



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

HABILITÁCIÓS TÉZISFÜZET

DR. FIRGI TIBOR

**A talajok víztartási görbéje a
geotechnikában**

ÉPÍTÉSZET, DESIGN ÉS

TECHNOLÓGIA

DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2025.

TARTALOM

A kutatás előzményei.....	3
1. A víztartási görbe meghatározása direkt méréssel	13
1.1. A kutatás előzményei, részletes ismertetése.....	13
1.2. A víztartási görbe meghatározásának méréstechnikai fejlesztései (1. tézis).....	22
1.3. Az elért eredmények hatása, visszhangja	23
1.4 A tézishez kapcsolódó tudományos közlemények	24
2. A víztartási görbe meghatározása indirekt módszerrel	25
2.1. A kutatás előzményei, részletes ismertetése.....	25
2.2. A víztartási görbe, indirekt meghatározási módszerének felhasználásával, a jellemző értékek becslése (2. tézis)	34
2.3. Az elért eredmények hatása, visszhangja	35
2.4. A tézishez kapcsolódó tudományos közlemények.....	36
3. A tenzió rézsúállékonyságra gyakorolt hatásának modellezése a hagyományos módszerekben geotechnikai szoftver segítségével.....	38
3.1. A kutatás előzményei, részletes ismertetése.....	38
3.2. Telítetlen, kohéziómentes talaj közelítő állékonyság-vizsgálata lamellás módszerrel (3. tézis)	46
3.3. Az elért eredmények hatása, visszhangja	47
3.4. A tézishez kapcsolódó tudományos közlemények.....	47
Irodalmi hivatkozások	48

A kutatás előzményei

Bevezetés

Egyetemistaként (BME) kezdtem megismerni a víztartási görbe jelentőségét a geotechnikában. A témakör kutatásával foglalkozhattam a diplomamunkámban is, amely OTKA kutatási témához kapcsolódott. Konzulenseim, Dr. Imre Emőke és prof. Dr. Telekes Gábor, inspiráltak az akkor Magyarországon még újszerű téma, a telítetlen talajok talajmechanikájának megismerésére, kutatására. Azóta, kisebb-nagyobb megszakításokkal, együtt dolgozhatok velük, köszönöm. Többek között még két tudósunk tartozik köszönettel, egyrészt Dr. Rajkai Kálmánnak, a MTA - Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet akkori osztályvezetőjének, aki a talajtani háttérrel és ismereteket biztosította, másrészt D.G. Fredlund professzor úrnak, aki a telítetlen talajok talajmechanikájának „atyja”, akivel bár személyesen nem dolgozhattam együtt, de a 2000-es évek közepén az YBL-ön tartott előadása nagy hatást gyakorolt kutatási elképzeléseimre, ekkor mondta a professzor úr, hogy a telítetlen talajok talajmechanikájának „kulcsa” a víztartási görbék ismerete.

A környezetgazdálkodási szakmérnök képzés keretében, szakdolgozatomban, a telítetlen talajokban történő vízáramlással foglalkozhattam, ahol szintén alapvető jelentőségű az áramlás közegét alkotó talajrétegek víztartási görbéjének ismerete, mivel így előállítható a vízáteresztőképességi együttható függvényük, talajtani megnevezéssel kapilláris vízvezető képességük.

Doktori disszertációm, bár más témakörben készítettem - hulladékhalmok modellezése - de még itt is igyekeztem egy kicsit foglalkozni a felső lezáró- és egyéb rétegek kapcsán, a telítetlen talajok talajmechanikája témakörrel. Ez is egy kapcsolódást teremtett az agrár-műszaki tudományokhoz, talajtanhoz, környezetvédelemhez.

Dr. Say Emma, korábbi tanszékvezetőm, lehetőséget biztosított a klíma változás kapcsán a telítetlen - telített talajzóna megváltozásának kérdéskörével nemzetközi kutatásban is foglalkozni, köszönöm.

A témával azóta is foglalkozom, alkalmazott kutatásként, amely kiegészült az utóbbi évtizedekben megjelent geotechnikai szoftverek adta lehetőségek feltérképezésével, vizsgálatával. Kecskés Gábor kollégám jóvoltából

lehetőségem volt ipari munkák kapcsán is alkalmazni a megismert módszereket, köszönöm.

Az évek, évtizedek alatt nagyon sokan segítették kutatási munkámat, kollégák a mérések, modellezés kapcsán, hallgatók TDK dolgozataikon keresztül, ami engem és remélem őket is, inspirált, köszönöm. Továbbá köszönöm, az Egyetem(ek), a Kar és az Intézet vezetőinek, hogy kutatásaimat támogatták.

Eredményeimet egyrészt diplomamunkáimban és doktori disszertációmban, másrészt szakmai előadásokon és a szakirodalomban mutattam be. A tézisek, a doktori fokozat megszerzése óta végzett kutatásaim eredményeként egy újabb lépés a fent leírt kutatási területen. Most van lehetőségem e kutatási téma önálló kifejtésére, az eddigi eredmények összegzésére. Természetesen a téma nincs lezárva, további kutatás szükséges, lehetséges, érdemes és folytatni tervezem a jövőben.

Telítetlen talajok a geotechnikában

A Terzaghi-féle „klasszikus” talajmechanika egyik alapfeltevése, hogy a talaj telített, ugyanakkor a mérnöki építmények többsége a telítetlen talajzónával van kapcsos-

latban. Terzaghi (Karl Terzaghi 1883-1963) a telített talajokra vonatkozó feszültségi állapotváltozót (hatékony feszültséget) vezetett be, ami lehetővé tette, hogy a telített talajok viselkedése egységes, kontinuum-mechanikai megközelítéssel legyen tárgyalható.

A telítetlen talajokkal kapcsolatos mérnöki feladatokat viszont – megfelelő feszültségi állapotváltozók hiányában – általában tapasztalati úton oldották meg, a telített talajokra kidolgozott elméletek alkalmazásának kiterjesztésével. A telítetlen talajok feszültségi állapotváltozóit Fredlund és Morgenstern 1977-ben állapította meg és vezette be (Fredlund D.G., Morgenstern N.R., 1977). Céljuk egységes, a telített - és a telítetlen talajokra is alkalmazható megoldások bevezetése volt, hogy lehetővé váljon a talajok egységes kontinuum- mechanikai tárgyalása. Ezt követte az állapot-változók közötti kapcsolatot leíró anyag-egyenletek, majd a bonyolultabb, mechanikai modellek megalkotása és alkalmazása.

A talaj telítetlen, ha a pórusvíz-nyomása (u_w) kisebb, mint a póruslevegő-nyomása (u_a). A póruslevegő-nyomás és a pórusvíz-nyomás különbsége ($u_a - u_w$) pozitív, amit szívó feszültségnek, szívásnak, tenzióknak (s) neveznek. A

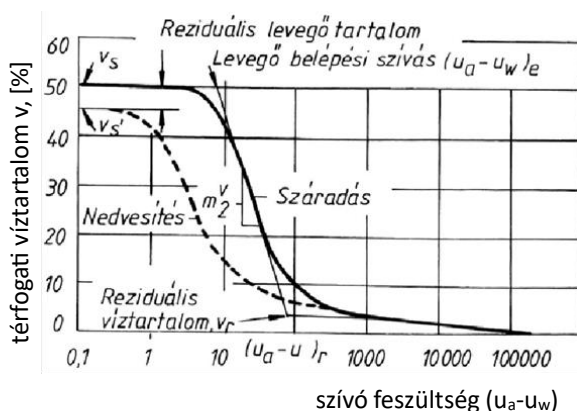
levegő akkor „lép be” a talajba és a levegőfázis akkor lehet folytonos, ha a tenzió egy – pórusmérettől függő – küszöbértéknél, levegő-belépési szívó feszültségnél nagyobb. Ennél kisebb tenzió esetén a talaj telített, de szívó feszültség lép fel, azaz $(u_a - u_w)$ pozitív, ezért a telítetlen talajmechanika rendszerében vizsgálandó. A telített talajmechanika egyik alapfeltétele ugyanis, hogy $u_a = u_w$, azaz a tenzió nulla, ami ez esetben nem teljesül.

Az állapotváltozó a rendszer egyensúlyi állapotát írja le az anyagi jellemzőktől függetlenül. A teljes feszültség, a folyadék és a légnemű fázis nyomása/feszültsége önmagában nem jellemzi a talajt egyértelműen. A hatékony feszültség, a telített talaj feszültségi állapotváltozója. Telítetlen talajok esetén a fázisok nagyobb száma miatt több független feszültségi állapotváltozó szükséges. A mérhető három feszültség nagyság szerint csökkenő sorrendben: a teljes feszültség (σ), a póruslevegő-nyomás (u_a) és a pórusvíz-nyomás (u_w). Különbségük megadja a telítetlen talajok lehetséges feszültségi állapotváltozóit. Ezek a nettó normál-feszültség ($\sigma' = \sigma - u_a$), a szívó feszültség ($s = u_a - u_w$) és a póruslevegő-nyomás (u_a).

