

Dinamikus keréktalperő mérés a közúti forgalomban

Gyorsulásmérési adatokból meghatározható a gépjármű kerekére ható terhelés mértéke, ami az aszfaltburkolatra átadódik rongálva a pályaszerkezetet. A terhelés nagyságát a jármű sebessége és a burkolat felületi minősége befolyásolja. Az útpályaszerkezetek hátralévő élettartam számítására különböző matematikai modelleket alkalmaznak, függően a rendelkezésre álló adatoktól. A kutatás arra irányul, hogy a hátralévő élettartam becsléshez szükséges dinamikus keréktalperő meghatározásához kidolgozásra kerüljön egy mérési módszer.

DOI 10.24228/KTSZ.2021.2.4

Mika Péter

Széchenyi István Egyetem, Győr
e-mail:mika.peter@sze.hu

1. BEVEZETÉS

Az útburkolat-gazdálkodás széles körben kutatott terület. A múlt század közepe óta számos cikk foglalkozott a pályaszerkezetek tönkremenetelével, a méretezéssel, illetve a hátralévő élettartam becslésével [1]–[3]. Számos becslési módszert dolgoztak ki, amelyek a pályaszerkezet éppen aktuális teherbíró képességének megállapításán alapulnak. Egyre több ország vizsgálja és követi nyomon az útpályaszerkezetek teljesítményét. Ezeket a teljesítmény mérőszámokat az Európai Unió 2004-ben indított COST 354-es akciójának keretén belül határozták meg, amelyek közül a legfontosabb ilyen mérőszám az útpályaszerkezet teherbíró képességének jellemzésére szolgál. A legtöbb európai ország a behajlást tekinti műszaki paraméternek, amelynek egyik mérőeszköze az FWD (Falling Weight Deflectometer) berendezés. Ezzel mintegy 4500 km hosszú úthálózat ál-

lapotfelmérését lehet egy év alatt elvégezni. A magyarországi teljes úthálózat bemérése egy mérőautó használatával évekbe telik.

A behajlásmérés roncsolásmentes vizsgálat, amelynek során a teherbíró képesség számításához az egyes rétegek modulusait is meg kell határozni. A behajláson alapuló teherbírásmérés elve, hogy miközben az anyag elfárad az azonos terhelés mellett egyre nagyobb lesz a behajlás mértéke. A pályaszerkezetek roncsolásmentes vizsgálatára és a rugalmassági modulus visszaszámolására dolgozott ki eljárást *Bush és Baladi* 1989-ben [4]. Ennek eredményeképpen a modern szenzorok és rendszeridentifikációs technika párosításával, meghatározható a pályaszerkezet rétegvastagsága, aszfalt vagy víztartalom, rugalmassági modulus, csillapítási tényező, kúszás és a relaxáció. Ez a módszer tehát az elsődleges vizsgálati mód a pályaszerkezet anyagtulajdonságainak meghatározásában.

Ezzel a mérési eljárással lehetőség van a pályaszerkezet hátralévő élettartamának becslésére is.

Amennyiben a hátralévő élettartam meghatározása a cél, akkor lehetséges egy újfajta megközelítés, amely szintén roncsolásmentesen képes becslést adni az élettartamra. Ez pedig a dinamikus keréktalperő változásának az érzékelésén alapszik, ugyanis ez jelenti a pályaszerkezet fizikai terhelését, ami az állapotromláshoz vezet. A kialakult többletterhelést a pálya deformációja, illetve a forgalom áramlás sebessége okozza. A dinamikus keréktalperő meghatározásához a jármű rugózott és rugózatlan tömegének gyorsulását kell mérni. A gyorsulási értékek rögzítése menet közben lehetséges, ráadásul háromtengelyes szenzorral egy időben három irány is mérhető, így akár a megtett távolság meghatározására is lehetőség adódik.

A függőleges kerékterhelés időben rendszeresen változó fizikai paraméter. A különböző járműtömegek, a gravitációs középpont, a kerékelfüggesztés, a lengéscsillapító fajtája, a csillapítási tényező, a gumiabroncs típusa, szerkezete, nyomása, sőt még az útfelület egyenletessége is mind befolyásoló tényező. A szakirodalomban számos tanulmány foglalkozott a dinamikus keréktalperő változásának modellezésével [5], [6]. Lechner (2002) modelljében figyelembe veszi a szuperpozíció elvét, feltételezve, hogy a hosszanti és oldalirányú gyorsulások függetlenek. Van, aki 14 szabadság fokú modellel számol [7], ahol a forgásközéppont dinamikáját használja fel a függőleges erő megállapításához. Nielsen [8] munkájában a hosszanti és oldalirányú gyorsulások összekapcsolásával határozza meg a keréktalperőt. Wenzel [9] kutatásában egy Kálmán szűrőt, a DEKF-et (Dual Extended Kalman Filter) használt a keréktalperő becsléséhez. Ezek a tudósok megállapították, hogy a kapott eredmények különböznek a statikus állapotban mért adatoktól, amely eltérés a jármű tömegáthelyeződés számításai hibájának tulajdonítható.

Az 50-es évek kutatásai is foglalkoztak a gépjármű-tengelyterhelés korlátozásának

kérdésével, mivel ez a pályaszerkezetet jelentős mértékben rongálja, ráadásul a pályaszerkezet tervezésénél is a tengelyterhelést veszik alapul. A gépjárműgyártók nem nagyon vették figyelembe a jármű tengelyére megengedhető súlyterhelést, ezért a közúttal foglalkozó szakembereknek folyamatosan lépést kellett tartani a gépjárművek fejlődésével. Az akkoriban épült utak szerkezete hamar tönkrement a növekvő gépjárműsúly és a forgalom miatt, ami nyomvályúkhoz, repedésekhez, kátyúk kialakulásához vezetett. De ez nem csak a burkolatra jelentett veszélyt, hanem a járművekre is. A menetrend szerint közlekedő járművek ráadásul még útvonalat sem választhattak, ezért gyakran előfordult rugó törés, ami a székesfehérvári 68. sz. Autóközlekedési Vállalat adatai alapján 1957-ben 1161 db rugóköteg cserét jelentett, így számottevő többletköltséget okozva a fuvarvállalatnak [10]. A rugótörések oka visszavezethető a többletterhelésre, ami az útvonal rossz állapota, felületi hibája miatt következett be. A korszerű gépjárművek futóműveiben lévő rugót a gépkocsi egész élettartamára tervezik, ennek ellenére a mai napig előfordul idő előtti rugótörés. Ebből az következik, hogy a meglévő rossz állapotú útjaink a tervezett tengelyterhelésnél nagyobb terhelésnek lehetnek kitéve, amit sem a jármű sem pedig az útpályaszerkezet nem visel el, tehát idő előtt következik be repedés, törés.

A cikk fő célkitűzése egy mérési módszer kifejlesztése, illetve bemutatása, amely alkalmas a jármű felfüggesztésére szerelt és a jármű utasterében elhelyezett szenzor adataiból egy meghatározott útszakaszra jellemző kerékterhelés mérésére közúti forgalomban.

A vizsgálathoz megfogalmazott kutatói kérdések:

- Mekkora gyorsulás keletkezik egy rossz minőségű útburkolaton?
- Járműtípustól függetlenül lehetséges a mérés?
- Milyen arány van a rugózott és a rugózatlan tömegen mért gyorsulások között?
- Milyen módszerrel számítható egy adott útszakaszon mért gyorsulástartományokból az

útszakaszra jellemző átlagos dinamikus keréktalperő?

- Van-e összefüggés a rugózott és a rugózatlan tömegem mért gyorsulásértékek közt?

