

# A 4-es metró budai nyomvonala menti kiscelli agyag előfordulások statisztikai és mérnökgeológiai értékelése

Barsi Ildikó

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, ildiko.barsi@gmail.com

Görög Péter

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, gorog.peter@gmail.com

Török Ákos

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, torokakos@mail.bme.hu

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A 4-es metró budai nyomvonala kevés kivétellel kiscelli agyagban halad. Az agyag mérnökgeológiai jellemzőit 40 fúrás, közel 500 minta több mint 5000 talajmechanikai paramétere alapján elemeztük. A minták plasztikus indexe alapján a kiscelli agyag nagy része kövér agyag kategóriába sorolható. Az agyag száraz testsűrűsége  $1540-2470 \text{ kg/m}^3$ , míg nedves testsűrűsége  $1860-2520 \text{ kg/m}^3$  közötti értékeket vehet fel. A fizikai paraméterek mélység szerint eloszlása azt tükrözi, hogy a mélység és a hézagtenyező illetve a mélység és a nedves testsűrűség között exponenciális kapcsolat figyelhető meg, de további vizsgálatok szükségesek ennek pontosítására.

*Kulcsszavak:* oligocén, agyag, térfogatsúly, plasztikus index, statisztika

## 1 BEVEZETÉS

A kiscelli agyag egy már sokat vizsgált képződmény, amely Budapest térségében és környékén az alapozási munkák során gyakran feltárt képződmény. A korábbi vizsgálatok kiterjedtek a kiscelli agyag fizikai tulajdonságainak vizsgálatára a budai felszínmozgásokkal kapcsolatban (Paál 1976, Németh 1980), valamint nagyobb mélyépítési munkákkal kapcsolatos helyszíni és laborvizsgálatokra (Horváth et al. 2000, Paál 2001). Ezen cikkekben közölt adatsorok is azt igazolják, hogy a kiscelli agyag nem tekinthető egységes képződménynek és fizikai paraméterei jelentősen eltérhetnek az egyes területeken. Az kiscelli agyag talajmechanikai és mérnökgeológiai paramétereinek statisztikai értékelése több budai előfordulásra már elkészült (Görög 2007a,b). A jelen cikk hasonló elvek alapján dolgozza fel a 4-es metró budai nyomvonala menti kiscelli agyag előfordulások fizikai jellemzőit, új eddig még ilyen szempontból nem elemzett fúrási adatok laborvizsgálati eredményei alapján.

## 2 ELHELYEZKEDÉS, FÖLDTANI FELÉPÍTÉS

### 2.1 Metró 4-es vonalának rövid története

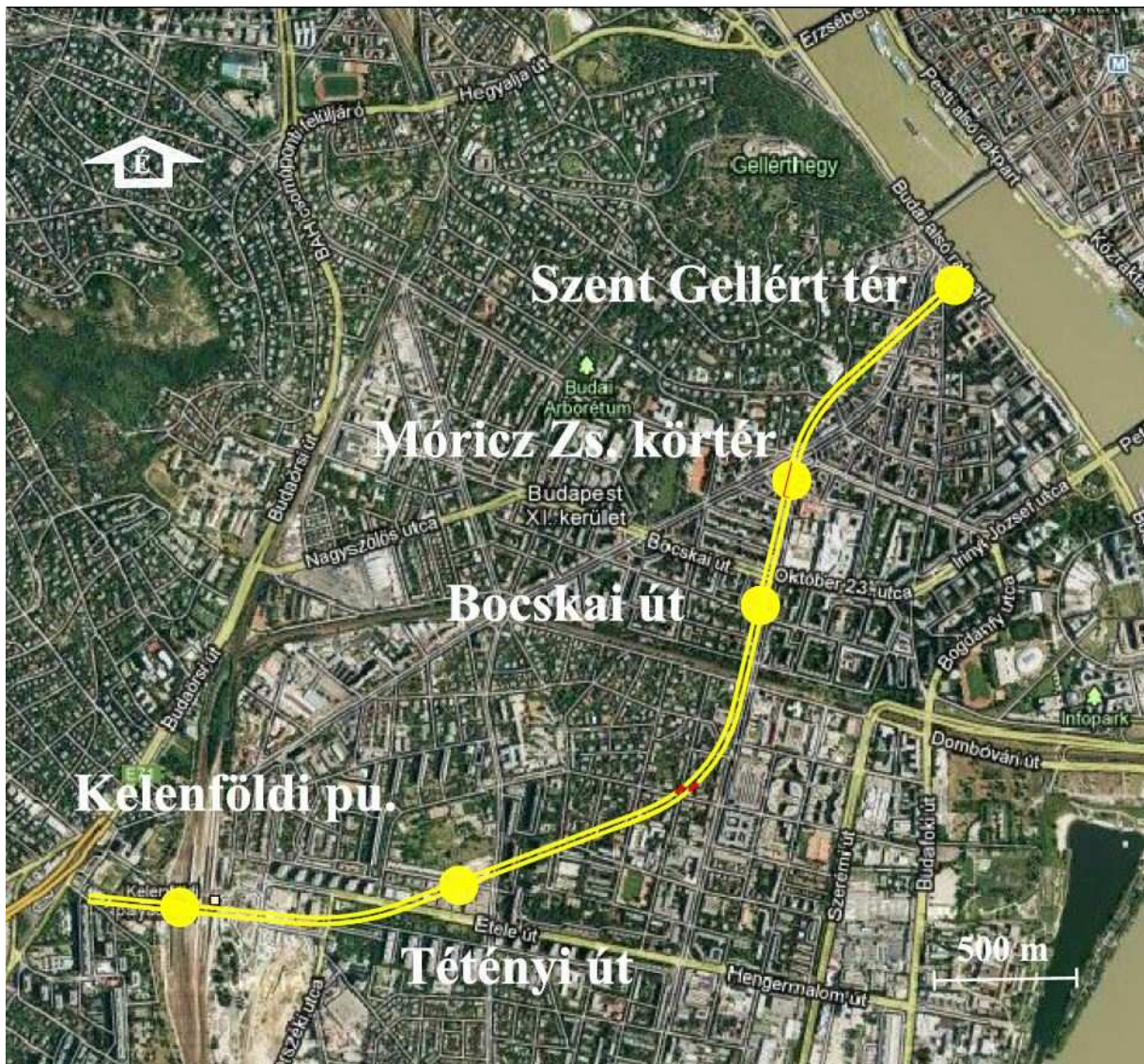
A budapesti metróhálózat kiépítésére az elmúlt száz évben több terv változat készült, melyek többségében a Dél-Budát a városközponton át Zuglóval összekötő vonal építése is szerepelt. A terv változatok egyezőek voltak abban, hogy a szóban forgó (4-es) vonalnak a budai Móricz Zsigmond körteret és a zuglói Bosnyák teret kell a városközponton áthaladva, a 2-es és a 3-as vonalakkal hálózatot alkotva összekötni. A budai oldalon a körtér utáni nyomvonal tervezett irányáról évtizedekig folytak a viták, hogy a vonal - a körtér után - a Fehérvári út alatt Budafokig vagy az Etele tér - Budaörs irányába haladva épüljön-e (www1).

