

A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők **II. rész**

A talaj mechanikai tulajdonsága és vizsgálata

A terepen mozgó járművek jellemzően kerek futóművel, lánctalpas járszerkezettel vagy ezek kombinációjával rendelkeznek. A terepi járműmozgást számos tényező befolyásolja, amelyeket 3 csoportba foglalhatunk össze. (1) járműparaméterek, (2) terep- és talajparaméterek, valamint a jármű mozgását befolyásoló (3) emberi tényezők. A cikksorozat második része bemutatja a talaj mechanikai tulajdonságait és vizsgálatát.

A JÁRMŰVEK MOZGÁSA SORÁN KIALAKULÓ TALAJ-IGÉNYBEVÉTELEK

A terepjáró járművek mozgásuk közben kétfajta igénybevételt okoznak a talajnak:

- *nyírási jellegű igénybevétel:* a hajtott kerek kerületi ereje okozta terhelés, amely a vonóerő kifejtéséhez szükséges (kerékcsúszás);
- *normál jellegű igénybevétel:* a jármű súlyerejéből létrejövő terhelés (talajbenyomódás).

Ebből a felismerésből adódóan a terepjáráselemeléssel kapcsolatos talajmechanika kétféle paramétert vizsgál. A normál jellegű igénybevételhez kapcsolódóan a talaj teherbíró képességét, a nyírási igénybevételhez tartozóan pedig a talaj nyírószilárdságát.

A TALAJ NYÍRÓSZILÁRDSÁGÁT BEFOLYÁSOLÓ FONTOSABB TULAJDONSÁGOK

A talaj nyírószilárdsága alatt a talaj által, az abban működő nyírófeszültségekkel szemben kifejtett ellenállás legnagyobb értékét értjük. Kritikus állapotnak azt a feszültségállapotot nevezzük, amikor a talaj folyamatos nyírási alakváltozást szenved. A terepen mozgó járművek haladása jellemzően a kritikus állapotban történik (deformálódó kerék, deformálódó pálya modell). A talajok két nagy csoportba sorolhatók az alapján, hogy nyírófeszültség hatására hogyan viselkednek. Megkülönböztethetünk kohézióval rendelkező és kohézióval nem rendelkező talajokat. A maximális nyírószilárdság értékét leginkább a nedvességtartalom és a talaj textúrája befolyásolja, de a legtöbb talajfizikai jellemző hatással van rá.

A KERÉKABRONCSOK TALAJTÖMÖRÍTŐ HATÁSA

Az abroncsok talpfelületén keletkező nyomások által keltett talajnyomás fő következménye a talaj (döntő mértékben) függőleges deformálása, tömörödése.

A talajnak, mint háromfázisú (szilárd – folyékony – légnemű) rendszernek tömörödése lényegében abból áll, hogy a légnemű fázis bizonyos része kiszorul a talajszemcsék közötti pórusokból azok összenyomódása következtében. A talaj tömörségét a talaj sűrűségével (térfogattömegével), vagy pórusvolumenének százalékos értékével szokás jellemezni.

Az abroncsok által okozott talajtömörítő hatás nagysága több tényező függvénye. Először is függ a tömörítendő talaj eredeti sűrűségétől, illetve fellazultsági fokától, vagy pórusvolumenétől. Minél lazább egy talaj, annál nagyobb tömörítést okoz ugyanakkora talpnyomás.

A talaj tömörítési érzékenysége ezenkívül függ a talaj szerkezeti összetételétől is. Általában minél nagyobb a talaj agyagtartalma, annál érzékenyebben reagál a talajnyomásra. A nedvességtartalom növekedésével szintén növekszik a talaj nyomásérzékenysége. A talajok nyomás alatti tömörödésének további érdekes jellemzője, hogy a tömörítés nagysága (és ezzel együtt a tömörítő hatás mélysége is) függ a terhelés időtartamától, (tehát a haladási sebességtől), valamint az ismétlődő terhelések összeadódhatnak.

