

## AZ AKUSZTIKUS HISZTERÉZIS VIZSGÁLATA LABORATÓRIUMBAN MÉRT P ÉS S HULLÁMSEBESSÉG ADATOK ALAPJÁN

### INVESTIGATION OF ACOUSTIC HYSTERESIS BASED ON P AND S WAVE VELOCITY DATA MEASURED IN LABORATORY

SOMOGYINÉ Molnár Judit<sup>1</sup>, KISS Anett<sup>2</sup>

<sup>1</sup>tudományos munkatárs, egyetemi adjunktus

<sup>1</sup>MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport; Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai-Elektronikai Intézeti  
Tanszék

<sup>1</sup>gfmj@uni-miskolc.hu

<sup>2</sup>tudományos segédmunkatárs

<sup>2</sup>Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék

<sup>2</sup>gfka@uni-miskolc.hu

**Kivonat:** Az akusztikus hullámterjedés jellemzői (sebesség, jósági tényező) a kőzetek fontos mechanikai tulajdonságairól hordoznak információt, ezért a kőzetparaméterek laboratóriumi és in-situ vizsgálatában ezek meghatározása gyakori feladat. Laboratóriumi mérési adatok megfelelő értelmezéséhez - a szakirodalomban fellelhető regressziós formulákon túllépve - olyan kvantitatív modellt fejlesztettünk ki, amely fizikai magyarázatot is ad a nyomásfüggés jelenségére. A modell alapja, hogy a nyomás növekedésével a pórusok térfogata csökken, így növekvő hullámsebesség mérhető a kőzetmintán, valamint a nyomás csökkentésével a pórusok újra kinyílnak, így a sebesség csökkenése következik be. Tehát lehetővé válik az akusztikus hiszterézis leírására alkalmas kőzetfizikai modell felállítása. A gyakorlatban való alkalmazhatóságának igazolása céljából a kőzetfizikai modellt a Geofizika Tanszék akusztikus mérőberendezésével nyomás alatt, kőzetmintákon mért P és S hullámsebesség adatokon teszteltük.

**Kulcsszavak:** akusztikus hiszterézis, kőzetnyomás, hullámsebességek, kőzetfizikai modell

**Abstract:** Characteristics of acoustic wave propagation (velocity, quality factor) contain information about important mechanical properties of rocks therefore their determination is a common task in laboratory and in-situ investigations of petrophysical parameters. We developed a quantitative model - exceeding the regression formulas in literature - which gives physical explanation for the phenomenon of pressure dependence in order to a proper evaluation of laboratory measured data. The base of the model is that pore volume decreases with increasing pressure thus increasing velocity can be measured, as well as with decreasing pressure the pores open again so the velocity decreases. Ergo it becomes possible to develop a petrophysical model which describes the acoustic hysteresis. To confirm the applicability of the model it was applied to P and S wave velocity data measured on rock samples under varying pressure by the automatic acoustic test system of the Department of Geophysics.

**Keywords:** acoustic hysteresis, rock pressure, wave velocities, petrophysical model

## 1. BEVEZETÉS

A Föld belső szerkezetéről, fizikai állapotáról főként szeizmikus adatok révén nyerünk információt. A szeizmikus adatok értelmezésénél jelentős szerepet játszik egy adott fizikai környezetben (nyomásállapot) lévő kőzetmintán laboratóriumban mért szeizmikus/akusztikus tulajdonságok extrapolálása, ezért is fontos az akusztikus hullámsebesség nyomásfüggésének laboratóriumban történő tanulmányozása. A kutatók a kőzetekben terjedő akusztikus hullámok (longitudinális - P, transzverzális - S) nyomás alatti sebességét több évtizede tanulmányozzák. Közismert, hogy 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 [1].

Az akusztikus hiszterézis laboratóriumban történő vizsgálata gyakori feladat [2, 3]. A hiszterézis jelensége a mikrorepedések irreverzibilis záródásával [4], a pórustérfogat irreverzibilis csökkenésével [5], valamint a kőzetben lévő kötőanyagok nemlineáris viselkedésével magyarázható [6, 7]. A mikrorepedések irreverzibilis záródásának elképzelése szerint a felterhelés során a kőzetben - adott nyomáson - bezáródott mikrorepedések nem nyílnak ki újra maradéktalanul a leterhelési szakaszban ugyanazon kőzetnyomáson. Birch elgondolása [5] alapján a magas nyomásértékek mellett a felterhelés során záródott pórusok a leterhelési ciklusban kis nyomásértékeknél már nem veszik fel eredeti alakjukat és méretüket. A harmadik magyarázat szerint mikrorepedések és szemcsék környezetében képlékeny ásványok (például klorit, szericit vagy szerpentinit) 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.

