



MISKOLCI EGYETEM

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

Doktori Iskola vezetője:

Prof. Dr. Szűcs Péter

egyetemi tanár

Innovatív mérési megoldások alkalmazásainak vizsgálata a geotechnikában

(Laza talajok talajmechanikája)

Doktori (PhD) értekezés

KÉSZÍTETTE:

Kántor Tamás

okleveles környezetmérnök

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

Dr. Kovács Balázs

címzetes egyetemi tanár

Miskolc, 2019.09.25.

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	I
Ábrajegyzék.....	III
Táblázatjegyzék	VI
Jelölések listája	VIII
1 Bevezetés	1
2 Irodalmi áttekintés	4
2.1 A talajmechanika története	4
2.2 Talajmechanikai kérdések a mezőgazdaságban	6
3 Vizsgált anyagok és alkalmazott eljárások bemutatása	9
3.1 Vizsgált talajok talajtani bemutatása	9
3.1.1 Irodalmi áttekintés a vizsgált talajokkal kapcsolatban	10
3.2 A vizsgált talajok talajmechanikai jellemzése	13
3.2.1 Szemeloszlási vizsgálatok	14
3.2.2 Konzisztencia határok	16
3.2.3 Lineáris zsugorodás.....	18
3.2.4 Konzolidáció	18
3.2.5 Proctor tömörség.....	21
3.2.6 Nyírószilárdság.....	22
3.2.7 Vízfelvevő képesség.....	24
3.3 A víztartalmi kategóriák megállapítása	25
3.4 Víztartási (pF) görbe.....	28
4 Alkalmazott innovatív mérési eszközök bemutatása	30
4.1 Mintaelőkészítés.....	30
4.1.1 A triaxiális minták előkészítése	31
4.1.2 A nagyméretű nyíródobozos kísérletek mintaelőkészítése.....	34
4.2 A szenzoros ödométeres mérőegység	36
4.3 A triaxiális vizsgáló berendezés	37
4.3.1 A triaxiális mérőrendszer digitális mérő és adatrögzítő rendszere	39
4.3.2 A Cam-Clay paraméterek meghatározása	42
4.4 A nagyméretű nyíróberendezés	44
4.4.1 A nagyméretű nyírógép főbb mechanikai paraméterei	44
4.4.2 A nagyméretű nyírógép vezérlése.....	45
4.4.3 Az MTV07-GG nagyméretű nyírógép nyomásszenzoros egysége	47
5 Az alkalmazott módszerek és elméleti alapok	50

5.1	A Mohr-Coulomb anyagtörvény	50
5.2	Hooke anyagtörvény.....	51
5.3	A harántkontrakciós (Poisson-) tényező	53
5.4	A Módosított Cam-Clay anyagmodell.....	56
5.5	Varianciaanalízis	60
5.6	Alkalmazott interpolációs eljárás	61
6	A kutatási eredmények bemutatása	63
6.1	A laza, konszolidálatlan talajok rugalmas viselkedésének vizsgálata	63
6.1.1	A rugalmassági vizsgálatokhoz alkalmazott vizsgálati módszer bemutatása	63
6.1.2	A triaxiális mérések eredményeinek feldolgozása	65
6.1.3	A laza talajok rugalmassági mutatójának (κ) meghatározása	67
6.1.4	A laza talajok rugalmassági paraméterének (κ) variancia analízise.....	71
6.1.5	A vizsgált talajok rugalmas viselkedésének változása a víztartalom függvényében.....	75
6.2	A konszolidálatlan, laza talajok képlékeny viselkedésének vizsgálata	78
6.3	Nagyméretű nyíródobozban végett vizsgálatok	83
6.3.1	A nagyméretű nyírás kezdeti tapasztalatai	84
6.3.2	Többlépcsős (Multistage) nyíróvizsgálatok.....	85
6.3.3	Mezőgazdasági talajok többlépcsős nyírókísérletei	88
6.4	A harántkontrakciós (Poisson)-tényező vizsgálata.....	91
6.4.1	A harántkontrakciós tényező meghatározása triaxiális vizsgálatokkal	92
6.4.2	A harántkontrakciós tényező meghatározása speciális ödométerrel	97
7	Tézisek.....	105
8	Összefoglalás	107
9	Summary	109
10	Köszönetnyilvánítás.....	111
11	Irodalomjegyzék.....	112
12	A témában megjelent fontosabb tudományos közleményeim.....	118

ÁBRAJEGYZÉK

1-1. ábra: Mezőgazdasági talajművelés (tarlóhántás).....	1
1-2. ábra: A CAM-CLAY paraméterek vizsgálatának lehetőségei ödométeres és triaxiális módszerekkel.....	3
2-1. ábra: Talajok igénybevétele mezőgazdasági vontató járószerkezete alatt	6
3-1. ábra: Nyírteleki, megyaszói és taktaharkányi talajok származási helyei	10
3-2. ábra: A vizsgált talajok szemeloszlási görbéi	15
3-3. ábra: A vizsgált talajok ábrázolása háromszög diagramon.....	15
3-4. ábra: A vizsgált talajok folyási egyenesei.....	17
3-5. ábra: A vizsgált talajok konszolidációs görbéi.....	19
3-6. ábra: A vizsgált talajok normál konszolidációs egyenesei (NCL)	20
3-7. ábra: A vizsgált talajok Proctor-görbéi.....	21
3-8. ábra: Homokos talaj nyíróvizsgálatainak eredményei a víztartalom függvényében	23
3-9. ábra: Iszapos talaj nyíróvizsgálatainak eredményei a víztartalom függvényében.....	23
3-10. ábra: Agyagos talaj nyíróvizsgálatainak eredményei a víztartalom függvényében.....	24
3-11. ábra: Enslin-Neff-féle berendezés a vízfelvevő képesség mérésére.....	25
3-12. ábra: A víztartalom mérési eredmények elhelyezkedése az általunk használt víztartalom-tartományok intervallumán	27
3-13. ábra: Jellegzetes magyarországi talajok pF-szám görbéi.....	28
4-1. ábra: Innovatív mintatömörítő berendezés.....	32
4-2. ábra: Rétegenként épített triaxiális minta tömörségi viszonyai a tömörítő nyomás és a mélység függvényében	33
4-3. ábra: A nagyméretű nyíráshoz készített minták tömörítés előtti és utáni magasságai (Iszapos talaj, $w = 21\%$).....	35
4-4. ábra: A különböző tömörítési munkák során a hézagtényező (b) és száraz térfogatsűrűség (j) értékének változása.....	35
4-5. ábra: Nyomásmérő oldalszenzorokkal ellátott ödométeres cella	36
4-6. ábra: Nyomásmérő szenzorokkal ellátott, vezeték nélküli ödométeres nyomó- és talpegység.....	37
4-7. ábra: Triaxiális vizsgáló berendezés a Miskolci Egyetem, Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratóriumában.....	38
4-8. ábra: Triaxiális mérőrendszer felépítése (Sárközi, Kriston és Kovács 2007)	39
4-9. ábra: A triaxiális rendszer térfogatmérő egysége	41
4-10. ábra: Triaxiális rendszer vezérlő programja.....	41
4-11. ábra: SHD típusú triaxiális vizsgálat mérési eredményeinek összefoglalója	42
4-12. ábra: Hézagtényező változása az SHD típusú triaxiális mérés közben ($\ln(p)$ -e).....	43
4-13. ábra: Cam-Clay paraméterek meghatározása az e- $\ln(p)$ görbe alapján.....	43

4-14. ábra: Nagyméretű nyíróberendezés	45
4-15. ábra: Az MTV07-GG típusú nyírógép vezérlő panelje.....	46
4-16. ábra: Nagyméretű nyírás során alkalmazott vezérlőfüggvény	47
4-17. ábra: Nyomásszenzorokkal ellátott betét a nagyméretű nyíróberendezéshez (aljzat) (G-Key Terv Kft.).....	48
4-18. ábra: Nyomásszenzoros mérőrendszer a nagyméretű nyíróberendezéshez (Pedinfor Kft.)	48
4-19. ábra: A feszültségmérő szenzorok jeleit feldolgozó és rögzítő LabView program.....	49
5-1. ábra: Az elemi kockára ható feszültségek és a feszültségmátrix.....	51
5-2. ábra: Különböző közetek Poisson-tényezője, mérési eredmények alapján (Gercek alapján (Vásárhelyi 2016)).....	54
5-3. ábra: A talajok mechanikai viselkedése a p'-q koordináta rendszerben (Szepesházi 2007).....	59
5-4. ábra: Az anyagok viselkedése izotropikus konszolidáció során.....	60
5-5. ábra: Lineáris interpoláció vázlata (Kovács és Szanyi 2005)	62
6-1. ábra: Triaxiális vizsgálatoknál alkalmazott vezérlőfüggvény (SHD függvény)	64
6-2. ábra: Triaxiális mérés során mért értékek.....	65
6-3. ábra: Triaxiális mérés eredményeiből számított $\ln(p)$ -v diagramm.....	66
6-4. ábra: Az $\ln(p)$ -v diagrammra illesztett rugalmassági érintők (k) és az illesztés egyenletei	67
6-5. ábra: A homokos talajra jellemző rugalmassági paraméter (k) érték meghatározásának összefoglalása.....	69
6-6. ábra: Az iszapos talajra jellemző rugalmassági paraméter (k) érték meghatározásának összefoglalása.....	69
6-7. ábra: Az agyagos talajra jellemző rugalmassági paraméter (k) érték meghatározásának összefoglalása.....	70
6-8. ábra: A rugalmassági paraméter (k) változása a talajtípus függvényében	71
6-9. ábra: Nyírtelegi homokos talaj rugalmas viselkedésének változását bemutató felület a víztartalom és a terhelés függvényében.....	76
6-10. ábra: Megyaszói iszapos talaj rugalmas viselkedésének változását bemutató felület a víztartalom és a terhelés függvényében.....	76
6-11. ábra: Taktaharkányi agyagos talaj rugalmas viselkedésének változását bemutató felület a víztartalom és a terhelés függvényében	77
6-12. ábra: Homokos talaj tömörödése során tapasztalt konszolidációs egyenesek a víztartalom függvényében	79
6-13. ábra: Iszapos talaj tömörödése során tapasztalt konszolidációs egyenesek a víztartalom függvényében	80
6-14. ábra: Agyagos talaj tömörödése során tapasztalt konszolidációs egyenesek a víztartalom függvényében	80

6-15. ábra: Fajlagos térfogat változási felület a terhelés és víztartalom függvényében (homokos talaj, NYT).....	81
6-16. ábra: Fajlagos térfogat változási felület a terhelés és víztartalom függvényében (iszapos talaj, MA)	81
6-17. ábra: Fajlagos térfogat változási felület a terhelés és víztartalom függvényében (agyagos talaj, TH).....	82
6-18. ábra: Nagyméretű, többlépcsős nyírás reprodukálhatóságának vizsgálata	85
6-19. ábra: Nyíróvizsgálatok általános kiértékelése a tönkremeneteli egyenes segítségével.....	86
6-20. ábra: Egy- és többlépcsős nyíróvizsgálatok eredményeiből számított σ - τ értékpárok (Kántor és Kovács 2010).....	87
6-21. ábra: Homokos talaj (NYT) nagyméretű nyíróvizsgálatainak (MS) eredményei a víztartalom függvényében	88
6-22. ábra: Iszapos talaj (MA) nagyméretű nyíróvizsgálatainak (MS) eredményei a víztartalom függvényében	89
6-23. ábra: Agyagos talaj (TH) nagyméretű nyíróvizsgálatainak (MS) eredményei a víztartalom függvényében	89
6-24. ábra: Nagyméretű nyíróvizsgálat során kialakuló feszültségeloszlás (iszapos talaj; (Kántor és Kovács 2012).....	90
6-25. ábra: Kezdeti tömörítés hatásának vizsgálata nagyméretű nyíróvizsgálat esetén.....	91
6-26. ábra: Talajok Poisson-tényezőjének meghatározása egytengelyű nyomóvizsgálattal (Kovács, Kriston, és mtsai. 2008.)	92
6-27. ábra: A talajok Poisson-tényező változása a száraz térfogatsűrűségük függvényében (Kovács, és mtsai. 2008.).....	94
6-28. ábra: Poisson-szerű tényező meghatározásának menete és a triaxiális mérés eredményeinek összefoglalása.....	95
6-29. ábra: Poisson-szerű tényező mérés, hidrosztatikus fázisának eredményeiből szerkesztett cellanyomás-hézag-tényező görbe	95
6-30. ábra: Homokos talaj mintatesten végzett Poisson-szerű tényező vizsgálat eredménye	96
6-31. ábra: Ödométeres mérés során rögzített feszültségtér a talajmintán belül	97
6-32. ábra: Ödométeres mérések során vizsgált talajok szemeloszlási görbéi.....	99
6-33. ábra: Az szenzoros ödométeres mérések során használt vezérlőfüggvény	100
6-34. ábra: Ödométeres mérés során a mintán elül létrejövő laterális feszültségek eloszlása	101
6-35. ábra: Ödométeres mérés során a mintán elül létrejövő tengely irányú feszültségek eloszlása .	102
6-36. ábra: Harántkontrakciós (Poisson) tényező eloszlása egy homokmintán belül, ödométeres mérés során.....	103
6-37. ábra: Harántkontrakciós tényező mintán belüli eloszlása homoktalaj (bal oldal) (Pis) és iszaptalaj (jobb old.) (Ceg) vizsgálatai alapján	104

TÁBLÁZATJEGYZÉK

3-1. táblázat: A vizsgált talajok legfontosabb agronómiai tulajdonságai (Kiss 2002).....	11
3-2. táblázat: A vizsgált talajok megnevezései	12
3-3. táblázat: A vizsgált talajok megnevezése a szemeloszlásuk alapján	16
3-4. táblázat: A vizsgált talajok konzisztencia határai.....	17
3-5. táblázat: Lineáris zsugorodás vizsgálat eredményei.....	18
3-6. táblázat: A vizsgált talajok optimális tömörítési víztartalmi és legmagasabb száraz sűrűsége ...	22
3-7. táblázat: Homokos, iszapos és agyagos talaj nyírószilárdsági paraméterei	24
3-8. táblázat: A vizsgált talajok vízfelvevő képessége Enslin-Neff módszer alapján	25
3-9. táblázat: A vizsgált talajok víztartalom tartományai	27
4-1. táblázat: Nagyméretű nyíróminták tömörítésénél alkalmazott vezérlési tábla.....	35
5-1. táblázat: A varianciaanalízisnél alkalmazott ANOVA táblázat (Závoti 2010)	61
6-1. táblázat: A homokos talajon mért rugalmassági tulajdonságok összefoglaló adatai (n=44 mérés)	67
6-2. táblázat: Az iszapos talajon mért rugalmassági tulajdonságok összefoglaló adatai (n=39 mérés)	68
6-3. táblázat: Az agyagos talajon mért rugalmassági tulajdonságok összefoglaló adatai (n=21 mérés)	68
6-4. táblázat: Homokos talaj (NYT) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (száraz állapot)	72
6-5. táblázat: Homokos talaj (NYT) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (köz. nedves állapot).....	72
6-6. táblázat: Homokos talaj (NYT) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (nedves állapot)	72
6-7. táblázat: Iszapos talaj (MA) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (száraz állapot)	73
6-8. táblázat: Iszapos talaj (MA) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (köz. nedves állapot)	73
6-9. táblázat: Iszapos talaj (MA) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (nedves állapot)	73
6-10. táblázat: Agyagos talaj (TH) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (száraz állapot)	73
6-11. táblázat: Agyagos talaj (TH) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (köz. nedves állapot).....	74
6-12. táblázat: Agyagos talaj (TH) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (nedves állapot)	74

6-13. táblázat: A vizsgált talajok rugalmas viselkedését a víztartalom és terhelés függvényében leíró egyenletek együtthatóinak összefoglalása.....	77
6-14. táblázat: A fajlagos térfogat változását leíró felületek egyenleteinek együtthatói	82

JELÖLÉSEK LISTÁJA**Latin szimbólumok**

<u>A</u>	Alakváltozási mátrix
c	Kohézió
Cc	Görbületi mutató
CEG	Ceglédi talaj jelölése
Cu	Egyenlőtlenségi mutató
c_v	Konszolidációs együttható
c_α	A másodlagos összenyomódás együtthatója (kúszási index)
CSL	Kritikus állapotot leíró egyenes (Critical state line)
D ₁₀	10 %-hoz tartozó szemcseátmérő (Szemeloszlás)
D ₃₀	30 %-hoz tartozó szemcseátmérő (Szemeloszlás)
D ₆₀	60 %-hoz tartozó szemcseátmérő (Szemeloszlás)
DF	Szabadsági fok (Variancia analízis)
E	Young modulus
e_{ij}	Véletlen hatás (Varianciaanalízis)
E_{oed}	Összenyomódási modulus
G	Nyírási modulus
I _p	Plasztikus index
k	Szivárgási tényező
K ₀	Nyugalmi földnyomási tényező
L	Kiindulási mintamagasság
M	Tönkremeneteli egyenes dőlése (Cam-Clay anyagtörvény)
MA	Megyasói talaj jelölése
MS	Többlepcsős nyíróvizsgálat (Multi-Stage, Multi-Step)
MS _b	Korrigált szórásnégyzet, kezelés hatása
MS _w	Korrigált szórásnégyzet, véletlen hatás
N	Fajlagos térfogat értéke egységnyi nyomás és NCL esetén (Cam-Clay anyagtörvény)
NCL	Normál konszolidációs egyenes
NYT	Nyírteleki talaj jelölése
p	Cellanyomás
p'	Hatékony feszültség
P%	Tévedés valószínűsége (Varianciaanalízis)
PIS	Pissos talaj jelölése
q	Deviátor feszültség
R	Zsugorodási viszonyszám
r	Elemszám (Varianciaanalízis)
Sa	Homok jelölése
saSi	Homokos iszap jelölése
SHD	Soros Hidrosztatikus és Deviátoros típusú triaxiális mérés (Serial Hydrostatic and Deviatoric)
Si	Iszap jelölése
siCl	Iszapos agyag jelölése
S _r	Szaturáció

SS_b	Négyzetösszeg, kezelés hatása (Varianciaanalízis)
SS_t	Négyzetösszeg (Varianciaanalízis)
SS_w	Négyzetösszeg, véletlen hatás (Varianciaanalízis)
SzD	Szignifikáns differencia (Varianciaanalízis)
T	Telítési határ
\underline{T}	Feszültség mátrix
TH	Taktaharkányi talaj jelölése
$t_{\alpha/2(n-k)}$	A Student-féle t-táblázatban az $\alpha/2$ szignifikancia szintre vonatkozó n-k érték (Varianciaanalízis)
v	Fajlagos térfogat (1+e)
V	Térfogat
V_a	Terhelést követő mintatérfogat
V_i	Kiinduló mintatérfogat
V_{max}	Legnagyobb térfogatváltozás
w	víztartalom
w_L	Folyási határ
w_{max}	Vízfelvevő képesség
w_{opt}	Optimális tömörítési víztartalom
w_p	Plasztikus határ
w_{zs}	Zsugorodási határ
X_{ij}	Az i-edik minta j-edik mintaeleme (Varianciaanalízis)
ZsL	Lineáris zsugorodás
α_i	Az i-edik sokaság várható értéke (Varianciaanalízis)
ΔL	Az adott időpillanatban mérhető magasságváltozás (Varianciaanalízis)
ΔV	Az adott időpillanatban fennálló térfogatváltozás értéke

Görög szimbólumok

λ	Képlékenységi paraméter (Cam-Clay anyagtörvény)
φ	Belső súrlódási szög
γ	Térfogatsúly
Γ	Fajlagos térfogat értéke egységnyi nyomás és CSL esetén (Cam-Clay anyagtörvény)
$\Delta\varepsilon_v$	A mintatest fajlagos térfogatváltozása
ε	Fajlagos alakváltozás
ε_a	Axiális alakváltozás
ε_l	Laterális alakváltozás
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	X, Y, Z irányú alakváltozások
κ	Rugalmassági paraméter (Cam-Clay anyagtörvény)
μ	A sokaságok közös várható értékei (Varianciaanalízis)
ν	Poisson tényező
$\rho_{d, max}$	Száraz térfogatsűrűség maximuma
σ_1	1-es főfeszültség)
σ_3	3-as főfeszültség)
σ_r	Radiális feszültség
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	X, Y, Z irányú feszültség
σ_{z0}	Látszólagos előterhelő nyomás vagy küszöbfeszültség

1 BEVEZETÉS

A geotechnika, azon belül is a talajmechanika, alig kevesebb, mint százéves múltra tekint vissza. Klasszikus értelemben Karl von Terzaghi, 1925-ben megjelent összefoglaló művének a „Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage” (szabad fordításban „A talaj fizikai tulajdonságain alapuló földmunkák mechanikája”) megjelenését tekintjük a mai értelemben vett talajmechanika alapjának. Terzaghi könyvében összefoglalja az európai és a világ addigi, a talajjal kapcsolatos, fizikai és mechanikai jellegű kutatások jelentős felfedezéseit, összefüggéseit.

„A régi és az új, a maradi és a haladó harcában kovácsolódott ki a talajmechanika mai fegyverzete. Az élet törvénye szerint az új és a haladó itt is legyőzte a régit, de közben ő maga is fejlődött és átalakult. Ma már senki sem vitatja, hogy biztosan és gazdaságosan építeni a talaj fizikai tulajdonságainak, statikájának, dinamikájának és hidraulikájának ismerete, vagyis a talajmechanika alkalmazása nélkül nem lehet.” (Kézdi 1972) áll Kézdi Árpád, Talajmechanika I. című könyvének előszavában.

A talajmechanika egy multidiszciplináris tudományterület, ami napjainkban is folyamatosan fejlődik, megújul. Az innováció, a más tudományágak fejlődéséből átvett újítások segítik a talajmechanika laboratóriumi, terepi és elméleti háttérének fejlődését, új utakat nyitva az egyre bonyolultabb problémák megoldásában (Hencher 2012.). Kutatási területemet a talajmechanika és az agrogeotechnika határára tűztem ki. Az agrogeotechnikában kardinális problémát jelent a mezőgazdasági és terepi talajok talajmechanikai szemléletű jellemzése. Ezen talajokra jellemző, hogy leggyakrabban laza szerkezetűek, alacsony teherbírásúak és a folyamatos művelési, lazítási munkálatok miatt a konszolidációs folyamat sem tud teljes egészében végbe menni (1-1. ábra).



1-1. ábra: Mezőgazdasági talajművelés (tarlóhántás)

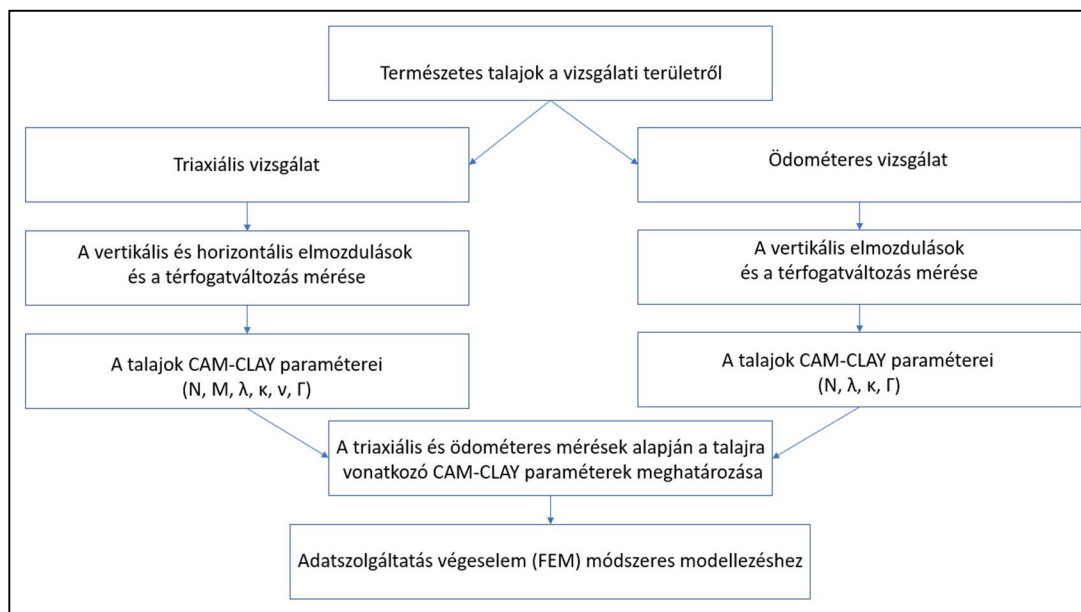
Kutatómunkám a Miskolci Egyetem és a Michelin gumiipari vállalat együttműködéséhez kapcsolódik. A projektben feladataim közé tartoztak a talaj és abroncs érintkezési felületén létrejövő kölcsönhatások talajmechanikai vizsgálatai. A kutatáshoz mezőgazdasági területekről származó talajokat választottam, amelyekre a „laza, konszolidálatlan” jelzöt használom. Mezőgazdasági szempontból ez a jelző a lazítási munkákból adódó, laza, porhanyós szerkezetű, a talaj felső 30-40 cm-es zónájából származó, erősen zavart talajokat jelöli, amelyek konszolidációja nem zajlik le. A geotechnikai laboratóriumba érkező mezőgazdasági talajokat alkalmassá kellett tenni a vizsgálatok végrehajtására úgy, hogy a lehető legtöbbet megőrizzenek mechanikai szerkezeti tulajdonságaikból. Ennek érdekében a mintakészítés során a lehető legkisebb terhelést (50-100 kPa) és legrövidebb tömörítési időt (60 s/réteg) alkalmaztam, így a minta kiindulási állapotát „laza, konszolidálatlan” jelzővel teszem szemléletessé. A mintakészítést követően a mintatestek átlagos száraz térfogatsűrűsége 1,3-1,4 g/cm³ közé esett, a kezdeti hézagtenyező értékek pedig 1,0-1,5 közötti változtak.

A talajmechanikán belül a laza, konszolidálatlan talajok vizsgálata néhány évtizedes múlttal rendelkezik. Napjainkban a precíziós gazdálkodás és a termőterületek védelmére irányuló törekvések a tudományterület újbóli felemelkedését hozhatják, s a laza talajok tekintetében is igény mutatkozik az új tudományos elméletek és technológiák alkalmazhatóságának és bevezethetőségének vizsgálatára. A mezőgazdaság mellett más területeken is találkozhatunk konszolidálatlan talajokkal (háromfázisú rendszerekkel), melyek mechanikai viselkedésének ismerete kiemelten fontos gazdasági és biztonsági kérdés. Ilyen terület például a terepi vagy úgynevezett „off-road” környezetben mozgó járművek járószerkezete és a talaj között kialakuló kölcsönhatások ismerete. A terepi körülmények közötti mozgás igénye elsősorban az erdészeti, a katonai vagy az autósport különböző területein merülhet fel.

Ha laza, konszolidálatlan, háromfázisú anyagok mechanikai vizsgálatairól beszélünk, meg kell említeni a hulladékok mechanikai vizsgálatait is. Habár a hulladékok számos tekintetben eltérnek a talajoktól (szemcseméret határok, anyagi összetétel, pórusfolyadék összetétele, lebomlási folyamatok különbözősége stb.) a külső feszültségekre adott válaszreakcióik hasonlóságokat mutatnak. Szilárd települési hulladékok esetén a deponálást követő laza szerkezetről történő tömörítés (kompaktorozás) a laza talajok tömörödéséhez hasonló viselkedést mutat.

Kutatásom során konszolidálatlan talajok talajmechanikai vizsgálatait és jellemzését tűztem ki célul. A talajmechanikai anyagmodelleket a konszolidált talajokra dolgozták ki, s a talajokat lineárisan rugalmas és ideálisan képlékeny anyagként írják le, valamint a kritikus állapotukban tapasztalható viselkedésükkel jellemzik. Így, bár több anyagmodell is rendelkezésre áll, ezek közül csak kevés alkalmas a laza, konszolidálatlan talajok terhelés alatti viselkedésének vizsgálatára. Kutatási munkám során a vizsgálatba vont talajok talajmechanikai szemléletű leírásához a cambridge-i egyetemen fejlesztett Cam-Clay és a módosított Cam-Clay anyagmodelleket használtam.

A kiválasztott anyagmodell paramétereinek (talajjellemzők) meghatározásához mind ödométeres, mind triaxiális vizsgálatokat alkalmazhatunk (1-2. ábra).



1-2. ábra: A CAM-CLAY paraméterek vizsgálatának lehetőségei ödométeres és triaxiális módszerekkel

Kutatásaim súlypontja a laboratóriumi vizsgálatokba bevezetett innovatív mérési megoldások, új elgondolások vizsgálata volt. Vizsgálni kívánt területek:

- a laza, konszolidálatlan talajok viselkedésének jellemzése, különös tekintettel azok rugalmas viselkedésére;
- a laza, konszolidálatlan talajok tömörödési viszonyainak jellemzése, a feltömörödés során tapasztalható változások vizsgálata;
- a konszolidálatlan talajok harántkontrakciós (Poisson) tényezőjének vizsgálata, mérési lehetőségei;
- a konszolidálatlan talajok nyírószilárdsági paramétereinek vizsgálata, az eredmények értelmezése;
- a talajmintákon belül kialakuló feszültségterek vizsgálata különböző (nyomó, nyomó-nyíró) terhelések esetén.

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ezen fejezet célja, hogy bemutassam a kutatási területem legfontosabb hazai és nemzetközi eredményeit, rávilágítva azokra a főbb kapcsolódási pontokra, ahol a kutatási eredményeim leginkább hasznosíthatóvá válhatnak.

A különböző talajok mechanikai viselkedésével foglalkozó tudományág a talajmechanika, amely több tudományterület összekapcsolódásából jött létre. Fogalmazhatunk úgy is, hogy ez a multidiszciplináris tudományterület a földtan, a talajtan, a mechanika, a mezőgazdaság, a geotechnika és az építészet gyökereiből táplálkozva, az adott kor igényeit szem előtt tartva, az elmúlt évtizedekben önálló tudományterületté fejlődött. A fejlődés – mint minden más tudományterület esetében a talajmechanika területén is – magával vonzotta, és a mai napig vonzza, a kapcsolódó tudományterületek és más fejlődő tudományágak legújabb fejlesztéseinek a bevonását.

2.1 A TALAJMECHANIKA TÖRTÉNETE

A talajokat Földünk egyik legfontosabb erőforrásának tekinthetjük. A földi szférák mindegyikével érintkezik, s szoros kapcsolatban van a litoszférával, bioszférával és atmoszférával. A talajjal kapcsolatos tudományok, mint a főbb tudományok mindegyike, a módszerek és célkitűzések alapján szoros kapcsolatban áll más tudományterületekkel (Stefanovits, Filep és Füleký 1999). A talajtan mérnöki szempontból vett legfőbb területe a talajmechanika, ami a talajok viselkedésének mechanikai szemszögű leírásával foglalkozó tudományterület. A talajmechanika a talajfizika és az alkalmazott mechanika metszete, amely leírja a talaj külső hatásokra adott válaszreakcióját. Eltér a folyadékok mechanikájától és a szilárd testek mechanikájától is, mivel a talajok, a pórusokat kitöltő közeg (általában a levegő és a víz) és a szemcsék (általában agyag, iszap, homok és kavics) heterogén keverékből állnak (Mitchell és Soga 2005.). A tudományág megszületésének is ez volt az egyik alapja, mivel a klasszikusan vett halmazállapotok (szilárd, folyadék, légnemű) mellett a talajok viselkedésének leírása, diszperz rendszerük miatt teljesen eltérő. Használjuk ugyan az előbb említett halmazállapotok mechanikai leíró módszereit, de azokat a talajoknál - eltérő viselkedésük okán - finomítani szükséges.

A talaj építőanyagként történő használata az ősidőktől jelen van a történelemben. A neolitik ósembere elsősorban szakrális célból emelt földdombokat, később védelmi jelleggel készített földsáncokkal óvták magukat a vadállatoktól, vagy a szomszédos törzsektől.

A XV. és XVI. századi reneszánsz nem csak művészeti és építészeti stílusjegyeket hagyott az utókor számára. A kor nagy polihistorai közül az egyik a leghíresebb, Leonardo da Vinci munkásságában már találkozhatunk a mechanika alapjait letevő találmányokkal. Megtalálhatjuk írásaiban, hogy hogyan vélekedtek a hadászati célokból fontos erődítési rendszerekről, milyen megtámasztási, támfalépítési technológiákat álmodtak meg, s támasztottak alá matematikai

számításokkal. Az út- és csatornaépítésről, valamint az ezekhez kitalált emelő- és kotrógépek terveivel jóval megelőzte korát.

A történelem során a talajok viselkedésének mechanikai szemléletű vizsgálata gyakran egybeforr a hadászati célokkal. A XVIII. század nagy francia fizikusa, Charles Augustin de Coulomb földnyomásról alkotott elmélete, bizonyos korlátozások mellett, a mai napig használható. Vizsgálatai során várfalak megerősítésével foglalkozott, s matematikai alapokon megalkotta a Coulomb-féle földnyomás-elméletet. Munkássága pályára állította a talajmechanika földnyomásokat leíró részét, ugyanis a XX. elejéig a földnyomás-elmélet volt a talajjal foglalkozó mérnöki tudományok középpontja.

A talajok kutatásának fontossága egyre inkább előtérbe került. Világszerte végeztek talajjal kapcsolatos, elsősorban tapasztalati (empirikus) vizsgálatokat, s gyűjtöttek adatokat, információkat a különböző talajok viselkedéséről. Az évek során felgyűlt tudásanyag viszont műszaki folyóiratokban, építési naplókban volt szétszórva. Ezek összegyűjtése és rendszerbe foglalása a XX. század kutatóira maradt. Élen járt a munkában Karl von Terzaghi, aki 1925-ben megjelent, „Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage” című munkájával letette a mai értelemben vett talajmechanika alapjait, s kiindulópontja lett az ezt követően induló talajmechanikai kutatásoknak. A talajmechanika fejlődése hatalmas lendületet kapott, párhuzamosan folytak az elméleti és gyakorlati kutatások, s kialakult a tudományág félig elméleti, félig tapasztalati, úgynevezett szemimpirikus jellege.

Hazánk sem maradt ki a nemzetközi folyamatokból, a mára világszinten ismert és elismert Jáky József professzor 1928-ban megalapította az első talajmechanikai laboratóriumot. Világhírűvé elméleti úton levezetett földnyomás-elméletével vált, ami bizonyos feltételek teljesülése esetén mai napig is használt formula (Kézdi, Talajmechanika I. 1972). Feltételezése szerint a függőleges feszültségek alatt bekövetkező oldalirányú kitérés megakadályozásában döntő szerepe van a nyírószilárdságnak, azaz $K = f(\varphi)$ kell, hogy legyen. A szemcsés talajokra levezetett nyugalmi földnyomási tényező (K_0) értéke ma az egész világon általánosan alkalmazott jó közelítés (Szepesházi 2011).

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (2.1)$$

(A (2.1) egyenletben φ az anyagra jellemző belső súrlódási szög.) Jáky mellett mindenképpen meg kell említenünk Kézdi Árpád és Széchy Károly nevét is, akik a magyarországi talajmechanika megalapozásában értek el elévülhetetlen érdemeket.

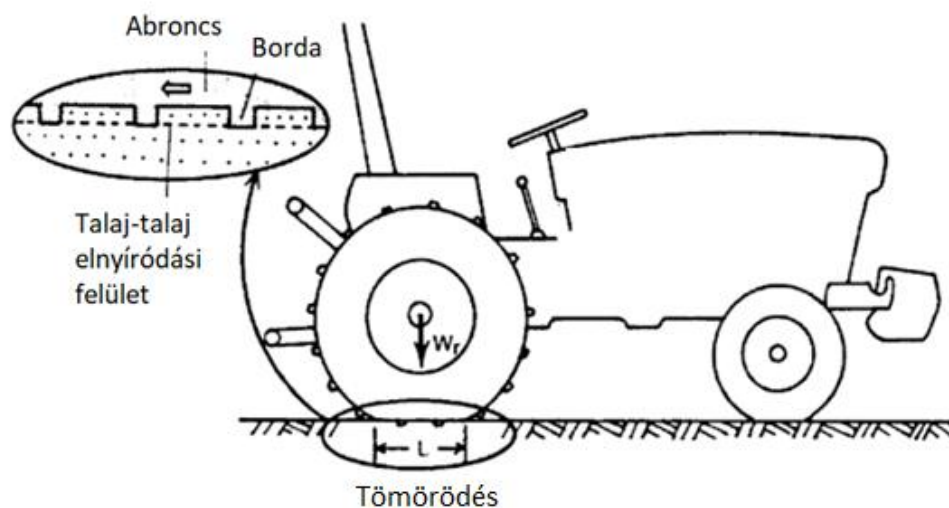
A talaj változó és bonyolult jellegét tekintve, nyugodtan megállapíthatjuk, hogy a történelem előtti időktől kezdve napjainkig kevés szerkezeti probléma megoldása kívánt annyi figyelmet, eredetiséget és invenciót, mint éppen a talajjal kapcsolatos kérdések (Kézdi 1972). A fejlődés az innováció mindig mozgató rugója a tudománynak, nincs ez másképp a talajmechanikával sem. Napjainkban is, a talajmechanika fejlesztése érdekében keresnünk kell a kapcsolódási pontokat más tudományágak elméleteivel, eszközeivel. Az általános, nagy folyamatok, mechanikai összefüggések

ugyan már a XX. század közepére tisztázódtak, de ezek finomítása, új adatnyerési lehetőségek vizsgálata, a mintavételi módszerek fejlesztése, s a korunkat jellemző modellezés egyre nagyobb térnyerése igényt formál a további kutatásokra, fejlődésre.

2.2 TALAJMECHANIKAI KÉRDÉSEK A MEZŐGAZDASÁGBAN

A talajok szerepe a mezőgazdaságban kettős, egyrészt megfelelő szilárdsággal kell rendelkezniük, hogy a rajtuk közlekedő járművek és állatok mozgását lehetővé tegyék, másrészt biztosítaniuk kell a növényzet fejlődése során a megfelelő tápanyag és levegőellátást a gyökérszónában. A mezőgazdaságban elsődleges a talajok, mint rendszerek védelme, így a mezőgazdasági terepen mozgó járművek járószerkezeteinek fejlesztésénél fontos szempont a talajvédelem, a talajok káros tömörödésének az elkerülése.

A mezőgazdasági vontatók szempontjából a talaj-abroncs (2-1. ábra) kapcsolat vizsgálata kiemelten fontos kérdés. Az érintkezési felületen a függőleges terhelések hatására tömörödési folyamatok játszódnak le, míg a kerekek forgása súrlódási ellenállást és nyírófeszültséget indukál a talajban. Ezen komplex folyamatok modellezése megfelelő talajparaméterek nélkül nem lehetséges. Mivel a konszolidálatlan vagy gyengén konszolidált talajok viselkedése a talajmechanika kevésbé vizsgált területe, így az ezen a területen végzett vizsgálatok a kor igényeinek megfelelő számítógépes modellezések számára különösen fontosak. Vizsgálataimmal segítséget kívánok nyújtani az abroncs által átadott terhelés, s az erre adott talajreakció közötti összefüggések jobb megértésében.



2-1. ábra: Talajok igénybevétele mezőgazdasági vontató járószerkezete alatt

A mezőgazdasági járművek terepen haladása és a legeltetés intenzívebbé válása miatt a talajromlás széles körben elterjedt jelenség. A mezőgazdaságban és az erdészetben használt gépek és járművek súlya az elmúlt 40 évben megnégyszereződött (Horn 2015). Európában mintegy 33 millió

hektárt érint a talajtömörödés problémája (Agnoletti, és mtsai. 2017). Ebből 20 millió hektár a kelet-európai régióban található, ami a mezőgazdasági földterület 37,5% -át teszi ki (Birkás, Jolánkai és Schmidt 2008, Batey 2009), Brus és van den Akker (Brus és van den Akker 2018) Hollandiában végzett felmérései alapján a túlterhelt altalajok 43%-a a használat következtében feltömörödöttnek tekinthető. Ezek azonban nagyon durva becslések, és nem alapos értékelés eredménye. Jones és munkatársai (Jones, Spoor és Thomasson 2003) arról számoltak be, hogy jelenleg a meglévő információk alapján az európai altalajok tömörítésére való sebezhetőségének azonosítására irányuló minden kísérlet térbeli alapon alapvetően javul. Mivel a talaj véges erőforrás, amely potenciálisan gyors lebomlási sebességgel és rendkívül lassú regenerációs folyamatokkal (Van-Camp, és mtsai. 2004) rendelkezik, a fenntartható talajgazdálkodás az egyetlen megoldás a globális kérdések, például az élelmiszerbiztonság, az energia- és vízigény, az éghajlatváltozás és a biodiverzitás kezelésére (Lal 2009). A súlyos degradációval szembeni földgazdálkodás érdekében, a talajtömörítés különböző skálákon történő értékelése és meghatározása terén végzett több évtizedes tudományos kutatás jelentős előrehaladást mutatott. A mezőben a tömörítés mértéke jelentősen változó lehet a mezőgazdasági gépek forgalmának intenzitásától és eloszlásától és/vagy a talajművelő eszközök hatásától függően (Mouazen, Ramon és De Baerdemaeker 2001). A szezonális földgazdálkodási gyakorlatok és az éghajlati változók miatt a felszíni talaj tulajdonságai rövidtávon változhatnak (Ferreira, és mtsai. 2015), de a mezőgazdasági felhasználású mezők talajtömörödése évtizedek alatt is fennállhat (Kellner és Hubbart 2016).

A talajtömörödés feltérképezése nagy jelentőséggel bír az erózióra, a felszíni vizek lefolyására és az instabil, érzékeny tömörített talajfelszín meghatározására, főleg olyan területeken, ahol a nehéz gépek áthaladhatnak, így a talajok tömörsége nagyfokú heterogenitást mutat. A talajtömörítés feltérképezése a földdegradáció kezelésében kulcsfontosságú kérdés, kihívást jelentő feladat, mivel tartalmaznia kell a talajtömörítés dinamikus jellegére vonatkozó információkat, azaz az idő és tér (beleértve a mélységet is) változékonyságát.

A talajtömörödés miatt a mezőgazdasági területek talajromlása a világ minden táján széles körben elterjedt jelenség. Korunk nagy feladatai közé tartozik ezen folyamatok modellezése, amit elsősorban a folyamatok dinamikus természete nehezít. Az időben és térben rendkívül változatos, a talajtömörítés térképeinek elkészítése kihívást jelentő feladat, aminek a talaj oldaláról nézve egyik leginkább bizonytalan része a megfelelő talajparaméterek használata a modellszámítások során. A talajtömörítés feltérképezésének jelenlegi megközelítéseit és módszereit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

(1) A behatolási ellenállás (PR) és az elektromos vezetőképesség közvetlen mérése, amely geostatikus megközelítéssel vagy földrajzi adatokkal növelhető;

(2) a függőleges feszültség kiszámítása, figyelembe véve a teljes terhelést és az érintkezési területet, a talaj jellemzőit és a gép terhelését;

(3) a pedo-transfer funkciókból származó előkonszolidációs feszültség kiszámítása (Nemes, Wösten és Schaap 2003).

Nagyobb léptékben a közvetett kapcsolatokat arra használják, hogy a mért értékek, például PR-értékek, talajnedvesség vagy szerves anyagok alapján meghatározzák a számítási kockázatot, kombinálva a mélység-víz indexxel. (Alaoui és Diserens 2018)

A fenti felsorolás alapján látható, hogy a mezőgazdasági területek talajviszonyainak modellezésében a legfontosabb feladat a talaj állapotának és a talajra ható külső terheléseknek a pontos felmérése.

A talaj szilárdságát nagy mértékben befolyásolja annak konszolidáltsági foka, amelyet a Casagrande-féle laboratóriumi eljárás során kapott talaj feszültség-alakváltozás viszonya alapján lehet meghatározni. A talaj szilárdságát számos tényező befolyásolja, mint például a textúra, a szervesanyag-tartalom és különösen a talajnedvesség. Az altalajban, külső terhelések hatására keletkező feszültségek leírására felállított, Boussinesq egyenleten alapuló modellek a feszültségnövekedés hatását kevésbé tudják kezelni és azokat is csak homogén talaj esetén (Boussinesq 1885). A talajok szerkezete, különösen a felső talajzónákban igen változatos, így a feszültségeloszlást leíró talajmechanikai módszerek alkalmazhatósága korlátozott.

A végeelemes módszer (FEM) alapú modellekkel a valóságot jobban közelítő határfeltételeket vizsgálhatunk a változó talajfelszín (érintkezési terület és felületi feszültségek), valamint a talaj mechanikai tulajdonságainak (azaz a feszültség-alakváltozás kapcsolatokat) egyidejű figyelembevételével. Ezen modellek lehetőséget nyújtanak a feszültség terjedésének pontosabb kiszámításához a mélység és a keletkező talaj elmozdulások függvényében. Kimutatták továbbá azt is, hogy a FEM modellek megfelelőbbek a terepi forgalom során előidézett talajstressz 3D-eloszlásának vizsgálatához, és előrehaladott modellezési megközelítések léteznek, amelyek magukban foglalják a változó pórusvíznyomás és a talaj deformációs viselkedésének összekapcsolását. Az ilyen modellek alkalmazását leginkább korlátozó tényezők a terepi viszonyok szempontjából a komplexitásuk és a vizsgált talajok mechanikai tulajdonságaink követelménye, amelyeket rutinszerűen nehéz meghatározni. A talajtömörítési modellben (SOCOMO) a talajfeszültségeket a Söhne (Söhne 1958) által kifejlesztett módszerrel határozzák meg, amikor a talajelem függőleges feszültségét egy pontterhelés alapján számítják ki. A talaj egy pontján a teljes feszültséget úgy határozzák meg, hogy a teljes terhelést és a kontakterületet egységnyi kis elemekre osztják, amelyeket pontterhelésnek kell tekinteni, és az összes pontterhelésből származó feszültségeket összegzik. Ebben a modellben a talaj mechanikai tulajdonságait a konszolidáció előtti feszültség, a kohézió és a belső súrlódás szöge jellemzi. A talajtömörítés várhatóan akkor fordul elő, ha a normál irányú főfeszültség meghaladja a konszolidáció előtti feszültséget.

3 VIZSGÁLT ANYAGOK ÉS ALKALMAZOTT ELJÁRÁSOK BEMUTATÁSA

Ebben a fejezetben a kutatómunkám elkészítése során vizsgált talajtípusokat és a talajok jellemzéséhez alkalmazott eljárásokat és anyagtörvényeket mutatom be. Az anyag és módszer fejezet célja, hogy a geotechnikai laborvizsgálatok eszközeivel mutassam be a vizsgálatba bevont talajokat, így átfogó képet nyújtsak azok viselkedéséről konszolidált állapotban. Az talajmechanikai vizsgálatok eredményei képet adhatnak a talajok várható viselkedéséről, elsősorban nyomó- és nyíróterhelések alatt, de segítenek az azonosításukban is, hiszen a szemeloszlási vizsgálatok és konzisztenciahatárok meghatározásával azonosíthatjuk a talajokat, valamint megtudhatjuk a finomszemcsék arányát. Az iszap- és agyagtartalom (finomszemcsék, $D < 0,063$ mm) alapjaiban határozza meg a talaj szivárgási tényezőjét, így konszolidációját, tömörödését és nyírószilárdsági paramétereit is, ezért ismerete kiemelten fontos.

A talajmechanikai laboratóriumi vizsgálatok mellett irodalomkutatást végeztem, olyan kutatók munkássága körében, akik korábban már foglalkoztak a kutatásaimhoz kiválasztott területek és talajok vizsgálatával és kutatási eredményeiket összehasonlítási alapként használhatom fel.