A korábban készült nagyvonalú tanulmányokat 1970 elején elővették, és ekkor kezdődött el az „építést előkészítő”, több mint 30 éves tevékenység. 1972-ben Budapest és környéke Közlekedésfejlesztési Terve a metró negyedik vonalaként a Dél-Buda - Rákospalota vonalat jelölte meg, majd 1974-ben egy OMFB-tanulmány véglegesítette a vonalvezetést, valamint foglalkozott az építéstechnológiával. 1976-ban a Minisztertanács 3034/1976. sz. határozata a vonal építésének kezdési éveként 1978-at jelölte meg. A pénzügyi és ütemezési előirányzatok folyamatos változása, és sok huzavona után azonban csak 2003-ban parafálták a metrószerződést, a számos perrel tarkított, kormányok által elhallgatott vagy éppen politikai céllá emelt metróberuházás ekkor indulhatott el. 2006-ban a város több pontján megindultak az állomásépítések, ill. az alagútépítés (www2).

## 2.2 A 4-es metró nyomvonala

A megvalósításra került tervek szerint a most épülő nyomvonal egyelőre két szakaszból áll. Az első szakaszt a Kelenföldi és a Keleti pályaudvar összekötő 7,3 km hosszú alagutak alkotják, melyek 10 állomást foglalnak magukba. A budai oldalon lévő állomások a következők: Kelenföldi pályaudvar, Tétényi út, Bocskai út, Móricz Zs. körtér, Szent Gellért tér (1. ábra). A második szakasz további öt állomás és 4 km alagút kivitelezését igényli, melyek a Keleti pályaudvar és a Bosnyák teret kötnék össze. A távolabbi tervek között szerepel még a metróvonal folytatása Budaörs (Gazdagrét érintésével) ill. Rákospalota irányába.

A vonal végig mélyvezetésben épül, amit több tényező is indokol, mint pl. a Duna alatti átvezetés, a városi beépítettség, a kelenföldi MÁV-pályaudvar alatti keresztezés valamint a már üzemelő metróvonalak és a 4-es metró közötti közvetlen átszállási lehetőség kialakítása (de mindkét meglévő metróvonalat felülről keresztezi). A mélyvezetésű alagutak függőleges vonalvezetése különböző lejtők és emelkedők sorozatából áll. Vízzintes pályarész sehol nincsen. A vonalon a legkisebb emelkedő 3,0 %, a legnagyobb 36,3 %, a vonal legmélyebb pontja a Szent Gellért térnél (73,75 mBf.), legmagasabb pontja a kelenföldi pályaudvarnál található (96,27 mBf.) (www2).



