

**A talaj és gumiabroncs kapcsolatában lejátszódó dinamikus
energiatranszport folyamatok vizsgálata
(OTKA T 049181 ZÁRÓJELENTÉS)**

2005-2008.

Dr. Kiss Péter SZIE-GÉK

Összefoglalás: Terepen – különösen puha talajon – történő járműmozgás két jelentős vesztesége a gördülési ellenállás és a szlip. A két veszteség ugyan hatással van egymásra, azonban a folyamatok tisztázása végett célszerű azokat külön-külön vizsgálni. A két veszteség elméleti- és gyakorlati meghatározásával számos kutató foglalkozott már, viszont nem kellően tisztázott a veszteségeket befolyásoló tényezők hatása valamint a veszteségkomponensek nagysága. Korábban a gördülési ellenálláson a talaj és a gumiabroncs függőleges deformációs ellenállását értették – mérési korlátok miatt – általában állandósult üzemállapotban felvett vizsgálatok mellett. Ezzel ellentétben a gördülési ellenállás nagysága menet közben folyamatosan változik és járulékos deformációk jönnek létre. A terep egyenetlensége, a talaj inhomogenitása miatt jelentős függőleges lengések alakulnak ki, állandóan változtatva a deformációk és így a gördülési ellenállás nagyságát. Számolni kell tehát a létrejövő lengések hatásával is. A kerék alatt a talaj három irányban deformálódik. A jármű súlyerejénél fogva jelentős nagyságú függőleges irányú talajdeformáció keletkezik. Ezt a deformációt a terepprofil gerjesztette függőleges lengések tovább fokozzák. A kerék alatt a talaj keresztirányban is deformálódik. Ezt a deformációt alapvetően a jármű keresztirányú lengései hozzák létre. Ha a jármű a haladási irányra merőleges lejtőn halad, akkor a keresztirányú deformáció tovább növekszik a jármű súlyerejének szinuszával arányosan. Az előbb említett veszteségek a gumiabroncs és talajra vonatkozó gördülési ellenállás komponensei. A harmadik komponense a talajdeformációnak, a talaj (haladási iránnyal párhuzamos) vízszintes irányú deformációja. Ezt viszont a gumiabroncs-talaj kapcsolatában létrejövő szlip hozza létre, energiaszükségletét tehát a szlipveszteség tartalmazza. Húzott és tolt kerekeknél, ahol jellemzően kis mértékű negatív szlip van, kis vízszintes irányú talajdeformáció jön létre (keréktúrás jelenségével nem számolva). Hajtott kereknél lényegesen nagyobb szlip is keletkezhet. Ekkor a vízszintes irányú talajdeformáció is nagyobb.

A kutatómunkánkban a fentebb említett veszteségek meghatározása történt. Terepen végzett járműkísérletek alapján elkülönítettük a gördülési ellenállás veszteségét a többi gumiabroncs-talaj kapcsolatra jellemző veszteségektől (szlip). Külön-külön meghatároztuk a talajdeformáció- és a gumiabroncs-deformáció veszteségeinek nagyságát. A vizsgálat során mértük a járműkerék középpontjának függőleges- és keresztirányú gyorsulását. A függőleges deformációkat létrehozó erőt a jármű súlyerejéből és a $\Delta Q = m \cdot a$ dinamikus járulékos terhelésből határoztuk meg. A keresztirányú deformációt a jármű tömegéből és a keresztirányú gyorsulásából. A haladási iránnyal párhuzamos, vízszintes irányú talajdeformációt pedig a szlip és a gumiabroncs felfekvési felületének hosszából határoztuk meg.

A vizsgálat eredményeképpen a gördülési ellenállás és a szlip veszteséget komponensekre bontottuk. A méréseket nyomaték- és fordulatszám jeladókkal felvett energetikai (teljesítmény) mérésekkel kontrolláltuk. A kontrollmérések a veszteségekkel kapcsolatos számításunkat igazolták.

Abstract: *Two of the major sources of loss when a vehicle is traversing terrain – especially on soft soil – are rolling resistance and slip. In spite of the two losses have effect of each other, it is better to analyse separately them due to clarification. Many workers have attempted theoretical and practical definitions of these losses but it is not enough clarified the effects of the loss-modify factors and the magnitude of loss components. They have usually examined the magnitude of the deformation of tyre and soil during rolling under steady-state conditions. However, the magnitude of rolling resistance continually varies during motion. The unevenness of the terrain and the inhomogeneity of the soil give rise to substantial vertical vibrations which change the magnitude of deformations, and thus rolling resistance. The effect of these vibrations must therefore be taken into account. There is three-dimensional soil deformation under the tyre. By the vehicle's weight there will be a significant vertical soil deformation. The terrain profile generated vertical vibration more augments this deformation. There is lateral soil deformation under the tyre as well. This deformation basically caused by the lateral vibration of vehicle. If the vehicle is moving on the beam on slope, the lateral deformation will be higher, according to the sinus of vehicle's weight. The previous mentioned losses are the components of rolling resistance. The third component of the soil deformation is the horizontal (parallel to the moving direction) deformation. This deformation caused by slip so this energy demand of this deformation is in the slip loss. In case of pushed (non driven) wheel, where the slip is little, the horizontal soil deformation is small (ignore the wheel bulldozer effect). In case of driven wheel the slip is higher so the horizontal soil deformation is higher as well.*

This paper reports a determination of rolling resistance components and slip loss through field experiments designed to distinguish rolling resistance losses from other tyre-soil interaction losses (slip). Soil and tyre deformation losses were determined separately. The experiment involved measurement of vertical and lateral accelerations at the wheel centre. The vertical acceleration and mass data yielded the dynamic load $\Delta Q = m \cdot a$ which is superposed on the static (vertical) weight of the vehicle and continually alters the magnitude of the soil and tyre deformation. The lateral deformation was determined by the vehicle mass and the lateral acceleration. The horizontal (parallel to the moving direction) deformation was determined by magnitude of slip and length of the contact area of tyre-soil.

