



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

2021. november 24.

A talaj nedvességtartalmának és nyírószilárdságának kapcsolata

Relationship between Soil Moisture Content and Shear Strength

Készítette: Böröczky András, D7EDEU
Gépészmérnök MSc, Nappali tagozat
Gödöllő

Témavezető: Prof. Dr. Kiss Péter, egyetemi tanár, MATE
Dr. Pillinger György, egyetemi adjunktus, MATE



AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-21-2 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT



Gödöllő

2021.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés, célkitűzés	3
2.	A talajnedvesség és a nyírószilárdság értelmezése.....	4
2.1.	A talaj nedvességtartalmának értelmezése	4
2.1.1.	Volumetrikus nedvességtartalom	5
2.1.2.	Gravimetrikus nedvességtartalom	7
2.1.3.	Talajnedvesség-potenciál, pF érték	8
2.1.4.	A talaj-víz kapcsolat	9
2.2.	A talajok szilárdsága	10
2.2.1.	A talajok nyírószilárdsága	11
2.2.2.	Talaj nyírószilárdságának meghatározása nyíródobozzal	15
2.2.3.	A nyírószilárdság és a tolóerő kapcsolata.....	16
3.	A talaj nedvességtartalmának és nyírószilárdságának kapcsolata	19
3.1.	Mérés bemutatása, mérési terv	19
3.1.1.	Mérőeszközök rövid bemutatása	20
3.1.1.1.	ELE 26-2112/01 Digitális talajnyíró készülék.....	20
3.1.1.2.	Labor szárítószekrény	21
3.1.1.3.	Bizerba GE 2000-68 mérleg	22
3.1.1.4.	Sartorius MA 30 nedvességmérő	23
3.1.2.	Talajminta előkészítése.....	24
3.1.3.	Nyírási diagramok meghatározása.....	27
3.2.	Mérési eredmények ismertetése	28

3.2.1.	Nedvességmérés eredményei.....	33
3.2.2.	Légszáraz állapot	33
3.2.3.	I. nedvesítés	36
3.2.4.	II. nedvesítés	37
3.2.5.	III. nedvesítés.....	39
3.2.6.	IV. nedvesítés	41
3.3.	A kohézió és a belső súrlódási szög nedvességtartalom függése.....	43
3.4.	A mérés szöveges értékelése	44
4.	Összefoglalás	46
	Irodalomjegyzék	47

1. Bevezetés, célkitűzés

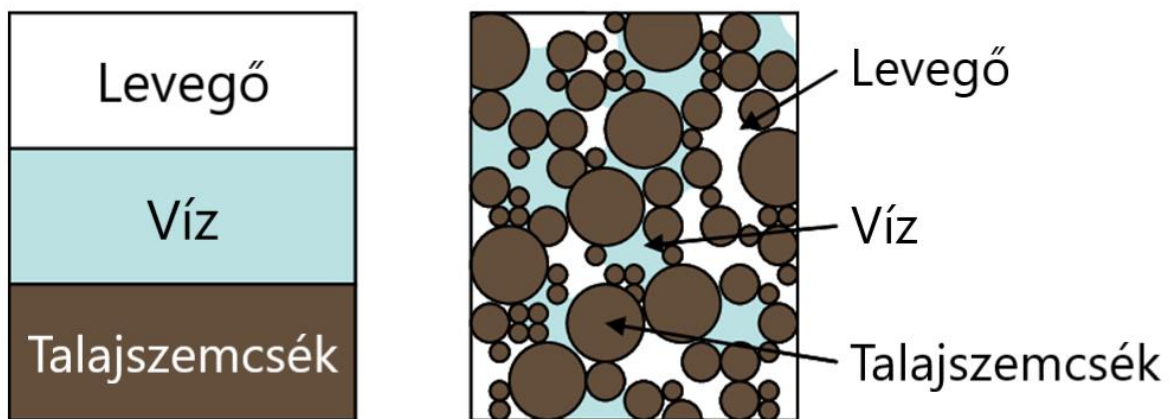
A talajjal, mint természeti erőforrással több tudományterület is foglalkozik. Az agrártudományok elsősorban a talaj biológiai-kémiai összetételét, termőképességét vizsgálják, amely rendkívül összetett és nehéz feladat. Az építéstudományok és a járműtechnika a talajok mechanikai jellemzőire fókuszál, amely szintén komplex megközelítést kíván a kutatóktól. A két esetet azonban nem lehet szétválasztani egymástól, hiszen a talajok fizikai, kémiai és biológiai paraméterei együttesen határozzák meg a talajok tulajdonságait, melyek időben is változhatnak. Ebből adódóan bármiféle talajokkal kapcsolatos vizsgálat fontos elemét képezi a vizsgálati célnak megfelelő modell kidolgozása. Jelen tanulmány a talajok mechanikai tulajdonságával, azon belül is a nyírószilárdságnak és a nedvességtartalomnak a kapcsolatával foglalkozik.

A talajmechanika által megkülönböztetett két alapvető tulajdonsága a talajoknak a nyomószilárdság és a nyírószilárdság. E két fogalom ekvivalens a klasszikus mechanikában megismert fogalmakkal. Nyomószilárdság alatt a normál irányú igénybevételekkel (jellemzően nyomás) szembeni ellenálló képességet értjük, amely a különböző építmények, járművek süllyedését befolyásolja. A nyírószilárdság a nyíróigénybevételekkel szembeni ellenálló képességét mutatja meg a vizsgált talajnak. Amennyiben a nyírófeszültség eléri és meghaladja a nyírószilárdság értékét, talajtörés keletkezik. A terepen mozgó járművek esetében a nyírószilárdság szoros összefüggésben áll a létrehozható maximális tolóerő értékével, így a talajra átvihető nyomatékkal (vontatási teljesítménnyel) is. Ebből adódóan a motorteljesítmények növelése a járászerkezetekben történő módosításokkal kell, hogy járjon a nyíróigénybevételek csökkentésének érdekében. Jó példa erre a lánctalpas, gumihevederes járászerkezet, melyet széles körben alkalmaznak terepen mozgó járművek esetében.

Munkám célja, hogy ismertessem a talajok mechanikai tulajdonságaival és nedvességtartalmával kapcsolatos definíciókat és ismereteket, valamint, hogy egy rövid áttekintést adjak a nyírószilárdság és a nedvességtartalom mérésére használatos eszközökről. Céлом továbbá, hogy alapkutatóként laboratóriumi méréseket végezzek egy ELE 26-2112/01 digitális nyírókészülékkel. A méréseket különböző nedvességtartalmak és normálirányú terhelések mellett végeztem el egy laza szerkezetű homoktalaj felhasználásával, amely előzetesen átesett egy komplex vizsgálaton is. A mérési eredményekből meghatározhatóak a Mohr-féle feszültségi körök és a Coulomb egyenesek, melynek segítségével a minta belső súrlódási szöge és kohéziója számszerűsíthető.

2. A talajnedvesség és a nyírószilárdság értelmezése

A vizsgálati szempont függvényében a talajnak, mint fogalomnak számos magyarázata létezik. Általánosságban a földkéreg legkülső, laza és termékeny rétegét szokás talajnak nevezni. Más leírások ezt kiegészítik azzal, hogy a talaj egy szilárd, folyékony és gáz fázisokból felépülő összetett heterogén rendszer. A szilárd fázist a talajalkotó kőzet, valamint egyéb szerves és szervetlen anyagok adják. A gáz fázist általában levegőként szoktuk azonosítani, a folyékony fázist pedig vízként. A három fázis térfogatának aránya számos talajfizikai tényezőt meghatároz.



1. ábra A talaj keresztmetszetének illusztrációja

2.1. A talaj nedvességtartalmának értelmezése

A talajok nedvességtartalma alatt a talajban található víz mennyiségét értjük. Az értékét többféleképpen ki tudjuk fejezni, a gyakorlatban leggyakrabban a gravimetrikus és a volumetrikus nedvességtartalmat szokták használni. Meg kell említeni az agráriumban előszeretettel használt pF-értéket is, amely a talajszemcsék és a folyadékfázis között kialakuló kötőerők mértékeként került bevezetésre.

2.1.1. Volumetrikus nedvességtartalom

Volumetrikus nedvességtartalom (VWC – *Volumetric Water Content*) vizsgálata során a talajban található víz térfogatának és a talajminta össztérfogatának arányát mérjük.

$$\theta = 100 \cdot \frac{V_{\text{víz}}}{V_{\text{talaj}}} \left[\frac{V}{V} \% \right] \quad (1)$$

ahol θ a volumetrikus nedvességtartalom

A volumetrikus nedvességtartalom értékét hossz mértékben kifejezve is megadhatjuk. Ezalatt az egységnyi magasságú, állandó alapterületű talajrétegben található talajvíz térfogatának megfelelő vízréteg magasságát értjük. Amennyiben $\theta = 20 \%$, az 1 m magas talajrétegben 20 cm vízrétegnek megfelelő térfogatú víz található.

A volumetrikus nedvességtartalmat leggyorsabban valamilyen elektromágneses elven működő talajszenzorral mérhetjük meg. Ezen eszközök a gyakorlat számára megfelelő pontosságú adatokat szolgáltatnak, a mérési tartományuk viszont korlátozott, kutatásokhoz nem használhatóak. Számos típus áll rendelkezésünkre, melyeket két nagy csoportba tudunk sorolni. Megkülönböztetünk TDR (*Time Domain Reflectometry*) és kapacitív szenzorokat, melyek minden esetben indirekt mérést tesznek lehetővé. A műszerek által mért jellemző a talaj dielektromos állandója, amely szoros összefüggésben áll a nedvességtartalommal. A talajt, mint összetett rendszert a már bemutatott 3 fázisra bonthatjuk fel. A szilárd fázist azonban tovább oszthatjuk szerves anyagokra és talajásványokra. A talajra vonatkozó permittivitást (ε_t) az építőelemek térfogataránya, és azok egyenkénti dielektromos állandója határozza meg [1]. *Topp* kutatásai szerint:

$$\varepsilon_t^b = \varepsilon_{tá}^b V_{tá} + \varepsilon_l^b V_l + \varepsilon_v^b \theta + \varepsilon_{sza}^b V_{sza} + \varepsilon_j^b V_j \quad (2)$$

Amelyből a volumetrikus nedvességtartalmat kifejezve a (3) egyenletet kapjuk:

$$\theta = \frac{1}{\varepsilon_v^{0.5}} \varepsilon_t^{0.5} - \frac{(\varepsilon_{tá}^{0.5} V_{tá} + \varepsilon_l^{0.5} V_l + \varepsilon_{sza}^{0.5} V_{sza} + \varepsilon_j^{0.5} V_j)}{\varepsilon_v^{0.5}} \quad (3)$$

ahol:

$\varepsilon_{v, t, \text{t}\acute{a}, l, \text{sza}, j}$ - a vízre, talajra, talaj ásványokra, szerves anyagra és a jégre vonatkozó relatív dielektromos állandó [-]

$V_{\text{t}\acute{a}, l, \text{sza}, j}$ - a talaj ásványok, levegő, szerves anyag és jég egységre vonatkoztatott térfogatrésze [-]

θ - a talaj volumetrikus nedvességtartalma $\left[\frac{V}{V} \%\right]$

b - konstans, értéke $\sim 0,5$ [-]

Az alábbi táblázat a talaj építőelemeinek dielektromos állandóit mutatja be:

1. táblázat Talaj építőelemeinek relatív dielektromos állandói

Anyag	Relatív dielektromos állandó [-]
Vákuum	~ 1
Levegő	1,0006
Talaj ásványok	$\sim 3-7$
Szerves anyag	$\sim 2-5$
Jég	~ 5
Víz (20 °C)	~ 80

A táblázatban jól látható, hogy a vizsgált anyagok közül a víz dielektromos állandója a legnagyobb, értéke többszöröse az egyéb alkotók permittivitásának. Ebből következik, hogy a dielektromos állandó változása legfőbb mértékben a talajnedvesség megváltozásának köszönhető. Ki kell emelni azonban, hogy a víz dielektromos állandója a hőmérséklet függvényében jelentősen változik. Közös tulajdonsága az elektromágneses elven működő talajnedvesség-mérő eszközöknek, hogy érzékenyek a talajban található légrésekre, a hőmérsékletre, továbbá a talaj sótartalma is zavarja a mérés pontosságát. A mérési hibák talajspecifikus kalibrációs görbék használatával, és a megfelelő mérési frekvencia kiválasztásával csökkenthetők.

A TDR eljárás az idő mérésén alapszik. A mérőeszköz kettő vagy három párhuzamos tűskével rendelkezik, melyek biztosítják a kapcsolatot a talajjal. A műszer által kibocsátott, meghatározott frekvenciájú elektromágneses hullám a tűskéken át a talajba jut, majd

visszaverődve, a mérőáramkör segítségével detektálásra kerül. A kibocsátott impulzus ismert hosszon halad, így a reflektálódás időtartamából kiszámítható a hullám terjedési sebessége a talajban. A vákuumban mért terjedési sebességhez képesti lassulás összefüggésben van a talaj dielektromos állandójával, így a volumetrikus nedvességtartalmával is. [2]

$$K_a = \frac{c^2 \cdot t^2}{L^2} \quad (4)$$

ahol:

K_a – a talaj látszólagos relatív dielektromos állandója [-]

c – a fény terjedési sebessége vákuumban [m/s]

t – a rádió frekvenciás jel visszatérési ideje [s]

L – az elektróda hossza [m]



2. ábra FieldScout TDR-300 talajnedvesség-mérő [21]

2.1.2. Gravimetrikus nedvességtartalom

Gravimetrikus nedvességtartalom számításánál a talajban található víz tömegének a szilárd fázisokhoz való arányát vizsgáljuk. Ennek megfelelően:

$$w = 100 \cdot \frac{m_{nedves} - m_{száraz}}{m_{száraz}} \left[\frac{m}{m} \% \right] \quad (5)$$

ahol w a gravimetrikus nedvességtartalom.