Az ugyanazon nyomban történő ismételt haladás egyre nagyobb tömörítést eredményez, s a tömörített zóna egyre mélyebb talajrétegekbe hatol. Tulajdonképpen a kerékabroncsok által keltett, az évek során, többszörösen ismétlődő talajnyomások okozták és okozzák még ma is, a megművelt talajréteg alsó határa alatt keletkezett 10-15 cm vastagságú s az átlagosnál lényegesen tömörödöttebb talajréteget, amelyet a szakzsargon keréktalp-kéregnek nevez, hasonlóan a mindig azonos mélységű szántásnál kialakuló „eketalp-betegséghez”. Ugyancsak jelentős hatása van a talaj tömörítésére a kerékabroncs által kifejtett kerületi erőnek is. A keréktalp érintkező felületén és a bordákon fellépő kerületi erő egyrészt fokozza a talaj nyomásigénybevételét, másrészt a közben fellépő abroncs- és talajréteg-csúszás fokozza a felső talajréteg tömörítését, és ezzel együtt a réteg szerkezetének rombolását.

A TALAJ TEHERBÍRÓ KÉPESSÉGE

A talaj egyik legfontosabb mechanikai jellemzője a függőleges teherbíró képesség, amely az ellenállás változását írja le a függőleges deformáció függvényében. A gumiabroncs-talaj kapcsolat kölcsönös befolyást jelent, a gumiabroncs hatást gyakorol a talajra, és viszont: a hatás-ellenhatás klasszikus szabályával állunk szemben. A függőleges terhelés deformálja a talajt, miközben a gumiabroncs

* Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, Járműtechnika Tanszék. Egyetemi tanár, tanszékvezető. ORCID: 0000-0002-5265-8133

** Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, MSc hallgató. ORCID: 0000-0002-7003-1289

*** Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, MSc hallgató. ORCID: 0000-0003-4897-9601

is benyomódik. A kutatók – a mezőgazdasági termelésre káros talajtaposás, valamint a terepjárás szempontjából fontos talaj-hordképesség miatt – elsősorban a talajra ható nyomás-besüllyedés kapcsolatára és a talajban létrejövő feszültségeloszlásra koncentráltak. A talajnyomás problematikáját többen, többféleképpen közelítették meg.

A talajnyomást a kerék és a talaj közötti kapcsolódási terület normál feszültségeinek eloszlása határozza meg, és ezek a feszültségek okozzák a talaj tömörödését. A talajtömörödés a terepen történő mozgás mellékhatása, a besüllyedés és a mozgási ellenállás kiszámításánál érdekes, de a környezetvédelmi szempontok sem mellékesek.

A kerekek gördülési ellenállásával kapcsolatos kutatások a XVIII. században Coulomb, majd a XIX. században Morin [14] nevéhez kötődnek. Az 1900-as évek elején Gerstner, majd Bernstein [6] a talaj teherviselési és a kerekek gördülési ellenállásának kapcsolatát vizsgálta és képlettel megadta a talajnyomás és besüllyedés alapegyenletét. Gerstner linearitást tételezett fel a talajbenyomódáskor keletkező feszültség és a benyomódás között, Bernstein [6] elsőként exponenciális összefüggést feltételezett, majd a nehézkes alkalmazás miatt gyökös összefüggést javasolt. Ezt a formulát Gorjacskin [9] fejlesztette tovább. Szaakjan, [22] figyelembe véve a nyomófej átmérőjét, módosította az összefüggést.

Az 1950-es években Bekker [5] az USA-ban megalapította a Land Locomotion Laboratóriumot, ahol rendszerezett kutatómunka kezdődött a kerék-talaj kapcsolatában kialakuló mechanikai folyamatok tisztázása érdekében. Bekker [5] az építészetben – kis besüllyedések és nagy nyomószélesség esetére, a klasszikus talajmechanika által – alkalmazott Taylor-féle [23] tapasztalati képletet összekapcsolta a Bernstein-Gorjacskin [9] összefüggéssel. Később Wills [26] és Reece [19] ajánlott egy jobban használható összefüggést a nyomás-besüllyedés kapcsolatára nyomólapos vizsgálatok eredményeként. Az említettekén kívül több kutató is foglalkozott a talajnyomás és a besüllyedés kapcsolatával, Kacigin [12] tangens-hiperbolikus függvénnyel közelítette a talajnyomást, Hegedűs [10] a dimenzióanalízis módszerét választotta. Rendszerezve a fentebb említett képleteket:

