

Kőzetfeszültség, kőzetszilárdság, mélyfúrási geofizika*

J E S C H A L A D Á K**

A cikk általános szilárdságtani elvek ismertetése után tárgyalja azokat a kapcsolatokat, amelyek egyes geofizikai és mechanikai paraméterek között érvényesek. Foglalkozik a geofizikai paraméterek jelenlegi mérési és kimutatási lehetőségeivel. Ismerteti a kőzetmagokon végzett rugalmassági és szilárdsági mérések között megállapítható összefüggéseket

Befejezésül megfogalmazza a lyukfal stabilitásának feltételét, és útmutatást ad a további ilyen irányú tevékenység elősegítésére.

Коротко излагаются общие принципы теории прочности и рассматриваются взаимосвязи между геофизическими и механическими параметрами. Обсуждаются существующие возможности измерения и выявления геофизических параметров. Анализируются связи, выявляемые измерением упругости и прочности буровых кернов.

В заключение описываются условия устойчивости стенки буровых скважин и даются указания, способствующие дальнейшей деятельности в этом направлении.

After a review of general static principles connections between the individual geophysical and mechanical parameters are dealt with. The present measuring and determination possibilities of geophysical parameters are discussed. The paper presents the connections which can be stated between elastic and rigidity measurements carried out on rock-samples (cores):

Finally, the conditions of well-wall-stability are formulated and suggestions are given for a further development of activities in this direction.

Bevezetés

A földkéregnek azt a felszínközeli részét, amelyben a bányászati kutatás folyik, általában a mozdulatlanság, a nyugalom jellemzi. Ez a mozdulatlanság fennáll addig, amíg a ható erők egyensúlyban vannak. Az egyensúly megbomlásának következtében létrejövő jelenségek között gyakoribbak az olyanok, amelyek kis tömegeket kis gyorsulással mozgatnak. Ilyenek – többek között – a kőzetkompaktálódás, a különféle folyadékok fajsúly szerinti elkülönülése stb. Ritkábbak a nagy tömegeket mozgásba hozó egyensúlymegbomlások, mint pl. a földrengések.

Az említett spontán mozgások mellett jelentősek az emberi tevékenység hatására bekövetkező „mesterséges” egyensúlymegbomlások. Ilyenek a bányászati és mélyfúrási munka során lépnek föl. Ebben a tanulmányban a mélyfúrás következtében előálló egyensúlymegbomlásokkal és elsősorban azok detektálási lehetőségeivel kívánok foglalkozni. Az ennek során felszabaduló erőhatások részben nem kívánatos, káros mozgásokhoz vezetnek, részben azonban éppen az egyensúly megbontása a műszaki, bányászati cél. Az előbbire példa lehet a fúrt lyuk falának beomlása, a másodikra a folyadék termelése, vagy a rétegrepesztő munka.

A kőzetekben bekövetkező geometriai változások, elmozdulások kapcsolatban vannak a ható erőkkel és a kőzet mechanikai tulajdonságaival. Egy

* Elhangzott: az 1975. február 27-i Mélyfúrási Geofizikai Szakosztály ülésén.

** OKGT Dunántúli Kőolajkutató és Feltáró Üzem.

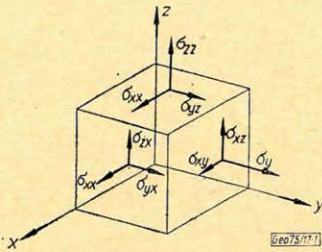
szilárdságtani problémával állunk tehát szemben, amelynek megoldása az erők, feszültségek és deformációk szilárdságtani tárgyalása nélkül nem lehetséges. Ezért röviden áttekintjük a kérdéshez kapcsolódó szilárdságtani elveket.

Szilárdságtani alapok

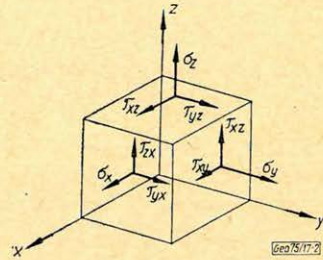
Egy térbeli állapot általában lineáris vektorfüggvényekkel, *tenzorokkal* írható le. Ha például egy közegre térbeli erőrendszer hat, amely deformációkat hoz létre, akkor egy-egy tenzorral jellemezhető a deformáció (alak- ill. méret-változás), a közeg elemi részeiben ébredő feszültségeloszlás és végül maga az erőrendszer is.

Ha elképzelünk egy teljesen általános erőrendszert, amely egy közegre hat, akkor e közeg egy kocka alakú elemi részében az erők hatására feszültségek jönnek létre az 1. ábra szerint. Ez a feszültségi állapot a következő tenzorral jellemezhető:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}. \quad (1)$$



1. ábra - puc. - Fig.



2. ábra - puc. - Fig.

A 2. ábrán ugyanezt a feszültségeloszlást láthatjuk, de a gyakorlatban jobban elterjedt jelölésekkel. Ezzel a jelölésmóddal a feszültségállapot tenzora így írható:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Ez az írásmód megfelel az általában alkalmazott jelöléseknek. A műszaki mechanikai gyakorlatban ugyanis σ -val mindig normális, tehát a húzó- vagy nyomófeszültségeket jelölik, viszont τ -val a csúsztató-, nyíró-, tangenciális feszültségeket.

A feszültségeloszlás törvényszerűsége, hogy a feszültségi tenzor mindig szimmetrikus. Ez matematikailag így fejezhető ki:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}. \quad (3)$$

illetőleg:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji}. \quad (4)$$

A feszültségi tenzonnal jellemzett feszültségeloszlás egy másodrendű felülettel szemléltethető, amelyet általában feszültségi ellipszoidnak neveznek, (habár nem mindig ellipszoid).

