

ÚJ KÖZETFIZIKAI MODELLEK AZ AKUSZTIKUS TERJEDÉSI SEBESSÉGEK ÉS JÓSÁGI TÉNYEZŐK NYOMÁSFÜGGÉSÉNEK LEÍRÁSÁRA – ALKALMAZÁS SZÉN MINTÁKON

NEW ROCK PHYSICAL MODELS TO DESCRIBE THE PRESSURE DEPENDENCE OF ACOUSTIC WAVE VELOCITIES AND QUALITY FACTORS – APPLICATION ON COAL SAMPLES

KISS Anett¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹tudományos segédmunkatárs

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék

¹gfka@uni-miskolc.hu

²tudományos munkatárs, egyetemi adjunktus

²MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport; Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai-Elektronikai Intézeti Tanszék

²gfmj@uni-miskolc.hu

Kivonat: A longitudinális és transzverzális akusztikus hullámok terjedési sebességeinek ismeretében meghatározhatók a dinamikus Lamé paraméterek. Ismert tény, hogy a sebességek függenek a kőzetre ható nyomástól. A folyamatot leíró kvalitatív modellek helyett egy, a fizikai kapcsolatot magyarázó kvantitatív modellt javasolunk. A sebességek együttes inverziós algoritmusból történő feldolgozásával meghatározott modellparaméterekkel a terjedési sebességek egy tetszőleges egytengelyű nyomástartományra számíthatók. Közismert, hogy a kőzetekben terjedő hullámok csillapodnak. A P és S hullámok terjedése kapcsán mérhető Q_α és Q_β jósági tényezők nyomásfüggésére új közetfizikai modellt javasolunk. A modellparaméterek inverziós meghatározása után, a jósági tényezők tetszőleges nyomás értékekre számíthatók. A modellek alkalmazhatóságát irodalomban közölt, szénmintákon mért adatokon teszteltük, majd megadtuk a nyomásfüggő Lamé paraméterek és veszteségi szögek értékeit. Az eredmények alátámasztották a modellek alkalmazhatóságát.

Kulcsszavak: akusztikus sebesség, jósági tényező, közetfizikai modell, dinamikus rugalmassági paraméterek

Abstract: Dynamic Lamé parameters can be determined from longitudinal and transverse acoustic wave velocities. It is known that velocities depend on pressure effecting on the rocks. Instead of the qualitative models we suggest a quantitative one explaining the physical relationships of the process. The propagation velocities can be calculated for any pressures after determining the model parameters with the joint inversion processing of velocities. It is well known that waves attenuate in rocks. We suggest a new rock physical model for the pressure dependence of quality factors measured in connection with P and S wave propagations. After the determination of model parameters in joint inversion procedure the quality factors can be calculated for any pressure. The applicability of the models was tested on literature data measured on coal samples, then the pressure dependent Lamé parameters and loss angles were derived as well. Results proved the applicability of the models.

Keywords: acoustic velocity, quality factor, rock physical model, dynamic elastic parameters

1. BEVEZETÉS

A geofizikának számos eszköz áll rendelkezésére, hogy információt nyerjen a felszín alatti szerkezetek felépítéséről, legyen szó nyersanyag kutatási, mérnök geofizikai, vagy akár régészeti feladatokról. A rugalmas hullámok terjedésén alapuló módszerek széles körben alkalmazottak. Ezek alapelve hasonló, mesterségesen keltetnek szeizmikus/akusztikus hullámokat, melyek haladnak a közegben, réteghatárokon, illetve visszaverődnek azokról. A visszaérkező hullámok beérkezési idejét mérve – ha ismert a közegben a terjedési sebesség –

meghatározhatjuk egy objektum mélységét, vagy fordítva, ismerve a mélységet, megadhatjuk a közeg terjedési sebességét, mely fontos kőzetfizikai jellemzőkről adhat információt. Az egyes módszerek alapvetően az alkalmazott frekvenciákban, így a behatoló képességeik, horizontális és vertikális felbontó képességeikben különböznek. A szeizmika alacsony frekvenciájú hullámaival képet ad a felszín alatti geológiai szerkezetekről. Ettől nagyobb frekvenciával működik, így nagyobb vertikális felbontóképességet biztosító módszer a fúrólukban végzett akusztikus mélyfúrési geofizikai szelvényezés, ez azonban meglehetősen lokális információval szolgál. Laboratóriumi körülmények között is lehetőség van az akusztikus hullámok vizsgálatára. Ennek előnye, hogy a méréseket ismert és kontrollált nyomásállapotok, alakváltozások, hőmérséklet mellett végezhetjük el. Ez azért fontos, mert a nyomás, illetve nyomásváltozás hatással van az akusztikus terjedési sebességekre, melyekből további fontos paraméterek, a dinamikus rugalmassági modulusok is megadhatók.

