

# Nyírószilárdsági vizsgálatok vizsgálattechnikai értékelése

Buocz Ildikó

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, ildikobuocz@yahoo.com

Gálos Miklós

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, mgalos@freemail.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** Kőzetek nyírószilárdságának meghatározására a kőzetmechanikai gyakorlatban számos vizsgálati módszer van. A különböző eljárással meghatározott un. tiszta nyírószilárdság és a nyírási paraméterek, mint anyagjellemzők a gyakorlatban jól, csak vizsgálattechnikai értékelés eredményeinek figyelembe vételével, használhatók. A tanulmány durva mészköveken, többféle módszerrel végzett nyíróvizsgálatok eredményeinek értékelését mutatja be.

*Kulcsszavak:* kőzetmechanika, nyírószilárdság, nyírási vizsgálatok, durva mészkő

## 1 BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Mérnöki létesítmények és földtani környezetük közötti kölcsönhatást, a mérnöki gyakorlat mechanikai módszerekkel kezeli, nevezetesen a feszültségek és az alakváltozások közötti függvénykapcsolat használatával. A függvénykapcsolatot elméleti megfontolásokra alapozottan anyagtvényekkel írhatjuk le. Ezekkel azonban a tönkremenetel, azaz az anyagi folytonosság megszakadása, a teherviselő képesség elvesztése nem, vagy csak nehezen követhető. A kőzetek tönkremenetelének vizsgálata szempontjából a szilárdságtani határértékek, mint a nyomó-, a húzó- a hajlító-, a nyíró- a csavarószilárdság a kőzetek fontos, minősítő anyagjellemzői. Ezeket a mérnöki gyakorlatban, megfelelő biztonsági tényezők figyelembe vételével, a méretezési és a szerkezet-ellenőrzési feladataink során a vizsgált kőzetmechanikai viselkedésének határfeltételeiként használjuk.

A kőzetmechanika építőmérnöki gyakorlatában a határfeszültségekkel meghatározott törési elméletek közül a Mohr-féle törési feltételt, mint könnyen kezelhető és a valóságot jól leírható elméletet alkalmazzuk. A Mohr-féle törési elmélet azon az 1773-ban, Coulomb által megfogalmazott törési elméleten alapszik, miszerint a törés az összetartozó nyíró- és normálfeszültségek függvénye. Vagyis a törés feltétele

$$\tau = f(\sigma) \quad (1)$$

formájú összefüggéssel írható le.

## 2 A NYÍRÓSZILÁRDSÁG MEGHATÁROZÁSÁNAK MÓDSZEREI

A nyírószilárdság meghatározható közvetlen nyíróvizsgálattal, illetve a törési határfeltétel függvénykapcsolata alapján. A közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatok eredménye csak a nyírószilárdság, míg a törési határfeltételt leíró határgörbékéből az un. nyírási paraméterek (mérnöki szóhasználatnál a kohézió és a belső súrlódási szög) is meghatározhatók.

### 2.1 Közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatok

Közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatok olyan kialakítású berendezéseken, illetve vizsgálati mintákon készülnek, melyek normálerő alkalmazása nélkül teszik lehetővé a kőzet elnyíródását és így a nyírószilárdság meghatározását. Az így meghatározott anyagjellemzőt gyakran elsődleges nyírószilárdságnak ( $\tau_1$ ) nevezzük.