A víztartási görbe (függvény)

A víztartási görbe – a talajtanban korábban pF-görbe, újabban víztartó képesség függvény – értelmezése, leírása különböző a talajmechanikában és a talajtanban. Az eltérés oka felhasználásának különbségében és történeti okokban keresendő (Várallyay Gy., 2003).

A víztartási görbe (víztartalom – szívó feszültség függvény) a talaj nedvességtartalmát (v) a szívó feszültség ($s = u_a - u_w$) függvényében ábrázolja féllogaritmikus koordinátarendszerben. Általában a nettó normálfeszültség nulla értéke mellett, azaz a $\sigma' = (\sigma - u_a) = 0$ síkon értelmezett (1. ábra), de a $(\sigma - u_a) > 0$ síkokon is meghatározható.



1. ábra A víztartási görbe talajmechanikai jelölésrendszere (Fredlund D.G., Rahardjo H., 1993 nyomán [18])

A görbe három jól elkülöníthető tartománya. 1.: A levegő-belépési küszöbérték elérésig a talajminta gyakorlatilag vízzel telített. A víztartalom nem változik, a görbe közel vízszintes. 2.: A szívó feszültség növekedésével rohamosan csökken a víztartalom és nő a levegőtartalom. 3.: A szívó feszültség növekedésével csak kis mértékben csökken a víztartalom, a görbe ellapul. A száradási és a nedvesítési ág eltérő. A hiszterézis a szűkülő-táguló kapillárisrendszerrel (Jamin-cső) magyarázható. Kezdeti telített talajállapotból általában csak a száradási ágot mérik.

A víztartási görbe (függvény) meghatározása

A talajmechanikában a feszültségi állapotváltozók bevezetése után kezdődött. A talajtanban viszont a víztartási függvény elméletét E. Buckingham már 1907-ben leírta. Mérésére szolgáló berendezések kifejlesztése az 1960-as évekre tehető.

A meghatározás két lehetősége: a mérés, vagy a számítás. A laboratóriumi mérések bár idő- és költség igényesek, de alapmérésnek tekinthetők és így fejlesztésük szükséges (1. tétel), ugyanakkor fontosak az indirekt módszerek (Rajkai K., 2004), és azok fejlesztése is (2. tétel).

A víztartási görbe (függvény) matematikai leírása

A mérésekből általában csak a víztartási görbe diszkrét pontjai ismertek, célszerű e pontokra folytonos függvényt illeszteni (Várallyay Gy. és tsai., 1979). Különböző paraméteres függvények a talajtanban is jól ismertek, pl. a van Genuchten - függvény (van Genuchten M.T., 1980):

$$\Theta = \Theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \Psi)^n)^m}, \quad (1)$$

ahol: Ψ - a szívófeszültség értéke (kPa),
 α, n, m - állandók (paraméterek), (-),
 Θ - térfogati víztartalom (v), (-),
 Θ_s - telített térfogati víztartalom (v_s) (paraméter), (-),
 Θ_r - reziduális térfogati víztartalom (v_r) (paraméter), (-).

A talajmechanikában Fredlund és Xing (1994) egyenlete:

$$v_n = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^m}, \quad (2)$$

ahol: s - a szívófeszültség értéke ($u_a - u_w$), (Ψ), (kPa),
 v_n - normalizált térfogati víztartalom (-),
 a, n, m - állandók, e - Euler-féle szám (-).

Számos egyenletet ajánlanak különböző szerzők a talajok víztartási görbéjének leírására és szinte mind levezethető a következő általános formulából (Havrán K., 2004):

$$a_1 v_n^{b_1} + a_2 \exp(a_3 v_n^{b_1}) = a_4 s^{b_2} + a_5 \exp(a_6 s^{b_2}) + a_7 \quad (3)$$

ahol: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1, b_2$ - konstansok.

A víztartási görbe felhasználása a talajmechanikában

A telítetlen talajok egyik fontos fizikai egyenlete a víztartási függvény (görbe). A vizsgált talaj(ok) víztartási függvényének ismeretében, a szilárdsági, alakváltozási és szivárgási feladatok megoldhatók, amennyiben a talajzóna telített talajokra értelmezett talajfizikai jellemzői ismertek, vagy vizsgálatokkal meghatározottak. Az építőmérnöki gyakorlatban tipikusan ilyen feladatok az árvízvédelmi gátak vizsgálata, rézsűk állékonyságának megállapítása (3. tézis), a függőleges földfalak vizsgálata, a térfogatváltozó (duzzadó-zsugorodó) talajok modellezése, a víztelenítési – vízáramlási feladatok számítása.

Példaként a szilárdsági feladatok megoldásának alapját képező törési feltétel telítetlen talajokra való kiterjesztése (Fredlund D.G., Rahardjo H., 1993):

A telített talajokra vonatkozó Mohr-Coulomb törési feltétel:

$$\tau = (\sigma - u_w) \cdot \tan \varphi + c \quad (4)$$

ahol: τ - nyírófeszültség (kN/m²),
($\sigma - u_w$) – hatékony normálfeszültség (kN/m²),
 φ - belső súrlódási szög (°),
 c – kohézió (kN/m²).

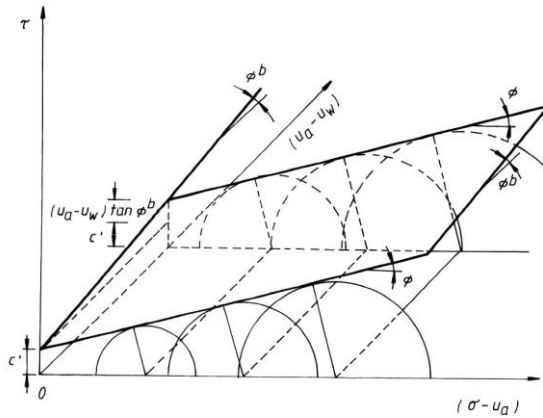
A telítetlen talajokra vonatkozó törési feltétel (2. ábra):

$$\tau = (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b + c \quad (5)$$

ahol: $(\sigma - u_a)$ – nettó normálfeszültség (kN/m^2),

$(u_a - u_w)$ – kapilláris szívó feszültség (kN/m^2),

φ^b – kapilláris szívó feszültségtől függő súrlódási szög ($^\circ$).



2. ábra A Mohr-Coulomb törési feltétel, telítetlen talajok esetén
(Fredlund D. G., et al. 1995)

A φ^b szög a víztartási függvény integrálásával írható fel:

$$\tau(u_a - u_w) = (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi + \int_0^{u_a - u_w} [v_n(u_a - u_w)]^p d(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi + c \quad (6)$$

ahol: $v_n(u_a - u_w)$ – normalizált víztartási függvény.

Az (5) egyenlet szerinti leírásból látható, hogy alkalmazva a telített talajra vonatkozó feltételt ($u_a = u_w$), a Mohr-Coulomb törési feltételt (4) adja, tehát a telítetlen talajmechanika határeseteként a telített talajmechanika.

1. A víztartási görbe meghatározása direkt méréssel

1.1. A kutatás előzményei, részletes ismertetése

Célom a víztartási görbe mérésének bevezetése a hazai geotechnika gyakorlatában, egyszerű és megbízható mérési eszközök fejlesztésével és mérési protokoll kidolgozásával, külföldön, vagy a hazai talajtanos gyakorlatban ismert eljárások adaptálásával, fejlesztésével [2], [3].

A víztartási görbe közvetlen, méréssel történő meghatározása csak telítetlen talajon végzett vizsgálattal lehetséges. Telítetlen talajok esetén három mérhető/szabályozható feszültség van: a teljes feszültség (σ), a póruslevegőnyomás (u_a) és a pórusvíznyomás (u_w). A mérések csak akkor értékelhetők a feszültségi állapotváltozók függvényében, ha a pórusvíznyomást és a póruslevegőnyomást külön-külön mérik, vagy szabályozzák.