2. AZ ÚTHIBA ÉS A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ KAPCSOLATA

Az első vizsgálat arra irányul, hogy megtudjam mekkora erőhatás éri egy, a közlekedésben részt vevő jármű futóművét, illetve felépítményét egy vélt legrosszabb szituációban. Ehhez egy konkrét kátyún történő áthajtás során keletkezett gyorsulásértékeket vizsgáltam meg. A kiválasztott kátyú mélysége 8 cm az átmérője 72 cm, ami relatív nagynak mondható. Elvégeztem a kátyú felületének bemérését, a mért adatokból pedig felületmodellét készítettem. Feltevéseim szerint azon az útszakaszon, ahol ekkora méretű kátyú van, ott sebességhatározásra is lehet számítani, ezért a mérést 30 km/h maximális sebesség mellett végeztem el.

Ha a kerékre jutó tömeget állandónak tekintjük, akkor a gyorsulás változása fogja az erő változását okozni, ezért kell ezt mérni. Természetesen a jármű felépítménye az útburkolat egyenetlensége miatt vagy a fékezés és gyorsításból származó tehetetlenségi erő hatására a bólintási centrum körül elfordul. A felépítmény súlypontja kimozdul, ami miatt a kimozdulás irányába eső kerekekre nagyobb erő hat, de ebben a vizsgálatban ettől eltekintek, mivel a talperő változásának kimutatása a cél, ez pedig nyilvánvalóan változni fog.

Az útpályán haladó jármű a futóművén keresztül adja át a terhelést a pályaszerkezetnek. Az erőhatásokból az egyes pályaszerkezeti rétegekben kialakuló feszültségek eltérő hatást fejthetnek ki, ilyenek a rugalmas és a plasztikus alakváltozás, a törés és a szerkezeti átalakulás [11]. Egy jól megtervezett és megépített pályaszerkezetben csak rugalmas alakváltozás engedhető meg. A tönkremenetel során felületi hibák alakulnak ki. A tönkremenetel akkor következik be, amikor az aszfaltréteg alsó szálában keletkező húzófeszültség a kifáradási határfeszültséget meghaladja. Ekkor repedések indulnak meg felfelé, és a burkolat felszínén összefüggő hálós repedés jelenik

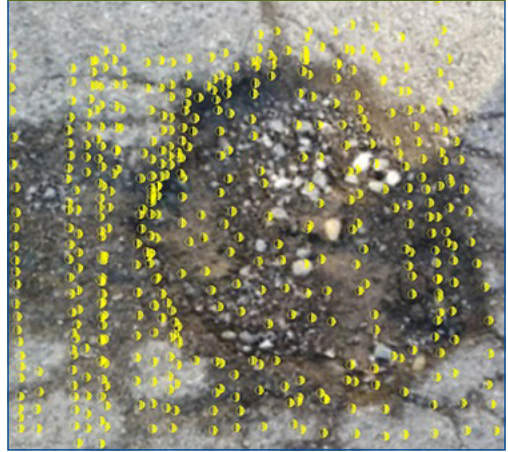
meg. A hajlékony pályaszerkezet nagyobb hajlítási igénybevételt szenved el, vagyis nagyobb eséllyel keletkezik repedés ugyanannál a forgalomnál.

A vizsgálathoz felhasznált eszköz:

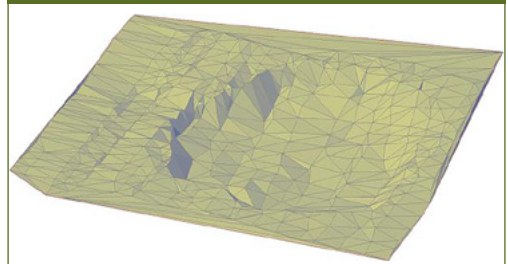
- *Távolságmérő:* Leica Disto S910+Tripod

A felületmodell készítéséhez szükséges a bemért pontok koordinátája, amelyet a lézeres távolságmérővel rögzítettem. A bemért pontok sűrűségét 2-3 cm távolságban határoztam meg, ez megfelelő felbontást nyújt a felület pontos leképezéséhez. A műszer tized milliméteres pontossággal képes a távolságot mérni, amely a vizsgálathoz megfelelő. A pontokat a kátyún kívül eső felületen is bemértem a menetiránynak megfelelően kissé elnyújtva, ahogy az **1. ábrán** látható.

1. ábra: A bemért pontok
(saját szerkesztés)



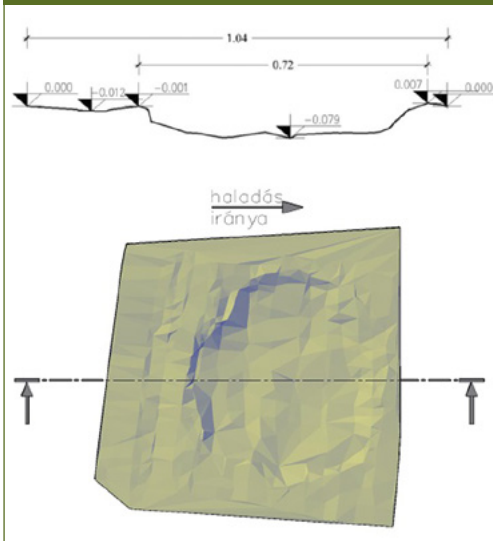
2. ábra: A bemért pontokból készült 3D felület modell (saját szerkesztés)



A bemért pontokból elkészítettem a felületmodellt, a háromszögelés módszerével (2. ábra), amelyből a keréknyom vonalában egy hosszszelvényt készítettem (3. ábra). A felületmodell 483 pontból áll és 1,03 m² a kétdimenziós kiterjedése.

A szelvényből kiderül, hogy mekkora a kátyú legnagyobb mélysége a pályaszínhez viszonyítva és az átmérő is meghatározható. A 3. ábra szemlélteti a felületmodellből készített szelvényt és annak pozícióját.

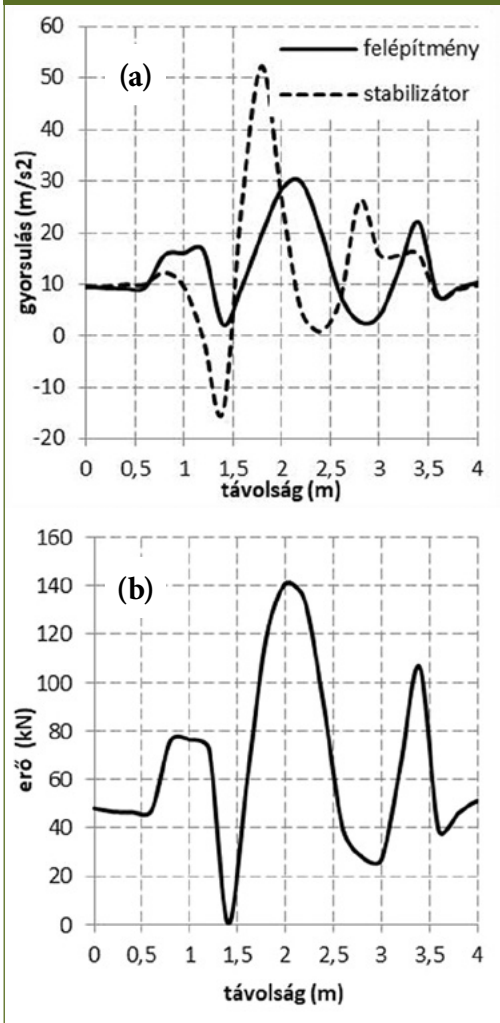
3. ábra: A felületmodellből készített szelvény és a szelvény nyomvonala (saját szerkesztés)



A bemért útprofil és a dinamikus keréktalperő összehasonlításához a kátyún át kell hajtani a mérőkocsival, és közben a kerék, illetve a felépítmény függőleges gyorsulását mérni. A mérésből kiderül, hogy adott sebesség mellett egy adott profilú kátyú mekkora gyorsulást idéz elő, illetve hogy alakul a dinamikus keréktalperő. A számítás során az egységtengeletet vettem figyelembe. A mérés eredményét a 4. ábrán mutatom be.