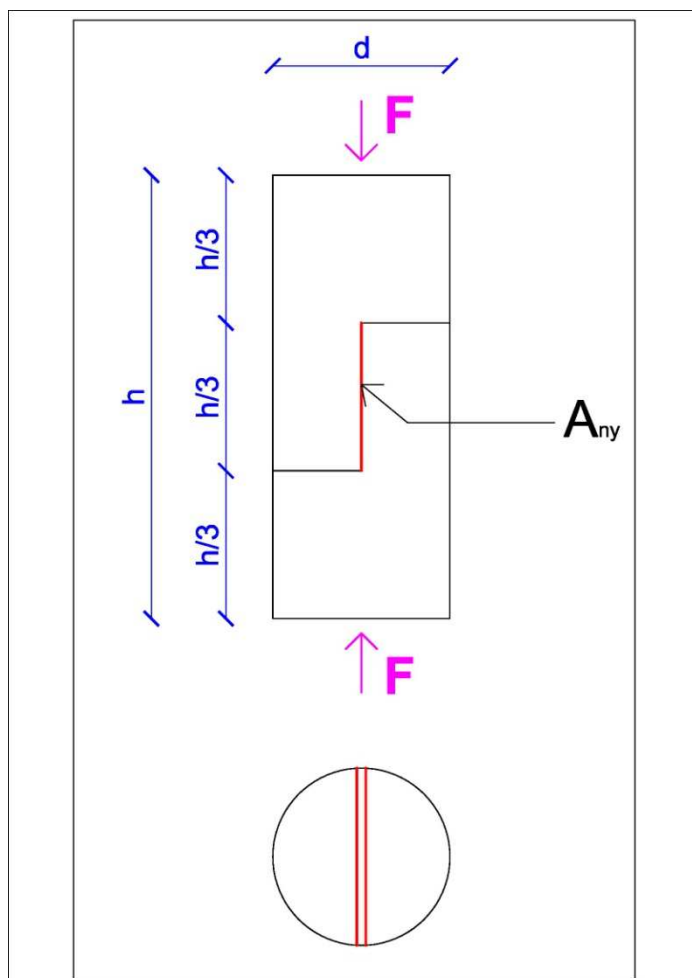
A tárcsák átszúrásával és csavarással végzett közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatokat Vutukuri részletesen ismerteti (Vutukuri et al., 1974). A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló laboratóriumának kőzetvizsgáló laborrészle-

gében került kifejlesztésre a bemetszett fúrómag mintákon végezhető nyírószilárdsági vizsgálat, mely vizsgálattechnikai szempontból egyszerű és jól illeszkedik a laboratóriumi szilárdsági vizsgálatok rendjébe (Gálos-Kövesdi, 2006).

A hengeres próbatestek két oldalról egymással szemben 1/3, 2/3 magasságban fél átmérőig vannak bevágva. Tengely irányú erő működése mellett a tengely irányában a minták a két bemetszés között nyíródnak el. A nyírás síkra merőlegesen nem hat külső erő, ezért nincs normálfeszültség. A nyírószilárdság:

$$\tau = \frac{F}{A_{ny}} \quad (2)$$

ahol  $F$  az elnyíródást okozó erő  
 $A_{ny}$  a bemetszések közötti nyírt felület



1. ábra. Bemetszett próbatest nyíró vizsgálathoz

### 2.2 Törési határgörbe alapján meghatározott nyírószilárdság

Mohr 1990-ben kidolgozott elméletének alap gondolata szerint a főfeszültségek főköreihez hozzárendelhető egy burkológörbe, amely az adott kőzet törési határgörbéje. Ez, az összetartozó törést előidéző főfeszültségek alapján határozható meg:

$$\tau = f(\sigma_1^i, \sigma_3^i; \sigma_1^j, \sigma_3^j; \dots; \sigma_i^i; \sigma_j^j) \quad (3)$$

Klasszikus módszer a triaxiális cellában végzett vizsgálat, amikor is az összetartozó törést okozó feszültségi főkörek burkoló görbéje, más szóval a törési határgörbe, a húzó-, az egytengelyű nyomó- és néhány többtengelyű feszültségállapotban meghatározott Mohr-körök érintőjének felvételéből adódik. A 2. ábrán a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló laboratóriumában levő triaxiális berendezését mutatjuk be.

