

Prof. dr. Kiss Péter\* – Kiss Botond Levente\*\* – Böröczky András\*\*\*

# A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők

IV. rész

## A jároszerkezet-terep kapcsolatában létrejövő gördülési ellenállás és kerületi erő

A terepen mozgó járművek jellemzően kerekes futóművel, lánctalpas jároszerkezettel 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. Jelen tanulmány a gördülési sugarakkal, valamint a jároszerkezet-terep kölcsönhatásával foglalkozik.

### A TEREPEEN GÖRDÜLŐ GUMIKERÉK STATIKUS ÉS GÖRDÜLÉSI SUGARAI

A deformálódó pálya és deformálódó kerék modell alkalmazásakor a gördülési sugarak meghatározása problematikus, és mérés technikailag igen bonyolult feladat. Márpedig terepjáró járművek vizsgálata esetén gyakran felvetődik a gördülési sugár meghatározásának kérdése, amelyet legtöbbször statikusan mért, vagy csak egyszerűen táblázatból vett értékkel helyettesítenek. A gumikerék-talaj kapcsolatban a következő keréksugarértéket különböztethetjük meg:

- statikus sugár;
- dinamikus gördülési sugár;
- a mozgástani viszonyok (szlip) által meghatározott gördülési sugár (kinematikai gördülési sugár vagy szlipsugár);
- a kerék talppontja és a kerék középpontja közötti távolság;
- az erőtani viszonyok által meghatározott sugár (kinetikai gördülési sugár).

A *statikus sugár* adatait a gumiabroncs gyártók katalógusaiban is megtalálhatjuk. Az abroncsot névleges terheléssel nyomják egy sík laphoz, és megméri a kerékközéppont és a sík felület távolságát. A vontatási vizsgálatok előtt a műhelyben is végezhetnek hasonló méréseket. Ennek a mérésnek az eredménye – az üzemi terhelésviszonyok és abroncslegrnyomás eltérése miatt – különbözhet a gyártó által megadott értéktől.

*Dinamikus gördülési sugár:* szintén az a paraméter, amelyet a gumiabroncs gyártók adnak meg katalógusaikban. A gyártók által alkalmazott mérési módszerek kis mértékben eltérhetnek ugyan, de a vizsgálatokat az alábbi elv szerint hajtják végre: szilárd útburkolaton, alacsony sebességgel (általában 10 km/h) szabadon végiggördítik a névle-

ges értékkel terhelt és légnomásra beállított gumiabroncsot. A vizsgálatokat általában 200 m-es szakaszon végzik el, és mérik a kerékfordulatokat. A kerékfordulatokból és a megtett útból kiszámolják a gördülési kerületet, illetve a gördülési sugarat. Az egyik probléma, hogy a gördülési sugár – bár csúszásmentes legördülést feltételeznek – valójában a tolt kerekekre jellemző, kis értékű, negatív szlippel terhelt. A másik probléma ezzel a katalógusbeli értékkel az, hogy üzem közben a terhelési viszonyok változnak, tehát változik a dinamikus gördülési sugár is.

A *mozgástani viszonyok (szlip) által meghatározott gördülési sugár* a kerék gördülése közben maguk a mozgástani viszonyok határozzák meg. Ez egy virtuális sugár, amelynek nagysága – szélső értékeket is beleértve – nullától a végtelenig terjedhet. Ha a kerék gördülése csúszásmentes (elméleti eset, csúcsos ciklois), akkor a gördülési sugár nagysága megegyezik a geometriai sugár nagyságával. Ha a kerék pozitív szlippel gördül (hajtott kerék, hurkolt ciklois), akkor a gördülési sugár nagysága kisebb, mint a geometriai sugár, negatív szlip (tolt kerék, nyújtott ciklois) esetén nagyobb, ahogy az a 15. és 16. ábra alapján látható. A szélső értékeket is figyelembe véve, elkaparó kerék esetén a gördülési sugár értéke zérus, tolt, de teljesen befékezett kerék esetén pedig végtelen nagy. A szélső értékek csak a teljesség kedvéért említettük, mert ezen esetekben már nem beszélhetünk gördülésről. A csúszás által meghatározott gördülési sugár [m] a következő képlettel adható meg:

$$r = \frac{l}{2 \cdot \pi}, \quad (1)$$

ahol  $l$  [m] az egy körülfordulással megtett utat jelenti.