Számos laboratóriumi vizsgálat [1] [2] [3] [4] [5] foglalkozik a longitudinális (P , α) és transzverzális (S , β) hullámterjedési sebességek változó nyomás alatti meghatározásával. Az eredmények alapján ismert tény, hogy a nyomás növelésével exponenciális növekednek a sebességek. Ennek oka Birch [6] szerint a pórustér záródása, Walsh és Brace [7] a mikrorepedések összezárulásával magyarázza a folyamatot. A kutatások során számos empirikus összefüggés született, vagyis mérési sorozatok alapján meghatározták a regressziós függvények paramétereit [8] [9] [10] [11], ezek azonban nem tekinthetők fizikai alapokon nyugvó magyarázatnak. A következőkben új kőzetfizikai modellt vezetünk be, mellyel ezt a hiányosságot igyekszünk pótolni a sebességadatok pontosabb és megbízhatóbb kiértékelése céljából.

Az akusztikus hullámok terjedési sebessége mellett gyakran vizsgált és fontos jelenség a hullámok csillapodása (abszorpciós együttható), illetve az ezzel kapcsolatban álló jósági tényező (Q_α , Q_β). A csillapodás leírására több modell is található a nemzetközi szakirodalomban, többek között a nemlineáris sűrűlódás modell, a Biot modell [12] [13], a viszkoelasztikus modell [14], és az elasztikus diszperzió modell. A sebességek nyomásfüggését leíró elméletek [6] [7] alkalmasak a jósági tényező és nyomás kapcsolatának levezetésére is. A növekvő nyomás csökkenő pórustérfogatot okoz, a szemcsék közelebb kerülnek egymáshoz, így a mérhető abszorpciós együttható értéke csökken, vagyis a jósági tényező értéke – a sebességhez hasonlóan – növekszik.

A következőkben új kőzetfizikai modelleket mutatunk be az akusztikus sebességek és jósági tényezők nyomásfüggésének leírására. Az akusztikus hullámterjedés jelenségét a konstans Q modell feltételezésével tárgyaljuk, melynek értelmében a sebességek és jósági tényezők kőzetfeszültség függő paraméterek. A modellt jellemző paraméterek inverziós meghatározása után a sebességek és jósági tényezők tetszőleges nyomásra számíthatók a modellegyenletekkel, valamint további mennyiségek, a nyomásfüggő dinamikus rugalmassági modulusok és veszteségi szögek is származtathatók.

2. KŐZETFIZIKAI MODELL AZ AKUSZTIKUS TERJEDÉSI SEBESSÉGEK NYOMÁSFÜGGÉSÉNEK LEÍRÁSÁRA

A szakirodalomban található kvalitatív modellek nem adják meg a jelenség fizikai és matematikai leírását. Ezért a következőkben Birch [6] elgondolásait követve - miszerint a pórustér záródása az oka a sebességnövekedésnek terhelés hatására - vezetünk be egy új kvantitatív kőzetfizikai modellt. Feltételezve, hogy a $d\sigma$ feszültség növekedés dV pórustérfogat csökkenést okoz a kőzetben, felírható az alábbi differenciálegyenlet

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

ahol:

- dV – a pórustérfogat megváltozása [m^3];
- λ_V – új közetfizikai paraméter (fizikai jelentését a (9) egyenletben adjuk meg) [$1/MPa$];
- V – a pórustérfogat [m^3];
- $d\sigma$ – a feszültségváltozás [MPa].

Lineáris kapcsolatot feltételezve az akusztikus sebesség (behelyettesíthető a longitudinális vagy transzverzális hullám sebességével) infinitezimális megváltozása és a pórustérfogat változás között felírható a második modell törvényt jelentő differenciálegyenlet

$$dv = -\kappa dV, \quad (2)$$

ahol:

- dv – akusztikus sebesség infinitezimális megváltozása [m/s];
- κ – arányossági tényező, új anyagjellemző paraméter [$1/m^2s$].

Egysítve és megoldva az (1) és (2) egyenleteket az alábbi összefüggésre jutunk

$$dv = \kappa \lambda_V V_0 \exp(-\lambda_V \sigma) d\sigma \rightarrow v = K - \kappa V_0 \exp(-\lambda_V \sigma), \quad (3)$$

ahol:

- V_0 – feszültségmentes állapotban mérhető pórustérfogat ($\sigma=0$) [m^3];
- σ – aktuális feszültség [MPa].
- K – integrációs konstans [-].

