

# Slip-sweep kísérleti mérés a Pannon-medencében

KÓNYA BENCE<sup>@</sup>

Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt., 1117 Budapest, Budafoki út 79.

<sup>@</sup>E-mail: bkonya@mol.hu

Mint az ipar minden területén, a szeizmikus mérések során is meghatározó szerepet játszik a termék – jelen esetben a szeizmikus szelvény – ár-érték aránya. Az árcsökkentés egyik hatékony módja az időegységre eső szeizmikus felvételek számának növelése – ennek egyik lehetséges megvalósítása a több vibrátorcsoporttal történő felvételezés.

Hagyományos vibrátoros mérés esetén az egyes vibrátorcsoportok addig nem kezdik el a jelgerjesztést, míg a másik csoport be nem fejezte, illetve amíg az előző jel felvételezése tart. Abban az esetben, ha a jelgerjesztések időben átfedik egymást, jelentősen növelhető a produktivitás. Az ilyen típusú jelgerjesztést az angol – és gyakran a magyar szakirodalomban is – slip-sweep típusú jelgerjesztésnek nevezik. Slip-sweep típusú mérés mind 2D mind 3D mérés esetén alkalmazható. Vizsgálandó, hogy e technológia alkalmazása milyen előnyökkel és hátrányokkal jár. Az alábbi munka a technológia elméleti hátterét, illetve egy, a Pannon-medencében végzett slip-sweep kísérleti mérést mutat be. A kísérleti mérést a MOL Nyrt. megrendelésére a GES Kft. végezte.

## Kónya, B.: Experimental slip-sweep survey in the Pannonian Basin

In seismic prospecting, like in other fields of the industry, the cost-value rate plays an important role. An efficient way to decrease the costs is to increase the number of seismic records in a given time. A good way to achieve this is to use more than one vibrator groups.

At conventional vibratory surveys the vibrator groups do not start emitting their signal till the other group finishes it and the recording of the previous signal lasts. The productivity can be increased significantly if the emitted signals are overlapped. This type of recording is called slip-sweep technique. The slip-sweep technique can be applied both in 2D and 3D surveys. This paper deals with the advantages and the disadvantages of the method. It describes the technique's theoretical background and shows an experimental survey carried out in the Pannonian Basin. The survey was accomplished by GES Ltd. on behalf of MOL Nyrt.

*Beérkezett:* 2011. február 28.; *elfogadva:* 2011. május 14.

## Bevezetés

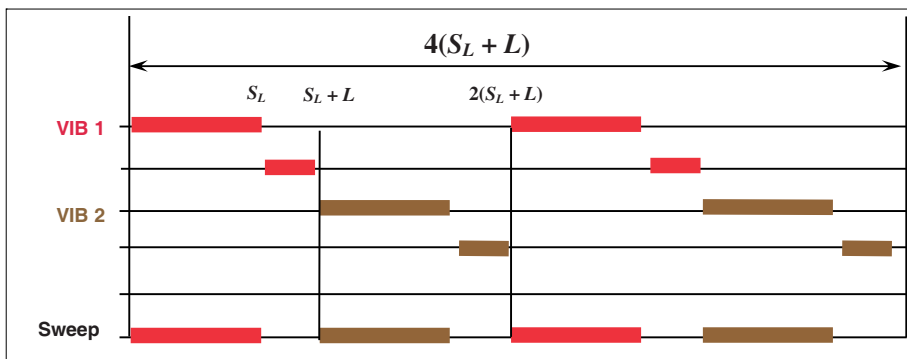
A slip-sweep technológiát a PDO (Petroleum Development of Oman) fejlesztette ki 1995-ben Ománban (Rozemond 1996). Az első mérések során a szeizmikus műszerek korrelálatlan felvételeket rögzítettek, majd a feldolgozás során történt meg a felvételek korrelációja és szétválogatása. 1998-ban a Sercel bemutatta az első slip-sweep felvételezésre is alkalmas SN388 műszerhez írt szoftverét, mely a VE432 számú elektronikát használta.

A slip-sweep technológia megjelenése előtt több vibrátorcsoporttal való gerjesztés esetén egyedül a flip-flop módszer kínált hatékonyabb felvételezést.