1. ábra. A 4-es metró budai nyomvonala

## 2.3 Alagút- és állomásépítési technológiák

Az alagútépítés technológiájának a korszerű pajzsos építési módot választották, amely segítségével a két alagutat időben és térben eltolva, de egyszerre építették, gyorsan, a forgalmat legkevésbé akadályozva. A pajzstípus kiválasztásakor fontos szempont volt, hogy a nyomvonal mentén érintett összes kőzetfajta fejtésére alkalmas legyen. A budai oldalon lévő kemény kőzet (többnyire kiscelli agyag) a nyitott homlokú pajzs, a Duna alatti, geológiailag és hidrogeológiailag is érzékeny szakasz, ill. a pesti oldal inhomogén, vízzel telített kőzetviszonyai zárt homlokmeztámasztású pajzs alkalmazását tették

szükségessé. Emiatt fejlesztették ki a többcélú alagútépítő pajzsokat, melyeket átalakítása nyitott homlokúról zárt homlokmeztámasztásra nem igényli a pajzsok kiemelését.

Az állomások nagy része a teljes nyomvonalon réselési technológiával, milánói módszerrel készült. A munkagödör megtámasztása résfalás technológiával történt, elsőként a felső zárófödém készült el, hogy a felszín a lehető leghamarabb vissza lehessen adni a forgalomnak. A metróvonal első szakaszának három állomása különbözik építéstechnológiailag a többitől (Szent Gellért téri, Fővám téri, Rákóczi téri), melynek oka, hogy a nyitott építési módszer a környező épületek (pl. BME CH épülete) illetve a Duna miatt nem alkalmazható. Ezeknél az állomásoknál egy kisebb dobozszerkezetű állomásrész épült réselési technológiával, majd innen bányászati módszerrel, új osztrák alagútépítési módszerrel épültek meg a peronalagutak. Az eljárás során az alagutak keresztmetszéveit több fázisban bontották ki, majd lőttbetonos külső falazatot készítettek, mely a körülvevő kőzetet is bevonva a teherviselésbe, biztosította az ideiglenes megtámasztást a pajzsok átvontatásának idejére a végleges vasbetonfalazat elkészültéig.

#### 2.4 Budai oldal földtani felépítése

A 4-es metró budai nyomvonala annak ellenére, hogy a Budai-hegység változatos földtani felépítéssel rendelkezik, viszonylag egy nemű képződményeket harántol a Gellért térig (Geovil, 2005). Uralkodóan az oligocén Kiscelli Aggyag Formáció kőzeteiben található az elkészült alagutak, az állomások és a kiszolgáló felszín alatti létesítmények. A Kiscelli Aggyag Formációt alkotó kőzetek mérnökgeológiai alapon három főbb csoportba oszthatók: a felső mállott zóna, majd a fellazult zóna és a legalsó helyzetű úgynevezett üde kiscelli agyag. Az alagutak és a budai oldal állomásainak nagy része a fellazult és az üde agyagban helyezkedik el (Horváth, 2000). A Gellért tér környékén és a Duna átvezetésnél már más képződmények is megjelennek. A fúrások és a korábbi mérnökgeológiai vizsgálatok alapján (Geovil, 2005) a kiscelli agyag törései mentén az oligocén Tardi Aggyag Formációt alkotó kőzettekkel. A Gellért téri állomás munkagödörében a kiscelli agyag meredek dőlésű erősen tektonizált rétegeit lehetett megfigyelni. A legidősebb képződményt a felső-triász dolomit képviseli, amely kiemelt helyzetben található a Duna meder térségében. Ezeket meredek törési zónák mentén kiemelt triász karsztos zónákat meder geofizikai vizsgálatokkal mutatták ki (Tóth 2003).

A nyomvonal budai szakaszán a kiscelli ill. a tardi összletek felett kizárólag negyedidőszaki üledékek találhatóak. Ezen a vonalszakaszon a heglábi lejtőüledékek jellemzők, melyeket a szél és a hegy felől lefolyó kisebb patakok hordták ide, ill. egy részük a Duna üledéke. Ezek az anyagok jellemzően holocén agyagos, agyagos kőzettörmelékenyes ill. homokos-agyagos képződmények. A Móricz Zsigmond körtér és a Szent Gellért tér közötti szakaszon a feltöltés vastagsága helyenként (pl. a Lágymányosi út-Bartók B. út. találkozásánál) eléri a 5,2 m-t. A Bertalan L. u.- Bartók B. út sarkánál 2,8 m vastag. A feltöltés alatt homoklisztes iszap, közepes agyag, iszapos homokliszt van az imént leírt harmadkori réteg határáig (7-13 m-ig) (Farkas et al., 1999).

### 3 ADATOK, ADATFELDOLGOZÁS MÓDSZERE

Az elmúlt, évtizedekben, amióta a Dél-Budát Zuglóval összekötő metróvonal ötlete felmerült, számtalan tanulmány, vizsgálat, fúrás, szakvélemény készült, amelyek Budapest altalajának megismeréséhez nagyban hozzájárultak. Az OFKFV, a METROBER és az UVATERV megbízásából 1966-1980 között, az épülő budapesti metró-vonalak kutatására kb. 500 db, 20 ezer fm földtani kutatófúrást mélyített, melyek mélysége 30-200 m között volt (Hegyí et al., 1981).

A kiscelli agyag talajmechanikai tulajdonságainak vizsgálatához ezen feltárások közül a jelenlegi budai nyomvonal mentén 40 darab fúrást választottunk ki, és ezek adatait gyűjtöttük össze (1. táblázat). A fúrások 1977 és 1997 közötti időszakból származnak, dupla illetve triplafalú magcsővel mélyítették.