GERSTNER-képlet:

$$p = k \cdot z \quad (1)$$

BERNSTEIN-képlet:

$$p = k \cdot (1 - e^{-n \cdot z}) \quad (2)$$

$$p = k \cdot \sqrt{z} \quad (3)$$

GORJACSKIN-képlet:

$$p = k \cdot z^n \quad (4)$$

SZAAKJAN-képlet:

$$p = k \cdot \left(\frac{z}{D}\right)^n \quad (5)$$

BEKKER-képlet:

$$p = \left[\frac{k_c}{b} + k_\varphi\right] \cdot z^n \quad (6)$$

WILLS- (Reece) képlet:

$$p = \left[c \cdot k_c^* + \rho \cdot g \cdot \frac{b}{2} \cdot k_\varphi^*\right] \cdot \left(\frac{z}{b}\right)^n \quad (7)$$

KACIGIN-képlet:

$$p = p_0 \cdot \tanh \frac{k}{\rho_0} \cdot z \quad (8)$$

ahol: p – a talajnyomás [Pa],

p_0 – a talaj teherbíró képességének határértéke [Pa],
 z – a talajbesüllyedés mélysége [m],
 k – a talaj alakváltozási tényezője [N/m³],
 k_c – a talajtömörítés kohéziós tényezője [N/mⁿ⁺¹],
 k_φ – a talajtömörödés súrlódási tényezője [N/mⁿ⁺²],
 b – a felfekvő felület szélessége [m],
 n – a talajtól függő konstans,
 c – a kohézió [Pa],
 ρ – a talaj sűrűsége [kg/m³],
 k_c^* és k_φ^* – a talajtömörödésre jellemző dimenzió nélküli számok.

A Bernstein-, Gorjacskin- és Kacigin-képletekben k , z és n a felülettől és a talajtól függő, dimenzió nélküli konstansok, a Szaakjan-képletben k dimenziója [N/m²].

Mind a k_c és k_φ értéke nyomókísérletekkel határozható meg, ahol a kísérleteket különböző szélességű próbatesttel kell elvégezni. A különböző alakú (kör, négyszög) nyomófejekkel végzett nyomókísérletek eredménye igazolta, hogy a nyomófej alakja is észrevehetően befolyásolja a besüllyedést. Az összefüggések közül a Szaakjan- [22] formula a legáltalánosabb érvényű, ezért a továbbiakban elsősorban ez a képletet alkalmazzuk a talajnyomás-besüllyedés kapcsolatának vizsgálatokor.

A talajnyomás általánosítására kidolgozott képletek lehetővé tették a menetellenállás pontosabb meghatározását. A kerék felfekvő felületére ható Q terhelés – egyenletes nyomáseloszlást feltételezve – megadható mint a felület és talajnyomás szorzata. Tehát:

$$Q = A \cdot p \quad (9)$$

ahol: Q – a kerék felfekvő felületére ható erő [N],

A – a kerék felfekvő felülete [m²].

Helyettesítve a Bekker-féle talajnyomás értéket [1]:

$$Q = A \cdot \left[\frac{k_c}{b} + k_\varphi\right] \cdot z^n \quad (10)$$

képletet kapjuk.