Gravimetrikus talajnedvességet legpontosabban szárítószekrényes eljárással mérhetünk, melynek menete az MSZ-08-0205:1978 jelzetű szabványban rögzített. Az eljárás lényege, hogy a nedves talajból vett mintát ismert tömegű edénybe tesszük, majd lemérjük egy tized g pontosságú mérlegen. Ezután szárítószekrénybe helyezzük, ahol $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on súlyállandóságig szárítjuk (20-25 óra). A szárítás befejeztével a mintát exsikkátorba helyezzük, majd kihűlés után az abszolút száraz talajt tartalmazó edényt ismét lemérjük, és az (5) egyenletbe behelyettesítve megkapjuk a gravimetrikus nedvességtartalmat. [3]

Előnye a mérésnek, hogy a teljes nedvességtartalomban használható, nem érzékeny a hőmérsékletre és a sótartalomra. Pontos méréseket lehet vele végrehajtani, kalibrációs standardnak tekinthető. Hátrányként említhető, hogy a mérés munkaigényes, és nem ismételhető, hiszen talajmintavétel szükséges hozzá (a mérés destruktív). Az eljárás nem teszi lehetővé a folyamatos adatrögzítést. [4]

A volumetrikus és a gravimetrikus nedvességtartalom átszámítható egymásba az alábbi képlettel:

$$w = \rho_t \cdot \theta \quad (6)$$

ahol ρ_t a talaj térfogattömege. – $[\text{kg}/\text{m}^3]$

2.1.3. Talajnedvesség-potenciál, pF érték

A nedvességpotenciál nem közvetlenül a talajban található víz mennyiségére, hanem az energiaállapotára utaló mennyiség. Ennek megfelelően talajnedvesség-potenciál alatt a talaj folyadék fázisának a talajvíz szintjéhez vagy más – önkényesen választható – referenciaponthoz viszonyítva kifejezett fajlagos energiáját értjük. A szuperpozíció törvénye alapján az összpotenciált felbonthatjuk részpotenciálok összegére.

$$\psi_{\text{ö}} = \psi_g + \psi_m + \psi_p + \psi_o \quad (7)$$

ahol:

$\psi_{\text{ö},m,p,o}$ – az össz-, gravitációs-, mátrix-, nyomás-, ozmózispotenciál $[\text{J}]$

A gravitációs potenciál a gravitációs erőterben ható erők következtében alakul ki. A mátrixpotenciál a talaj kapilláris rendszerében működő erők hatását fejezi ki, a nyomáspotenciál hidrosztatikai nyomásból adódik, míg az ozmózis nyomás a talajvíz inhomogenitásából adódó koncentráció különbség következménye. A mezőgazdasági gyakorlatban a potenciálból adódó kötőerők nagyságát, azaz a talajban található víz energia állapotát érdemes vizsgálni, ugyanis ez a növények által felvehető víz mennyiségére utal. A kötőerők kifejezésére a vízoszlop-centiméterben kifejezett szívóerő 10-es alapú logaritmusát, azaz a pF értéket használjuk *Schofield* javaslatára. [5]

A talajban mutakozó szívóerő mérésére kifejlesztett eszköz a tenziométer, amely egy porózus anyagú, vízzel töltött kerámiacsészéből, és egy hozzákapcsolt manométerből áll. A kerámiacsésze úgy van kialakítva, hogy a levegő számára impermeábilis, viszont a víz számára permeábilis legyen. A mérés megkezdésekor a csészét buborékmentesen fel kell tölteni desztillált vízzel, majd a kívánt mélységben el kell helyezni. A talaj szilárd fázisa által létrehozott tenzió következtében a víz a csészéből kifelé áramlik, ezzel vákuumot képezve a belső térben. Amint a nedvességtartalom egyensúlya beáll, a szivárgás megszűnik, ekkor a manométer rögzíti a létrejövő nyomásállapotot.

2.1.4. A talaj-víz kapcsolat

A talajt mechanikai szempontból egy porózus anyagnak tekinthetjük, amely kapillárisokkal van átszőve. Ennek megfelelően a vizet molekuláris és kapilláris adszorpció útján tudja tárolni. Abszolút száraz talaj nedvesítése során a dipólus vízmolekulák a kolloid részecskék felületéhez tapadnak, ezt a réteget nevezzük BET (*Brunauer-Emmett-Teller*) rétegnek. A legbelső rétegek kötődnek a legnagyobb erővel a szilárd szemcsékhez, majd kifelé haladva a kötés erőssége egyre gyengül. A pórusokban található vizekre a molekuláris adszorpción kívül a kapilláris erők is hatnak a felületi feszültség miatt. A folyadék felszíne homorú lesz, amely felett negatív értékű kapilláris nyomás alakul ki, melynek értéke fordítottan arányos a kapilláris sugarával. [6] A pórusokban, a homorú vízfelszín felett kialakuló relatív gőznyomást a (8) képlettel számíthatjuk.

$$\varphi = \frac{P_g}{P_s} = e^{\frac{2\sigma\rho_g}{P_s\rho_v r}} [-] \quad (8)$$

ahol:

P_s – a telített gőz nyomása a szabad vízfelszín felett [Pa]

P_g – a vízgőz nyomása a kapillárisban [Pa]

ρ_v – a víz sűrűsége [kg/m³]

ρ_g – a vízgőz sűrűsége a kapillárisban [kg/m³]

r – a kapilláris sugara [m]

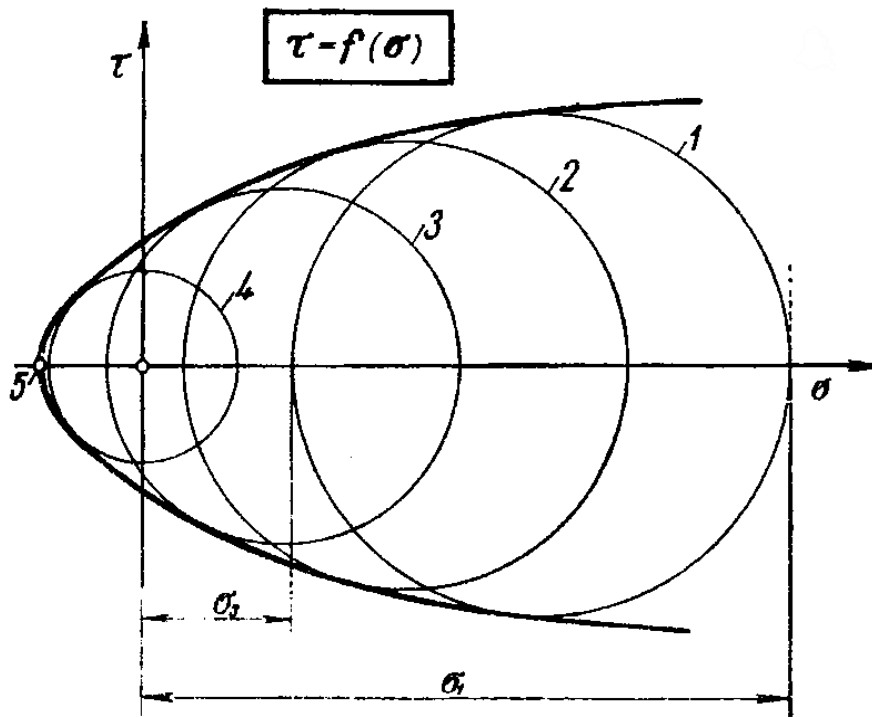
Amennyiben a környezet relatív páratartalma nagyobb, mint a pórusokban kialakuló relatív gőznyomás, a parciális nyomáskülönbségek hatására a levegőből a talajba diffundál a víz. Minden esetben kialakul egy egyensúlyi nedvességtartalom a vizsgált talajrétegben, amelyet egy szorpció izoterma jellemez a külső levegő páratartalmának függvényében. [7]

2.2. A talajok szilárdsága

A talaj viszkoelaszto-plasztikus anyagnak tekinthető. A viszkoelasztikus tulajdonságoknak köszönhetően a feszültség-nyúlás karakterisztika hiszterézis görbét vesz fel, de a plasztikus tulajdonságok miatt a vizsgált anyagban maradó alakváltozások következnek be. A viszkoplasztikus viselkedés pedig a feszültség-deformáció összefüggés terhelési sebességtől való függését írja le. Ezen tulajdonságok pontos leírását csak nem-lineáris reológiai modellek segítségével tudjuk megtenni, viszont az így kapott differenciál-egyenleteket a legtöbb esetben csak numerikus módszerekkel tudjuk megoldani. Célszerű tehát olyan egyszerűsítéseket bevezetni, melyek segítségével elfogadható pontosságú analitikus megoldásokat kapunk. [6]

2.2.1. A talajok nyírószilárdsága

A talajok nyírószilárdságán a nyírófeszültségekkel szemben tanúsított legnagyobb ellenállását értjük. Amennyiben a külső erőhatások ezt a belső ellenállást meghaladják, törés következik be. A külső erők által létrehozott feszültségállapot számítására a klasszikus mechanikából ismert Mohr-féle elmélet használható. Ennek segítségével a mérnöki gyakorlatban elfogadható pontossággal tudjuk elvégezni a szilárdsági számításokat. A Mohr-féle elmélet kimondja, hogy ha különböző, törést előidéző feszültségállapothoz tartozó főfeszültségi köröket egy τ - σ koordináta-rendszerben ábrázoljuk, akkor az így kapott köröknek közös burkológörbéje van, melynek alakja és nagysága a vizsgált anyag tulajdonságától függ. [8]



3. ábra Mohr-féle feszültségi körök és a körök burkolója [9]

A talajmechanikában a Mohr-féle törési elmélet Coulomb szerinti egyszerűsítése terjedt el széles körben, amely a főfeszültségi körök burkológörbáját egyenessel közelíti. A normál (σ) és tangenciális (τ) irányú feszültségek között felírható a (9) összefüggés.

$$\tau = \sigma \cdot tg\phi + c \quad (9)$$

ahol:

$tg\phi$ – a súrlódási tényező [-]

c – a kohézió [Pa]

A (9) egyenlet szerint tehát a nyírószilárdság két tagból tevődik össze. A normálfeszültségtől független kohézióból, melynek értéke a $\sigma = 0$ normálterhelés melletti nyírószilárdság értékét adja meg, valamint a talaj belső súrlódásából. A kohéziót a talajszemcsék érintkezőfelületei között kialakuló filmréteg idézi elő. A kolloidszemcsék és az azt körülvevő hidratburok között erős adhéziós kötés alakul ki, míg az érintkezési felületek mentén összenyomódó filmrétegek között kohéziós erők lépnek fel. A kohézió mértékét elsősorban a talajszemcsék mérete határozza meg. Nagy talajszemcsék (pl.: durva homok, kavics) esetén az érintkező felület mérete csökken, így a filmrétegben kialakuló nyomások nőnek. Ennek következtében a filmréteg vastagsága a kohéziós erőkkel együttesen lecsökken. Az ilyen típusú anyagokban a belső súrlódás értéke nagy, de a kohézió közel elhanyagolható. Hasonló megfontolások esetén a kisebb frakciójú talajszemcsék (pl.: agyagok) esetében a filmréteg viszonylagos vastagsága lényegesen nagyobb. A filmréteg nyírószilárdsága lecsökken, így a belső súrlódás értéke is kisebb lesz, míg a kohéziós erők megnőnek.

A vizsgált talajok nedvesítése során azt tapasztaljuk, hogy a talajszemcséket körbevevő hidratburokokon kívül a kapillárisokban is megjelenik a víz, meniszkusz alakul ki. A vízfilm felületi feszültségének következtében összetartja a talajszemcséket, ezzel növelve a kohézió mértékét. [9] A súrlódással és a kohéziós erőkkel kapcsolatban számos megválaszolatlan kérdés van még, így az ismertetett elméleten kívül más megközelítések is léteznek.

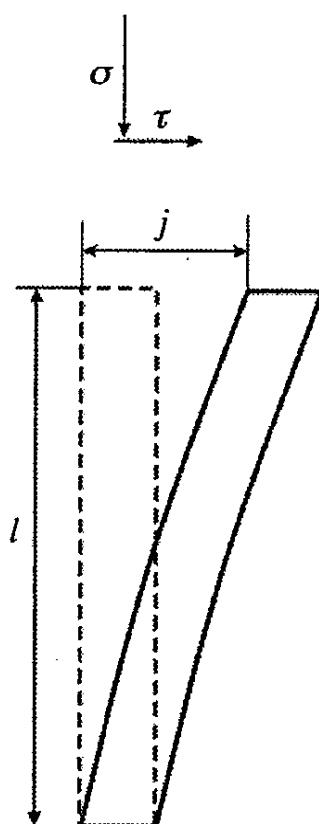
A talajok nyírási vizsgálata során az tapasztalható, hogy a deformáció növekedésével a kohézió mértéke gyors ütemben csökken, egészen a zérus értékig. A nyírófeszültség ennek megfelelően egy maximális érték elérése követően csökken, és felveszi a $\tau = \mu \cdot \sigma$ értéket. Az ilyen típusú nyírási diagramot csúcsos lefutású diagramnak nevezzük. A járműtechnikai kísérletek azt bizonyították, hogy a talajok nyírásakor nem csak a nyírási síkban keletkezik deformáció, hanem attól l mélységben is, melynek értéke a vizsgált talajszelvény feszültségállapotától és a talaj típusától függ elsősorban.

A Hooke-törvény alapján a fajlagos nyírási deformációra felírható differenciálegyenlet:

$$d\tau = -\tau \frac{dj}{l} \quad (10)$$

Melynek megoldását

$$\tau = C_1 \cdot e^{-\frac{j}{l}} + C_2 \quad (11)$$



4. ábra Nyírásnak kitett talajszelvény elmozdulása a mélység függvényében [6]

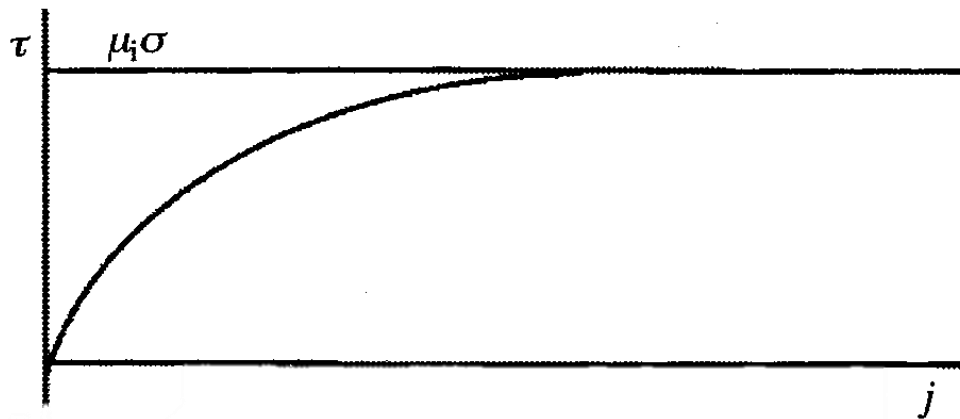
alakban keressük.

A differenciál-egyenlet kezdeti feltételei:

$$j = 0 \text{ esetén } \tau = 0, \quad j = \infty \text{ esetén } \tau = \mu \cdot \sigma \quad (12)$$

Ebben az esetben a megoldást a (13) egyenlet adja. Ekkor a nyírófeszültség értéke aszimptotikusan közelít a $\tau = \mu \cdot \sigma$ értékhez. Ez a típusú diagram a kohézióval csak elhanyagolható mértékben rendelkező talajokra jellemző.

$$\tau = \mu \cdot \sigma (1 - e^{-\frac{j}{l}}) \quad (13)$$



5. ábra Kohézió nélküli talajok nyírási diagramja

A kohézióval rendelkező talajoknál a már említett csúcsos lefutású nyírási diagramok jellemzőek. Bekker általános érvényűnek fogadta el ezt a típust. A görbe leírására pedig az alábbi egyenletet javasolta [10]:

$$\tau = \frac{c + p \cdot tg\varphi}{Y} \left\{ e^{\left[\left(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1} \right) \cdot K_1 \cdot j \right]} - e^{\left[\left(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1} \right) \cdot K_1 \cdot j \right]} \right\} \quad (14)$$

ahol:

c – a talaj kohéziója [Pa]

p – a fajlagos talajnyomás [Pa]

$tg\varphi$ – a talaj belső súrlódási tényezője

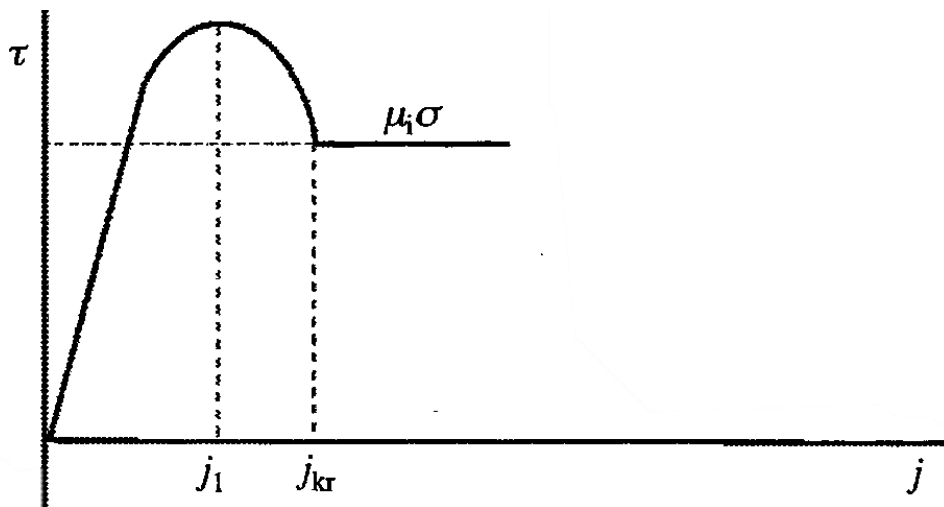
K_1 – talajdeformációt jellemző tényező [1/m]

K_2 – görbe lefutását jellemző tényező [-]

Y – a zárójelben lévő kifejezés maximális értéke

j – nyírási út [m]

A kohézió, a belső súrlódási szög, valamint a K_1 , K_2 tényezők értékei kísérleti úton határozhatóak meg.



