

A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők

III. rész

A jároszerkezet-terep kapcsolatában létrejövő gördülési ellenállás és kerületi erő

A terepen mozgó járművek jellemzően kerek futóművel, lánctalpas jároszerkezettel vagy ezek kombinációjával rendelkeznek. A terepi járműmozgást számos tényező befolyásolja, amelyeket három csoportba foglalhatunk össze: (1) járműparaméterek, (2) terep- és talajparaméterek, valamint a jármű mozgását befolyásoló (3) emberi tényezők. Jelen tanulmány a jároszerkezet – terep kapcsolatban létrejövő gördülési ellenállás és kerületi erő kérdéskörével foglalkozik.

GÖRDÜLÉSI ELLENÁLLÁS, MENETELLENÁLLÁS MEGHATÁROZÁSA

A mechanika a kerék statikai egyensúlyát külön vizsgálja a vontatott vagy tolt keréknél, és külön a forgatónyomatékkal terhelt hajtott keréknél. A gördülési ellenállást mindkét esetben forgatónyomatékként értelmezi, miszerint a Q súlyerő hatására a középvonalról f karral eltolva fellépő N támasztóerő $f \cdot N$ forgatónyomatéka a gördülési ellenállás. Terepjáró járműves vizsgálatoknál a gördülési ellenállás ilyen módon történő meghatározása mérés-technikai okokból nem lehetséges. Ezért vontatási vizsgálatoknál a gördülési ellenállás helyett – azt helyettesítve – a menetellenállást adják meg. A menetellenállás viszonylag egyszerű módon mérhető, a gördülési ellenállás legyőzéséhez szükséges vonóerő nagyságát jelenti állandó haladási sebességen mérve. Tehát a gördülési ellenállás nyomaték dimenziójú, míg a menetellenállás erő dimenziójú paraméter. A gördülési ellenállás problémakörével számos külföldi és hazai kutató foglalkozott. A hazai kutatók közül a legjelentősebbek: Komádi [35], Sitkei [42] és Janik [31].

A gumi- és talajdeformációból származó menetellenállás beható vizsgálatával Omeljanov [39] foglalkozott, képletében az F_m menetellenállást két komponensre bontva adta meg:

$$F_m = C_1 \cdot Q \cdot \sqrt[3]{\frac{p_1}{c_1 \cdot D}} + C_2 \cdot Q \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{p_1 \cdot D^2}} \quad (1)$$

ahol: Q – az abroncsterhelés [N],
 D – a kerékátmérő [m],
 p_1 – az abroncslégnyomás [Pa],
 c_1 – a talaj fajlagos tömörítési tényezője [N/m³],
 C_1 – a talajdeformációt jellemző tényező,
 C_2 – az abroncsdeformációt jellemző tényező.

Ez az összefüggés teoretikus megfontolásokra, és nem talajmechanikai vizsgálatokra épült. A képlet két tagból áll, az első a talajdeformáció, míg a második a gumideformáció menetellenállás-komponenseit adja meg. Omeljanovhoz [39] hasonlóan Bekker [29] is két tagból építette fel a menetellenállás képletét, ő azonban talajmechanikai alapokon számolt:

$$F_m = b \cdot \left[\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right]^{-\frac{1}{n}} \cdot \frac{(p_1 + p_k)^{\frac{n+1}{n}}}{n+1} + F_{\text{abroncs}} \cdot Q \quad (2)$$

ahol: $f_{\text{abroncs}} = \frac{u}{p_1^a}$ (az u és a tényezőket kísérleti úton határozzák meg),

p_k – az ún. köpenynyomás érték [Pa].

A két menetellenállás-képlet szerint a gumiabroncs menetellenállásának talajdeformációból adódó része a kerékterhelés, a kerékszélesség és a talajjellemzők mellett az abroncs belső légnyomásától függ. Ez szabja meg elsősorban a gumiabroncs talajba süllyedésének mértékét is. Az egyenlet szerint a talajdeformációból adódó tömörítési ellenállás egyenesen arányos, míg a gumi deformációjából származó ellenállás fordítottan arányos az abroncs belső légnyomásával. Mindkét Omeljanov- [39] és Bekker-féle [29] meghatározás hibája, hogy csak teljesen homogén, sima talajfelszín esetén igazak. Ugyanis, ha a talajfelszín nem homogén és/vagy teljesen sima, a gördülő keréknek követnie kell a talajegyenetlenség változásait, amely függőleges lengéseket gerjeszt. Ezek a lengések átadódnak az egész járműtestre, megváltoztatva annak helyzeti és mozgási energiáját. A lengések sok esetben jelentős veszteségeket okoznak, amelyek részét képezik a menetellenállásnak, más néven a terepen mozgó kerék gördülési ellenállásának.