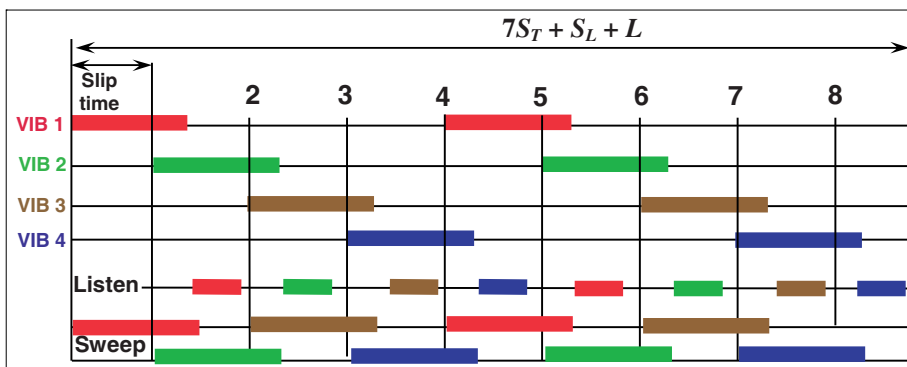
Ebben az esetben az első vibrátorcsoport jelgerjesztése (sweep) közben a második csoport átáll a következő forráspontra, és miután kivárta az első csoport vibrálását és felvételezési idejét, kezdi meg maga is a jelgerjesztést. Ez idő

alatt áll át az első csoport a maga következő forráspontjára. Ebben az esetben egy felvétel minimális ideje a jelgerjesztés hosszának (sweep length;  $S_L$ ) és a felvételezési időnek (Listening time;  $L$ ) az összege. A slip-sweep módszer lényege igen egyszerű: az egyes vibrátorcsoportok a jelgerjesztés kezdetével nem várják meg, az előző gépcsoport jelgerjesztésének befejeztét. *A hosszú (a sweephossz és a felvételezési idő összegével egyező hosszúságú), nyers felvételekből az adott felvételhez tartozó gerjesztő jellel történő korrelálás és szétválogatás után keletkeznek a különböző forráspontokhoz tartozó korrelált felvételek.*

Slip-sweep alkalmazása esetén az első csoport sweepjének megkezdése után egy adott minimum idő elteltével kezdődhet a második csoport jelgerjesztése. Ez a minimum idő a slipidő (slip-time;  $S_T$ ). Így minden slipidő elteltével újabb felvételezést indíthatunk és az első felvétel indításától számítva  $S_L + n \cdot S_T$  idő után újabb felvételeket kapunk, ahol  $n$



**1a. ábra** | Flip-flop mérés. 4 felvétel elkészüléséhez szükséges idő:  $4(S_L + L)$   
**Figure 1a** | Flip-flop Survey. The required time for recording 4 records:  $4(S_L + L)$



**1b. ábra** | Slip-sweep mérés. 8 felvétel elkészítéséhez szükséges idő:  $7S_T + S_L + L \rightarrow 1$  felvétel:  $(7/8)S_T + (1/8)S_L + (1/8)L$   
**Figure 1b** | Slip-sweep survey. The required time for recording 8 records:  $7S_T + S_L + L \rightarrow 1$  record:  $(7/8)S_T + (1/8)S_L + (1/8)L$

pozitív egész szám. Ebből következik, hogy a produktivitás növeléséhez a slipidő csökkentése szükséges. Egy elméleti példát tekintve, történjék a felvételezés vertikális összegzés nélkül (minden ponton csak egy jelgerjesztés történik). Legyen a sweephossz 15 másodperc, a felvételezési idő 5 másodperc, a slipidő pedig 8 másodperc. Flip-flop mérés esetén 8 felvétel elkészítéséhez szükséges idő:  $8(S_L + L) = 160$  másodperc. Ugyanezen esetben slip-sweep módszerrel a felvételezéshez szükséges idő:  $S_L + 7S_T + L = 76$  másodperc. A példánkban a felvételezési idő kevesebb mint felére esett. Nagyobb számú felvételt tekintve az egyes felvételekre fordított idő flip-flop mérés esetén állandó  $(S_L + L)$ , míg slip-sweep mérés esetén  $S_T$ -hez tart. Így a gerjesztés hosszánál jelentősen rövidebb slipidőt választva nagymértékű termelékenység-növekedést érhetünk el.

A slip-sweep alkalmazásával nyerhető produktivitás-növekedést szemléltetik az 1a–b. ábrák.

### A slip-sweep technológia hátránya

A slipidő csökkentésével – emelkedő sweep esetén – az előző felvételt zajokkal terheljük. Ezek a zajok a korrelációs és a hanghullám okozta zajok. A korrelációs zajok a következő sweepjél alaphérfvenciájából, illetve annak vibrátor-föld-

geofon rezgőrendszerben megjelenő felharmonikusából erednek. A  $k$ -adik felharmonikus hérfvencia időképlete:

$$f_k = (k + 1)f_{\min} + \frac{(k + 1)(f_{\min} - f_{\max})}{S_L}t,$$

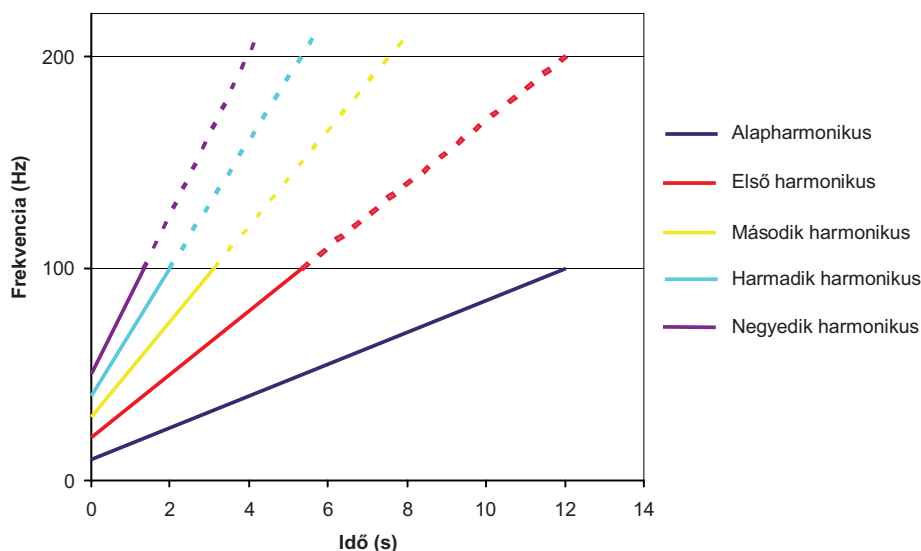
ahol

- $f_k$  = a  $k$ -adik felharmonikus,
- $f_{\min}$  és  $f_{\max}$  az alapharmonikus minimum és maximum hérfvenciái,
- $S_L$  = a sweephossz.

Egy 10-től 100 Hz-ig terjedő, 12 másodperc hosszú sweepet és felharmonikusait láthatjuk a 2. ábrán,  $f$ - $t$  tartományban.

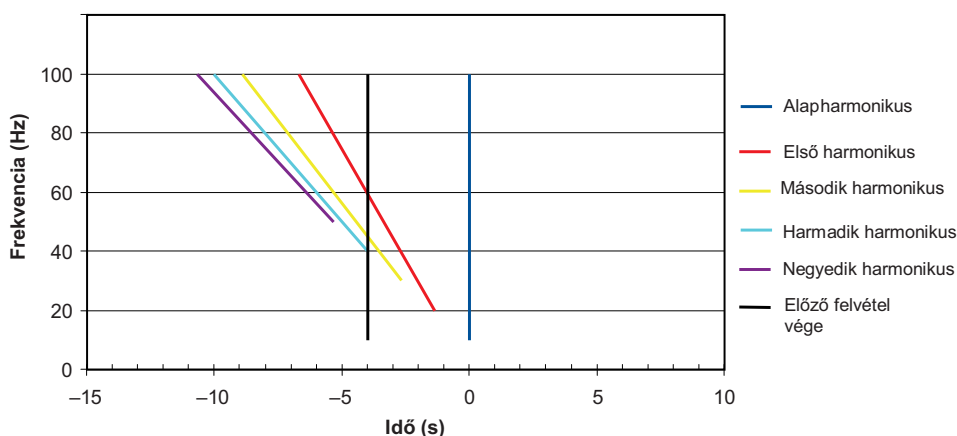
A korrelált (emelkedő) sweepjél és felharmonikusai az idő-hérfvencia sík nem pozitív időtartományában jelennek meg, vagyis a felvétel nullideje előtt. A 3. ábrán az előző sweep és felharmonikusainak korrelált  $f$ - $t$  függvényét láthatjuk.

A fenti sweepparaméterekkel, 9 másodperces slipidő és 5 másodperces felvételhossz esetén az előző felvétel végét mutatja a bal oldali függőleges vonal (–4) másodpercnél. Látszik, hogy a felvételünk korrelációs zaja megjelenik az előző felvételen vagy felvételeken. Általában az első felharmonikus és annak korrelációs zaja a legnagyobb amplitúdó-



**2. ábra** Kibocsátott sweepjel és felharmonikusai, idő–frekvencia tartományban ábrázolva. Az alapharmonikus tartományán kívül eső részek szaggatott vonallal vannak ábrázolva. Ennek a tartománynak a felvételen nincs jelentősége

**Figure 2** The emitted sweep signal and its harmonics in time–frequency domain. The sections outside of the first harmonic’s frequency range are dotted. Those are not represented in the record



**3. ábra** Korrelált sweepjel és felharmonikusai,  $S_L = 10$  s;  $f = 10$ –100 Hz. Az alapharmonikus tartományán kívül eső részek a korreláció során eltűnnek

