

Gördülési súrlódási együttható mérése különböző felületeken laboratóriumi mérőberendezéssel

Laboratory measurement of rolling resistance coefficient on different surfaces

KOCSOR Péter (BSc)¹, VÖRÖS Bálint (BSc)¹, GUBA Sándor (PhD)¹,
HORVÁTH Barnabás (PhD)¹, SZALAI István (DSc)^{1,2}

¹Pannon Egyetem, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ, H-8200 Veszprém, Egyetem u. 10.

²Pannon Egyetem, Mechatronikai Képzési és Kutatási Intézet, H-8900 Zalaegerszeg, Gasparich Márk u. 18/A.

Tel: +36 88 624 000, e-mail: guba.sandor@mk.uni-pannon.hu

Abstract

The aim of our research is to design and construct a measuring device that can be used to determine the rolling friction coefficient (RFC) under laboratory conditions. The measuring device which uses drum measurement method can determine the RFC on three different model surfaces by force measurement, power measurement and angular deceleration measurement. During the tests, we compared the RFC values measured on different surfaces in cases of different compressive forces and angular velocities.

Keywords: rolling resistance coefficient, force measurement, angular deceleration measurement, power measurement, measuring device

Kivonat

Kutatásunk célja egy olyan mérőberendezés tervezése és megvalósítása, amellyel laboratóriumi körülmények között határozható meg a gördülési súrlódási együttható. A megépített mérőberendezés dob méréstechnika segítségével erőméréssel, teljesítményméréssel és szöglassulásméréssel képes meghatározni a GSE-t három különböző modell felületen. A tesztek során összehasonlítottuk a különböző felületeken mért GSE-t különböző összenyomó erő és kerületi sebesség esetében.

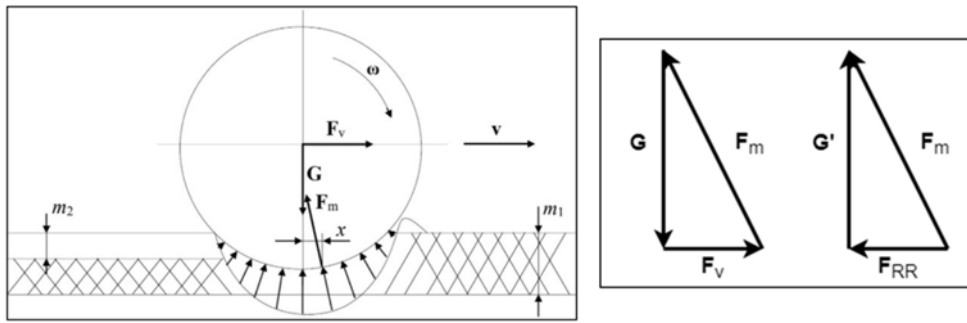
Kulcsszavak: gördülési súrlódási együttható, erőmérés, szöglassulásmérés, teljesítménymérés, mérőműszer

1. BEVEZETÉS

A gördülési súrlódási erő egy mozgást akadályozó erőhatás, amely egymáson elgördülő testek esetén, a kerék és a pálya kölcsönhatásának következtében lép fel. Jellemzésére a gördülési súrlódási együtthatót (GSE) használjuk, amely napjaink járműiparának egyik meghatározó fizikai tényezője. A gördülés következtében bekövetkező veszteségek első szisztematikus vizsgálatát Coulomb végezte 1785-ben, míg a legelső kísérleti módszer a gépjármű kerekek gördülési ellenállásának meghatározására Holt és Wormeley nevéhez fűződik [1].

Valamennyi gyártó különböző gumiabroncs anyagfelhasználással és mintázatkialakítással próbál kedvezőbb gördülési súrlódási tulajdonságú gumiabroncsot alkotni, amellyel tovább csökkenthető a gépjárművek üzemanyagfogyasztása, így az üvegházhatású gázok kibocsátása is. A felmérések alapján a GSE 10%-os csökkenése a felhasznált üzemanyagmennyiség közel 1%-os csökkenését vonja maga után [2].

