

A számítógépipar fejlődésével párhuzamosan a szeizmikus feldolgozás egyre több műveletének végrehajtására az összegzés előtt kerülhet sor, ami a jobb közelítések révén kedvezően befolyásolja a kapott szelvények felbontóképességét és jel/zaj viszonyát. A szeizmikus sztratifográfia elveinek alkalmazása és a rejtejt csapdák kutatása egyaránt ezt igényli. Az amplitudó-offszet analízis egyre szélesebbkörű alkalmazása is ebbe a tendenciába illeszkedik.

A „szeizmikus attribútumokkal” ellentétben, az amplitudó-offszet hatások vizsgálatának komoly fizikai alapjai vannak. Az angol nyelvű szakirodalomban AVO (Amplitude Versus Offset) analízisnek nevezett eljárás értékes eszköz lehet a szénhidrogén (különösen a gázos) tárolók közvetlen detektálására, a CH perspektíva minősítésére. A távolság vagy beesési szög függvényében fellépő amplitudó (azaz reflexiók együttható) változások vizsgálata általában gondos feldolgozást igényel, mivel a hatást számos tényező (a statikus, dinamikus korrekciók hibái, gyenge jel/zaj arány, a jelalakok dinamikus korrekció miatti megnyúlása stb.) zavarhatja, elfedheti. A kifejlesztett robusztus eljárás célja a különlegesen gondos (és ezért költséges) előfeldolgozás megtakarítása a maradék görbületek automatikus felismerése segítségével és a jelalak nyúlás hatásának kiküszöbölésével.

Az eljárás alkalmazása lehetővé teszi az anomáliák olcsóbb, rutinszerű felismerését, mely alapján az érdekes helyeken részletesebb vizsgálatok végezhetőek. A kutatás hatékonyságát növeli, ha a „rutin” feldolgozás eredményeinek kiértékelése után történik speciális feldolgozás a perspektivikus helyeken. Ennek költségei még mindig sokkal kisebbek lehetnek, mint egy-egy meddő fúrás.

### I. KÉSMÁRKY, S. SZÁNTÓ: Experiences with the Application of Amplitude Versus Offset Analysis

*In parallel with the fast evolution of the computer technology, more and more seismic processing steps are executed before stacking. This results in generally much better resolution and signal-to-noise ratio, due to the more accurate approximations applied. There is an enormous demand for this, on behalf of the application of seismic stratigraphy and the exploration of subtle traps. The more extensive use of AVO analysis also fits into this trend.*

*In contrast with the 'seismic attributes', the AVO analysis has a massive physical background. Due to these principles, amplitude versus offset (AVO) analysis has been regarded as a valuable tool to detect hydrocarbon (especially gas) reservoirs and to appraise CH potential. In general, study of the amplitude-offset effects need a very careful preprocessing, because of the sensitivity of the method concerning dynamic correction errors, NMO stretching of the traces, poor signal-to-noise ratio etc. Our robust approach applies an automatic recognition of the parabolic residual moveout time shifts, to eliminate or minimize the unfavourable effects mentioned above. This way the AVO analysis can be applied as a part of the routine processing.*

### Bevezetés

Paradoxonnak tűnik, hogy egy iparág fejlődését utólag tévesnek bizonyuló felismerések is segíthetik. Ilyen például MUSKAT és MERES cikke [1940], melynek fő következtetése szerint a reflexiók amplitudó változása kellően nagy beesési szögtartományon belül elhanyagolható, következésképpen a szeizmikus jelalakok a (hipebolikus) beérkezési görbék mentén azonosaknak tekinthetők. Ilyen leegyszerűsített modell szolgált alapul a többszörös fedéses mérési technológia és feldolgozás bevezetéséhez és sikereihez. Az állítás az esetek döntő többségében valóban jó közelítés, és a szerkezetkutató szeizmika igényeinek hosszú ideig tökéletesen megfelelt. KOEFOED [1955] hívta fel a figyelmet a közelítés korlátaira és az ilyen anomáliák összefüggésére a rugalmas állandókból levezethető Poisson aránnyal. Sajnos, korát megelőzte, mivel még nem voltak adva a gyors számítógépes adatfeldolgozás lehetőségei.

A terepi műszerek és a számítógépes feldolgozás a 80-as évek elejére érte el azt a fejlettségi szintet, amikor a téma megérett (mind a jó minőségű adatok, mind a feldolgozás oldaláról) az ipari alkalmazásra. A „dim spot” jelenség jó példa erre, ahol a beérkezési görbe mentén a reflexiók együttható (és a jelalak) előjelet vált, és ez az időszelvényen kioltódást, elnémulást eredményez [RUTHERFORD, WILLIAMS, 1989]. Az ilyen amplitudó változások kőolajföldtani jelentőségének felismerése ösztönözte a módszer további kutatását és ipari alkalmazását.