Ennek egyenlete:

$$\sigma_{xx}x^2 + \sigma_{yy}y^2 + \sigma_{zz}z^2 + 2\sigma_{xy}xy + 2\sigma_{xz}xz + 2\sigma_{yz}yz = \text{konstans.} \quad (5)$$

ha az 1. egyenlet jelöléseit alkalmazzuk. Ez az egyenlet tükrözi a feszültségi tenzor szimmetrikus voltát, mert $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ lévén:

$$\sigma_{xy} + \sigma_{yx} = 2\sigma_{xy}.$$

Megfelelő transzformálás segítségével az 5. egyenlet a következő alakra hozható:

$$\sigma_1 \bar{x}^2 + \sigma_2 \bar{y}^2 + \sigma_3 \bar{z}^2 = \text{konstans.} \quad (6)$$

Ez a feszültségállapotnak egy olyan koordinátarendszerben felírt egyenlete, amelyikben a koordinátatengelyek irányában nyírófeszültségek nem lépnek fel, és amelyikben a tengelyirányú feszültségek a feszültségi állapot főtengeleibe esnek. Ezért a σ_1 , σ_2 és σ_3 feszültségeket a feszültségi állapot főfeszültségeinek szokás hívni.

A főfeszültségekkel síkban is lehetséges egy térbeli feszültségeloszlás szemléltetése. A *Mohr-féle feszültségábrázolásnál* a nyírófeszültségeket a normális feszültségek függvényében rakják fel derékszögű koordinátarendszerben (3. ábra). Az ábrából látható, hogy a $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ főfeszültségekkel jellemzett igénybevétel hatása alatt a test bármely síkjában meghatározható az abba a síkba eső nyíró- és a rá merőleges normális feszültségek, ha ismerjük a főfeszültségeket és a szóban forgó síknak a tengelyekkel bezárt α szögét.

Deformációk

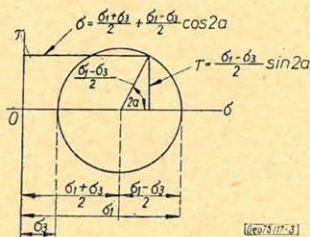
A test feszültségi állapotát létrehozó erők abban geometriai változásokat okoznak, amelyeket általánosan *deformációknak* szokás nevezni. A geometriai változások is egy tenzonnal jellemezhetők. A két, a feszültségi és a deformációs tenzor közötti kapcsolatot az anyag, a közeg mechanikai tulajdonságai szabják meg.

A deformációs tenzor a feszültségekével teljesen analóg formában írható föl:

$$S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

ahol ε_{ij} -vel jelöltük a fajlagos geometriai változást.

A feszültségekhez hasonlóan a deformációknál is szokás megkülönböztetést tenni a normális, ill. a nyírófeszültségek hatására létrejövő geometriai változások között. A normális feszültségek hatására kialakuló nyúlást, ill. összenyomódást, amelyek csupán *méretváltozások*, ε -nal, a nyírófeszültség hatására bekövetkező különféle *alakváltozásokat* pedig γ -val szokás jelölni. Ezekkel azután a 7. tenzor a következő alakban írható föl:



3. ábra - puc. - Fig.

$$S = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

A deformációs tenzor is szimmetrikus, tehát itt is érvényes, hogy

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \quad \text{illetőleg} \quad \gamma_{ij} = \gamma_{ji}.$$

A feszültség és a deformáció analóg volta azonban nem jelenti azt, hogy a két mennyiség változása egybeesik, tehát, hogy például maximumaik és minimumaik iránya egyezik. A két tenzor közötti kapcsolat a test mechanikai tulajdonságaitól függ, és e tulajdonságok is lehetnek irányfüggőek (pl. anizotróp kőzetek esetében).

Ezek a deformációk egyébként bizonyos határértékekig lineárisak. Ezeknek a kis deformációknak a tartományában érvényes a közismert *Hooke-törvény*, amely szerint a *feszültség* és a *deformáció* közötti összefüggés *lineáris*. Ebben a tartományban a deformációk rugalmasak, tehát a feszültség megszüntetése után a test visszanyeri eredeti méreteit és alakját. Ezért nevezik ezt a feszültség-, ill. deformációtartományt *rugalmasnak*.

A legáltalánosabb Hooke-törvény szerint a két tenzor közötti lineáris kapcsolat a következőképpen írható fel:

$$\sigma_{xx} = c_{11} \varepsilon_{xx} + c_{12} \varepsilon_{yy} + c_{13} \varepsilon_{zz} + 2c_{14} \varepsilon_{xy} + 2c_{15} \varepsilon_{xz} + 2c_{16} \varepsilon_{yz} \quad (9)$$

és még további öt analóg egyenlet, (ugyanis $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$).

Ha a test szilárdságtani szempontból anizotróp, akkor az elméletileg lehetséges 36 állandó helyett maximálisan 21 van (mert $c_{ij} = c_{ji}$).

Ezek az állandók a test, az anyag mechanikai-szilárdsági tulajdonságainak jellemzői, az úgynevezett *rugalmassági együtthatók* vagy *rugalmassági modulusok*.

Az anizotróp testek esetében elméletileg lehetséges 21 különféle állandó között is van azonban összefüggés, mert természetsszerűleg a különféle deformációk hatással vannak egymásra, s így az egyes rugalmassági modulusok nem függetlenek egymástól.

Izotróp testeknél *mindössze két* rugalmassági állandó állapítható meg egymástól függetlenül: ha kettőnek az értéke ismert, akkor a többi ezekből számítható. Tehát egy izotróp test rugalmas tulajdonságainak és állandóinak jellemzésére elegendő kettőnek a megmérése, ezek megadják a többit.

A gyakorlatban leginkább a következő állandókat használják:

E = húzó-nyomó rugalmassági modulus (Young-modulus);

G = a nyíró vagy csúsztató rugalmassági modulus;

μ = Poisson-féle viszonyszám;

α = Lamé-állandó;

K = térfogati vagy kompresszió-modulus;

$\kappa = 1/K =$ kompresszibilitás;

Valamennyi itt felsorolt állandó az anyag, a közeg mechanikai tulajdonságaira jellemző érték a rugalmas, tehát a kis deformációk tartományában.

Az egyes rugalmassági állandók között izotróp testek esetén fennálló összefüggéseket meghatározták, ezek közül néhány fontosabbat, amelyek témánkat is érintik, itt bemutatunk:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (10)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{2\mu G}{1-2\mu}, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}. \quad (13)$$

Bár az említett rugalmassági állandók közismertek, mégis érdemes röviden fizikai jelentésükre utalni.