A kátyún 30 km/h-s sebességgel áthajtva 52 m/s² gyorsulást mértem a stabilizátoron és 30 m/s² a felépítményen.

4. ábra: A kátyú okozta gyorsulásváltozás (a) és a keletkezett dinamikus keréktalperő (b) (saját szerkesztés)



3. JÁRMŪDINAMIKAI SZEMPONTOK

Annak eldöntése, hogy függ-e a jármű típustól a dinamikus keréktalperő mérés, különböző kategóriájú járművekkel végeztem mérést ugyanazon az útszakaszon. Mindkét járműtípuson a rugózott és rugózatlan tömegem került elhelyezésre szenzor, és pontosan ugyanazon a szakaszon történt a mérés. Az egyik egy Opel Astra J, a másik jármű pedig Csepeľ D755-10 volt.

Ha járműdinamikai szempontból közelítjük meg a dinamikus keréktalperő meghatározását, akkor a lengéscsillapító diagnosztikát kell áttekintenünk. Számos tényező befolyásolja a kerék függőleges gyorsulását, amivel a járműtervező mérnökök a lengéscsillapítók, futóművek tervezésénél számolnak. A legfontosabb kérdés a közlekedésbiztonság, de kényelmi szempontokat is figyelembe vesznek.

A kerék és a burkolat közötti normál erő ismerete közlekedésbiztonsági szempontból nélkülözhetetlen. Ez a függőleges erő meghatározza a jármű stabilitását, a kanyarban a merevségét, amely a vízszintes irányú tapadó erőt befolyásolja. A burkolat terhelése szempontjából, mind a függőleges, mind pedig a vízszintes erőnek szerepe van. A hátralevő élettartamnál figyelembe vett erő vizont a függőleges dinamikus keréktalperő, mivel az aszfalt alsó szálában kialakuló feszültség jelenti a kritikus terhelést, ami tulajdonképpen egy, a függőleges erőből származó hajlító feszültség. A következő fejezetben leírtak szerint a gyorsulásszenzor segítségével meghatározható ez az erő, de kérdés, hogy megfelelő-e a számítás pontossága? A hátralevőélettartam-becslő modellemben az egység tengely figyelembevételével meghatározott statikus tengelyterhelés közelében egy 1 kN-os terhelés változás akár 6 hónap eltérést is eredményezhet a becsült élettartamban, amit még elfogadhatónak tartok.

Lengéstani szempontból a legkellemetlenebb az önfrekvenciával megegyező gyakoriságú egyenetlenség. Ha az út nem tökéletesen sík, akkor a tapadási erő folyamatosan változik a kerékfelfüggesztés rugalmas elemeitől és az út egyenetlenségétől függően. Tehát egy adott járműnek a kerékterhelése, adott profilú út esetén egy minimum és egy maximum érték közt változik. A gépjárművek függőleges lengései több szempontból is károsak lehetnek [12], nő a gépjárművezető igénybevétele, romlik az utazási komfort, növekszik a felépítmény, a futómű igénybevétele, a talajra jutó erő. A függőleges lengés csökkenthető az útburkolat profilozásával, a felfüggesztés karakterisztikájának célszerű megválasztásával.

A jármű lengéseinek elemzéséhez a járművet, mint lengőrendszert szükséges tekinteni. A cél a dinamikus keréktalperő változásának meghatározása, amelyet a járművön, mint lengőrendszeren belül két tömeg határoz meg, az egyik a rugózatlan, a másik pedig a rugózott tömeg. A rugózott tömeg lengéseit hivatott csökkenteni a lengéscsillapító, ami csökkenti a lengés amplitúdóját, de ez nem jelenti azt, hogy elhanyagolható az ebből származó erőváltozás.

A következőkben a rugózott és a rugózatlan tömeg gyorsulásait vizsgálom különböző sebességek mellett. Lengésdinamikai szempontból több tényező is befolyásolja a dinamikus talperőt, úgymint a lengéscsillapító állapota, a gumiabroncs nyomása, a hőmérséklet, a csillapítási tényező, a gumiabroncs rugóállandója. Mivel ezek a paraméterek a mérés során nem változnak, ezért ezeket a tényezőket ebben a vizsgálatban elhanyagolhatónak tekintem.

Fontos megjegyezni, hogy ha a mérőjármű lengéscsillapítója elégtelen, akkor nem alkalmas egyáltalán a dinamikus keréktalperő mérésre. A lengéscsillapító vizsgálata úgy történik, hogy 24 Hz frekvenciával gerjesztik a rendszert, majd magára hagyják, és a csillapítás során keresztül megy a saját frekvenciáján, ahol a legnagyobb lesz a lengés amplitúdója. Ebből pedig meghatározzák a statikus és a dinamikus keréktalperő hányadosát.

A további vizsgálathoz fontos tudni, hogy a különböző járműkategóriák esetén, hogy alakul a felépítmény és a kerék gyorsulása. A két kategóriában mért adatokat az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat: A mért gyorsulások (m/s²) arányai személygépkocsi és teherautó esetén különböző sebességek mellett (saját szerkesztés)

	30km/h		50km/h	
	szgk	tgk	szgk	tgk
rugózatlan tömeg	34,30	33,93	39,21	40,21
rugózott tömeg	15,92	15,88	16,78	18,93
Arány	2,15	2,14	2,34	2,12

Mivel jelentős eltérés van a két szenzoron mért gyorsulás között, emiatt a dinamikus keréktalperő meghatározásához mindkét tömegben szükséges a gyorsulást mérni. Az is megfigyelhető, hogy a rugózott és rugózatlan tömegben mért gyorsulások arányai nem azonosak egymással. Ha összehasonlítjuk a személygépjármű, illetve a tehergépjármű rugózott és rugózatlan tömegein mért gyorsulásokat meghatározott sebesség mellett, akkor azt tapasztaljuk, hogy nagyságrendileg azonos értékeket kapunk. Ez azt jelenti, hogy járműtípustól függetlenül a mért adatok átszámíthatók minden további nélkül az egysegtengelyre.

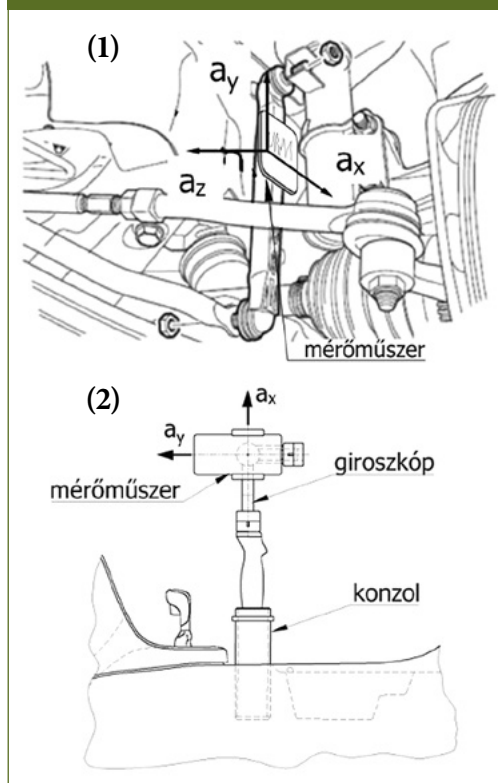
4. A JÁRMŰ LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

A közúti forgalomban történő mérés során, a járművön elhelyezett szenzorok érzékelik a rezgést. A rezgés kialakulása nem csak a pálya felületi hibájából ered, hanem a jármű működéséből is keletkezhet. Emiatt el kell végezni a jármű laboratóriumi vizsgálatát, amiből kiderül, hogy mekkora mértékű rezgések keletkeznek, ha kizárjuk az útfelületből származó rezgéseket. Ez a mérés felfogható úgyis, mintha tökéletes útfelületen haladna a jármű. A vizsgálatot a Széchenyi István Egyetem laboratóriumában végeztem Óri Péter kollégám segítségével.