6. ábra Kohézióval rendelkező talajok nyírási diagramja

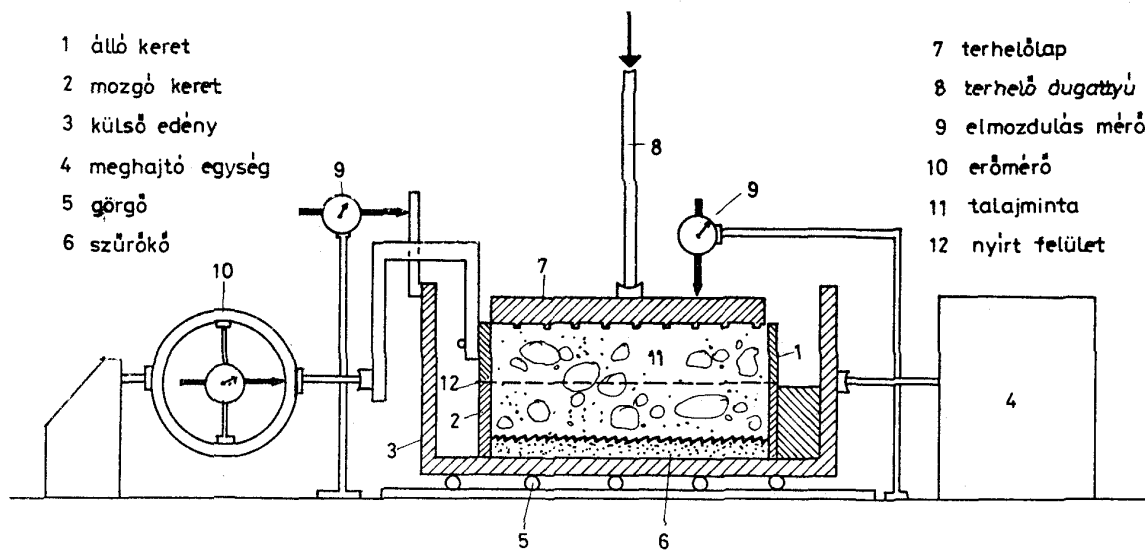
2.2.2. Talaj nyírószilárdságának meghatározása nyíródobozzal

A talajok nyírószilárdságának meghatározását többféle módszerrel tehetjük meg. Ezek közül a legismertebbek az egyirányú és triaxiális nyomóvizsgálatok, illetve a torziós és a keretes nyírókészülékekkel végzett különböző mérések. Kutatásom során egy laboratóriumi keretes nyírószerkezettel dolgoztam, így a továbbiakban ennek a részletesebb bemutatásával foglalkozom.

A talajok nyírószilárdságának meghatározására szolgáló berendezések közül a legegyszerűbb eszköz a keretes nyírókészülék. Felépítését tekintve egy álló alsó keretből, és egy felső mozgó keretből áll. A két keret elhelyezkedése meghatározza a nyírási síkot. A talajminta két fésűs nyomólap között helyezkedik el. A felső nyomólapon keresztül a minta normálirányban terhelhető. A terhelés hatására a talajmintából levegő szorul ki, a halmazsűrűsége megváltozik. A kísérlet célja szerint 3 különböző mérési módot különböztetünk meg: [9]

1. Lassú mérés: A minta rugalmasságából adódó relaxációt és kúszást figyelembe vesszük, a függőleges terhelés ráadása után kivárjuk a minta teljes konszolidációját. A vízszintes terhelést lépcsőzetesen növeljük, a lépcsők között ugyancsak kivárjuk a konszolidációt.

2. Konszolidált gyors mérés: A függőleges terhelés teljes konszolidációját kivárjuk, de a vízszintes terhelés sebességét úgy választjuk meg, hogy a vizsgálat időtartalma alatt a minta nedvességtartalma ne változzon meg.
3. Gyors mérés: Sem a függőleges, sem a vízszintes terhelés esetében nem várjuk meg a konszolidációt, a mérést a terhelés ráadását követően azonnal elkezdjük. A minta nedvességtartalma a teljes mérés során nem változik.



7. ábra Keretes nyírókészülék felépítése

2.2.3. A nyírószilárdság és a tolóerő kapcsolata

A terepjárás komplexebb, tudományos oldalú megközelítését a hadiipar hívta életre. Az 1900-as évek elejétől széles körben kutatott tématerületté vált, hiszen már az I. világháborúban megjelentek a különböző típusú harckocsik, melyek használhatóságát a terepi mozgásképességük szabta meg. A tudatos tervezéshez pedig elengedhetlenné vált a talajok szilárdsági tulajdonságainak ismerete. Bekker katonai felkérésre, 1971-ben kiadott művében foglalta össze az európai országokban tevékenykedő kutatók eredményeit [11].

A gyakorlatban a járószerkezetek alatt végbemenő mechanikai folyamatok vizsgálata vált fontossá, hiszen a kutatások célja a járművek kapaszkodóképességének meghatározása volt. Elsőként *Micklewaith* ismerte fel, hogy ez szoros összefüggésben van a talajok tiszta nyírásával. A talajok legnagyobb nyírófeszültségét és a járószerkezeten kialakuló tolóerőt a

Coulomb-Mohr elmélet szerint írta le. [12] Fontos megjegyezni, hogy az itt bemutatott egyenletek lánctalpas járószerkezetre vonatkoznak.

$$F_{Tmax} = A \cdot \tau_{max} = A \cdot c + \mu \cdot \sigma [N] \quad (15)$$

ahol:

F_{Tmax} – a legnagyobb tolóerő [N]

A – a felfekvő felület [m²]

τ_{max} – a maximális nyírófeszültség [Pa]

μ – a súrlódási tényező [-]

c – a kohézió [Pa]

σ – normálirányú terhelés [Pa]

Bekker általánosította ezt a megoldást, és egy olyan matematikai formulát javasolt, amelyből nem csak a τ_{max} értéke határozható meg, hanem a nyírófeszültség változása is a nyírási út függvényében. Ehhez ismerni kell a talaj nyírási diagramját, melyre *Bekker* a (14) egyenletet tekintette általánosnak. Feltételezve, hogy kapaszkodáskor a lánctalp alatt vízszintesen ható nyíróerő azonos a tolóerővel, a tolóerő értékét a nyírási függvény felfekvő felület mentén végzett integrálja adja meg. Ezek alapján:

$$F_t = \frac{2 \cdot l \cdot b \cdot (c + p \cdot \tan \phi)}{K_1 \cdot s \cdot Y \cdot l} \cdot \left[-\frac{1}{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}} + \frac{e^{(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot s \cdot l}}{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}} + \frac{1}{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}} - \frac{e^{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) \cdot K_1 \cdot s \cdot l}}{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}} \right] \quad (16)$$

ahol a (14). egyenlet jelölései érvényesek, továbbá:

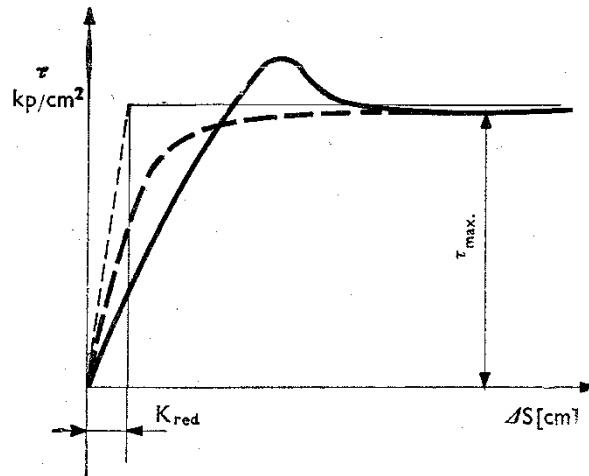
b – a járószerkezet felfekvőfelületének haladási irányra merőleges szélessége [m]

l – a felfekvőfelület hossza [m]

s – szlip [%]

Komándi kísérletei alapján arra a következtetésre jutott, hogy a csúcsos nyírási diagramok nem tekinthetők általános érvényűnek. A kohézióval rendelkező talajoknak is lehet aszimptotikus nyírási diagramja, és fordítva is. Elmélete szerint a nyírási diagram alakját a talaj fizikai állapota szabja meg. Elsődleges szerepe van a nedvességtartalomnak és a porozitásnak. A probléma megoldásaként a *Jánosi és Hanamoto* által javasolt [13] aszimptotikus matematikai leírást tekintette általános érvényűnek (17), de bevezette a redukált

nyírási diagram fogalmát. A redukált nyírási diagramok segítségével a csúcsos nyírási diagramokat velük egyenértékű, aszimptotikus jelleggel tudta leírni.



8. ábra Komándi féle redukált nyírási diagram

$$\tau = \tau_{max} \left(1 - e^{-\frac{\Delta s}{K}}\right) \quad (17)$$

A (17) egyenlettel analóg módon, integrálás után megkapjuk az általános érvényű tolóerő képletét:

$$F_t = A \cdot \tau_{max} \cdot \left\{1 - \frac{K_{red}}{s \cdot l} \cdot \left[1 - e^{-\frac{s \cdot l}{K_{red}}}\right]\right\} \quad (18)$$

ahol:

K, K_{red} - a nyírási diagram alakváltozási tényezője [m]

A talajok nyírószilárdságának matematikai leírásával számos kutató foglalkozott a fent említetteken kívül. A teljesség igénye nélkül: *Troitskaya, Kacigin, Ageikin, Guskov, Volskii, Nafikov, Poliakov, Reece, Soltynski, Sitkei, Wislicki, Wismer, Söhne, és Poncyliusz*. [10] [11] [13] [14] [15] [12] [16] [17] [18] [19].

Komándi a kutatásait folytatva a lánc talpas járószerkezet mellett fűvott gumiabroncsok esetében is meghatározta a létrejövő maximális tolóerő értékét. A deformálódó kerék – deformálódó pálya kapcsolatát leíró differenciál-egyenletek sokszor numerikusan nem megoldhatóak, ezért több egyszerűsítést is be kellett vezetni. *Komándi* a nyírási alakváltozást

síkbelinek tekintette (a gumiabroncs síkfelületen érintkezik a talajjal), valamint a fajlagos talajnyomás helyett a jármű teljes adhéziós súlyát veszi figyelembe [15]. Ezek alapján:

$$F_t = (A \cdot c + \mu \cdot G) \cdot \left\{ 1 - \frac{K_{red}}{s \cdot l} \cdot \left[1 - e^{-\frac{s \cdot l}{K_{red}}} \right] \right\} \quad (19)$$

3. A talaj nedvességtartalmának és nyírószilárdságának kapcsolata

A talajok maximális nyírószilárdságának értékét, valamint a nyírási diagram alakját elsősorban a talaj fizikai tulajdonságai határozzák meg. Legnagyobb hatása a nedvességtartalomnak és a tömörségnek, azaz a talajmintában lévő levegő mennyiségének van. Az általam végzett kutatás célja, hogy meghatározzam a talaj nedvességtartalom változásának nyírószilárdságra gyakorolt hatását. Ehhez kapcsolódóan számos mérést elvégeztem, melyekben a nyírási sebesség mellett a minta nedvességtartalmát és normálirányú terhelését változtattam. Első lépésként egy homoktalajból vett mintát vizsgáltam. A jövőben más talajtípusokból vett minták vizsgálatát is tervezem, valamint a laboratóriumi méréseket kiegészítem terepi mérésekkel is.

3.1. Mérés bemutatása, mérési terv

A méréssorozathoz tartozó mérési tervezet a *Mérési tervezet - A talaj nedvességtartalmának és nyírószilárdságának kapcsolata* című TDK dolgozatot támogató méréssorozathoz című dokumentumban található. Az alábbiakban a tervezet fontosabb pontjait mutatom be, a teljes anyagot a terjedelmi korlátozások miatt nem közlöm. A mérések során 5 különböző nedvességtartalom, és 5 eltérő normálterhelés mellett határoztam meg a minták nyírási diagramját, valamint az így megszerkeszthető Coulomb-egyenest.

A mérés célja, hogy alapkutatóként adatokat szolgáltatson a különböző nedvességtartalmú talajok nyírószilárdságának vizsgálatához. Az elvégzett mérések egy nagyobb terjedelmű kutatás részeként kerültek megvalósításra. A jövőben hasonló módszerekkel több Magyarországon megtalálható talajtípussal is végzek méréseket, valamint szabadföldi vizsgálatokkal is kiegészítem a mérési eredményeket. A mérés során szárítószekrényes

nedvességmérés is elvégzésre került, amely az MSZ-08 0205-78 szabvány alapján zajlik. A digitális nyíróberendezéssel kapcsolatos mérésekre nincsen hazánkban elfogadott szabvány, ezért ezeket a méréseket az egyetemi kutatók által megszerzett tapasztalatok alapján végeztem el.

A mérés során felhasznált eszközök a 2. táblázatban kerültek felsorolásra.

2. táblázat A mérések során felhasznált eszközök

Megnevezés	Típus	Megjegyzés
Digitális talajnyíró készülék	ELE 26-2112/01	
Adatgyűjtő notebook	Asus Eee PC 1008HA	
Szita		Ø 0,5 mm
Talajminta-gyűrűk	Eijkelpamp	100 cm ³
Szárítószekrény	Labor 125	
Gyors nedvességmérő	Sartorius MA 30	
Mérleg	Bizerba GE 2000-68	e=0,1 g; d=0,01/0,1 g
Egyéb laboreszközök	-	vödör, keverőlapát, stb.

3.1.1. Mérőeszközök rövid bemutatása

3.1.2. ELE 26-2112/01 Digitális talajnyíró készülék

A digitális talajnyíró készülékkel a nyíródobozba helyezett talajminták elnyírásához szükséges erő vizsgálható. A nyíráshoz szükséges erő mellett a talajminta vízszintes elmozdulása is mérhető az eszközzel. A berendezés digitális mérőeszközökkel van felszerelve, valamint elektronikus adattárolás alkalmazása segíti az adatok későbbi kiértékelését.