A gördülési súrlódási erő többek között a felület, illetve a gördülő test deformációjából ered, amelyet az 1. ábra szemléltet.



1. ábra. Merev kerék mozgása állandó sebességgel, deformálódó útfelületen és az erőrendszer vektorábrái [3].

Az ω szögsebességgel gördülő test esetén a felület és a test egyaránt deformálódik. A deformáció természetes következménye, hogy erők lépnek, amelyek a deformációt gátolni igyekeznek. Az F_m az érintkezési felületen ható megoszló erőrendszer eredőjét szemlélteti. Az eredő felbontható egy függőleges és egy arra merőleges erőkomponensre, amelyek állandó szögsebesség mellett egyensúlyt tartanak a ható erőrendszer többi tagjával. Az állandósult mozgás fenntartásához az F_v erő járul hozzá, amellyel az F_m vízszintes erőkomponense tart egyensúlyt, míg a gördülő test tömegéből származó G erővel pedig az F_m függőleges összetevője.

A gördülési ellenállásnak előfordul több értelmezése is, mint erő, nyomaték, illetve munka is, azonban a továbbiakban erőként kezeljük, esetünkben az F_m vízszintes komponensét értelmezzük rajta. A gördülési súrlódási együttható származtatása az előbbieket alapján többféleképpen történhet. Munkánk során a gördülési súrlódási együtthatóra, mint dimenziótlan fizikai állandóra, az F_m vektor vízszintes és függőleges komponensének hányadosaként hivatkozunk ($GSE = F_{RR}/G'$) [4–6].

A gördülési súrlódási együttható nagysága attól függ, hogy az útfelület és a kerék milyen arányban, illetve mekkora mértékben deformálódik. Ez függ a kerék és az útburkolat anyagi tulajdonságaitól, a kerék és az útfelület érdességétől, a kerék átmérőjétől, a guminyomásától, a mozgó kerék sebességétől, valamint ezen mennyiségeket befolyásoló egyéb tényezőktől is (pl. hőmérséklet). Nagyságrendileg 0,001 és 0,400 közötti érték lehet.

2. MÉRŐRENDSZER

A gyakorlatban jelenleg négy elterjedtebb mérési elrendezést használnak, ezek azonban mind közvetett módon mérik a gördülési súrlódási ellenállást és abból következtetnek az együttható értékére:

- pótkocsis mérések,
- szabadon guruló járművel történő mérések,
- üzemananyagfogyasztáson alapuló mérések,
- dob mérések.

Minden mérési módszernek más-más előnyei és hátrányai vannak, nincs olyan mérési elrendezés, amellyel teljeskörű vizsgálatot végezhetünk. Az adott helyzethez és lehetőségekhez képest kell kiválasztani az optimális mérési módszert.

Mivel a dob mérés technika napjaink legelterjedtebb módszere a gördülési súrlódási erő és együttható meghatározására, az általunk tervezett mérőberendezés is ezen elv szerint készült. A mérőberendezés az útfelületet hordozó nagy átmérőjű dobból, az azt forgató hajtásláncból, egy teszt kerékből, a kereket és a dobot összeszorító mechanizmusból, valamint a méréshez szükséges szenzorokból áll. Az iparban a mérési körülményeket az ISO 18164:2005 és az ISO 28580:2018 szabványok rögzítik. A szabványok a dob mérés technikán belül erőméréssel, forgatónyomaték-méréssel, teljesítményméréssel és szöglassulásméréssel határozható meg a gördülési súrlódási erő, majd a dob és a kerék paramétereinek, továbbá az összenyomó erő segítségével a GSE meghatározható. A dob mérés technika sajátossága a görbült útfelület, amely azonban mérési hibát okoz, de az

$$F_{RR} = F_{RR,méert} \sqrt{\frac{r_{dob}}{r_{dob} + r_{kerék}}} \quad (1)$$

összefüggéssel korrigálható [7], ahol r_{dob} a dob, $r_{kerék}$ a kerék sugara.

