

ERŐMŰI PERNYÉK NYÍRÓSZILÁRDSÁGI PARAMÉTEREINEK VIZSGÁLATA

Gonda Nóra¹, Kántor Tamás², Dr. Kovács Balázs³, Makó Ágnes⁴

¹ okl. hidrológus mérnök, predoktorandusz, ^{2,4} PhD hallgató ³ intézetigazgató, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Hidrológiai – Mérnökgeológiai Intézet Tanszék

ÖSSZEFOGLALÓ

Jelen tanulmány célja az erőműi pernyék nyírószilárdsági tulajdonságainak vizsgálata különböző cementáló adalékanyagok tekintetében, valamint az állékonysági paraméterek változásának figyelemmel követése az érettségi fok függvényében. A kisméretű direkt nyírógéppel végzett méréseink során választ keresünk arra is, hogy a későbbi felhasználás tekintetében esetlegesen felmerülő savas környezet hogyan befolyásolja a minták nyírószilárdságát.

BEVEZETÉS

A széntüzelésű energiatermelés széleskörű elterjedésével nagy mennyiségű hulladék keletkezik világszerte. A szén égetéséből származó pernye, ill. hamu mára komoly környezeti problémává vált.

Ezért fontos feladat törekedni ezeknek a melléktermékeknek a depóniába helyezése helyett azok további hasznosítására. Az újra hasznosítás és további alkalmazás számos tényező függvénye, mint pl. a szemcseméret, ásványos ill. kémiai összetétel, geológiai eredet, állékonysági paraméterek, áteresztő képesség, stb. Ezek teszik alkalmassá a pernyéket pl. az építőiparban, a cementgyártásban, a beton és a különféle betonkeverékek előállításában, valamint utak, gátak adalék anyagaként ill. tömedék anyagként való felhasználására [Kovács, 2001; Iyer - Scott, 2001]. Egy további fontos jellemzője ezeknek az anyagoknak – mely lehetővé teszi ezek kötő anyagként való alkalmazását – a puccolános tulajdonság, melynek köszönhetően vízzel és kalcium-hidroxiddal reagálva cementkötésű termékek keletkeznek.

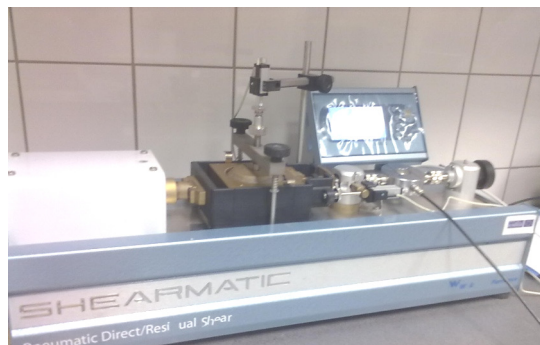
Az erőműi pernyék depóniába helyezése vagy a fent említett felhasználási lehetőségek számos speciális vizsgálatot igényelnek, hiszen ezek a mérnöki létesítmények egyaránt viselkednek teherviselő közegként, illetve jelentenek terhet környezetükre. Kaniraj és Gayathri (2003) különféle szálerősítéses pernye keverékek geotechnikai vizsgálatát végezték el, Zabielska és Adamska (2006) pernyék és geomembránok érintkezési felületének nyíróvizsgálatával foglalkozott. A szakirodalomban számos lehetséges felhasználási módot mutatnak be, ezért különösen fontos ezen anyagok geotechnikai viselkedésének mind behatóbb tanulmányozása, minthogy az erőműi pernyék hasznosítása aktuális kérdés.

A NYÍRÓSZILÁRDSÁG

Az anyagok nyírószilárdságát a Coulomb-féle $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + c$ egyenlettel jellemezzük, ahol τ a σ hatékony normál feszültség mellett rendelkezésre álló nyírószilárdság, φ a belső súrlódási szög és c a kohézió. Utóbbi kettő - a kohézió és a belső súrlódási szög - anyagjellemző, melyeket szokás nyírószilárdsági paramétereknek is nevezni. COULOMB szerint az anyag törését az idézi elő, hogy a szemcsék között fennálló belső súrlódást és kohéziót a nyírófeszültség túllépi.