#### 1. táblázat. Vizsgált fúrások eloszlása hely szerint

Fúrások helye (megálló neve)	Talpmélység [m]	Darabszám
Szt. Gellért tér	50-200	12
Móricz Zsigmond körtér	50	6
Bocskai út környéke	30-50	7
Tétényi út környéke	30-80	8
Kelenföld	40-60	7
Összesen		40

A begyűjtött adatokat az adatbázis készítése előtt kritériumok alapján szűrtük, a kiugró adatokat kiválogattuk, az előforduló, de mérési hibának betudható extrém értékeket kihagytuk.

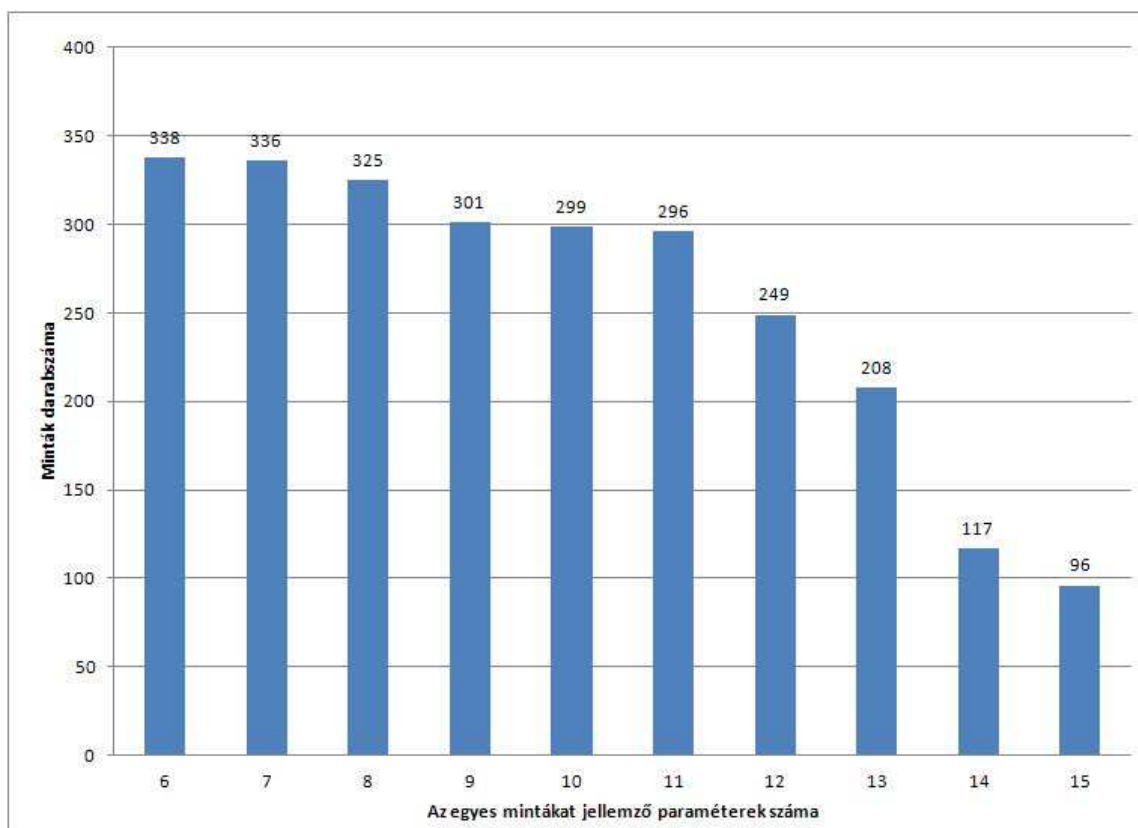
A 40 fúrásból 483 db mintát választottunk ki a szürke kiscelli agyagból, melyek mélysége szerinti eloszlása nem egyenletes. A legmagasabb helyről származó minta 5,5 m-ről, a legmélyebb 97,0 m-ről származik, de a minták több mint 80%-a 15 méternél mélyebbről került a laboratóriumba, ami a kiscelli agyag budai oldalon való mélyebb elhelyezkedésével magyarázható.

A kiválasztott 483 db minta több mint 5000 adatot jelent. A minták a következő 17 talajmechanikai paraméterrel jellemezhetők: víztartalom ( $w$ ), sodrási határ ( $w_p$ ), folyási határ ( $w_L$ ), plasztikus index ( $I_p$ ), konzisztencia index ( $I_c$ ), nedves testsűrűség ( $\rho_n$ ), száraz testsűrűség ( $\rho_d$ ), vízzel telített testsűrűség ( $\rho_t$ ), hézagtérfogat ( $e$ ), hézagterfogat ( $n$ ), szilárd részek aránya ( $s$ ), telítettség ( $S_r$ ), kohézió ( $c$ ), súrlódási szög ( $\phi$ ), összenyomódási modulus ( $E_s$ ), rugalmassági modulus ( $E$ ), egyirányú nyomószilárdság ( $\sigma_c$ ) (2. táblázat).

