Doktori értekezés

MIKA PÉTER

Széchenyi István Egyetem

2022

PÁLYASZERKEZET RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATA ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Mika Péter

Témavezető neve:

Dr. habil. Horváth Balázs, Széchenyi István Egyetem

„Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola”

Győr, 2022

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki mindazoknak, akik segítséget nyújtottak a disszertációm megírásában. Köszönöm témavezetőmnek dr. habil. Horváth Balázs dékán úrnak, aki szakmai támogatásával segítette munkámat. Köszönetemet fejezem ki dr. Hajdu Flóra egyetemi adjunktus kolléganőmnek, prof. dr. habil. Kuti Rajmund egyetemi tanár és Szalai Péter mestertanár kollégáimnak a terepi mérés során nyújtott segítségéért. Köszönet prof. dr. habil. Lakatos István dékánhelyettes úrnak és Őri Péternek a labormérésben nyújtott segítségért. Köszönetemet fejezem ki menyasszonyomnak a disszertáció összeállításában történő közreműködéséért valamint családomnak a türelemért és támogatásért.

NYILATKOZAT

Alulírott MIKA PÉTER kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból vettem át, egyértelműen a forrás megadásával megjelöltem.

Győr, 2022.01.20.

Mika Péter

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS 13

1 AZ ÚT ÁLLAPOTRENDSZERE 20

1.1 ÁLLAPOTPARAMÉTEREK 21

1.1.1 FELÜLETI TEXTÚRA 21

1.1.2 FELÜLETI EGYENETLENSÉG 21

1.1.3 FELÜLETI HIBÁK 21

1.1.4 ALAKVÁLTOZÁSI TULAJDONSÁG 22

1.1.5 SZERKEZETI JELLEMZŐK 22

1.1.6 VONALVEZETÉSI JELLEMZŐK 22

1.1.7 KERESZTMETSZETI JELLEMZŐK 23

1.1.8 ÜZEMI JELLEMZŐK 23

1.1.9 CSOMÓPONTI JELLEMZŐK 23

1.1.10 EGYÉB JELLEMZŐK 24

1.1.11 FORGALMI PARAMÉTEREK 24

1.1.12 BALESETI PARAMÉTEREK 25

1.2 ÁLLAPOTFELVÉTELI MÓDSZEREK, ESZKÖZÖK 26

1.2.1 A FELÜLETI TEXTÚRA MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 26

1.2.2 A FELÜLETI EGYENETLENSÉG MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 26

1.2.3 A FELÜLETI HIBÁK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 27

1.2.4 AZ ALAKVÁLTOZÁSI TULAJDONSÁG MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 27

1.2.5 A SZERKEZETI JELLEMZŐK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 27

1.2.6 A VONALVEZETÉSI ÉS KERESZTMETSZETI JELLEMZŐK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 28

1.2.7 AZ ÜZEMI JELLEMZŐK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 28

1.2.8 A CSOMÓPONTI ÉS EGYÉB JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSÁNAK ESZKÖZEI 28

1.2.9 A FORGALMI ÉS BALESETI ADATOK RÖGZÍTÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK 28

1.3 ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSI RENDSZEREK 30

1.3.1 MAGYAR BURKOLAT ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSI RENDSZEREK 30

1.3.2 KÜLFÖLDI BURKOLAT ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSI RENDSZEREK 31
1.3.3 A FORGALMI PARAMÉTEREK ÉRTÉKELŐ RENDSZERE 34

2 A PÁLYASZERKEZET FELÉPÍTÉSE, VIZSGÁLATI MÓDSZEREI 42

2.1 A PÁLYASZERKEZET RÉTEGRENDJE 42
2.2 A PÁLYASZERKEZETI RÉTEGEK ANYAGAI 42
2.2.1 A FÖLDMŰ 42
2.2.2 JAVÍTÓRÉTEG 43
2.2.3 FAGYVÉDŐ RÉTEG 43
2.2.4 BURKOLATALAP 43
2.2.5 KÖZBENSŐ FESZÜLTSÉGELOSZTÓ RÉTEG 43
2.2.6 BURKOLAT 43
2.3 A PÁLYASZERKEZETI RÉTEGEK MÉRETEZÉSE 44
2.3.1 A FORGALOM, MINT A PÁLYASZERKEZET FIZIKAI TERHELÉSE 44
2.3.2 TÍPUS-PÁLYASZERKEZET KIVÁLASZTÁSA 45
2.3.3 ANALITIKUS PÁLYASZERKEZET MÉRETEZÉS 45
2.3.3.1 A földmű méretezése 46
2.3.3.2 Alapréteg méretezése 46
2.3.3.3 A burkolati réteg méretezése 47
2.3.3.4 Ellenőrzés a tervezési élettartamra 47
2.4 PÁLYASZERKEZET RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ... 48
2.5 A PÁLYASZERKEZET ÉLETTARTAMA 49
2.5.1 AZ UTAK ÉLETTARTAMÁNAK ÉRTELMEZÉSE 49
2.5.2 AZ ÚTPÁLYASZERKEZETEK ÉLETTARTAMÁT BEFOLYÁSOLÓ FŐBB TÉNYEZŐK 50
2.5.3 A HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM SZÁMÍTÁSI METÓDUSAI 52
2.6 ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA 55
2.6.1 BURKOLATALAP 55
2.6.2 ÚTBURKOLAT 56