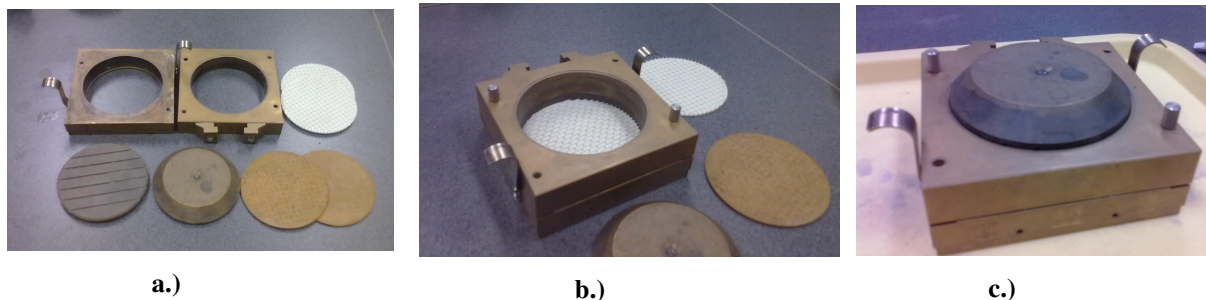
Direkt nyíróvizsgálatok

A nyírószilárdság meghatározása során a vizsgált mintatestben függőleges irányú terheléssel ismert nagyságú nyomófeszültséget ébresztünk, miközben az alakváltozások egyidejű mérése mellett egyre növekvő vízszintes nyíróerőt közlünk, és mérjük azt a vízszintes erőt, mely a mintában már tönkremenetelt, törést idéz elő. Ezt a kísérleti eljárást közvetlen vagy más néven direkt nyírókísérletnek nevezzük, mivel a nyírás egy kényszerfelület mentén történik. A vizsgálatot az 1. ábrán látható nyírógép segítségével végezzük el.



1. ábra Direkt nyírógép

A nyíródoboz a 2/a-c. ábrán látható módon egy alsó álló keretből és egy erre helyezett felső keretből áll, amely vízszintes irányban elmozdítható. A keretek belsejében két szűrőkő és két fogazott terhelőlap között van a minta. A normál erőt a felső keretbe helyezett nyomólap közvetíti, a vízszintes nyíróerőt oldalról egy motor segítségével, a két keret közötti keskeny rés síkjában adjuk át. Többféle méret létezik belőle, valamint a formáját tekintve lehet kör vagy négyzet keresztmetszetű is.



2/a-c. ábra A nyíródoboz

A méréseket a SHEARMATIC 27-WF2180 típusú kisméretű digitális automata nyírógéppel végeztük, $d = 100$ mm átmérőjű, kör keresztmetszetű nyíródoboz felhasználásával. A nyíróvizsgálatok előtt a minta tömegét és magasságát lemértük, valamint a mérések előtt és után is meghatároztuk a minták pórusaiban lévő víz tömegének a szemcsék tömegéhez viszonyított, százalékban kifejezett nedvességtartalmát.

Méréseinknél normálfeszültségként széles tartományba eső értékeket (50-300 kPa) alkalmaztunk. Az adatrögzítés módját a konszolidáció során exponenciálisra, a nyírás esetében lineárisra állítottuk be, illetve a mért adatokat egy speciális kiértékelő program segítségével dolgoztuk fel.

A PERNYÉK

A szénportüzelésű kazánokból kikerülő pernye gyakorlatilag szilárdság nélküli, szürke színű, porszerű, finom (átlagos szemcsemérete 10-30 μm körüli), igen laza anyag, sűrűsége jellemzően 1960 kg/m^3 [Mucsi et al., 2011]. Kémiai összetételét illetően általánosan elmondható a SiO_2 , Al_2O_3 valamint Fe_2O_3 tartalom, de kémiai tulajdonságait nagymértékben befolyásolják az égetett szén tulajdonságai. Alapvetően kétféle típusú pernyét különböztetünk meg:

- Savanyú pernyék: magas SiO_2 (40-50 %), és alacsony CaO (max. 15 %) tartalommal rendelkeznek,
- Bázikus pernyék: ezeket magas 30-40 % CaO , és alacsony, 20-25 % SiO_2 tartalom jellemzi.

