

Zárójelentés

Egységes talajmechanikai paraméterrendszer kidolgozása terepjáró járművek számára

Nyilvántartási szám: T 046534

1. Bevezetés

A terepjáró járművek jelentős fejlődésen mentek keresztül az utóbbi évtizedekben. Az öszkerék-hajtás javítja a járművek stabilitását és terepjáró képességét. A katonai járművek kutatásának és fejlesztésének eredményeit sikeresen alkalmazzák a polgári járműveknél.

A tudományág intenzív kutatása az 1950-es években kezdődött. A terület interdiszciplináris, a mechanika, és matematika törvényeire támaszkodik és felhasználja a talaj-mechanika, a gépelemek, a járműgépészet, a járműdinamika és a számítástechnika kutatási eredményeit.

A kutatók törekvése a talaj-kerék kapcsolatban kialakuló fizikai változás matematikai leírására koncentrált. Bekker [5] (1961), a csúcsos nyírási görbe leírására javasolt egy képletet, amelynek pontatlansága hamar közismert lett. Jánosi [13] (1961) az aszimtótikus nyírási függvényt írta le egy képlettel, amelyet lánctalpas járószerkezeteknél javasolt alkalmazni.

Komándi [17] (1966) kiterjesztette a képlet alkalmazását fűvott gumiabroncs-talaj kapcsolatra azáltal, hogy Kred, empirikus állandót szabadföldi vontatási vizsgálatokból határozta meg.

Sitkei [29] (1967) a talaj-gumiabroncs kapcsolatot homoktalajokon vizsgálta és megállapította, hogy a kerék slip meghatározó szerepet játszik a tolóerő kialakulásában. Sitkei [27] (1978) kimutatta, hogy az aszimtótikus feltételezésnek megfelelően a számítási képlet nagy slip értékeknél kisebb kerületi erőt ad a valóságosnál. Ennek megoldására bevezette a S^* jellemző slip értékét, amely a fenti számítási probléma megoldását szolgálta.

Ezek a módszerek stacioner viszonyok között írják le elfogadható hibával a talaj-gumiabroncs kapcsolatban lejátszódó fizikai folyamatot. Ez erős közelítést jelent, mert még lassú haladás közben is a kerék jelentősen módosítja a puha talajprofil miközben a normál, és nyíróerők kifejtik hatásukat.

A jármű kerekének talajprofil módosító hatása megváltoztatja a talaj szerkezetét ezért valószínűsíthető a mechanikai paraméterek - úgymint a talaj kohézió és belső súrlódás - megváltozása. Emiatt feltételezhető, hogy a talaj-kerék kapcsolatban lejátszódó fizikai változás nem stacioner tehát a talaj-kerék kapcsolatban kialakuló tolóerő meghatározására szolgáló képletben a talaj kohéziója és belső súrlódása nem constans hanem a talaj nedvességtartalmának és a jármű adhéziós tömegének függvényében változik.

A talaj gumiabroncs kapcsolatban kialakuló tolóerőt meghatározó talaj kohézió és belső súrlódás többek között a talajnedvesség tartalom függvénye. A talaj nedvességtartalma önmagában nem alkalmas a talaj mechanikai állapotát jellemző talajkohézió és belső súrlódás előrejelzésére. Szükségesnek látszott egy olyan talaj paraméter bevezetése amely a nedvesség tartalmat a szemcseösszetételt és a porozitást azaz a talaj teher bírását együttesen jellemzi valamint eredményesen összeköti a talaj mechanikai és talajtani jellemzőit.

A fenti indoklás alapján ennek az összekötő funkciónak az ellátására alkalmasnak feltételeztük a talaj vízháztartását jellemző pF -érték és pF függvény bevezetését ezért az alábbi kutatási tervet javasoltuk és az OTKA jóváhagyása után dolgoztuk ki 2004-2007 közötti időszakban.

A szerződésben rögzített kutatási program a következő volt:

A kutatás célja: A talaj vízháztartását jellemző pF -érték ill. pF függvény ismeretében a talaj mechanikai és talajtani paramétereinek előrejelzése. Az optimális talajművelő szerszámok, gépek és gépcsoportok kiválasztásához szükséges a talaj mechanikai paramétereinek ismerete. Eddig azonban a néhány talajra korábban meghatározott adatokból nem lehetett egyértelműen következtetni más talajok hasonló tulajdonságaira. A fő problémát az okozza, hogy a nedvességtartalom önmagában nem jellemzi a talajállapotot, csak a szemcseösszetétel és sok egyéb, kisebb hatású paraméter számbavételével. Ez utóbbiakat egészíti ki hasznosan, új információkkal a pF görbe figyelembe vétele. Az utóbbi évek kutatásai azt mutatták, hogy reális lehetőség van a mechanikai és talajtani paraméterek összekapcsolására a pF görbe alapján. Az adatok feldolgozásához elsősorban a pF görbe alsó szakaszára van szükség a $pF=0$ és $pF=2,5$ értékek között. Fontos, hogy a pF görbe implicit tartalmazza a talaj sűrűségét is, mivel $pF=0$ állapotban a talaj telített..

Kutatási program éves bontásban:

2004-2005: A tipikus talajok víztartókéesség (pF) görbéjének felvétele a $pF=0$ és $pF=4,2$ értékek között, valamint a Kuron-féle higroszkóposági értékszám meghatározása, amely $pF=6,2$ értéknek felel meg.

A kiválasztott talajokon a mechanikai jellemzők (belső súrlódási szög, kohézió, teherbírás,) meghatározása a szántóföldi vízkapacitás ($pF=2,3$) és a $pF=4.2$ érték közötti nedvességtartalmaknál, megfelelő lépcsőkben.

A talaj mechanikai tulajdonságait jellemző talaj kohézió és belső súrlódás meghatározása a kiválasztott talajtípusokon, különböző talajtömörtség mellett, különböző pF értéket reprezentáló talaj nedvességtartalomnál. A mérések elvégzése különböző mélységben különböző talaj tömörtség mellett, különböző pF értéket reprezentáló talaj nedvességtartalomnál.

A mérések alapján a talajkohézió és belső súrlódás változásának bemutatása a talajtömörtség és a talaj vízkapacitását jellemző pF érték függvényében.

2006: A legfontosabb talajtani paraméterek meghatározása a kiválasztott talajokra. Ezek magukban foglalják a szemcseösszetétel, humusztartalom, a pH kémhatás, az összes sótartalom meghatározását. A feldolgozás során a talaj-mechanikai jellemzőket a pF-értékhez kell rendelni. Részeredmények publikálása.

2007: A vizsgálati eredmények alapján a pF görbe felvétele egy adott talajhoz a talajtani paraméterek ismeretében lehetséges. Ez lehetővé teszi az adatok konverzióját és a mechanikai jellemzők előrejelzését. Zárójelentés és az eredmények publikálása.

A kutatási munka kidolgozására felállított kutatócsoport a munkát elvégezte melyről az alábbi jelentésben számol be.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A talaj súrlódási tulajdonságai és a talaj kohézió.

A keréken kifejthető kerületi erő nagyságát a talaj súrlódási tulajdonsága és kohéziója alapvetően meghatározza. Ha a járószerkezet és a talaj egy közös sík mentén érintkeznek, akkor a Coulomb által kidolgozott törvény érvényes:

$$S = \mu \cdot N \quad \text{vagy} \quad \tau = \mu \cdot \sigma$$

ahol: S - a súrlódási erő,
N - a normális terhelő erő,
 μ - a súrlódási tényező.
 τ - a nyíró feszültség
 σ - a normális feszültség

A kapaszkodóval ellátott járószerkezet nyírja a talajt, ezért ilyenkor talaj talajon mozdul el és az elmozduláshoz a szemcsék közötti esetleges kötőerőket is le kell győzni. Ekkor az alábbi általános összefüggés érvényes:

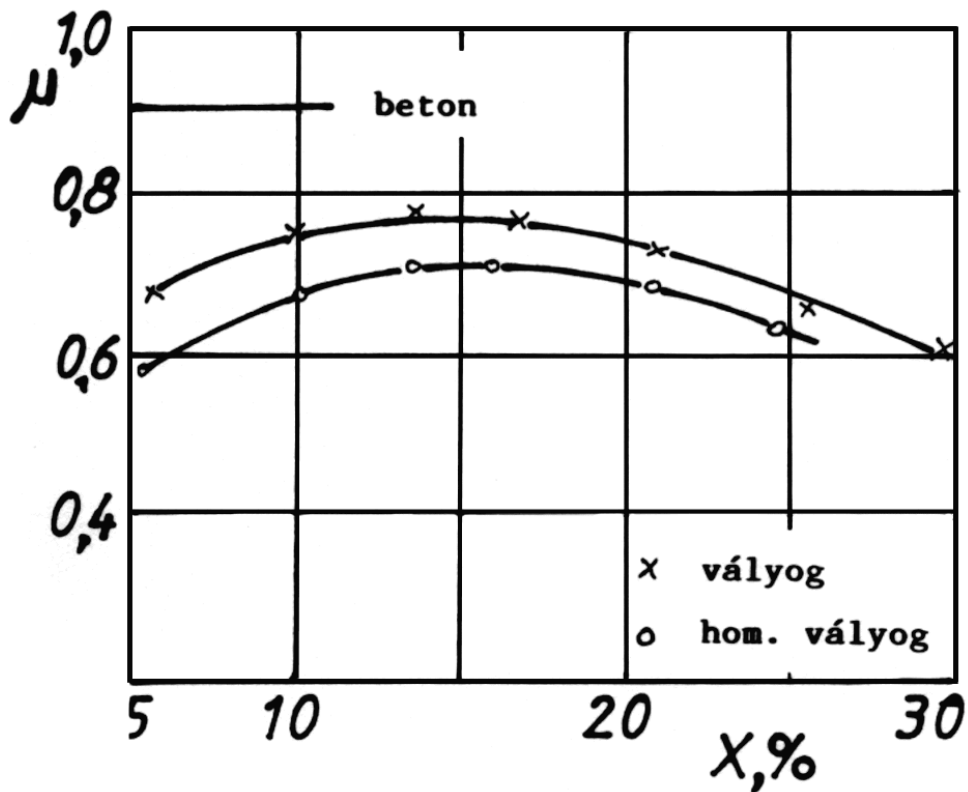
$$\tau = \mu_i \cdot \sigma + c$$

Ahol μ_i - a talaj belső súrlódási tényezője,
c - a talaj kohéziója.

