



A TALAJ DEFORMÁCIÓJA ÉS CSILLAPÍTÁSA GUMIABRONCSOK ALATT

Doktori (PhD) értekezés

Pillinger György

Gödöllő

2016

A doktori iskola megnevezése:

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudomány

vezetője:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető:

Prof. Dr. Kiss Péter
egyetemi tanár, PhD
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Folyamatmérnöki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	9
1.1. A választott témakör időszerűsége, jelentősége	9
1.2. Célkítűzések.....	9
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	11
2.1. A kerék és gumiabroncs jellemzők.....	11
2.2. Talaj, talajfelszín jellemzők	11
2.2.1. <i>A talaj szerkezete.....</i>	<i>12</i>
2.2.2. <i>A talaj szemcseösszetétele.....</i>	<i>12</i>
2.2.3. <i>A víz státusza a talajban.....</i>	<i>13</i>
2.2.4. <i>A talaj tömörödöttsége, lazultsága és hordképessége.....</i>	<i>14</i>
2.2.5. <i>Viszkoelasztikus tulajdonságok.....</i>	<i>17</i>
2.2.6. <i>A talaj csillapítása</i>	<i>18</i>
2.2.7. <i>Terepegyenetlenségek</i>	<i>18</i>
2.3. Gumiabroncs-talaj kapcsolat.....	19
2.3.1. <i>Gördülési ellenállás</i>	<i>23</i>
2.3.2. <i>Kerékcsúszás</i>	<i>23</i>
2.3.3. <i>Kerék és a talaj érintkezési felülete.....</i>	<i>23</i>
2.3.4. <i>Tolóerő meghatározás.....</i>	<i>25</i>
2.3.5. <i>Energetikai modellek.....</i>	<i>26</i>
2.4. Szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése.....	28
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	29
3.1. Vontatási kísérlet elrendezése és menete	29
3.2. Járműparaméterek mérési módszerei és eszközei	31
3.3. Talajparaméterek mérésének módszerei és eszközei	33
3.2.1. <i>A talajfelszín mérési módszere és eszköze.....</i>	<i>33</i>
3.2.2. <i>Kúpos-index mérési módszere és eszköze</i>	<i>33</i>
3.2.3. <i>Talaj fizikai összetételének meghatározási módszere és eszköze.....</i>	<i>34</i>
3.2.4. <i>Helyszíni nedvességtartalom mérés módszere és eszköze.....</i>	<i>34</i>
3.4. Közös paraméterek mérésének módszerei és eszközei	35
3.3.1. <i>Gumiabroncs felfekvési felületének meghatározási módszere.....</i>	<i>35</i>
3.3.2. <i>Lengésgyorsulások és a vonóerő mérési módszerei és eszközei</i>	<i>36</i>
3.5. Talajvályús kísérletek módszerei és eszközei	37
4. EREDMÉNYEK.....	39
4.1. A talaj csillapítása	39
4.2. Gumiabroncs terhelhetősége és felfekvési felülete	45

4.3. Gumiabroncs - talaj kapcsolatában keletkező lengéscsillapítás	47
4.4. Talaj térfogati sűrűségének kapcsolata a kúpos indexszel.....	53
4.5. Új tudományos eredmények	61
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	63
6. ÖSSZEFOGLALÁS	65
7. SUMMARY.....	67
8. MELLÉKLETEK.....	69
M1. Irodalomjegyzék.....	69
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk.....	73
M3. A vizsgált talaj tulajdonságai.....	76
M4. Gumiabroncs terhelési vizsgálatai.....	78
M5. Szabadföldi kúpos index vizsgálatok eredményei	79
M6. Talajvályús kúpos index vizsgálatok eredményei	82
M7. Szabadföldi profilmérési eredmények.....	85
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	91

JELÖLÉSJEGYZÉK

A	– talaj típusra jellemző konstans	[bar]
α	– emelkedő meredeksége	[°]
α_2	– út típustól függő állandó	[-]
B	– konstans	[-]
B ₂	– talaj típusra jellemző konstans	[g/cm ³]
b	– abroncs szélessége	[m]
c	– talaj kohézió	[Pa]
CI ₀	– előző állandó szakaszhoz tartozó CI érték	[MPa]
CI ₁	– következő állandó szakaszhoz tartozó CI érték	[MPa]
CI _{max}	– CI görbe állandósult szakaszának értéke	[MPa]
D	– kerék átmérője	[m]
d	– nyomólap átmérője	[m]
d _e	– ekvivalens átmérő	[m]
d _k	– kúp átmérő	[m]
dCI/dz	– kúposindex mélység szerinti deriváltja	[MPa/m]
δ	– logaritmikus dekrementum	[-]
δ_1	– a gumibroncs betonon mért logaritmikus dekrementuma	[-]
δ_2	– csak a talaj logaritmikus dekrementum értéke	[-]
δ_{1+2}	– az abroncs és a talaj eredő logaritmikus dekrementum értéke	[-]
ΔCI_0	– következő és előző állandósult CI értékek különbsége	[MPa]
Δs	– nyírási úthossz	[m]
ΔR	– következő és előző réteghez tartozó R értékek különbsége	[MPa]
E	– talaj rugalmassági modulusa	[Pa]
E ₁	– rugalmassági modulus	[Pa]
E ₂	– rugalmassági modulus	[Pa]
ε	– relatív nyúlás	[-]
F	– kerékterhelés	[N]
F ₀	– felfekvési felület merev pályán	[m ²]
F _g	– gördülési ellenállás	[N]
F _t	– tolóerő	[N]
F _N	– normálirányú terhelés	[N]
F _v	– vontatáshoz szükséges erő	[N]
F _x	– felfekvési felület talajon	[m ²]
f	– gördülési ellenállási tényező	[-]

G_x	–	spektrális sűrűség	[cm ² m]
h	–	konstans	[-]
η	–	csillapítási tényező	[Ns/m]
K	–	abroncs talaj kapcsolat rugómerevsége	[N/m]
K_1	–	abroncs rugómerevsége	[N/m]
K_2	–	talaj rugómerevsége	[N/m]
K_3	–	nyírási diagram alakváltozási tényezője	[-]
K_{red}	–	empirikus állandó	[m]
k	–	talaj teherbírási tényezője	[N/m ²]
k_0	–	talaj alakváltozási tényezője	[N/m ³]
k_1	–	dimenzióanalízis számításhoz használt jelölés	[kg/s ² m]
k_2	–	dimenzióanalízis számításhoz használt jelölés	[kg/s ²]
k_3	–	dimenzióanalízis számításhoz használt jelölés	[kg/s]
k_4	–	dimenzióanalízis számításhoz használt jelölés	[kg]
k_5	–	dimenzióanalízis számításhoz használt jelölés	[1/s]
L_0	–	integrál lépték	[-]
l	–	felfekvési felület egyenértékű hossza	[m]
m	–	lengő tömeg	[kg]
m_n	–	nedves talaj tömege	[kg]
m_{sz}	–	abszolút száraz talaj tömege	[kg]
μ	–	talajszemcsék közötti súrlódási tényező	[-]
n	–	talajtól függő kitevő (Szaakjan) (a vizsgált talajra: $n = 0,8$)	[-]
n_0	–	tiszta gördüléssel haladó kerék fordulatszáma	[1/s]
n_1	–	talajtól függő konstans (Bernstein)	[1/m]
n_2	–	talajtól függő konstans (Gorjacsinkin)	[-]
n_3	–	lengés szám	[db]
n_4	–	csúszással haladó kerék fordulatszáma	[1/s]
n_v	–	porozitás	[%]
n_e	–	porozitás változás	[%]
$nt\%$	–	talaj nedvességtartalma tömegszázalékban	[%]
$ntf\%$	–	talaj nedvességtartalma térfogatszázalékban	[%]
p	–	talajnyomás	[N/m ²]
p_i	–	abroncs légnyomása	[bar]
π	–	a kör területének és átmérőjének a hányadosa ($\pi = 3,1416$)	[-]
Q_0	–	megengedett abroncsterhelés tömege	[kg]

Q_x	– alkalmazott abroncsterhelés tömege	[kg]
R	– lineáris szakasz meredeksége, a tömörségre jellemző szám	[bar]
R_0	– előző réteghez tartozó R érték	[MPa]
R_1	– következő réteghez tartozó R érték	[MPa]
ρ	– valódi talaj sűrűség ($\rho = 2,7$)	[g/cm ³]
ρ_t	– abszolút száraz talaj sűrűsége	[kg/m ³]
ρ_v	– vizsgált talaj térfogati sűrűsége	[g/cm ³]
$\rho_{v\text{íz}}$	– víz sűrűsége	[kg/m ³]
ρ_0	– tömörítés előtti térfogati sűrűség	[g/cm ³]
ρ_ε	– tömörítés utáni térfogati sűrűség	[g/cm ³]
S	– szlip	[%]
S^*	– karakterisztikus szlip	[-]
s	– csúszással megtett út	[m]
s_0	– tiszta gördüléssel megtett út	[m]
σ	– talajt terhelő nyomófeszültség	[Pa]
σ^2	– szórás négyzet	[-]
$\sigma_{\text{köz}}$	– közepes talajnyomás a gumibroncs alatt	[N/m ²]
σ_n	– normál feszültség	[Pa]
T_r	– relaxációs idő, $T_r = \eta / (E_1 + E_2)$	[s]
τ	– nyíró feszültség	[Pa]
τ_m	– nyírófeszültség	[Pa]
ω_0	– lengés saját körfrekvenciája	[1/s]
X	– abroncs felfekvési felületének a szélessége	[m]
X_n	– a vizsgált talaj száraz bázisra vonatkoztatott nedvességtartalma	[%]
x_1	– abroncsdeformáció	[m]
x_2	– talajdeformáció	[m]
Y	– abroncs felfekvési felületének a hossza	[m]
y_0	– lengési görbe első kitérésének a maximuma	[m]
y_2	– azonos fázisban következő kitérés	[m]
z	– talaj besüllyedése az abroncs vagy a nyomólap alatt	[m]
z_{max}	– CI_{max} -hoz tartozó mélység	[m]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a választott témakör aktualitását és a dolgozat célkitűzéseit foglalmazom meg.

1.1. A választott témakör időszerűsége, jelentősége

A vontatott jármű mozgásképeségét a környezete és saját adottságai határozzák meg. A terep, terepi közlekedés kutatásának célja elsősorban a mozgékonyság növelése, valamint a haladáshoz felhasznált energia csökkentése. Hosszú ideig nem volt jelentős fejlődés ezen a területen. A mezőgazdaság, a hadászat és az autózás beindulásával kezdtek tudatosan foglalkozni a kerék-pálya kapcsolattal. A célok kibővültek a talajtömörítő hatás mérséklésével, valamint a környezetvédelmi törekvésekkel. A gumiabroncs-talaj kapcsolat e négy területre (menetdinamika, energetika, talajtaposás, környezetszennyezés) jelentős hatást fejt ki.

A kerék, felfedezése (i.e. 3500) óta számos újtáson ment keresztül. Alakja, anyaga, formája a célok elérésének megfelelően -a kutatások hatására- kisebb nagyobb mértékben változott.

A bolygatatlan talaj tulajdonságait, állapotát az aktuális időjárás (csapadék, hőmérséklet) és a benne élő szervezetek nagymértékben befolyásolják.

A terepi közlekedés különböző területein más-más céllal folynak kutatások és fejlesztések. A mezőgazdaságban a lényeges kérdés a vontatási hatások növelése és a talajtömörítés csökkentése. A haditechnikában és az égítést járműveknél a mozgékonyság és a megbízhatóság növelése a meghatározó. Jelenleg is folyik e területek tudományos fejlesztése, mivel a gumiabroncs-talaj kapcsolatban számos kérdés nem tisztázott kellő mértékben. A gumiabroncs-talaj kapcsolat energetikája alatt a gumiabroncs és talaj deformációk, valamint a terepprofil által okozott lengések közben végbemenő energetikai folyamatokat értjük. A gumiabroncs-talaj kapcsolatában lejátszódó folyamatok részletes tanulmányozásával konstrukciós és üzemeltetési módosítások végezhetők az említett tényezők javításának érdekében. A terepjáró járműveken alkalmazott szabályzó és kontroll rendszerek is igénylik a jármű terepen történő mozgásának, valamint a gumiabroncs-talaj kapcsolatának leírását, modellezését.

1.2. Célkitűzések

A szakirodalom áttanulmányozása alapján (lásd 2.4 pont) célkitűzéseim a következők.

A doktori disszertáció két fő célja: A gumiabroncs-talaj kapcsolatában lejátszódó eddig még nem, vagy nem kellő mélységben tárgyalt jelenségek okainak és azok leírasi, feldolgozási lehetőségeinek a feltárása. Továbbá a talaj teherbírási vizsgálata alapján -különböző módon- meghatározható talajfizikai tulajdonságokra való következtetés és azok meghatározása.

Ilyen vizsgálandó jelenség a gumiabroncs-talaj kapcsolatban a talaj tömörödése a gumiabroncs alatt, valamint a talaj okozta, keréken kifejtett lengéscsillapítási hatás.

A teherbírási vizsgálat alapján történő talaj sűrűség meghatározás.

A kutatás a következő kísérletekből és vizsgálatokból áll:

- Szabadföldi vontatási kísérletek különböző módokon megmunkált talajon.
- Szabadföldi talaj vizsgálatok, az érintetlen, illetve a gumiabroncs terhelte területeken.
- Vontatási kísérletek betonon.
- Laboratóriumi jármű és abroncs vizsgálatok.
- Laboratóriumi talaj vizsgálatok.
- Talajvályús kísérletek.

Ezen kísérletek és vizsgálatok alapján a kutatás az alábbi kérdésekre keresi a választ:

- Milyen mélyebb okai vannak a gumiabroncs alatt kialakult nyommélység nagyságának?
- Milyen hatása van a kezdeti talajsűrűség eloszlásnak a nyommélységre?
- A mélység függvényében, hogyan tömörödik a talaj a gumiabroncs alatt?
- Milyen módon lehet a talaj csillapítási tulajdonságát kiszámolni?
- Szétválasztható-e a talajon mozgó abroncs csillapítása az eredő csillapítás ismeretében?
- Lehet-e a kúpos penetrométeres mérés eredményeit talaj sűrűség meghatározására használni?
- Milyen matematikai kapcsolat van a talaj térfogat sűrűsége és a CI index között?

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a témához kapcsolódó szakirodalmat tekintem át a végén megadva az összefoglaló értékelését is.

2.1. A kerék és gumiabroncs jellemzők

A kerék az emberiség egyik legnagyobb találmánya. A természetben tengely körüli forgó mozgás egyáltalán nem fordul elő.

A gumiabroncsos kerék rendeltetése alapján lehet hordozókerék és hajtókerék. A hordozókerék feladata a kerékre ható terhelés viselése. A hajtókerék feladata fogadni a motorból érkező forgatónyomatékot és kerületi erő formájában közvetíteni a talajra. A fentiekén kívül beszélhetünk még kormányzott kerékről, amely a terhelése mellett kifejezetten a kormányzásra szolgál.

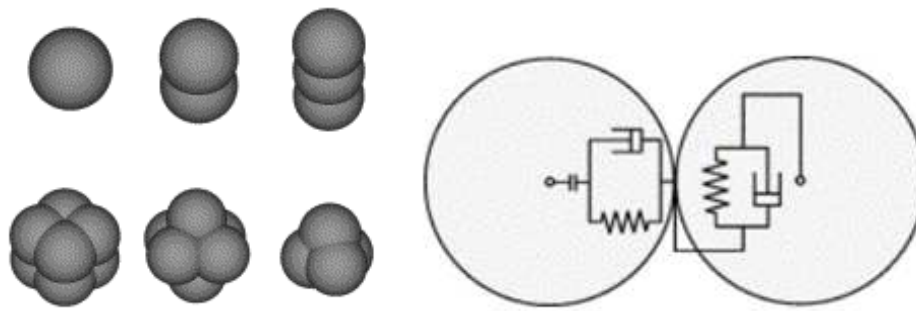
A gumiabroncs legfontosabb tulajdonságai: a gumi Shore keménysége, valamint a belső légnyomása. A gumiabroncsok Shore keménysége felhasználástól függően általában Shore A 70 és Shore D 50 között változik. Ez a paraméter hatással van a tapadásra, valamint a kerék energetikai és lengési tulajdonságaira. A belső légnyomás jellemző értéke 0,3 és 4 bar között változik. A légnyomás pontos értékét számos tényező befolyásolja, mint például a kerék átmérő, szélesség, kordszálak minősége és mennyisége. Az előírtnál kisebb vagy nagyobb nyomáson történő üzemeltetés egyaránt káros, az abroncs idő előtti tönkremeneteléhez vezet. Az abroncsokat vonóerő kifejtésre, függőleges irányú terhelésre valamint maximális fordulatszámra méretezik.

2.2. Talaj, talajfelszín jellemzők

A terepi közlekedés a talajtakaró (pedoszféra) annak a legkülső mállott rétegén, a litoszférán történik. Ennek legfontosabb funkciója a termékenység és az élettér biztosítása a talajban élő organizmusok számára. A talajon történő közlekedés azonban rontja annak szerkezetét, ezzel csökkentve mindkét funkció betöltésének hatékonyságát.

A talajok viselkedésének a leírásához előszeretettel használnak diszkrét elemes módszereket, mivel a talaj is apró szemcsék véges halmaza. Tsuji és társai (2012) gömb formájú elemi talaj részt alkalmaztak. A szimulált talajban sík lapot toltak és mérték a toláshoz szükséges erőt. Később Ono és társai (2013) azt vizsgálták, hogy a talajművelő szerszám hogyan mozog az általuk DEM módszerrel szimulált közegben. Tamás és társai (2013) DEM módszerrel modellezte a talajt illetve a talajt megmunkáló szerszámot.

Ennek a vizsgálatnak a következő lépése lehet a szerszám kerékkel történő helyettesítése. Többféle részecskével végeztek kísérleteket. Az alapelem gömb volt. Később különbözőképpen összeillesztett gömbök képezték az elemi szemcsét (2.1. ábra). Az elemi részecske alakja a diszkrét elemes módszereknél nagyon lényeges kérdés. Alapjaiban befolyásolja az elemhalmaz, azaz a talaj viselkedését. Az egyes elemi részecskék közötti kapcsolat leírásához reológiai elemeket használtak. Például rugó elem, nedves csillapításos elem.



2.1. ábra DEM módszerrel modellezett talajszemcsék típusai és a szemcsék közötti reológiai elemekkel leírt kapcsolat (Li és tsai, 2013)

2.2.1. A talaj szerkezete

A talaj és jármű egymásra gyakorolt hatása többek között az adott talajtípus mechanikai tulajdonságaitól függ. A talaj mechanikai tulajdonságát a talaj szerkezete határozza meg. A talaj egy háromfázisú rendszer, szilárd részekkel, vízzel és levegővel. A szilárd részek szemcsemérete meghatározza a talaj víztartó, illetve vízszívó képességét s ezzel a benne lévő víz és a levegő mennyiséget is befolyásolja.

A talaj szerkezeti állapotát jelentősen befolyásoló jellemzők tehát:

- szemcseösszetétel
- nedvességtartalom
- tömörödöttség vagy lazultság

A talajon történő haladás szempontjából a talaj ismerete fontos kérdés. Számos szervezet hozott létre talaj adatbázisokat a talajparaméterek rendszerezésére. Diagle és társai (2005) összefoglalták a NASIS (National Soil Information System) szervezet talajparaméter rendszerét. Cikkükben meghatározzák a nyilvántartott talajparamétereket (például: kúposindex) és besorolják a -járművel rosszul vagy egyáltalán nem járható- talajfelszíneket. (Mozgékonyági térkép)

2.2.2. A talaj szemcseösszetétele

A szemcseméret frakciók egymáshoz viszonyított aránya befolyásolja a talajok fizikai tulajdonságait, mint például a vízháztartását, ezzel együtt pedig a szilárdsági jellemzőit. A homoktalaj szemcséi viszonylag nagyok, így az azok közötti rések is. A fajlagos felülete azonban kicsi. A vizet ezért könnyen átengedi, nem tartja magában. Az agyagtalaj szemcséi kicsik, így könnyen tapadnak egymáshoz, a fajlagos felülete nagy, a köztük lévő tér rész is kicsi marad. A nagy felülete miatt a vizet jobban magában tartja.

A talajok szemcseszerkezetének törvényszerűségeivel Atterberg (1912) foglalkozott. Az általa létrehozott csoportosításból megállapítható, hogy a különböző fizikai talajféleségek szemcse eloszlása nem lineáris. A talajt négy szemcsefrakció alkotja. A durva homok (szemcseméret: 2,0 - 0,2 mm), finom homok (0,2 - 0,02 mm) az iszap, por (0,02 - 0,002 mm) és az agyag (< 0,002 mm). A három alkotó számszerű részarányai alapján a talaj fizikai féleségét egy háromszög diagramból lehet megállapítani (Stroppel, 1952, Stefanovits 1981).

A szemcseösszetétel, szemcseméret és a szemcsék között kialakult hézagokat vizsgálta Arya, Paris (1981). Modellt állítottak fel a pórusátmérő alapján történő víztartó képesség meghatározására. Ötféle különböző összetételű talajt vizsgáltak meg.

A talajok fizikai jellemzőinek összefüggéseivel számos kutató foglalkozott. A talaj vízemelő képességére és fajlagos talaj ellenállására vonatkozó kísérleteket végzett hazánkban Arany (1943),

Rázsó (1958) és Stefanovits (1975). Megállapították, hogy a magasabb agyagtartalom növeli a talaj vízfelvevő képességét, valamint ezzel együtt nő a talaj nyírószilárdsága és kohéziója. A talajok belső súrlódási szögére a szemcseátmérők vannak jelentős hatással.

Senatore, Wulfmeier, Vlahinic', Andrade, Iagnemma (2013) képfeldolgozós módszerrel vizsgálták a kerék talaj kapcsolatát. Eredményeikben választ kaphatunk arra, hogy milyen pályát írhat le egy talajszemcse a felette elhaladó kerék hatására.

2.2.3. A víz státusza a talajban

A talajban lévő víz mennyiségének jellemzésére többféle lehetőség létezik, melyre a gyakorlatban három fő mutatószám alakult ki:

- A maximális nedvességtartalom (vízkapacitás),
- a természetes vagy szántóföldi vízkapacitás, valamint
- az úgynevezett holt víz vagy hervadásponti vízkapacitás.

Maximális nedvességtartalom esetén a talaj összes pórustérfogatát víz tölti ki. Nagysága attól függ, hogy mekkora valamely talaj összes pórustérfogata. Adott szerkezetű talaj által a gravitációval szemben megtartott víz mennyiséget természetes vagy szántóföldi víz kapacitásnak nevezzük.

A talajnedvesség értékét tömeg vagy térfogat százalékban adják meg, száraz vagy nedves bázisra vonatkoztatva. A térfogatszázalékban mért nedvességtartalom és a vele jellemzett állapotok közvetlenül összehasonlíthatók, minden talajféleség esetén.

A talaj nedvességtartalma tömegszázalékban, száraz bázisra vonatkozóan „ $n_t\%$ ”:

$$n_{t\%} = \frac{m_n - m_{sz}}{m_{sz}} 100. \quad (2.1)$$

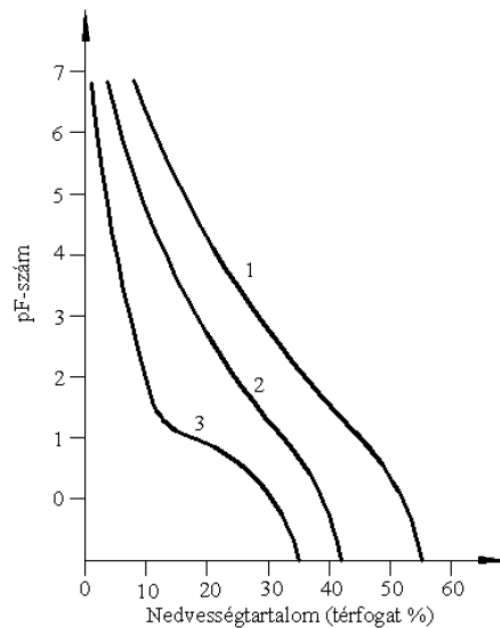
A talaj nedvességtartalma térfogatszázalékban „ $n_{tf\%}$ ”:

$$n_{tf\%} = \frac{n_{t\%}}{n_{t\%} + \frac{\rho_{viz}}{\rho_t}} 100. \quad (2.2)$$

A talaj szemcsék közötti összetartó erőt kohézióknak nevezzük. A talajszemcsék valamely más tárgyhoz való tapadását adhézióknak hívjuk. A gumibroncs-talaj kapcsolatában e két jellemző meghatározó. A talaj finomszemcse (agyag, iszap) tartalmának növekedésével nő a talaj kohéziója és adhéziója is. A nedvességtartalom adhéziót és kohéziót befolyásoló hatásaival Letosnyev (1951) foglalkozott. A talaj nedvességtartalma döntő befolyást gyakorol a gumibroncs-talaj kapcsolat erő hatásaira, mint például teherbírás vagy csillapítás.

Az említett talajnedvesség tartalmak azonban nem veszik figyelembe a talaj szemcseméretét. A talaj nedvességtartó képessége erősen függ a szemcseösszetételtől. Ami azt jelenti, hogy a teljesen száraz talajhoz képest egy 15 %-os agyagtalaj száraz tapintású, míg a homoktalaj tapintása érezhetően nedves. Ebből a megfontolásból vezették be a nedvesség tartalomnak a pF számmal, illetve görbével történő jellemzését. Ennek fizikai alapja az a víztenzió, amellyel az anyag tartja a vizet.

A pF görbe egy adott talaj nedvességtartalma és vízemelő, vagyis víztartó képessége közötti kapcsolatot adja meg (2.2. ábra). Ugyanannak a talajnak más-más a pF értéke a vízzel való telítettségétől függően. Az érték a szívóhatás vízoszlop centiméterekben vett tízes alapú logaritmusával egyenlő. Ennek megfelelően a ~1000 cm vízoszlopnomás szívóhatásban kifejezve pF 3-nak felel meg. A pF érték nulla és hét között változhat. A talajok víztartó képességének és szerkezeti tulajdonságainak kapcsolatával hazánkban Rajkai (1988) foglalkozott.



2.2. ábra Különböző talajok pF görbéi, 1 agyag, 2 vályog, 3 homokos vályog
(Sitkei, 2002)

Sitkei (2002) szerint: „két különböző talaj mechanikai paramétereit nem azonos nedvességtartalomnál, hanem azonos tenzióhoz tartozó nedvességtartalmaknál kell összehasonlítani.”

2.2.4. A talaj tömörödöttsége, lazultsága és hordképessége

Terepi közlekedés során a talaj lazultsága vagy tömörödési állapota alapjaiban határozza meg a jármű mozgásképeségét. A lazultság növekedésével nő a gördülési ellenállás és csökken a vontatási határfok, a kormányzott kerekek vonatkozásában pedig romlik az irányíthatóság.

A talaj egy háromfázisú rendszer, szilárd részek között vizet és levegőt tartalmaz. Nyomás hatására a víz és levegő a szilárd anyag pórusaiból és azokon keresztül távozásra kényszerülnek. Így a talaj lengéscsillapítónak fogható fel, ekkor pedig az összenyomódása sebesség függő.

A tömörödöttség jellemzésére a térfogatátomeget, a lazultságra pedig a pórushányadot használják. Utóbbi megadja, hogy egy adott térfogatú talajminta hány százalékban tartalmaz „pórusokat”, vagyis mennyi az a része, amelyik vízzel vagy levegővel és nem pedig szilárd talajrészecskével van kitöltve. Sitkei (1981) vizsgálatai alapján a talaj lazultsága, általában 45-52 % között változik, nagymértékű lazultságnál 60 % is lehet. A 30 % pórustérfogatú talaj már erősen tömörödött.

A szakirodalom a talaj sűrűségét gyakran nevezi térfogat tömegnek. A talaj sűrűségén (vagy térfogat tömegén) a talajból vett minta térfogatának - rendszerint 100 cm^3 - és a minta kiszáritás utáni tömegének a hányadosát értjük. Frissen szántott talaj esetén ez az érték 900 kg/m^3 ($0,9 \text{ g/cm}^3$), az üledett talajnál kb. $1400\text{-}1600 \text{ kg/m}^3$ ($1,4\text{-}1,6 \text{ g/cm}^3$), egy igen tömödött talajnál pedig 1800 kg/m^3 ($1,8 \text{ g/cm}^3$). A talaj összenyomásával a pórushányada csökken, a térfogatátomege pedig nő.

A gépjármű terepi közlekedése során hat a talajra, súlyereje a kerekeken keresztül a kerék felfekvési felületétől függően különböző felületi nyomásokkal. Ekkor a talaj bizonyos mértékben összenyomódik, tömörödik.

Gerstner és Bernstein (1913) a 1900-as évek elején felismerték, hogy a gördülési ellenállás tetemes részét az a munka teszi ki, amely a talajdeformáció legyőzéséhez szükséges. Bernstein a gyakorlati élet számára egy exponenciális összefüggést (2.4) alkotott a talajnyomás besüllyedés leírásához,

amely megtalálható Gorjacschin (1936) munkáiban is (2.5). Végül Szaakjan (1956) a nyomófej átmérőjének bevezetésével általánosítja a képletet, ami megfelel a Boussinesq elméletnek (2.6).

Boussinesq dolgozta ki a rugalmas féltér elméletet, amellyel a talajokra jellemző számos fizikai jelenség leírható (Boussinesq, 1883). Az Ő eredményein alapuló ilyen jellegű kutatások napjainkban is folynak. A talaj terhelés, és a hatására kialakult nyomáseloszlás vizsgálatával foglalkozott Benedetto, Tosti, Di Domenico (2012). A kutató csoport ejtősúlyos vizsgáló berendezéssel mérte a talajban bekövetkezett deformációkat.

Hordképességi vizsgálatok

A kerék belesüllyed a talajba és az összenyomódás mértéke a terhelésen túl függ a talaj állapotától, például nedvességtartalom, fizikaiiféleség, térfogattömeg stb.. A besüllyedés mértéke közvetlenül befolyásolja a talajdeformációt és a gördülési ellenállást. Kétféle fő eljárás terjedt el a hordképesség vizsgálatára:

- Nyomólapos vizsgálat
- Nyomókúpos vizsgálat

Mindkét eljárás célja megállapítani, hogy bizonyos normál irányú terhelés hatására milyen mértékű deformációt szenved a talaj. Mindkét eljárásnak megvan a maga előnye, illetve hátránya.

Nyomólapos vizsgálat

A terhelés hatására kialakult besüllyedés megállapítására úgynevezett nyomólapos vagy bevaméteres kísérleteket végeznek. A kísérlet során egy meghatározott felületű nyomólapot nyomnak a talajba és közben mérik a besüllyedés mértékét valamint a nyomóerőt. A vizsgálat során jelentős szerepet játszik a talaj kezdeti tömörödöttségi állapota (sűrűsége), mivel ennek változása különböző teherbírasi tényezőket eredményez. A nyomólapos vizsgálat hátránya a mérés közbeni nagy erőszükséglet.

Gerstner feltételezte, hogy a besüllyedés és a talajnyomás között lineáris kapcsolat van, és a kapcsolatot egy „ k_0 ” talaj alakváltozási tényező [N/m^3] adja meg.

$$p = k_0 z. \quad (2.3)$$

A képlet a nyomólap átmérőjét nem veszi figyelembe. Eltérő átmérőjű nyomólapokat alkalmazva különböző alakváltozási tényező értékek keletkeznek, azaz a „ k_0 ” tartalmazza a nyomólap átmérőjét is, nem független attól.