**Figure 3** Correlated sweep and its harmonics,  $S_L = 10$  s;  $f = 10$ –100 Hz. The sections outside of the first harmonic’s frequency range are eliminated

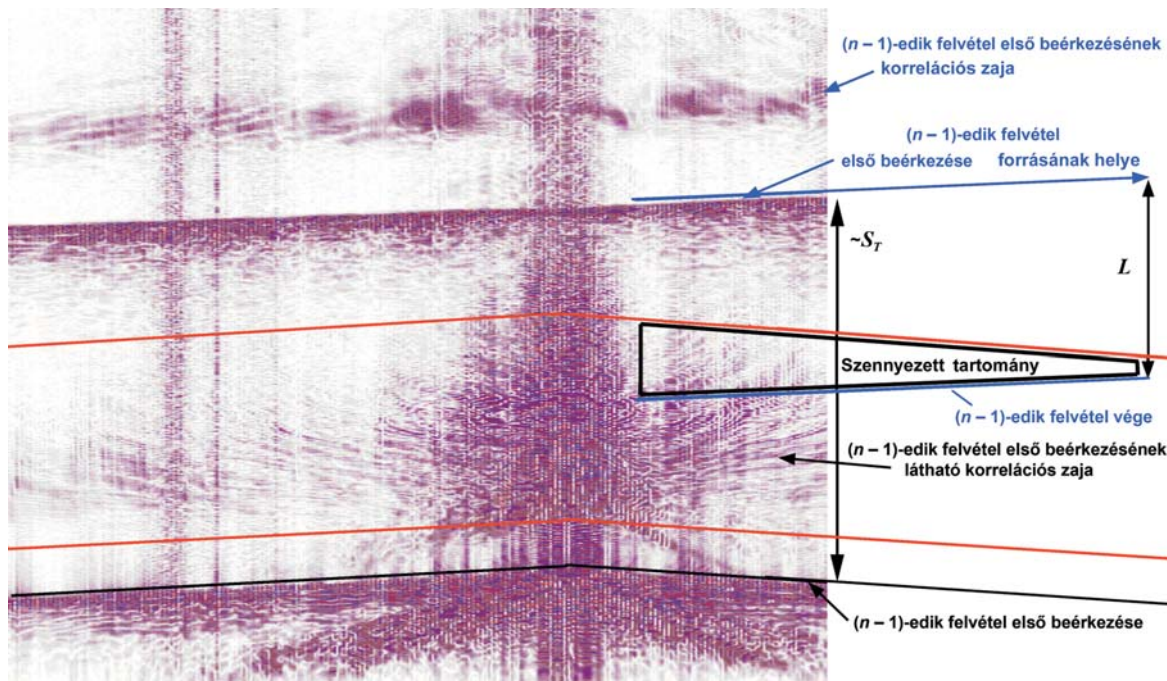
jú a felharmonikusok közül. Ez látható egy – a fenti paraméterekkel készült – konkrét terepi felvételen a 4. ábrán.

Szokásos (nem slip-sweep) felvételezésnél a szellemreflexiók nem okoznak problémát, mivel a korrelált felvétel negatív időben megjelenő részét eltávolítjuk. Slip-sweep felvételezés esetén ezt nem tehetjük meg, mivel a negatív időtartomány az előző felvétel pozitív időtartományába esik.

A fenti felvételen a felvételezési paraméterek a korábban leírtak voltak. Az  $(n - 1)$ -edik felvétel forrása és az  $n$ -edik felvétel forrása között jelentős térbeli távolság volt. A pirossal lehatárolt tartomány jelöli az  $n$ -edik felvétel első beérkezésének elméleti első felharmonikus szellemzajainak helyét (ez az első beérkezés előtt 6,66 másodperctől 1,33 másod-