A mérési módszerek két nagy csoportja ismert, a mechanikai és a kémiai. A mechanikai módszerek egy részénél közvetlenül a vízfázis szívási feszültségét növelik (csökkentik), a másik lehetőség a levegőnyomás növelése, az úgynevezett tengelyeltolási technika alkalmazása

(Hilf G., 1948). A kémiai módszerek a relatív páratartalom szabályozásán, vagy ozmózison alapulhatnak. A módszerek alkalmazhatósági tartományai:

1. mechanikai módszerek:

a, víznyomást szabályozva:

- megcsapolt vízoszlop módszer $u_a - u_w < 20 \text{ kPa}$

- függő vízoszlop módszer $u_a - u_w < 100 \text{ kPa}$

b, levegő- és víznyomást szabályozva:

- nyomásmembrános eljárás $100 \text{ kPa} < u_a - u_w < 1600 \text{ kPa}$

- feszültségkamrás eljárás $u_a - u_w < 600 \text{ kPa}$

2. kémiai módszerek:

a, ozmózison alapuló $u_a - u_w > 2500 \text{ kPa}$

b, rel. páratartalom szab. $u_a - u_w < 1500 \text{ kPa}$

Általában nem elegendő egyetlen módszert alkalmazni a teljes víztartási görbe meghatározására. A gyakorlatban alkalmazott eljárási rend a növekvő tenzió szerint: teljes telítés vízzel - minta alsó éle merül vízbe - homoklapos berendezés - kaolinlapos berendezés – nyomásmembrános készülék.

Méréseink során a szokásos geotechnikusi tapasztalat szerint jártunk el, miszerint a szemcsés és a kötött

(plasztikus) talajok vizsgálatára más-más vizsgálati metódika alkalmas.

Homoklapos berendezés

A mérési berendezés az ún. függő vízoszlop módszer laboratóriumi eszköze. A folyadékfázisra ható szívó feszültséget hozunk létre, a meghatározó szabad vízfelszínnek, a mintához viszonyított helyzete változtatásával, azaz a nívópalack mozgatásával és/vagy egyidejű vákuum létrehozásával. E laboratóriumi eszközöket az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetben fejlesztették ki, és Várallyay-féle pF-mérő „box”-ként, vagy TAKI-módszerként vált ismertté. Az Eijkel-kamp-féle berendezés, amely a kereskedelmi forgalomban kapható, működési elvét tekintve a homoklapos-kaolinlapos berendezéssel azonos.

A kutatási program egy részében homok és homokkeverékek víztartási görbéinek mérését végeztük. Mivel az 1-100 vízoszlop-cm terhelés közötti tartományban a hagyományos berendezések fix terhelésen működnek, így új homoklapos berendezést építettünk (4. ábra). A kontroll méréseket az MTA-TAKI végezte.



4. ábra Az új homoklapos berendezés működés közben

A berendezéshez szükséges egy felülről nyitott doboz, amelynek átlátszósága, megfelelő szilárdság, légzárás, vegyi ellenállóság és biológiai inaktivitás fontos. E követelményeknek a 10 mm vastagságú plexi lemez megfelel, a doboz gyártástechnológiáját módosítottuk.

A szívótér és a többirétegű töltet elválasztására perforált plexi lapot használtunk (anyaga szintén 10 mm vastag), lyuggatott, lábakon elhelyezve. A további kiegészítő eszközök megegyeznek a Várallyay-féle berendezésével.

A berendezés membránja az alacsony helyzetben tartott vízfelszín által kifejtett szívást a víztől a mintához továbbítja. A szívástartományon belül a vizet átbocsájtja, a levegőt pedig visszatartja. A durva szemcsés anyagoknak kicsi a levegő belépési küszöbérték, a finomabb szemcséjű anyagoknak kicsi a vízáteresztő-képessége, ezért külön-

bőző anyagokat (finom homok, kaolin) használunk membránként.

Az elválasztó réteg feladata, hogy megakadályozza a membrán anyagának alsó víztérbe jutását. E célra eredetileg azbesztet alkalmaztak, de egészségvédelmi okokból ez az anyag már nem használható, újat kerestünk. Sok anyagot kipróbáltunk, többek között: geotextíliát, bazaltgyapotot, kerámiagyapotot, ez utóbbi bizonyult megfelelőnek.

Mérési tapasztalataink az új berendezéssel [5]:

A méréshez gyűrűben elhelyezett mintát használunk, amelynek víztartalom változását tömegméréssel mérjük. A víztartási görbe mérésének módszere a szakirodalomból ismert (Rajkai K., 1993). Mivel egyetlen berendezéssel dolgoztunk és a nívó-palack mozgatásával növeltük a terhelést, ezért a szűrőréteg kismértékben és rugalmasan alakváltozott (összenyomódott). Ezt a nívópalack mozgatósi kalibrációjával vettük figyelembe.

Méréseink eredményei szerint a szemcsés talaj vízáteresztő képessége a szívó feszültség kis értékeinél is rohamosan csökken, ezért az egyensúly beállításához akár több mint egy hónapra is szükség lehet. Tapasztalatunk szerint, az elhúzó méréseket algásodás zavarhatja meg, amit

fényzáró tetővel minimalizáltunk. Gombaölő szert nem használtunk, mert a víz viszkozitására gyakorolt befolyásoló hatását nem ismertük. A folytonos vízszál megléte döntő jelentőségű a mérés megbízhatósága szempontjából. A minták tömegmérése közbeni mozgatása miatt, a vízszál ideiglenesen megszakad, újbóli kialakulásához a minta aljának és a homoklapnak a jó kapcsolata, érintkezése szükséges, amelyet e berendezésnél a lágy anyagú homoklap elősegíti. Azonban ez esetben is célszerű a minták mozgatását, e hibaforrás elkerülése érdekében minimalizálni.

A függő vízoszlopos módszer előnye, hogy kicsi szívásértékek beállításánál a folyadékfázis nyomásának (szívásának) pontos szabályozása a légnomásénál egyszerűbb. Az azbeszt szűrőréteg kiváltása lehetővé teszi, az előre-gedő és felújítandó Várallyay-féle berendezések további üzemben tartását.

Feszültségkamrás berendezés

Kutatási programunkban kötött (plasztikus) talajok víztartási görbéjét is mértük. Ebben az esetben célszerű a tengelyeltolási technikát alkalmazó berendezést választani. Méréseinkhez kísérleti feszültség-kamrás berendezést

használtunk, amelyet Kanadában (University of Saskatchewan) fejlesztettek ki (5. ábra).



5. ábra A feszültségkamrás készülék

A szűrőkő telítését, amely a mérést megelőző egyik fontos feladat, szakirodalom (Fredlund D.G., Rahardjo H., 1993) és szabvány (ASTM D 2325-68) szerint végeztük. A szűrőkő telítési eljárása azon az elven alapul, hogy a víznyomás növelésének hatására a víz egységnyi térfogatában több levegő oldódik, a protokollt elkészítettük és közzöltük [6].

A feszültségkamrás mérés nem szabványosított, ezért a következő mérési protokollt állítottuk össze:

1. A mintatartó hengerben lévő minta szívó feszültséget a mérés megkezdése előtt - vízbe állítva - a lehető legkisebb értékre kell csökkenteni („telítés”).

2. A rugóval leszorított mintát tartalmazó, összeszerelt készülék tömegét le kell mérni.

3. Alkalmazni kell a megfelelő nagyságú légnyomást. Az alsó csapok nyitva vannak, amelyeken keresztül a fölös víz a mintából távozik. A szűrőkövön átdiffundált levegőt az alsó víztérből (fecskendő segítségével) ki kell fújni.

4. A berendezés tömegét a levegő- és vízcsapok zárása és bontása után újra le kell mérni.

5. Az egyensúlyi állapot akkor állt be, az alkalmazott tenzió és a minta víztartalma között, ha a fél óra időkülönbséggel mért tömegek között az eltérés pl. 0,01 g-nál kisebb.

6. Ha az egyensúlyi állapot beállt, a berendezés szét-szedése nélkül (a minta zavarása nélkül) alkalmazható a következő légnyomás érték. Így egy mintán mérhető az adott talaj víztartási görbéjének nulla és a szűrőkö levegő belépési küszöbértéke közötti tartománya (a mi berendezésünkénél ez 500 kPa).

7. A méréssorozat végén a mintát a feszültségkamrából kiszedve, 105 °C-on tömegállandóságig szárítva és megmérve a száraz tömegét, a víztartási görbe diszkrét pontjai számíthatók.