A *kerék talppontja és a kerék középpontja közötti távolság* tulajdonképpen nem gördülési sugár, hanem ahhoz nagyságában sok esetben igen közel álló jellemző. Például az autotechnikában, ahol a kerékcúszással nem számolnak, ezt a jellemzőt fogadják el gördülési sugárnak. Ez az egyetlen paraméter az említett sugarak között, amely üzem közben is, változó terhelési viszonyok mellett, közvetlenül mérhető egy, a kerékpalást felületére körkörös felerősített távolságmérő készülékkel. A készülék a palástfelület és az abroncs felfekvési felületének, talppontjának a távolságát méri.

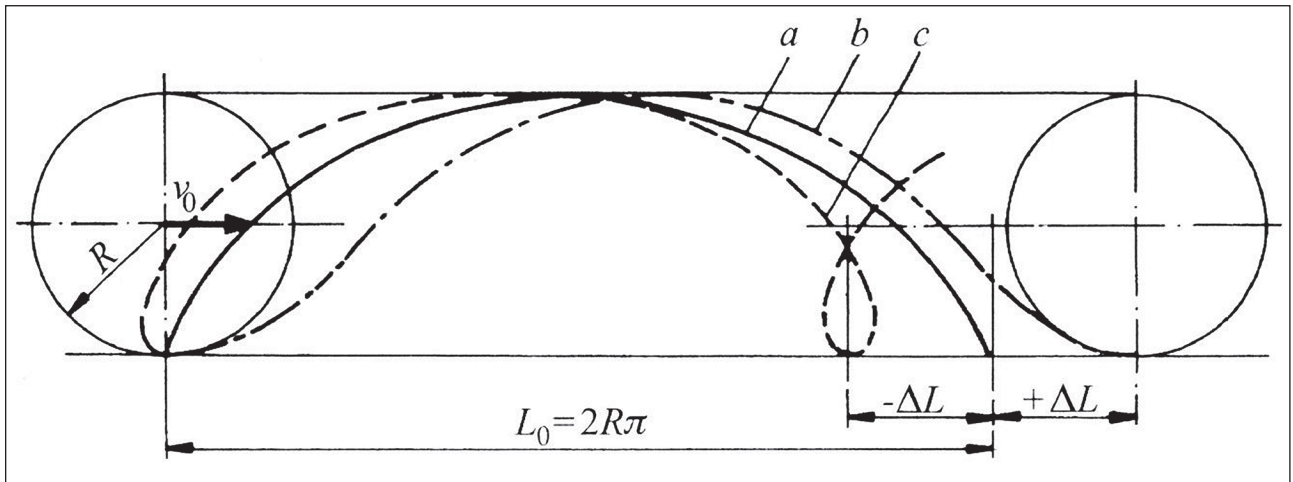
Az *erőtani viszonyok által meghatározott sugár:* deformálódó kerék, deformálódó pálya viszonyában, ahol sok eset-