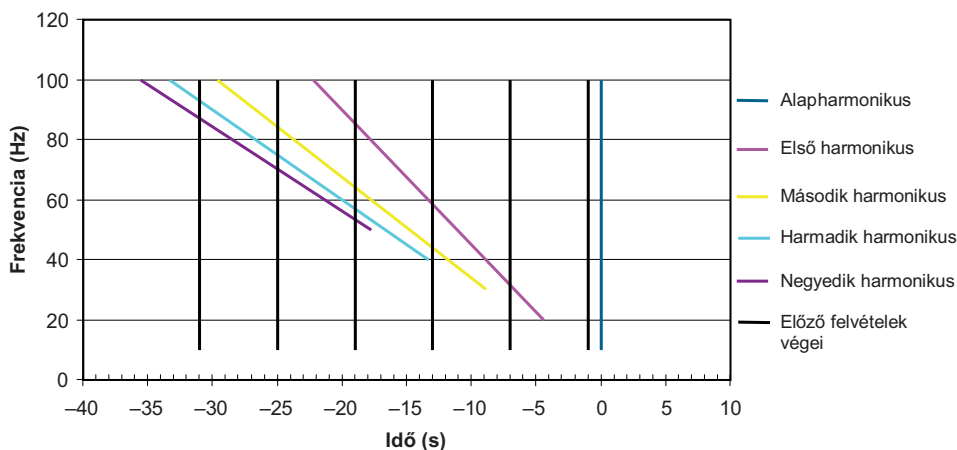
percig helyezkedik el). Ezen a tartományon belül a nagyobb negatív idők felé elhelyezkedő magasabb frekvenciájú korrelációs zajok nem láthatók. Feketével keretezve látható az  $(n - 1)$ -edik felvételnek az a tér-idő tartománya, amelyet az  $n$ -edik felvétel első beérkezésének első felharmonikusa szennyez a korreláció során. E tartomány mérete függ a slipidőtől, illetve a sweephossztól. Hosszabb sweep és rövid slipidő alkalmazása esetén a korrelációs zajok több korábbi felvételen is megjelenhetnek (5. ábra).

A függőleges fekete vonalak az előző felvételek végét jelölik meg. Látható, hogy ilyen paraméterek alkalmazása során az előző négy felvételt szennyezi a korrelált első felharmonikus.



**4. ábra** Korrelált növekvő frekvenciájú sweeppel készült slip-sweep felvételek, tér-idő tartományban ábrázolva.  $\sim S_T$  – körülbelüli slipidő;  $L$  – felvételezési idő

**Figure 4** Correlated up-sweep record in time-space domain.  $\sim S_T$  – approximate slip-time;  $L$  – listening time



**5. ábra** Korrelált sweeppel és felharmonikusai,  $S_L = 40$  s;  $S_T = 6$  s;  $L = 5$  s;  $f = 10-100$  Hz. Ilyen nagyságrendű paramétereket napjainkban rendszeresen alkalmaznak slip-sweep mérés esetén

**Figure 5** Correlated sweep and its harmonics,  $S_L = 40$  s;  $S_T = 6$  s;  $L = 5$  s;  $f = 10-100$  Hz. Parameters in this order are widely used nowadays

Fontos kérdés, hogy milyen idő- és frekvenciatartományban *jelenik meg* egy adott számú felharmonikus az előző felvételen (csak azokat a frekvenciákat tekintve, amelyek az eredeti sweeptartományba esnek). Ezeket az értékeket az alábbi, (1) és (2) egyenletekből számíthatjuk (Meunier et al. 2001):

$$f_{mn} = \left[ \frac{n+1}{n} \frac{F_{\max} - F_{\min}}{S_L} (S_T - L) \right], \quad (1)$$

$$t_{\lim} = \frac{S_L [F_{\max} - (n+1)F_{\min}]}{(n+1)(F_{\max} - F_{\min})} - S_L, \quad (2)$$

ahol

$f_{nm}$  = az  $n$ -edik harmonikushoz tartozó interferencia nélküli maximum frekvencia,

$t_{\lim}$  = az az idő, amelyen túl az  $n$ -edik harmonikus megjelenik az előző felvételen,

$F_{\max}/F_{\min}$  = a sweep kezdő- és végfrekvenciája,

$S_L$  = sweephossz,

$S_T$  = slipidő,  
 $L$  = felvételhossz,

A fentiekből kitűnik, hogy a slipidő vagy a sweep sávszélesség növelésével, illetve a sweephossz csökkentésével csökkenthetjük a korrelációs zajok hatását. A sávszélességet nem érdemes egy bizonyos határon túl növelni, a slipidő és a sweephossz arányának változtatásával pedig a termelékenységből veszítünk.

A korrelációs zajok szűrésére számos adatfeldolgozási technika létezik. Egy egyszerű eljárást ismerttet Meunier et al. (2002). Itt az adatfeldolgozási eljárásokat nem részletezem.

## Miért érdemes slip-sweep technológiát alkalmazni

I) A technológia nagyobb produktivitását kihasználva az alábbi előnyöket aknázhathatjuk ki:

- 1) Felvételezés nagyobb forráspontsűrűséggel, ami által
  - a) The tube 1 is laid on the groove of bending die 2 and then clamped between the insert die 3 and movable clamp die 4.
  - b) nő az összegszelvény fedésszáma, ami hatékonyabb zajsűrést eredményez mind koherens, mind nem koherens zajok esetén,
  - c) jobb ofszet- és azimuteloszlást kapunk, ami csökkenti a footprintanomáliákat,
  - d) a sűrűbb mintavételezés növeli a térbeli felbontást (Long 2004, Vermeer 1999).
- 2) Pontszerű forrás költséghatékony alkalmazása (single source vagy point source) csoportos forrás helyett (source array).
  - a) Csoportos forrás alkalmazása esetén a csoporton belüli magasságkülönbség csillapítja a kibocsátott magasabb frekvenciákat (Vermeer 2010). Ez nagy felszíni dőlésszögű környezetben való felvé-

telezéskor léphet fel. Pontszerű forrás esetén a jelenség nem lép fel, ami javítja a felbontást.