A nyomás-sebesség kapcsolat exponenciális függvénnyel jellemezhető legjobban [8, 9]. Számos empirikus modell létezik hullámsebességek nyomásfüggésének jellemzésére, azonban ezek rendszerint egy alkalmasan választott formula paramétereinek matematikai regressziós eljárás alapján meghatározását adják, fizikai magyarázattal nem szolgálnak a nyomás-sebesség kapcsolatára [9, 10]. Laboratóriumi mérési adatok megfelelő értelmezéséhez olyan kvantitatív modell megalkotására van szükség, amely fizikai magyarázatot is ad a jelenségre.

## 2. NYOMÁSFÜGGŐ SEBESSÉG MODELL A FELTERHELÉSI SZAKASZ LEÍRÁSÁRA

Birch [6] kvalitatív elgondolása szerint a terheletlen állapotból indulva a nyomás növekedésének hatására a kőzetmintában először a nagy pórusok záródnak be, majd a nyomás további növelésével a kisebb pórusok lassúbb összenyomódási folyamata játszódik le a kőzetben, míg az összes pórus be nem zárul. Ezért definiáljuk a fajlagos pórustérfogatot ( $V$ ). Első modelltörvényként kijelentjük, hogy ha a kőzetben  $d\sigma$  (infinitesimalis) feszültség növekedést hozunk létre, akkor a  $V$ -ben bekövetkező változás (a bezáruló  $dV$  pórustérfogat) fordítottan arányos a feszültség növekménnyel és  $V$  aktuális értékével.

$$dV = -\lambda_v V d\sigma, \quad (1)$$

ahol:

$\lambda_v$  – egy, az anyagra jellemző új kőzetfizikai paraméter.

A differenciálegyenletet megoldva

$$V = V_0 e^{-\lambda_v \sigma}, \quad (2)$$

ahol:

$V_0$  – a nyitott pórusok fajlagos térfogata feszültségmentes állapotban ( $\sigma = 0$ ).

Ezáltal előállt a pórustérfogat-nyomás kapcsolata. Birch [5] elmélete alapján a nyomás növekedésével a pórusok térfogata csökken, így növekvő terjedési sebesség mérhető a kőzetmintán. Ezt a folyamatot három szakaszra oszthatjuk. A terheletlen állapotból indulva nyomás hatására a nagy pórusok bezáródnak, így a terjedési sebesség nemlineárisan és meredeken nőni kezd. A második szakaszban a kisebb pórusok lassúbb összenyomódási folyamata miatt a görbe meredeksége mérséklődik, majd a minta tönkremenetele miatt a mérhető sebesség csökkenni kezd. A mechanizmus alapján az akusztikus hullám terjedési sebességének nyomásfüggését a porózus kőzet pórusainak összenyomódása, végső soron záródása hozza létre. (A tönkremeneteli szakasszal a kőzefizikai modellben nem foglalkozunk.). Feltételezzük tehát, hogy a longitudinális terjedési sebességben bekövetkező  $d\alpha$  elemi megváltozás és a  $dV$  fajlagos pórustérfogatban bekövetkező változás között fordított arányosság áll fenn:

$$d\alpha = -\kappa_p dV, \quad (3)$$

ahol:

$\kappa_p$  – arányossági tényező.

A modellegyenlet levezetéséhez egyesítve a (1)-(3) egyenleteket a

$$d\alpha = \kappa_p \lambda_v V_0 e^{-\lambda_v \sigma} d\sigma \quad (4)$$

kifejezés adódik. Az egyenletet megoldva

$$\alpha = K - \kappa_p V_0 e^{-\lambda_v \sigma}, \quad (5)$$

ahol:

$K$  – ismeretlen integrációs állandó.

Feszültségmentes állapotban a kőzetben terjedő rugalmas hullám sebességét jelölje  $\alpha_0$ . Az (5) egyenlet alapján ekkor meghatározható a  $K$  integrációs konstans. A  $\Delta\alpha_0 = \kappa_p V_0$  jelölést bevezetve az (5) egyenlet a

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha_0 (1 - e^{-\lambda_v \sigma}) \quad (6)$$

alakot ölti, ahol  $\Delta\alpha_0$  új kőzefizikai paraméter. A fentiekben ismertetett fajlagos pórustérfogat változáson alapuló kőzefizikai modell (egy tengelyű terhelés esetén) a kőzetek széles körére érvényes a reverzibilis tartományban a felterhelési szakaszon. A modell keretében a terjedési sebesség a terhelésmentes állapottól ( $\alpha_0$ ) a nagy kőzetnyomással jellemzett állapotig ( $\alpha_{max}$ ) változhat, ahol az összes pórus zárva van. Felírva a  $\alpha_{max} - \alpha_0 = \Delta\alpha_0$  összefüggést, belátható, hogy a  $\Delta\alpha_0$  paraméter a Ji et al. [11] által definiált sebességeséssel azonos. Azaz a  $\Delta\alpha_0$

paramétert tekinthetjük a kőzetben, terheletlen állapotban lévő pórustérfogat által okozott sebességesedésnek.  $\lambda_v$  pedig a sebességesedés logaritmikus nyomásérzékenysége [12].