3.1 VIZSGÁLT TALAJOK TALAJTANI BEMUTATÁSA

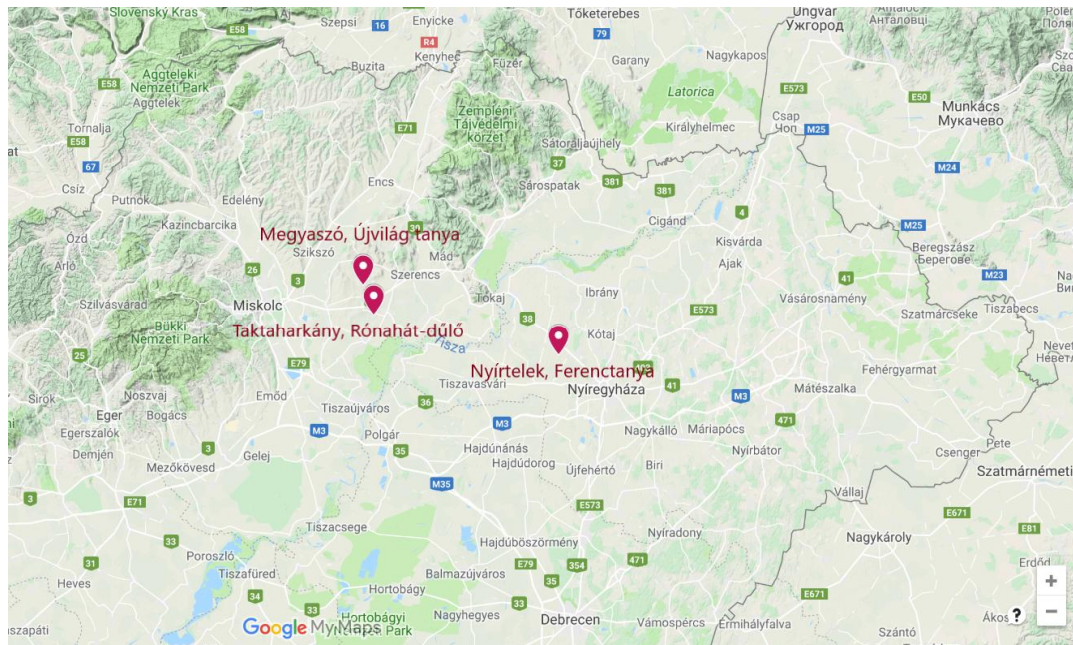
Kutatásom céljaként a laza, konszolidálatlan talajok talajmechanikai szemléletű vizsgálatait tűztem ki. A talajállapot megjelölése egy igen szűk területét jelenti a talajmechanikának és a geotechnikának, ugyanis a mérnöki tervezés során a laza talajok nem igazán kedvezőek, vagy igen nagy munka befektetésével javíthatók a talajparaméterek olyan szintre, amely által alkalmasak lehetnek földművek terheinek átvételére vagy alapozások gazdaságos tervezéséhez.

Laza, konszolidálatlan talajokkal sok helyen találkozhatunk, de problémát leginkább az erdészeti, terepi („off-road”), sivatagi és mezőgazdasági művelés alatt álló területeken jelentenek. Terhelés hatása alatti viselkedésük vizsgálatának jelentőségét elsősorban a fent említett területeken mozgó járművek járószerkezetének optimalizálása és a talajok tömörödésének hatására bekövetkező esetleges mezőgazdasági terméskiesés indokolja.

Vizsgálataimhoz mezőgazdasági területekről származó, felszínközeli talajmintákat használtam. A talajok négy különböző magyarországi, és egy franciaországi területről származnak, amelyek a következők:

- Nyírtelek, Ferenc tanya (jelölése: NYT, talajtani talajfélesége: homok)
- Megyaszó, Újvilág tanya (jelölése: MA, talajtani talajfélesége: homokos vályog)
- Taktaharkány, Rónahát-dűlő (jelölése: TH, talajtani talajfélesége: agyag).
- Cegléd (jelölése: CEG, talajtani talajfélesége: homokos vályog)
- Pissos (Franciaország) (jelölése: PIS, talajtani talajfélesége: homok).

A nyírteleki, megyaszói és taktaharkányi talajok jól jellemzik a Magyarországon megtalálható, mezőgazdasági termelés alá vont termőterületek talajainak spektrumát (3-1. ábra). Ezen talajok vizsgálatát kiemelt fontosságúnak tekintettem, ezért a kutatómunka során a vizsgálatok jelentős részét ezeken végeztem.



3-1. ábra: Nyírteleki, megyaszói és taktaharkányi talajok származási helyei

A ceglédi területről és a Franciaországból származó talajmintákat csak egyes speciális vizsgálatoknál használtam, így ezek részletes talajmechanikai vizsgálatai nem készültek el. A ceglédi talaj szemeloszlási görbéje alapján nagy hasonlóságot mutatott a megyaszói területről származóval, a francia kutatási helyről érkező talaj pedig homokjelleget mutat.

3.1.1 Irodalmi áttekintés a vizsgált talajokkal kapcsolatban

A vizsgálatra kiválasztott talajok három olyan terület környezetéből származnak, melyekre vonatkozóan több évtizedes módszeres és szisztematikus mérési vizsgálati eredmények állnak rendelkezésre (Kiss 2002).

Stefanovits 1994-ben közölt kutatómunkájában magyarországi mezőgazdasági talajok degradációs folyamatait vizsgálta, amely kutatás részét képezték a fent említett talajok is (Stefanovits 1994).

Birkás és munkatársai a területen végzett kutatómunkájuk során az altalaj tömörödési vizsgálatait végezték el (Birkás, és mtsai. 2000).

Talajfizikai és művelésenergetikai témakörben pedig Sinóros-Szabó akadémiai doktori értekezésében foglalta össze a területeken szerzett tapasztalatait (Sinóros-Szabó 1992).

Az eddigi vizsgálatok főleg terepi és nagymodell kísérletek voltak, s elsősorban mezőgazdasági megközelítéssel mutatták be a talajváltozásokat. Ilyen tanulmány Kiss munkája is, amelyben mezőgazdasági gumiabroncsok alatt kialakuló talajtömörödések és deformációkat nagy részletességgel vizsgál. Kutatásai során „talajvályuban” építette fel a vizsgált talajok természetes szerkezetét úgy, hogy azok nedvességtartalma változtatható legyen, ezzel kutatásába be tudta vonni a talajok tömörödését nagy mértékben befolyásoló víztartalom hatását és annak változását is (Kiss 2002).

Kiss 2002-es disszertációjában összefoglalja az adott talajok legjellemzőbb, mezőgazdasági szemléletű tulajdonságait. (3-1. táblázat)

3-1. táblázat: A vizsgált talajok legfontosabb agronómiai tulajdonságai (Kiss 2002)

Talajjellemzők	Nyírtelek (homoktalaj)	Megyaszó (vályogtalaj)	Taktaharkány (agyagtalaj)
Térfogattömeg [g/cm^3]	1,49	1,37	1,28
Pórustérfogat [%]	44,81	48,30	50,58
Talajnedvesség ($pF_{2,5}$) [tf%]	45%	38%	67%
A talaj sűrűsége [g/cm^3]	2,70	2,65	2,59
Póruszám [cm^3/cm^3]	0,81	1,07	1,02

A 3-1. táblázatban bemutatott értékek talajlaboratóriumi vizsgálatok eredményeit foglalják össze. A táblázatban látható paraméterek alapján megállapítható, hogy a vizsgált talajokat nagy hézagtérfogat („pórustérfogat”), alacsony térfogatsűrűség, valamint közepes térfogati nedvességtartalom jellemzi.

Mikita 2013-ban írt PhD értekezésében egészen más, újszerű megközelítésben vizsgálta a fenti talajokat. A Computer Tomográfus (CT) vizsgálati módszer hidro- és mérnökgeológiai alkalmazási lehetőségeit vizsgálva szintén a nyírteleki és megyszói talajokat használta. Kutatómunkája során felszínközeli zavartalan talajmintákon végzett laboratóriumi kísérleteket. Megállapításokat tett az adott talajok talajfizikai és ásványtani összetételére, valamint típus szerint osztályozta a talajokat (Mikita 2013).

A vizsgált talajokat és azok irodalmi hivatkozások alapján gyűjtött, talajtani megközelítésű tulajdonságait az alábbiakban foglalom össze:

- Homoktalaj: a humuszos homoktalaj minták Nyírtelek-Ferentanya területéről származnak. Fizikai talajféleségét tekintve homok. A felszínhez közeli, talajtani A-szintből származó minták makromorfológiai jellemzői: világos, szürkésbarna, tömődött humuszos homoktalaj. Jellemző

a talajszemcsék közötti alacsony kohézió, a szemcsék könnyen gördülnek el egymáson. A felső kb. 30 cm rétegben a vizuálisan észlelhető szerves anyag tartalom alacsony (Mikita 2013).

A Nyírség északi részén, üledékes eredetű iszapos finom homokon, illetve eolikus homokos löszön mezőségi talajok fejlődtek. Egy méternél vastagabb, 3-4%-nyi, a mélységgel fokozatosan csökkenő szervesanyagot tartalmazó humuszos szinttel rendelkeznek, a szénsavas mész a humuszos szint alján megtalálható. Ezek a talajok kis területen találhatóak (Szegei 2009).

A hazai genetikai és talajföldrajzi osztályozásban a homokos szövet fő típus szinten nem jelenik meg. Típus szinten a „Futóhomok talajokat” és „Humuszos homoktalajokat” különítenek el, amelyek a „Váztalajok” fő típusba tartoznak. Talajtípus szintjén homokos szövetre történő utalás található a „Közép és délkelet európai barna erdőtalajok” esetében a „Kovárványos barna erdőtalajok” kialakulását tekintve (Baranyai, és mtsai. 1987). Altípus szinten szintén megjelenik a homokos szövetre történő utalás a „Rozsdabarna Ramann – féle erdőtalajoknál”. A „Csernozjom” fő típusba tartozó „Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom” talajok is kialakulhatnak homokos talajképző kőzeten (Szabolcs, és mtsai. 1966).

Ez a jellegzetesen homoki táj területileg az ország legnagyobb összefüggő homokterülete, melyet keleten a Kraszna, északon a Tisza határol, nyugat és dél felé pedig fokozatosan megy át a Debreceni löszhátba (Szücs és Kléh 1954).

- Homokos vályogtalaj: A Megyaszó-Újvilág tanya területéről vett talajminták genetikai osztályozási rendszer szerinti besorolása réti csernozjom, fizikai talajfélesége vályog. A homokos vályogtalaj a szerkezeti elemeit tekintve leginkább heterogén talajtípus (Císlarová és Votrubová 2002).
- Agyagtalaj: Az agyagtalaj minták a Taktaharkány, Rónahát dülő környezetében található szántóföldről származnak. A talaj a genetikai osztályozási rendszer besorolása szerint réti agyagtalaj, fizikai félesége agyag (Kiss 2002).

Disszertációmban mezőgazdaság talajok vizsgálatait mutatom be a talajmechanika eszközeivel, ami a két tudományterület nevezéktanai közötti különbség problematikáját hordozza magában.

3-2. táblázat: A vizsgált talajok megnevezései

Talaj származása	Talajtani megnevezés	Talajmechanikai megnevezés	Jelölés a dolgozatban
Nyírtelek	Homoktalaj	Homokos iszap (saSi)	Homokos talaj (NYT)
Megyaszó	Homokos vályogtalaj	Iszap (Si)	Iszapos talaj (MA)
Taktaharkány	Agyagtalaj	Iszapos agyag (siCl)	Agyagos talaj (TH)
Cegléd	Homokos vályogtalaj	Iszap (Si)	Iszapos talaj (CEG)
Pissos	Homoktalaj	homok (Sa)	Homokos talaj (PIS)

Irodalomkutatás segítségével elvégeztem a kiválasztott talajok mezőgazdasági besorolását, valamint laborvizsgálatokkal a talajok talajmechanikai azonosító vizsgálatait is (lásd 3.2 fejezet).

A talajmechanikai és talajtani elnevezések ötvözéséből alkottam meg a talajok dolgozatban használt nevezéktanát, amelyet a 3-2. táblázatban foglaltam össze.

3.2 A VIZSGÁLT TALAJOK TALAJMECHANIKAI JELLEMZÉSE

Kutatásaim során különböző eredetű, elsősorban aktív, mezőgazdasági területekről származó talajokat választottam. A területek jellegéből adódóan jellemző rájuk, hogy az év különböző szakaszaiban különböző tömörségi és víztartalmi állapotok jellemzik őket, valamint, hogy szerkezetük, igénybevételük is folyamatosan változik. A talajok használhatóságát befolyásoló tényezők fontos gazdasági, talajminőségi és mezőgazdasági hatással bírnak, ezért vizsgálatuk kiemelten fontos és több különböző szakterület vizsgálati módszereinek bevonását igényli.

A talajmechanikai vizsgálatokkal a talajok mechanikai ellenállását, tömörödését, konszolidációját jellemezhetjük. A statikus és/vagy dinamikus külső hatások a talajtesten belül változásokat okoznak, amik a talaj későbbi viselkedésére is hatással vannak. A mérési eredmények alapján feltárt összefüggések kaput nyithatnak a későbbi számítógépes modellezési megoldások felé, amelyek segíthetik a talajok viselkedésének előrejelzését, például a tömörödési folyamatok prognosztizálásában. A mezőgazdaságot tekintve így optimalizálhatók az egyes talajmunkák, öntözési lazítási, tömörítési feladatok, előre számíthatóvá válhat a talaj viselkedése különböző külső hatások esetén.

A vizsgálataimba bevont laza mezőgazdasági talajok könnyebb összehasonlíthatósága érdekében talajmechanikai laboratóriumi vizsgálatokat végeztem. Ezek célja a talajok viselkedésének vizsgálata a talajmechanika ismert és alkalmazott módszerei alapján. A vizsgálatokkal a választott talajok tömöríthetőségét, nyírószilárdsági paramétereit, víztartalomtól függő viselkedését, vízfelvevő képességét, konszolidációs jellemzőit kívántam feltárni. Laboratóriumi mérés sorozataimat az alábbiak szerint állítottam össze:

- Szemeloszlási vizsgálatok (MSZ14043-3:1979 1979.)
- Konzisztencia határok vizsgálata (MSZ14043-4:1980 1980.)
- Lineáris zsugorodás
- Víztartalom meghatározása (MSZE CEN ISO/TS 17892-1:2004 2006.)
- Konszolidáció (MSZE CEN ISO/TS 17892-5:2004 2010.)
- Proctor vizsgálatok (MSZ14043-7:1981 1982.)
- Direkt nyíróvizsgálatok (MSZE CEN ISO/TS 17892-10:2004 2010.)
- Enslin-Neff-féle vízfelvevő képesség

Az elvégzett vizsgálatok eredményeit az alábbi alfejezetekben mutatom be, összefoglalva azok jelentőségét a konszolidált és konszolidálatlan talajok tekintetében.

3.2.1 Szemeloszlási vizsgálatok

Egy talaj szemeloszlásán azt értjük, hogy a különböző nagyságú szemcsék milyen súlymennyiséget képviselnek a teljes halmazban. A vizsgálat elvégzése a talaj általános megítélése, osztályozása miatt fontos, de az eredményeknek közvetett gyakorlati alkalmazása is ismert, gondoljunk például a szivárgási tényező becslésére vonatkozó Jáky vagy Terzaghi összefüggésre. Képet kaphatunk a talajok tömöríthetőségéről, fagyérzékenységéről valamint a talajok stabilizálhatóságát is becsülhetjük (Kézdi 1972).

A szemeloszlási vizsgálat célja a talajt alkotó szemcsék nagyságának, valamint az egyes kiválasztott szemcsehatárok közötti szemcsék súlyszázalékának meghatározása (Kézdi 1976).

A vizsgálat eredményét a szemeloszlási görbén szemléltetjük, ahol a görbe egy pontja megmutatja, hogy a vizsgált szemcsehalmazban az adott szemcseméretnél kisebb szemcsék aránya mennyi az összes szemcse tömegéhez képest.

A kiválasztott talajok szemeloszlási görbéjének meghatározását a MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2004 2006. számú szabvány útmutatásai alapján hajtottam végre. A talajok szemrevételezése alapján a szitálás és hidrometrálás együttes alkalmazásával végeztem.

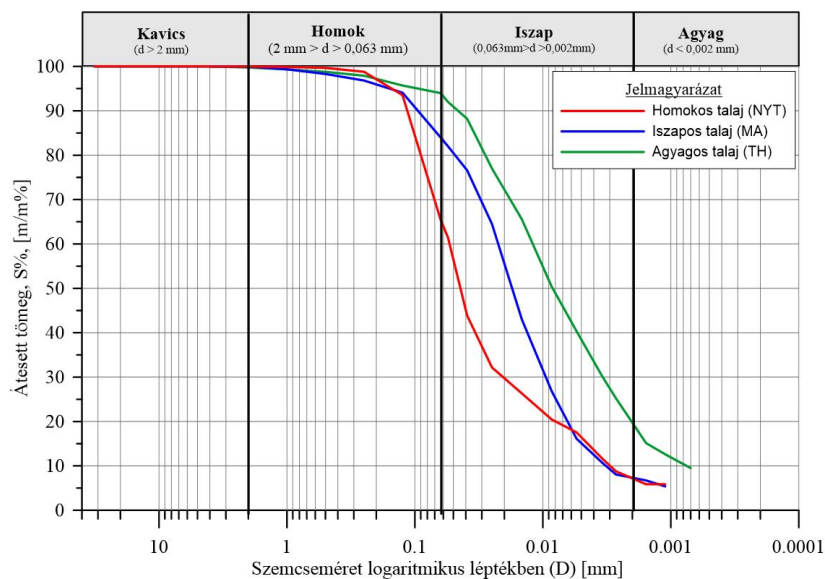
A szemcseméret eloszlása az egyik legfontosabb talajfizikai jellemző. A durva szemcsés talajok osztályba sorolása jórészt a szemeloszláson alapul. A talajok számos geotechnikai és hidrogeológiai tulajdonsága áll összefüggésben a szemeloszlásukkal. A szemeloszlás ismerete lehetővé teszi a talaj leírását azáltal, hogy a szemcseméreteket különálló osztályokra bontja (MSZE-CEN-ISO/TS-17892-4:2004 2006.).

A mérési eredményeket a 3-2. ábra szemlélteti, a 3-3. táblázatban pedig a szemeloszlási görbe alapján a hatályos szabvány szerint azonosítottam a talajtípusokat. A 3-3. táblázat tartalmazza még a szemeloszlási görbe nevezetes pontjait, valamint az ezekből számított, a görbe lefutását jellemző egyenlőtlenégi mutató (C_u) és a görbületi mutató (C_c) értékét.

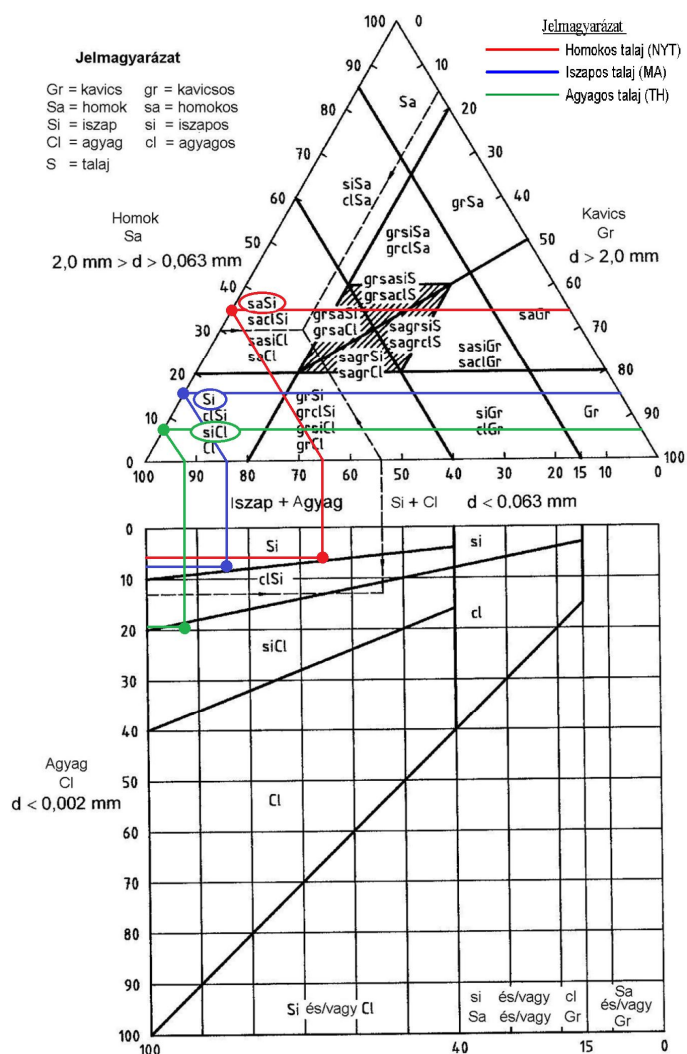
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad 3.1$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \cdot D_{60})} \quad 3.2$$

ahol D_{10} ; D_{30} , D_{60} az adott súlyszázalékhoz tartozó szemcseátmérő.



3-2. ábra: A vizsgált talajok szemeloszlási görbéi



3-3. ábra: A vizsgált talajok ábrázolása háromszög diagramon

A szemeloszlási görbék alapján a három, kiemelten vizsgált talaj nagy arányban tartalmaz iszap frakciót, különbözőségüket az adja, hogy változó arányban tartalmaznak homok és agyag mérettartományhoz tartozó szemcséket.

A homokos és iszapos talaj közel azonos agyagtartalommal bírnak, míg az agyagos talaj közel 20%-os agyagtartalmával kiemelkedik ebből a sorból. A szemeloszlási vizsgálatokkal meghatározó különbségeket állapítottam meg az egyes talajok között, mely különbségek a viselkedésükben is meg kell, hogy jelenjenek. Ezek az arányok döntően befolyásolják a talajok rugalmas és képlékeny viselkedését, valamint a víztartalomhoz köthető tulajdonságaikat.

A finom és durva szemcsék aránya hatással van a talajok nyírószilárdsági paramétereire is, amikhez köthető például a terepen mozgó járművek úgynevezett kapaszkodó képessége is.

3-3. táblázat: A vizsgált talajok megnevezése a szemeloszlásuk alapján

Talajtípus	Homok%	Iszap%	Agyag%	D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	Cu	Cc	Jelölés
Homokos talaj	34,5	59,7	5,8	0,05	0,02	0,003	16,7	2,67	saSi
Iszapos talaj	16,0	77,3	6,7	0,025	0,0095	0,0035	7,1	1,03	Si
Agyagos talaj	8,0	72,3	19,7	0,016	0,0034	0,0008	20,0	0,90	siCl

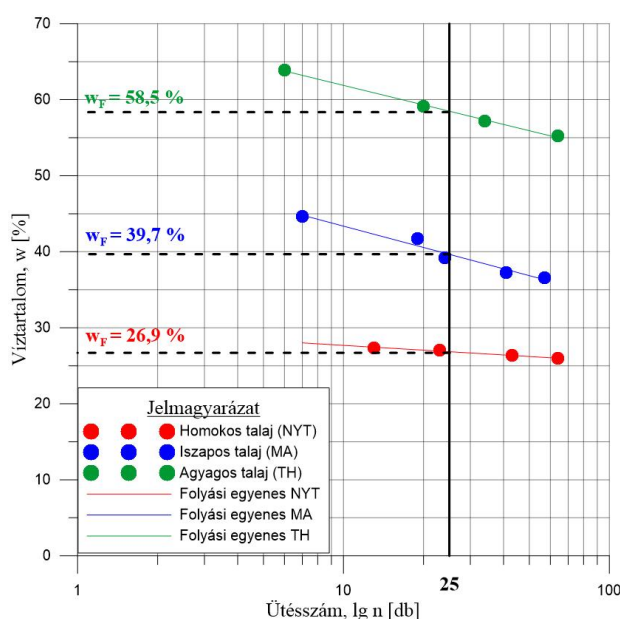
A labormérések során meghatározott eredmények elsősorban a talajazonosításban voltak segítségemre. A továbbiakban a talajokat a 3-3. táblázat első oszlopában használt névvel jelölöm, utalva a szemcseösszetétel meghatározó frakcióira. A szemeloszlási görbék alapján különbségét tudtam bemutatni a vizsgált talajok között. A további vizsgálatok során ezek a különbségek a kiválasztott talajok között az összenyomódási és nyírási folyamatok során különbségeket jelenthetnek.

3.2.2 Konzisztencia határok

A folyási határ az a víztartalom, amelynél a talaj a folyós állapotból a képlékenybe megy át. Az MSZE-CEN-ISO/TS-17892-12:2004 (2006) szabvány a 60 g/60°-os és a 80 g/30°-os ejtőkúp használatát szorgalmazza. A folyási határ alternatív, korábbi meghatározási módja a Casagrande-módszer. A tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy ennek eredményeit számos szubjektív és objektív tényező befolyásolja. Ezen túlmenően a Casagrande készülék és vizsgálat számos apró, de jelentős változáson ment át azóta, hogy azt Casagrande 1932-ben első ízben javasolta. Emiatt a különböző korszakokban készült vizsgálatok eredményeinek összehasonlíthatósága problematikus. Ezért a folyási határ meghatározására előnyben kell részesíteni az ejtőkúpos módszert. (MSZE-CEN-ISO/TS-17892-12:2004 2006.) A vizsgálatok idején még nem állt rendelkezésre kúpos penetrométeres berendezés, ezért a folyási határok megállapításánál a Casagrande-féle készüléket használtam (MSZ14043-4:1980 1980.).

A talaj sodrási határa az a legalacsonyabb víztartalom, amelynél a talaj még képlékeny. A sodrási határt általában a folyási határral együtt határozzák meg (MSZE-CEN-ISO/TS-17892-12:2004 2006.).

A magas agyag és iszap tartalmú, finomszemcsés talajok hazai osztályozásának alapja a konzisztenciahatárokból számolt plasztikus index ($I_p = w_L - w_p$), amennyiben a finomszemcsék aránya meghaladja a 40%-ot és a plasztikus index 10%-nál nagyobb ($S_{0,063\%} > 40\%$ és $I_p > 10\%$). A plasztikus index meghatározásához vizsgáltam a kiválasztott talajok folyási (w_L) (3-4. ábra) és sodrási (w_p) határait. A konzisztencia határok víztartalmak, amelyek megmutatják, hogy az adott talaj a határokon belül milyen viselkedést mutat. Ezek alapján megkülönböztetünk merev, félig merev, plasztikus (képlékeny) és folyós állapotokat.



3-4. ábra: A vizsgált talajok folyási egyenesei

A vizsgálatok során kapott eredményeket az alábbi, 3-4. táblázatban foglaltam össze. A kísérleteket az MSZ 14043-4:1980 szabvány alapján végeztem.

3-4. táblázat: A vizsgált talajok konzisztencia határai

Talajtípus	Folyási határ, w_L [%]	Sodrási határ, w_p [%]	Zsugorodási határ, w_{zs} [%]	Plasztikus index, I_p [%]
Homokos talaj	26,9	19,3	16,3	7,6
Iszapos talaj	39,7	21,5	16,6	18,2
Agyagos talaj	58,5	28,7	5,92	29,8

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy a homokos talajnak nevezett talajtípust a talajmechanika szabályai szerint annak szemeloszlási görbéje alapján tudjuk definiálni. A vizsgált iszapos talaj közepes plaszticitású, sovány agyag, míg az agyagos talaj a plasztikus index alapján közepesen plasztikus, közepes agyag.

A konzisztencia határok rámutatnak a finomfrakció jelentőségére. Láthatjuk, hogy az iszap és agyag frakció növekedésével a talajok viselkedése a víztartalom változás hatására is különböző. A növekvő finomfrakció arányok elsősorban a talajok képlékeny viselkedését hangsúlyozzák ki.

3.2.3 Lineáris zsugorodás

A lineáris zsugorodás az előre megformázott talajkocka egységnyi víztartalomvesztés hatására bekövetkező élrövidülése. A laboratóriumi mérések eredményei (3-5. táblázat) arról adnak információt, hogy a kiválasztott talajok finomszemcséinek hatása az agyagos talaj esetén domináns, térfogatváltozása a víztartalom-csökkenés hatására jelentős, zsugorodó agyagtalajról van szó. A szemcsék közti kapilláris szívóerő a homokos és iszapos talaj tekintetében kis mértékű.

3-5. táblázat: Lineáris zsugorodás vizsgálat eredményei

Talajtípusok	Telítési határ, T [%]	Zsugorodási határ, w _{zs} [%]	Zsugorodási viszonyszám, R	Legnagyobb térfogatváltozás, V _{max} [%]	Lineáris zsugorodás, Z _{SL} [%]
Homokos talaj	21,7	16,3	1,78	9,6	3,0
Iszapos talaj	27,9	16,6	1,79	20,2	6,0
Agyagos talaj	34,3	5,92	1,88	53,3	13,3

A lineáris zsugorodás (Z_{SL}) jó mérőszáma az elagyagosodott, degradálódott talajszerkezetnek. Az ilyen talajok nedves állapotban víztartóként viselkednek és megakadályozzák a víz lejutását a gyökérszónába, ami a növénykultúra fejlődését gátolja. Száraz állapotban a magas agyagtartalmú talajok keménnyé válnak, ami a talajművelést megnehezíti. A nagy lineáris zsugorodást mutató talajok esetén a kiszáradás során kialakuló makrorepedések figyelhetőek meg.

3.2.4 Konzolidáció

Az ödométeres vizsgálatból származtatható fő paraméterek a talaj összenyomhatóságára és elsődleges konzolidációjának a sebességére vonatkoznak. Egyes esetekben az előterhelő nyomás, a másodlagos összenyomódás sebessége és a duzzadási jellemzők is megállapíthatók. A zavartalan mintán végzett ödométeres vizsgálatból származtatható fő paraméterek a következők:

- 1) összenyomódási paraméterek (ϵ , E_{oed});

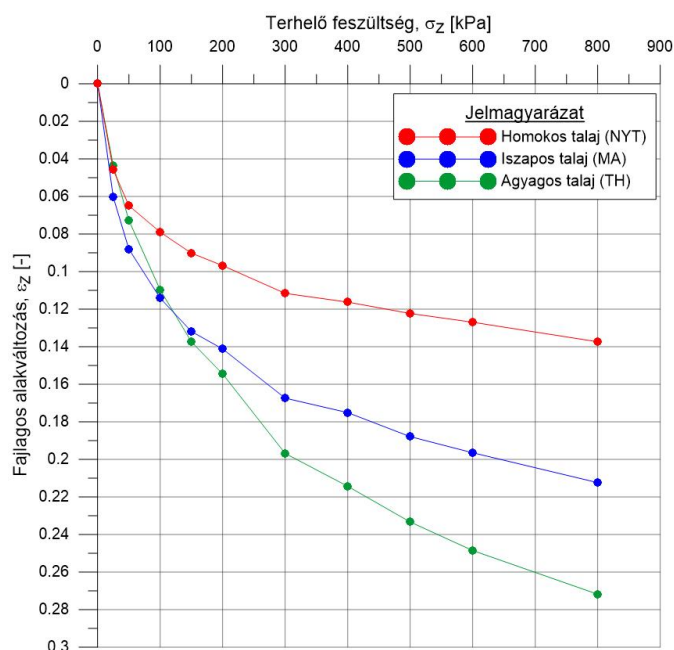
- 2) konszolidációs együttható (c_v);
- 3) látszólagos előterhelő nyomás vagy küszöbfeszültség (σ_{z0});
- 4) a másodlagos összenyomódás együtthatója (kúszási index) (c_α);
- 5) duzzadási paraméterek.

A lépcsőzetes terhelésű ödométeres vizsgálat alapvető feltételei:

- a feszültségpálya az egydimenziós alakváltozásnak felel meg;
- a drénezés egydimenziós és tengelyirányú.

A feszültségállapotok és a drénezési viszonyok az alapozások esetében térben és időben változnak, ezért eltérések adódhatnak mind a süllyedés nagyságának, mind a sebességének számított értékétől. A vizsgált minta kis mérete általában nem tükrözi híven a természetes talajtömeg szerkezeti jellemzőit. A konszolidációs vizsgálatok elemzése alapvetően azon a feltevésen alapul, hogy a talaj telített. Telítetlen talajok esetén a származtatott paraméterek némelyike fizikailag nem értelmezhető (MSZE CEN ISO/TS 17892-5:2004 2010.).

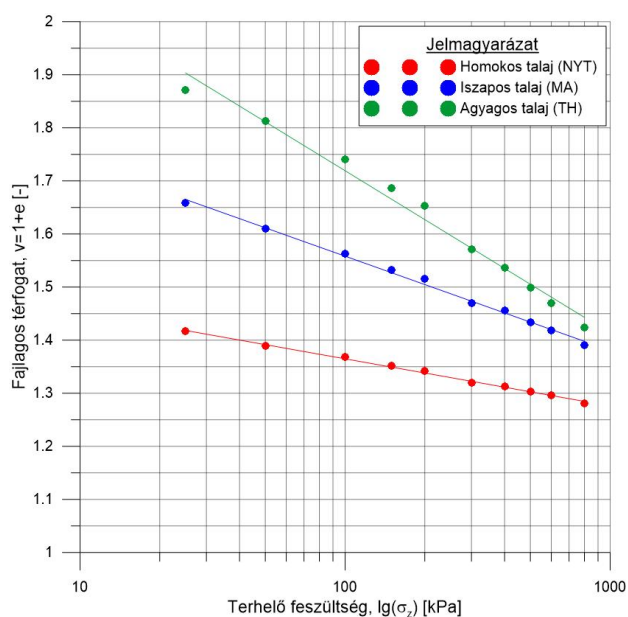
Az érvényben lévő magyar szabvány szerint vizsgáltam a kiválasztott talajok konszolidációs tulajdonságait. Az ödométeres mérések eredményei a különböző talajok esetében jelentős különbségeket mutattak. A konszolidációs képesség a talajok szivárgási tényezőjével van összefüggésben, amit a finomfrakció aránya jelentősen befolyásol. A magas agyag és iszap tartalmú agyagos talaj esetén tapasztaltam a legnagyobb mértékű összenyomódást, míg a homokos talaj deformálódott a legkevésbé. Mérési eredményeimet a 3-5. ábra összegzi.



3-5. ábra: A vizsgált talajok konszolidációs görbéi

A talajok konszolidációját a normál konszolidációs egyenessel (Normal Consolidation Line, NCL) és annak dőlésszögével is jellemezhetjük. Ez az egyenes a talajminta szemilogaritmikus koordinátarendszerben, a talajmintára ható terhelés logaritmusának függvényében ábrázolt fajlagos térfogatváltozására illesztett egyenesnek felel meg. Az illesztett NCL dőlésszöge összefüggésben van a talaj konszolidációs hajlandóságával, minél nagyobb a dőlésszög, annál nagyobb mértékben alakváltozó talajról van szó.

A 3-6. ábra a talajok normál konszolidációs görbéit foglalja össze. A konszolidációs görbékhez hasonlóan és az elméletnek megfelelően az agyagos talaj NCL görbéjének dőlése a legnagyobb, tehát a leginkább tömörödő a vizsgált talajok közül.



3-6. ábra: A vizsgált talajok normál konszolidációs egyenesei (NCL)

A 3-6. ábra alapján a normál konszolidációs egyenesek egyenletei az alábbiak:

$$\text{Homokos talaj:} \quad v = -0,0386 \cdot \ln(\sigma_z) + 1,5425 \quad R^2 = 0,997 \quad 3.3$$

$$\text{Iszapos talaj:} \quad v = -0,07714 \cdot \ln(\sigma_z) + 1,9135 \quad R^2 = 0,995 \quad 3.4$$

$$\text{Agyagos talaj:} \quad v = -0,1329 \cdot \ln(\sigma_z) + 2,3312 \quad R^2 = 0,984 \quad 3.5$$

A 3.3-3.5 egyenletekben a v a fajlagos térfogatváltozás, σ_z pedig az ödométeres vizsgálat során használt aktuális tengelyirányú feszültség. Az egyenletek multiplikatív tagjai mutatják számunkra az egyenes meredekségét, az additív tagok pedig a zérus terheléshez tartozó fajlagos térfogat értéket.

A vonatkozó szabvány leírása szerint a talajok konszolidációját egydimenziós alakváltozás alapján számítjuk, s ebből származtatható a talajok összenyomhatóságának mérőszáma, az

összenyomódási modulus (E_{oed}), amikor is telített állapotot tételezünk fel. Laza, konszolidálatlan és telítetlen talajok konszolidációs (tömörödési) vizsgálatát tehát más irányból kell megközelíteni.

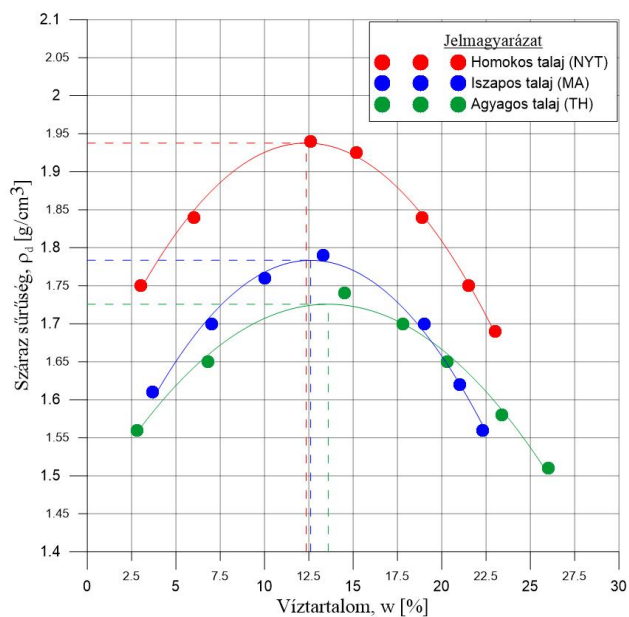
3.2.5 Proctor tömörség

A talajok tömöríthetőségének jellemzésére a talajmechanikai gyakorlatban a Proctor-vizsgálatot alkalmazzuk. A magyarországi gyakorlatban a hagyományos (Standard Proctor) vizsgálat terjedt el, majd az uniós csatlakozást követően a módosított Proctor-vizsgálat került be a Eurocode7 által szabályozott magyar szabványok közé (MSZ EN 13286-2, 7.4 pont). A vizsgálat alkalmazási területe sokrétű, többek között kiemelt jelentőségű alkalmazása az útépitési, gátépitési munkálatok során, valamint a hulladéklerakók szigetelőrendszereinek ásványi anyagú szigetelőrétege tömöríthetőségének megállapításánál van.

A vizsgálati módszer alkalmazható finom és durvaszemcsés anyagok esetén is. Eredményei jó képet adnak a talajok víztartalomtól függő tömöríthetőségéről. A tömörítési munka a Proctor vizsgálatok során dinamikus jellegű.

A mérési eredményekből számított értékeket a ρ_d - w síkon ábrázolva, megkapjuk a Proctor-görbét, amelyből meghatározható az elérhető száraz térfogatsűrűség maximuma ($\rho_{d, \max.}$) és a hozzá tartozó optimális tömörítési víztartalom ($w_{opt.}$). Ezen mérőszámok megadják azt a víztartalmat, amely mellett elérhető az adott talaj legnagyobb száraz térfogatsúly értéke, tehát a legtömörebb állapot.

Vizsgálataim során mért és számított eredményeimet a 3-7. ábra és a 3-6. táblázat foglalja össze.



3-7. ábra: A vizsgált talajok Proctor-görbéi

A 3-7. ábra jól elkülönülő görbéi arra utalnak, hogy a talajok dinamikus terhelés hatására különböző módon reagálnak, különböző térfogatsűrűségeket érnek el, viszont az optimális víztartalom tekintetében a különbségek elhanyagolhatók.

3-6. táblázat: A vizsgált talajok optimális tömörítési víztartalmai és legmagasabb száraz sűrűsége

Talajtípus	w_{opt} [%]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]
Homokos talaj (NYT)	12,35	1,938
Iszapos talaj (MA)	12,60	1,783
Agyagos talaj (TH)	13,59	1,726

A 3-6. táblázatban közölt, maximális száraz állapot térfogatsűrűség ($\rho_{d,max}$) és optimális víztartalom (w_{opt}) értékeket összevetve az iszapos és agyagos talaj dinamikus tömöríthetősége csak kis mértékben tért el.

3.2.6 Nyírószilárdság

A közvetlen nyíróvizsgálatokat többek között a földmunkák és az alapozások esetében használják a talajok hatékony nyírószilárdságának meghatározására (MSZE CEN ISO/TS 17892-10:2004 2010.).

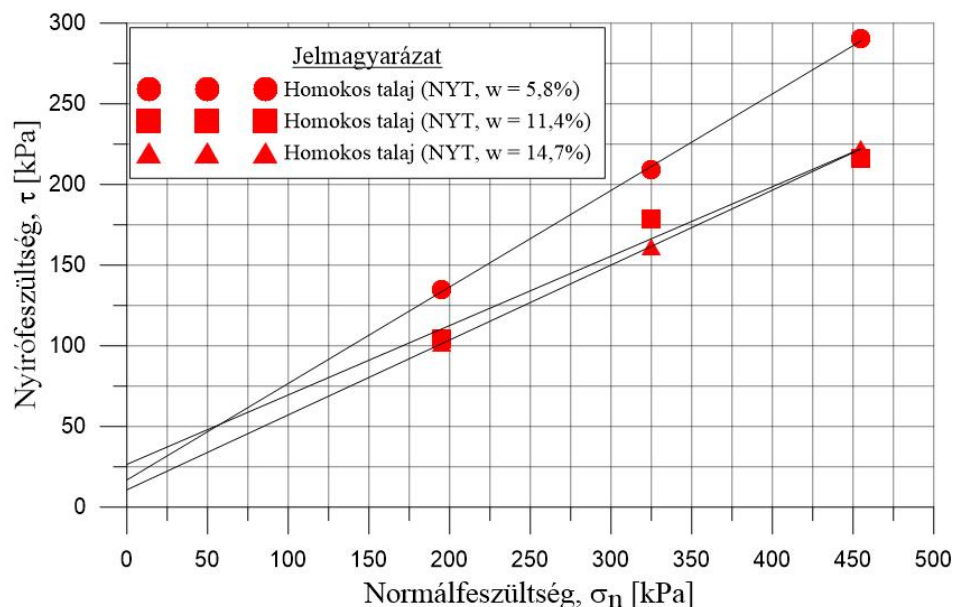
A kiválasztott talajok (homokos talaj (NYT), iszapos talaj (MA), agyagos talaj (TH)) nyíróvizsgálatait a vonatkozó szabvány előírásai szerint végeztem el. Mivel a víztartalom és annak változása a magas iszap- és agyagtartalmú talajok esetén nagymértékben befolyásolja a nyírószilárdsági paramétereket, ezért mindhárom talajnál három különböző nedvességtartalmat állítottam be. A nedvességtartalmak kijelölése mezőgazdasági szakemberek segítségével történt, a talajok szántóföldi viselkedése alapján. A víztartalmi kategóriák kijelölésének alapja a termőterületen tapasztalható talajállapot volt. Ez a talaj különböző nedvességi állapotához és művelésre („járhatóságra”) alkalmasságához köthető. A különböző nedvességi állapotokban lévő talajt megmintázva, laboratóriumi körülmények között végeztem a nedvességtartalom meghatározását.

A víztartalmi kategóriák talajtípusok szerint változó tartományokba esnek, ami a különböző szemeloszlásnak és iszap-agyagtartalomnak köszönhető. Az nyíróvizsgálatoknál beállított víztartalmakat a 3.3 fejezetben részletezem.

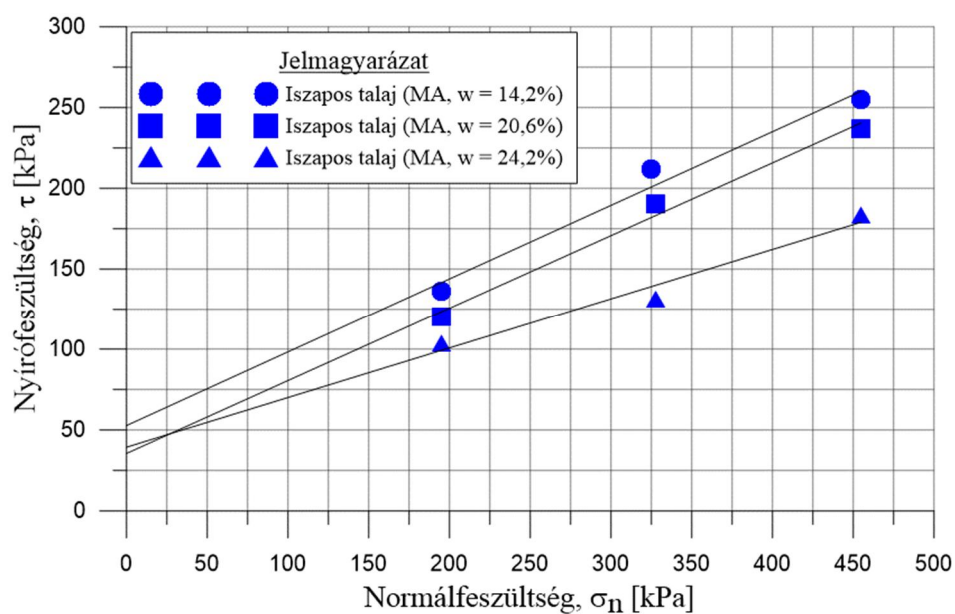
A nyíróvizsgálatokhoz a Controls által forgalmazott, Shearmatic típusú, szabványos közvetlen nyírás végrehajtására alkalmas, automata nyíróberendezést használtam. A mért eredmények feldolgozása utána megszerkesztettem a Coulomb-féle tönkrementeli egyeneseket, melyeket a 3-8. - 3-10. ábrák mutatnak be. A törési határgörbék megerősítik a korábbi azonosító vizsgálatok eredményeit,

a nagyobb homoktartalmú minta belső súrlódási szöge (φ) nagyobb, kohéziója (c) kisebb, mint az iszapos és agyagos talajé. A nagyobb finomfrakcióval bíró talajok tönkremeneteli egyeneseinél pedig a vízérzékenység mutatkozik meg.

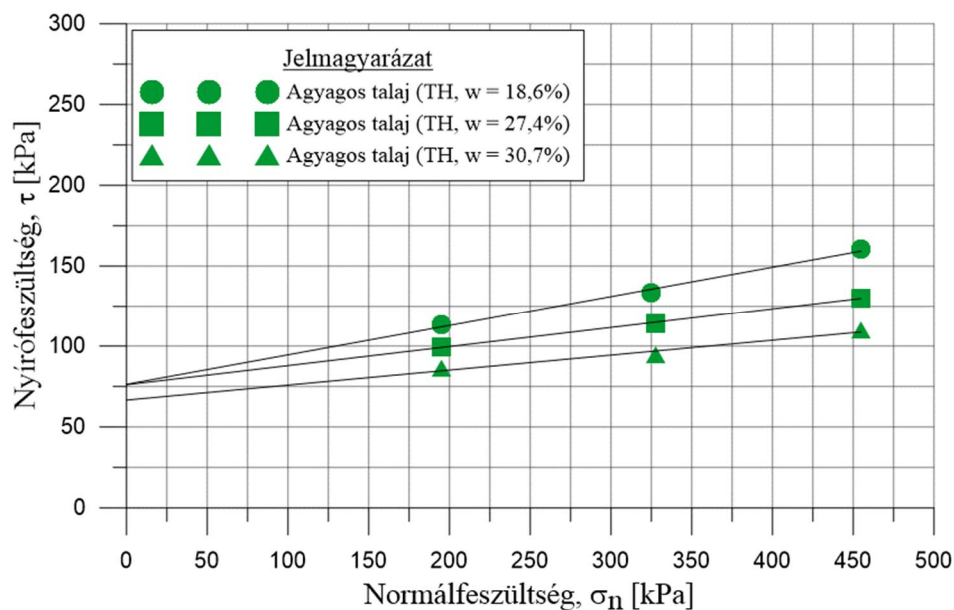
A talajok nyírószilárdsági paramétereit a 3-7. táblázatban foglaltam össze.



