteme csökken, mivel egyre kevesebb a nyitott mikrorepedés. A leterhelési szakaszban bezárt mikrorepedések a terhelés csökkentésével, a leterhelési szakaszban nem nyílnak meg maradéktalanul, egy bizonyos irreverzibilitás mindig jelen van. E fizikai elvből kiindulva

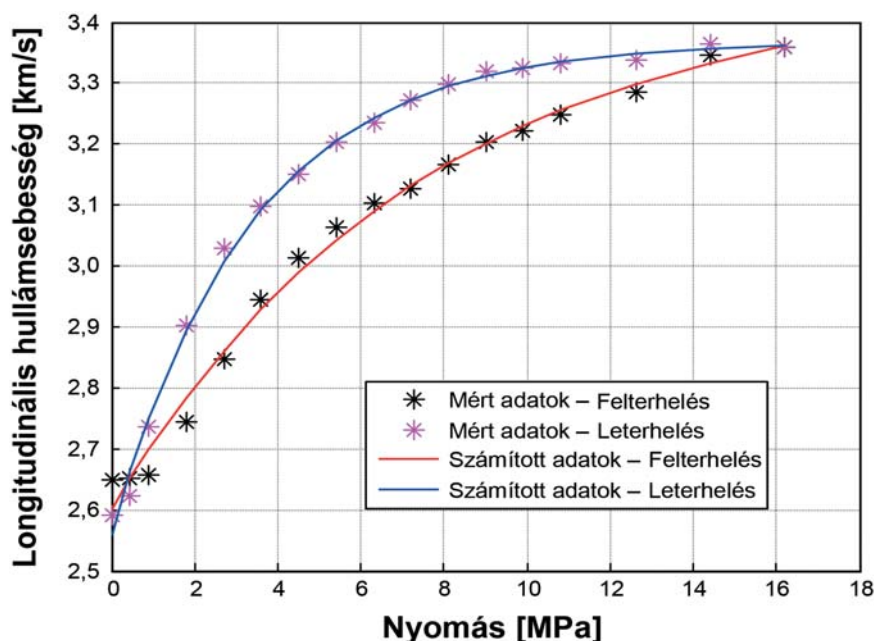


2. ábra

A B jelű közetmintán mért és az inverzióval számított sebesség–nyomás függvény a fel- és leterhelési szakaszra

Figure 2

The measured and inversion calculated velocity–pressure function on rock sample B in case of pressurization and depressurization cycle



3. ábra | A C jelű kőzetmintán mért és az inverzióval számított sebesség–nyomás függvény a fel- és leterhelési szakaszra

Figure 3 | The measured and inversion calculated velocity–pressure function on rock sample C in case of pressurization and depressurization cycle

állítottuk fel a jelenséget leíró differenciálegyenleteket, melyek megoldásával könnyen értelmezhető formulákat vezetünk le. Az akusztikus hiszterézist a bevezetett modell-egyenletekben a két különböző λ paraméter fejezi ki.

A kőzetfizikai modelleket számos kőzetmintán végzett mérések adatain alkalmaztuk. Bemutattuk, hogy a mérések kiválóan reprodukálhatóak. A modellegyenletekben szereplő modellparamétereket lineáris inverziós eljárással határoztuk meg. A paraméterek ismeretében a kőzetfizikai modell alapján számított adatokat a mérési adatokkal összevetve jó egyezést találtunk, ami azt bizonyítja, hogy a kőzetfizikai modellegyenletek jól jellemzik a fel- és leterhelési

szakaszt, illetve jól működnek a gyakorlatban. Az alkalmazott lineáris inverziós módszer megbízhatóságát az is alátámasztja, hogy a megoldandó inverz probléma jelentősen túlhatározott, valamint a minták esetében számított illeszkedési hibák 1% alattiak voltak.

Köszönetnyilvánítás

A kutató munka 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 valósul meg.

Hivatkozások

- Anselmetti F. S., Eberli G. P., 1997: Sonic velocity in carbonate sediments and rock. In: I. Palaz and K.J. Marfurt (eds.), Carbonate Seismology. SEG, 53–74
- Best A.I., 1997: The effect of pressure on ultrasonic velocity and attenuation in near-surface sedimentary rocks. Geophys. Prosp. 45, 345–364
- Birch F., 1960: The velocity of compression waves in rocks to 10 kilobars, Part 1. J. Geophys. Res. 65, 1083–1102
- Dobróka M., 1987: Love seam-waves in a horizontally inhomogeneous three-layered medium. Geoph. Prosp. 35, 512–516.
- Dobróka M., 1988: On the absorption-dispersion characteristics of channel waves propagating in coal seams of varying thickness. Geoph. Prosp. 36 318–331
- Dobróka M., Szabó N., 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. Acta Geophys. 59(5), 907–934
- Dobróka M., Somogyiné Molnár J., 2012a: New petrophysical model describing the pressure dependence of seismic velocity. Acta Geophys. 60, 371–383
- Dobróka M., Somogyiné Molnár J., 2012b: The pressure dependence of acoustic velocity and quality factor – new petrophysical models. Acta Geod. Geophys. Hung. 47, 149–160
- Gyulai Á., 1989: Parameter sensitivity of underground DC measurements. Geophysical Transactions 35(3), 209–225
- Hashin Z., Shtrikman S., 1963: A variation approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. J. Mech. Phys. Solids 11, 127–140
- Hill R., 1963: Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles. J. Mech. Phys. Solids 11, 357–372
- Ji S. C., Wang Q., Xia B., 2002: Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks, Ores. Polytechnic International Press, Montreal, Canada
- Ji S., Wang Q., Marcotte D., Salisbury M. H., Xu Z., 2007: P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure. J. Geophys. Res. 112, B09204.
- Jones L. A., Wang H. F., 1981: Ultrasonic velocities in Cretaceous shales from the Williston basin. Geophysics 46, 288–297

- Menke W., 1984: Geophysical data analysis – Discrete inverse theory. Academic Press Inc., Ltd., London
- Rudenko O. V., Robsman V. A., 2004: Nonlinear process in media acoustic hysteresis and problems of dynamic interaction between piles and earth foundation. *Acoust. Phys.* 50(6), 725–731
- Scholz C. H., Kranz R., 1974: Notes on dilatancy recovery. *J. Geophys. Res.* 79, 2132–2135
- Singh R., Rai C., Sondergeld C., 2006: Pressure dependence of elastic wave velocities in sandstones. SEG/New Orleans 2006 Annual Meeting.
- Somogyiné Molnár J., Dobróka M., 2011: A szeizmikus/akusztikus sebesség és a jósági tényező kőzetnyomástól való függését leíró kőzetfizikai modellek. *Magyar Geofizika* 52(3), 128–134
- Szalai S., Szarka L., 2008: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays, I. Linear arrays. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 43, 419–437
- Toksöz M. N., Johnston D. H., Timur A., 1979: Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks, I. Laboratory measurements. *Geophysics* 44(4), 681–690
- Walsh J. B., Brace W. F., 1964: A fracture criterion for brittle anisotropic rock. *J. Geophys. Res.* 69, 3449–3456
- Wang Q., Ji S. C., Salisbury M. H., Pan M. B., Xia B., Xu Z. Q., 2005: Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections. *Tectonophys.* 398, 67–99
- Wepfer W. W., Christensen N. I., 1991: A seismic velocity-confining pressure relation, with applications. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 28, 451–456
- Yu G., Vozoff K., Durney D. W., 1993: The influence of confining pressure and water saturation on dynamic elastic properties of some Permian coals. *Geophysics* 58(1), 30–38