A TOLÓERŐ KIALAKULÁSA

A jároszerkezet kapaszkodási képességét a talaj belső ellenállásai szabják meg, tehát azok az ellenállások, amelyeket a talaj az elmozdulás, a csúszás, az alak- és térfogatváltozás ellenében kifejt. A különböző talajok belső ellenállását nyírószilárdságuk jellemzi, amelyet a klasszikus talajmechanikai módszerek alkalmazásával vizsgálnak. A leg-

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

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

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



gyakrabban alkalmazott vizsgálókészülék a talajnyíró- és triaxiális mérőberendezés.

Különböző talajok nyírási diagramjával és a tolóerő meghatározásával Söhne [41], Mickelthwait [38], Bekker [29], Jánosi [32] és Poncyliusz [40] foglalkozott. Hazánkban Sitkei [42], és Kománcsi [35] a talaj mechanikai tulajdonságait vizsgálta, és módszert dolgoztak ki a tolóerő meghatározására.

Jánosi [32] és Bekker [29] a lánctalpas járószerkezetű járművekre dolgozták ki módszerüket. A Jánosi-képlet [32] a gyakorlatban jól használható, a Bekker-féle összefüggés [29] – bonyolultsága miatt – inkább csak elméleti jelentőségű.

Kománcsi bevezette az ún. redukált nyírási diagram fogalmát, és ő javasolt először összefüggést a fúvott gumiabroncs által kifejtendő tolóerő meghatározására [35]. A gyakorlat számára igen bonyolult képletekkel leírható, csúcsos jellegű nyírási diagramokat az egyszerűbb, aszimptotikus nyírási diagramokká redukálta. Vizsgálatainál a laboratóriumi talajnyírási diagramok helyett szabadföldi méréseket alkalmazott, ezzel a számítás menete egyszerűsödött, pontossága pedig javult.

Sitkei a tolóerő meghatározásának képletében bevezette a karakterisztikus szlip fogalmát [42]. A karakterisztikus szlip a nedvességtartalom, a sűrűség, az abroncsátmérő, az abroncsleágyomás és a kerékterhelés függvénye. Munkájában elméleti alapokon vizsgálta a gumiabroncs–talaj kapcsolatot. Az egy-kerék modellen felvett vonóerő–szlip görbék által a karakterisztikus szlip változását követte, a talaj nedvességtartalmának, az abroncs leágyomásának és terhelésének függvényében.

Később Kománcsi a gumiabroncs–talaj kapcsolatban kifejlesztett tolóerő képletét módosította [34]. A korábban alkalmazott képlettel ellentétben – ahol a nyírófeszültséget integráljuk a felfekvési hosszúság mentén –, az új összefüggésben a nyírt felület mentén végzi el az integrálást, kiindulva Söhne felismeréséből [41], amely szerint a csúszási zóna a szlip és a geometriai méretek függvénye.

Rendszerezve az alkalmazott tolóerő [N] képleteket: Jánosi-képlet:

$$F_t = \tau_m \cdot A \cdot \left\{ 1 - \frac{K}{s \cdot l} \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{s \cdot l}{K} \right)} \right] \right\} \quad (3)$$

Sitkei-képlet:

$$F_t = \tau_m \cdot A \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{s}{S^*} \right)} \right] \quad (4)$$

Kománcsi- (redukált) képlet:

$$F_t = \tau_m \cdot A \cdot \left\{ 1 - \frac{K_{red}}{s \cdot l} \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{s \cdot l}{K_{red}} \right)} \right] \right\} \quad (5)$$

Kománcsi- (módosított I.) képlet:

$$F_t = \tau \cdot A \cdot \left[1 - (1 - s) \cdot e^{-D} \right] \quad (6)$$

Kománcsi- (módosított II.) képlet:

$$F_t = \tau^* \cdot A \cdot \frac{s}{s_D - s} \quad (7)$$

ahol: F_t – tolóerő [N],
 τ – a nyírófeszültség [Pa],
 A – a felfekvési felület [m²],
 s – a szlip,
 l – a felfekvési felület hosszúsága [m],
 S^* – a karakterisztikus szlip,
 K – a nyírási diagram alakváltozási tényezője [m],
 K_{red} – az empirikus állandó [m],
 D – a nyírt felület alakváltozási tényezője,
 $D = C_1 \cdot L^n \cdot s^m$,

L – a felfekvési felület egyenértékű hosszúsága [m],
 τ^* – az adhéziós feszültség [Pa],
 s_D – a deformációs szlip.