Terheletlen állapotban a v_0 sebesség és V_0 pórustérfogat mérhető laboratóriumban, így a K integrációs konstans számítható a (3) alapján felírható $v_0 = K - \kappa V_0$ összefüggés szerint. Felhasználva ezt az eredményt és bevezetve a $\Delta v_0 = \kappa V_0$ jelölést (3) egyenlet átírható

$$v = v_0 + \Delta v_0 (1 - \exp(-\lambda_V \sigma)), \quad (4)$$

ahol:

- v – adott nyomáshoz tartozó sebesség [m/s];
- v_0 – terheletlen állapothoz ($\sigma=0$) tartozó sebesség [m/s];
- Δv_0 – sebesség-esés [m/s].

A modell keretén belül a sebesség terhelés hatására a nyitott pórustér mellett mért v_0 kezdeti értékről a v_{max} maximális nyomáson (teljesen összezárt pórustér esetén) mérhető sebesség értékre növekszik. A kettő közötti különbséget jelentő $\Delta v_0 = v_{max} - v_0$ sebesség-esést így a zérus nyomáson jelenlévő pórusok okozzák [15].

Mivel a modell alapját az izotróp pórustérfogat változás adja, a modell longitudinális (P) és transzverzális (S) hullámokra is alkalmazható. Ennek megfelelően a (4) modellegyenlet

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha_0 (1 - \exp(-\lambda_v \sigma)), \quad (5)$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta_0 (1 - \exp(-\lambda_v \sigma)) \quad (6)$$

szerint írható fel, ahol:

α – a longitudinális hullámsebesség adott σ nyomáson [m/s];

α_0 – a longitudinális hullámsebesség terheletlen állapotban ($\sigma = 0$) [m/s];

$\Delta\alpha_0$ – a longitudinális hullámsebesség-esés [m/s];

β – a transzverzális hullámsebesség adott σ nyomáson [m/s];

β_0 – a transzverzális hullámsebesség terheletlen állapotban ($\sigma = 0$) [m/s];

$\Delta\beta_0$ – a transzverzális hullámsebesség-esés [m/s].

Laboratóriumi mérések alapján látható, hogy egyes kőzettípusok eltérően reagálnak a feszültségváltozásra. Bizonyos esetekben kis feszültségnövekedés is jelentős sebességváltozást okoz, azaz az adott kőzet érzékenyebben reagál a megváltozott feszültségállapotra. Az (5) és (6) modellegyenletekben szereplő λ_v kőzetfizikai paraméter jelentése ezért a geofizikában széleskörűen alkalmazott érzékenységi függvények segítségével adható meg [16]. Alkalmazva a $\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha$ és $\Delta\beta = \beta_{max} - \beta$ jelöléseket (a σ nyomáson nyitva lévő pórusok okozta sebességesések), (5) és (6) egyenletek a

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_0 \exp(-\lambda_v \sigma) \quad (7)$$

$$\Delta\beta = \Delta\beta_0 \exp(-\lambda_v \sigma) \quad (8)$$

alakban írhatók, így bevezetve a sebességesések logaritmikus feszültségérzékenységét ($S(\sigma)$) az alábbi egyenletet kapjuk eredményül

$$S(\sigma) = -\frac{1}{\Delta\alpha} \frac{d\Delta\alpha}{d\sigma} = -\frac{d \ln(\Delta\alpha)}{d\sigma} = -\frac{1}{\Delta\beta} \frac{d\Delta\beta}{d\sigma} = -\frac{d \ln(\Delta\beta)}{d\sigma} = \lambda_v, \quad (9)$$

melyből látható, hogy a λ_v kőzetfizikai paraméter a sebességesés logaritmikus feszültségérzékenységével egyezik meg. A (9) egyenletből az is látható, hogy σ^* karakterisztikus feszültségnél a $-\lambda_v \sigma^*$ kitevő 1, ezért $\Delta\alpha_{\sigma^*} = \Delta\alpha_0 / e$ és $\Delta\beta_{\sigma^*} = \Delta\beta_0 / e$, vagyis a sebességesések a „kiindulási” sebességesések e -ad részére csökkennek. Az (5) és (6) egyenletekben szereplő λ_v közös paraméter, kapcsolatot biztosít a P és S hullámsebesség adatok között, így lehetőség van azok együttes inverziós kiértékelésére.