Az E rugalmassági modulus a normális feszültség és az ennek hatására bekövetkező nyúlás, ill. összenyomódás közötti arányossági tényező.

A G rugalmassági modulus a csúsztató- (csavaró-, nyíró-) feszültség és a hatására bekövetkező szögelfordulás-arányossági tényező.

(G -t szokás az egyik Lamé-féle állandónak is nevezni.)

A μ Poisson-féle szám a nyújtási alakváltozás és a vele egyidejűleg bekövetkező harántirányú alakváltozás viszonya.

A α Lamé-állandó elméleti megfontolásoknál fordul elő, végeredményben – mint az a 12. és 13. egyenletekből látszik – a nyújtási vagy csúsztató rugalmassági modulusok és a Poisson-féle szám közötti kapcsolatok kifejtésénél van rá szükség.

Maradó alakváltozások

A Hooke-törvény – mint arról már szó volt – csak a kis alakváltozások tartományában érvényes. Ez annyit jelent, hogy csak egy bizonyos feszültség-értékig áll fenn a lineáris kapcsolat a feszültség és a deformáció között. Azt a határfeszültséget, amelynek túllépése végleges változást, maradó alakváltozást, vagy éppen törést eredményez, nevezik rugalmassági határnak vagy folyási határnak. A rugalmassági határ éppen úgy az anyag minőségére jellemző mechanikai tulajdonság, mint az egyes rugalmassági állandók.

Témánk szempontjából az anyagnak ez a tulajdonsága még fontosabb, mint a rugalmassági modulusok.

A közetek mechanikai viselkedése

A vizsgálatunk tárgyát képező közegek, a közetek inhomogén testek, s mindhárom halmazállapot előfordul bennük. Viszont a különféle halmazállapotú közegek viselkedése eltér egymástól terhelés alatt. A gázok összenyomhatók, energia tárolható bennük összenyomás, kompresszió által. Végeredményben tehát rugalmas közegeknek tekinthetők.

A folyadékok is összenyomhatók, ha csak igen kis mértékben is, és energiát is tudnak kompresszió formájában tárolni; sőt igen kis alakváltozással nagy energia tárolható a komprimált folyadékban. Ezért a folyadék is rugalmas közegnek tekinthető.

Mindkét fluidum-halmazállapotra jellemző, hogy szerkezeti változást, maradó alakváltozást még extrém igénybevételeknél sem lehet előidézni rajta.

Alapvető jellegzetessége azonban a fluidumoknak szilárdságtani szempontból, hogy nyíró- és csavaró- (általában csúsztató) feszültségek nem keletkezhetnek bennük. Teljes mértékben igaz ez a gázokra, viszont a valóságos folyadékokra csak közelítőleg. A szilárd anyagok feszültségeivel összehasonlítva azonban a folyadékokban keletkező nyírófeszültségek elhanyagolhatóan kicsinyek.

Ez érvényes az akusztikus szelvényezés hullámterjedése terén is: a folyadékokban (pl. a fúróiszapban) csak a nyomáshullámok (P-hullámok, longitudinális hullámok) terjedését veszik számításba.

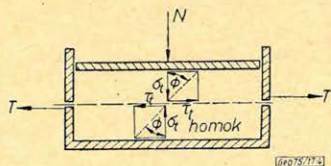
Szemben a fluidumokéval merőben más a szilárd testek viselkedése. Csak egészen kis igénybevételi, illetőleg alakváltozási tartományokban rugalmasak, a rugalmassági határon túl bekövetkezik a maradó alakváltozás, a törés.

A szilárd anyagok közül témánkhoz a kőzetek szilárd váza tartozik, s földkéregben előforduló igénybevételnek megfelelően elsősorban a nyomó- és nyírófeszültségeket tárgyaljuk.

Több irányú igénybevételek

Ha egy közegre egyidejűleg több erő hat, akkor a létrejövő alakváltozások vagy törések bekövetkezése az igénybevételek irányától és jellegétől is függ. A 4. ábrán bemutatott modell jól megvilágítja ezt a kérdést. Az ábrán látható két félből álló „készülék” segítségével meg lehet határozni a dobozban levő közege a nyíró- és nyomóerők összefüggését. Különbféle N nyomóerőkkel egymásnak szorítva a két fél dobozt, különféle T nyíróerőknél áll elő az anyag törése. Ilyen mérésorozattal meg lehet mérni a $\tau_t - \sigma_t$ összefüggést. (τ_t és σ_t a törőfeszültségek).

Teljesen laza közegeknél (pl. homok) a zérus összenyomás esetén zérus a nyíróerő is. Az ilyen anyagnak nincsen belső súrlódása, részecskéi között jelentős kohézió terhelés nélkül nem áll fenn.



4. ábra - puc. - Fig.

Ha az anyagnak összenyomás nélküli állapotban is van nyírószilárdsága (τ_0), akkor kompaktálódott, cementálódott anyaggal állunk szemben. Ilyen a legtöbb kőzet.

A nyomó és nyíró törő-feszültségek közötti kapcsolat lineáris.

Belső súrlódás nélküli anyagnál:

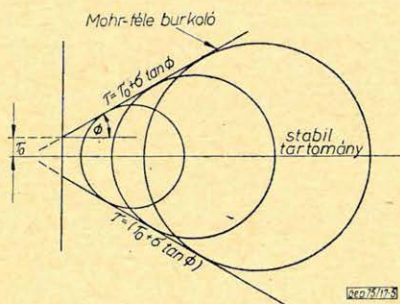
$$\tau = \pm \tau \operatorname{tg} \varphi, \quad (14)$$

belső súrlódással rendelkezőnél viszont:

$$\tau = \pm (\tau_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi), \quad \text{ahol} \quad (15)$$

φ a belső súrlódás szöge. Ez ugyanolyan anyagi tulajdonság, mint a rugalmassági állandók, a folyási határok stb.