A talaj tömörítéséhez szükséges munka meghatározható a tömörítő erő és az erő irányába eső deformáció szorzataként. A felületegységre vonatkoztatott tömörítési munka tehát:

$$W = \int_0^{z_0} p \cdot dz \quad (11)$$

Feltételezve, hogy a talaj a kerék gördülésekor csak függőlegesen lefelé nyomódik, A felfekvési felület és z_0 maximális besüllyedés mellett a talajdeformáció legyőzéséhez szükséges munka:

$$W = A \cdot \int_0^{z_0} p \cdot dz = A \cdot \int_0^{z_0} \left[\frac{k_c}{b} + k_\varphi\right] \cdot z_0^n \cdot dz \quad (12)$$

A fenti összefüggést Bekker vezette le először lánctalpas járószerkezetekre [5]. Az egyenlet csak kismértékű szlipnél érvényes, mivel akkor még nem ismerték a csúszás-besüllyedés függvénykapcsolatát. A szlip-gördülési ellenállást befolyásoló hatását később Onafeko [17] és Kim [25] vizsgálta.

A terepjárás, a mezőgépesítés és az építészet számára a talaj is szerkezeti anyag – mint pl. a fémek az anyagtechnológia számára –, de ugyanakkor a talaj tulajdonságai, jellemző mechanikai sajátosságai kevésbé ismertek. A mezőgazdaság – érthetően – elsőként a talajtani paramétereket alakította ki, a műszaki feladatok megoldásához azonban nélkülözhetetlenek a talajmechanikai paraméterek ismerete is.

A talaj kiterjedését jelenteve végtelen féltérnek tekinthető. A rugalmas féltér terhelési viszonyait jórészt a múlt század



végén kidolgozták és a megoldások sok esetben a talajra is érvényesek.

TALAJMECHANIKAI PARAMÉTEREK VIZSGÁLATA

A talajjellemzőket vizsgálatokkal határozzák meg. Az építészetben alkalmazott módszereket vette át a terepjárás-elmélet is. A terepen mozgó járművek által keltett – a talajban ébredő – terhelések azonban eltérőek az építészeti létesítmények által létrehozott terhelésektől. A terepjárásnál a terhelés eléri és túllépi a törési határokat és a bekövetkező alakváltozás nagymértékű és gyors lefolyású. Ebből adódóan a terepjárás területén lezajló folyamatokat a „kritikus állapotú talajmechanika körébe” tartozónak tekintjük. A talajmechanikai paraméterrendszeren belül a talaj hordképességének vizsgálata a gumiabroncs-talaj kapcsolat egyik lényeges eleme. A hordképesség meghatározására a terepjáráselméletben különböző technikai eljárások terjedtek el, amelyek alapján 2 fő csoportot alkothatunk:

1. a nyomólapos (Bevameter) mérések, és
2. a kúpos penetrométer alkalmazása.

NYOMÓLAPOS (BEVAMETER) MÉRÉSEK

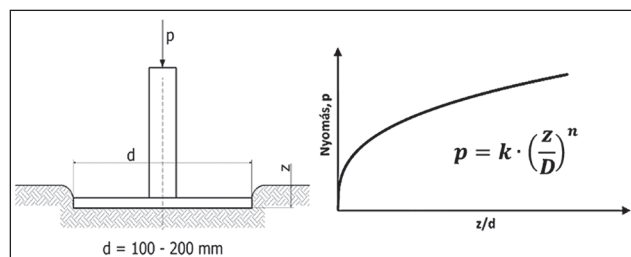
Ennek a mérés technikának az úttörője Bekker [5]. A mérés azon alapszik, hogy a talajparamétereket legjobb terhelés alatt meghatározni ahhoz hasonlóan, mint ahogy a gumiabroncs terheli a talajt. A vizsgálat során egy meghatározott átmérőjű tárcsát nyomnak a talajba, és rögzítik a nyomás-besüllyedés kapcsolatát. A nyomófej alatti talajdeformáció jelentős részét, a homoktalajok kivételével, a tömörítés teszi ki. Tömörítéskor a talaj térfogata, s ezzel pórushányada is csökken. A teherbírás elsősorban a talaj típusától, nedvességtartalmától és a talaj térfogatsúlyától (lazításától) függ. A talaj tömörítése a terhelés sebességétől is függ, minél lassabb az összenyomás, annál nagyobb mérvű a tömörítés. Ez a jelenség a talajok viszko-elasztikus tulajdonságaival magyarázható. A nyomófej alkalmazása megfelelően pontos eredményeket szolgáltat, hátránya azonban a nagy erőszükséglet. Ezért jobbára csak járműre szerelve alkalmazható, kézi műszerként nem.