E berendezés mérési tapasztalatai a következőkben foglalható össze: Döntő jelentőségű a folytonos vízszál megléte, amelyet a merev szűrőkő kevésbé segít. Kötött (plasztikus) talajmintáknál ezért is nagyon fontos a talajminta alsó felületének gondos kialakítása, hogy a bekészítés előtt ép, friss felületű legyen. Tapasztalatunk szerint a terhelés nem monoton jellege (légnomás lecsökkentése) is rontja a minta és a szűrőkő közötti kapcsolatot. Ha a tömegmérés előtt nem csökkentjük le a légnomást a berendezésben, akkor a kapcsolat nem sérül, de ez esetben nem hanyagolható el a bezárt levegő tömegnövekedése, a korrigálást több módon is megtehetjük:

1. A mérés megkezdése előtt korrekciós mérést végezhetünk. A korrekciót táblázatban közöltem.

2. Számítással korrigáljuk a mért eredményt ($pV = mRT$ – állapotegyenlet felhasználásával).

A víztartási görbe feszültségkamrás berendezéssel történő meghatározásának előnye, hogy a tengelyeltolási technikát alkalmazzuk és így nagyobb tenzió tartományokra is kiterjeszthető a mérés, hátránya viszont, hogy a légnomás kevésbé pontosan szabályozható, ami kicsi tenzióknál okozhat hibát [6].

1.2. A víztartási görbe meghatározásának mérés- technikai fejlesztései (1. tézis)

Megújítottam és átalakítottam a homoklapos berendezést, alkalmassá téve geotechnikai mérések végzésére, valamint elvégeztem a hazai talajtani és geotechnikai honosítását a feszültségkamrás berendezésnek, mindkét esetben kontrollmérésekkel ellenőrzött próbaméréseket végeztem és mérési protokollokat készítettem.

A homoklapos berendezés esetén, a tiltott azbeszt anyagú szűrőrétegét kerámiagyapottal helyettesítve, olyan berendezést és mérési protokollt készítve, amely a fix terhelésű eszközzel szemben, változó terhelés mellett is alkalmazható, alkalmassá vált a speciális geotechnikai célú mérésekre, a megújítással a további üzemben tartása a talajtan területén is lehetségessé vált. A feszültségkamrás berendezés használata esetén, többek között, javaslom, a talajminta-szűrőkő kapcsolat fenntartása miatt, a terhelés monoton jellegének fenntartását, de a kamrába zárt levegő tömegnövelő hatásának figyelembevételét, amelyre korrekciós megoldásokat dolgoztam ki, így javítva a mérések megbízhatóságát és pontosságát.

1.3. Az elért eredmények hatása, visszhangja

Megállapítható, hogy ezek a mérési módszerek a geotechnikai gyakorlat számára is megfelelőek és a mérési eredmények megfelelő pontosságúak. A két mérőeszköz megbízhatósága, egyszerűsége és alacsony költségigénye miatt a jövőben is használható. A mérés technikai fejlesztések során szerzett tapasztalataim, javasolataim megosztásával [1], egy rutin geotechnikai vizsgálatokra alkalmas laboratórium a jövőben e területre is kiterjesztheti tevékenységi körét, amelyre az OE-Ybl Geotechnikai Laboratóriuma alkalmassá is vált.

A mérések tapasztalatait és eredményeit további kutatásokban is felhasználtuk (2. tétel).

E speciális mérési lehetőségeket Hallgatóink az MSc képzésben gyakorlati szinten is megismerhetik.

Szakcikk és konferenciák tanúsága szerint napjainkban a víztartási görbe mérés technikai fejlesztése az automatizálás és a sokpontos mérés irányában folytatódik (Ray R., 2016); (Norouzi S., et al. 2023). Jelenleg én is az eszközök (elsősorban a homoklapos-kaolinlapos berendezés), ilyen irányú továbbfejlesztésén dolgozom.

1.4 A tézishez kapcsolódó tudományos közlemények

[1]**Firgi, Tibor**; Keszeyné, Say, Emma; Telekes, Gábor
A geotechnika területén a talajok víztartási függvényének alkalmazási köre és laboratóriumi mérésének tapasztalatai
Műszaki Szemle (EMT) 72., pp. 8-17., (2018)

[2]Imre, Emőke; **Firgi, Tibor**
A víztartási görbe talajmechanikai alkalmazása
Hidrológiai Közlöny 98/4., pp. 24-33., (2018)

[3]**Firgi, T.**
Soil water characteristic curve of some sand mixtures
In: Mahler, A.; Scharle, P.; Szepesházi, R. (szerk.) Proceedings of the 19th European Young Geotechnical Engineers Conference Győr, SZE, pp. 136-144., (2008)

[4]Imre, E.; Laufer, I.; Trang, Q.P.; Lőrincz, J.; Rajkai, K.; **Firgi, T.**; Telekes, G.
The soil water characteristics of two-component sand mixtures
Springer Proceedings In Physics, pp. 45-59. (2007)

[5]Imre Emőke; Rajkai Kálmán; Czap Zoltán; **Firgi Tibor**; Aradi László; Telekes Gábor
Összehasonlító mérések homoklapos, nyomásmembrános és kaolinlapos készülékekkel
In: Geotechnika 2000, Ráckeve, pp. 1-10., (2000)

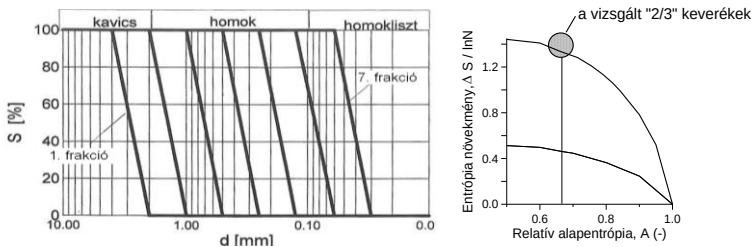
[6]Imre, E.; Rajkai, K.; Czap, Z.; **Firgi, T.**; Telekes, G.; Aradi, L.
Comparative measurements with sand box, pressure membrane extractor and pressure plate extractor
In: Rahardjo, H; Toll, DG; Leong, EC (szerk.) Unsaturated Soils for Asia. Proceedings of the 1st Asian Conference, Balkema Publishers, pp. 287-291., (2000)

2. A víztartási görbe meghatározása indirekt módszerrel

2.1. A kutatás előzményei, részletes ismertetése

A víztartási görbe direkt méréssel történő előállításával mellett, a bevezetőben említett okok miatt, indirekt módszerek is szükségesek lehetnek.

E fejezetben ismertetett vizsgálati eredmények egy sokéves kutatás részei (Imre et al., 2003), amelyben részt vehettem. A kutatás távlati célja a szemeloszlási entrópia (Lőrinc J., 1986) felhasználásával a víztartási görbe meghatározása [8], [9], [10], [14]. A kutatásban szemcsés talajfrakciók és talajkeverékek (6. ábra) víztartási görbéit mértük (az 1-4 frakciók mérésében vettem részt, az ismertetett berendezéssel), az eredményeket értékeltük.



6. ábra A vizsgált frakciók szemeloszlása és a keverékek, normalizált koordináta rendszerben a maximális és minimális normált entrópia növekmény vonallal

Előzmények: a kutatás első részében 7 talajfrakciót és 21, telítetlen $A=2/3$ optimális talajkeveréket vizsgáltak. A keverékek $1/3$ rész finom és $2/3$ rész durva szemcsés halmazból álltak. A vizsgált frakciók mért víztartási görbéiből, a szemeloszlás ismeretében, a keverékek víztartási görbéjét számításal is meghatároztuk az alkalmazott Imre-Genovese modell a következő:

A keverékek szemeloszlása a frakciók szemeloszlásának súlyozott összege:

$$S_{NJ}(d) = \sum_{k=1}^i x_k S_k(d) \quad (7)$$

ahol: x_k a k -adik frakció gyakorisága.

Hasonló megállapítás igaz a keverékek víztartási görbéjére is:

$$w_{NJ}(u_a - u_w) = \sum_{k=1}^i c_k w_k(u_a - u_w) \quad (8)$$

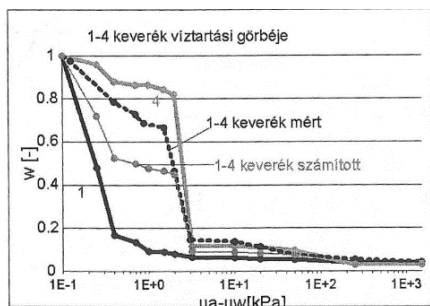
ahol c_k a súly együttható, és $\sum_{k=1}^N c_k = 1, c_k \geq 0$

Feltételezések továbbá, hogy:

1. optimális $A=2/3$ keverékek esetén a súlyok c_k ($k=1 \dots N$) egyenlők,

2. a frakciók víztartási görbe modellje egy trilineáris függvény szemilogaritmikus léptékben,
3. a frakciók víztartási görbéinek nem konstans részei nem fedik egymást.

A kutatás második részében (Imre E., Havrán K., Fírgi T.) az első négy frakció és 6 optimális keverékük vizsgálatára került sor (Havrán K., 2004). A frakciók és keverékek előállítása pontosabb módszerrel történt, felezőszíták alkalmazásával, az alkalmazott terhelések sűrítésével.