- b) Sík területen történő felvételezéskor nagy ofszetek esetén a forráscsoport szintén csillapítja a magasabb frekvenciákat.
- c) A pontforrás alkalmazása pontosabb statikus korrekciós értékek meghatározását teszi lehetővé.

II) A felvételeken megjelenő harmonikus zajok hatékonyabban szűrhetőek.

## Terepi kísérleti mérés a Pannon-medencében

2009 nyarán a MOL Nyrt. 2D szeizmikus méréseket végeztetett Páhi környékén. A méréseket a GES Kft. végezte. A kutatásban szereplő egyik vonalat a hagyományos mérés mellett slip-sweep technikával is lemérték. A két mérés során az alkalmazott eszközök és a mérési körülmények megegyeztek. A vonalat először hagyományos felvételezéssel mérték meg, majd a rákövetkező nap slip-sweep technológiával. Az alábbiakban a mérés tapasztalatait és az eredményeket foglalom össze (1. táblázat).

Slip-sweep esetén a korreláció a feldolgozás során történt meg.

## Termelékenység

Normál méréssel 250, slip-sweep technikával 486 felvétel készült a vonalon. A vonalon kibocsátott energia az összes forráspont számával, a pontonkénti vibrátorszámával, a pontonkénti sweepszámmal és a sweepepek hosszúságával arányos:

$$E \sim N \cdot V \cdot SW \cdot S_L,$$

ahol

$N$  = az összes forráspont száma,

$V$  = vibrátorok száma,

$SW$  = pontonkénti sweepszám,

$S_L$  = a sweep hossza.

1. táblázat | A kísérleti mérések főbb paraméterei

|                    | Hagyományos mérés                 | Slip-sweep mérés          |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Korreláció:        | <b>Összegzés utáni korreláció</b> | <b>Nincsen korreláció</b> |
| Jelforrás:         | <b>1 × 3</b> vibrátor             | <b>2 × 2</b> vibrátor     |
| Sweep típusa:      | lineáris, emelkedő                | lineáris, emelkedő        |
| Kezdőfrekvencia:   | 10 Hz                             | 10 Hz                     |
| Zárőfrekvencia:    | 100 Hz                            | 100 Hz                    |
| Sweephossz:        | 12 sec.                           | 12 sec                    |
| Vertikális összeg: | 2                                 | 2                         |
| Forrásköz:         | <b>20 m</b>                       | <b>10 m</b>               |
| Slipidő:           | –                                 | <b>9 s</b>                |
| Felvételezési idő: | 5 s                               | 5 s                       |

2. táblázat | Az egyes mérési technikákkal elért teljesítmény

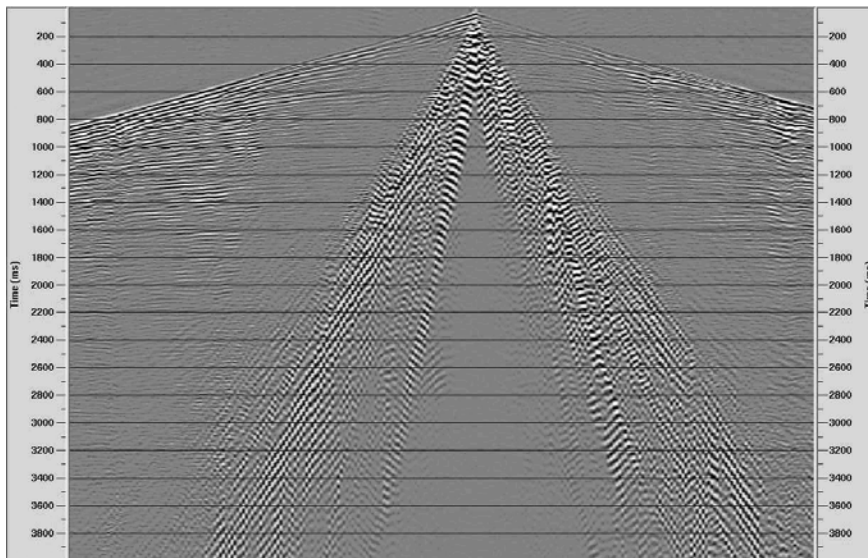
|            | Összes felvételszám a vonalon | Kibocsátott "sweep-energia" a vonalon | Felvételezéshez igénybe vett idő (h) | Teljesítmény (sweepenergia/idő) | Teljesítmény (vonalszakasz/idő) |
|------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Normál     | 250                           | 18000                                 | 8,48                                 | 2123                            | 588                             |
| Slip-sweep | 486                           | 23328                                 | 4,83                                 | 4830                            | 1033                            |

A 2. táblázatból kitűnik, hogy slip technikát alkalmazva a kibocsátott energiát tekintve 128%-os, míg egységnyi idő alatt felvételezett vonalszakasz esetében 76%-os volt a teljesítménynövekedés. A slip-sweep mérés során nagyobb fedésszámmal történt a felvételezés, ami javítja a jel/zaj arányt.