**2. táblázat.** Vizsgált paraméterek, jelöléseik, darabszámuk

Név	Jelölés	Darabszám
víztartalom	$w$ [%]	485
sodrási határ	$w_p$ [%]	474
folyási határ	$w_L$ [%]	474
plasztikus index	$I_p$ [%]	482
konzisztencia index	$I_c$ [%]	474
nedves testsűrűség	$\rho_n$ [kg/m <sup>3</sup> ]	345
száraz testsűrűség	$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	300
vízzel telített testsűrűség	$\rho_t$ [kg/m <sup>3</sup> ]	298

Név	Jelölés	Darabszám
hézagtérfogat	$e$ [-]	300
hézagterfogat	$n$ [%]	300
szilárd részek aránya	$s$ [%]	300
telítettség	$S_r$ [-]	210
kohézió	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	155
súrlódási szög	$\phi$ [°]	146
összenyomódási modulus	$E_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	17
rugalmassági modulus	$E$ [MPa]	46
egyirányú nyomószilárdság	$\sigma_c$ [MPa]	226



**2. ábra.** Az egyes mintákat jellemző paraméterek függvényében a minták eloszlása

Az adatbázisban lévő talajmechanikai paraméterek eloszlása nem egyenletes, mind a 17 paraméter egyik mintára sem áll rendelkezésre, de a legalább 15 paraméterrel jellemzett minták száma 96, a legalább 9 jellemzőt tartalmazóké pedig 300 fölött van (2. ábra). A víztartalom, sodrási határ, folyási határ, plasztikus index és konzisztencia index mindegyik mintára elérhető.

A kiértékelés során elvégeztük a talajmechanikai jellemzők legalapvetőbb statisztikai jellemzését: minimum, maximum, medián és szórás értékek meghatározását. A nagyobb számítási munkát igénylő matematikai módszerek alkalmazása előtt érdemes a paraméterek kapcsolatának létezésére vonatkozó feltevést grafikus ábrázolással igazolni. Ezt paraméter párok pontdiagramon való ábrázolásával végeztük, majd regresszió függvényt illesztettünk a ponthalmazra. Ezen számításokat a MS Excel programja segítségével végeztük.

A kapott eredmények értékeléséhez Görög Péter korábbi, a kiscelli agyagra vonatkozó (Görög 2007b) és más az agyagos kőzetek paramétereit bemutató vizsgálatok eredményeit használtuk.

#### 4 EREDMÉNYEK

A talajfizikai paraméterek alapvető statisztikai jellemzőit, minimum, maximum, medián értékeit, szórását a 3. táblázat tartalmazza.

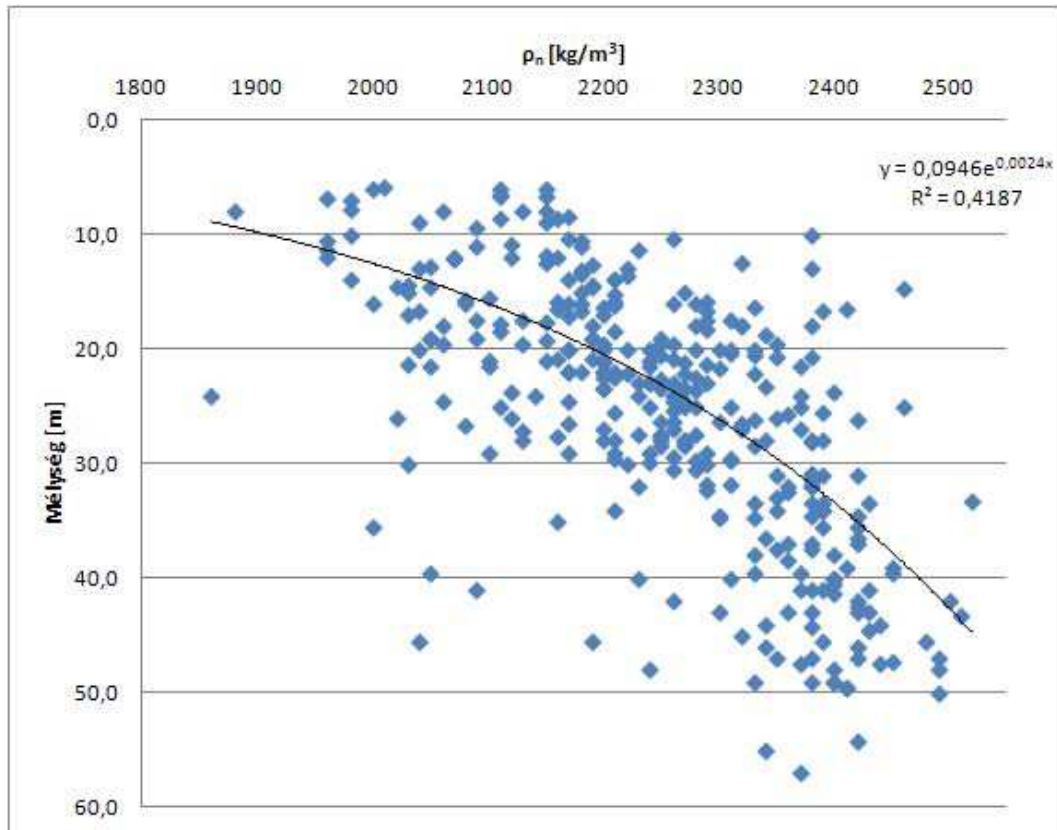
**3.táblázat.** Paraméterek statisztikai jellemzői