A nyíró- és nyomófeszültségek derékszögű koordinátarendszerében (amely azonos a Mohr-féle feszültségábrázolás rendszerével) a 14., ill. a 15. egyenlettel jellemzett egyenes a mezőt két részre osztja. Az egyenestől

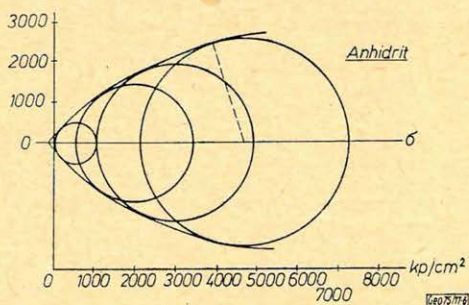


5. ábra - puc. - Fig.

jobbra eső mezőben törés nem következik be, ez a stabil állapot helye; ugyanakkor az egyenestől balra eső helyeken a töréshez vezető $\tau - \sigma$ értékpárokat találjuk. Az egyenestől jobbra tehát tetszőleges, az egyenest érintő köröket lehet felvenni, a σ_1 és σ_3 főfeszültségeknek megfelelően. Az 5. ábrán láthatjuk az anyag Mohrköreit, a törés határvonalát jelentő burkoló egyenessel, amelynek egyenlete 15-tel egyezik.

A φ szög nem mindig állandó a teljes igénybevételi tartományban, hanem a gyakorlatban előforduló anyagoknál (kőzeteknél) olykor a 6. ábra szerint változik. Ebben az esetben a Mohr-körök burkoló görbéje nem egyenes.

A 6. ábrával kapcsolatban megemlítendő még, hogy az abszcissa pozitív iránya a nyomófeszültségek tartománya. Az abszcissa negatív tartományában is találunk nyírószilárdságot, ami annyit jelent, hogy a mintának választott anyag (anhidrit) még egy bizonyos kis értékű húzás hatása alatt is rendelkezik nyírási szilárdsággal.



6. ábra - puc. - Fig.

A mechanikai hatásra bekövetkező közettörés néhány esete

Az előbbieken tárgyalt $\tau(\sigma)$ függvény ismerete többek között a kőzet felrepedése szempontjából is jelentős. A lyukfalra ható hidrosztatikus nyomás felrepedést idéz elő, ha a tangenciálisan fellépő kőzetfeszültség nagyobb, mint a kőzet folyási határa. A 16. egyenletrendszer a lyuk környékén a belső differenciális nyomás hatására fellépő radiális, tangenciális és függőleges feszültségeket adja meg: Δp a nyomásnövekedés a lyuk belsejében a hidrosztatikushoz képest, a a lyuk sugara, r a radiális koordináta, σ_r és σ_θ a radiális, illetve tangenciális, σ_z pedig a vertikális feszültség:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \Delta p \frac{a^2}{r^2}, \\ \sigma_\theta &= -\Delta p \frac{a^2}{r^2}, \\ \sigma_z &= 0.\end{aligned}\tag{16}$$

Látható, hogy létezik olyan Δp nyomásnövekedés, amelynél a lyukfal feszültsége túllépi szilárdságát és repedés következik be.

A repesztési nyomás azonban függ a pórusnyomástól is. Más következtetésből kiindulva a 17. egyenlethez juthatunk:

$$p_w = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z + p,\tag{17}$$

ahol p_w a repesztést előidéző iszapnyomás a kút belsejében, p a pórusnyomás, σ_z a vertikális feszültség és μ a Poisson-állandó.

A kőzetek mechanikai állapotára további példának említhetjük az úgynevezett „pergő” márgákat, ahol a márga abnormális pórusnyomása veszi igénybe a kőzet mátrixát, és a lyuk megfúrása következtében előálló egyensúly-megbomlás okozza a mátrix összetörését, mert a pórusba zárt, rugalmasan összenyomott folyadék az „ellennyomás” megszűnése következtében szétnyomja a nem áteresztőképes pórust. Az ilyen márgák tehát túlnyomásosak, de mivel permeabilitásuk nincsen, a pórusaikba zárt víz csak a mátrix szétromcsolása útján tud kiszabadulni. A túlnyomásos áteresztőképes rétegek esetében roncsolás nem jön létre, hanem a kitörés veszélye lép előtérbe.

Termelés közben is felléphet a kőzetváz törése, összeomlása. *Laza homokokban* jól ismert az a káros jelenség, hogy a termelvényel együtt a mátrixot alkotó szemcsék is betermelődnék, „befolyznak” a béléscsőbe. Az ebből származó hátrányok elkerülésére alkalmaznak különféle homokszilárdító eljárásokat.

Hasonló folyamat játszódhat le erősen kötött kőzetekben is akkor, ha a pórustér túlnyomásos. Az ilyen tároló intenzív, nem fojtott termelésbe állítása esetén a mátrix igénybevétele meredeken nő, pórusai összezáródhatnak. Együttjárhat ezzel a mátrix összeroncsolódása is, és ekkor a perforációk felé sodort szemcsék véglegesen leronthatják az áteresztőképességet. Egyes szerzők statisztikai megfigyelések alapján kimutatták, melyik az a túlnyomás, illetőleg mekkora az a porozitás-anómália, amelynél ez a jelenség előreláthatólag lehetetlenné teszi a szénhidrogéntermelést (megjegyzendő, hogy ilyen kőzetviszonyok között már csak gáztermelés jön szóba) (8).

Mindezeket a mechanikai jelenségeket példának hoztuk fel arra, hogy milyen sok területen nyújthat segítséget a kőzetek feszültségének és szilárdságának ismerete. Kétségtől mentesen hasznos lenne, ha mélyfúrási geofizikai úton is sikerülne a kőzet feszültségi állapotáról közelebbi adatokat szerezni.

Mélyfúrási geofizikai és mechanikai paraméterek kapcsolata

A mélyfúrási geofizikai mérési módszerek választéka nem túlzottan nagy. A rendszeresen mért paraméterek közül a legtöbb a kőzet mechanikai tulajdonságaitól független fizikai jellemző, amelyből különféle elméleti vagy gyakorlati, esetleg statisztikai úton meghatározott összefüggés segítségével számolják ki a geofizikai adatokat.

A kőzet geometriájához kapcsolódnak a porozitásérzékeny mérési módszerek: neutronmérés, sűrűségmérés, akusztikus mérés és távolabbról az ellenállásmérés is.