Kománcsi a nyírt felület alakváltozási tényezőjének meghatározásához – vizsgálatok alapján – táblázatban foglalta össze a paraméterek nagyságát (1. táblázat).

1. táblázat. A nyírt felület alakváltozási tényezőjének paraméterei [7]

	C_1	n	m
Betonút	30	0,8	1,2
Gabonatarló, vályog	7	0,6	1,0
Gabonatarló, homok	5	0,5	1,0
Laza homoktalaj	20	0,8	1,0

A TALAJ NYÍRÓSZILÁRDSÁGA

A talaj nyírószilárdságát keretes nyírószilárdság mérővel (11. ábra) és torziós nyírókészléllel (12. ábra) mérik.

A közvetlen nyírókísérlet eszköze a nyíródoboz, amely egy alsó és egy felső, egymásra helyezett keretből áll, amely egymáshoz képest vízszintesen elmozdítható. A kísérleti eszköz szemcsés és kötött talajok vizsgálatára egyaránt alkalmas. A talajminta két fogazott szűrőkö vagy fésűs fémbetét közé kerül. A talajmintát normál terheléssel (N) terheljük. Az alsó keret fixen rögzített, a felső keret vízszintes nyíróerő (P) terheli, amit a talaj elnyírásáig fokoznak. A nyírást – a csúszólap – a keretek vízszintes elmozdulási síkjában alakul ki. A nyíróerőt „lépcsősen” vagy folytonosan növeljük, és mérjük a minta vízszintes (Δs) és függőleges (Δh) deformációját.

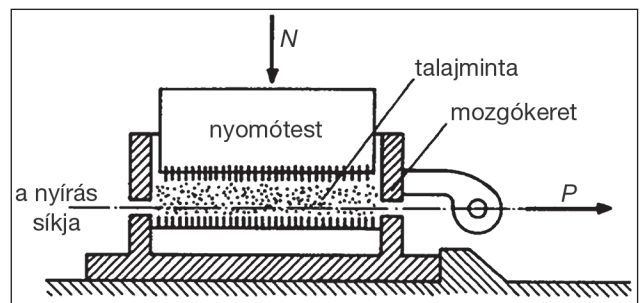
Vízszintes deformáció nemcsak a nyírást síkjában keletkezik, hanem alatta is csökkenő értékkel, egészen l mélységig. Az l nagysága függ: a talaj tömörödöttségétől, kohéziójától, a terhelő felület nagyságától, a függőleges nyomás nagyságától. A kerék kapaszkodó képességét a talaj (elmozdulás, csúszás, alak- és térfogatváltozás ellenében kifejtett) ellenállása szabja meg.

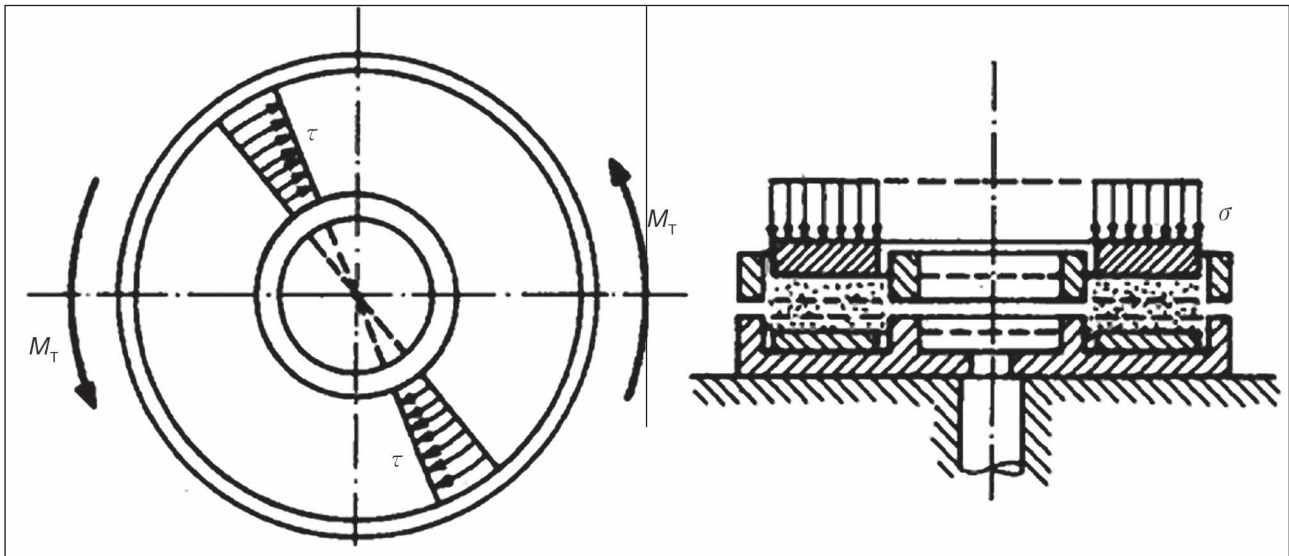
A különféle talajokon felvett nyírási diagramok (13. ábra.) alapján a talajok két csoportba sorolhatók:

- *Kohézióval rendelkező talajok.* Ezekben a súrlódás mellett belső összetartó erők is hatnak.
 - *Kohézió nélküli talajok.* Ezekben csak a szemcsék egymáson történő súrlódásából adódó erők hatnak.
- Kohéziós talajoknál a nyírófeszültséget a:

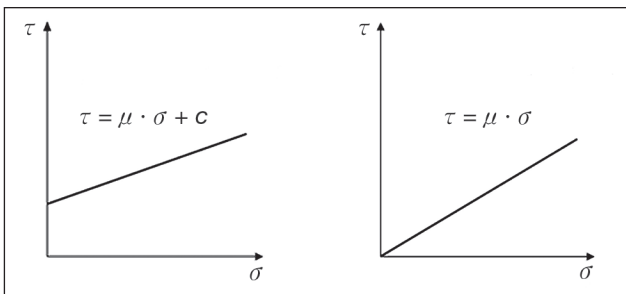
$$\tau = c + \mu \cdot \sigma \quad (8)$$

11. ábra. Keretes nyírókészlél (A szerzők szerkesztése)

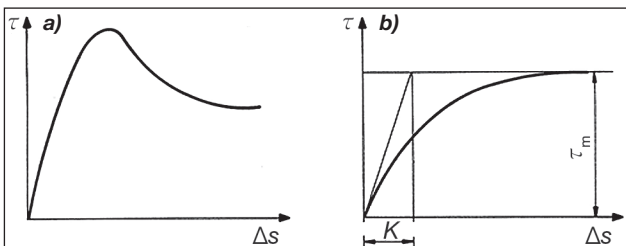




12. ábra. Torziós nyírőkészülék (A szerzők szerkesztése)



13. ábra. Kohéziós és kohézió nélküli talaj nyírési diagramja és Coulomb egyenese (A szerzők szerkesztése)



14. ábra. A nyírófeszültség és a vízszintes nyírési elmozdulások közötti kapcsolatot a kohéziós talajoknál a) és a kohézió nélküli talajoknál b) (A szerzők szerkesztése)

kohézió nélküli talajoknál a:

$$\tau = \mu \cdot \sigma \quad (9)$$

képlettel számolhatjuk ki, ahol

c – a kohézió [Pa],

μ – a talajszemcsék közötti súrlódási tényező,

σ – a talajt terhelő nyomófeszültség [Pa].

A kohézió nélküli talajoknál a nyírófeszültség egy bizonyos értékig nő, majd, aszimptotikusan közelíti a maximális értékét. Az aszimptota párhuzamos a nyírési utat megadó vízszintes tengellyel.

Kohéziós talajoknál általános esetekben a nyírófeszültség fokozatosan növekedve éri el a maximumot, majd egyenletesen csökkenve megközelíti az állandó értéket jelentő, a vízszintes tengellyel párhuzamos aszimptotát (14. ábra).

Ez utóbbi jelleggörbét csúcsos, az előbbit, pedig aszimptotikus nyírési diagramnak nevezzük.

A nyírési diagram egyenletének ismeretében a nyíróerő, illetve a kifejtett tolóerő meghatározható.