A gumikerekes járószerkezet talajon vagy betonon mozog, ezért gyakorlati szempontból a gumi-talaj és gumi-beton közötti súrlódási tényezőnek van jelentősége. A kísérleti eredményeket az 1.ábrán láthatjuk. Sitkei [28] (1981) A talaj nedvességtartalma először növeli, majd 15-18% nedvességtartalom felett csökkenti a súrlódási tényezőt. Betonon a súrlódási tényező 0,9 érték körül vehető fel.

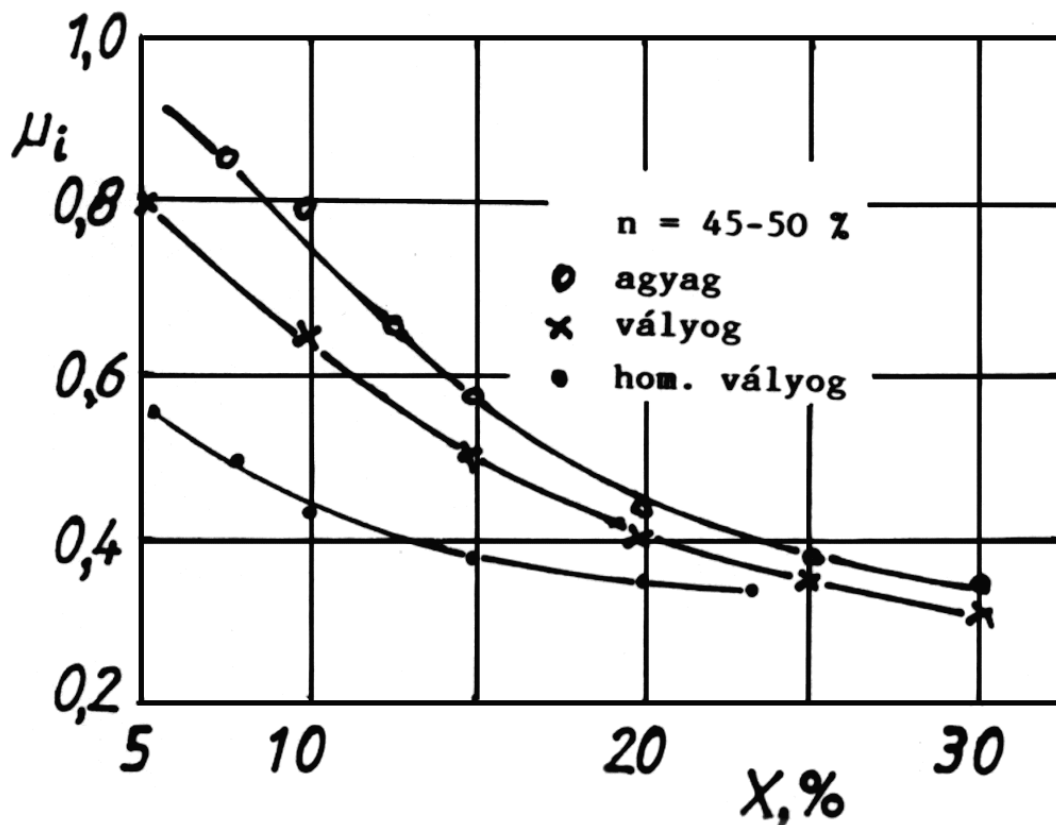
Az 1.ábra adatait átlagértékeknek kell tekinteni. A súrlódási tényezőt ugyanis kisebb mértékben a talaj tömörsége (porózussága), a felületi nyomás és a súrlódási úthossz is befolyásolja. A talaj agyagtartalma egyértelműen növeli a súrlódási tényezőt.

A talaj belső súrlódási tényezője alapvetően függ a szemcseösszetételtől, különösen az agyagtartalomtól. A porozitásnak szintén van bizonyos befolyása, a nagy porozitás csökkenti a súrlódási tényezőt. A nedvesség tartalom szintén döntő tényező, amely folyamatosan csökkenti a belső súrlódási tényezőt. A kísérletileg nyert átlag adatokat három tipikus talajra a 2. ábra mutatja be. Sitkei [28] (1981).



1. ábra

A talaj és az abroncs közötti súrlódási tényező a nedvességtartalom függvényében

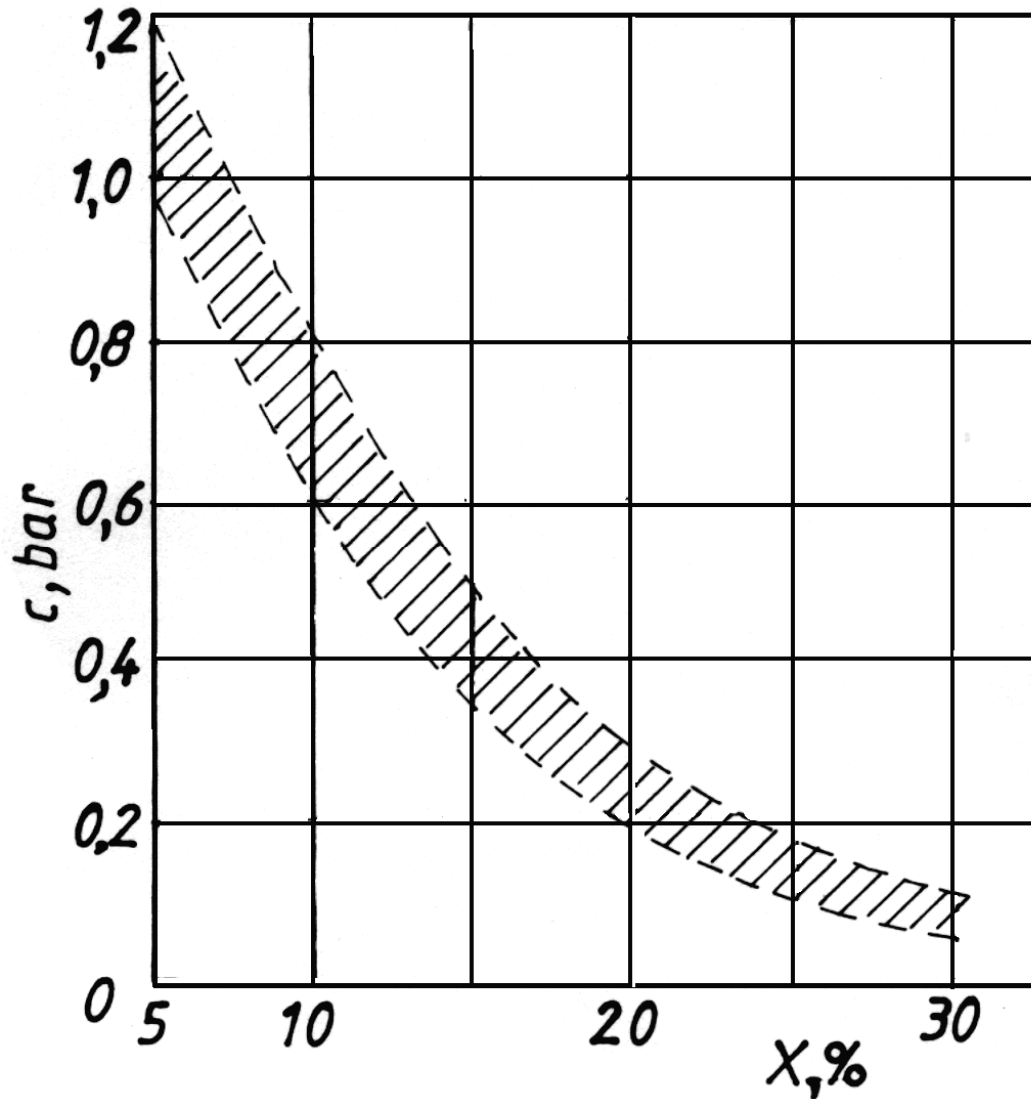


2. ábra

Különböző talajok belső sűrűdési tényezője a nedvességtartalom függvényében

Az ülepedett talajok szemcséi nedves állapotban összetapadnak. A szemcsék egymáson való elmozdításához járulékos nyírófeszültségre van szükség, amelyet *kohézió*nak nevezünk. A nyírásai folyamat során a deformáció gyorsan megszünteti a kohéziót, ezért kohézió csak addig hat, amíg a talajt nem deformálták. A járókerék okozta függőleges talaj deformáció a kohéziót általában jelentősen csökkenti.