A magas kalcium tartalmú pernyék az alacsony rangú szenek (barnaszén) égetésével keletkeznek, és vízzel reagálva önszilárdulók lesznek. Az alacsony kalciumtartalmú (savanyú) pernyék a magasabb rangú (antracitos) szenekből keletkeznek, és jellemző rájuk a korábban említett puccolános jelleg, vagyis vízzel és $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -dal reagálva megkeményednek [Ahmaruzzaman, 2009].

Ezen tulajdonságuk, valamint kémiai összetételük és egyéb geotechnikai jellemzőik (pl. szemcseméret, sűrűség, belső súrlódási szög, kohéziós erők nagysága) teszik lehetővé többek között a pernyék hidraulikus kötőanyagként való hasznosítását.

Jelen tanulmány egy deponált, savanyú eróműi pernye hasznosításával foglalkozik. A pernye vizsgálatán túl, égetett mész (CaO) és mészégetési szállópor (LKD) adalékanyag alkalmazhatóságát, valamint a későbbi hasznosítás következtében előálló savas környezet nyírószilárdsági paraméterekre gyakorolt hatását vizsgáltuk.

A laboratóriumi mérésekhez a pernye és az adalékanyagok keverékéből készült mintatesteket szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra Az alján drénezett ülepítő hengerben készült, naponta öntözött, majd kiszaluzott mintatestek

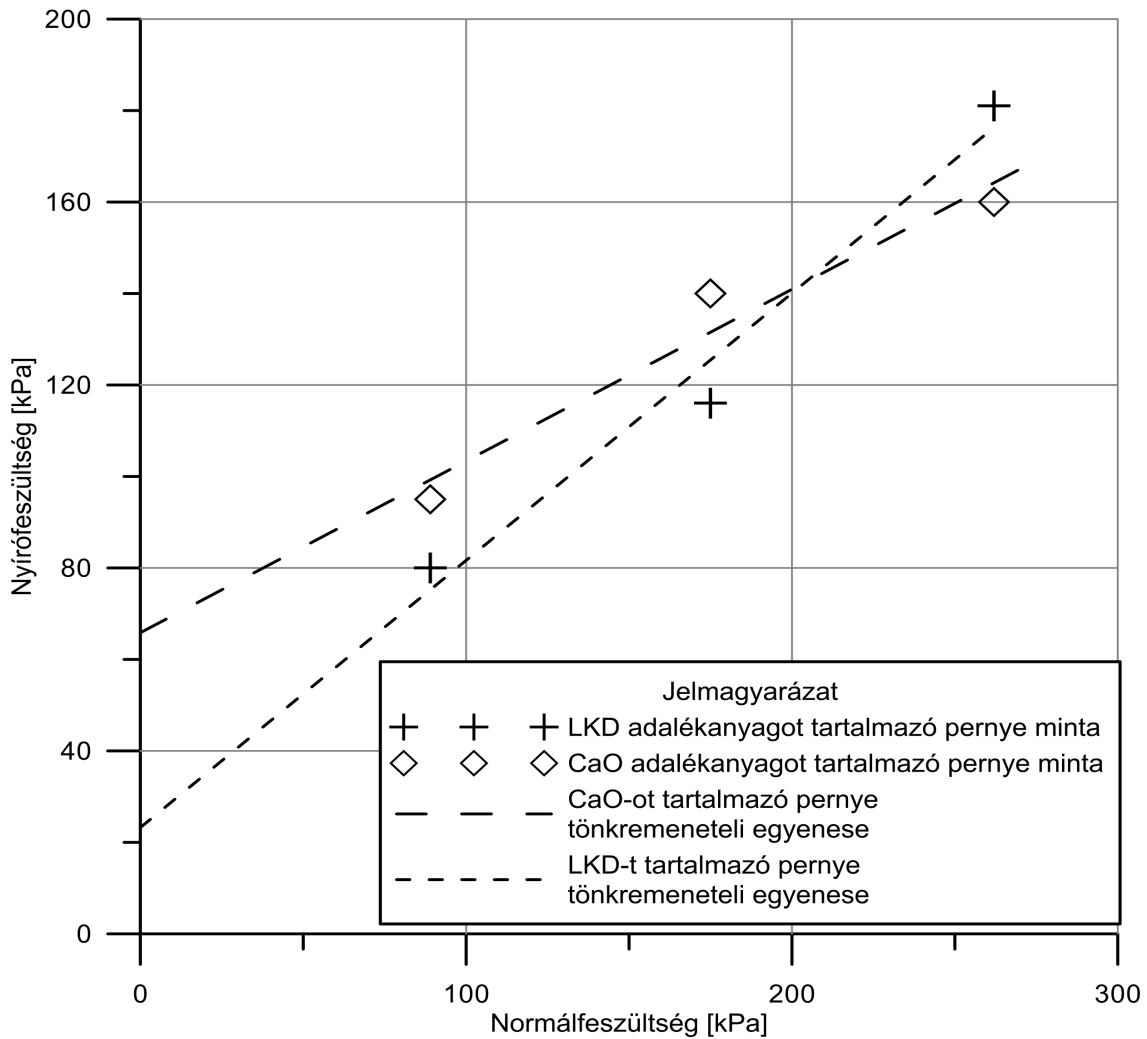
A MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Az első vizsgálati szempontként a pernyék adalék anyagainak a nyírószilárdsági paraméterekre gyakorolt hatását kívánjuk bemutatni. A későbbiekben alkalmazni kívánt adalékanyag megválasztására összehasonlító méréseket végeztünk a kereskedelmi forgalomban kapható égetett mész (CaO), valamint a kisebb reaktivitású (alacsonyabb reakcióidejű) mészalapú kötőanyag, az LKD tekintetében. Az utóbbi rövidítés jelentése: „lime kiln dust”, azaz mészégetési szállópor.