The test results gave the components of rolling resistance and slip. The measurements were checked against energy (power) measurements from torque and speed sensors, and these confirmed the component of losses calculations.

1 Bevezetés, előzmények

A terepen gördülő jármű kereke deformálja a talajt miközben a gumibroncs is deformálódik. A létrejövő talaj- és gumideformáció energiaveszteséggel jár, mely veszteséget a gördülési ellenállás tartalmazza. A terep egyenetlensége függőleges lengéseket gerjeszt, amely szintén energiaveszteséget okoz. E lengések keltette tömegeterők további járulékos talaj- és abroncsdeformációt hoznak létre. A kialakult felfogás szerint a gördülési ellenállás két komponensből áll: talaj- és gumibroncs-deformációból. Nem számolnak viszont a – terepen minden esetben – létrejövő lengések hatásával. A lengések járulékos talaj-és gumideformáció növekedést okoznak, növelve a gördülési ellenállás nagyságát. A terepen való mozgás másik veszteségkomponense a szlip. A szlipet a kerék-talaj kapcsolatban fellépő vízszintes erő (kerületi erő, tolóerő) hozza létre. Nagysága arányos az erő nagyságával. Mindkét veszteség (a gördülési és a szlip) tartalmaz talaj- és gumideformációs veszteséget egyaránt. Ha

eltekintünk a gördülési ellenállás és a szlip egymásra gyakorolt hatásától, akkor a deformációk jól elhatárolhatók egymástól. A gördülési ellenállás tartalmazza a függőleges és keresztirányú gumi- és talajdeformációkat, a szlip pedig a haladási iránnyal párhuzamos talaj- és gumideformációkat. Kutatásunkban a következő célokat tűztük ki: (1) A függőleges (z irányú) talajdeformáció energiaráfordításának meghatározása, (2) A keresztirányú (y) talajdeformáció energiaráfordításának meghatározása, (3) A hosszirányú (x) talajdeformáció energiaráfordításának meghatározása, (4) A gumideformációs energia meghatározása, (5) A függőleges lengésgyorsulás okozta járulékos talaj- és gumideformáció nagyságának meghatározása, (6) Az előbb említett veszteségek meghatározásával a gördülési ellenállás és a szlipvesztés komponensekre való bontása.

A kerekek gördülési ellenállásával kapcsolatos tudományos igényű kutatások kezdete a XVIII. századra tehető és Coulomb nevéhez fűződik. Azóta számos kutató foglalkozott vele (az elsőket megemlítve: Bernstein 1913; Goryatchkin 1936; Bekker 1956), illetve foglalkozik vele a napjainkban is. A gördülési ellenállás a kerék középvonalától f karral eltolva fellépő N támasztóerő és a kar szorzataként, forgatónyomatékként értelmezhető. Szabadföldi vizsgálatoknál – az egyszerűbb mérése miatt – gyakran a jármű vontatásához szükséges erő nagyságát adják meg a gördülési ellenállás helyett. Az ismert összefüggések azonban nem számolnak a lengések okozta járulékos deformáció növekedéssel. Az eddigi képletek hibája tehát, hogy csak teljesen homogén, sima talajfelszín esetén igazak, ahol nincsenek lengések, vagy pedig nagyságuk elhanyagolható. Ugyanis, ha a talajfelszín nem homogén és/vagy teljesen sima, a gördülő keréknek követnie kell a talajegyenetlenség változásait, ami függőleges lengéseket gerjeszt. Ezek a lengések átadódnak az egész járműtestre, megváltoztatva annak helyzeti és mozgási energiáját. A lengések sok esetben jelentős veszteségeket okoznak, melyek részét képezik kerék gördülési ellenállásának.

A terepen való járműmozgás tehát alapvetően instacionárius folyamat. A dinamikus hatást elsősorban a terepprofil egyenetlensége, a talaj inhomogenitása továbbá ha hasznos vonóerőt fejt ki a jármű, akkor a vonóerő dinamikus változása okozza. Dinamikus hatást hoz létre a szlip is. Mivel az említett hatások sztohasztikus jellegűek, a létrejött lengések is véletlen jellegűek lesznek.

A lengések befolyásolják a gumibroncs-talaj kapcsolatot is. A statikus terhelés okozta gumi- és talajdeformációhoz képest járulékos terhelésnövekedés és ezáltal járulékos gumi- és talajdeformáció jön létre. A terepen való mozgáskor kialakuló gördülési ellenállás tehát ebből adódóan dinamikus folyamat, melynek értéke folytonosan változik. A korábbi felfogás szerint a gördülési ellenállás két komponensre bontható: gumi- és talajdeformációra. Ez a felbontás továbbra is érvényes azzal a bővítéssel, hogy a dinamikus terhelésváltozás járulékos gumi- és talajdeformációt hoz létre. Ezek a gördülési ellenállás-komponensek meghatározhatók.