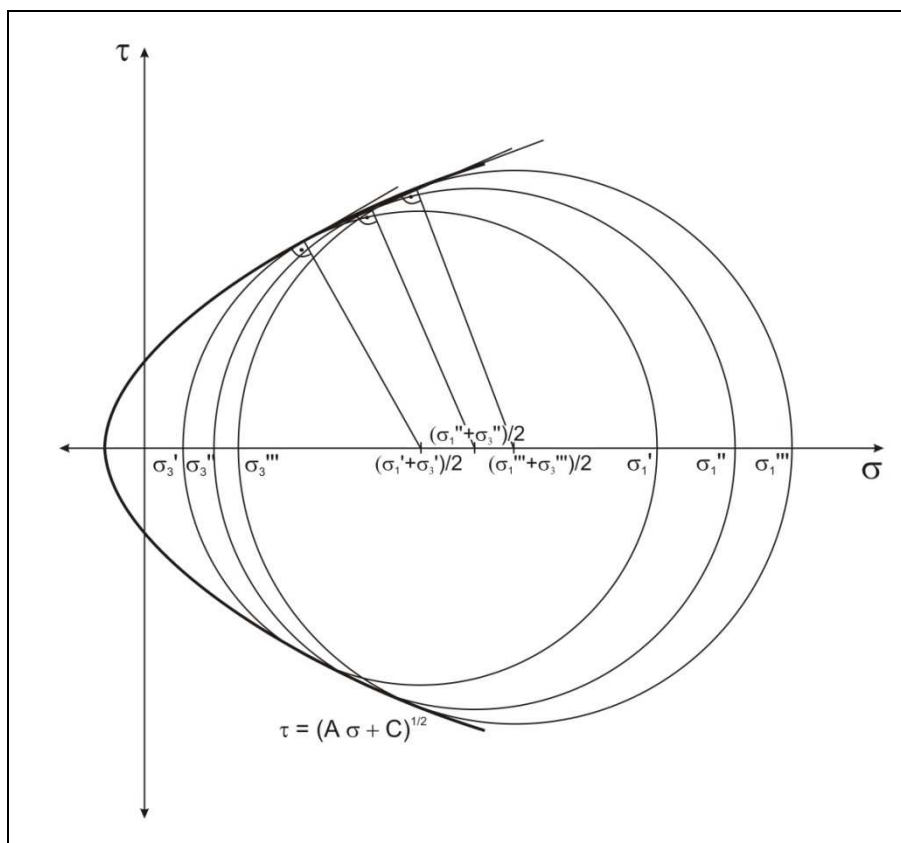


2. ábra. A BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék triaxiális vizsgálóberendezése

A függvénykapcsolat adott közetfélésekre vonatkozó alakjának meghatározásával számos szerző foglalkozott. A tényleges viselkedés leírását parabolákkal, hiperbolák kiválasztott szakaszának lineáris közelítésével, sorba fejtett függvénnyel javasolták és javasolják manapság is. A törési határgörbe legegyszerűbben másodfokú parabolával adható meg. A szakirodalomban több megoldás áll rendelkezésre, például Balássy által javasolt számítási módszer (Balássy, 1979), amely a Mohr-körök un. zenitgörbéjét felhasználva szóródó mérési eredmények esetén is jól használható. A zenit görbe matematikai leírására másodfokú parabolát használjuk:

$$\tau = \sqrt{A\sigma + C} \quad (4)$$

összefüggés szerint, ahol az A és C a vizsgált kőzet anyagjellemzői.



3. ábra. Főfeszültségek Mohr-féle ábrázolása, a törési határgörbe meghatározására

Az építési kőanyagok magyar szabványsorozatában a triaxiális vizsgálat vizsgálati szabványa (MSZ 18285/3:1979) korlátozott érvényességgel megengedi a törési határgörbe felvételét a nyomószilárdság ( $\sigma_c$ ) és a húzószilárdság ( $\sigma_t$ ) hányadosa, a Brincke-szám (B) függvényeként:

$$\tau = f(B) \quad B = \frac{\sigma_c}{|\sigma_t|}$$

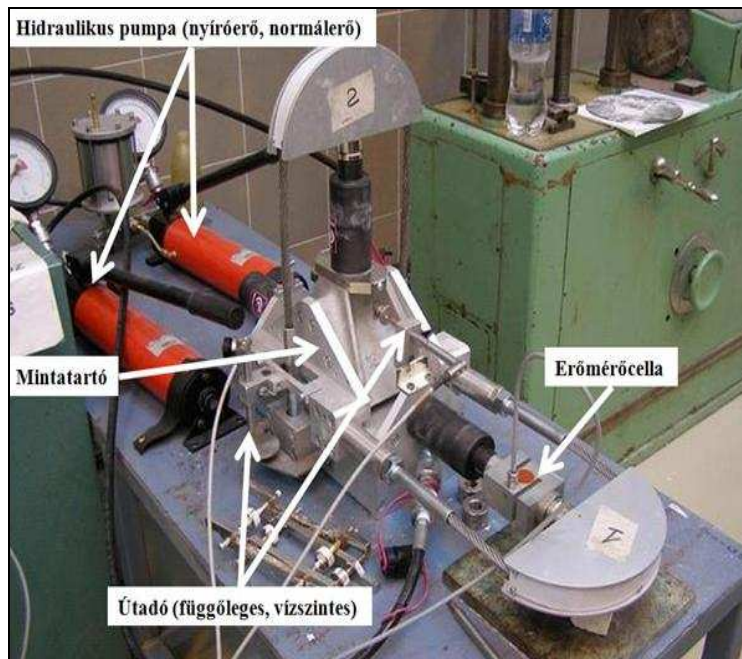
$$\tau = \frac{b}{a} \sqrt{(\sigma + c)^2 - a^2}$$