A megépített berendezés erőméréssel, teljesítményméréssel és szöglassulásméréssel képes meghatározni a GSE-t három különböző modell felületen. A dobon gumi, szövet és szivacs felületeket alakítottunk ki, amelyek különböző felületi paraméterekkel rendelkeznek (2. ábra).



2. ábra. Az elkészített mérőberendezés a három különböző felületi paraméterekkel rendelkező bevonattal.

A dobot egy 0,28 kW teljesítményű Robax aszinkron motor hajtja. A motor vezérlését egy Siemens Sinamics Control Unit CU240E-2 PN végzi, amely egy Sinamics Power Modul 340-el áll összeköttetésben. A fordulatszámot BALLUFF (BES 516-360-S4-C) induktív szenzorral, mérőtárcsa segítségével lehet mérni. A kerék pozicionálását két egymásra merőleges lineáris egység végzi. A berendezés vezérlését Raspberry Pi-n futó, Python nyelven írt, grafikus felülettel rendelkező program végzi.

a. Erőmérés

A gördülési súrlódási erő és együttható mérésének legegyszerűbb módja az, ha közvetlenül erőmérést alkalmazunk. Az erőmérés rögzített elemeken, a tengelyeken történik adott összenyomó erő (F_{ny}) mellett. A berendezés két tengelyt tartalmaz, a kerék és a dob tengelyét, azonban mivel kis erőt kell mérni, így a precízebb mérés szempontjából célszerűbb azon a tengelyen végezni az erőmérést, amely eredően kisebb erőhatásnak van kitéve. Ezért a kerék tengelyén történik a mérés és a mért erőnek az érintővel párhuzamos komponense fontos. A tengelyen mért erőkomponens (F_{RR}) és a felületen ébredő gördülési súrlódási erő (F'_{RR}) nem egyezik meg, azonban F_{RR} meghatározható F'_{RR} alapján:

$$F_{RR} = F'_{RR} \frac{r_{dob} + r_{kerék}}{r_{dob}}. \quad (2)$$

b. Teljesítménymérés

A gördülési súrlódási erő közvetetten, a dobot meghajtó motor teljesítményfelvételének (P) megváltozásával is meghatározható. A mérés differenciálisan, két lépésben történik. Az első lépésben a dobot állandó sebességre (v) gyorsítják a kerék hozzányomása nélkül, és mérik a motor teljesítményfelvételét. Ezt követően, a második lépésben, a kereket a dobhoz nyomják, a dobot szintén állandó sebességre gyorsítják, és mérik a motor teljesítményfelvételét. A második esetben mért teljesítmény értéke az elsőhöz képest növekedni fog, hiszen a felvett teljesítménynek már elegendőnek kell lennie ahhoz, hogy a dob mellett a kereket is forgásban tartsa, ekkor:

$$F_{RR} = \frac{\Delta P}{v}. \quad (3)$$

Ennek a módszernek az előnye az, hogy a dob esetén fellépő csapágy- illetve aerodinamikai veszteségek nem hamisítják meg a mérési eredményt, hiszen ezek a differenciális mérésnek köszönhetően nem játszanak szerepet a gördülési ellenállás meghatározásában. Hátrányt jelent a dobot hajtó motor esetleges melegevése, ami befolyásolja a motor által felvett teljesítményt, így hibát okozhat a GSE mérésében.

c. Szöglassulás mérése

A szöglassulás mérésével történő meghatározás szintén egy differenciális módszernek tekinthető. A mérés a magára hagyott rendszer szöglassulásának mérésén alapul. Első lépésben a dobot állandó v sebességre gyorsítják, majd kikapcsolják a gyorsító berendezést a rendszerből, így a szerelvény lassulni kezd. A lassulást

mérik szöglassulás (β) formájában, majd a mérést megismétlik egy, a vizsgált kerékkal kiegészített szerelvényel, azaz a mérődobot és kereket adott erővel összenyomják.