A tolóerő (kerületi erő) szlip kérdéskörrel is többen foglalkoztak már. Az első kísérletek a talaj nyírószilárdságára vonatkoztak. Ezzel kapcsolatosan Söhne, Micklethwait, Bekker és Jánosi nevét fontos megemlíteni. A szlip kísérleti úton történő meghatározásában két hazai kutatónk Komándi és Sitkei fejtett ki nemzetközi hírű munkásságot. Szlipvesztés a gumibroncs-talaj kapcsoltában három helyen keletkezik. Legnagyobb arányban az érintkezési felület mentén jön létre az elcsúszás. Itt van a legnagyobb mértékű haladási iránnyal párhuzamos talajdeformáció. Ugyanilyen irányú de kisebb mértékű elcsúszás jön létre a talajban is. A Boussinesq-i féltér elmélet szerint elvileg a föld középpontjáig, valóságban azonban a talaj szerkezetétől és mechanikai tulajdonságától függően jelentősen korlátozott mértékig. Csekély mértékű, ún. alakváltozási szlip jön létre a gumibroncsban is.

2 Vizsgálati módszerek és eszközök

A gördülési ellenállás és szlip komponenseinek meghatározásához traktorral szabadföldi vontatási vizsgálatot végeztünk. Kilenc méréssorozatot vettünk fel. Ebből öt mérést 1.4 bar abroncslégnnyomás mellett, ezen belül egy mérés a traktor önálló haladásakor (8. mérés: üresmenet), négy mérést pedig eltérő sebességi fokozatokban. A további négy mérésnél változott az abroncslégnnyomás (0.6 bar – 1.4 bar, 0.2 bar lépésközzel). A talaj homokos vályogtalaj volt, 2.7 g/cm^3 sűrűségű (levegő és víz nélkül), nedvességtartalma 8% (száraz bázison), pórusvolumene pedig 46.1%. A vizsgálati traktor elől Michelin 540/65 R 26 X M 108-as, hátul pedig 650/65 R 38 X M 108 típusú gumiabronccsal rendelkezett. A traktor tömege 6040 kg volt, melyből 2715 kg jutott a mellső és 3325 kg pedig a hátsó tengelyre, hídmérlegen történt mérés alapján. A vontatási vizsgálatokat, egyenes, lejtéstől mentes mérőszakaszokon végeztük el, minden egyes vizsgálatot újabb és újabb, szűz területen. A vontatás dinamikájának feltárása miatt, a mérések nem a szabványban rögzített módon történtek. Így volt lehetséges a nagyobb szliptartományban ébredő veszteséget meghatározása, valamint a lejátszódó instacioneritás meghatározása. Mérés közben a vontatásenergetikai adatok rögzítése századmásodpercenként, a terepprofil mérések pedig 20 cm-es lépésköznként történtek. Az alkalmazott mérés technika lehetővé tette e két, külön rögzített adatok egymáshoz rendelését.

2.1 A talaj energiaelnyelésének meghatározása

A talaj energiaelnyelésének meghatározásához szükség volt a vízszintes (x,y) és a függőleges (z) irányú talajdeformáció nagyságára. Az x és y irányú talajdeformációt a mérési adatokból közvetett úton, számítással lehet meghatározni. Az x irányú talajdeformáció a szlippel arányos. Meghatározni a gumiabroncs felfekvési felületének hosszából és a szlip nagyságából lehet. A gumiabroncs felfekvési felületének geometriáját a vizsgálatok során, különböző abroncslégnnyomás mellett (0.6-1.4 bar) meghatároztuk. A szlipet a vontatási vizsgálat alatt századmásodperces mintavételezéssel mértük. Az y irányú (keresztirányú) talajdeformáció nagyságát a traktoron elhelyezett gyorsulásmérő jeléből határoztuk meg. A keresztirányú gyorsulásfüggvény második idő szerinti integráltja a keresztirányú elmozdulás-függvényt adja. A legnagyobb mértékű (függőleges, z irányú) talajdeformációt méréssel határoztuk meg. A méréshez talajprofilozó készüléket használtunk. A talaj az energiát elvileg a végtelen féltérben nyeli el (Boussinesq), a gyakorlatnak azonban korlátoznia kell ezt a teret véges méretűre. A deformációs energiákat ezért a mérhető, felszíni deformációból számítottuk ki, eltekintve a mélyebb rétegének tömörítésétől Kiss, Laib (2005). A talajdeformációs energiákat a következő egyenletekkel határoztuk meg:

$$W_x = \int_0^x F(x) dx \quad (1)$$

$$W_y = \int_0^y F(y) dy \quad (2)$$

$$W_z = A \cdot \int_0^z p(z) dz \quad (3)$$

Ahol: A a felfekvési felület, p a normál irányú talajnyomás, F y és z irányú erők

2.2 A gumiabroncs deformációs energiájának meghatározása

A gumideformációs munkát számítással határoztuk meg a

$$W_a = \psi \cdot Q \cdot l \quad (4)$$

képlet segítségével, ahol ψ a gumiabroncsra vonatkozó (szakirodalomból vett) gördülési ellenállási tényező, $\psi = 0,04$; Q a kerékterhelés; l a gumiabroncs felfekvési hossza.