A képletet Bernstein lineárisról exponenciálisra változtatta:

$$p = k(1 - e^{-n_1 z}). \quad (2.4)$$

Majd Gorjacschin alakította tovább. A „ k_0 ” értéke azonban még itt is függ a nyomófej átmérőjétől:

$$p = k_0 z^{n_2}. \quad (2.5)$$

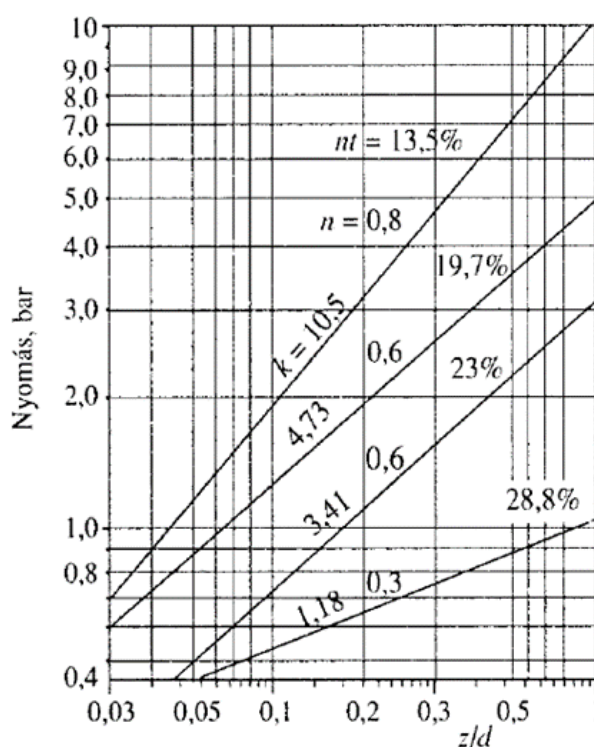
Szaakjan már a nyomólap átmérőjét is figyelembe vette, így az hatványkitevős függvénykapcsolat egyik konstansa a talaj teherbírasi tényezője „ k ”. Értéke a talajtípustól, valamint a kezdeti tömörödöttségi állapotától függ.

$$p = k \left(\frac{z}{d} \right)^n. \quad (2.6)$$

BEKKER (1956, 1961), Wills (1966), Reece (1964), Kacigin (1964) is alkottak képleteket a talajnyomás besüllyedés kapcsolatára. Igazolható, hogy a benyomódás mértéke függ a nyomótest alakjától is, nem mindegy, hogy kör vagy négyzet alakú nyomótestet nyomunk a földbe. Valamint

feltételezhető, hogy a talajba nyomás sebessége és időtartalma is befolyással bír a besüllyedésre. Ezzel azonban kevésbé foglalkoznak. Legelterjedtebben a Szaakjan képletet (2.6) alkalmazzák. A mérnöki gyakorlat számára kellő pontosságú és nem túl bonyolult.

A szakirodalmi adatok alapján a Szaakjan képlethez szükséges kitevő értékét „n” a gyakorlati alkalmazásnak megfelelő pontossággal jól meglehet becsülni. A 2.3. ábrán a vályogtalajra vonatkozó görbék láthatóak különböző nedvességtartalmak esetén. A vízszintes tengelyen a z/d (a besüllyedés és a nyomólap átmérőjének a hányadosa) viszony van feltüntetve. A függőleges tengelyen pedig a talajnyomás bar-ban. A nedvességtartalom tartomány 13,5 % - 28,8 % között, a kitevő értéke pedig 0,3 -tól 0,8 -ig változik.



2.3. ábra Vályogtalaj eltérő nedvesség tartalmaihoz tartozó nyomás-besüllyedés görbék

(Sitkei, 1972a, 2002)

Itt meg kell még említeni Kacigin (1964) tangens-hiperbolikus függvényét és Hegedűs (1965) által alkalmazott dimenzióanalízis módszerét, amely a gumibroncs-talaj kapcsolatban ébredő talajnyomás minél pontosabb leírására szolgál.

Qingnian, Ying, Longming (1991) vizsgálatai azt mutatják, hogy a talaj tömörödése nem csak függőleges irányban történik. A talaj oldal irányban is, úgymond kifolyik a nyomófelület alól. A vizsgálatot laza homoktalajon végezték el. A homoktalajt különböző keresztmetszetű nyomó felületekkel terhelték, majd mérték a nyomóerőt és a benyomódás mélységét. Valamint különböző módokon elhelyezett támaszfalakkal akadályozták meg a homok oldal irányú kifolyását a nyomólap alól. Az oldalfalakkal, amelyek akadályozzák az oldalra folyást, a besüllyedés mélysége nagymértékben csökkenthető, ezzel párhuzamosan növekszik a talaj teherviselő képessége. Így megállapíthatóvá vált, hogy a talaj hány százaléka tömörödik függőleges irányban és hány százaléka folyik ki oldal irányba. Megállapításuk szerint homoktalajoknál a függőleges tömörödés mértéke 25 %, a talaj oldal irányú kifolyása 75 %. Kohezív talajoknál az oldal kifolyás mértéke kisebb, míg kohézió nélküli talajoknál nagyobb.

Nyomókúpos vizsgálat

A bevaméteres talaj hordképességi vizsgálatok hátrányait próbálták a nyomókúpos vizsgálatokkal kiváltani. Előnye, hogy a kis átmérőjű kúpot kézzel is könnyen a talajba lehet nyomni, míg a bevaméterhez jelentősen nagyobb erőre van szükség. Ami az előnye egyben a hátránya is. A kis nyomókúp a vizsgált területnek csak egy kis felület egységén határozza meg a CI görbét, amely a talaj nagy inhomogenitása miatt nem jellemző az egész területre. Ezt a hátrányt sok mérés átlagolásával lehet kiküszöbölni. A kúpforma miatt egyéb, súrlódásból származó erők is keletkeznek. A mérés eredménye egy hordképességi diagram, amely a mélység függvényében ábrázolja a talaj ellenállást nyomás értékben kifejezve.

Hernanz, Peixoto, Cerisola, Sánchez-Girón (2000) a CI indexet és egyéb paramétert használtak arra, hogy a talaj sűrűségét a kúposindex mérés alapján meghatározzák.

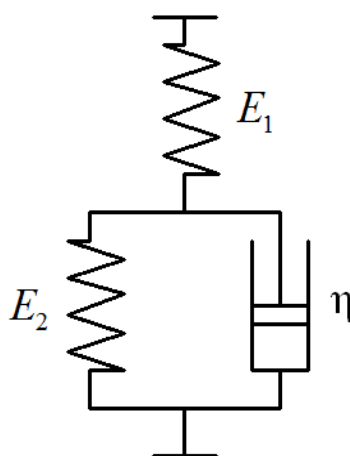
Changying és Junzheng (1998) a talaj teherbírása és a „lágyság” talaj vastagsága között keresett összefüggést. Lágyság talajnak egy kiválasztott CI értéknél kisebb értékű kúpos indexszel rendelkező talajréteget neveztek. A penetrométert arra használták, hogy a lágyság réteg vastagságát meghatározzák. Pontosabban a CI diagram segítségével kimutatható, hol kezd a talajellenállás erősen növekedni. Meddig a pontig tartott a „lágyság” talajréteg. A mérések és a mért modell az adott területre érvényesek, de iránymutatónak elmondható, hogy 30 cm-nél nem volt vastagabb lágyság réteg. A legvékonyabb lágyság réteg pedig 7 cm volt.

Meirion-Griffith és Spenko (2011) talajnyomás-besüllyedés kapcsolatát vizsgálta különböző átmérőjű merev kerekekkel. A nyomás növelésével a besüllyedés mértéke is növekszik. Azonos nyomóerő mellett a kisebb kerék jobban, míg a nagyobb kerék kevésbé hatol a talajba. Egyféle talajt alkalmaztak, melyet a következő szempontok alapján elemeztek: Összetétel, szemcseméret, mechanikai tulajdonságok és nedvességtartalmat illetően.

A kúpos index érték és a talaj teherbírása közötti kapcsolat ma nem megoldott.

2.2.5. Viszkoelasztikus tulajdonságok

A talaj viszkoelasztikus anyag (Sitkei 1972 a, b). A viszkoelasztikus anyagokat elemi lineáris anyagtörvények felhasználásával lehet modellezni. A talaj reológiai tulajdonságainak leírásához a háromelemes Kelvin modell jól alkalmazható (2.4. ábra).



2.4. ábra Háromelemes reológiai anyag modell (Sitkei, 1972a)

A modellt az alábbi differenciálegyenlet írja le:

$$T_r \frac{d\sigma}{dt} + \sigma_n = E_1 T_r \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon. \quad (2.7)$$

Mahyuddin, Siliman, Suharto (2011) markológépek által kiemelt talajrész vizsgálatára és modellezésére szintén viszkoelasztikus modellt használt. Itt is egy rugós tag és egy nedves csillapításos tag volt párhuzamosan kötve. Ehhez az egységhez fentről szintén egy rugóstag, -mint a 2.4. ábrán,- letről pedig egy csillapításos tag volt kapcsolva.

Tran és Muro (2004) viszkoelasztikus talaj modellt használt, melyben sorba volt kapcsolva egy rugós és egy nedves csillapításos tag. Mivel a járművük bordákkal rendelkező láncaltapas jármű volt, vízszintes irányba is szintén egy ilyen párosítást alkalmaztak. Ezek segítségével a vertikális és horizontális gyorsulás amplitúdókat jól modellezhették.

Hildebrand, Keskinen, Navarrete (2008) szintén viszkoelasztikus elemekkel modellezte a talajt.

A talaj tömörítése nem-lineáris viszkoelasztikus modellel írható le (Sitkei, 1997).

2.2.6. A talaj csillapítása

A talaj -víztartalomtól függően- egészen addig nyomható össze, míg a benne lévő levegő és víz teljesen el nem távozik belőle. Nagyon magas víztartalom esetén a víz ellentarthat a nyomásnak, így akadályozva a további összenyomódást, ez azonban csak szélsőségesen magas nedvességtartalom esetén valósul meg.

Az összenyomódás során egyrészt a szemcse közökön keresztül áramló fluidumok áramlási ellenállása, másrészt pedig a talajszemcsék egymáshoz viszonyított elmozdulása miatt létrejött szemcsék közötti súrlódás hozza létre a csillapítási erőt.

A talajban tehát megfigyelhető mind a kétféle csillapítási forma: a viszkózus (nedves) illetve a Coulomb-féle (száraz) csillapítás is. A valóságos kapcsolatok többsége viszkózus csillapítási tulajdonsággal rendelkezik. Ebben az esetben a csillapítóerő nagysága arányos a mozgó tömeg sebességével, de vele ellentétes értelmű. Száraz csillapítás esetén a csillapító erő független a tömeg sebességétől.

Egy lengő rendszer csillapodására jellemző paraméter a logaritmikus dekrementum. A logaritmikus dekrementumot legegyszerűbben a lengés során mért lengésgyorsulás amplitúdók alapján lehet kiszámolni. A csillapítás és a logaritmikus dekrementum a lengés egyéb paraméterének ismeretében átszámolható egymásba:

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} m \omega_0. \quad (2.8)$$

A talaj csillapítási tulajdonságának meghatározása nem egyszerű feladat, ezért kevesen foglalkoztak vele. Gebresenbet (1992) kis magasságokból a talajra ejtett tömeg segítségével hozott létre lengéseket a talajban. A tömegben mért lengésgyorsulás amplitúdók felhasználásával határozta meg a talaj logaritmikus dekrementumát. A talajban létrejött talajszemcsék egymáshoz viszonyított relatív elmozdulásainak amplitúdója lényegesen befolyásolja a csillapítást. Ezt gyümölcsfák rázásakor tapasztalták, amikor 8-10 mm-es amplitúdók mellett a logaritmikus dekrementum elérte a 3-3,1 értéket (Sitkei, 2005).

2.2.7. Terepegyenetlenségek

A jármű haladását a domborzati viszonyok, a terepfelszín egyenetlenségei akadályozhatják vagy lassíthatják. A járművet így többletterhelés éri. Ezt a szerkezeti kialakításnál és méretezésnél is figyelembe kell venni.

A terepegyenetlenségek keltette gyorsulások, kialakult feszültségek, azaz a jelenség megjelenési formáit sztochasztikus folyamatnak tekintjük (Gedeon, 1993). Ez azt jelenti, hogy ha ugyanazzal a járművel ugyanazon a merev pályán többször végighaladunk, akkor minden egyes áthaladás során ugyanabban az idő pillanatban (vagy pálya helyen) más és más regisztrátum értéket kapunk. A sztochasztikus folyamat leírásához használt matematikai módszereket más területeken is alkalmazzák, például szabályozástechnikában, mechanikában, stb..

A terepegyenetlenségek elemzésének és kiértékelésének eredménye a terep leírására szolgáló három egymástól független paraméter: a szórás négyzet „ σ^2 ”, az „ L_0 ” integrál lépték (Gedeon, 1983) és az alfa „ α_2 ” úttípustól függő állandó. Ezek ismeretében az útprofil spektrumot vagy spektrális sűrűségfüggvényt „ G_x ” a gyakorlathoz elegendő, kellő pontossággal modellezhetjük. Az alábbi képletet alkalmazva:

$$G_{x(n_3)} = \sigma^2 \frac{4 L_0}{\left(1 + \frac{4}{\alpha_2 - 1} L_0 n_3\right)^{\alpha_2}} 100. \quad (2.9)$$

Az útprofil spektrum segítségével összehasonlíthatóvá válnak az egyes terepprofil típusok.

A 25 cm-nél nagyobb akadályokat makro akadályoknak, míg az ennél kisebbeket mikro akadályoknak nevezik (Gedeon, 2002, 2008). A mikro akadályok vagy más néven a terepprofil járulékos lengéseket okoznak, melyek hatással vannak a szlipre, valamint a gördülési ellenállásra. A függőlegesen felfelé irányuló gyorsulás csökkenti az adhéziós tömeget, így csökkennek a deformációk. A lefelé történő gyorsulás azonban növeli az adhéziós tömeget, ezzel növelve a deformációkat. Így fokozva a jármű menetellenállásának mértékét, illetve annak ingadozását (Kovács, 2012).

A függőleges lengésgyorsulások kiértékelésére Nguyen és Inaba (2011) is a teljesítmény sűrűséget (PSD, power spectral density) használta.

Durst, Mason, McKinley, Baylot (2011) a talajprofilok érdességének RMS-ét vizsgálta fraktál dimenzió analízissel. Bizonyos kikötésekkel fraktál dimenziós módszerrel jól lehet közelíteni a talajfelszín érdességének RMS-ét.

A növekvő terepegyenetlenség növekvő igénybevételt gerjeszt a haladó járművön. Ilyen tekintetben, különböző terepviszonyokkal és annak hatásával foglalkozott Gurmai és Kiss (2009).

2.3. Gumiabroncs-talaj kapcsolat

A környezet és jármű (kerék) tulajdonságai együtt határozzák meg a haladási energia igényt, ezért a kerék-pálya kapcsolatát a járműves szakemberek négy csoportba sorolják.

Az első a merev-kerék, merev-pálya modell, amelyet a vasúti közlekedésben alkalmaznak. A valóságban az acélkerék és sín is deformálódik. Ezek a deformációk azonban olyan csekélyek, hogy a modellben nem vesszük figyelembe. A kis deformáció miatt nagyon kis felfekvési felület alakul ki, így a gördülési ellenállási tényező értéke ennél a kapcsolatnál az ezred nagyságrendbe esik (pl.: 0,001). A tisztán merev kapcsolat hátránya a nagy lengésgyorsulások és reakcióerők keletkezése az esetleges pálya egyenetlenségek hatására.

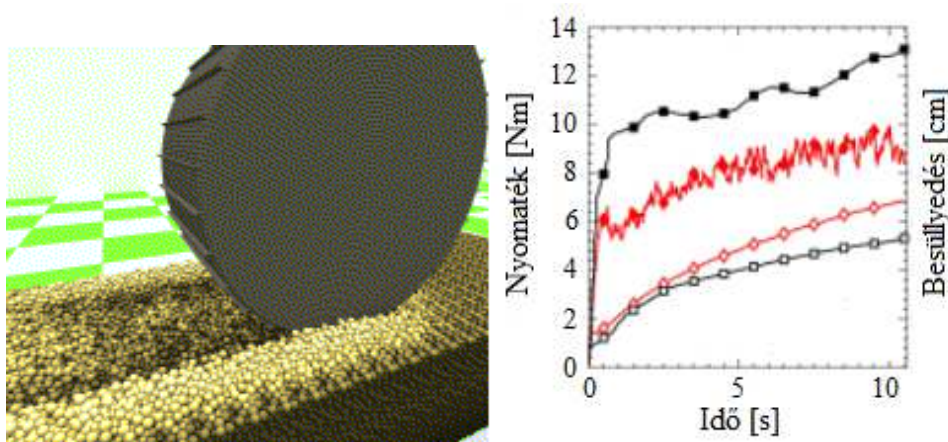
A második a deformálódó-kerék, merev-pálya modell, ez a közúti közlekedésre jellemző kapcsolat, ahol a beton vagy aszfalt a merev pálya. Itt az általános használat és magas haladási sebesség kerül előtérbe. A deformálódó elem a gumiabroncs, az út érdességéből adódó rázóhatásokat elnyeli, így lehetővé téve a nagyobb sebességű haladást. A gumiabroncs deformációja miatt a gördülési ellenállási tényező értéke ennek a kapcsolatnak a század nagyságrendekbe esik (pl.: 0,02).

A harmadik modell a deformálódó-pálya, merev-kerék kapcsolatának modellje. Ezzel a kapcsolattal vaskerekű földmunka-, szeméttelapi- és bányagépeknél találkozhatunk. Ezeken a gépeken azért

alkalmaznak merev kereket, hogy az a sérüléseknek jobban ellenálljon. A gördülési ellenállás értéke itt igen változó lehet. A talaj állapotától függ. Abban az esetben, amikor a talaj kemény, akkor kisebb, amikor lazább, akkor nagyobb a gördülési ellenállási tényező értéke. A gördülési ellenállás a talaj változatosságához hasonlóan ingadozik.

A negyedik kapcsolat típus a deformálódó-pálya és deformálódó-kerék modell. A gumibronccsal szerelt járművek terepi közlekedésénél, valamint a mezőgazdasági gépeknél találkozunk ilyen kapcsolattal. A gördülési ellenállási tényező ebben az esetben a legnagyobb, értéke tízed nagyságrendű lehet (pl.: 0,3). Ebben az esetben a legnagyobb a haladási energiaigény, mert a talaj és az abroncs együttesen deformálódik. A talaj paraméterek nagy szórása itt is jellemző.

A kerék és gumibroncs modellezés a téma jelentősége miatt nagyon elterjedt. Számos kutató foglalkozik vele. A számítástechnika fejlődésével együtt bonyolódnak a modellek. Az új modellezési eljárásokkal igyekeznek újabb és újabb eredményeket elérni. Napjainkban a legelterjedtebb a diszkrét elemes modellezés. Smith és Peng (2013) diszkrét elemes módszerrel alkottak bordás, egyelőre merev kereket, amely a szintén DEM módszerrel modellezett talajon gördült (2.5. ábra).



2.5. ábra Smith és Peng (2013) DEM modellje

Hajtott illetve vontatott kereket is tudnak modellezni. Az 2.5. ábrán és a hozzá tartozó diagramon éppen egy hajtott kerék látható melynek a nyomatékát és a talajba történő besüllyedését ábrázolták az idő függvényében. Pirossal jelölték a szimulált, feketével a valós mérést. A felső két görbe a nyomatékot, az alsó kettő a besüllyedést szemlélteti.

Végeselemes módszerrel történő modellezésre Xia (2011) által alkotott abroncs-talaj kapcsolat leírására készült modellje jó példa. Az abroncsot és a talajt is háromdimenziós térben hozta létre. Az abroncs és a talaj rácsozása és színezése segítségével mind a kettőt ért nyomások illetve deformációk jól szemléltethetők, így például nyomon követhető a keréksugár változás. A kerék kerületi sebességének növelése a gördülési sugár növekedését eredményezi. A növekedés mértéke egy telítődési görbe. Eleinte nagyobb, majd egyre kisebb mértékben növekszik a gördülési sugár. 1-ről 3 rad/s kerületi sebesség növelés hatására a gumibroncs gördülési sugara 17 mm-et növekedett. A vizsgált abroncs átmérője 981 mm, a szélessége 327 mm volt.

Raper (2005) alacsony gumibroncsnyomásnál vizsgálta a kerék (abroncs-talaj) érintkezési felületére kifejtett hatását. A gyökérzet növekedésének változását is figyelte a talajtaposás mértékétől függően.

A Mars és idegen bolygó expedíciók új lendületet adtak a kerék-talaj kapcsolatának vizsgálatához. Számos cikk jelenik meg a homoktalajok illetve különböző merev kerekű kis járművek kapcsolatáról. Idegen bolygókon a nagy hőingadozás és a légkör hiánya miatt általában előszeretettel alkalmaznak merev kereket. Expedíciós járműveknél az akadály leküzdő képesség és a megbízhatóság szerepelnek legfontosabb szempontként. Lényeges szempont még az energiatakarékos haladás. Bolygó kutató jármű vizsgálatával foglalkozott Li, Ding, Gao, Deng, Li (2013). Kutatásukban a kerék-talaj kapcsolatot vizsgálták.

2012-ben szintén Mars kutató -Rover elnevezésű- jármű kerekének a talajjal történő kapcsolatát vizsgálta Knuth, Johnson, Hopkins, Sullivan és Moore (2012) DEM módszerrel.

Ishigami, Miwa, Nagatani, Yoshida (2007) a Mars jármű talajmechanikai viselkedését kutatták laza talajon. Ehhez talaj vályút alkalmaztak, amelyben jobban megfigyelhető a kerék viselkedése.

Taghavifar és Mardini (2013) a radiál gumibroncsok gördülési ellenállásának alakulását vizsgálták a sebesség, belső légnyomás illetve a függőleges terhelés hatására. Talaj vályúban előkészített talajon, megfelelő függesztő mechanizmussal ellátott kereket gördítették. A fedett talajvályús kísérleteknek számos előnye van. Védett az időjárás viszonytagságaitól. A vályúba töltött talaj tulajdonsága jól módosítható. A mérések ismétlését nagy biztonsággal azonos körülmények között lehet végrehatani. A halladási sebesség, belső légnyomás valamint a függőleges terhelés is jól beállítható. Az egyik eredményük többek között, mely szerint a függőleges terhelés és a gördülési ellenállás között valamilyen exponenciális kapcsolat lehet. A fúvott gumibroncs gördülési ellenállási tényezője deformálódó pályán a terhelés növekedésével növekszik.

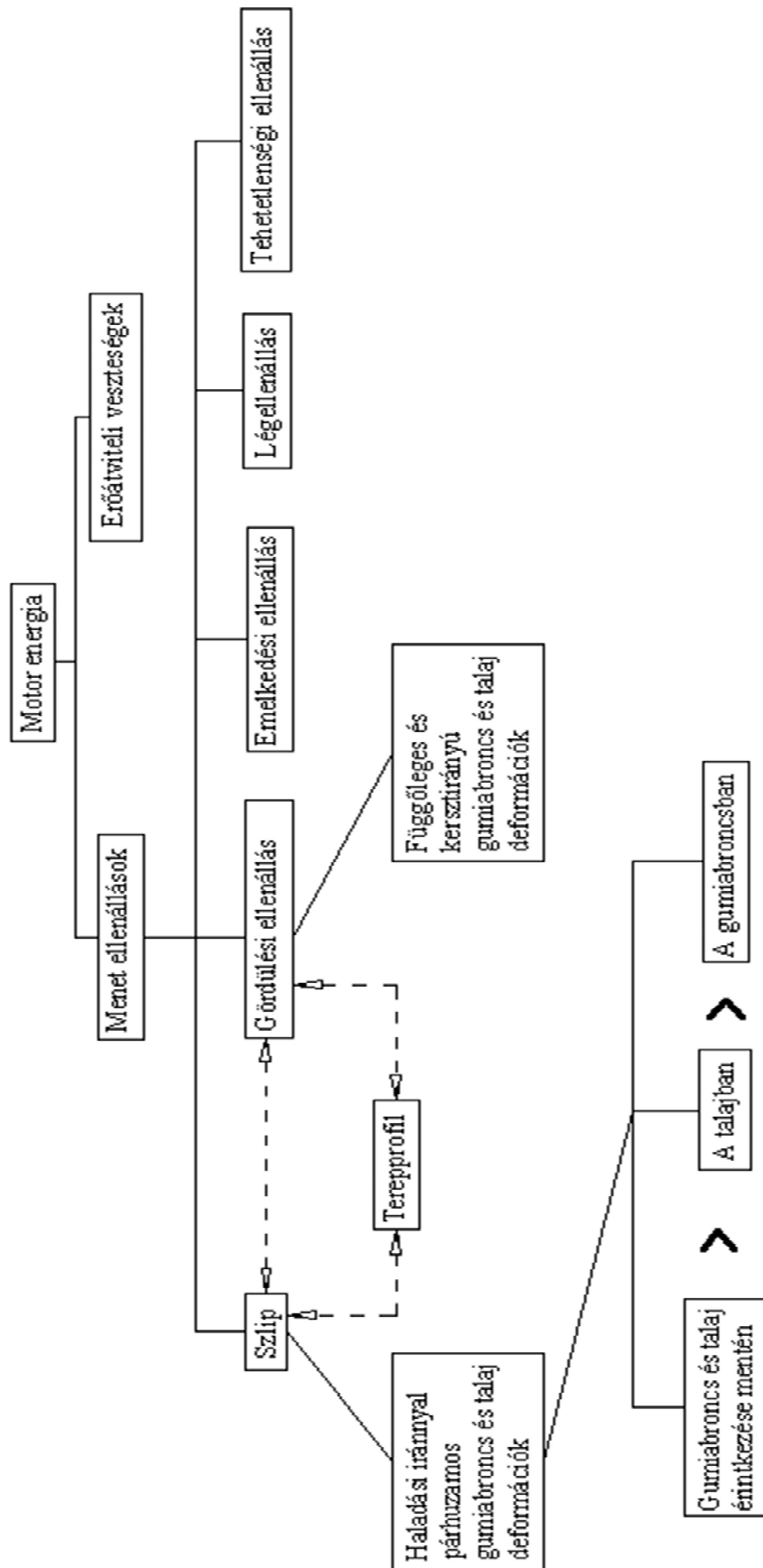
A jármű motorja által szolgáltatott energiát a menetellenállások és az erőátviteli veszteségek emésztik fel (2.6. ábra). A menetellenállások:

- Szlip okozta veszteség
- Gördülési ellenállás
- Emelkedési ellenállás
- Légellenállás
- Tehetetlenségi ellenállás.

A jármű haladása közben deformálja a talajt, valamint a gumibroncs is deformálódik. Az abroncs radiálisan illetve tangenciálisan is deformálódik. A keletkező deformációk energiavesztéssel járnak (Bernstein, 1913), ezeket a veszteségeket a gördülési ellenállás és a szlip foglalja magába.

A gördülési ellenállás és a szlip tartalmazza azokat a veszteségeket, amelyek a gumibroncsra és a jármű által bejárt pályára vonatkoznak. Ezek, a gumibroncs deformáció és a talaj deformáció által okozott ellenállás, valamint a terepprofil által keltett járulékos ellenállás.

A függőleges és keresztirányú gumibroncs, valamint talaj deformációkat a gördülési ellenállás tartalmazza. A haladási iránnyal párhuzamos talaj és gumibroncs deformációkat, valamint a gumibroncs és talaj között létrejött közvetlen elcsúszást is a szlip foglalja magába. Abban az esetben, ha jármű nem teljesen sima vagy homogén pályán halad, akkor a pályaprofil minden esetben függőleges és hosszirányú lengéseket is gerjeszt. A lengések átadódnak a járműtestre, így megváltoztatva annak helyzeti és mozgási energiáját, ezzel járulékos gumibroncs és talaj deformációt hozva létre (Kiss, 2001). A terepen történő haladás ezért nagyobb energia befektetést igényel a sima pályával szemben. Mivel a terepprofil sztochasztikus, ezért a lengések is azok. A terepen történő haladás dinamikus folyamat (Gedeon, 2002). Tehát a gumibroncs-talaj kapcsolatában a gördülési ellenállás, a szlip és a terepprofil keltette lengésekből keletkező járulékos terhelés okozza az energia veszteséget.



2.6. ábra A terepen mozgó jármű motorja által leadott energia megoszlása

2.3.1. Gördülési ellenállás

Mechanikai értelemben a gördülési ellenállás a kerék támasztóerejének a kerék középpontjára kifejtett nyomatéka, amely ellentétes a kerék forgásirányával. Ebben az esetben a gördülési ellenállás mértékegysége nyomaték [Nm]. (Csizmadia és Nádori, 1996)

Terepjárás-elméletben és járműdinamikában (Bekker, 1956) a gördülési ellenállás a gumibroncs és a talaj deformációk (függőleges és keresztirányú) összegéből tevődik össze. Járműre illetve kerékre is értelmezhető. Mértékegysége ebben az esetben erő [N].

A gördülési ellenállás:

$$F_g = F_N f \cos \alpha. \quad (2.10)$$

Teljesen vízszintes úton a $\cos \alpha = 1$.

A gördülési ellenállási tényező „ f ” meghatározása vontatással végezhető, ha a haladási sebesség (v = áll.) állandó, az emelkedő meredeksége $\alpha = 0^\circ$:

$$f = \frac{F_v}{F_N}. \quad (2.11)$$

2.3.2. Kerékcúsúság

A gördülés egyik fontos jellemzője a szlip. A szliphez vagy csúszási veszteséghez jellemzően a jármű haladási irányával megegyező irányú gumibroncs és talaj deformációk tartoznak. A gumibroncs-talaj kapcsolatában három helyen keletkezhet szlip veszteség. A gumibroncsban, a gumibroncs és talaj érintkezési felülete mentén és a talajban. Legnagyobb mértékű elcsúszás a gumibroncs és a talaj érintkezése mentén van. Ennél kisebb az elcsúszás a talajban, és minimális mértékű alakváltozás a gumibroncsban is keletkezik, amit alakváltozási szlipnek neveznek. A teljes szlip meghatározása méréssel történik. Mértékegysége [%].

Elméletben a szlipet a megtett út hosszából lehet kiszámolni (2.12.).

$$S = \frac{s_0 - s}{s_0} 100. \quad (2.12)$$

A gyakorlatban a szlipet azonban a jobban mérhető kerék fordulatszámából határozzák meg (2.13.). A szlip nélküli gördülés, vagyis a tiszta gördülés feltétele, hogy a megtett úthossz egyenlő legyen a legördülő ívhosszal. Erőtani szempontból ennek az a feltétele, hogy a keréknek a talajjal történő érintkezése során ne keletkezzen kerületi erő. Ebből az következik, hogy a gördülő keréknél mindig van valamekkora szlip. A szlipet nem lehet megszüntetni, a szlipet optimalizálni kell. A fűvott gumibronccsal szerelt közúti járművek szlipje 2-4 % a mezőgazdasági járművéké 8-12 %.

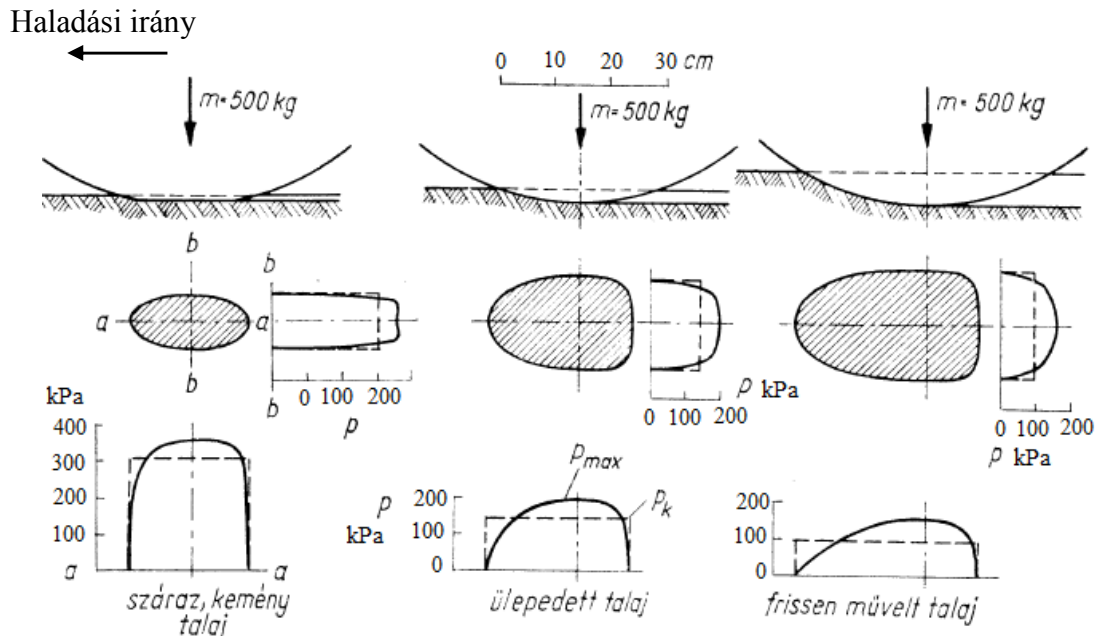
$$S = \frac{n_4 - n_0}{n_4} 100. \quad (2.13)$$

Különbség van pozitív illetve negatív szlip között. A pozitív szlip a hajtó keréknél keletkezik, amikor a kerék kerületi sebessége nagyobb, mint a kerék haladási sebessége. Negatív szlip a vontatott keréknél keletkezik, ha a kerék haladási sebessége nagyobb a kerületi sebességénél.