A kohéziót döntően a nedvességtartalom, a térfogati sűrűség és az agyagtartalom határozza meg. Vályog talajok átlagos kohézióját a nedvességtartalom függvényében a 3. ábra mutatja, a 40-50% pórustartományban.



3. ábra

A kohézió várható értéke közepesen kötött talajon a nedvességtartalom függvényében

2.2. A talaj víz kapcsolat.

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 hő-fejlődéssel jár együtt, amely az első vízmolekula rétegre kb. 1000 kJ/kg, ez mintegy 40%-a a párolgási hőnek. A víz elvonásakor ezt a hőt többletként kell közölni, a párolgási hőn felül.

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

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$$

ahol: σ - a felületi feszültség,
 r - a kapilláris sugara.

A kapilláris vízemelés (h) az ismert $\Delta p = h \cdot \gamma$ összefüggés felhasználásával

$$h = \frac{2\sigma}{\gamma \cdot r}$$

ahol: γ - a víz fajszúlya [N/m^3]

A kapilláris nyomás következtében a gőznyomás a homorú felület felett kisebb lesz, mint a sík felület felett. A relatív gőznyomást a Thomson-formula alapján számoljuk:

$$\varphi = \frac{p_g}{p_s} = \exp\left[\frac{2\sigma\rho_g}{p_s\rho_v r}\right]$$

ahol: p_g, ρ_g - a vízgőz nyomása és sűrűsége a kapillárisban,
 p_s - a telített gőz nyomása szabad vízfelszín felett,
 ρ_v - a víz sűrűsége.

A relatív gőznyomás döntően függ a kapilláris sugarától. 0,36 nm sugarú pórusban a relatív gőznyomás csak 0,05 (5% relatív páratartalom), míg 100 nm sugarú kapillárisban már 98% a relatív páratartalom. Ha a környezet relatív páratartalma nagyobb a pórusban levő értéknél, akkor a parciális nyomáskülönbség hatására a víz a talajba diffundál.

A fentiek alapján a póruseloszlástól függően, mindig kialakul a talajban egy egyensúlyi nedvességtartalom, amelyet a szorpciós izoterma ír le a relatív páratartalom függvényében.

A talaj víztartó képességét a negatív kapilláris nyomás értékkel mint tenzióval jellemezhetjük. A tenzió kifejezhető a nyomómagassággal is ($\Delta p = h \cdot \gamma$), s ennek cm-ben megadott értékének 10-es alapú logaritmusát nevezik pF-értéknek.

A tenzióhoz más úton is eljuthatunk. A levegő vízpotenciálját alapvetően a relatív páratartalom szabja meg:

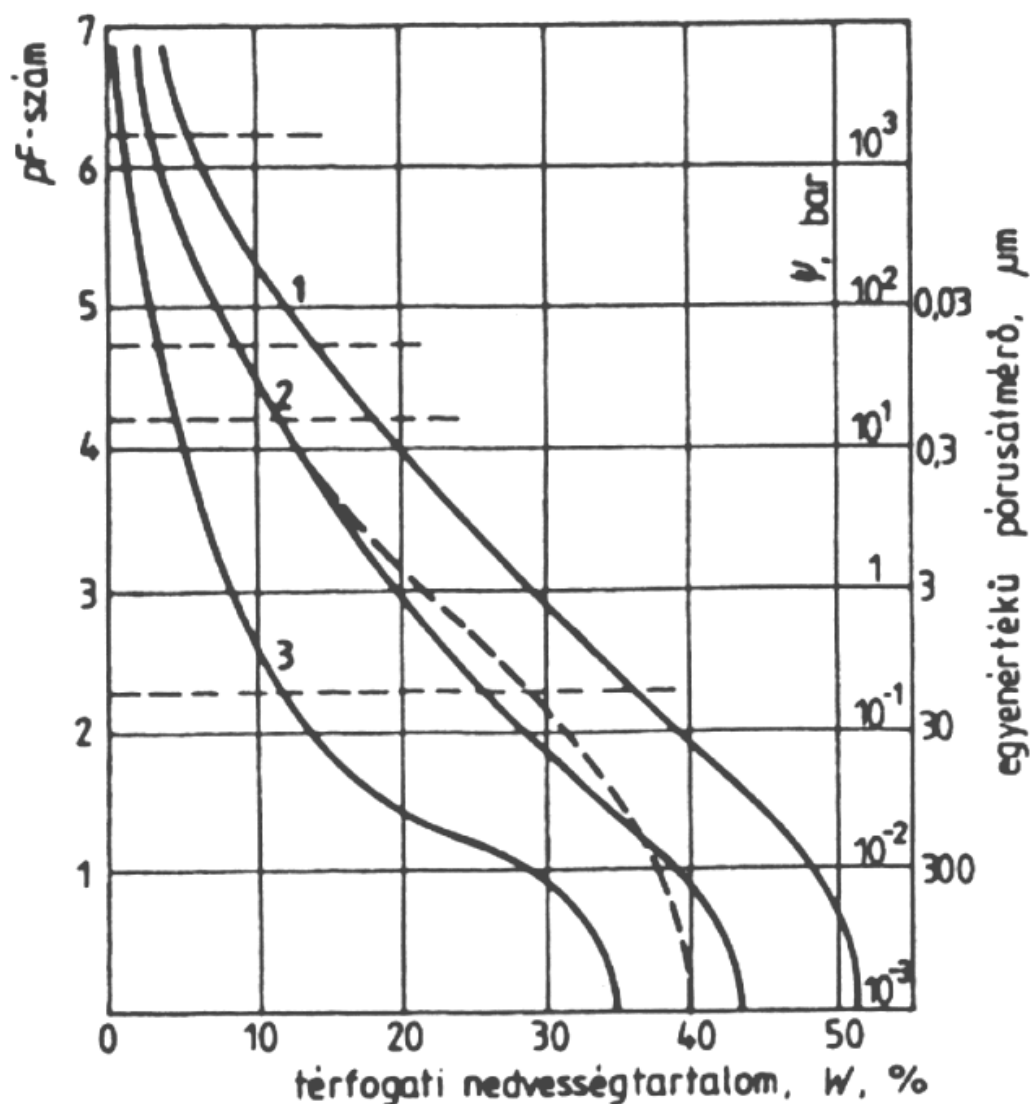
$$\psi = \frac{RT}{m_v} \ln \varphi$$

ahol R - az egyetemes gázállandó, $83 \text{ bar} \cdot \text{cm}^3/\text{mol}^\circ\text{K}$,
 m_v - a víz móltérfogata, $18 \text{ cm}^3/\text{mol}$,

T - a hőmérséklet, °K.

A fenti egyenlet alapján pl. 20°C hőmérsékleten és 50% relatív páratartalom mellett ($\varphi=0,5$) $\psi=936$ bar tenziót kapunk. Egyensúly akkor lép fel, amikor a talaj víztenziója ugyanakkora, mint a levegő relatív páratartalmának megfelelő tenzió.

A jellegzetes talajtípusok pF görbéit a 11. ábrán láthatjuk.

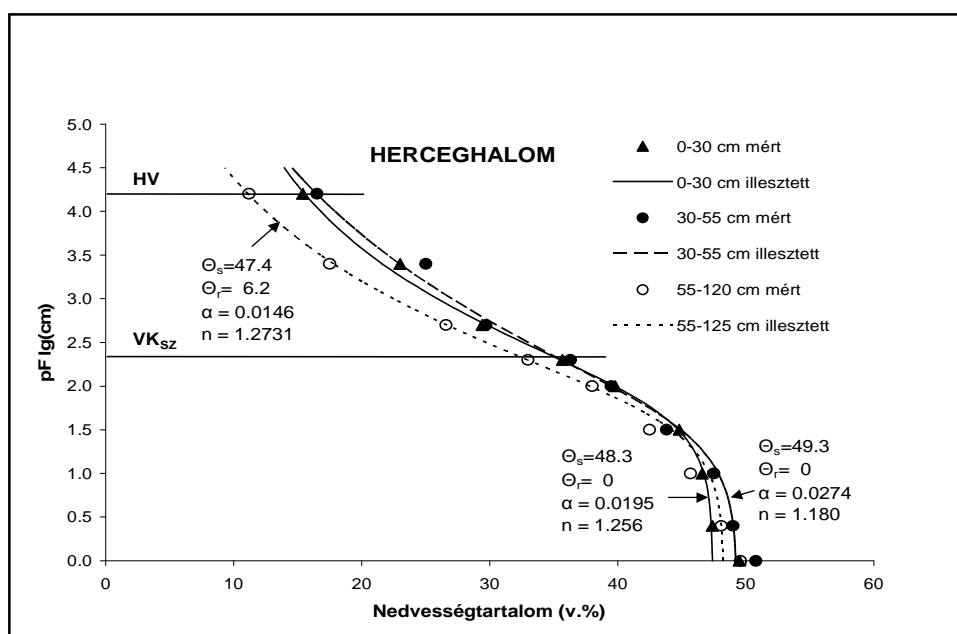


11. ábra
Különböző talajok pF görbéi
(1 anyag, 2 vályog, 3 homok)

A talaj tömörítésekor a nagyméretű pórusok száma csökken, míg a kisebb pórusok (1-50 μm tartomány) száma nő. Ennek megfelelően a pF-görbe lefutása kismértékben változhat (a szaggatott vonallal rajzolt görbe a 11.ábrán).