2.3 Lengés okozta járulékos tömegező meghatározása

A lengésgyorsulások tömegezőket gerjesztenek, amelyek járulékos abroncs- és talajdeformációt hoznak létre. A deformációk során munkavégzés történik, amely veszteségként jelentkezik a gördülés során. A statikus kerékterhelésre $\Delta Q = m \cdot a$ dinamikus növekmény szuperponálódik, ahol m a kerékre jutó tömeget, a pedig a kerékközéppontban mért mértékadó, függőleges lengésgyorsulás nagyságát jelenti, amelyet gyorsulásjeladóval mértük. Ez a dinamikus növekmény járulékos energiavesztéseket okoz a talajban és a gumiabroncsban.

2.4 Lengés okozta járulékos talaj- és gumideformációs energia meghatározása

A gumiabroncs-talaj kapcsolat egyenértékű rugóállandója az abroncs és a talaj sorba kapcsolt rugóállandóiból tevődik össze. A talaj rugóállandója a nyomás-besüllyedés összefüggésből állapítható meg. Az érintkezési felületen a talajra ható erő:

$$F = \frac{k \cdot A}{D^n} z^n = c_{zs} \cdot z^n \quad (5)$$

ahol: k a talaj teherbírási tényezője; A felfekvési felület; D a felület ekvivalens átmérője; c_{zs} a talaj rugóállandója, n talajfüggő konstans $n=0.85$.

A dinamikus erőkomponens által végzett munka a talajban:

$$W_{ds} = c_{zs} \int_z^{z^*} z^n dz = \frac{c_{zs}}{n+1} (z^{*n+1} - z^{n+1}) \quad (6)$$

ahol z^* a dinamikus erőkomponenssel növelt kerékterhelés okozta pillanatnyi talajbenyomódás. A z^* meghatározása számítással az alábbi képlettel történt:

$$z^* = D \cdot \sqrt[n]{\frac{Q + \Delta Q}{A \cdot k}} \quad (7)$$

A gumiabroncsban hasonló módon számítható a dinamikus erőkomponenssel növelt terhelőerő munkája. Az abroncsok Q terhelése és h benyomódása között az alábbi általános összefüggés áll fenn:

$$Q = c_{za} \cdot h^{1,2} \quad (8)$$

ahol c_{za} a gumiabroncs rugóállandója; h az abroncs statikus benyomódása.

A dinamikus komponens által végzett munka a

$$W_{da} = c_{za} \int_h^{h^*} h^{1,2} dh = \frac{c_{za}}{2,2} (h^{*2,2} - h^{2,2}) \quad (9)$$

képlettel számolható ki, ahol h^* a dinamikus erőkomponenssel növelt kerékterhelés okozta pillanatnyi abroncsbenyomódás, amelynek meghatározása a

$$h^* = \left(\frac{Q + \Delta Q}{c_{za}} \right)^{0,833} \quad (10)$$

képlettel történt.

2.5 A gördülési ellenállás munkájának meghatározása

A gördülési ellenállás fentebb meghatározott komponenseinek összegét összehasonlítottuk a traktor szabadföldi vizsgálatok folyamatosan mért energetikai adatokból számolt gördülési ellenállás munkájával. A vontatási vizsgálat során meghatározott gördülési ellenállás teljesítménykomponenséből a gördülési ellenállás munkája meghatározható. A traktor pillanatnyi haladási sebességéből meghatározható a hajtott kerék alatti felfekvési hossz megtételéhez szükséges idő, illetve a kerék fordulatszámából pedig ezen hossz megtételéhez szükséges kerék-szögelfordulás $\hat{\varphi}$ nagysága. A gördülési ellenállás munkája:

$$W_r = \frac{P_r}{2\pi \cdot n_v} \cdot \hat{\varphi} \quad (11)$$

ahol: P_r a gördülési ellenállás teljesítményigénye (vontatási energiamérlegből meghatározva Kiss (2004)); n_v a traktor hajtott kerekének fordulatszáma.

3 Eredmények

3.1 A gördülési ellenállás komponensei

A gördülési ellenállás komponensszámításának alapadatait az 1 táblázat foglalja össze. A táblázatban az abroncs légnyomása, mérés közben a kerékközéppontban mért függőleges lengésgyorsulás nagysága, a talaj teherbírási tényezője, a gumiabroncs rugóállandója, az abroncs benyomódása, felfekvési felületének nagysága és hossza, a kerékterhelés és a talajbesüllyedés található. Az itt felsorolt adatokat méréssel, illetve mért adatokból számítással határoztuk meg. A 8. mérés (üresmenet) gördülési ellenállásának értékelését a többitől jelentősen eltérő tengelyterhelés miatt hagytuk el. Később a szlip értékelésekor viszont figyelembe vettük.

A 2. táblázatban a függőleges (z irányú) abroncs- és talajdeformációs munkákat, a lengés következtében létrejött terhelésnövekedés okozta deformációkat láthatjuk. Ez a táblázat tartalmazza a járulékos terhelésnövekedés ΔQ általi deformációs munkanövekményeket is.