Az eszközbe egy Kaliber EP10 precíziós elmozdulás érzékelő van beépítve, melynek maximális elmozdulása 10 mm, felbontása 0,01 mm, és pontossági osztálya 0,1 %. Az erő mérésére egy ASCCELL Sensor TC230 erőmérő cella szolgál, amely méréstartománya 0-2,3 kN, felbontása 0,1 N és pontossági osztálya 0,1 %. A mérési adatok rögzítésére egy ASUS Eee PC 1008HA típusú számítógépen történik, a CAN Scope nevezetű mérőszoftver segítségével. A számítógép RS232 csatlakozó segítségével kapcsolódik a mérőeszközzel. A mérőszoftverben 10 és 50 Hz-es mintavételezési frekvencia állítható be. A műszeren a nyírási sebességet 0-9 mm/min között lehet digitálisan megadni. A normálirányú terhelést súlyokkal lehet szabályozni. a terhelés egy erőkaron keresztül adódik át a nyomólapra, amely erőkar megtízszerezi a terhelés értékét. Az eszközhöz 1, 2, 5 és 10 kg-os súlyok tartoznak.



9. ábra ELE 26-2112/01 Digitális talajnyíró készülék

A talajnyíró készülék fontosabb adatait a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat A talajnyíró készülék fontosabb műszaki adatai

Mintatartó átmérője	Ø 63,5 mm
Mintatartó magassága	36,5 mm
Nyomólap átmérője	Ø 63 mm
Legkisebb terhelőerő	10 N
Legnagyobb terhelőerő	500 N
Elérhető legnagyobb normálfeszültség	1,549 MPa
Nyírási sebesség	0-9 mm/min
Mintavételezési frekvencia	10/50 Hz

3.1.3. Labor szárítószekrény

Gravimetrikus talajnedvességet a legpontosabban szárítószekrényes eljárással mérhetünk. Az eljárás lényege, hogy a nedves talajból vett mintát előzetesen lemérjük egy tized g pontos mérlegen, majd szárítószekrénybe helyezzük, ahol 105 °C-on, súlyállandóságig szárítjuk (20-25 óra). A szárítás befejeztével a mintát exsikkátorba helyezzük, majd kihűlés után az abszolút száraz talajt tartalmazó edényt ismét lemérjük. A gravimetrikus nedvességtartalmat a (20) képlettel számíthatjuk szárazanyagra vonatkozóan [MSZ-08 0205-78]

$$w = \frac{M_{nedves} - M_{száraz}}{M_{száraz}} \quad (20)$$



10. ábra Labor szárítószekrény

A szárítószekrény nem tud digitálisan hőmérsékletet mérni, így a kívánt hőfokot manuálisan kell beállítani egy hőmérő segítségével. Egy potenciométerrel lehet a hőmérsékletet növelni, illetve csökkenteni. A mérési tapasztalatok alapján a nevezetes értékek bejelölésre kerültek, így a talajméréshez kívánt 105 °C körülbelüli beállítása lehetséges csak.

3.1.4. Bizerba GE 2000-68 mérleg

A nedves és száraz talajminták, a talajminta tartó edények, valamint a minta előkészítése során a légszáraz talaj, és a víz tömegének mérésére használt eszköz, egy Bizerba GE 2000-68 mérleg volt. Alsó mérési határa 0,5 g, felső mérési határa 2000 g. Osztásértéke(d) 0,01/0,1 g, míg hitelesítési osztásértéke (e) 0,1 g. A mérleg kalibrációját a mérések előtt egy Haigis 1 kg-os etalonnal végeztem el.



11. ábra Bizerba GE 2000-68 mérleg és egy talajmintatartó

3.1.5. Sartorius MA 30 nedvességmérő

A nedvesített talajminta nedvességtartalmának ellenőrzéséhez használt eszköz egy Sartorius MA 30-as gyors nedvességmérő. A műszer tartalmaz egy precíziós mérleget, és egy halogénes fűtőszálat. A készülék tömegállandóságig szárítja a behelyezett mintát, majd a tömegcsökkenésből kiszámítja az elpárologtatott víz tömegét, és a gravimetrikus nedvességtartalmat. A kívánt maximális hőfokot 40 és 160 °C között lehet beállítani. A beépített mérleg felső mérési határa 30 g, a pontossága 0,05 % (5-10 g minta esetén). Az eszközhöz tartozik egy nyomtató egység is, amely a beállított időközönként kinyomtatja az éppen aktuális tömeg vagy nedvességtartalom értéket.



12. ábra Sartorius MA 30 halogénes gyors nedvességmérő

3.1.6. Talajminta előkészítése

A mérés első lépéseként meg kell határozni a talajminta légszáraz nedvességtartalmát szárítószekrény segítségével. Ezt követően az méréssorozathoz szükséges talajt kell előkészíteni az alábbi módon:

1. A talajminta rostálása
2. A szükséges talajmennyiség kimérése (~ 2kg)
3. A kívánt nedvességtartalomhoz szükséges vízmennyiség kimérése
4. A talajminta homogenizálása
5. Mintavétel nedvességtartalom ellenőrzéshez

A talajminta rostálása egy 0,5 mm lyukbőségű szitán történt, melynek célja, hogy a vizsgálat során használt talaj szemcseméretében egységes legyen. Ennek köszönhetően a nedvességtartalom homogén beállítása is megközelíthető. Tapasztalati tény, hogy a nagyobb talajszemcsék magasabb nedvességtartalommal rendelkeznek még légszáraz állapotban is.

A kívánt nedvességtartalomhoz szükséges víz mennyiségét az alábbi képlet segítségével határoztam meg:

$$m_{\text{víz}} = \frac{m_0(\phi_k - \phi_0)}{1 - \phi_k} \quad (21)$$

ahol:

$m_{\text{víz}}$ – a szükséges víz tömege [kg]

m_0 – a talaj kezdeti tömege [kg]

ϕ_0 – a kezdeti nedvességtartalom [m/m %]

ϕ_k – a kívánt nedvességtartalom [m/m %]

A talajminta homogenizálása során a víz egyenletes elosztása a cél. Mivel egy laza szerkezetű, kis mennyiségű, előzetesen lerostált talajba kerül bele a víz, a keverés egy kézi keverőlapát segítségével elvégezhető. A mérés során fontos szerepet kap az inhomogenitásokból származó mérési hibák kiküszöbölése.

A nedvességtartalom ellenőrzéséhez kis mennyiségű (~50 g) mintát vettem az előkészített talajból egy jól zárható talajmintavevő henger segítségével. A mintavevő műanyag zárófedele megakadályozza a nedvességtartalom változását a mérések elvégzése során. Amint a mérések befejeződtek, a talajmintát szárítószekrénybe helyeztem nedvességmérés céljából. A gravimetrikus talajnedvesség mérés szabványosítva van, így elvégzése során ennek az utasításait kell figyelembe venni. Az MSZ -08 0205-78 12.1-es pontja 4 lépésben foglalja össze a teendőket:

1. *A nedves talajból 5-10 g-ot, centigramm pontosságú tara- vagy gyorsmérlegen, beszámozott, ismert g tömegű, jól záródó fedeles dobozba (edény) mérünk. A mérést gyorsan végezzük, mert – különösen száraz, meleg helyiségben – mérés közben is csökken a talaj nedvességtartalma.*
2. *A nedves talajjal telt edényt (fedél nélkül) szárítószekrénybe helyezzük és 105 °C-on súlyállandóságig szárítjuk. Ez a talaj kolloidtartalmától, nedvességtartalmától és felaprózottságától függően kb. 20-25 órát vesz igénybe.*

3. A szárítás befejeztével az edényt fedelével zárjuk, majd kihűlésig CaCl_2 sicc. -ot tartalmazó exsikkátorba helyezzük.
4. Kihűlés után az abszolút száraz talajt tartalmazó edényt tara- vagy gyorsmérlegen centigramm pontossággal mérjük.

Számítás:

$$n_s = \frac{a - b}{b - c} \cdot 100 \quad (22)$$

ahol:

n_s = a talaj nedvességtartalma súlyszázalékban (száraz talaj százalékban) [%]

a = nedvességedény és a bemért nedves talaj együttes tömege (szárítás előtt) [g]

b = nedvességedény és a bemért abszolút száraz talaj együttes tömege (szárítás után) [g]

c = nedvességedény tömeg [g]

A talaj súlyszázalékban kifejezett nedvességtartalmát térfogatszázalékra (n_{tf}) az alábbi összefüggés alapján számíthatjuk:

$$n_{tf} = n_s \cdot tfs \quad (23)$$

ahol:

tfs = a talaj térfogattömege [g/cm^3]

A mérésorozat az alábbi pontokban tér el az MSZ -08 0205-78-től:

- A pontosabb eredmény érdekében a mintatartó edényekbe ~ 30 g minta kerül elhelyezésre
- Nem áll rendelkezésre exsikkátor, ezért a száraz talaj tömegének mérése közvetlenül a szárítószekrényből való kivételük után történik meg, ügyelve arra, hogy a mérleg ne melegedjen fel a mintáktól, ezzel biztosítva a mérési pontosságot.

A III. és IV. nedvesítés során a szárítószekrény helyett egy halogénes gyors nedvességmérőt használtam a mérés időtartamának csökkentése céljából. A szárítószekrényes mérések alapján elmondható, hogy a talajminta nedvesítésének módszere megfelelő, a valós nedvességtartalom mindkét esetben hibahatáron belül megegyezett az elérni kívánt nedvességtartalommal.

3.1.7. Nyírási diagramok meghatározása

A nyírószilárdság mérésének menete az alábbi pontokban foglalható össze:

1. A talajminta betöltése és eligazítása nyírókeretbe
2. Nyírási sebesség beállítása
3. Normálirányú terhelőerő beállítása, nyomólap rögzítése
4. Mérési frekvencia kiválasztása, adatgyűjtés elindítása
5. Nyíródoboz mozgásának elindítása
6. Nyíródoboz mozgásának leállítása
7. Adatgyűjtés leállítása
8. Talajminta cserélése

A talajminta nyíródobozba töltésére egy mintavevő hengert használtam. A mintatartó és mintavevő henger térfogata megegyezik. Ezzel a módszerrel lehet biztosítani, hogy minden mérés során azonos térfogatú talaj kerüljön a berendezésbe.

A nyírási sebesség 0-9 mm/min érték között állítható be. A méréssorozatban a maximális 9 mm/min, és egy csökkentett 4,5 mm/min nyírási sebességet használtam. A beállítást a mérőeszköz kezelőfelületén lehet elvégezni.

A normálirányú erő beállítása manuálisan, súlyok segítségével történik. A vizsgálat során 5 különböző terhelés mellett (1-2-5-10-20 kg) történtek mérések. A szükséges súlyok felrakása után a nyomólapot egy anya segítségével lehet lerögzíteni, hogy a mérés során a függőleges irányú elmozdulást megakadályozzuk. A talaj rugalmas tulajdonságokkal is rendelkezik, terhelés hatására a talajmintából levegő szorul ki, a halmazsűrűsége megváltozik, ezért fontos meghatározni, hogy milyen típusú mérést végzünk a konszolidáció függvényében. A választott mérési módszer a konszolidált gyors mérés, melynek lényege, hogy a függőleges

terhelés teljes konszolidációját kívárujuk, de a vízszintes terhelés sebességét úgy választjuk meg, hogy a vizsgálat időtartama alatt a minta nedvességtartalma ne változzon meg. [9]

Következő lépésként a mérőeszközhöz csatlakoztatott lapon, a CanScope programban kell kiválasztani mérési frekvenciát (10 Hz), majd az adatgyűjtést el kell indítani. Ezután a berendezés kezelőfelületén kell elindítani a nyíródoboz mozgását. A képernyőn megjelenik az aktuális elmozdulás értéke. Amint eléri a 10 mm-t, a nyíródoboz mozgását a kezelőpanelon meg kell állítani, majd a mérőszoftverben az adatgyűjtést is le kell állítani. Ezt követően a mérési adatok .txt és .xls fájlformátumban kimenthetőek.

A következő mérés elvégzése előtt a használt talajmintát el kell távolítani a nyírókeretből, majd friss mintát kell betölteni. Figyelni kell arra, hogy a használt minta ne kerüljön vissza a mérőeszközbe homogenizálás nélkül, ugyanis az már eltérő fizikai szerkezettel rendelkezik. A talajminta homogenizálása a mérések között keverőlapáttal elvégezhető.

3.2. *Mérési eredmények ismertetése*

A mérési eredmények kiértékelését Excel programban végeztem el. Első lépésként a nullponthibát kellett kiküszöbölni. A mérőeszközön nincsen lehetőség a mért értékek nullázására, ezért ezt manuálisan, az adatfeldolgozás során kellett megtenni. A mérődoboz bizonyos mértékű játékkal van szerelve, ezért a kapott diagramok az első szakaszukon konstans zérus értéket vesznek fel. Annak érdekében, hogy a diagramok összehasonlíthatóak legyenek, a diagramok kezdőpontját az origóba kellett eltolni.

A mérőeszköz az elmozduláshoz szükséges erőt méri, így ahhoz, hogy nyírási diagramot kapjunk, ki kell számítani az aktuális nyírófeszültség értékét. Az elmozdulás és nyírófeszültség értékekből ezután kirajzolható a nyírási diagram. Adott nedvességtartalomhoz kapcsolódóan megrajzolható továbbá a Coulomb egyenes is. Ehhez meghatároztam a különböző normálfeszültségekhez tartozó maximális nyírófeszültség értékét. Jelen esetben az egyenest 5 pontra kell illeszteni (5 különböző normáalterhelés). Az illesztett egyenes egyenletét és a determinációs együtthatót az Excel program segítségével határoztam meg. Az egyenes Y-tengellyel való metszéspontja fogja megadni a kohézió értékét, míg az egyenes meredeksége a talaj belső súrlódási tényezőjét.

Minden vizsgált nedvességtartalom esetén elvégeztem a bemutatott adatfeldolgozást, továbbá a kapott diagramokból a különböző nedvességtartalomnál és nyírási sebességnél mutató értékek összehasonlítását segítő összesített ábrákat szerkesztettem.