2.3.3. Kerék és a talaj érintkezési felülete

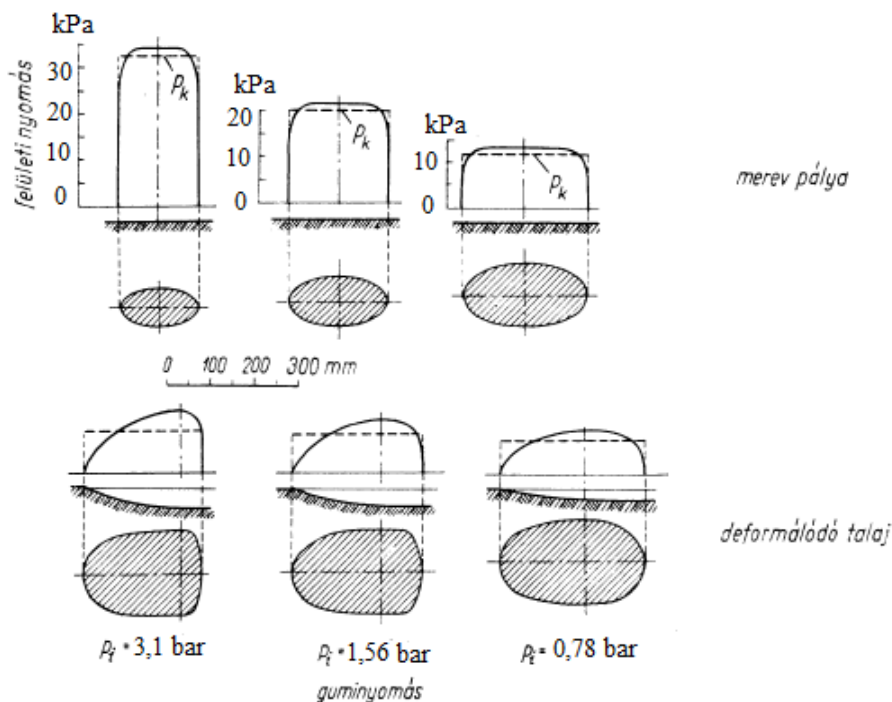
A felfekvési felület változása merev pályán egyre kisebb teherbírású talajokon a 2.7. ábrán látható. A talaj teherbírásának csökkenésével a talaj visszarugózása miatt a nyom képe a függőleges tengelyre nem lesz szimmetrikus. A deformáció növekedésével növekszik az aszimmetria mértéke is. A felfekvési felület a gumibroncs és a talaj közös deformációjaként jön létre. A talajdeformáció növekedésével növekszik a felfekvési felület is, és ezzel fordítottan csökken a közepes talajnyomás.

A kerék függőleges tengelyéhez képest az ellipszis haladási irányba eső része előre felé megnyúlik. Az ellenkező oldalon a talajtaposás miatt a kerék nem fekszik fel, így az ellipszis ezen oldala rövidebb lesz. A talajnyomás maximális értéke a kerék függőleges tengelye körül alakul ki. Attól mindkét irányban távolodva csökken. A szakma merev pályán gördülő abroncs felfekvési felületének nagyságát ellipszissel közelíti, így tett Smith, Ellies, Horn (2000) is.



2.7. ábra Azonos tömegű terhelés mellett a kerék felfekvési felületeinek változása különböző teherbírású talajokon (Sitkei, 1967)

A gumiabroncs nyomása is hatással van a felfekvési felületre (2.8. ábra). Az abroncsnyomás növelése csökkenti a felfekvési felületet merev pályán, illetve deformálódó pályán egyaránt.



2.8. ábra A felfekvési felület változása az abroncsnyomás függvényében merev-pályán illetve deformálódó pályán (Sitkei, 1967)

A legkisebb felfekvési felület és ezzel a maximális talajnyomás merev-pályán a legnagyobb abroncsnyomás mellett jön létre.

Lee (2011) végeelem módszerrel modellezte a fűvott gumibroncs és a hó kapcsolatában kialakult viszonyokat. Több abroncsnyomást alkalmazott. Többek között meghatározta az abroncs felfekvési felülete alatti nyomás eloszlást.

2.3.4. Tolóerő meghatározás

A tolóerő a gumibroncs és a talaj között ébred. A jármű -a kerék- akkor indul el, ha a kerületi erő (tolóerő) nagyobb, mint a gördülési ellenállás, valamint, ha a talaj nyírószilárdsága nagyobb, mint a kerületi erőből adódó talajnyírás. Az utóbbi teljes mértékben a talaj tulajdonságától függ. A kifejthető tolóerő tehát a talaj nyírószilárdságától, az adhéziós súlytól és a járószerkezet veszteségeitől függ. A talaj nyírószilárdságát keretes talajnyíró készülékkel vagy helyszíni talajnyíró műszerrel határozzák meg. A vizsgálatok során megállapították, hogy a talaj nyírószilárdságának szempontjából két fő típust lehet megkülönböztetni. Ezek a

- kohézióval rendelkező talajok (2.9. a, ábra), melyek nyírófeszültségét a

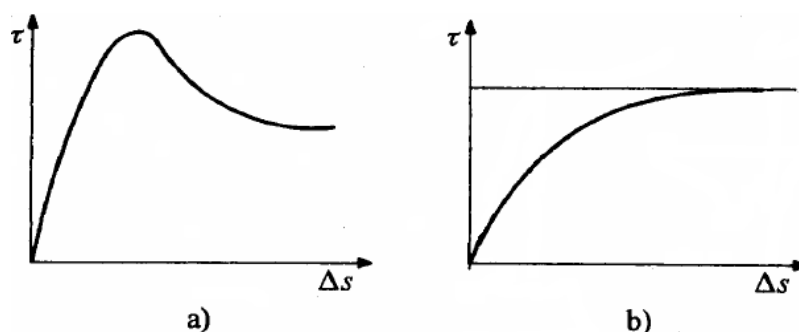
$$\tau = c + \mu \sigma \quad (2.14)$$

képlettel lehet számolni, és a

- kohézió nélküli talajok (2.9. b, ábra), melyek nyírófeszültségét a

$$\tau = \mu \sigma \quad (2.15)$$

képlettel lehet számolni.



2.9. ábra Különböző nyírási diagramok, a) csúcsos, b) aszimptotikus nyírási diagram

Különböző homoktalajok nyírásával foglalkozott Sadek, Chen, Liu (2011). A talajmintákat keretes talajnyíró készülékben nyírták el. A méréseiket DEM módszerrel is modellezték. Eredményként aszimptotikus és csúcsos nyírási diagramjaik törés pontjait határozták meg.

A csúcsos nyírási görbe leírására Bekker (1956, 1961) javasolt képletet. Az aszimptotikus nyírási függvény leírására -láncaltalpas járószerkezetnél- Jánosi és Hanamoto (1961) alkotott képletet:

$$F_t = \tau_m F_x \left[1 - \frac{K_3}{s l} \left(1 - e^{-\frac{s l}{K_3}} \right) \right]. \quad (2.16)$$

A tolóerő meghatározásával még számos kutató foglalkozott. Sitkei (1978, 1986) bevezette a karakterisztikus szlip fogalmát, amely a nedvességtartalom, sűrűség, abroncsátmérő, nyomás és kerékterhelés függvénye:

$$F_t = \tau_m F_x \left(1 - e^{-\frac{s}{S}} \right). \quad (2.17)$$

A redukált nyírási diagram fogalmát Komándi (1993) vezette be. A csúcsos nyírási diagramot aszimptotikus nyírási diagramá redukálta, ezzel a görbéket leíró bonyolult összefüggéseket leegyszerűsítette. A gumibroncs-talaj kapcsolatában kifejezhető vonóerő képletet később módosította.

A redukált nyírási diagramból számítható tolóerő meghatározásának képlete:

$$F_t = \tau_m F_x \left[1 - \frac{K_{red}}{SY} \left(1 - e^{-\frac{SY}{K_{red}}} \right) \right]. \quad (2.18)$$

2.3.5. Energetikai modellek

A terepen haladó jármű energiaigényét a ráható ellenállások alapján határozzák meg. Traktorra vonatkozó teljesítménymérleg és veszteség meghatározás módszerét Komándi (1966) dolgozta ki.

Zanasi, Grossi, Morselli (2007) a gumibroncs-talaj kapcsolatára háromdimenziós dinamikai energetikai modellt készített. A modellezéshez Power-Orient Graphic (POG) technikát használt. A modell a jármű vagy kerék megcsúszását is figyelembe tudja venni.

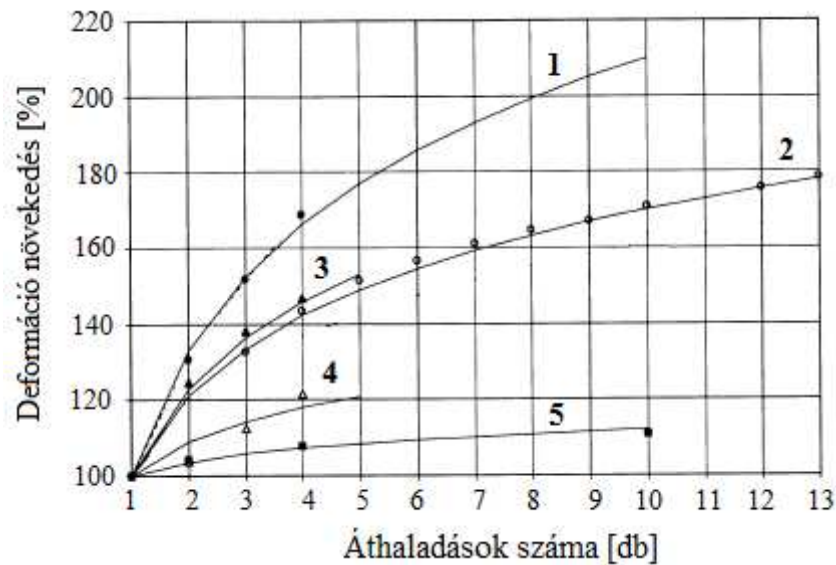
Park, Popov, Cole (2004) vizsgálta a nehéz terepjárók rezgéseinek hatását a talaj deformációra. Három különböző numerikus modellt alkottak: az egy pont érintkezési-, a merevkerék érintkezési-, és a deformálódó kerék érintkezési modellt.

Jardine, Potts, Fourie, Burland (1986) tanulmányozták a nem-lineáris viselkedés hatására bekövetkezett talajszerkezeti változásokat.

Nakashima és Oida (2004) véges elem és diszkrét elemes módszerrel vizsgálták a talaj-gumibroncs kapcsolatát. Akkoriban elemi talajrészként még a gömb forma volt elterjedt. Ők is ezt alkalmazták. Az elemek közötti kapcsolat leírásához itt is reológiai elemeket használtak. Függőleges kapcsolatnál egy kelvin elem, amely csak nyomást tud felvenni, húzás hatására a két elem elválk egymástól. Vízszintes irányba szintén kelvin elem, amellyel sorba kapcsoltak egy száraz súrlódásos elemet.

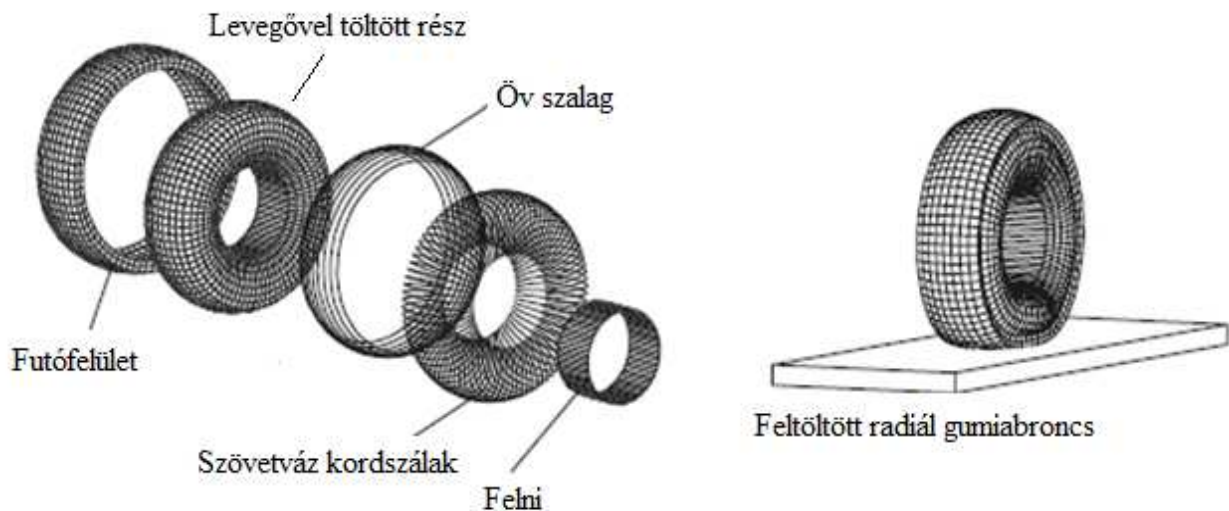
Az egy nyomon történő többszöri áthaladást a szakma multi-pass jelenségnek nevezi. A jelenséggel elsőként Holm (1969) foglalkozott majd később, például Kane, Ayers, Howard, Anderson, Koch (2013) és Lyasko (2010). Lyasko mérései azt mutatják, hogy adott talajon adott gumibronccsal történő többszöri áthaladás eredményeként a talaj a tömörödés miatt felkeményedik (2.10. ábra.). Az első áthaladáshoz képest a 10. áthaladás eredményeként a talaj deformációja az elsőhöz képest 70 %-al lesz kisebb. Az első és második áthaladás között talajtól és abroncstól (1-5 különböző abroncs-talaj párosítások) függően 5-30 %-os növekedés lehet. A 12 és 13. áthaladás között viszont csak 5 % körüli deformáció növekedés figyelhető meg. A többszöri áthaladás nem csak a deformációra, hanem a vontatási erő és energia szükségletre is hatással van.

A gumibroncs-talaj kapcsolatban a kerék alatt kialakult deformáció eredményezi a gördülési ellenállást (Bekker, 1956) ezzel az egyik legjelentősebb energetikai paraméter. Minél nagyobb a talaj deformáció, annál nagyobb a haladási energia igény. Különböző talaj-abroncs kapcsolatában kialakult deformációkkal foglalkozott Kiss és Laib (1997).



2.10. ábra Multi-pass jelenség hatása a talajdeformációra, különböző abroncs-talaj párosítások esetén, 1: abroncs (5.00-10) frissen szántott vályog talajon, 2: abroncs (5.00-10) ülepedett vályog talajon 3: abroncs (24.5-32) homokos vályogtalajon, 4: abroncs (24.5-32) agyagos homoktalajon, 5: acél kerekű traktor agyag talajon (Lyasko, 2010)

A gumiabroncs-talaj kapcsolatát Fervers (2004) is modellezte. FEM módszert alkalmazott. Különböző talajoknál és különböző abroncs légnyomásoknál. A kerék minden részét modellezte és a részeket összeillesztve készítette el a teljes kerék modelljét (2.11. ábra.)



2.11. ábra Egyszerű 3D radiál gumiabroncs modell (Fervers, 2004)

2.4. Szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A szakirodalom áttekintése alapján elmondható, hogy a gumibroncs talaj kapcsolatában a csillapítási veszteségek (logaritmikus dekrementum) részletesebb vizsgálatát csak az utóbbi évtizedekben kezdték el. A gumibroncs-talaj kapcsolat egy dinamikus, egyszerre gerjesztett és csillapított lengőrendszer, melynek viselkedését a csillapításra jellemző paraméter a logaritmikus dekrementum alapjaiban határozza meg. Az abroncson ébredő lengésgyorsulások nagyságát, a talajon való gördülése közben a talaj csillapítási tulajdonsága jellemzően meghatározza. A talaj csillapítási tulajdonságának meghatározásával nagyon kevesen foglalkoztak. A szakirodalom áttekintése után megállapítható, hogy külön, a talaj csillapítási értékének megméréseire vagy meghatározására irányuló módszer nem létezik. Továbbá nem tisztázott, milyen függvénykapcsolat van a talajjellemzők és azoknak a keréken kifejtett csillapításának mértéke között.

A talajnyomás hatására kialakult besüllyedés témakörében számos irodalom lelhető fel. Viszont a tömörítő felület alatt végbemenő folyamatok jellemzően kevésbé vannak feltárva. Ilyen például a nyomó felület alatti függőleges deformáció és a talaj oldal folyása. Rendszerint csak a -nyomó felület hatására- kialakult függőleges talajdeformációval foglalkoznak, holott -talaj típustól függően, különböző mértékben- a nyomófelület alatt oldalfolyás is keletkezik. Nagyobb mennyiségű homoktartalom esetén nagyobb, magasabb agyagtartalom esetén pedig kisebb mértékű oldalfolyás jön létre. Jelenleg ezért nem teljesen egyértelmű, hogy mikor mekkora nyomómélység alakul ki.

A kúpos penetrométeres méréseket elterjedten alkalmazzák. Jellemzően talaj teherbírasi vizsgálatára, talaj megmunkálási minőség ellenőrzésre, illetve a járműre vonatkozó várható gördülési ellenállás nagyságának meghatározására használják fel. A talaj sűrűség meghatározása -főleg mélyebb rétegekben- igen munkaigényes feladat. A talaj sűrűség valamilyen módon összefügg a CI értékkel, hiszen kisebb sűrűségű talajoknál kisebb, míg tömörödtebb, nagyobb sűrűségű talajoknál nagyobb talaj ellenállást lehet mérni. Azonban a szakirodalomban nem lelhető fel olyan összefüggés, amely a CI érték alapján megadná a talaj sűrűséget.

A talajnyomás és a hatására kialakult besüllyedés közötti kapcsolat leírására több összefüggés létezik (2.3, 2.4, 2.5, 2.6). Közös jellemzőjük a talaj teherbírasi tényezője „ k ” és a talajtól függő konstans az „ n ” kitevő, értékük talajonként és összefüggésenként eltérő lehet. A gyakorlatban leginkább a Szaakjan féle formulát (2.6) alkalmazzák, mert az figyelembe veszi a nyomólap átmérőjét is. Az „ n ” kitevő szakirodalmi adatok alapján még kellő pontossággal megbecsülhető, de a meghatározásukra egyébként nyomólapos talajvizsgálatokat kell végezni, mely igen munkaigényes feladat a nagy gépi erő szükséglet miatt. Jó lenne olyan eljárás vagy módszer, amellyel a „ k ” illetve az „ n ” kitevő, egyszerűbben, nagy berendezések nélkül a helyszínen, aránylag könnyen meghatározható lenne.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben mutatom be az alkalmazott mérési módszereket és eszközöket. A gumiabroncs-talaj kapcsolatában a gumiabroncs nyomása meghatározó szerepet játszik a menetellenállás nagyságának kialakulásában. Közvetlenül befolyásolja a talajdeformáció mértékét és a csillapítást is. A talajdeformáció és a talajcsillapítás vizsgálatához szabadföldi és laboratóriumi kísérletek szolgáltatták az alapot.

3.1. Vontatási kísérlet elrendezése és menete

A vizsgált jármű egy Gaz 69 típusú terepjáró volt, amelyet egy John Deere 6600 típusú traktor vontatott 10 km/h állandó sebességgel (3.1. ábra). A vontatási vizsgálat betonon, egy talajtípuson, annak azonban három különböző állapotán történt. A vonószerkezet lehetővé tette, hogy a jármű még érintetlen ún. szűz profilú talajon haladjon. Minden szakaszon külön beállított abroncsleányomás volt. Az alkalmazott abroncsleányomások. 1,5 bar, 1,8 bar, 2,1 bar és 2,4 bar.



3.1. ábra A vizsgálathoz használt járműszerelvénnyel, vontató jármű: John Deere 6600, vizsgált jármű: Gaz 69

A talajon történő vontatás helyszínrajza a 3.2. ábrán látható. Minden beállított abroncsnyomáshoz tartozott egy-egy 10 m hosszúságú felfilózott mérőszakasz, melyek előtt illetve után biztosítva volt elegendő hosszúságú gyorsítási és kifizetési út.

A vizsgált jármű mind a négy kereke azonos típusú gumiabronccsal volt felszerelve. Abroncs adatok:

Abroncs típus: Taurus 6.50-16

Mintázat: TP6

Pánt jele: 5,00 F x 16

Tömlő: 6,50-16

Átmérő: 760 mm $\pm 1,5\%$

Maximális szélesség: 184 mm

Terhelt sugár, álló: 350 mm $\pm 1,5\%$ (mindenkori névleges terhelés)

PR.: 6

3.1. táblázat katalógus szerinti abroncs terhelhetőség

Megengedett maximális terhelés 8,333 m/s (30 km/h) maximális sebességig:					
78 480 [N/m ²]	98 100	147 150	196 200	245 250	294 300
3041,1 [N]	3433,5	4365,5	5120,8	5787,9	6435,4

A jármű tömege 1310 kg, első tengelyterhelés 780 kg, hátsó tengelyterhelés, 530 kg, tengelytávolsága 2,38 m, a nyomtáv 1,47 m. A tengelyterhelések illetve a jármű tömege is tartalmazza a járművezető tömegét.



3.2. ábra A talajon történt vontatás helyszín rajza, a vontatási szakaszokkal és a szakaszokon alkalmazott abroncsnyomásokkal

A mérés menete:

1. Mérőszakasz kijelölése (10 m), ráfutási és kifutási útszakasszal.
2. Mérőszakasz (szűz profil) profilozása közlekedőedények elvén működő profilozó készülékkel.
3. Talaj mintavétel és talaj vizsgálatok a mérőszakasz több pontján (CI, nedvességtartalom).
4. A vizsgált járművön az abroncsleágyozás beállítása.
(150 kPa (1,5 bar); 180 kPa; 210 kPa; 240 kPa)
5. Vontatási kísérlet elvégzése. ($v = \text{áll} = 2,778 \text{ m/s}$, (10 km/h))
6. A deformált mérőszakasz újra profilozása a keréknyomban (maradó profil felvétele).
7. A talaj vizsgálatok ismételt elvégzése a keréknyomban.

A fenti vizsgálati sor vályogos-homoktalaj tarló, tárcsázott tarló és kultivátorozott állapotán lett elvégezve. Profilozás nélküli vontatás betonon is történt. Továbbiakban ezen kifejezések alatt (tarló, tárcsázott tarló, kultivátorozott) az alábbi táblázatban szereplő paraméterekkel rendelkező vályogos-homoktalaj különböző állapotait kell érteni.

3.2. táblázat Talajállapotok megnevezéséhez tartozó talajfizikai paraméterek

	Térfogat tömeg ρ [g/cm ³]*	Nedvességtartalom n_t [%]	Teherbírási tényező k [N/cm ²]	Homok: 2-0,05 mm	Iszap: 0,05- 0,002 mm	Agyag: <0,002 mm
Tarló	1,64	16,63	85	90,50%	3,20%	6,30%
Tárcsázott tarló	1,60	9,46	47			
Kultivátorozott	1,52	11,10	33			

*átlagos adatok, eloszlás a 4.18. ábrán.

Az első oszlop a talaj térfogat tömege. A második oszlop a talaj nedvességtartalma, tömegszázalékban, száraz bázisra vonatkoztatva. A harmadik a talaj alakváltozási tényezője. Az utolsó három pedig a talaj fizikai összetétele, a szemcseméret tartományok.

A betonon történt vontatási vizsgálat szükségességét az indokolta, hogy legyen egy referenciamérés, amelyhez a vizsgált talajon végzett paramétereket (például a kialakult gumibroncs felfekvési felület) lehet hasonlítani. A beton nem deformálódó pályamodellnek felel meg, így azon csak a gumibroncs deformálódik. A profilja is jó közelítéssel teljesen síknak tekinthető a vizsgálat alá vont talajokéhoz képest. A betonon való mérés segítségével később számításban elkülöníthető a gumibroncs- és a talajdeformáció illetve az abroncs és a talaj csillapítása.

3.2. Járműparaméterek mérési módszerei és eszközei

A járműparaméterek egy része főleg geometriai méretekből állnak, amelyek értéke a vizsgálat során nem változik. Ezek meghatározása mérőszalaggal, milliméteres pontossággal történt:

1. Nyomtáv
2. Gumibroncs szélesség
3. Tengelytáv
4. Kerék átmérő

A jármű tömeg meghatározásának eszköze négy darab talpmérleg volt. (3.3. ábra). A mérlegek által mutatott értékek összege adja a jármű össztömegét, valamint így tengelyenként és gumibroncsenként is meghatározhatók a terhelési értékek. Mérés közben a haladási sebesség 2,778 m/s (10 km/h) volt. A haladási sebesség a mérőszakasz hosszából és a mérőszakasz megtételéhez szükséges időből lett meghatározva, valamint a traktor sebességmérőjével ellenőrizve.

A vizsgált jármű rugóállandója a jármű adott tengelyre eső súlyerejéből és a kezdeti besüllyedéséből számolható. A kezdeti besüllyedés megállapításának menete:

- A talaj és a felépítmény megfelelő pontja közötti távolság felvétele.
- A jármű karosszériájának megemelése úgy, hogy a kijelölt tengely tehermentesüljön.
- A talaj és a felépítmény megfelelő pontja közötti távolság újbóli felvétele.

A mért két távolság különbsége adja a kezdeti besüllyedés nagyságát.

További jármű paraméterek:

5. Jármű tömeg
6. Haladási sebesség
7. Gumibroncsnyomás
 - a. Abroncs rugómerevsége

Az 5, 6 ponttal jelölt paraméterek mérés közben nem változtak.



3.3. ábra A jármű tömegének meghatározása, PAT-SAW 10 C típusú talpmérleg, méréshatár: 10 tonna, széria szám: 85427 C

Abroncs rugómerevségének a meghatározása

A jármű abroncsának rugómerevségét az abroncs adott nyomáson felvett rugókarakterisztikájából lehet kiolvasni. A rugókarakterisztika meghatározása:

A talpmérlegek segítségével mindig leolvasható volt az abroncsot terhelő erő. A rugókarakterisztikát minden vizsgált abroncsnyomáson meg kellett határozni. A megfelelő nyomás érték beállítása után a kereket tehermentesíteni kell. Majd lemérni a kerék közepe és a talaj közötti távolságot (3.4. a. ábra.). Következő lépésben az abroncsot a jármű saját súlyával kell terhelni. Majd többlet súlyok felhasználásával ismételni a mérést (3.4. b ábra.). Minden egyes súly körülbelül 981 N többletterhelést eredményezett a vizsgált keréken. A terhelés növelésével párhuzamosan lemérésre került az abroncs deformáció is. A megfelelően társított terhelés és deformáció értékek összességének eredménye az abroncs rugókarakterisztikája.



3.4. ábra Rugómerevség meghatározás, a) kerék középpontjának és a talaj távolságának felvétele, b) többletterhelés a vizsgált abroncson

3.3. Talajparaméterek mérésének módszerei és eszközei

A vizsgált talaj típusa: vályogos-homoktalaj. A vizsgálat során a talajfelszín: gabonatarló, tárcsázott (hántott) gabonatarló és kultivátorozott talaj volt. A vizsgált talaj paraméterek:

1. Talajfelszín (talajprofil), szintmérő készülék.
2. Kúpos index (CI – érték), penetrologger: Ejkelkamp típus (3.5. ábra.).
3. Fizikai összetétel, talajmintavétel (3.6. ábra.).
4. Nedvességtartam, SMM-1 típusú talajnedvesség mérő (3.7. ábra.).

A talaj egyes tulajdonságai napszakon belül is jelentősen változhatnak, ezért a mérés alatt, közvetlenül előtte illetve utána lettek rögzítve. A betonon kiválasztott szakasz teljesen vízszintesnek tekinthető.

3.2.1. A talajfelszín mérési módszere és eszköze

A talajfelszín minden talajállapoton áthaladás előtt, illetve áthaladás után is felmérésre került. Így a talajdeformáció pontosan számolható. A talajfelszín alakjának felvétele (profilozása) úgynevezett profilométerrel történt, amely a közlekedőedények elvén működik. A műszer közvetlen profilmérést valósít meg. A kijelölt szakaszokon pontosan a leendő keréknyom közepében lett -egy előre meghatározott ponthoz képest- a talajfelszín magassága meghatározva. A jobb és bal nyomvonal profilja egyaránt rögzítésre került. A mintavételezési távolsága 10 cm volt. Mivel a mérési szakasz 0 cm-es pontjában volt az első mérési pont így az egész szakaszon, egy oldalon összesen 101 mérési eredmény született. A mérés pontossága $\pm 0,125$ cm volt.

A közlekedő edények elvén működő eszköz lényege, hogy egy kiválasztott „bázis” ponthoz képest lehet meghatározni a profilozás pontjaiban a talajszint magasságát. A kiválasztott „bázis” pont magassága a mérés előtt és után változatlan volt.

3.2.2. Kúpos-index mérési módszere és eszköze

A kúpos index a talaj teherbírására jellemző érték. Jelölése: CI. A kúpos index függvény a mélység függvényében megadja a talaj teherbíró képességét. A CI mérés az úgynevezett Ejkelkamp típusú Penetrologgerrel történt (3.5. ábra). A műszer egy erőmérő cellával és egy lézeres távolság mérővel van ellátva, ezek segítségével a mért CI függvényt digitális formában rögzíti. A mérés szabadföldön illetve talajvályóban 2 cm^2 -es, 60° -os és $3,3\text{ cm}^2$, 30° -os csúcshögű nyomófejjel történt.



3.5. ábra Penetrologger és használata

3.2.3. Talaj fizikai összetételének meghatározási módszere és eszközei

A talaj fizikai összetétele laboratóriumi körülmények között került megállapításra a Talajtani Intézettel együttműködve. A fizikai összetétel megállapításához a nyomvonalak közvetlen közeléből vett talajminta szolgált (3.6. ábra). A mintavevő hengerek 5 cm magasságú és átmérőjű rozsdamentes acél csövek. A csöveket egy készülékbe kell helyezni majd azt a talajba verni. A henger feltöltődik talajjal, ezután a készülékből kiszedett henger végeit műanyag tetővel lehet lezárni. A talajminták így megőrzik eredeti szerkezetüket valamint nedvességtartalmukat is. A minták segítségével első lépésben a nedvességtartalom lett meghatározva majd a szemcseösszetétel. Szabadföldi talaj és talajvályúba töltött talaj esetén egyaránt.



3.6. ábra Talajmintavétel

A talajt alkotó szemcsék szitaszűrési eljárással lettek elválasztva egymástól. A különböző szemcseméreték mennyiségének ismeretében megállapítható a talaj típusa. A mintavevő henger méreteinek ismeretében pedig a talaj térfogattömege és porozitása is számolható.

3.2.4. Helyszíni nedvességtartalom mérés módszere és eszköze

A talajminták segítségével laboratóriumban meghatározott nedvességtartalom mellett, a terepen is meghatározásra került a talaj nedvességtartalma. Erre a célra a PCE-SMM 1 típusú talajnedvesség mérő készülék szolgált (3.7. ábra). A műszer mérési tartománya 0 - 50% +/-2%.



3.7. ábra PCE-SMM 1 talajnedvesség mérő

3.4. Közös paraméterek mérésének módszerei és eszközei

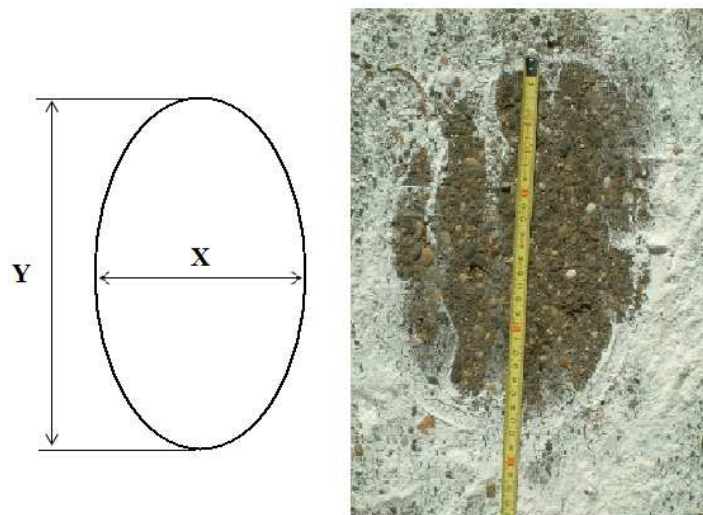
A gumiabroncs-talaj kapcsolatában a haladás során kialakult jellemzők a talaj illetve jármű együttes egymásra hatásából jön létre. Például a tömeg megváltozása megváltoztatja az abroncs felfekvési felületét. A talaj teherbírása, az abroncsnyomása vagy a gumiabroncs rugalmasságának változása is hasonló eredménnyel jár. Azonban ezek a változások különböző mértékben hatnak. Így ha valamely előző paraméterek (talaj vagy jármű) közül valamelyik megváltozik, akkor az alábbi jellemzők is változni fognak.

A mért paraméterek a gumiabroncs-talaj kapcsolatában:

1. Felfekvési felület, hossz- és keresztátló, mérőszalag (3.8 ábra.).
2. Talaj deformáció, profilométer, számítás.
3. Vonóerő, erőmérő cella (50 kN, 3.10. ábra.).
4. Lengésgyorsulás, háromirányú gyorsulás érzékelő (3.9. ábra.), Spider-8-as típusú adatgyűjtő rendszer (3.11. ábra.).