Név	Jelölés	Darab	Minimum	Maximum	Medián	Szórás
víztartalom	w [%]	485	3,0	30,0	13,0	4,1
sodrási határ	w <sub>p</sub> [%]	474	15,0	37,1	21,8	2,6
folyási határ	w <sub>L</sub> [%]	474	17,6	93,5	51,2	12,1
plasztikus index	I <sub>p</sub> [%]	482	6,7	73,5	29,0	11,3
konzisztencia index	I <sub>c</sub> [%]	474	-0,36	1,66	0,28	0,21
nedves testsűrűség	ρ <sub>n</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	345	1860	2520	2260	128
száraz testsűrűség	ρ <sub>d</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	300	1540	2470	2040	186
vízzel telített testsűrűség	ρ <sub>t</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	298	1978	2612	2304	121
hézagtényező	e [-]	300	0,13	0,90	0,36	0,14
hézagtérfogat	n [%]	300	11,5	47,4	26,5	7,1
szilárd részek aránya	s [%]	300	52,6	88,5	73,5	7,1
telítettség	S <sub>r</sub> [-]	210	0,08	1,00	0,85	0,20
kohézió	c [kN/m <sup>2</sup> ]	155	30	4000	270	1121
súrlódási szög	φ [°]	146	4	68	34	15
összenyomódási modulus	E <sub>s</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	17	5,7	33,3	17,2	8,1
rugalmasági modulus	E [MPa]	46	3,7	620,0	100,0	114,2
egyirányú nyomószilárdság	σ <sub>c</sub> [MPa]	226	0,02	11,82	1,11	1,63

A táblázat plasztikus indexre vonatkozó adataiból látszik, hogy a minták közel 50%-a kövér agyag. A minták egyes paramétereit néhol nagy szórást mutatnak, további vizsgálatok célja, annak felfedése, hogy ez a szórás valamilyen más paraméter, paraméterek változásával kapcsolatban van-e.

Először a mélységgel kapcsolatos összefüggéseket szemléltetjük. A mélység és a nedves testsűrűség közötti kapcsolatot a 3. ábra mutatja. A ponthalmazra illesztett függvény exponenciális, inverz egyenlete a következő (ρ<sub>n</sub> [kg/m<sup>3</sup>]-ben a mélység pedig [m]-ben megadva):

$$\rho_n = 171,3 \ln(m) + 1712$$



**3. ábra.** Összefüggés a nedves testsűrűség és a mélység között

A függvény nem mutat erős korrelációt a két változó között, de gyengének sem mondható. A determinációs együttható értéke 0,42, ezért a kapcsolat létének bizonyításához további vizsgálatok szükségesek (pl. hipotézisvizsgálat).

A mélység és a hézag tényező közti összefüggés az 4. ábráról olvasható le. A regresszió függvényt itt is exponenciálisnak választottuk, ennek inverz függvénye adja a hézag tényezőt a mélység függvényében:

$$e = -0,172 \ln(m) + 0,921$$

A determinációs együttható értéke 0,39, ami szintén se nem túl erős, se nem gyenge függést mutat. A kapcsolat vizsgálata szintén további, bonyolultabb módszerek használatát igényli.

A száraz és a nedves testsűrűség között lineáris függvény írja le legjobban a kapcsolatot, magas korrelációt mutatva. A 5. ábrán az elméleti telített állapot is fel lett tüntetve.

$$\begin{aligned}\rho_n &= 0,68\rho_d + 881 \\ \rho_t &= 0,64\rho_d + 1003\end{aligned}$$