Az adatfeldolgozás során felhasznált összefüggések:

$$\sigma = \frac{F_n}{A} [Pa] \quad (24)$$

$$\tau = \frac{F_{ny}}{A} [Pa] \quad (25)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \mu_t \quad (26)$$

ahol:

σ – normálfeszültség [Pa]

F_n – normálerő [N]

A – a minta felülete [m²]

τ – nyírófeszültség [Pa]

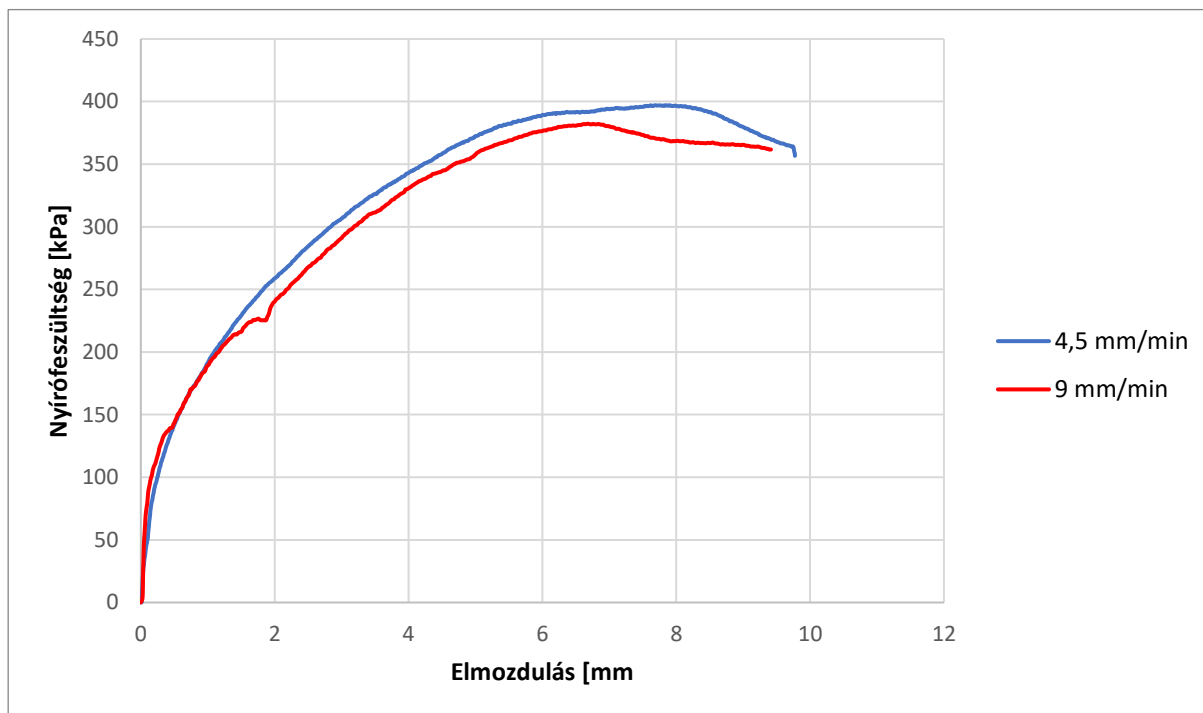
F_{ny} – nyíróerő [N]

φ – talaj súrlódási szöge [rad]

μ_t – talaj belső súrlódási tényezője [-]

A méréssorozathoz tartozó mérési jegyzőkönyv a *Mérési jegyzőkönyv - A talaj nedvességtartalmának és nyírószilárdságának kapcsolata című TDK dolgozatot támogató méréssorozathoz* című dokumentumban található. Az alábbiakban csak a fontosabb mérési adatokat és jellemző diagramokat közlöm a terjedelmi korlátozások miatt.

A méréssorozat során 5 különböző nedvességtartalom mellett végeztem méréseket 5 különböző normáalterhelés és 2 különböző nyírási sebesség alkalmazásával. A nyírási diagramok jellemzően a kohézió nélküli talajokra jellemző, aszimptotikus jelleget mutattak.



13. ábra A homoktalajokra jellemző aszimptotikus nyírási diagramok különböző nyírási sebességeknél

A felhasznált talajmintával végzett egyéb kísérletek kapcsán előzetesen már meg lett határozva a minta szemcseösszetétele, melyet a 4. táblázat mutat. A vizsgálat során a talajmintát egy 0,5 mm lyukbőségű rostán átrostáltam, hogy ezzel biztosítsam a homogén szemcseösszetételt.

4. táblázat A talajminta szemcseösszetétele [20]

Homok 0,05 – 2 mm	Iszap 0,02 – 0,05 mm	Agyag <0,02 mm
90,50 %	3,20 %	6,30 %

A következő táblázatban a kapott nyírófeszültségek láthatóak a nyírási sebesség, nedvességtartalom és normálterhelés függvényében:

Terhelés [kg]	Normálerő [N]	Normálfeszültség [kPa]	Nyírószilárdság [kPa]	Kohézió[kPa]	Súrlódási tényező [-]	Súrlódási szög [°]	Nedvességtartalom [m/m %]	Nyírási sebesség [mm/min]
1	98,1	30,97	24,19	13,174	0,609	31,333	1,579	9
2	196,2	61,95	46,50					
5	490,5	154,88	112,45					
10	981	309,76	217,11					
20	1962	619,53	382,28					
1	98,1	30,97	24,80	7,5426	0,566	29,519	1,579	4,5
2	196,2	61,95	41,71					
5	490,5	154,88	95,05					
10	981	309,76	185,34					
20	1962	619,52	357,24					
1	98,1	30,97	21,67	3,548	0,654	33,185	2,99	9
2	196,2	61,95	47,87					
5	490,5	154,88	111,09					
10	981	309,76	193,91					
20	1962	619,52	412,95					
1	98,1	30,97	26,16	1,771	0,675	34,035	2,99	4,5
2	196,2	61,95	52,68					
5	490,5	154,88	98,86					
10	981	309,76	199,35					
20	1962	619,52	426,81					
1	98,1	30,97	25,90	4,028	0,600	30,976	5,084	9
2	196,2	61,95	38,62					
5	490,5	154,88	99,20					
10	981	309,76	185,13					
20	1962	619,52	377,92					

Terhelés [kg]	Normálerő [N]	Normálfeszültség [kPa]	Nyírószilárdság [kPa]	Kohézió[kPa]	Súrlódási tényező [-]	Súrlódási szög [°]	Nedvességtartalom [m/m %]	Nyírási sebesség [mm/min]
1	98,1	30,97	24,42	9,611	0,532	27,991	5,084	4,5
2	196,2	61,95	39,79					
5	490,5	154,88	111,77					
10	981	309,76	152,55					
20	1962	619,52	345,12					
1	98,1	30,97	22,07	13,388	0,413	22,455	6,992	9
2	196,2	61,95	38,45					
5	490,5	154,88	71,45					
10	981	309,76	159,09					
20	1962	619,52	262,32					
1	98,1	30,97	17,16	17,472	0,518	27,393	6,992	4,5
2	196,2	61,95	44,59					
5	490,5	154,88	99,43					
10	981	309,76	215,48					
20	1962	619,52	320,65					
1	98,1	30,97	18,90	21,262	0,335	18,495	8,99	9
2	196,2	61,95	35,85					
5	490,5	154,88	69,73					
10	981	309,76	165,10					
20	1962	619,52	210,48					
1	98,1	30,97	24,02	16,432	0,359	19,723	8,99	4,5
2	196,2	61,95	33,75					
5	490,5	154,88	86,10					
10	981	309,76	121,74					
20	1962	619,52	-					

3.2.1. Nedvességmérés eredményei

Az első három nedvességtartalom melletti mérés esetén szárítószekrényes nedvességmérést alkalmaztam. Első lépésként a talajminta légszáraz nedvességtartalmát állapítottam meg, majd a nedvesítések során a (21) egyenlet alapján határoztam meg a ~ 2 kg légszáraz talajhoz keverendő víz mennyiségét. A homogén keverés után mintát vettem, amit szintén szárítószekrénybe helyeztem nedvességmérés céljából. A vizsgált talaj vízzel telített, elfolyósított állapotban mutatott gravimetrikus nedvességtartalmát is vizsgáltam annak érdekében, hogy ismert legyen a maximálisan elérhető nedvességtartalom is. A szárítószekrényes mérések eredményeit az 5. táblázat mutatja.

5. táblázat A gravimetrikus nedvességmérés eredményei

Mintatartó sorszáma	Minta megnevezése	Mintatartó tömege [g]	Kiindulási tömeg [g]	Szárítás utáni tömeg [g]	Gravimetrikus nedvességtartalom [m/m%]
70.	Légszáraz talaj	2,72	31,03	30,59	1,579
71.	Telített talaj	2,71	44,24	35,97	24,865
26..	I. nedvesítés	3,73	31,22	29,89	5,084
21.	II. nedvesítés	2,96	30,35	28,56	6,992

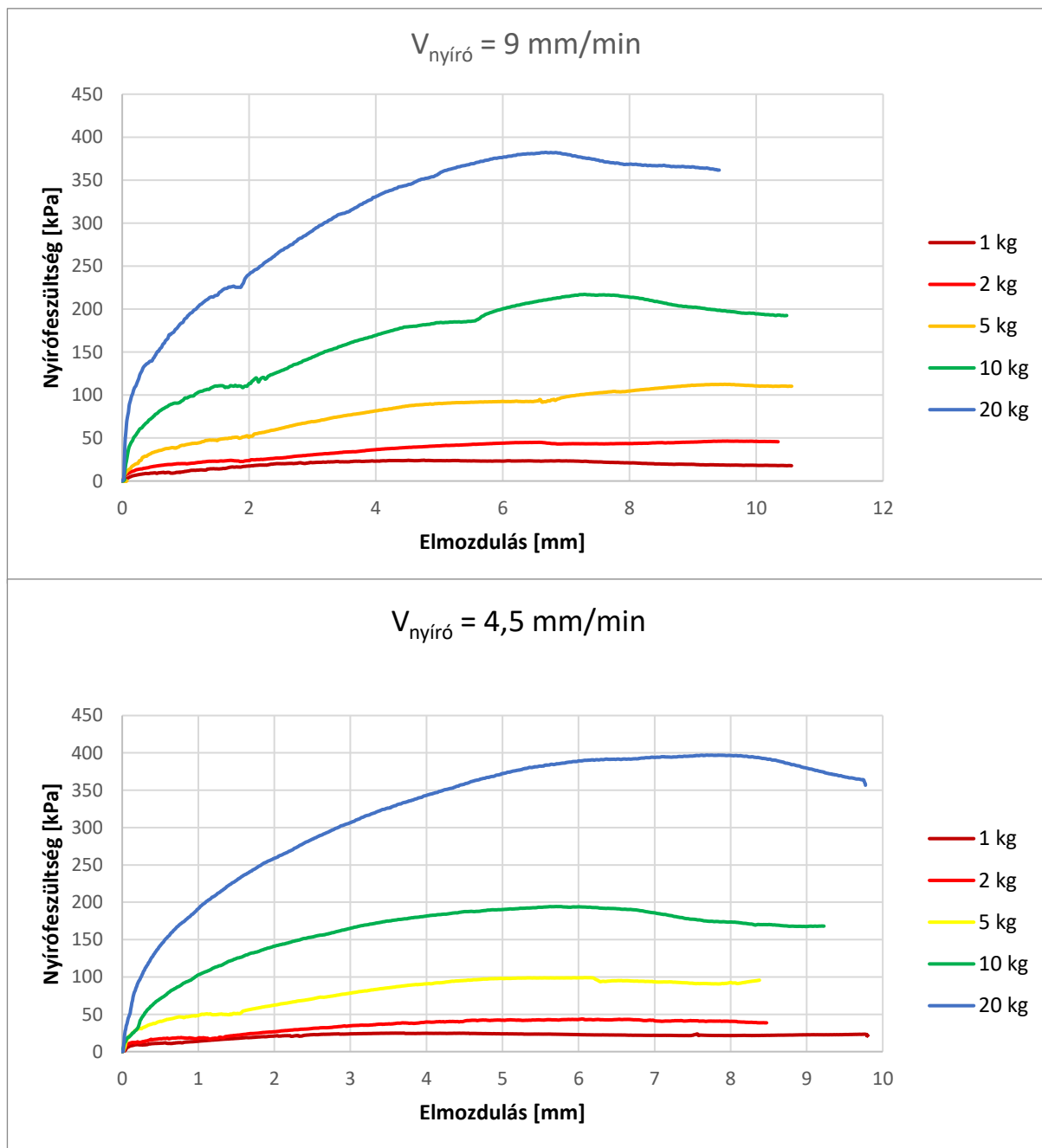
A pontos értéknek elfogadott gravimetrikus nedvességtartalom értékek közel megegyeznek a beállítani kívánt nedvességtartalmakkal ($5,084 \approx 5 \frac{m}{m} \%$; $6,992 \approx 7 \frac{m}{m} \%$), ezért a nedvesítési módszert pontosnak tekintettem. A további nedvesítések során csak ellenőrző méréseket végeztem egy halogénes gyors nedvességmérő berendezéssel. Az elérni kívánt nedvességtartalmak 3 és 9 m/m % esetén a mért értékek 2,99 és 8,99 m/m %-ra adódtak. A mérések során vizsgált nedvességtartalmak tehát $\sim 1,5$ -3-5-7-9 m/m %.

3.2.2. Légszáraz állapot

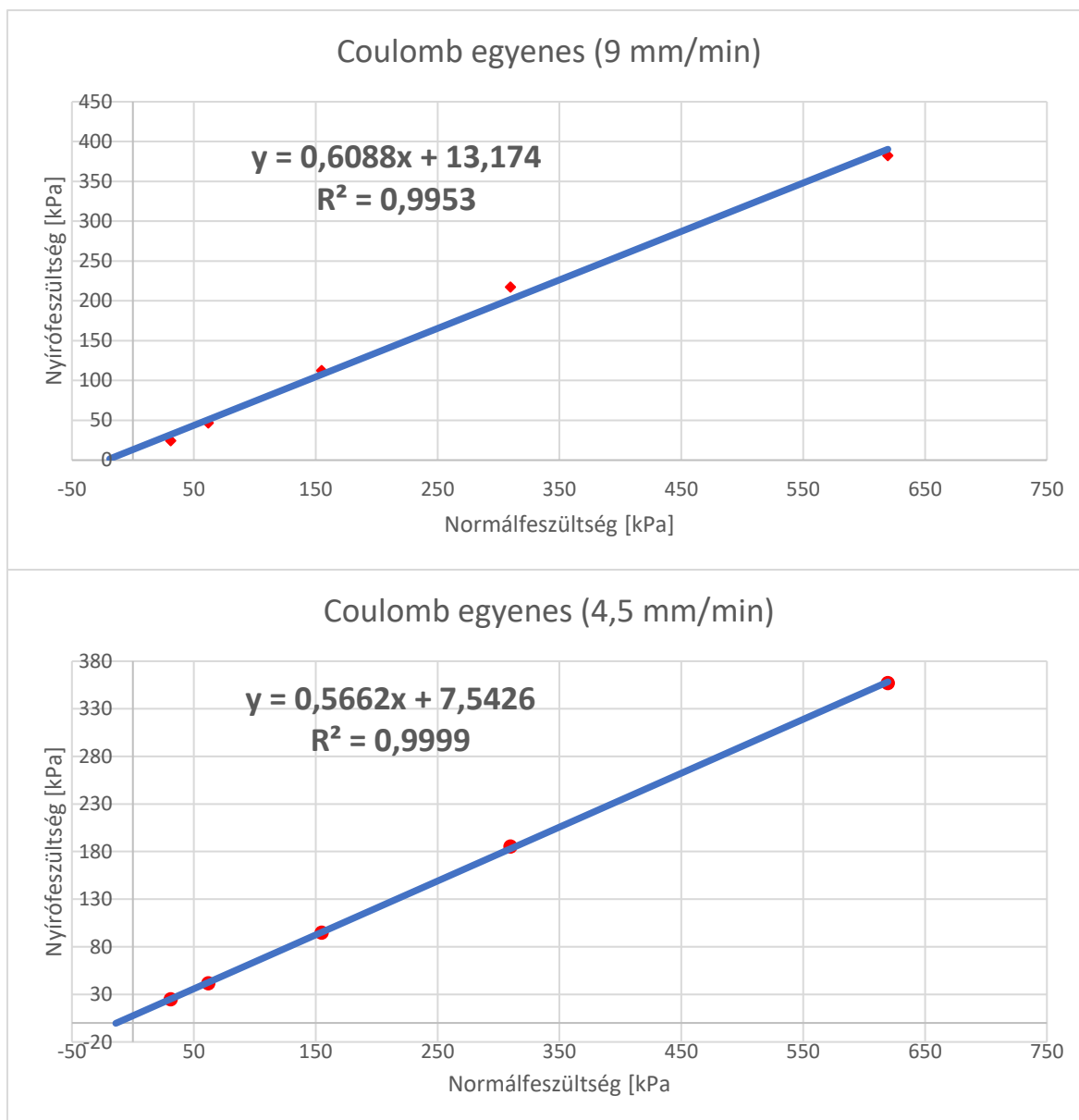
Légszáraz állapotban (1,579 m/m %), 9 mm/min nyírássebesség mellett a talaj kohéziójának értéke 13,174 kPa-ra, míg a belső súrlódási tényezője 0,6088-ra adódott. 4,5 nyírási sebesség mellett ezek az értékek 7,5426 kPa és 0,5662.