7. ábra Az 1-4 keverék mért és számított víztartási görbéje
(a frakciók mért víztartási görbéivel)

Feladatunk, annak igazolása volt, hogy az Imre-Genovese modell, érvényes-e az új talajkeverékekre, a mérési tapasztalatok felhasználásával a modell pontossága javul-e. A mérések mérés technikai fejlesztését és a mérési eredmények kiértékelését, a megalkotott elmélet pontosítását

végeztem. A kísérletek és kiértékelésük igazolta a modell helyességét, a szemcsés talajt alkotó frakciók víztartási görbéinek ismeretében, lehetséges az optimális keverékük víztartási görbéjének becslése [15], [16], [17], példaként az 1-4 keverék esetén (7. ábra).

A kutatás következő részében célom e módszer pontosítása volt. A korábbi feltételezések közül egyet, miszerint a c_k súlyok ($k=1 \dots N$) egyenlőek, pontosítottam. Megvizsgáltam a c_k – súlyok változtatásának a modell pontosságára gyakorolt hatását és kerestem az optimális súlyozást. Ezt úgy végeztem, hogy a talajkeverékek különböző súlyozással számított víztartási görbe pontjaira, a jól ismert van Genuchten (1) függvényt illesztettem, amelyet a keverékek mért víztartási görbéire illesztett van Genuchten függvénnyel hasonlítottam össze, a legjobb regresszió keresésével. Megállapítottam, hogy a durvább frakciót a féltől kisebb súllyal (átlagosan 0,31), míg a finomabb frakciót féltől nagyobb (átlagosan 0,69) súllyal számításba véve, a modell pontossága mintegy 20%-kal javítható.

A kísérletsorozat eredményei és a modell illesztése lehetőséget ad annak megvizsgálására, hogy a frakciók és a talajkeverékek fontos paraméterei (levegő belépési

küszöbértékhez és a reziduális víztartalomhoz mekkora szívófeszültség és telítettség tartozik) [1],[13], becsülhető-e, a számítással (a módosított Imre-Genoves modellel) előállított víztartási görbékből.

Az eljárás a következő lépésekben történt: Illesztettük a van Genuchten függvényt a mért értékekre (4 frakció és 6 talajkeverék), valamint a módosított Imre-Genoves modellel előállított 6 talajkeverék víztartási görbéire. A számításokat számítógépes program segítségével (Wolfram Mathematica) végeztem, amely a Newton módszert alkalmazza, feltételezve, hogy a hibák függetlenek és normál eloszlásúak. A regressziós együttható minden esetben 0,998 felett volt.

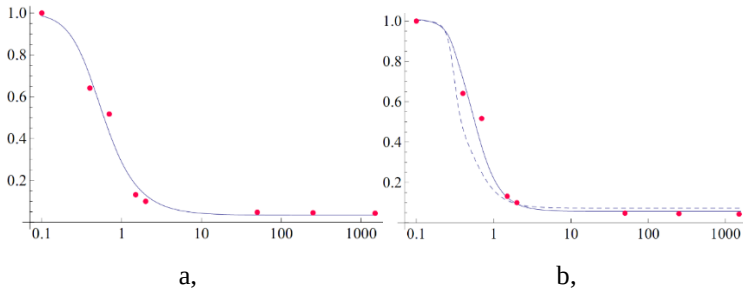
A van Genuchten modell kapcsán (a paraméterek számának csökkentése miatt) a szerző javasolja a reziduális víztartalomérték becsléssel történő felvételét, de ezt nem tettük meg (független paraméternek tekintettük), ezáltal a függvények illesztéséből a modell reziduális szívófeszültség/telítettség becslésének jóságára is következtethetünk, példaként az 1-3 keverék víztartási görbéi (8. ábra). A jellemző paraméterek, a trilineárisnak tekinthető víztartási görbékről grafoanalitikus úton is meghatározhatók.

A szakirodalomban ismert (Wang, S., et al., 2023), a van Genuchten függvény felírása a telítettséggel:

$$\frac{S-S_r}{1-S_r} = \frac{1}{[1+(\alpha\psi)^n]^m} \quad (9)$$

ahol: S - a telítettség (-) (r-reziduális)

Így a normalizált víztartalom tengelyről közvetlenül a telítettség olvasható le.



9. ábra Az 1-3 talajkeverék van Genuchten modell illesztéssel előállított víztartási görbéje (a, - mért értékekre, b, - modellel előállított értékekere (folytonos vonal -súlyozással), vízszintes tengely: szívó-feszültség (u_a-u_v) (kPa); függőleges tengely: v_n – normalizált térfogati víztartalom (-))

Az eredményeket az 1. táblázatban foglaltam össze és értékelem a következőkben:

A vizsgált négy frakció esetén:

Az eredmények az elvárható értékeket és trendeket tükrözik. A kontrollmérések mellett, ez is a mérési eredmények megbízhatóságát bizonyítja.

1. táblázat A víztartási görbék jellemző paraméterei

minták	$(u_a - u_v)_s$	eltérés	$(u_a - u_v)_r$	eltérés	$v_m (S_r)$	eltérés
	(kPa)	%	(kPa)	%	(-)	%
1.	0,14		0,42		0,097	
2.	0,26		0,74		0,067	
3.	0,47		1,65		0,061	
4.	1,55		3,60		0,061	
1-2(m)	0,15		0,60		0,068	
1-2(sz)	0,17	13,3	0,56	-6,7	0,081	19,1
1-3(m)	0,25		1,65		0,046	
1-3(sz)	0,29	16,0	1,52	-7,9	0,055	19,6
1-4(m)	n.a		n.a		n.a	
1-4(sz)	0,23		3,55		0,072	
2-3(m)	0,58		1,22		0,086	
2-3(sz)	0,51	-12,1	1,36	11,5	0,069	-19,8
2-4(m)	0,35		5,11		0,059	
2-4(sz)	0,31	-11,4	4,75	-7,0	0,071	20,3
3-4(m)	0,74		3,75		0,086	
3-4(sz)	0,62	-16,2	4,15	10,7	0,077	-10,5

Megjegyzés: 1-4 – frakciók, 1-2 – 3-4 talajkeverékek,

m – mért, sz – modellillesztéssel számított

az 1-4(m) talajkeverék mérése a többmintás mérés és a kontrollmérések ellenére, nem értékelhető eredményt adott

- levegő belépési küszöbérték $((u_a - u_v)_s)$

Nehezen mérhető érték, az eredmények a modellillesztés eredményei, értékei kicsik (0,14 – 1,55 kPa), trend jellege az elvárható, miszerint a finomabb frakciók felé haladva nő az értéke.

- reziduális szívófesztültség $((u_a - u_v)_r)$

Jobban mérhető paraméter, trend jellege az elvárható, miszerint a finomabb frakciók felé haladva nő az értéke.

- reziduális szívófesztültséghez tartozó telítettség

Az elvárthoz képest talán fordított trendet tükröz, az adatsorokat átnézve, megállapítható, hogy ez a paraméter nagyon érzékeny a modellillesztésre és a mérési hibákra, így ez további vizsgálatot igényel. Ugyanakkor megállapítható, hogy a frakciók víztartalma, a telítettség 0,097 és 0,061 értéke közötti tartományában lép át a reziduális tartományba. Ennek geotechnikai szempontból azért lehet jelentőség, mert a vizsgált talajok e telítettség körül veszíthetik el, szerintem, a hagyományos értelemben vett un. „kapilláris kohéziójukat”.

A vizsgált hat talajkeverék esetén:

Megállapítások tehetők a talajkeverék fontos paramétereire, összehasonlítva az őket alkotó frakciók paraméte-

reivel, illetve ezen paraméterek meghatározhatóságára a számítással (modellel) előállított víztartási görbéikből.

- levegő belépési küszöbérték $((u_a - u_v)_s)$

Értéke a talajkeveréket alkotó frakciók értékei közé adódott. A modellillesztéssel előállított értéke közepesen jól becsülhető ($\pm 16\%$). Az eltérés bár nagynak tűnhet, de a paraméter bizonytalanságát, mérésének hibáit, a modellillesztések hibáit is figyelembe véve elfogadható, különösen, ha a talajfizikai jellemzők szokásos bizonytalanságára gondolunk, hiszen a maximális eltérés 0,08 kPa.

- reziduális szívófeszültség $((u_a - u_v)_r)$

Értéke a talajkeveréket alkotó frakciók értékei közé adódott, két esetben kis mértékben túl is lépte azt, de minden esetben a nagyobb értékhez esett közelebb, oka a talajkeverék pórustéreloszlásával magyarázható. A modellillesztéssel előállított értéke jól becsülhető ($-8\% - +11\%$). Az eltérés a paraméter bizonytalanságát, mérésének hibáit, a modellillesztés hibáit is figyelembe véve elfogadható, különösen, ha a talajfizikai jellemzők szokásos bizonytalanságára gondolunk, hiszen a maximális eltérés 0,40 kPa.