A mérési módszer kifejlesztéséhez előzetesen szükséges a járművön elvégezni egy próbamérést, amellyel kiszűrhető a mérésbe bevitt hiba. A járműre felszereltem az érzékelőket ugyanúgy, mint amikor közúton végzem a mérést. A jármű kerekének gyorsulását a forgásközépponton kellene mérni, de erre nem volt lehetőségem, ezért egy hozzá kapcsolódó alkatrészt választottam, ami vele együtt mozog. Mivel a vizsgálat célja a jármű sebességének hatása a rugózatlan tömeg függőleges gyorsulására, ami egy kerékhez kapcsolt alkatrész függőleges gyorsulásának mérésével megvalósítható, így a választott alkatrészt erre a célra megfelelőnek tartom. A szenzorok elhelyezkedését az 5. ábra mutatja, ahol a koordináta rendszerek az elhelyezett mérőeszközökhöz kapcsolódó önálló mozgó koordináta rendszert alkotnak. A forgalmi sávban haladó jármű egy álló ko-

ordináta rendszerben mozog, ahol a forgalmi irányt az (y), a függőleges pedig a (z) irány jelöli (13. ábra). Tehát a műszerek a járművel együtt azonos irányban mozognak. A fékpadon végzett vizsgálatot öt különböző sebesség mellett végeztem, a lengéscsillapító esetében pedig a jobb oldali felfüggesztést vizsgáltam.

5. ábra: A gyorsulásszenzorok elhelyezkedése a járműben (saját szerkesztés)



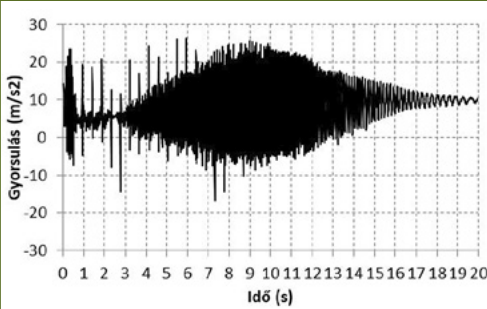
A műszaki vizsgán a lengéscsillapító hatékonyságát is ellenőrzi az EUSAMA [12]. Ez az eljárás a talperő ingadozása alapján minősíti a lengéscsillapítót. A talperő viszony a statikus és a dinamikus talperők hányadosaként értelmezhető. Ez a lengéscsillapító vizsgálatánál fontos mérőszám az EUSAMA-ajánlása szerint a kiértékelésnél a következő határértékek szerint használható:

- 60-100 % nagyon jó
- 45-60 % jó
- 30-35 % gyenge

- 10-30 % elégtelen
- 1-20 % veszélyes
- 0% nincs érintkezés a talajjal

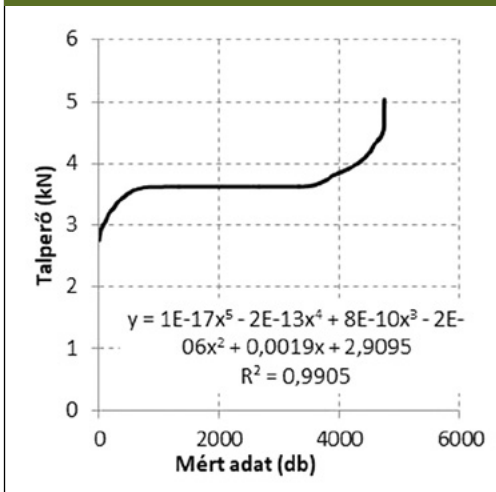
Elvégeztem a lengéscsillapító diagnosztikáját az EUSAMA eljárással. A vizsgálat során csak a jármű tömegéből származott a talperő, plusz teher nem volt. aminek eredménye a **6. ábrán** látható.

6. ábra: A felfüggesztésen mért gyorsulás-értékek (saját szerkesztés)



A mért gyorsulásadatokat átszámítottam talperőre, hogy összevethető legyen a vizsgálópadon mért eredménnyel. A jobb első kerékre nehezedő tömeg 402 kg volt, amiből a rugózatlan tömeg 52 kg. A minimális talperő megha-

7. ábra: A felfüggesztésen mért gyorsulás-értékek (saját szerkesztés)



tározásához a talperőre kapott értékeket sorrendbe állítottam, és elvégeztem a regresszió analízist egy ötödfokú polinomiális függvény-nyel. A regressziós függvény és a korreláltság mértéke a **7. ábrán** látható.

Ezzel a vizsgálattal megállapítottam a dinamikus talperő minimum értékét, amellyel a kiszámítható a dinamikus és a statikus talperő hányadosa az alábbi összefüggéssel.

$$A[\%] = 100 \cdot F_{\min} / G_{\text{stat}} \quad (1)$$

A **7. ábráról** leolvasható a minimális talperő értéke, ahol a függvény az ordináta tengelyt metszi, ami jelen esetben 2,91 kN, a statikus talperő pedig 4,02 kN, ahogy az a **8. ábrán** látható.

8. ábra: A vizsgálópad által mért tömeg adatok (saját szerkesztés)

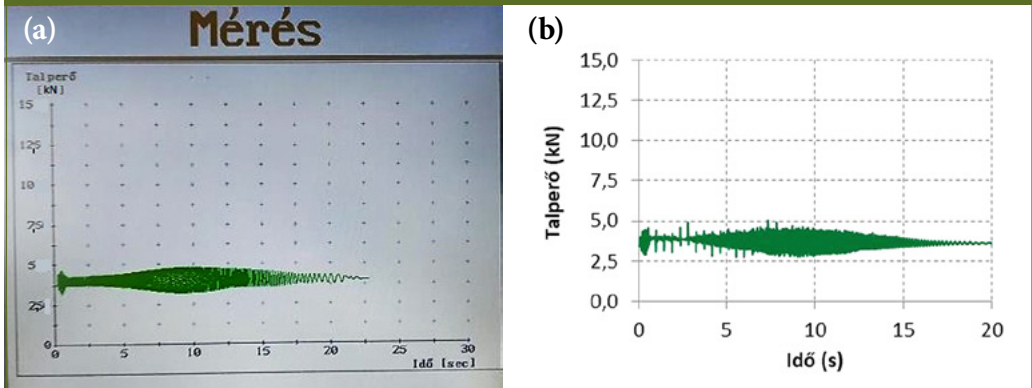


Az (1)-es összefüggést felhasználva a viszony-szám 72,3%-ra adódott, ami közel azonos a vizsgálópadon mérttel **8. ábra**. A lengéscsillapító minősítése így nagyon jó lett.

A lengéscsillapító vizsgálata során, a keréken mért gyorsulást is rögzítettem. A vizsgálópad és a keréken mért gyorsulásértékek összehasonlítását is elvégeztem (**9. ábra**). A két mérés között szignifikáns eltérés nem tapasztalható, tehát a felfüggesztésre rögzített gyorsulássen-szor alkalmas a dinamikus keréktalperő mérésére.