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

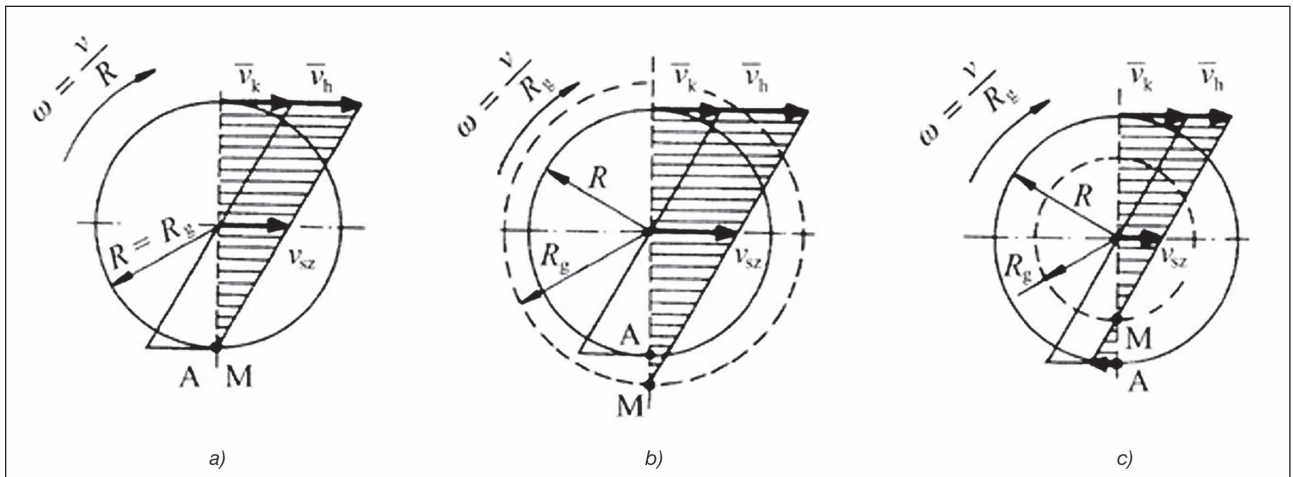
\*\* Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, Járműtechnika Tanszék, MSc hallgató. ORCID: 0000-0002-7003-1289

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





15. ábra. Kerék adott kerületi pontjának mozgási pályái (a: csúszásmentes gördülés, csúcson ciklois, b: tolt kerék, nyújtott ciklois, c: hajtott kerék, hurkolt ciklois) [52]



16. ábra. A mozgástani viszonyok által meghatározott gördülési sugarak. a) csúszásmentes gördülés, b) tolt kerék, negatív szlip, c) hajtott kerék, pozitív szlip [52]

ben jelentős és tartós szlipértékekkel számolhatunk, célszerű megkülönböztetni az erőtani viszonyok által meghatározott gördülési sugarat. Ez a sugár a kerékközéppont és a gumiabroncs-talaj kapcsolatban a felfekvési felület mentén ébredő elemi tolóerők eredőjének a távolsága. Ennek a sugárnak a nagysága határozza meg, hogy az aktív hajtónyomatékból milyen nagyságú vízszintes tolóerő ébred. Ez a sugár valós, és értéke csak egy szűkebb intervallumban mozoghat, ellentétben a szlip által meghatározott gördülési sugár értékével.

**A KERÉK TALPPONTJA ÉS A KERÉK KÖZÉPPONTJA KÖZÖTTI TÁVOLSÁG**

A kerék talppontja a gumiabroncs kerületének és a talajfelszínének az a pillanatnyi kapcsolódási pontja, amelyik a kerék geometriai középpontja alatt helyezkedik el. Ennek a pontnak a távolsága a kerék középpontjától egy mérhető és számolható sugárszerű jellemző. Mérése gördülés közben, változó terhelési viszonyok mellett is lehetséges, igaz nem egyszerű mérés-technikai eljárással. Számítása a kerékközéppont függőleges irányú gyorsulásértékéből és ugyanezen kerék alatt, a gyorsulásfüggvényrel szinkronban lévő deformált keréknyom terepprofilgörcéből, vala-

mint a statikus keréksugár nagyságából lehetséges. Mindhárom jellemző mérése gyakori a szabadföldi vizsgálatoknál. Első lépésben a mozgásjellemzőket kell meghatározni a kerékközéppontban felvett folytonos, függőleges irányú gyorsulásfüggvényből.