3 ÚJ MÓDSZEREK A FORGALMI PARAMÉTEREK ÉRTÉKELŐ RENDSZERÉBEN 57

3.1 A FORGALMI PARAMÉTEREK FELVÉTELI MÓDSZEREI 57

3.1.1 GYORSULÁSSZENZORON ALAPULÓ JÁRMŰTRAJEKTÓRIA ELŐÁLLÍTÁSI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA [S4] 58
3.1.1.1 A trajektória előállítása, a követési távolság, a követési idő számítása 58
3.1.1.2 A jármű gyorsulásának mérése, az adatok rögzítése 59
3.1.1.3 A rögzített adatok kiértékelése 61
3.1.1.4 A vizsgálatból származó új tudományos eredmény 65
3.1.2 GIROSZKÓPPAL KOMPENZÁLT GYORSULÁSSZENZOROS JÁRMŰTRAJEKTÓRIA ELŐÁLLÍTÁSI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA [S5] .. 68
3.1.2.1 A gyorsulásadatok feldolgozási módszere 69
3.1.2.2 A mérési sebesség és a frekvencia vizsgálata 71
3.1.2.3 A különböző szituációk vizsgálata 74
3.1.2.4 Giroszkópos terepi mérés, ipari park 76
3.1.2.5 Giroszkópos terepi mérés, alsó rakparti út 80
3.1.2.6 A vizsgálatból származó új tudományos eredmény 82
3.1.3 ADOTT ÚTSZAKASZ SEBESSÉGHATÁR TARTÁSÁNAK VIZSGÁLATI MÓDSZERE 83
3.1.3.1 A mért GPS adatok CAD szoftveres feldolgozása 83
3.1.3.2 A vizsgálatból származó új tudományos eredmény 85
3.2 ÚJ FORGALMI PARAMÉTER ÉRTÉKELŐ RENDSZER KIDOLGOZÁSA 86
3.2.1 AZ ADAPTÍV JÁRMŰKÖVETÉSI MODELL (ACFM) [S2] 87
3.2.1.1 A járműkövetési modell matematikai levezetése 87
3.2.1.2 Az ACFM szimulációból származó új tudományos eredmény 90
3.2.2 A KÖZÚTI FORGALMI HULLÁMOK TERJEDÉSI SEBESSÉG MEGHATÁROZÁSÁHOZ SZÜKSÉGES JÁRMŰTRAJEKTÓRIÁK MÓDSZERÉNEK KIDOLGOZÁSA [S1],[S3] 93
3.2.2.1 A forgalmi hullámok terjedési sebességének vizsgálatából származó új tudományos eredmények 96
3.2.3 A FORGALMI PARAMÉTER ÉRTÉKELÉS MÓDSZERE 97
4 ÚJ LEHETŐSÉGEK A PÁLYASZERKEZET RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREIBEN 98
4.1 A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐN ALAPULÓ ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELŐ RENDSZER KIDOLGOZÁSA 98

4.2 A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MÉRÉSEN ALAPULÓ ÁLLAPOTFELVÉTELI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA [S7] 100
4.2.1 AZ ÚTHIBA ÉS A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ KAPCSOLATA 102
4.2.2 JÁRMŰDINAMIKAI SZEMPONTOK 105
4.2.3 A JÁRMŰ LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA 107
4.2.4 A MÉRT GYORSULÁS ADATOK SZINKRONIZÁLÁSA AZ ÚTPOZÍCIÓHOZ 111
4.2.5 A MÉRT ADATOK KIÉRTÉKELÉSE, AZ ÁTLAGOS DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MEGHATÁROZÁSA 113
4.2.6 A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ VIZSGÁLATBÓL SZÁRMAZÓ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNY 116
4.3 HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM SZÁMÍTÁS A KERÉKTALPERŐBŐL [S6] .. 117
4.3.1 A BEHAJLÁS ÉS A VÍZSZINTES MEGNYÚLÁS KÖZTI ÖSSZEFÜGGÉS 119
4.3.2 A HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM SZÁMÍTÁSÁNÁL HASZNÁLT PARAMÉTEREK VIZSGÁLATA 120
4.3.3 A HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM VIZSGÁLATBÓL SZÁRMAZÓ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK 126
4.4 AZ ÚJFAJTA DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MÉRÉSEN ALAPULÓ ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELÉSI MÓDSZER BEMUTATÁSA VALÓS ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT 127
4.4.1 A PÁLYASZERKEZETI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA 127
4.4.2 MÉRÉS VÉGREHAJTÁSA A KÖZÚTI FORGALOMBAN 128
4.4.3 DWLFI ÉRTÉK MEGHATÁROZÁSA 129
5 TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEGZÉSE 131
6 KÖVETKEZTETÉSEK, JÖVŐBELI CÉLOK, FEJLESZTÉSEK 134
ÖSSZEGZÉS 135
SUMMARY 137
IRODALOMJEGYZÉK 139
SAJÁT PUBLIKÁCIÓK 144