3. KÖZETFIZIKAI MODELL A JÓSÁGI TÉNYEZŐK NYOMÁSFÜGGÉSÉNEK LEÍRÁSÁRA

A rugalmas hullámok csillapodásának fizikai magyarázatát két módon jellemezhetjük [17]. A modellek egyik típusa a csillapodást általánosított lineáris rugalmas egyenletekkel (Hooke-törvény) vagy bizonyos nem linearitást megengedő módosított egyenletekkel magyarázzák. A modellek másik csoportja új fizikai és matematikai leírást alkalmaz a lehetséges csillapodási mechanizmusok értelmezésére, melyeket a kőzetek mikroszkopikus jellemzőihez és azok hullámterjedés során való viselkedéséhez kötnek. Utóbbi elgondolásokat követve az alábbiakban új kőzetfizikai modellt vezetünk be a jósági tényezők (Q_α , Q_β) nyomásfüggésének leírására. A konstans Q modell feltételezésével felállított modell alapját a

sebességekhez hasonlóan, a nyomásváltozás hatására bekövetkező pórustérfogat változás adja.

A növekvő nyomás hatására a szemcsék kompaktálódnak és ezáltal csökken a pórustérfogat, mely a csillapodás mértékének is a csökkenését okozza, így növekvő jósági tényező értékek mérhetőek. A jósági tényező modell első modell törvényének a sebességmodellből ismert (1) egyenletet írhatjuk fel. Valamint lineáris kapcsolatot feltételezve a pórustérfogat megváltozása és a jósági tényező változás között felírható a (10) modell törvény

$$dQ = -\chi dV, \quad (10)$$

ahol:

dQ – a jósági tényező változás [-];
 χ – arányossági tényező [$1/m^3$].

Az (1) és (10) egyenletek egyesítésével felírható az alábbi differenciálegyenlet és megoldása

$$dQ = \chi \lambda_Q V_0 \exp(-\lambda_Q \sigma) d\sigma \rightarrow Q = K - \chi Q_0 \exp(-\lambda_Q \sigma), \quad (11)$$

ahol:

λ_Q – új közetfizikai paraméter, jelentése a sebességmodellnél megfogalmazott gondolatokat követve felírható, mint a „jósági tényező-esés” logaritmikusan feszültségérzékenysége [$1/MPa$];
 Q_0 – a terheletlen állapotban mérhető jósági tényező [-].

Terhelésmentes állapotban a jósági tényező értéke méréssel meghatározható, így a K integrációs konstans számítható a (11) alapján felírható $Q_0 = K - \chi Q_0$ összefüggés szerint. Felhasználva ezt az eredményt és bevezetve a $\Delta Q_0 = \chi Q_0$ jelölést (11) egyenlet átírható

$$Q = Q_0 + \Delta Q_0 (1 - \exp(-\lambda_Q \sigma)), \quad (12)$$

ahol:

Q – adott nyomáshoz tartozó jósági tényező [-];
 ΔQ_0 – „jósági tényező-esés”, mely a maximális és zérus nyomásokhoz tartozó jósági tényező értékek különbségét jelenti [-].

Mivel a modell alapja újra az izotróp pórustérfogat változás, ezért a (12) modell egyenlet felírható a longitudinális és transzverzális hullámok jósági tényezőire

$$Q_\alpha = Q_{\alpha 0} + \Delta Q_{\alpha 0} (1 - \exp(-\lambda_Q \sigma)), \quad (13)$$

$$Q_\beta = Q_{\beta 0} + \Delta Q_{\beta 0} (1 - \exp(-\lambda_Q \sigma)), \quad (14)$$

ahol:

- Q_α – a longitudinális hullám jósági tényezője adott σ nyomáson [-];
 $Q_{\alpha 0}$ – a longitudinális hullám jósági tényezője terheletlen állapotban ($\sigma = 0$) [-];
 $\Delta Q_{\alpha 0}$ – a longitudinális hullám jósági tényező-esése [-];
 Q_β – a transzverzális hullám jósági tényezője adott σ nyomáson [-];
 $Q_{\beta 0}$ – a transzverzális hullám jósági tényezője terheletlen állapotban ($\sigma = 0$) [-];
 $\Delta Q_{\beta 0}$ – a transzverzális hullám jósági tényező-esése [-].

Látható, hogy λ_Q a (13) és (14) egyenletekben egyaránt szereplő paraméter, így ha longitudinális és transzverzális hullámok jósági tényezőire is rendelkezésre állnak adatok, lehetőség van azok együttes kiértékelésére.