A fékpádon történő mérés úgy tekinthető, mintha a jármű egy tökéletesen síkfelületen

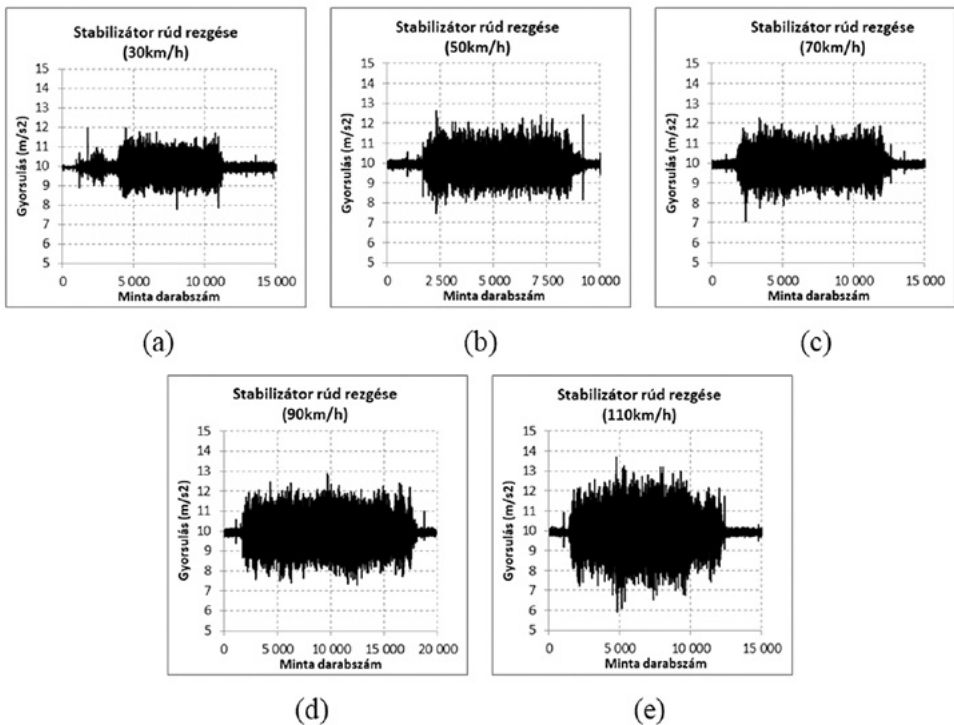
9. ábra: A vizsgálópád (a) és a gyorsulásszenzor általi mérések (b) összehasonlítása (saját szerkesztés)



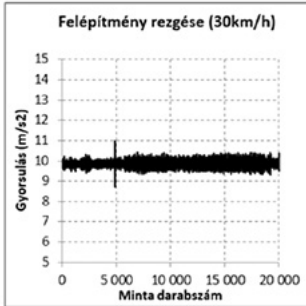
haladna. Ebből az következik, hogy a mért rezgések, lengések csak a járműben keletkezhetnek. A fékpadon végzett mérés eredményét a 10. ábra szemlélteti.

A stabilizátor rúdon mért értékek a sebesség növekedésével egyértelműen nőnek. A jármű utasterében lévő szenzor adatai kissé eltérő alakúak. A legszembetűnőbb alakzat

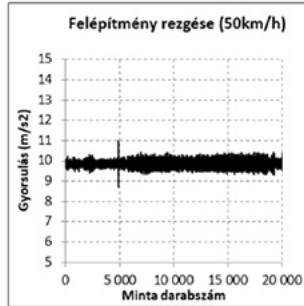
10. A stabilizátor rúdra rögzített gyorsulásszenzor adatai a fékpadon végzett mérés során (a) 30 km/h sebesség mellett, (b) 50 km/h sebesség mellett, (c) 70 km/h sebesség mellett, (d) 90 km/h sebesség mellett, (e) 110 km/h sebesség mellett (saját szerkesztés)



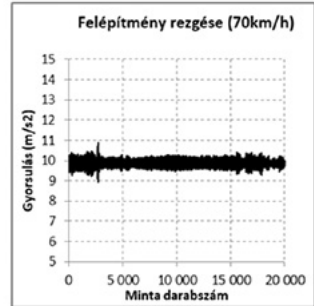
11. Az utastérben elhelyezett gyorsulásszenzor adatai a fékpadi mérés során (a) 30 km/h sebesség mellett, (b) 50 km/h sebesség mellett, (c) 70 km/h sebesség mellett, (d) 90 km/h sebesség mellett, (e) 110 km/h sebesség mellett (saját szerkesztés)



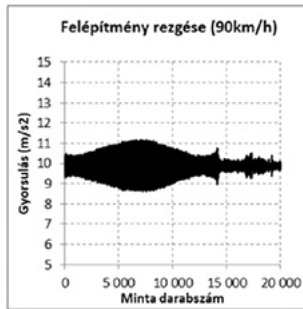
(a)



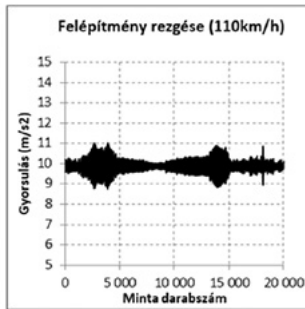
(b)



(c)



(d)



(e)

a 90 km/h sebességnél látható, de a 110 km/h-s mérés sem mondható egyenletesnek. Ez utóbbinál két kiemelkedő értéket is láthatunk, ami azért történt, mert a gyorsítás, illetve a lassítási szakaszban is átment a 90 km/h-s sebességen. Ebből a vizsgálatból kiderült, hogy a felépítménynek – vagy más néven rugózott tömegnek – van egy saját frekvenciája, ami 90 km/h sebességnél jelentkezik (11. ábra).

5. A MÉRT GYORSULÁSADATOK SZINKRONIZÁLÁSA AZ ÚT POZÍCIÓHOZ

A járműipar az elmúlt évtizedekben jelentős fejlesztést hajtott végre a lengéscsillapítás terén. Ma már léteznek olyan rendszerek, amelyek adaptív módon képesek a csillapítási tényező módosítására menet közben [5]. Az egyes menetdinamikai alrendszerek úgy mint a blokk-

lágatló (ABS), az elektronikus menetstabilizáló (EPS), kipörgés gátló (TC) vagy lengéscsillapító irányításához bizonyos paraméterek mérésére van szükség, ilyen például az egyes kerekek fordulatszáma, szöghelyzete, illetve a dinamikus keréktalperő. Technikai, illetve gazdasági okokból nem minden járművet szerelnek fel ilyen rendszerrel, ráadásul ezen adatok kinyerése is speciális járműdiagnosztikai szoftvert igényel, amivel általában csak az autógyártók rendelkeznek. Emiatt szükséges egy olyan mérési módszert kifejleszteni, amely képes a mobiltelefonba épített szenzorból kinyert adatokból a dinamikus keréktalperő meghatározására.

A vizsgálathoz felhasznált eszközök:

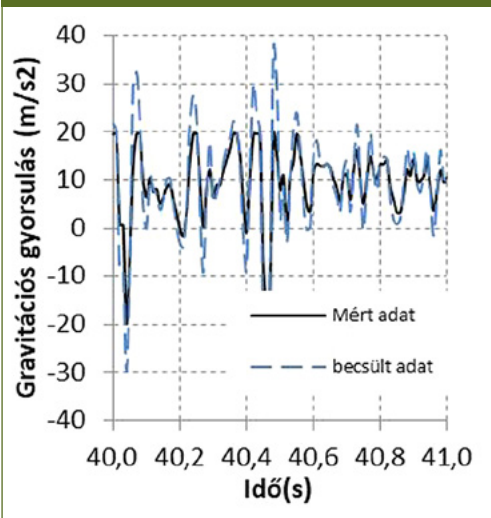
- *Jármű:*
OPEL ASTRA J
- *Okostelefon:*
A beépített szenzor típusa BOSH BMI120

Első lépésként egy tesztszakaszon végeztem mérést. A járművet egy lengőrendszernek tekintve, a rugózott és a rugózatlan tömegén is szükséges volt a mérést elvégezni. A szenzor elhelyezésénél ügyelnem kellett arra, hogy a kerék függőleges mozgását kövesse le, tehát a függőleges irányra. Az **5. ábrán** látható a szenzorok elhelyezkedése a járművön, illetve a gyorsulásirányok értelmezése.

Az utastérben elhelyezett műszer egy giroszkópra van helyezve, ami pedig egy egyedileg gyártott konzollal csatlakozik a gyárilag kialakított pohártartó nyílásba.