MELLÉKLETEK

I. MELLÉKLET: AZ ÚT ÁLLAPOTRENDSZERÉNEK ISMERTETÉSE

II. MELLÉKLET: TÁBLÁZAT A SEBESSÉGHATÁROK BETARTÁSÁNAK VIZSGÁLATÁHOZ

III. MELLÉKLET: DWLFI ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELŐ LAP

IV. MELLÉKLET: A KÜLÖNBÖZŐ SEBESSÉGEK MELLETT MÉRT GYORSULÁSOK STATISZTIKAI FELDOLGOZÁSA

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Ókori közút rétegrendje *(https://digolanum.gportal.hu/gindex.php?pg=36088902)* .. 13
2. ábra A disszertáció fejezeteinek kapcsolatát bemutató ábra 17
3. ábra A dinamikus keréktalperő mérőeszköz kapcsolási rajza 18
4. ábra Az út állapotrendszere 20
5. ábra A hullámterjedés sebességének értelmezése a fundamentális diagramon 36
6. ábra Az S vonal mozgása 36
7. ábra Az elhaladt járművek időpontjának rögzítése 37
8. ábra Az elhaladt járművek időintervallum szerinti összegzése 38
9. ábra A keresztmetszeti forgalomnagyságok minimum helyeit összekötő egyenes ábrázolása 38
10. ábra Az összes közúti baleset alakulása Győr város területén (db/év) 40
11. ábra Súlyos sérüléses közúti balesetek 2012. I. félévben (Győr déli rész) 41
12. ábra A hajlékony pályaszerkezet elvi felépítése [59] 42
13. ábra A követési idő és a követési távolság változása 59
14. ábra Az útszakasz kijelölése 59
15. ábra A gyorsulás irányok értelmezése, a műszer elhelyezkedése a járműben 61
16. ábra A szenzor **ay** irányú gyorsulás adatai különböző mintavételi frekvencia (a) 200Hz, (b) 50Hz, (c) 2,85Hz, (d) 1,43Hz szerint ábrázolva. A kiugró értékek jelölve vannak a diagramokon. 62
17. ábra A korreláció vizsgálat eredménye (a) sebesség-pontosság, (b) mintavételi darabszám-pontosság 65

18. ábra (a) Az eredeti 25. mérés és a 25. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni ... 66
19. ábra (a) Az eredeti 24. mérés és a 25. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni ... 66
20. ábra (a) Az eredeti 24. mérés és a 23. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni ... 67
21. ábra Az eredeti 24. méréshez viszonyított, a 30km/h sebességértékek körüli korrigált mérések távolság eltérései ... 67
22. ábra (a) Az eredeti 24. mérés és a ráillesztett 25. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni alakulása ... 68
23. ábra A különböző számítási módszerek összehasonlítása (a) gyorsulás, (b) sebesség, (c) megtett távolság ... 70
24. ábra A mérés pontossága a sebesség függvényében különböző frekvenciákon ... 73
25. ábra A sebességgörbék összehasonlítása ... 73
26. ábra A mérési szituációk ... 74
27. ábra A mérőműszer elhelyezkedése a járműben és a gyorsulási irányok értelmezése ... 77
28. ábra A mért adatok statisztikai feldolgozása (a) normál (b) korrigált ... 79
29. ábra A korreláció számítás eredménye, (a) a kezdeti gyorsulás-pontosság, (b) a sebességkülönbség-pontosság ... 80
30. ábra A kísérleti útszakasz (Győr, alsó rakparti út) ... 81
31. ábra A három különböző mérési módszer eredménye út-idő diagramon (a) Kossuth-híd felé (b) Dunapart Rezidencia felé ... 81
32. ábra A bemért úthálózat győri szakaszai ... 83
33. ábra Az utazások során megtett távolságok megoszlása a különböző megengedett sebességű útszakaszok szerint ... 84
34. ábra A sebességtartás kategóriánkénti megoszlása ... 84
35. ábra Sebességtartás az egyes tartományokban ... 85
36. ábra A megengedett sebességhatár alatti futásteljesítmény ... 85
37. ábra A megengedett sebességhatár feletti futásteljesítmény ... 86
38. ábra Az ACFM értelmezése, a modell paraméterek. Az ábrán látható az **sj** $*$ távolság, ami a követő jármű megkívánt távolsága ... 88
39. ábra Egy jármű reakciója az ACFM modellben (a folytonos vonal a követő jármű, a szaggatott pedig az első jármű), mikor hirtelen a követő jármű elé bevág egy másik