3-8. ábra: Homokos talaj nyíróvizsgálatainak eredményei a víztartalom függvényében



3-9. ábra: Iszapos talaj nyíróvizsgálatainak eredményei a víztartalom függvényében



3-10. ábra: Agyagos talaj nyíróvizsgálatainak eredményei a víztartalom függvényében

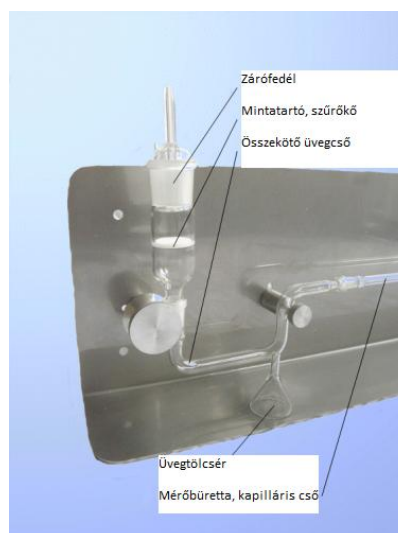
3-7. táblázat: Homokos, iszapos és agyagos talaj nyírószilárdsági paramétereit

Talajtípus	Száras		Közepesen nedves		Nedves	
	(W _{Homokt.} = 5,8%, W _{Izapt.} = 14,2%, W _{Agyagt.} =18,6%)		(W _{Homokt.} = 11,4%, W _{Izapt.} = 20,6%, W _{Agyagt.} =27,4%)		(W _{Homokt.} = 14,7%, W _{Izapt.} = 24,2%, W _{Agyagt.} =30,7%)	
	Belső súrlódási szög, φ [°]	Kohézió, c [kPa]	Belső súrlódási szög, φ [°]	Kohézió, c [kPa]	Belső súrlódási szög, φ [°]	Kohézió, c [kPa]
Homokos talaj	30,8	16,9	23,2	26,6	24,9	10,8
Izapos talaj	24,5	52,8	24,3	35,6	17,1	39,5
Agyagos talaj	10,3	76,4	6,7	76,2	5,3	66,7

3.2.7 Vízfelvevő képesség

A talaj agyagásványos összetétele jelentősen befolyásolja a talajszemcsék felületén megkötődő víz mennyiségét. Az agyagásványok összetételétől függően, a talaj több vagy kevesebb vizet képes megkötni a felületén. A talajok vízfelvevő képessége alapján következtethetünk az agyagfrakcióban lévő ásványok típusára (Szabó és Szabó 2012).

Vizsgálataimat az Enslin-Neff módszerrel végeztem (3-11. ábra). A vizsgálat során 1 gramm, kiszáritott, porított talajmintát helyezünk a vizsgáló eszköz szűrőkövére. A talaj a kapilláris szívás hatására telítődni kezd a víztérből származó folyadékkal. A felszívott víz mennyiségét az eszköz beszállított kapilláris csövén követhetjük, s itt olvashatjuk le a telítődéskor elért maximális vízfelvételt is. A mérést háromszor megismételve, s az eredményeket átlagolva kapjuk a talajmintára jellemző vízfelvevő képességét.



3-11. ábra: Enslin-Neff-féle berendezés a vízfelvevő képesség mérésére

A három kiválasztott talaj esetében a vizsgálatok eredményeit az alábbi táblázatban foglalom össze (3-8. táblázat).

3-8. táblázat: A vizsgált talajok vízfelvevő képessége Enslin-Neff módszer alapján

Talajtípus	Mért értékek [%]			Vízfelvevő képesség (Enslin-Neff) [w_{max} ; %]
Homokos talaj	53,5	53,5	55,0	54,0
Iszapos talaj	54,5	56,5	56,5	55,8
Agyagos talaj	89,0	86,0	87,5	87,5

Az eredmények alapján elmondható, hogy a vizsgált talajok vízfelvevő képességét elsősorban az agyagtartalmuk befolyásolja. A homokos és iszapos talaj esetén a közel azonos agyagtartalom (~6-7%) az azonos vízfelvevő képességben is megmutatkozott, míg az agyagos talaj jóval nagyobb mennyiségű, 87,5% vizet képes kapillárisan felvenni. Az agyagos talaj vízfelvevő képessége nem kimagasló az agyagok között, ugyanis a Ca-montmorillonitok vízfelvevő képessége elérheti a 2-300%-os értéket is, míg a Na-montmorillonitok esetében ez az érték 6-800% is lehet (Szabó 1999).

3.3 A VÍZTARTALMI KATEGÓRIÁK MEGÁLLAPÍTÁSA

A Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Karán működő, Agrogeotechnikai Kutatócsoport (ME MFK AGKCs) tagjaként a laboratóriumi mérések mellett feladatom volt több, terepi vizsgálat végrehajtása is. Az előző fejezetekben bemutatott talajok természetes környezetükben olykor hasznos többletinformációkat nyújthatnak a viselkedésük jobb megértésével kapcsolatban. A talajmechanikai szemléletű laborvizsgálatok bebizonyították, hogy a homokos, iszapos és agyagos talaj

a nedvességtartalmuktól függően eltérően reagálnak a külső erőhatásokra, ezért a későbbi, innovatív mérési megoldások vizsgálatánál a talajfizikai féleségek mellett fontos szempont volt a talajok nedvességtartalmának változtatása is. A különböző szemcseösszetételű talajok a víztartalom változásra másképp reagálnak, rugalmas-képlékeny viselkedésük, nyírószilárdságuk, tömöríthetőségük egyaránt változik.

A talajok vizsgálandó víztartalom tartományainak kiválasztását a korábban bemutatott laboratóriumi Proctor vizsgálattal, terepi tömörség és víztartalom méréssel (3T System penetrométer), valamint laboratóriumi víztartalom vizsgálattal határoztuk meg kollégáim segítségével.

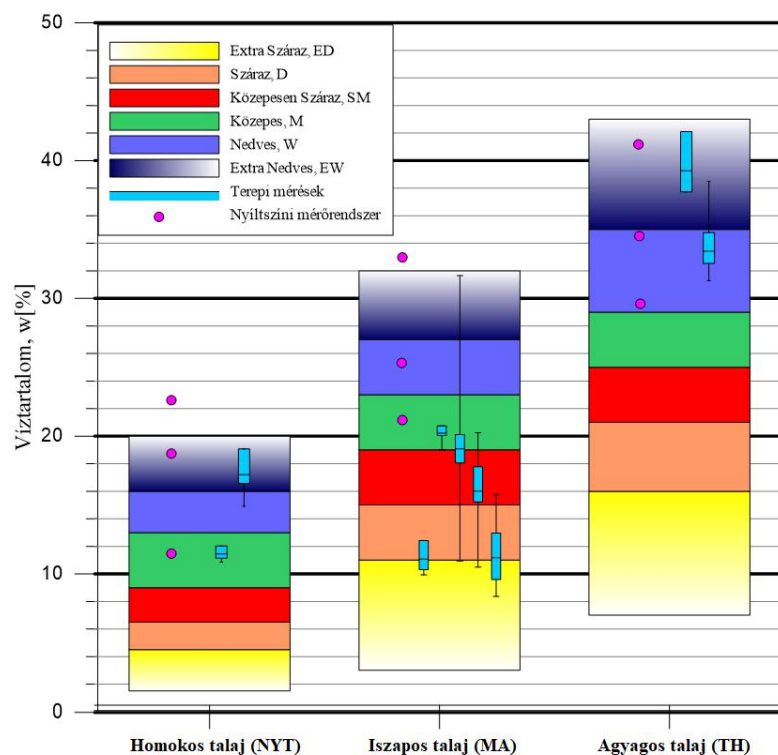
A fent említett módszerek eredményei alapján először négy, majd hat talajnedvességi tartományt jelöltünk ki. Ezekből a későbbiekben gyakorlati és statisztikai megfontolásokból három nedvességi tartományt választottam ki (száraz, közepesen nedves, nedves), és kísérleteimet ezen értékek mellett végeztem. Az egyes nedvességtartományok megadásában igénybe vettem az agrármérnökök gyakorlati tapasztalatait is. Az elsősorban szántóföldi tapasztalatokon alapuló, a talaj állapotát a talaj típusától függetlenül megadó módszerek a szántóföld művelhetőségét, járhatóságát helyezik előtérbe, ami az egyes munkafolyamatok (lazítás, vetés, tömörítés, stb.) ütemezésében játszanak nagyon fontos szerepet.

A meghatározott víztartalmi kategóriák szántóföldi megfeleltetéséhez a 3T Systems penetrométerét használtuk. Az egyes mérőhelyeken végzett terepi vizsgálatokat különböző időjárási körülmények mellett végeztük, azaz száraz, csapadékos és a csapadékot követő időszakokban.

A 3T System által gyártott penetrométer a talajellenálláson kívül képes a talaj nedvességtartalmát is mérni és rögzíteni. Az eszközzel a víztartalom értékét a mezőgazdasági szempontok alapján az úgynevezett szántóföldi vízkapacitás függvényében határozzuk meg (a talaj pF 2,5 víztelítettségi állapotának megfelelően, a szántóföldi vízkapacitás százalékában kifejezett részarányaként térfogatszázalékban adja meg). Ez azt jelenti, hogy 100%-nak tekintjük azt a víztartalmat, amit a talaj a gravitációs erővel szemben meg tud tartani, s az ennél kisebb víztartalmak esetén a szántóföldi vízkapacitás százalékában adjuk meg a talaj nedvességtartalmát. A hidrogeológiában ezen érték megfelelője a minimális vízkapacitás. Ez talajfüggő, így a vizsgálatok végrehajtása előtt ismerni kell a talaj szemcsés összetételét. Ezután összehasonlító vizsgálatokat végeztünk a szántóföldi talajállapotok és víztartalmak, valamint a geotechnikai gyakorlatban alkalmazott, tömegvesztésen alapuló nedvességtartalom kapcsolata között. A vizsgálatok eredményeit a 3-12. ábra szemlélteti, amely eredmények lehetővé teszik a laboratóriumi mérési eredmények átvitelét, adaptálását a szántóföldi kultúrák vizsgálatára. A nedvességtartalom tartományok meghatározásánál egyértelműen figyelembe vettük a mezőgazdasági hasznosíthatóság szempontrendszerét, így például az extrém száraz és nedves kategóriák határait ott vettük fel, ahol a napi gyakorlat szerint mezőgazdasági talajművelés már gazdaságossági vagy technikai-technológiai okokból nem végezhető. Az említettek

miatt, az általunk használt víztartalom tartományok megfelelőek a terepi, illetve szántóföldi mezőgazdasági körülmények jellemzésére, ugyanakkor kevésbé illeszkednek a tényleges geotechnikai gyakorlat által alkalmazott vagy alkalmazható határértékekhez.

A továbbiakban a tartományok szélsőértékeinek felülvizsgálata céljából a nyírteleki és a taktaharkányi talajok esetében további méréseket végeztünk. Az adatoktól függően lehetséges az extra száraz, száraz és közepesen száraz tartományok jelenlegi intervallumának eltolása a magasabb nedvességtartalom felé, azonban ennek vizsgálatát a jövőben kevésbé szélsőséges meteorológiai viszonyok között célszerű elvégezni.



3-12. ábra: A víztartalom mérési eredmények elhelyezkedése az általunk használt víztartalom-tartományok intervallumán

A fent ismertetett módszerek alapján a vizsgálataimat a 3-9. táblázat víztartalmi kategóriái szerinti csoportosításban végeztem.

3-9. táblázat: A vizsgált talajok víztartalom tartományai

Talajtípus	Száraz	Közepesen nedves	Nedves
Homokos talaj (NYT)	4-6,5 %	9-13 %	13-16 %
Iszapos talaj (MA)	11-15 %	19-23 %	23-27 %
Agyagos talaj (TH)	16-21 %	25-29 %	29-35 %

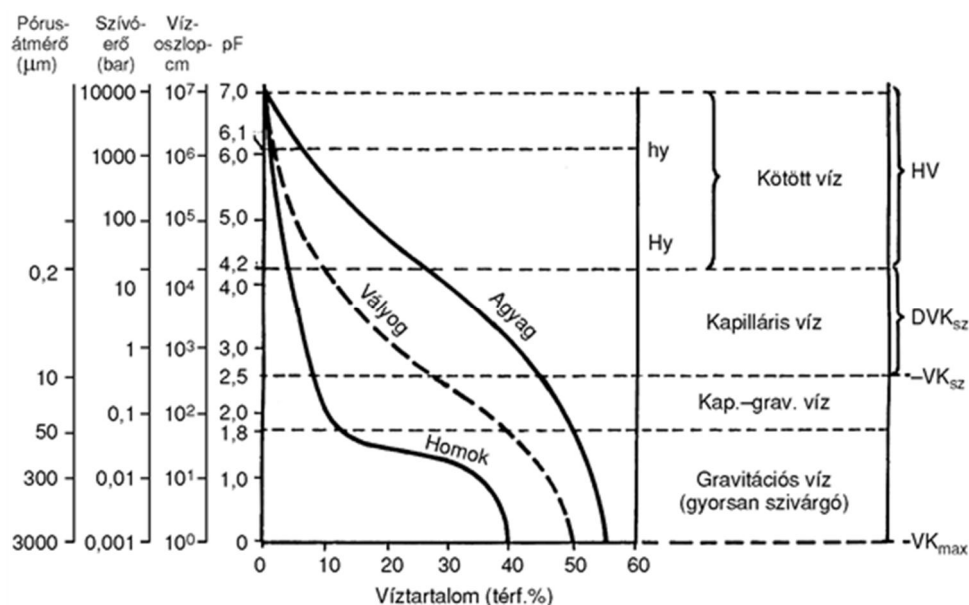
3.4 VÍZTARTÁSI (pF) GÖRBE

A talaj a vizet, más kapillár-porózus anyagokhoz hasonlóan, molekuláris adszorpció és kapilláris adszorpció útján tárolja. Teljesen száraz anyagból kiindulva a vízmolekulák először a kolloid részecskék felületi molekuláihoz tapadnak. A molekuláris vonzóerők az első vízmolekula-rétegre a legnagyobbak és a következő rétegekre mind kisebb erők hatnak.

A molekuláris adszorpció előrehaladása során a nanométer méretű pórusokban meniskus alakul ki s megjelennek a kapilláris erők a felületi feszültség következtében. Negatív értékű kapilláris nyomás jön létre a homorú folyadékfelszín felett,

A talaj víztartó képességét a negatív kapilláris nyomással, mint tenzióval jellemezhetjük. A tenzió kifejezhető a nyomómagassággal is, s ennek cm-ben megadott értékének 10-es alapú logaritmusát nevezik pF-számnak.

A jellegzetes talajtípusok pF-szám görbéit a 3-13. ábrán láthatjuk. Minél kisebbek a talaj részecskéi, vagyis minél nagyobb a fajlagos felülete, annál nagyobb nedvességtartalmak felé tolódnak el a görbék. Ez azt jelenti, hogy egy agyagtalaj ugyanakkora tenzió mellett sokkal több vizet tart magában, mint egy homokos talaj. Ebből az a következtetés vonható le, hogy két különböző talaj mechanikai paramétereit nem azonos nedvességtartalomnál, hanem azonos tenzióhoz tartozó nedvességtartalmaknál kell összehasonlítani (Laib 2002).



3-13. ábra: Jellegzetes magyarországi talajok pF-szám görbéi

Telítetlen talaj esetén a talajtulajdonságok változása általában nem lineáris, és a leggyakrabban valamilyen függvénykapcsolattal írhatóak le. Ezeket a függvényeket vagy mérésekkel, vagy számításokkal, vagy költséghatékony módon becsléssel tudjuk meghatározni (Rowe 2001.).

A víztartási görbe (pF) meghatározása különböző módszerek segítségével lehetséges. Rendelkezésünkre állnak matematikai összefüggések, laboratóriumi mérések és származtathatjuk egy talaj vízháztartási görbéjét annak szemeloszlási görbéjéből is (Fredlund, Wilson és Fredlund 2002).

A laboratóriumi mérés során a víztartási görbének csak néhány pontját tudjuk meghatározni, mert csak meghatározott szívás (ψ) értékekhez tudunk víztartalmat (v) számolni. Ezért a felhasználás érdekében szükséges az ismert pontokra matematikailag leírható függvényt illeszteni (Donovál és Lévai 2013.).

A pF görbe matematikai illesztésének leírásával világszerte több kutatói is foglalkozott, meg kell említeni itt Williams (1983), Gardner (1958), Brooks-Coley (1964), McKie-Bumb (1984), Fredlund-Xing (1994) és van Genuchten (1980) modelljét, amelyek segítik a pF görbe illesztését.

A talaj víztartási és a szemeloszlási görbéje között összefüggés tapasztalható. Laboratóriumi körülmények között meghatározott víztartási és szemeloszlási görbéből adatbázist hoztak létre, így becsülni lehet egy talaj szemeloszlási görbéjéből a víztartási görbéjét. A gyakorlatban lehetetlen minden esetben megmérni a víztartási görbét, ezért csak a gondosan kiválasztott szemeloszlási görbéhez mérik meg, egyéb esetben a szemeloszlási entrópia alapján „interpolálják” az eredményt (Donovál és Lévai 2013.).

A háromfázisú talajok viselkedésének megismerésében fontos szerep jut a különböző talajtípusok víztartási (pF) görbéinek. A talajban kialakuló szívóerők megváltoztatják a feszültségállapotot, mivel a kapilláris részen összehúzzák a szemcséket, ami feszültségnövekedést eredményez. Ez laza, konszolidálatlan talajok esetén (is) kihat a talajok rugalmas és képlékeny viselkedését leíró paramétereire. Mindezeket figyelembe véve, amennyiben a vizsgált talajok pF görbéi meghatározásra kerülnek, eredményeim alapjai lehetnek a háromfázisú, telítetlen talajok talajmechanikai szemszögű megismerésének. Jelen dolgozatnak nem része a pF görbék szerinti elemzés, de a jövő feladatai között kiemelt helyen szerepel.

4 ALKALMAZOTT INNOVATÍV MÉRÉSI ESZKÖZÖK BEMUTATÁSA

Doktori munkám elkészítése során kiemelt feladat volt, hogy innovatív mérési megoldások és eszközök alkalmazását megvalósítsam és bemutassam előnyös és hátrányos tulajdonságaikat. Kutatómunkám során méréseket hajtottam végre a fejlesztési, beüzemelési és mérési időszakokban, melyek eredményei disszertációm alapját képezik. A laza, konszolidálatlan talajok vizsgálata gyakran új megoldási módokat követelt meg mind a mintaelőkészítés (konszolidálatlan minták előállítás), mind a mérések végrehajtása és az eredmények rögzítése szempontjából. Az egyedi mérési módszerek alkalmazhatósága és eredményeik megbízhatósága érdekében gyakran hosszas előzetes kísérletezési fázisra volt szükség, amely számos tanulsággal szolgált, s olykor további innováció irányába vitt.

Az alábbi alfejezetekben a doktori értekezésem során alkalmazott talajmechanikai vizsgálati módszereket mutatom be.

4.1 MINTAELŐKÉSZÍTÉS

A 3. fejezetben ismertetett talajminták máig mezőgazdasági művelés alatt álló területekről, a felső, az atmoszferiliáknak és talajművelési hatásoknak erősen kitett zónából (0-50 cm mélység) származnak. A szemcseszerkezetükre a heterogenitás (finom szemcsék, aggregátumok, stb) jellemző. A térbeli különbségek nem csupán a szemcsék összetapadásából adódnak, hanem a nedvességtartalom és a szervesanyag tartalom változatosságából is.

A laboratóriumi mérések mintatest igénye igen kötött. Fő szempont, hogy a vizsgálat megkezdése előtt a minta alaktartó legyen, valamint, hogy a vizsgálatok reprodukálhatósága miatt, a mintatest alakja, formája, kezdeti tömörsége, nedvességtartalma stb. megegyezzen az ismételni kívánt méréseknél.

A szántóföldekről a laboratóriumba szállított mintákat a vizsgálatokat megelőzően kalapácsos törő segítségével 0,3 cm alatti maximális aggregátum méretig aprítottuk. Ez a mérettartomány még nem roncsolta a szilárd szemcsék szerkezetét, viszont alkalmassá tette a talajmintákat a laboratóriumi vizsgálatokra. A mintatesteket a vizsgálatokat követően szintén kalapácsos törő segítségével visszaaprítottuk, így kevesebb mintaanyagra volt szükség. A talajok többszöri vizsgálatát és porítását elemeztük, és arra a következtetésre jutottunk, hogy nincs számottevő hatással a talajok főbb közetfizikai jellemzőit (tömörödés, konszolidáció, nyírószilárdság stb.) (Gonda, Kántor és Makó 2012).

Laboratóriumi vizsgálataim során különböző eszközöket használtam a laza, telítetlen, konszolidálatlan talajok talajmechanikai paramétereinek meghatározására, így a mintaelőkészítéshez is több, különböző mintaelőkészítési eljárást kellett alkalmaznom. Az eltérő formájú és méretű mintatestek rendhagyó, olykor újszerű megoldásokat kívántak. A laboratóriumunkban ezért irányított fejlesztést hajtottunk végre a mérések meggyorsítása és a mérések minél jobb ismételhetősége

érdekében. A sorozatméréseim során nyert tapasztalatok, az ismételhetőségi vizsgálatok eredményei igazolták, hogy a minták új megoldásokkal történő előkészítése a laza talajok esetén megfelelő.

4.1.1 A triaxiális minták előkészítése

A triaxiális vizsgálatokhoz a mintatest származhat zavartalan magmintából zavartalan, vagy erősen zavart minta esetén konszolidációs padon történő újra konszolidáltatott mintából. A mintatest konszolidációja időigényes, agyagos talajok esetén időtartama napokban, akár hetekben is mérhető, így nagy mintaszámú sorozatmérések esetén alkalmazása nem időhatékony. A talajmechanikai gyakorlatban a minták zavartalansága, azaz a természetes állapotok minél jobb megőrzése (víztartalom, tömörség, szemcseösszetétel stb.) kívánatos cél, így a mintázás során törekedni kell a minél precízebb mintavételi eljárás alkalmazására.

Laza, felszínről származó, folyamatos művelés és igénybevétel alatt álló talajok esetén a zavartalan minta vétele és annak vizsgálata problematikus. A szántóföldi körülmények minél jobb közelítésére fejlesztettük ki az STC System Group Kft. közreműködésével a TXM-V1-STC-07 típusú talajtömörítő berendezést (4-1. ábra). Az eszköz egy pneumatikus nyomással működtetett, nyomás és elmozdulás mérővel ellátott, PLC vezérléssel működő prototípus, ami a mintaformáló hengerrel kiegészülve maximum 10 centiméter átmérőjű, 20 centiméter magas minták kontrollált előtömörítésére alkalmas. A berendezés segítségével készített mintatestek tömörsége alacsony, így közelíti a mezőgazdasági területeken, talajlazítást után tapasztalható laza, konszolidálatlan állapotot.

Az előtömörítés a mintaformáló hengerben rétegesen történt, amikor is a laza, előnedvesített mintaanyagot azonos tömegekben helyeztem a mintaformába. Minden egyes réteg felszínét vízszintesen elegyengetve a pneumatikus henger és a rá szerelt nyomólap segítségével előre meghatározott nyomásértékkel azonos ideig tömörítettem a vizsgálandó talajt, mindaddig amíg el nem értem a kívánt mintamagasságot. Az egyes talajrétegek azonos tömörségét az azonos mintamennyiség mellett a tömörítési idővel is biztosítottam, de lehetőség volt arra is, hogy a mintamagasság-változás gradiense alapján határozzuk meg a konszolidáció időtartamát. Minden réteg esetén azonos – a tömörítési idő indul, ha a minta magasságváltozásának csökkenése a tömörítés során kisebb, mint 0,5 mm/sec - tömörítési időt alkalmaztam, aminek elteltét követően a mintát a berendezés teljesen tehermentesíti.

A folyamat eredményeként egy tömörített és nem konszolidált mintatest jött létre, amin a triaxiális vizsgálathoz szükséges gumimembrán található, így alkalmas a triaxiális cellába helyezésre. További újítás, hogy a tömörítés a triaxiális cella talplemezén történt, így a beépítés további lépései során a mintatest már nem sérült. A 4-1. ábra bemutatja, hogy a mintaelőkészítés történhet a nyomásmérő szenzorok leszerelése nélkül is. A megoldás lehetővé teszi az előtömörítés mértékének

tetszőleges megváltoztatását azáltal, hogy a minta tömörítése befejezhető a konszolidációs görbe geotechnikus által megadott $\Delta h/\Delta \varepsilon$ viszonyszám elérése esetén is.

A 4-1. ábra jobb oldalán látható a mintatest alakját és kezdeti méreteit megformázó, tengely irányban kettéosztott, speciális henger. A henger belső felületét porózus bronzbetétből alakítottuk ki, ami a berendezés pneumatikus rendszeréhez tartozó vákuumszivattyúhoz csatlakozik. A vákuum segítségével a mintaépítés során, a vízzáró gumimembránt a mintagyártó henger falához tapasztva biztosítjuk a mintatest formáját, valamint a két félhengert eltávolítva a mintatest már mérésre alkalmas. Ez különösen fontos laza talajok vizsgálata esetén, mivel az esetleges utólagos membrán ráhelyezés során a mintatest könnyen megsérülhet.

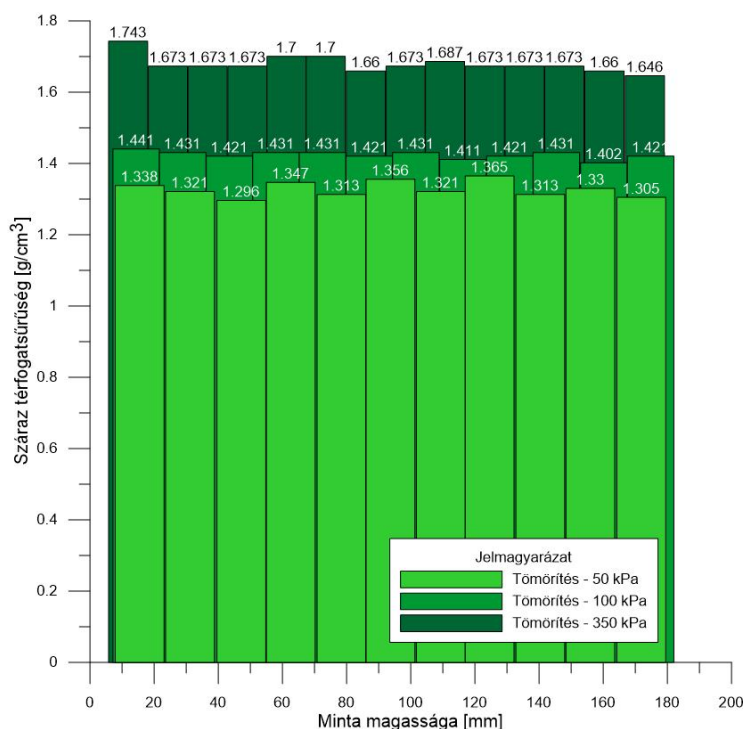


4-1. ábra: Innovatív mintatömörítő berendezés

A mérésekhez előkészített mintatestek tömörségi viszonyait a mintaelőkészítési jegyzőkönyvek alapján ellenőriztem. Az azonos tömegek betöltése mellett állandó tömörítési nyomáson mért rétegenkénti száraz térfogatsűrűség minden esetben jó egyezést, mintán belüli azonos tömörségi viszonyokat mutatott, mint ahogyan azt a 4-2. ábra is mutatja.

A mintaelőkészítésnél használt tömörítő feszültség, azaz a tömörítő munka nagyban befolyásolja a mintatestek mérés előtti, kiindulási tömörségi állapotát. A 4-2. ábra által vázolt vizsgálatokkal arra kívánok rámutatni, hogy azonos talajtípus (iszapos talaj) azonos víztartalmi állapotai (közepesen nedves, $w=20-21\%$) mellett végzett tömörítés esetén, a tömörítő feszültség változással

eltérő tulajdonságú mintatestek hozhatók létre. Az 4-2. ábra azt is szemlélteti, hogy minden mérés esetén törekedtem arra, hogy állandó mintamagasságokból induljak ki, így az 50 kPa-os tömörítő nyomás esetén 11, a 100 kPa-os nyomásnál 12, a 350 kPa-os, legnagyobb tömörítő nyomás esetén pedig 14 rétegből felépülő mintatesteket használtam.



4-2. ábra: Rétegenként épített triaxiális minta tömörségi viszonyai a tömörítő nyomás és a mélység függvényében

A mintagyártó eszközzel végzett vizsgálatok célja a laza konszolidálatlan, telítetlen talajok laboratóriumi mérésekre alkalmassá tétele volt, ezért a mintaelőkészítés során a mintatestek öntartása mellett a konszolidálatlan állapotuk megtartása is kívánatos volt. A vizsgálatok reprodukálhatósága is nagyon fontos szempont, hogy megfelelő mennyiségű és minőségű, redundáns adat ismeretében a későbbi sorozatmérések adatai statisztikailag elemezhetőek legyenek. Ezen okok ismeretében a mintaelőkészítés során törekedtem arra, hogy minél kisebb tömörítőfeszültségeket használjak, valamint, hogy a tömörítés időtartama se legyen hosszú. A tömörítés jellemző időtartama rétegenként 60 másodperc, a tömörítő feszültség pedig rétegenként 50-100 kPa/réteg volt.

A mintaépítő berendezés alkalmas az ödométeres mintatestek előtömörítésére is. Mivel ebben az esetben a minta öntartása a merev oldalfalak által biztosított, így az előtömörítésnél egészen kis tömörítőfeszültség is elegendő.

4.1.2 A nagyméretű nyíródobozos kísérletek mintaelőkészítése

A triaxiális mérésekhez hasonlóan az MTV07-GG nagyméretű nyíróberendezéssel végzett vizsgálatoknál is a cél a laza, konszolidálatlan és telítetlen talajok vizsgálata volt. A triaxiális vizsgálatoknál a vizsgálatokba bevont talajok rugalmas és képlékeny viselkedésének megismerése volt a fő cél, a nagyméretű nyíróberendezéssel elsősorban a korábban bemutatott talajok nyíró igénybevételekkel szembeni ellenállóképességét kutattam. A nyíróberendezés létrehozásának eredeti célja tehát a talajok nyírószilárdsági paramétereinek a meghatározása volt, viszont moduláris felépítésének és fejlett mechanikai és elektronikai rendszereinek köszönhetően egyéb, speciális vizsgálat (nagyméretű ödométeres, kihúzódnási („pull out”), sűrűdnási vizsgálatok, stb.) elvégzésére is alkalmas.

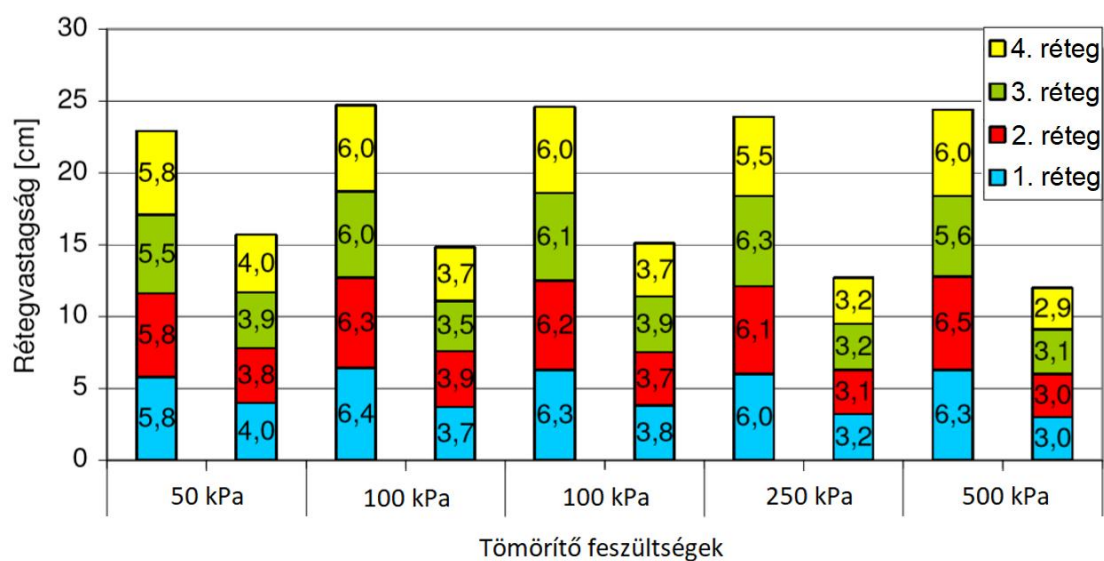
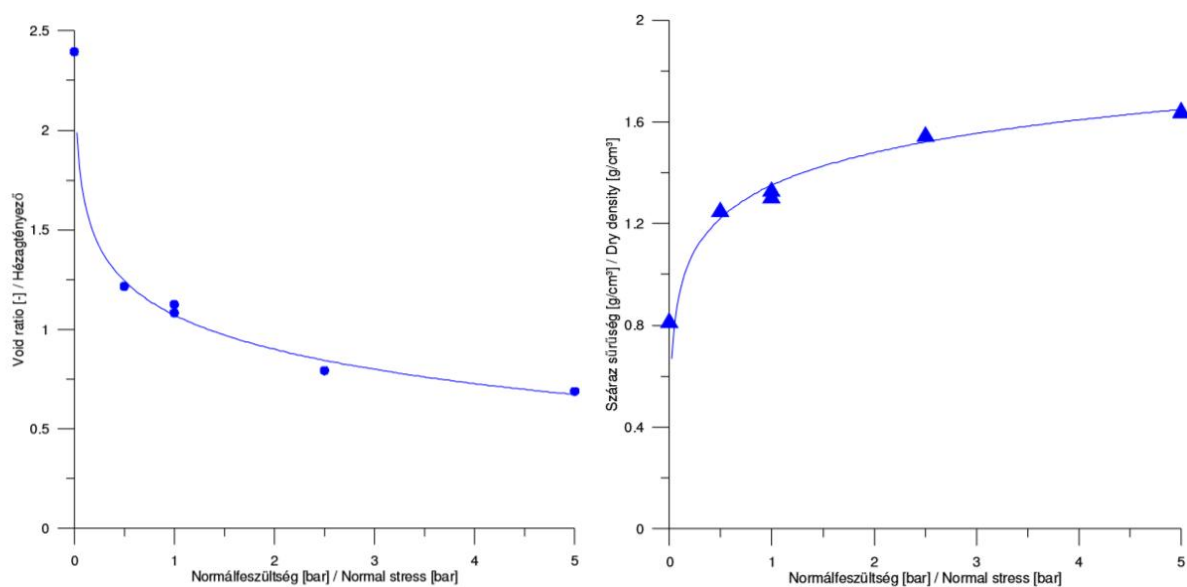
A nagyméretű nyíróberendezéssel végzett méréseim esetén a mintatestek előállítása a berendezés hidraulikus rendszerével történt, a vizsgálatokhoz használt, feszültségmérő szenzorokkal ellátott, sz350 x h350 x m300 mm méretű, közepes nagyságú nyíródobozban.

A laza állapotú, konszolidálatlan mintaanyag mérésre alkalmassá tételéhez vizsgálatssorozatot végeztem, melynek célja – a triaxiális mintatestekhez hasonlóan – a homogenitás ellenőrzése volt. A mérések megkezdése előtt, a terhelések felvitelét megelőzően egy kvázi homogén, minden fizikai paraméterét tekintve egyenletes eloszlási állapot volt a kívánatos cél, amely irányított körülmények között többször előállítható, így az eredmények reprodukálhatósága jó eséllyel garantálható.

A mérés szempontjából fontos a mintatest előállítása, ezért előzetesen nagyméretű (D315 x 250 mm), ödométeres vizsgálatokat végeztem közepes nedvességtartalmú, iszaptalaj mintán, annak tömöríthetőségének és a mintatest homogenitásának vizsgálatára. Az előzőleg meghatározott víztartalmak beállításánál a vizsgált talajban lévő száraz szemcsetömeget vettem figyelembe, ami az egyes rétegeknél azonos volt. Ennek alapján állítottam be a tömegszázalékban meghatározott víztartalmakat. Az ödométeres vizsgálatokat négy különböző normálfeszültség értékkel végeztem el, az 100 kPa-os normálfeszültséggel tömörített talajminták esetén a konszolidációs eljárást meg is ismételttem. A talajrétegek betömörítése során a következő normálfeszültség értékeket használtam: 50, 100, 250, 500 kPa. Az egyes rétegek beépítése során a tömörítő feszültséget 20 percen keresztül adtam a mintára. A tömörítési folyamatok során a 4-1. táblázatban feltüntetett, idő-feszültség pontokkal definiált, a pontok között lineáris feszültségváltozást követő vezérlőfüggvényeket alkalmaztam minden egyes beépített réteg esetén. A 4-1. táblázat mind a négy, tömörítés során alkalmazott vezérlőfüggvény törési pontjait feltüntettem.

4-1. táblázat: Nagyméretű nyíróminták tömörítésénél alkalmazott vezérlési tábla

Idő [s]	Tömörítő feszültség [kPa]			
	T50	T100	T250	T500
0	0	0	0	0
300	50	100	250	500
1500	50	100	250	500
1600	0	0	0	0

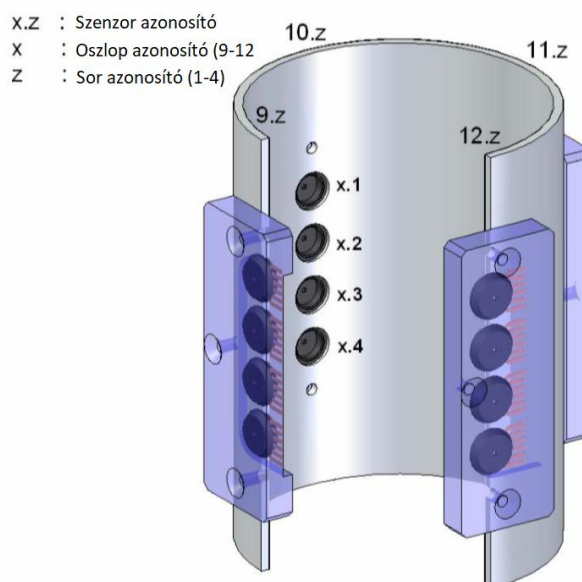
4-3. ábra: A nagyméretű nyíráshoz készített minták tömörítés előtti és utáni magasságai (Iszapos talaj, $w = 21\%$)

4-4. ábra: A különböző tömörítési munkák során a hézagtérfegyűző (b) és száraz térfogatsűrűség (j) értékének változása

A 4-3. ábra szemlélteti, hogy a nyíródobozba töltött talaj mennyisége minden esetben azonos volt, így a kiindulási mintamagasság (229-247 mm) kis szórással azonosnak tekinthető. Látható a 4-3. ábrán az az általános tendencia is, hogy növekvő normálfeszültség hatására a vizsgált talaj nagyobb mértékben veszít magasságából, tömörödik. Az összenyomódás hatására változnak a talajparaméterek is, növekvő száraz térfogat sűrűség (4-4. ábra/j) és csökkenő hézagtérfogat (4-4. ábra/b) értékek tapasztalhatóak. A 4-3. ábra feltünteti még az egyes rétegvastagságokat is, mind a tömörítés előtti mind a tömörítés utáni állapotban. A korábban már bemutatott mérési metodikának köszönhetően a mintatest homogenitása megfelelő, az egyes beépített rétegek szárazanyag-tartalma és térfogata a kívánt értékeket mutatják.

4.2 A SZENZOROS ÖDOMÉTERES MÉRŐEGYSÉG

A konszolidálatlan talajok összenyomódás vizsgálata a hagyományos, talajmechanikai gyakorlatban használt ödométeres eszközökkel nem minden esetben megoldható. A vonatkozó szabvány alapján a minta mérete jól definiált. A minta átmérője legalább 35 mm, magassága legalább 12 mm, az átmérő és magasság aránya (D/H) pedig legalább 2,5 (MSZE CEN ISO/TS 17892-5:2004 2010.). A laboratóriumi tapasztalat azt mutatja, hogy előtömörítés vagy konszolidáltság hiányában a várható deformációk olyan nagyok lehetnek, hogy a tengelyirányú deformációk kívül esnek a szabványos eszközök fizikai mérési tartományán, s a szabványban előírt méretek mellett nem valósítható meg a konszolidáció mérése.



4-5. ábra: Nyomásmérő oldalszenzorokkal ellátott ödométeres cella

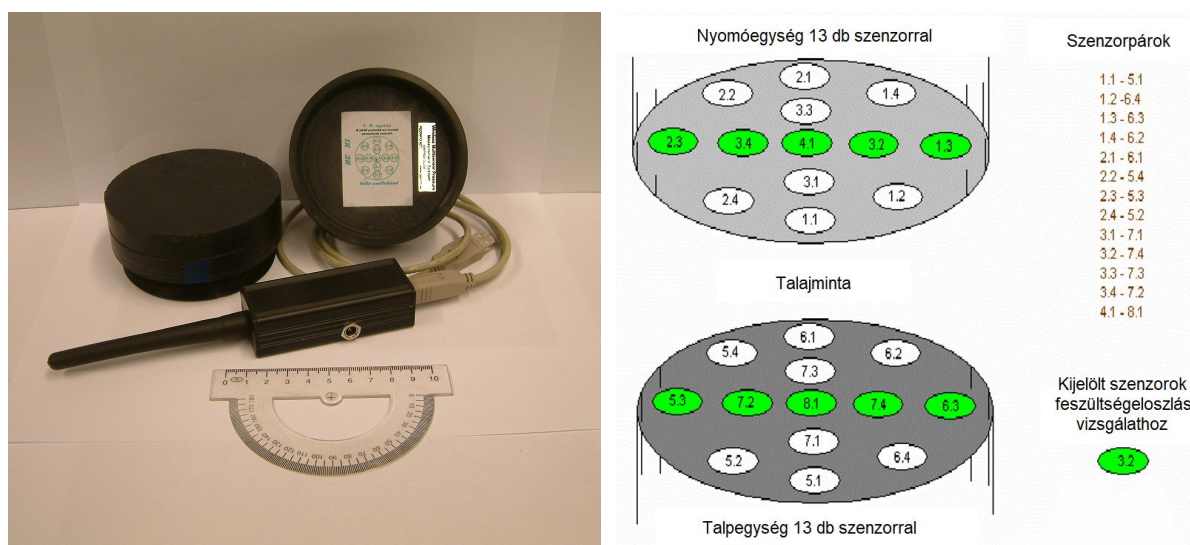
A konszolidálatlan, laza talajok konszolidációjának pontosabb vizsgálatához egy új fejlesztésű készüléket használtam, amit a Pedinfo Kft. közreműködésével fejlesztettünk. A mérésekkel szemben

megfogalmazott igények megfogalmazását követően a fejlesztés során a tesztelés és a beüzemelés érdekében vizsgálatokat végeztem, aminek eredményeként a készülék alkalmassá vált sorozatmérések elvégzésére. A fejlesztési folyamat során elvégeztem az ödométeres hengerbe (4-5. ábra), a nyomólapba és az aljzatba (4-6. ábra) épített feszültségmérő szenzorok kalibrálását, így megkaptuk a kalibrálási görbéket, amikkel az elektromos jelek nyomásértékké konvertálhatók, s a minta körül kialakuló feszültségtér pontosabban értelmezhető.

Az ödométeres vizsgálatok során a minta deformációja úgynevezett gátolt oldalkitérés mellett megy végbe, egydimenziós konszolidációként kezelhetjük. A mintában a feszültségeloszlás kis mértékben tér el a mintatest tetején és alján, kialakul a teljes konszolidáció.

Laza talajok ödométeres vizsgálatánál azonban figyelniünk kell a hagyományostól eltérő, nagyfokú, tengely irányú alakváltozásra is, ezért kompromisszumos megoldásként a mintatestek magasságának növelése mellett döntöttünk. A mintatestek méretarányainak eltolása a talajban kialakuló feszültségtér inhomogenitását okozták. A talajmintában kialakuló feszültségtér mérésére fejlesztettük ki a szenzoros ödométeres eszközt.

A közel 1:1 méretarányok mellett, az összesen 42 darab nyomásmérő szenzor segítségével, ilyen módon nyomon követhető a mintatestben kialakuló feszültségtér. A rögzített feszültségértékekből pedig különböző talajparaméterek számíthatók és interpolálható a mintatesten belüli változások.



4-6. ábra: Nyomásmérő szenzorokkal ellátott, vezeték nélküli ödométeres nyomó- és talpegység

4.3 A TRIAXIÁLIS VIZSGÁLÓ BERENDEZÉS

Kutatómunkám során kiemelt hangsúlyt kapott a Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratóriumban található triaxiális vizsgáló berendezés (4-7. ábra). A talajok nyírószilárdsági paramétereinek meghatározásánál használt vizsgálati módszer az egyik legpontosabb eredményt szolgáltatja, mivel a mérések során a tengelyirányú feszültségek mellett az oldalirányú (laterális) nyomások is

változtathatóak, így szimulálva a geológiai környezet mélységfüggő paramétereit. A különböző oldalnyomások mellett elvégzett vizsgálatok eredményei alapján megszerkesztett Mohr-körökre fektetett Coulomb-féle tönkremeneteli egyenes alapján meghatározhatóak a nyírószilárdsági paraméterek (belső súrlódási szög, kohézió).



4-7. ábra: Triaxiális vizsgáló berendezés a Miskolci Egyetem, Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratóriumában

A talajok rugalmas, képlékeny állapotához tartozó nyírószilárdsági paramétereinek méréséhez egy digitális adatgyűjtővel ellátott, teljes mértékben automata, számítógép vezérelt rendszert használtam, amely az olasz Controls vállalat által forgalmazott, kereskedelmi forgalomban kapható triaxiális és ödométeres mérőrendszerének módosított változata. A berendezést kiegészítettük egy, a kutatási célnak jobban megfelelő térfogatmérő egységgel, amely a minták térfogatváltozásának szélesebb tartományon való mérését teszi lehetővé. Ez különösen fontos laza, konszolidálatlan talajok esetén, ahol nagy deformációkra, valamint térfogatváltozásokra számíthatunk.

A triaxiális terhelőkeretet egy egyedi fejlesztésű vezérlő programmal irányítjuk, amely lehetővé teszi a terhelési folyamatok pontosabb irányíthatóságát, tetszőleges terhelési függvények alkalmazását. A vezérlőprogrammal a triaxiális cella nyomásának és a mintatest tengely irányú terhelésének változtatásával különböző feszültségpályákat definiálhatunk. A program a kalibrációs egyenletek által a beérkező jeleket fizikai paraméterekké alakítja, amelyek lehetővé teszik a vezérlési feltételek minél jobb követését, valamint rögzíti az egyes csatornákon beérkező információkat. Mindezek összességében olyan vizsgálati módokat és adatfeldolgozási eljárásokat tesznek lehetővé, amelyek lehetővé teszik az újszerű megoldások alkalmazását a talajmechanikában.

parancsok kiadására. A szenzorok kalibrációs adatait is a vezérlő program tárolja, ami megkönnyíti a felhasználó számára a mérések véghezvitelét.

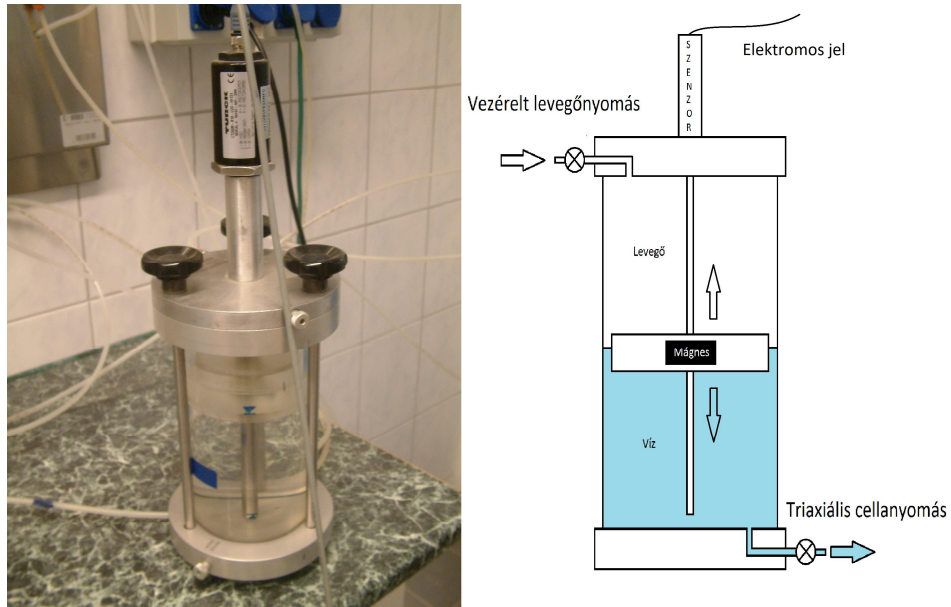
A minta tengely irányú méretváltozásait egy 100 mm méréshatárú elmozdulásmérő szenzor méri, amelyet egy mikrométer segítségével kalibráltam.