A gyorsulás definíciója alapján előállítható a sebesség:

$$\bar{v} = \int_{t_0}^t \bar{a}(t) \cdot dt + \bar{v}_0 = \bar{v}(t). \tag{2}$$

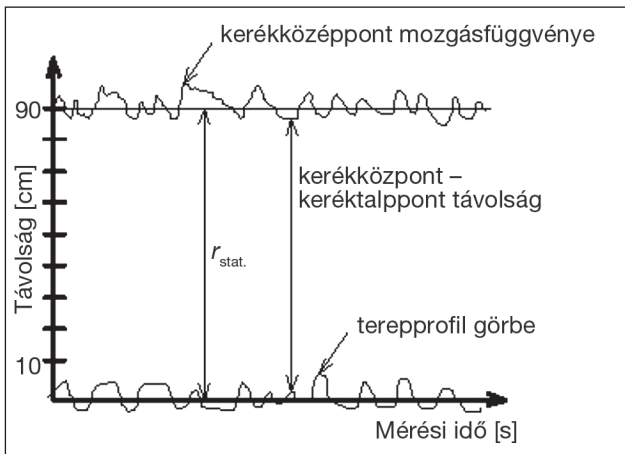
A sebességfüggvényből a mozgásfüggvény további integrálással határozható meg:

$$\bar{r} = \int_{t_0}^t \left( \int_{t_0}^t \bar{a}(t) \cdot dt \right) \cdot dt + \bar{v}_0(t - t_0) + \bar{r}_0, \tag{3}$$

ahol:  $\bar{v}_0 = \bar{v}(t_0)$  - a kezdő pillanathoz tartozó sebességérték [m/s]  
 $\bar{a}(t)$  - a  $t$  időpillanathoz tartozó gyorsulásérték [m/s<sup>2</sup>].

A kétszeri integrálással kapott mozgásfüggvény a jármű kerékközéppontjának mozgásfüggvényét adja.

Ezt követően egy koordinátarendszerben ábrázolható a keréknyomban felvett terepprofilgörbe, és a vele szinkronban lévő kerékközéppont mozgásfüggvény. A két függvényt függőlegesen el kell tolni úgy, hogy a függvényekre illesztett egyenesek távolsága a statikus keréksugár értéke legyen. Az így eltolat függvények értékei közötti távolság a



17. ábra. A kerékközéppont-keréktalppont távolság közvetett meghatározása [49]

kerékközéppont-keréktalppont (felfekvési felület) távolságot adja (17. ábra). A számítási módszer feltételezi, hogy a keréktalppont utáni talajdeformáció és a talaj-visszarugó-zása közel azonos mértékű.

Az említett sugárértékek tehát különböznek egymástól, és csak speciális esetben egyeznek meg a gumiabroncs-talaj kapcsolatában. A kerékközéppont-keréktalppont távolsága deformálódó, puha talajon nem egyenlő a másik kettő gördülés közben kialakuló sugárral. A fent említett gördülési sugarak közül tehát a gumiabroncs-talaj kapcsolatban lejátszódó fizikai folyamatokat legjobban a mozgástani és az erőtani gördülési sugár írja le. A két sugár – leszámítva a lengés következtében létrejövő pillanatnyi egyenlőséget – csak merev kerék és pálya kapcsolatában, zérus szlip esetén egyezik meg egymással. Mivel gumiabroncs-talaj kapcsolatában a gumi alakváltozási szlipje miatt csúszásmentes legördülésről nem beszélhetünk, tehát a szlip nem lehet zérus, a két sugár külön értéket vesz fel. Mindkettő külön-külön jellemzi a gumiabroncs-talaj kapcsolatot, az egyik mozgástani (szlip) oldalról, a másik pedig a kerék-talaj között fellépő erőátadás oldaláról. Az első a szlip okozta csúszást, és az azzal együtt járó virtuális sugárváltozást jellemzi, a másik az aktív hajtónyomaték és a felfekvési felület mentén ébredő tolóerő közötti geometriai jellemző. A két érték különbözőségére a legszemléletesebb (szélsőérték) példa, amikor a jármű kereke elkapar. A szlip ebben az esetben 100%, a mozgástani sugár ekkor zérus. Ugyanakkor a jármű kereke ekkor fejt ki a legnagyobb tolóerőt, tehát az erőtani sugárnak zérusnál nagyobb értékűnek kell lennie.