- reziduális szívófeszültséghez tartozó telítettség

Hasonló megállapítások tehetők, mint a frakciók esetén. Értéke a talajkeverékek esetén 0,046 és 0,086 közötti. A modellillesztéssel előállított értéke közepesen becsülhető (- 10 % - + 20%). Az eltérés a mért paraméter bizonytalanságát, mérési hibáit, a modellillesztés hibáját is figyelembe véve elfogadható, a maximális eltérés 0,017.

2.2. A víztartási görbe, indirekt meghatározási módszerének felhasználásával, a jellemző értékek becslése (2. tézis)

Laboratóriumi kísérletekkel és modell-illesztéssel igazoltam, hogy az optimális ($A=2/3$) szemcsés talaj keverékek ($d=2,0 - 0,5$ mm) víztartási függvényeinek paramétere: levegő belépési küszöbérték, reziduális szívófeszttség és a reziduális szívófeszttséghez tartozó telítettség, az egyes frakciók víztartási függvényeinek ismeretében, közelítően becsülhetők.

A vizsgált talajfrakciók mért víztartási függvényeiből, a szemeloszlás ismeretében, a módosított Imre - Genovese modell alkalmazásával, a talajkeverékek víztartási függvénye, számítással is meghatározható. Az alkalmazott modell szerint, a keverékek víztartási függvénye a frakciók

vízartási függvényének súlyozott összege, amelyből (például a van Genuchten függvény illesztésével és elemzésével), a keverékek fenti paraméterei is becsülhetők, jellemzően $\pm 10\text{-}15\%$ -os eltéréssel.

2.3. Az elért eredmények hatása, visszhangja

A kutatás távlati célja a szemeloszlási entrópia felhasználásával a vízartási görbe és így jellemző paramétereinek meghatározása. A kutatás jelen fázisa biztató, szakcikkek és konferencia előadások, kiadványok formájában publikált, amely iránt hazai és nemzetközi érdeklődés is tapasztalható (hivatkozások és konferencia beszélgetések formájában). Az oktatásban, az MSc képzésben, de még inkább TDK munkák kapcsán van lehetőség a hallgatók bevonására (történt is ilyen) a kutatásba. A legújabban megjelent geotechnikai egyetemi jegyzetben (Szepesházi R., 2024), a telítetlen talajok tárgyalása kapcsán, az (átdolgozott) jegyzetünkre [12] is hivatkozik a szerző. Jelenleg a kutatás folytatódik, a van Genuchten-től eltérő függvény illesztésének vizsgálatával, valamint más talajfrakció és nem ideális keverékek vizsgálatával [7].

2.4. A tézishoz kapcsolódó tudományos közlemények

[7] Emőke, Imre; **Tibor, Firgi**; Delphin, Kabey; Ágnes, Bálint; László, Radi; Daniel, Arreto

A Parameter Identification In Relation To The Water Retention Curve And The Grading Curve Of Sands

In: Bayoumi Hamuda Hosam Proceedings Book of the VII. International Symposium, Environmental Health and Biosecurity Strategy, Óbudai Egyetem, (2023)

[8] Imre, E.; Barreto, D.; Datcheva, M.; Singh, V.P.; Baille, W.; Feng, S.; **Firgi, T.**

Minimum dry density in terms of grading entropy coordinates
In: Zhussupbekov, A; Sarsembayeva, A; Kaliakin, VN.(szerk.)
Proceedings of the 17th Asian RC. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, London,CRC Press, pp. 402-406. (2023)

[9] Imre, Emőke; **Firgi, Tibor**; Baille, Wiebke; Datcheva, Maria; Barreto, Daniel; Feng, Shuyin; Singh, Vijay

Soil parameters in terms of entropy coordinates
E3S Web Of Conferences, 382. Paper: 25003, (2023)

[10] Imre, E.; Schanz, T.; **Firgi, T.**; Hegedűs, C.

Properties of sand mixtures with identical entropy coordinates
In: Woojin, Lee; Jong-Sub, Lee; Hyun-Ki, Kim; Dong-Soo, Kim (szerk.) Proceedings of 19th International Conference On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Dél-Korea, ISSMGE, pp. 1163-1166., (2017)

[11] Imre, E;Rajkai, K;**Firgi, T**;Laufer, I;Genovese,R;Jommi,C
Modified grading curve - SWCC relations

In: Mancuso, C.; Jommi, C.; D'Onza, F. (szerk.) Unsaturated Soils: Research and Applications, Berlin, Németország: Springer Netherlands, pp. 39-46., (2012)

[12] Imre E. (szerk.); Rajkai K.; **Firgi T.**; Czap Z.; Telekes G.
Telítetlen talajmechanika

Budapest, Magyarország,125 p, (2009)

- [13] Laufer, I; Imre, E; Rajkai, K; **Firgi, T**; Telekes, G.
Data acquisition for a soil water retention curve transfer function of sands
In: Proceedings of YGEC Egyiptom pp. 17-20., (2009)
- [14] Imre, E; Laufer, I; Rajkai, K; Scheuermann, A; **Firgi, T**; Telekes, G.
Water retention functions of sand mixtures
In: Toll, DG.; Augarde, CE.; Gallipoli, D.; Wheeler, SJ. (szerk.)
Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering: Proceedings of the 1st European Conference on Unsaturated Soils, USA, CRC Press - Taylor and Francis G. pp. 299-304., (2008)
- [15] Imre, E; Rajkai, K; **Firgi, T**; Havrán, T; Trang, P; Telekes, G; Lőrincz, J.
A homokfrakciók és homokkeverékek víztartási görbéje közti kapcsolat
Hidrológiai Közlöny 88/5. pp. 52-56., (2008)
- [16] Imre, E.; Rajkai, K.; **Firgi, T.**; Trang, QP.; Telekes, G.
Closed-form functions for the soil water-retention curve of sand fractions and sand mixtures
In: G., A. Miller; C., E. Zapata; S., L., Houston; D., G., Fredlund (szerk.) 4th International Conference on Unsaturated Soils ,Reston (VA): USA, American Society of Civil Engineers (ASCE) pp. 2408-2419., (2006)
- [17] Imre, E; Havrán, K; Lőrincz, J; Rajkai, K; **Firgi, T**; Telekes, G.
GA model to predict the soil water characteristics of sand mixtures
In: Tarantino, A; Romero, Edgardo Juan; Cui, YJ (szerk.) Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics: Proceedings of an International Symposium on Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, pp. 359-368., (2005)

3. A tenzió rézsűállékonyságra gyakorolt hatásának modellezése a hagyományos módszerekben geotechnikai szoftver segítségével

3.1. A kutatás előzményei, részletes ismertetése

Ebben a fejezetben, azt vizsgálom, hogy a közismert Bishop rézsűállékonyság-vizsgálati módszerrel, modellezhető-e a tenzió állékonysági biztonságra gyakorolt hatása.

A geotechnikában a rézsűk állékonysági vizsgálata (EC7) és az elvárt biztonsági szint meghatározása (Garai J., et al., 2023), régóta alapfeladat. Az időjárási körülmények szélsőségesse válása újabb kihívásokat jelent [18]. A geotechnikai számítások a klasszikus talajmechanikában zárt alakú megoldásokra vezettek. A telítetlen talajmechanikai feladatok nemlineárisak, megoldásuk általában numerikus (végeselemes) módszerrel történik [22], [25], (Plaxis, Soil Vision stb.) (Wolf Á és tsai., 2018). Ugyanakkor a gyakorlati számításokban nagyrészt a klasszikus megoldásokat (súrlódókörös, blokkos, lamellás) alkalmazzuk, a legelterjedtebb a lamellás módszer különböző változatainak alkalmazása, geotechnikai szoftverek segítségével. Így e módszerek alkalmazhatósági határainak,

paraméterérzékenységének, telítetlen -telített talajzónák lehetséges modellezésének vizsgálata szükséges, ezt számos ipari munka kapcsán is tapasztaltuk [19], [20], [21], [23], [24]. Vizsgálatainkat a GEO5 szoftver – rézsúállékonyság moduljával végeztük, mivel hazánkban ez az egyik legismertebb és az ÓE-YBL licensszel rendelkezik.

Igazodva a tézisfüzet témájához, itt csak a szemcsés talaj vizsgálatát ismertetem. A vizsgált „minta” talaj: iszapmentes közepes homok, talajfizikai jellemzői (Karafiát lapján 1953 alapján, Praxis), a tömörségtől függő középértéket választva: $\rho_n = 1,85 \text{ t/m}^3$, $\phi = 34^\circ$, $c = 0 \text{ kN/m}^2$
A tereplépcső 3,00 m, terheletlen.