A vizsgált mintatestek mindkét kötőanyagból 3 m/m %-ot tartalmaztak. Az adott normálfeszültségek (σ) mellett mért nyírófeszültség (τ) értékeket szemlélteti a 4. ábra. A korábban említett törési feltétel értelmében a σ - τ értékpárokra illesztett egyenes segítségével meghatározható a belső súrlódási szög (φ) és a kohézió (c) értéke.

A mérési eredmények különbséget mutatnak a két adalékanyag nyírószilárdságra gyakorolt hatásáról. Jól látszik, hogy a CaO-dal kezelt minták esetében a kialakuló kötések erősebbnek bizonyultak, mint az LKD kötőanyagú pernyéknél, amely a jelentősen nagyobb kohézió értékben nyilvánul meg.

A Cao és LKD adalékanyagot tartalmazó minták nyírószilárdsága

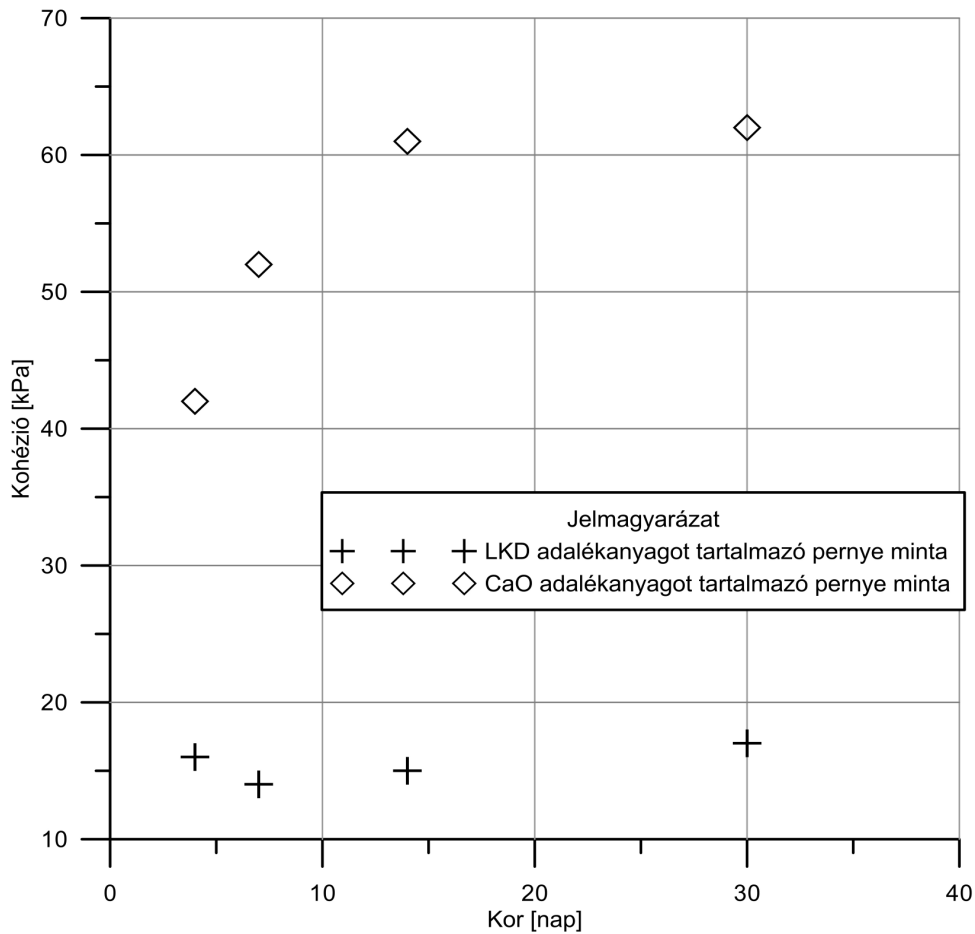


4. ábra A CaO és LKD adalékanyagot tartalmazó minták nyírószilárdsága