A szorpciós izotermához hasonlóan a pF-görbe is hiszterézissel rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy a talaj száradásakor más görbét kapunk, mint a talaj nedvesítésekor. A két görbe közös pontból indul a telítési állapotból és közös görbébe fut a pF=4-4,5 tartományban.

A talaj nedvességtartalmát a szívóerő függvényében ábrázolva a talaj pF-görbéje szerkeszthető meg, amelyről a különböző szívóerővel kötött nedvességfrakciók mennyisége közvetlenül leolvasható. A görbe elnevezését Scofield a pH analógiájaként alkalmazta (Scofield 1935) [37]. A talaj nedvességtartalmat térfogatszázalékban, a tenzió- értéket logaritmus vízoszlop-centiméterben ábrázoljuk. A pF-görbéről leolvasható vízgazdálkodási jellemzőket és az illesztett van Genuchten-függvényt az 12. ábra mutatja.



12. ábra.

A pF-görbe alakja és kitüntetett értékei (KFsz szabadföldi vízkapacitás, HV hervadáspon) a mért értékek és az illesztett van Genuchten-függvény paraméterek (θ_s , θ_r , α és n).

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 fontos következtetés tehető: két különböző talaj mechanikai paramétereit nem azonos nedvességtartalomnál, hanem azonos tenzióhoz tartozó nedvességtartalmaknál kell összehasonlítani.**

A pF görbe hipotézisunk szerint alkalmas lesz konverziós függvényként a talajtani és talajmechanikai paraméter rendszer összekapcsolására. A pF függvény minden pontja meghatároz egy-egy nedvességtartalmat és az ehhez tartozó szemcse eloszlást valamint porozitást.

Ha tehát a pF függvény diszkrét pontjaihoz meghatározzuk a talaj mechanikai tulajdonságait jellemző talaj kohéziót és belső súrlódási tényezőt, lehetővé válik egy egységes talaj paraméter rendszer kidolgozása. A rendszer megfelelő számú mérések birtokában alkalmas lehet a talajtani paramétereiből a talajmechanikai paraméterek illetve megfordítva a talajmechanikai paramétereiből a talajtani paraméterek előrejelzésére.

Munkánk célja azaz a kísérleti célkitűzésünk, a talaj gumiabroncs kapcsolatban kialakuló tolóerőt meghatározó talaj kohézió és belső súrlódás változásának meghatározása, három hazánkban jellemző nagy területen előforduló talajtípuson az adott talajtípus pF függvényének diszkrét pontjaihoz tartózan. További cél a talajkohézió és belső súrlódás változásának meghatározása a mélység függvényében különböző pF függvényértékek mellett.

3. Anyag és módszerek

A korábbi fejezetben megfogalmazott kutatási célt a következő módszerekkel értük el. A kutatás anyaga a talaj. Az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet javaslatára három, hazánkban igen sok helyen előforduló, talajtípust választottunk ki.

Ezekből szabványos mintavevő hengerekkel, valamint ömlesztve, zsákban mintát vettünk a talaj pontos beazonosítása valamint a pF érték, nedvességtartalom, és a talajmechanikai paraméterek meghatározása végett. Meghatároztuk továbbá a talaj típusát, szemcse eloszlását azaz a homok, iszap, agyag százalékos arányát, a humusztartalmát, pH kémhatását, és az összes só tartalmát. A jellemző talajadatokat a 3.1. táblázatban a felhasznált talajmintavevőt 13. ábrán mutatjuk be.

Lásd Kutatási jelentés (feltüntetve a közlemények között
13. ábra
Talajmintavevő eszköz

A talajminták nedvességtartalmát laboratóriumban és a szántóföldön is meghatároztuk.. Mértük a kiválasztott talajok pF érték, valamint nedvesség tartalom változásait az évszakok függvényében. A nedvességtartalom szántóföldi meghatározására helyszíni nedvességtartalom meghatározó műszert használtunk tudva azt, hogy ennek pontossága lényegesen rosszabb, mint a laboratóriumban használatos szárítószekrényes módszeré.

A helyszíni talaj-nedvességmérő műszer típusa 5910-A gyártó Soilmoisture Equipment Corp. U.S.A. Santa Barbara CA. volt. A berendezés az ellenállásmérés

elvén határozza meg a talaj nedvességtartalmát, mérési pontossága a leírás szerint $\pm 10\%$. A műszert a 14. ábrán mutatjuk be. A laboratóriumban elvégzett szárítószekrényes talajnedvesség meghatározása szerint a műszer pontossága megfelelt a dokumentációban leírt adatnak.

Lásd Kutatási jelentés (feltüntetve a közlemények között)

14. ábra

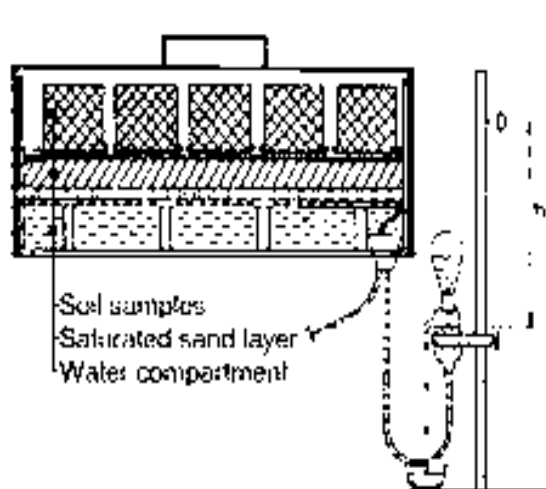
Talajnedvesség mérő műszer

A kísérletbe bevont talajok pF értékeinek szántóföldi meghatározását Eijkelkamp cég által forgalmazott 2725A típusú „Jet-fill tenziométerrel” végeztük.

A kutatási munka elfogadott tématervének megfelelően a kiválasztott talajtípusok pF függvényeinek meghatározása következett. Majd a pF függvények egyes pontjainak megfelelő vízkapacitással rendelkező talajminták mechanikai paramétereit azaz a talaj kohézió és belső súrlódás meghatározását végeztük szabadföldi és laboratóriumi nyírási vizsgálatokkal úgy, hogy az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézete a begyűjtött talajmintákból vett talajmennyiség nedvességtartalmát úgy állította be, hogy megfeleljen a pF görbe egy-egy előre meghatározott pontjának. Ezeknek a beállított talajmintáknak határoztuk meg a mechanika tulajdonságot jellemző paramétereit úgymint a talaj kohéziót és belső súrlódást laboratóriumi nyírási vizsgálatokkal.

A pF-görbe meghatározására az 1970-es évektől a Várallyay-féle homok és kaolinlap berendezést (Várallyay 1973) [39], újabban az Eijkelkamp cég által forgalmazott sandbox mérőkészülék együttes (Eijkelkamp Catalogue) alkalmazható. A pF-méréshez alkalmazott porózus lapnak az adott szívóerőnél maximális vízáteresztő-képességűnek kell lennie, de nem ereszhet át levegőt. Ez a követelményt nem teljesíthető egyetlen anyaggal sem a teljes szívóerő tartományban (0 – 1,5 MPa). A durvább pórusú anyagok (pl. a homok) nagyobb szívóerőnél áteresztik a levegőt, a finomabb pórusú anyagok vízáteresztő-képessége viszont a kis szívóerőnél nagyon kicsi. A pF érték meghatározására ezért a különböző szívóerő-tartományokban eltérő módszereket, és berendezéseket használunk.

A következőkben csupán a méréseknél alkalmazott Várallyay-féle pF-mérő berendezés működési elvét ismertetjük, ami elvileg teljesen azonos az Eijkelkamp rendszerével, csupán a technikai megoldások korszerűbbek (pl. Rajkai 1993) [38].



15. ábra. A homoklap és kaolinlap berendezés elvi vázlata. A kaolinlap berendezésben a szívóerőt vákuumszivattyú egész -500 cm vízpotenciál értékig biztosítja.

Az alacsony szívóerő-tartományban a különböző pF-értékek nedvességtartalmára a talaj szerkezetnek van döntő hatása. A meghatározást bolygatatlan szerkezetű talajmintákon végezzük. A pF0-2 tartományban "homoklap", a pF2-3 tartományban "kaolinlap" berendezések segítségével, amelyek elvi vázlatát a 15. és 16. ábrák szemléltetik.