A tengely irányú erők mérését egy erőmérő cella végzi, ami a triaxiális cella nyomórúdjaához csatlakozik. A nyomórúd közvetlen kapcsolatban van a minta tetejére helyezett teherátadó és elosztó lappal, így a mérőcellával a mintatestre átadódó terhelés pontosan mérhető. A Controls által gyártott mérőberendezés eredetileg 2,5 kN méréshatárú erőmérő cellával szerelt, amit lecseréltünk egy 20 kN (2t) terhelhetőségű, HBM C9B erőmérő cellára, így mérhetővé vált a talajra a kritikus állapotban ható tengelyirányú erő is.

A triaxiális mérőrendszer részét képezik még a nyomásmérő szenzorok. Ezen szenzorok segítségével a vizsgálatok során mérhetjük a cella- valamint a pórusvíznyomást. A nyomásmérő szenzorok kalibrálását egy, már korábban kalibrált szenzor, valamint egy manométer segítségével végeztem.

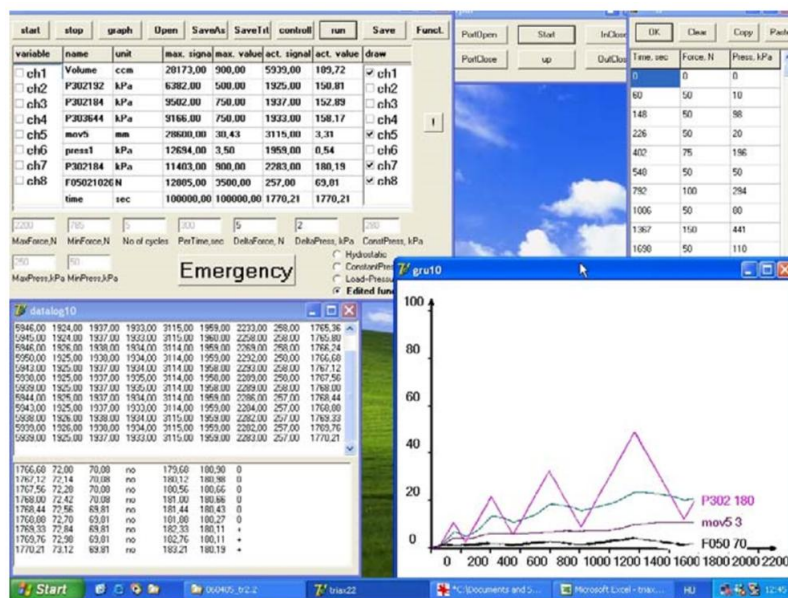
A legnagyobb változtatást a minta térfogatváltozásának mérése miatt kellett végrehajtani. Laza, konszolidálatlan talajok esetén a minta térfogatváltozása nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint jól konszolidált talajok esetén, így a hagyományos térfogatmérő szenzorok mérési tartománya vizsgálataim végrehajtására kevésnek bizonyult. A Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratórium és a Pedinfo Kft. közös fejlesztése a nagymértékű térfogatváltozást mérő egység (4-9. ábra). Az egyedi berendezésbe egy henger alakú úszót szereltek, amelyet a nyomásváltozás hatására a befoglaló zárt hengerből ki és beáramló folyadék fel vagy le mozdít el. Az úszóba helyezett mágnes a német TURCK cég által gyártott, mágneses erőteret mérő szenzorban jelet indukál. Az új eszköz segítségével a vizsgált minta térfogatváltozása 0-1300 cm³ között mérhető, ami az adatgyűjtő 64K-s felbontása mellett 0,05 cm³-s mérési pontosságot jelent. A kalibráció során a szenzor erős linearitást mutatott, a mérési eredmények korrelációja $R^2 = 0,99998$ volt.

A térfogatmérő egy korábbi nyomástartó edényből került kialakítására, ezért 0-12 bar között biztonságosan használható, akár nagy, (± 500 cm³/min) áramlási hozam tartományon is. Külön kiemелendő, hogy áramlás nélküli, vagy alacsony áramlások esetén sem tapasztalható a mérési jelek zajossága. A Controls által fejlesztett és forgalmazott térfogatmérők hibája, hogy maximálisan ± 50 cm³ térfogatváltozás mérésére alkalmasak és sem kis (közel nulla) sem nagy vízhozamok esetén nem pontosak.



4-9. ábra: A triaxiális rendszer térfogatmérő egysége

Az adatgyűjtőből érkező jeleket a számítógépes program összegyűjti és kiértékeli. A szenzoradatok közül a cellanyomás és a tengely irányú erő értékének vezérlő szerepe is van, ugyanis az automata rendszer ennek alapján csökkenti vagy növeli a mintát terhelő laterális és tengely irányú feszültségeket (4-10. ábra).



4-10. ábra: Triaxiális rendszer vezérlő programja

A vezérlőfüggvényt a felhasználó tudja a mérés megkezdése előtt betáplálni a vezérlő programba. A vezérlőfüggvény megadása „tengelyirányú erő – idő” és „cellanyomás – idő” függvénykapcsolatok megadásával történik.

A mért adatok rögzítése vizsgálatonként külön fájlban történik, így lehetőség van azok további feldolgozására, esetleg javítására, szűrésére. A vezérlőszoftverrel szemben támasztott igények megfogalmazása után a számítógépes programot dr. Czinkota Imre írta meg. A vezérlőszoftver és a mérő adatgyűjtő rendszer elektromos illesztését Czinkota György valósította meg.

A vezérlőprogram kommunikációs felületén nyomon követhetjük a mért értékeket és a kiadott vezérlő parancsokat, egy másik ablakban pedig a szenzorok nevei, kalibrációs adatai, aktuális jel és mért értékei találhatóak. (4-10. ábra)

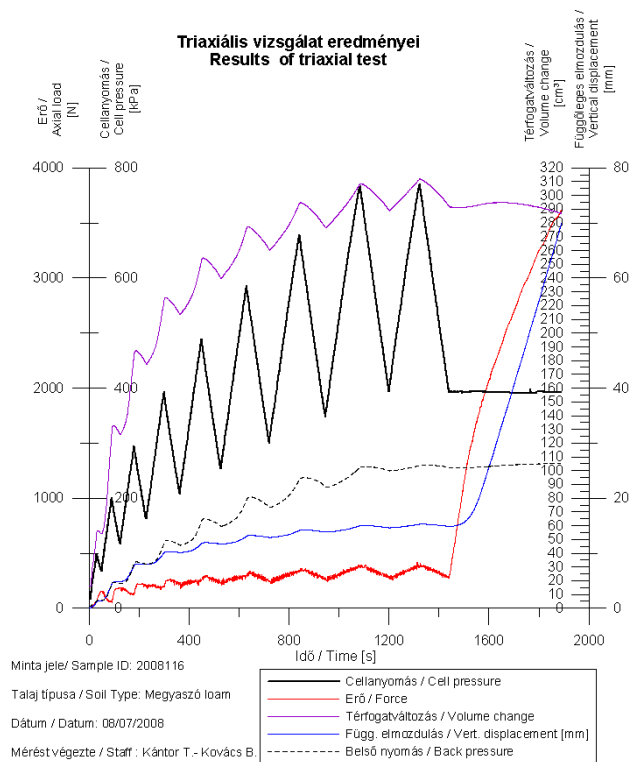
A vezérlő függvényt egy ablakban kirajzolva is látjuk, így a függvények beadása után vizuálisan is ellenőrizhetjük a végrehajtani kívánt feladat helyességét.

Többszörösen ismételt mérések esetén különösen hasznos a szenzorok adatainak vizuális megjelenítése is, amit egy külön ablakban találunk.

4.3.2 A Cam-Clay paraméterek meghatározása

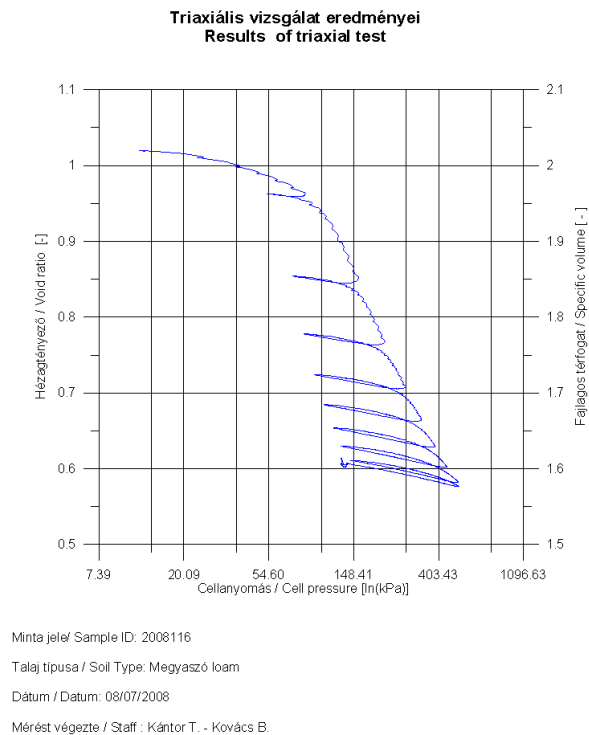
A Cam-Clay paraméterek meghatározására egy több lépcsős, több típusú mérést magába foglaló mérési sorozatot alkalmaztam, aminek a főbb részei:

- SHD (Serial Hydrostatic and Deviator, Soros Hidrosztatikus és Deviatoros) típusú triaxiális mérés (4-11. ábra);



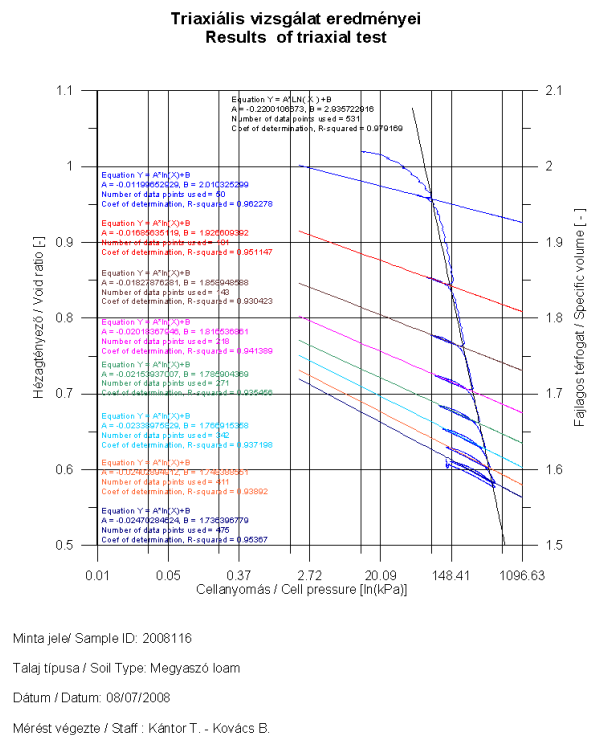
4-11. ábra: SHD típusú triaxiális vizsgálat mérési eredményeinek összefoglalója

- A hézagtényező cellanyomás-függésének meghatározása (4-12. ábra);



4-12. ábra: Hézagányező változása az SHD típusú triaxiális mérés közben ($\ln(p)$ - e)

- Az $e - \ln(p')$ görbe hiszteréziseire illesztett egyenesek meredekségeinek (κ) és az NCL (λ) érték meghatározása (4-13. ábra);



4-13. ábra: Cam-Clay paraméterek meghatározása az $e - \ln(p)$ görbe alapján

- Az N és Γ paraméter kiszámítása.

A κ , λ , Γ és N paraméterek a vizsgálat hidrosztatikus terhelési szakaszából - amely a mérések kezdeti, hidrosztatikus terhelési állapotot előállító szakasza - határozhatók meg.

A λ paraméter mutatja a tiszta tömörödési eljárás során a fajlagos térfogat vagy hézagtényező változását (4.1).

$$\lambda = \frac{\delta v}{\delta \ln(p')} = \frac{\delta e}{\delta \ln(p')} \quad 4.1$$

Az eljárás kezdetén domináns a talaj plasztikus viselkedése, és közelebb van a kritikus állapothoz, a hézagtényező nagy mértékben csökken. Ez az $e-\ln(p')$ síkban szemi-logaritmikus koordináta rendszerben ábrázolva lineáris függvényként jelenik meg.

4.4 A NAGYMÉRETŰ NYÍRÓBERENDEZÉS

A Miskolci Egyetem egyedi gyártású, speciális vezérlőszoftverrel irányított nagyméretű nyíróberendezése első ránézésre csak méreteiben tér el egy hagyományos nyíróberendezéstől. A fizikai méreteken túl azonban fontos tényező még az a széles terhelési tartomány is, amin a szerkezet dolgozni képes. Jellemző paramétereit ebben a fejezetben foglalom össze.

4.4.1 A nagyméretű nyírógép főbb mechanikai paramétereit

A szerkezet befoglaló méretei impozánsok, szélessége 1400, hosszúsága 4600, magassága pedig eléri a 2300 mm-t, össztömege meghaladja az 5,5 tonnát. Ezen kívül a gép része még egy elektromos és kommunikációs szekrény, valamint a hidraulikus rendszert ellátó hidraulika-szivattyú. A mechanikai, elektromos és szenzoros egységek fejlesztésében az STC System Group Kft. segítségét vettük igénybe.

Az alapgépet is további három részre oszthatjuk, amelyek a mérések során külön részfeladatokért felelősek. Az első rész a szerkezet mintaelőkészítő tere, ahol a vizsgálandó anyag az aktuális nyíródobozba betöltésre kerül, valamint a mérést követően itt építjük ki a nyírón terhelésű próbatestet. A középső egységben történnek a mérési folyamatok. Ide csatlakozik be a hidraulikus rendszer, amely a vizsgálatok során a normál terhelést biztosítja, valamint itt található a nyíródobozok felső részét elhúzó megfogó keret, ez felel a nyíródoboz felső részének rögzítéséért, valamint kapcsolatot biztosít a nyírógép harmadik főegységével, a vonóerőért felelős motortérrel (4-14. ábra). Jelenleg két darab elektromotor végzi a vízszintes irányú mozgatót, egyik a lassú (LS), a másik a gyors (HS) elmozdulást biztosítja. A két motor külön-idejű csatlakoztatását manuális kuplungrendszerrel történik.



4-14. ábra: Nagyméretű nyíróberendezés

A nagyméretű nyírógéphez három különböző méretű nyíródoboz tartozik:

- Nagyméretű nyíródoboz: 700 x 700 x 700 mm [szélesség x hosszúság x magasság]
- Közepes méretű nyíródoboz: 400 x 400 x 300 mm [szélesség x hosszúság x magasság]
- Kis nyíróhenger: Ø315 x 300 mm [átmérő x magasság]

Látható, hogy a szokványostól (100 mm átmérőjű kör keresztmetszetű, vagy 100 mm oldalhosszúságú szögletes minták) eltérően kutatócsoportunk nagy mintákkal is dolgozik, ami a fejlesztés része. A nyíródobozok jelentős magasságát a tervezett hagyományostól eltérő vizsgálati megoldások indokolták. A szerkezet moduláris felépítéséből adódóan lehetőség van más, a nagyméretű nyíródoboznál kisebb méretű nyíródobozok alkalmazására is. A berendezéssel elérhető terhelési tartomány 0 és 25 tonna között változik, így nyíródoboz mérettől függően akár a 2000 kPa-os normál terhelés is elérhető. A nyírófeszültségek esetén ez elérheti az 500 kPa-t. A horizontális elmozdulás tartománya 0 és 350 mm, míg a horizontális elmozdulás sebességtartománya 0,001 és 500 mm/perc között szabályozható. A berendezés a mérések során rögzíti az időt, a terhelő erőket és feszültségeket (normál- és nyíró terhelés), valamint a vertikális és horizontális elmozdulásokat.

4.4.2 A nagyméretű nyírógép vezérlése

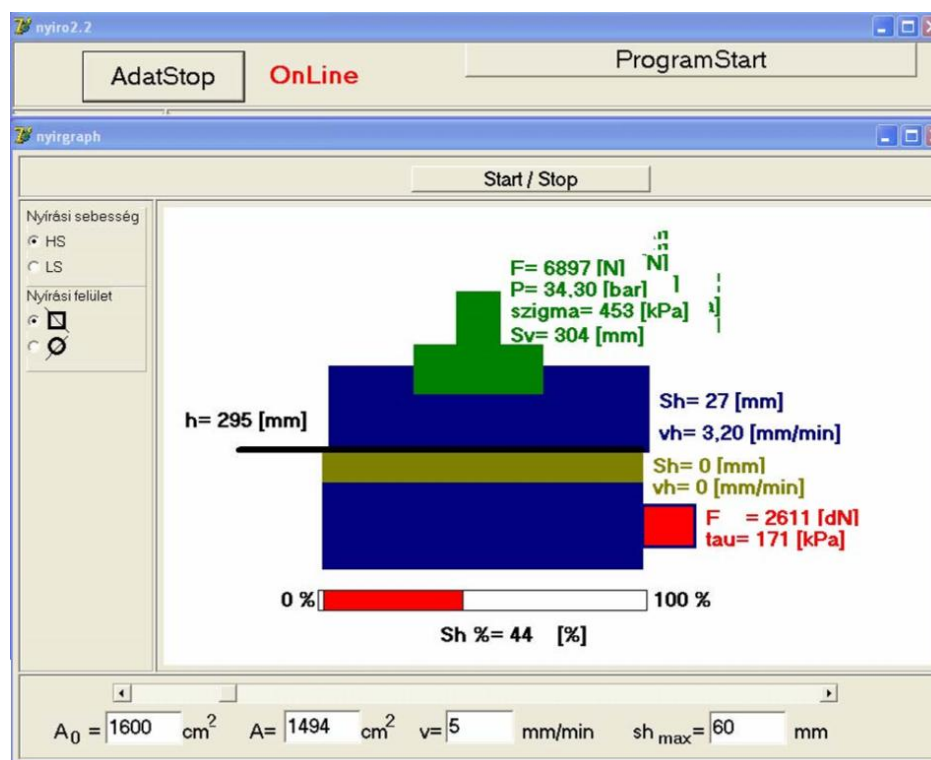
A nagyméretű nyírógépben lévő szenzorok, egyéb elektromos és hidraulikus berendezések összehangolt működése érdekében a szerkezeti kivitelezéssel párhuzamosan a vezérlés fejlesztése is megtörtént. Ekkor egy külön ezzel az egyedileg fejlesztett géppel kommunikáló szoftver kifejlesztése is megtörtént (4-15. ábra). A nagyméretű nyíróberendezés fejlesztése során mindig elsődleges szempont

volt a modularitás és a többcélúság, ezért a számítógépes programot is ezen vezérelvek alapján kellett megalkotni. Legfontosabb a hidraulikus és mechanikus részegységek független vezérelhetősége és a folytonos adatgyűjtés és tárolás, valamint a beérkező jelek alapján történő vezérelhetőség biztosítása volt. A megfelelő szoftver fejlesztését dr. Czinkota Imre végezte, A PLC – vezérlőszámítógép kapcsolat illesztésének megoldása Czinkota György munkája.

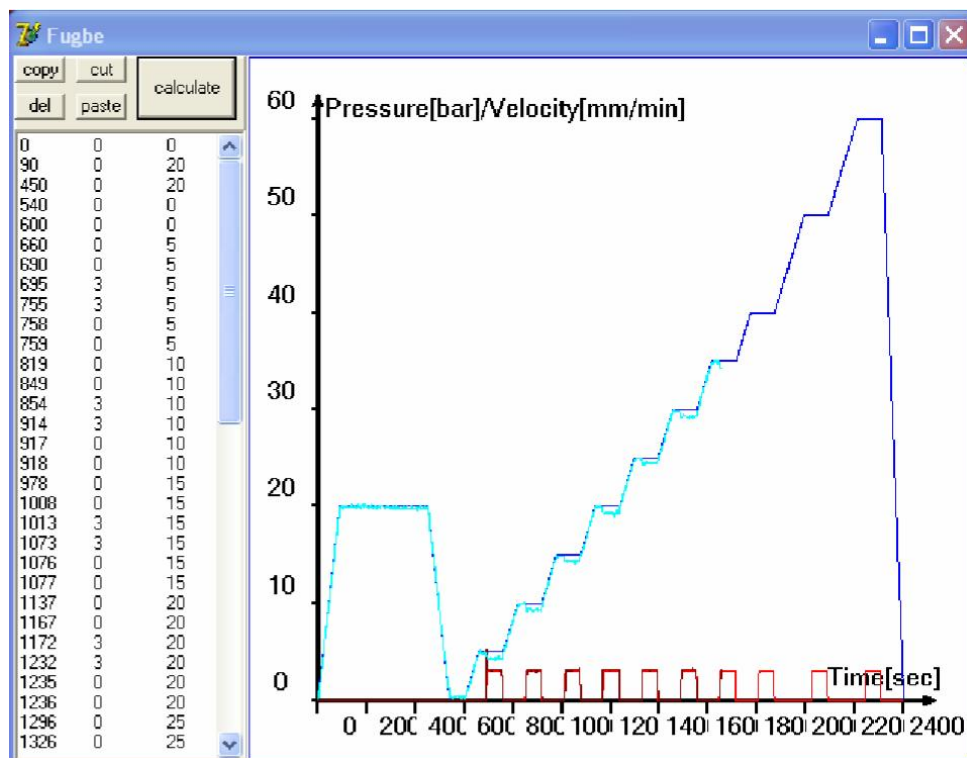
A szoftver alkalmas arra, hogy a nyírógép PLC-jén keresztül kapcsolatban legyen a szenzorokkal, azok jeleit feldolgozza, s egy előre meghatározott vezérlő függvényből számított adat alapján vezérlési utasítást adjon ki a megfelelő egységnek. Jelenleg a hidraulikus rendszer nyomását, valamint a horizontális elmozdulás sebességét tudjuk vezérelni (4-16. ábra).

A vezérlésnél használt, előre definiált függvényekben akár töréspontok is beállíthatóak, mind az elhúzás sebességére, mind a hidraulikanyomásra vonatkozóan, így lehetőség van olyan függvény előállítására, amellyel a deformáció sebessége és a normál feszültség változásának sebessége szabályozható. A szoftverfejlesztés többlépcsős folyamat volt, melynek eredményeként a gép vezérlése alkalmassá vált egy többlépcsős vizsgálati módszer kidolgozására (Kántor 2011).

A szoftveres vezérlés mellett, a nyírógépre szerelt vezérlőpanellel is lehetőség van a nyírógép üzemeltetésére (Kántor és Mikita 2010).



4-15. ábra: Az MTV07-GG típusú nyírógép vezérlő panelje

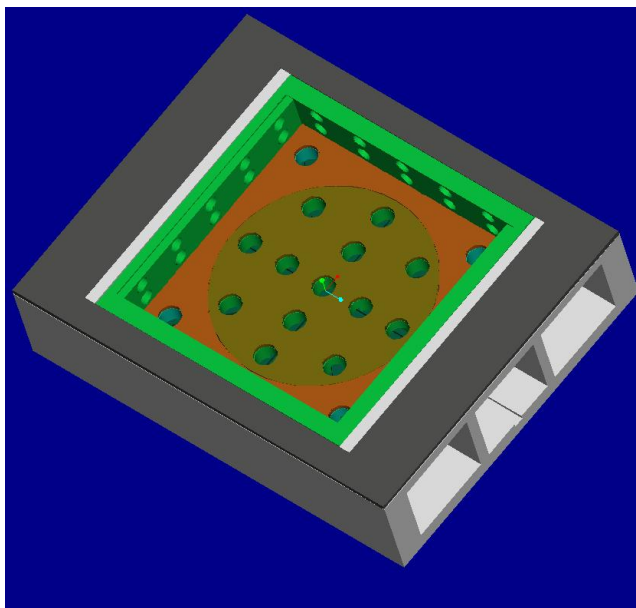


4-16. ábra: Nagyméretű nyírás során alkalmazott vezérlőfüggvény

4.4.3 Az MTV07-GG nagyméretű nyírógép nyomásszenzoros egysége

A nagyméretű nyírógép továbbfejlesztéseként hozta létre a laboratóriumunk a G-Key Terv Kft. és a Pedinfo Kft. közreműködésével a közepes méretű (400 x 400 x 300 mm) nyíródobozzal kompatibilis, nyomásmérő szenzorokkal ellátott mérőbetétet (4-17. ábra). A betét ugyan 350 x 350 mm-re csökkenti a nyíródoboz hasznos felületét, viszont a beépített, a mintát körülvevő 82 darab feszültségmérő szenzor jelentős többletinformációval szolgál a talajokban kialakuló feszültség eloszlásáról. Az elv megegyezik a korábban bemutatott szenzoros ödométeres egységével.

A szenzorok által lehetőség van a mintában nyíró és nyomóterhelések hatására létrejövő talajparaméter változások roncsolásmentes követésére. A szenzorok mérési tartománya 0-800 kPa közötti tartományban stabil linearitást mutatnak. A szenzorokat a fedő és alaplapp esetében nagy permeabilitású szinterbronz lapokban kialakított fészkekben helyeztük el, amely alatt a vízelvezetés biztosított (Kántor 2009).

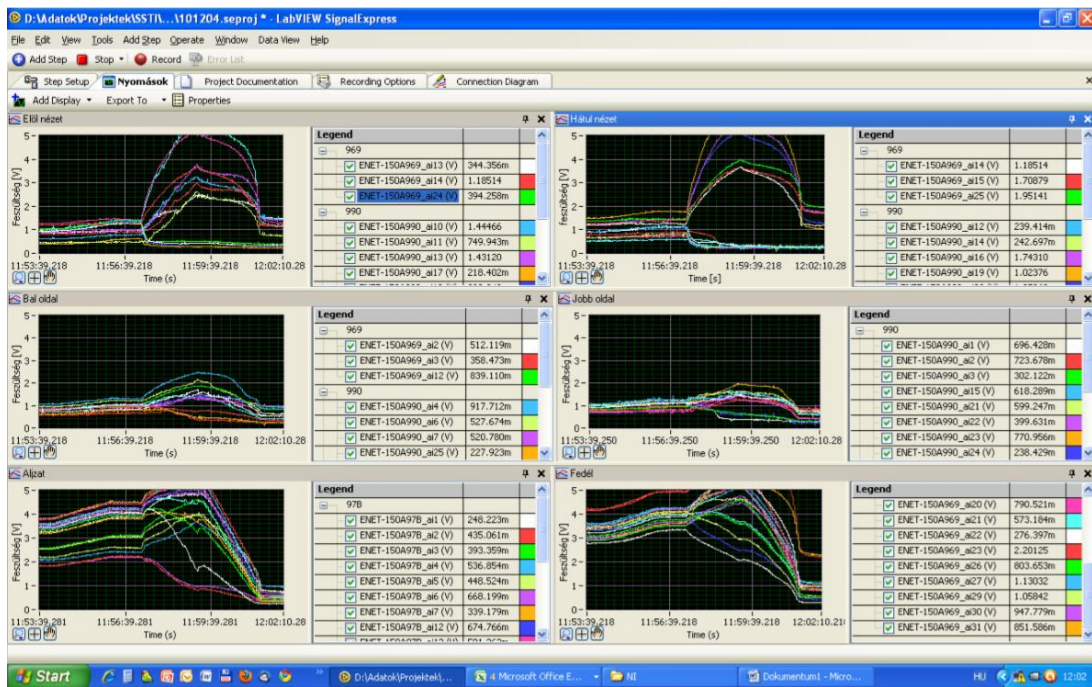


4-17. ábra: Nyomásszenzorokkal ellátott betét a nagyméretű nyíróberendezéshez (aljzat) (G-Key Terv Kft.)



4-18. ábra: Nyomásszenzoros mérőrendszer a nagyméretű nyíróberendezéshez (Pedinfo Kft.)

A beépített szenzorok jeleit a 4-18. ábra szerinti adatgyűjtő doboz gyűjti és továbbítja a számítógép irányába. A szenzorok külön-külön kábeles kapcsolaton keresztül kommunikálnak a mérődobozzal, ami - a szenzoros ödométeres mérőegység vezeték nélküli kommunikációjához képest - megnehezíti a mérések kivitelezését, mivel a kábelek a sorozatmérések során sérülékenyek (Kántor, Kriston és Czinkota 2009).



4-19. ábra: A feszültségmérő szenzorok jeleit feldolgozó és rögzítő LabView program

A beérkező jelek a LabView szoftver segítségével kezelhetők. A megfelelő kalibrációs függvények használatával a szenzorokból érkező elektromos jelek feszültségértékké konvertálhatók (4-19. ábra).

5 AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK ÉS ELMÉLETI ALAPOK

Az anyagmodell nem más, mint egy anyagnak az alkalmazott terhelés hatására adott válaszában matematikai ábrázolása, amely a fizikai változók (mechanikai feszültség, hőáram, villamos áram, stb.) és más fizikai mennyiségek (mint pl. alakváltozás, hőmérséklet eloszlás, villamos feszültség, stb.) között teremtenek kapcsolatot.

Az anyagmodelleket aszerint csoportosíthatjuk, hogy miként teremtenek kapcsolatot a bemenő és kimenő mennyiségek, (vagyis mechanikai esetben a feszültség és az alakváltozás) között. Ez a kapcsolat lehet lineáris vagy nemlineáris. Lineáris esetben a kimenő mennyiség egyenesen arányos a bemenővel és az arányossági tényező valamilyen anyagjellemző (Tamás, és mtsai. 2014).

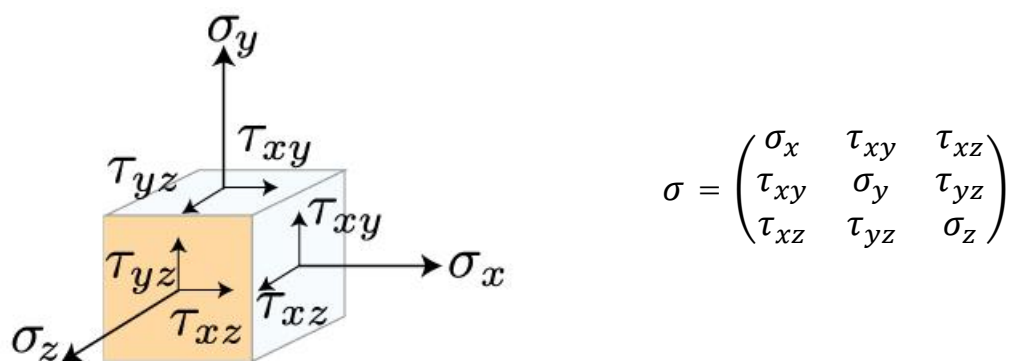
A talajok terepi és laboratóriumi vizsgálatai a későbbi modellalkotás fontos részei. A vizsgálatok során határozzuk meg a modell bemenő paramétereit, mely paraméterek minősége döntően befolyásolja a későbbi modell eredményeinek minőségét. Értekezésem során modellezési feladatot nem végeztem, törekedtem a laza, konszolidálatlan talajok talajtulajdonságainak minél pontosabb meghatározására.

A fejezetben bemutatott módszerek és elméleti alapjaik támpontként szolgáltak a vizsgálatok megtervezésében és kivitelezésében, mivel mindenképp a konszolidált talajok jellemzésére használt anyagparaméterekhez hasonló, azokkal egyeztethető, azokkal összevethető anyagtulajdonságokat kívántam megállapítani.

5.1 A MOHR-COULOMB ANYAGTÖRVÉNY

A talajok nyírószilárdsági paramétereinek meghatározása minden állékonysági probléma megoldásának sarkalatos pontja. Ezen paraméterek terepi és laboratóriumi körülmények közötti mérési módszerei, az úgynevezett nyírószilárdsági vizsgálatok (közvetlen nyírókísérlet, triaxiális vizsgálat stb.) közismertek. Vizsgálataim során a laza, konszolidálatlan talajoknál tapasztalható nyírási ellenállások meghatározására törekedtem, mérési eredményeim feldolgozásához a Mohr-Coulomb elméletet használtam.

Az anyagok igénybevétele (5-1. ábra), illetve a bennük keletkező feszültségek csak egy bizonyos határig nőhetnek. A rugalmas viselkedés után elkövetkezik egy olyan állapot, amelyben már maradó alakváltozások is keletkeznek, azaz, ha a terhelést e határ elérése után szüntetjük meg, akkor a terhelt test már nem nyeri vissza az eredeti alakját. A mérnöki gyakorlatban a leggyakrabban az ideálisan rugalmas - tökéletesen képlékeny anyagmodellt használjuk, bár ez fémekre, egyéb rideg anyagokra igaz, viszont konszolidált vagy túlkonszolidált talajok esetén is helytálló megállapításokra juthatunk ezen közelítéssel.



5-1. ábra: Az elemi kockára ható feszültségek és a feszültségmátrix

A talajmechanikai gyakorlatban olyan eljárások használatosak, amelyekben elegendő azt vizsgálni, hogy egy közeg valamely (vagy több) pontjában milyen feszültségi állapot esetén lesz képlékeny (vagy törési) állapot. Az ilyen összefüggéseket leíró egyenleteket szokás képlékenységi (vagy törési) feltételnek nevezni.

A talajokra a Coulomb-féle feltételt használjuk, mert az anyagvizsgálatok szerint ez írja le legpontosabban a konszolidált talajok viselkedését. Eszerint egy pontban akkor következik be képlékeny állapot (vagy tönkremenetel), ha található a pontban egy olyan sík, ahol a rá ható σ és τ feszültség kielégíti a

$$\tau = \sigma \cdot tg(\varphi) + c \quad 5.1$$

összefüggést, a törési-képlékenységi feltételt. Az anyagjellemző a belső súrlódási szög (φ) és a kohézió (c), ezeket nyírószilárdsági paramétereknek nevezzük. A Coulomb-féle törési feltétel összekapcsolható a Mohr-féle feszültségábrázolással. A feltétel ekkor úgy is megfogalmazható, hogy egy pontban akkor van törési (képlékeny) állapot, ha a pont (σ_1 és σ_3 által meghatározott) főköre érinti a Coulomb-egyenest (Szepesházi 2008).

5.2 HOOKE ANYAGTÖRVÉNY

Laza, konszolidálatlan talajok vizsgálatainál fontos azok rugalmas viselkedésének a megismerése. Habár ezen talajokra leginkább a képlékeny deformáció jellemző (ami a terhelés nagyságának függvénye), rugalmas tulajdonságaik a feltömörödés közben változnak. A rugalmas anyagtulajdonságok mérésére a Hooke-féle anyagtörvény összefüggéseit használtam.

A mérnöki gyakorlatban a többnyire - első közelítésként - idealizált feltételek mellett végezzük a vizsgálatainkat. Általában feltételezzük, hogy az anyag

- homogén;
- izotróp;
- rugalmas;
- lineáris feszültség-alakváltozás kapcsolattal jellemezhető.

A lineárisan rugalmas anyagtörvény az előbbieken említett fizikai feltételek legegyszerűbb és leggyakrabban használt példája.

Az egyszerű Hooke-törvény közismert és a talajmechanikai számítások során gyakran használt formula. Az egytengelyű nyomókísérlet esetében a függőleges terheléssel azonos irányú feszültség (σ_z) és alakváltozás (ε_z), illetve a keresztirányú alakváltozások (ε_x és ε_y) közötti kapcsolat:

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon_z \quad \varepsilon_x = -\nu \cdot \varepsilon_z, \quad 5.2$$

ahol E a rugalmassági (Young-) modulus, ν a Poisson-tényező. A lineárisan rugalmas, homogén, izotróp közeget általában e két anyagjellemzővel jellemezzük. Képezhetők azonban más paraméterek is, például a nyírási modulus (G):

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad 5.3$$

Mindenesetre két független anyagjellemző leírja a vázolt tulajdonságú anyagot (Szepesházi 2008).

Meg kell jegyezni, hogy a feszültség-alakváltozás összefüggés még kicsiny terhelések mellett sem lineáris, s csak akkor használható, ha a deformációk kicsik s nem befolyásolják a külső erők hatásait. Habár a talajokra egyik feltétel sem igaz, a Hooke-törvény a gyakorlatban jól használható közelítés. Az általános Hooke-törvény az alábbi alakban írható fel (5.4-5.6) (Braja 2008):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z)] \quad 5.4$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_z)] \quad 5.5$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] \quad 5.6$$

Látható, hogy az általános Hooke-törvény a talaj térbeli feszültségi és alakváltozási állapotát három fajlagos összenyomódásra és három fajlagos szögtorzulásra felírt egyenlettel felírható. Lényeges, hogy valamely irányú fajlagos összenyomódás elsősorban az azonos irányú normál-feszültségtől függ, de a keresztirányú feszültségek is befolyásolják. Valamely szögtorzulás viszont csak az azonos irányú

nyírófeszültség függvénye, ami azt is jelenti, hogy a fősíkok eltolódhatnak, de nem fordulnak el (Szepesházi 2008).

A Hooke-törvényből kifejezhető az x, y és z irányba ható főfeszültségek egyenletei (5.7-5.9), így a feszültségek az alakváltozások és a rugalmassági talajparaméterek ismeretében visszaszámíthatók.

$$\sigma_x = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1 + \nu} \cdot \varepsilon_x \quad 5.7$$

$$\sigma_y = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1 + \nu} \cdot \varepsilon_y \quad 5.8$$

$$\sigma_z = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1 + \nu} \cdot \varepsilon_z \quad 5.9$$

5.3 A HARÁNTKONTRAKCIÓS (POISSON-) TÉNYEZŐ

A Poisson-tényező nevét megalkotójáról Siméon Denis Poisson, francia matematikus és fizikusról kapta. A Poisson-tényező (μ) a szilárd testek mechanikájában használt anyagjellemző, de az idők folyamán a talajmechanikai is átvette és alkalmazza filozófiáját. Egyirányú feszültségi állapot esetén (húzás vagy nyomás) a keresztirányú és a hosszirányú alakváltozás egymáshoz viszonyított arányát írja le. A Poisson-tényező dimenzió nélküli szám, és azt a módot jellemzi, ahogyan az anyag alakváltozást szenved.

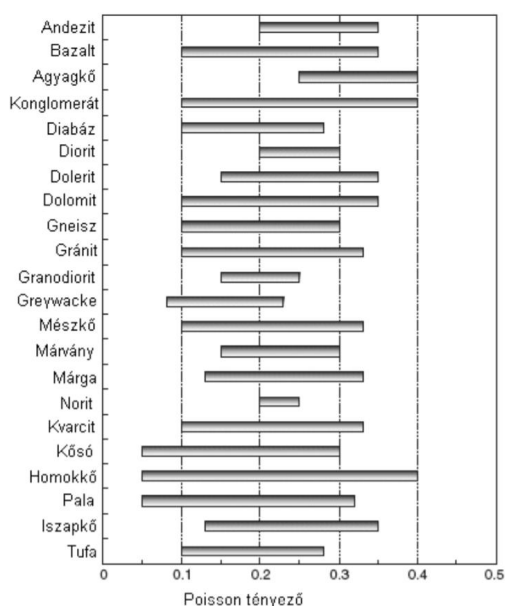
Az általános rugalmasságtani megközelítés szerint a talajok rugalmassági modulusa a triaxiális (vagy egytengelyű) vizsgálat során kapott feszültség-alakváltozás görbéből számítható, figyelembe véve a tengelyirányú alakváltozást és a másik két oldalirányban (tengely- és oldalirány) működő feszültségeket. A görbéből különböző modulusok az ismert rugalmasságtani összefüggés alapján határozhatók meg, amelyek a harántkontrakciós tényező (Poisson-tényező) segítségével számítják az adott modulusot (Tompai 2008).

A közetmechanikában az egyik alapvető paraméter a közet Poisson-tényezője (ν). Mivel általában meghatározása sok esetben nehézségekbe ütközik, jól felszerelt laboratóriummal van csak lehetőség pontos értékének meghatározása, így igen kevés szakirodalom foglalkozik ezzel az anyagállandóval. Egyirányú nyomószilárdsági vizsgálat esetén a keresztirányú (ε_l) és tengelyirányú (ε_a) alakváltozások hányadosaként értelmezhető, azaz:

$$\nu = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a} \quad 5.10$$

Értéke az anyagtudományok területén 0 és 0,5 között változhat. Tekintettel arra, hogy a keresztirányú (axiális) elmozdulás általában nem tekinthető linearizálhatónak, így megegyezés alapján ezen értéket a törőteher 50 %-hoz tartozó elmozdulások értékével határozzák meg.

Az 5-2. ábra a fontosabb kőzetek Poisson tényezőjének mért tartományait mutatja be Gercek, 2007-es összefoglalója alapján. Fontos megjegyezni, hogy a bemutatott értékeket inkább tájékoztató jellegűek (Vásárhelyi 2016).



5-2. ábra: Különböző kőzetek Poisson-tényezője, mérési eredmények alapján (Gercek alapján (Vásárhelyi 2016))

Az 5-2. ábra alapján könnyen belátható, hogy a Poisson-tényező meghatározása még nagyszilárdságú, kvázi homogén kőzetek esetén is igen nagy szórást mutat, így megnehezíti ezen természetes eredetű anyagok modellezési feladatát. A kis szilárdságú kőzetek, illetve talajok tekintetében még nagyobb szórás tapasztalható, leginkább akkor, ha a vizsgált anyag nem konszolidált.

Talaj modellezése esetén, különös tekintettel, ha deformációk vizsgálatáról van szó, fontos szerepet játszanak az adott talajra jellemző rugalmassági tényezők, úgy, mint a rugalmassági vagy Young modulus (E) és a Poisson-tényező (ν). A hagyományos talajmechanika módszerei konszolidált vagy túlkonszolidált, idealizált talajok viselkedését írják le, ahol a talaj rugalmas viselkedését konstans, vagy szűk határok között változó, jellemző értékek jellemzik (Rowe 2001.).

A Poisson-tényező értékét talajok esetén is a 0 és 0,5 közötti tartományon értelmezzük. Amikor az érték megközelíti a maximális értéket, azaz a 0,5-et, a talaj a kritikus állapot közelébe ér, ahol kis deviátoros feszültségváltozás hatására is nyírási tönkremenetelt szenved, viszont ebben az állapotban összenyomhatatlan és eléri a térfogatváltozás maximumát. Ebben az állapotban a talaj, mint nagy viszkozitású folyadék viselkedik.

Mechanikai szempontból a Poisson-tényező az anyagok rugalmas viselkedését leíró, anyagjellemző, viszont laza (konszolidálatlan) talajok esetén a rugalmas és képlékeny viselkedés nehezen elválaszthatók egymástól a bonyolult tömörödési és nagy alakváltozási folyamatok miatt.

Ennek okán a konszolidálatlan talajok esetén a Poisson-tényező meghatározása is bonyolult feladat, és a terhelés során bekövetkező talajfizikai paraméterek változása miatt nem is tekinthető állandó értéknek. A konszolidálatlan talajok vizsgálata napjaink aktuális feladata, ugyanis a mezőgazdasági, erdőgazdasági, katonai és egyéb, a laza talajokat érintő modellező feladatok adatigényének kielégítése szempontjából fontos.

A Poisson-tényező mérésének alapjául a homogén és izotróp talajokra érvényes Hooke törvény szolgálhat (5.11).

$$\underline{T} = 2G[\underline{A} + \frac{\nu}{1-2\nu} A_I I] \quad 5.11$$

ahol G a talaj nyírási modulusa, ν pedig a Poisson-tényező. \underline{T} feszültség mátrix az alábbi formában értelmezhető:

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad 5.12$$

Az alakváltozási mátrix (\underline{A}) (5.13) pedig a következő formában írható fel:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad 5.13$$

Egytengelyű feszültségállapot esetén az általános feszültséget leíró egyenlet (5.16):

$$\sigma = 2G[\varepsilon + \frac{\nu}{1-2\nu}(1-2\nu)\varepsilon] \quad (\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x) \quad 5.14$$

$$\sigma = 2G \left(\frac{(1-2\nu) + \nu(1-2\nu)}{(1-2\nu)} \right) \varepsilon \quad 5.15$$

$$\sigma = \underbrace{2G(1+\nu)}_E \varepsilon \rightarrow \sigma = \varepsilon E \quad 5.16$$

ahol az E a Young modulus

$$E = 2G(1+\nu) \quad , \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad 5.17$$

Tiszta nyírás esetén a nyírófeszültséget az alábbi formában írhatjuk fel:

$$\tau = 2G \frac{1}{2} \gamma \rightarrow \tau = G\gamma \quad 5.18$$

ahol γ a vizsgált anyag térfogatsúlya.

A fajlagos térfogatváltozás definiálásához az alábbi egyenletet (5.19) alkalmazhatjuk:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad 5.19$$

A Hooke törvény alapján:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = 2G \left[\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right] \quad 5.20$$

$$3\sigma_0 = 2G \left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{\Delta V}{V} \right) \rightarrow \frac{3\sigma_0}{\Delta V/V} = \frac{2G(1+\nu)(1-\nu)}{1-\nu} \rightarrow B = \frac{\sigma_0}{\Delta V/V} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad 5.21$$

ahol B a térfogati rugalmassági modulus. Az E , ν , G és B paraméterek alapján leírható a talajok statikus mechanikai viselkedése.

Triaxiális terhelési körülmények között a relatív térfogatváltozást az alábbi egyenlet (5.23) szerint adhatjuk meg:

$$\Delta\varepsilon_1 + 2\Delta\varepsilon_3 = \frac{\Delta V}{V} \Rightarrow \Delta\varepsilon_3 = \left(\frac{\frac{\Delta V}{V} - \Delta\varepsilon_1}{2} \right) \quad 5.22$$

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\Delta\varepsilon_1} \frac{\Delta V}{V} \quad 5.23$$

Ödométeres körülmények között, amikor laterális alakváltozások nem történnek, tehát a minta csak tengelyirányú alakváltozást szenved (D a levezetésnél használt konstans tag):

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z \Rightarrow D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad 5.24$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} \sigma_z \quad 5.25$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_z}{2} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \quad \gamma_{max} = \frac{\sigma_z}{2G} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \quad 5.26$$

5.4 A MÓDOSÍTOTT CAM-CLAY ANYAGMODELL

A Cam-Clay és a módosított Cam-Clay anyagmodellek az elasztó-plasztikus alakváltozást alapul vevő, felkeményedő (hardening) talajmodellek közé sorolandóak. Mindkét modell a talajok kritikus állapotát írja le, alapvetésük pedig az, hogy logaritmikus kapcsolat írható fel a talajmintára ható átlagos feszültség és a hézagtenyező változása között. A modelleket a cambridge-i egyetem kutatói puha talajokon (agyag) végzett vizsgálatok alapján dolgozták ki az 1950-60-as években (Roscoe,

Schofield és Wroth 1958). Számos publikációban közzétették eredményeiket (Roscoe és Burland 1968), s a későbbiekben ezek már, mint alapvetések kerültek bele a talajmechanikai gyakorlatba.

A modellnek kidolgozása során konszolidált és enyhén túlkonszolidált talajokat vizsgáltak, s alkalmazási területei is elsősorban magas konszolidáltsági fokú talajok mérnöki vizsgálataira irányultak (Sárközi, Kriston és Kovács 2007).

A laza, konszolidálatlan és telítetlen talajok és szemcsés összletek esetén kevés hivatkozással találkozhatunk a módosított Cam-Clay anyagtörvény alkalmazásával kapcsolatban.

Mindkét modell a talaj viselkedésének három fontos területét érinti:

- a talaj teherviselő képessége;
- a talaj összenyomódása vagy dilatációja (nyírás közbeni térfogatváltozás);
- a kritikus állapotban tapasztalható térfogatváltozás (feszültség- vagy térfogatváltozás nélküli alakváltozás).

A talajokat háromfázisú diszperz rendszerként kezelve, ahol a szilárd fázis a rendelkezésre álló teljes térfogatot nem tudja kitölteni (szemcsealak és szemcsefelszín egyenetlenségei miatt), a szemcsék közt kialakuló pórusteret a folyadék és levegő (gáz) fázis tölti ki. A modellszámítások során a szilárd és folyadékfázist a leggyakrabban összenyomhatatlan közegként kezeljük. A térfogatvesztés a levegő összenyomhatóságából, a szemcsék átrendeződéséből, valamint, ha nyílt rendszerrel beszélünk, akkor a pórusteret elhagyó víz- és levegőfázisból adódhat.

Az alakváltozást a talajok esetén is rugalmas és képlékeny alakváltozásra bonthatjuk. A teljes alakváltozás mértéke, valamint az ezen belüli rugalmas-képlékeny arány a terheléstől és a talaj konszolidáltsági fokától függ.