Azonban a két adalékanyag hatását célszerű az időben is vizsgálni, vagyis azt, hogy az érettségi fok függvényében hogyan alakulnak az állékonysági paraméterek. Ezért a próbatestek szilárdságát a laboratóriumi vizsgálatok esetében különböző, tervezett: 4, 7, 14 és 30 napos vizsgálati korokban mértük.

Az 5. ábra szemlélteti a kapott eredményeket mindkét adalékanyag esetében az idő előrehaladtával. Az LKD jelű minta esetében látható, hogy a kohézió értékek az érettségi fok növekedésével sem változtak számottevően, ugyanolyan alacsonyak maradtak. Ezzel szemben a „hagyományos” mész tartalmú minták kohézió értékei növekvő tendenciát mutatnak, főként a 14 napos korig, ez után az 1 hónapos minta vizsgálati eredményében markáns növekedés nem tapasztalható.

Az LKD és CaO adalékanyagot tartalmazó minták kohéziójának változása az érettségi fok függvényében



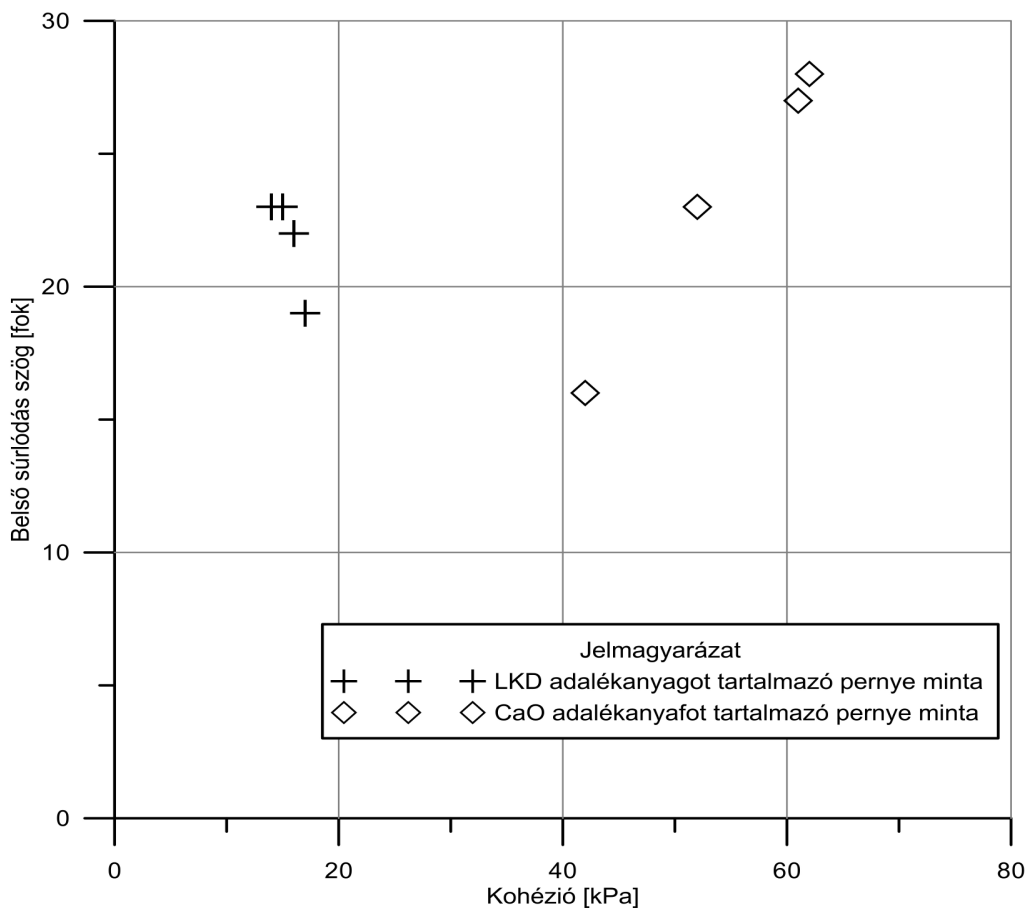
5. ábra A vizsgált adalékanyagokat tartalmazó minták kohézió értékeinek változása az érettségi fok függvényében