### A TALAJBAN LÉTREJÖVŐ FESZÜLTÉGELOSZLÁS, ÉS A DEFORMÁCIÓ VIZSGÁLATA

Számos kutató foglalkozott a gumiabroncs-talaj kapcsolatban a talajban létrejövő feszültségeloszlás, és deformáció vizsgálatával. Kezdetben igen egyszerű és korlátozott méréseket végeztek a talajba fektetett vékony papírlapokkal vagy színezett homokcsíkokkal. Később fényképezési módszerrel rögzítették – egy párhuzamosan húzott árkon keresztül – a talajban elhelyezett jelek elmozdulását a gördülő kerék alatt Söhne [55] és Gliemerth [46] a bordázott abroncs alatti függőleges és vízszintes talajelmozdulásokat vizsgálta. Cegnar és Fausti [44] állandó terhelés és abroncsleányomás mellett vizsgálta a magas bordázatú abroncsok alatti talajelmozdulásokat.

Számos kutató foglalkozott a benyomódást befolyásoló tényezők vizsgálatával is.

Fekete [45], Arvidsson [43] és Schmid [53] különböző talajállapotok és nedvességtartalmak mellett vizsgálta a talajtömörödést és a benyomódás nagyságát, Kogure [50] a benyomódáson kívül a gördülési ellenállás nagyságát is meghatározta.

Többek egyező véleménye alapján a növekvő haladási sebesség csökkenti a maximális benyomódás mértékét.

Feltétlenül meg kell említeni, hogy a talajdeformációk vizsgálatára a reológia módszerét is felhasználták. Tan [57] volt az első, aki a talaj tulajdonságait kutatta a reológia eszköztárával. A talajokra Poynting–Thomson modellt alkalmazott. Hazánkban Huszár [47] és Sitkei [56] alkalmazta a mezőgazdasági anyagokra, többek között a talajokra is a reológiai módszereket. Karafiath [48] a kontinuum mechanika és a talajképlékenység elméletét használta fel a gumiabroncs-talaj modellezésnél, míg a mozgékony és talajtömörödés meghatározására Yong [65] véges elemes módszert alkalmazott. Ting [60] a diszkrét elemek módszerét használta talajmechanikai, egytengelyű terhelési, nyírási és triaxiális vizsgálataihoz. Munkájában kétdimenziós DEM (Digital Elevation Model – digitális magasságmodell) modellt használt. Tanaka [58] homok-, vályog- és agyagtalajok deformációjának és behatolással szembeni ellenállásának vizsgálatánál használta a diszkrét elemek módszerét.

Upadhyaya [61] egy traktor hárompont felfüggesztésére szerelt nyomó- és nyírókészülékkel vizsgálta szabadföldön, többféle talajon, a nyomóerő-benyomódás, nyírási diagram és a nyírási egyenes függvénykapcsolatokat.

A gumiabroncs-talaj kapcsolatban ébredő normális és érintő irányú feszültségek kutatása terén elért eredmények indították el az 1980-as évek közepén a talajtömörödés folyamatának jobb megértését, és az annak csökkentésére irányuló törekvéseket.

A járművek méret- és tömegnövekedése miatt több kutató is foglalkozott a gumiabroncs alatt, a talajban ébredő feszültségek vizsgálatával. Wong [63] a gumi-talaj kapcsolatban ébredő normál feszültséget vizsgálta a talajban, a dinamikus abroncssterhelés függvényében, különböző talajállapotok mellett.

Wanjii *et al.* [62] talajvályús vontatási modellkísérletekkel vizsgálta a kerék alatt létrejövő normál és horizontális feszültségeloszlásokat. Vizsgálatait talajnyíró kísérletekkel egészítette ki.