Az alábbiakban az eredményekből szerkesztett nyírási diagramok és Coulomb egyenesek láthatóak. Az ábrákon a nyírókészülékre felhelyezett súlyok tömege van feltüntetve. Az

áttételnek köszönhetően a normálterhelés a feltüntetett érték ~ 100 -szorosa ($g = 10 \frac{m}{s^2}$ esetén).



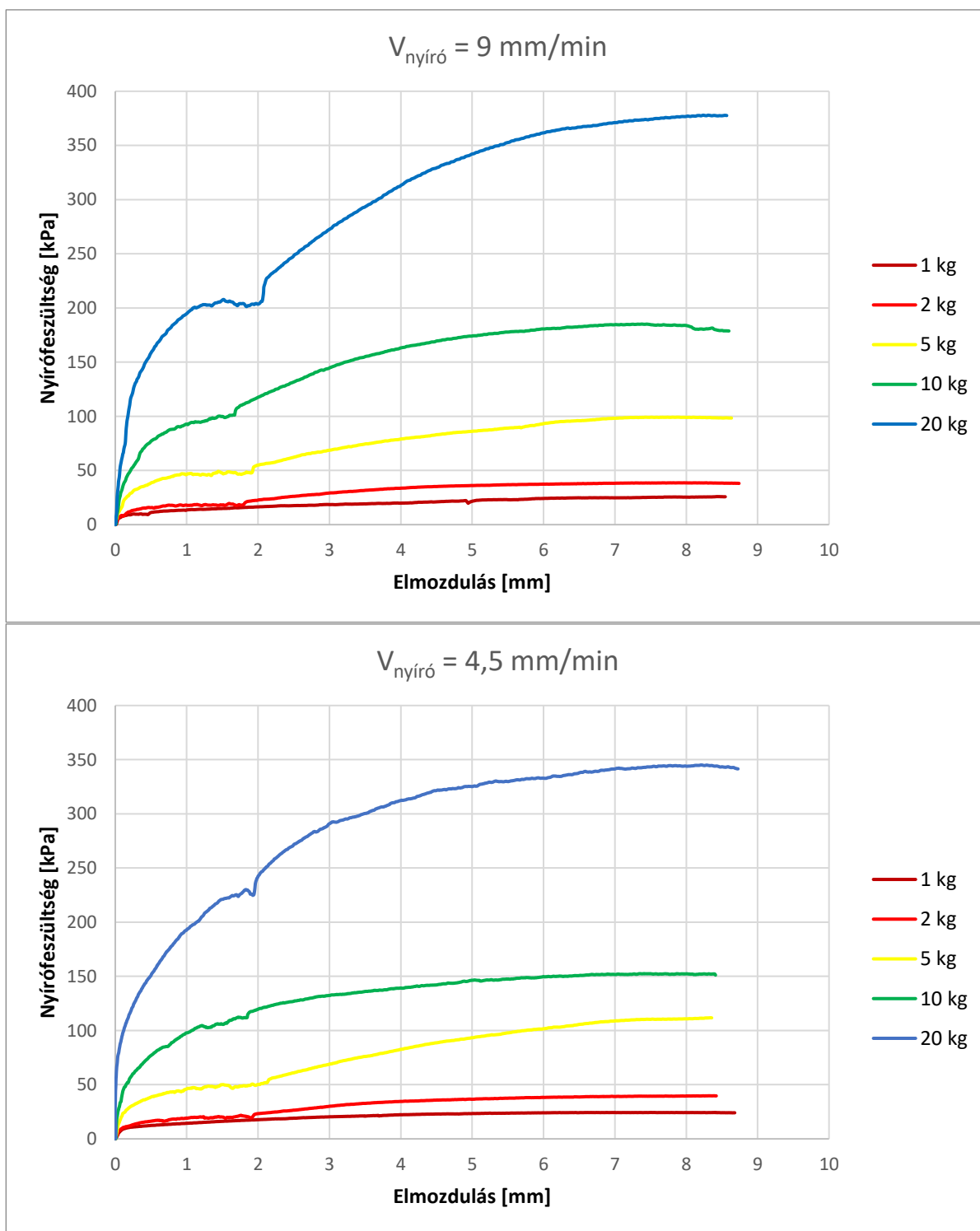
14. ábra Légszáraz állapotú talaj nyírási diagramjai



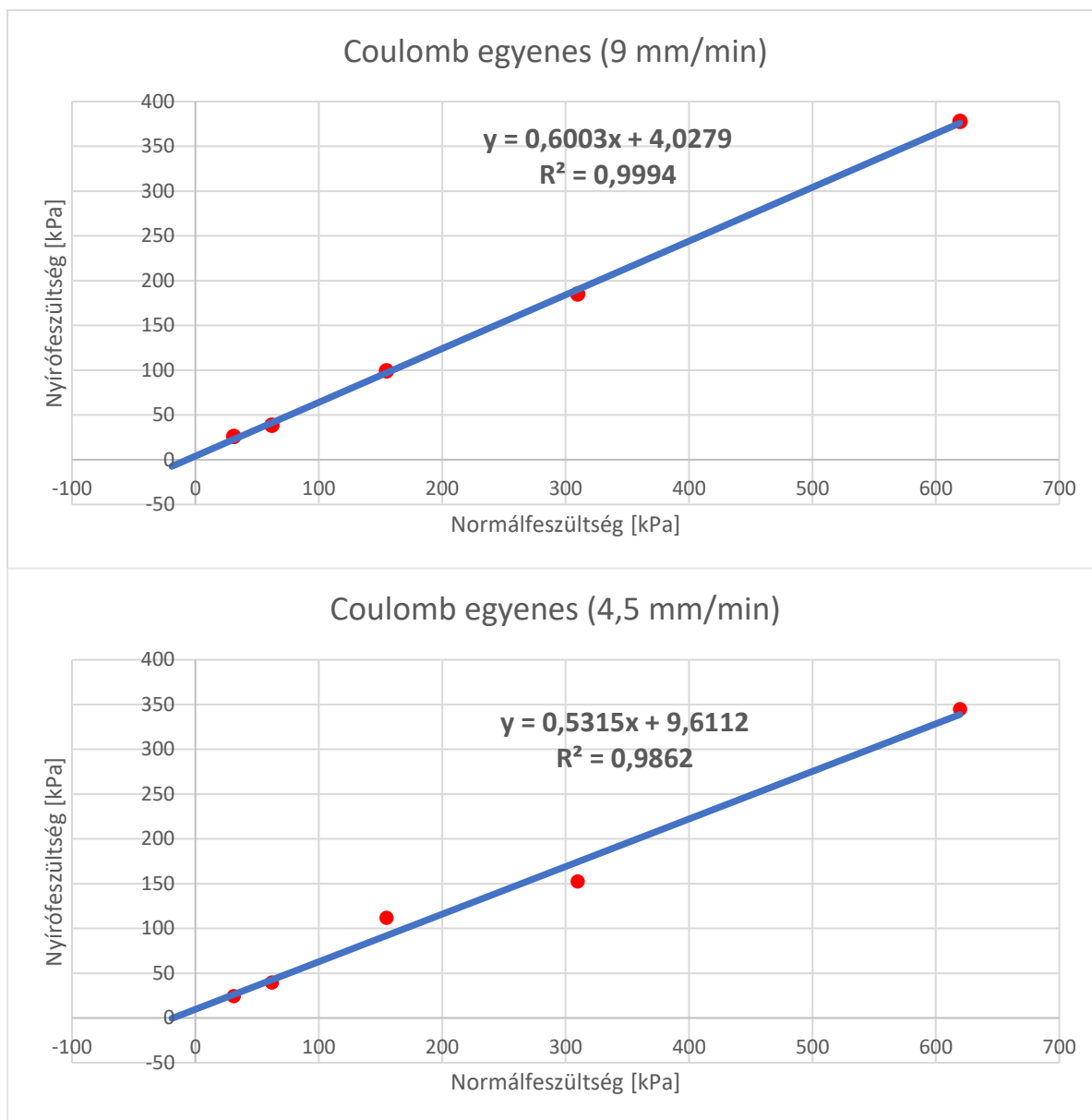
15. ábra Légszáraz állapotú talaj Coulomb egyenesei

3.2.3. I. nedvesítés

Az első nedvesítés esetében (6,992 m/m %), 9 mm/min nyírási sebesség mellett a talaj kohéziójának értéke 4,0279 kPa-ra, míg a belső súrlódási tényezője 0,6003-ra adódott. 4,5 nyírási sebesség mellett ezek az értékek 9,6112 kPa és 0,5315.



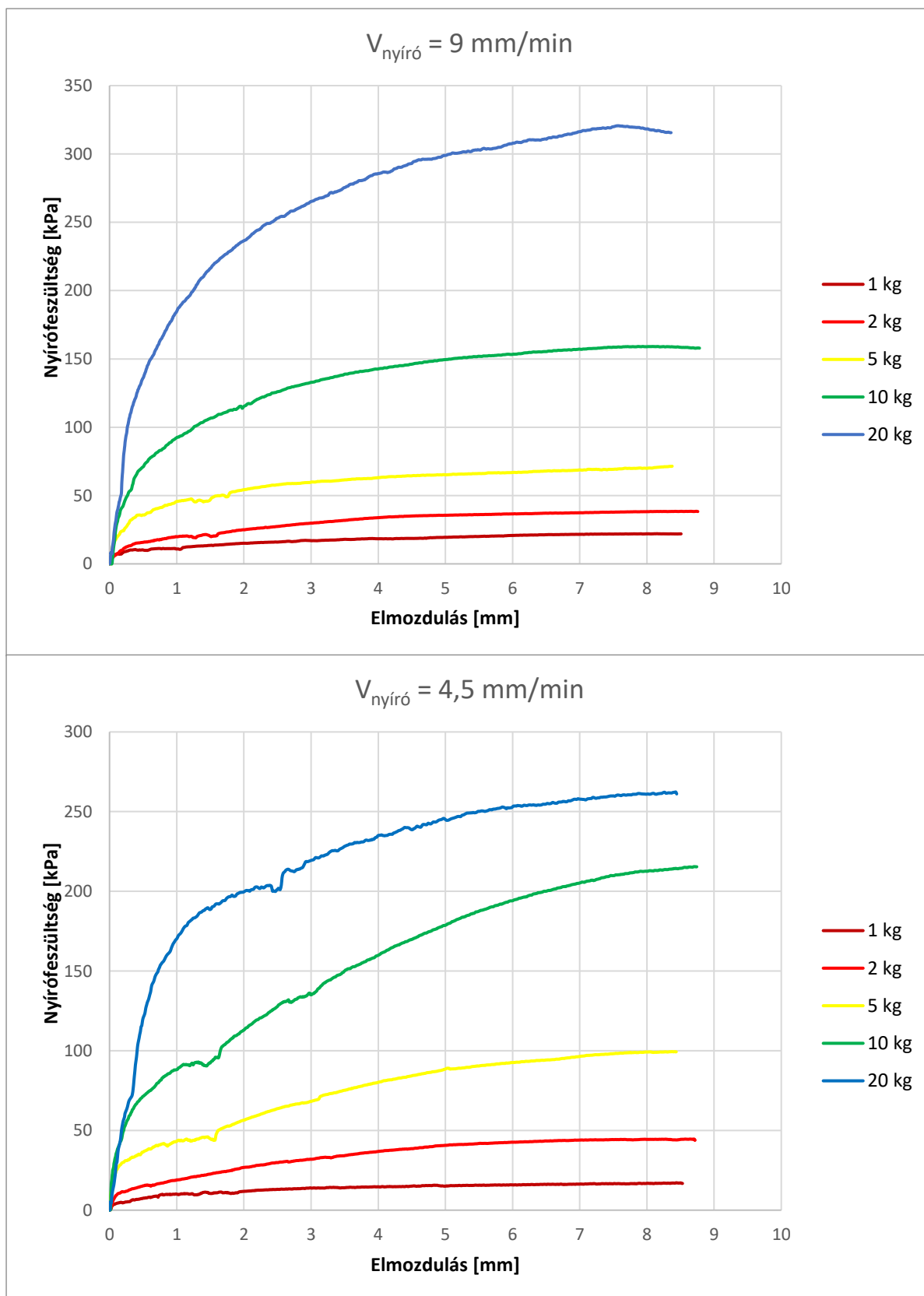
16. ábra Az első nedvesítés alkalmával kapott nyírási diagramok



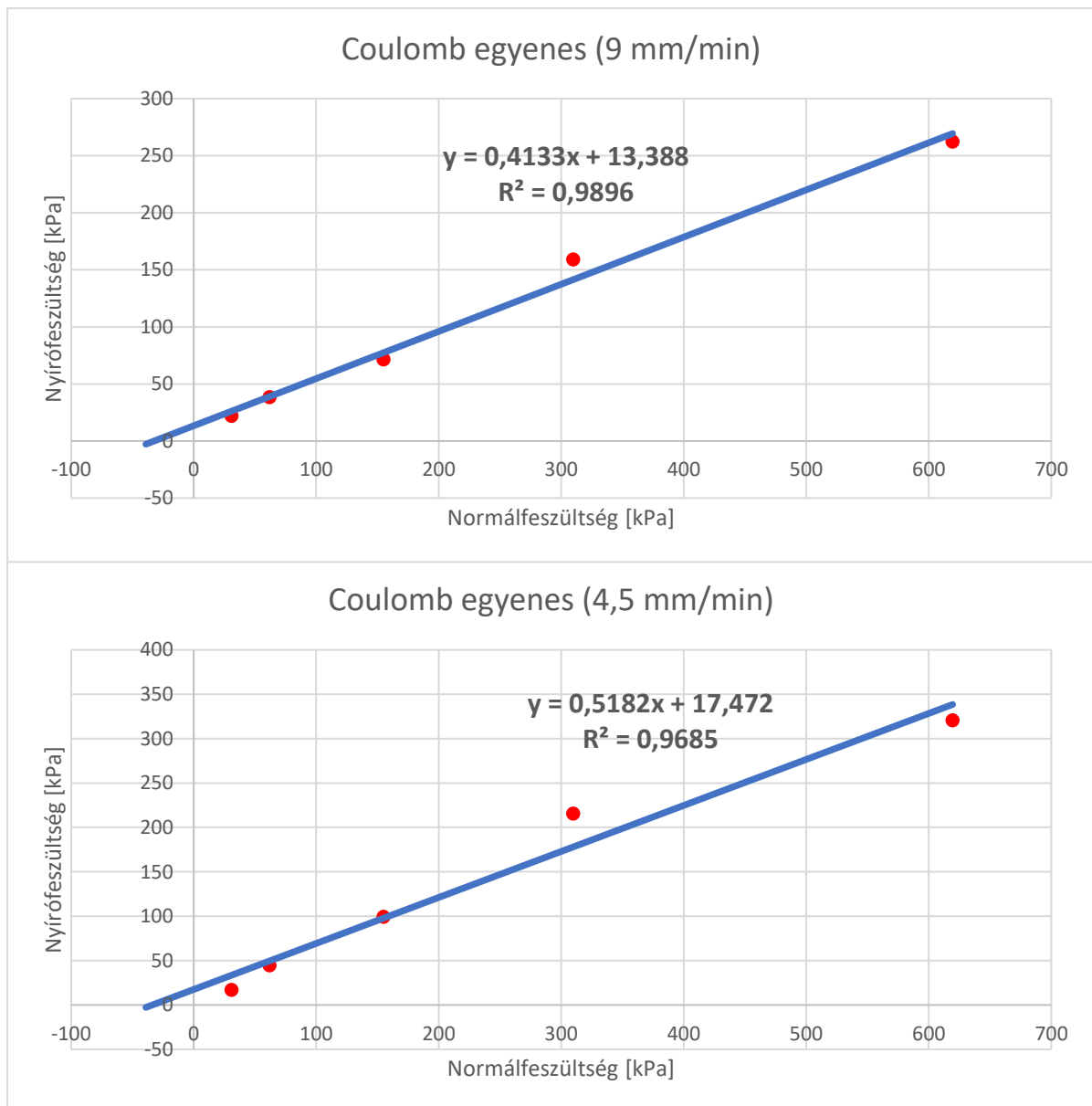
17. ábra Az első nedvesítésnél kapott Coulomb egyenese

3.2.4. II. nedvesítés

Az második nedvesítés esetében (5,084 m/m %), 9 mm/min nyírássebesség mellett a talaj kohéziójának értéke 13,388 kPa-ra, míg a belső súrlódási tényezője 0,4133-ra adódott. 4,5 nyírási sebesség mellett ezek az értékek 17,472 kPa és 0,5182.