3.3.1. Gumiabroncs felfekvési felületének meghatározási módszere

A felfekvési felület egy jelentős gumiabroncs-talaj kapcsolati paraméter. Ezen a felületen érintkezik a két különálló rész, ezen valósul meg a különböző erőhatások átadása. Például: tolóerő, fékerő, oldalerő, tapadás, támasztóerő.



3.8. ábra Felfekvési felület meghatározása

A felfekvési felületet minden abroncsnyomás és talajállapot mellett, az első tengely két kerékén a jármű álló helyzetében lett felvéve. Amikor a jármű az adott talajra állt jelző porral történő körbeszórás jelölte ki a felületet. A jármű tovább haladása után az ott maradt jelzőpormentes területnek a hossza és szélessége alapján számolható a felület. A gumiabroncs felfekvési felülete álló helyzetben illetve merevpályán ellipszis alakkal közelíthető. Deformálódó pályán történő haladás esetén az ellipszisforma torzul (2.8. ábra.). A teljesen pontos felfekvési felület meghatározásához azt menetközben kellene mérni. Menet közbeni felfekvési felület mérésre nem volt lehetőség, ezért az álló helyzetben mért átlók szolgáltak a felfekvési felület meghatározásához.

Az ellipszis felületét, a

$$F_{x,0} = \frac{X Y \pi}{4} \quad (3.1)$$

képlettel lehet kiszámolni. Az ellipszis területszámításánál a kistengelyt X a nagytengelyt pedig Y jelöli (3.8. ábra). A továbbiakban a felfekvési felület kifejezés láttán a két mellső abroncs alatt meghatározott felfekvési felületek átlagát (számtani közepét) kell érteni.

3.3.2. Lengésgyorsulások és a vonóerő mérési módszerei és eszközei

A lengésgyorsulásokat három különböző gyorsulásérzékelővel a jármű három különböző helyén lettek mérve. A jobb féltengelyen egy háromirányú érzékelő volt elhelyezve (3.9. ábra). A bal féltengelyen egy kétirányú gyorsulás érzékelő. A vezető ülés mellett pedig egy egyirányú gyorsulás érzékelő kapott helyet, amely csak a függőleges gyorsulásokat mérte. A mért gyorsulás értékek korrigálás nélkül közvetlenül kerültek felhasználásra a számítások során.



3.9. ábra Gyorsulás érzékelő a bal féltengelyen

A féltengelyen elhelyezett gyorsulás érzékelővel lettek a logaritmusos dekrementum meghatározásához szükséges csillapodási görbék felvéve. A jármű első tengelyének két kereke egy kb. 20 cm magasságú rámpáról esett a talajra. Ezt ejtési vizsgálatnak nevezik. A kerék talajjal történő találkozásának pillanatától az abroncs és talaj együtt leng. A féltengelyre szerelt gyorsulás érzékelő rögzíti ezt a lengést. Az ejtési vizsgálatot minden vizsgált talajállapatra és abroncsnyomásra elvégeztem.

A vonóerő mérő egy 50 kN méréshatárral rendelkező nyúlásmérő bélyeges erőmérő cella (3.10. ábra). A cella a vonószerkezeten úgy lett elhelyezve, hogy azon keresztül valósuljon meg a jármű vontatása (3.12. ábra). Az erőmérő cellából és gyorsulás érzékelőkből érkező jeleket egy Spider-8 típusú adatgyűjtő rendszer fogadta (3.11. ábra) és továbbította a vonó járművön elhelyezett számítógépnek. A számítógépen a Catman elnevezésű 4.5-ös verziószámú programmal történt a mintavételezés és a mért paraméterek rögzítése. A mintavételezési sűrűség 0,625 ms volt.



3.10. ábra Erőmérő cella, 50 kN



3.11. ábra Spider-8 típusú adatrögzítő bekötése

A gyorsulás érzékelő alsó mérés határa: -200 m/s^2 , a felső: $+200 \text{ m/s}^2$. A mérés során ez a tartomány nem került átlépésre. Szabadföldi mérések – deformálódó talaj és abroncs kapcsolatnál – és alacsony sebességnél ilyen tág tartományt nehéz meghaladni. A mérőeszköz tömege 17 g, ez a csekély tömegnövekedés a jármű tömegéhez képest, gyakorlatilag nem befolyásolja a mérési eredményeket.

A vonószerkezet kialakítása a 3.12. ábrán látható.



3.12. ábra A John Deere 6600-as típusú traktorra erősített vonószerkezet

3.5. Talajvályús kísérletek módszerei és eszközei

A 3.13 ábrán látható talajvályú $1,8 \times 1,0 \times 0,7 \text{ m}$. Méreteit az indokolja, hogy a mérési ponttal kellő távolságot kell tartani az oldalfalaktól, mert a kúposindex mérésre hatással van mind az oldalfal, mind pedig a padló jelenléte. A feltöltése ugyanazon talajjal történt, mint amin a szabadföldi vontatási vizsgálatok zajlottak. Azzal a különbséggel, hogy a vályú feltöltéshez átszitált, növényi részekről mentes tiszta talaj került. A talajvályú kétféleképpen lett megtöltve:

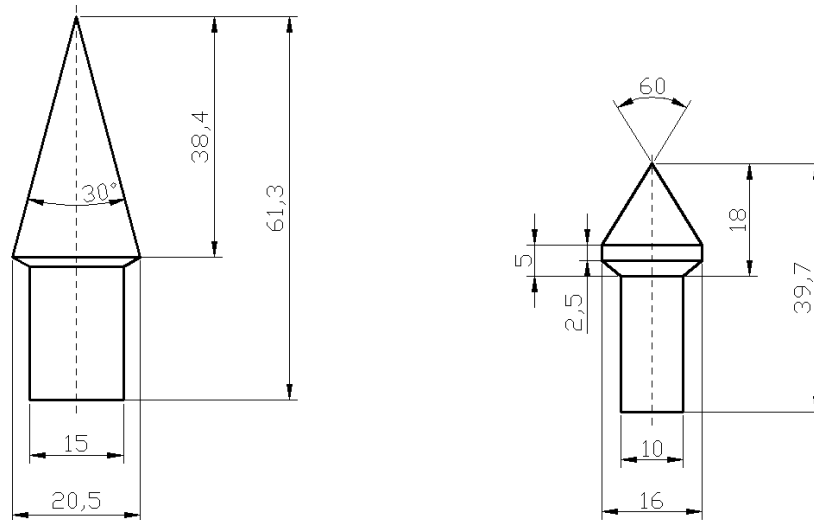
1. Többször, adott sűrűségűre tömörített talajjal feltöltve. $\rho_6 = 1,65 \text{ g/cm}^3$; $\rho_5 = 1,45 \text{ g/cm}^3$; $\rho_4 = 1,25 \text{ g/cm}^3$; $\rho_3 = 1,1 \text{ g/cm}^3$; $\rho_2 = 0,95 \text{ g/cm}^3$; $\rho_1 = 0,9 \text{ g/cm}^3$.
2. Rétegenként különböző sűrűségekre tömörített talajjal feltöltve. A vályú aljától felfelé haladva: 10 cm, $\rho_1 = 1,65 \text{ g/cm}^3$; a következő négy réteg 5 cm vastag, $\rho_2 = 1,45 \text{ g/cm}^3$; $\rho_3 = 1,25 \text{ g/cm}^3$; $\rho_4 = 1,1 \text{ g/cm}^3$; $\rho_5 = 0,95 \text{ g/cm}^3$.



3.13. ábra Talajvályú üres és töltött állapotban

A talajvizsgálatok a korábban említett eszközökkel történtek. Kúposindex meghatározás, nedvességtartalom mérés, illetve talajmintavétellel talaj térfogati sűrűség meghatározás.

A mérések során kétféle penetrációs kúp került alkalmazásra. Ezek pontos méretei a 3.14. ábrán láthatóak. Az egyik kúp nyílásszöge 30° , a másik kúp nyílásszöge 60° . Az eltérő nyílásszögű kúpok előtt másképpen viselkedik a talaj. Például a nagyobb nyílásszögű kúpok előtt a kúp felülete és a talaj között ébredő eltérő súrlódási erők eredményeként a talaj könnyen feltömrödhethet.



3.14. ábra Alkalmazott penetrációs kúpok

Másik jelentős eltérés a két alkalmazott kúp között az átmérőjük. A 30° -os kúp átmérője 2,05 cm, ami egy $3,3 \text{ cm}^2$ felületet jelent. A 60° -os kúp átmérője 1,6 cm, aminek a felülete $2,01 \text{ cm}^2$. Az eredményeket ezeken felül még jelentősen befolyásolja a penetrációs kúp fejének hossza. Helyes mérési eredményeket akkor kapunk, ha a homogén sűrűségű talajréteg vastagabb, mint a kúp fejének a hossza.

4. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatom a kísérletekből megállapított új tudományos eredmények levezetésének módját, valamint szakirodalmi ismeretekre támaszkodva, elméleti következtetéseket vonok le a jelenség fontos paramétereinek könnyebb meghatározásához, melyeket nomogramok formájában közlök.

4.1. A talaj csillapítása

A gumibroncs alatt a talaj tömörödése nem csak függőleges irányú. A terhelés hatására oldal irányban is folyik ki talaj a nyomó felület alól. Adott százaléku besüllyedéshez tehát bizonyos százaléknyi oldalkifolyás tartozik. Kohezív talajoknál kevesebb, míg kohézió nélküli talajoknál nagyobb százalékban van oldalfolyás.

A függőleges relatív deformáció az alábbi megfontolások alapján számolható.

A talaj térfogati sűrűsége a porozitás és nedveségtartalom függvényében:

$$\rho_v = \rho(1 - n_v)(1 - X_n). \quad (4.1)$$

A (4.1) n_v -re rendezve, ha $X_n = 10\%$ és $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$:

$$n_v = 1 - \frac{\rho_v}{2,4}. \quad (4.2)$$

A porozitás változást „ n_ε ” az „ ε ” relatív nyúlással az alábbi módon lehet kifejezni:

$$n_\varepsilon = \frac{n_v - \varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (4.3)$$

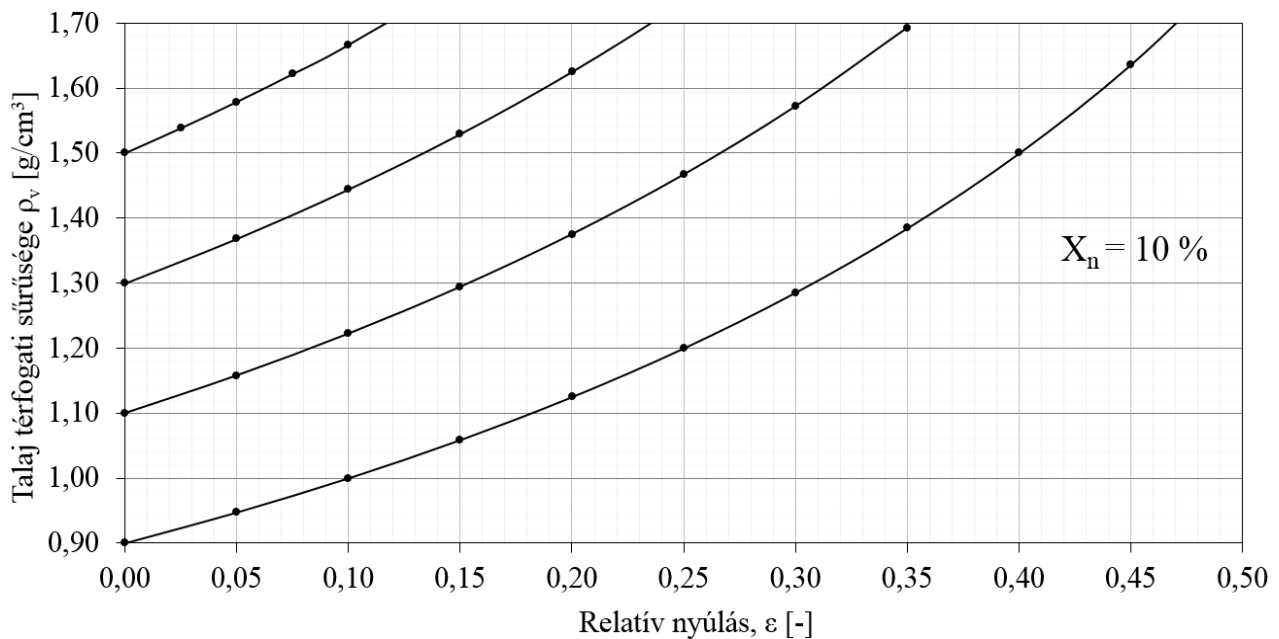
A (4.2) és a (4.3) felhasználva közvetlen egyenletet lehet létre hozni a tömörödés előtti „ ρ_0 ” és a tömörödés utáni „ ρ_ε ” térfogat sűrűségű talaj relatív nyúlásának meghatározására:

$$\rho_\varepsilon = 2,4 - 2,4 \left(\frac{1 - \frac{\rho_0}{2,4} - \varepsilon}{1 - \varepsilon} \right). \quad (4.4)$$

A (4.4) leegyszerűsített alakja:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_\varepsilon}. \quad (4.5)$$

A (4.5) egyenletet felhasználva nomogram készíthető a tömörödés jellemzésére.



4.1. ábra Segéddiagram a térfogat sűrűségek alapján történő relatív nyúlás meghatározásához

A teherbírási tényező meghatározása

A „k” talaj teherbírási tényezőt jó közelítéssel az abroncs talaj kapcsolatában kialakult felfekvési felület és az áthaladás okozta nyommélységből lehet meghatározni. Ehhez a Szaakjan formulát felhasználva az alábbi egyenlet írható:

$$p = k \left(\frac{z}{d} \right)^n \rightarrow p = \sigma_{köz} \text{ és } d = d_e; \quad k = \frac{\sigma_{köz}}{\left(\frac{z}{d_e} \right)^n}. \quad (4.6)$$

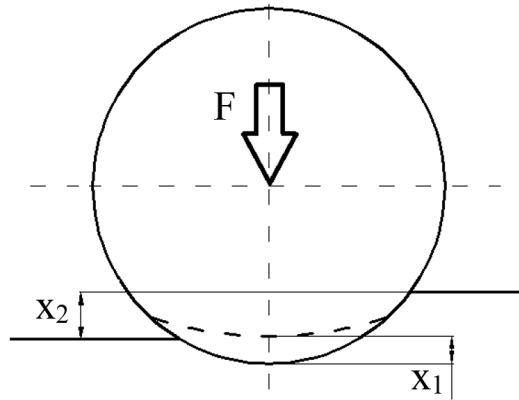
A teherbírási tényező ilyen módszerrel történő megállapításának előnyei a bevaméteres vizsgálatokkal szemben:

- Nincs szükség nagy berendezéshez, ami a nyomólap talajba nyomásához kellene.
- A „k” teherbírási tényező csak abban az esetben független a „d” átmérőtől, ha a talaj sűrűsége „ρ_v” és a talaj rugalmassági modulusa „E” állandó. A gyakorlatban ez nem fordul elő. E módszer viszont „d” értékül a tényleges felület egyenértékű átmérőjét veszi figyelembe.
- A gördülő kerék alatti talajdeformáció jobban megfelel a valóságnak, mint a csak függőleges mozgást végző nyomólapnál.

Egyedüli csekély hátránya, hogy az „n” kitevő egy típusú kerékkel nem határozható meg a nyommélységből. A megállapításához kétféle szélességű kerék használatára lenne szükség. Azonban a kitevő jól becsülhető a már meglévő adatok alapján (lásd 2.3. ábra).

Csillapítások szétválasztása

A gumibroncs-talaj kapcsolatban a keréken elhelyezett lengésgyorsulás érzékelő által rögzített lengésgyorsulás értékek alapján meghatározható csillapításra jellemző érték két komponensből tevődik össze. Az egyik a gumibroncs csillapítása a másik pedig a talaj csillapítása. Az alábbi levezetés a két komponens egymástól való szétválasztásának módját mutatja be.



4.2. ábra Abroncs és talaj deformáció

A kerékterhelés "F" egyrészt abroncs „ x_1 ”, másrészt talajdeformációt „ x_2 ” okoz (4.2 ábra). Az abroncs „ K_1 ” és a talaj „ K_2 ” rugómerevségéből kiindulva:

$$F = K_1 x_1 = K_2 x_2. \quad (4.7)$$

A rugómerevség és a deformáció között fordított arányosság van:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{K_2}{K_1}. \quad (4.8)$$

A szétválasztás kiinduló pontja a logaritmikus dekrementum kiszámításának alap összefüggése, amelyből „ y_2 ” kell kifejezni:

$$\delta = \ln\left(\frac{y_0}{y_2}\right) \rightarrow y_2 = \frac{y_0}{e^\delta}. \quad (4.9)$$

A kerék teljes illetve induló besüllyedése az abroncs és a talajdeformáció összege:

$$y_0 = x_1 + x_2 = \frac{F}{K_1} + \frac{F}{K_2}. \quad (4.10)$$

A következő periódusban a besüllyedés a (4.9) és (4.10) alapján:

$$y_2 = \frac{y_0}{e^\delta} = \frac{\frac{F}{K_1}}{e^\delta} + \frac{\frac{F}{K_2}}{e^\delta} = \frac{F}{K_1 e^{\delta_1}} + \frac{F}{K_2 e^{\delta_2}}. \quad (4.11)$$

A (4.11)-et és a (4.10)-et a (4.9) miatt elosztva egymással:

$$\frac{y_0}{y_2} = \frac{\frac{F}{K_1} + \frac{F}{K_2}}{\frac{F}{K_1 e^{\delta_1}} + \frac{F}{K_2 e^{\delta_2}}} = \frac{F(K_1 + K_2)}{K_1 K_2} \frac{K_1 e^{\delta_1} K_2 e^{\delta_2}}{F(K_1 e^{\delta_1} + K_2 e^{\delta_2})} = \frac{(K_1 + K_2)e^{\delta_1} e^{\delta_2}}{K_1 e^{\delta_1} + K_2 e^{\delta_2}}. \quad (4.12)$$

Így:

$$\frac{y_0}{y_2} = \frac{(K_1 + K_2)e^{\delta_1} e^{\delta_2}}{K_1 e^{\delta_1} + K_2 e^{\delta_2}} = \frac{\left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1} e^{\delta_2}}{\frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1} + e^{\delta_2}}. \quad (4.13)$$

Most vesszük a (4.13) természetes alapú logaritmusát mindkét oldalnak és felhasználjuk a (4.9) alap összefüggést:

$$\delta_{1+2} = \ln \left[\frac{\left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1} e^{\delta_2}}{\frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1} + e^{\delta_2}} \right]. \quad (4.14)$$

A (4.14) bal oldalán látható a kimért gumiabroncs és talaj együttes logaritmikus dekrementum értéke. A jobb oldalon a talaj és az abroncs rugómerevsége mellett pedig a gumiabroncs logaritmikus dekrementum értéke, -ami betonon történő lengetés alapján kimérhető- illetve a keresett talaj logaritmikus dekrementum értéke.

A (4.14)-et δ_2 -re kell rendezni.

Természetes alapra helyezve a két oldalt:

$$e^{\delta_{1+2}} = \frac{\left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1} e^{\delta_2}}{\frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1} + e^{\delta_2}}. \quad (4.15)$$

Átszorozva a jobb oldal nevezőjével:

$$\left(\frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1} + e^{\delta_2}\right) e^{\delta_{1+2}} = \left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1} e^{\delta_2}. \quad (4.16)$$

Megfelelően rendezve:

$$\begin{aligned} e^{\delta_2} e^{\delta_{1+2}} - \left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1} e^{\delta_2} &= -e^{\delta_{1+2}} \frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1}, \\ \left(e^{\delta_{1+2}} - \left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1}\right) e^{\delta_2} &= -e^{\delta_{1+2}} \frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Ebből:

$$e^{\delta_2} = \frac{-e^{\delta_{1+2}} \frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1}}{e^{\delta_{1+2}} - \left(\frac{K_1}{K_2} + 1\right) e^{\delta_1}}. \quad (4.18)$$

Majd rendezzük és vesszük a természetes alapú logaritmusát:

$$\delta_2 = \ln \left[\frac{\frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1} e^{\delta_{1+2}}}{\left(\frac{K_1}{K_2} + 1 \right) e^{\delta_1} - e^{\delta_{1+2}}} \right] \quad (4.19)$$

A rendezett egyenlet segítségével az alábbi (4.3. ábra) nomogramot lehet megalkotni, mely az abroncs logaritmikus dekrementum értékének, valamint a talaj és az abroncs rugóállandójának az ismeretében eredményül a talaj logaritmikus dekrementum értékét adja. A mérési eredmények kiértékelését a 4.1. táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat A talajcsillapítás „ δ_2 ” számításához használt paraméterek értékei

δ_{1+2}	δ_1	δ_2	δ_1/δ_2	K_1	K_2	K_2/K_1
0,3	0,19	0,42	0,449	200000	200000	1,00
0,3	0,19	0,39	0,486	200000	150000	0,75
0,3	0,19	0,36	0,528	200000	100000	0,50
0,3	0,19	0,33	0,577	200000	50000	0,25
0,3	0,19	0,31	0,621	200000	10000	0,05
0,5	0,19	0,95	0,200	200000	200000	1,00
0,5	0,19	0,82	0,232	200000	150000	0,75
0,5	0,19	0,70	0,271	200000	100000	0,50
0,5	0,19	0,60	0,319	200000	50000	0,25
0,5	0,19	0,52	0,367	200000	10000	0,05
0,7	0,19	1,79	0,106	200000	200000	1,00
0,7	0,19	1,39	0,137	200000	150000	0,75
0,7	0,19	1,10	0,172	200000	100000	0,50
0,7	0,19	0,88	0,215	200000	50000	0,25
0,7	0,19	0,73	0,259	200000	10000	0,05
1	0,19	3,75	0,051	200000	150000	0,75
1	0,19	1,98	0,096	200000	100000	0,50
1	0,19	1,37	0,138	200000	50000	0,25
1	0,19	1,06	0,178	200000	10000	0,05
1,5	0,19	2,63	0,072	200000	50000	0,25
1,5	0,19	1,65	0,115	200000	10000	0,05



4.2. Gumiabroncs terhelhetősége és felfekvési felülete

A gyakorlatban számos gumiabroncsot alkalmaznak. Típustól függően másképp viselkednek különböző terhelések és belső légnyomások esetén. Ezért egy közös pontot kell keresni, ami minden fúvott gumiabroncs esetén jelen van és jellemzi a gumiabroncs terhelési állapotát, valamint annak hatására létrejött felfekvési felületet. A gumiabroncs katalógusból (3.1. táblázat) kiolvasható, hogy adott belső légnyomáshoz mekkora lehet a legnagyobb terhelhetőség. A mérések során a katalógusban szereplő adatoktól eltérő terhelés és nyomás értékek kerültek alkalmazásra.

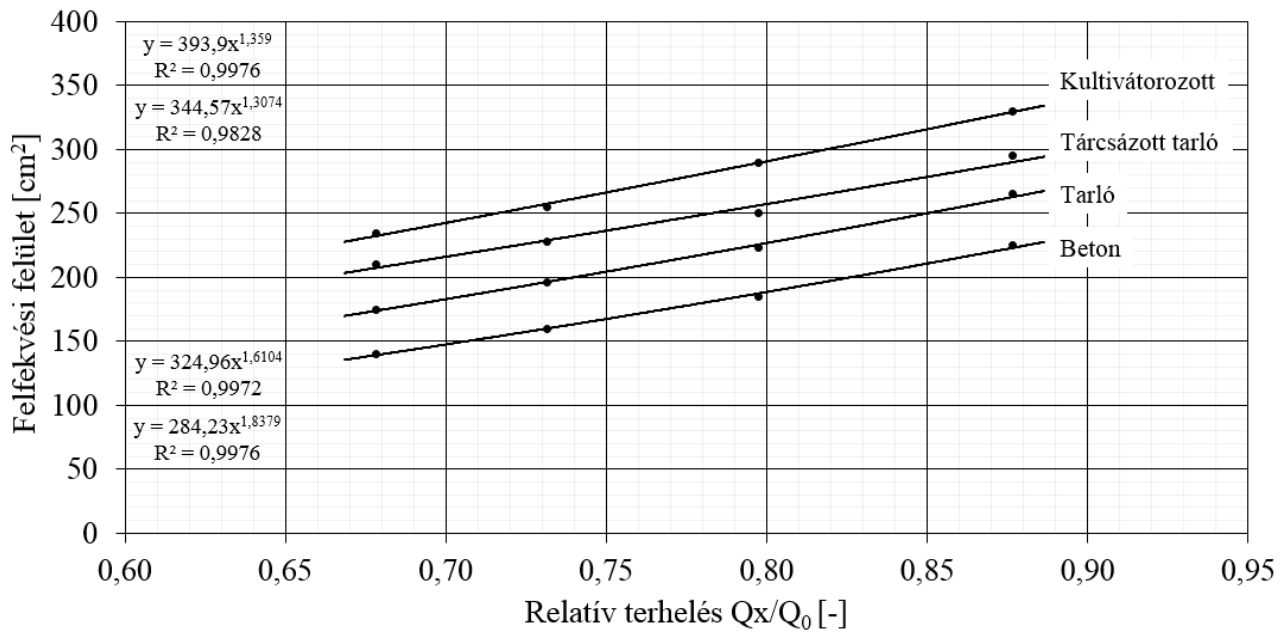
A relatív abroncsterhelés megmutatja, hogy adott légnyomáson a katalógus által megadott terhelési tömeghez képest – megengedett terhelés tömege – az alkalmazott terhelés milyen viszonyban van. Abban az esetben, ha a megengedett terhelési tömeg 0,8 bar-on 310 kg és az alkalmazott terhelési tömeg 390 kg akkor a relatív terhelés 1,26 lesz (4.2. táblázat). Ami azt jelenti, hogy a megengedetthez képest 1,26 szór nagyobb relatív terhelés éri az abroncsot. Illetve, ha 2,1 bar-on a megengedett terhelési tömeg 533 kg és az alkalmazott terhelési tömeg 390 kg, akkor a relatív abroncsterhelés 0,73, vagyis az abroncs teherviselési képessége csak 73 %-ban van kihasználva.

4.2. táblázat Vizsgált abroncs terhelhetősége

p_i [bar]	Q_0 [kg]	Q_x/Q_0	Felfekvési felület: $F_{x,0}$ [cm ²]			
			Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
0,8	310	1,26				
1	350	1,11				
1,2	390	1,00				
1,5	445	0,88	225	265	295	330
1,8	489	0,80	185	223	250	290
2	522	0,75				
2,1	533	0,73	160	196	228	255
2,4	575	0,68	140	175	210	234
2,5	590	0,66				
3	656	0,59				

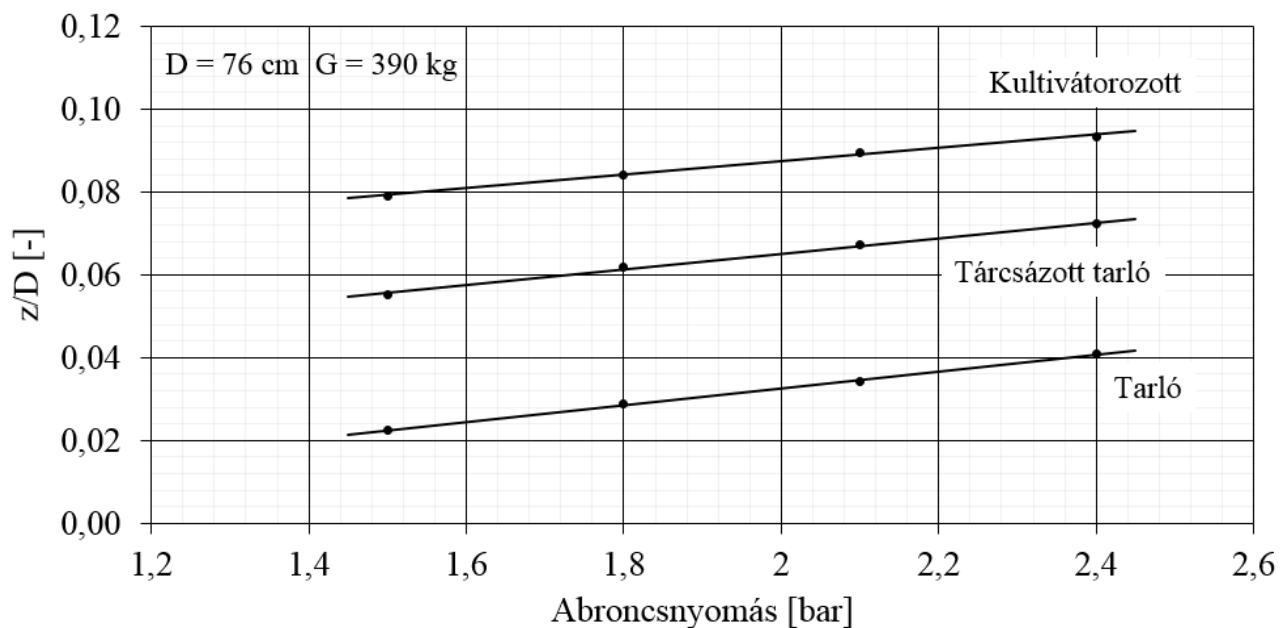
Q_x [kg]	390	Alkalmazott abroncsterhelés tömege
------------	-----	------------------------------------

A 4.2. táblázatban katalógus adatok szerepelnek, melyek közül az alkalmazott abroncsnyomás és megengedett terhelési tömegek ki vannak emelve, valamint a hozzájuk tartozó betonon és különböző talajállapotokon mért felfekvési felületek is fel vannak tüntetve. Ezek ismeretében megrajzolható a 4.4. ábra, amely a relatív terhelés függvényében ábrázolja a felfekvési felületek nagyságát. A felfekvési felület nagysága jelentős szerepet játszik a közepes talajnyomás kiszámításánál, amely a különböző számításokhoz szükséges (teherbírási tényező, a csillapítási adatok feldolgozása).



4.4. ábra A felfekvési felület változása a relatív abroncs terhelés függvényében

A 4.4. ábrán látható, hogy a mérések során alkalmazott abroncsnyomás mellett a kerékterhelés nem terhelte túl az abroncsot, vagyis az előírt határértékek között dolgozott. Az ábrában a görbék empirikus egyenletét is megadom.

4.5. ábra Az abroncsnyomás és a z/D viszony kapcsolata

A névleges abroncsterheléskor a felfekvési felület az

$$\frac{F_x}{bD} = 0,18 + 0,75 \left(\frac{z}{D} \right)^{0,8} \quad (4.20)$$

egyenlettel közelíthető, míg merev pályán nyilvánvalóan

$$\frac{F_0}{bD} = 0,18.$$

A fenti két egyenletből:

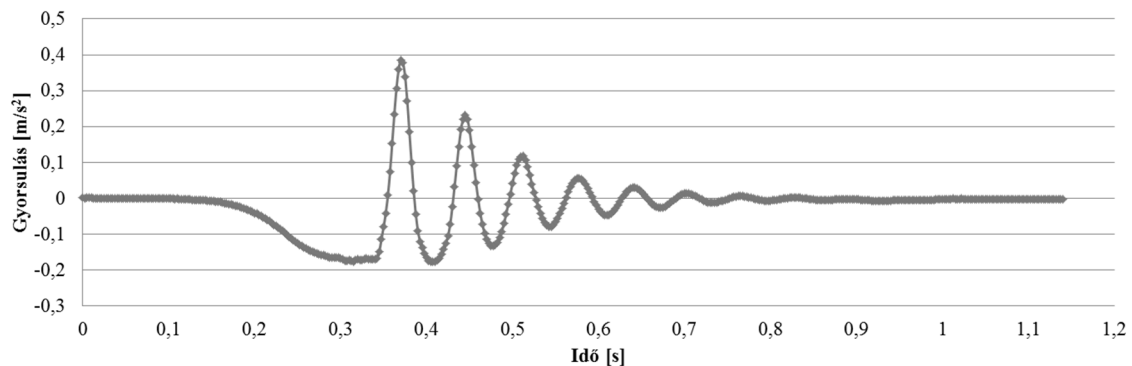
$$\frac{F_x}{F_0} = 1 + 4,166 \left(\frac{z}{D} \right)^{0,8} \quad (4.20a)$$

A 4.5. ábra függőleges tengelyén a z/D viszony látható. A mértékegység nélküli szám jobban jellemezi a besüllyedést -mint csak a talajdeformáció mértéke- mert a nagysága a terhelésen kívül függ a kerék átmérőtől is. Az arány azt mutatja meg, hogy a kerék mennyire süpped a talajba. $z/D = 0,5$ -nél a kerék már tengelyig a talajban lenne. Azaz a kerék 50 %-a süppedt bele. Jelen esetben a mérések során meghatározott viszony tartománya körülbelül 0,02 - 0,1 közötti, ami 2 – 10 %-os kerék besüppedést jelent. A viszonyból a pontos talajdeformáció nagysága a kerék átmérőjével történő szorzás útján kapható meg.