A mintavételre speciális berendezés használatos. A speciális berendezés élezett acélhengerébe hézagmentesen illeszkedő, számozott betéthenger helyezhető. A betéthenger 5 cm átmérőjű és 5,0 cm hosszú. Térfogata 100 cm³. A mintavétel a következő: a talaj kb. 20x20 cm-es felszínét gondosan megtisztítjuk. Az élezett peremű mintavevő hengert, - benne a betét hengerrel - kalapáccsal ütve, csavarás nélkül, a henger külső oldalán levő jelig, a talajba süllyesztjük.

A talajba ütött mintavevőt néhányszor körbe fordítjuk, hogy a hengerben lévő minta a talaj tömegétől elváljon. A mintavevő hengert ezt követően kiemeljük a talajból, a betéthengert kivesszük, helyére az újabb mintavételhez, üres hengert helyezünk.

A betéthengerben levő talajminta hengerből kiálló részét vékony acéldróttal, vagy vékony pengéjű acélkészel eltávolítjuk. Ügyeljünk, hogy a vágási felület "természetes" porozitása ne változzon jelentősen. A betéthengerek alját és tetejét, fém- vagy műanyag fedővel lezárjuk. A mintavétel adatait és a betéthengerek számát feljegyezzük.

16. ábra. A nyomásmembrános készülék vázlata. A kamra légterében a kívánt nyomást nagy nyomású sűrített levegő vagy kompresszor biztosítja.

A meghatározás alapelve: A vizsgálatra kerülő bolygatatlan, vagy bolygatott szerkezetű talajmintát, a vízzel történő telítés után porózus lapra helyezjük, és különböző szívóerőnek tesszük ki, amelynek eredményeként a talajból a szívóerőnél gyengébb erőkkel kötött víz eltávozik. Az egyes szívóerőknél - az egyensúlyi állapot elérése után - súlyméréssel határozzuk meg a talaj nedvességtartalmát. Feltételezzük, hogy a súlyváltozást csak a talajminta nedvességtartalom-változása okozza.

Szükséges eszközök: Homoklap-berendezés tartozékaival (14. ábra): 9 mm vastag, átlátszó plexiből készített 350*330 mm belső alapterületű és 170 mm belső magasságú kád, benne 10 mm vastag, 4 mm átmérőjű furatokkal lyuggatott, 25 mm magas, 13*13 mm keresztmetszetű lábakon álló kivehető plexi tartólap. A tartólapra 15 mm vastagságban gyapot-réteg kerül, majd erre a porózus töltőanyag. A töltőanyag pF1 esetében 2 cm vastag durva homok, pF1,5 és 2 estében 2-3 cm vastagságú finom homok. A töltőanyag felszínét finomlyukú szitaszövet borítja.

A kaolinlap-berendezésben a töltőanyag pF_{2,3} értékhez finom homok és kaolin 2:1 arányú 2,5-3,5 cm vastagságban rétegezett keveréke, míg pF_{2,7} értékhez a finom homok és kaolin 1:1 arányú, 4-5 cm vastag rétege.

A meghatározás menete: A laboratóriumba szállított eredeti szerkezetű (bolygatatlan) hengerek fedőit levesszük és a henger aljára gumikarikával finomszövésű műanyag szitaszövetettel borítjuk.

A hengereket ezt követően a felső élig, szobahőmérsékletű vízzel telítjük, amíg a minta tömege az ellenőrző tömegmérések szerint nem változik. A méréseket tára- vagy gyorsmérlegben végezzük, 0,01 g pontossággal. Az egyensúlyi tömegetből számítjuk a talaj teljes vízkapacitásának megfelelő pF₀ érték nedvességtartalmát. A víz ezt követően hengerek alsó éléig ér. Az egyensúly beállása után tömeg a pF_{0,4} vízpotenciálérték (a 2,5 cm-es vízpotenciál) ebből számítható.

A mintahengert ez után a "homoklap" berendezésbe állítjuk. A szívóerőt mm-beosztású, vasállványon mozgatható nívópalackkal állítjuk be 10, 32 és 100 cm-es (azaz pF_{1,0} - 1,5 - 2,0) értékre. A homoklapra helyezett hengereket addig tartjuk egy-egy adott szívóerőn, amíg a henger tömege nem változik. A mérés alatt a párolgást fedővel küszöböljük ki. A fedél a mérő légteret páratelten tartja. Az egyensúlyi tömegek szolgálnak a különböző szívóerőkön visszatartott nedvességmennyiségek számítására.

A mérést ezt követően az ún. "kaolinlap" berendezésen folytatjuk. A "kaolinlap" 600 cm-es szívóerőig nem ereszt át levegőt. A szívóerőt vákuummal állítjuk be. A vákuumot vákuumszivattyú állítja elő, és higanyos manométer szabályozza. A kaolinlapra helyezett hengerek egyensúlyi tömegét 200 és 501 cm-es vízoszlop szívóerőn (pF_{2,3} és pF_{2,7}) mérjük és számítjuk.

A hengerben levő talajt a mérés befejezését követően veszteség nélkül fém edénybe töltjük és szárítószekrényben 105 C°-on súlyállandóságig, szárítjuk. Megmérjük a száraz tömeget. Ugyancsak meghatározzuk a fémhenger, a műanyag szitaszövet és a szorító gumikarika együttes tömegét.

Számítás: A különböző szívóerővel mért együttes tömegeből a fémhenger + szerelvények, valamint a hengerben levő száraz talaj tömegét levonva közvetlenül az egyes pF-értékeknél mért nedvességtartalmat kapjuk. Mérés időtartama alatt ügyelni kell a mérőhelység hőmérsékletének állandóságára.

A víz-potenciál meghatározása pF 2.7 felett nyomásmembrános készülékkel történt. A meghatározást a vizsgálat célkitűzésétől, a készülék típusától függően bolygatott, vagy bolygatatlan szerkezetű talajmintákon végezzük, membránként cellofánt alkalmazó nyomásmembrános készülékben, melyet a 16. ábrán mutatunk be.

A nyomásmembrános készülék acélból készült, 20-30 cm átmérőjű kamra, amelyet légmentes fedél zár le. A kamra felső részének aljára helyezett finomszövésű műanyag szitaszövetre vízbe áztatott cellofán membránt helyezünk. A membrán a vizet áttereszt, de kb. 2,0 MPa nyomásig levegőt nem ereszt át. A nyomás alatt álló felső légtérben a cellofánra helyezzük a talajmintákat, míg az azokból kipréselt víz a

cellofánon keresztül a túlnyomásmentes alsó légtérbe jut és annak nyílásán kicsöpög a készülékből.

Szükséges eszköz: Nyomásmembrános készülék tartozékaival, durvább és finomabb lyukméretű műanyag szitaszövet, cellofán, 1 cm magas, kb. 4 cm átmérőjű, számozott műanyag gyűrű, sűrített levegő, vagy kompresszor nyomásszabályozóval.

A meghatározás menete: a hengerekből kivett talajmintát vízben szuszpendálva, majd a gyűrűbe töltve 0,25 és 1,5 MPa nyomás (pF_{3,4} és 4,2) alá helyezzük a nyomásmembrános készülékben.

A vízzel telített talajpépből diónyit, fémspatulával a nyomásmembrános készülék előzetesen átnedvesített és sima cellofánjára elhelyezett, számozott gyűrűbe helyezzük. A gyűrű számát feljegyezzük. Ügyelni kell a talaj és a cellofán jó érintkezésére, anélkül hogy arra a pépet rákennénk vagy rányomnánk.

Bolygatatlan talajminta alkalmazása esetén: a pF_{2,7}-es érték meghatározását követően a mintahenger behelyezése után a készüléket lezárjuk és a cellofán feletti térben a meghatározott nyomást (palackból vagy motoros kompresszorral) biztosítjuk az egyensúly eléréséig (3-10 nap).

Az egyensúlyi állapot eléréséhez szükséges idő elteltével a készülékből óvatosan kiengedjük a sűrített levegőt, majd a nyomás megszűnése után a készüléket felnyitjuk, és a gyűrűben levő talajmintákat becsiszolt fedelű mérőedénybe tesszük és szárítószekrényben 105 C°-on meghatározzuk a nedvességtartalmát.

Számítás: A súlyszázalékban kifejezett nedvességtartalmat a talaj térfogat-tömegével megszorozva, térfogat %-ra számítjuk át és ábrázoljuk (pF-görbe). A talaj térfogat-tömege nem más, mint az alacsony pF tartományban a mérésekhez használt bolygatatlan szerkezetű talajminta száraz tömegének századrésze.

Megjegyzés: Az állandó térfogattömeg feltételezése egyszerűsítő közelítés, amely nem duzzadó talajmátrixú mintákra teljesül.

A meghatározás a mintavételt is beleértve, idő- és költségigényes. Gyakorlati célokra gyakran kielégítő a pF-görbe értékeinek - így a teljes vízkapacitás (pF₀), a szabadföldi vízkapacitás (pF_{2,3}), a holtvíztartalom (pF_{4,2}) - közelítő értéke.

3.1 A talaj mechanikai paramétereinek meghatározása

A kiválasztott talajok mechanikai paramétereinek meghatározásához szabadföldön torziós, laboratóriumban szekrényes nyírókészüléket használtunk. A torziós készülék csak a maximális nyírási feszültséget méri. A készülék nyírófeje szárnylapátos és három méretben áll rendelkezésre. A nyírásakor a szükséges talajnyomást - azaz a jármű tömege által létrehozott normál feszültséget - terhelő tömeggel hoztuk létre úgy, hogy az nagyságrendileg megfeleljen a jármű által létrehozott talajnyomásnak.