A Cam-Clay és módosított Cam-Clay modellek előnye, hogy alkalmasak az alakváltozások, térfogatváltozások és így a tömörödés igen precíz, valóság-hű modellezésére.

A kritikus állapotot leíró talajmodellek esetén a talaj állapota három tényező segítségével adható meg. Ezek a tényezők a mintára ható átlagos, hatékony feszültség (p'), a deviátor feszültség (q) és a fajlagos térfogat (v).

$$p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3} \quad 5.27$$

ahol a σ_1' , σ_2' és a σ_3' a talajmintára ható hatékony főfeszültségek. A deviátor feszültséget, a

$$q = \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1' - \sigma_2' \quad 5.28$$

egyenlet (5.28) alapján számíthatjuk. Itt a talajmintát terhelő főfeszültségek közül a legnagyobb, egyes számú, általában tengelyirányú főfeszültség (σ_1), valamint az oldalfeszültségek (σ_2) különbsége adja meg az átlagos feszültségen felüli (deviáns) többletfeszültséget.

A fajlagos térfogat (v) a hézagtényező (e) ismeretében számítható (5.29).

$$v = 1 + e \quad 5.29$$

Szepesházi 2007-ben közzétett munkájában összefoglalja a talajok rugalmas-képlékeny alakváltozására vonatkozó főbb összefüggéseket. Az úgynevezett HS-talajmodellek (Hardening Soil), szabad fordításban, felkeményedő talajmodellek családjába tartoznak a Cam-Clay modellek is.

A felkeményedő talajmodellek a talajok rugalmas, képlékeny és kritikus állapotai közti összefüggéseket írják le, s definiálják azokat a határvonalakat, ahol az állapotváltozások megtörténnek. (5-3. ábra)

A p' - q koordináta rendszerben ábrázolva a feszültségek alakulását, a talajok tönkremeneteli pontjait összekötő egyenes, a Mohr-Coulomb törési kritérium kiterjesztéseként az alábbi egyenlettel (5.30) írhatjuk le:

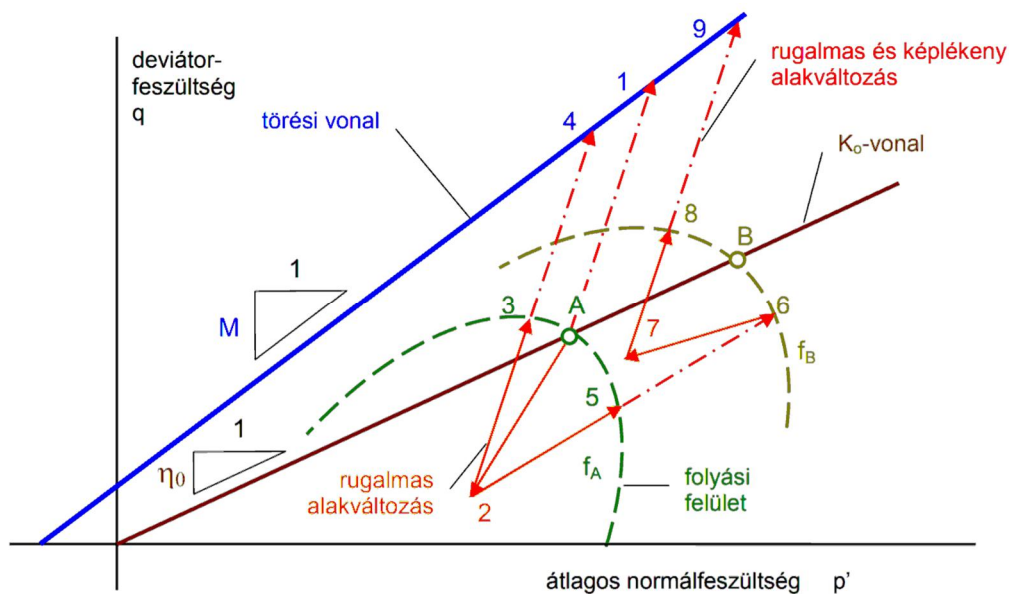
$$q = M \cdot p' + a = \frac{6 \cdot \sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \cdot p' + c \cdot \operatorname{ctg}\varphi \quad 5.30$$

Az egyenletben (5.30) szereplő $M(\varphi)$ paraméter a talaj belső súrlódási szögétől függő változó. A változás elsősorban a talajok szemcseösszetételétől függ, de hatással van rá azok nedvességtartalma is. Az egyenlet additív tagja a talaj kohézióját jellemzi. Minél nagyobb egy talaj kohéziója, annál nagyobb a talaj teherviselő képessége (tönkremenetelt megelőző állapot). A kohézió értékét jelentősen befolyásolja a közeg nedvességtartalma. A nedvességtartalom-csökkenés hatására a talajok veszítenek teherviselő képességükből, ezzel a tervezés során mindig számolni kell.

A 5-3. ábra folyási felületekként (f) különíti el a rugalmas és a rugalmas-képlékeny viselkedés közötti átmenetet. A folyási feltétel a

$$f = f(\sigma_i; \varepsilon_i; k) \leq 0 \quad 5.31$$

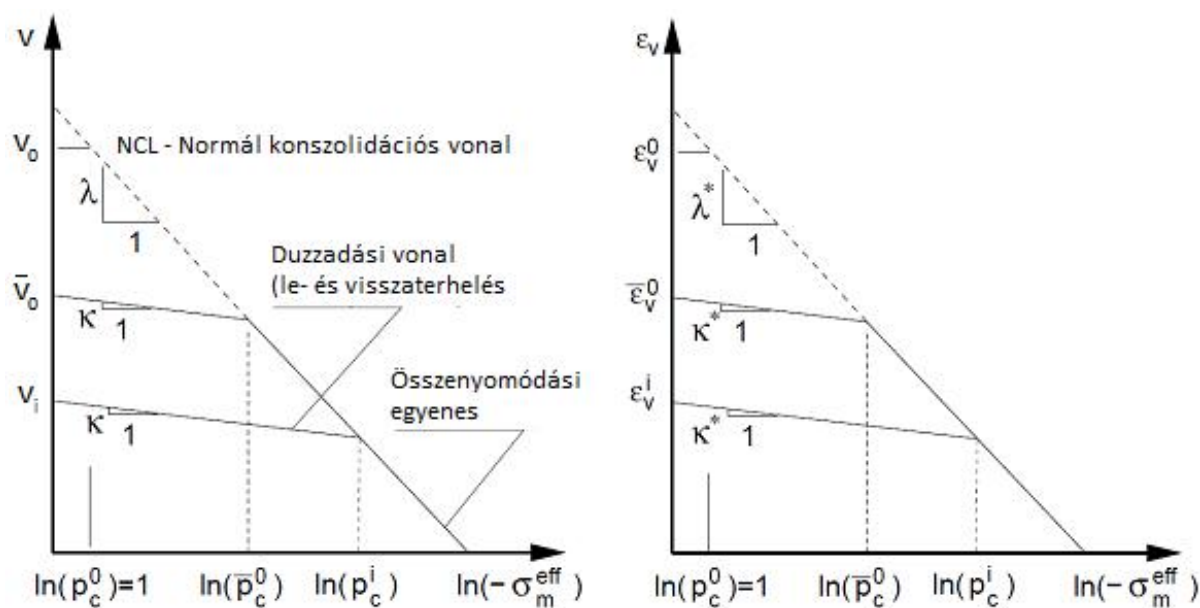
összefüggéssel adható meg. Ha egy feszültségi állapot pontja az f felülete alatt van, illetve, ha p' és q feszültség jellemzőt behelyettesítve $f < 0$ adódik, akkor az ebből az állapotból induló feszültségváltozások mindaddig csak rugalmas alakváltozásokat okoznak, amíg a változásokat leíró pont el nem éri az f felületet, illetve $f=0$ nem lesz. A felület fölé kerülve már képlékeny alakváltozások is bekövetkeznek (Szepesházi 2007).



5-3. ábra: A talajok mechanikai viselkedése a p' - q koordináta rendszerben (Szepesházi 2007)

Az 5-3. ábra megjelölt szakaszai és jellemző pontjai alapján az alábbi megállapítások tehetőek:

- az A pontig monoton növekvő terheléssel kialakult feszültségi állapotnak az f_A felület felel meg
- Az A pontot elérve, a deviatoros feszültség növelésével a talajt rugalmas-képlékeny alakváltozás jellemzi, ami a deviatoros feszültségek növelésével az 1-es pontig tart. Az 1 pontban a talaj eléri a kritikus (tönkremeneteli) állapotot.
- Az A pontban tehermentesítve a talajt a 2. pontig tisztán rugalmas alakváltozásokkal jutunk, maradékalakváltozást nem szenved a talaj.
- Újraterhelés esetén, tisztán csak a deviator feszültséget növelve a 2-3 szakaszon az alakváltozások szintén tisztán rugalmasak.
- A 3-as ponton túl ismét rugalmas-képlékeny alakváltozással közelíthetjük a 4-es pontot, a kritikus állapotot.
- Ha a talaj a 2-es pontból indulva az 5-ös pont irányába terhelődik újra, azaz inkább p' nő, mint q , az f_A felület után az 5-ös ponttól akkor is újra lesznek már képlékeny alakváltozások is.
- Ha a terhelési folyamat a 6-os pontban megáll, akkor a talajra az f_B felület lesz érvényes, melyet a K_0 -vonalon haladó normálisan konszolidált talaj a B pontban ért volna el. Ekkor a talaj a 6 pontból a 7-es pontig tehermentesülve, majd onnan a 8-as pontig újraterhelve ismét csak rugalmas alakváltozások következnek be, viszont a 8-9-es vonalon már újra lesznek képlékeny alakváltozások is.



5-4. ábra: Az anyagok viselkedése izotropikus konszolidáció során

5.5 VARIANCIANALÍZIS

A talajmechanikai vizsgálatok során gyakran nagyszámú, redundáns információ előállítására van szükség annak érdekében, hogy az újszerű vizsgálati módszerek alkalmazásánál megbizonyosodhassunk a mért értékek megbízhatóságáról. Adataim feldolgozásakor – különös tekintettel a rugalmas-képlékeny viselkedés vizsgálatánál – a varianciaanalízis módszerét használtam a hasznos adatok és a mérési hibák elkülönítésére.

A statisztika tárgykörébe tartozó varianciaanalízis során több populáció átlagát hasonlítjuk össze. A nullhipotézis eldöntéséhez a szórásnégyzeteket használjuk, ebből adódik a módszer elnevezése (Scheffé 1967). Azoknál a vizsgálatoknál használhatjuk, ahol legalább egy, mesterségesen előidézett változó (kezelés) és a véletlen befolyásolja a valószínűségi változó értékét. Nullhipotézisről beszélünk, ha a minták átlagai azonosak, tehát a kezelések vagy csoportok között nincs különbség. Viszont, ha a minták átlagai nem egyenlők, akkor a kezelések vagy csoportok különböznek egymástól, ezt alternatív hipotézisnek nevezzük (Rutherford 2011). Az elemzés végén arra kapunk választ, hogy a nullhipotézis vagy az alternatív hipotézis érvényesül. Egytényezős kísérletek során k számú független kezelésünk van és minden kezelésben r számú mérés vagy megfigyelés található. A szisztematikus különbséget a sokaságok várható értékei tartalmazzák, míg a véletlen hatások a hibatagnak felelnek meg. A nullhipotézis alapján azt feltételezzük, hogy ezek azonosak. A modellegyenlet (5.32) (Baráth, Ittész és Ugrósdy 1996):

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij} \quad 5.32$$

ahol X_{ij} az i -edik minta j -edik mintaeleme, μ a sokaságok közös várható értékei, α_i az i -edik sokaság várható értékének és a μ különbsége, e_{ij} pedig a véletlen hatás.

A kapott eredményeket Fischer nyomán az ún. ANOVA táblázatba (5-1. táblázat) rendezzük (Závoti 2010). A kérdés, amire a választ keressük, hogy a kezelések okozta variancia nagyobb-e a véletlen hatás okozta hibavariáciánál. Ezt F-próba segítségével határozzuk meg. Az F-próbánál mindig a kezelés okozta variancia áll a számlálóban, mert azt vizsgáljuk, hogy ez nagyobb-e a véletlen okozta hibavariáciánál (Baráth, Ittész és Ugrósy 1996):

$$F = \frac{MS_B}{MS_W} \quad 5.33$$

5-1. táblázat: A varianciaanalízisnél alkalmazott ANOVA táblázat (Závoti 2010)

Tényező	Szabadsági fok (DF)	Négyzetösszeg (SS)	Korrigált szórásnégyzet (MS)	F
Kezelés hatása	$k-1$	SS_B	MS_B	MS_B/MS_W
Véletlen hatás	$k \cdot r - k$	SS_W	MS_W	
Összes	$k \cdot r - 1$	SS_T		

Ha szignifikáns különbség mutatható ki, tehát az alternatív hipotézis érvényesül, tovább kereshetjük, melyik sokaság átlaga tér el jelentősen melyiktől. Ennek eszköze a szignifikáns differencia (SzD) számítása, amely a legnagyobb, véletlenszerűen jelentkező különbség értéke. Ezt az alábbi képlet (5.34) segítségével határozzuk meg (Baráth, Ittész és Ugrósy 1996):

$$SzD_{P\%} = t_{\frac{\alpha}{2}(n-k)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot MS_W}{r}} \quad 5.34$$

ahol $t_{\alpha/2(n-k)}$ a Student-féle t-táblázatban az $\alpha/2$ szignifikancia szintre vonatkozó $n-k$, MS_W a hibavariancia a variancia táblázatból, r a mintánkénti elemszám, $P\%$ pedig a tévedés valószínűsége.

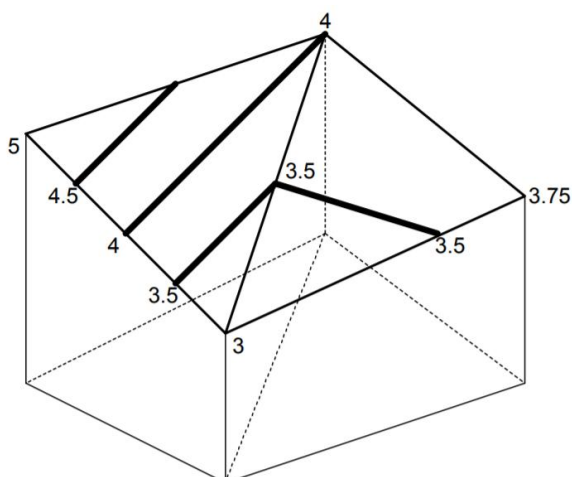
5.6 ALKALMAZOTT INTERPOLÁCIÓS ELJÁRÁS

Eredményeim interpretálásához és további vizualizálásához a Golden Software Surfer szoftverben található „Triangulation with Linear Interpolation method”, azaz a háromszögelésen alapuló lineáris interpolációs módszert választottam, amely az optimalizáláson alapuló Delaunay háromszögelés módszerét használja (Golden Software 2015).

A háromszögelésen alapuló módszerek esetén a megoldás torzításmentes interpolációt jelent, mert az adatpontokban a módszerrel visszkapjuk az eredeti értékeket, mivel a csomópontokban az eredeti értékek maradnak meg. A háromszögelésen alapuló megoldások során az adatpontokra a

rendszer háromszöghálót illeszt úgy, hogy a lehető legizometrikusabb háromszögekkel fedje le a területet. A módszer széleskörben elterjedt, s több változata is ismert, amelyek a háromszögek kiosztásában térnek el.

A lineáris interpoláció során feltételezzük, hogy két ismert pont között a változás egyenletes, azaz, a két szomszédos pontot összekötő szakasz végpontjai közti különbséget a módszer egyenközüen, lineárisan osztja fel. Ezután a háromszögek sarokpontban mért értékeire a rendszer síkokat illeszt, és a kapott síkok aktuális magassága megadja minden a háromszög területén belüli pontban az interpolált közelítő értéket. A módszer legnagyobb előnye az egyszerűség és az, hogy a mérési pontokat nem torzítja. Hátrányai között említhetjük, hogy extrapoláció esetén a számítás során feltételezzük, hogy az adathiányos külső területrészen a változás tendenciája megegyezik a pontokkal leírt térrész szélén tapasztalt változásokkal, azaz a szélső háromszögekre fektetett síkokat tetszőleges mértékben meghosszabbítjuk oldalirányban. Ennek következménye az, hogy jelentős hibák lehetnek a számítás során, ezért elsősorban interpolációra ajánlott módszernek tekinthetjük. További hiba, hogy az izovonalak a háromszögek határain törnek, ami nem realiztikus közelítés (5-5. ábra; (Kovács és Szanyi 2005)).



5-5. ábra: Lineáris interpoláció vázlat (Kovács és Szanyi 2005)

A mérési pontok által definiált háromszögek mindegyikére a szoftver definiál egy dőlésszöget és egy emelkedési értéket, amely a vizsgálati tartomány felett így meghatároz egy felületet. Mivel az eredeti adatokat a háromszögek meghatározására használják, az eredmények nagyon jó illeszkedést adnak.

A lineáris interpolációval végzett háromszögelés akkor működik megfelelően, ha az adatok egyenletesen vannak elosztva a vizsgálati tartományon (Golden Software 2015).

A módszer kiválasztásánál fontosnak tekintetem, hogy egy torzításmentes eljárást alkalmazzak, így az eredeti, átlagolt adatsoromba további hibát nem vittem bele az esetleges szórásértéken kívül.

6 A KUTATÁSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Kutatásaimat a 4. fejezetben bemutatott berendezések segítségével végeztem, az elért eredményeket ebben a fejezetben foglalom össze.

A kutatási és fejlesztési folyamatok során, az újszerű berendezésekkel szerzett tapasztalatok, valamint ezek alkalmazása kijelölhetik a talajmechanika jövőbeli kutatási irányait és segíthetik annak fejlődését.

6.1 A LAZA, KONSZOLIDÁLATLAN TALAJOK RUGALMAS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

A talajmechanikában általánosan használt egyszerűsítések és talajmodellek jelentős része azon alapul, hogy a talajokat rugalmas-képlékeny-kritikus állapotokkal jellemzi, valamint, hogy a talajt, mint vizsgált anyagot homogénnek, ideálisan rugalmasnak és gyakran izotrópnak is tekinti. Ezen közelítésnek az oka nagyon egyszerű, ugyanis a talajmechanikában használt főbb elméleti összefüggések (rugalmas viselkedés, képlékeny viselkedés, nyírási ellenállás stb.) tágabb értelemben a mechanika tudományából, szűkebb értelemben a közetmechanikából származnak, ahol ezen egyszerűsítések nem esnek messze a valóságtól és az évtizedek alatt bizonyították is helytállóságukat. A talajok, mint háromfázisú rendszerek esetén ezen egyszerűsítések és elhanyagolások csak a jól konszolidált és túlkonszolidált esetekre igazak. Ekkor ugyanis a talajra ható külső feszültség már, mint hatékony feszültség adódik át a talaj szilárd szemcseszerkezetén, s a teherviselés szempontjából a hézagokat kitöltő víz és levegő fázis befolyásoló hatása elhanyagolható.

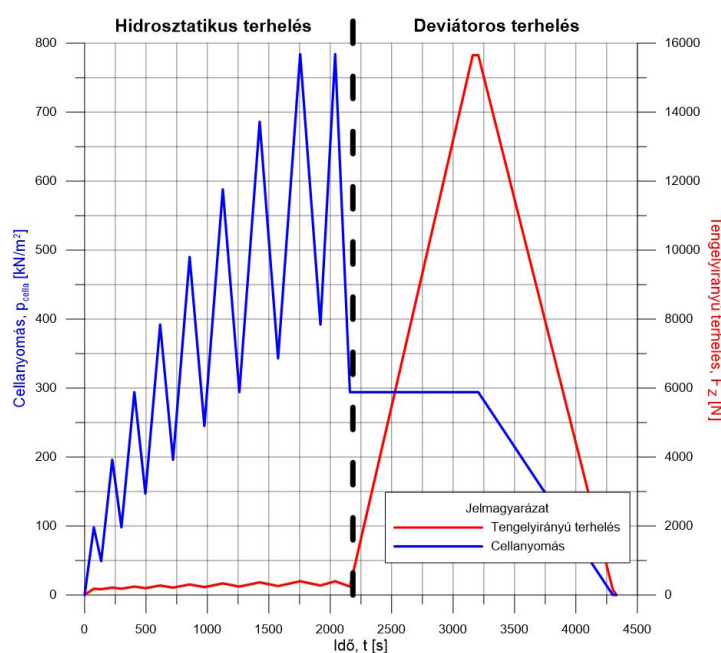
Jól konszolidált és túlkonszolidált esetet tekintve a talaj rugalmas tulajdonságát elsősorban a szemcsék rugalmassága adja, kisebb mértékben a pórusfolyadék. Konzolidálatlan esetben ez az arány eltolódik, nagyobb szerepet játszik a pórusfolyadék, s a feltömörödés során, a feltömörödéssel párhuzamosan a folyadék és szilárd fázis együttes rugalmassága határozza meg a talaj rugalmassági jellemzőjét. A külső terhelésekre bekövetkező deformációk hatására a pórustér is igen jelentősen változik, aminek következtében a pórusokban lévő folyadék és gáz fázis áramlási viszonyai is jelentősen átalakulnak, megváltoznak. A rugalmas és képlékeny viselkedési jellemzők tehát nehezen szétválaszthatók, s ez okozza a nehézséget a konszolidálatlan talajok rugalmas viselkedésének leírásában, jellemzésében. Összefoglalva tehát elmondható, hogy a laza talajok vizsgálata a kis terhelések - nagy alakváltozások vizsgálatának tudománya.

6.1.1 A rugalmassági vizsgálatokhoz alkalmazott vizsgálati módszer bemutatása

Méréseimet a 4.3 fejezetben már részletesen bemutatott triaxiális berendezéssel végeztem. A berendezéshez fejlesztett térfogatváltozás mérőegység a konszolidálatlan („laza”) talajok esetén várható jelentős alak és térfogatváltozásokat nagy pontossággal ($0,01 \text{ cm}^3$) képes mérni, s a több mint 1200 cm^3 -

es mérési tartománya lehetővé teszi, hogy az egészen kis terhelésektől a nagy, a triaxiális mérőrendszer maximumát jelentő, 1000 kN/m²-es cellanyomásig folyamatosan, megszakítás nélkül kövesse a változásokat.

Az 5-4. ábra által szemléltetett, a szemilogaritmikus $\ln(p)$ -v görbe felvételéhez szükséges, a rugalmassági viszonyokat jellemző fokozatos fel- és leterhelési állapotot a triaxiális cellában szabályozott, hidrosztatikus, ciklikus nyomásváltozást hoztam létre. Az abroncs-talaj kölcsönhatásokra a dinamikus jellegű erőhatások jellemzők, ezért triaxiális vizsgálataimat drénezetlen körülmények között végeztem. Az ehhez alkalmazott, úgynevezett SHD (Serial Hydrostatic and Deviator) függvényt a 6-1. ábra mutatja be, ami jól szemlélteti, hogy az egyes terhelési lépcsők időtartama rövid. A semleges feszültségek nem épülnek le, azokat a vizsgálatok során szenzorosan mértem. A függvény két szakaszból áll, az első, hidrosztatikus terhelési szakaszt a triaxiális cellába helyezett mintatest körül, a függvény által definiált, ciklikusan emelkedő és csökkenő hidrosztatikus feszültségi állapot jellemzi. A nyomás csökkenése, a mintatest tehermentesülése során, majd egyre emelkedő nyomások mellett olyan hiszterézis hurkok állíthatók elő, amelyek lehetővé teszik a rugalmassági paraméterek (κ) meghatározását. Ez az egyre emelkedő csúcsokkal meghatározott függvény a minta tömörödését idézi elő, így az adott talajra vonatkozó képlékenységi jellemző (λ) is meghatározható.



6-1. ábra: Triaxiális vizsgálatoknál alkalmazott vezérlőfüggvény (SHD függvény)

Az általam használt vezérlőfüggvény a Sárközi és szerzőtársai (Sárközi, Kriston és Kovács 2007) által publikált SHD függvénytől annyiban tér el, hogy a hidrosztatikus fel- illetve leterhelések esetén a maximum és minimum pontoknál konstans nyomástartási fázist nem tartottam, így „fűrészfog”

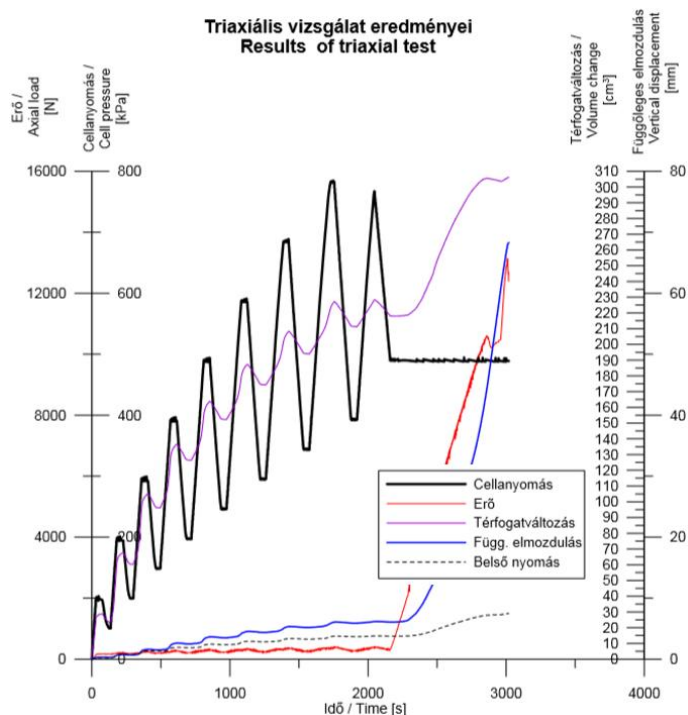
jellegű volt a vezérlés. Ennek oka az volt, hogy így a minta a terheléssorozat alatt kisebb mértékben konszolidálódott és megőrizte alulkonszolidált jellegét.

6.1.2 A triaxiális mérések eredményeinek feldolgozása

A korábbi, a 3.2 fejezetben részletesen bemutatott talajok rugalmas viselkedésének vizsgálataihoz összesen 104 darab triaxiális vizsgálatot végeztem. A vizsgálatok során az alábbi paramétereket lettek mérve és eltárolva (6-2. ábra):

- a cellanyomás (hidrosztatikus feszültségállapot);
- a tengelyirányú nyomóerő (deviátor feszültség);
- a térfogatváltozás (a mintatest térfogatváltozása a hidrosztatikus terhelés hatására);
- a függőleges összenyomódás (mintatest tengelyirányú összenyomódása);
- a pórusnyomás (hatékony feszültség kiszámítása).

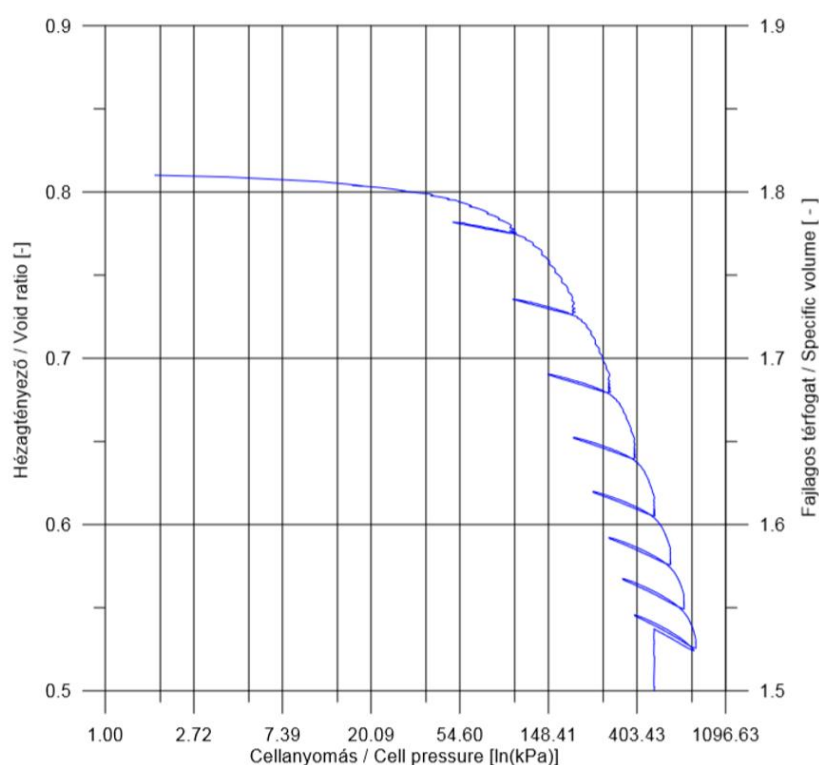
A triaxiális cellában lévő nyomás a mintát terhelő hidrosztatikus feszültséggel egyenlő, amit a bemutatott vezérlőfüggvény segítségével szabályoztam. Mivel a hidrosztatikus terhelésnél a minta aljára nem hat nyomás, így a teljes hidrosztatikus feszültségtér kialakítása érdekében, a vezérlőfüggvénybe programozott, tengely irányú többletterheléssel pótoltam a hiányzó nyomást.



6-2. ábra: Triaxiális mérés során mért értékek

A kiindulási talajparaméterek ismeretében - a mért értékek alapján – kiszámítható a minta mérés közbeni hézagtényező (e) változása. Ebből a 5.29 összefüggés segítségével meghatározható a fajlagos térfogat (v) értéke, amit a cellanyomás (p) függvényében, szemilogaritmikus koordináta rendszerben ($\ln(p)$ - v) ábrázolva megadható a módosított Cam-Clay anyagmodell által leírt formula. Erre mutat példát a 6-3. ábra, amely egy homoktalaj mintán végzett triaxiális vizsgálat eredményeiből készült.

A hézagtényező értékének csökkenése a mintatest tömörödését mutatja. A görbén a vezérlőfüggvényben meghatározott terhelési és tehermentesítési periódusok jól definiált hiszterézis hurkokat hoztak létre, amiből az adott nyomáson a talajra jellemző rugalmassági paraméterre következtethetünk.

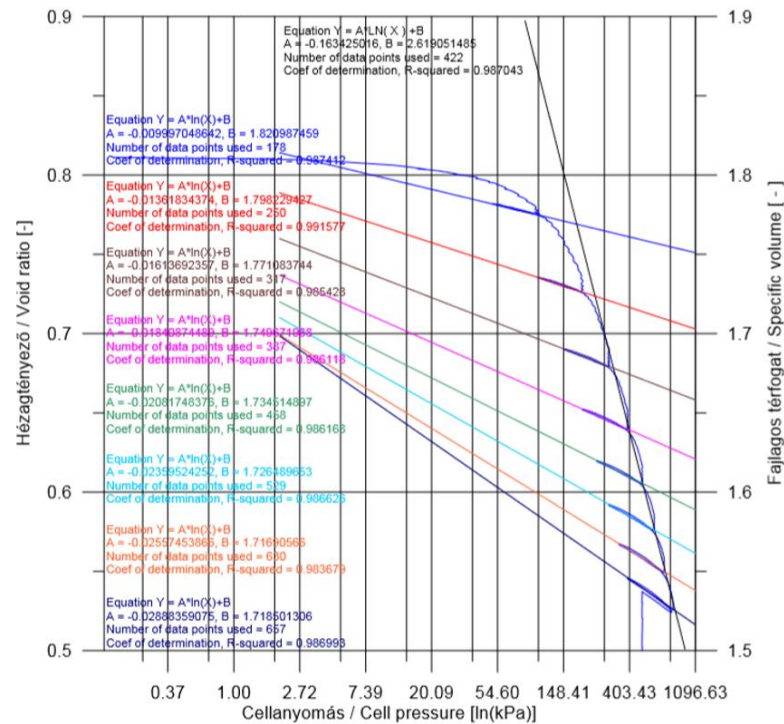


6-3. ábra: Triaxiális mérés eredményeiből számított $\ln(p)$ - v diagramm

A 6-4. ábra a hiszterézis görbékre illesztett egyeneseket mutatja be. A szemilogaritmikus koordináta-rendszerben illesztett egyenesek egyenlete általános formában $Y = A \cdot \ln(X) + B$ adható meg, ahol X a cellában uralkodó hidrosztatikus nyomás, A az egyenes meredeksége, azaz a Cam-Clay anyagmodell szerinti κ , rugalmassági paraméter. A B értéke egyenlő a teljes tehermentesülés esetén elérhető legkisebb fajlagos térfogattal. Ez a Γ -val jelölt paraméter mutatja a talaj leglazább állapotát egy adott terhelés vagy terheléssorozatot követően.

A vizsgálatokat mind a három talajtípus (homokos talaj, iszapos talaj, agyagos talaj) esetén többszöri ismétléssel végeztem el. A különböző talajtípusoknál a víztartalom-változás hatását is

vizsgálni kívántam, ezért mezőgazdasági szakemberekkel egyeztetve mindhárom talajra egy száraz, egy közepesen nedves és egy nedves állapotot határoztam meg (lásd a 3.3 fejezetben, és a 3-9. táblázatot).



6-4. ábra: Az $\ln(p)$ -v diagrammra illesztett rugalmassági érintők (k) és az illesztés egyenletei

A 6-4. ábra alapján jól nyomon követhető a talaj rugalmassági tulajdonságának a változása, és a választott Cam-Clay anyagmodell alkalmazhatósága a probléma megoldására, leírására.

6.1.3 A laza talajok rugalmassági mutatójának (κ) meghatározása

A méréseim során kapott eredményeket talajtípusok szerint dolgoztam fel, először a víztartalmak figyelmen kívül hagyásával. Teljesen konszolidált, vagy túlkonszolidált talajok esetén a víztartalom kis mértékben befolyásolja a rugalmassági paramétereket.

Az összefoglaló táblázataimban (6-1.-6-3. táblázatok) szereplő adatok az adott talajon végzett összes triaxiális vizsgálat eredményének statisztikai értékelése.

6-1. táblázat: A homokos talajon mért rugalmassági tulajdonságok összefoglaló adatai ($n=44$ mérés)

Jellemző	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8	N
Minimum:	-0,013	-0,016	-0,0177	-0,0195	-0,0214	-0,0242	-0,027	-0,0322	1,846
Maximum:	-0,001	-0,0019	-0,0087	-0,0149	-0,0166	-0,0183	-0,0204	-0,0222	2,653
Átlag:	-0,009	-0,0124	-0,0153	-0,0177	-0,0198	-0,0222	-0,0245	-0,0273	2,208
Szórás:	0,003	0,0033	0,0019	0,0012	0,0011	0,0012	0,0013	0,0018	0,218
Medián:	-0,01	-0,0136	-0,0159	-0,0179	-0,02	-0,0223	-0,0246	-0,0274	2,166

6-2. táblázat: Az iszapos talajon mért rugalmassági tulajdonságok összefoglaló adatai (n=39 mérés)

Jellemző	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8	N
Minimum:	-0,0251	-0,0231	-0,026	-0,0272	-0,0278	-0,0281	-0,0288	-0,0342	1,819
Maximum:	-0,0083	-0,0127	-0,0148	-0,0168	-0,0172	-0,0201	-0,021	-0,0221	3,307
Átlag:	-0,0123	-0,0166	-0,0186	-0,0206	-0,0221	-0,0239	-0,0256	-0,0274	2,495
Szórás:	0,0037	0,0026	0,0024	0,0024	0,0025	0,0023	0,0023	0,0027	0,52
Medián:	-0,0118	-0,0161	-0,0181	-0,0203	-0,0218	-0,0234	-0,0256	-0,0277	2,723

6-3. táblázat: Az agyagos talajon mért rugalmassági tulajdonságok összefoglaló adatai (n=21 mérés)

Jellemző	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8	N
Minimum:	-0,0228	-0,0267	-0,02792	-0,0292	-0,0318	-0,0346	-0,0373	-0,0386	2,093
Maximum:	-0,01	-0,0155	-0,01967	-0,0217	-0,0226	-0,0233	-0,0248	-0,0261	3,839
Átlag:	-0,0138	-0,0194	-0,02254	-0,025	-0,0272	-0,0294	-0,0316	-0,0332	2,682
Szórás:	0,0038	0,0028	0,002017	0,002	0,0022	0,0027	0,003	0,0033	0,56
Medián:	-0,0118	-0,0184	-0,0219	-0,0248	-0,0276	-0,03	-0,0322	-0,0335	2,555

Az összefoglaló táblázatokban feltüntettem a különböző terhelési lépcsőknél meghatározott rugalmassági paraméterek (κ_1 - κ_8) maximális, minimális, átlag és medián értékeit, valamint az adatok szórását.

A táblázatok adatait a 6-5.-6-7. ábrák grafikusán is összefoglalják, amelyek szemléltetik a κ rugalmassági talajparaméter változását. A konszolidált talajokra jellemző konstansnak tekintett rugalmassági paraméter itt nem érvényes, az a terhelés növekedésével változik. A változás jellemzésére a rugalmassági paraméter (κ) átlagértékeire illesztett görbék egyenleteit írtam fel.

A rugalmassági talajparaméter átlagértékei és a terhelés között függvénykapcsolatot határoztam meg, amelyek között van eltérés a talajtípusok szerint is.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a konszolidálatlan talajok rugalmasságát leíró paraméter nem konstans, értéke függ a külső terheléstől és a talaj típusától is. A talaj rugalmas viselkedését az alábbi függvénykapcsolatokkal (6.1-6.3) adtam meg.

$$\text{Homokos talaj:} \quad \kappa = -0,00854 \cdot \ln(p) + 0,0032 \quad R^2=0,946 \quad 6.1$$

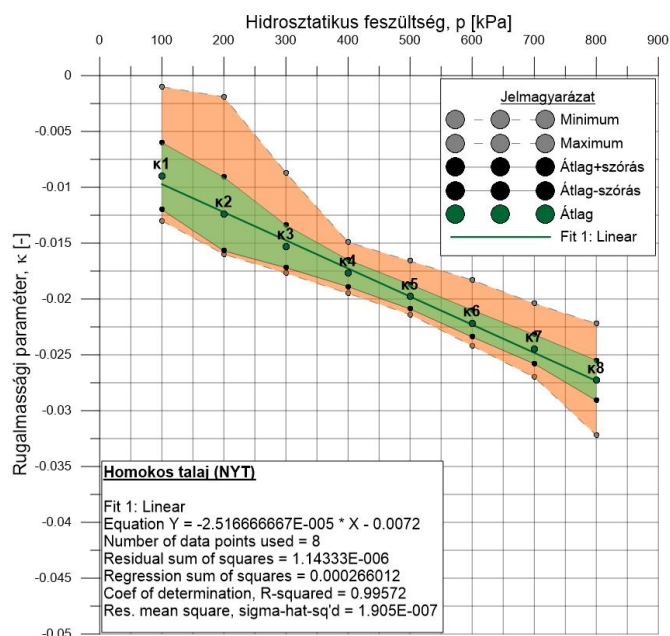
$$\text{Iszapos talaj:} \quad \kappa = -0,00698 \cdot \ln(p) + 0,0205 \quad R^2=0,978 \quad 6.2$$

$$\text{Agyagos talaj:} \quad \kappa = -0,00921 \cdot \ln(p) + 0,0293 \quad R^2=0,988 \quad 6.3$$

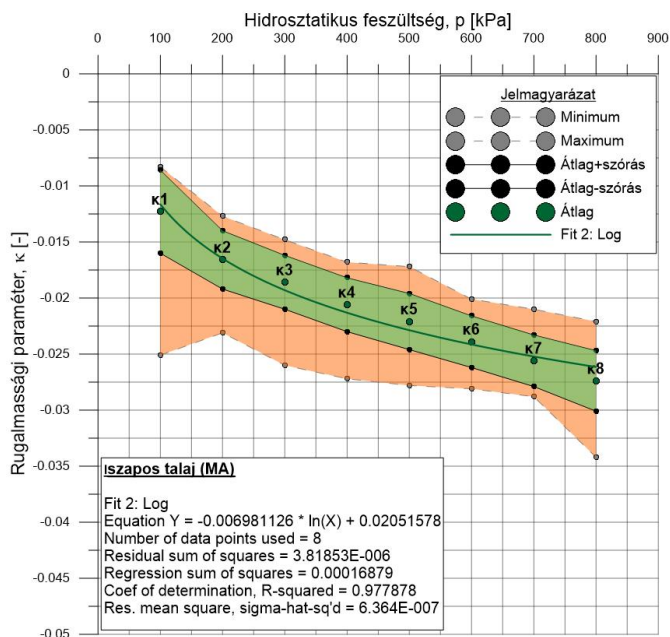
A függvénykapcsolatok alapján elmondható, hogy a homokos talaj esetén a rugalmassági paraméter (κ) változása a terhelő feszültség függvényében közel lineáris. Ebben az esetben a korreláció

értéke $R^2 = 0,9957$, ami erős kapcsolatot jelent a két változó között. A lineáris kapcsolatból az adódik, hogy végtelen nagy terhelés esetén a talaj rugalmassága még képes lenne változni. Ez természetesen nem valós, mivel a konszolidálatlan talajok a növekvő terhelés hatására elérnék a konszolidált állapotot, amikor is a fajlagos alakváltozás értéke egy konstans véges értékhez tart, és a viselkedésükre a talajmechanikában használt egyszerűsítő feltevések (konszolidációs elmélet) alkalmazhatók.

A fentiek alapján, mérnöki megfontolásból a homokos talaj esetén is a logaritmusos trendvonal illesztés mellett döntöttem, ami, bár kisebb korrelációt mutat ($R^2=0,9456$), viszont a természet törvényszerűségeit pontosabban írja le. Az illeszkedés ebben az esetben is szoros.

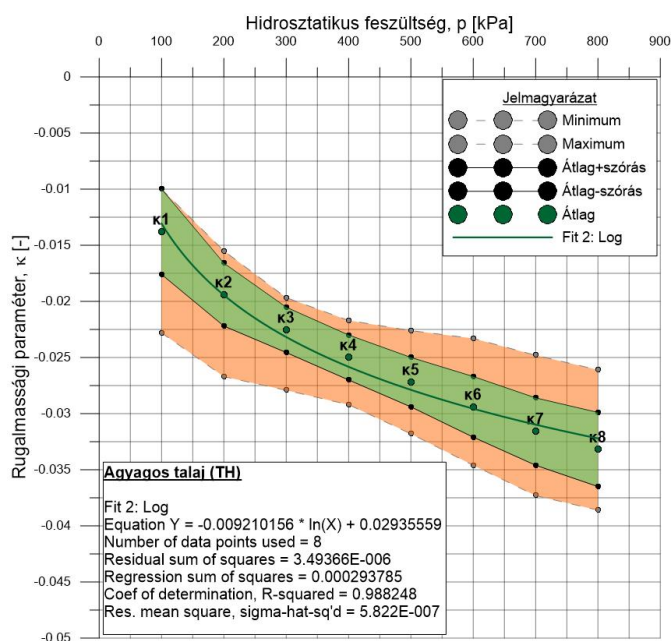


6-5. ábra: A homokos talajra jellemző rugalmassági paraméter (κ) érték meghatározásának összefoglalása



6-6. ábra: Az iszapos talajra jellemző rugalmassági paraméter (κ) érték meghatározásának összefoglalása

A vizsgált iszapos és agyagos talajok esetében a legnagyobb korrelációs koefficiens értéket a logaritmikus trendvonal illesztésével értem el. Az iszapos talajnál $R^2 = 0,9779$, míg az agyagos talajnál $R^2 = 0,9882$ illeszkedés adódott.

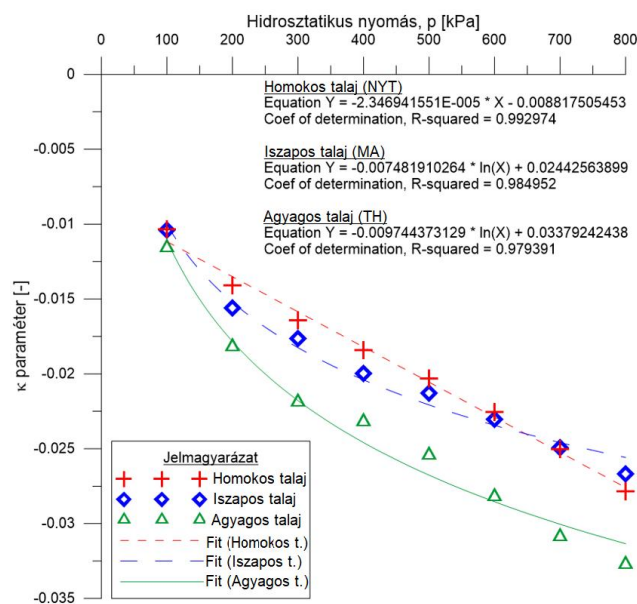


6-7. ábra: Az agyagos talajra jellemző rugalmassági paraméter (κ) érték meghatározásának összefoglalása

Az iszapos és agyagos talaj rugalmassági változását érdemes együtt értékelni. A magas agyag- és iszapfrakció ($d < 0,063$ mm) rugalmasságra gyakorolt hatása a szivárgási tényezőben, valamint a felületi vízmegkötő képességben keresendő. A felkeményedés során, a csökkenő hézag tényező (e) és ezáltal a fajlagos térfogat (v) értéke a pórusterek csökkenését mutatja, így lecsökken a pórusokban lévő folyadék mozgásteret, ezáltal a rugalmas folyadékfázis terhelést vesz fel.

A jobb összehasonlíthatóság kedvéért három talaj rugalmassági tényezőjének változását egy összefoglaló ábrán is feltüntettem (6-8. ábra).

A 6-8. ábra alapján elmondható, hogy a vizsgált, konszolidálatlan talajok esetén a rugalmasságot kifejező κ tényezők változása függ a talaj szemcseösszetételétől. A finomszemcsék növekvő aránya miatt, valamint a növekvő külső terhelés hatására a talajok rugalmas viselkedése változik, tehát a konszolidáltság függvényében a talaj rugalmas viselkedése nem állandó. A változásokra felírt függvénykapcsolatok jó támpontot adhatnak a laza, konszolidálatlan, telítetlen talajok viselkedését leíró modellek kiinduló paramétereinek megadásához.



6-8. ábra: A rugalmassági paraméter (κ) változása a talajtípus függvényében

6.1.4 A laza talajok rugalmassági paraméterének (κ) variancia analízise

A triaxiális mérések során nyert nagy mennyiségű adat, valamint az összesítő grafikonokon (6-5.-6-7. ábrák) látható eltérések miatt elvégeztem az adathalmaz varianciaanalízisét. A statisztikai vizsgálattal az volt a célom, hogy kizárjam az esetleges mérési hibákból adódó téves következtetéseket.

Az elemzéshez a talajtípus és víztartalom függvényében kiválasztottam 5-7 darab ismételt mérést, amelyek rugalmassági tényezőinek (κ_{1-8}) összehasonlító vizsgálatát készítettem el. A varianciaanalízis elméleti háttérét az 5.5 fejezetben foglaltam össze. Az analízis eredménye a szignifikáns differencia érték, amely megmutatja két mért, vagy számított paraméter közti hiba minimumát. Amennyiben a vizsgált két érték közötti különbség nagysága nagyobb, mint a szignifikáns differencia értéke, a különbség nem véletlen hiba.

Számítási eredményeimet az alábbi táblázatok foglalják össze (6-4.-6.12. táblázatok). A táblázatok első oszlopában és első sorában a különböző hidrosztatikus nyomásoknál vizsgált rugalmassági paraméterek (κ_{1-8}) vannak feltüntetve. A számításoknál az adott rugalmassági paraméterek átlagértékeit hasonlítottam össze. A táblázat belső értékeit (XY, ahol X a sor megjelölése, Y az oszlop megjelölése) az alábbi egyenlet (6.4) alapján számítottam:

$$XY = (\kappa_{i,oszlop} - \kappa_{i,sor}) - SzD \quad 6.4$$

ahol $\kappa_{i,oszlop}$ a kijelölt hidrosztatikus feszültségnél mérhető rugalmassági tényező átlagértékét tartalmazó oszlop, $\kappa_{i,sor}$ az i-dik terheléshez tartozó sor, SzD pedig a szignifikáns (számottevő) differencia értéke.