4. A LAMÉ PARAMÉTEREK ÉS VESZTESÉGI SZÖGEK NYOMÁSFÜGGÉSE

A közetek rugalmassági paramétereinek leírására gyakran alkalmazott a lineárisan rugalmas izotrop test vagy Hooke-test modellje. Ebben az esetben a közegben létrejövő feszültségek lineáris függvényei a deformációnak és ez a kapcsolat két rugalmassági jellemzővel, a Lamé paraméterekkel adható meg

$$\mu = \rho \beta^2, \quad \lambda = \rho \alpha^2 - 2\mu, \quad (15)$$

ahol:

- μ – a második Lamé paraméter [MPa];
 λ – az első Lamé paraméter [MPa];
 ρ – a közet sűrűsége [kg/m^3].

A P és S hullám sebesség adatok inverziójával megbecsült modellparaméterek alapján, az (5) és (6) egyenletekkel kiszámított nyomásfüggő sebességeket a (15) egyenletbe helyettesítve megadhatók a nyomásfüggő Lamé paraméter értékek. Mivel a közetek sűrűsége nagyságrendileg sokkal kisebb nyomásfüggést mutat, mint a sebességek, ezért ezt a változást a vizsgálatunk során elhanyagolhatónak tekintettük és konstans értékekkel számoltunk.

Amennyiben jósági tényező adatok szintén rendelkezésre állnak lehetőség van a veszteségi szögek megadására is

$$\varepsilon = \frac{1}{Q_\beta}, \quad \varepsilon' = \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda Q_\alpha} - \frac{2\mu}{\lambda Q_\beta}, \quad (16)$$

ahol:

ε és ε' – a veszteségi szögek.

5. MODELLEK ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA SZÉN MINTÁN

A bevezetett új közetfizikai modellek alkalmazhatóságát szakirodalomban Yu és szerzőtársai [18] által publikált, 15 jelű szén mintán mért sebesség és jósági tényező adatokon mutatjuk be, majd származtatjuk a nyomásfüggő Lamé paraméterek és veszteségi szögek értékeit is. A mérési adatok alapján együttes minősített inverziós eljárásban határoztuk meg a

modellegyenletekben / (5) és (6), (13) és (14) / szereplő modellparamétereket ($\alpha_0, \Delta\alpha_0, \beta_0, \Delta\beta_0, \lambda_V$, valamint $Q_{\alpha_0}, \Delta Q_{\alpha_0}, Q_{\beta_0}, \Delta Q_{\beta_0}, \lambda_Q$). Mivel a feladat túlhatározott (az adatok száma nagyobb, mint a modellparaméterek száma) a Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztuk [19]. Ezen paramétereket a direkt feladatot jelentő modellegyenletekbe visszahelyettesítve lehetőség van tetszőleges nyomáshoz tartozó sebességek és jósági tényezők számítására. Az inverzió eredményét a sebességek vonatkozásában az 1. táblázatban, a jósági tényezők vonatkozásában a 2. táblázatban közöljük. Zárójelben feltüntetjük a paraméterek becslési hibáit, melyet az alábbi formulával határoztunk meg [19]

$$var_i = \sqrt{cov(\mathbf{m})_{ii}}, \quad (17)$$

ahol:

- var_i – az i -edik modellparaméter becslési hibája;
 $cov(\mathbf{m})_{ii}$ – paramétertérbeli kovariancia mátrix főátlóbeli elemei;
 i – a modellparaméterek száma (jelen esetekben $i=1,2,\dots,5$).

α_0 [m/s]	$\Delta\alpha_0$ [m/s]	λ_V [1/MPa]	β_0 [m/s]	$\Delta\beta_0$ [m/s]	D [%]	S [-]
1974 (±19)	580 (±20)	0.1765 (±0.0119)	1002 (±6)	166 (±6)	0.77	0.50

1. táblázat P és S hullám sebesség adatokból inverzióval meghatározott modellparaméterek és becslési hibáik, relatív adattérbeli távolság és átlagkorreláció.

Q_{α_0} [-]	ΔQ_{α_0} [-]	λ_Q [1/MPa]	Q_{β_0} [-]	ΔQ_{β_0} [-]	D [%]	S [-]
0.39 (±0.85)	68.20 (±4.02)	0.0294 (±0.0034)	14.53 (±0.62)	35.13 (±2.31)	6.49	0.64

2. táblázat P és S hullám jósági tényező adatokból inverzióval meghatározott modellparaméterek és becslési hibáik, relatív adattérbeli távolság és átlagkorreláció.