A torziós talajnyíró készülék típusa Eijkelkamp 14.5 volt. A berendezés három szárnylapáttal rendelkezett, méretei a következők:

Átmérő	Hosszúság
16 mm	32 mm
20 mm	40 mm
25.4 mm	50.8 mm

A berendezés méréshatára 0-260 kPa volt 20 mm szárnylapát átmérőnél és 520 kPa volt 16mm szárnylapát átmérőnél. Méréseimhez tekintettel a talaj állapotára a 20 mm átmérőjű szárnyas lapátot használunk. Két esetben vált szükségessé a 16 mm átmérőjű lapát használata.

A normál feszültséget létrehozó tömeget 3, 5, és 7 kilogrammban határoztam meg mert ez 93,7 kPa, azaz 1 bar talajnyomást illetve 156,2 kPa, azaz 1,5 bar és végül 218,6 kPa, azaz cca 2 bar talajnyomást jelentett figyelembe véve a szárnylapát átmérőjét. A torziós talajnyíró készüléket a 17. ábrán a normál terhelést biztosító tárcsával az eszközt a 18. ábrán mutatom be.

A talajnyírásokat három szinten azaz a talajfelszínen, 25 cm, és 50 cm mélységben végeztem el. A berendezés a maximális nyírófeszültséget határozta meg a helyszínen valós körülmények között. A talajfelszínen elvégzett mérések után 25 cm-re majd 50 cm-re ástam le óvatosan - majd elvégeztem a talaj nyírását - úgy, hogy lehetőleg a talaj tömörödöttségét ne változtassam meg.

Lásd Kutatási jelentés (feltüntetve a közlemények között)

17. ábra

Torziós talajnyíró három szárnylapáttal

A talaj teherbírásának ellenőrzésére alkalmanként kúpos penetrációs vizsgálatot is végeztem. Ennek célja csupán az volt, hogy nagyságrendileg összehasonlítsam a mért értékeket a szakirodalmi adatokkal azért, hogy ne vegyem figyelembe a szélsőséges talajállapotokat. Az alkalmazott penetrométer típusa Eijkelkamp 69.87 számú volt. Méréshatára 5000 kPa volt 20.6 mm kúpátmérő mellett. A penetrografot a 19. ábrán mutatom be.

A kiválasztott talajminták mechanikai tulajdonságait reprezentáló talajkohézió és belső súrlódás meghatározását laboratóriumban Eijelkamp 21.1998 típusú nyírókészülékkel végeztük különböző pF értékű talajoknál. A berendezés szekrényes nyírókészülék volt, amelynek mérési pontossága kisebb volt, mint 1.0% a berendezés dokumentációja szerint.

Lásd Kutatási jelentés (feltüntetve a közlemények között)

18. ábra

Torziós nyírókészülék a normálterhelést biztosító tárcsával

Lásd Kutatási jelentés (feltüntetve a közlemények között)

19. ábra

Eijkelkamp penetrograf

4. Eredmények

A korábbi fejezetben megfogalmazott kutatási cél elérése érdekében elvégzett méréseket feldolgozva az alábbi táblázatokban foglaltuk össze.

A 4.1, 4.2 és 4.3 táblázatokban a három kiválasztott talaj mért pF-értékeit mutatjuk be. A mért adatok alapján megszerkesztett pF görbéket a 20. ábrán mutatjuk be.

A pF görbék jellemző pontjaihoz tartozó talajmintáknak meghatároztuk a szabadföldön és laboratóriumban nyírás vizsgálattal a nyírófeszültség maximumát három normál terhelésnél. Ezek mármint a normális terhelések megfeleltek 1, 1.5, és 2 bar talajnyomásnak

A méréssel meghatározott három maximális nyírófeszültség értékre egyenes illesztettünk és kiszámoltuk az egyenes iránytangensét - amely a talaj belső súrlódásának- és meghatároztuk az egyenes függőleges tengely metszékét amely a talaj kohéziójának felelt meg. Ezeket a mért és számított eredményeket egy talajtípusra mintaképpen a 4.4.,4.5., 4.6., táblázatok tartalmazzák, a maximális nyíró feszültség értékeit a normális feszültség függvényében egyes pF értékek esetében – szintén csak mintaképpen – a 21., 22. ábrában is bemutatjuk.

Az eltel négy év alatt több mint ezer talajnyírást végeztünk a három vizsgált talajtípusnál, különböző pF értékek mellett. Minden pF értéknél a méréseket háromszor megismételtük. Az elvégzett mérések átlagait a 23., 24., és 25. ábrában mutatjuk be.

Az ábra értékelése alapján megállapítható, hogy a szárazabb talaj állapotnál mind a talaj kohézió mind a belső súrlódás növekszik, csupán a növekedés mértéke különbözik a vizsgált talajtípusoknál.

Ezt a kutatási eredmény megerősíti az korábban elvégzett talajvizsgálat eredményét amelyet a 26.ábrán mutatunk be. Ezek szerint a talaj tömörségének növekedése a talaj kohézióját változtatja adott nedvességtartalom mellett.

A talajok pF értékeinek illetve ebből megrajzolt pF görbe meghatározása rendkívül időigényes feladat. Valószínűsíthető, hogy ezért nem alkalmazzák a pF görbét jelentőségének megfelelően.

Ennek áthidalására az MTA Talajtani és Agrokémiai kutatóintézete kidolgozott egy pF görbe számítási módszert amely néhány pF értékből egyéb talajtani paraméterek segítségével, az intézet adatbázisára támaszkodva,matematikai eljárással meghatározza a pF görbét.

Az erre a számítási módszerre kidolgozott szoftwaret megvásároltuk az MTA Talajtani és Agrokémiai kutatóintézettől és számítással is meghatároztuk a mért pF görbéket majd a szoftwaret alkalmassá tettük a talaj mechanikai tulajdonságait reprezentáló talaj kohézió és belső súrlódás előrejelzésére.

A TALAJTANonc becslési eljárásai négy csoportba sorolhatók. A becslési eljárás kiválasztását és a talajra jellemző adatok megadását követően, kell elvégezni. A rendelkezésre álló lehetőségeket a 4.7 táblázatban mutatjuk be.

Nr.	Adatbázis illetve Szerző(k)	Függvény	Bemenő adatok
1.	TAKI adatbázis RAJKAI et al., 1981	$\Theta = \frac{\Theta_s}{1 + (\alpha \cdot h)^n}$	térfogattömeg, szervesanyag-tartalom, homok, iszap és agyag frakció
2.	TAKI adatbázis RAJKAI et al., 2004	$\Theta = \frac{\Theta_s}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^{1-1/n}}$	térfogattömeg, szervesanyag-tartalom, homok, iszap és agyag frakció
3.	TAKI adatbázis	$\Theta = \frac{\Theta_s}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^{1-1/n}}$	Arany-féle kötöttség vagy homok, iszap és agyag frakció
4.	HYPRES adatbázis WÖSTEN et al., 1999	$\Theta = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^{1-1/n}}$	térfogattömeg, szervesanyag-tartalom, homok, iszap és agyag frakció

Nr.	Adatbázis illetve Szerző(k)	Nedvesség-potenciál értékek [cm]	Bemenő adatok
5.	TAKI adatbázis (nem szikes talajok) RAJKAI et al., 1981	1; 2,5; 10; 31; 100; 200; 501; 2.512; 15.850; 1.585.000	térfogattömeg, szervesanyag-tartalom, homok és agyag frakció, iszap frakciók
6.	TAKI adatbázis (szikes talajok) RAJKAI et al., 1981	1; 2,5; 10; 31; 100; 200; 501; 2.512; 15.850; 1.585.000	térfogattömeg, szervesanyag-tartalom, CaCO ₃ és sótartalom, Na _{Herke} érték
7.	UNSODA adatbázis RITCHIE et al., 1999	0; 300; 15.850	térfogattömeg, szervesanyag-tartalom, homok és agyag frakció

4.7. táblázat

A TALAJTANonc zárt alakkal megadott víztartókéesség-függvény paramétereire becslést adó eljárásai és a fejlesztésükhöz használt adatbázisok

A kiegészített TALAJTANonc programcsomag segítségével meghatározott talajkohézió és belső súrlódás értékeit felhasználtuk a korábban kidolgozott mozgékonyági programban [20., 21.].

A program szimulációs eljárással képes előre jelezni a terepen haladó jármű mozgásképességét azaz a jármű haladási sebességét, hajtóanyag fogyasztását. Majd a számítási eredményeket összevetettük a rendelkezésünkre álló korábbi szabadföldi mérésekkel. Ezek alapján elmondható, hogy a terepen mozgó járművek mozgásképességét jellemző paraméterek számítási pontossága az általunk kidolgozott talaj paraméter rendszert felhasználva nem romlott azaz kisebb volt mint az elvárt 8 %.

A kutatási cél elérése érdekében végzett szabadföldi és laboratóriumi mérések feldolgozott adatai adatbázisban a kidolgozónál rendelkezésre állnak.