4.3. Gumiabroncs - talaj kapcsolatában keletkező lengéscsillapítás

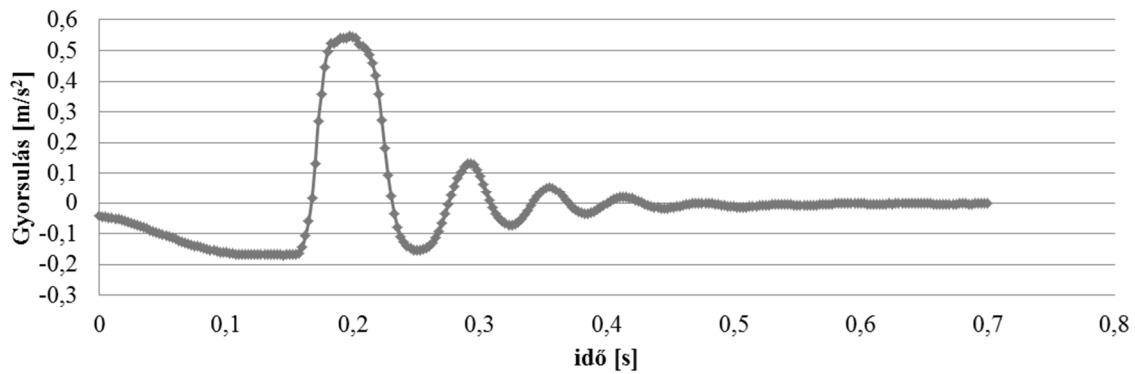
Jelen esetben az abroncs és talaj együtt leng, melynek csillapodása az abroncstól és a talajtól is függ. Azonos talajállapot mellett eltérő abroncsnyomás esetén eltérő csillapodás keletkezik. Az abroncsra a talajon történő gördülése során is ilyen csillapítások hatnak. Az abroncsot az adott talajra ejtve lehet az együttes csillapodási görbét felvenni, mely görbe alapján számítással lehet a logaritmikus dekrementumot meghatározni. A függőleges irányú gyorsulás-érzékelő által mért csillapodási görbe a 4.6. ábrán látható. A görbe segítségével a 4.21 képlet alapján a logaritmikus dekrementum kiszámítható. Különböző talajokon -a talaj illetve az abroncs csillapító képességétől függően- eltérően csillapodik a lengés.

$$\delta = \ln \left(\frac{y_n}{y_{n+1}} \right) \quad (4.21)$$



4.6. ábra Csillapodási görbe tarlón, $p_i = 2,1$ bar, $F = 3826$ N, $\delta = 0,58$

Látható, hogy keményebb talajon kisebb, míg jobban megmunkált talajon nagyobb logaritmikus dekrementum értékek születtek. A lengés csúcsain is látszik a különböző talajok keménysége. Tarlón például sokkal hegyesebb, míg kultivátorozott talajon inkább lekerekített a lengési csúcs.



4.7. ábra Csillapodási görbe kultivátorozott talajon, $p_i = 1,5$ bar, $F = 3826$ N, $\delta = 1,3$

A vizsgálatokat minden talajállapoton és betonon is elvégeztem, melynek eredményét táblázatos formában a 4.3. táblázat mutatja.

4.3. táblázat Abroncs talaj kapcsolatban mért logaritmikus dekrementum

Logaritmikus dekrementum: δ [-]				
p_i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	0,22	0,35	0,81	1,31
1,8	0,16	0,45	1,02	1,56
2,1	0,12	0,58	1,18	1,85
2,4	0,09	0,72	1,36	2,2

A továbbiakban számba veszem a gumiabroncs-talaj kapcsolatában szerepet játszó paramétereket, amelyek segítségével dimenzió analízist végzek, mértékegység nélküli jellemzők megalkotásához. Minden felsorolt jellemzőt a méréseim során kimértem, illetve meghatároztam.

Gumiabroncs-talaj kapcsolatában szerepet játszó paraméterek:

1. Kerék okozta közepes talajnyomás: $\sigma_{köz}$, [N/m²]
2. Csillapítási tényező: η , [Ns/m]
3. Rugómerevség: K , [N/m]
4. Lengő tömeg: m , [Ns²/m]
5. Teherbírási tényező: k , [N/m²]

4.4. táblázat A dimenziómátrix

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
	η	k	m	K	$\sigma_{köz}$
N	1	1	1	1	1
m	-1	-2	-1	-1	-2
s	1	0	2	0	0

A változók száma: 5 db, dimenziók száma: 3 db, dimenzió nélküli mennyiségek száma: 2 db.

A dimenziómátrix megoldása:

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 0, \quad (4.22)$$

$$-k_1 - 2k_2 - k_3 - k_4 - 2k_5 = 0, \quad (4.23)$$

$$k_1 + 2k_3 = 0. \quad (4.24)$$

4.24-et rendezve k_3 -ra:

$$k_3 = -1/2 k_1. \quad (4.25)$$

4.25-öt behejentesítve a 4.22-be:

$$k_1 + k_2 + (-1/2 k_1) + k_4 + k_5 = 0. \quad (4.26)$$

Leegyszerűsítve:

$$1/2 k_1 + k_2 + k_4 + k_5 = 0. \quad (4.27)$$

4.25-öt behejentesítve a 4.23-be és leegyszerűsítve:

$$-1/2 k_1 - 2k_2 - k_4 - 2k_5 = 0. \quad (4.28)$$

4.27-ot és 4.28-et összeadva:

$$k_5 = -k_2. \quad (4.29)$$

4.29-at és 4.25-öt behejentesítve a 4.22-be:

$$k_1 + k_2 - 1/2 k_1 + k_4 - k_2 = 0. \quad (4.30)$$

Leegyszerűsítve:

$$k_4 = -1/2 k_1. \quad (4.31)$$

4.5. táblázat A hasonlósági számok mátrixa

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
	η	k	m	K	$\sigma_{köz}$
Π_1	1	0	-1/2	-1/2	0
Π_2	0	1	0	0	-1

A két dimenzió nélküli mennyiség:

$$\Pi_1 = \frac{\eta}{\sqrt{K m}}. \quad (4.32)$$

$$\Pi_2 = \frac{k}{\sigma_{köz}} \text{ vagy } \frac{\sigma_{köz}}{k}. \quad (4.33)$$

Ezek alapján egy lehetséges hasonlósági egyenlet:

$$\frac{\eta}{\sqrt{K m}} = f\left(\frac{\sigma_{köz}}{k}\right). \quad (4.34)$$

A hasonlósági egyenlet megoldása

A szabadföldi vontatások alkalmával mért paramétereket felhasználva számolhatók a hasonlósági egyenlet egyes tényezői. A számolt pontokra görbét illesztve eredményül a (4.34)

függvénykapcsolatát kapjuk. A 4.2, 4.3, 4.6. és 4.7.-es táblázatok tartalmazzák a mért induló paramétereket, amelyek a továbbiakban felhasználásra kerülnek.

A mért felfekvési felület értékeit a 4.2. táblázat tartalmazza.

4.6. táblázat Áthaladás után mért talajdeformáció

Talajdeformáció: z [cm]				
p _i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	0	1,7	4,2	6,0
1,8	0	2,2	4,7	6,4
2,1	0	2,6	5,1	6,8
2,4	0	3,1	5,5	7,1

4.7. táblázat Kerék lengésének saját körfrekvenciája

Saját körfrekvencia: ω_0 [1/s]				
p _i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	7,72	7,32	4,71	3,43
1,8	8,94	5,74	3,86	3,23
2,1	7,54	4,98	3,69	3,02
2,4	9,12	4,12	3,23	2,89

A gumiabroncs-talaj kapcsolatában kialakult rugómerevséget a lengés saját körfrekvenciájából számolom, $m = 390$ kg:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \rightarrow K = m \omega_0^2. \quad (4.35)$$

4.8. táblázat Abroncs-talaj kapcsoltában keletkező rugómerevség

Abroncs-talaj merevség (K) [N/m]				
p _i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	228018	205001	84874	45011
1,8	305780	126054	57004	39915
2,1	217509	94884	52094	34894
2,4	318217	64942	39915	31954

A csillapítási tényezőt a mért logaritmikus dekrementum és a sajátkörfrekvencia segítségével határozom meg. Ez egyben az összefüggés a csillapítási tényező és a logaritmikus dekrementum között:

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} m \omega_0. \quad (4.36)$$

4.9. táblázat Abroncs talaj kapcsoltában keletkező csillapítás

Abroncs-talaj csillapítás: η [kg/s]				
p _i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	211	318	474	558
1,8	178	321	489	626
2,1	112	359	540	695
2,4	102	368	546	790

A közepes talajnyomás a kerékterhelés és a felfekvési felület ismeretében számolható:

$$\sigma_{köz} = \frac{F}{F_{x,0}}. \quad (4.37)$$

4.10. táblázat Kerék alatti közepes talajnyomás

Kerék alatti közepes talajnyomás: $\sigma_{köz}$ [N/m ²]				
p_i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	170040	144374	129691,5	115936
1,8	206805	171565	153036	131928
2,1	239119	195199	167803	150035
2,4	273279	218623	182186	163500

A Szaakjan formulát felhasználva lehet az adott talajállapot teherbírási tényezőjét meghatározni:

$$p = \frac{F}{F_x} = k \left(\frac{z}{d} \right)^n \rightarrow k = \frac{F}{F_x \left(\frac{z}{d} \right)^n}. \quad (4.38)$$

4.11. táblázat Talaj teherbírási tényezője

Talaj teherbírási tényező: k [bar]				
p_i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	0	10	4	3
1,8	0	9	4	3
2,1	0	8	4	3
2,4	0	8	4	3

A Szaakjan formulában a nyomólap átmérőjét „ d ”, most a felfekvési felületből számolt ekvivalens átmérővel kell helyettesíteni:

$$d_e = \sqrt{\frac{4F_{x,0}}{\pi}}. \quad (4.39)$$

4.12. táblázat Felfekvési felületből számolt ekvivalens átmérő

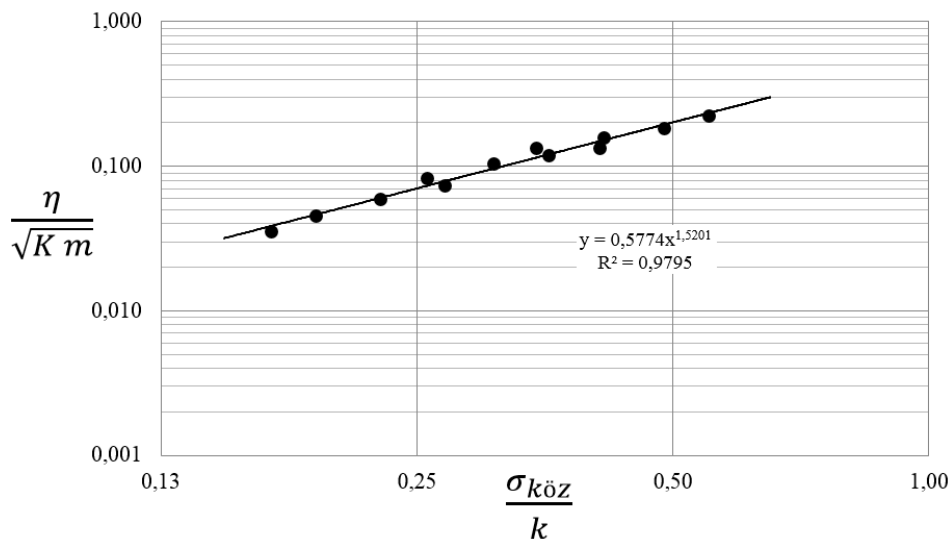
Ekvivalens átmérő d_e [cm]				
p_i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	16,9	18,4	19,38	20,5
1,8	15,3	16,9	17,84	19,2
2,1	14,3	15,8	17,0	18,0
2,4	13,4	14,9	16,4	17,3

4.13. táblázat Mértékegység nélküli abroncs-talaj jellemző

Abroncs-talaj jellemző: $\sigma_{köz}/k$ [-]				
p_i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	-	0,15	0,29	0,37
1,8	-	0,20	0,34	0,41
2,1	-	0,24	0,38	0,46
2,4	-	0,28	0,42	0,49

4.14. táblázat Mértékegység nélküli abroncs-talaj csillapítási tényező

Abroncs-talaj csillapítási tényező: $\eta/((K m)^{0,5})$ [-]				
p_i [bar]	Beton	Tarló	Tárcsázott	Kultivátorozott
1,5	0,0224	0,0356	0,0823	0,1331
1,8	0,0163	0,0457	0,1037	0,1585
2,1	0,0122	0,0589	0,1199	0,1880
2,4	0,0091	0,0732	0,1382	0,2236



4.8. ábra. A hasonlósági számok közötti függvénykapcsolat.

A hasonlósági számok közötti függvénykapcsolat:

$$\frac{\eta}{\sqrt{K m}} = B \left(\frac{\sigma_{köz}}{k} \right)^h \quad (4.40)$$

A konstansok értékei:

$$B = 0,58 \text{ [-]},$$

$$h = 1,52 \text{ [-]}.$$

A (4.40) összefüggés segítségével és a megfelelő paraméterek ismeretében meghatározható az „ η ” abroncs talaj együttes csillapítási tényezője. A (4.36)-ost felhasználva a csillapítás kifejezhető logaritmikus dekrementum formájában. Illetve a (4.19)-es segítségével el is választható a talaj lengéscsillapítására jellemző logaritmikus dekrementum értéke.

4.4. Talaj térfogati sűrűségének kapcsolata a kúpos indexszel

Az ide vonatkozó vizsgálatokat ellenőrzött körülmények között talajvályúban végeztem. Ugyanazt a talajt használtam, amelyen a szántóföldi mérések történtek. Mérésenként a teljes talajkeresztmetszet azonos tömörségű volt. A mérések eredményeit a 4.9. a 4.10. és a 4.11. ábra szemlélteti. Érdekes eredmény (4.9. ábra), hogy a kúp ellenállása mintegy 10 cm mélységig lineárisan növekedett, majd egy maximális értéken stabilizálódott. A lineárisan növekvő szakasz hossza többszörösen meghaladta a kúp hosszát. A lineáris szakasz hossza a tömörség növekedésekor egyértelműen csökkent. Ez a jelenség bonyolítja az értékelést és a gyakorlati felhasználást is a sűrűség meghatározásához.

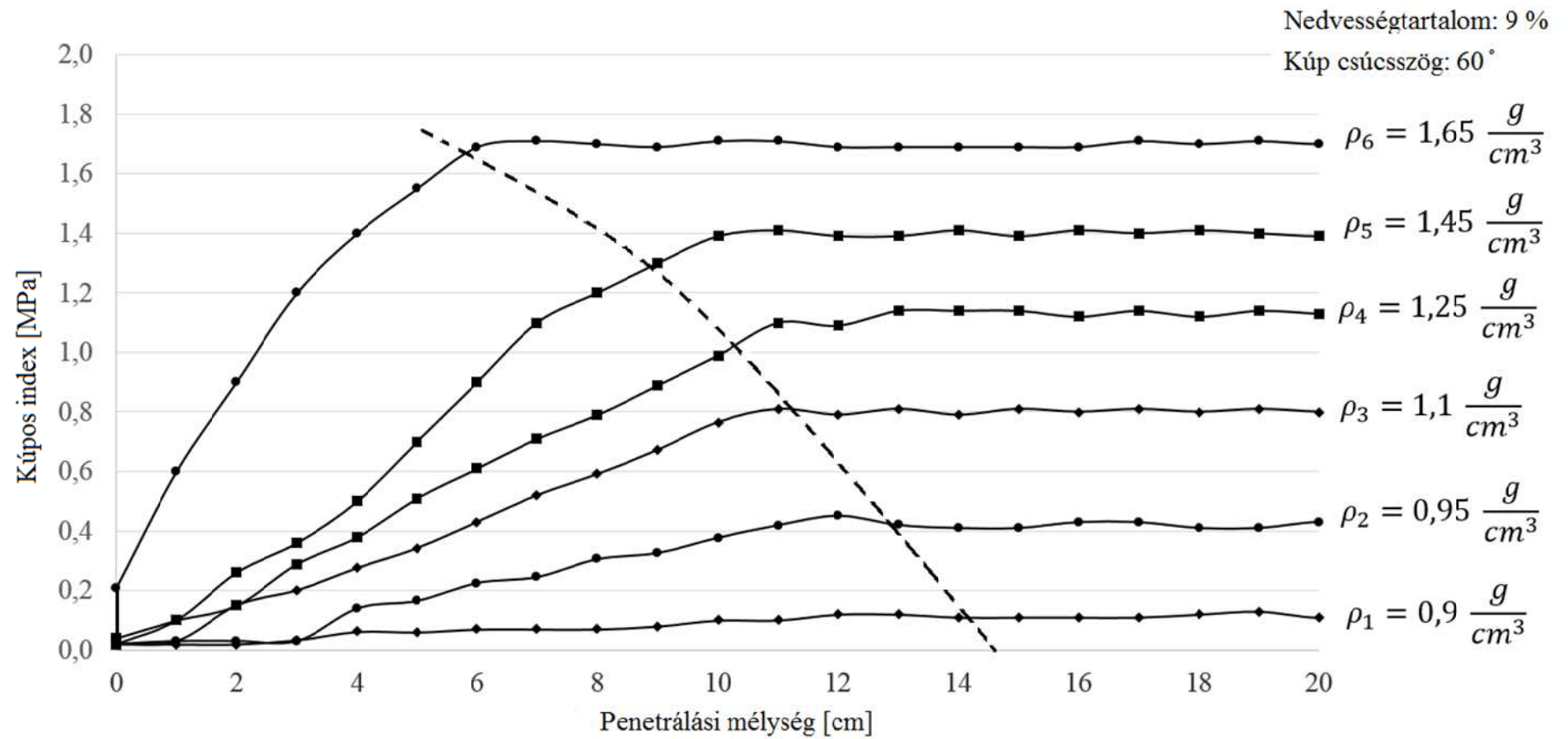
A CI (kúpos index) görbék lefutása és azok értékei függnak a mérésnél használt kúp típusától. A mérések során a 3.14. ábrán látható kúpok kerültek alkalmazásra.

A CI görbe feldolgozásához a klasszikus Boussinesq probléma nyomófejre vonatkozó összefüggését célszerű használni, amely itt, a következő alakba írható fel:

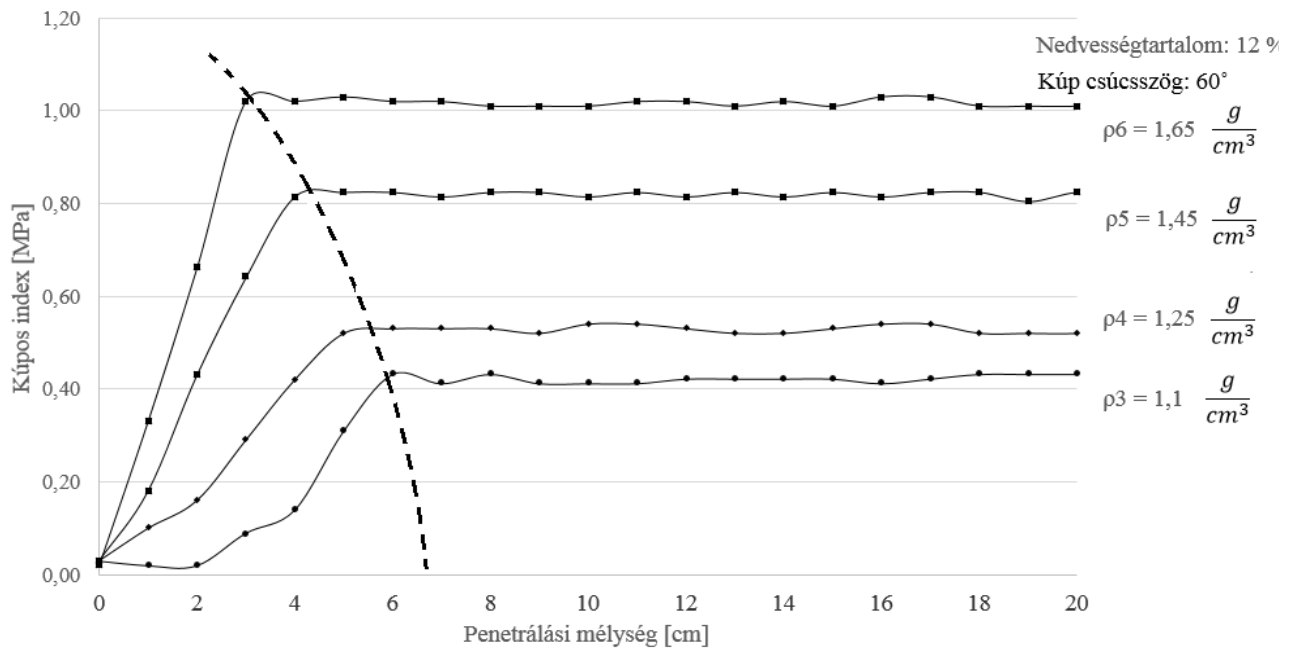
$$CI = R \left(\frac{z}{d_k} \right). \quad (4.41)$$

Az állandósult szakasz sarok pontjára:

$$CI_{\max} = R \left(\frac{z_{\max}}{d_k} \right). \quad (4.42)$$

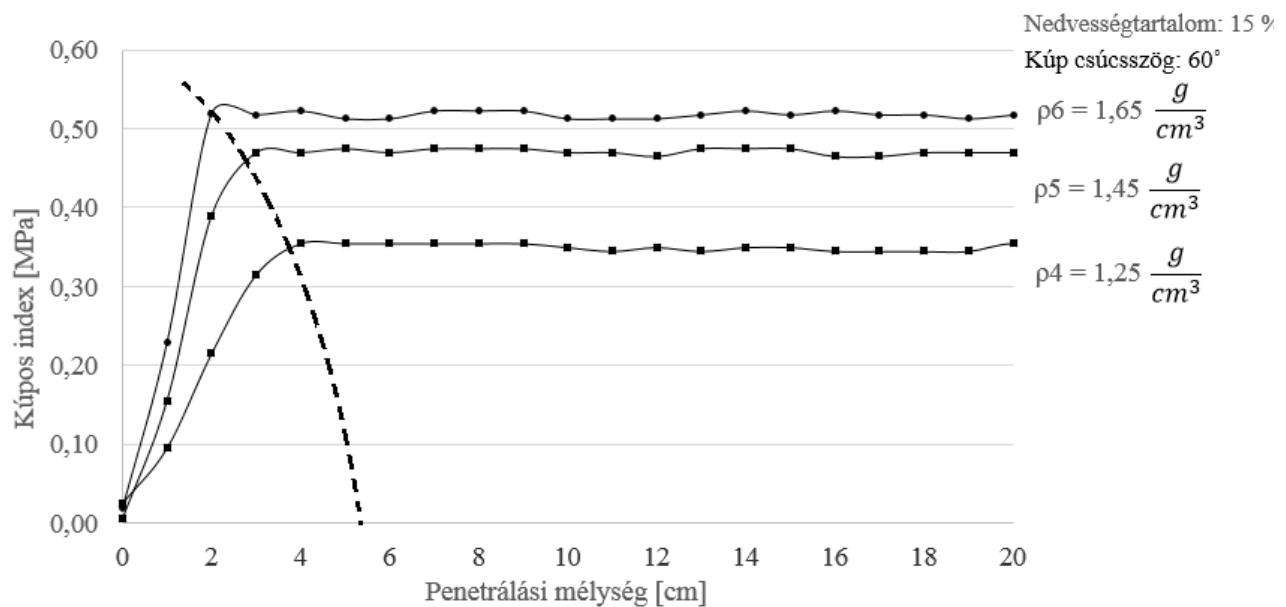


4.9. ábra Talajvályúban mért, különböző sűrűségűre tömörített talaj CI görbéi, 9 %-os nedvességtartalomnál



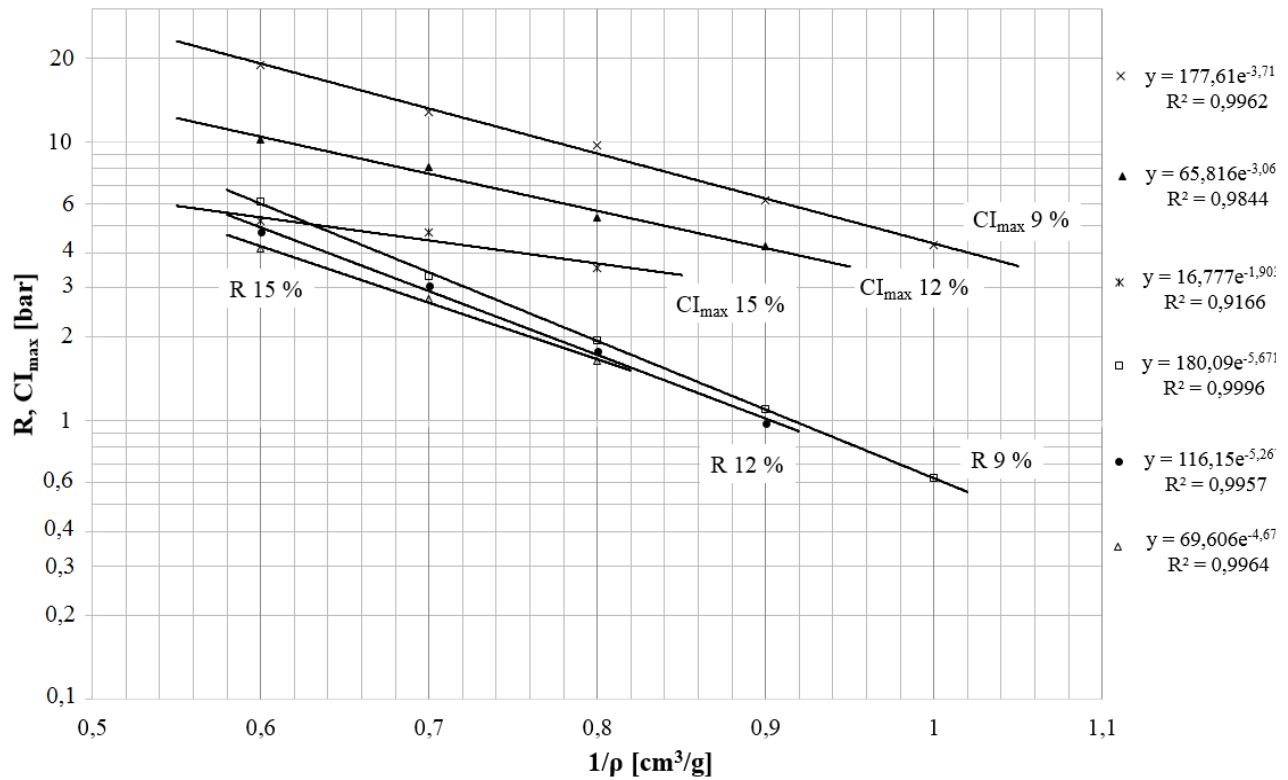
4.10. ábra Talajvályúban mért, különböző sűrűségűre tömörített talaj CI görbéi, 12 %-os nedvességtartalomnál

A 4.10. és 4.11. ábrán olyan penetrációs vizsgálatok eredményei láthatóak eltérő nedvességtartalmak esetén, mint a 4.9. ábrán. A megemelt nedvességtartalom hatására a talaj jobban összeállt, ezért kis sűrűség értékek előállítása nem volt kivitelezhető.



4.11. ábra Talajvályúban mért, különböző sűrűségűre tömörített talaj CI görbéi, 15 %-os nedvességtartalomnál

A különböző nedvességtartalmú talajon felvett görbék egyértelműen mutatják, hogy a töréspont helye mind kisebb penetrálási mélységnél van, amint a nedvességtartalom növekszik.



4.12. ábra Kapcsolat az R, CI_{max} és a sűrűség inverze között

A 4.12. ábra a talajvályóban mért penetrációs vizsgálatok feldolgozott eredményeit mutatja (4.9., 4.10., 4.11.). A függőleges tengelyen a CI_{max} és az R értékek láthatók különböző nedvességtartalmak esetén, a talajsűrűség inverzének függvényében, fél logaritmusos skálán megjelenítve. Ebben az ábrázolási módban az egy nedvességtartalomhoz tartozó CI_{max} és R értékek -a szórását figyelembe véve- egy egyenesre esnek.

Az emelkedő lineáris szakaszt jellemző „R” érték a talajsűrűség függvénye és a mérések alapján (4.12. ábra) negatív exponenciális függvény:

$$R = A e^{-\frac{B_2}{\rho_v}} \quad (4.43)$$

A (4.42) és (4.43) alapján a kúposindex és a talaj sűrűség közötti kapcsolat az alábbi úton vezethető le (emelkedő szakasz):

$$\frac{dCI}{dz} d_k = A e^{-B_2 \frac{1}{\rho_v}} \quad (4.44)$$

Osztunk A-val, majd vesszük a természetes alapú logaritmusát mind két oldalnak:

$$\ln\left(\frac{dCI}{dz} d_k\right) = -B_2 \frac{1}{\rho_v} \quad (4.45)$$

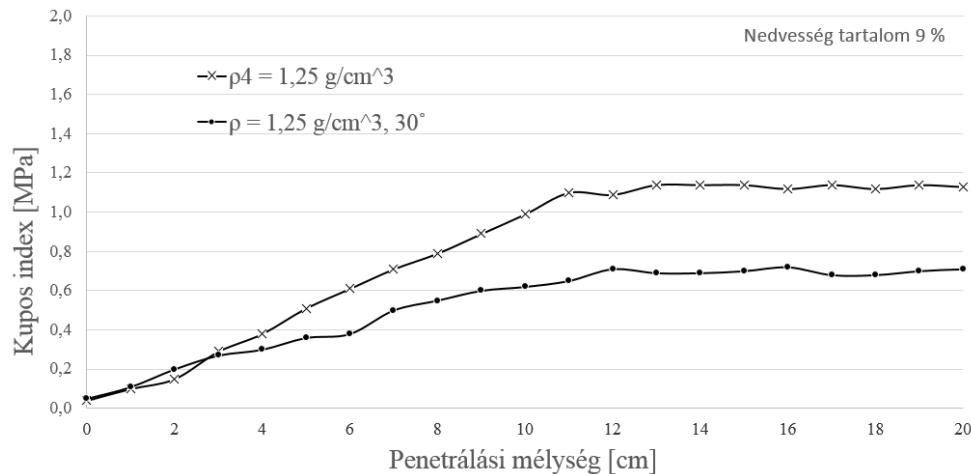
Osztunk $-B_2$ -vel és rendezzük ρ_v -re:

$$\rho_v = \frac{-B_2}{\ln\left(\frac{dCI}{dz} \frac{d_k}{A}\right)}. \quad (4.46)$$

Végül megállapítható, hogy az ln-es részben nem CI/z -vel, hanem dCI/dz -vel, vagyis a kúposindex mélység szerinti első deriváltjával kell számolni (meredekség).

Az állandósult szakaszon „R” értéke a (4.42) egyenletből számolható. Ekkor

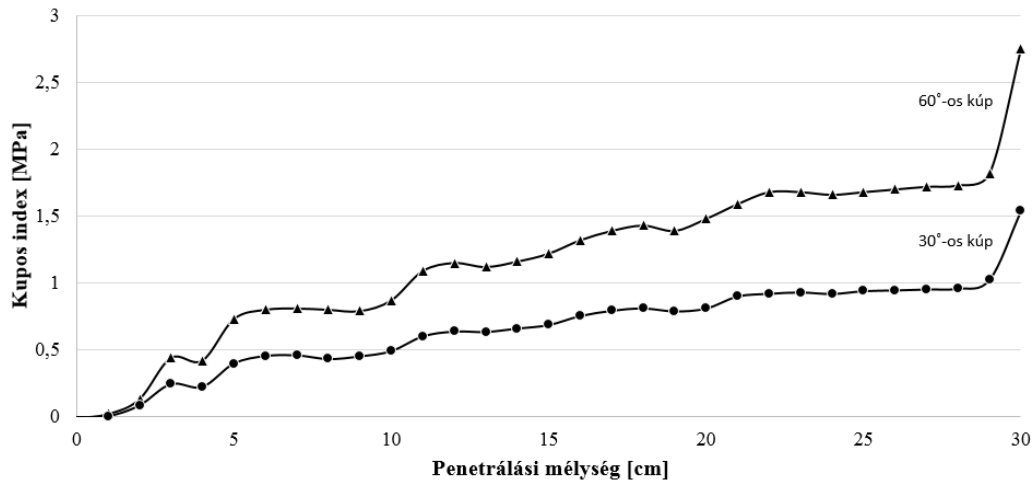
$$\rho_v = \frac{-B_2}{\ln\left(\frac{CI_{\max}}{A} \frac{d_k}{z_{\max}}\right)}. \quad (4.46a)$$



4.13. ábra 1,25 g/cm³ sűrűségű talaj penetrálása 30 és 60 fokos kúppal

A 4.13. ábrán együtt látható a 30°-os kúppal és a 60°-os kúppal való mérés, azonos talaj sűrűség esetén. A 30°-os kúppal mért CI értékek kisebbek, mint a 60°-al mérték, mert a kisebb csúcsszögű kúp kevésbé tömöríti a talajt és könnyebben hatol át rajta. A görbe meredeksége is jóval kisebb, mint a 60°-os kúp esetében.