A Yu és szerzőtársai [18] által mért P és S hullám sebességeket az 1. ábrában piros szimbólumokkal, az inverzióval meghatározott modellparaméterekkel számított sebességeket kék folytonos vonallal jelöljük. Ehhez hasonlóan a mért jósági tényezőket piros szimbólumok, a számított értékeket kék folytonos vonal mutatja a 2. ábrán. Látható, hogy mind a sebesség, mind a jósági tényező értékek exponenciális növekedést mutatnak a növekedő terhelés hatására. A mért és számított adatok közötti távolság kicsi. Ennek számszerűsítésére relatív adattérbeli távolságot is számítottunk [19]

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{d_k^{(m)} - d_k^{(sz)}}{d_k^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 [\%] \quad (18)$$

ahol:

- D – a relatív adattérbeli távolság [%];

- N – az adatok száma [-];
 $d_k^{(m)}$ – k-adik mért adat;
 $d_k^{(sz)}$ – k-adik számított adat.

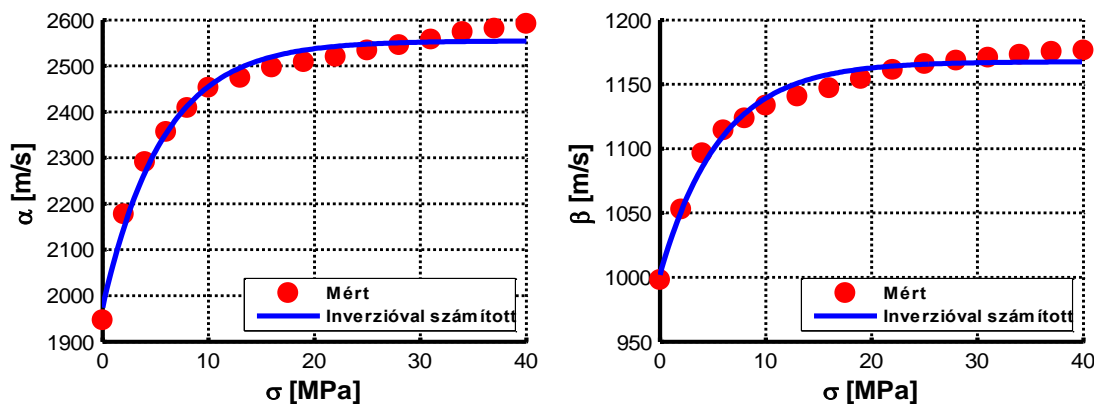
Az inverzió során utolsó iterációs lépésben kiszámított legkisebb adattérbeli távolságok a sebességek esetében $D = 0.77\%$, a jósági tényezők esetében $D = 6.49\%$, mely értékek alátámasztják a modellek alkalmazhatóságát. A jósági tényezők esetében jelentkező nagyobb távolság oka lehet, hogy mérésük sok nehézséget okoz, ezért a mérési adatok nagyobb hibával terheltek. Az inverzió megbízhatóságának alátámasztására átlagkorrelációt számítottunk

$$S = \sqrt{\frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (\text{corr}(m)_{ij} - \delta_{ij})^2}, \quad (19)$$

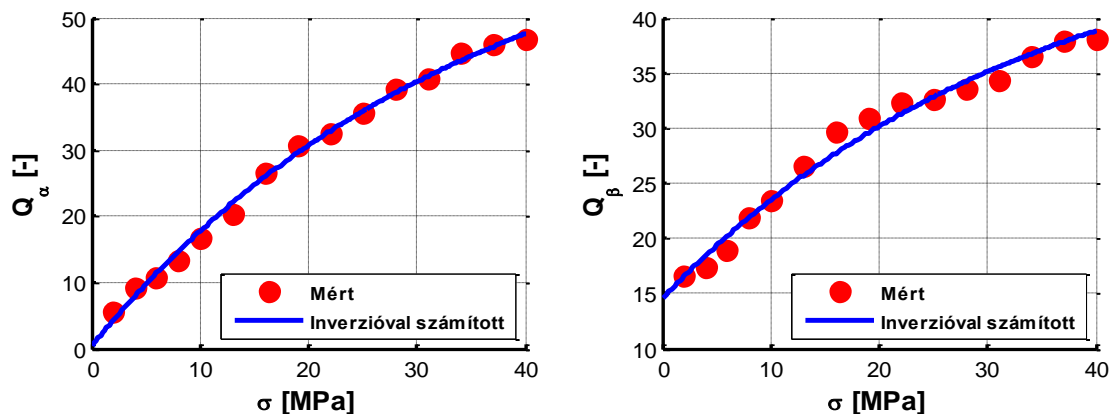
ahol:

- S – az átlagkorreláció [-];
 M – a modellparaméterek száma [-];
 $\text{corr}(m)$ – paraméter térbeli korrelációs mátrix, mely megadja a modellparaméter párok közötti lineáris kapcsolat erősségét;
 δ – Kronecker-delta szimbólum ($\delta=1$, ha $i=j$, egyébként 0).