A vizsgálat alatt a gumideformációs munka a mellső keréken 126.1-188 J között változott, a hátsó keréken pedig 362.1-448.4 J között volt. A lengések következtében létrejött terhelésnövekedéssel ΔQ növelt kerékterhelés ($Q + \Delta Q$) hatására létrejövő gumideformáció h^* mértéke a mellső- és hátsó keréken egyaránt 2.4 és 3.3 cm között volt. Ugyanezen terheléskomponens deformációs munkája az abroncsban elől 21.2-34.8 J, még hátul 38.9-73.1 J.

A talajdeformációs munka nagysága a mellső kerék alatt 86.5-303.2 J, még a hátsó kerék alatt 233,4-724 J intervallumban változott. A lengés következtében megnövekedett

talajdeformáció z^* nagysága az első keréknél 1.9-5.6 cm, a hátsó keréknél pedig 1.8 és 4.6 cm között változott. A dinamikus terhelésnövekmény ΔQ munkája a talajban a mellső keréknél 32.8-68.2 J, a hátsó keréken 49.3-124.4 J volt.

	Abrons- légnymás [bar]	Lengésgyorsulás [m/s ²]	Teherbírási tényező [bar]	A gumiabroncs Rugóállandó ja [N/cm]		Gumibenyo módás [cm]		Felfekvési felület hossza [m]		Felfekvési felület [cm ²]		Kerék terhelés [kN]		Talaj- besüllyedés [cm]	
	p	a	k	c _{za1}	c _{za2}	h ₁	h ₂	l ₁	l ₂	A ₁	A ₂	Q ₁	Q ₂	z ₁	z ₂
1.	1.4	1,05	5.355	3800	7600	2.3	2.2	0.329	0.470	1175	1764	10.37	19.26	4.6	2.7
2.	1.4	1,10	5.383	3800	7600	2.2	2.2	0.329	0.470	1175	1764	9.82	19.81	4.3	3.2
3.	1.4	1,80	12.91	3800	7600	2.2	2.2	0.329	0.470	1175	1764	9.70	19.93	1.5	1.2
4.	1.4	1,20	5.241	3800	7600	2.2	2.2	0.329	0.470	1175	1764	9.58	20.05	4.4	3.5
5.	1.0	1,05	7.870	3100	6100	2.7	2.6	0.389	0.512	1396	2034	10.21	19.42	2.6	1.7
6.	0.8	1,05	6.142	2800	5400	3.0	2.9	0.426	0.538	1535	2221	10.43	19.20	3.3	2.0
7.	1.2	1,15	5.700	3450	6850	2.4	2.4	0.357	0.490	1278	1885	9.83	19.80	3.8	2.9
8.	1,4	-	-	3800	7600	-	-	0.329	0.470	1175	1764	-	-	-	-
9.	0.6	0,85	3.840	2600	5000	3.1	3.1	0.470	0.571	1701	2465	10.00	19.63	5.1	3.7

1. táblázat: A gördülési ellenállás komponensszámításának alapadatai (1. indexelés: mellső kerék; 2. indexelés hátsó (hajtott kerék))

	Gumideformá ciós munka [J]		Járulékos terheléssel növelt gumideformá ció [cm]		Dinamikus terheléskompo nens munká ja a gumi abroncsban [J]		Talajdeformá ciós munka [J]		Járulékos terheléssel növelt talaj- besüllyedés [cm]		Dinamikus terheléskompo nens munkája a talajban [J]	
	W _{a1}	W _{a2}	h ₁ [*]	h ₂ [*]	W _{da1}	W _{da2}	W _{s1}	W _{s2}	z ₁ [*]	z ₂ [*]	W _{ds1}	W _{ds2}
1.	136.5	362.1	2.5	2.4	22,3	38,9	283,6	552,4	5.2	3.6	68,2	87,7
2.	129.2	372.4	2.4	2.4	21,2	43,0	251,1	632,3	4.9	4.2	61,9	108,4
3.	127.7	374.8	2.5	2.6	34,8	73,1	86,5	233,4	1.9	1.8	37,5	71,1
4.	126.1	376.9	2.4	2.5	22,1	48,1	250,6	691,2	5.0	4.6	57,6	124,4
5.	158.9	397.7	2.9	2.9	25,6	47,4	157,8	338,7	2.9	2.2	32,8	49,3
6.	177.7	413.2	3.3	3.1	29,0	51,4	204,7	400,4	3.7	2.7	48,1	64,0
7.	140.4	388.1	2.6	2.7	24,1	49,1	222,1	566,7	4.4	3.8	57,7	102,8
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.	188.0	448.4	3.3	3.3	23,0	45,8	303,2	724,0	5.6	4.6	56,5	94,1

2. táblázat: Járulékos terheléssel növelt függőleges deformációk és deformációs munkák (1. indexelés: mellső kerék; 2. indexelés hátsó (hajtott kerék))

A 3. táblázat a gördülési ellenállás komponenseit mutatja, kiegészítve a keresztirányú talajdeformációval. A táblázat tartalmazza a függőleges és keresztirányú komponenseket, valamint a függőleges dinamikus terhelésnövekedés okozta járulékos deformációs veszteségeket. A táblázat második oszlopa a vontatási méréssel meghatározott gördülési ellenállás teljesítményét mutatja, a traktor jobb oldalára vonatkoztatva, amely oldalra a komponensek meghatározása is történt.