A doból és kerékből álló szerelvény nagyobb szöglassulással rendelkezik, amely a kölcsönhatásukból származó veszteségnek tudható be. Ezen veszteséget a gördülési súrlódási erő okozza, amely a dob, illetve a kerék tehetetlenségi nyomatékát (I_{dob} és $I_{kerék}$) ismerve kiszámítható:

$$F_{RR} = \beta_{dob} \frac{I_{dob}}{r_{dob}} + \beta_{dob} \frac{I_{kerék} \cdot r_{dob}}{r_{kerék}^2} - \beta_{t. kerék} \frac{I_{kerék}}{r_{kerék}} - \beta_{t. dob} \frac{I_{dob}}{r_{dob}}, \quad (4)$$

ahol β_{dob} a terhelt dob, $\beta_{t. dob}$ és $\beta_{t. kerék}$ a terheletlen dob és kerék szöglassulása.

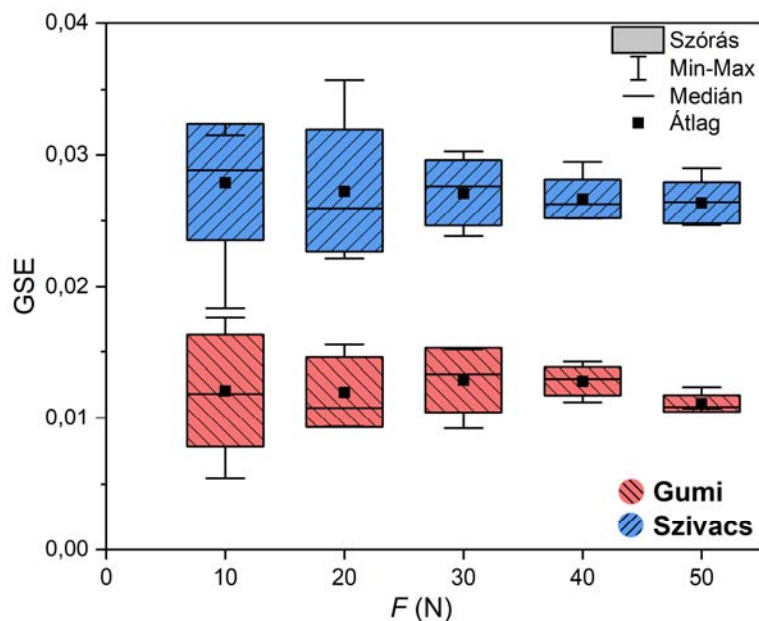
A szöglassulásmérés további előnye a teljesítményméréssel szemben, hogy ennél a módszernél a motor melege sem jelenik meg hibaforrásként, így az eredmények bemutatásánál az ezzel a módszerrel mért adatokat használtuk. Végül mindhárom mérési eljárással összehasonlítást végeztünk azonos paraméterek mellett.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A fent ismertetett mérési módszerekkel állandó guminyomás mellett végeztünk méréseket. Az összenyomó erőt 10 N és 50 N között, a kerületi sebességet pedig 5 km/h és 10 km/h között változtattuk. A kapott eredményeket a felületek tulajdonságai, az összenyomó erő és a kerületi sebesség alapján értékeltük. Mivel a szivacs és szövet felületek hasonlóak, az összehasonlítást a gumi és a szivacs felületek között végeztük el.

a. Összenyomó erő

Az összenyomó erő hatásának vizsgálatok az erőt 10 N és 50 N között, 10 N-os lépésközzel változtattuk. A dob forgási sebessége 5 km/h volt. Az egyes beállítások mellett 6 párhuzamos mérést végeztünk. A 3. ábrán a szöglassulásméréssel meghatározott GSE adatai láthatók.