Amennyiben a cellában pozitív szám szerepel (zöld jelölés), az azt jelenti, hogy a két összehasonlított rugalmassági paraméter átlagértékei közötti eltérés nagyobb, mint a szignifikáns differencia, tehát a mért értékek a lehetséges véletlen hibánál nagyobb mértékben térnek el, ami ebben az esetben a talaj rugalmas viselkedésében való eltérésre utal. Amennyiben a cella negatív értéket tartalmaz (pirossal kiemelve), ott a mért paraméterek átlagai közötti különbség kisebb, mint a véletlen hiba, tehát nincs szignifikáns eltérés a vizsgált nyomáson a talaj rugalmas viselkedésében. A mátrix a fő átlóra szimmetrikus, ezért a fő átló feletti rész csupán előjelében térne el a bemutatott értékektől, az értelmezést nem befolyásolná, így ezeket külön nem tüntettem fel.

6-4. táblázat: Homokos talaj (NYT) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (száraz állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00095							
κ_3	0,00472	0,00115						
κ_4	0,00801	0,00443	0,00067					
κ_5	0,01038	0,00680	0,00303	-0,00026				
κ_6	0,01278	0,00920	0,00543	0,00214	-0,00022			
κ_7	0,01535	0,01177	0,00800	0,00471	0,00235	-0,00005		
κ_8	0,01831	0,01473	0,01096	0,00767	0,00531	0,00291	0,00034	

6-5. táblázat: Homokos talaj (NYT) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (köz. nedves állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00285							
κ_3	0,00520	0,00148						
κ_4	0,00718	0,00346	0,00111					
κ_5	0,00907	0,00535	0,00300	0,00103				
κ_6	0,01131	0,00759	0,00524	0,00326	0,00137			
κ_7	0,01378	0,01006	0,00771	0,00573	0,00383	0,00160		
κ_8	0,01660	0,01288	0,01053	0,00855	0,00665	0,00441	0,00195	

6-6. táblázat: Homokos talaj (NYT) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (nedves állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00176							
κ_3	0,00409	0,00092						
κ_4	0,00631	0,00314	0,00081					
κ_5	0,00810	0,00493	0,00261	0,00039				
κ_6	0,01029	0,00712	0,00480	0,00258	0,00078			
κ_7	0,01239	0,00922	0,00690	0,00468	0,00289	0,00070		
κ_8	0,01428	0,01111	0,00878	0,00656	0,00477	0,00258	0,00048	

6-7. táblázat: Iszapos talaj (MA) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (száraz állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00227							
κ_3	0,00416	0,00080						
κ_4	0,00652	0,00315	0,00126					
κ_5	0,00874	0,00537	0,00348	0,00113				
κ_6	0,01076	0,00739	0,00550	0,00315	0,00093			
κ_7	0,01280	0,00944	0,00755	0,00519	0,00297	0,00095		
κ_8	0,01578	0,01242	0,01053	0,00817	0,00595	0,00393	0,00188	

6-8. táblázat: Iszapos talaj (MA) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (köz. nedves állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00370							
κ_3	0,00576	0,00058						
κ_4	0,00807	0,00290	0,00084					
κ_5	0,00940	0,00423	0,00217	-0,00014				
κ_6	0,01115	0,00598	0,00392	0,00161	0,00028			
κ_7	0,01305	0,00787	0,00582	0,00351	0,00218	0,00042		
κ_8	0,01480	0,00963	0,00758	0,00526	0,00393	0,00218	0,00029	

6-9. táblázat: Iszapos talaj (MA) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (nedves állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00271							
κ_3	0,00588	0,00014						
κ_4	0,00820	0,00246	-0,00072					
κ_5	0,00966	0,00392	0,00074	-0,00158				
κ_6	0,01064	0,00490	0,00172	-0,00060	-0,00206			
κ_7	0,01154	0,00580	0,00262	0,00030	-0,00116	-0,00214		
κ_8	0,01228	0,00653	0,00335	0,00104	-0,00042	-0,00141	-0,00231	

6-10. táblázat: Agyagos talaj (TH) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (száraz állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	-0,00023							
κ_3	0,00169	-0,00291						
κ_4	0,00299	-0,00160	-0,00352					
κ_5	0,00441	-0,00018	-0,00210	-0,00341				
κ_6	0,00586	0,00126	-0,00066	-0,00196	-0,00338			
κ_7	0,00776	0,00317	0,00125	-0,00006	-0,00148	-0,00292		
κ_8	0,00945	0,00486	0,00294	0,00163	0,00021	-0,00123	-0,00314	

6-11. táblázat: Agyagos talaj (TH) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (köz. nedves állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00113							
κ_3	0,00481	-0,00178						
κ_4	0,00611	-0,00048	-0,00417					
κ_5	0,00838	0,00178	-0,00190	-0,00320				
κ_6	0,01111	0,00452	0,00084	-0,00046	-0,00273			
κ_7	0,01381	0,00721	0,00353	0,00223	-0,00003	-0,00277		
κ_8	0,01567	0,00908	0,00540	0,00410	0,00183	-0,00091	-0,00360	

6-12. táblázat: Agyagos talaj (TH) rugalmas viselkedésének varianciaanalízis eredményei (nedves állapot)

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7	κ_8
κ_1								
κ_2	0,00557							
κ_3	0,00956	0,00244						
κ_4	0,01301	0,00589	0,00190					
κ_5	0,01587	0,00875	0,00476	0,00130				
κ_6	0,01843	0,01131	0,00732	0,00386	0,00101			
κ_7	0,02027	0,01315	0,00916	0,00571	0,00285	0,00029		
κ_8	0,02169	0,01457	0,01058	0,00712	0,00427	0,00171	-0,00013	

A 6-4.-6-12. táblázatok alapján elmondható, hogy a varianciaanalízis alátámasztotta a 6-8. ábrán bemutatott összefüggéseket, melyek a vizsgált konszolidálatlan talajok rugalmassági tényezőinek (κ) terhelésfüggését írják le.

A homokos talajnál (NYT) megfigyelhető, hogy a nedvességtartalom változása döntően nem befolyásolja a rugalmas viselkedés változását. A 6-4.-6.6. táblázatok alapján az egymást követő terhelési lépcsők során a rugalmassági tényező változásának mértéke meghaladja a szignifikáns differencia értékét, így a változás mértéke a talaj tulajdonságából adódik.

Az iszapos és agyagos talaj esetén a nedvességtartalom változás már nagymértékű rugalmassági tulajdonságváltozást okoz. Különösen a nagy terhelési tartományokban figyelhető meg, hogy a rugalmasság változásának mértéke nem haladja meg a szignifikáns differencia értékét, tehát nagy terhelések esetén a talaj rugalmassága közel konstans értékre állt be. Ennek oka a finom frakció magas aránya, amely az iszapos és agyagos talajnál figyelhető meg. A finomszemcsés talajokra az alacsony szivárgási tényező jellemző, azaz a pórusokban lévő folyadék lassabban mozog, így a nagyobb terheléseknél, ahol a konszolidált állapot közelébe ér a talaj, a pórustérfogat lecsökken és uralkodóan a pórusfolyadék rugalmassága határozza meg a rendszer rugalmassági tényezőjét.

6.1.5 A vizsgált talajok rugalmas viselkedésének változása a víztartalom függvényében

A vizsgált talajok laboratóriumi triaxiális kísérletei során jól elkülöníthető víztartalmi állapotokat határoztam meg. Ezek a víztartalom zónák a talajok viselkedésbeli különbségein alapulnak, ezeket egy korábbi (3.3 fejezet) fejezetben már ismertettem. A víztartalom, valamint változásának a hatása a talajok tömörödő képességére és rugalmas viselkedésére ismert, viszont kevés tapasztalat és mérési eredmény áll rendelkezésre eddig a laza, konszolidálatlan talajok ilyen irányú vizsgálata terén.

A víztartalom hatásának vizsgálatához leválogatásra kerültek az egyes víztartalmi kategóriákba tartozó mérési eredmények, majd ezek statisztikai elemzése után a további elemzéshez a különböző terhelési lépcsőkhöz tartozó rugalmassági paraméterek (κ) átlagát használtam.

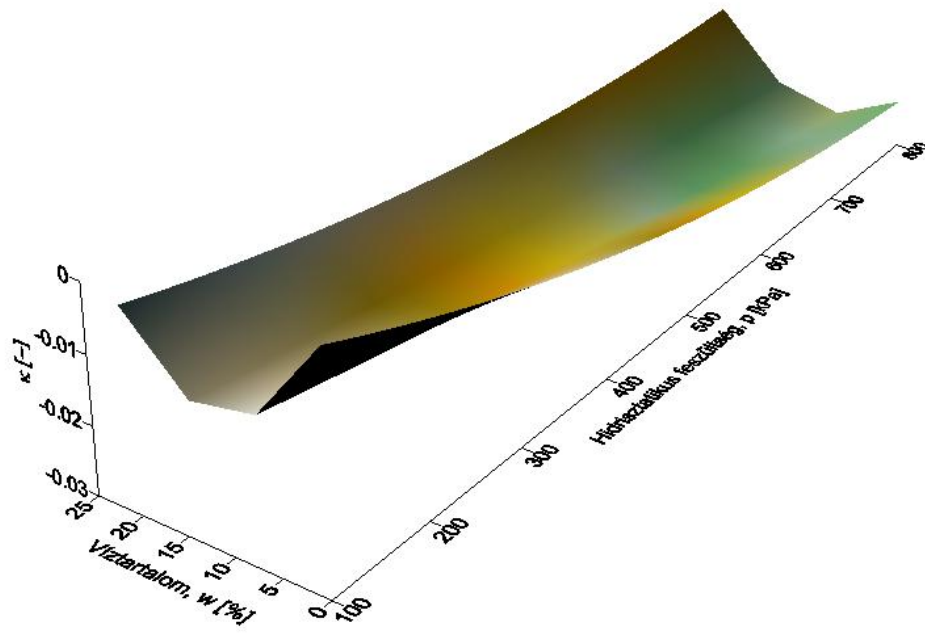
Az κ paraméterek változásának ábrázolása háromdimenziós koordináta rendszerben történt, ahol az egyes tengelyeken a hidrosztatikus nyomás, víztartalom, rugalmassági paraméter (κ) található. Ezek egymástól való függésének megállapítására a Golden Software Surfer interpolációs (Grid) és felületillesztési csomagját használtam.

A homokos, iszapos és agyagos talaj esetén is a mérési eredményeim átlagértékeire illesztett, a felületet leíró függvénykapcsolat, a p hidrosztatikus nyomás és a w víztartalom függvényében írja le a talaj rugalmassági változását. Az illesztések során használt felületek általános egyenlete (6.5) az alábbiak szerint írható fel:

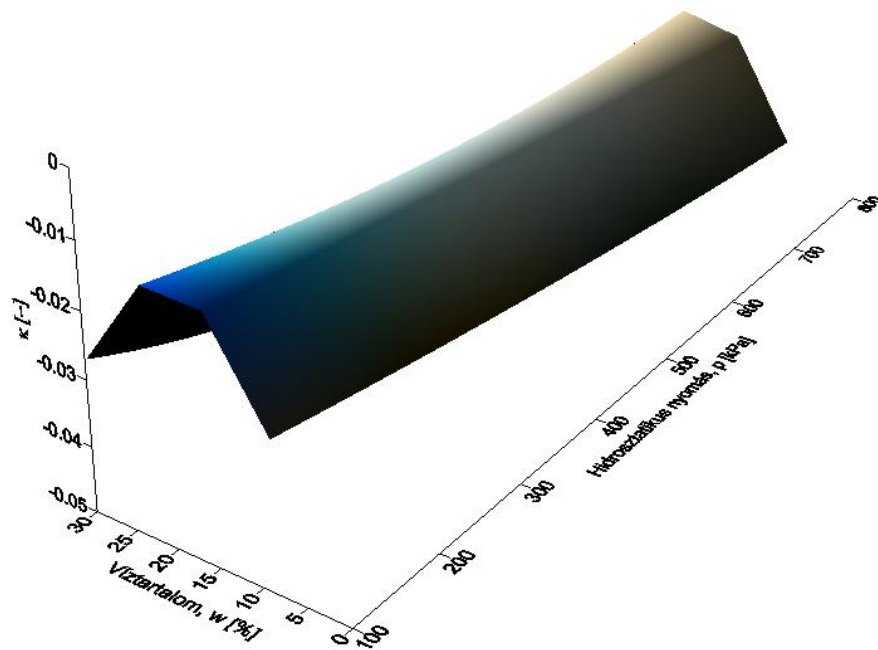
$$\kappa(p,w) = A_{00} + A_{01} w + A_{02} w^2 + A_{10} p + A_{11} pw + A_{12} pw^2 + A_{20} p^2 + A_{21} p^2w + A_{22} p^2w^2 \quad 6.5$$

ahol κ a rugalmassági paraméter, p a talajmintát terhelő hidrosztatikus feszültség, w pedig a nedvességtartalom.

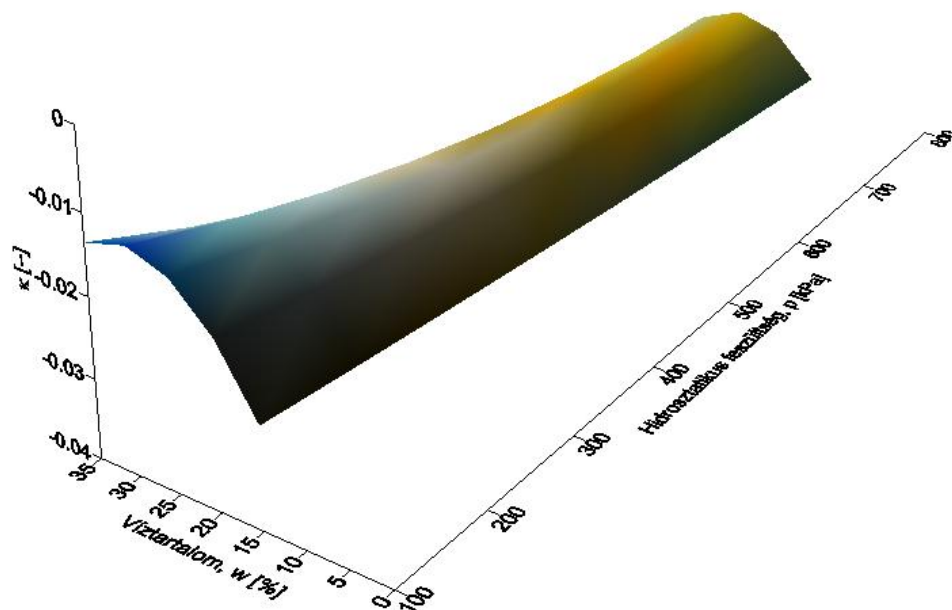
A mért értékekre illesztett felületeket a 6-9.-6-11. ábrák szemléltetik. A háromdimenziós felületek a talajok rugalmas viselkedését írják le a hidrosztatikus terhelés és a víztartalom függvényében (6.5). A felületek jellege hasonló, minden talaj esetén megfigyelhető egy szélső értékekre illeszkedő nyeregfelület jelleg, ami a Proctor-féle haranggörbékkel mutat analógiát. Ez különösen igaz az iszapos és agyagos talaj esetén, viszont a magas homoktartalmú mintánál a jelleg megfordul. Ennek magyarázata egyelőre nem tisztázott, további vizsgálatok szükségesek.



6-9. ábra: Nyírtelegi homokos talaj rugalmas viselkedésének változását bemutató felület a víztartalom és a terhelés függvényében



6-10. ábra: Megyaszói iszapos talaj rugalmas viselkedésének változását bemutató felület a víztartalom és a terhelés függvényében



6-11. ábra: Taktaharkányi agyagos talaj rugalmas viselkedésének változását bemutató felület a víztartalom és a terhelés függvényében

A vizsgált, különböző talajok rugalmas viselkedését leíró felületek általános egyenletének (6.5) együtthatóit a 6-13. táblázatban foglaltam össze.

6-13. táblázat: A vizsgált talajok rugalmas viselkedését a víztartalom és terhelés függvényében leíró egyenletek együtthatóinak összefoglalása

Egyenleti állandó	Homokos talaj (NYT)	Iszapos talaj (MA)	Agyagos talaj (TH)
A_{00}	0.011616	-0.056972	-0.044102
A_{01}	-0.003407	0.004841	0.001656
A_{02}	0.000144	-0.000119	$-1.309193 \cdot 10^{-5}$
A_{10}	$-7.572669 \cdot 10^{-5}$	$-7.334273 \cdot 10^{-5}$	-0.000157
A_{11}	$8.300375 \cdot 10^{-6}$	$7.045685 \cdot 10^{-6}$	$1.281051 \cdot 10^{-5}$
A_{12}	$-3.426368 \cdot 10^{-7}$	$-2.546766 \cdot 10^{-7}$	$-3.197923 \cdot 10^{-7}$
A_{20}	$4.067888 \cdot 10^{-8}$	$5.456894 \cdot 10^{-8}$	$1.685396 \cdot 10^{-7}$
A_{21}	$-6.937083 \cdot 10^{-9}$	$-7.868548 \cdot 10^{-9}$	$-1.477812 \cdot 10^{-8}$
A_{22}	$3.142124 \cdot 10^{-10}$	$2.928436 \cdot 10^{-10}$	$3.414916 \cdot 10^{-10}$

Vizsgálataim összegzéseként megállapítható, hogy különböző szemcseösszetételű, konszolidálatlan talajok esetén szignifikáns differencia mérhető a rugalmas viselkedés tekintetében. A rugalmas viselkedés a szemcseméretbeli különbség mellett függvénye a vizsgált anyag víztartalmának és a tömörödés során alkalmazott aktuális terhelő feszültségnek is.

Konzolidálatlan, laza mezőgazdasági talajok vizsgálatával függvénykapcsolatot határoztam meg különböző szemcseösszetételű talajok rugalmassági tényezői (κ) és a rájuk ható külső, hidrosztatikus terhelés között, ami a feltömörödési folyamatok során a talajok rugalmasságának változásáról ad képet. A kapott eredmények, mint bemenő paraméterek hasznosak lehetnek laza talajok modellezési feladatainál.

6.2 A KONZOLIDÁLATLAN, LAZA TALAJOK KÉPLÉKENY VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

A talajok külső terhelés hatására maradó alakváltozást szenvednek, s közben térfogatuk csökken, tömörödnek. A talajmechanikában ezen folyamatok leírására a konszolidációs elméleteket használjuk. Az egyik legjelentősebb az 1922-ben megjelent, Karl Terzaghi által alkotott egydimenziós konszolidációs elmélet, amelyet a mai napig használunk. A megoldás peremfeltételei:

- a talaj vízzel telített ($S_r = 1$);
- a víz és a talajszemcsék összenyomhatatlanok;
- érvényes a Darcy-törvény ($k = \text{állandó}$);
- a konszolidáció csak a víz távozásától függ;
- laterális vízmozgás nincs;
- a $\Delta e / \Delta \sigma$ hányados állandó.

Látható, hogy a törvény igen speciális esetben igaz, jelentős megkötések esetén alkalmazható.

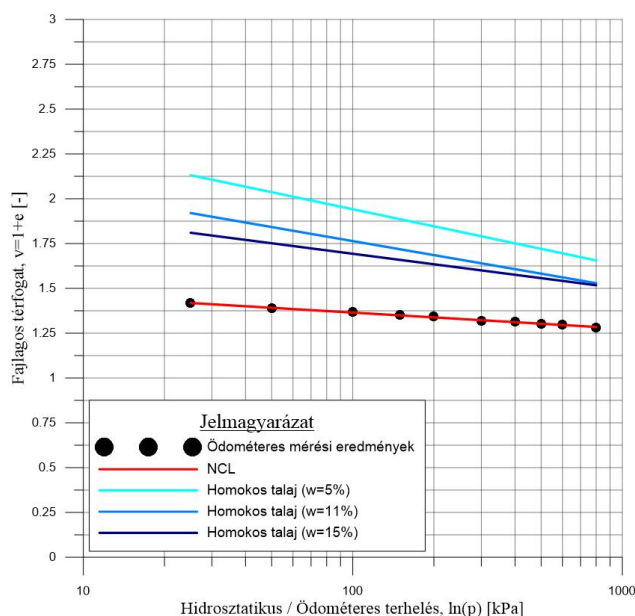
Az általam vizsgált, laza konszolidálatlan talajokra vonatkozóan az elmélet több szempontból sem igaz, sőt, egyedül a víz és a talajszemcsék összenyomhatóságát tekinthetjük közös pontnak. A kritériumok mellett az egydimenziós konszolidáció mérési módszere, az ödométeres laboratóriumi eljárás is alkalmatlannak mutatkozott a kísérletek elvégzésére, ugyanis a laza kiindulási állapotból kifolyólag a mintatest deformáció túl nagynak bizonyult. Az ödométeres, egydimenziós konszolidációs eljárás helyett, háromdimenziós triaxiális vizsgálati módszerrel kezdtem meg a vizsgált talajok tömörödési vizsgálatait.

A 6.1.1 fejezetben ismertetett triaxiális mérési módszer hidrosztatikus szakaszában alkalmazott növekvő terhelési csúcsok a talajminta tömörödését okozzák, és a periodikusan változó terhelés-tehermentesítési fázisok során a mintatest veszít térfogatából. A terhelési lépcsők időtartamának rövidege miatt (dinamikus jelleg) a vizsgált talaj nem éri el az adott terhelés mellett a teljes konszolidáltságot, valamint a minta is mindvégig háromfázisú marad. A vizsgálat drénezetlennek tekinthető eredményeit a módosított Cam-Clay anyagmodellben szereplő λ paraméter szerint jellemezhetjük, ami a normál konszolidáltsági vonal (NCL, normal consolidation line) meredeksége (Kántor, Mikita és Kovács, és mtsai. 2019).

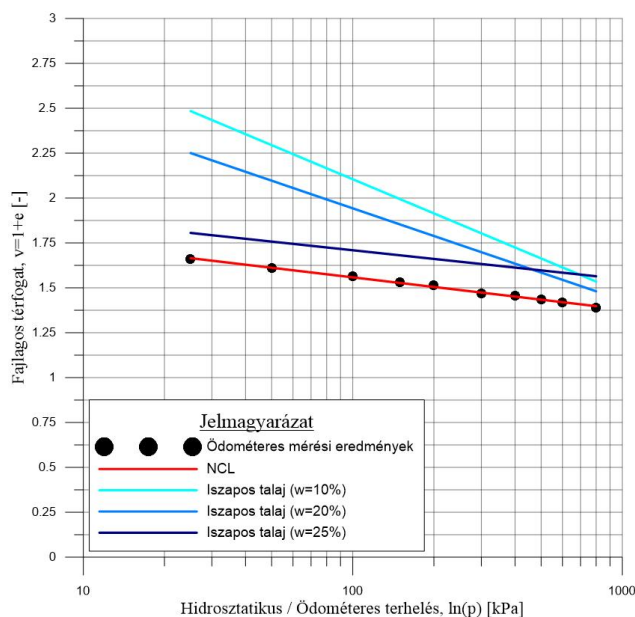
A λ paramétert ugyan a jól konszolidált, vagy túlkonszolidált talajokra jellemző, konszolidálatlan talajok képlékeny viselkedésének jellemzésére ritkán használják. A kiválasztott mintáim képlékeny viselkedésének jellemzésére a mérések során nyert eredmények statisztikai alapú adatfeldolgozását végeztem el, amellyel a talajok növekvő terhelés hatására bekövetkező feltömörödését vizsgáltam.

A triaxiális vizsgálatok során nyert tömörödési adatok értelmezéséhez a nagyszámú redundáns adatot a talajok fajtája, valamint víztartamuk szerint is osztályoztam. A konszolidációnál használt, s a módosított Cam-Clay anyagmodell javaslata szerint, a térfogatváltozást a fajlagos térfogat paraméterrel jellemeztem, és vizsgáltam ennek változását a mintára ható hidrosztatikus feszültség természetes alapú logaritmusának függvényében. Az így kapott eredményeket a 6-12.- 6-14. ábrák mutatják be. Az ábrákon külön tüntettem fel a különböző víztartalmi szintekhez tartozó konszolidációs egyeneseket, valamint a 3.2.4 fejezetben bemutatott, szabványos ödométeres vizsgálattal meghatározott, az adott talajra vonatkozó normál konszolidációs egyenest (NCL).

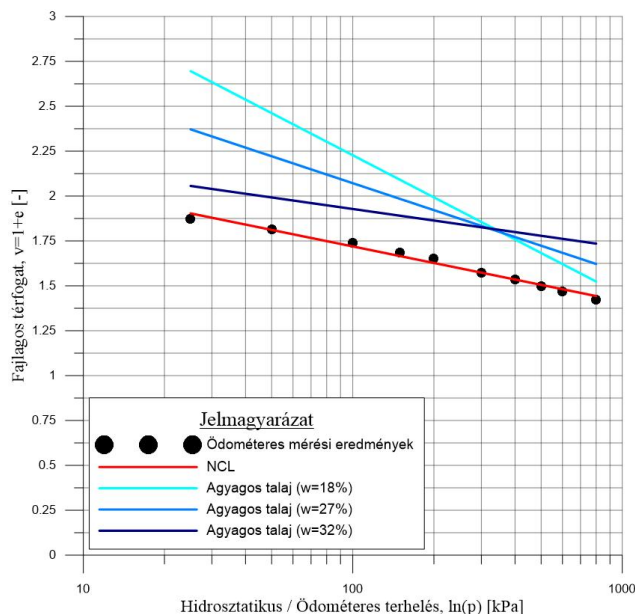
A görbék alapján minden talajtípus esetén jól elkülöníthetők a laza talajok tömörödési és normál konszolidációs görbéi. A laza állapotból induló, folyamatosan háromdimenziós terhelésnek kitett mintatestek tömörödési egyenesei mindvégig a NCL felett futnak, ami a talaj konszolidálatlanságát mutatja. A víztartalom növelésével a mintatest tömörödési jellege az NCL irányába tolódik el, ami a víznek a tömörödéssel és konszolidációra gyakorolt hatását mutatja. Nedves minta esetén már mintagyártás során is nagyobb tömörség, alacsonyabb fajlagos térfogat alakul ki a mintatesten belül, így a lecsökkent pórustérben a víz áramlása lelassul, s a telített talajok konszolidációs tulajdonságai jellemzik a laza talajokat is.



6-12. ábra: Homokos talaj tömörödése során tapasztalt konszolidációs egyenesek a víztartalom függvényében

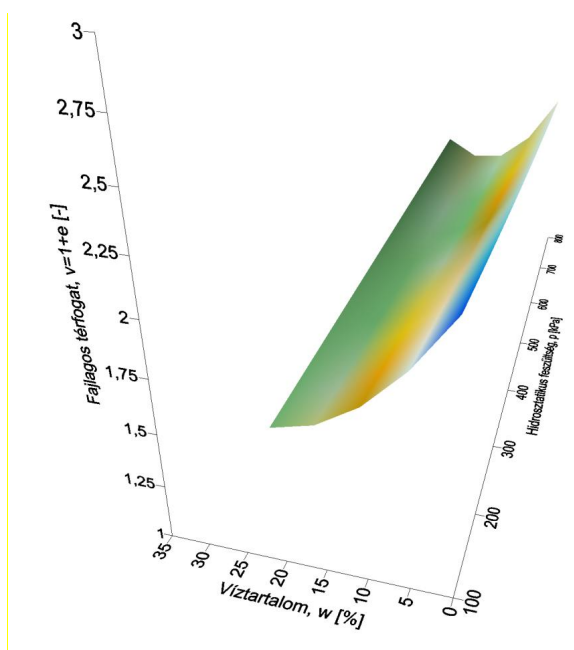


6-13. ábra: Iszapos talaj tömörödése során tapasztalt konszolidációs egyenesek a víztartalom függvényében

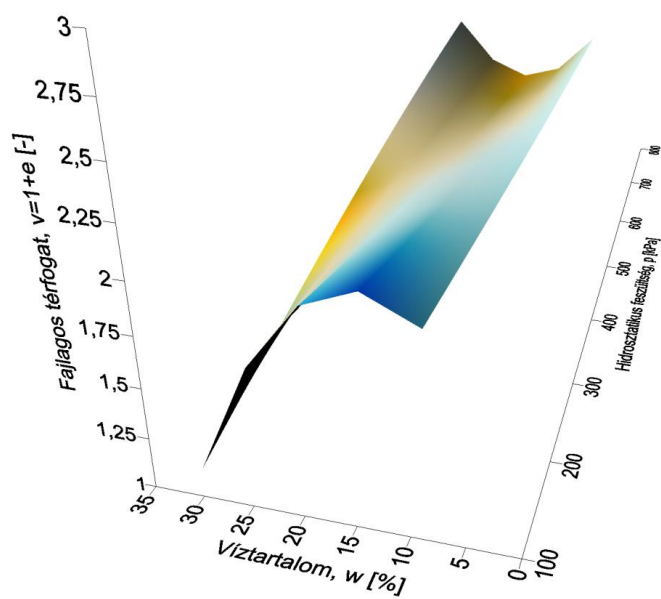


6-14. ábra: Agyagos talaj tömörödése során tapasztalt konszolidációs egyenesek a víztartalom függvényében

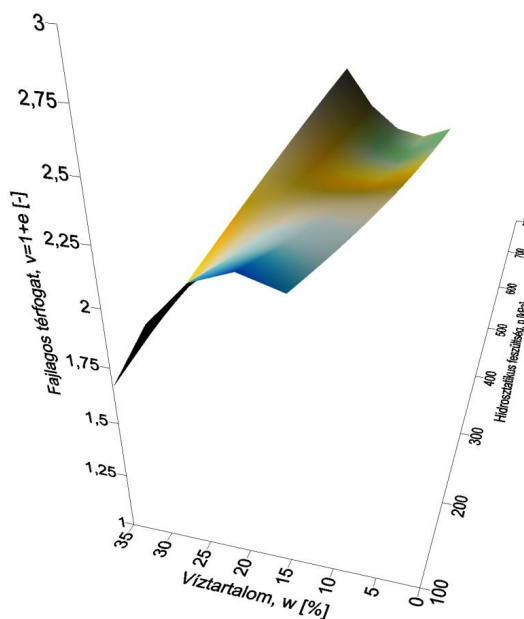
A víztartalom (w) és a terhelés (p) tömörödéésre gyakorolt hatásának vizsgálatára – a rugalmassági tényezőhöz (κ) hasonlóan - a felületillesztési módszert alkalmaztam. Az illesztések grafikus eredményeit a 6-15.-6-17. ábrák foglalják össze. A tömörödés háromdimenziós ábrázolása a talajok tekintetében újszerű megoldás.



6-15. ábra: Fajlagos térfogat változási felület a terhelés és víztartalom függvényében (homokos talaj, NYT)



6-16. ábra: Fajlagos térfogat változási felület a terhelés és víztartalom függvényében (iszapos talaj, MA)



6-17. ábra: Fajlagos térfogat változási felület a terhelés és víztartalom függvényében (agyagos talaj, TH)

A homokos, iszapos és agyagos talaj esetén is a mérési eredményeim átlagértékeire illesztett, felületet leíró függvénykapcsolat a p hidrosztatikus nyomás és a w víztartalom függvényében írja le a talaj képlékeny változását. Az illesztések során használt felületek általános egyenlete (6.6) az alábbiak szerint írható fel:

$$v(p,w) = A_{00} + A_{01} w + A_{02} w^2 + A_{10} p + A_{11} pw + A_{12} pw^2 + A_{20} p^2 + A_{21} p^2 w + A_{22} p^2 w^2 \quad 6.6$$

ahol v a fajlagos térfogat, p a talajmintát terhelő hidrosztatikus feszültség, w pedig a nedvességtartalom. Az egyenletben szereplő, talajokra jellemző együtthatók értékeit a 6-14. táblázat foglalja össze.

6-14. táblázat: A fajlagos térfogat változását leíró felületek egyenleteinek együtthatói

Egyenleti állandó	Homokos talaj (NYT)	Iszapos talaj (MA)	Agyagos talaj (TH)
A_{00}	2.261167	1.083181	1.258963
A_{01}	-0.051065	0.154813	0.115642
A_{02}	0.001001	-0.005278	-0.003017
A_{10}	-0.000563	0.002567	0.001837
A_{11}	$-1.664393 \cdot 10^{-5}$	-0.000470	-0.000337
A_{12}	$2.066936 \cdot 10^{-6}$	$1.453456 \cdot 10^{-5}$	$8.611636 \cdot 10^{-6}$
A_{20}	$2.010444 \cdot 10^{-7}$	$-9.161499 \cdot 10^{-7}$	$-6.557690 \cdot 10^{-7}$
A_{21}	$5.940333 \cdot 10^{-9}$	$1.678478 \cdot 10^{-7}$	$1.203311 \cdot 10^{-7}$
A_{22}	$-7.377037 \cdot 10^{-10}$	$-5.187487 \cdot 10^{-9}$	$-3.073552 \cdot 10^{-9}$

Az újszerű vizsgálataim eredményei is rámutattak arra, hogy a konszolidálatlan talajok képlékeny alakváltozása különbözik a konszolidált talajokétól. Laza, konszolidálatlan állapotból kiindulva a minta tömörödési (konszolidációs) jellege meredekebb lefutású, s csak nagy terhelések esetén éri el a normál konszolidációs egyenest. Méréseim során ezt a nyomásértéket a vizsgálóberendezés korlátai miatt nem értem el.

A tapasztalt különbségeket okozhatja az egydimenziós és háromdimenziós konszolidáció közti különbség is. Az egydimenziós, vagy más néven ödométeres vizsgálatok során a minta oldalkitérése gátolt, míg triaxiális cellában létrehozott hidrosztatikus terhelésnél a mintatest axiális és laterális alakváltozást is szenved. A mintatestben kialakuló feszültségterek különböznek, ami meghatározza a tömörödés menetét is, ezért a feszültségterek lehetőleg roncsolásmentes vizsgálata a talajmechanika jövőjének fontos kihívása.

A tengelyirányú és horizontális alakváltozások közti kapcsolat vizsgálata is fontos kérdése a talajmechanikának, például a földnyomási problémáknál, amire a Poisson-számhoz hasonló, harántkontrakciós tényező alkalmazható. Ennek mérésére tett kísérleteimet, eredményeimet és tapasztalataimat egy későbbi fejezetben foglalom össze.

A laza talajok tömörödésének vizsgálatai fontos modellparaméterek lehetnek a mezőgazdasági talajok káros tömörödéseinek vizsgálatokor, de akár a hulladéklerakók konszolidációjának modellezési feladatainál is (Kántor 2006).

6.3 NAGYMÉRETŰ NYÍRÓDOBOZBAN VÉGETT VIZSGÁLATOK

A hagyományos nyíróvizsgálatok méret és terhelési tartományának kiterjesztése több probléma megoldása esetén előnyös. A nagyméretű nyíróberendezések fejlesztésére általánosan jellemző, hogy valamilyen egyedi probléma kezelése miatt hozzák létre, ezért a világszerte megépített nagyméretű nyíróberendezések kialakításai különbözők. Leggyakrabban a durvaszemcsés összletek vizsgálata miatt növelik a nyíródobozok méreteit, mint ahogy azt Estair és Santana 2018-ban megjelent munkájában közli (Estair és Santana 2018). Gyakori felhasználása ezeknek a nagyméretű berendezéseknek a különböző súrlódási és kihúzási vizsgálatok is, amikor két különböző anyag közti adhézió mérhető. Különösen fontos ez geoműanyagok súrlódási paramétereinek meghatározásakor, ahogy azt Zhijun és munkatársai (Zhijun, és mtsai. 2019), vagy éppen Punetha, Mohanty és Manojit (Punetha, Mohanty és Manojit 2016) közleményeiben találhatjuk. Magyarországi viszonylatban Szabó és szerzőtársa készített széleskörű, átfogó összefoglalást a talaj és geoműanyagok, valamint hulladék és geoműanyagok közti súrlódási viszonyok problematikájáról. A bemutatott értékek jelentős része nagyméretű nyírási eredményéből származik (Szabó és Szabó 2012). A hulladékok nyírószilárdsági paramétereinek meghatározásáról pedig Varga doktori disszertációjában foglalkozik, s a feladat nehézségét nagyméretű nyíróvizsgálatokon keresztül mutatja be (Varga 2010).

Laboratóriumi vizsgálatok esetén az eredményeket befolyásolja a mintavétel minősége, ezáltal a minta minősége, a mintaanyag reprezentatív jellege, valamint zavart minta esetén az újbóli konszolidálás során elért tömörségi viszonyok és a természetes állapot közti különbség. Hátrányt jelent még a hagyományos laboratóriumi vizsgálatok során a mintaméret hatása. A minta méreteinek korlátja megszabja a legnagyobb vizsgálható szemcsék mérettartományát is, ezáltal korlátozza a durvaszemcsés talajok vizsgálatát. A nyírószilárdság laboratóriumi mérésének eszközei lehetnek az

- egytengelyű nyomóvizsgálat;
- a triaxiális vizsgálat;
- nyíróvizsgálatok.

Leírásuk a szakirodalomból részletesen ismert, értekezésemben bemutatásukra nem térek ki.

A nyírószilárdsági paraméterek terepi mérése mellett szól a mért talajrétegek bolygatatlansága, nedvességtartalmi, konszolidáltsági viszonyainak természetes állapota. A terepi mérések hátránya viszont a méréspontosság, ami az in situ jellegből fakad.

Tovább bonyolítja a nyírószilárdsági paraméterek meghatározását, ha konszolidálatlan talajokról van szó. A korábbi triaxiális mérésorozat során tapasztalt nagy deformációk problémát okoznak a nyíródobozos vizsgálatok esetén is, az egytengelyű nyíróvizsgálatoknál pedig a mintatest öntartása, valamint az alacsony ellenállási értékekből adódóan a mérések pontatlansága is a mérési eredmények megbízhatóságát csökkenti.

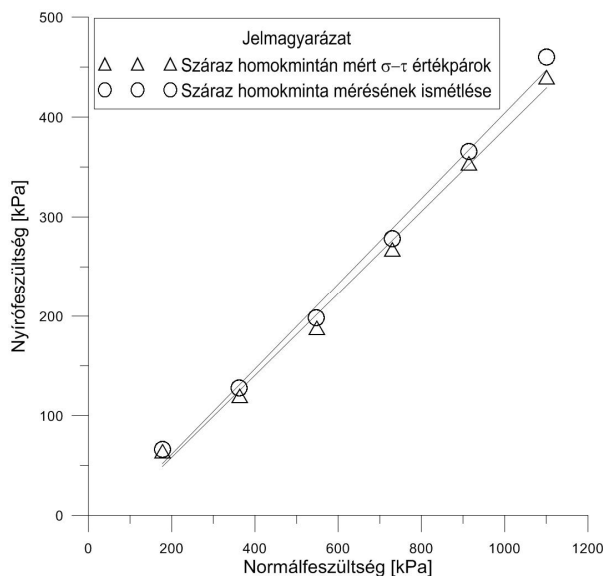
Az Agrogeotechnikai Kutatócsoport, a DIGÉP Kft., az STC System Group Kft és a G-Key Terv Bt. által fejlesztett és épített nagyméretű nyíróberendezés a fentebb taglalt problémák kiküszöbölésére, valamint egyéb, a laza, konszolidálatlan talajokkal kapcsolatos innovatív mérések kivitelezésére jött létre. A berendezés főbb részeit, vezérlési lehetőségét és a hozzá tartozó újszerű, szenzoros mérőegységeket a 4.4. fejezetben mutattam be. A következő alfejezetekben a nagyméretű, laza mintatesteken végrehajtott direkt nyíróvizsgálatok során szerzett tapasztalatokat foglalom össze.

6.3.1 A nagyméretű nyírás kezdeti tapasztalatai

A nagyméretű nyírógép beüzemelési szakaszában több olyan mérést és vizsgálatot is elvégeztem, amelyekkel a potenciális hibákat és gépi jellegzetességeket próbáltam kiszűrni. Az új, többlépcsős vizsgálati módszer kialakítását is elősegítendő, számos tesztmérést már a későbbiekben vizsgálni kívánt talaj felhasználásával végeztem.

A vizsgálatok megtervezése során törekedtünk arra, hogy olyan talajt válasszunk ki, amelynek a belső súrlódási szöge kellőképp nagy, mivel így az esetleges mérési hibák dominánsabban megmutatkoznak. A választás így egy kis kohéziójú, nagy belső súrlódási szöggel bíró, száraz, homokos talajra esett, amit a későbbi vizsgálatoknál is használtunk (Kántor és Kovács 2011).

A többlépcsős mérések tesztelése során kiderült, hogy a vizsgálatok jól reprodukálhatók, mivel a belső súrlódási szög értékekben csak kis eltérést tapasztaltunk. (6-18. ábra)

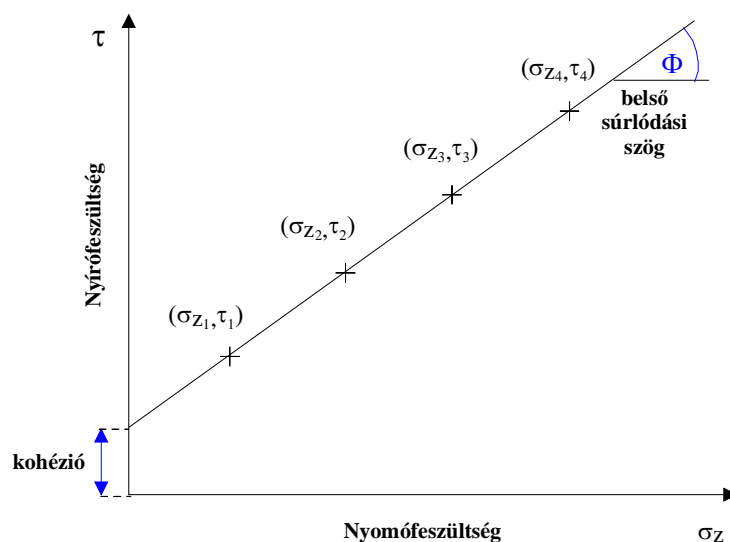


6-18. ábra: Nagyméretű, többlépcsős nyírás reprodukálhatóságának vizsgálata

A kohézió értékében már itt észlelhető volt egy nagyfokú bizonytalanság, s ez előrevetítette, hogy a vizsgált anyagok tekintetében is a kezdeti tömörségi állapota lényeges tényező lesz a nyírószilárdsági paraméterek tekintetében (Kántor és Kovács 2010).

6.3.2 Többlépcsős (Multistage) nyíróvizsgálatok

Általános nyíróvizsgálatok esetén konszolidáltatják a mintát egy előre beállított normálfeszültség alatt, ezután oldják a mintát befogadó keretek rögzítését, és az egyik keretet a másikhoz képest állandó sebességű nyírási alakváltozással vízszintesen elmozdítják. A minta elnyírása közben mérik a nyíróerőt és a vízszintes elmozdulást (MSZE CEN ISO/TS 17892-10:2004 2010.). Minden egyes elvégzett vizsgálatnak egy σ - τ értékpár lesz az eredménye (Kézdi 1972). Ahhoz, hogy megkapjuk az adott talajra jellemző tönkremeneteli határgörbét a σ - τ síkon, több különböző normálfeszültség mellett elvégzett nyírásra van szükség (6-19. ábra).

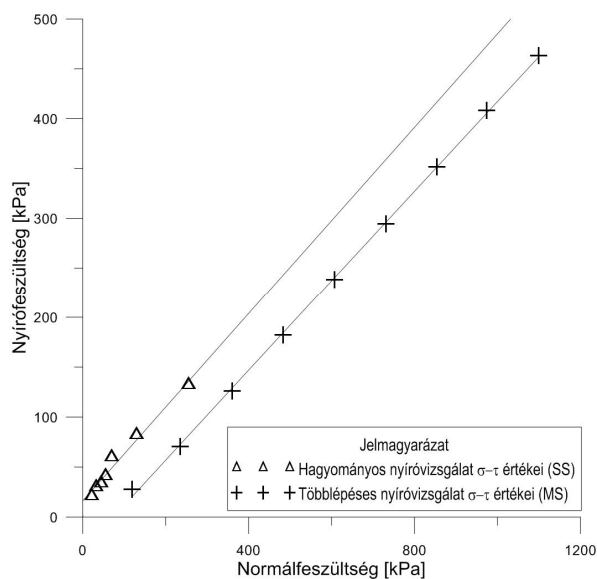


6-19. ábra: Nyíróvizsgálatok általános kiértékelése a tönkremeneteli egyenes segítségével

A vizsgálatok reprodukálhatósága szempontjából nagy gondot okoz az, hogy az újbóli mintaelőkészítés során ugyanazt a víztartalmat, szemeloszlást, homogenitást érjük el, így a mérésorozat eredményei mindig magukban hordozzák ezen bizonytalanságok által okozott hibaforrásokat. A nagyméretű nyíróberendezés tesztelése során vizsgáltuk a szabványos nyíróvizsgálati módszert is (6-20. ábra). Ezek eredményeit, valamint a nagy nyíródoboz adta lehetőségeket kihasználva alkottunk meg egy új nyíróvizsgálati eljárást, a többlépcsős nyíróvizsgálati módszert (MS). Az új módszer lényege, hogy a hagyományosan különálló nyíróvizsgálatokat egy folytonos mérési sorozatban hajtja végre egyre növekvő normálterhelések mellett, kis elmozdulásokkal. Az elmozdulások során felépül a talaj nyírási ellenállása, de akkora elmozdulás nem jön létre, hogy a tönkremenetel bekövetkezzen, vagy a tönkremeneteli felület kialakuljon. A minta terhelt felülete sem változik érdemben, így lehetséges egy következő terhelési-nyírási lépcső elvégzése (Kántor és Kovács 2011).

A többlépcsős nyírási eljárás alkalmazhatóságát több kutató is vizsgálta. Kiemelkedő kutatási eredményeket értek el a Freibergi Egyetem szakemberei, akik a nagyméretű, többlépcsős nyírási vizsgálatok mellett, a geoműanyagok és talajok közötti súrlódási viszonyok vizsgálatánál is ezt a módszert alkalmazták. Althoff doktori disszertációjában az alacsony teherbírású talajok nyírószilárdsági paramétereinek meghatározásával foglalkozott (Althoff 2015), s kutatásait Tamáskovics által megalapozott többlépcsős nyírókísérletre alapozta. A freibergi egyetem kutatója Tamáskovics Norbert is, aki a vizsgálati módszert „PO800568” jelzéssel, magyar szabadalmi oltalom alá helyeztette (Tamáskovics (jun.) és Tamáskovics (sen.) 2008).

Vizsgálataim során a Tamáskovics által leírt eljárás alapján a módszert alkalmaztam (Tamáskovics 2009). Egy előre meghatározott $\Delta\tau/\Delta h$ arányszám elérése esetén indul el a következő konszolidálási és nyírási szakasz.



6-20. ábra: Egy- és többlépcsős nyíróvizsgálatok eredményeiből számított σ - τ értékpárok (Kántor és Kovács 2010)

Az egy- és többlépcsős vizsgálati módszerekkel elvégzett tesztek követően, azok eredményeit feldolgozva és a tesztek során fellépő hibalehetőségeket kiszűrve összevethetővé váltak a két vizsgálati módszer előnyei és hátrányai (Kántor és Kovács 2010).

Vizsgálataink során kiderült, hogy a többlépcsős nyíróvizsgálat legnagyobb előnye a szabványos, kisméretűvel szemben az, hogy a mérés közben az anyagparaméterek (nedvességtartalom, szemeloszlás, homogenitás) nem, vagy csak elhanyagolható mértékben változnak. Természetesen vannak olyan területek is, ahol az egylépcsős nyíróvizsgálatok jobb megoldást jelentenek, ilyenek lehetnek, amikor reziduális nyírás ellenállással gátolt kúszás jellegű lejtőmozgásokat vizsgálunk. Ilyen esetekben a hosszú, lassú elmozdulás mellett végzett nyírás az adott talajra nézve reálisabb eredményt ad (Szabó és Kovács 1992).