Gördülési ellenállási veszteségek (komponensek)							
	P _{görd} a traktor jobb oldalára (vontatás energetikai adatokból) (kW)	P _z talajdefor máció (kW)	P _z din talajdefor máció (kW)	P _{z,y} gumidefor máció (kW)	P _{z,y} din gumideformá ció (kW)	P _y talajdefor máció (kW)	„Maradék” teljesítmény (kW)
1.	5,85	2,16	1,48	1,44	0,57	0,33	-0,13
2.	6,10	2,02	1,75	1,27	0,65	0,31	0,10
3.	7,00	0,83	1,92	1,45	1,89	0,36	0,55
4.	7,81	2,59	1,84	1,53	0,71	0,33	0,81
5.	3,85	1,09	0,68	1,34	0,59	0,22	-0,07
6.	3,85	1,41	0,51	1,49	0,36	0,21	-0,13
7.	4,85	1,68	1,27	1,24	0,57	0,29	-0,20
8.	-	-	-	-	-	-	-
9.	4,75	2,28	0,57	1,5	0,26	0,19	-0,05

3. táblázat: A gördülési ellenállás komponensei

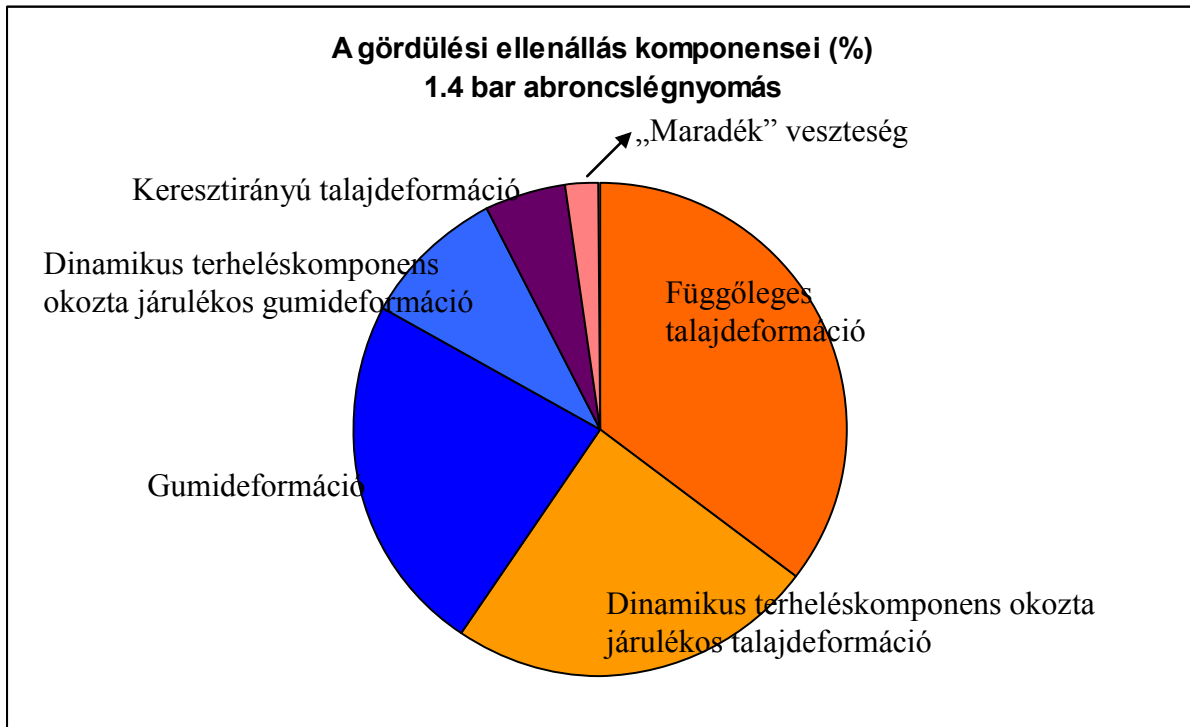
A táblázat 3-7. oszlopa a deformációkból meghatározott veszteségkomponenseket tartalmazza. A táblázat utolsó oszlopában az ún. maradék teljesítményt láthatjuk. Ennek értéke kicsi, mely a számítás helyességét igazolja. Ily módon a veszteségek (deformációk) oldaláról meghatározott energetikai komponensek összevethetők a vontatási vizsgálatokkal kapott energetikai adatokkal.

A 4. táblázatban a gördülési ellenállás komponenseinek százalékos aránya látható. Jól látható, hogy a gördülési ellenállás jelentős része a jármű függőleges statikus és dinamikus terhelésnek deformációjából ered. Jóval kisebb arányt képvisel a keresztirányú lengés okozta talaj és gumideformáció. Az 1. mérésorozathnál képviselt arányokat az 1. számú ábra mutatja.