A műszer elhelyezése után az előre kijelölt 100 m hosszú szakaszon hajtottam végig különböző sebességgel 30-110 km/h-ig terjedően. A mérési adatok kiértékelésekor kiderült, hogy a mérőműszer méréstartományánál már a 30 km/h-s sebesség mellett is nagyobb gyorsulások keletkeztek. A járműdinamikában ismeretes, hogy a keréken akár 150 m/s²-es gyorsulás is érzékelhető, emiatt a hiányos adatsort ki kell egészíteni. A hiányzó adatokat egy becslő módszerrel határoztam meg. Az eredeti és a becsléssel előállított adatok közti különbséget az **12. ábra** mutatja egy 100 adatból álló mintán.

12. ábra: A mért és becslt gyorsulások ábrázolása (saját szerkesztés)



A becslési módszer a mért adatok differenciáján alapszik. Először a gyorsulásértékek differenciáját képeztem, majd a differenciák átlagát hozzáadtam a mért gyorsuláshoz. A számítást diszkrét értékekre a következő képlettel végeztem.

$$d_i = a_i - a_{i-1} \quad (2)$$

$$\bar{d}_i = (d_{i-1} + d_i) / 2 \quad (3)$$

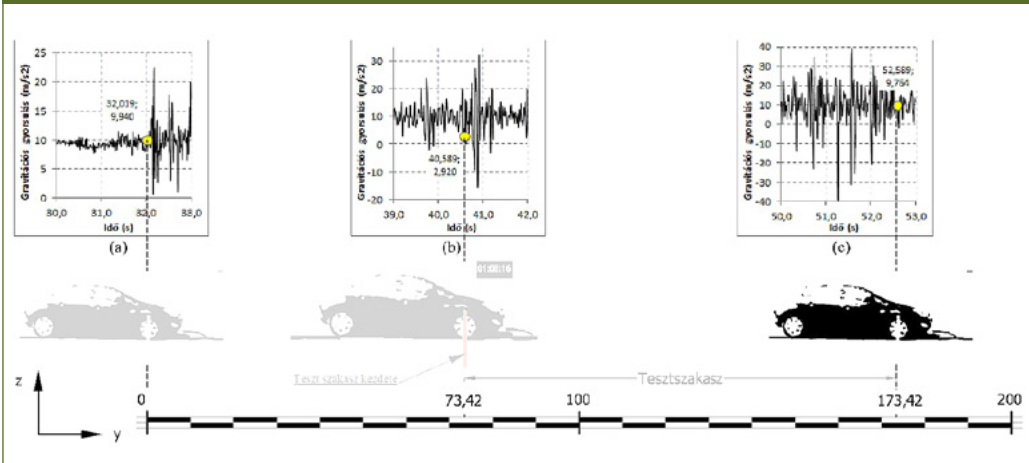
$$\hat{a}_i = a_i + \bar{d}_i \quad (4)$$

A becslt érték nagyságát lehet befolyásolni ha mozgó átlagot alkalmazunk, amely periódusának növelésével, mérséklődik a becslt érték. Ezzel lehetőség van úgy becslni a hiányzó gyorsulást, hogy az a lehető legjobban igazodjon a járműdinamikában ismert függőleges keréksebességhez [12], amely értéke utazáskényszerű és biztonsági okokból 0,7-1,5 m/s közé esik, kritikusan gerjesztett jó lengéscsillapító esetén.

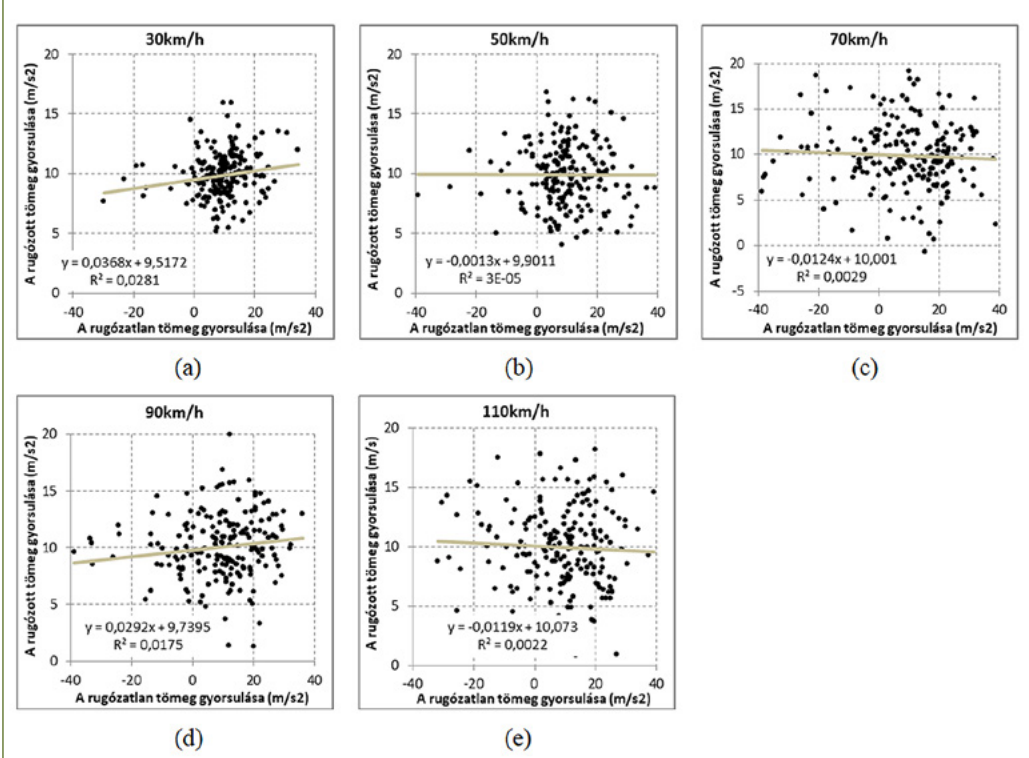
A mért adatok feldolgozásánál problémát jelent az időalap, továbbá a jármű pozíciója az úton. Ahhoz, hogy összehasonlítható legyen minden mérés, ki kell szűrni az indulás és a megállás időpillanatát a mérési adatsorból, valamint a megtett távolsághoz igazítani minden egyes mérést.

A mérés során a vizsgálati szakasz kezdőpontjába nagy sebességű kamerát állítottam, valamint egy függőlegesen leszúrt karót helyeztem a kezdő szelvénybe. A gyorsulásszenzor és a nagysebességű kamera időadatai alapján meg tudom határozni a jármű elindulásának időpillanatát, valamint azt az időpillanatot, amikor a jármű a szakasz kezdetén van. A jármű elhalad a karó előtt így pontosan lehet tudni, hogy mikor érte el az első kerék a szakasz kezdőpontját. A gyorsulásadatokból ki lehet keresni a jármű indulásának időpillanatát ezred másodperc pontosan, mivel ezen a ponton kiugrás van a gyorsulásértékben (**13. ábra**). A jármű indulásával egy időben indult a videófelvétel. A nagysebességű felvételtől pedig az indulás időpillanatától a tesztszakasz kezdetéig eltelt időt lehet meghatározni szintén ezredmásodperc pontossággal. A mérés során a jármű, valamint a kezdőszakasz GPS koordinátái is rögzítésre kerültek,

13. A mért gyorsulások úthoz igazítása (a) függőleges gyorsulás az indulás pillanatában, (b) függőleges gyorsulás a tesztszakasz kezdetén, (c) függőleges gyorsulás a tesztszakasz végén (saját szerkesztés)



14. A rugózott és a rugózatlan tömeg gyorsulásai közti összefüggés (a) 30 km/h sebesség mellett, (b) 50 km/h sebesség mellett, (c) 70 km/h sebesség mellett, (d) 90 km/h sebesség mellett, (e) 110 km/h sebesség mellett (saját szerkesztés)



amiből meghatározható a kezdő szakasz pozíciója. A 13. ábrán mutatom be az adatsor szinkronizálás folyamatát.