Hasonló következtetések vonhatók le az 1. táblázatban feltüntetett belső súrlódási szögek kapcsán is, azonban a CaO-os minták esetében szokatlan a kohézió értékkel párhuzamosan növekvő (jelentősebben itt is a 14 napos korig) belső súrlódási szög (6. ábra), hiszen általánosan a kohézió értékének növekedésével a belső súrlódási szög csökken, és igaz ez fordítva is. Az LKD-val kezelt pernyék φ értékeiben a mért kohéziókhöz hasonlóan nincs számottevő változás a mintatestek éretségének előrehaladtával. Ennek az lehet az oka, hogy a CaO-os minták esetében az érettségi fokkal a mész – pernye közti kötések fokozatosan erősödnek, ezáltal nagyobb szemcseméretű „gumók” keletkeznek, és ez a belső súrlódási szögben jelentkezik. Az LKD adalékanyag tartalmú minták esetében a mért kohézió értékek is azt tükrözik, hogy az előbbi megállapítás itt nem érvényes, a kötések nem erősödnek, így számottevően a belső súrlódási szög értékek sem változnak.

1. Táblázat Az LKD és CaO adalékanyagú minták $c - \varphi$ értékei az érettségi fok függvényében

Kor [nap]	LKD		CaO	
	c [kPa]	φ [fok]	c [kPa]	φ [fok]
4 nap	16	22	42	16
7 nap	14	23	52	23
14 nap	15	23	61	27
30 nap	17	20	62	28

A CaO és LKD adalékanyagot tartalmazó minták nyírószilárdsági paraméterei



6. ábra A CaO és LKD adalékanyaggal ellátott minták nyírószilárdsági paraméterei

A mérési eredmények alapján egyértelműen megállapítható, hogy az LKD kötőanyaggal szemben a hagyományos CaO-dal kezelt pernye minták nyírószilárdsági paraméterei kedvezőbbek a teherviselés igényének kielégítése szempontjából, mely a későbbi alkalmazhatóság, hasznosítás egyik alapfeltétele.

Vizsgálatokat végeztünk arra vonatkozóan is, hogy a kedvezőbbnek bizonyult CaO-dal kezelt minták állékonysági paraméterei növelhetők-e az adalékanyag őrlése, valamint osztályozása által. Az anyag őrlésével még finomabb szemcseméretű termékek állíthatók elő, melynek fontossága a fajlagos felület növekedésében van, ezáltal a szemcsék közti kötések erősödnek.

2. táblázat Az adalékanyag őrlésének hatása a nyírószilárdságra

Kor [nap]	CaO		CaO_őrölt	
	c [kPa]	φ [fok]	c [kPa]	φ [fok]
7	50	23	56	25
14	61	27	65	20