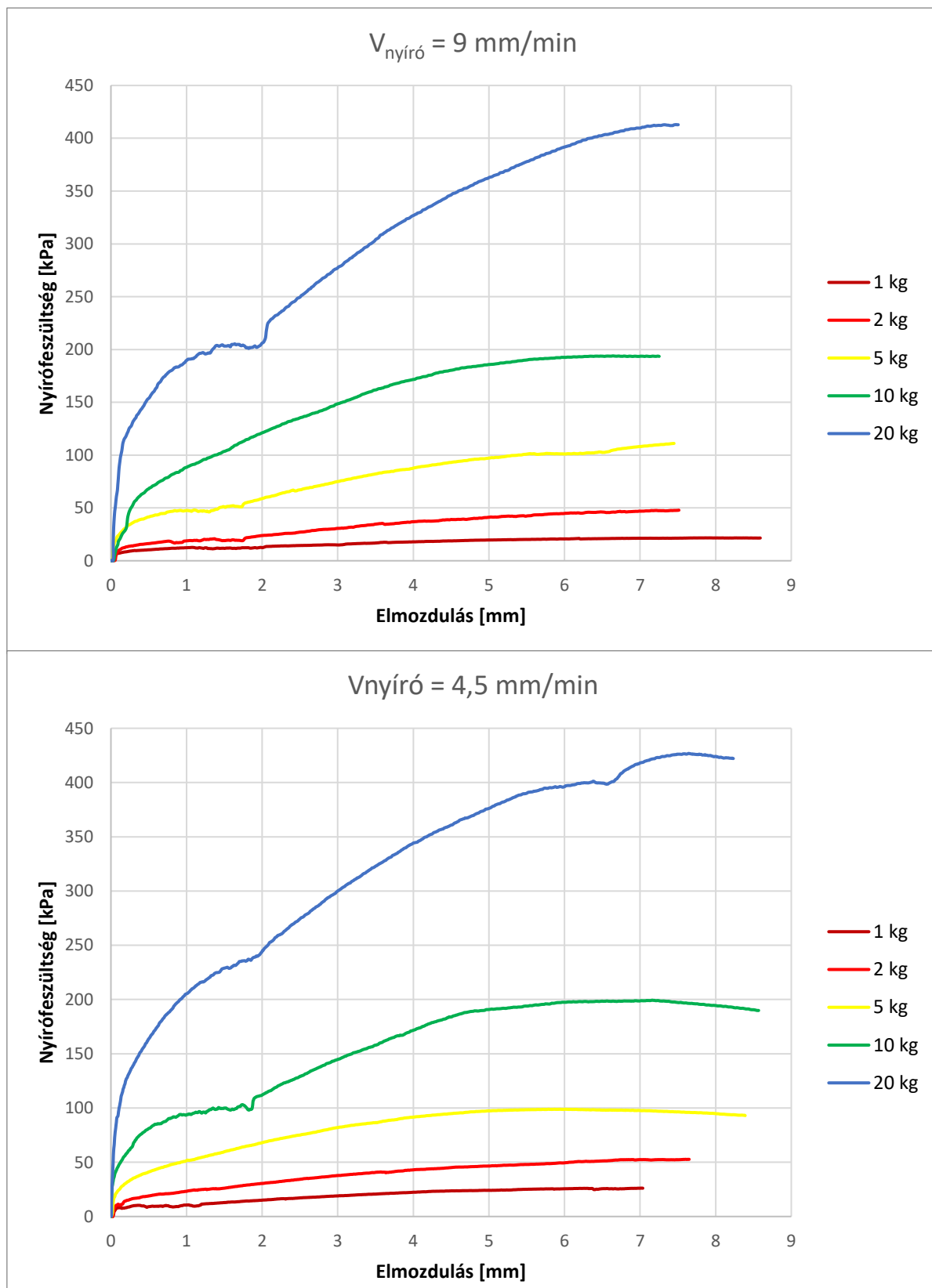
18. ábra A második nedvesítés alkalmazásával kapott nyírási diagramok

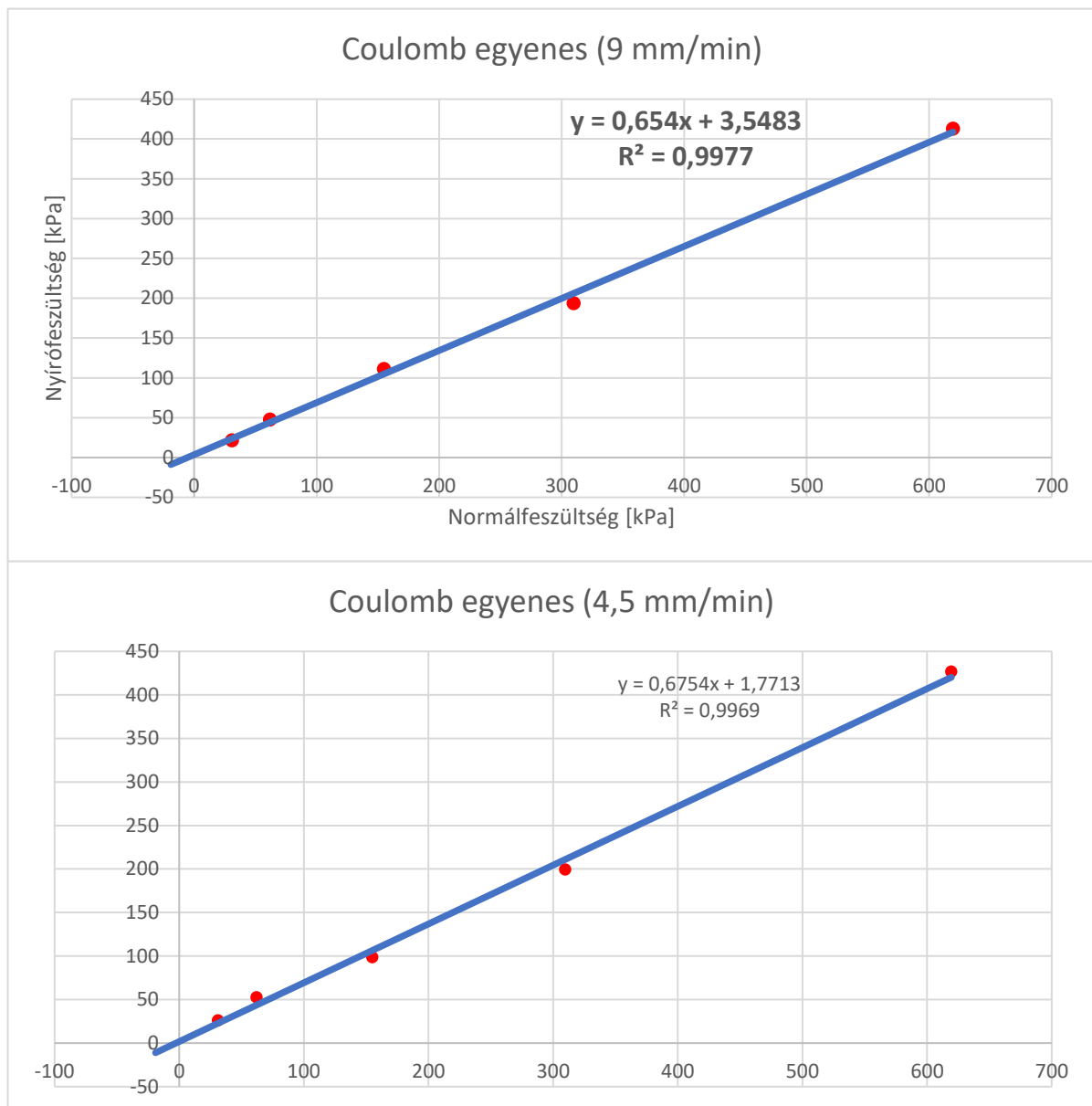


19. ábra A második nedvesítésnél kapott Coulomb egyenesek

3.2.5. III. nedvesítés

A harmadik nedvesítés esetében (2,99 m/m %), 9 mm/min nyírássebesség mellett a talaj kohéziójának értéke 3,548 kPa-ra, míg a belső súrlódási tényezője 0,654-ra adódott. 4,5 nyírási sebesség mellett ezek az értékek 1,771 kPa és 0,6754.

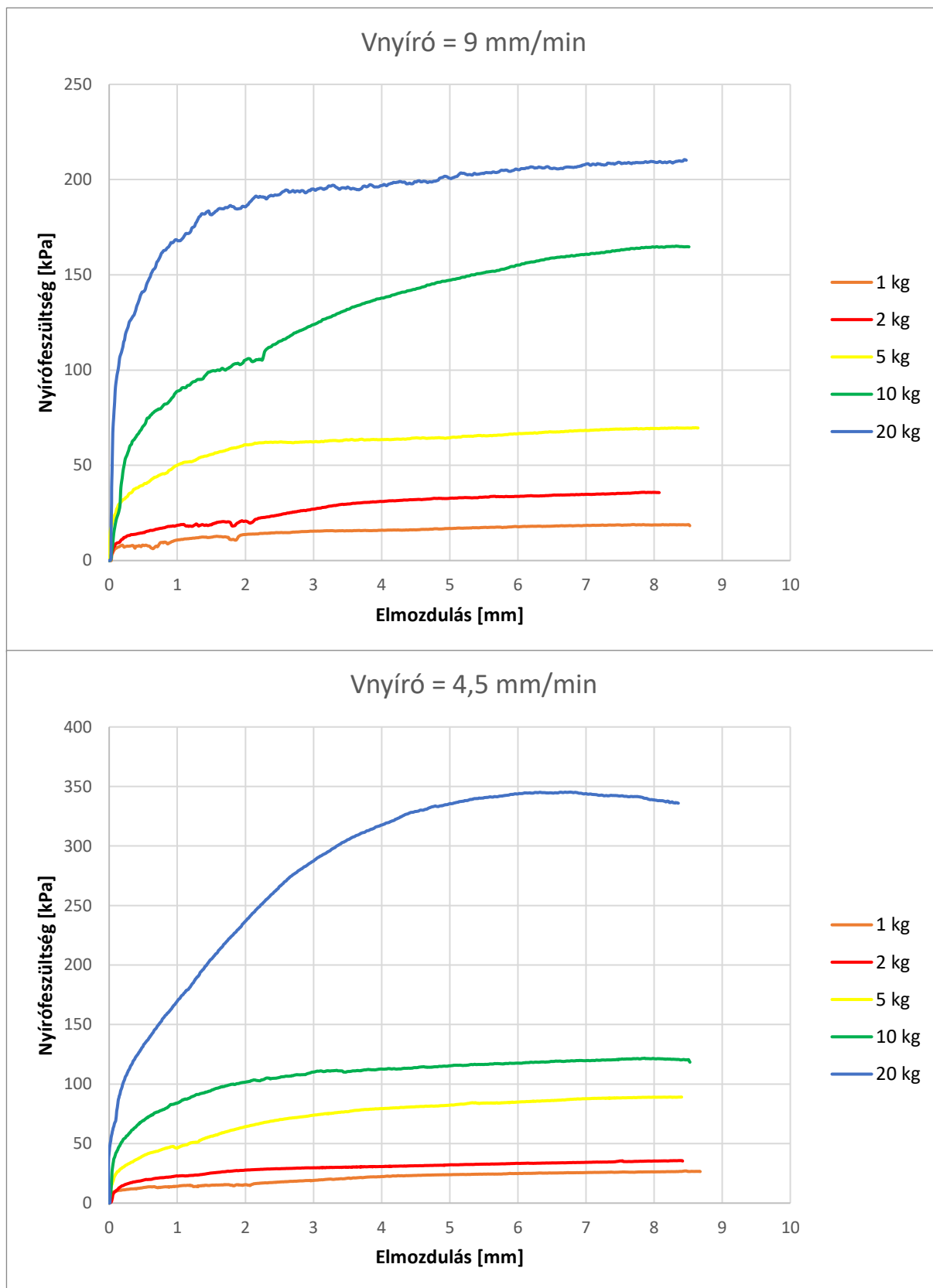




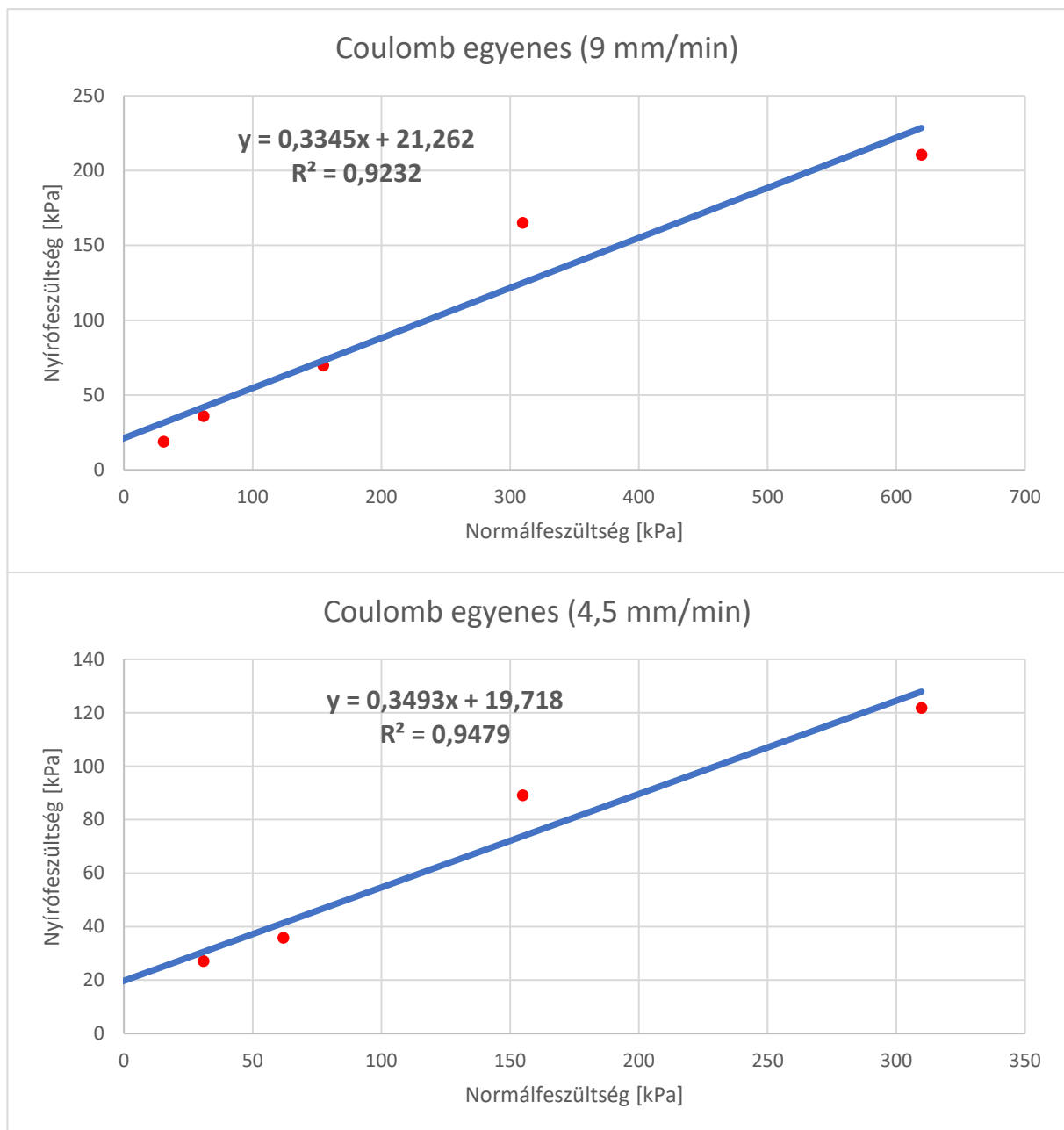
21. ábra A harmadik nedvesítés során kapott Coulomb egyenesek

3.2.6. IV. nedvesítés

A negyedik nedvesítés esetében (7,99 m/m %), 9 mm/min nyírássebesség mellett a talaj kohéziójának értéke 21,262 kPa-ra, míg a belső súrlódási tényezője 0,335-ra adódott. 4,5 nyírási sebesség mellett ezek az értékek 19,718 kPa és 0,35.