A kőzet mechanikai állapotával viszont az akusztikus mérések vannak kapcsolatban, mert a rugalmas hullámok terjedése szoros összefüggésben van a közeg mechanikai tulajdonságaival. A közeg mechanikai tulajdonságai és az akusztikus terjedési sebességek között a következő összefüggések ismeretesek:

$$\mu = \frac{1 - 2(v_s/v_c)^2}{2[1 - (v_s/v_c)^2]}, \quad (18)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho_b}} \quad \text{ill.} \quad \Delta t_s^2 = \frac{\rho_b}{G}, \quad (19)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho_b}} \quad \text{ill.} \quad \lambda + 2G = \frac{\rho_b}{\Delta t_c^2}, \quad (20)$$

$$K = \frac{1}{\alpha} = \frac{32 + 2G}{3} = \rho_b \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3 \Delta t_s^2} \right). \quad (21)$$

Az itt alkalmazott jelölések:

ρ_b	= a kőzet térfogati sűrűsége	g/cm^3 ,
V_s	= a tranzverzális (nyírási) hangsebesség,	m/s ,
V_c	= a longitudinális (nyomási) „	m/s ,
Δt_s	= a nyírási hullám terjedési ideje	$mikros/m$,
Δt_c	= a nyomáshullám terjedési ideje	$mikros/m$.

A kifejezésekből látható, hogy az akusztikus sebességek és a kőzet rugalmas tulajdonságai között jól definiált összefüggések állnak fenn. Természetesen a kőzetek ismert anizotrópiája befolyásolja a 18–21. egyenletek érvényességét, mert a geofizikai módszerek vertikálisan is, térfogatilag is átlagolnak.

Ez a tény figyelmeztessen minket arra (amit sajnos sokszor elfelejtünk), hogy a geofizikai (jelen esetben geofizikai-mechanikai) összefüggések *érvénye korlátozott*, és ennek megfelelően óvatosan kezelendő.

A 18–21. egyenletek alkalmazásánál felmerül néhány, egyrészt geofizikai, másrészt szilárdságtani természetű nehézség.

A képletekben szereplő geofizikai mutatók ugyanis részben közvetlen „termékei” a szelvényezési munkának (Δt_c ; ρ_b), részben azonban a jelenlegi mérési és értelmezési módszerekkel nem határozhatók meg (Δt_s). Az összefüggések áttekintése világosan mutatja, hogy éppen a Δt_s ismerete nélkül a kifejezések nem használhatók rendesen.

A geofizikai-mechanikai összefüggések alkalmazásának másik nehézsége, hogy a segítségükkel számítható mechanikai mutatók egytől-egyig *rugalmassági állandók*, vagyis csak a Hooke-törvény értelmezési tartományában, tehát a kis deformációk esetében érvényesek. Segítségükkel tehát meg lehet határozni a kőzet rugalmas állandóit, de nem *feszültségi állapotát* vagy *igénybevételének a nagyságát*.

Ha tehát a 18–21. egyenleteket használni akarnánk, akkor két, egymástól lényegében független problémára kell választ találnunk.

Nézzük először a geofizikai adatok kérdését. Egyelőre *nincs biztos lehetőség* a tranzverzális sebesség közvetlen mérésére (habár egyes tanulmányok már közelítik a kérdés megoldását), ezért közvetett utat kell keresnünk.

Közelítő út lehet a következő. A 12. és 20. egyenletből levezethető a következő összefüggés:

$$G = \frac{\rho_b}{2 \Delta t_c^2} \cdot \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu}. \quad (22)$$

Sűrűségmérés és akusztikus sebességmérés eredményeinek birtokában tehát számítható a nyírási rugalmassági modulus, ha ismerjük a *Poisson-számot*. A kőzetminőségek ismeretében fel lehet esetleg egy átlagos Poisson-számot venni a rétegsor egyes szakaszaira, és azzal azután számítható lesz G . Ez azonban veszélyes út, mert a rétegsor erősebben, a környezettől eltérően igénybe vett szakaszaiban feltehetőleg *éppen nem* egyezik a Poisson-szám értéke az átlaggal.

Más utakat kerestek *Anderson és szerzőtársai* (6). Egyik megoldásuknál a 18. egyenletet használták föl. Ez akkor lehetséges, amikor a két akusztikus sebesség viszonya ismert; vagyis amikor valamilyen módon v_s/v_c értékét meg lehet határozni. Ez a számítási módszer is csak közelítő megoldás lehet, mert itt ugyanúgy fennáll a v_s/v_c viszonyszám bizonytalansága éppen az érdekes szakaszon, mint a Poisson-szám esetében.

Andersonék másik megoldása a *közetek agyagosságára* alapul. Méréssorozat alapján megállapították ugyanis, hogy a homokkő-tárolók agyagossága és Poisson-száma között összefüggés áll fenn. Regressziós analízissel sikerült egy adott területre érvényes egyenletet is találniok az agyagosság és a Poisson-szám értéke között:

$$\mu = 0,125 q + 0,27. \quad (23)$$

Ha tehát ezen az adott területen meghatározható a homokkő agyagossága, akkor abból számítható a Poisson-szám is. A szerzők szerint a *Gulf-Coast* területen ezt a kifejezést jól lehet használni repesztési nyomás meghatározásához.

(Feltételezhetően lehetne hasonló összefüggést hazai területekre is megállapítani kellő számú mechanikai és analízáló magvizsgálat alapján.)

Az agyagosságot ennél a módszernél szelvényekből vették a következő ismert összefüggés szerint:

$$q = \frac{\varphi_s - \varphi_D}{\varphi_s}. \quad (24)$$

ahol φ_s a szónikus, φ_D pedig a sűrűségporozitás.

Tixier és társai ismét más úton keresték a megoldást az ismeretlen tranzverzális sebesség pótlására (7).

A Schlumberger vállalat által bevezetett mechanikai szelvény (Mechanical Properties Log) alkalmazásáról és eredményeiről beszámoló cikkükben ismertetik az új eljárást, amely a longitudinális sebességre és a sűrűségértékekre épül.