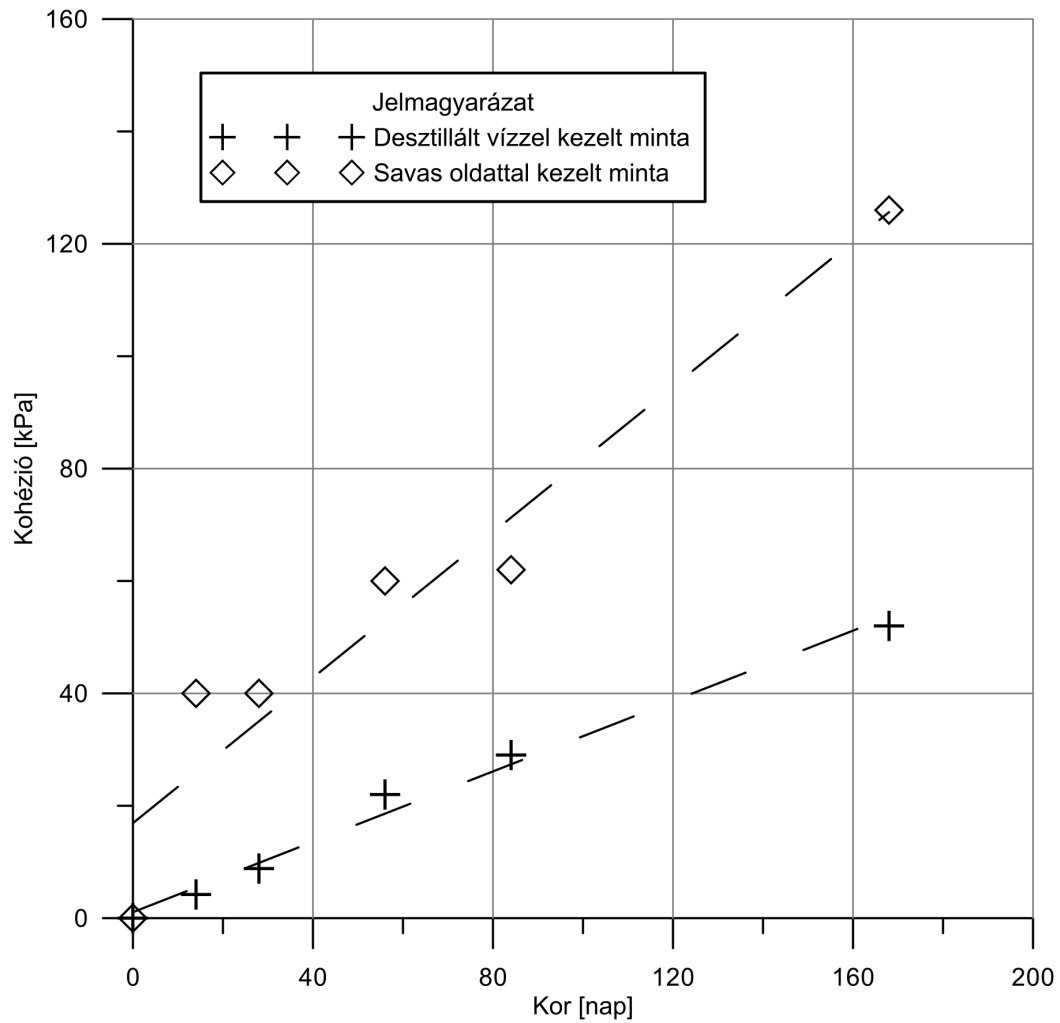
A nyíróvizsgálatok eredményeit a 2. táblázat foglalja össze. Jól látható, hogy a kohézió és belső súrlódási szög értékekben nincs jelentős változás az őrölt CaO alkalmazása után, tehát véleményünk szerint nem gazdaságos az adalékanyag őrlése, hiszen az rendkívül energiaigényes folyamat.

Az erőműi pernyék későbbi felhasználása szempontjából egy további fontos kérdés a környezeti tényezőkkel szemben a minták nyírószilárdságának stabilitása, azaz, hogy az esetlegesen előálló savas környezet milyen mértékben ronsolja a kialakuló kötéseket. Ezért desztillált vízzel ill. savas oldattal kezelt mintákat vizsgáltunk az idő függvényében. A mintatestek készítésénél az alul drénezett ülepítő hengerekben lévő CaO – pernye keverékeket naponta öntöttük az előbb említett két folyadékkal, melyek pH-ját minden nap ellenőriztük.