Az elmélet és a laboratóriumi mérések is azt mutatják, hogy a gázzal telített porózus homokkövek Poisson aránya igen alacsony a vízzel telített esethez képest. A hagyományos időszelvény csak az összegzendő minták átlag értékét mutatja, az amplitudó-offszet analízis ezzel szemben lehetőséget ad az amplitudó tendencia (növekvő vagy csökkenő) jellegének statisztikus vizsgálatára a beesési szög (vagy az offszet) függvényében. A módszer tehát új dimenziót jelent az amplitudók tanulmányozására, a hagyományos „bright spot” (nagy amplitudók) vizsgálata mellett. Bár ezek az adatok általában kevésbé folytonosak, mint az összegszelvény fázisai, a pozitív AVO anomáliák általában egybeesnek a „bright

<sup>1</sup> Beérkezett: 1992. 12. 31-én

<sup>2</sup> Geofizikai Szolgáltató Kft. (GES) H-1068 Budapest, Városligeti fasor 42.

spot"-okkal, konszolidálatlan homokkő gáztárolók esetén [SICKLE, VALUSEK 1990].

Kis relatív változások esetén a reflexiók együttható a Poisson arány, a longitudinális hullám  $v_p$  sebessége és a sűrűség változások lineáris függvényeivel közelíthető. Az amplitudó menet az összegzendő (dinamikus korrekció utáni) csatornák mintáira illesztett egyenes „tengelymetszet” és „meredekség” paramétereivel jellemezhető, miután az offszet helyett bevezetjük a beesési szög szinuszának négyzetét, mint független változót.

A „kilógó” minták hatásának csökkentésére robusztus eljárások is alkalmazhatók az egyszerű legkisebb négyzetes módszere helyett.

A kiválasztott pontokra az egyenes illesztés a súlyozott négyzetes hiba összeg minimalizálásával történik. A súlyok a következők:

$$w_i = e^{-n \frac{(y_i - ax_i - b)^2}{\sum (y_k - ax_k - b)^2}}$$

ahol	$w_i$	az $i$ -edik súly
	$y_i$	az $i$ -edik pont $y$ koordinátája
	$x_i$	az $i$ -edik pont $x$ koordinátája
	$a$	az illesztett egyenes meredeksége
	$b$	az illesztett egyenes $y$ tengelymetszete
	$n$	az illesztésben szereplő pontok száma

### Adatfeldolgozás

Az amplitudó-offszet menetet számos tényező befolyásolja:

- geometriai szóródás
- a forrás és a geofoncsoport iránykarakterisztikái
- reflexiók és transzmissziós veszteségek, belső többszörösök
- energia elnyelés a fedő kőzetekben
- vékony réteg interferencia („hangolódás”)
- maradék statikus és dinamikus korrekciós hibák
- a jelalak megnyúlása a dinamikus korrekció során
- gyenge jel/zaj arány

Bármelyik offszet függés ezek közül lehet sokkal nagyobb, mint a keresett hatás, ezért fontos a megfelelő korrekció. Például az összegszelvény készítéshez még megfelelő sebességfüggvény már pontatlanul bizonyulhat az AVO anomáliát „eredményező” kis maradék görbületek miatt. Az első négy hatás a „valódi amplitudójú feldolgozással” vagy legalábbis egy gondosabb, relatív amplitudóviszonyokat megőrző feldolgozással kezelhető. A vállalatunknál kifejlesztett eljárás az utolsó három hatás ellen kínál megoldást (természetesen csak az elvi korlátok szabta lehetőségeken belül). Elvben a zavaró hatások determinisztikus korrekciója a helyesebb, de a gyakorlatban az adatfüggő manipulációkra, kiegyenlítésre is szükség lehet.

A feldolgozás főbb lépései:

- demultiplexelés
- átrendezés CDP/offszet szerint
- gömbi szóródási korrekció és szükség esetén nagyablakos

- amplitudó kiegyenlítés
- spike dekonvolúció, sávszűrés
- statikus, dinamikus korrekció
- amplitudó-offszet (AVO) analízis

A kimenet egy színes, időszelvény jellegű „szorzat” szelvény, mely a fent leírt „tengelymetszet” és „meredekség” szelvények szorzata. A felsoroltakon kívül offszetek szerinti vertikális összegzés és bizonyos keverés hasznos lehet a jel/zaj arány növelés szempontjából. A vékonyréteg hatások csak modellezéssel kezelhetőek, melyre szintén készítettünk programot. Az 1. és 2. ábra egy Alföldön mért szeizmikus szelvény részletét és a megfelelő AVO szelvényt mutatja.

### A zajok becslése és kivonása

(a) Feltételezzük, hogy a dinamikus és statikus korrigált, egy CDP-hez tartozó zajmentes szeizmikus csatornák előállíthatók összesen két „jelcsatorna” különböző arányú keverésével. Más szóval ez a modell megenged lassan változó „zavarokat”, maradék görbületeket.

(b) Feltételezzük, hogy a mérés csatornapáronként legfeljebb csak gyengén korrelált zajjal terhelt, valamint, hogy a zajok korrelációja a jelekkel nulla.