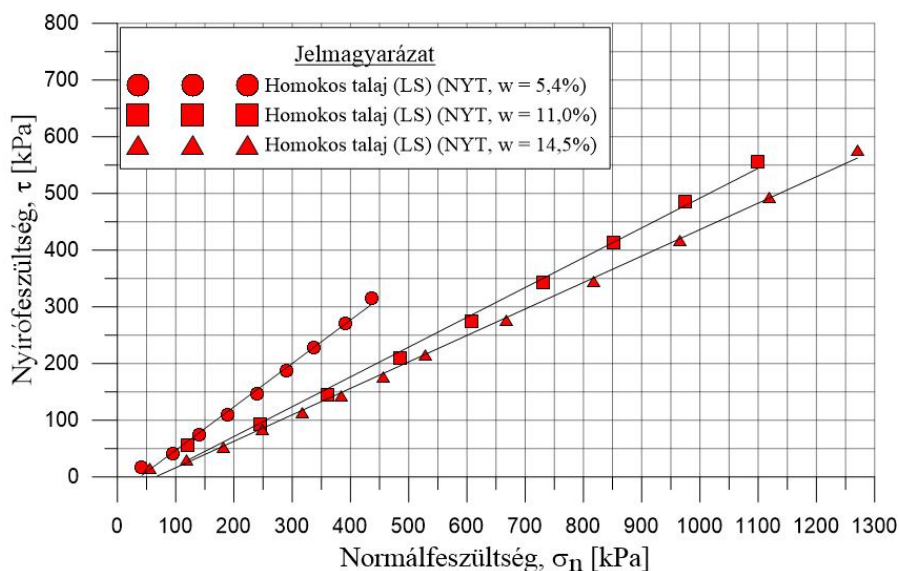
Laza konszolidálatlan talajok vizsgálata esetén, a többlépcsős nyíróvizsgálatok tekinthetőek úgynevezett roncsolásmentes vizsgálatnak is, ha a mintát egy adott mértékű felterhelést követően közvetlenül a tönkremenetel előtti állapotig terhelünk, majd egy magasabb terhelés mellett ismét minimális elmozdulásig kialakuló erőket mérjük, amit többször megismételve megkapjuk a konszolidálatlan talajra jellemző tönkremeneteli egyenest, s ezáltal a nyírószilárdsági paramétereket. Mindehhez az erők, elmozdulások igen pontos ismeretére és real time vezérlésre van szükség, annak érdekében, hogy még éppen a tönkremenetel előtt a terhelés leállítható legyen. Ilyen vizsgálatot rideg mintán nem lehet végezni, de éppen az említett hulladékok vagy laza talajok esetében igen. A vizsgálat tulajdonképpen felfogható egy speciális roncsolásmentes vizsgálatként is (Kovács 2019).

6.3.3 Mezőgazdasági talajok többlepcsős nyírókísérletei

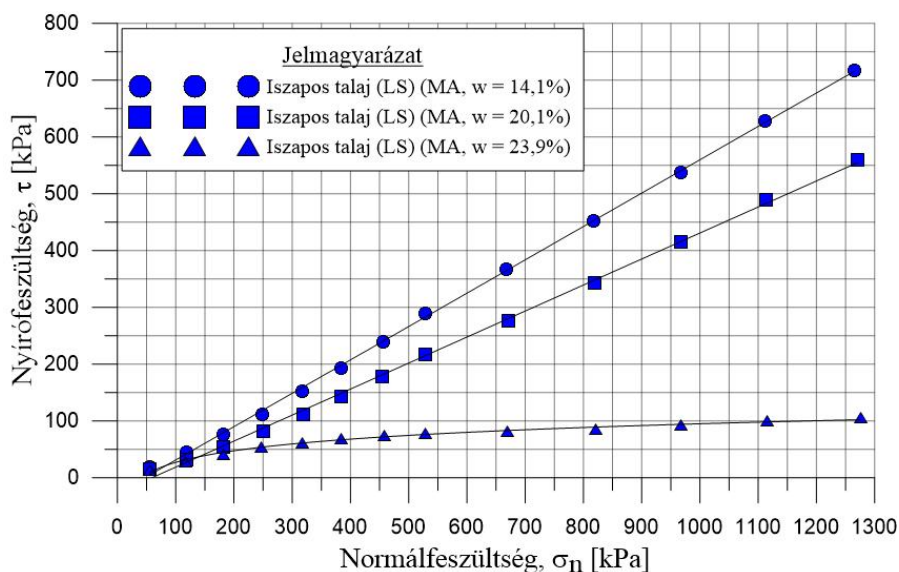
Az előbbieken vázolt többlepcsős, roncsolásmentes, nagyméretű, direkt nyíróvizsgálatok kidolgozása után vizsgálatokat végeztem a korábbi fejezetekben már taglalt mezőgazdasági talajok nyírószilárdsági paramétereinek meghatározására. A nyírások során a vizsgálatok fő kritériuma itt is a talajok laza konszolidálatlan állapotban tartása volt.

A vizsgálatokat három, eltérő nedvességtartalom mellett, több ismétlésben végeztem. Az eredmények jó egyezést mutattak, - valamint a korábbi beüzemelés során végzett vizsgálatok is alátámasztották az azonos körülmények között végzett tesztek ismételhetőségét - ezért az eredmények összefoglalásánál nem minden vizsgálat eredményét közlöm.

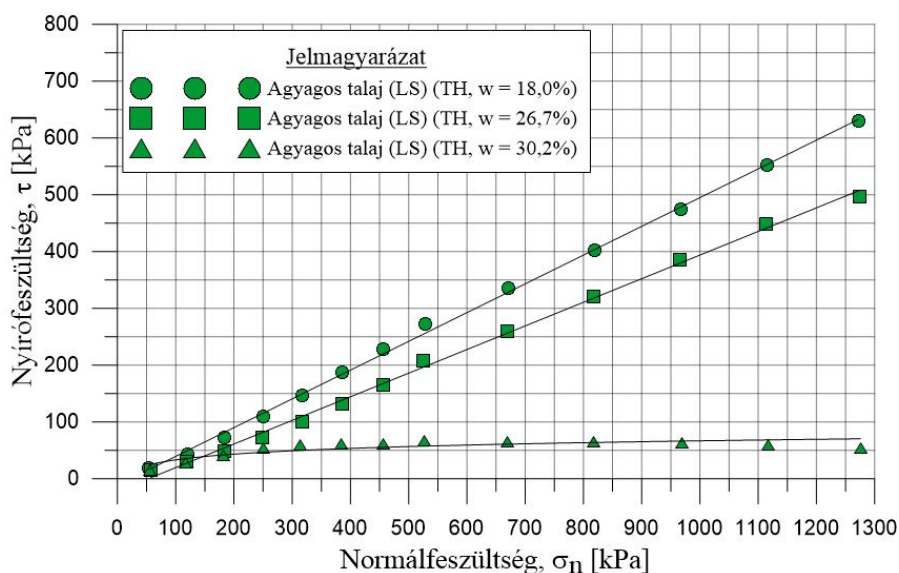
A méréseket eredményei a tönkrementeli egyenesek, amelyeket a 6-21.-6.23. ábrákon ábrázoltam. Értékelve az eredményeket, feltűnő, hogy magas finomszemcse tartalom esetén (iszapos talaj, agyagos talaj), magas víztartalmak mellett a tönkrementeli egyenesek az alacsony normál terhelések mellett lineáris tönkrementeli görbét határoznak meg. Nagyobb terhelés mellett (200-300 kPa) a tönkrementeli egyenes hajlásszöge változik és kvázi konstans értékhez közelít, amit a terhelés növelésétől függetlenül tart. Ennek magyarázata a finom szemcsékben rejlik, ugyanis magas nedvességtartalom és konszolidálatlan állapot mellett az ilyen típusú talajok magasabb terheléseknél viszko-elasztikusan viselkednek. Folyadékokra jellemző viselkedéséhez hasonló mechanikai jeleget tapasztalhatunk.



6-21. ábra: Homokos talaj (NYT) nagyméretű nyíróvizsgálatainak (MS) eredményei a víztartalom függvényében



6-22. ábra: Iszapos talaj (MA) nagyméretű nyíróvizsgálatainak (MS) eredményei a víztartalom függvényében



6-23. ábra: Agyagos talaj (TH) nagyméretű nyíróvizsgálatainak (MS) eredményei a víztartalom függvényében

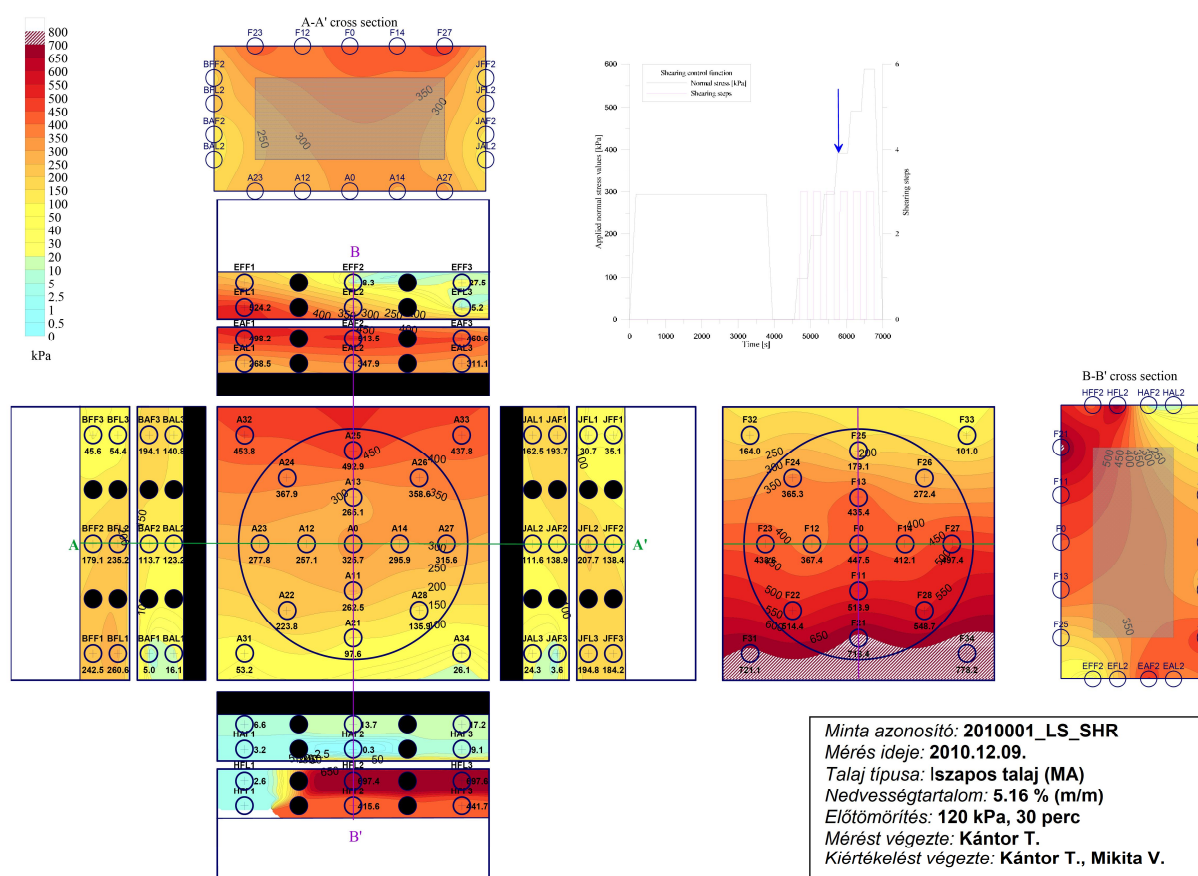
A többlépcsős nyíróvizsgálatok eredményeinek másik, fontos tanulsága a kohézió mérésének problematikája. A 6-21.-6-23. ábrák alapján is szembeűnő, hogy minden esetben negatív „kohéziós” érték adódott a tönkremeneteli egyenes illesztése után. Ez, a fizikát meghazudtoló eredmény természetesen nem talajtulajdonság, hanem a mérési eredmények feldolgozásának hibája. A 3.2.6 fejezetben láthattuk, hogy normál körülmények között a vizsgált talajok a rájuk jellemző nyírószilárdsági paramétereket mutatták.

A többlépcsős, nagyméretű nyírásoknál tapasztalt negatív kohéziós érték a normál terhelés nem megfelelő felvételéből adódott. A nyomólásra ható terhelés ugyanis nem egyezik meg a nyírási felületen lévő normál feszültséggel. Az eltérés a konszolidálatlan minták vizsgálata során még nagyobb

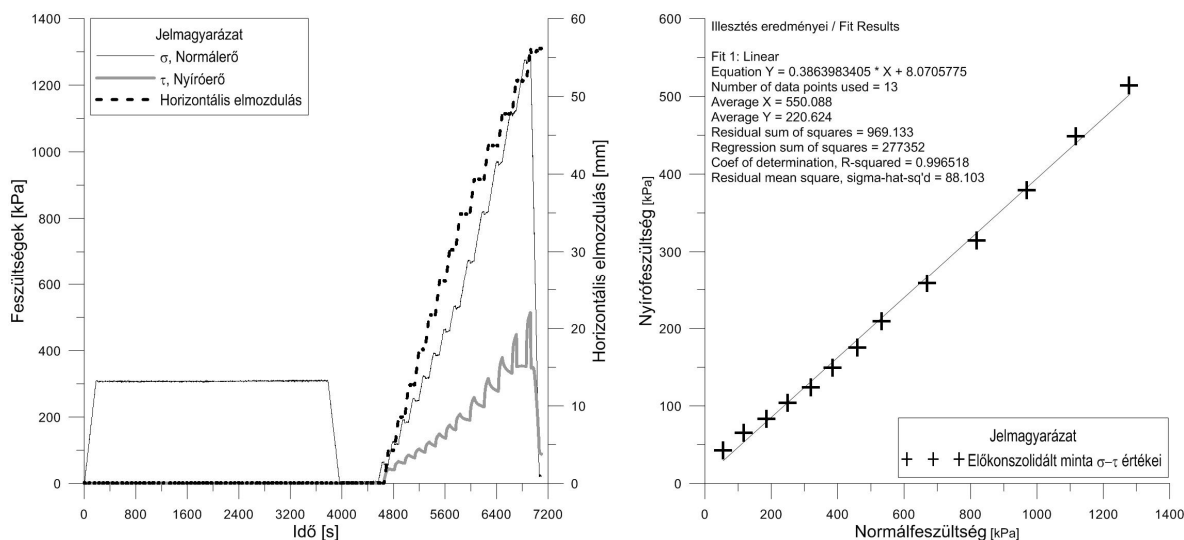
lehet. A tönkremeneteli felületen ható feszültségek meghatározása azonban nem egyszerű feladat, de a 4.4.3 fejezetben bemutatott nyomásszenzoros egység lehetővé tette a minta belsejében kialakuló feszültségmező vizsgálatát. Ez megoldást jelenthet a fent említett probléma kiküszöbölésére (6-24. ábra).

A 6-24. ábrán bemutatott inhomogén feszültségter rávilágít a nyírási síkon és a nyomólap közelében mérhető feszültségek különbségére. Az A-A' és B-B' metszeteken jól elkülöníthető feltömördési és lazulási zónák különíthetők el.

A 6-24. ábrán látható közvetlen nyíróvizsgálat kezdeti szakaszába egy rövid tömörítési fázist építettem be. A tömörség növelésével a talaj kohéziós értékének növekedését vártam. A vizsgálat eredményeit a 6-25. ábra foglalja össze.



6-24. ábra: Nagyméretű nyíróvizsgálat során kialakuló feszültségeloszlás (iszapos talaj; (Kántor és Kovács 2012)



6-25. ábra: Kezdeti tömörítés hatásának vizsgálata nagyméretű nyíróvizsgálat esetén

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a laza talajok esetén a tömörség hatással van a talaj kohéziós értékére, a tömörség növekedésével a kohéziós érték is nő.

6.4 A HARÁNTKONTRAKCIÓS (POISSON)-TÉNYEZŐ VIZSGÁLATA

A Poisson-tényező vizsgálata és minél pontosabb meghatározása fontos tényező pl. a numerikus talajmechanikai modellek felépítése során, ezért a vizsgálataim kiterjedtek a laza, konszolidálatlan, elsősorban mezőgazdasági eredetű talajok Poisson-tényezőjének meghatározására is. A kutatócsoport tagjaként feladatomban a laboratóriumi vizsgálatsorozat végrehajtása volt, valamint az eredmények feldolgozása és értékelése alapján a kutatás további irányvonalának kijelölésében való részvétel.

A Poisson-tényező megnevezés laza, konszolidálatlan, háromfázisú diszperz rendszerek esetén, - amilyen a talaj is – a szakmai körökben a legtöbb esetben heves vitát generál. A legfőbb ellenérv a megnevezéssel szemben, annak jól meghatározott fizikai jelentése, azaz, hogy az eredetileg Poisson által leírt elmélet a rugalmas anyagok viselkedésére vonatkozik (lásd 5.3 fejezet). Ezzel szemben konszolidálatlan talajok esetén a rugalmas-képlékeny viselkedés párhuzamosan történik, s az alakváltozási folyamatok során nehéz elválasztani egymástól a tisztán rugalmas és tisztán képlékeny deformációt. Vizsgálataim elméleti megfontolása a Poisson által lefektetett elveken alapul, de a kapott eredmények megnevezése „Poisson-szerű tényezőként” vagy harántkontrakciós-tényezőként szerepel.

A vizsgálataim során a 4. fejezetben részletesen ismertetett, speciális mérőeszközöket használtam a konszolidálatlan talajok harántkontrakciós-tényezőjének meghatározására.

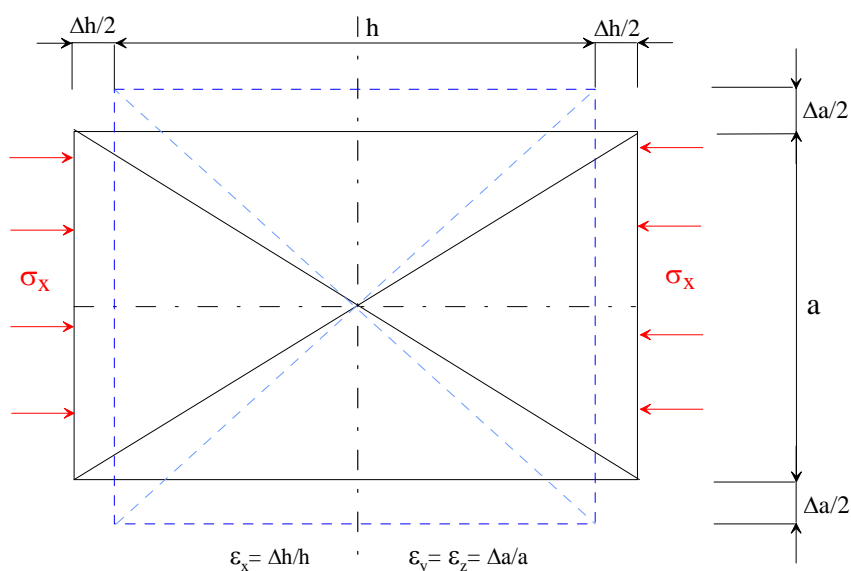
A Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratórium innovatív térfogatmérő részegységgel felszerelt triaxiális mérőberendezése lehetővé tette a vizsgálatok során fellépő nagy deformációk mérését, így a Poisson-szerű tényező vizsgálatát.

A nyomásmérő szenzorokkal felszerelt, szintén innovatív mérési megoldásnak számító ödométeres mérőhengerrel a Hooke-törvényből levezethető, feszültségmérésen alapuló meghatározási módszert tudtam végrehajtani.

A laza, konszolidálatlan és telítetlen talajok harántkontrakciós-tényezőjének meghatározásával kapcsolatos vizsgálati eredményeimet az alábbiakban foglalom össze.

6.4.1 A harántkontrakciós tényező meghatározása triaxiális vizsgálatokkal

A Poisson-tényező meghatározását egytengelyű nyomókísérlet segítségével Kézi Árpád 1980-ban megjelent művében foglalja össze, s az általa alkalmazott eljárást részletesen leírja (Kézdi 1980). Vizsgálatai során minden egyes terhelési lépcső esetében a mintatestről fényképet készített. A fényképekről mérni lehetett a minták relatív, oldal irányú kitérését és tengely irányú összenyomódását. Az értékek ismeretében számíthatóvá vált a Poisson-tényező értéke. Az eljárás a 6-26. ábra alapján foglalható össze, amelyet az Agrogeotechnikai Kutatócsoport 2008. évi jelentésében közöltünk (Kovács, Kriston, és mtsai. 2008.).



6-26. ábra: Talajok Poisson-tényezőjének meghatározása egytengelyű nyomóvizsgálattal (Kovács, Kriston, és mtsai. 2008.)

A módszernek vannak korlátai, ugyanis az nagyban függ a leolvasás pontosságától, amit egy fényképelemzés esetén a felbontás minősége nagyban befolyásol. A másik feltétel az oldalirányú deformációk mértéke, amivel csak nagy deformációk esetén – ami jól konszolidált talajokra igaz –

számítható pontosan a Poisson-tényező értéke. Sajnos a laza talajok esetében az oldal irányú deformációk szinte elhanyagolhatók is lehetnek, ezért ez az eljárás csak nagyon korlátozott esetekben alkalmazható. Az egytengelyű mérések kivitelezése a minta öntartása miatt nehezen kivitelezhető, s a mérés során az adatgyűjtés pontossága nem biztosítható.

A Kézdi-féle megoldás mechanikailag korrekt, konszolidált vagy túlkonszolidált talajoknál jól használható, a konszolidálatlan talajok esetén nehezen alkalmazható.

A Poisson-szerű tényező meghatározásának másik módja az általunk használt triaxiális módszer. Ennek alap gondolata egybevág a Mouazen-Ramon-Baerdemaeker által 2002-ben publikált mérési módszerrel. A standard triaxiális nyomóvizsgálatok során a tengelyirányú főfeszültség (σ_1) a hengeres talajminta tetején hat a terhelőkeret által a triaxiális cella nyomórúdjának lefelé mozgatásával. Az oldalirányú és axiális főfeszültségek közötti különbség ($\sigma_1 - \sigma_3$), azaz a deviátor feszültség különböző síkokon nyírófeszültséget eredményez. A hengeres minta a háromtengelyű terhelés alatt egy bizonyos axiális elmozdulás után deformálódni kezd, miközben térfogat- és alakváltozást szenved.

A mért térfogatváltozásokat felhasználva kiszámítható a mintatestre jellemző harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező. A vizsgálatok során mértem a fel- illetve leterhelési fázisok során a triaxiális cellába a be-, illetve kiáramló víz mennyiségét, ami - zárt rendszer lévén - megegyezik a vizsgálat alá vont mintatest térfogatváltozásával (6.7). Ennek értéke:

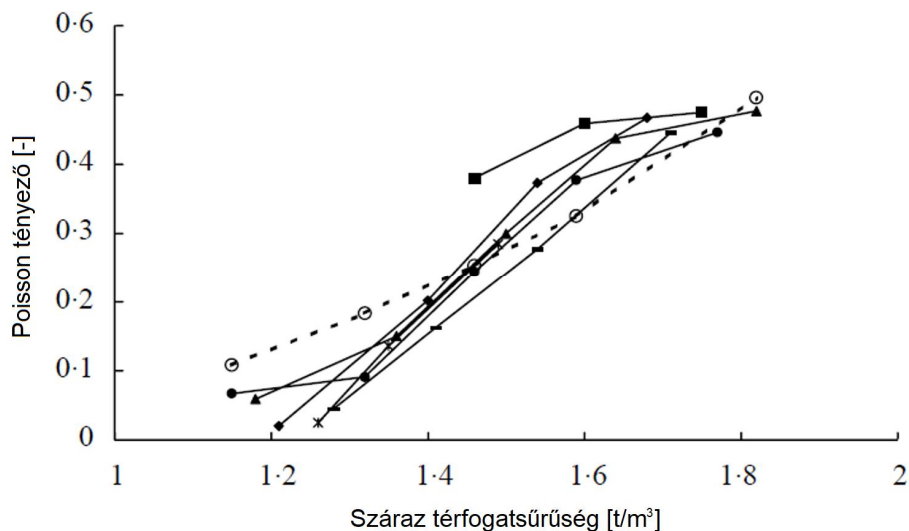
$$\Delta \varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_i} = \frac{(V_a - V_i)}{V_i} \quad 6.7$$

ahol $\Delta \varepsilon_V$ a mintatest fajlagos térfogatváltozása, ΔV az adott időpillanatban fennálló térfogatváltozás értéke, V_a a terhelést követő mintatérfogat, V_i pedig a kiinduló mintatérfogat. A tengelyirányú alakváltozás kiszámításához (6.8) a mérések során rögzített tengelyirányú elmozdulásmérő adatait használtam.

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad 6.8$$

ahol L a kiindulási mintamagasság, ΔL pedig az adott időpillanatban mérhető magasságváltozás. A fent ismertetett eljárások és számítások alapján a harántkontrakciós tényező (ν) az alábbi összefüggéssel (6.9) adható meg:

$$\nu = \frac{\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_V}{2\Delta \varepsilon_1} \quad 6.9$$



6-27. ábra: A talajok Poisson-tényező változása a száraz térfogatsűrűségük függvényében (Kovács, és mtsai. 2008.)

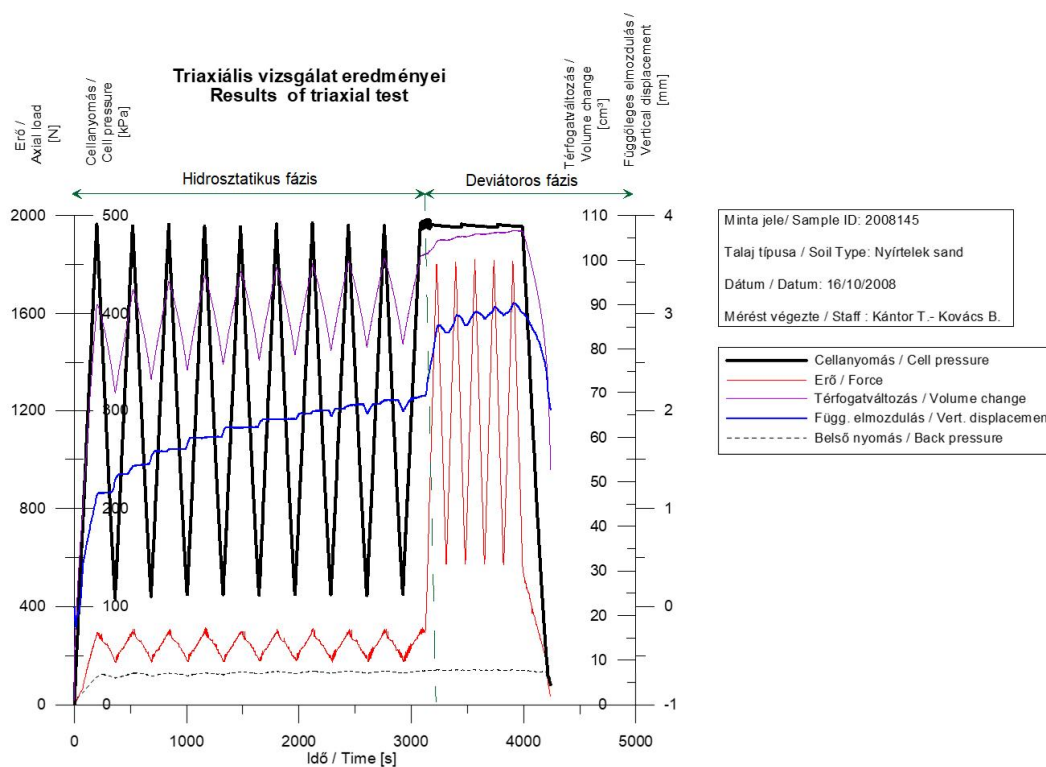
6.4.1.1 A harántkontrakciós (Poisson) tényező mérési metodikája

A fenti összefoglalás alapján eljárási módszert dolgoztunk ki laza, konszolidálatlan talajok harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényezőjének triaxiális vizsgálatokkal történő meghatározására.

A vizsgálatok végrehajtására egy vezérlő függvényt dolgoztam ki, ami egy hidrosztatikus, ciklikus fel- és leterhelési fázisból, ezt követően pedig konstans oldalnyomás tartása mellett egy ciklikusan változó, tengely irányú terhelés-tehermentesítési fázisból állt. A függvény irányítása által a triaxiális mérőberendezés segítségével létrehozott feszültségpálya először elősegítette a talaj rendeződését a mintatesten belül, a deviátoros terhelési fázisban pedig a Poisson-tényező vizsgálatának analógiáján létrejött a tengelyirányú és a radiális irányú deformáció. (6-28. ábra)

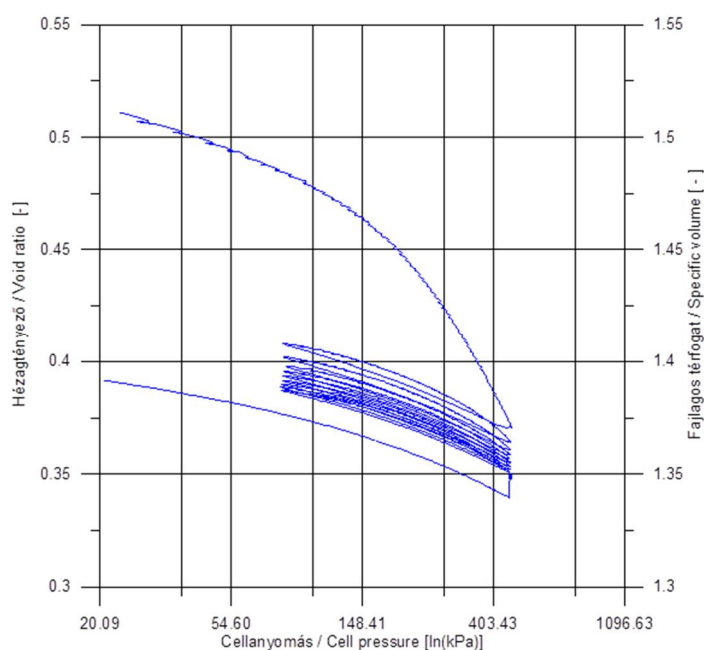
A speciális triaxiális vizsgálatok során az alábbi paramétereket rögzítettük:

- cellanyomás;
- tengely irányú terhelés;
- térfogatváltozás;
- függőleges elmozdulás;
- pórusnyomás.



6-28. ábra: Poisson-szerű tényező meghatározásának menete és a triaxiális mérés eredményeinek összefoglalása

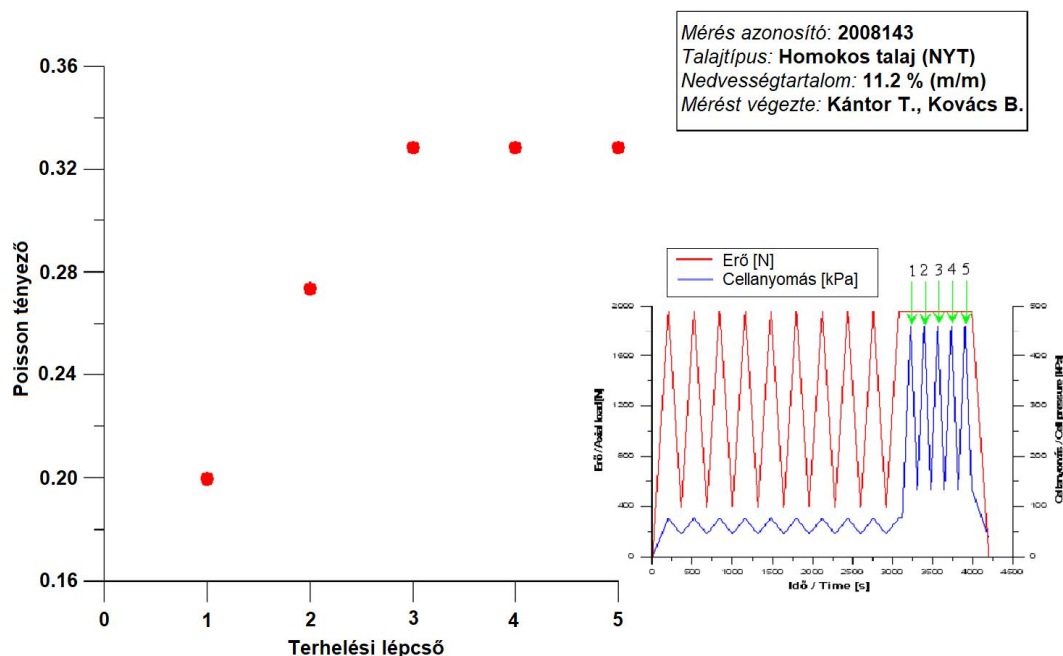
A mért eredményekből meghatározhatóvá vált a mintatest hézagtényező változása, ami megmutatja a minta aktuális tömörségi állapotát, valamint változásából követhető a talaj tömörödése, illetve lazulása.



6-29. ábra: Poisson-szerű tényező mérés, hidrostatikus fázisának eredményeiből szerkesztett cellanyomás-hézagtényező görbe

A harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező meghatározásának hidrosztatikus szakaszában a mintatest a 6-29. ábra szerint fokozatos tömörödést szenvedett. A hidrosztatikus fázisban alkalmazott terhelés-tehermentesítés lehetővé tette a mintatest rugalmasságának vizsgálatát is. A hiszterézis hurkok párhuzamos futása alapján kijelenthető, hogy a mintatest rugalmassága a vizsgálat során csak kis mértékben változott.

A mérési protokoll második, deviátoros szakaszában a mintatestet állandó szinten tartott oldalterhelés mellett, tengelyirányú terhelésnövekménnyel, majd tehermentesítéssel vizsgáltam. A terheléseket mindig azonos szintre emelve és csökkentve, öt lépcsőben vizsgáltam a mintatest alakváltozásait. A térfogatváltozásból visszszámított átmérőnövekményekből és a mért mintamagasság változásból a 6.4.1 fejezetben ismertetett számítás szerint meghatározhatóvá vált a talajmintára jellemző harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező.



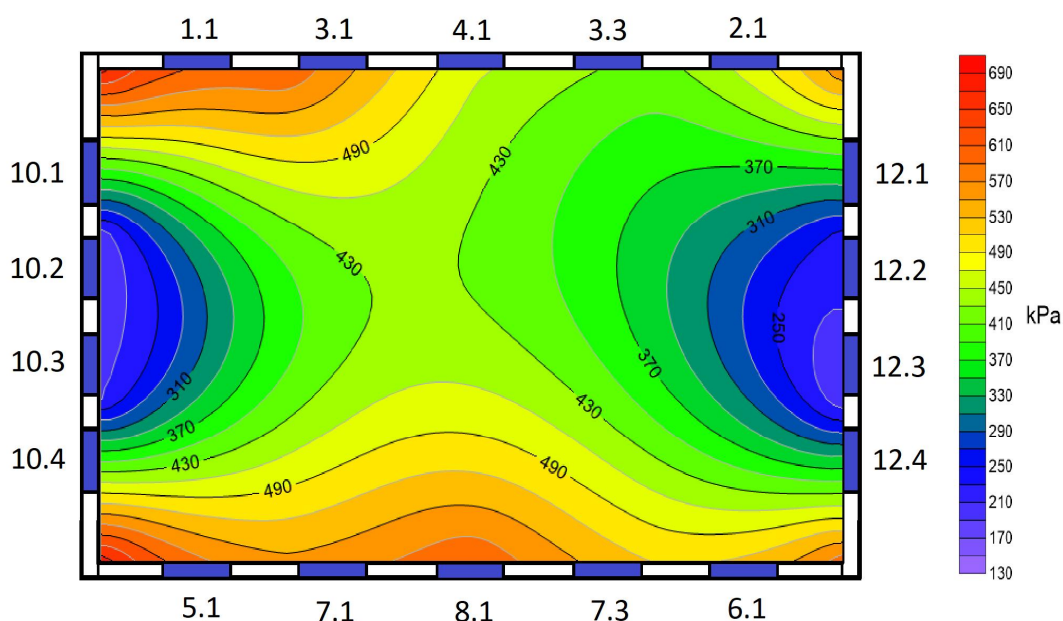
6-30. ábra: Homokos talaj mintatesten végzett Poisson-szerű tényező vizsgálat eredménye

A 6-30. ábra szemlélteti az egyes terhelési lépcsőkhöz tartozó számított Poisson-szerű tényezők aktuális értékét. A grafikon alapján követhető, hogy a vizsgált talajparaméter a kezdeti lépcsőknél növekszik, a hidrosztatikus fázist követően a minta a tengely irányú terhelések hatására további tömörödést szenved. A harmadik terhelési lépcsőt követően a harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező értéke állandó értéket vett fel. Ebből arra következtethetünk, hogy a hidrosztatikus fázisban nem történt meg a mintatest teljes tömörödése, s a deviátoros fázis kezdetén a tengely irányú további alakváltozás lehetséges volt.

A mérési eredmények rámutatnak arra is, hogy a minta konszolidálatlan állapotában is mérhető a Poisson-szerű tényező értéke, s a feltömörödő minta esetén ezt a talajtulajdonságot változó értéként kell kezelni. A konstans rugalmassági paraméterrel csak a teljes konszolidáció után számolhatunk, ennek eléréséig a harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező folyamatos növekedést mutat. A növekedés mértéke a talajban egyszerre jelen lévő rugalmas és képlékeny viselkedés egymáshoz viszonyított arányára is utalhat.

6.4.2 A harántkontrakciós tényező meghatározása speciális ödométerrel

A harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező másik, általam alkalmazott mérési lehetőségét a Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratórium és a Pedinfo Kft. által közösen fejlesztett, „Wireless Multisensor Pressure Measurement System”, WMPMS 16W/081 típusú, innovatív mérési eszköz adta. A 4.2 fejezetben részletesen bemutatott, nyomásmérő szenzorokkal ellátott ödométeres henger és a hozzá tartozó, szintén szenzoros aljzat- és nyomólap lehetővé teszi a mintatesten belüli feszültségeloszlás vizsgálatát. A konszolidálatlan talajok esetén a mintatesten belüli feszültségeloszlás egyenetlen, inhomogén, amit a mérések eredményei megerősítettek (6-31. ábra). A feszültségtér inhomogenitása a talajparaméterek (hézagtényező, rugalmasság, víztartalom, nyírószilárdság stb.) mintán belüli eloszlásának inhomogenitását sejtet, ami további vizsgálatokat kíván.



6-31. ábra: Ödométeres mérés során rögzített feszültségtér a talajmintán belül

6.4.2.1 A harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező ödométeres meghatározásának elméleti háttere

Ödométeres vizsgálatok esetén, amennyiben lehetőség van az oldalirányú, hengeres minta esetén radiális feszültségek mérésére, az egyszerűsített Hooke-törvényből kiindulva számítható a vizsgált talajra jellemző Poisson-tényező. Az ödométeres cella alkalmas arra, hogy laza, szinte ömlesztett, konszolidálatlan mintákon is elvégezhető legyen a kísérlet. Kiindulásként a Hooke-törvény x irányú fajlagos alakváltozásokra felírható formuláját (6.10) használhatjuk:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad 6.10$$

ahol ε_x az x irányú fajlagos alakváltozás, E a Young modulus, ν a Poisson-tényező, σ_x , σ_y , σ_z pedig az x, y és z irányú fő feszültségeket jelölik.

Ödométeres vizsgálat esetén az alábbi megállapításokat tehetjük (6.11):

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_r = 0 \quad 6.11$$

azaz a merevfalú hengerben végzett méréseknél csak tengelyirányú deformáció van, amit hengeres minta esetén ε_r , radiális alakváltozásként írhatunk le.

Az oldalirányú feszültségek esetében az alábbi egyszerűsítéssel élhetünk (6.12):

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_r \neq 0 \quad 6.12$$

azaz hengeres mintatestek esetén, feltételezve a tengelyszimetriát az oldalirányú feszültségek minden irányban egyenlőek, és σ_r radiális feszültségként adhatók meg, ami külső terhelés esetén nagyobb, mint zérus.

A Hooke-féle egyenlet így a következő formában írható fel (6.13):

$$0 = \sigma_r - \nu \cdot \sigma_r - \nu \cdot \sigma_z \quad 6.13$$

amiből következik, hogy átrendezés után a Poisson-tényező az alábbi formában (6.14) számítható:

$$\nu = \frac{\sigma_r}{\sigma_r + \sigma_z} \quad 6.14$$

A fenti összefüggés szerint, ha ismerjük a mintatestre ható radiális- valamint a tengely irányú feszültséget, a Poisson tényező értéke számítható. A Hooke-törvény használata bizonyos feltételekhez kötött (homogén, izotróp, rugalmas talajokra igaz, amelyek feszültség-alakváltozás görbéje lineáris), amelyek a laza, konszolidálatlan talajok esetén nem igazak.

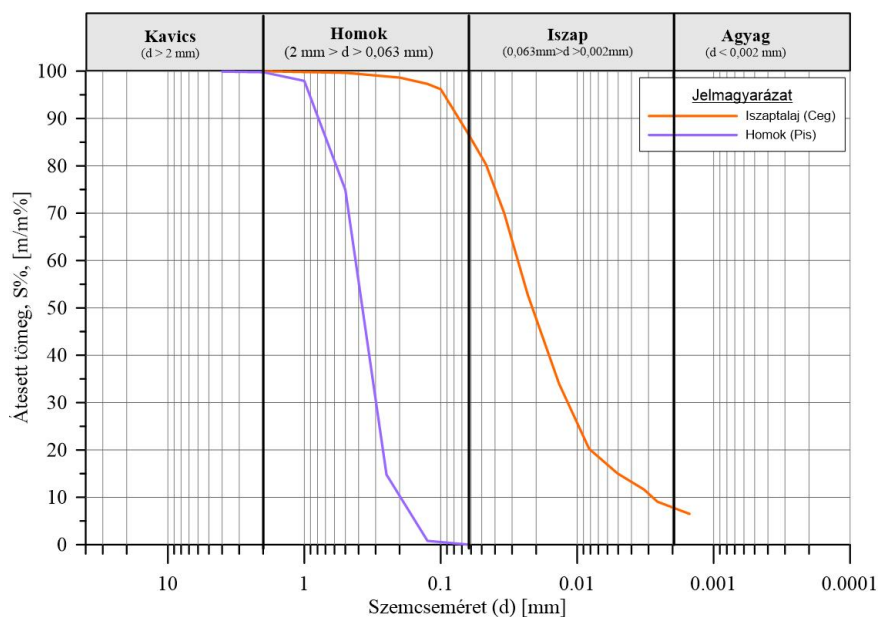
A talajban létrejövő feszültségtér felbontása esetén alkalmunk nyílik az egyenlet elemeinek előállítására. A laterális és tengely irányú feszültségkomponens szétválasztására a 4.2 fejezetben bemutatott oldal- és tengelyirányú szenzorokkal ellátott ödométeres mérőberendezést használtam. Az eszközzel mért adatokat a Golden Software Surfer szoftver segítségével dolgoztam fel.

6.4.2.2 A mérésorozat főbb jellemzői

A Poisson-tényező meghatározásához a 3.2 fejezetben ismertetett talajok helyett két további talajt használtam fel, amelyeknek a mérések előtt az azonosító vizsgálatait elvégeztem. Az eredményeket a 6-32. ábra tartalmazza. Az egyik egy tisztán homoktalaj, melynek minden szemcséje a homokfrakcióba esik, míg a második talaj egy iszaptalaj, melyben az iszap tartományba eső szemcsék részaránya közel 80%.

A homoktalaj esetén a várható viselkedés a konszolidáció gyors lezajlása, a homokokra jellemző magas szivárgási tényező miatt. A külső terhelés legnagyobb része a szemcseszerkezeten adódik át, a pórustérben jelenlévő folyadékban nyomása kis mértékben tud csak megnőni, mivel a potenciálkülönbség mozgási energiává alakulva a folyadékfázis kiáramlását okozza a pórustérből.

Az iszaptalaj esetén a korábbi, a talajok rugalmas és képlékeny viselkedését leíró vizsgálatok eredményei alapján időben elhúzódó konszolidációs folyamatra számíthatunk, mivel a finomszemcsés talajokra jellemző felületi aktivitás miatt a vírzecskék mozgása részben korlátozott. A vizsgálataim során használt terhelő függvények karakterisztikájából adódóan a konszolidációs folyamatok nem mennek végbe, ezért a magas iszap- és agyagtartalmú talajokat globálisan tudjuk jellemezni a Poisson-tényező szempontjából, mivel a rugalmas és képlékeny alakváltozások szétválasztására nincs mód.



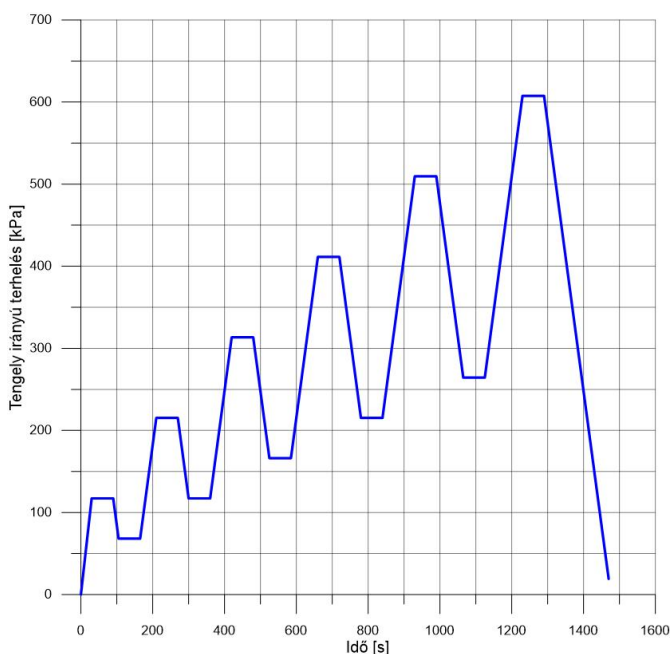
6-32. ábra: Ödométeres mérések során vizsgált talajok szemeloszlási görbéi

6.4.2.3 Az ödométeres vizsgálatok feszültségpályája

Ödométeres vizsgálatok esetén a mintatestet tengely irányban terheljük, miközben, mérjük a terhelő erőt, valamint a tengely irányú elmozdulásokat.

A nyomásszenzorokkal ellátott, speciális ödométer esetén nem a klasszikus konszolidációs görbe előállítása volt a cél, hanem a mintán belüli feszültségeloszlások alakulása a terhelés függvényében, valamint a feszültségmérés alapján talajparaméterek megállapítása, talajok viselkedésének összehasonlítása.

A vizsgálatok célja, olyan feszültségi viszonyok kialakítása, amelyek reprezentálják a talaj növekvő terhelésekre adott válaszát, szerepel bennük tehermentesítés a maradó feszültségek mérésére, valamint a konszolidálatlan talajjellemző megtartása érdekében a konszolidáció elhagyása, tehát rövid idejű terhelések alkalmazása. A beépített szenzorok mérési tartománya 800 kPa, így a vezérlőfüggvény kialakításánál a szenzorok védelme miatt a terhelések maximumát 600 kPa-ban határoztam meg. A felsorolt korlátozó tényezők és megfontolások alapján a vizsgálataimhoz a 6-33. ábrán vázolt, tengely irányú erő vezérelt függvényt határoztam meg.



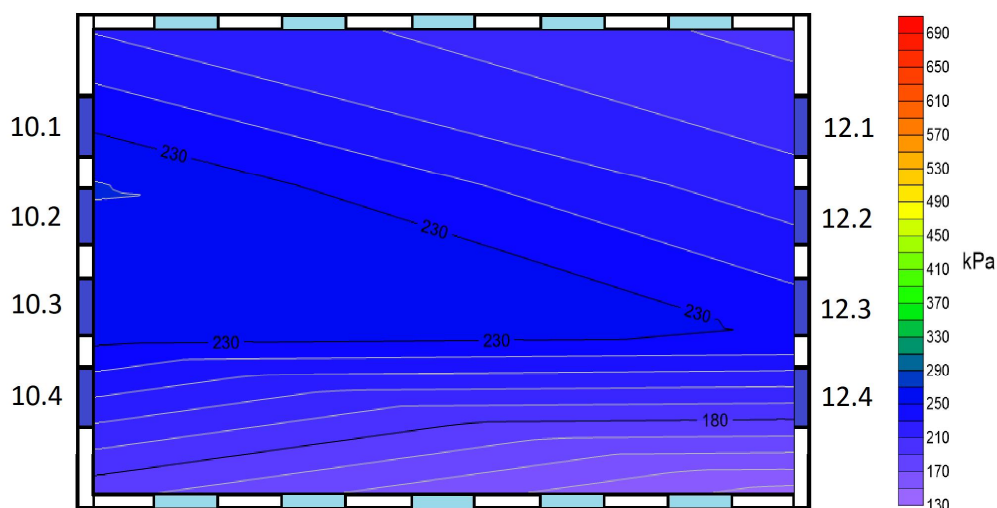
6-33. ábra: Az szenzoros ödométeres mérések során használt vezérlőfüggvény

A vezérlőfüggvény lehetővé teszi a talaj viselkedésének vizsgálatát konszolidálatlan (alul konszolidált), konszolidált és túlkonszolidált állapotban is. A görbe csúcspontjai a mindenkori maximális feszültségeket adják, míg a leszálló ágak a tehermentesülési állapotokat jellemzik.