Mivel a modell alapja a pórustérfogat változása, mely nem függ a terhelés irányától, így a levezetés további részleteinek mellőzésével a longitudinális sebesség nyomásfüggésére felállított kőzetmodellt a transzverzális hullám ( $\beta$ ) esetében is értelmezzük

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta_0 (1 - e^{-\lambda_v \sigma}), \quad (7)$$

ahol:

$\lambda_v$  – egy közös kőzetfizikai paraméter.

### 3. NYOMÁSFÜGGŐ SEBESSÉG MODELL A LETERHELÉSI SZAKASZ LEÍRÁSÁRA

Már említettük, hogy a kőzetnyomás csökkenésével a terjedési sebesség csökken, ami modell feltételként azzal magyarázható, hogy a felterhelési szakaszon zárult pórusok újra kinyílnak. Mivel az adott nyomáson a leterhelési szakaszon mért akusztikus terjedési sebesség nagyobb, mint a felterhelési szakaszon ugyanezen nyomásnál kapott sebesség, a modellfeltétel kiegészíthető azzal, hogy a felterheléskor zárult pórusok (ugyanazon nyomáson) leterheléskor nem nyílnak ki maradéktalanul. Ezáltal az előző fejezetben bemutatott kőzetfizikai modellt kiterjesztve a leterhelési szakaszra, a hiszterézis jelensége egzaktul leírhatóvá válik.

A leterhelési szakasz jellemzéséhez vezessük be a zárt fajlagos pórustérfogatot ( $v$ ), amely előáll a kőzetben nyomásmentes állapotában lévő nyitott pórusok  $V_0$  számának és adott nyomásérték melletti nyitott pórustérfogat  $V$  számának a különbségeként:  $v = V_0 - V$ . A kőzetfizikai modell alapfeltételezése, hogy a zárt pórustérfogatban bekövetkező változás ( $dv$ ) egyenesen arányos a zárt pórustérfogattal ( $v$ ) és az alkalmazott  $d\sigma$  nyomáscsökkenéssel

$$dv = \lambda'_v v d\sigma, \quad (8)$$

ahol:

$\lambda'_v$  – egy új, a már bevezetett  $\lambda_v$  paramétertől különböző (de fizikai jelentésében a leterhelési szakaszon megegyező) anyagjellemző kőzetfizikai paraméter.

A fenti differenciál egyenletet megoldva

$$v = v_m e^{-\lambda'_v (\sigma_m - \sigma)}, \quad (9)$$

ahol:

$v_m$  – a zárt pórustérfogat az alkalmazott (a felterhelési szakaszon elért)  $\sigma_m$  maximális nyomáson.

Az elemi sebesség változást a nyitott pórustérfogat változásával összekapcsoló (3) egyenletet a leterhelési szakaszra változatlan formában érvényesnek tekintjük, hiszen a

sebességváltozás szempontjából csak pórusterfogató változása lényeges, függetlenül attól, hogy milyen okból történt a változás. A (8) és (9) egyenletek együttes megoldásával a  $dV = -dv$  formula felhasználása mellett

$$\alpha = \alpha_m - \kappa_p v_m \left(1 - e^{-\lambda'_v(\sigma_m - \sigma)}\right) \quad (10)$$

adódik, ahol  $\alpha_m$  az alkalmazott  $\sigma_m$  maximális nyomás mellett mérhető sebesség. A modell lényeges kritériuma, hogy a leterhelési szakasz a felterhelés során alkalmazott maximális nyomástól indul. A  $\Delta\alpha_m = \kappa_p v_m$  jelölést alkalmazva megkapjuk a leterhelési szakaszra érvényes, a longitudinális hullámsebesség nyomásfüggését leíró modellegyenletet

$$\alpha = \alpha_m - \Delta\alpha_m \left(1 - e^{-\lambda'_v(\sigma_m - \sigma)}\right). \quad (11)$$

A fenti egyenlet elvi összefüggést szolgáltat a terjedési sebesség és a közetnyomás kapcsolatára a leterhelési szakaszon. Látható, hogy a (11) egyenlet maximális nyomásértéknél ( $\sigma_m$ ) a mérhető terjedési sebességet ( $\alpha_m$ ) adja, míg  $\sigma = 0$  esetén a  $\alpha(0) = \alpha_1$  jelölést alkalmazva

$$\alpha_1 = \alpha_m - \kappa_p v_m \left(1 - e^{-\lambda'_v \sigma_m}\right) \quad (12)$$

adódik. Bevezetve a

$$\Delta\alpha_1 = -\Delta\alpha_m e^{-\lambda'_v \sigma_m} \quad (13)$$

formulát, a (11) egyenlet formálisan a felterhelési szakaszt leíró (6) modellegyenlethez hasonló összefüggésre vezet