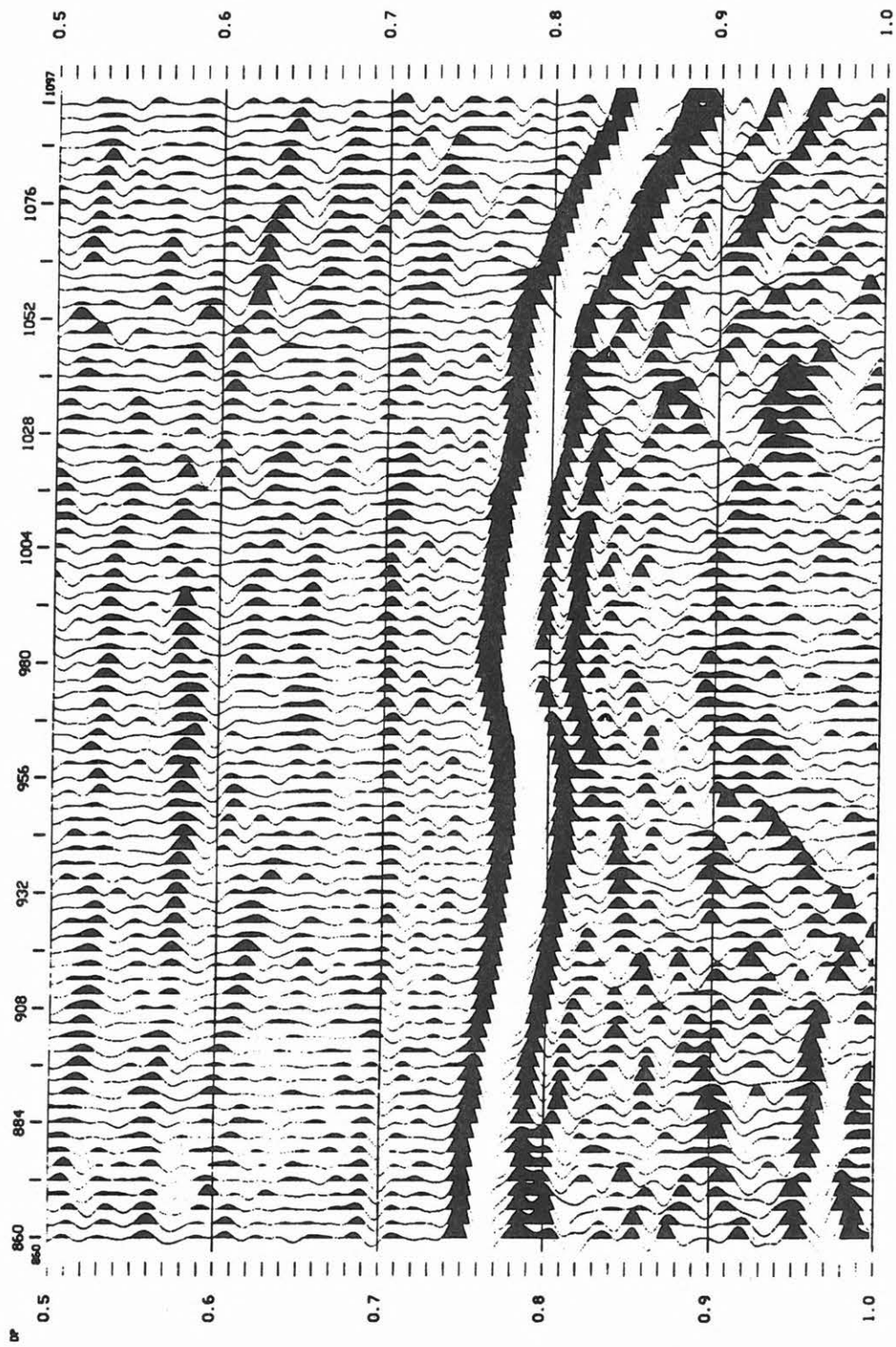
(c) Súlyozott összegzéssel becslést készítünk a két „jelcsatornára” és a keverési súlyokra egy olyan algoritmussal, amelyik arra törekszik, hogy a „jelek” kivonásával kapható zajbecslés korrelációs mátrixának determinánsa legyen maximális. Más szóval, a kivonás után kapott „zaj” legyen a lehetősegekhez képest minél korrelátlanabb [ROBINSON 1970].

Az eredményeket egy közös mélységponthoz (CDP) tartozó csatorna csoporton szemlélteti a 3.–5. ábra. Az ábrák bal oldalán látható hat egyedi csatorna jelentése rendre: fedésszám, a 30°-nál kisebb beesési szögekhez tartozó normál összegszelvény csatorna, a robusztus és a hagyományos algoritmussal számított „tengelymetszet” csatorna, a robusztus és a hagyományos algoritmussal számított „szorzat” csatorna.