$$\text{ahol} \quad a = \frac{2|\sigma_t|}{B-3} \quad b = \frac{|\sigma_t|}{\sqrt{B-3}} \quad c = (a + |\sigma_t|)$$

A törési határgörbe meghatározásának másik módja a nyíróberendezéssel végzett nyírószilárdsági vizsgálat, amikor is különböző normálfeszültséghez tartozó nyírószilárdságot határozunk meg:

$$\tau = f(\sigma_1, \tau_1; \sigma_2, \tau_2; \dots; \sigma_n, \tau_n) \quad (6)$$

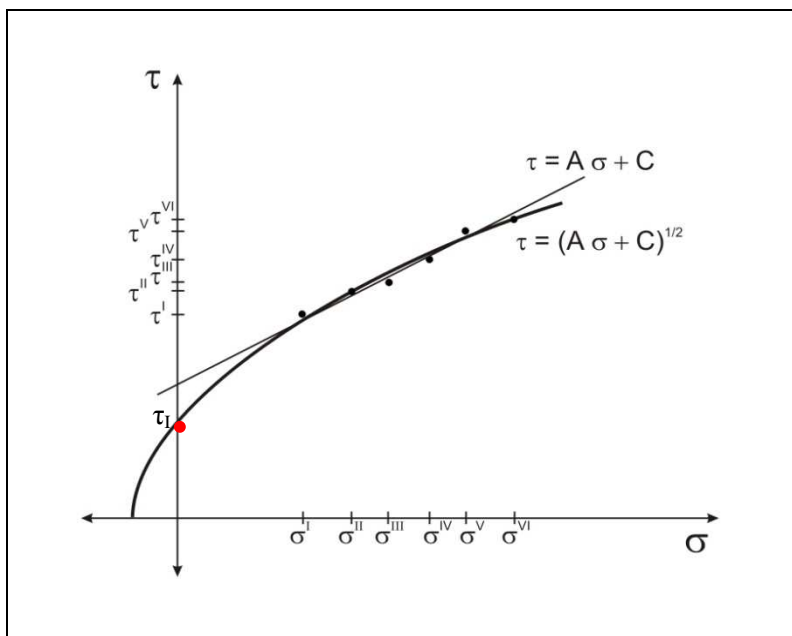
A 4. ábrán a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Anyagvizsgáló laboratóriumában levő nyíróberendezését mutatjuk be.



4. ábra. A BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék nyíró-vizsgálóberendezése

A törési határgörbe az összetartozó  $\sigma_i - \tau_i$  értékpárookra illesztett függvény. Célszerűen a parabolával történő, (4) szerinti törési határgörbe felvétele, amikor is a pontokra a legkisebb négyzetek eltérésének módszerével illesztjük a függvényt, de gyakran előfordul, hogy a talajmechanikában szokásos egyenes illesztéssel élünk. Ez esetben az ún. Coulomb-egyenes nyírási paramétereivel adható meg a törési határfeltétel, azaz a kohézióval ( $C = \tau = c$ ) és a belső súrlódási szöggel ( $A = \text{tg}\phi$ ).

Összeálló kőzeteknél ez a megadás nem felel meg a gyakorlati tapasztalatoknak, még akkor sem, ha az illesztés regressziójának erőssége jó, mivel a kőzeteknek van húzószilárdsága, amelyet törési határfeltételként kell kezelniük. Az 5. ábra jól szemlélteti a kétféle módon megadott törési határgörbe közötti különbséget.