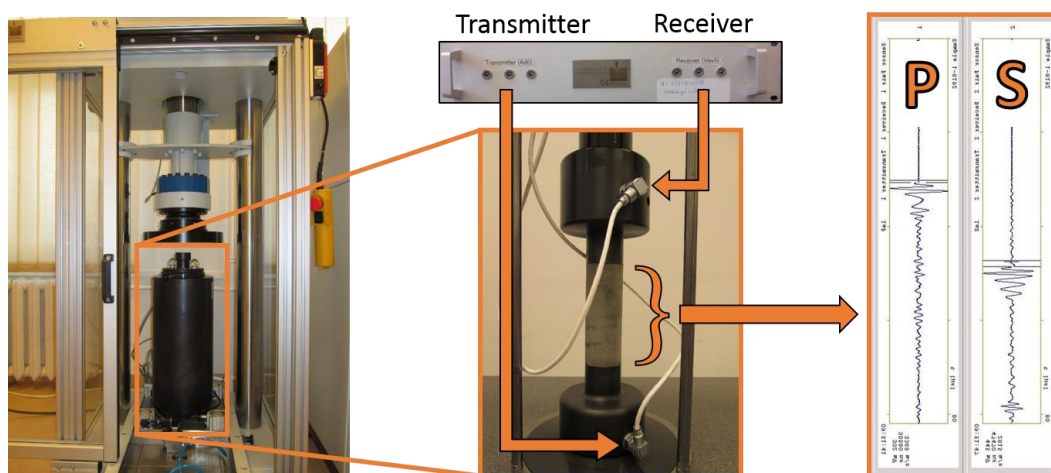
$$\alpha = \alpha_1 + \Delta\alpha_1 \left(1 - e^{-\lambda'_v \sigma}\right). \quad (14)$$

Megállapítható tehát, hogy mind fel-, mind leterhelési szakasz esetében azonos kvalitatív elgondolásból kiindulva hasonló modellegyenletre jutunk [12]. A felterhelési szakaszhoz hasonlóan a (14) egyenlet érvényesnek tekinthető transzverzális hullámsebességre is

$$\beta = \beta_1 + \Delta\beta_1 \left(1 - e^{-\lambda'_v \sigma}\right). \quad (15)$$

#### 4. AZ AKUSZTIKUS HISZTERÉZIS BEMUTATÁSA LABORATÓRIUMBAN MÉRT HULLÁMSEBESSÉG ADATOK ALAPJÁN

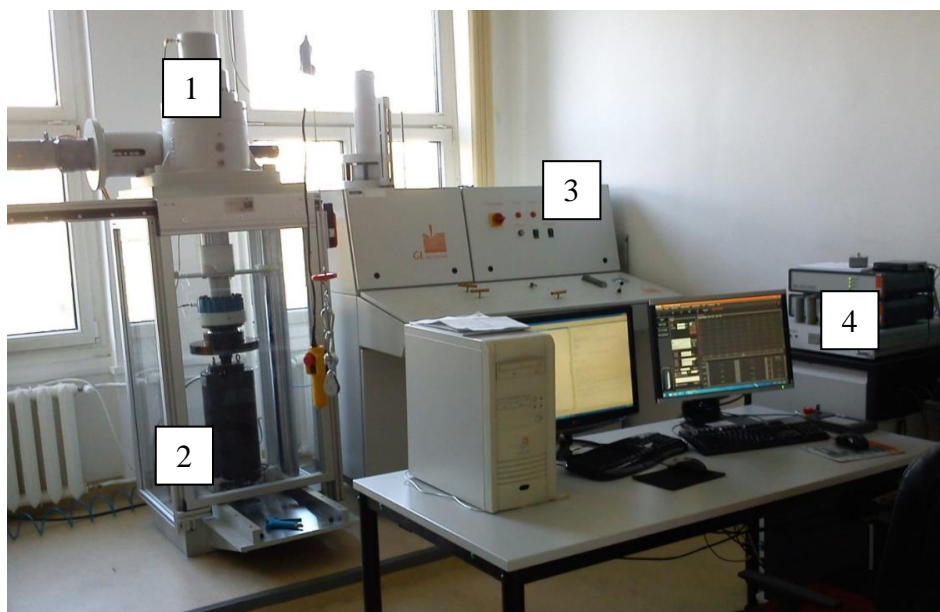
Az akusztikus hullámok terjedési sebességének mérése a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének közetfizikai laboratóriumában található számítógép-vezérelt mérőberendezéssel történt. Az akusztikus hullám terjedési sebességét az impulzus átviteli módszerrel mértük [13]. Az akusztikus mérőrendszert az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. Akusztikus mérőrendszer

Az akusztikus mérőfejek (adó és vevő) piezoelektromos kristályt tartalmaznak. Az akusztikus mérőegység impulzus generátora 500 ns időtartamú feszültség impulzust ad a piezoelektromos adó kristályra, amely akusztikus hullámot indít a mintában. Az impulzus generátor a mérőrendszer szinkronizálására (triggerelésére) alkalmas jelet is kibocsát, amely a mérőműszer vezérlésére (indítására) szolgál. A vevő kristály a beérkező akusztikus jelet elektromos impulzussá alakítja és szoftverrel detektáljuk a hullámok beérkezési idejét. A mérések során a jel/zaj viszony növelése érdekében 256-szoros összegzést alkalmaztunk, amely 256 egymást követő mérés futó átlagolását jelenti. Ezzel a módszerrel lényegesen csökkenthetőek a megjelenített hullámképben a külső zajok amplitúdói, és ennek következtében az első beérkezések pontosabban meghatározhatóak.