Gépi úton végzett számításaihoz felhasználják a 23. egyenletet is, ugyancsak a 24. egyenlet alapján számolva. Az alapszelvények: *SP*; term. gamma; akusztikus lefutási idő; sűrűség. Különbféle korrekciók alkalmazásával kapják meg a mélységfüggő szelvények formájában megjelenített eredményeket: a Poisson-számot, a *G* rugalmassági modulust és a *K* kompressziós modulust.

A számítások csak megfelelő korrekciók után adnak helyes eredményeket. Így helyesbíteni kell a szónikus sebesség értékét és a sűrűséget is, hogy a kapott mechanikai adatok a valósággal jól egyezzenek. Ezek az így kapott mechanikai mutatók azonban a közeg rugalmas tulajdonságait tükrözik. Ugyanakkor az egyensúly-meghomlások hatására bekövetkező végleges, maradandó alakváltozások nem a közet rugalmas tulajdonságaitól függnék, hanem a *szilárdsági értékeitől*.

A felsorolt és a számításokhoz is felhasznált egyenletek tehát csak akkor alkalmasak a szilárdsági vagy igénybevételi állapot jelzéséhez, ha a kérdéses közeg (közet) rugalmassági modulusai és szilárdsági mutatói között összefüggés áll fenn. A kérdés felvetése jogos, mert például az acélsanyagok esetében a folyási határ széles határok között változhat (pl. $30 - 80 \text{ kp/mm}^2$) és ugyanakkor a *Young-modulus* értéke $2,0 - 2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$ között ingadozik.

A kérdés tisztázása céljából feldolgoztuk a *BKI* egy magvizsgálatsorozatát, amely közetminták (elsősorban karbonátok) Poisson-számának, folyási hatá-

rának és *Young*-modulusának meghatározására terjedt ki (egyéb mérések mellett).

Témánkhöz a karbonátmagok vizsgálati adatait használtuk föl. Figyelembe véve a mechanikai összefüggéseket, a *BKI* által mért *E* modulusokból, a 11. egyenlet segítségével és az ugyancsak megmért Poisson-féle állandók segítségével kiszámítottuk a *G* torziós modulus értékeket.

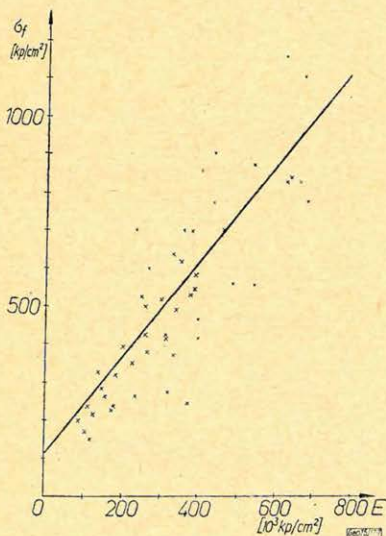
Ezután regressziós analízis útján kapcsolatot kerestünk a karbonátok mért folyási határa és az *E*, ill. *G* modulusok között.

A σ_f és *E* kapcsolata a 7., a σ_f és *G* kapcsolata a 8. ábrán látható. A regressziós analízist Hewlett – Packard kalkulátoron végeztük. A témánkat jobban érintő $\sigma_f(G)$ kapcsolat regressziós egyenesének egyenlete:

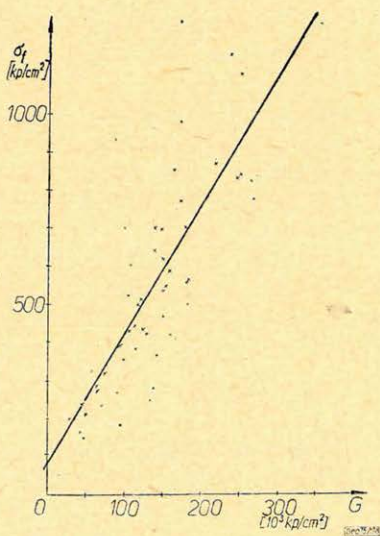
$$\sigma_f = 3,41 \cdot 10^{-3} G + 82,1. \quad (25)$$

A lineáris regresszió korrelációs együtthatója 0,76 volt, ami arról tanúskodik, hogy a két változó jól korrelálható. Ez a geofizikai-mechanikai értelmezés szempontjából annyit jelent, hogy – legalábbis a vizsgált mészkőveknél – az akusztikus egyenletekből meghatározott *G* rugalmassági modulus közvetlenül átszámítható a kőzet folyási határára kielégítő pontossággal.

Hasonló egyenleteket kellő számú magadat birtokában lehet számítani más kőzetekre: homokkővekre, agyagokra, agyagmárgákra is, esetleg területenként külön-külön. E kőzettípusoknál ugyanis nem várható az, ami a 7–8. ábra



7. ábra – puc. – Fig.



8. ábra – puc. – Fig.

adatainak esetében megvolt. A feldolgozott mészkőadatok ugyanis többféle területről és mélységből származtak, s ennek ellenére igen jól korrelálható pontthalmazt alkottak.

A szilárdsági adatok alkalmazása

Az előbbieket szerint lehet módot találni arra, hogy egy mélyfúrásban geofizikai módszerekkel és bizonyos kőzettulajdonságok ismeretében meghatároz-

zuk a kőzetek *folyási, rugalmassági határát*, esetleg mélység szerint szilárdsági „szelvény” formájában kirajzolva vagy regisztrálva.

Ha ennek a folyásihatár-szelvénynek egyes pontjait összevetjük az ugyanahhoz a mélységhez tartozó kőzetfeszültséggel, akkor ki lehet jelölni a törésre, egyensúlymegbomlásra hajlamos szakaszokat. Ha ugyanis a kőzet feszültsége nagyobb lesz, mint a folyási határ, akkor a törés, „*folyás*”, tehát végeredményben a maradót alakváltozás bekövetkezik.

Fontos azonban még annak a ténynek a megfontolása, mit is nevezünk a kőzet feszültségének, más szóval igénybevételének. Egy általános, tehát nem homogén és nem is egységes halmazállapotú kőzet az őt érő erőhatásokra feszültségének változásával reagál. Ezek a feszültségek részben a pórusok tartalmában, részben a mátrixban ébrednek, egy erő hatására, amely – csekély számú kivételtől eltekintve – a nehézségi erő, tehát vertikális irányú.