A 4.14. ábrán a 3.4. fejezetben leírt második módon (5 cm-ként lépcsősen növekvő sűrűség) tömörített talajon mért CI mérés eredmény görbéje látható harminc illetve hatvan fokos penetrációs kúpok alkalmazása mellett. Az egyes rétegek hatása látható a CI görbén. Az aránylag vékony réteg (5 cm) és a hozzá képest hosszú kúp (3.14. ábra) miatt a rétegek CI görbéi enyhén összemosódnak. A talaj rétegek és határaik egymásra hatás bonyolult tömörödési probléma, amely további vizsgálatokat igényel.

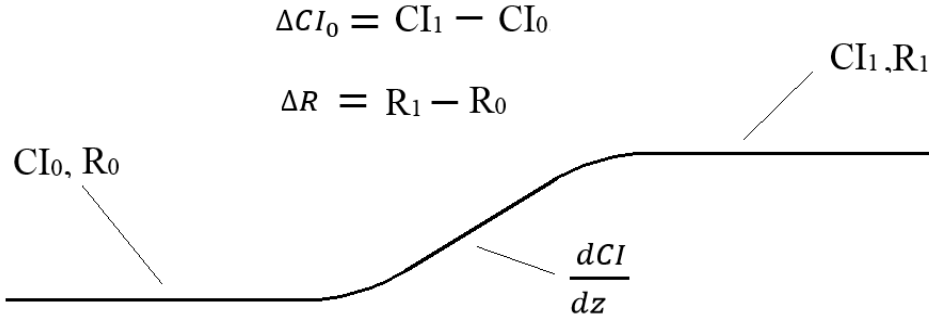


4.14. ábra Rétegelten tömörített talaj, vályúban mért CI görbék, 30° és 60° kúppal mérve

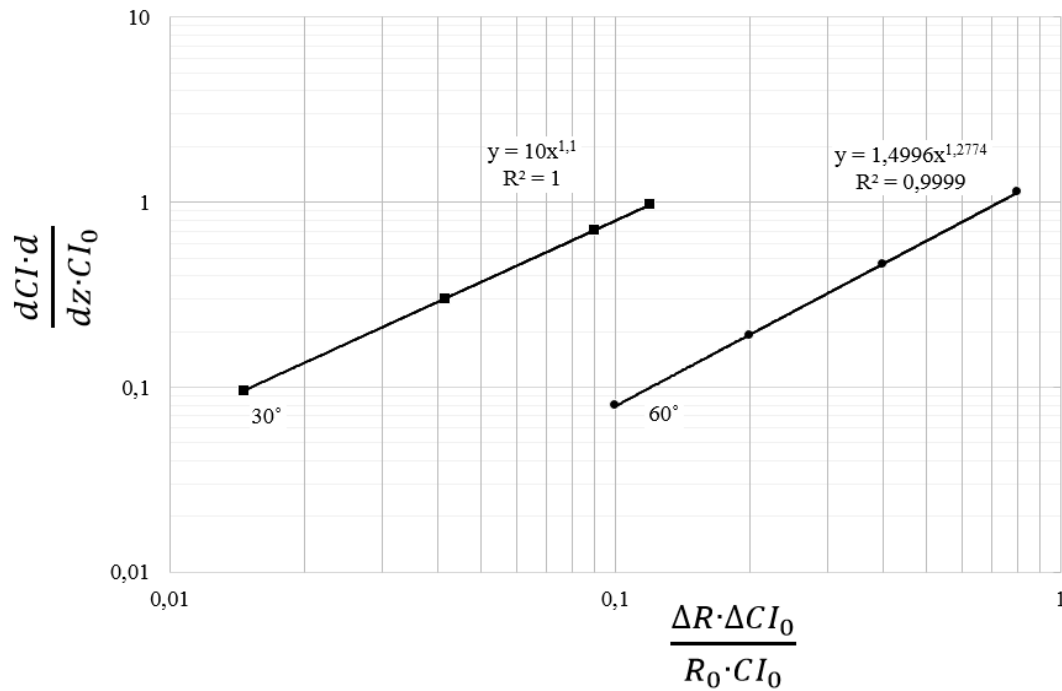
A 4.14. ábrán látható vízszintes részek állandó sűrűségű talajnak felelnek meg, mint a 4.9. ábrán. A két réteg közötti átmenet egy lineáris szakasz. Az átmenet jellemzésére tehát a CI index meredeksége használható az alábbi dimenzió nélküli formában:

$$\frac{dCI}{dz} = 1,52 \left(\frac{\Delta R \Delta CI_0}{R_0 CI_0} \right)^{1,3} \quad (4.47)$$

Ahol:



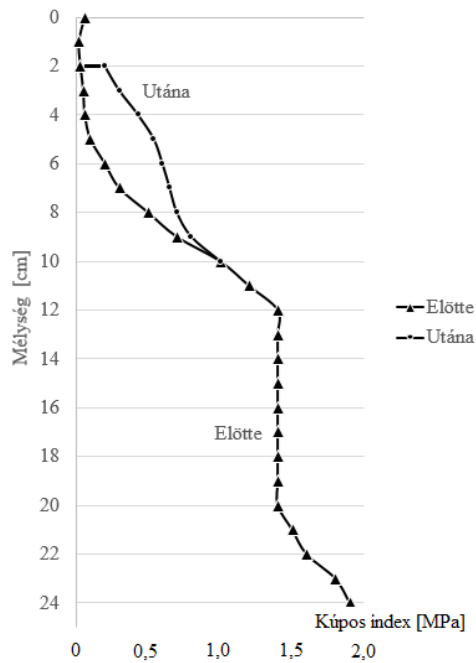
4.15. ábra Rétegek közötti átmenet és jelölései



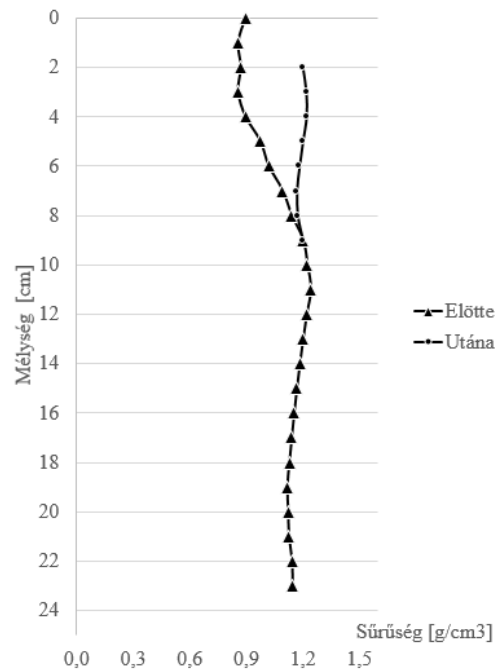
4.16. ábra Lépcsős sűrűség változás hatása az átmenetet jellemző kúposindex meredekségére

Mint látható, a nagyobb tömörségű rétegek között a meredekség csökken, mivel kisebb relatív összenyomás „ ε ” szükséges (lásd a 4.1. segéddiagramot).

A 4.17. ábrán látható a jobb nyomban mért áthaladás előtti CI görbe valamint az áthaladás után felvett CI görbe. Látható, hogy az áthaladás hatására a kúposindex értékek növekedtek. A (4.46) egyenletet felhasználva a sűrűség számolható. Ehhez a CI értéket és az alkalmazott kúp méretei szolgáltak bemenő adatként. A 4.18. ábrán a számolt talajsűrűség értékek láthatóak a mélység függvényében. Az első két cm volt a nyommélység. A talajsűrűség értékek áthaladás után ezt követően jelennek meg. Az áthaladás hatására -a megfelelő rétegekben- a talaj sűrűsége is növekedett. Két összetartozó pont (pl. 4 cm mélyen a talaj sűrűség áthaladás előtt és azt követően) közötti különbség a tömörödés mértékét adja meg, amit a relatív nyúlással lehet kifejezni.



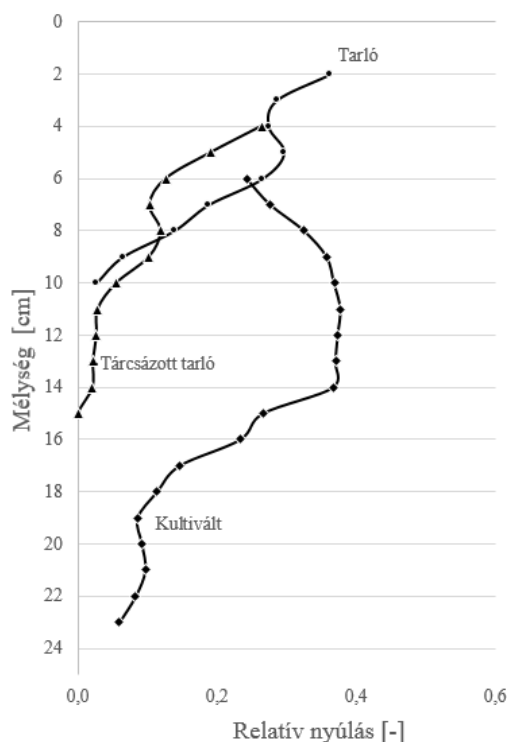
4.17. ábra Kúposindex mérés Tarlón áthaladás előtt és áthaladás után



4.18. ábra Kúposindex alapján számolt talaj sűrűség változás a mélység függvényében

A (4.5) egyenletet felhasználva, a sűrűség értékek segítségével rétegenként számolható a talaj áthaladás hatására bekövetkezett relatív nyúlása. A vizsgált állapotok esetén a talaj relatív nyúlása (tömörödése) a mélység függvényében a 4.19. ábrán látható.

A relatív nyúlások rétegenkénti összege adja a talaj függőleges deformációját, a talaj oldalirányú mozgása nélkül. Ez utóbbi pontos számbavétele további speciális vizsgálatokat igényel.



4.19. ábra Az áthaladás hatására kialakult relatív nyúlás (tömörödés) a mélység függvényében

Ezek alapján megállapítható, hogy a kúpos penetrométer megfelelő kísérleti adatok birtokában alkalmas a talajsűrűség eloszlásának becslésére, amely alapul szolgálhat egy pontosabb teherbírási tényező meghatározásához, figyelembe véve a talaj mélység szerinti sűrűség eloszlását.

4.5. Új tudományos eredmények

1. Teherbírási tényező meghatározása

A talaj teherbírási tényezőjének (k) meghatározására új módszert fejlesztettem ki. A módszer a jármű áthaladása során hagyott nyomból fejti vissza az teherbírási tényezőt úgy, hogy a felfekvési felület alapján számolt egyenértékű átmérőt helyettesíti a Szaakjan formula nyomólap átmérőjének helyébe. Így a kerék terhelés valamint a nyommélység ismeretében a (k) talaj teherbírási tényező számolható.

2. Gumiabroncs-talaj kapcsolat lengéscsillapítása

Összefüggést dolgoztam ki a talajon gördülő gumiabronccsal szerelt kerék, talaj és gumiabroncs okozta lengéscsillapításának (η) meghatározására:

dimenzió nélküli alakban

$$\frac{\eta}{\sqrt{K m}} = B \left(\frac{\sigma_{köz}}{k} \right)^h, \quad \text{vagy} \quad \eta = B \left(\frac{\sigma_{köz}}{k} \right)^h \sqrt{K m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right].$$

A lengéscsillapítás meghatározásához szükség van a közepes talajnyomásra ($\sigma_{köz}$), a talaj teherbírási tényezőjére (k), az abroncs-talaj kapcsolat rugómerevségére (K), a kerékterhelés tömegére (m) és két állandóra, amely $B = 0,58 [-]$ és $h = 1,52 [-]$.

3. A talaj csillapítása

Összefüggést dolgoztam ki a gumiabroncs-talaj kapcsolatában keletkező eredő logaritmikusan dekrementum (δ_{1+2}) alapján történő talaj csillapítás megállapítására:

$$\delta_2 = \ln \left[\frac{\frac{K_1}{K_2} e^{\delta_1} e^{\delta_{1+2}}}{\left(\frac{K_1}{K_2} + 1 \right) e^{\delta_1} - e^{\delta_{1+2}}} \right].$$

Az összefüggés segítségével, az abroncs és a talaj rugómerevségének (K_1 , K_2) ismeretében valamint a gumiabroncs logaritmikusan dekrementumának (δ_1) ismeretében kiszámolható a talaj logaritmikusan dekrementuma (δ_2).

4. Talaj térfogati sűrűségének kapcsolata a kúpos indexszel

Megállapítottam a kapcsolatot a talajban mért kúposindex (CI) érték és a talaj sűrűsége (térfogat tömege) (ρ) között, az emelkedő lineáris szakaszra:

$$\rho_v = \frac{-B_2}{\ln \left(\frac{dCI}{dz} \frac{d_k}{A} \right)} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right], \quad \text{az állandósult szakaszra:} \quad \rho_v = \frac{-B_2}{\ln \left(\frac{CI_{\max}}{A} \frac{d_k}{z_{\max}} \right)} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right].$$

A CI index érték alapján történő talaj sűrűség meghatározáshoz szükség van a penetráláshoz használt kúp átmérője (d_k) valamint a talajtól függő konstansokra, amelyek ebben az esetben $A = 185 [\text{MPa}]$ és $B_2 = 5,7 [\text{g/cm}^3]$. Illetve szükséges még a $CI_{\max}$ értékhez tartozó mélység ($z_{\max}$).

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A gumiabroncs-talaj kapcsolatában gördülés közben végbemenő jelenségek igen összetettek. Számos párhuzamosan zajló folyamat játszódik le a gumiabroncsban, illetve annak a talajon történő áthaladása közben a talajban, és az érintkezési felület mentén egyaránt. Ezen folyamatok rendszerint nem függetlenek egymástól, hanem egymásra kölcsönös hatást gyakorolnak, összefüggnek.

A szabadföldi mérések alkalmával különös hangsúlyt kell fektetni a környezeti hőmérséklet illetve a napsugárzás intenzitásának figyelésére. A fekete gumiabroncs a rá eső sugárzások jelentős részét elnyeli, így felmelegítve az abroncsot, ezzel megváltoztatva annak belső légnyomását. Valamint a talajfelszín nedvességtartalma is erős változásokon mehet keresztül. A szabadföldi mérések, mérési sorozatok rendszerint hosszabb időt vesznek igénybe, ami alatt az abroncsban számottevő nyomásváltozás alakulhat ki -talajoldalról nedvességtartalom változás- így megváltoztatva az abroncs-talaj kapcsolatban kialakult sűrűlátsási és csillapítási tulajdonságot.

A szabadföldi talaj nagy inhomogenitása és a benne lévő egyéb zavaró elemek (növényzet, kavicsok) miatt talajvályús kísérleteket érdemes végezni. A vályúba csak megfelelően tisztított és beállított nedvességtartalmú talaj kerül. Így az ott végzett, például kúpos penetrométeres vizsgálatok eredményei a kis szórásuk miatt sokkal jobban felhasználhatók törvényszerűségek megállapítására.

Új módszerként javaslom a talaj teherbírási tényezőjének meghatározását a gumiabroncs okozta nyommélység alapján. Ez a klasszikus bevaméteres mérésekhez képest egyszerű módszer. Nagy előnye, hogy a „k” érték meghatározásához magát a gumiabroncsot használjuk, amely jobban megfelel a valóságnak, mint a csak függőlegesen mozgó nyomólap. Két különböző szélességű abroncs használatkor a jellemző „n” kitevő is meghatározható.

A jármű felépítményének mozgástani és energetikai számításainak bemenő paramétere a gumiabroncs -légnyomásától függő- csillapító képessége és rugómerevsége, valamint a jármű hord rugójának és csillapító elemének a megfelelő tulajdonságai. Ezen elemek egymással soros elrendezésben, kapcsolásban vannak. Terepen haladva a rendszer kiegészül a talaj csillapítási tulajdonságával, amely erősen befolyásolja a jármű mozgástani és energetikai tulajdonságait. A dolgozatban meghatározott „ η ”, a kéreken keletkezett gumiabroncs és talaj okozta lengéscsillapítási érték az ilyen jellegű számításokhoz szolgálhat bemenő paraméterként.

Az abroncs és talaj csillapítása energiát nyel el és növeli a mozgás energiaszükségletét. A talajprofil okozta függőleges lengések járulékos deformációkat hoznak létre, mind az abroncsban, mind a talajban. A 4.5 fejezet harmadik pontjában leírt eredmény segítségével a talajban elnyelt energiahányad meghatározására nyílik új lehetőség. Az itt nyert adatok így többek között segíthetik a függőleges lengésgyorsulások okozta járulékos veszteségek mélyebb feltárását is.

A kúpos penetrométeres mérés segítségével most már nem csak talajellenállást lehet meghatározni, hanem a mélység függvényében a talajsűrűséget is. A 4.5 fejezet, négyes pontjában közölt eredményeket felhasználva a helyszínen, azonnal megállapítható a talaj sűrűsége, a talaj életébe történő kismértékű beavatkozás árán. A klasszikus talajsűrűség megállapítási módszerhez talajminta vétele szükséges. A mintavétel a talaj jelentős megbontását, bolygatását jelentette, illetve maga a sűrűség meghatározása is több időt vett igénybe. Ami alatt az eredeti talaj sűrűsége akár meg is változhatott. Az elért eredményeknek köszönhetően most pontos képet lehet alkotni a talajsűrűség változásáról az idő függvényében és -az adott tartományon belül- tetszőleges mélységben egyaránt. A módszer részletesebb ismeretet nyújt a rétegenkénti talajsűrűség változás milyenségéről is, ezzel nem csak gumiabroncsok alatt, hanem a későbbiekben akár különböző járószerkezetek alatt kialakult rétegenkénti talajdeformáció jellege is nyomon követhető.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A TALAJ DEFORMÁCIÓJA ÉS CSILLAPÍTÁSA GUMIABRONCSOK ALATT

A disszertáció elején kitűzött célok megvalósításához a megfelelő kísérleti vizsgálatokat megterveztem és elvégeztem. Figyelembe vettem és felhasználtam a szakirodalomban megtalálható, ezen a területen elért eddigi eredményeket. A kísérleti vizsgálatok átölelték a szabadföldi, talaj, és gumibroncs-talaj, valamint laboratóriumi körülmények között végzett abroncs illetve talaj kísérleteket és vizsgálatokat egyaránt. Részletes szakirodalmi következtetéseket tettem a számomra releváns pontokban, melyek alapján a vizsgálódásaimat és kísérleteket a megfelelő irányba tereltem.

Az anyag és módszer című fejezetben részletesen ismertettem a különböző kísérleti beállításokat és azok megvalósításánál alkalmazott módszereket és eszközöket.

Szabadföldi vontatási kísérleteket a Szent István Egyetem erre alkalmas területén végeztem. A terület talajfizikai összetételét pontosan meghatároztam. A kísérlethez használt terepjáró járművet egy John Deere 6600-as traktorral, erre a célra megfelelően kialakított egyedi vonószerkezet segítségével vontattam. Vontatásokat eltérő talajállapotokon és különböző abroncs légnyomások mellett végeztem. A vizsgált gumibroncs tulajdonságait (például az abroncs rugómerevsége) laboratóriumi körülmények között mértem ki.

Az eredmények fejezetben megtalálható a kísérleti eredmények feldolgozásának részletes leírása illetve az eredmények alapján levonható következtetések. A 4.1. alfejezet az elméleti következtetések címet viseli. Ebben olyan elméleti úton megállapított levezetések olvashatók, melyeknek egy része önmagában is új tudományos eredmény lehet, illetve segítik a mérési eredmények gyors feldolgozását, például segéddiagram formájában. Ilyen például a 4.1. ábrán mutatott nomogram, amely segítségével a tömörödés előtti és tömörödés utáni talaj térfogat tömegek ismeretében a relatív talajnyúlás (tömörödés) könnyen leolvasható.

A megvalósított kísérletek és vizsgálatok feldolgozásának eredményeként, a talaj tömörödése és csillapítása témakörében négy új tudományos eredmény született:

Új módszert javasoltam a talaj teherbírási tényezőjének megállapításához, mely számos előnnyel rendelkezik a jelenleg alkalmazott módszerekkel szemben.

Számítási és leírási módszert alkottam a talaj csillapítási tulajdonságának meghatározásához. A vizsgált talajra meghatároztam a csillapítást, melyet a logaritmikus dekrementummal lehet kifejezni.

Feltártam az összefüggést a kúpos penetrációs talaj vizsgálat során felvett CI érték és a talaj térfogat sűrűsége között.

A kísérletek során tett észrevételeimet, illetve a feltárt összefüggéseket és új módszereket a következtetések és javaslatok fejezetben ismertettem részletesen.

Az elért eredmények részletesebb információt nyújtanak a jelenség (gumibroncs alatt bekövetkezett talaj deformációja és csillapítása) mélyebb kapcsolatainak megértéséhez, továbbá újabb kiindulópontokat jelentenek a további kutatások részére.

Összegezve, a dolgozat elején a célkitűzések fejezetben feltett kérdésre sikerült válaszokat megfogalmazni.

7. SUMMARY

DEFORMATION AND DAMPING OF SOIL UNDER TIRES

I designed and performed experimental investigations to realize the goals which were presented in the first section of my dissertation. I have taken into consideration the previous results found in the literature of the field. The experimental investigations ranged from field soil, tire-soil and laboratory soil and tire experiments. I wrote detailed conclusions from the literature in the relevant aspects, which guided my investigations and experiments in the proper direction.

In the „materials and methodology” chapter, I described the different experimental setups, the methods and devices of the realization in details.

The field traction experiments were performed at an appropriate area of Szent István University. The physical composition of the soil was precisely defined. The terrain crossing vehicle used in the experiments was pulled with a John Deere 6600 tractor with a special traction coupling device. The tractions were performed at different states of the soil and different tyre pressure setups. The tire parameters (such as spring stiffness of the tire) were measured in laboratory environment.

The results chapter discusses the detailed description of the experimental results, also highlights the conclusions derived from the aforementioned results. 4.1 sub-chapter is titled “theoretical conclusions”. This chapter presents deductions, which can point to new scientific results on their own, also these deductions help faster processing of the measured data, e.g. with the help of assisting plot diagrams. Such diagram is the nomogram of 4.1, which helps reading the relative elongation (compaction) with the known volumetric soil masses before and after the compaction.

With the results of the realized experiments and investigations, four new scientific results were presented in the field of soil compaction and attenuation:

I propose a new method for the definition of carrying capacity parameter of the soil, which have numerous advantages over the currently used methods.

I have created a new computational and describing method to define the damping parameters of the soil. I have specified the damping for the investigated soil, which can be denoted by the logarithmic decrement.

I have shown the correlation between the CI value and the volumetric density of the soil during cone soil penetration tests.

I detailed the newfound correlations and novel methods - which were unfolded during the experiments - in the conclusions and recommendations chapter.

The obtained results give deeper information and understanding on the phenomenon (soil deformation and damping under tire load). They also help to ground new starting points for further experiments.

Summarizing the work, I was able to answer the questions which were initiated in the beginning of my dissertation.

8. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. ARANY S. (1943): Vezérfonal a Mezőgazdasági Főiskolák hallgatóinak laboratóriumi gyakorlathoz. III. rész. Talajtani vizsgálatok.
2. ARYA M. L., PARIS J. F. (1981): A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*, Vol.45, pp.1023-1030.
3. ATTERBERG A. (1912): Die Plastizität der Tone. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde* 2. Berlin. 149. seite 312-316.
4. BEKKER M. G. (1961): Introduction of Terrain Vehicle Systems, University of Michigan Press.
5. BEKKER M. G. (1956): Theory of Land Locomotion, The Mechanics of Vehicle Mobility, University of Michigan Press, Ann-Arbor.
6. BENEDETTO A., TOSTI F., DI DOMENICO L. (2012): Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflector. *Journal of Terramechanics* 49:1, pp. 1-12.
7. BERNSTEIN R. (1913): Probleme zur experimentiellen Motorpflugmechanik. *Der Motorwagen*, heft 16. sz.
8. BOUSSINESQ J. (1883): Application des potentials a l'etude de l'equilibre et due mouvement des solides elastiques. Gauthier-Villars, Paris
9. CHANGYING J., JUNZHENG P. (1998): Relationeship between bearing capacity of soft layer of paddy fields is South China. *Journal of Terramechanics*, 35:4, pp. 225-228.
10. CSIZMADIA M. B., NÁDORI E. (1996): Statika. Nemzeti Tankönyvkiadó. Budapest-Gödöllő. 410.o.
11. DIAGLE J. J., HUDNALL H. W., GABRIEL J. W., MERSIOVSKY E., NIELSON D. R. (2005): Designing soil interpretation classes for military land-use predictions. *Journal of Terramechanics*, 42:3-4, pp. 305-320.
12. DURST P. J., MASON G. L., MCKINLEY B., BAYLOT A. (2011): Predicting RMS surface roughness using fractal dimension and PSD parameters. *Journal of Terramechanics*, 48:2, pp. 105-111.
13. FERVERS C.W. (2004): Improved FEM simulation model for tire-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 41:2-3, pp. 87-100.
14. GORJACKSKIN (1936): Teorija i proizvodstvo szelskohozjajsztvennüh mashin. Moskva.
15. GEBRESENBET G. (1992): Dynamic Behaviour of Moulboard Plough. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Uppsala, Paper No. 9201-07.
16. GEDEON J. (2008): A terepfelszín modellezésének továbbfejlesztése. *Járművek és Mobilgépek*, No1., 1-16. o.
17. GEDEON J. (2002): Terepen mozgó járművek. Szaktudás kiadó ház, fejezet: Terepegyenetlenségek leírása, 222. o.
18. GEDEON J. (1983): A léptékparaméter, mint a járművek üzemi terhelésének egyik jellemzője. *Periodica Polytechnica, Transp. Eng.*, 377-387. o.

19. GEDEON J. (1993): On Some Basic Problems of Stochastic Modelling. *Periodica Polytechnica, Transp. Eng.*, pp. 89-100.
20. GURMAI L., KISS P.(2009): Modelling Terrain Conditions. *Proceedings of 11th European Regional Conference of the ISTVS*, P-39, Bremen, Germany
21. HEGEDŰS E. (1965): Plate sinkage study by means of dimensional analysis. *Journal of Terramechanics*. 2.
22. HERNANZ L. J., PEIXOTO H., CERISOLA C., SÁNCHEZ-GIRÓN V. (2000): An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. *Journal of Terramechanics*, 37:4, pp. 167-184.
23. HILDEBRAND R., KESKINEN E., NAVARRETE R. A. J. (2008): Vehicle vibrating on soft compacting soil half-space: Ground vibrations, terrain damage, and vehicle vibrations. *Journal of Terramechanics*. 45:4, pp.121-136.
24. HOLM (1969): Das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen Überfahren einer Spur. *Proceedings of 3rd. Int. Conf. of the ISTVS*, Essen.
25. ISHIGAMI G., MIWA A., NAGATANI K., YOSHIDA K. (2007): Terramechanics-based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil. http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/~ishigami/papers/JFR_ishigami.pdf, letöltve: 2014.04.18.
26. JARDINE, POTTS, FOURIE, BURLAND (1986): Studies of influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. <http://www.icvirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geot.1986.36.3.377?crawler=true&mimetype=application/pdf> , letöltve: 2014.08.14.
27. JÁNOSI Z., HANAMOTO B. (1961): The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soil. *Int. Conf. Mechanics of Soil-Vehicle System*. Torino-Saint Vincent. 12/16.
28. KACIGIN V. (1964): Voproszi szelszkohezajsztvennoj mehaniki. Tom XIII.
29. KANE R. J., AYERS P., HOWARD H., ANDERSON A., KOCH D. (2013): Multipass coefficients for terrain impacts based on military vehicle type, size and dynamic operating properties. *Journal of Terramechanics* 50:3, pp. 175-183.
30. KISS P. (2001): Terepen mozgó járművek energetikájának egyes kérdései. PhD doktori értekezés, Gödöllő, 156. o.
31. KISS P., LAIB L. (1997): Energetic aspects of soil deformation connection with soil-tyre interaction. ASAE Annual International Meeting. ASAE Paper Number: 971025 Minneapolis, Minnesota, USA
32. KNUTH M. A., JOHNSON J. B., HOPKINS M. A., SULLIVA R. J., MOORE J. M. (2012): Discrete element modeling of a Mars Exploration Rover wheel in granular material. *Journal of Terramechanics*, 49:1, pp.27-36 pp.
33. KOMÁNDI GY. (1993): Revaluation of the adhesive relationship between the tire and the soil. *J Terramechanics* 30/2 pp: 77-83.
34. KOMÁNDI GY. (1966): Teljesítménymérleg- és szlipvizsgálat traktoroknál. *Az Agrártudományi Egyetem Tudományos Értesítője*, Gödöllő.
35. KOVÁCS Z. (2012): Traktorok lengéscsillapítási segédelsőkerek hajtásánál, a vontatási jellemzők alakulása. *PhD doktori értekezés*, Gödöllő.