A kőzetminták mechanikai terhelését a Geofizikai Tanszékén lévő triaxiális nyomásfokozó berendezéssel (2. ábra) végeztük, a hozzá kapcsolódó DION7 vezérlő szoftver segítségével.



2. ábra. Triaxiális nyomás alatti akusztikus mérőrendszer részei: (1): egytengelyű nyomásfokozó, (2): mérőcella, (3): palástnyomás-fokozó, (4): akusztikus mérőműszer

A berendezés két fő részből áll: egy terhelőkeret, valamint egy palástnyomás-fokozó egység. Az egytengelyű terhelőkerettel maximum 300 kN terhelést tudunk létrehozni, míg a hidraulikus palástnyomás-fokozóval legfeljebb 80 MPa nyomás állítható elő. A terhelés a nyomólapon át, majd a mérőcellán, végső soron az adó és vevő fejekén keresztül adódik át a kőzetmintára. (A nyomólap szoftveres vezérlésének minimális sebessége 0,1  $\mu\text{m/s}$ , ezáltal a kívánt nyomás nagyon pontosan beállítható.) A mérőcellát a palástnyomás-fokozóval olajjal lehet elárasztani, ekkor a mintát minden esetben egy gumihenger zárja el az olajtól.

A bemutatott nyomásfokozó berendezéssel a kőzetmintákon egytengelyű terhelés alatt longitudinális és transzverzális terjedési sebességeket mértünk fel- és leterhelés során. A méréseknél lineáris függvény szerinti kis sebességű (0,1 kN/s) terhelést választottunk. A kőzetminták törési szilárdságai ismertek voltak, melyeket a mérés során nem közelítettünk meg, hogy újabb repedéseket ne hozzunk létre a kőzetmintákban.

A mérések során megállapítottuk, hogy a fel- és leterhelési adatok között szignifikáns eltérés mutatkozik, mely jelenség az akusztikus hiszterézis. Amint az előző fejezetekben is említettük ennek magyarázataként Birch elméletét fogadjuk el. A felterhelési szakaszban bezárult pórusok a terhelés csökkentésével (a leterhelési szakaszban) nem nyílnak meg maradéktalanul, egy bizonyos irreverzibilitás mindig jelen van. Ennek következtében a leterhelési szakasz végén  $\sigma=0$  nyomásnál kevesebb a nyitott pórus, mint azonos nyomásnál a felterhelési szakaszban, azaz a terjedési sebesség nagyobb. A kőzetfizikai modellekben ezt az irreverzibilitást a két különböző  $\lambda_v$  és  $\lambda'_v$  paraméter fejezi ki.

## 5. A KIFEJLESZTETT KÖZETFIZIKAI MODELL ALKALMAZÁSA A GYAKORLATBAN

A fentiekben bevezetett kőzetfizikai modellek megteremtik annak a lehetőségét, hogy a kőzet (P hullám:  $\alpha_0, \Delta\alpha_0, \lambda_v, \alpha_1, \Delta\alpha_1, \lambda'_v$ , S hullám:  $\beta_0, \Delta\beta_0, \lambda_v, \beta_1, \Delta\beta_1, \lambda'_v$ ) paramétereinek ismeretében a (6)-(7) és (14)-(15) egyenletek segítségével tetszőleges nyomásnál meg tudjuk határozni a terjedési sebesség értékeket külön fel- és leterhelési szakasz esetén. A geofizikai inverzió terminológiájával fogalmazva ezek az egyenletek a direkt feladat megoldását jelentik. A kőzetfizikai modellekben szereplő modellparamétereket laboratóriumi mérési adatok alapján együttes inverziós eljárásokkal határoztuk meg [14]. Mivel az adatrendszer kismértékű zajt tartalmaztak és az inverz probléma jelentősen túlhatározott, a paraméterek meghatározására a legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztuk. A cikkben két saját mérési, valamint 2 irodalmi [15] adatsor inverziós feldolgozását mutatjuk be. A minták jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

Minta	Leírás
A	Finom, közép szemcsés homokkő
B	Finom szemcsés homokkő
F410	Oligocén Fontainebleau homokkő
A11	Oligocén Fontainebleau homokkő

1. táblázat. A vizsgált kőzetminták leírása

Az inverziós adatfeldolgozás eredményét a 2. táblázat mutatja.