Matematikailag kifejezve:

$$P = \sigma_z + p. \quad (26)$$

Ez a közismert kifejezés egyszerűen annyit jelent, hogy a függőleges kőzetnyomás, P a kőzetben két reakciófeszültséget vált ki pórusnyomás (p), illetve mátrixfeszültség (σ_z) formájában. Logikus, hogy a vertikális z irányú feszültség és a pórusnyomás összege mindig azonos a kőzetterheléssel. P értékét a mélység és a kőzetsűrűségek ismeretében – tehát például egy jól értelmezhető gamma-gamma-mérés adatainak birtokában – számítani lehet.

A fúróluk által létrehozott egyensúlymegbomlás a lyukfal instabilitásához, ill. annak töréséhez azonban akkor vezet, amikor a *horizontális igénybevétel* lépi túl a mátrix rugalmassági határát.

Ki kell hangsúlyozni, hogy az *akusztikus sebességekből* számított G *rugalmassági* állandó a mátrix tulajdonságaihoz kapcsolódik, mert a mért akusztikus hullámok a mátrixban terjednek, hiszen a folyadék-hullámok a kisebb terjedési sebesség miatt sokkal később érkeznek be. Így azután a rugalmassági állandóból tapasztalati összefüggések alapján számított folyási határ is a mátrixra jellemző érték lesz.

Ugyanakkor a mátrix feszültsége a fedőterheléstől és a pórusnyomástól függ a 26. egyenlet szerint. A lyuk falára azonban nem a σ_z vertikális mátrixfeszültség hat, hanem – mint azt már a 17. egyenletnél is láttuk – a

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z \quad (27)$$

horizontális feszültség. Ennek megfelelően a folyási határral a horizontális feszültséget kell összehasonlítani, ami:

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1 - \mu} (P - p). \quad (28)$$

Ha tehát akusztikus sebességből, a sűrűségből és azután az érvényes tapasztalati képletből számított σ_f folyási határ nagyobb, mint a horizontális mátrixfeszültség, akkor a lyukfalon a kőzet stabilitása várható. Ellenkező esetben a kőzetfal mechanikai bomlására lehet számítani. A kőzetfal instabil voltának matematikai kifejezése tehát:

$$\sigma_f \leq \frac{\mu}{1 - \mu} (P - p). \quad (29)$$

Alkalmazási feltételek

A 29. egyenlet alkalmazásának feltételei a következők:

1. Kielégítő mérési program:

- 1.1. Akusztikus mérés
- 1.2. Sűrűségmérés
- 1.3. SP-mérés
- 1.4. Természetes-gamma-mérés
- 1.5. Neutron-mérés

2. Kőzetvizsgálatok a területen

Területenként meghatározandók a homokkövek, agyagok, márgák és karbonátok jellemző mechanikai tulajdonságai: nyújtási és torziós modulus, Poisson-szám, folyási határ, *mérésekkel*: továbbá az ezek között fennálló matematikai összefüggések *statisztikai alapon*.

3. A kőzetfeszültség értékei

A sűrűségmérésből és a mélységből meg kell határozni a teljes fedőnyomás értékét a mélység függvényében. Ebből azután a pórusnyomás és a Poisson-szám ismeretében ki lehet számítani bármely szintre a horizontális mátrixfeszültséget.

4. A szelvények értelmezése

A kijelölt kőzettípusokra (pl. márgák, homokkövek, karbonátok) a szelvények és a meghatározott tapasztalati összefüggések segítségével számítható a G rugalmassági modulus, ill. a kőzet folyási határa egy, a következő alakban felírható egyenlet szerint:

$$\sigma_f = A \frac{\rho_b}{\Delta t_c^2} \cdot \frac{1-2\mu}{1-\mu} + B \quad (30)$$

Itt A és B a $\sigma_f(G)$ függvény állandói.

5. Végül össze kell hasonlítani mélységszintenként, illetőleg az érdekes szakaszokon a kőzetfeszültség meghatározott értékeit a 30. képlet szerint számított folyási határokkal. Ez végeredményben a 29. és 30. egyenletek alapján fog történni, kb. a következő alakban:

$$A \cdot \frac{\rho_b}{2 \Delta t_c^2} \cdot \frac{1-2\mu}{1-\mu} + B \leq \frac{\mu}{1-\mu} (P-p) \cdot \quad (31)$$

Összefoglalás

A fenti fejtegetésekkel arra kívántunk rámutatni, hogy a mélyfúrési tevékenység során gyakran észlelt (vagy olykor kívánatos) lyukfali egyensúly-megbomlások geofizikai úton is előre jelezhetők.

Mint minden gyakorlati számítási módszernek, ennek is vannak (és bizonyára még lesznek) nehézségei. Az összefüggések azonban egyértelműen igazolják, hogy a mért és a keresett mutatók között nem véletlenszerű, hanem logikai kapcsolat áll fenn. Ezért érdemes a kérdést alaposan vizsgálni, kísérleteket végezni, és akkor a továbbfejlődés magától fog jönni.

- [1] *Pattantyás: Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve, 2. kötet, Budapest, 1961.*
 [2] *Johnson, V. – Mellor, P. B.: Plasticity for mechanical engineers, Nostrand-kiadás, London, 1962. 412 oldal.*
 [3] *Természettudományi Lexikon, Akadémiai Kiadó, 1968.*
 [4] *Hubbert, M. K. – Willis, D. C.: Mechanics of hydraulic fracturing, Petr. Transactions, 1957. 210. kötet, 153–188. oldal.*
 [5] *Eaton, B. A.: Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations, JPT 1969. Oct. 1353–1360. oldal.*
 [6] *Anderson, R. A. – Ingram, D. S. – Zanier, A. M.: Fracture pressure gradient determination from well logs. SPE preprint 4135, 1972. 15. oldal.*
 [7] *Tixier, M. P. – Loveless, G. W. – Anderson, R. A.: Estimation of formation strength from the mechanical properties log SPE preprint 4532, 1973. 14 oldal.*
 [8] *Fertl, W. H. – Timko, D. J.: How downhole temperatures, pressures affect drilling. Part 7. WO 1972. Dec. 59–63. o.*
 [9] *Bányászati Kutató Intézet kutatási zárójelentése. Készítette: Szabó Á. – Szemerédi Pálné. 12–20/1969.*

Lapszemle

Földtani Kutatás XVII. évf. 3. sz. 1974.