Az eredményül kapott $S = 0.5$ (sebességek) és $S = 0.64$ (jósági tényezők) értékek azt mutatják, hogy közepes korreláció áll fenn a modellparaméterek között, tehát megbízható az inverziós eljárás eredménye.

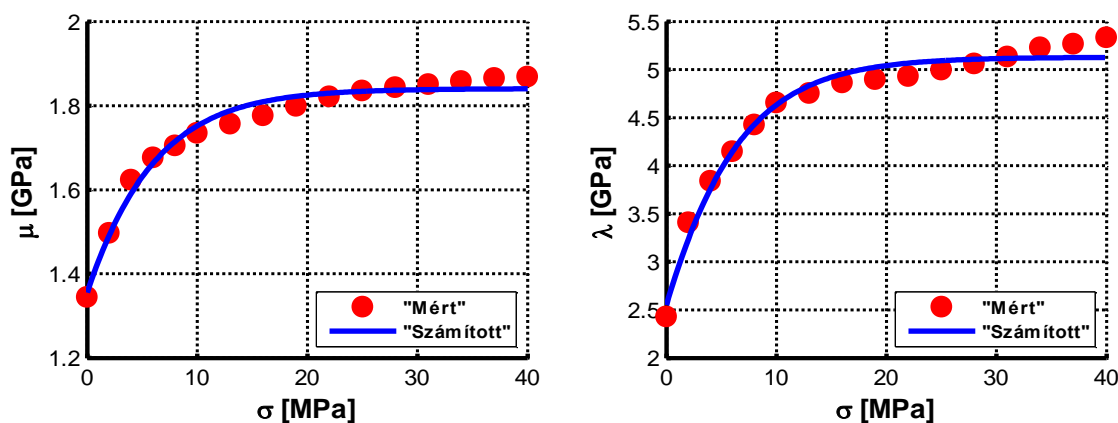


1. ábra Mért [18] és inverzióval becsült modellparaméterekkel számított longitudinális (α) és transzverzális (β) hullámterjedési sebességek nyomásfüggése.

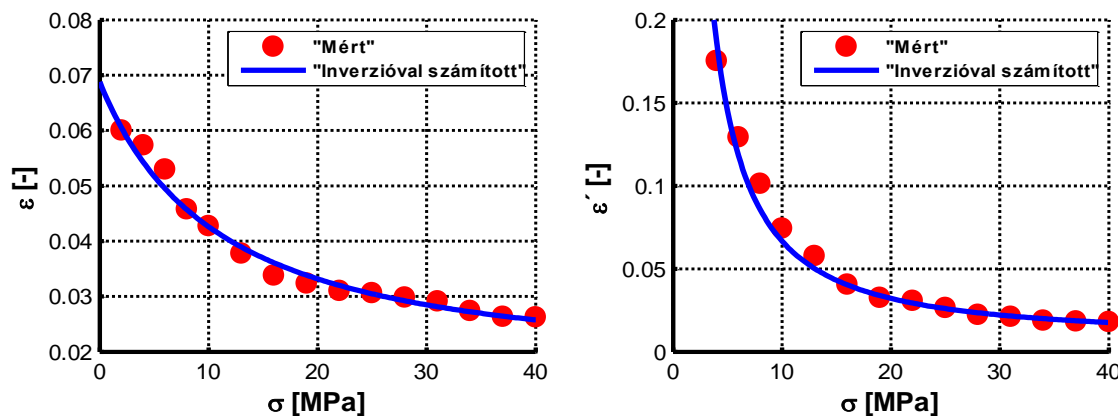


2. ábra Mért [18] és inverzióval becsült modellparaméterekkel számított longitudinális (Q_α) és transzverzális (Q_β) jósági tényezők nyomásfüggése.