5. Eredmények értékelése, megbeszélés

A korábbi fejezetben megfogalmazott kutatási cél elérése érdekében elvégzett méréseket értékelve elmondható, hogy a talajok pF értéke és görbéje alkalmas a talajtani és talajmechanikai adatbázis eredményes összekapcsolásra és ezáltal egységes talaj paraméter rendszer kidolgozására.

A vizsgált talajok pF értékeinek függvényében megrajzolt talajkohézió és belső súrlódás monoton növekvő változása elfogadható a korábbi szakirodalmi adatok ismeretében. Ezzel a módszerrel lehetővé vált a talajtani és talaj mechanikai paraméter rendszer összekapcsolása és ezáltal az egységes talajmechanikai paraméter rendszer kidolgozása.

Ha ezt a módszert a talajtan tudományterület művelői elfogadják és a terepjárás elmélet kutatói alkalmazzák további talajokra elvégzett mérések után általánosítható következtetések is kidolgozhatók a talajok homok-iszap-anyag frakcióinak ismeretében.

A mérések értékelésekor járulékos következtetések a következők:

A talaj kohéziója a mélység függvényében jelentősen növekedett. A növekedés mértékét a tömörítés jelentősen csökkentette. Ez a megfogalmazás tehát azt jelenti, hogy a jármű haladása közben összetöri a talajt és ezáltal csökkenti annak kohézióját.

A talaj belső súrlódása a mélység függvényében kismértékben csökkent, a tömörítés ezt csökkenő tendenciát némileg növelte. A változás itt nem tűnik egyértelműnek és a változás mértéke is lényegesen kisebb mint a talaj kohéziójánál.

A talaj nyírószilárdsága a talaj nedvességtartalmának növekedésével csökkenő tendenciát mutatott. Ez a tendencia megfelel a szakirodalomban megtalálható adatoknak. A nagyobb értékek a tömörített állapothoz tartoznak.

A talaj kohéziója a nedvességtartalom növekedésével csökken. Itt is a nagyobb értékek a tömörített talajhoz tartoznak .

Mindezek alapján megállapítható, hogy a talaj nyírószilárdsága és kohéziója nem tekinthető állandónak még egy talajtípusnál sem. Mindkettő jelentősen változik a mélység és a nedvességtartalom függvényében.

Ezek a megállapítások az adott talajtípusra, az ismertetett mérési körülmények között helytállóak.

A kutatócsoport a munkát elvégezte és kéri a tisztelt OTKA tanácsot, hogy a jelentést elfogadni szíveskedjenek.

Gödöllő 2008. február 28.

Dr. Laib Lajos

Talajjellemzők		3.1. táblázat				
Talajtípus	Fizikai megnevezés	Homok-Iszap-Agyag arány [%]	Humusz tartalom [%]	pH(KCl)	Összes só (talaj g/g, %)	Talajnedvesség pF 6.2-nél
anyagosa vályog Karcag	mélyben szolonyeces réti csernozjom	0,2%-58%-41,8%	2,7	6,3	0,04	5,5
vályog Herceghalom	mészlepedékes csernozjom	12%-62%-26%	3,4	7,1	<0,01	3,7
nehéz vályog Józsefmajor	mészlepedékes csernozjom	23%-42%-35%	3,7	5,2	<0,01	4,2

Talajtípus: mészlepedékes nehéz vályog
Helyszín: Nagygombos Józsefmajor
pH
kémhatása:5,2

Humusztartalom :3.7 % 4.1 táblázat
Homok,iszap,agyag: 23-42-35 %
Összes-só:< 0.01

Mintavevő	Térfogat tömeg	pF0	pF2.0	pF2.3	pF2.7	pF3.4	pF4.2	pF 6.2
hengerek száma	g/cm3	Talajnedveségtartalom [cm3/cm3]						
1104	1,41	44,4	35,6					
1152	1,55	43,9	37,1					
373	1,46	44,1		34,0				
1396	1,54	43,7		35,4				
1115	1,49	43,7			30,8			
112	1,61	42,1			32,2			
1066	1,59	42,8				29,9		
1214	1,63	41,9				30,7		
1050	1,55	42,8					29,2	
36	1,49	43,9					28,4	4,2
Átlag	1,53	43,33	36,35	34,70	31,50	30,30	28,80	4,20

Talajtípus: mészlepedékes vályog
Helyszín: Herceghalom
pH
kémhatása:7.1

Humusztartalom :3.4 % 4.2 táblázat
Homok,iszap,agyag: 12-62-26 %
Összes-só:< 0.01

Mintavevő	Térfogat tömeg	pF0	pF2.0	pF2.3	pF2.7	pF3.4	pF4.2	pF 6,2
hengerek száma	g/cm3	Talajnedveségtartalom [cm3/cm3]						
35	1,33	48,8	33,6					
1264	1,31	47,0	32,5					
734	1,33	46,9		28,3				
154	1,29	48,2		28,4				
1028	1,26	48,4			21,4			
1136	1,25	48,8			22,6			
1271	1,25	48,7				16,5		
1326	1,35	47,0				18,6		
261	1,40	47,6					18,1	
174	1,33	48,5					15,9	3,7
Átlag	1,31	47,98	32,95	28,35	22,00	17,55	17,00	3,70

Talajtípus: agyagos vályog
 Helyszín: Karcag
 pH kémhatása: 6,3

Humusztartalom : 2,7 % 4.3 táblázat
 Homok,iszap,agyag: 0,2-58-41,8 %
 Összes-só: 0.04

Mintavevő	Térfogat tömeg	pF0	pF2.0	pF2.3	pF2.7	pF3.4	pF4.2	pF 6,2
hengerek száma	g/cm ³	Talajnedveségtartalom [cm ³ /cm ³]						
28	1,37	51,3	40,2					
39	1,42	50,2	39,3					
276	1,48	49,9		38,8				
303	1,40	50,5		39,3				
306	1,31	54,1			33,4			
406	1,47	50,9			34,4			
434	1,39	50,1				32,8		
444	1,38	51,5				33,9		
482	1,44	51,1					31,3	
627	1,40	50,1					30,4	5,5
Átlag	1,41	50,97	39,75	39,05	33,90	33,35	30,85	5,50

4.4.
Táblázat

Talajtípus mészlepedékes vályog
 Helyszín: Nagygombos, Józsefmajor

A talaj nyírófeszültségének, kohéziójának, és belső súrlódásának
 változása pF
 2.0,2.3,2.7 értéknél 2.7 értéknél pF 0, 2,0, 2,3 értéknél

Sorszám	Terhelő tömeg	Normális feszültség	Nyíró feszültség	Kohézió	Belső súrlódás	pF érték
	M	σ	τ tau	c	μ	pF
	Kg	kPa	kPa	kPa		
1	3	93,7	19	9,3	0.064	0
2	5	156,2	22	9,3	0.064	0
3	7	218,6	32	9,3	0.064	0
4	3	93,7	132	126	0.204	2
5	5	156,2	134	126	0.204	2
6	7	218,6	140	126	0.204	2
7	6	93,7	160	135	0.292	2,3
8	5	156,2	190	135	0.292	2,3
9	7	218,6	202	135	0.292	2,3

Talajtípus: Mészlepedékes vályog
 Helyszín: Nagygombos Józsefmajor

4.5. Táblázat

pF 2,7, 3,4, értéknél

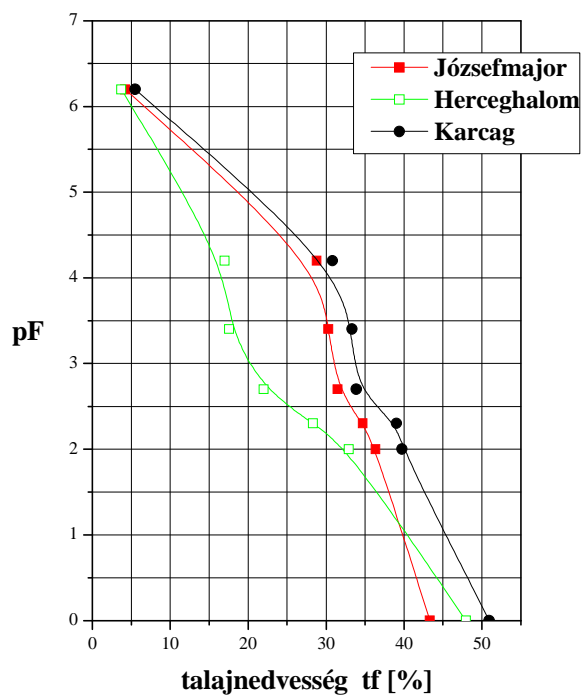
Sorszám	Terhelő tömeg	Normális feszültség	Nyíró feszültség	Kohézió	Belső súrlódás	pF érték
		σ	τ		μ	
	m		Tau	c		
	kg	kPa	kPa	kPa		
4	3	93,7	149	139	0,355	2,7
5	5	156,2	168	139	0,355	2,7
6	7	218,6	173	139	0,355	2,7
7	6	93,7	207	168,8	0,408	3,4
8	5	156,2	237	168,8	0,408	3,4
9	7	218,6	258	168,8	0,408	3,4