### Modellezés

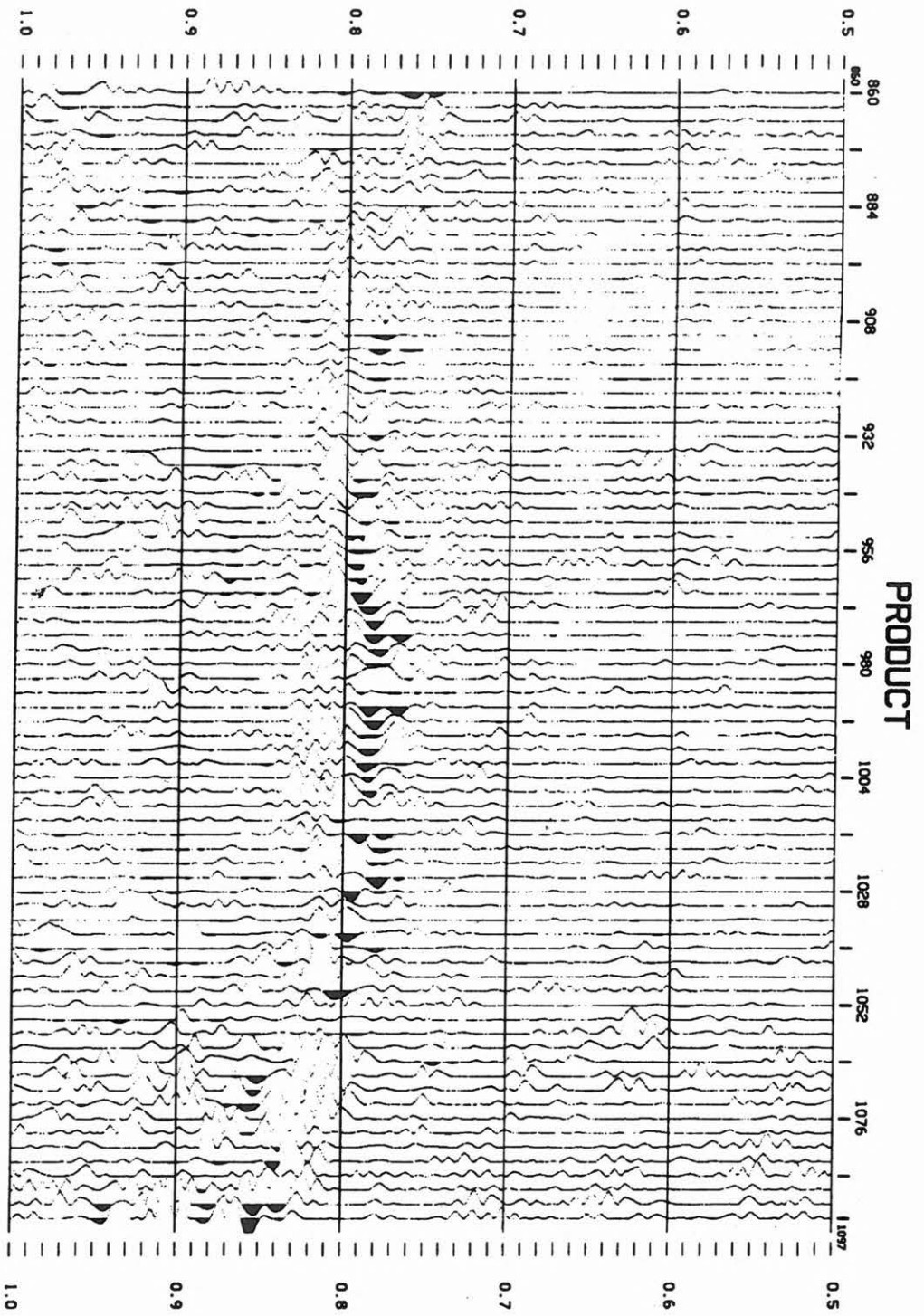
Az üledékes kőzetek különböző paramétereinek ( $P$  és  $S$  hullám sebessége, sűrűség, porozitás, pórustartalom, agyagosság) bonyolult kölcsönös függéseket mutatnak, így ezek megismerése, modellezése fontos feladat. A modellek sok esetben empirikus megfigyeléseken alapulnak. A Gassmann formula ad lehetőséget a pórustartalom és rugalmas együtthatók kapcsolatának kvantitatív modellezésére [GASSMANN 1951, 1953].

Egy nagyalföldi szeizmikus szelvény alapján felvett „tető” és „fenék” reflexióval jelentkező „kemény” homokkő blokk  $v_p/v_s$  arányát változtatva készítettük a 6.–7. ábrán látható szintetikus CDP csatorna csoportokat. Az ábrák két részből állnak. Felül a CDP csatornák láthatók az 1120–1520 ms-os időablakban. A két szintet kb. 1230 és 1290 ms-nál megjelöltük a jelalakok csúcserképeinél, fekete-fehérben sajnos nem túl jól mutató kis téglalapokkal.