36. LAIB L. KISS P., ANTOS G. (2008): The effects of the off-road vehicle on the soil cohesion and internal friction. *Járművek és Mobilgépek*, No. 2., pp.132-153.
37. LAIB L., VAS A. (1998): Traktorok-Autók. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
38. LEE J. H. (2011): Finite element modeling of interfaciál forces and contact stresses of pneumatic tire on fresh snow for combined longitudinal and lateral slips. *Journal of Terramechanics*. 48:3, pp.171-197.
39. LETOSNYEV M. N. (1951): A mezőgazdasági gépek elmélete. Budapest, Akadémiai Kiadó, 793.
40. LI W., DING L., GAO H., DENG Z., LI N. (2013): ROSTDyn: Rover simulation based on terramechanics and dynamics. *Journal of Terramechanics* 50:3, pp. 199-210.
41. LYASKO M. (2010): Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. *Journal of Terramechanics* 2010:47, pp. 275-294.
42. MAHYUDDIN A. I., SILIMAN N., SUHARTO D. (2011): Dynamic response of shallow buried structures associated with landmine clearing operations. *Journal of Terramechanics*. 48:3, pp.215-224.
43. MEIRION-GRIFFITH, SPENKO (2011): A modified pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains. *Journal of Terramechanics*. 48:2, pp.145-155.
44. NAKASHIMA H., OIDA A. (2004): Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method. *Journal of Terramechanics*. 41:2-3, pp.127-137.
45. NGUYEN V.N., INABA S. (2011): Effects of tire inflation pressure and tractor velocity on dynamic wheel load and rear axle vibrations, *Journal of Terramechanics* 48 pp. 3-16.
46. ONO I., NAKASHIMA H., SHIMIZU H., MAYASAKA J., OHDOI K. (2013): Investigation of elemental shape for 3D DEM modeling of interaction between soil and a narrow cutting tool. *Journal of Terramechanics* 50:4, pp. 265-276.
47. PARK S., POPOV A.A., COLE D.J. (2004): Influence of soil deformation on off-road heavy vehicle suspension vibration. *Journal of Terramechanics* 41:1, pp.41-68.
48. QINGNIAN W., YING L., LONGMING G. (1991): Bearing capacity and sinkage of loose sand. 5th European Conference of ISTVS, proceedings volume 1. pp. 33-40.
49. RAPER R. L. (2005): Agricultural trafik impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42:3-4, pp. 259-280.
50. RAJKAI K. (1988): A talaj víztartó képessége és különböző talajtulajdonságok összefüggésének vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan*, 37,15-30. o.
51. RÁZSÓ I. (1958): Mezőgazdasági gépek elmélete. I. kötet. Tankönyvkiadó, Budapest.
52. REECE A.R. (1964): Theory and practice of off-the-road locomotion. The Annual Conference, London.
53. SADEK M. A., CHEN Y., LIU J. (2011): Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions. *Journal of Terramechanics* 48:6, pp. 451-458.
54. SENATORE C., WULFMEIER M. VLAHINIC' I. ANDRADE J., IAGNEMMA K.(2013): Design and implementation of particle image velocimetry method for analysis of running gear-soil interaction. *Journal of Terramechanics* 50:5-6, pp. 311-326.
55. SITKEI GY. (1972a): A mezőgazdasági járszerkezetek méretezési módszerei. Akadémiai Kiadó, Budapest

56. SITKEI GY. (1972b): Die viskoelastischen Eigenschaften von Ackerböden und deren Einfluss auf die Boden-Rad Wechselwirkung. *Proceedings of the 4th. Int. Conf. of the ISTVS*, Stockholm.
57. SITKEI GY. (1981): Mezőgazdasági anyagok mechanikája. Akadémiai Kiadó, Budapest
58. SITKEI GY. (1967): Mezőgazdasági gépek talajmechanikai problémái, Budapest, Akadémia kiadó. 141-142. o.
59. SITKEI GY. (1978): Allgemeine Zusammenhänge zwischen der Leistung, dem Gewicht und den optimalen Betriebsparametern von Schleppern. *Grundl. der Landtechnik*, S. 189-191.
60. SITKEI GY. (1986): Mezőgazdasági és erdészeti járművek modellezése. Akadémiai Kiadó, Budapest.
61. SITKEI GY. (1997): Non-linear Viscoelastic-Plastic Model Describing Compaction Processes. *Proc. of 2nd IFAC/IMACS Conf.* pp. 105-112.
62. SITKEI GY. (2002): Terepen mozgó járművek. Szaktudás Kiadó ház. fejezet: A kerék energiavesztesége függőleges lengés hatására. 187-191. o.
63. SITKEI GY. (2005): A gyümölcs- és zöldségtermesztés műszaki vonatkozásai, MGI könyvek. 49-58. o.
64. SMITH R., ELLIES A., HORN R. (2000): Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire load. *Journal of Terramechanics* 37 pp. 207-222.
65. SMITH W., PENG H. (2013): Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method. *Journal of Terramechanics* 50:5-6, pp. 277-287.
66. STEFANOVITS P. (1975): Talajtan, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
67. STEFANOVITS P. (1981): Soil Science. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, pp. 126-135.
68. STROPPEL T. H. (1952): Die Kennzeichnung der Ackerböden nach der Textur. *Grundlagen der Landtechnik*. 3.
69. SZAAKJAN SZ. (1956): O zakonomernosztyi szoprotivlenija pocsvi vдавlivaniju. *Szbornyik trudov po zeml. mec.* III.
70. TAGHAVIFAR H., MARDANI A. (2013): Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics* 50:2, pp. 99-106.
71. TAMÁS K., JÓRI J. I., MOUAZEN M. A. (2013): Modelling soil-sweep interaction with discrete element method. *SOIL & TILLAGE RESEARCH* November: (134) pp. 223-231.
72. TRAN T. D., MURO T. (2004): Effect of an innovative vertical vibro-tracked vehicle on soil compaction. *Journal of Terramechanics* 41:1, pp. 1-23.
73. TSUJI T., NAKAGAWA Y., MATSAMUTO N., KADONO Y., TAKAYAMA T. TANAKA T. (2012): 3-D DEM simulation of cohesive soil-pushing behavior by bulldozer blade. *Journal of Terramechanics* 49:1, pp. 37-47.
74. WILLS B. M. D. (1966): The load sinkage equation in theory and practice. *Proc. 2nd International Conf. ISTVS Quebec*.
75. XIA K. (2011): Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. *Journal of Terramechanics* 48:2, pp. 113-123
76. ZANASI R., GROSSI F., MORELLI R. (2007): Three-dimensional Energetic Dynamic Model of Tire-Soil Interaktion.

http://www.dii.unimore.it/~zanasi/Personale/Papers/P_12_VPPC_2007_Final.pdf, letöltve: 2013.05.16.

77. ZOMOTOR Á. (2003): Gépjármű menetdinamika, kiadó: Dr. Kőfalvi Gyula. 20. o.

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Lektorált cikk idegen nyelven

1. Laib, L. - Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** (2010): The effects of the off-road vehicle on the soil cohesion and internal friction. Mechanical Engineering Letters, Vol. 4., pp. 73-91. HU ISSN 2060-3797
2. Máthé, L. - Kiss, P. - Laib, L. - **Pillinger, Gy.** (2013): Computation of run-off-road vehicle velocity from terrain tracks in forensic investigations. Journal of Terramechanics, Vol. 50. Issue 1., pp. 17-27. (IF: 0,803*)
3. Máthé, L. - Kiss, P. - Laib, L. - **Pillinger, Gy.** - Magdics, G. (2013): Run-off-road vehicle speed analysis from terrain tracks. Mechanical Engineering Letters, Vol. 10., pp. 81-90. HU ISSN 2060-3797
4. Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** (2014): Examination of an overturned towed vehicle. Journal of Tekirdag Agricultural Faculty, Vol. 11. Issue 1., pp. 63-66. ISSN 1302-7050

Lektorált cikk magyar nyelven

5. **Pillinger, Gy.** (2011): Vályogos homoktalaj tereprofil mérése. Járművek és Mobil Gépek online folyóirat (http://www.on-and-off-road-vehicles.hu/pdf/15_152_161.pdf domain név alatt), III. évf., 1. sz., 152-161. o., HU ISSN 2060-4408
6. **Pillinger, Gy.** (2014): Talajdeformáció meghatározása gumiabroncs-talaj kapcsolat reológiai modelljével. Mezőgazdasági Technika, LV. évfolyam, április, 2-5. o., HU ISSN 0026-1890
7. **Pillinger, Gy.** (2014): Függőleges lengések hatására keletkezett járulékos teljesítmény veszteség megoszlása a gumiabroncsabroncs és talaj között. Járművek és Mobil Gépek online folyóirat (http://www.on-and-off-road-vehicles.hu/pdf/pillinger_2014.pdf domain név alatt), VI. évf., 1. sz., 1-7. o., HU ISSN 2060-4408

Nemzetközi konferencia kiadvány

8. Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** - Kiss, P. (2010): Effects of varying moisture content and settlement on internal friction, load capacity and cohesion in loam soil. CD-ROM Proceedings of the 33rd FISITA World Automotive Congress, Budapest, Hungary, 30 May - 4 June, 2010, Paper No: FISITA2010-SC-O-17, p. 5., ISBN 978-963-9058-29-3
9. **Pillinger, Gy.** - Kiss, P. (2011): Modelling the energetics of tire-soil interaction. CD-ROM Proceedings of the 17th International ISTVS Conference, Blacksburg, Virginia, USA, September 18-22, 2011, Paper No: 713, p. 8.

Magyar nyelvű konferencia kiadvány

10. Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** - Kiss, P. (2010): Vályogtalaj mechanikai jellemzőinek vizsgálata a nedvességtartalom és ülepedettség függvényében. XV. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszakának konferencia kiadványa, Kolozsvár, Románia, 2010. március 25-26., 201-204. o., ISSN 2067-6 808

11. **Pillinger Gy.** - Kiss, P. - Laib, L.(2010): Terepi balesetek és talajparaméterek összefüggései. XXXV. Gépjármű Szakértői Szeminárium és Járműakadémia konferencia kiadványa (CD-ROM), Tata, 2010. május 13-14. 1-10. o.
12. Máthé, L. - Laib, L. - Kiss, P. - **Pillinger, Gy.** (2010): A közúti balesetek következtében terepre behatoló jármű sebességének meghatározása szimulációval. IFFK - Konferencia kiadványa (CD-ROM), Budapest, 2010. szeptember 2-4., 10 o., ISBN 978-963-88875-0-4
13. Máthé, L. - Laib, L. - **Pillinger, Gy.** (2010): Közúti baleset után terepre behatoló jármű sebességének meghatározásához szükséges talaj adatbázis bemutatása. XXXVI. Gépjármű Szakértői Szeminárium és Járműakadémia konferencia kiadványa (CD-ROM), Tata, 2010. november 4-5., 20 o., ISBN 978-963-88810-7-6
14. **Pillinger, Gy.** - Laib, L. - Máthé, L. (2010): Közúti baleset után terepre behatoló jármű sebességének meghatározásához szükséges terepprofil adatbázis bemutatása. XXXVI. Gépjármű Szakértői Szeminárium és Járműakadémia konferencia kiadványa (CD-ROM), Tata, 2010. november 4-5., 10 o., ISBN 978-963-88810-7-6
15. Laib, L. - Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** (2011): Közúti balesete után terepre behatoló jármű sebességének meghatározása szimulációval, a terepre érkezés pillanatában. XXXVII. Gépjármű Szakértői Szeminárium és Járműakadémia konferencia kiadványa (CD-ROM), Tata, 2011. szeptember 22-23., 14 o.
16. **Pillinger, Gy.** (2012): Lengésgyorsulások okozta veszteségek meghatározása terepen mozgó járműveknél. XVII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszakának konferencia kiadványa, Kolozsvár, Románia, 2012. március 22-23, 275-278. o., ISSN 2067-6 808
17. **Pillinger Gy.** - Kiss P. (2010): Terepjáró járművek mozgékonyágát befolyásoló tényezők vizsgálata. XXXIV. MTA AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2010. február 02.
18. Gurmai, L. - Kiss, P. - Magdics G. - Máthé L. - **Pillinger Gy.** (2013): Terepen mozgó járművek energetikai összefüggései. Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés konferencia, IFFK 2013, Budapest, 2013. 121-130. o. ISBN 978-963-88875-2-8

Nemzetközi konferencia abstract

19. Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** (2011): Vehicle speed determination approach based on tracks on terrain for criminal thesis. 2nd International Conference in Agricultural Engineering (Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry), Gödöllő, Hungary, October 9-15, 2011, p. 106. ISBN 978-963-269-249-4

Egyéb

20. Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** (2010): Vályogtalaj ülepedettségének és mechanika tulajdonságainak vizsgálata a terepjárás szempontjából. Gépipari Tudományos Egyesület Mezőgépipari Szakosztály, előadás, Budapest, 2010. április 8.

Hivatkozások

Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** - Kiss, P. (2010): Effects of varying moisture content and settlement on internal friction, load capacity and cohesion in loam soil. CD-ROM Proceedings of the 33rd FISITA World Automotive Congress, Budapest, Hungary, 30 May - 4 June, 2010, Paper No: FISITA2010-SC-O-17, p. 5., ISBN 978-963-9058-29-3

1. Gurmai, L. (2011): *Szállítókocsik tesztelése és validációja a terepviszonyok figyelembevételével. A Gépipari Tudományos Egyesület Mezőgépipari Szakosztály Tanácskozásának kiadványa, Gödöllő, 2010. november 26., 45-54. o., ISBN 978-963-269-223-4*
2. Gurmai, L. (2011): *Szállítókocsik tesztelése és validációja a terepviszonyok figyelembevételével. Járművek és Mobil Gépek online folyóirat nyomtatásban megjelent különszáma, 55-65. o., ISBN 978-963-269-227-2*

Máthé, L. - **Pillinger, Gy.** - Kiss, P. (2010): Vályogtalaj mechanikai jellemzőinek vizsgálata a nedvességtartalom és ülepedettség függvényében. XV. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészakának konferencia kiadványa, Kolozsvár, Románia, 2010. március 25-26., 201-204. o., ISSN 2067-6 808

3. Szalay, D. K. - Tolner, I. T. - Deákvári, J. - Kovács, L. - Kardeván, P. - Fenyvesi, L. (2011): *A hiperspektrális méréstechnológia: A terepi és laboratóriumi mérések alkalmazása és jelentősége. A Gépipari Tudományos Egyesület Mezőgépipari Szakosztály Tanácskozásának kiadványa, Gödöllő, 2010. november 26., 37-45. o., ISBN 978-963-269-223-4*

M3. A vizsgált talaj tulajdonságai

8.1. táblázat: A vizsgált talaj szemcse összetétele

Minta	0,25-2 mm Homok	0,05-0,25 mm Homok	0,02-0,05 mm Iszap	0,01-0,02 mm Iszap	0,005-0,01 mm Iszap	0,002-0,005 mm Iszap	0,002 mm > Agyag
1.	32%	55,80%	2,10%	0,80%	0,00%	0,50%	8,80%
Összes	87,80%		3,40%				8,80%
2.	79,80%	10,10%	0%	0%	4%	0%	6,10%
Összes	89,90%		4%				6,10%
3.	63,20%	30,60%	0%	0%	1,90%	0,40%	3,90%
Összes	93,80%		2,30%				3,90%
Átlag	58,30%	32,20%	0,70%	0,20%	2%	0,30%	6,30%
Összes átlag:	90,50%		3,20%				6,30%

8.2. táblázat: Gabonatarló talajmintáinak tulajdonságai

Ts [g/cm ³]	Porozitás [%]	Nedvességtartalom		Ts [g/cm ³]	Porozitás [%]	Nedvességtartalom	
		tömeg [%]	térfogat [%]			tömeg [%]	térfogat [%]
1,64	37	17,1	28,0	1,54	40,83	15,53	23,87
1,5	42	16,5	24,8				
1,41	46	14,1	19,8				
1,45	44	14,3	20,7				
1,58	39	16,5	26,0				
1,63	37	14,7	23,9				
1,71	34	17,7	30,3	1,65	36,50	18,23	30,03
1,61	38	19,2	30,9				
1,66	36	16,4	27,4				
1,68	35	17,3	29,2				
1,61	38	18,8	30,3				
1,61	38	20,0	32,1				
1,7	35	15,4	26,3	1,63	37,17	18,12	29,42
1,68	35	17,5	29,3				
1,61	38	17,4	28,0				
1,63	37	17,3	28,1				
1,58	39	17,3	27,4				
1,58	39	23,8	37,4				
1,63	37	15,8	25,8	1,66	36,00	14,65	24,23
1,62	38	15,4	24,3				
1,58	39	16,4	25,8				
1,7	35	15,1	25,7				
1,77	32	14,3	25,2				
1,68	35	10,9	18,6				
				1,62	37,63	16,63	26,89

8.3. táblázat: Tárcsázott gabonatarló talajmintáinak tulajdonságai

Minta jele	K _A	Ts [g/cm ³]	Porozitás [%]	Nedvességtartalom		Ts [g/cm ³]	Porozitás [%]	Nedvességtartalom	
				tömeg [%]	térfogat [%]			tömeg [%]	térfogat [%]
H15	1 -	1,7	35	9,07	16,90	1,69	35,00	8,50	15,83
	2 -	1,74	33	5,89	11,50				
	3 -	1,65	37	8,59	15,50				
	4 -	1,61	38	9,29	16,50				
	5 -	1,77	32	9,27	18,10				
	6 -	1,69	35	8,88	16,50				
H18	1 -	1,62	38	10,00	18,10	1,62	37,67	9,30	17,65
	2 -	1,66	36	9,64	17,70				
	3 -	1,52	42	6,41	15,70				
	4 -	1,61	38	10,30	18,50				
	5 -	1,66	36	9,44	17,30				
	6 -	1,67	36	10,00	18,60				
H21	1 -	1,7	35	10,00	18,90	1,65	36,67	10,06	17,58
	2 26	1,58	39	10,30	19,10				
	3 -	1,54	41	6,95	11,50				
	4 -	1,66	36	10,00	18,40				
	5 -	1,74	33	10,20	19,60				
	6 -	1,67	36	12,90	18,00				
H24	1 -	1,58	39	8,80	15,30	1,58	39,33	10,00	16,33
	2 -	1,56	40	12,50	13,90				
	3 -	1,58	39	11,10	20,80				
	4 -	1,57	40	9,95	17,20				
	5 -	1,64	37	9,31	16,90				
	6 -	1,53	41	8,32	13,90				
						1,64	37,17	9,46	16,85

8.4. táblázat: Kultivátorozott talaj mintáinak tulajdonságai

Minta jele	K _A	Ts [g/cm ³]	Porozitás [%]	Nedvességtartalom		Ts [g/cm ³]	Porozitás [%]	Nedvességtartalom	
				tömeg [%]	térfogat [%]			tömeg [%]	térfogat [%]
K15	1 -	1,36	48	12,40	19,2	1,53	41,33	12,32	20,37
	2 -	1,55	40	12,90	22,3				
	3 -	1,61	38	10,60	19,2				
	4 -	1,58	39	12,60	22,7				
	5 -	1,4	46	11,70	18,5				
	6 -	1,65	37	13,70	20,3				
K18	1 -	1,37	47	10,90	21,2	1,49	42,67	11,21	19,48
	2 -	1,52	42	11,00	18,7				
	3 -	1,43	45	10,30	16,5				
	4 -	1,61	38	14,60	26,1				
	5 -	1,59	39	10,70	19,0				
	6 -	1,42	45	9,77	15,4				
K21	1 -	1,56	40	9,62	16,6	1,58	39,33	10,65	17,83
	2 -	1,58	39	10,20	18,0				
	3 -	1,63	37	9,86	17,9				
	4 -	1,62	38	10,00	18,0				
	5 -	1,57	40	13,30	18,3				
	6 -	1,5	42	10,90	18,2				
K24	1 -	1,52	42	9,97	16,8	1,50	42,83	10,24	17,08
	2 -	1,47	44	9,76	16,0				
	3 26	1,47	44	10,30	17,0				
	4 -	1,47	44	12,00	20,0				
	5 -	1,51	42	10,30	17,3				
	6 -	1,53	41	9,10	15,4				
						1,52	41,54	11,10	18,69

M4. Gumiabroncs terhelési vizsgálatai

1,5 bar:					Kerékterhelések:		Keréksugarak:	Deformációk:
	(+4 tömeg):	[kg]:	80	F1 [N]=	7500	R1 [cm]=	33,5	4
	(+3 tömeg):	[kg]:	75	F2 [N]=	6500	R2 [cm]=	34	3,5
	(+2 tömeg):	[kg]:	90	F3 [N]=	5300	R3 [cm]=	34,3	3,2
	(+1 tömeg):	[kg]:	82	F4 [N]=	4400	R4 [cm]=	34,9	2,6
	Üresen:	[kg] :	395	F5 [N]=	3600	R5 [cm]=	35,2	2,3
	Terhelés nélkül:	[kg] :	0	F6 [N]=	0	R6 [cm]=	37,5	0

1,8 bar:					Kerékterhelések:		Keréksugarak:	Deformációk:
	(+4 tömeg):	[kg]:	80	F1 [N]=	7500	R1 [cm]=	34,3	3,2
	(+3 tömeg):	[kg]:	75	F2 [N]=	6500	R2 [cm]=	34,5	3
	(+2 tömeg):	[kg]:	90	F3 [N]=	5300	R3 [cm]=	34,9	2,6
	(+1 tömeg):	[kg]:	82	F4 [N]=	4400	R4 [cm]=	35,3	2,2
	Üresen:	[kg] :	395	F5 [N]=	3600	R5 [cm]=	35,5	2
	Terhelés nélkül:	[kg] :	0	F6 [N]=	0	R6 [cm]=	37,5	0

2,1 bar:					Kerékterhelések:		Keréksugarak:	Deformációk:
	(+4 tömeg):	[kg]:	80	F1 [N]=	7500	R1 [cm]=	34,7	3
	(+3 tömeg):	[kg]:	75	F2 [N]=	6500	R2 [cm]=	35	2,7
	(+2 tömeg):	[kg]:	90	F3 [N]=	5300	R3 [cm]=	35,2	2,3
	(+1 tömeg):	[kg]:	82	F4 [N]=	4400	R4 [cm]=	35,5	2
	Üresen:	[kg] :	395	F5 [N]=	3600	R5 [cm]=	35,7	1,8
	Terhelés nélkül:	[kg] :	0	F6 [N]=	0	R6 [cm]=	37,5	0

2,4 bar:					Kerékterhelések:		Keréksugarak:	Deformációk:
	(+4 tömeg):	[kg]:	80	F1 [N]=	7500	R1 [cm]=	34,5	2,8
	(+3 tömeg):	[kg]:	75	F2 [N]=	6500	R2 [cm]=	34,8	2,5
	(+2 tömeg):	[kg]:	90	F3 [N]=	5300	R3 [cm]=	35,3	2,2
	(+1 tömeg):	[kg]:	82	F4 [N]=	4400	R4 [cm]=	35,7	1,8
	Üresen:	[kg] :	395	F5 [N]=	3600	R5 [cm]=	35,9	1,6
	Terhelés nélkül:	[kg] :	0	F6 [N]=	0	R6 [cm]=	37,5	0

M5. Szabadföldi kúpos index vizsgálatok eredményei

Gabona tarló											
Kúp típus: 2 cm ² , 60°											
Mélység	Pen 1	Pen 2	Pen 3	Pen 4	Pen 5	Pen 6	Pen 7	Pen 8	Pen 9	Pen10	Átlag
[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,95	0,03	0,03	0,03	0,03	0,12
1	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,95	0,03	0,03	0,03	0,03	0,12
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,98	1,22	0,03	0,03	0,03	0,24
3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,98	1,22	0,03	0,03	0,03	0,24
4	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,98	1,22	0,1	0,03	0,05	0,25
5	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	1,01	1,22	0,51	0,03	0,34	0,33
6	0,07	0,03	0,12	0,03	0,03	1,01	1,32	1,02	0,03	0,6	0,43
7	0,28	0,03	0,24	0,23	0,03	1,88	1,64	1,02	0,03	0,68	0,61
8	0,47	0,31	0,24	0,23	0,09	2,37	1,64	1,21	0,12	0,78	0,75
9	0,68	0,7	0,59	0,4	0,56	2,37	1,64	1,38	0,33	0,85	0,95
10	0,68	0,7	0,72	0,43	0,84	2,48	1,7	1,52	0,57	0,86	1,05
11	0,89	1,11	0,81	0,43	1,09	2,48	1,7	1,52	1,08	0,88	1,20
12	1,01	1,11	0,81	0,43	1,25	2,81	1,77	1,62	1,3	0,88	1,30
13	1,01	1,11	0,93	0,35	1,25	3,44	1,83	1,62	1,46	0,89	1,39
14	1,07	1,1	0,99	0,35	1,26	2,18	1,9	1,73	1,46	0,9	1,29
15	1,07	1,1	0,99	0,34	1,26	2,27	1,9	1,73	1,51	0,9	1,31
16	1,17	1,1	0,99	0,34	1,26	2,27	1,93	1,84	1,51	0,98	1,34
17	1,24	1,1	0,78	0,34	1,13	2,4	1,88	1,84	1,4	1,1	1,32
18	1,24	1,1	0,78	0,34	1,13	2,4	1,88	1,94	1,4	1,39	1,36
19	1,22	1,1	0,78	0,34	1,13	2,42	1,88	1,97	1,4	1,74	1,40
20	1,22	1,1	0,78	0,34	0,97	2,42	1,81	1,97	1,36	1,91	1,39
21	1,19	1,26	0,68	1,42	0,97	2,35	1,69	1,97	1,36	2,13	1,50
22	1,19	1,26	0,68	1,42	0,97	2,35	1,69	2,21	1,36	2,21	1,53
23	1,19	1,26	0,68	1,42	0,97	2,35	1,69	2,59	1,59	2,37	1,61
24	1,43	1,81	0,92	2,12	1,17	2,35	1,93	2,92	1,85	2,45	1,90
25	1,81	2,51	0,92	2,5	1,81	2,27	2,27	3,46	1,85	2,56	2,20
26	1,81	3,08	2,87	2,11	2,31	2,27	2,27	3,46	1,88	2,67	2,47
27	2,54		2,87		3,39	2,66	2,96	3,56	1,88	3,19	2,88
28	2,81				3,39	2,66	2,96		3,17		3,00
29	2,25				0,14				1,4		1,26
30	2,25										2,25

Tárcsázott gabona tarló											
Kúp típus: 2 cm ² , 60°											
Mélység	Pen 1	Pen 2	Pen 3	Pen 4	Pen 5	Pen 6	Pen 7	Pen 8	Pen 9	Pen10	Átlag
[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,32	0,06
1	0,13	0,03	0,03	0,04	0,17	0,06	0,03	0,05	0,16	0,32	0,10
2	0,13	0,03	0,03	0,04	0,17	0,06	0,03	0,13	0,37	0,26	0,13
3	0,13	0,03	0,03	0,34	0,17	0,12	0,03	0,13	0,41	0,45	0,18
4	0,15	0,03	0,03	0,34	0,17	0,12	0,17	0,13	0,41	0,45	0,20
5	0,19	0,2	0,03	0,45	0,18	0,12	0,17	0,13	0,51	0,45	0,24
6	0,23	0,19	0,09	0,45	0,18	0,12	0,22	0,17	0,53	0,45	0,26
7	0,97	0,17	0,21	0,45	0,18	0,12	0,22	0,17	0,53	0,38	0,34
8	0,97	0,17	0,21	0,4	0,18	0,17	0,22	0,17	0,53	0,52	0,35
9	1,13	0,14	0,1	0,4	0,33	0,17	0,22	0,16	0,56	0,52	0,37
10	1,13	0,12	0,1	0,4	0,29	0,27	0,22	0,16	0,56	0,52	0,38
11	1,25	0,12	0,1	0,4	0,29	0,27	0,22	0,16	0,56	0,52	0,39
12	1,25	0,1	0,1	0,31	0,29	0,36	0,22	0,16	0,56	0,52	0,39
13	1,25	0,1	0,17	0,31	0,17	0,43	0,22	0,3	0,56	0,52	0,40
14	1,29	0,07	0,19	0,31	0,17	0,43	0,22	0,27	0,56	0,52	0,40
15	1,29	0,12	0,19	0,31	0,1	0,43	0,22	0,41	0,54	0,54	0,42
16	1,41	0,12	0,19	0,16	0,07	0,34	0,22	0,67	0,61	0,54	0,43
17		0,41	0,23	0,16	0,07	0,54	0,22	0,67	0,61	0,54	0,38
18		0,47	0,23	0,42	0,07	1,51	0,22	0,81	0,6	0,54	0,54
19		0,47	0,4	0,42	0,07	1,51	0,22	1,4	0,6	1,08	0,69
20		0,55	1,25	1,24	0,38	2,36	0,22	1,4	1,7	1,08	1,13
21		0,55	1,29	1,38	0,38	2,37	0,22	1,44	1,7	1,08	1,16
22		0,55	2,46	1,6	0,99	2,37	0,22	1,44	1,77	1,55	1,44
23		0,9	2,46	2,4	0,99	2,37	0,22	1,44		1,55	1,54
24		0,9		2,4	0,99	2,37	0,22	1,44		1,23	1,36
25		0,9		2,4	1,07	0,67	0,41	1,62		1,23	1,19
26		0,9			2,76	0,67	0,41	1,62		1,23	1,27
27		0,99			0,03	0,67	0,99	1,62		0,38	0,78
28		1,05					0,99	1,62		0,38	1,01
29		0,03					0,99	1,75			0,92
30		0,03						1,75			0,89
31		0,03						1,75			0,89
32		0,03						1,75			0,89

Kultivátorozott talaj											
Kúp típus: 2 cm ² , 60°											
Mélység	Pen 1	Pen 2	Pen 3	Pen 4	Pen 5	Pen 6	Pen 7	Pen 8	Pen 9	Pen10	Átlag
[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
4	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
5	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
6	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,1	0,03	0,03	0,04
7	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,21	0,03	0,03	0,05
8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,23	0,03	0,03	0,05
9	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03
10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03
11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03
12	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
13	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,14	0,03	0,03	0,03	0,04
14	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,27	0,03	0,03	0,03	0,05
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,38	0,03	0,08	0,03	0,07
16	0,1	0,03	0,03	0,03	0,03	0,21	0,52	0,03	0,31	0,03	0,13
17	0,72	0,03	0,03	0,3	0,03	0,21	0,78	0,03	0,56	0,03	0,27
18	1,55	0,03	0,03	0,3	0,04	0,21	1,08	0,03	0,68	0,03	0,40
19	1,55	0,03	0,03	0,66	0,36	0,21	1,3	0,03	0,78	0,23	0,52
20	1,55	0,03	0,03	0,66	0,56	0,35	1,3	0,03	0,85	0,66	0,60
21	1,55	0,03	0,25	0,85	0,7	0,49	1,59	0,39	0,88	1,05	0,78
22	0,2	0,03	0,77	0,88	0,7	0,81	1,99	1,92	0,88	1,05	0,92
23	0,2	0,41	1	0,88	0,82	1,43	2,46	2,33	1,17	1,05	1,18
24		0,94	1	0,91	0,95	1,43			1,17	1,03	1,06
25		0,94	1,14	0,91	0,95	0,75			2,08	1,03	1,11
26		1,31	1,72	1,15	1,38	0,75				1,23	1,26
27		1,31	1,72	1,84	2,94					1,23	1,81
28		1,31	1,72							2,16	1,73
29		2,15	1,65								1,90
30		2,38	0,09								1,24
31		0,03									0,03
32		0,03									0,03

M6. Talajvályús kúpos index vizsgálatok eredményei

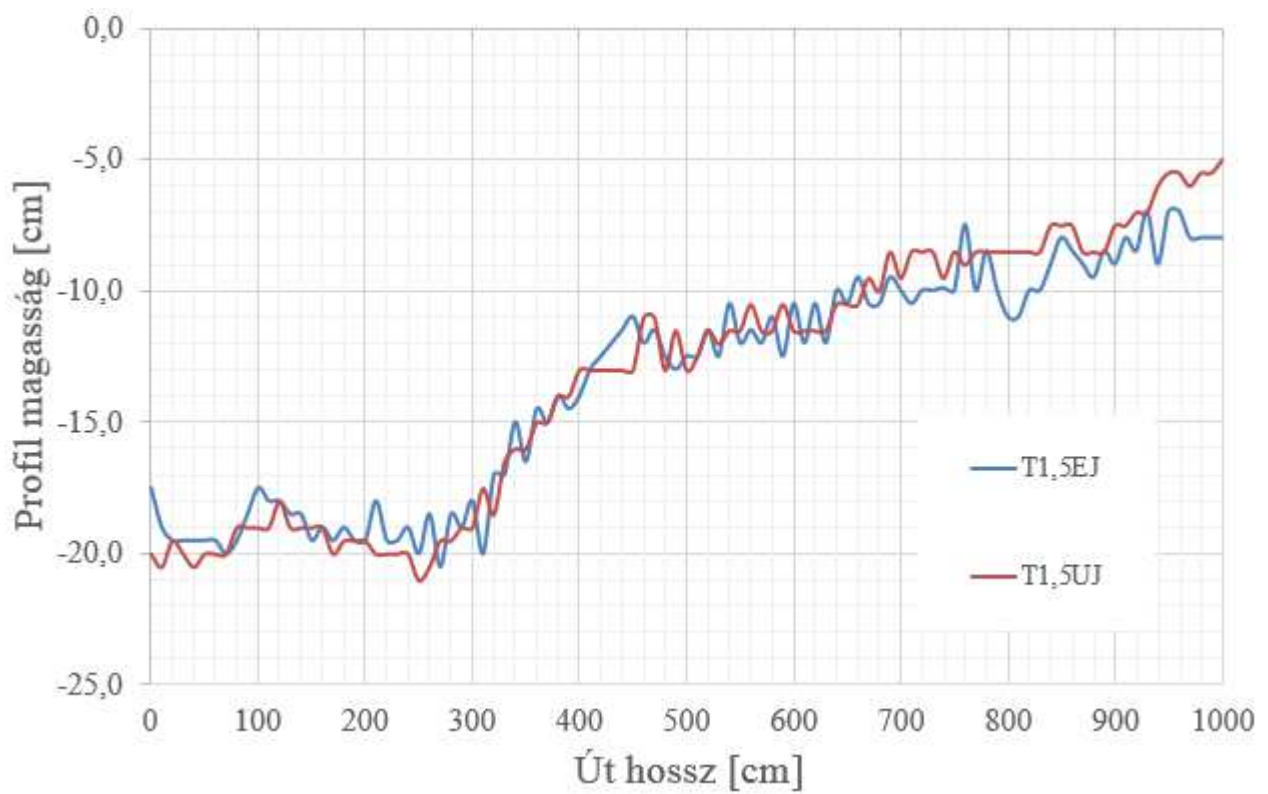
Kúp típus: 2 cm², 60°; 9% nedvességtartalom						
Mélység	$\rho_1 = 0,90$ g/cm³	$\rho_2 = 0,95$ g/cm³	$\rho_3 = 1,1$ g/cm³	$\rho_4 = 1,25$ g/cm³	$\rho_5 = 1,45$ g/cm³	$\rho_6 = 1,65$ g/cm³
0	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,21
1	0,02	0,03	0,03	0,1	0,1	0,60
2	0,02	0,03	0,15	0,15	0,26	0,90
3	0,03	0,03	0,20	0,29	0,36	1,20
4	0,06	0,14	0,28	0,38	0,50	1,40
5	0,06	0,17	0,34	0,51	0,70	1,55
6	0,07	0,23	0,43	0,61	0,90	1,69
7	0,07	0,25	0,52	0,71	1,10	1,71
8	0,07	0,31	0,59	0,79	1,20	1,70
9	0,08	0,33	0,67	0,89	1,30	1,69
10	0,10	0,38	0,77	0,99	1,39	1,71
11	0,10	0,42	0,81	1,10	1,41	1,71
12	0,12	0,45	0,79	1,09	1,39	1,69
13	0,12	0,42	0,81	1,14	1,39	1,69
14	0,11	0,41	0,79	1,14	1,41	1,69
15	0,11	0,41	0,81	1,14	1,39	1,69
16	0,11	0,43	0,80	1,12	1,41	1,69
17	0,11	0,43	0,81	1,14	1,40	1,71
18	0,12	0,41	0,80	1,12	1,41	1,70
19	0,13	0,41	0,81	1,14	1,40	1,71
20	0,11	0,43	0,80	1,13	1,39	1,70
21	0,13	0,41	0,80	1,12	1,40	1,71
22	0,13	0,42	0,80	1,13	1,41	1,69
23	0,12	0,42	0,81	1,13	1,40	1,71
24	0,13	0,43	0,79	1,14	1,40	1,69
25	0,12	0,41	0,79	1,12	1,39	1,71
26	0,12	0,41	0,79	1,14	1,40	1,70
27	0,11	0,41	0,80	1,14	1,39	1,69
28	0,13	0,41	0,79	1,12	1,41	1,69
29	0,12	0,41	0,80	1,12	1,41	1,69
30	0,12	0,42	0,79	1,12	1,41	1,71
31	0,12	0,43	0,80	1,14	1,41	1,70
32	0,13	0,42	0,81	1,13	1,40	1,71