GUMIDEFORMÁCIÓ VIZSGÁLATA

Csúszásmentesen gördülő gumiabroncsos kereket feltételezve, az abroncs mind radiális, mind tangenciális irányban deformálódik. Az abroncs rugalmassága révén a talajjal érintkező deformált felület egyes részei a talajhoz tapadnak, míg mások a talajhoz képest elmozdulnak, elcsúsznak. A gumiabroncs gördülési viszonyait lényegesen befolyásolja a gumi belső súrlódása, az abroncsdeformációból adódó relatív elmozdulása a felfekvő felület mentén, és a gumiabroncs tangenciális deformációja. A gumiabroncs tehát nemcsak gördül, hanem kerülete mentén kissé megcsavarodik, és a felfekvő felület deformálódik. A gumi összenyomódása, illetve kirugózása periodikus mechanikai deformáció, amely hiszterézisvesztést, hőképződést okoz. Hőképződést jelent a talajjal érintkező részek súrlódása is. A hiszterézisvesztés következtében pedig növekszik a kerék gördülési ellenállása.

A gumiabroncs futófelülete egy körgyűrű része, amely nem fejthető síkba, és így az abroncs legördülése során állandóan deformálódik, torzul. Ez a deformáció természetesen rugalmas és csúszásokkal jár együtt. A gumiabroncs tehát nem ideálisan gördül le, hanem gördülése közben az érintkezési felület egyes részecskéi a talajhoz képest elmozdulnak. Tölt kerekeknél a talajjal történő érintkezés előtt az abroncsfelület egy kissé megnyúlik, utána pedig zsugorodik. Hajtókerekek esetében a forgatónyomaték hatására a gumiabroncs a felfekvő felület előtt egy kissé torlódik, összenyomódik, továbbgördülve az abroncs viszszaugrik az eredeti alakjára. Ez az ún. alakváltozási szlip, amely nem jelent a talajon tényleges abronccsúszást. Lazább talajon az abroncsdeformáció kisebb, a talajba kapaszkodó bordák azonban a talajt jobban deformálják.

A talajdeformációhoz viszonyítva, lényegesen kevesebben foglalkoztak a gumideformáció vizsgálatával. A mérésekre alapozott vizsgálatokat nehezíti, hogy a kerék gördülése közben kell az abroncsdeformációt vizsgálni. Li [37], Krick [36] és Knight [33] lineáris potenciométer alkalmazásával vizsgálta a gördülő gumiabroncs deformációját. Freitag és Smith [30] a gumiabroncs belsejébe épített line-



áris potenciométer használatával mérte a gumi középpontjához képest a sugárirányú és az érintő irányú deformációkat. Azt vizsgálták, hogy miként változik a deformáció az abroncslégnyomás, a szlip és a talajhordképesség függvényében. A gumideformáció függ az abroncslégnyomástól és terheléstől, a talaj típusától, keménységétől és a haladási sebességtől. A gumideformáció formája és mértéke alapvetően a gumi és a talaj relatív merevségétől függ. Abeels [28] elektromechanikus mérőeszközzel vizsgálta a gumi oldalfalán fellépő deformációt merev pályán és puha talajon.

A gumiabroncs terepen történő gördülésekor bonyolult erő- és mozgástani folyamatok zajlanak, miközben a deformálódó abroncs, a besüppedő talaj következtében a gumiabroncs-talaj kapcsolatot jellemző fizikai paraméterek időpillanatról időpillanatra változnak. A terepen történő gördülés, és annak következtében a járműmozgás is alapvetően instacionárius (dinamikus) folyamat. A dinamikus hatást elsősorban a terepprofil egyenletlensége, a talaj inhomogenitása, továbbá – ha hasznos vonóerőt fejt ki a jármű, akkor – a vonóerő dinamikus változása és a szlip okozza. Mivel az említett hatások sztohasztikus jellegűek, a létrejött lengések is véletlenszerűek.

A gumiabroncs-talaj kapcsolatában, a kerék középpontjában 3 irányban vizsgálhatók a lengések. Egyenes vonalú haladáskor a függőleges irányú lengéseket alapvetően a terepprofil gerjesztése hozza létre, míg a vízszinteset elsősorban a vonóerő és a jármű sebességének változása. A keresztirányú lengések a terepprofil és a talaj eltérő teherbíró képessége miatt adódnak. A lengések egymást befolyásolják.