jármű. A kezdeti sebesség **80 km/h** és a kezdeti követési távolság **10** m. Ezt egy mérsékelten kritikus szituációnak tekinthetjük. 91
40. ábra Egy jármű reakciója az ACFM modellben (a folytonos vonal a követő jármű, a szaggatott pedig az első jármű), mikor hirtelen a követő jármű elé bevág egy másik jármű. A kezdeti sebesség **110 km/h** és a kezdeti követési távolság **10** m. Ezt egy kritikus szituációnak tekinthetjük. 92
41. ábra A kialakult sor értelmezése, a trajektória adatok rögzítése 93
42. ábra A hullámterjedés sebességének grafikus ábrázolása a hullámfronton és a hullám hátoldalán 94
43. ábra A szimulált forgalmi hullám tér-idő dinamikája 95
44. ábra A hullámterjedés sebessége és a forgalomáramlás sebessége közti összefüggés 96
45. ábra A felületmodellből készített szelvény és a szelvény nyomvonala 104
46. ábra A kátyú okozta gyorsulásváltozás (a) és a keletkezett dinamikus keréktalperő (b) . 104
47. ábra A gyorsulás szenzorok elhelyezkedése a járműben 107
48. ábra A felfüggesztésen mért gyorsulásértékek 108
49. ábra A felfüggesztésen mért gyorsulás értékek 108
50. ábra A vizsgálópad (a) és a gyorsulásszenzor általi mérések (b) összehasonlítása 109
51. ábra A stabilizátor rúdra rögzített gyorsulásszenzor adatai a fékpadi mérés során 110
52. ábra Az utastérben elhelyezett gyorsulás szenzor adatai a fékpadi mérés során 110
53. ábra A mért és a becsült gyorsulásértékek idősora 112
54. ábra A mért gyorsulás adatok úthoz igazítása 113
55. ábra A rugózott és a rugózatlan tömeg gyorsulásai közti összefüggés 114
56. ábra A rugózott és a rugózatlan tömegek gyorsulásai különböző sebességek mellett 114
57. ábra A felső kvartilisek a sebesség függvényében 115
58. ábra A gyorsulásértékek (a) és a 100 kN tengelyterhelésre átszámolt (b) dinamikus keréktalperő változása 115
59. ábra Rendszertelen terhelés [96] 119
60. ábra A gumiabroncs érintkezési felületét helyettesítő kör területének értelmezése 122
61. ábra A hátralévő élettartam modellek összehasonlítása 123
62. ábra A hátralévő élettartam modellek összehasonlítása a valóságnak megfelelő nyúlás tartományon belül 124
63. ábra Az egyes modellek paraméter-érzékenységének összehasonlítása 125
64. ábra Az útállapot értékelésének folyamatábrája 127

KÉPJEGYZÉK

1. kép A tesztjármű kezdő- és végpozíciójának, valamint az adatrögzítő elhelyezésének illusztrálása, nevezetesen (a) kiemelt szegély, (b) burkolati jel, (c) okostelefon……..,……...…….60

2. kép A 100 m-es szakasz és a szintkülönbség kimérése (a) lézeres távolság mérő, (b) célpont, (c) a mért távolság (d) a szintkülönbség (e) a burkolati jeltől mért távolság……...76

3. kép A bemért pontok……...…..…..103

4. kép A bemért pontokból készült 3d felületmodell……..…….103

5. kép A vizsgálópad által mért tömegek……...…..109

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat Kockázati mátrix [1]…….……..……..……..…39

2. táblázat A normál mérési eredmények összefoglalása…….……..….63

3. táblázat A korrigált mérési eredmények összefoglalása……..……...……....64

4. táblázat Az egyes feldolgozási módszerek eredményei……...….……..71

5. táblázat A mérési eredmények összefoglalása a különböző mintavételi frekvenciák és mérési sebességek szerint…….…….……...….72

6. táblázat A különböző szituációkban elért pontosságok……...……...75

7. táblázat Az Ipari parki terepi mérés adatait összefoglaló táblázat…….…….……78

8. táblázat Az ACFM modell paraméterei……..……..……..……90

9. táblázat Forgalmi állapotértékelési rendszer……...……97

10. táblázat A DWLFI útállapot értékelő rendszer…….……..99

11. táblázat A mért gyorsulások (m/s2) arányai személygépkocsi és teherautó esetén különböző sebességek mellett……..…….……...106

12. táblázat A paraméter értékek a kitűntetett helyeken. Az (a) tényező értéke az egyenértékű rugalmassági modulus és (b) az aszfaltréteg vastagsága függvényében ……...……..118

13. táblázat A hátralévő élettartam számítása során használt paraméterek…….……...122

14. táblázat Az egyes számítási módok által használt paraméterek összefoglaló táblázata……..123

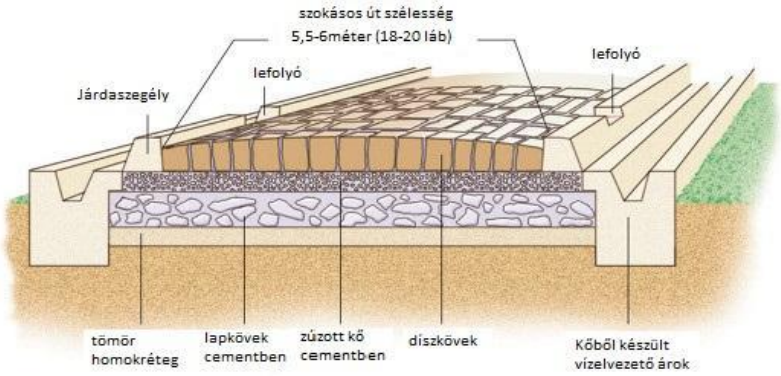
15. táblázat Az elméleti minimum és maximum élettartamok a különböző paraméterek és modellek szerint ……..……...125

16. táblázat A DWLFI állapotértékelő lap a Nép utca felméréséről…….……..…....129

BEVEZETÉS

A közlekedés minden ember életében fontos szerepet tölt be. A helyváltoztatási igény kiskorunktól fogva egész életünk során végigkísér bennünket. Az egyre növekvő közlekedési igény, a motorizációs szint növekedése a mai napig érzékelhető az emberiség számára. A forgalmi dugó, a parkoló hely, a burkolat állapota, a forgalomirányító rendszerek működése mind komoly kihívás elé állítja a közlekedés területén dolgozó mérnököket. A közlekedés történelmét áttekintve elmondható, hogy a járművek fejlődése gyorsabb ütemben történik, mint az úthálózat és a hozzá kapcsolódó infrastruktúra, viszont egy út életciklusa lényegesen hosszabb idejű, mint egy járműé, tehát hosszú évekre szükséges a karbantartás tervezése.