**5. ábra.** Törési határgörbe meghatározása közvetlen nyírószilárdsági vizsgálat eredményei alapján az összetartozó  $\sigma_i - \tau_i$  értékekből

Mind a triaxiális vizsgálatnál, mind pedig a nyíróberendezéssel végzett vizsgálatokkal meghatározott törési határgörbén a  $\sigma = 0$  helyén a nyírószilárdság, azaz az ún. „tiszta nyírás” értéke ( $\tau_i$ ) olvasható le. A törési határgörbét leíró függvényekből a tiszta nyírás, azaz a normál feszültség  $\sigma = 0$  helyén a (4) összefüggésből

$$\tau_i = \sqrt{C} \quad (7)$$

az (5) összefüggésből pedig

$$\tau_i = \frac{b}{a} \sqrt{c^2 - a^2} \quad (8)$$

A kőzetalkotók közötti kapcsolatot kifejező belső súrlódási szöget a

$$\operatorname{tg}\Phi = \left( \frac{d\tau}{d\sigma} \right)_{\sigma=0} \quad (9)$$

összefüggés szerint adhatjuk meg. Gyakorlatban, nyírási paraméterként a (un. belső súrlódási szöget,  $\Phi$ -t) parabola alakú törési határgörbe  $\sigma = 0$  pontjában levő érintő hajlásszögeként használjuk:

$$\operatorname{tg}\Phi = \frac{A}{2\tau_i} \quad (10)$$

A Brincke-szám függvényeként meghatározott törési határfeltétel esetén a szakirodalomban javasoltak alapján a

$$\operatorname{tg}\Phi = 0,5(\sqrt{B+1} - 1) \quad (11)$$

összefüggésből számoljuk a belső súrlódási szöget.

### 3 AZ ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A különböző módszerrel meghatározott nyírószilárdsági vizsgálatok eredményeinek értékeléséhez összehasonlító vizsgálatosorozatot végeztünk. Sósiktról származó finomszemű durva mészkő tömbből közvetlen nyíróvizsgálatra, nyomó- és húzószilárdsági vizsgálatra, valamint nyíróberendezéssel készülő vizsgálatra alakítottunk ki próbatesteket. A vizsgálatosorozathoz az egy tömbből kimunkált azonos átmérőjű próbatestek így homogén izotróp mintának voltak tekinthetők.

#### 3.1 Közvetlen nyíróvizsgálat

Közvetlen nyíróvizsgálatot 6 db bemetszett próbatesten végeztünk. A vizsgálati eredményeket az 1. táblázatban adjuk meg. A vizsgálatnál csak a nyírószilárdság határozható meg, a belső súrlódási szög nem számítható.

**1. táblázat.** Bemetszett próbatesten végzett vizsgálatok eredményei

Próbatest szám	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Nyírószilárdság (MPa)	2,78	3,79	4,07	3,67	3,61	3,87
Átlag	3,63					
Szórás	0,45					

## 3.2 Törési határgörbe szerinti vizsgálat

A 6-6 db próbatesten készített egyirányú nyomó- és húzószilárdsági (Brazilvizsgálat) eredményei alapján a (8) és (11) összefüggések szerint a Brincke-szám függvényében számoltuk a nyírási paramétereket. A nyomó- és húzószilárdsági vizsgálatok eredményeit 2. és 3. táblázat tartalmazza.

**2. táblázat.** Nyomószilárdsági vizsgálatok eredményei

Próbatest szám	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Nyomószilárdság (MPa)	18,61	23,03	24,12	16,23	21,49	24,40
Átlag	21,32					
Szórás	3,27					

**3. táblázat.** Húzószilárdsági vizsgálatok eredményei

Próbatest szám	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Húzószilárdság (MPa)	6,74	5,59	6,13	2,83	5,38	5,28
Átlag	5,33					
Szórás	1,34					

A vizsgálati eredmények alapján számított nyírási paraméterek:

nyírószilárdság: 5,96 MPa

belső súrlódási szög: 31,7°

## 3.3 Nyíróberendezéssel végzett vizsgálat

Nyíróberendezéssel végzett nyírószilárdsági vizsgálat során az előzetesen gipszbe ágyazott próbateszteket a mintatartóba helyeztük és konstans normálerő mellett a mintákat elnyírtuk. A 11 db mintán végzett nyírás a  $\sigma$ - $\tau$  diagramon egy-egy pontot jelent. A tizenegy mérés pontjaira a legkisebb négyzetek módszerével másodfokú parabolát illesztettünk. Az illesztett törési határgörbének a  $\tau$  tengely metszéspontja a tiszta nyírószilárdság és az ehhez a ponthoz tartozó érintő meredeksége a belső súrlódási szög. A mérési eredményeket a 4. táblázat tartalmazza, a 6. ábrán a törési határgörbét tüntettük fel.