A bevaméteres méréskor 100–200 mm átmérőjű nyomófejet nyomnak a talajba (8. ábra). A talajnyomást a Szaakjan [22] összefüggés alapján dolgozzák fel.

$$p = k \cdot \left(\frac{z}{D}\right)^n \quad (13)$$

ahol: p – a talajnyomás [Pa],
 z – a talajbesüllyedés mélysége [m],
 k – a talaj alakváltozási tényezője [N/m²],
 D – a nyomófej átmérője [m],
 n – a talajtól függő konstans.

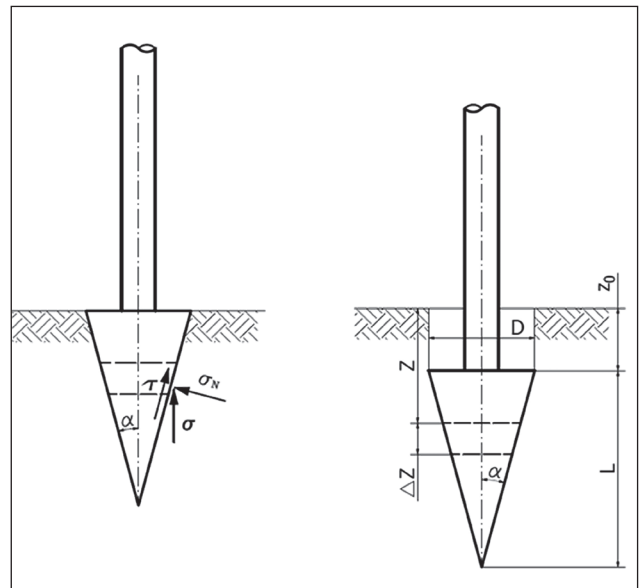
8. ábra. Bevaméteres mérés, és a talajnyomás-besüllyedés diagram (A szerzők szerkesztése)



A talaj pórushányada, illetve térfogatsúlya döntően befolyásolja a teherbíró képességet. A frissen lazított talaj teherbírása kicsi, ezért nagy függőleges deformációk jönnek létre. A nagy méretű nyomófejekkel megbízható teherbírási adatok nyerhetők, hátrányuk azonban a nagy nyomóerőszükséglet, amelyet gépi erővel érnek el. A gyors és egyszerű mérés technika iránti igény alakította ki a kúpos penetrométeres méréseket.

KÚPOS PENETROMÉTER ALKALMAZÁSA

A kúpos penetrométer kis keresztmetszetével kézzel is talajba nyomható. A gyakorlatban a sokkal egyszerűbben kezelhető kúpos penetrométer (9. ábra) használata terjedt el. A kúp nyílásszöge jellemzően 30°, keresztmetszete 1-2 cm².

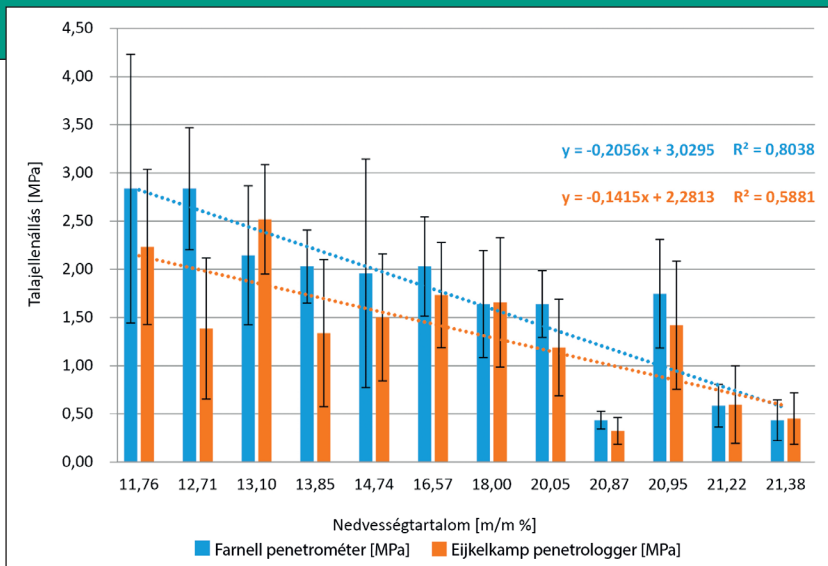


9. ábra. Kúpos penetrométer, és az eszközre ható erők (A szerzők szerkesztése)