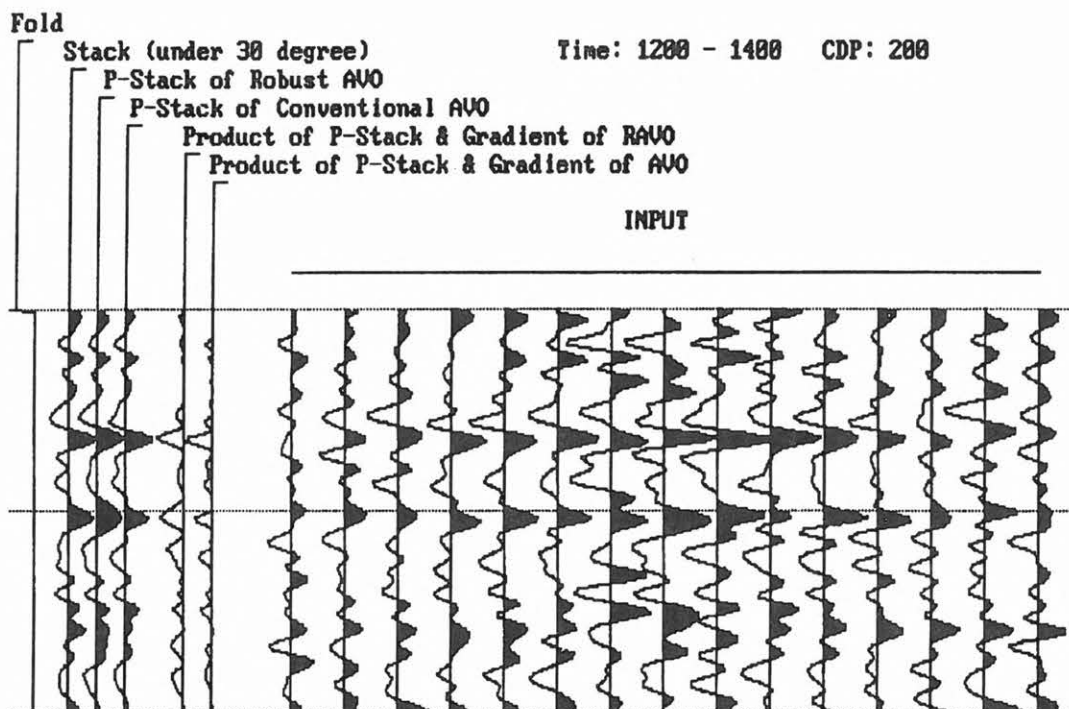


1. ábra. A bemenő adatokból számított hagyományos időszelvény részlete

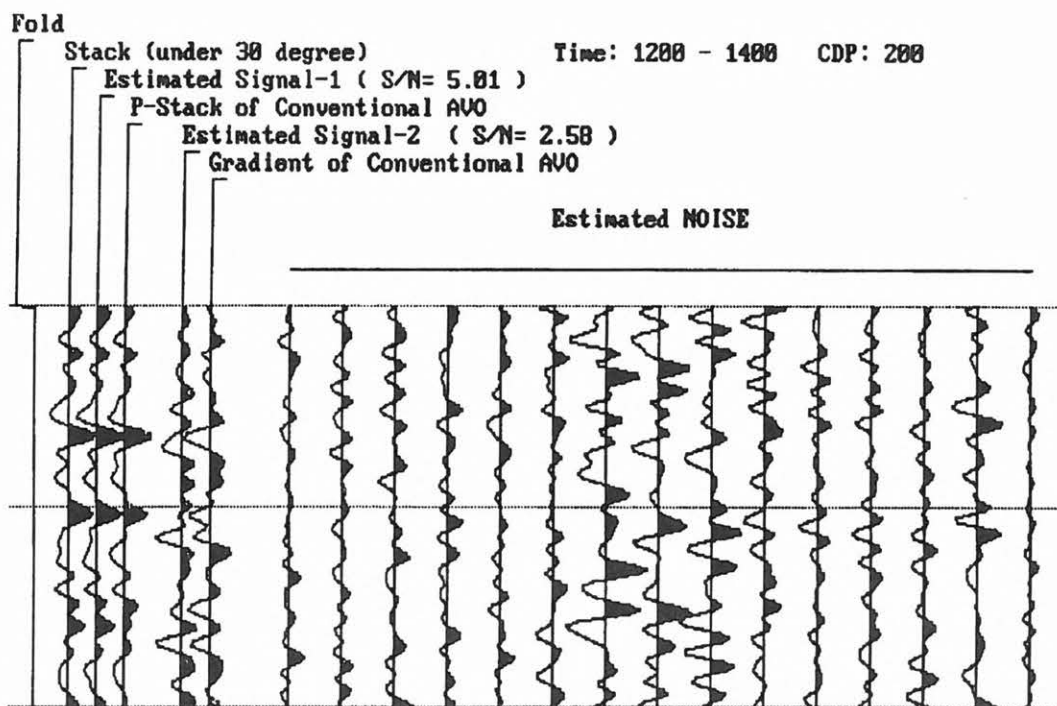
Fig. 1. A part of the conventional seismic time section computed from the input data set