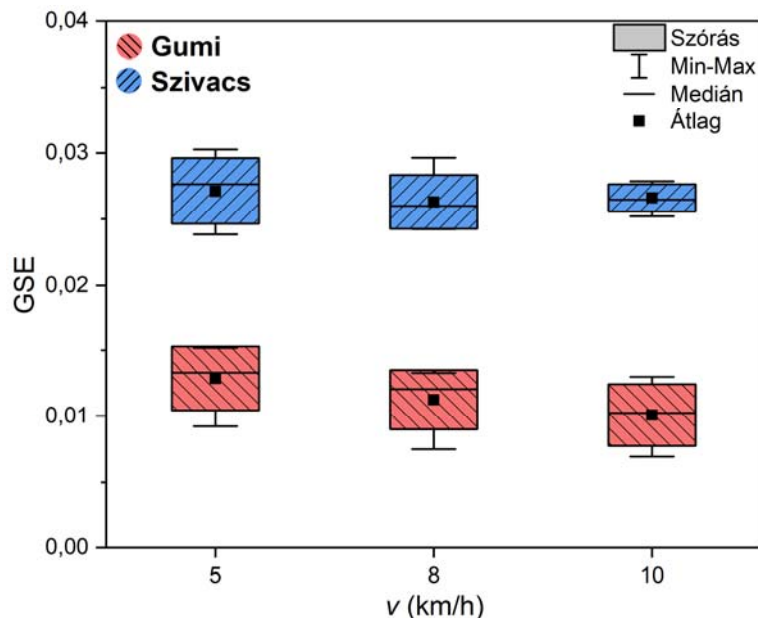


3. ábra. A GSE meghatározása szöglassulás mérésével különböző összenyomó erők mellett gumi és szivacs felületeken 5 km/h sebesség mellett.

Az egyes összenyomó erőknél mért súrlódási együttható nem változott jelentős mértékben, gumi felületen átlagosan 0,012-t, szivacs felületen pedig átlagosan 0,027-t mértünk. Az irodalom alapján a gumi felületen mért GSE az aszfalt, a szivacs felületen mért GSE pedig a kavicsos útfelület adataihoz áll közel [4]. A várakozásoknak megfelelően a szivacs felületen ez átlagosan 123 %-kal nagyobb súrlódási együtthatót jelent. Megfigyelhető, hogy kisebb összenyomó erő mellett az adatok szórása nagyobb. Ennek oka, hogy a dob nem tökéletesen kör keresztmetszetű, így a kerék és a dob érintkezése sem egyenletes. Az összenyomó erő növelésével azonban ennek hatása csökken.

b. Kerületi sebesség hatása

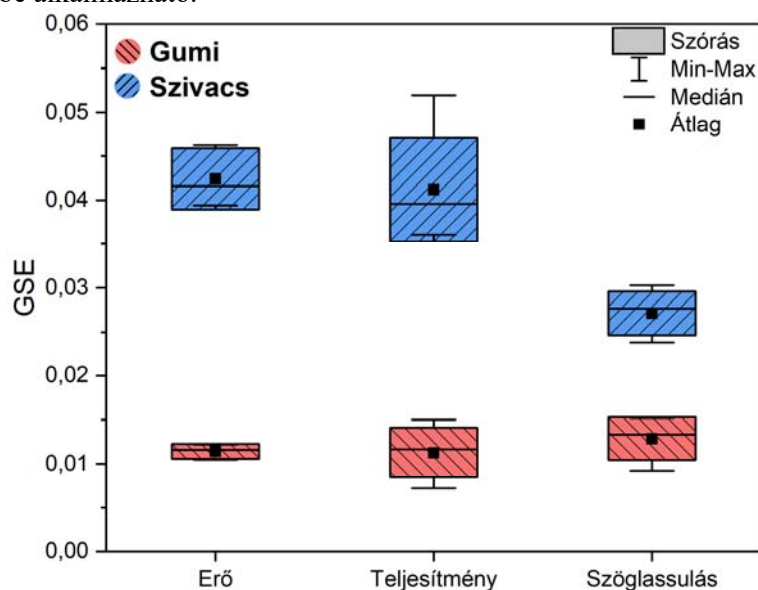
A kerületi sebesség hatásának vizsgálatakor minden esetben 30 N összenyomó erőt alkalmaztunk és mérési pontonként 6 párhuzamos mérést végeztünk. A kerületi sebességet 5 km/h, 8 km/h és 10 km/h-ra állítottuk be (4. ábra). A szivacs felületen mért adatokban nem figyelhető meg jelentős mértékű változás, azonban a gumi felületen kismértékű csökkenést tapasztaltunk. Ebben a sebességtartományban az irodalmi adatok alapján is hasonló trend figyelhető meg [8]. A későbbiekben a műszert egy nagyobb lépésközű méréssorozattal is teszteljük.