A nyomásfüggő terjedési sebességek és a kőzet sűrűségének ismeretében (15) egyenletekbe helyettesítve megadhatók a nyomásfüggő Lamé paraméterek értékei. A nyomásfüggő veszteségi szögek pedig a jósági tényezőt is bevonva, a (16) egyenletek alapján számíthatók. Ezeket az eredményeket a 3. és 4. ábrák szemléltetik, ahol szimbólumok jelölik a mért sebességekből/jósági tényezőkből, valamint folytonos vonal mutatja a számított sebességekből/jósági tényezőkből paramétereket.



3. ábra Mért és számított sebességekből származtatott nyomásfüggő Lamé paraméterek.



4. ábra Nyomásfüggő veszteségi szögek.

ÖSSZEFOGLALÁS

Új közetfizikai modellekre tettünk javaslatot, melyek háromparaméteres exponenciális modellegetekkel leírják az akusztikus terjedési sebességek és jósági tényezők nyomásfüggését. Bevezettünk két új közetfizikai paramétert (λ_V és λ_Q), melyek a maximális nyomás és terheletlen állapot között fellépő sebesség-, illetve jósági tényező-esések logaritmikus feszültség érzékenységet adják meg. A mért adatok együttes inverziója során meghatározott modellparaméterekkel a sebesség és jósági tényező értékek tetszőleges nyomásra számíthatók. Az eredmények alapján megadhatók a nyomásfüggő Lamé paraméterek és veszteségi szögek is. A modellek alkalmazhatóságát irodalmi, szén mintán mért adatrendszeren mutattuk be. Az inverziós eredmények alátámasztották a gyakorlati hasznosíthatóságot.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] **WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R., GARDNER, G.H.F.,** *An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media.* Geophysics 1958. 23:459-493.
- [2] **NUR, A., SIMMONS, G.,** *The effect of saturation on velocity in low porosity rocks.* Earth and Planetary Science Letters 1969. 7:183-193.
- [3] **STACEY, T.R.,** *Seismic assessment of rock masses.* In: Proceedings of Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, 1976.
- [4] **SENGUN, N., ALTINDAG, R., DEMIRDAG, S., YAVUZ, H.,** *P-wave velocity and Schmidt rebound hardness value of rocks under uniaxial compressional loading.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2011. 48:693-696.
- [5] **HE, T., SCHMITT, D.R.,** *Velocity measurements of conglomerates and pressure sensitivity analysis of AVA response.* In: Proceedings of 76th SEG International Exposition and Annual Meeting, New Orleans, USA, 2006.
- [6] **BIRCH, F.,** *The velocity of compression waves in rocks to 10 kbars.* Journal of Geophysical Research 1960. 65:1083-1102.
- [7] **WALSH, J.B., BRACE, W.F.,** *A fracture criterion for brittle anisotropic rock.* Journal of Geophysical Research 1964. 69:3449-3456.
- [8] **FREUND, D.,** *Ultrasonic compressional and shear velocities in dry clastic rocks as a function of porosity, clay content, and confining pressure.* Geophysical Journal International 1992. 108:125-135.
- [9] **KHAKSAR, A., GRIFFITHS, C., MCCANN, C.,** *Effective stress coefficient for P- and S-wave velocity and quality factor in sandstone, Example from Cooper Basin, Australia.* In: Proceedings of 69th SEG Annual Meeting, Houston, USA, 1999.
- [10] **EBERHART-PHILLIPS, D., HAN, D.H., ZOBACK, M.D.,** *Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone.* Geophysics 1989. 54:82-89.
- [11] **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.
- [12] **BIOT, M.A.,** *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids, I: Low frequency range.* Journal of the Acoustical Society of America 1956. 28.
- [13] **BIOT, M.A.,** *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids, II: High frequency range.* Journal of the Acoustical Society of America 1956. 28.
- [14] **BLAND, D.R.,** *The theory of linear viscoelasticity.* Pergamon Press, Oxford. 1960.

- [15] **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.
- [16] **DOBRÓKA, M., SOMOGYI MOLNÁR, J.,** **The pressure dependence of acoustic velocity and quality factor: new petrophysical models.** Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica 2012. 47:149–160.
- [17] **TOKSÓZ, M.N., JOHNSTON, D.H.,** *Preface.* In: SEG Geophysics reprint series 1981. No. 2 *Seismic Wave Attenuation*, 1–5.
- [18] **YU, G., VOZOFF, K., DURNEY, D.W.,** *The influence of confining pressure and water saturation on dynamic elastic properties of some Permian coals.* Geophysics 1993. 58:30–38.
- [19] **MENKE, W.,** *Geophysical data analysis – Discrete inverse theory.* Academic Press, Inc. London, 1984.