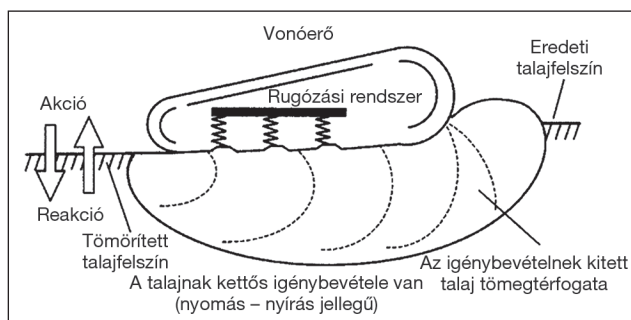
Wood *et al.* [64] összehasonlította a merev kerék és gumiabroncs alatt a tolóerő kialakulásának folyamatát. Meghatározta a tolóerő-dinamikus terhelés, és a mozgási ellenállás-dinamikus terhelés kapcsolatát a kerék alatt keletkező normál, és az érintő irányú feszültségek ismeretében.

A korszerű mérőberendezések és a számítógépes mérés technika lehetővé teszi a talajelmozdulások pontos meghatározását. Seig [54] és Tijink [59] 3 dimenziós számítógépes módszerrel tanulmányozta a gördülő kerék alatti talajelmozdulásokat különböző talajtípusok, nedvességtartalom, és tömörödöttség, azonos gumiabroncs típus, abroncsleányomás, terhelés és sebesség mellett. A mérések eredményeként megállapította, hogy a vízszintes és függőleges elmozdulások aránya növekszik a növekvő nyomóerő hatására.

### A TALAJ-JÁRÓSZERKEZET KÖLCSÖNHATÁSA

A járműtest és a talaj közötti kapcsolatot biztosító szerkezeti részt összefoglaló néven járószerkezetnek nevezzük. Leszámítva a speciális járószerkezeteket (pl. lépegető járó-





18. ábra. A talaj-kerék kölcsönhatása [51]

szerkezet), alapvetően a kereket, a lánctalpat és a gumihvedert soroljuk ide. A 18. ábra a lánctalpas járószerkezet és a talaj kapcsolatát mutatja. Az itt bemutatott hatás alapvetően a kerekes járószerkezetekre is igaz, ahol a kerekek adják át a talajnak a jármű súlyerejét, és a hajtónyomatékból származó kerületi erőt. A talaj szilárdsága ellenáll ezeknek a hatásoknak, miközben visszahat a kerékre. Tehát a hatás-ellenhatás klasszikus törvényszerűségével állunk szemben.

### KÖVETKEZTETÉSEK

A jármű terepen történő mozgása során a következő jelenségek figyelhetők meg:

- A jármű kerekei a talajba süllyednek, a talajban deformáció, keréknyom alakul ki.
- A kerekek – különösen a hajtó kerekek –, vízszintes irányú csúsztató hatást fejtenek ki.
- Mindkét igénybevétel (a talajnyomás és a nyírás) nemcsak közvetlenül a kerék-talaj kapcsolat érintkezési felülete mentén hat, hanem a talaj mélyebb rétegeiben is.
- A talaj teherbíró képessége maximálja a kerékterhelés nagyságát. Ha a kerékterhelés nagyobb a teherbíró képességnél, akkor a jármű kerekei a talajba süllyednek, akadályozva ezzel a jármű mozgását.
- A talaj nyírószilárdsága a kerületi erőt maximálja. Nagyobb kerületi erő esetén a jármű kerekei kipörögnek, a szlip jelentősen megemelkedik, szintén akadályozva, vagy lehetetlenné téve a haladást.
- A talaj nedvességtartalma jelentősen befolyásolja a talaj mechanikai tulajdonságait. Egyes talajoknál a nedvességtartalom növekedése pozitívan, másoknál negatívan hat a mozgékonyaságra. Szemcsés talajoknál (pl. homok) a nedvesség egy bizonyos fokig a szemcsék közötti tapadást segíti elő, biztosítva a járművek számára a jobb mozgékonyaságot, míg a finomszemcsés talajoknál (pl. vályog) a nedvességtartalom növekedése a talaj nyírószilárdságát csökkenti, növelve ezzel a jármű csúszását, balesetveszélyét.
- A terep profilja (mikroakadályok) a jármű lengését gerjesztik. A létrejövő lengések megváltoztatják a jármű dinamikáját, amely komoly baleseti tényező lehet.
- A talaj süppedékesége, inhomogenitása hasonlóan baleseti forrás lehet.
- A talajfelszín közvetlenül borító gyeptakaró (különösen, ha nedves) fokozhatja a jármű csúszását.