A biztonságos rézsúhajlás felvételének lehetőségei:

- szabványos táblázatból:

2. táblázat Részlet a táblázatokból (Bartos S., Králik B., 1984)

Talajnem	Talaj- állapot	Térfoogat- sűrűség t/m^3	Fejtési osztály MSZ 15103	A töltés magassága a 3 3-6 6-9 9-12 méter, akkor a
Durva kavics vagy homokos kavics, iszapmentes, ve- gyes szemszerkezetű		2,1-2,4	III-IV.	6/4
Durva és középfinom homok, iszapmentes, egyenletes szemmagyságú	Tömör	1,8-2,1	II-III.	6/4 7/4

a)

Tömör szemcsés talaj és sodor- ható iszap	sűrűsége	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	3,5	3,5
	nyílvízarány móló	0	0	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0

b)

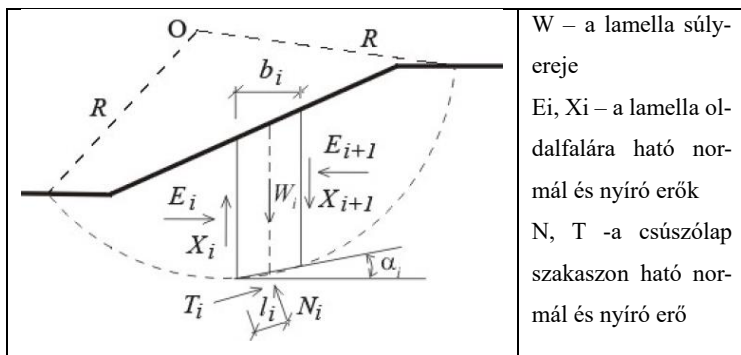
Megállapítható, hogy a vizsgált esetben, a rézsű lehetséges meredeksége: 6/4 (a vízszintessel bezárt szög: $\beta = 33^\circ 40'$) – a további vizsgálatokat ehhez viszonyítottam.

- konzervatív tervezési módszer

Szemcsés talaj, ($c=0$, esete), ahol a biztonság (n , SF) = (1) = $\tan \varphi / \tan \beta$ – összefüggésből határozható meg, értéke: karakterisztikus paraméterrel: $n = 1,02$ (98,0 %), amely állékonysági diagram felhasználásával is megállapítható.

- számítás (lamellás módszerrel)

A lamellás módszer jól ismert, rézsűállékonyságvizsgálati lehetőség (10. ábra), alapgondolata, hogy a csúszólap feletti, elmozduló földtömeget függőleges lamellákra osztjuk és az egyensúlyvizsgálatot lamellánként végezzük. Az egyes lamellákra ható erőket a 10. ábra mutatja.



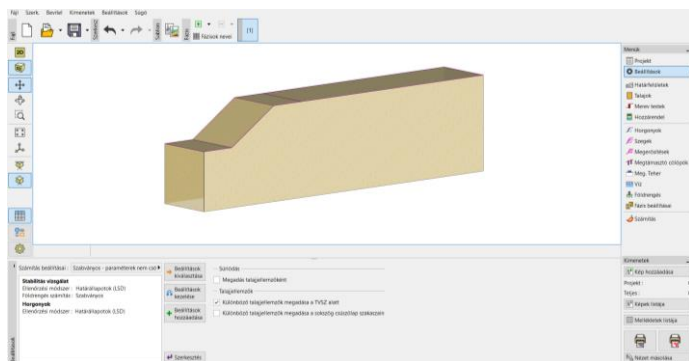
10. ábra A lamellás módszer (GEO5)

A Bishop (1955) -féle egyszerűsítés, hogy a lamella két oldalán ható nyíróerők egyenlőek és értékük nulla, az így elkövetett hiba néhány százalék (Faur K.; Szabó I. 2011). A biztonságot (FS) a következő összefüggés alapján, iterációval határozzuk meg (GEO5):

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \sum_i \frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{FS}} \quad (10)$$

ahol: c ; φ – hatékony nyírószilárdsági paraméterek (kN/m²; (°),
 u - pórusvíznyomás (kN/m²).

A módszert a GEO5 programmal (11. ábra), a fenti kiindulási adatokra alkalmaztam, a következő lépésekben: alapmodellen, alapmodell paraméterérzékenységi vizsgálata, telítetlenség vizsgálata. Az eredményeket a 3. táblázatban foglaltam össze.



11. ábra A modell felépítés a GEO5 programmal

3. táblázat A modellezés eredményeinek összefoglalása

		paraméter vált. / FS (kihasználtság) (%)			
1	nincs parciális t.	98,8			
2	EC7	133,5			
	DIN 1054	123,6			
3	± φ	- 10%	-5%	+5%	+10%
		112,7	105,4	92,8	87,2
	± γ	- 10%	-5%	+5%	+10%
		98,8	98,8	98,8	98,8
	± c	+1 kPa	+2 kPa	+3 kPa	+4 kPa
		73,1	63,2	56,6	51,7
4	TVSZ	alul	közép		
		98,9	102,0		
	TVSZ (φ csök. 2°)	98,9	102,2		
5	Ru -tényező	0,0	0,2	0,4	
		98,9	145,1	274,4	
6	hirtelen apadás (3 m)	X=1	X=0,5	X=0	
		98,9	176,1	753,4	
	hirtelen apadás (1,5 m)	X=1	X=0,5	X=0	
		98,9	163,3	452,8	
7	TVSZ és a szívófelület	2,5	1,0	0,5	
		46,3	98,8	98,8	
	alapmodell+ c=0,1 kPa	91,9			
	TVSZ és a szívófelület	1,5 m	1,0 m	0,5 m	
		88,3	90	91,1	

Megjegyzések a táblázatban közöltekhez, az eredmények értékelése (a megjelölt soronként):

1. Az összehasonlíthatóság miatt a parciális (biztonsági) tényezők nélküli eredményhez hasonlítottam a későbbi eredményeket.

2. EC7 (MSZ EN 1997) és DIN 1054 szerinti vizsgálat eredményeit mutatja, a DA-3 szerinti számítás, kihasználtságra gyakorolt hatása, mintegy 25-30 százalékpont.

3. A talajfizikai paraméterek végeredménye gyakorolt hatása szerint, a belső súrlódási szög tekintetében jelentős, a talaj térfogatsúlyának nincs hatása (a konzervatív tervezéshez hasonlóan), a kohézió hatása a legjelentősebb, már kis változtatásra érzékenyen reagál a modell, ennek azért van jelentősége, mert akár közelítőleg úgy is számításba vehetnénk a szívófeszültség hatását, mint a hagyományos kohéziót (vagy azt növelő hatást).

4. Statikus talajvíztükör alkalmazása esetén, csak ez alatt számol víznyomással, hatása akkor válik jelentősebbé, ha a vízalatti talajok talajfizikai jellemzőjét rontjuk, amire a szoftver lehetőséget ad.

5. Az R_u tényező (pórusvíznyomás becslése százalékosan) vizsgálata a hazai gyakorlatban kevésbé ismert. Ez esetben

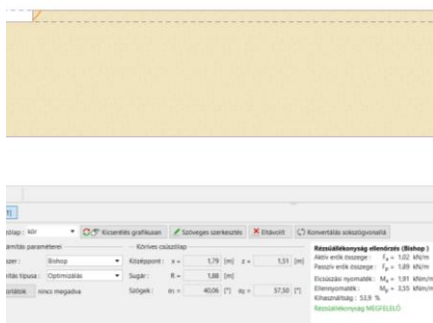
a rézsűállékonyság vizsgálatában, a pórusvíznyomást a vertikális feszültség megadott hányadaként vehetjük figyelembe, elvileg a negatív érték akár a szívófeszültséget is leírhatja, hatása jelentős, de kifejezetten ideiglenes vagy nem részletes számításokhoz használják, célszerű tovább vizsgálni. Kohéziómentes talajoknál a precíz megadása, a gyakorlatilag felszíni csúszólap esetén nehéz, kötött talajoknál célszerűen alkalmazható lehet.

6. A hirtelen apadás (tipikusan árvízvédelmi töltések víz felőli oldala) hatása jelentős lehet, de a program ajánlása szerint értéke vízáteresztő talajoknál 1, így hatása ez esetben nincs, megadásánál a vízáteresztő ill. nem eldöntése további vizsgálatot igényel.