Minta	P hullám							
	Felterhelés			Leterhelés			D (%)	S
	$\alpha_0$ (km/s)	$\Delta\alpha_0$ (km/s)	$\lambda_v$ (1/MPa)	$\alpha_1$ (km/s)	$\Delta\alpha_1$ (km/s)	$\lambda'_v$ (1/MPa)		
<b>A</b>	3,56	1,06	0,0212	3,56	0,94	0,0401	0,39	0,59
<b>B</b>	4,69	0,37	0,0404	4,72	0,29	0,1927	0,12	0,55
<b>F410</b>	3,58	1,46	0,1200	4,36	0,72	0,1500	1,14	0,46
<b>A11</b>	3,26	1,93	0,0840	3,63	1,54	0,1480	5,50	0,45
	S hullám							
	Felterhelés			Leterhelés			D (%)	S
	$\beta_0$ (km/s)	$\Delta\beta_0$ (km/s)	$\lambda_v$ (1/MPa)	$\beta_1$ (km/s)	$\Delta\beta_1$ (km/s)	$\lambda'_v$ (1/MPa)		
<b>A</b>	2,29	0,51	0,0212	2,31	0,46	0,0395	0,26	0,50
<b>B</b>	2,71	0,17	0,0456	2,72	0,16	0,1944	0,10	0,59
<b>F410</b>	2,22	0,99	0,1200	2,73	0,49	0,1300	1,07	0,44
<b>A11</b>	2,17	1,25	0,091	2,48	0,95	0,136	6,6	0,47

2. táblázat. Fel- és leterhelésnél mért hullámsebesség adatok együttes inverziós feldolgozása során meghatározott modellparaméterek, relatív adattérbeli távolságok (D) és átlagkorreláció értékek (S).

Az inverziós eljárás megbízhatóságának jellemzése érdekében relatív adattérbeli távolságot (D) számoltunk az alábbi formula alapján

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left( \frac{d_k^{(m)} - d_k^{(sz)}}{d_k^{(sz)}} \right)^2} \cdot 100 [\%], \quad (16)$$

ahol:

$d_k^{(m)}$  – a k-adik nyomásérték mellett a fel- és leterhelési szakaszban mért terjedési sebesség

$d_k^{(sz)}$  – a k-adik nyomásérték mellett a fel- és leterhelési szakaszban számított terjedési sebesség

$N$  – a mérési adatok száma.

Az átlagkorrelációkat is meghatároztuk

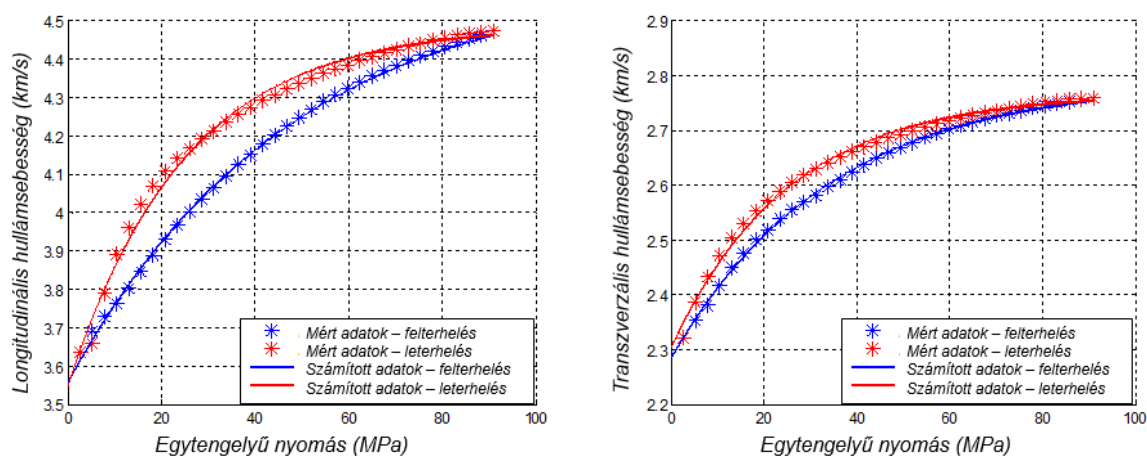
$$S = \sqrt{\frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (corr(\bar{m}_{ij}) - \delta_{ij})^2}, \quad (17)$$

ahol:

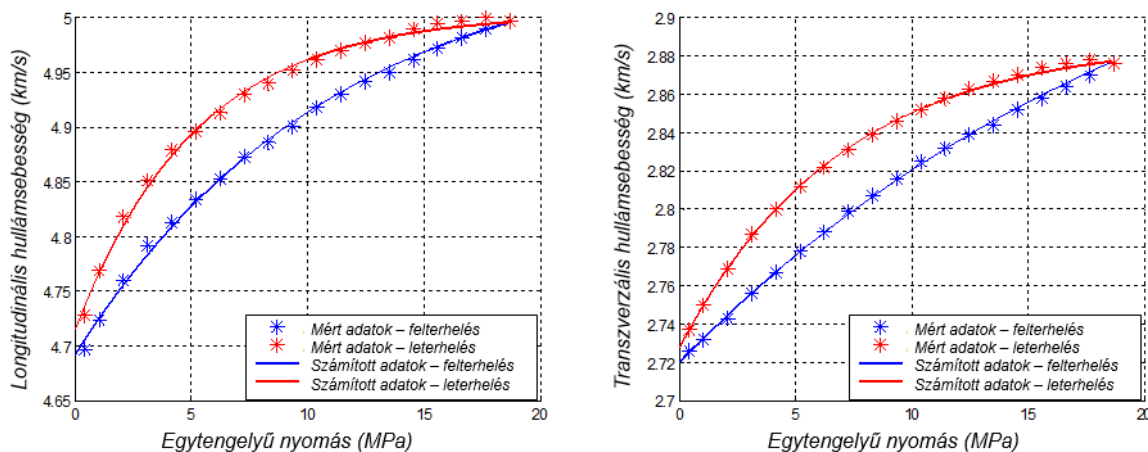
- $\delta$  – a Kronecker-delta szimbólum ( $i = j$  esetén 1, egyébként 0)  
 $corr(m)$  – a korrelációs mátrix  
 $M$  – a modellparaméterek száma.