Már az ókori Itáliában is jól tudták, hogy a jó utak szükségesek a hadügyek, a közlekedés és a gazdasági élet számára. A közutak építése során szilárd alapot, kavics vagy kőzúzalék burkolatot alkalmaztak. A Kr. e. V. században jogszabályt alkottak az utak építésére, mely kimondja, hogy nyolc láb, a kanyarban tizenhat láb szélesnek kell lennie (Tizenkét Táblás Törvény). Ebből látszik, hogy az útépítés több ezer évre nyúlik vissza. A jó minőségű út feltétele a pályaszerkezet építése és annak víztelenítése. A kővel borított utat via stratának nevezték, innen származik a napjainkban használatos sztráda szó.



1. ábra Ókori közút rétegrendje *(https://digolanum.gportal.hu/gindex.php?pg=36088902*)

Az egyetemi képzés lezárásaként megírt diplomamunkám során is a közlekedéssel foglalkoztam, a forgalmi dugók kialakulását és mérséklésének lehetőségeit vizsgáltam. Ez fenntartási szempontból fontos tényező, hisz a forgalom egyrészt károsanyagot bocsájt ki, másrészt fizikai terhelést jelent az útra nézve. Munkám során eredményesen tudtam csökkenteni a torlódási hosszakat és a megállások számát. Ez lényeges a burkolat állapota szempontjából, mivel a hirtelen elindulás és megállás többlet terhelést idéz elő az aszfaltrétegben. 2008 óta foglalkozom közlekedés tervezéssel, amihez geometriai és pályaszerkezeti méretezés is szükséges, 2013 óta pedig a forgalom és az útpálya szerkezet vizsgálatával, ez indokolta a disszertációm témájának választását.

Az üzemeltetéshez nemcsak a kaszálás, kátyúzás, padkanyesés stb. tartozik, hanem a forgalom lefolyás szabályozása is. Az út üzemeltetése során a pályaszerkezet élettartama gazdasági szempontból fontos kérdés [2]. A forgalom az egyik olyan tényező, ami leginkább befolyásolja a hátralévő élettartamot, ezért ennek vizsgálatával is foglalkoztam a kutató munkám során. A fenntartási munkához szorosan kapcsolódik a meglévő út állapotértékelése, mely kutatási munkám fő irányvonala. A téma könnyebb megértése és az átláthatóság érdekében elvégeztem az állapotértékelési, állapotfelvételi, állapotparaméterek rendszerbe foglalását.

A tudományos probléma

Az úttal foglalkozó szakemberek számára rendelkezésre állnak különböző „adatbankok" amelyből kiindulási adatokat lehet szerezni különböző tervek készítéséhez. Ilyen adatbank például a KAPU (Közterületi Adatok Publikációja) [3]. Ehhez az adatbankhoz a KARESZ (Közúti Adatgyűjtő Rendszer) gyűjt adatokat 3D lézerszkenner segítségével. Ezt a módszert alkalmazták 2012-2015 között Budapest területének felmérésére, amely körülbelül 5000 kilométernyi utat jelent és a felmérés során több száz TB adatmennyiség keletkezett. Az adatbankhoz szükséges adatok frissítése folyamatos. További fontosabb adatbankok a Magyar Közút Nonprofit Zrt. üzemeltetésében az OKA (Országos Közúti Adatbank) adatbázis, amely 1995-ig visszamenőleg szolgáltat adatot az országos úthálóz állapotáról, a KIRA (Közlekedési Információs Rendszer és Adatbázis), illetve a KENYI (Kerékpárút Nyilvántartó Rendszer). Ezen kívül még Önkormányzati üzemeltetésű leltári jellegű adatgyűjtő rendszerek is léteznek. Az általam kifejlesztett útállapotértékelő rendszert a KARESZ-KAPU rendszerhez viszonyítva elmondható, hogy hasonló méretű hálózat vizsgálata esetén csak néhány GB adat keletkezik.

Az elmúlt évtizedekben nem csak a forgalom növekedett, hanem a járművek súlya is. Ez többlet terhelést jelent a pályaszerkezetre nézve, különösen rossz minőségű burkolat esetén. A súlynövekedésen túl nem elhanyagolható mértékű a nehézgépjárművek túlterhelése sem. Lengyel kutatók közel 11 millió nehézgépjármű adatait dolgozták fel, amely közül 6-22% volt túlterhelt [4]. A túlsúlyos gépjárművek pedig átlagosan 65%-os élettartam rövidülést okoznak [5]. Az e-ÚT 06.03.13 Útügyi Műszaki Előírás, ami 2005 óta van érvényben, a tervezési forgalom (TF) képletében ugyan figyelembe veszi az egyes 115 kN-os, a kettős 180 kN-os és az útkímélő kettős 190 kN-os tengely többlet fárasztó hatását, de az ezeknek megfelelő egyes járműátszámítási szorzókat azóta sem módosították. Továbbá figyelmen kívül hagyja a túlterhelt járművek és az egyenetlen útfelületből származó többletterhelést is.