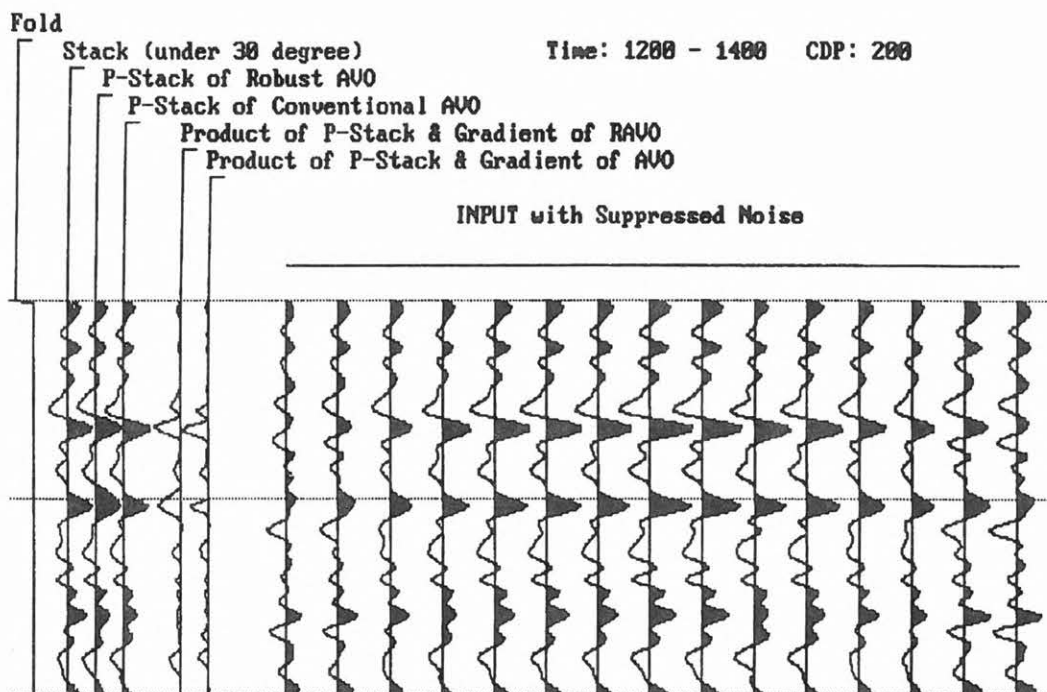
2. ábrán Az 1. ábrának megfelelő „szorzat” AVO szelvény részlete. A nyomdai lehetőségek miatt fekete-fehér kijátszást alkalmaztunk a színezés helyett. A fekete szín felel meg a pozitív értékeknek  
 Fig. 2. A part of the 'product' AVO section corresponding to Fig. 1. Because of technical reasons, the plotting was in black and white, instead of applying colours. Black corresponds to positive values



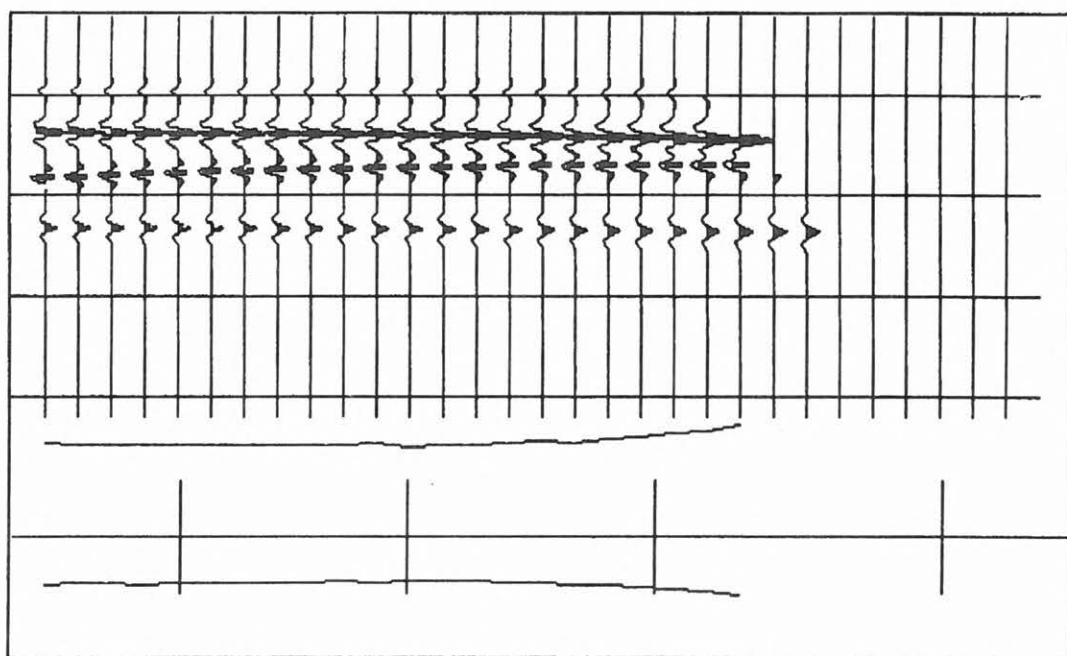
3. ábra. A bemeneti CDP csatornák az 1200-1400 ms időablakban  
 Fig. 3. Input CDP gather in the 1200-1400 ms window



4. ábra. A bemenet alapján becsült zaj. (A robusztus becslés helyett itt a két számított jelösszetevő szerepel.)  
 Fig. 4. The estimated noise traces from the input traces of Fig. 3. (Instead of the robust estimates, the two signal components are shown on the left hand side extra traces.)