33	0,12	0,41	0,81	1,12	1,41	1,69
34	0,11	0,42	0,80	1,12	1,40	1,71
35	0,13	0,43	0,80	1,14	1,40	1,71
36	0,11	0,42	0,81	1,12	1,40	1,71
37	0,13	0,41	0,81	1,14	1,41	1,71
38	0,13	0,43	0,79	1,13	1,41	1,71
39	0,13	0,43	0,80	1,13	1,41	1,76
40	0,14	0,42	0,79	1,14	1,40	1,78
41	0,13	0,41	0,79	1,12	1,41	1,83
42	0,12	0,41	0,79	1,14	1,39	1,81
43	0,13	0,41	0,81	1,14	1,41	1,83
44	0,13	0,41	0,80	1,13	1,40	1,82
45	0,12	0,41	0,79	1,14	1,40	1,81
46	0,15	0,42	0,79	1,14	1,39	1,83
47	0,14	0,42	0,79	1,14	1,40	1,82
48	0,14	0,41	0,79	1,14	1,39	1,81
49	0,15	0,41	0,81	1,14	1,40	1,83
50	0,14	0,42	0,79	1,13	1,41	1,82
51	0,13	0,41	0,81	1,12	1,41	1,83
52	0,13	0,43	0,81	1,14	1,41	1,82
53	0,325	1,075	1,62	2,394	2,82	2,73

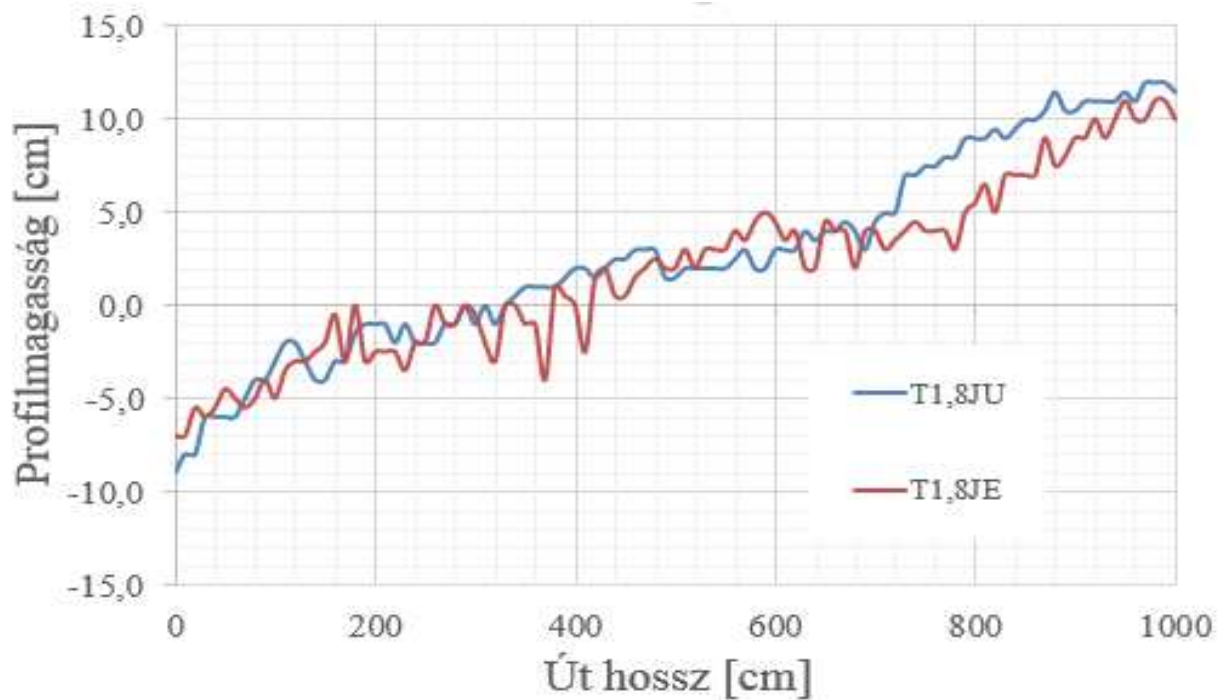
Kúp típus: 2 cm ² , 60°; 12% nedvességtartalom				
Mélység	$\rho_3 = 1,1 \text{ g/cm}^3$	$\rho_4 = 1,25 \text{ g/cm}^3$	$\rho_5 = 1,45 \text{ g/cm}^3$	$\rho_6 = 1,65 \text{ g/cm}^3$
1	0,03	0,03	0,03	0,02
2	0,02	0,10	0,18	0,33
3	0,02	0,16	0,43	0,66
4	0,09	0,29	0,64	1,02
5	0,14	0,42	0,82	1,02
6	0,31	0,52	0,83	1,03
7	0,43	0,53	0,83	1,02
8	0,41	0,53	0,82	1,02
9	0,43	0,53	0,83	1,01
10	0,41	0,52	0,83	1,01
11	0,41	0,54	0,82	1,01
12	0,41	0,54	0,83	1,02
13	0,42	0,53	0,82	1,02
14	0,42	0,52	0,83	1,01

15	0,42	0,52	0,82	1,02
16	0,42	0,53	0,83	1,01
17	0,41	0,54	0,82	1,03
18	0,42	0,54	0,83	1,03
19	0,43	0,52	0,83	1,01
20	0,43	0,52	0,81	1,01
21	0,43	0,52	0,83	1,01
22	0,41	0,53	0,82	1,02
23	0,42	-	-	-

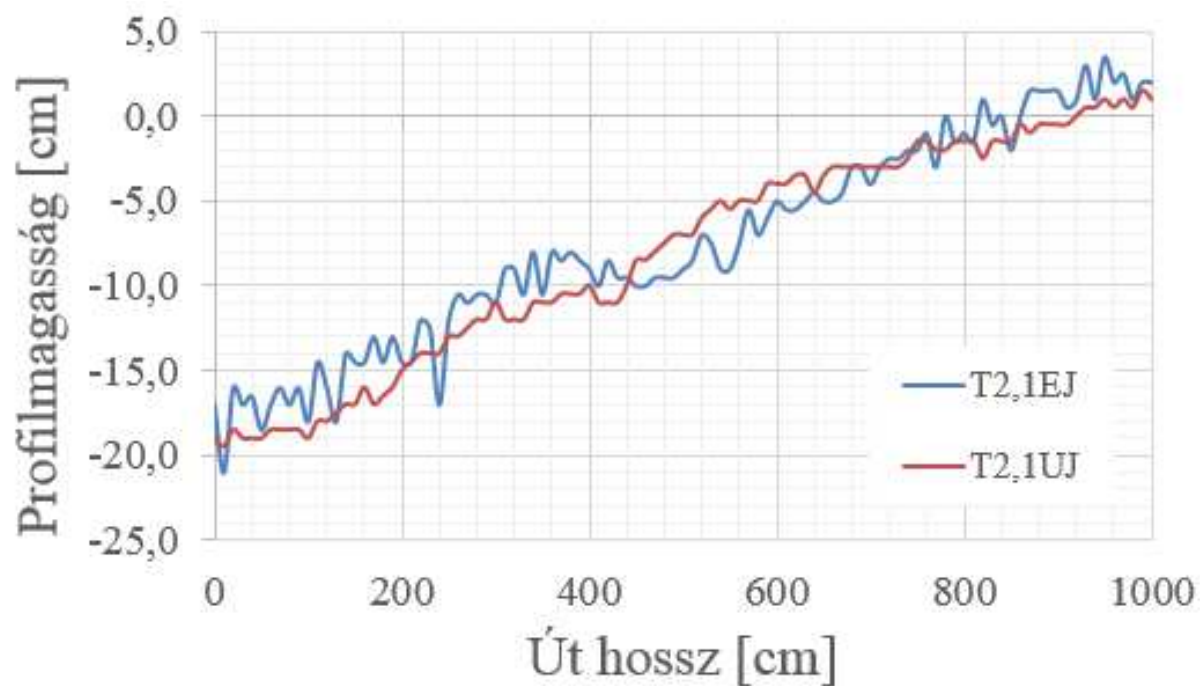
Kúp típus: 2 cm², 60°; 15% nedvességtartalom			
Mélység	$\rho_4 = 1,25 \text{ g/cm}^3$	$\rho_5 = 1,45 \text{ g/cm}^3$	$\rho_6 = 1,65 \text{ g/cm}^3$
1	0,03	0,01	0,02
2	0,10	0,16	0,23
3	0,22	0,39	0,52
4	0,32	0,47	0,52
5	0,36	0,47	0,52
6	0,36	0,48	0,51
7	0,36	0,47	0,51
8	0,36	0,48	0,52
9	0,36	0,48	0,52
10	0,36	0,48	0,52
11	0,35	0,47	0,51
12	0,35	0,47	0,51
13	0,35	0,47	0,51
14	0,35	0,48	0,52
15	0,35	0,48	0,52
16	0,35	0,48	0,52
17	0,35	0,47	0,52
18	0,35	0,47	0,52
19	0,35	0,47	0,52
20	0,35	0,47	0,51
21	0,36	0,47	0,52
22	0,35	0,47	0,52
23	-	-	-

M7. Szabadföldi profilmérési eredmények

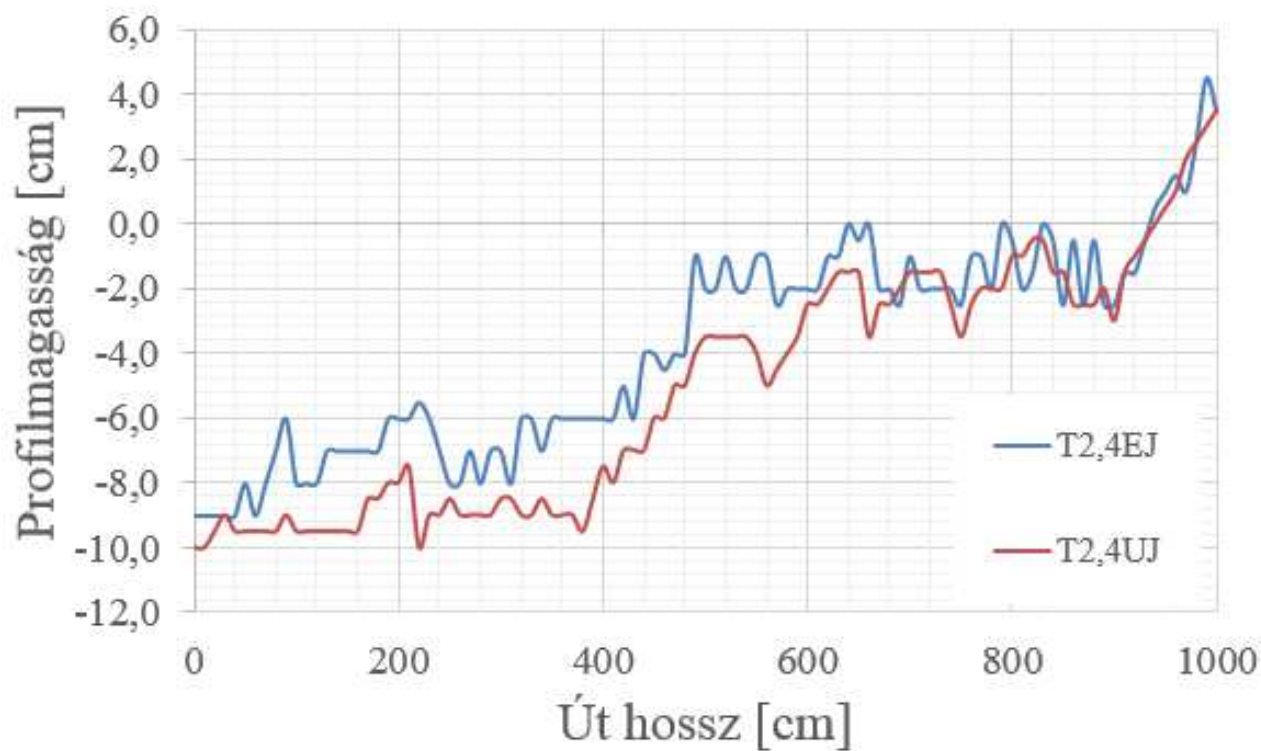
8.1. ábra. 1,5 bar, gabona tarló



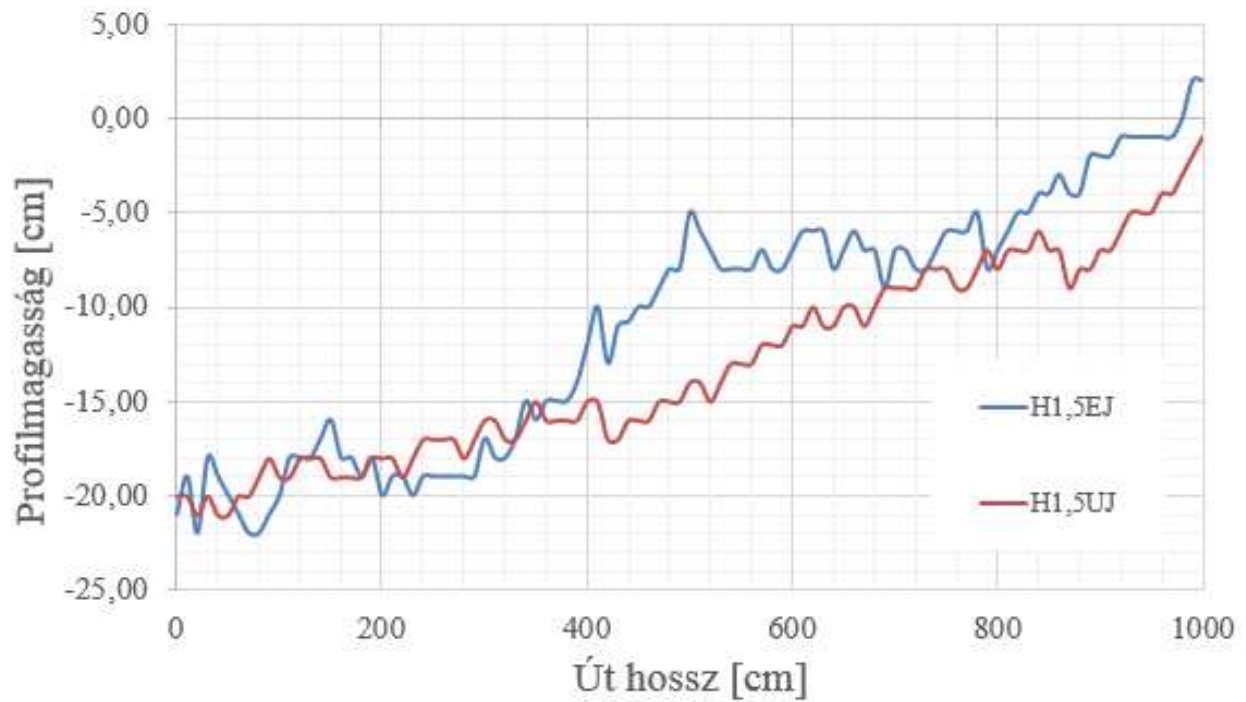
8.2. ábra. 1,8 bar, gabona tarló



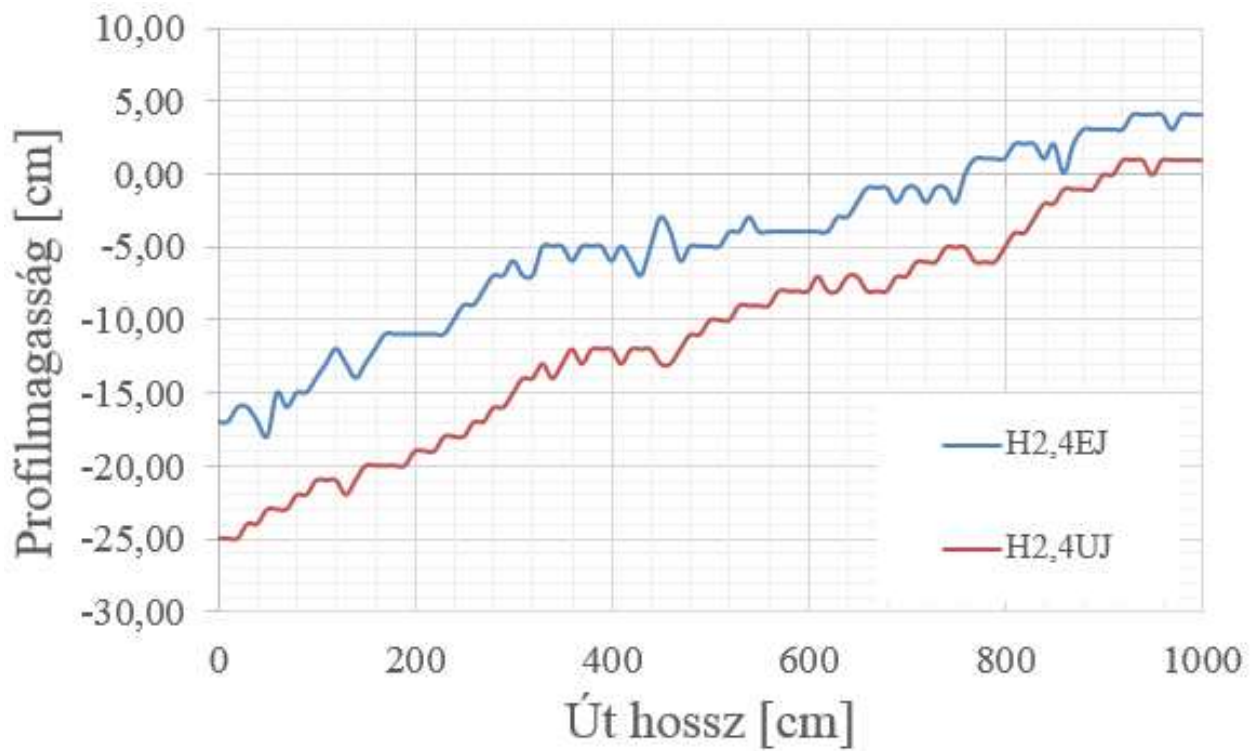
8.3. ábra. 2,1 bar, gabona tarló



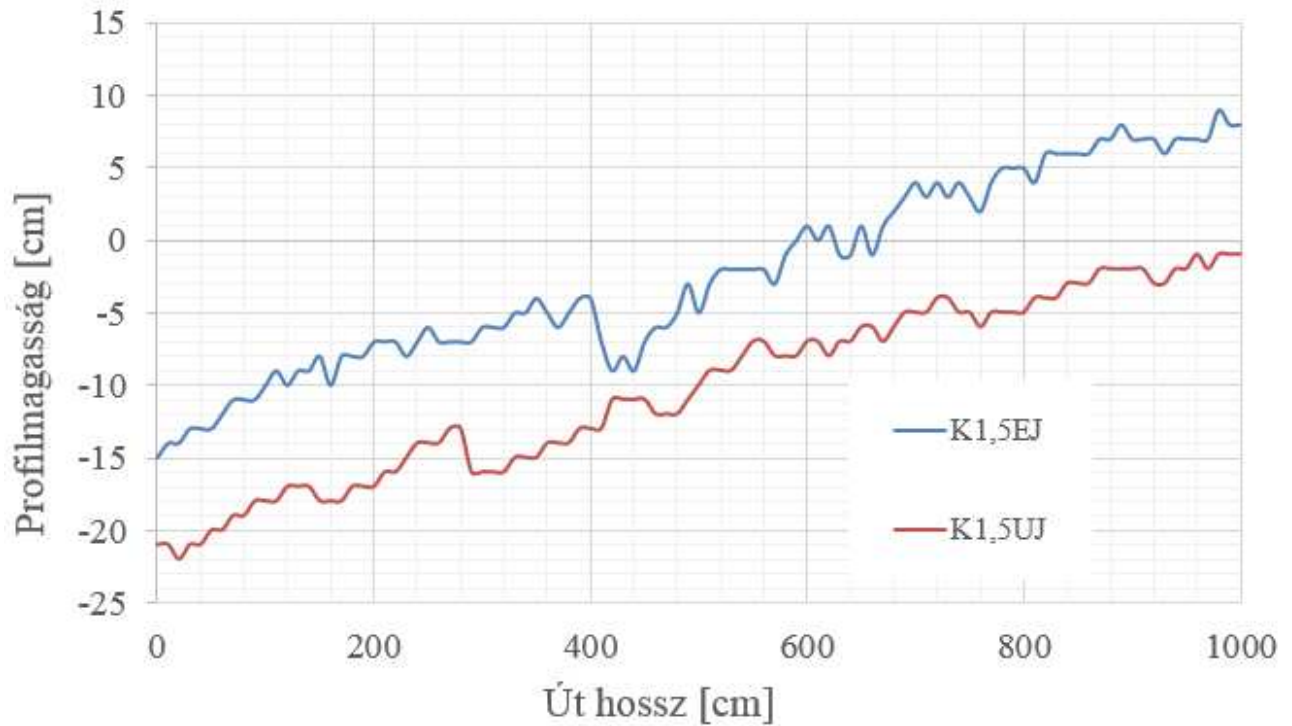
8.4. ábra. 2,4 bar, gabona tarló



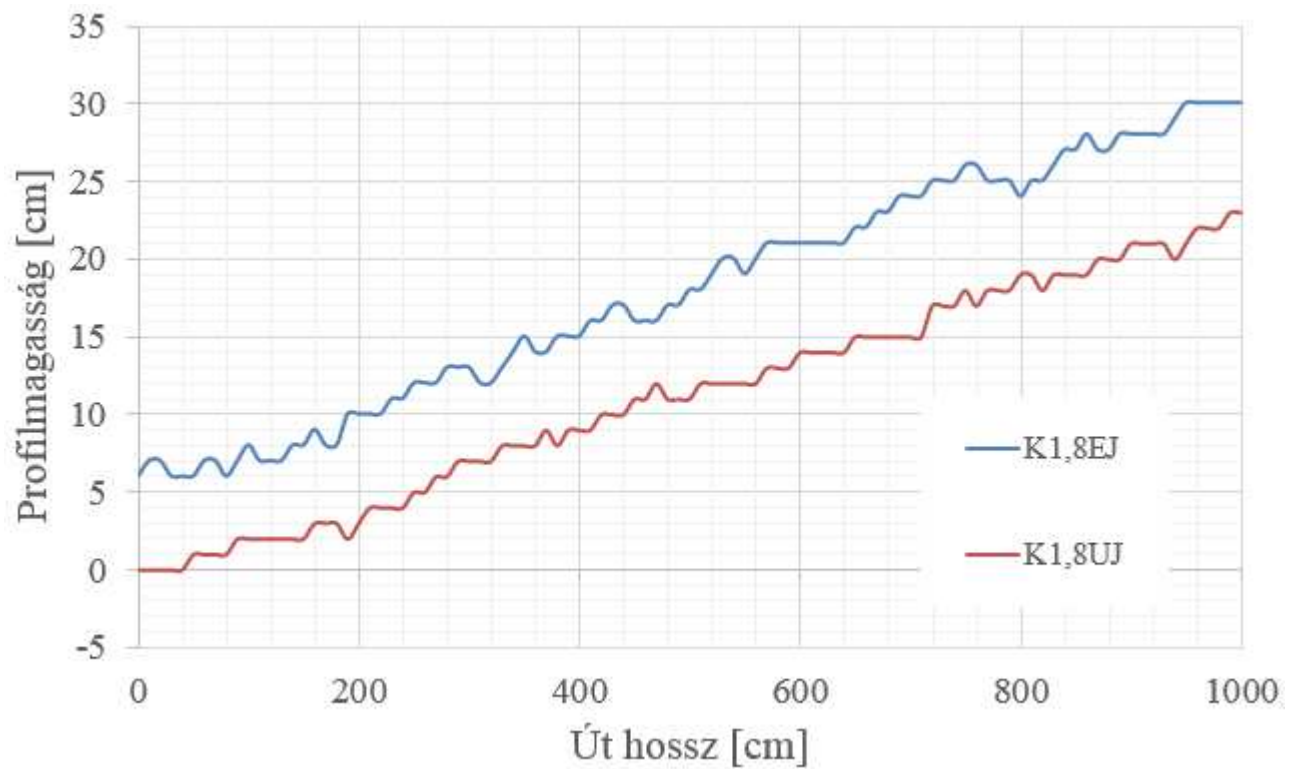
8.5. ábra. 1,5 bar, tárcsázott gabona tarló



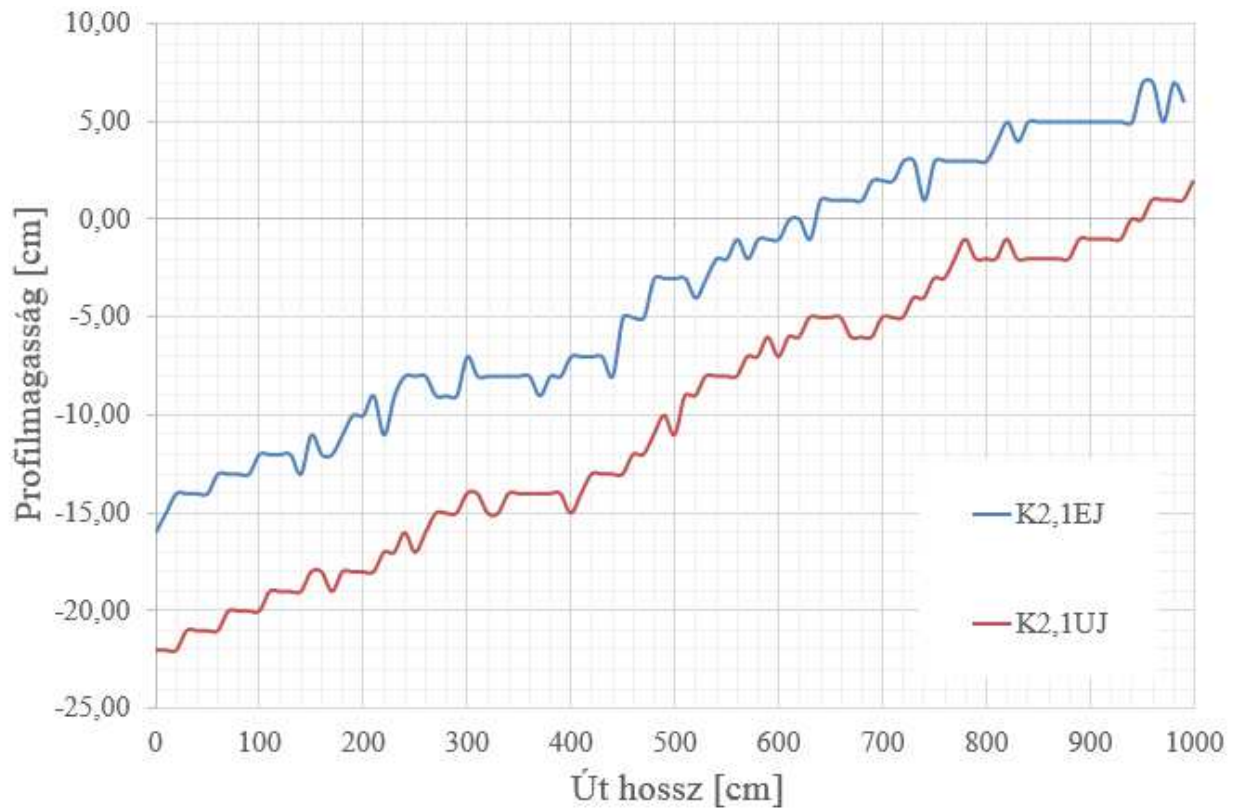
8.6. ábra. 2,4 bar, tárcsázott gabona tarló



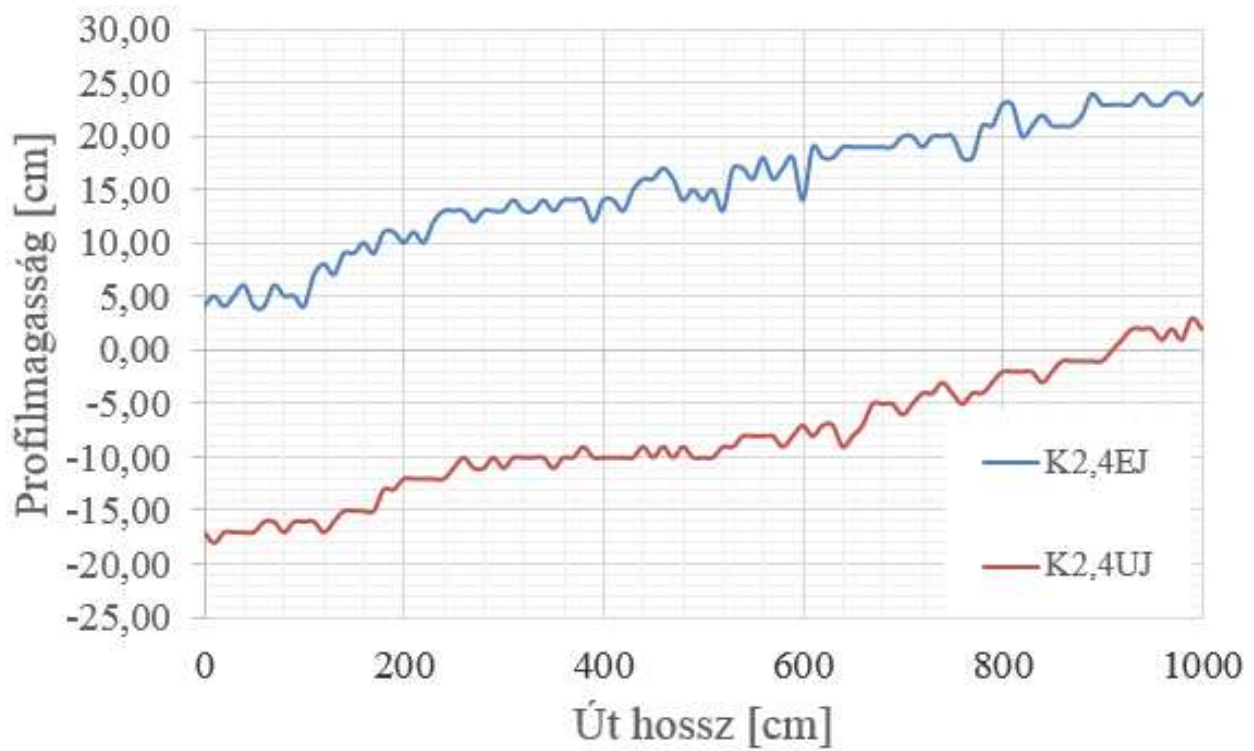
8.7. ábra. 1,5 bar, kultivátorozott talaj



8.8. ábra. 1,8 bar, kultivátorozott talaj



8.9. ábra. 2,1 bar, kulivátorozott talaj



8.10. ábra. 2,4 bar, kulivátorozott talaj

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom konzulensemnek Prof. Dr. Kiss Péter professzor úrnak, aki hasznos tanácsaival és útmutatásaival irányította munkámat. Köszönöm a segítséget Prof Dr. Laib Lajos és Dr. Varga Vilmos tanáruraknak, akik számos alkalommal láttak el új ötletekkel, illetve motiváló tanácsaikkal. Köszönöm a mérések kivitelezése során adott közreműködését a SZIE Járműtechnika Tanszék munkatársainak, kiemelten Peev Ilia-nak és Török Tamás-nak, akik többek között a mérőrendszer mechanikai egységeinek legyártását valósították meg. Különösképpen szeretném megköszönni Dr. Petróczki Károly és Dr. Korzenszky Péter kollégáim által nyújtott segítséget, akik a mérőrendszer kiépítésében támogatták munkámat. Köszönetet mondok a VM Mezőgazdasági Gépesítési Intézetnek a méréseimhez használt eszközök rendelkezésemre bocsátásáért.

Gödöllő, 2016. február

Pillinger György