A pályaszerkezet méretezéséhez szükséges a talaj teherbírási modulusának meghatározása, amelyet laboratóriumban az MSZ 2509-3, vagy az MSZ 2509-2 szerint CBR vizsgálattal végeznek. A CBR-értékből tapasztalati képlet alapján számítják a talaj statikus teherbírási modulusát, amely követelményként van megfogalmazva. Az e-ÚT 06.03.13 Útügyi Műszaki Előírás szerint az A, B és C forgalmi terhelési osztályok estén laboratóriumi vizsgálat hiányában táblázatból vehető ez az érték. A többi terhelési osztály D, E, K és R esetén mindig laboratóriumi vizsgálat szükséges. A méretezéshez szükséges másik paraméter a tervezési forgalom (TF), amely pontos meghatározása fontos a tervezés, illetve a megerősítés tervezése során.

Egyre több ország vizsgálja és követi nyomon az útpályaszerkezetek teljesítményét. Ezeket a teljesítmény mérőszámokat az Európai Unió 2004-ben indított COST 354-es akciója keretében határozták meg, amelyek közül a legfontosabb 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 állapotát lehet felmérni egy év alatt, így a magyarországi teljes úthálózat bemérése egy mérőautó használatával évekbe telik. A behajlás mértéke az E (rugalmassági modulus) értékétől is függ, amit csak laboratóriumi körülmények közt lehet pontosan meghatározni. Egy régi útszakaszon, amit többször javítottak, az egyenértékű modulus meghatározása nehézkes. Mindemellett a legnagyobb problémát az jelenti, hogy különböző pályaszerkezetek esetén is adódhat ugyanolyan mértékű behajlás [6].

Egy másik teherbírás teljesítményi mérőszám a hátralévő élettartam, amely a legtöbb tanulmány szerint a legalkalmasabb mérőszám. A szakirodalomban fellelhető több olyan műszaki paraméter, amely könnyen alkalmazható teljesítmény mérőszámként [7]. Ezeket a műszaki paramétereket azonban nem szabványosították és az egyes országok közútkezelői is egyedi megoldásokat alkalmaznak. A hátralévő élettartam számítására több módszer is létezik [8], [9]. A szakirodalomban található módszerek a központi behajlás értékén alapulnak, míg a saját modellemben a dinamikus keréktalperővel számolok [S6].

Az útkezelő szervezetek, mint például a győri, régóta használnak útnyilvántartó rendszert. Már a 90-es években létezett Győr város úthálózatának adatbankja. Az adatbázis tartalmazta az utak, útszakaszok, csomópontok, hidak adatait. Azóta fejlődött a rendszer és mára már tartalmaz forgalmi, baleseti adatokat, a hálózat terhelési kartogramjait, a kerékpáros létesítmények, járdák adatait és a behajtási korlátozásokat is meglehet jeleníteni. A mai napig nem minden településen áll rendelkezésre ilyen adatbázis, még egy megyei jogú város esetén is problémát jelent ennek a naprakész szinten tartása. A szervezet információt gyűjt az útszakasz

állapotáról. Az állapotfelvétel célja a karbantartási feladatok előkészítése, egy durva diagnózis felállítása. Az állapotparaméterek időnkénti felvételével nyomon követhető a létesítmény leromlási folyamata.

Egy útfelújítási, csomópont átépítési projekt során fontos lehet a meglévő létesítmény gyors és megbízható, kellő mértékű objektivitással készített állapotértékelése, ezért új módszerek alkalmazását követelik meg. Ennek egyik iránya a kutatási munkám során kidolgozott dinamikus keréktalperő mérési módszer szélesebb körű alkalmazása. A létesítmény állapotértékeléséhez újfajta állapotparaméterekre, állapotfelvételi és állapotértékelési módszerekre van szükség. Ezért kidolgoztam egy állapotértékelési rendszert, amely a dinamikus keréktalperőn alapszik és számításba vesz forgalmi paramétereket is. Ezt Dynamic Wheel Loading Force Index (DWLFI) vagyis dinamikus keréktalperő indexnek neveztem el. A módszer más módszerekhez hasonlítva abban tér el, hogy figyelembe veszi az útfelület egyenetlenségéből adódó többletterhelést. A doktori értekezés bemutatja egy útszakaszon kialakuló többletterhelés mérési módszerét, majd a mérési eredmények feldolgozásának menetét. A kifejlesztett mérési módszer a közúti forgalomban haladva, a forgalomáramlás sebességévével azonosan képes rögzíteni a terhelést, így gyors és megbízható adatot szolgáltatni az állapotértékelő rendszernek. Ez a fajta állapotfelmérés egy megelőző vizsgálata lehet egy ennél részletesebb és pontosabb vizsgálatnak, mint például a TSD (Traffic Speed Deflectometer).