Ezen lengések energiavesztéssel járnak, és egyúttal hatással vannak a gumiabroncs-talaj kapcsolatra is. A statikus kerékterhelés okozta gumi- és talajdeformációhoz, a gördülési ellenállás és vonóerő által kifejtett terhelésváltozáson túl, folyamatosan változó, járulékos terhelésnövekedés, és ezáltal járulékos gumi- és talajdeformáció adódik hozzá. Változik a felfekvési felület nagysága, alakja, a talaj- és gumideformáció mértéke, és változik a kerékközéppont helyzete is. A keletkezett lengésgyorsulás tehát befolyásolja a gördülés közben kialakuló sugárértéket is. A lengések következtében kialakuló kerékterhelés változása miatt a sugár is időben változó lesz. A terhelésváltozás befolyásolja a gumi és a talaj között fellépő adhéziót, ennek következtében a szlip is folyamatosan változik.

A gördülés közben megváltozott sugárértéket leggyakrabban (dinamikus) gördülési sugárnak nevezik. Egy elnevezéssel azonban csak egy sugárérték jellemezhető. A (dinamikus) gördülési sugár elnevezést használják a gördülés közben benyomódott abroncsfelület és a kerékközéppont távolság jelölésére, a szlip által befolyásolt gördülőkör sugarának leírására (szlipsugár) éppúgy, mint egyfajta katalógusbeli értéket, amelyet a gumiabroncsgyártók adnak meg a gördülőkör sugarára.

(Folytatjuk)

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [28] Abeels, P. F. „Tyre testing: Automatic recording of the tyre deformability.” (1989) ASAE Paper No: 89-1051. Saint Joseph, Michigan: American Society of Association Executives;
- [29] Bekker, Mieczyslaw G. „Theory of land locomotion: The mechanics of vehicle mobility” Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1956.;
- [30] Freitag, D. R., Smith, M. E. „Center-line deflection of pneumatic tyres moving in dry sand.” *Journal of Terramechanics* 3., no.1 (1966): 31–46. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(66\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0022-4898(66)90153-4);
- [31] Janik, J. *Gördülési ellenállás gumi- és vasabroncsú keréknél.* Járművek, Mezőgazdasági gépek 9. kiadás, 1956;
- [32] Jánosi Z., Hanamoto B. „The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soil.” *Mechanics of Soil-Vehicle System*, (Torino-Saint Vincent: 1961);
- [33] Knight, S. J., Green, A. J. „Deflection of a moving tyre on firm to soft surface.” (1962) ASABE, 116–120. <http://doi.org/10.13031/2013.40953>;
- [34] Komándi, Gy. *A talaj fizikai tényezőinek meghatározása a nyírási diagram és a vontatási jelleggörbe összefüggései alapján.* Gödöllő: Gödöllői Agrártudományi Egyetem Tudományos Értesítője, 1969.;
- [35] Komándi Gy. „An evaluation of the concept of rolling resistance.” *Journal of Terramechanics* 36, no.3 (1999): 159–166. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(99\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00005-1);
- [36] Krick, G. „Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tyres operating on yielding soils with consideration of tyre deformation.” *Journal of Terramechanics* 6/3, (1969): 73–98. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(69\)90129-3](https://doi.org/10.1016/0022-4898(69)90129-3);
- [37] Li, Y. et al. „Distribution of stresses beneath a drive pneumatic tyre and prediction of its tractive performance on sand.” *Proc. Int. Conf. Soil Dynamics*. Vol. 4., 1985.: 738–755.;
- [38] Micklethwait, E. W. E. *Soil mechanics in relations to fighting.* Chercetsey, 1944.;
- [39] Omeljanov, A. E. *Légtömlős kerekek mezőgazdasági gépeken való alkalmazásáról.* Mezőgazd. Gép, 1948.;
- [40] Poncyliusz, M. „Applicability of asymptotic curves to describe test results from direct shearing of soil.” (3rd. Eur. ISTVS Conf. Warsaw: 1986.);
- [41] Shöne, W. H. „Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres.” *Agricultural Engineering* 39, no.5. (1958): 276–281.;
- [42] Sitkei, György. *A mezőgazdasági gépek talajmechanikai problémái.* Budapest: Akadémiai Kiadó, 1967.

HADITECHNIKA FOLYÓIRAT

A *Haditechnika* folyóirat korábbi számai megvásárolhatók:

Líra Könyváruház, Récsei Center 1146 Bp., Istvánmezei út 6., (telefon: 411-1543);
 Stúdió könyvesbolt 1138 Bp., Népfürdő u. 15/D, (telefon/fax: 359-1964, 359-6461);
 HM Zrínyi Nonprofit Kft. Ügyfélszolgálat (Budapest II., Fillér u. 14.)
 Nyitvatartás: H.–P. 9–15 óra ugyfelszolgalat@hmzrinyi.hu.