22. ábra A negyedik nedvesítés során kapott nyírási diagramok

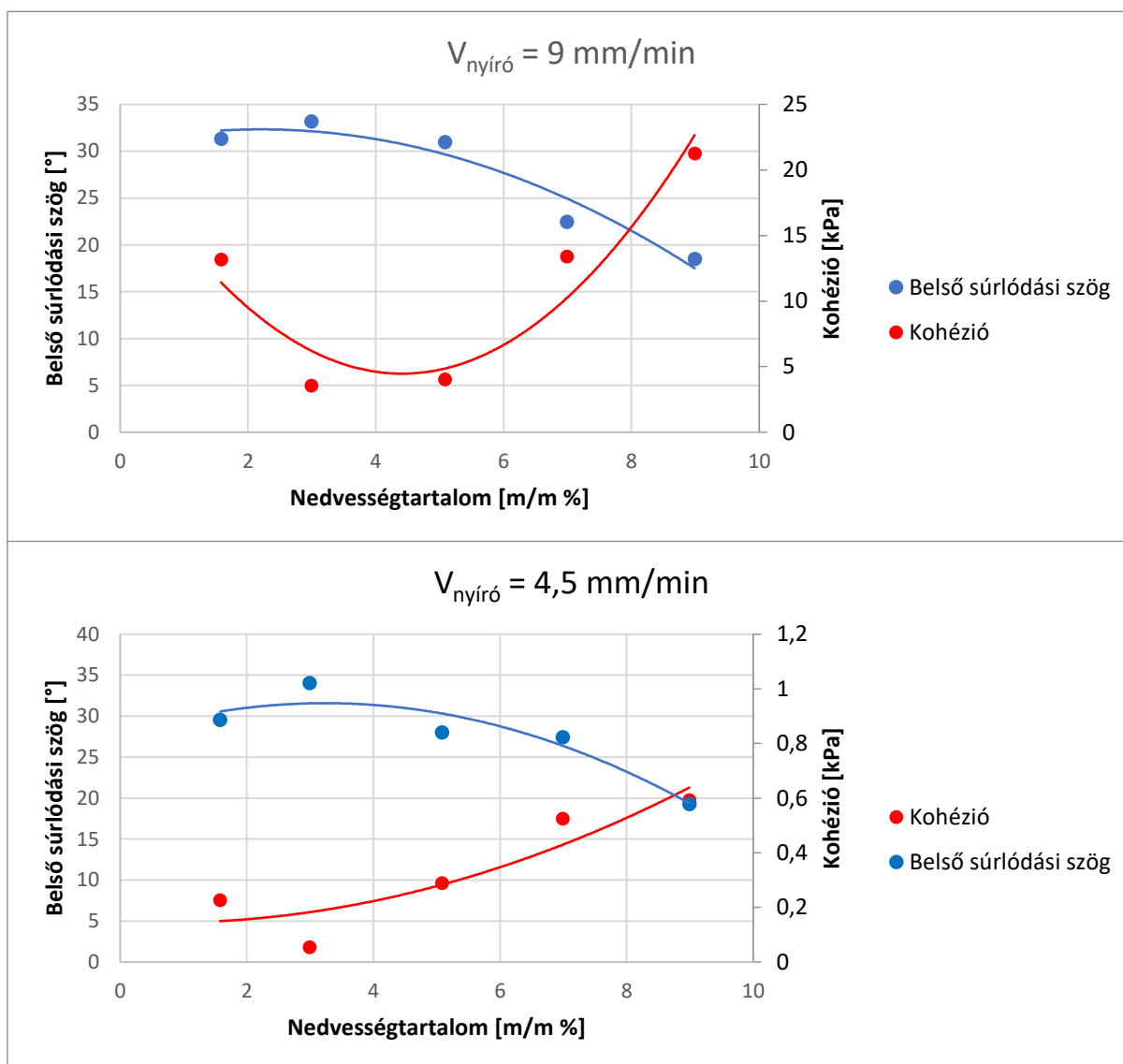


23. ábra A negyedik nedvesítés során kapott Coulomb egyenesek

3.3. A kohézió és a belső súrlódási szög nedvességtartalom függése

A mérési adatok alapján a vizsgált talaj kohéziója a nedvességtartalom növekedésével először csökkenni, majd ezt követően növekedni kezdett. 9 mm/min nyírási sebesség mellett ~ 5 m/m %-nál vált monotonitást a mérési pontokra illesztett másodfokú görbe. 4,5 mm/min esetében a mérési pontok hasonló tendenciát mutatnak.

A belső súrlódási szög, amely a talajok súrlódási tényezőjét határozza meg, a nedvességtartalom növekedésével csökkenni kezdett.



24. ábra A belső súrlódási szög és a kohézió nedvességtartalom függése

3.4. A mérés szöveges értékelése

A mérések során használt talajminta a szemcseösszetételét tekintve a homoktalajok közé sorolható, amelyek jellemzően non-kohezív tulajdonságokkal rendelkeznek. A kapott nyírási diagramok aszimptotikus jelleget követnek, amely szintén a kohézió nélküli talajokra jellemző elsősorban. A minta előkészítése során történő rostálással (0,5 mm) a kisebb

szemcsefrakciók felé tolódott el a vizsgált talaj (ISO szabvány szerint közepes homok), amely a kohézió növekedéséhez vezetett.

A talajminták nedvesítését a homogén szemcseeloszlásnak köszönhetően rendkívül pontosan sikerült elvégezni, ezt igazolják a mért gravimetrikus nedvességtartalom értékek is. A IV. nedvesítésnél (9 %) a minta előkészítése során is érezhető módon megnövekedett a kohézió, keverés közben nagyobb csomókká tapadt össze a talaj. Ez az állapot nagyban megnehezíti a nedvesség egyenletes szétoszlását.

A kapott eredményekből jól látható, hogy a nedvességtartalom növekedésével a talaj belső súrlódási tényezője csökkenni kezd. A kohézió a nedvességtartalom növekedésével csökkenni kezd, azonban a további nedvesítés során növekedés figyelhető meg az értékében. A legnagyobb mért nyírószilárdság 426, 81 kPa-ra adódott 3 m/m% nedvesség és 4,5 mm/min nyírási sebesség mellett.

A diagramok alapján jól látszódik, hogy a normálfeszültség növekedésével a nyírófeszültség egyenesen arányosan növekszik. Ezt bizonyítják a Coulomb egyenesek szerkesztése során kapott R^2 értékek is.

A nyírási sebesség változtatásával a mérési eredmények megváltoztak, ez alátámasztja a talajok viszkoplasztikus tulajdonságát. Jellemzően alacsony nedvességtartalom mellett a nagyobb nyírási sebesség esetén, míg magas nedvességtartalomnál a kisebb nyírási sebesség alkalmazásával érhető el nagyobb nyírószilárdság. A mérési adatok mennyisége azonban nem teszi lehetővé, hogy konkrét következtetéseket lehessen levonni a talajok nyírószilárdsága és nyírási sebessége között.

Mivel minden mérési beállítással 1 db mérés került elvégzésre, így a közölt adatok mérési bizonytalansága nagy. Ennek kiküszöbölésére a jövőben további ellenőrző mérések elvégzése szükséges!

4. Összefoglalás

A talajok nyírószilárdságán a nyírófeszültségekkel szemben tanúsított legnagyobb ellenállását értjük. Értékének kiszámítására a kutatók több képletet is megalkottak, de általánosságban elmondható, hogy a kohézió és a talaj belső súrlódásának összege határozza meg a nagyságát. A kohéziót a talajszemcsék felületén keletkező vékony filmrétegekben kialakuló kohéziós erők okozzák, míg a súrlódást a Coulomb által bevezetett értelmezéssel vizsgálhatjuk. Jól ismert, hogy a nedvességtartalom változása a talajok nyírószilárdságának, ezzel együtt pedig a kialakítható maximális tolóerő nagyságának megváltozását okozza.

A nedvességtartalom – nyírószilárdság kapcsolat pontosabb megismerése érdekében több mint 50 laboratóriumi mérést végeztem el, valamint számos gravimetrikus nedvességtartalom mérést is. A szárítószekrényes mérések az MSZ-08 0205-78 szabvány figyelembevételével kerültek elvégzésre. A vizsgált talaj a szemcseösszetételét tekintve a homoktalajok közé sorolható. Ezt igazolja a kapott nyírási diagramok aszimptotikus jellege is. A talajminta előkészítése során egy 0,5 mm lyukbőségű rostán lerostáltam a talajt, majd a nedvességtartalom pontos beállítása érdekében a folyamatos kevergetés mellett állítottam be a kívánt értéket.

A mérési adatok alapján elmondható, hogy a normálterhelés növekedésével egyenesen arányosan nő a nyírószilárdság, valamint a nedvességtartalom növekedésével a talaj belső súrlódási tényezője csökken. A kohézió értéke a nedvességtartalom növekedésével kezdetben csökken, majd a további nedvesítés hatására növekedés figyelhető meg. A méréssorozat alatt mért legnagyobb nyírószilárdság értéke 426, 81 kPa volt, 3 m/m % nedvességtartalom és 4,5 mm/min nyírási sebesség mellett.

A bemutatott vizsgálatok egy nagyobb kutatás részét képezik, így a jövőben több hasonló elrendezésű mérés elvégzését tervezem, valamint az adatokat terepen mért eredményekkel is szeretném kiegészíteni.

Irodalomjegyzék

- [1] G. C. Topp, J. L. Davis és A. P. Annan, „Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines.,” *Water Resources Research*, pp. 16, 574-582, 1980..
- [2] G. Várallyay , A mezőgazdasági vízgazdálkodás talajtani alapjai, Budapest: I.k, 2002.
- [3] MSZ 08 0205 - 78, *A TALAJ FIZIKAI ÉS VÍZGAZDÁLKODÁSI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA - MSZ 08 0205 - 78*, Magyar Szabványügyi Testület, 1978.
- [4] A. Böröczky, *Menet közbeni talajnedvesség-mérő szenzor tervezése*, Gödöllő: Szent István Egyetem, 2020..
- [5] P. Stefanovits, G. Filep és G. Fülek, Talajtan, Budapest: Mezőgazda Kiadó, 1999.
- [6] L. Laib, Terepen mozgó járművek, Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Ház Rt., 2002..
- [7] G. Sitkei, Gyakorlati áramlástan, Budapest: Szaktudás kiadó, 1997..
- [8] B. M. Csizmadia , J. Égert, T. Fekete , E. Gelencsér , C. Kósa és E. Nándori, *Mechanika Mérnököknek - Szilárdságtan*, B. M. Csizmadia és E. Nándori , szerk., Budapest - Gödöllő - Győr: Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 1999..
- [9] Á. Kézdi, Talajmechanika I., Budapest: Tankönyvkiadó, 1972..
- [10] M. G. Bekker, *Theory of land locomotion - The mechanics of vehicle mobility*, Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1956..
- [11] M. G. Bekker, „Russian Approach to Terrain-Vehicle Systems,” U.S.Army Research Office, Arlington , 1971..
- [12] E. W. Micklethwait, *Soil mechanics in relations to fighting*, Chercetsey, 1944..
- [13] Z. Jánosi és B. Hanamoto, „The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles is deformable soil,” in *Mechanics of Soil-Vehicle System*, Torino-Saint Vincent, 1961.
- [14] V. Kacigin, *Voproszi szelszkohozjajsztvennoj mehaniki*, %1. kötet13., 1964.
- [15] G. Komándi , „A talaj fizikai tényezőinek meghatározása a nyírási diagram és a vontatási jelleggörbe összefüggései alapján,” Gödöllői Agrártudományi Egyetem, Gödöllő , 1969..
- [16] M. Poncyliusz, „Applicability of asymptotic curves to describe test results from direct

shearing of soil,” in *3rd. Eur. ISTVS Conf.*, Varsó, 1986..

- [17] R. Reece, „Theory and practice of off-the-road locomotion,” in *The Annual Conference* , London, 1964..
- [18] W. H. Shöne, „Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres,” *Agricultural Engineering*, %1. kötet39., %1. szám5., pp. 276-281., 1958..
- [19] R. D. Wismer és H. J. Luth, „Off-road traction for wheeled vehicles,” *Journal off Terramechanics* , %1. kötet10., %1. szám2., 1973..
- [20] G. Pillinger, *A talaj deformációja és csillapítása gumiabroncsok alatt - PHD doktori értekezés*, Gödöllő: Szent István Egyetem, 2016..
- [21] S. T. Inc., *TDR 300 Soil Moisture Meter Product Manual*, Spectrum Technologies Inc., 2009.
- [22] L. Laib, A. Vas , P. Kiss, T. Mezei, F. Farkas , L. Jánosi , K. Nagy és V. Varga , *Traktorok-autók*, L. Dr. Laib és A. Dr. Vas, szerk., Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 1998., p. 62..
- [23] G. Sitkei , *Mezőgazdasági és erdészeti járművek modellezése*, Budapest: Akadémiai kiadó, 1986..
- [24] G. Sitkei , *A mezőgazdasági gépek talajmechanikai problémái*, Budapest: Akadémiai Kiadó , 1967..
- [25] P. Kiss, *Terepen mozgó járművek energetikájának egyes kérdései - PHD doktori értekezés*, Gödöllő: Szent István Egyetem, 2001.