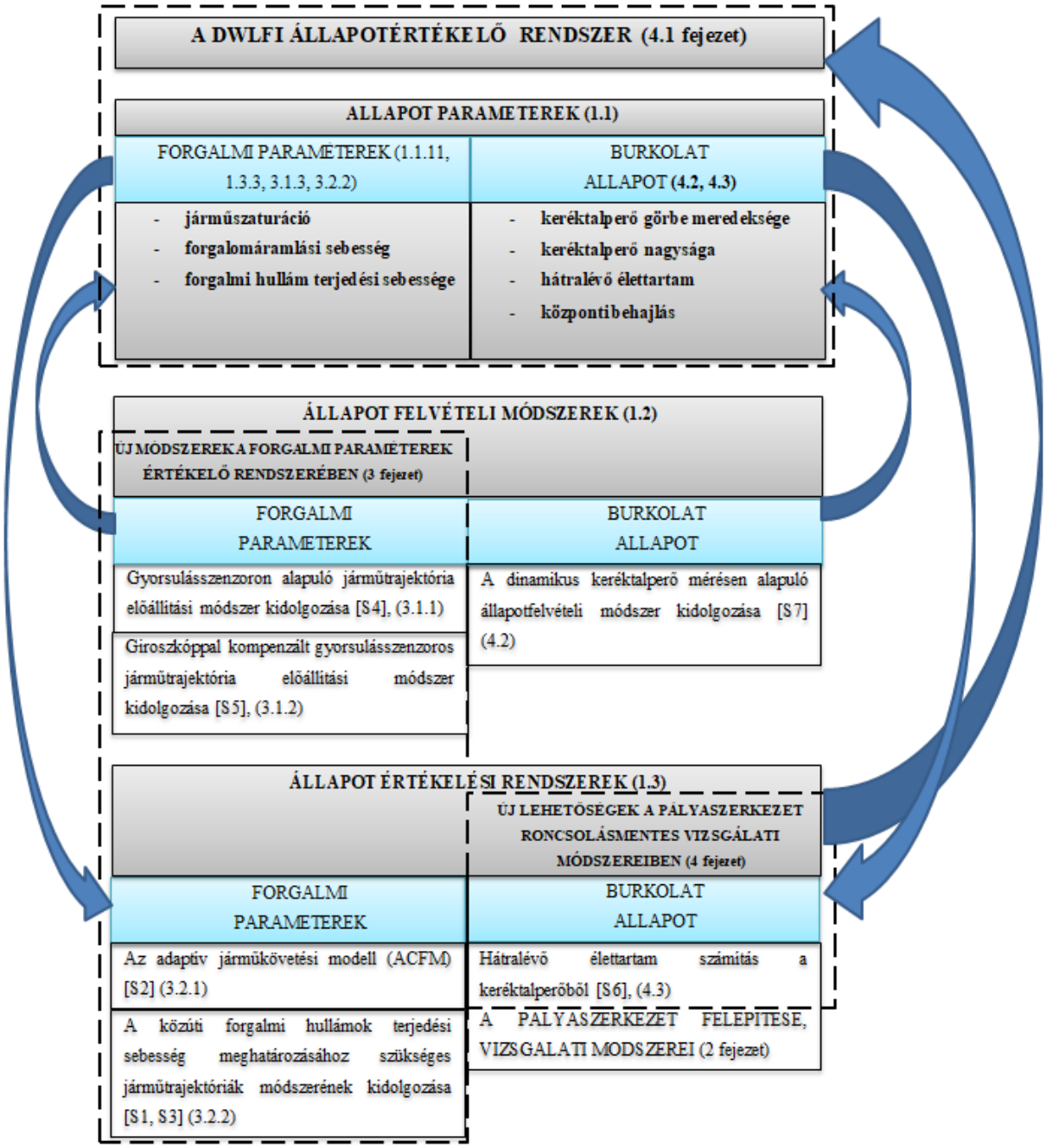
A kidolgozott dinamikus keréktalperő mérési eljárás bizonyította hatékonyságát, mert megbízható és gazdaságos adatszolgáltatást biztosít az utak állapotáról.

A kutatási téma körülhatárolása

A téma aktuális és rendkívül kutatott terület. Sok paraméter játszik szerepet a burkolat leromlásában, de a leromlási folyamatban szerepet játszó összes paraméter vizsgálata meghaladja egyetlen doktori értekezés kereteit. Ezen tény felismerése, valamint a rendelkezésre álló adataim és eszközeim számbavétele után arra a következtetésre jutottam, hogy le kell szűkítenem a vizsgálandó paramétereket. Az állapotparaméterek rendszerbe sorolását követően csak a dinamikus keréktalperőn alapuló mérési módszerhez kapcsolódó paraméterek részletes vizsgálatával foglalkoztam. A végső célt figyelembe véve a témát két fő részre osztottam:

- forgalmi adatok vizsgálata a harmadik fejezetben,
- alakváltozási, szerkezeti jellemzők és az állapotértékelési rendszer kidolgozása a negyedik fejezetben.

A DWLFI rendszerhez kapcsolódó fejezetek egymás közti viszonyát az alábbi ábrán szemléltetem.