Talajtípus: Mészlepedékes vályog
 Helyszín: Nagygombos Józsefmajor

4.6. Táblázat

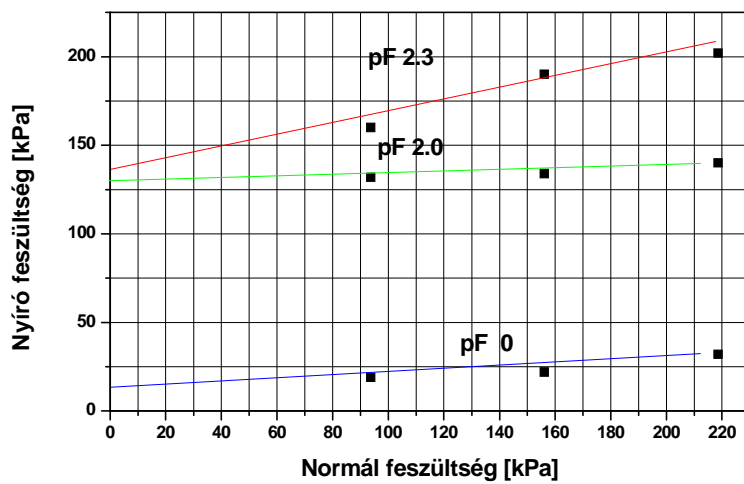
pF 4.2 6.2 értéknél

Sorszám	Terhelő tömeg	Normális feszültség	Nyíró feszültség	Kohézió	Belső súrlódás	pF érték
		σ	τ		μ	
	m		Tau	c		
	kg	kPa	kPa	kPa		
1	3	93,7	199	173	0,509	4,20
2	5	156,2	223	173	0,509	4,20
3	7	218,6	228	173	0,509	4,20
4	6	93,7	258	191	0,613	6,20
5	5	156,2	289	191	0,613	6,20
6	7	218,6	312	191	0,613	6,20



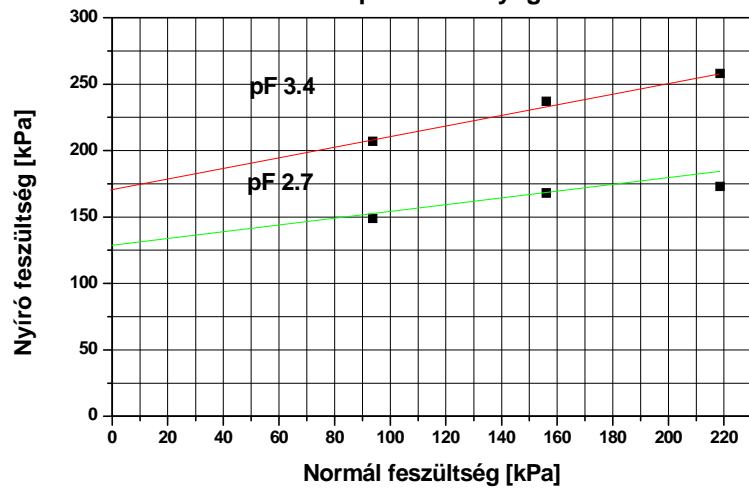
20. ábra

A nyírófeszültség maximális értékei a normál feszültség függvényében pF 0, 2,0, 2,3 értéknél, mészlepedékes vályog



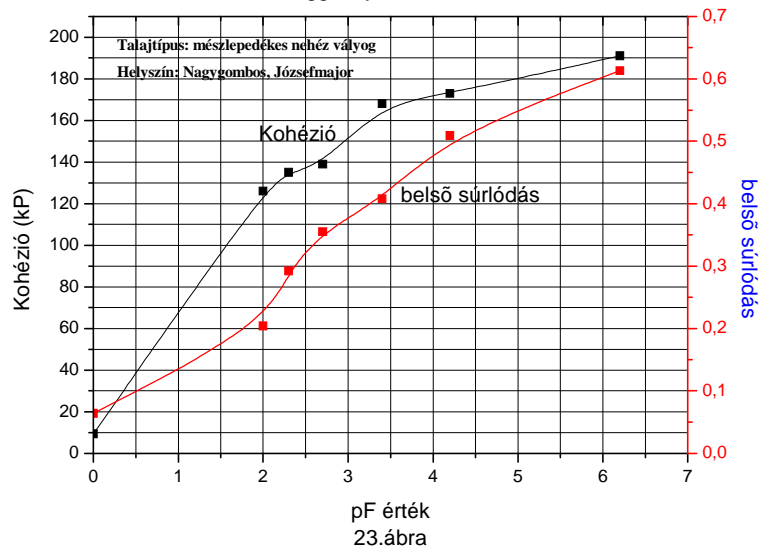
21. ábra

A nyírófeszítés maximális értékei a normál feszültség függvényében pF 2.7, 3.4, értéknél mészlepedékes vályog



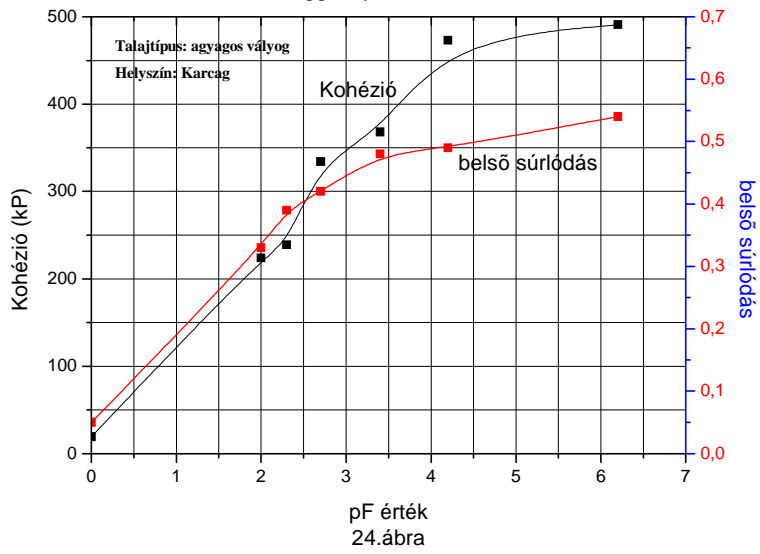
22. ábra

A kohézió és belső súrlódás változása a pF érték függvényében

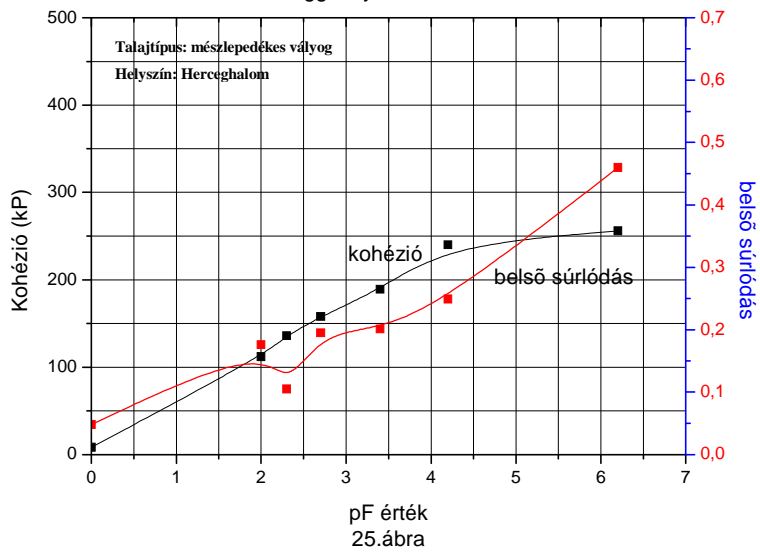


23. ábra

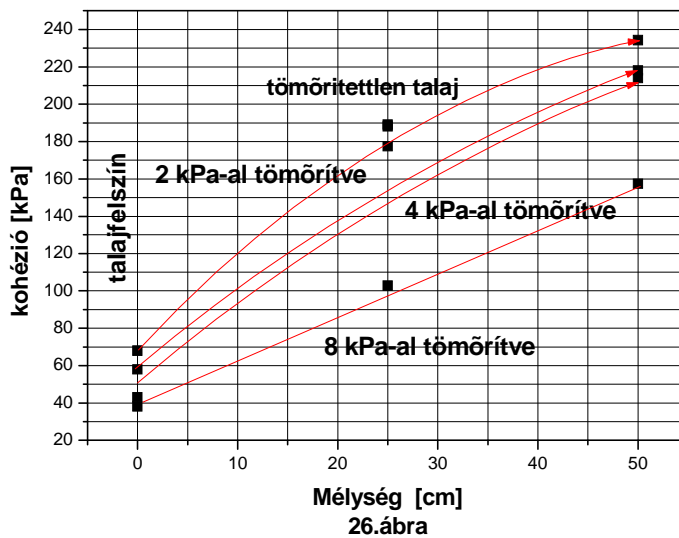
A kohézió és belső súrlódás változása a pF érték függvényében



A kohézió és belső súrlódás változása a pF érték függvényében



A talajkohézió változása a mélység és a tömörítő tömeg függvényében tf 23 %



26.ábra