Visszaszámolva ez azt jelenti, hogy a 30 km/h-s mérésnél a kezdet a 40,858 másodpercnél van. A szakasz végét pedig egyszerű volt meghatározni, mivel a jármű egyenletes sebességgel haladt köszönhetően a sebesség-tartó automatikának. Az állandó 8,333 m/s-os sebességgel számolva pontosan 12 másodperc kell a száz méter megtételéhez, vagyis 52,585 s-nál van a szakasz vége.

6. A MÉRT ADATOK KIÉRTÉKELÉSE, AZ ÁTLAGOS DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MEGHATÁROZÁSA

Ha egy konkrét vizsgált útszakaszon akarjuk meghatározni az átlagos dinamikus keréktalperőt, akkor az ebben a fejezetben kidolgozott mérési módszert lehet alkalmazni. A számtani átlagot a kialakult gyorsulás maximumok befolyásolják, ami az útprofil egyenetlenségéből

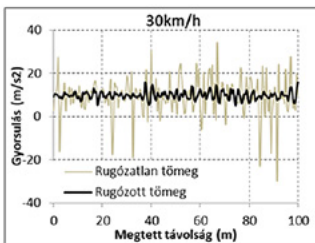
adódóan nem egyenletes eloszlású, tehát ezt sem a maximum értékeket nem lehet alapul venni. Ezért a mértékadó szintnek én a felső kvartilist tekintem.

Az ötödik kutatói kérdés megválaszolásához korreláció vizsgálatot végeztem. Minden sebességkategóriánál megcsináltam a vizsgálatot, és mindenhol nullához közeli lett az R^2 értéke, amely **14. ábrán** látható. Tehát valós körülmények között egy régi, burkolati hibákkal teli útszakaszon végig haladó jármű futóművén és a felépítményén mért gyorsulások közt nincs összefüggés.

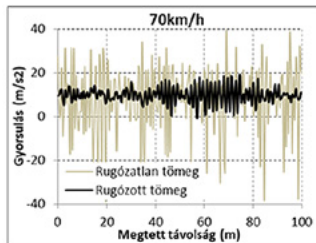
Megvizsgáltam a rugózott és a rugózatlan tömeg gyorsulásait a kijelölt 100 m-es útszakaszon. Mindkét tömeg gyorsulásértékei a sebesség növekedésével egyenes arányban növekszenek, ahogy az a **15. ábrán** látható, de nincs köztük összefüggés.

A dinamikus keréktalperő meghatározásához először kiszűrtem a teljes mérési adatsorból a vizsgált százméteres útszakaszhoz tartó-

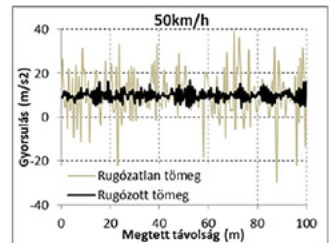
15. A rugózott és a rugózatlan tömegek gyorsulásai különböző sebességek mellett (a) 30 km/h sebesség mellett, (b) 50 km/h sebesség mellett, (c) 70 km/h sebesség mellett, (d) 90 km/h sebesség mellett, (e) 110 km/h sebesség mellett (saját szerkesztés)



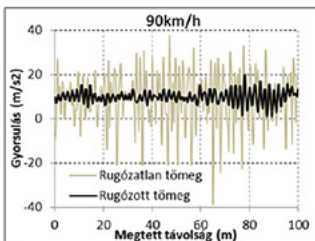
(a)



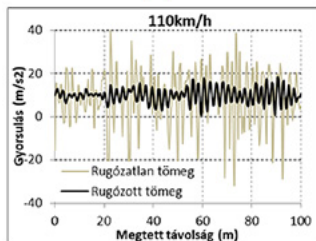
(b)



(c)



(d)



(e)

2. táblázat: A különböző sebességek mellett mért gyorsulások statisztikai feldolgozása (saját szerkesztés)

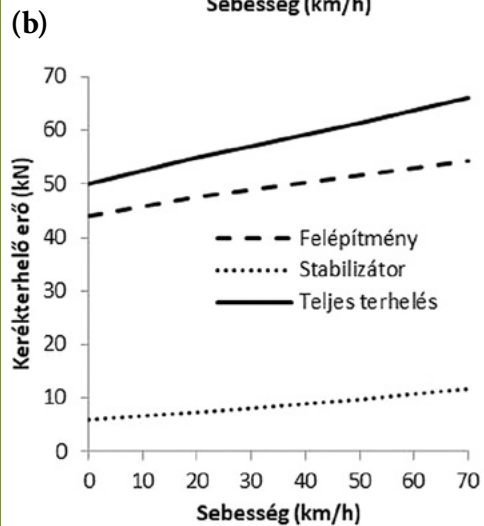
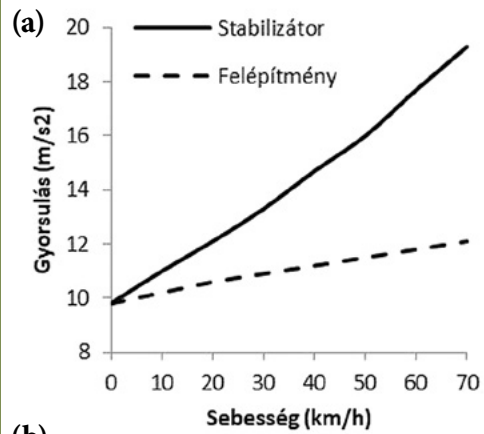
Mérés	Minta darabszám	Számítási közép	Konfidencia -95%	Konfidencia 95%	Medián	Módusz	Módusz frekvenciája	Szigma	Minimum	Maximum	Alsó kvartilis	Felső kvartilis	Terjedelem	Szórás
stabilizátor_30	201	9,392	8,213	10,571	9,619	4,520	2	1 888	-29,756	34,309	6,185	13,316	64,065	8,475
stabilizátor_50	201	9,891	8,380	11,401	9,361	19,604	2	1 988	-39,223	39,213	4,524	16,036	78,436	10,861
stabilizátor_70	201	8,038	5,840	10,237	10,189	19,300	5	1 616	-38,843	38,690	-0,383	19,306	77,533	15,807
stabilizátor_90	201	8,969	7,123	10,816	10,802	19,460	4	1 803	-38,843	36,085	1,991	18,617	74,928	13,274
stabilizátor_110	201	8,665	6,800	10,529	10,922	19,604	4	1 742	-31,810	39,213	1,776	18,473	71,023	13,403
felépítmény_30	201	9,862	9,604	10,121	9,802	10,080	2	1 982	5,173	15,920	8,684	10,890	10,746	1,858
felépítmény_50	201	9,888	9,527	10,248	9,911	-	1	1 987	-4,029	16,780	8,240	11,608	12,750	2,588
felépítmény_70	201	9,901	9,395	10,407	9,628	-	1	1 990	-0,625	19,173	7,805	12,083	19,798	3,637
felépítmény_90	201	10,001	9,594	10,408	9,932	-	1	2 010	1,311	19,989	8,302	11,909	18,677	2,923
felépítmény_110	201	9,970	9,497	10,443	9,986	-	1	2 004	0,883	18,209	7,660	12,063	17,325	3,397

zó gyorsulásértékeket. A vizsgált útszakaszt 50 cm-es szakaszokra osztva ez 201 mintát jelent. A minta statisztikai feldolgozását a 2. táblázat mutatja.