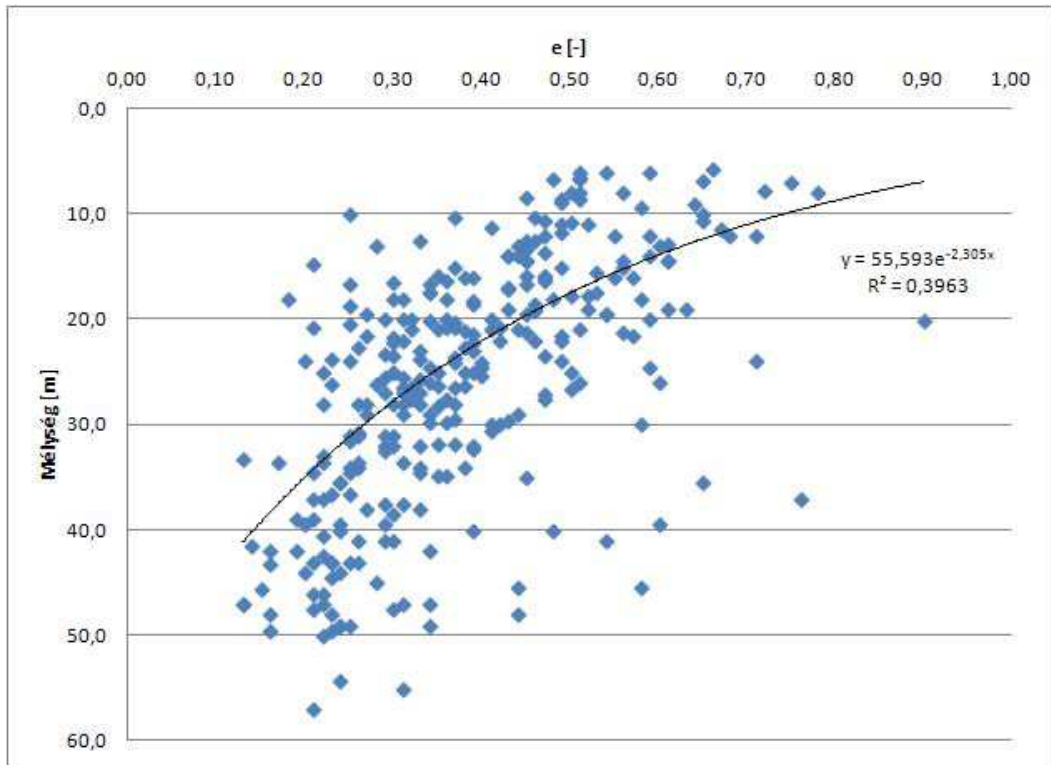
Az függvény determinációs együtthatója 0,87, ami erős kapcsolatot mutat. Ez a kiscelli agyag magas átlagos telítettségének köszönhető, ami 85% felett van. A telített állapotot a száraz, és az elméleti telített testsűrűség kapcsolatából származó egyenessel szemléltethető. A telített testsűrűséget a következő módon kapjuk:

$$\rho_t = \rho_d + \frac{e}{e+1} \rho_{v\acute{z}}$$

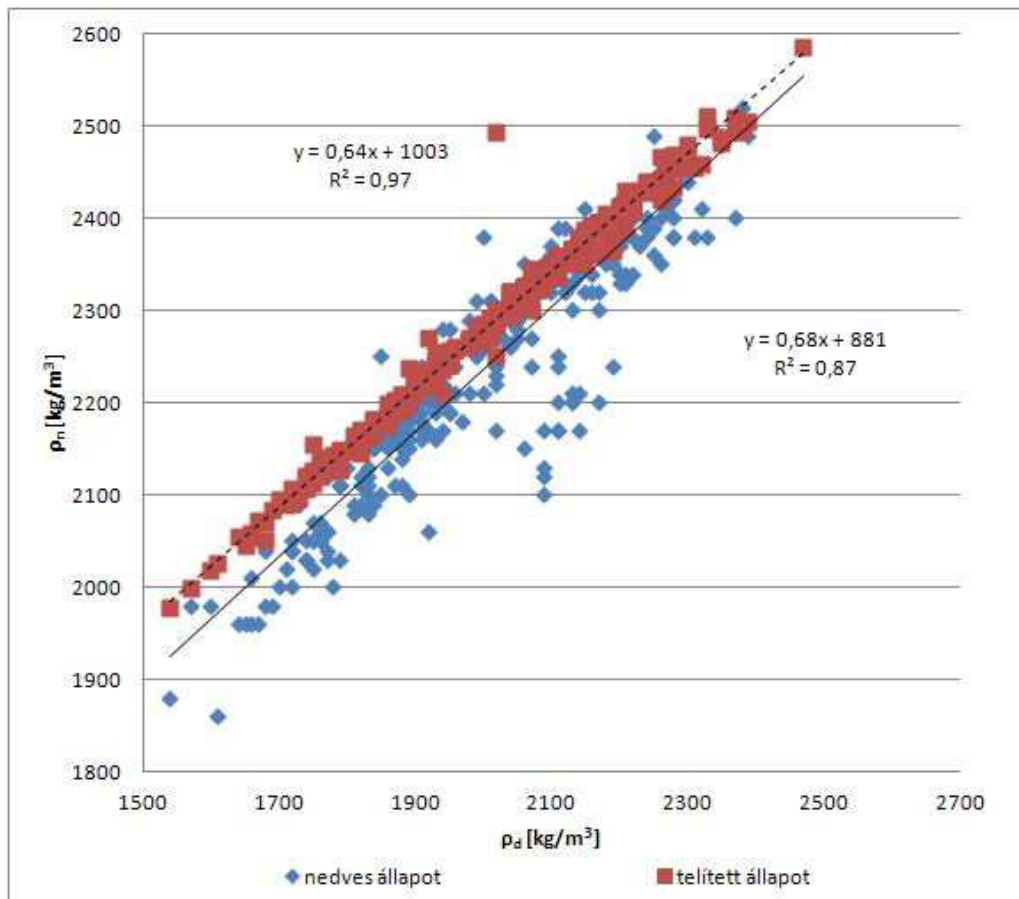
A képlékenységi diagramot is ábráztuk, a plasztikus index és a folyási határ értékei között szintén lineáris kapcsolat mutatható ki, magas korrelációval. A 6. ábrán feltüntettük a Casagrande féle A-vonalat is.