Százalékos arány a P görd-höz						
	P _z talajdefor máció (%)	P _z din talajdefor máció (%)	P _{z,y} gumidefor máció (%)	P _{z,y} din gumideformá ció (%)	P _y talajdefor máció (%)	„Maradék” teljesítmény (%)
1.	36,9	25,3	24,6	9,7	5,6	2,2
2.	33,1	28,7	20,8	10,7	5,1	1,6
3.	11,9	27,4	20,7	27,0	5,1	7,9
4.	33,2	23,6	19,6	9,1	4,2	10,4
5.	28,3	17,7	34,8	15,3	5,7	1,8

6.	36,6	13,2	38,7	9,4	5,5	3,4
7.	34,6	26,2	25,6	11,8	6,0	4,1
8.	-	-	-	-	-	-
9.	48,0	12,0	31,6	5,5	4,0	1,1

4. táblázat: A gördülési ellenállás komponenseinek százalékos aránya



1. ábra: A gördülési ellenállás komponensei (1.sz. mérés)

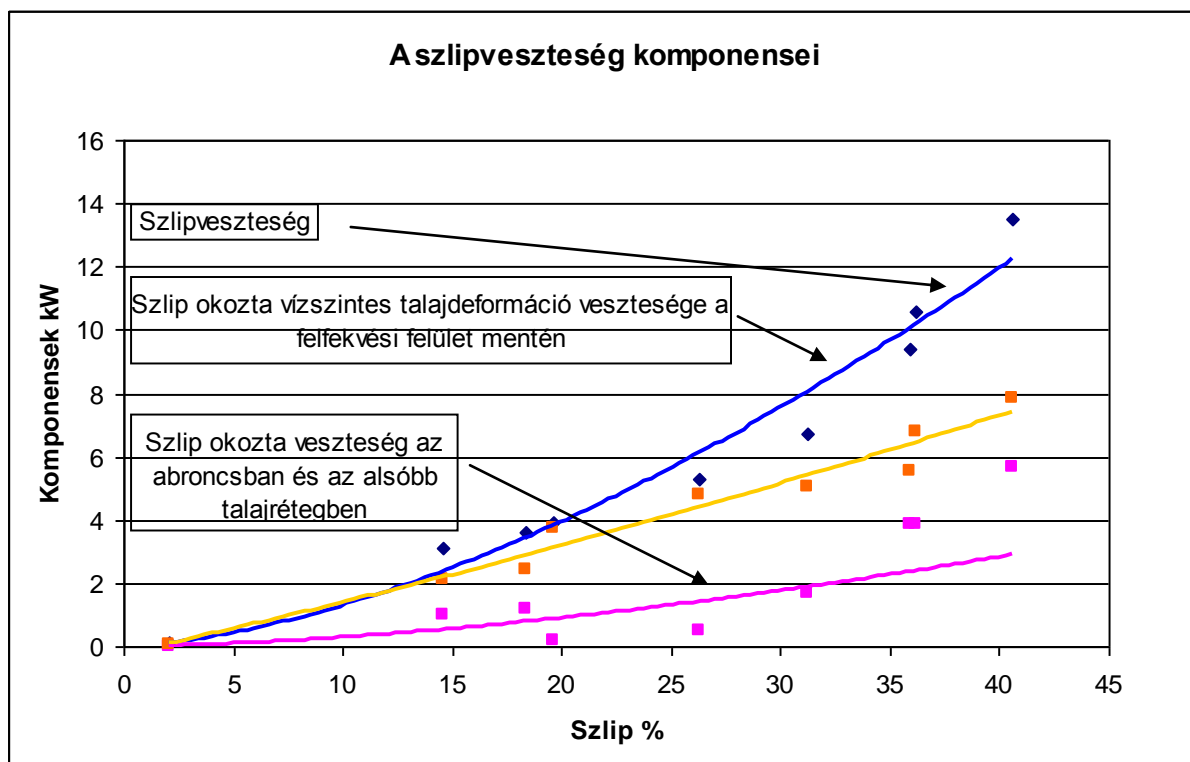
3.2 A szlipvesztés komponensei

Az 5. táblázatban a szlipvesztés komponensei láthatók. A gumiabroncs-talaj kapcsolatban a szlip három helyen keletkezik. Kis mértékű, ún. alakváltozási szlip jön létre a gumiabroncsban. Arányaiban nagy mértékű szlip keletkezik a kerék-pálya kapcsolatban létrejövő felfekvési felület csúszási zónájában. Ez a zóna lényegében a gumiabroncs bordázata között lévő talajt jelenti. És végül, közepes mértékű szlip van a csúszási zóna alatt lévő talajrészben. Az energetikai vizsgálatban a rendelkezésre álló adatok alapján nem lehetett mindhárom komponenst meghatározni és elkülöníteni. Viszont a domináns, a csúszási zónában létrejövő szlip meghatározható volt. A komponens-meghatározást itt is a traktor jobb oldalára végeztük el.

Szlipveszteségek				
	Pszlip a traktor jobb oldalára (vontatás energetikai adatokból) (kW)	P_x talajdeformáció (szlip okozta) (a felfekvési felület csúszási zónájában) (kW)	P_x szlip okozta deformáció gumiban és a csúszási zóna alatt a talajban (kW)	Szlip(%)
1.	3,6	2,42	1,18	18,4
2.	9,4	5,57	3,83	35,9
3.	10,6	6,77	3,83	36,2
4.	13,5	7,83	5,67	40,6
5.	5,3	4,81	0,49	26,3
6.	3,9	3,73	0,17	19,6
7.	6,7	5,03	1,67	31,2
8.	0,1	0,072	0,028	2,1
9.	3,1	2,13	0,97	14,6

5. Táblázat: A szlipveszteség komponensei.

A komponenseket grafikusán a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A szlipveszteség komponensei

3.3 Energiabszorpciós model

A fentebb bemutatott számítások és eredmények alapján a gumaibroncs-talaj kapcsolatában energiaabszorpciós modellek írhatók fel a