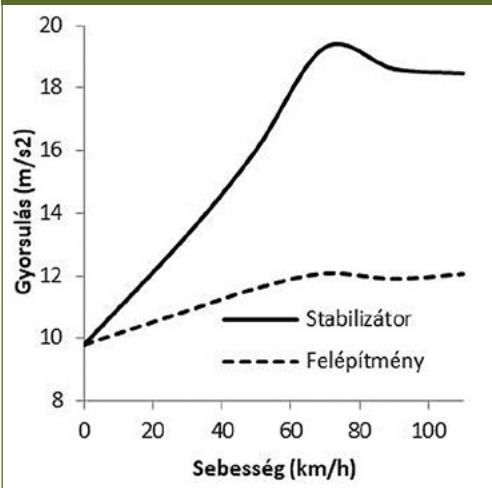
A szakaszon mért mértékadó gyorsulás a felső kvartilis értéke, amit ha diagramon ábrázolunk (16. ábra), akkor megfigyelhető, hogy 70 km/h-nál éri el a maximumot és 110 km/h-nál pedig visszaesés tapasztalható. Mivel 70 km/h-ig közel lineárisan változik a gyorsulásértéke, ezért a továbbiakban csak eddig a szintig fogom figyelembe venni a mért adatokat.

A 70 km/h sebességnél kialakul a maximális dinamikus kerékterhelő, ami 66 kN (17. ábra) és ha ezt hasonlítom a statikushoz, akkor ez

17. ábra: A gyorsulásértékek (a) és a 100 kN tengelyterhelésre átszámolt (b) dinamikus kerékterhelő változása (saját szerkesztés)



16. ábra: A felső kvartilisek a sebesség függvényében (saját szerkesztés)



32%-os többletet jelent. Ezért nem mindegy, hogy a forgalom mekkora sebességgel halad illetve, hogy milyen módszerrel és mennyire pontosan tudjuk ezt meghatározni. A 16 kN többletterhelést 5 km/h sebességre átszámítva 1,14 kN terhelés adódik, ami a hátralévő élettartam szempontjából még elfogadható hiba. Tehát a forgalomáramlás sebességét legalább 5 km/h pontossággal kell meghatározni.

Ebből a vizsgálatból kiderül, hogy a különböző sebességek mellett mért gyorsulásértékek között szignifikáns különbség van. A vizsgálati tartományban a stabilizátor gyorsulása maximum 20 m/s², a felépítményé pedig 12 m/s² a vizsgált útszakaszon. A laboratóriumi vizsgálat esetén a stabilizátoron 11-12 m/s² a felépítményen pedig 10,5 m/s² gyorsulást mértem.

7. KONKLÚZIÓ

A módszer alkalmas a dinamikus keréktalperő mérésére, amely a sebesség függvényében szignifikáns változást mutat, ez pedig felhasználható eredményül szolgál a hátralévőélettartam-becslő módszerhez.

Az első kutatói kérdésre választ kapunk az első részben elvégzett vizsgálatból, ami egy 8 cm mély és 72 cm átmérőjű kátyú okozta gyorsulásértékek feldolgozásán alapszik. Eszerint a stabilizátoron 30 m/s², míg a felépítményen 52 m/s² gyorsulás keletkezik.

A második kérdéshez két külön kategóriájú jármű gyorsulásait mértem ugyanazon útszakaszon. Mindkét jármű futóművén és felépítményén is gyorsulásszenzor volt elhelyezve. A rugózatlan és a rugózott tömegben mért gyorsulások közt 1 m/s² különbség adódott 50 km/h sebesség mellett, ami nem jelent szignifikáns különbséget így kijelenthető, hogy járműkategóriától függetlenül lehetséges a dinamikus keréktalperő mérés.

A harmadik kérdésre a válaszhoz a rugózott és a rugózatlan tömegre szerelt gyorsulásszenzorok adatait vizsgáltam meg, amire 2,12-2,34 arány adódott, a mérés sebességétől és a járműkategóriától függően. Az arányok közti eltérés pedig a jármű rugózott és rugó-

zatlan tömeg arányával, illetve a lengéscsillapítók és gumiabroncsok típusa, rugómerevsége és csillapítási tényezője közti különbséggel magyarázható.

A negyedik kérdés megválaszolásához a 100 m-es útszakaszon mért gyorsulásértékek statisztikai feldolgozását végeztem el. A felső kvartilisek közti különbségek szignifikáns eltérést mutatnak és 70 km/h-s sebességig közel lineáris trendet követnek. Ez azt jelenti, hogy 70 km/h sebességig megbízható és megfelelően pontos a mérési módszer járműtől függetlenül, tökéletes lengéscsillapító, futómű és gumiabroncs állapot esetén.

Az ötödik kérdés megválaszolásához korreláció vizsgálatot hajtottam végre a gyorsulástartadatokon. Arra az eredményre jutottam, hogy nincs összefüggés a rugózott és a rugózatlan tömegben mért gyorsulásértékek közt.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Nemesdy Ervin, Ambrus Kálmán, Pallós Imre, and Török Kálmán, 'Az aszfaltkeverékek mechanikai, és fizikai tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatai', 2000.
- [2] M. Gergely, P. Péter, and P. József, 'Hajlékony útburkolatok élettartamának meghatározása a továbbfejlesztett kézi behajlásmérés alkalmazásával', *Konf. Kiadv.*, Oct. 2011.
- [3] Gáspár László, Horváth Ferenc, and Lublós László, *Közlekedési létesítmények élettartama*. Győr: Universitas-Győr Nonprofit Kft., 2011.
- [4] Albert J., Bush III, and Gilbert Y. Baladi, *Nondestructive Testing of Pavement and Backcalculation of Moduli*. Philadelphia, PA 19103, 1989.
- [5] M. Doumiati, A. Victorino, A. Charara, G. Baffet, and D. Lechner, 'An estimation process for vehicle wheel-ground contact normal forces', *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pp. 6-11, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01205>
- [6] D. Lechner, 'Analyse du comportement dynamique des vehicules routiers l'egers: d'evaluation d'une methologie

appliqu'ee `a la s'ecurit'e primaire.', *Ph. D, dissertation Ecole Centrale de Lyon, France, 2002.*

- [7] T. Shim and C. Ghike, 'Understanding the limitations of different vehicle models for roll dynamics studies.', *Vehicle System Dynamics*, vol. 45, pp. 191–216, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110600882449>
- [8] U. Kiencke and L. Nielsen, 'Automotive control systems', *Springer*, 2000.
- [9] T. A. Wenzel, K. J. Burnham, M. V. Blundell, and R. A. Williams, 'Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation.', vol. 44, pp. 153–171, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110500385949>
- [10] Vásárhelyi Boldizsár, *Közúti közlekedésünk és útjaink helyzete, In: Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények*, vol. 1. Budapest: Akadémiai kiadó, 1958.
- [11] T. Boromisza, 'Aszfaltburkolatú utak teherbírásának vizsgálata behajlásméréssel, In: Mélyépítéstudományi Szemle', vol. XXVI., no. 12, pp. 521–528, 1976.
- [12] Ilosvai Lajos, 'Gépjárművek tervezése és vizsgálata III. Kézirat', pp. 126. Budapest, 1983.



Dynamic wheel load measurement in road traffic

From the acceleration measurement data, the amount of load acting on the wheel of the vehicle can be determined, which is transferred to the asphalt pavement damaging the track structure. The magnitude of the load is affected by the speed of the vehicle and the surface quality of the pavement. Various mathematical models are applied to calculate the remaining life of pavement structures, depending on the available data. The aim of the research is to develop a measurement method for determining the dynamic wheel load required for estimating the remaining service life.



Dynamische Radlastmessung im Straßenverkehr

Aus den Beschleunigungsmessdaten kann die auf das Rad des Fahrzeugs wirkende Last bestimmt werden, die auf den Asphaltbelag übertragen wird und Fahrbahnstruktur beschädigt. Die Größe der Last wird von der Geschwindigkeit von den verfügbaren Daten. Es werden - in der Abhängigkeit von Fahrbahnstrukturen - verschiedene mathematische Modelle verwendet, um die verbleibende Lebensdauer von Fahrbahnstrukturen zu berechnen. Ziel der Forschung ist es, eine Messmethode zur Bestimmung der dynamischen Radlaste zu entwickeln, die zur Schätzung der verbleibenden Lebensdauer erforderlich ist.