Az alapján könnyű belátni, hogy a mérés folyamata dinamikus jellegű, ezt az eredmények értékelésénél figyelembe kell venni.

6.4.2.4 A radiális feszültségkomponens meghatározása

A szenzoros ödométeres mérések során rögzítettem a mintát körülvevő, 42 darab szenzor jeleit, amelyekből a kalibráló függvényeik segítségével a nyomás értéke meghatározható. A nyomásértékek alapján a mintatest felületén kialakuló feszültségeloszlás ábrázolható, valamint interpolációs eljárás segítségével különböző metszetekben meghatározható a mintatesten belüli feszültségeloszlás.



6-34. ábra: Ödométeres mérés során a mintán elül létrejövő laterális feszültségek eloszlása

A radiális feszültségszelvény meghatározásához az ödométeres cella oldalpalástjába épített nyomásmérő szenzorok méréseiből származó adatokat használtam fel. A 6-31. ábra alapján megállapítható, hogy a mintatesten belüli feszültségeloszlása jó közelítéssel tengelyszimmetrikus.

A 6-34. ábra a homoktalaj maximális terhelésénél (600 kPa) rögzített oldalirányú feszültségi állapotot mutatja be. A metszet előállításához a Golden Software Surfer, interpolációs eljárásai közül a háromszögelésen alapuló lineáris interpolációs módszert használtam.

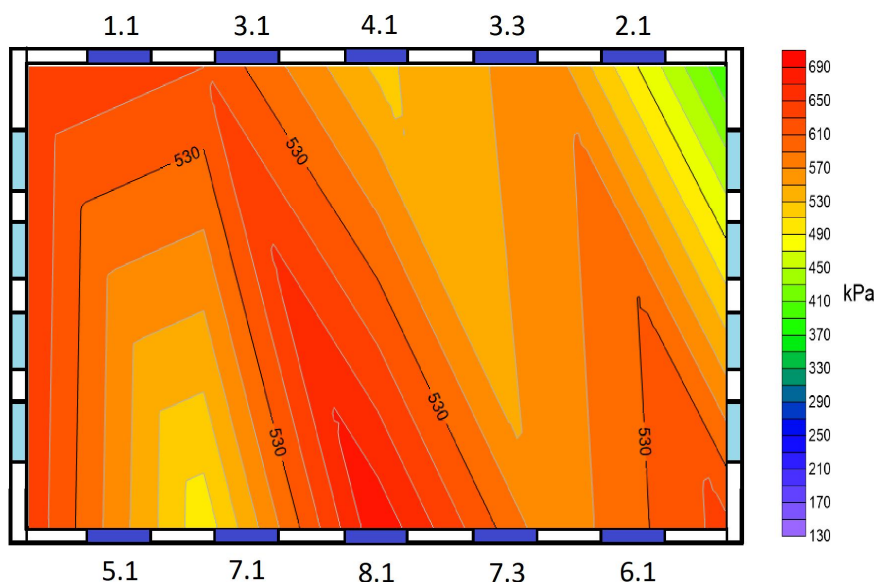
Az interpolációnál figyelni kell arra, hogy a két mérési pont közötti szakaszon a számított nyomásértékek minél inkább tükrözzék a valódi állapotokat, ezért a számítási algoritmusoknál 2-es anizotrópiát állítottam be, aminek eredményeképp a szoftver a szemben fekvő szenzorok mért értékei alapján tölti fel a köztes részt, így létrehozható a kiválasztott keresztmetszetben uralkodó, laterális feszültségek eloszlása.

6.4.2.5 A tengelyirányú feszültségek meghatározása

A mintán belüli tengelyirányú feszültségek eloszlásának vizsgálata szintén egy szelvény kijelölésével történt. A későbbi számítások érdekében - habár a tengelyszimmetria megengedné - a

laterális feszültség szelvényére illeszkedő, a nyomólapban és az aljzatban elhelyezett megfelelő szenzorok mért értékeit használtam.

A háromszögelésen alapuló, lineáris interpoláció során függőlegesen torzítást (anizotrópia = 0,5) hajtottam végre a köztes adatok kiszámításához, így a belső térre vonatkozó nyomásértékek számítása az egymással szemben lévő szenzorok jeleiből történik.



6-35. ábra: Ödométeres mérés során a mintán elül létrejövő tengely irányú feszültségek eloszlása

A 6-35. ábra a 6.4.2.2 fejezetben bemutatott homoktalaj maximális terhelésénél (600 kPa) rögzített, tengely irányú feszültségek eloszlását mutatja.

6.4.2.6 A Poisson-tényező meghatározása

A 6.4.2.4 és a 6.4.2.5 fejezetben ismertetett interpolációs eljárásokkal létrehozott radiális és axiális feszültségeloszlási mátrixokat a homoktalaj (Pis) tekintetében három különböző nedvességtartalom mellett, háromszori ismétlésben végeztem el.

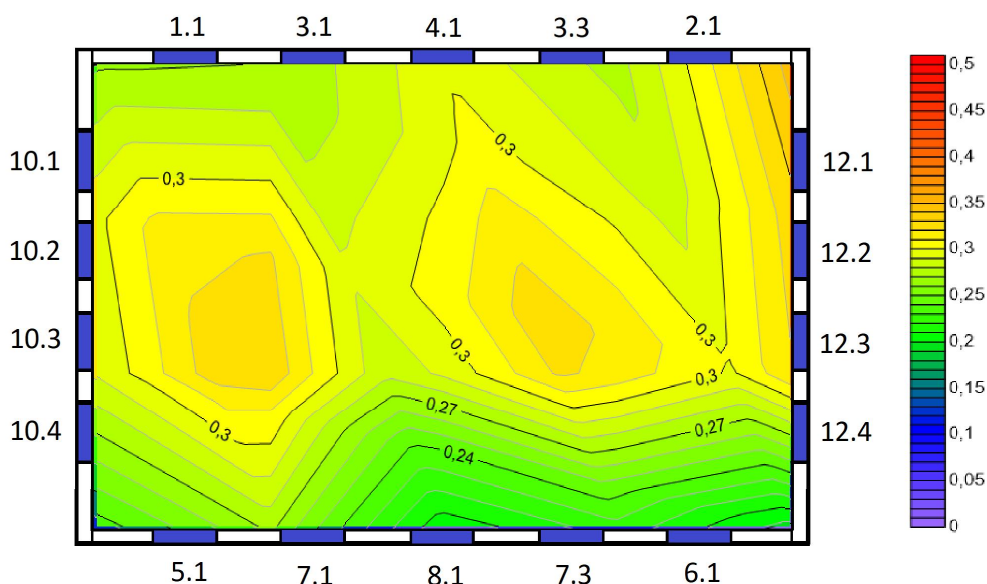
A lineáris interpolációkkal minden minta esetén a terhelési maximum és terhelési minimum pontokban egy 81 x 49-es felbontású eloszlás mátrixot generáltam. Egy kiválasztott szelvényben a feszültségeloszlást így közel 4000 számított pont segítségével tudtam jellemezni. A 6.4.2.1 fejezetben levezetett összefüggés alapján, a Golden Software Surfer program matematikai moduljának segítségével mátrixműveleteket hajtottam végre. A

$$\nu = \frac{\sigma_r}{\sigma_r + \sigma_z} \quad 6.15$$

egyenlet (6.15) számlálójában szereplő σ_r feszültségértéket a számított radiális feszültség mátrixal helyettesíttem, míg a nevezőben lévő σ_z -t az előállított axiális feszültségeloszlás mátrixával adtam meg.

Az így kapott eredmény mátrix a harántkontrakciós (Poisson) tényezővel analóg módon létrehozott feszültségarányt mutatja, amely a laterális feszültségeknek az összefeszüléshez viszonyított arányával egyenlő.

A számítások eredményeképp a 6-36. ábra szerinti eloszlásképeket kaptam, ami jól tükrözi a laterális és összefeszülés arányának inhomogenitását is. A számított eredmények a Poisson-tényező értelmezési tartományán belüli szórást mutatnak. Az ábra alapján megállapítható, hogy a magasabb harántkontrakciós értékek a minta övonalában, középen helyezkednek el, míg a véglapoknál alacsonyabb értékek tapasztalhatók.



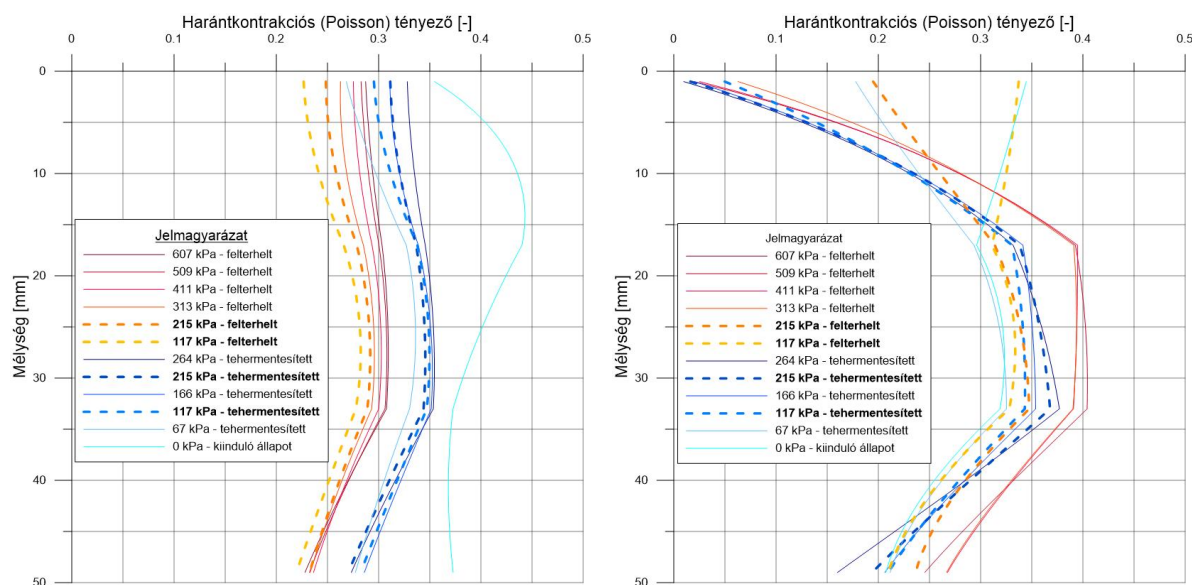
6-36. ábra: Harántkontrakciós (Poisson) tényező eloszlása egy homokmintán belül, ödométeres mérés során

6.4.2.7 A harántkorrekciós (Poisson) tényező mintatesten belüli eloszlása

A harántkontrakciós tényező vizsgálatai közelebb visznek a laza, konszolidálatlan talajmintán belüli folyamatok jobb megértéséhez. A minta keresztmetszetére számított horizontális és vertikális feszültségeloszlásból számolt harántkontrakciós tényező értékeit mátrix formában elemeztem. A mátrix elemei a talaj keresztmetszeti síkjának egyes pontjaiban számított harántkontrakciós tényezők voltak. A 81 oszlopból és 49 sorból álló mátrixok az adatok elemzéséhez megfelelő felbontást biztosítottak.

A Franciaországból származó homoktalaj és a ceglédi iszaptalajjal végzett kísérletek eredményeit a 6-37. ábra foglalja össze. Az ábrákon egy-egy komplett mérés eredményét mutatom be, amelyek tartalmazzák a vizsgált terhelési fázisokat, a kezdeti (laza) állapotban számítható

harántkontrakció eloszlással, valamint a hat felterhelési és az öt tehermentesítési szakaszra vonatkozó eredményekkel. A felterhelési szakaszokat piros, míg a tehermentesítési fázisokat kék árnyalatokkal jelöltem a jó elkülöníthetőség érdekében. Szaggatott, vastagított vonallal emeltem ki az azonos nyomásértékhez tartozó, viszont különböző terhelési periódusban (felterhelés vagy tehermentesítés) mért értékeket, amelyek között a lényegi különbség a talaj terhelési történet, ugyanis a felterhelési szakaszban a talaj még nem „élt át” nagyobb terhelést, lazának, tömörítetlennek tekinthető, képlékeny alakváltozást szenved. Ezzel szemben a tehermentesítés esetén a talaj túlnyomórészt rugalmas viselkedést mutat, mivel túltömörített (túlkonzolidált) állapotba kerül.



6-37. ábra: Harántkontrakciós tényező mintán belüli eloszlása homoktalaj (bal oldal) (Pis) és iszaptalaj (jobb oldal.) (Ceg) vizsgálati alapján

A homokos talaj vizsgálati eredményei alapján jól elkülöníthetők egymástól a felterhelés során számított harántkontrakciós tényezők görbéi a tehermentesítésnél mértektől. Két, közel párhuzamosan futó, a minta övonalánál növekvő görbesereg különíthető el. A kiinduló állapot görbéje különbözik, aminek az oka a mintabeépítés során a tömörítéssel a talajba vitt feszültség. A homoktalajokra jellemző rugalmas viselkedés jól magyarázza a harántkontrakciós tényező 6-37. ábrán (bal) látható eloszlását.

A finomszemcsék arányának növekedésével, az iszaptalaj esetén a mérési eredmények nagyobb differenciát mutatnak a mintatest felső és alsó részén. Az alacsony harántkontrakciós tényező értékek a nyomólap, valamint a talp és a minta közti súrlódás által redukált radiális feszültségekkel magyarázhatóak.

7 TÉZISEK

1. Tézis

Laza konszolidálatlan talajok triaxiális vizsgálataival igazoltam, hogy a CAM-CLAY anyagtörvény kiterjeszhető konszolidálatlan laza talajokra, de ebben az esetben a korábban állandónak gondolt paraméterek változókká válnak, az $\ln(p)$ -e vonatkoztatási rendszerben lineáris tulajdonságok pedig magasabb fokú függvényekkel írhatóak le, aminek konszolidált talajokra vonatkozó része egyenes. A vizsgált talajok rugalmassági paramétereinek (κ) terheléstől függő változására függvénykapcsolatokat írtam fel.

2. Tézis

Triaxiális laborvizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy a CAM-CLAY anyagtörvény rugalmassági paramétere (κ) konszolidálatlan talajok esetén nem állandó érték, függ a talaj típusától, aktuális terhelésétől és nedvességtartalmától is, ezek alapján függvénykapcsolatot írtam fel, ami bemeneti paraméterként alapjai lehetnek a konszolidálatlan talajok modellezési feladatainak. Az eredmények jóságát varianciaanalízissel bizonyítottam.

3. Tézis

Triaxiális terhelési körülmények között végzett háromdimenziós konszolidációs vizsgálatokkal jellemezni tudtam laza, konszolidálatlan talajok képlékeny alakváltozását a CAM-CLAY anyagtörvény képlékenységet leíró (λ) paraméterének segítségével. Az eredmények alapján függvénykapcsolatot írtam fel laza mezőgazdasági talajok tömörödési folyamatainak jellemzésére a talaj típusa, nedvességtartalma valamint a külső terhelések függvényében. Ezáltal bizonyítottam a konszolidált talajok jellemzésére fejlesztett CAM-CLAY anyagtörvény alkalmazhatóságát konszolidálatlan talajok képlékenységi tulajdonságainak jellemzésére.

4. Tézis

Az MTV07-GG nagyméretű nyíróberendezéssel, nagyméretű mintatesteken (400x400x300 mm) végzett direkt nyíróvizsgálatokkal bizonyítottam, hogy laza talajok esetén a többlépcsős, kvázi-roncsolásmentes vizsgálat alkalmas laza, konszolidálatlan talajok nyírószilárdsági paramétereinek pontos meghatározására. Megállapítottam, hogy a laza talajok kohézió értéke előtömörödöttség függő.

5. Tézis

Kidolgoztam a laza talajok harántkontrakciós tényezőjének nyomásszenzorokkal ellátott, speciális ödométeres hengerrel történő meghatározásának módszerét. A végzett kísérletek alapján megállapítottam, hogy a talajokban tengelyirányú terhelés hatására bekövetkező harántkontrakciós (Poisson-szerű) tényező mintán belüli eloszlása inhomogén. Megállapítottam továbbá, hogy a harántkontrakciós tényező nem állandó érték laza, konszolidálatlan talajok tekintetében annak mértéke függ az aktuális terhelési állapottól és a terhelési előtörténetétől is.

8 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkám során a talajmechanika egy eddig kevésbé kutatott területével, a laza, konszolidálatlan talajok talajmechanikájával foglalkoztam. A téma aktualitását elsősorban a terepen mozgó járművek járószerkezete és a talaj között kialakuló kölcsönhatások vizsgálata adta, de - szisztematikus módszerfejlesztéssel - eredményeim alapján egyéb, laza, kis konszolidáltsági fokú anyagok (hulladékok, pernyék, mezőgazdasági termények, stb.) viselkedésének megértését is segíthetik.

Értekezésem elkészítéséhez a Miskolci Egyetem, Geotechnikai Talajvizsgáló Laboratóriumának eszközeit használtam. A laboratórium mellett, hogy oktatási és kutatási feladatokat is ellát, jelentős fejlesztési munkát is végez. Kutatómunkám során többször is bebizonyosodott, hogy a laza, konszolidálatlan talajok esetén a hagyományos talajmechanikai laborvizsgálatok nem, vagy csak korlátozottan alkalmazhatóak. Ezért kutatómunkám jelentős részét az eszközfejlesztések és azok tesztelése is jelentette.

A szenzoros méréstechnika, a triaxiális rendszer átalakítása (nagy méretű térfogatomérő és szenzortechnika), a nagyméretű nyíróberendezés és a feszültségmérőkkel ellátott ödométeres mérőberendezés mind a laza talajok talajtulajdonságainak pontosabb meghatározását segítették elő. Ezek az innovatív mérőberendezések részét képezhetik a következő évek talajkutatásainak is.

Kutatómunkám során a talajok alapvető tulajdonságainak (rugalmas-képlékeny viselkedés, nyírószilárdsági paraméterek) vizsgálatát végeztem el, valamint olyan anyagtvörvényt vizsgáltam (Cam-Clay), amely alkalmasnak mutatkozott laza talajok viselkedésének leírására is. A vizsgálatok során kiderült, hogy az eredetileg telített puha agyagokra kifejlesztett Cam-Clay anyagmodell paraméterei alkalmasak laza talajok viselkedésének leírására is. A Cam-Clay anyagtvörvény kiterjeszthető konszolidálatlan laza talajokra, de ebben az esetben a korábban állandónak gondolt paraméterek változókká válnak, az $\ln(p)$ -e vonatkoztatási rendszerben lineáris tulajdonságok pedig magasabb fokú függvényekkel írhatóak le, aminek konszolidált talajokra vonatkozó része egyenes.

A vizsgálatba bevont talajok rugalmas viselkedésének leírására a Cam-Clay anyagmodell által meghatározott κ paramétert használtam. A triaxiális mérések eredményei alapján megállítottam, hogy a rugalmassági paraméter konszolidálatlan talajok esetén nem állandó érték, függ a talaj típusától, aktuális terhelésétől és nedvességtartalmától is, ezek alapján függvénykapcsolatot írtam fel, ami bemeneti paraméterként alapjai lehetnek a konszolidálatlan talajok modellezési feladatainak.

Nagyméretű, egyedi fejlesztésű nyíróberendezés segítségével, laza mezőgazdasági jellegű talajokon kísérletsorozatot végeztem. A laza konszolidálatlan állapotot rövid ideig tartó, alacsony tömörítő feszültséggel értem el. Ennek eredményeként az elvégzett mérések eredményei rávilágítottak arra, hogy a feltömörödés során a kohézió értéke nem állandó, függ a talaj konszolidáltsági fokától. Kis

tömörségek mellett a Mohr-Coulomb-féle meghatározási móddal negatív kohézió volt mérhető, ami hosszabb előtömörítés hatására pozitívvá vált.

Értekezésemben külön fejezetben foglalkoztam egy igen fontos, bár talajok esetén nehezen mérhető talajparaméter, a Poisson-tényező, vagy más néven harántkontrakciós tényező meghatározásával. Laza konszolidálatlan talajok esetén a vizsgálatok még bonyolultabbá válnak. Kidolgoztam a laza talajok harántkontrakciós tényezőjének nyomásszenzorokkal ellátott, speciális ödométeres hengerrel történő meghatározásának módszerét. A végzett kísérletek alapján megállapítottam, hogy a talajokban tengelyirányú terhelés hatására bekövetkező harántkontrakciós (Poisson-) tényező mintán belüli eloszlása inhomogén. Megállapítottam továbbá, hogy a harántkontrakciós tényező nem állandó érték laza, konszolidálatlan talajok tekintetében annak mértéke függ az aktuális terhelési állapottól és a terhelési előtörténettől is.

A kifejlesztett eszközök és módszerek stabil eredményeket hoztak, s alapjai lehetnek a talajmechanika további fejlődésének. A talaj külső terhelésekre adott válaszreakcióinak ismerete elengedhetetlen az abroncsfejlesztés, a precíziós gazdálkodás, a talajkímélő mezőgazdasági eszközök és módszerek fejlesztésében. A laboratóriumi módszerek a kezdeti lépését jelenthetik még pontosabb és hatékonyabb modellek megalkotásához, amelyek segítségével – a dinamikus fejlődő számítástechnikai eszközök bevonása mellett – a terepen végbemenő folyamatok előre jelezhetőek.

Az általam vizsgált nyomásszenzoros mérés technika betekintést nyújthat a talajokon belül végbemenő folyamatokba, s segítheti a talajon belüli mechanikai folyamat jobb megértését. Dolgozatomban a harántkontrakciós (Poisson-) tényező meghatározásánál és a nagyméretű nyíróberendezés esetén a mintatesten belüli feszültségeloszlásának bemutatásához alkalmaztam nyomásmérő szenzorokat, de egyéb – talajmechanikai mérési eszközbe is beépíthetőek lehetnek.

A nagyméretű nyíróberendezés tekintetében továbbfejlesztési irány lehet a jelenleg meglévő szenzoros mérőegység szoftveres fejlesztése, melynek eredményeként nyomon követhetővé válna a nagyméretű (350x350x300 mm) mintatesteken belüli feszültségterek változásának valós idejű (real-time) nyomon követése és az eredmények alapján egy beavatkozási protokoll beépítése.

9 SUMMARY

During my research I dealt with a less researched field of soil mechanics, the soil mechanics of loose, unconsolidated soils. The topicality of the subject was mainly the investigation of the interaction between the running gear of the vehicles on the ground and the soil, but my results can also help to understand the behaviour of other loose materials with low consolidation (waste, fly ash, agricultural crops etc.).

For the preparation of my dissertation I used the tools of the Geotechnical Soil Testing Laboratory of the University of Miskolc. In addition to teaching and research, the laboratory is also undertaking significant development work. In the course of my research it has been proved several times that in loose, unconsolidated soils traditional soil mechanical laboratory tests are not applicable or only to a limited extent. Therefore, a significant part of my research work was devoted to device development and testing.

Sensoric measurement techniques, triaxial system modifications (large volumetric and sensor technology), large shear equipment and the oedometric device with tension gauges all contributed to a more accurate determination of loose soil properties. These innovative measuring apparatuses could also be part of the soil research of the coming years.

During my research I investigated the basic properties of soils (elastic-ductile behaviour, shear strength parameters), as well as the material law (Cam-Clay), which was also suitable for describing the behaviour of loose soils. During the investigations it was found that the parameters of the Cam-Clay material model originally developed for saturated soft clays are suitable for describing the behaviour of loose soils. The Cam-Clay material law can be extended to unconsolidated loose soils, but in this case the previously considered parameters become variables, and in the $\ln(p)$ -e reference system linear properties can be described by higher degree functions, of which the consolidated part is straight.

I used the κ parameter determined by the Cam-Clay model to describe the elastic behaviour of the soils. Based on the results of the triaxial measurements, it was found that the elasticity parameter in unconsolidated soils is not a constant value, it depends on the soil type, the actual load and the moisture content. Based on these, I wrote a function relation, which can serve as a basis for modelling tasks of unconsolidated soils.

With the help of large, individually developed shear equipment, I carried out a series of experiments on loose agricultural soils. I reached the loose unconsolidated state with a short, low compression voltage. As a result, the results of the measurements carried out revealed that the value of cohesion during the compaction is not constant, depends on the degree of soil consolidation. At low densities, the Mohr-Coulomb detection method measured negative cohesion, which became positive with longer pre-compression.

In my dissertation, I dealt with the determination of a very important, but hardly measurable soil parameter, the Poisson factor, also known as transverse contraction factor, in a separate chapter. For loose unconsolidated soils, the tests become more complicated. I developed a method for the determination of the transverse contraction coefficient of loose soils using a special oedometric device equipped with pressure sensors. Based on the results of the experiments it was found that the distribution of transverse contraction (Poisson) factor in the soil under axial load is inhomogeneous. I also found that the transverse contraction factor is not a constant value for loose, unconsolidated soils, depending on the actual load condition and load history.

The tools and methods developed have yielded stable results and can serve as a basis for further development of soil mechanics. Knowledge of the soil's response to external pressures is essential for tire development, precision farming, and the development of soil-friendly agricultural tools and methods. Laboratory methods can be the first step in creating more accurate and effective models that can predict field processes while incorporating dynamically evolving computing tools.

The pressure sensing measurement technique that I investigate can provide insight into the processes taking place within the soil and help to better understand the mechanical flow within the soil. In my dissertation I used pressure gauges to determine the transverse contraction (Poisson) factor and to show the stress distribution within the specimen in the case of large shear devices, but they can also be incorporated into other soil mechanical measuring devices.

With regard to large shear equipment, the software development of the existing sensing unit could be further developed, as a result of which it would be possible to monitor the real-time changes in the voltage fields of large (350x350x300 mm) specimens and incorporate an intervention protocol.

10 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondok Dr. Kovács Balázsnak, témavezetőmnek, aki lehetőséget biztosított számomra, hogy egy nemzetközi kutatócsopathoz csatlakozhassak és segítőkész támogatásával egyengette utam a disszertáció elkészültéig.

Köszönöm az Agrotechnikai Kutatócsoport megálmodóinak, Kriston Sándornak és Dr. Sárközi Lászlónak, akiktől megtanulhattam a kutatómunka iránti alázatot... emléküket örökké őrizni fogom. Hálával tartozom Dr. Mikita Viktória kolléganőmnek, az adatok kiértékelésében nyújtott segítségével és a munkával együtt töltött évekért. Köszönet a Michelin munkatársainak, akikkel együtt dolgozhattam és azon ipari partnereknek is, akik szaktudásukkal segítettek az eszközök fejlesztését.

Köszönetet mondok Dr. Szabó Imre professzor úrnak, aki egyetemi tanulmányaim alatt konzultálta TDK tevékenységemet és diplomamunkámat. Doktori dolgozatom elkészítése során mindvégig számíthattam önzetlen segítségére és kritikai észrevételeire, amelyek jobbá tették dolgozatomat.

Köszönöm Prof. Dr. Szűcs Péternek, hogy a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola hallgatója lehettem és a Környezetgazdálkodási Intézet igazgatójának Dr. Madarász Tamásnak, hogy támogatott értekezésem megírásában az intézeti háttér biztosításával.

Köszönetet mondok a Környezetgazdálkodási Intézet minden jelenlegi és volt munkatársának, hogy számíthattam segítségükre és támogatásukra. Külön köszönet azon kollégáimnak és egyben barátaimnak, akiket a disszertáció megírása során kérdéseimmal bombázhattam.

Köszönöm Családomnak és Páromnak, hogy mindvégig bíztak bennem és a legnehezebb időszakokban is szerető támogatásukkal és gondoskodásukkal segítettek.

Köszönöm a támogató projekteknek:

„A kutatómunka a Miskolc Egyetemen Műszaki Földtudományi Karának GINOP-2.3.2-15-2016-00031 jelű „Innovatív megoldások a felszín alatti vízkészletek fenntartható hasznosítása érdekében” című projektjének részeként - a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.”

„A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.,

11 IRODALOMJEGYZÉK

1. AGNOLETTI, M, ÉS MTSAL. „Land-use change impacts on floods – Challenges and opportunities for future research.” *Water Resour Res* 53. 2017.
2. ALAOUI, ABDALLAH, ÉS ETIENNE DISERENS. „Mapping soil compaction – A review.” *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018. May 31.
3. ALTHOFF, SEBASTIAN. „Nutzung gering tragfähiger Böden.” *Doktorarbeit*. Freiberg: Institut für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg , 2015.
4. BARANYAI, F, ÉS MTSAL. *Melióráció – öntözés és tápanyaggazdálkodás, Útmutató a nagyméretarányú talajtérképezés végrehajtásához*. Budapest: Agroinform, 1987.
5. BARÁTH, C, A ITTÉZS, ÉS G UGRÓSDY. *Biometria*. Budapest: Mezőgazda Kiadó, 1996.
6. BATEY, T. „, Soil compaction and soil management – a review.” *Soil Use and Manag.* 2009.
7. BIRKÁS, M, MJOLÁNKAI, ÉS R SCHMIDT. „Environmentally-sound adaptable tillage—solutions from Hungary.” *In Proceedings of the 1st Scientific Agronomic Days*. 2008.
8. BIRKÁS, MÁRTA, T SZALAI, CS. GYURICZA, M. JOLÁNKAI, ÉS M. GECSE. „Subsoil compaction problems in Hungary.” *Subsoil compaction, Distribution processes and Consequences, Advances in Geoecology*. Catena Verlag, Reiskirche, Germany, 2000.
9. BOUSSINESQ, J. *Application des Poteneiels a l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*. Paris, France, 1885.
10. BRAJA, M. DAS. *Advanced Soil Mechanics*. New York: Taylor & Francis, 2008.
11. BRUS, DJ, ÉS JJH VAN DEN AKKER. „How serious a problem in subsoil compaction in the Netherlands?” *Soil*. 2018.
12. CÍSLEROVÁ, M., ÉS J. VOTRUBOVÁ. „CT derived porosity distribution and flow domains.” *Journal of Hydrology*. Elsevier pp. 186-200, 2002.
13. DONOVÁL, KRISZTINA, ÉS DÓRA LÉVAI. *Telítetlen talajparaméterek pontos meghatározása*. Tudományos Diákköri dolgozat, Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2013.
14. ESTAIR, JOSE, ÉS MARIA SANTANA. „Large direct shear tests performed with fresh ballast.” *www.researchgate.net*. 2018. 02.
15. FERREIRA, CSS, ÉS MTSAL. „Spatiotemporal variability of hydrologic soil properties and the implications for overland flow and land management in a peri-urban Mediterranean catchment.” *Journal of Hydrogeology*. 2015.

16. FREDLUND, MURRAY D., WARD G. WILSON, ÉS DELWYN G. FREDLUND. „Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve.” *Canadian Geotechnical Journal* 39, 2002: 1103-1117.
17. GOLDEN SOFTWARE. „Surfer.” *Help menü*. 2015.
18. GONDA, NÓRA, TAMÁS KÁNTOR, ÉS ÁGNES MAKÓ. „Laboratóriumi sorozatmérések hatása talajok állékonysági paramétereire: Műszaki Földtudományok Közlemények.” *PUBLICATIONS OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC SERIES A-MINING* 83, 2012: 71-80.
19. HENCHER, STEVE. *Practical engineering geology*. Abingdon, Oxon: Spon Press, 2012.
20. HORN, R. „Soil Compaction and Consequences of Soil Deformation on Changes in Soil Functions.” *Soil Matters – Solutions Under Foot*. 2015.
21. JONES, R, G SPOOR, ÉS A THOMASSON. „Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary.” *Soil Till. Res.* 2003.
22. KÁNTOR, TAMÁS. „Kommunális hulladéklerakókon bekövetkezett halálos balesetek áttekintése.” *Tudományos Diákköri Konferencia, Miskolc*. Miskolc: Miskolci Egyetem közleménye, 2006.
23. KÁNTOR, TAMÁS. „Nagyméretű nyíródoboz és a hozzá tartozó többlépcsős nyírási metódus fejlesztése.” *PUBLICATIONS OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC SERIES A-MINING* 81., 2011: 369-374.
24. KÁNTOR, TAMÁS. „Talajok széles terhelési tartományon végzett nyíróvizsgálatai.” *Doktoranduszok Fóruma*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2009.
25. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Developing of an innovative large-scale shearing machine and conclusions of first measurements.” In *Geotechnical Engineering: New Horizons*, szerző: F.B. J. Barends, R. B. J. Bredeveld, M Brinkgreve, L. A. Korff és van Paassen, 267-272. Rotterdam: Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers Conference Rotterdam 2011, 2011.
26. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Investigation of stress distribution during large scale shearing test.” *GEOSCIENCES AND ENGINEERING A Publication of the University of Miskolc* 1, 2012: 93-98.
27. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Laza, konszolidálatlan talajok direkt nyíróvizsgálatai nagyméretű nyíróberendezéssel.” *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika* , 2010.
28. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Nagyméretű nyíródoboz és a hozzá tartozó többlépcsős nyírási metódus.” *Publications Of The University Of Miskolc Series A-Mining* 81, 2011: 369-374.

29. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS VIKTÓRIA MIKITA. „Investigation of unconsolidated soft soils with innovated large scale shearing machine.” *Spring Wind 2010 = Tavaszi Szél, 2010*. Pécs: Doktoranduszok Országos Szövetsége, 2010. 216-223.
30. KÁNTOR, TAMÁS, SÁNDOR KRISTON, ÉS IMRE CZINKOTA. „The evolution of stress field in loose, agricultural soils.” *Talajtani Vándorgyűlés*. Budapest, 2009.
31. KÁNTOR, TAMÁS, VIKTÓRIA MIKITA, BALÁZS KOVÁCS, ÉS ISTVÁN SZÉKELY. „Investigation of the elasto-plastic behaviour of different agricultural soils with Modified Cam-Clay constitutive law.” *Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Sapientia EMTE*. Kolozsvár: Ábel Kiadó, 2019. 150-155.
32. KELLNER, E, ÉS J HUBBART. „Agricultural and forested land use impacts on floodplain shallow groundwater temperature regime.” *Hydrol Process*. 2016.
33. KÉZDI, ÁRPÁD. *Földművek*. Budapest: Tankönyvkiadó Vállalat, 1980.
34. KÉZDI, ÁRPÁD. *Talajmechanika I*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1972.
35. KÉZDI, ÁRPÁD. *Talajmechanikai praktikum*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1976.
36. KISS, ZSOLT PÉTER. „Mezőgazdasági gumibroncsok talajfizikai hatásainak vizsgálata.” *Doktori (PhD.) értekezés*. Debreceni Egyetem, Agrártudományi Centrum, Növénytermesztési és Kertészeti Tudományok Doktori Iskola, 2002.
37. KOVÁCS, BALÁZS. „Innovatív megoldások a környezetvédelmi célú, numerikus hidro- és mérnökgeológiai modellek pontosságának növelésére.” *Habilitációs téziszfüzet*. Szeged: Szegedi Tudományegyetem, 2019.
38. KOVÁCS, BALÁZS, ÉS JÁNOS SZANYI. *Hidrodinamikai és transzportmodellezés (Processing MODFLOW és Surfer for Windows környezetben) II.* . Miskolc: Gáma-Geo Kft., 2005.
39. KOVÁCS, BALÁZS, SÁNDOR KRISTON, TAMÁS KÁNTOR, VIKTÓRIA MIKITA, ÉS LÁSZLÓ SÁRKÖZI. „Triaxial testing of Nyírtelek sand, Megyaszó sandy loam and taktaharkány clay agricultural soils to determine Cam-Clay parameters.” University of Miskolc: Research Group of Agrogeotechnics, 2008.
40. LAIB, LAJOS. *Terepen mozgó járművek*. Budapest: Szaktudás Kiadó Ház, 2002.
41. LAL, R. „Soils and food sufficiency, a review.” *Agron Sustain Dev*. 2009.
42. MIKITA, VIKTÓRIA. „Tomográfias képdiagnosztikai vizsgálatok hidro- és mérnökgeológiai célú alkalmazási lehetőségei.” *Doktori (PhD) értekezés*. Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola, 2013.

43. MITCHELL, J.K., ÉS K. SOGA. *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2005.
44. MOUAZEN, AM, H RAMON, ÉS J DE BAERDEMAEKER. „On-line detection of soil compaction distribution based on finite element modelling procedure.” *In: Proceedings of the 3rd European Conference of Precision Agriculture (vol. 1)*. 2001.
45. MSZ14043-3:1979. „Talajmechanikai vizsgálatok. Szemeloszlás meghatározása.” *Szabvány*. 1979.
46. MSZ14043-4:1980. „Talajmechanikai vizsgálatok. Konzisztenciahatárok.” *Szabvány*. 1980.
47. MSZ14043-7:1981. „Talajmechanikai vizsgálatok. A talajok tömöríthetőségének és tömörségének vizsgálata.” *Szabvány*. 1982.
48. MSZE CEN ISO/TS 17892-1:2004. „Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata. 1. rész: A víztartalom meghatározása.” *Szabvány*. 2006.
49. MSZE CEN ISO/TS 17892-10:2004. „Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata, 10. rész: Közvetlen nyíróvizsgálat.” *Szabvány*. 2010.
50. MSZE CEN ISO/TS 17892-5:2004. „Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata, 5. rész: Ödométeres vizsgálat lépcsőzetes terheléssel.” *Szabvány*. 2010.
51. MSZE-CEN-ISO/TS-17892-12:2004. „Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata, 12. rész: Az Atterberg-határok meghatározása.” *Szabvány*. 2006.
52. MSZE-CEN-ISO/TS-17892-4:2004. „Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata, 4. rész: A szemeloszlás meghatározása.” *Szabvány*. 2006.
53. NEMES, ATTILA, H WÖSTEN, ÉS M. G. SCHAAP. „Functional Evaluation of Pedotransfer Functions Derived from Different Scales.” *Soil Science Society of America Journal* , 2003: 1093-1102.
54. PUNETHA, PIYUSH, PIYUSH MOHANTY, ÉS SAMANTA MANOJIT. „Study on Interface Shear Strength of Soil-geosynthetics in Large Direct Shear Box.” *6th Asian Regional Conference on Geosynthetics*. New Delhi, 2016.
55. ROSCOE, K. H., A. N. SCHOFIELD, ÉS C. P. WROTH. „On the Yielding of Soils.” *Geotechnique*, 1958: 22-53.
56. ROSCOE, K. H., ÉS J.B. BURLAND. „On the generalised stress-strain behaviour of ‘wet’ clay.” *Cambridge Univ. Press*, 1968: 535-609.
57. ROWE, R. KERRY. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, Volume 1*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2001.

58. RUTHERFORD, A. *ANOVA and ANCOVA A GLM approach*. Hoboken, New: John Wiley and Sons, 2011.
59. SÁRKÖZI, LÁSZLÓ, SÁNDOR KRISTON, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Experimental and Numerical Investigation of Soft Unsaturated Soils.” 2007.
60. SCHEFFÉ, H. *The analysis of variance*. New York: John Wiley and Sons, 1967.
61. SINÓROS-SZABÓ, BOTOND. „Talajfizikai és művelésenergetikai kölcsönhatások.” *Akadémiai Doktori értekezés*. Nyíregyháza, 1992.
62. SÖHNE, W. „Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres.” *Agricultural Engineering*, 1958: 276-281.
63. STEFANOVITS, PÁL. „Soil degradation in Hungary.” *Soil Resilience and Sustainable Sand Use*. 1994.
64. STEFANOVITS, PÁL, GYÖRGY FILEP, ÉS GYÖRGY FÜLEKY. *Talajtan*. Budapest: Mezőgazda Kiadó, 1999.
65. SZABÓ, IMRE. *Hulladékelhelyezés*. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, 1999.
66. SZABÓ, IMRE, ÉS ATTILA SZABÓ. *Hulladéklerakók rekultivációja, utógondozása*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2012.
67. SZABÓ, IMRE, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Lassú felszínmozgások vizsgálata a miskolci Avas dombon.” *A Bányamérnöki Kar Tudományos eredményei*, 1992: 281-286.
68. SZABOLCS, I., K DARAB, J.-NÉ FÓRIZS, GY. FÖLDVÁRI, F. JASSÓ, ÉS GY. VÁRALLYAY. *A genetikus üzemi talajterképezés módszerkönyve*. Budapest: OMMI, 1966.
69. SZEGI, TAMÁS. „Ásványi és szerves adalékanyagok hatása a nyírségi.” *Doktori értekezés*. Gödöllő: Környezettudományi Doktori Iskola, 2009.
70. SZEPESHÁZI, RÓBERT. „A HS-talajmodell.” https://se.sze.hu/images/ngb_se005_1/SZR_TKI.pdf, 2007.
71. SZEPESHÁZI, RÓBERT. „Cölöpalapok méretezése az Eurocode 7 követelményei szerint.” *doktori (PhD) értekezés*. Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 2011. február.
72. SZEPESHÁZI, RÓBERT. *Geotechnika*. Győr: Széchenyi István Egyetem, egyetemi jegyzet, 2008.
73. SZÜCS, ÉS KLÉH. *A Nyírség talajviszonyai, Agrokémia és Talajtan*. 1954.
74. TAMÁS, PÉTER, ATTILA BOJTOS, ANNAMÁRIA DÉCSEI-PARÓCZAI, ÉS RÓBERT TAMÁS FEKETE. *Végelem módszerek*. www.tankonyvtar.hu: Digitális Tankönyvtár, 2014.

75. TAMÁSKOVICS (JUN.), NORBERT, ÉS NORBERT TAMÁSKOVICS (SEN.). Eljárás többlépcsős nyírókísérletre (Methode für Scherversuche mit mehreren Stufen). Magyarország Szabadalom száma: PO800568. 2008.
76. TAMÁSKOVICS, NORBERT. „Experimentelle Untersuchung des Verbundverhaltens von Geokunststoffen.” *11. Informations- und Vortragstagung der Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)*. München, 2009. 1-6.
77. TOMPAI, ZOLTÁN. „Földművek és kötőanyag nélküli alaprétegek teherbírásának és tömörségének ellenőrzése könnyű ejtősúlyos módszerekkel.” *PhD értekezés*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2008.
78. VAN-CAMP, L, ÉS MTSAL. „Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection.” *EUR 21319 EN/3. Office for Official Publications of the European Communities*. 2004.
79. VARGA, GABRIELLA. „Hulladéklerakók állékonysági kérdései.” *PhD értekezés*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2010.
80. VÁSÁRHELYI, BALÁZS. *Az alkalmazott kőzetmechanika alapjai*. Budapest: Hantken Kiadó, 2016.
81. ZÁVOTI, J. *Matematikai statisztikai elemzések 5., Kapcsolatvizsgálat: asszociáció*. Magyarország: Nyugat-magyarországi Egyetem, 2010.
82. ZHIJUN, HE, MO HAIQIANG, A SIGA, ÉS ZOU JINGFENG. „Research on the parameters of nonlinear hyperbolic model for clay-geogrid interfaces based on large scale direct shear tests.” *Transportation Geotechnics*, 2019: 39-45.

12 A TÉMÁBAN MEGJELENT FONTOSABB TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEIM

1. GONDA, NÓRA, TAMÁS KÁNTOR, ÉS ÁGNES MAKÓ. „Laboratóriumi sorozatmérések hatása talajok állékonysági paramétereire: Műszaki Földtudományok Közlemények.” *PUBLICATIONS OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC SERIES A-MINING 83*, 2012: 71-80.
2. KÁNTOR, TAMÁS. „Kommunális hulladéklerakókon bekövetkezett halálos balesetek áttekintése.” *Tudományos Diákköri Konferencia, Miskolc*. Miskolc: Miskolci Egyetem közleménye, 2006.
3. KÁNTOR, TAMÁS. „Nagyméretű nyíródoboz és a hozzá tartozó többlépcsős nyírási metódus fejlesztése.” *PUBLICATIONS OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC SERIES A-MINING 81.*, 2011: 369-374.
4. KÁNTOR TAMÁS. „Talajok széles terhelési tartományon végzett nyíróvizsgálatai.” *Doktoranduszok Fóruma*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2009.
5. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Developing of an innovative large-scale shearing machine and conclusions of first measurements.” In *Geotechnical Engineering: New Horizons*, szerző: F.B. J. Barends, R. B. J. Bredevelde, M Brinkgreve, L. A. Korff és van Paassen, 267-272. Rotterdam: Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers Conference Rotterdam 2011, 2011.
6. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Investigation of stress distribution during large scale shearing test.” *GEOSCIENCES AND ENGINEERING A Publication of the University of Miskolc 1*, 2012: 93-98.
7. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Laza, konszolidálatlan talajok nyíróvizsgálatai nagyméretű nyíróberendezéssel.” In *Mérnökgeológia - Kőzetmechanika 2010*, szerző: Ákos Török és Balázs Vásárhelyi, 113-122. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2010.
8. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS BALÁZS KOVÁCS. „Nagyméretű nyíródoboz és a hozzá tartozó többlépcsős nyírási metódus.” *Publications Of The University Of Miskolc Series A-Mining 81*, 2011: 369-374.
9. KÁNTOR, TAMÁS, ÉS VIKTÓRIA MIKITA. „Investigation of unconsolidated soft soils with innovated large scale shearing machine.” *Spring Wind 2010 = Tavaszi Szél, 2010*. Pécs: Doktoranduszok Országos Szövetsége, 2010. 216-223.
10. KÁNTOR, TAMÁS, SÁNDOR KRISTON, ÉS IMRE CZINKOTA. „The evolution of stress field in loose, agricultural soils.” *Talajtani Vándorgyűlés*. Budapest, 2009.

11. **KÁNTOR, TAMÁS**, VIKTÓRIA MIKITA, BALÁZS KOVÁCS, ÉS ISTVÁN SZÉKELY. „Investigation of the elasto-plastic behaviour of different agricultural soils with Modified Cam-Clay constitutive law.” *Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Sapientia EMTE*. Kolozsvár: Ábel Kiadó, 2019. 150-155.
12. KOVÁCS, BALÁZS, LÁSZLÓ SÁRKÖZI, SÁNDOR KRISTON, VIKTÓRIA MIKITA, ÉS **KÁNTOR TAMÁS**. „Soil mechanical behaviour of soft unconsolidated soils.” *Miskolci Egyetem*. Miskolc, 2007. 195-207.
13. KOVÁCS, BALÁZS, SÁNDOR KRISTON, **TAMÁS KÁNTOR**, VIKTÓRIA MIKITA, ÉS LÁSZLÓ SÁRKÖZI. „Triaxial testing of Nyírtelek sand, Megyaszó sandy loam and taktaharkány clay agricultural soils to determine Cam-Clay parameters.” University of Miskolc: Research Group of Agrotechnics, 2008.
14. KOVÁCS, BALÁZS, VIKTÓRIA MIKITA, **TAMÁS KÁNTOR**, ÉS SÁNDOR KRISTON. „Compaction behaviour of loose, agricultural soils of different clay content.” *Advance Clay Confernece*. Budapest, 2009.
15. KRISTON, SÁNDOR, BALÁZS KOVÁCS, **TAMÁS KÁNTOR**, ÉS VIKTÓRIA MIKITA. „Evolution of stress fields during standard geotechnical tests in loose agricultural soils.” *microCAD 2009, A szekció : XXIII. International Scientific Conference*. Miskolc, 2009. 25-30.
16. KRISTON, SÁNDOR, BALÁZS KOVÁCS, **TAMÁS KÁNTOR**, ÉS VIKTÓRIA MIKITA. „The evolution of stress field in loose, agricultural soils.” *Cereal Researc Communications*, 2009: 391-394.
17. MIKITA, VIKTÓRIA, SÁNDOR KRISTON, **TAMÁS KÁNTOR**, BALÁZS KOVÁCS, ÉS ENDRE DOBOS. „Modelling of soil compaction and saturation distribution of loose agricultural soils by penetrometer.” *Növénytermelés* 60, 2011: 203-206.