4. ábra. A kerületi sebesség hatása a szöglassulás módszerével mért GSE értékre gumi és szivacs felületeken 30 N összenyomó erő mellett.

c. Különböző módszerekkel mért GSE összehasonlítása

Az erő-, teljesítmény- és szöglassulásmérés módszerével mért adatok a gumi felület esetében jó egyezést mutattak. A mért értékek 9,9%-on belül azonosak voltak. Szivacs felület esetében azonban a szöglassulásméréssel mért GSE 35,4%-kal kisebb a másik két módszerrel mért értéknél. Ez a szivacs réteg erősebb deformációjával magyarázható. Ebből következik, hogy a szöglassulásmérés módszere ilyen modell felületek esetén kevésbé alkalmazható.



5. ábra. A különböző módszerekkel mért GSE értékek 30 N összenyomó erő és 5 km/h sebesség mellett.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során egy gördülési súrlódási együttható mérésére alkalmas, dob mérés technikán alapuló laboratóriumi berendezés tervezését és megvalósítását végeztük el. A megépített mérőeszköz erőméréssel, teljesítményméréssel és szöglassulásméréssel képes meghatározni a GSE-t három különböző modell felületen. A kísérletek során vizsgáltuk a különböző felületeken mért GSE függését az összenyomó erőtől és a kerületi sebességtől. Megállapítottuk, hogy kis összenyomó erő esetén (20 N alatt) a mért GSE értékek szórása nagy, de nagyobb összenyomó erőknél a dob felületi egyenetlenségeinek hatása csökken. A sebességváltozás hatásának vizsgálatakor kis sebességtartományban (<10 km/h) nem tapasztaltunk jelentős változást a GSE értékekben, azonban további vizsgálatok elvégzését tervezzük nagyobb kerületi sebességeknél is. A három mérési módszer összehasonlításakor megállapítottuk, hogy szivacs felületen a szöglassulásmérés eredménye jelentősen eltér a másik két módszerrel mért értéktől.

A jövőben egy továbbfejlesztett mérőberendezéssel a GSE hőmérsékletfüggését is vizsgáljuk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közlemény a TKP2020-NKA-10 számú projekt keretében az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020. évi Tématerületi Kiválóság Program pályázati program finanszírozásában valósult meg. A programot a ZalaZONE Autóipari Próbapálya Zala Kft. támogatja.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] P. Kumar, D.K. Sarkar, S.C. Gupta, Rolling resistance of elastic wheels on flat surfaces, *Wear*. 126 (1988) 117–129. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90133-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90133-0).
- [2] K. Wiratkasem, S. Pattana, The effect of motorcycle tyre rolling resistance coefficient on the saving of fuel consumption, *Energy Reports*. 7 (2021) 248–252. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.042>.
- [3] P. Kocsor, B. Vörös, A gördülési súrlódási együttható kísérleti meghatározása, in: *Pannon Egyetem Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia 2021, 2021*.
- [4] M. Ehsani, Y. Gao, A. Ernadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*, 2nd ed., CRC Press, 2009.
- [5] T. Bercsey, L. Tuskó, *Gépjárműtechnika*, Typotex Kiadó, 2012.
- [6] M.R. Bharat, D. Sidharth, *Tyre modelling for rolling resistance*, Chalmers University of Technology, 2014.
- [7] Nemzetközi Szabványügyi Szervezet, ISO 28580:2018, Passenger car, truck and bus tyres — Methods of measuring rolling resistance — Single point test and correlation of measurement results, 2018.
- [8] B.P. Wiegand, Estimation of the Rolling Resistance of Tires, *SAE Tech. Pap.* 2016-April (2016). <https://doi.org/10.4271/2016-01-0445>.