Szádeczky-Kardoss Elemér: A módszeres szubdukciónívizsgálat a hasznosítható telepek kutatásának szolgálatában, 1–10 old.

Horváth Ferenc – Stegena Lajos – Géczy Barnabás: Szialikus és szimaikus ívközi medencék, 11–16 old.

Géczy Barnabás: Lemeztektonika és paleontológia, 17–21 old.

Wein György: A budai hegység szerkezetalakulása, 23–34 old.

Szénás György: A lemeztektonika és bírálata, 35–40 old.

Balkay Bálint: A globális tektonika lokális problémáiról, 39–40 old.

Császár Géza – Haas János: Irodalmi áttekintés a lemeztektonikai elmélet mai helyzetéről, 41–56. old.

Földtani Kutatás XVII. évf. 4. sz. 1974.

Dank Viktor – Hingl József – Szabó György – Bérczi István: A nagy mélységű szénhidrogén-kutatás helyzete Magyarországon, 10 old.

Barabás László – Kadlinger Béla – Tihanyi Gábor: Nagy mélységű fúrások műszerezési kérdései és fejlesztési irányai, 11–14 old.

Szabó György: A nagy mélységű fúrások korszerű eszközei, különös tekintettel a hazai tapasztalatokra, 15–17 old.

Sz. Gy.: Néhány gondolat a legújabb fúrási mélységrekordokkal kapcsolatban, 18–26 old.

Tóth Béla – Csaba József – Fülöp Miklós: Mélyfúrások aktív paraméterei optimalizálásának közetfizikai megfontolásai, 19–25 old.

Moldvay Lóránd: A dóm-jellegű neogén mozgások kérdése az alföldi szénhidrogénkutatás szempontjából, 33–42 old.

Szerkesztőségi cikk: A KGST 25 éve. Együttműködés a felszíni és mélyfúrési kutatásban, 43–45 old.

T. G.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>И. Вегеш — И. Желлер</i> : Автоматическое определение информации по сейсмограммам МОВ	121
<i>Ж. Караш — М. Лантош — З. Надь — Б. Петерфия — Ж. Вида — И. Зимани</i> : Опытные работы по изучению нефтегазовых месторождений электроразведочными методами в Венгрии	129
<i>И. Кешмарки — К. Клошка — Э. Макари</i> : Построение карт изогипс при помощи ЭВМ	136
<i>А. Йеш</i> : Сопротивление и прочность горных пород и промысловая геофизика	147
Обзор журналов	146, 160

CONTENTS

<i>I. Véges — P. Zsellér</i> : Automatic information determination from reflection seismograms	121
<i>Mrs. Zs. Karas — M. Lantos — Z. Nagy — B. Péterfai — Zs. Vida — I. Zimányi</i> : First tentatives in Hungary for the exploration of CH beds and of their environment with electric measurements	129
<i>I. Késmárky — K. Kloska — E. Makáry</i> : Construction of contour maps by means of machines	136
<i>A. Jesch</i> : Rock stress, rock rigidity and well-logging	147
Riewiew of papers	146, 160

Tájékoztató

A MTESZ Központi Szabványosítási és Minőségügyi Bizottsága a MTESZ Tagegyesületeivel, a Magyar Szabványügyi Hivatallal, az EOQC Magyar Nemzeti Bizottságával, a Szakszervezetek Országos Tanácsa és a Magyar Kommunista Ifjúsági Szövetség közreműködésével, az ágazati minisztériumok és az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság támogatásával

1975. november 3–4-én

„MINŐSÉGFEJLESZTÉS – SZABVÁNYOSÍTÁS – TAKARÉKOSSÁG '75”
címmel

konferenciát rendez Budapesten, a MTESZ Székház kongresszusi termében (Bp. V., Kossuth L. tér 6–8. I. emelet).

A konferencia vezérfonalát a XI. Pártkongresszus irányelvei képezik, különös tekintettel az V. ötéves tervre való felkészülésre, valamint a Minisztertanács 2001 (1974. I. 09.) számú határozatára.

A konferencia fő témakörei

A) *Termékminőség és társadalmi hatékonyság*

- minőség, megbízhatóság – gazdaságosság, takarékoság
- minőség szabályozási rendszerek a gyakorlatban (minőségtervezés, -biztosítás, -ellenőrzés)
- kutatás, fejlesztés, gyártmányminőség és korszerűsítés
- minőség és érdekelttség
- szakosítás, kooperáció és minőség.

B) *Szabványosítás – műszaki fejlesztés – integráció*

- a szabványosítás mai helyzetének kritikai elemzése
- szabványosítás a műszaki fejlesztésben
- szabványosítás, szocialista integráció, nemzetközi együttműködés
- szabvány és minőségügyi képzés, továbbképzés.

Az előadások időtartama 20–25 perc, melyet vita követ.

R é s z v é t e l

A konferencián való részvételt „Jelentkezési lap” kitöltésével szíveskedjék bejelenteni, (igényelhető a KSZMB titkárságán, 429-764).

Részvételi díj személyenként 600,– Ft, az előadások anyagának ára további 200,– Ft.

Az utazásról, étkezésről és a szállásdíjról a résztvevők maguk gondoskodnak.

B e f i z e t é s

A részvételi díjat és az előadások anyagának árát a jelentkezéssel egyidőben kérjük a MTESZ 232–90171–2494 sz. egyszámlájára KSZMB „Minőségfejlesztés–Szabványosítás–Takarékosság '75” megjelöléssel átutalni.

Késedelmes és hiányos címzésű átutalás részvételi jogot nem biztosít. Az átutaláson feltétlenül kérjük megjelölni a résztvevő(k) nevét és címét.

SZERVEZŐ BIZOTTSÁG