A kísérletek célkitűzéséhez képest – azaz annak vizsgálata, hogy a savas környezet milyen mértékben ronsolja a mész és pernye között lejátszódó reakciók eredményeként kialakuló kalcium – hidrát – szilikát kötéseket – meglepő eredményt kaptunk. A 7. ábrán látható módon a savas környezet hatásaként magasabb kohézió értékeket mértünk a semleges desztillált vizes mintákhoz képest, és ez az érettségi fokkal tovább növekedett. Figyelemre méltó a fél éves minta rendkívül magas kohézió értéke. Mindezekből arra következtethetünk, hogy általánosan a savas környezet nem ronsolja olyan mértékben a mintákat, ahogyan azt vártuk, illetve a laboratóriumi körülmények között állandóan semleges pH-n tartott, teljesen tiszta desztillált víz nem befolyásolja a kialakuló kötések erősségét. Vagy egy másik lehetséges magyarázat, hogy a savas kémhatás a pernyék felületét ronsolja, ezáltal még finomabb szemcseméretű lesz a minta, így a fajlagos felület növekedésével a kötések erősödnek, ami a magasabb kohézió értékekben nyilvánul meg.

A 3. táblázatban feltüntetett belső súrlódási szög értékekben a 28 és 56 napos desztillált vízzel kezelt minták esetében a trendből kiugró értékeket kaptunk, ami valószínűleg mérési pontatlanság eredménye.

A savas közeg hatása a kohézió értékekre a vizsgálati kor függvényében



7. ábra A savas közeg hatása az érletési fok függvényében a kohézió értékekre

3. Táblázat A savas környezet hatása a nyírószilárdság értékére

Kor [nap]	CaO_deszt. víz		CaO_bányavíz	
	c [kPa]	φ [fok]	c [kPa]	φ [fok]
14	4,2	27	40	20
28	8,8	35	40	21
56	22	38	60	21
84	29	24	62	17
168	52	28	126	8,4

ÖSSZEFOGLALÁS

Az erőműi pernyék hasznosítása aktuális kérdés, valamint alapvető fontosságú a nyírószilárdsági paraméterek vizsgálata. Jelen tanulmányban egy deponált savanyú erőműi pernye hasznosításával foglalkoztunk.

A kisméretű direkt nyírógéppel végzett méréseink első szempontja kétféle adalékanyag, a hagyományos, kereskedelmi forgalomban kapható égetett mész (CaO), és az alacsonyabb reakcióidejű mészégetési szállópor, az LKD vizsgálata az állékonysági paraméterekre vonatkozó hatásuk tekintetében. Az eredményekből egyértelműen megállapítható, hogy a CaO-dal kezelt pernyék nyírószilárdsága a későbbi felhasználás szempontjából kívánatos teherbírás tekintetében egyértelműen kedvezőbb.

A jobbnak bizonyuló CaO adalékanyag tekintetében további vizsgálatokat végeztünk arra vonatkozóan, hogy az anyag őrlésének, osztályozásának eredményeként adódó nagyobb fajlagos felület által elérhető-e a kötések erősödése. Az eredményekből kiderült, hogy számottevő változás nem következik be a mért kohézió és belső súrlódási szög értékekben.

Az erőműi pernyék későbbi felhasználása szempontjából egy további fontos kérdés a környezeti tényezőkkel szemben a minták nyírószilárdságának stabilitása. Ennek vizsgálatára desztillált vízzel és savas oldattal kezelt minták nyírószilárdságát mértük az idő előrehaladtával. Az eredményekből arra következtettünk, hogy általánosan a savas környezet nem rontsolja olyan mértékben a mintákat, ahogyan azt vártuk, vagy esetleg a pernyék felülete rontsolódik, így a finomabb szemcsék közti összetartó erők erősödnek.

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország fejlesztési terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

AHMARUZZAMAN, M.: **A review on the utilization of fly ash.** Progress in Energy and Combustion Science 36, Assam, India (2009) p. 327-363

IYER, R.S., SCOTT, J. A.: **Power station fly ash — a review of value-added utilization outside of the construction industry.** Resources, Conservation and Recycling 31 (2001) p. 217–228

KANIRAJ, S. R. – GAYATHRI, V.: **Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions** / Geotextiles and Geomembranes 21. (2003) p. 123–149

KOVÁCS, F.: **A barnaszén erőművek salak-pernye anyagai, jellemzőik és hasznosításuk.** A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat, 55. kötet (2001) p. 67-76

MUCSI, G., DEBRECZENI, Á., MÁDAI, V., DUDOK, T., CSŐKE, B.: **Development of hydraulic binder using industrial wastes.** Építőanyag, 63. evf. 1. szám (2011) p. 24-28.

ZABIELSKA – ADAMSKA, K.: **Shear strength parameters of compacted fly ash – HDPE geomembrane interfaces** / Geotextiles and Geomembranes 24. (2006) p. 91–102