A kis felületen történő mérés azonban óhatatlanul sokkal érzékenyebb a talajban lévő inhomogenitásokra, és ezt a hibát a mérések számának növelésével kompenzálják. Az Egyesült Államokban Nuthall [16] a talajok teherbíró képességét kúpos penetrométerrel határozta meg. Az általa kidolgozott módszer segítségével sikerült a mért és számítással módosított járműmozgékonyással kapcsolatos talajadatokat a CI (Cone Index – kúposindex) értékekkel összehangolni. Freitag [8] a gyakorlat számára is jól alkalmazható egyenletei és a mérőberendezés könnyű kezelhetősége miatt ez az eljárás szántóföldi méréseknél is széles körben elterjedt. A kúposindex-méréssel, a számítások pontosításával Rohani és Balladi [20] Jánosi [11], Wismer [27] és Turnage [24] is foglalkozott. Reece és Peca [18] a kúposindex értéket használta fel átglyúrt, súrlódás nélküli agyagtalajok nyírófeszültségének meghatározására.

Hazánkban Komádi [13] és Sitkei [21] foglalták össze a gyakorlat számára is használható egyenletekké a kúposindex-mérések különböző eljárásait és a talajvizsgálatok elméletét.

A penetrométer kúpja által létrehozott talajdeformáció összetett, amelyen súrlódási erők is fellépnek. A súrlódási tényező nedvességtartalom-függő, ezért a nyomóerő és a keresztmetszet hányadosa (CI) mint kúpos index nem jellemzi a teherbírást egyértelműen. A kúpos index a behato-



10. ábra. Az átlagos talajnedvességtartalom-értékek a mérési pontokon, és a környezetükben mért talajellenállásértékek átlagának kapcsolata a két eszköz esetében (A szerzők szerkesztése a [7] alapján)

láshoz szükséges erő és a penetrométer-fej keresztmetszetének viszonya, amely a *k* teherbírási tényezővel meghatározott viszonyban áll. A behatoláshoz szükséges erő a talajdeformáció és a súrlódási erők függőleges komponenseiből adódik.

A penetrométeres mérések szakirodalmában talált eredmények alapján kimutatható, hogy a talajnedvesség és a talajellenállás között negatív korreláció figyelhető meg. Ez esetben a talaj nedvességtartalmának növekedésével a talaj mechanikai ellenállása csökken. [15] Ezt szemlélteti a 10. ábra. Az így módon felvázolható trendtől jelentős eltérések is tapasztalhatók, amelyeket a talaj szerkezetének inhomogenitása is okozhat. A diagramon feltüntetett eredmények kétféle penetrométer alkalmazásával kerültek meghatározásra. Mindkét készülékkel történt vizsgálat során kimutatható volt, hogy a talaj nedvességtartalmának növekedésével a talaj teherbíró képessége csökken. Az egyik készülék egy Farnell A2451 katonai felhasználásra tervezett penetrométer, amely analóg kijelzésű és rugós erőmérő egységgel ellátott. A másik egy Eijkelkamp penetrolgger, amely digitális kijelzésű, erőmérő cellával rendelkező mérőeszköz. A műszer mélység szerinti felbontása 1 cm, erő szerinti felbontása 1 N, mérőrudjának hosszúsága pedig 81 cm. A két mérőeszközzel kapott eredmények közötti szórást a talaj inhomogenitása okozza.