### HIVATKOZOTT IRODALOM

[43] Arvidsson, J., Ristic, S. „Soil stress and compaction effects for four tractor tyres.” *Journal of Terramechanics* 33, no. 5 (1997): pp. 223–232.;

[44] Cegnar, A., Fausti, F. „Movements under the contact area in radial and conventional tyres.” (1960) *ASAE*, pp. 60–104.;

[45] Fekete, A., Baganz, K., Helbi, W., „Some observation on soil compaction under a tire.” *Journal of Terramechanics* 12, (1975): pp. 217–223.;

[46] Gliemeroth, G. „Untersuchungen über Verfestigungs- und Verlagerungsvorgänge in Ackerboden unter Rad- und Raupen-fahrzeugen.” *Zeitung Acker- und Pflanzenbau* 96, (1953): pp. 219–234.;

[47] Huszár, I., Müller, Z., „Mezőgazdasági termények mechanikai vizsgálata.” *Járművek, Mezőgazdasági Gépek* 24, no. 12 (1977);

[48] Karafiath, L. L., Nowatski, E. A., „Soil Mechanics for Off-Road Engineering.” *Trans Tech Publication Clausthal*, (1978);

[49] Kiss, P., „Terepen mozgó járművek energetikájának egyes kérdései.” (PhD doktori értekezés, Gödöllő: Szent István Egyetem, 2001);

[50] Knight, S. J., Kogure, A. J. „Deflection of a moving tyre on firm to soft surface.” (1962) *ASAE*, pp. 116–120.;

[51] Laib, L., *Terepen mozgó járművek.* (Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 2002);

[52] Laib, L., Vas, A., *Traktorok-autók.* (Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 1998);

[53] Schmid, I. C., „Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK.” *Journal of Terramechanics* 32, no. 1. (1995): pp. 3–26.;

[54] Seig, D. A. *Soil compactibility.* Bedford: Silsoe Collage, 1985.;

[55] Shōne, W. H. „Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres.” *Agricultural Engineering* 39, no. 5. (1958): pp. 276–281.;

[56] Sitkei, Gy. *A mezőgazdasági gépek talajmechanikai problémái* (Budapest: Akadémiai Kiadó, 1967);

[57] Tan, T. K. „Three-dimensional theory of the consolidation and flow of clay layers.” *Scientica sinica*, (1957);

[58] Tanaka, H. et al., „Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the Distinct Element Method.” *Journal of Terramechanics* 37 no. 1 (2000): pp. 41–56.;

[59] Tijink, F. G. „Summation of shear deformation in tubes in soil under a moving tyre.” *Soil Tillage Research* 12, (1988): pp. 323–345.;

[60] Ting, J. M. et. al., „Discrete numerical model for soil mechanics.” *Journal of Geotechnical Engineering* 115 no. 3 (1989);

[61] Upadhyaya, S. K. et al. „An instrumented device to obtain traction related parameters.” *Journal of Terramechanics* 30, no. 1, (1993): pp. 1–20.;

[62] Wanji, S. et. al., „Prediction of wheel performance by analysis of normal and tangential stress distributions under the wheel-soil interface.” *Journal of Terramechanics* 34, no. 3 (1998);

[63] Wong, J. Y. „On the study of wheel-soil interaction.” *Journal of Terramechanics* 21, no. 2 (1984): pp. 117–131.;

[64] Wood, R. K. et. al., „Tire thrust as affected by dynamic load.” 10th Int. Conf. ISTVS. Kobe: 1990.;

[65] Yong, R. N., Fattah, E. A. „Prediction off wheel-soil interaction and performance using the finite element method.” *Journal of Terramechanics* 13, no. 4 (1976): pp. 227–240.