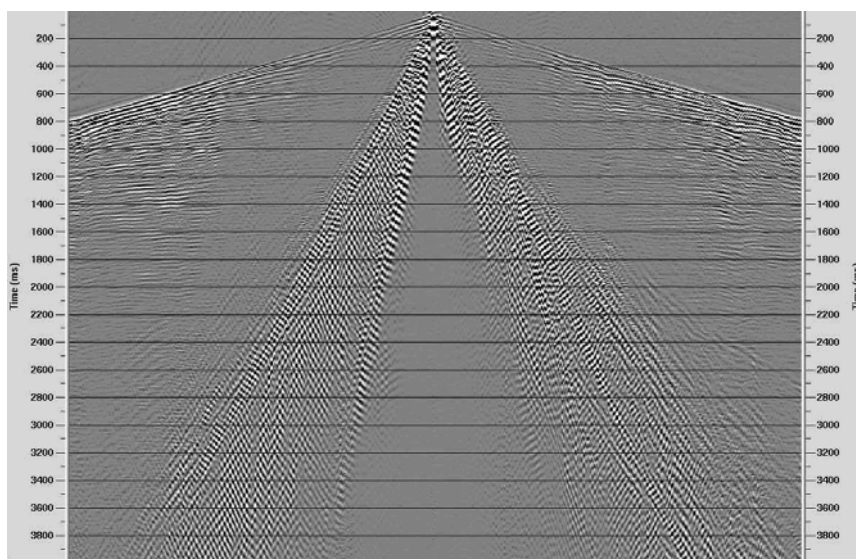
### A mérés eredményei

A 6–7. ábrán egy-egy tipikus felvétel látható normál és slip-sweep felvételezéssel.

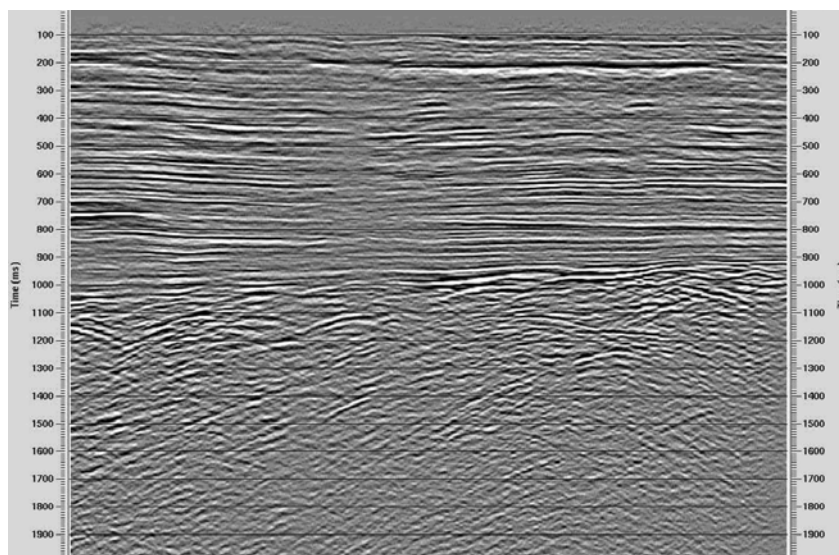
A slip-sweep felvételeken nem szembetűnőek az egymást követő sweepepek korrelálásából adódó korrelációs szellemzajok.