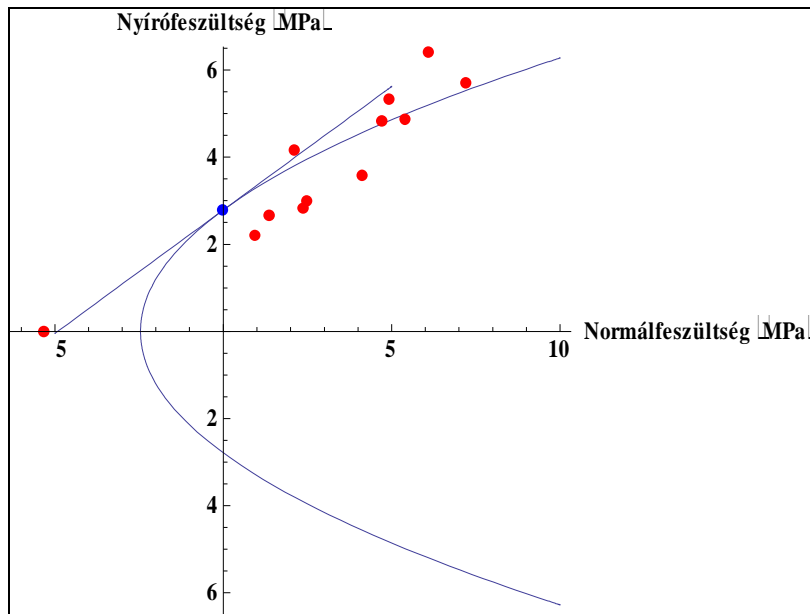
**4. táblázat.** Közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatok eredményei

Próbatest szám	Normálfeszültség (MPa)	Nyírószilárdság (MPa)
I3 a	0,91	2,21
I3 b	1,35	2,68
I1	2,11	4,17
I4	2,38	2,83
I9	2,45	2,98
I5	4,14	3,6
I2	4,69	4,84
I6	4,94	5,33
I8	5,38	4,86
I10	6,08	6,4
I7	7,2	5,69

Az illesztett határgörbe alapján a nyírási paraméterek:

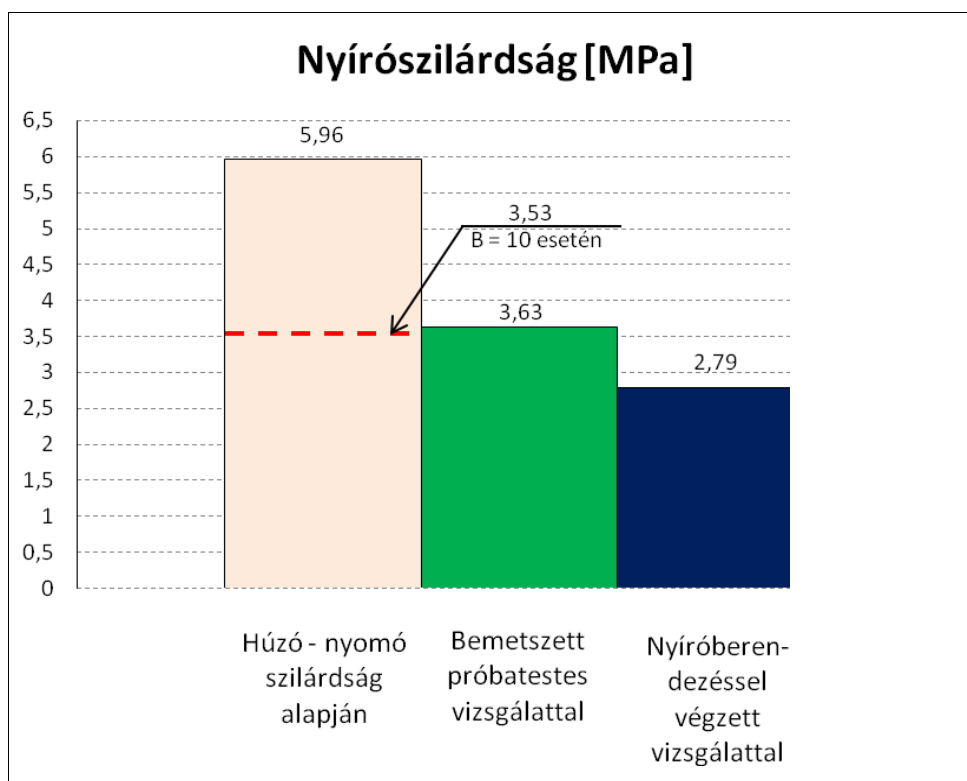
nyírószilárdság: 2,79 MPa

belső súrlódási szög: 29,6°



6. ábra. Törési határgörbe a közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatok alapján

A különböző eljárással meghatározott nyírószilárdsági értékeket a 7. ábra oszlopdiagramja szemlélteti.



7. ábra. A nyírószilárdsági vizsgálatok eredményei

A Brincke-szám alapján számított nyírószilárdság kiugróan nagy értékét az erre a mintára kapott húzószilárdság irreálisan nagy értéke magyarázza. Abban az esetben, ha a húzószilárdság a szakirodalmi adatok szerint a nyomószilárdság tizede lenne, úgy a nyírószilárdság 3,53 MPa-ra, a belső súrlódási szög pedig  $49,2^\circ$ -ra adódott volna.

#### 4 ÖSSZEFOGLALÁS, JAVASLATOK

Közetmechanikai feladatok megoldásánál a nyírási paraméterek, mint fontos anyagjellemzők szerepelnek. Meghatározásukra a törési feltétel alapján különböző laboratóriumi vizsgálati lehetőségek állnak rendelkezésünkre. A tanulmányban vizsgálati eredményekre alapozva teszünk javaslatot ezek használatára.

A gyakorlati feladatok megoldásánál a lehetőségek figyelembe vételével bármely eljárással meghatározhatjuk a törés határfeltételét, a hozzá tartozó nyírási paraméterekkel. Figyelemmel kell azonban lennünk arra a tényre, hogy anyagjellemzőkkel és nem anyagtulajdonságokkal van dolgunk. A nyírási paraméterek számszerű értékei függenek a vizsgáló eljárástól, azaz vizsgálati paraméterekkel terheltek. A közvetlen nyíróvizsgálatokkal nyert nyírószilárdsági értékek (bemetszett próbatestes vizsgálat: 3,63 MPa és nyíróberendezéssel végzett vizsgálat: 2,79 MPa) közelítenek egymáshoz, míg a húzónyomó szilárdság alapján számított érték (5,96 MPa) erősen eltér azoktól. A különbség oka a húzónyomó szilárdság arányában kereshető. A Brincke-szám függvényében számított nyírószilárdság abban az esetben ad a közvetlen nyíróvizsgálatokból nyert értékekhez hasonló eredményt (3,53 MPa), amennyiben  $B=10$ .

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a vizsgálatok során kapott segítségért Emszt Gyula tanszéki mérnöknek, Árpás Endre és Pálinkás Bálint laboránsoknak.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- Balássy Z. 1979. A törési határgörbe meghatározása szóródó mérési eredmények esetén. Alkalmazott kőzetmechanikai kutatások. Vizsgálati jelentés Agrártudományi Egyetem, Gödöllő
- Gálos M., Kövesdi B. 2006. Kőzetek nyírószilárdságának meghatározása bemetszett próbatesteken. In: Török Á., Vásárhelyi B. (szerk.) *Ménökgeológia-Kőzetmechanika 2006*. Műegyetemi Kiadó, Budapest. 53-59.
- Vutukuri V. S., Lama R. D., Saluja S. S. 1974. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Testing Techniques and Results. Volume I. TRANS TECH PUBLICATIONS, Ohio. 280p.
- MSZ 18285/3:1979 számú Építési kőanyagok szilárdsági vizsgálata. Triaxiális vizsgálat.