7. A szívófelület megadása (illetve a pórusvíznyomás közvetlen bevitele), is lehetőséget teremt a telítetlenség miatt kialakuló szívófeszültség figyelembevételére. A kohéziómentes talajoknál hatása csak abban az esetben tud érvényesülni, ha a csúszólapot is tartalmazza a szívási zóna, esetleg kicsi kohézió felvételével „rá tudjuk kényszeríteni” a hatás figyelembevételére a számítást és így a tényleges szívófelület magassággal számolhatunk. A módszer korlátja, hogy csak egy szívófelület adható meg és a

talajvízszint és e felület között a szívófeszteltség lineárisan nő, ami egy bizonyos telítettség alatt, hatásában már nem igaz [18]. A vizsgált rézsű esetén a kihasználtság kb. 1% pontos csökkenése nem jelentős, de hatásirányában igaz.

Visszatérve a 2/b táblázatra, e szerint a vizsgált talajból kb. 0,5 méter emelhető ki függőleges fallal ideiglenesen (tömör homok esete), ez a szívó feszültség hatása, hiszen kohéziómentes talajoknál a megtámasztatlan függőleges földfal magassága nulla, a konzervatív számítás szerint. A GEO5 rézsűállékonyság modul – Bishop módszerét alkalmazva, a TVSZ-szívófelület beállításával, a 0,5 méteres földfalmagasságot visszaigazolja, de a fenti megállapítások igazak erre a vizsgálatra is.



12. ábra Függőleges földfal vizsgálata, szívófelülettel

Megjegyzem, hogy a szívófeszteltség állékonyságnövelő hatása, csak akkor vehető számításba, ha a talaj nem

kerül (közel) telített, vagy kiszáradás (közeli) állapotba (ami különleges körülményektől eltekintve, csak ideiglenes állapotban teljesül), valamint a fenti modellezésben számos tényezőt nem vizsgáltam (pl. felszíni- vagy dinamikus teher, geometria stb.), amelyek hatása döntő lehet.

3.2. Telítetlen, kohéziómentes talaj közelítő állékonyság-vizsgálata lamellás módszerrel (3. tézis)

Számítógépes szimulációval, Bishop rézsűállékonyság vizsgálati módszerét alkalmazva, megállapítottam, hogy a kohéziómentes, telítetlen talajban kialakuló szívófeszültség, állékonysági biztonságra gyakorolt hatásának vizsgálatára, a módszer korlátozottan alkalmas, közelítő eredményt adhat.

Megvizsgáltam kohéziómentes talaj esetén, terhelésmentes, előre felvett geometriájú rézsű állékonysági vizsgálatának lehetőségeit, különös tekintettel a telítetlen talajban kialakuló szívófeszültség állékonysági biztonságra gyakorolt hatását. A paraméterek érzékenységi vizsgálatát értékeltem. A vizsgált rézsű esetén a szívófeszültség állékonyságnövelő hatása (néhány százalékpont FS), a többi paraméterhez képest kicsi, és ideiglenes

hatású, ugyanakkor kis mélységű ($< 0,50$ m), függőleges falú munkagödrök ideiglenes állékonysága igazolható a módszerrel.

3.3. Az elért eredmények hatása, visszhangja

A fenti vizsgálatot a GEO5 szoftverrel végeztem, amely népszerű, felhasználóbarát. Egy moduljával dolgozva megállapítható, hogy a tőle elvárható számítást tudja. Az így szerzett tapasztalataimat az oktatásban és az iparban is hasznosítom. Természetesen ez a kutatási téma sincs lezárva folytatandó kötött talajok vizsgálatával, valamint a numerikus módszert (VEM) alkalmazó modul hasonló megismerésére, megismertetésével, a telítetlen talajmechanikában elért eredményeink felhasználásával, további számítógépes szimulációkkal.

3.4. A tézishoz kapcsolódó tudományos közlemények

[18] A. M., Tang; P. N., Hughes; T. A., Dijkstra; A., Askarinejad; M., Brenčič; Y. J., Cui J. J., Diez; T., Firgi; B., Gajewska; F., et al. Atmosphere–vegetation–soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe, Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology 51. pp. 156-168., (2018)

[19] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; Firgi, T.
M30-as autópálya, Szikszói szakasz magastöltés károsodás szakértés, 38+850-39+000 km.sz. között (2024)

- [20] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; **Firgi, T.**
M83-as gyorsforgalmi földműkárosodás vizsgálata, 51+000 - 57+800 szelvény között (2024)
- [21] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; **Firgi, T.**
Lejtőmozgás szakértői vizsgálata, Balatonfűzfő, Jánoshegyi u. 26. (2023)
- [22] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; **Firgi, T.**
M60-as autópálya földműkárosodások szakértői vizsgálata, Bóly, Nagynyárad térsége (2022)
- [23] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; **Firgi, T.**
Iparterület felszíni vízelvezetés- folyóka károk szakértői vizsgálata, Ercs, ÉPI telep (2022)
- [24] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; **Firgi, T.**
Víz tározó károsodás geotechnikai szakértői vizsgálata, Nagyatád, János-major (2022)
- [25] Kecskés, G.; Szoboszlai, B.; **Firgi, T.**
Út és földműkárosodás geotechnikai vizsgálat és helyreállítása, M25-ös gyorsforgalmi út 12+250-12+300 km (2020)

Irodalmi hivatkozások

- ASTM D 2325-68 Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium-Textured Soils by Porous-Plate Apparatus
- Bartos S. Králik B. (1984): Mélyépítés II. (Földművek), YMMF Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- Bishop, A.W. (1955): The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique* Vol. 4, pp. 273-328
- Buckingham, Edgar (1907): Studies on the movement of soil moisture, Bureau of Soils, Bulletin, vol.38, Washington, D.C.

Faur K., Szabó I. (2011): Geotechnika, Digitális Egyetem

Van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sciences American Journal* 44., pp. 892-898.

Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977): Stress State Variables for Unsaturated Soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 447-446.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993): Soil mechanics for unsaturated soils, John Wilry & Sons, New York

Fredlund, D.G., Xing, A. (1994): Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal* 31.

Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., Barbour, S.L. (1995): The relationship of the unsaturated shear strength to the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical J.* 33.

Garai J.; Vadai Zs.; Kovács I. (2024): Why failures in geotechnics are less frequent than predicted? *Geosciences And Engineering: A Publication of The University Of Miskolc* 12.

GEO5 - <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/theory-01>

Havrán, K. (2004): A szemelozslás és a telítetlen talajok függvényeinek kapcsolata, Diplomamunka, BME Budapest

Hilf, J.W. (1948): Estimating construction pore pressures in rolled earth dams, *Proceedings 2nd International conference on soil mechanics and foundation engineering*, Rotterdam

Imre, E., Rajkai, K., Genovese, R., Jommi, C., Lőrincz, J., Aradi, L., Telekes, G. (2003): Soil water retention curve for fractions and mixtures, *Proceedings for Unsat Asia*, Osaka

Lőrincz, J. (1986): Talajok szemeloszlási entrópiája, Egyetemi doktori értekezés, BME, Budapest

MSZ EN 1997-1:2006 Eurocode7-Geotechnikai Tervezés

Rajkai, K. (1993): A talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálati módszerei, Búzás I. (szerk): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv, INDA4321 Kiadó, BP. 115-160. o.

Rajkai, K. (2004): A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest

Ray, R. (2016): Geotechnical Engineering in the Digital Age, In: Huszák, T., Koch, E., Mahler, A. (ed.), 2. Széchy Károly Emlékkonferencia, MGE-MMK-GT, pp. 22-23.

Norouzi, S., Sadeghi M., Tuller M., Ebrahimian H., Liaghat, A., Jones, S. B., de Jonge L. W. (2023): A novel laboratory method for the retrieval of the soil water retention curve from shortwave infrared reflectance, Journal of Hydrology 626, 130284.

Shijun Wang, Jing Yang, Xing Wang, Zhong Zhang, Qian Zhai (2023): Uncertainty in Determination of the Soil-Water Characteristic Curve Based on the van Genuchten Model, Sustainability 15, 6740.

Szepesházi R. (2024): Bevezetés a geotechnika világába, MÁÚT Magyar Út- és Vasútügyi Társaság

Várallyay, Gy., Rajkai, K., Pacsepszkij, JA., A., Mironenko, E.V. (1979): A pf görbék matematikai leírása, Agrokémia és talajtan 28(1,2), 15-38. o.

Várallyay, Gy. (2003): A mezőgazdasági vízgazdálkodás talajtani alapjai, Budapest-Gödöllő

Wolf Á. (szerk), Szepesházi R., Honti I., Schell P., Mahler A., Szilvágyi Zs., Lődör K., Móczár B., Szepesházi A., Koch E. (2018): Geotechnikai végelelemes modellezés, MMK GT, BP.