- **Gördülési ellenállásra**

$$G = T_{(z)} + T_{(y)} + T_{D(y,z)} + G_{(z)} + G_{D(y,z)} \quad (12)$$

kifejtve:

$$G = A \int_0^z p(z) dz + \int_0^y F(y) dy + c_{zs} \int_z^{z^*} z^n dz + \psi \cdot Q \cdot l + c_{za} \int_h^{h^*} h^{1.2} dh \quad (13)$$

- **Szlipveszteségre**

$$S = S_G + S_{csúszási\ zóna} + S_T$$

kifejtve:

$$S = S_G + \int_0^l S(l) dl + S_T$$

4 Következtetések

- A terepen való járműmozgás közben lengések jönnek létre. A lengéseket a tereprofil egyenetlensége, a talaj inhomogenitása okozza. A lengések következtében a terepen való mozgás dinamikus folyamattá válik.
- A lengések következtében járulékos tömegezők keletkeznek, növelve a gumideformáció és talajbesüllyedés, talajdeformáció mértékét, valamint ezzel együtt növelve a gördülési ellenállás nagyságát.
- A járulékos talaj- és gumideformációk arányosak a lengések okozta járulékos tömegező növekedések nagyságával.
- A talajdeformáció energiaigénye a deformációból és az azt létrehozó terhelés nagyságából határozható meg. A jármű mozgása közben a terhelés dinamikusan változik, a pontos energiaigényhez ezt a dinamikus hatást is figyelembe kell venni. A dinamikus változást a terep profilja, a talaj inhomogenitása, a gördülési ellenállás és a vonóerő folyamatos változása okozza.
- A talaj energiaelnyelésének meghatározása teljesebbé teszi a gumiabroncs-talaj kapcsolat műszaki paraméterrendszerét. Lehetőséget teremt újszerű, energetikai gumiabroncs minősítési rendszer létrehozására.
- A bemutatott eredmények elősegítik a terepjáró járművek és gumiabroncsok konstrukciós fejlesztését, valamint a szántóföldi technológiák műszaki folyamatainak

elemzését. A járműmozgás energetikájának jobb feltárása lehetővé teszi a gumi-abroncs-talaj kapcsolatot modellező programok pontosítását.

- Az energiaigény összefüggésben van a talaj CI értékével és a mechanikai paramétereivel, melynek pontos feltárása még további kutatást igényel.

A kutatási időszak kezdete óta a kutatómunkából az alábbi publikációk születtek:

1. Kiss, P.: A traktorkerék alatti talajdeformáció energiaráfordításának meghatározása. MTA Agrár-Műszaki Bizottság XXIX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Kiadványa, Gödöllő, 2005.
2. Kiss, P. Gurmai, L.: A tolóerő kialakulása és meghatározása terepjáró járműveknél. MTA Agrár-Műszaki Bizottság XXX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Kiadványa, Gödöllő, 2006. pp. 286-291.
3. Kiss, P. Laib, L.: Energy Determination of Vertical Soil Deformation in Case of Tractor Wheels and Soft Soil. In: Proceedings of the 15th International Conference of the ISTVS p. 3B03/8, Hayama, Japan, 2005.
4. Kiss, P.: Determination of Soil Deformation Energy. In: Proceedings of the International Scientific Conference Innovation and Utility in the Visegrad Fours, p. 541-546. ISBN 963 86918 08Ö, ISBN 963 86918 24, Nyíregyháza, Hungary, 2005.
5. Laib, L. Kiss, P. G. Antos, Ernyei, P.: The Effects of the Off-Road Vehicle on the Soil Cohesion and Internal Friction. In: Proceedings of the 10th European Conference of ISTVS, CD Session 3/26. ISBN 963 06 08324, Budapest, Hungary, 2006.
6. Kiss, P.: New results of the soil-tyre interaction: Energy Determination of Vertical Soil Deformation. Trakya University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery Tekirdag, Turkey, 2006. (oral presentation)
7. Kiss, P.: Research activity of Department of Automotive Technology. Trakya University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery Tekirdag, Turkey, 2006. (oral presentation)
8. Kiss, P. Laib, L.: Determination of rolling resistance components. In: Proceedings of the Joint North America, Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics, CD Session Paper no: 2007-52-0339, Fairbanks, Alaska, USA, 2007.
9. Kiss, P.: Energetical Modelling of Soil-tyre interaction. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (University of Technology of Belfort Montbéliard), France, 2007. (oral presentation)
10. Laib, L. Kiss, P. G. Antos, Ernyei, P.: The Effects of the Off-Road Vehicle on the Soil Cohesion and Internal Friction. Járművek és Mobil Gépek. (internetes tudományos folyóirat) I. évf. 2. szám (2008. november) pp. 132-153. HU ISSN 2060-4408 (<http://www.vehicles.hu>)
11. Kiss, P.: Determination of rolling resistance components. Járművek és Mobil Gépek. (internetes tudományos folyóirat) II. évf. 1. szám (2009. január) pp. 237-246. HU ISSN 2060-4408 (<http://www.vehicles.hu>)

Továbbá a témavezetésemmel, a kutatómunkához kapcsolódva két tudományos diákköri dolgozat (TDK) készült és egy PhD doktori kutatómunka folyamatban van.