Az egyes mintákra vonatkozó értékeiket szintén a 2. táblázat tartalmazza. Látható, hogy a minták esetében számított illeszkedési hibák 1% körüliek, valamint az átlagkorrelációk 0,6 alattiak voltak, amely szerint a modellparaméterek közepes korrelációs kapcsolatban vannak egymással. Az inverziós paraméterbecslés pontosságát a bemutatott eredmények alátámasztják.

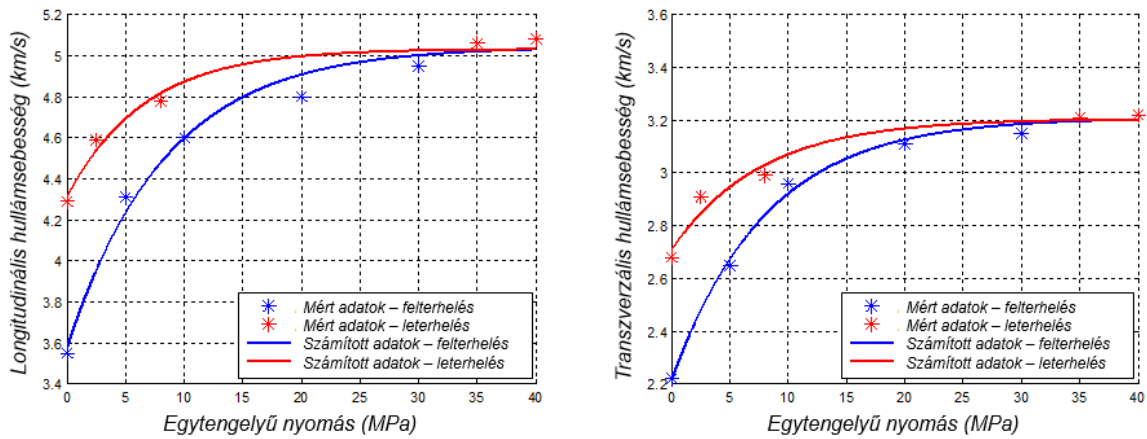
A modellparaméterekkel meghatározhatók a fel- és leterhelés esetén érvényes sebesség-nyomás függvények (folytonos vonal), melyek a mérési adatok mellett (szimbólumok) a 3-6. ábrákon láthatóak.



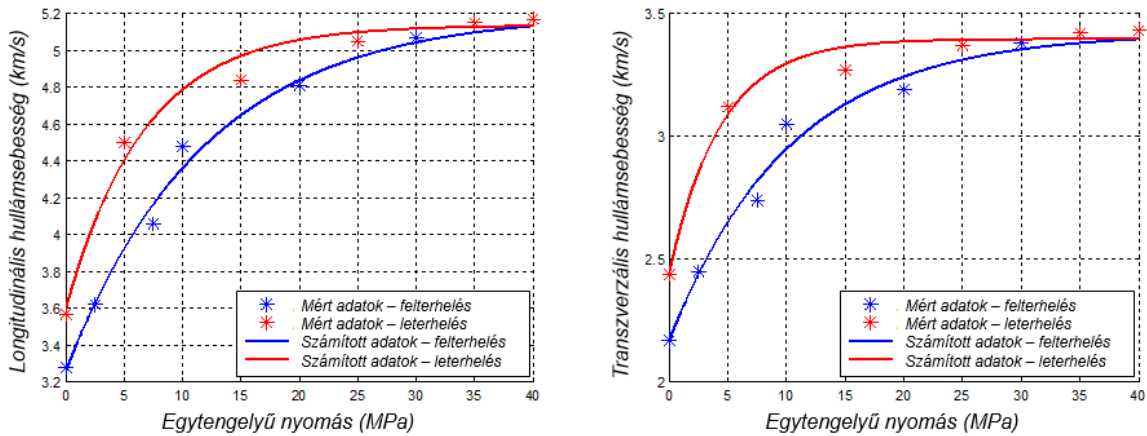
3. ábra. Az A jelű kőzetminta fel- és leterhelésénél mért, valamint inverzióval számított sebesség-nyomás függvénye