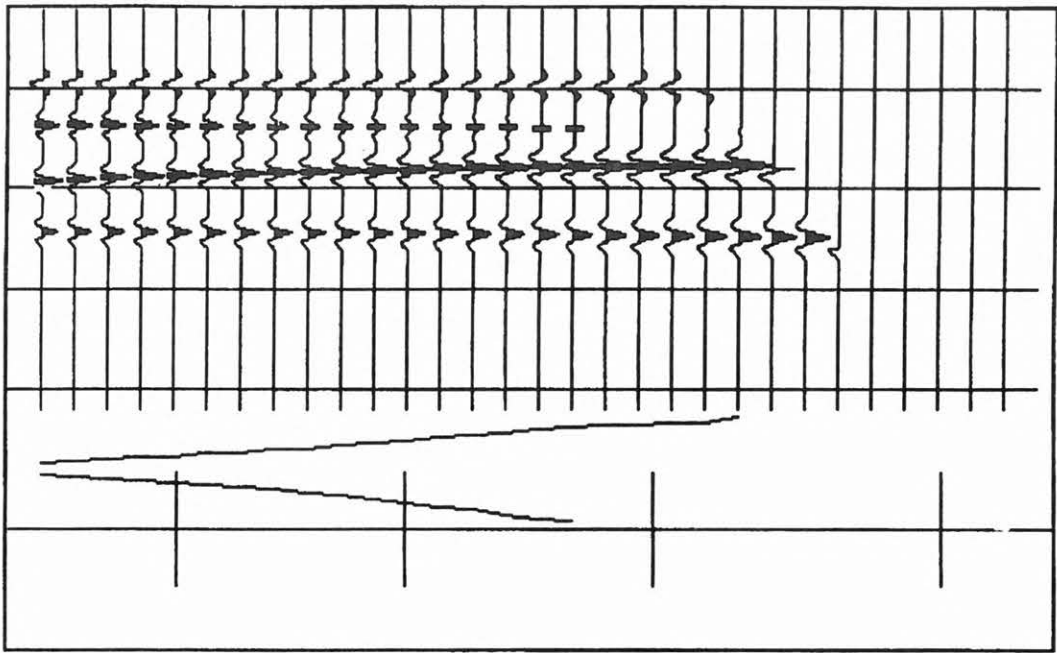


5. ábra. A zaj kivonásával becsült jel csatornák, melyek az offset függvényében csökkenő amplitudó menetet mutatnak  
 Fig. 5. The estimated signal component of the CDP gather shown in Fig. 3, exhibiting decreasing amplitudes after subtracting the noise traces (Fig. 4) from the input (Fig. 3)



6. ábra. A vízzel telített homokkő modellnek megfelelő szintetikus CDP csatorna csoport

Fig. 6. Synthetic CDP gather, computed from a water saturated 'hard' sandstone model in the 1120-1520 ms time window. The peak values of the top and bottom reflections of the sandstone are marked by little black bars at about 1230 and 1290 ms. (The 'smiling' of the bottom reflection is the result of the slightly smoothed stacking velocity function.) The 'amplitude profiles' of the two marked horizons are shown in the lower part of the figure. The horizontal line is the offset axis corresponding to the zero amplitude. The vertical bars represent the offsets, related to incidence angles 10, 20, 30 and 40 degrees respectively



7. ábra. A gázzal telített homokkő modellnek megfelelő szintetikus CDP csatorna csoport  
 Fig. 7. Synthetic CDP gather, computed from a gas saturated 'hard' sandstone model, similar to Fig. 6. The decreasing character of the amplitude of the top reflection and the polarity reversal of the bottom one are obvious

(Az alsó szint „mosolygása” annak következménye, hogy a dinamikus korrekcióhoz használt sebességfüggvény a felső szintre volt beállítva és simított jellege miatt nem követte a környezeténél lényegesen magasabb intervallum sebességű homokkő által kis „idő alatt” megnövelt stacking sebességet.) A két szint kijelölt amplitúdóinak menetét az ábrák alsó része mutatja. A vízszintes vonal a nulla amplitúdónak megfelelő koordináta tengely, a felső részhez hasonló offszet skálázással. A tengelyt metsző függőleges vonalak a 10, 20, 30 és 40 fokos beesési szögeknek megfelelő offszeteket jelölik.

Gázt nem tartalmazó homokkő esetén, amikor a homokkő  $v_p/v_s$  aránya megegyezik az agyag  $v_p/v_s$  arányával, a szintetikus modellen nem kapunk AVO anomáliát és az alsó horizont polaritása a felsőhöz képest fordított (6. ábra).

A gázzal telített homokkő esetére (a rétegvastagság, a  $v_p$ ,  $v_p/v_s$  arány és a homokkő sűrűségének változtatásával) a 7. ábrán látható szintetikus modellt kaptuk, mely igen jól tükrözi a felső fázis amplitúdócsökkenését és az alsó horizont polaritásfordulását (a 6. ábrához képest az alsó reflexió polaritást váltott).

A 6. és 7. ábrák meggyőzően mutatják, hogy pusztán a gáztartalommal összefüggő  $v_p/v_s$  arány (vagy a Poisson arány) milyen jelentősen és milyen irányban befolyásolja az amplitúdó-offszet meneteket és a polaritásvizonyokat.

### Az anomáliák értelmezése

Előljáróban megjegyezzük, hogy az AVO anomáliák értelmezése elsősorban agyagok közé ékelődő

tiszta homokkővek esetén tekinthető kidolgozottnak. Más litológia esetén csak óvatosabb következtetések vonhatók le.

Homokkővek esetén két alapesetet kell megkülönböztetni:

(a) „Lágy” (a környező agyagoknál alacsonyabb  $v_p$  longitudinális hullám terjedési sebességgel jellemezhető) homokkővek

(b) „Kemény” (a környező agyagoknál nagyobb  $v_p$  longitudinális hullám terjedési sebességgel jellemezhető) homokkővek

Mindkét esetben a longitudinális hullám  $v_p$  terjedési sebessége csökken a homokkőben, ha gázzal (vagy esetleg könnyű olajjal) van átitatva. A transzverzális hullám  $v_s$  terjedési sebessége ugyanakkor nem csökken jelentősen. Az AVO effektus lényege az, hogy a fenti esetben lecsökkenő  $v_p/v_s$  arány következtében nagyobb beesési szögeknél a beeső longitudinális hullám energiájának jóval nagyobb része alakul át „lassabb” transzverzális hullámenergiává.