(Folytatjuk)

HIVATKOZOTT IRODALOM

[5] Bekker, Mieczysław G. *Theory of land locomotion - The mechanics of vehicle mobility*. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1956.;
 [6] Bernstein R. „Probleme zur experimentiellen Motorflugmechanik,” *Der Motorwagen*, 1913;
 [7] Böröczky A., Kiss B., Kiss P., és Deákvári J. „A talajok mechanikai ellenállásának és nedvességtartalmának vizsgálata,” *Mezőgazdasági Technika*, (2021 április): 2–4.;
 [8] Freitag D. R. *A dimensional analysis of the performance of pneumatic tyres of soft soils* Vicksburg: US-Army Engineer Waterways Experiment Station, 1965;
 [9] Gorjacskij, *Teurija i proizvodstvo szelszkohozajszvennih mashin*, Moszkva: 1936;
 [10] Hegedűs E. „Plate sinkage study by means of dimensional analysis,” *Journal of Terramechanics* 2, 1965;

[11] Jánosi Z., Hanamoto B. „The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles is deformable soil.” *Mechanics of Soil-Vehicle System*, Torino-Saint Vincent: 1961;
 [12] Kacigin V. *Voproszi szelszkohozajsztvennoj mehaniki*, (1964);
 [13] Komádi Gy. „An evaluation of the concept of rolling resistance.” *Journal of Terramechanics* 36, (1999): 159–166.;
 [14] Morin, M. A. *Memoir sur le tirage des voitures le Paris: Comptes rendus de l’Academia des Sciences*, 1840.;
 [15] Naderi-Boldaji, M. et al., „Improvement and field testing of a combined horizontal penetrometer for on-the-go

measurement of soil water content and mechanical resistance.” *Soil and Tillage Research* Vol. 123 (2012): 1–10.;

[16] Nuthall, C. J., Rula, A. A. *An analysis of ground mobility models.*, Technical Report M-71-4. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station.;
 [17] Onafeko, O. 1969. „Analysis of the rolling resistance losses operating on deformable terrain.” *Journal of Agriculture Engineering*. (1969): 176–182.;
 [18] Reece, A. R., Peca, J. O. „An assesment of the value of the cone penetrometer in mobility prediction.” *7th Int. Conf. ISTVS*. Calgary: 1981.;
 [19] Reece, R. „Theory and practice of off-the-road locomotion.” *The Annual Conference*, London: 1964.;
 [20] Rohani, B., Balladi G. Y. „Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil.” *7th Int. Conf. ISTVS*. Calgary: 1981.;
 [21] Sitkei, Gy. *A mezőgazdasági gépek talajmechanikai problémái*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1967.;
 [22] Szaakjan, Sz. *O zakonomernosztiji szoprotivljenija pocsvi bdavlibaniju* 3. *Szbornyik trudov po zeml.* 1965.;
 [23] Taylor, D. E. *Fundamentals of soil mechanics*. New York: John Wiley and Sone. 1948.;
 [24] Turnage, G. W. „Prediction of in-sand tyre and wheeled vehicle drawbar performance.” *7th Int. Conf. ISTVS*. Cambridge: 1984.;
 [25] Kim, U. K., Shin, B. S. „Modelling motion resistance of rigid wheels.” *Journal of Terramechanics* 22, no. 4 (1985): 225–236.;
 [26] Wills, B. M. D. „The load sinkage equation in theory and practice.” *2nd Int. Conf. ISTVS*. Quebec: 1966.;
 [27] Wismer, R. D., Luth, H. J. „Off-road traction for wheeled vehicles.” *Journal of Terramechanics* 10, (1973).

JEGYZETEK

1 A terepen történő mozgás egyik veszteségkomponense a szlip. A szlipet a kerék-talaj kapcsolatban fellépő vízszintes erő (kerületi erő, tolóerő) hozza létre. Nagysága arányos az erő nagyságával. Legnagyobb arányban az érintkezési felület mentén jön létre az elcsúszás. Itt van a legnagyobb mértékű haladási irányval párhuzamos elmozdulás. Ugyanilyen irányú, de kisebb mértékű elcsúszás jön létre a talajban is, és csekély mértékű, ún. alakváltozási szlip jön létre a gumiabroncsban is.