4. ábra. A B jelű kőzetminta fel- és leterhelésénél mért, valamint inverzióval számított sebesség-nyomás függvénye



5. ábra. Az F410 jelű kőzetminta fel- és leterhelésénél mért, valamint inverzióval számított sebesség-nyomás függvénye



6. ábra. Az A11 jelű kőzetminta fel- és leterhelésénél mért, valamint inverzióval számított sebesség-nyomás függvénye

Láthatjuk, hogy a számított adatok kiválóan illeszkednek a mért adatokhoz, ami alapján elmondható, hogy a modellegyenletek jól jellemzik a fel- és leterhelési szakaszt, így az akusztikus hiszterézis fizikai magyarázatára bevezetett kőzefizikai modell helyes. Kutatásaink során számos kőzetminta esetében hasonlóan jó egyezést kaptunk.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben olyan kőzefizikai modellt mutattunk be, amely megadja a kőzetnyomás és a longitudinális/transzverzális hullám terjedési sebességének kapcsolatát mind a fel- és leterhelési szakasz esetén, azaz sikeresen írja le és egyben magyarázatot ad az akusztikus hiszterézisre is. A felterhelési szakaszban a terjedési sebességek a nyomás növekedésével nőnek. A növekedés üteme kis nyomásértékeknél nagy, azonban nagy nyomásértékek esetén a növekedés üteme csökken, mivel egyre kevesebb a nyitott pórus. A felterhelési szakaszban bezárult pórusok a terhelés csökkentésével, a leterhelési szakaszban nem nyílnak meg maradéktalanul, egy bizonyos irreverzibilitás mindig jelen van. E fizikai elvből kiindulva állítottuk fel a jelenséget leíró differenciálegyenleteket, melyek megoldásával könnyen

értelmezhető formulákat vezettünk le. Az akusztikus hiszterézist a bevezetett modellegyenletekben a két különböző  $\lambda_V$  paraméter fejezi ki.

A kőzetfizikai modelleket számos kőzetmintán végzett mérések adatain alkalmaztuk. A modellegyenletekben szereplő modellparamétereket együttes 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/leterhelési szakaszt, azaz az akusztikus hiszterézist. A modell gyakorlatban való alkalmazhatóságát az inverziós eljárás során számított illeszkedési hibák alacsony értékei is alátámasztják.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a K 109441számú OTKA projekt támogatta.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] **RUDENKO, O. V., ROBSMAN, V. A.:** *Nonlinear process in media with an acoustic hysteresis and the problems of dynamic interaction between piles and earth foundation.* Acoustic Physics, 2004, 50/6, 725-731.
- [2] **JONES, L. A., WANG, H. F.:** *Ultrasonic velocities in Cretaceous shales from the Williston basin.* Geophysics, 1981, 46, 288-297.
- [3] **JI, S. C., WANG, Q., XIA, B.:** *Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks, Ores,* Polytechnic International Press, Montreal, Canada, 2002.
- [4] **WALSH, J. B., BRACE, W. F.:** *A fracture criterion for brittle anisotropic rock.* Journal of Geophysics Research, 1964, 69, 3449-3456.
- [5] **BIRCH, F.:** *The velocity of compression waves in rocks to 10 kilobars, Part 1.* Journal of Geophysics Research, 1960, 65, 1083-1102.
- [6] **HILL, R.:** *Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles.* Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11, 357-372.
- [7] **HASHIN, Z., SHTRIKMAN, S.:** *A variation approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials.* Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11, 127-140.
- [8] **WANG, Q., JI, S. C., SALISBURY, M. H., PAN, M. B., XIA, B., XU, Z. Q.:** *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.* Tectonophysics, 2005, 398, 67-99.
- [9] **SINGH, R., RAI, C., SONDERGELD, C.:** *Pressure dependence of elastic wave velocities in sandstones.* SEG Annual Meeting, New Orleans, 2006.
- [10] **WEPFER W. W., CHRISTENSEN, N. I.:** *A seismic velocity-confining pressure relation, with applications.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1991, 28, 451-456.
- [11] **JI, S., WANG, Q., MARCOTTE, D., SALISBURY, M. H., XU, Z.:** *P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure.* Journal of Geophysical Research, 2007, 112, B09204.
- [12] **DOBRÓKA, M., SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., KISS, A.:** *Kőzetfeszültségek és hatásuk a hullámterjedés jellemzőire - nyomásfüggő kőzetfizikai modellek.* Milagrossa Kft., Miskolc, 2014.

- [13] **TOKSÖZ, M. N., JOHNSTON, D. H., TIMUR, A.:** *Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements.* Geophysics, 1979, 44/4, 681-690.
- [14] **MENKE, W.:** *Geophysical data analysis – Discrete inverse theory.* Academic Press, Inc. London Ltd, 1984.
- [15] **GOMEZ, C. T, DVORKIN, J., VANORIO, T.:** *Laboratory measurements of porosity, permeability, resistivity, and velocity on Fontainebleau sandstones.* Geophysics, 2010, 75, E191-E204.