„Lágy” homokkő esetén a homokkő tetején jelentkező reflexiós koefficiens negatív. Nagyobb offszetek (beesési szögek) esetén ez az érték csökken, azaz abszolút értékben növekszik. A „bright spot”-tal együtt jelentkező ilyen anomáliák a gáz jelenlétét valószínűsítik. Az elkészített szorzat szelvényeken az ilyen jelleg pozitív értékkel jelentkeznek. (Ugyanis a kimeneti AVO szelvény minden mintája az amplitúdó menetre illesztett egyenes tengelymetszetének és meredekségének szorzata. Negatív amplitúdókhoz a fenti esetben negatív meredekség, pozitív amplitúdókhoz pozitív meredekség tartozik. A kettő szorzata mindkét esetben pozitív.)

„Kemény” homokkő esetén a tetőn jelentkező reflexiós koefficiens kis pozitív érték. A gáz jelenléte tehát a homokkő „szeizmikus láthatóságát” csökkentheti, a kisebb  $v_p$  sebesség kontraszt következtében. Nagyobb offszetek (beesési szögek) esetén a reflexiós koefficiens abszolút értékben csökken, majd előjelet válthat. A „dim spot”-tal együtt jelentkező ilyen anomáliák a gáz jelenlétét valószínűsítik. A szorzat szelvényeken az ilyen jelleg nagyobb negatív értékekkel jelentkezik. (A gömbi szóródási korrekció közismert „alulkorrigálása” miatt az AVO anomáliákat nem tartalmazó szelvényrészletek is várhatóan kisebb negatív értékeket mutatnak.)

A kemény homokkő esetében jól látható, hogy az AVO módszer túllép a szeizmika olyan hagyományos alkalmazásán, melynek célja pusztán a merőleges beeséshez tartozó akusztikus impedancia kontrasztok leképezése. Ez esetben ugyanis kicsi és bizonytalan előjelű a reflexiós együttható, tehát a hagyományos szeizmika számára „láthatatlan” a réteghatár.

### Következtetések

Az AVO módszer sem tévedhetetlen eszköz, de a CH találati valószínűség 10-20%-os növelése már kellő gazdasági érv lehet az alkalmazásához. Mivel a nemzetközi tapasztalatok ezt megfelelő távlatokban is igazolták, a módszer alkalmazásába és továbbfejlesztésébe is érdemes energiát, pénzt fektetni. Fontos tanulság, hogy a tárolók karotázs mérésekből kapott petrofizikai paramétereinek és a szeizmikus adatok együttes értelmezését javítani szükséges. (A  $P$  és  $S$  hullám sebessége, a sűrűség, a porozitás, a pórustartalom, az agyagosság mind szoros összefüggésben van az AVO anomáliákkal.)

A módszer a terepi technológia újragondolását is igényli. Javasolható a kis geofonköz, minél kisebb geofoncsoport alkalmazása (az iránykarakterisztika

miatt). Fontos a forrás egyöntetűségének és a felszíni hatások kiküszöbölésének minél jobb megoldása. Az egyszeresek vizsgálatából megállapítható, hogy az elnémitás miatti fedésszám csökkenés jelentősen nehezíti a módszer alkalmazását sekélyebb célpontok esetén.

Az AVO módszer további alkalmazásához rendkívül fontos lesz, hogy a lemélyített fúrások eredményeinek ismeretében a korábbi következtetések revízióját az illetékes szakemberek elvégezzék.

A karotázs értelmezési adatok együttes felhasználásának jelentősége növekszik a megbízhatóbb paraméterek és geológiai modellek felhasználása révén.

A kifejlesztett robusztus eljárással bizonyos hamis AVO anomáliák elkerülhetők, az általános megbízhatóság és a feldolgozás rutin jellegének fenntartása mellett.

### HIVATKOZÁSOK

- GASSMANN F. 1951: Elastic waves through a packing of spheres, *Geophysics*, **16**, pp. 673-685  
 GASSMANN F. 1953: 'Errata', *Geophysics*, **18**, p. 269  
 KOEFOED O. 1955: On the effect of Poisson's ratio of rock strata on the reflection coefficients of plane waves, *Geophys. Prosp.*, **3**, pp. 381-387  
 MUSKAT M., MERES M. W. 1940: Reflection and transmission coefficients for plane waves in elastic media, *Geophysics*, **5**, pp. 115-148  
 ROBINSON John C. 1970: Statistically optimal stacking of seismic data, *Geophysics*, **35**, p. 436  
 RUTHERFORD S. R., WILLIAMS R. H. 1989: Amplitude-versus-offset variations in gas sands, *Geophysics*, **54**, pp. 680-688  
 SICKLE K., VALUSEK J. 1990: AVO analysis of 3-D seismic data identifies untested reservoirs in old gas field, *Geophysics; the Leading Edge*, **18**, July