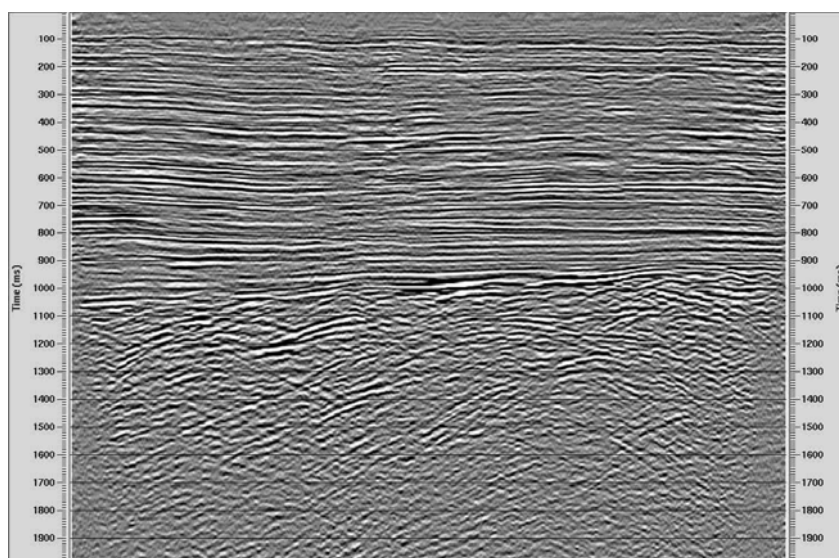
6. ábra | Normál felvétel  
Figure 6 | Normal record



7. ábra | Slip-sweep felvétel  
Figure 7 | Slip-sweep record



**8. ábra** | Normál felvételezéssel készült összecszelvény  
**Figure 8** | Stack section of the normal records



**9. ábra** | Slip-sweep technikával készült összecszelvény  
**Figure 9** | Stack section of the slip-sweep records

A mérések befejeztével mind a slip-sweep, mind a hagyományos technikával készült adatok feldolgozása megtörtént.

A 8–9. ábrán a különböző módszerekkel készült felvételekből előállított – azonos kiterjedésű – szelvények láthatók. A szelvények előállításakor a feldolgozási eljárások meggyeztek.

A szelvény készítése során a felvételekből a korrelációs zajokat extra feldolgozási lépésekkel nem szűrték ki.

Mind a hagyományos, mind a slip-sweep módszerrel készített szelvény jó minőségű, azonban a nagyobb térbeli mintavételezésnek köszönhetően a slip-sweep szelvénynek jobb a minősége (a slip-sweep mérés esetén a fedésszám közel kétszerese volt a hagyományoshoz képest).

## Összefoglalás

Az elméleti és kísérleti eredményekből megállapítható, hogy a korábbi, egy vagy két vibrátorcsoporttal felváltva történő felvételezéshez képest a slip-sweep technológiának számos előnye van.

Slip-sweep mérés során több gépcsoporttal is történhet a felvételezés. 3D mérés esetén manapság már nem ritka a 8–16 gépcsoportos felvételezés sem. Ezzel a módszerrel azonos méretű terület akár lényegesen sűrűbb mintavételezéssel is gyorsabban bemérhető. Így a slip-sweepel készült szelvények még speciális szűrőek nélkül is jó minőségűek. A sűrűbb mintavételezést elsősorban nyílt területeken lehet hatékonyan alkalmazni.

A technológia pontforrás hatékony alkalmazását teszi lehetővé, ami növeli a felbontóképességet.

Slip-sweep felvételezés során az egységnyi időre jutó felvételek száma első sorban a slipidőtől függ, így szinte veszteség nélkül növelhető a sweephossz, amivel nagymértékben javítható a jel/zaj arány.

A slip-sweep technológiával készült felvételek korrelációs zajjal terhelték. Ezeket a zajokat az adatfeldolgozás során érdemes szűrni. Ez a normál adatok feldolgozásához képest plusz költséget és időt igényel, ellenben ez nagyságrendileg kisebb a felvételezés során nyerhető költségcsökkenésnél.

#### **Köszönetnyilvánítás**

Az adatfelvételezést és feldolgozást a MOL Nyrt. tette lehetővé.

Köszönöm *Sebe Istvánnak* és *Wittmann Gézának* a szakmai segítséget, illetve *Szántó Évának* a feldolgozott felvételeket és összegszelvényeket.

#### **Hivatkozások**

- A. S. Long, 2004: The relationship between pre-stack migration resolution and 3D spatial sampling with the High Density 3D method. ASEG 17th Geophysical Conference and exhibition, Sydney, pp. 1–3
- J. Meunier, P. Nicodeme. S. Rodriguez, 2001: Analysis of the Slip Sweep technique. SEG Expanded Abstracts 20/9, 1–2
- J. Meunier, T. Bianchi, 2002: Harmonic noise reduction opens the way for array size reduction in vibroseis operations. SEG Int'l Exposition and 72nd Annual Meeting, Utah, pp. 1–4
- H. J. Rozemond, 1996: Slip-sweep Acquisition. SEG Expanded Abstracts 15, 64–67, 64–66
- G. J. O. Vermeer 2010: 3D symmetric sampling of sparse acquisition geometries. Geophysics 75/6, WB5–WB7
- G. J. O. Vermeer, 1999: Factors affecting spatial resolution. Geophysics 64/3, 942–953