$$I_p = 0,87(w_L - 16,55)$$

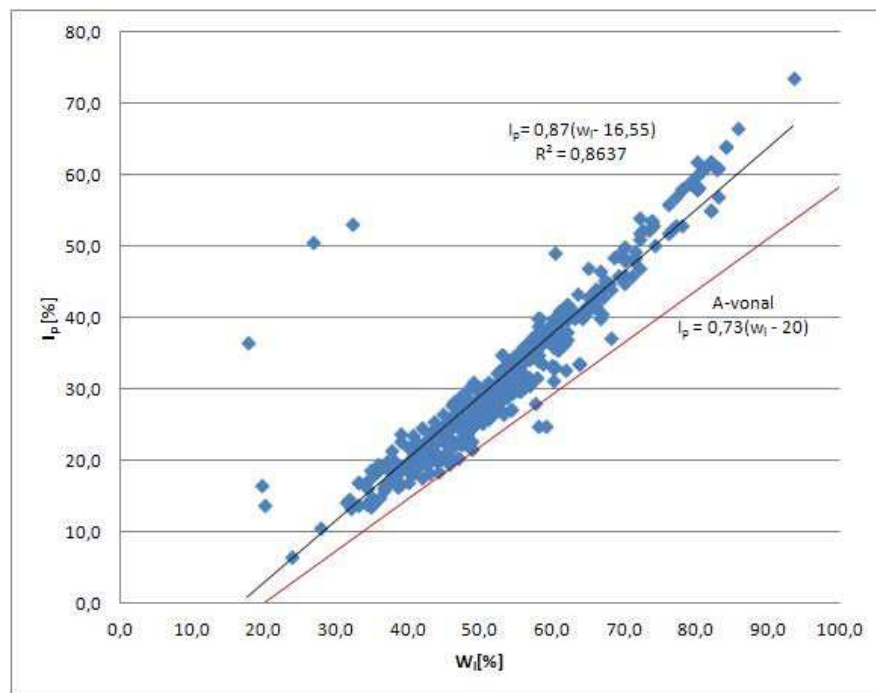
A függvény erős korrelációt mutat a két változó között,  $R^2=0,86$ . A néhány nagyon eltérő érték valószínű mérési hibából származhat.



4. ábra. Összefüggés a hézagtényező és a mélység között



5. ábra. Összefüggés a nedves és a száraz testsűrűség értékei között, az elméleti telített állapot feltűntetésével



**6. ábra.** Összefüggés folyási határ és a plasztikus index között (képlékenységi diagram, az A-vonal feltüntetésével)

## 5 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A több mint 5000 talaj-, közetfizikai adat feldolgozása azt igazolta, hogy a kiscelli agyag sodrási határa, plasztikus indexe, testsűrűsége, vízzel telített testsűrűsége, hézagtérfogata, kohéziója, belső súrlódási szöge, rugalmassági modulusa, és egy irányú nyomószilárdsága nagy szórást mutat. Legjobb korrelációt a nedves és a száraz testsűrűség, valamint a folyási határ és a plasztikus index között tudtuk kimutatni. A mélység függvényében a hézagtérfogató exponenciálisan csökken, míg a nedves testsűrűség ennek megfelelően exponenciálisan nő. További talajfizikai paraméterek kapcsolatainak vizsgálata segítséget nyújt a mélyépítési és alapozási munkák során a számításokhoz alkalmazható leggyakoribb input adatok meghatározásához.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TAMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Geovil Kft. 2005. Budapest 4. metróvonal, I. szakasz, Összefoglaló mérnökgeológiai, hidrogeológiai és geotechnikai szakvélemény, „B” kötet, Budai oldal - 00+00 - 39+72 jvsz.
- Görög P. 2007a. A kiscelli agyag fizikai jellemzőinek statisztikai vizsgálata. *Mélyépítés*, **4**, 18-25.
- Görög P. 2007b. Engineering geologic properties of the Oligocene Kiscell Clay. *Central European Geology*, **50/4**, 313-329.
- Hegy J., Kiss E. Z., Szlabóczky P. 1981. Általános földtani eredmények a budapesti metró vonalak földtani kutatásaiból. *Általános földtani szemle*, **16**, 5-24.
- Horváth T., Fáy M., Sándor Cs. 2000. A metróvonal mérnökgeológiai adottságai. *Földtani Kutatás*, **37**, 2, 35 – 44.
- Németh G. 1980. Az Újlaki III. bánya Jablonka úti szakaszán bekövetkezett felszínmozgás vizsgálata. *Mélyépítés tudományi szemle*, **30**, 5, 195 – 206.
- Paál T. 1976. A budai agyagok mérnökgeológiai összehasonlítása matematikai statisztikai alapon. *Földtani Közöny*, **106**, 229-256.
- Paál T. 2001. Geológiai megfigyelések az EUROCENTER-Óbuda áruház építése kapcsán. *Földtani Közöny*, **131**, 3-4, 569-579.
- Tóth T., Bozsó T., Horváth T. 2003. Sziklafalak a Dunában. *Mélyépítés*, I./4., 16-23.
- www1: www.metro.hu  
www2: www.metro4.hu