2. ábra A disszertáció fejezeteinek kapcsolatát bemutató ábra

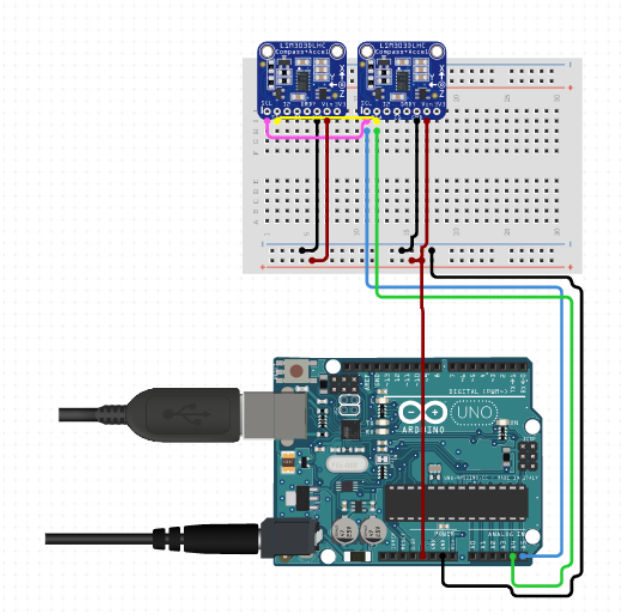
Célkitűzéseim

- Dinamikus keréktalperő mérésen alapuló vizsgálattal igazolni, hogy egyenetlen útfelület esetén jelentős többletterhelés adódik át az útra ugyanazon járműsebesség mellett.
- Felkutatni, elemezni a pályaszerkezetekkel kapcsolatos szakmai előírásokat, szabványokat, amelyek alapján megfogalmazhatóak a hátralévő élettartam számításához szükséges paraméterek.

- Gyorsulás szenzoron alapuló járműtrajektória és keréktalperő mérési módszerek kidolgozása.
- Egy adaptív járműkövetési modell kidolgozása a forgalom modellezéséhez.
- Egy dinamikus keréktalperőn alapuló útállapot értékelő rendszer kidolgozása.

Az alkalmazott kutatási módszerek

A kutatáshoz szoftver és hardver elemekre is szükségem volt. A mérések elvégzéséhez korszerű gyorsulás szenzorokat, GPS-t, lézeres távolságmérőt, nagysebességű kamerát, automata váltós járművet használtam. A jövőbeni dinamikus keréktalperő vizsgálatokhoz gyorsulás szenzorokból és mikrokontrollerből elkészítettem egy mérőeszköz kapcsolási rajzát. A mérési adatok feldolgozásához statisztikai szoftverre és szimulációs szoftverekre, mint például a Vissim, a Matlab, a Scilab, továbbá az AutoCad-re volt szükségem. Ezen kívül még az Excelt használtam a mérési adatok kiértékeléséhez.



3. ábra A dinamikus keréktalperő mérőeszköz kapcsolási rajza

A kutatási eredmények gyakorlati alkalmazása

Az általam kidolgozott mérési eljárás és út állapotértékelési rendszer segítség lehet a közútkezelők számára az útfelújítás, karbantartási munkák döntéshozatalakor. Ezt a módszert az Egyetemen folyó útépítéssel, közúti forgalomtechnikával foglalkozó tantárgyak tananyagának továbbfejlesztésekor is hasznosítani lehet. A megalkotott adaptív járműkövetési modell a Forgalomtervezés és irányítás tantárgy oktatása során alkalmazható.

A disszertáció felépítése

A disszertáció első fejezetében ismertetem az út állapotrendszert, mely leírható az állapotparaméterekkel, állapotfelvételi módszerekkel, valamint az állapotértékelési rendszerekkel. Elvégeztem az ehhez szükséges rendszertani besorolást **(4. ábra)**. Az állapotrendszer teljes leírása az I. mellékletben található, amely az összes állapotparamétert, állapotfelvételi módszert és állapotértékelési rendszert kategorizálva mutatja be.

A második fejezetben a vizsgálat tárgyát képező pályaszerkezet jellemzőit, valamint annak vizsgálati módszereit mutatom be. A fejezet célja, hogy megismertesse az olvasóval a pályaszerkezet egyes rétegeinek fizikai jellemzőit és anyagminőségét, a fellépő terheléseket, valamint a szilárdsági méretezési eljárást. Ezenkívül betekintést nyújt a már létező roncsolásmentes vizsgálati módszerekbe, valamint az építéstechnológiába.

A harmadik fejezetben újfajta forgalmi állapotfelvételi és értékelési rendszert dolgoztam ki. Ennek lényege, hogy járművön belül elhelyezett érzékelőkkel gyűjt adatot a forgalmi paraméterek meghatározásához. Ez a fejezet szorosan kapcsolódik a disszertáció fő témájához, a pályaszerkezet roncsolás mentes vizsgálatához, amihez hozzá tartozik a forgalmi állapot értékelése is, mivel a tönkremenetel függ a járműsebességtől.

A negyedik fejezet a disszertáció fő célkitűzését mutatja be a dinamikus keréktalperő index meghatározásán keresztül. Kidolgoztam az állapotértékelési rendszerhez szükséges dinamikus keréktalperő mérésen alapuló állapotfelvételi módszert. Bemutattam az általam elvégzett fizikai kísérleteket, valamint egy útszakasz üzemi körülmények közt történő vizsgálatát a saját módszereimmel.

A disszertáció összefoglalását, az eredmények értékelését az ötödik fejezet tartalmazza.

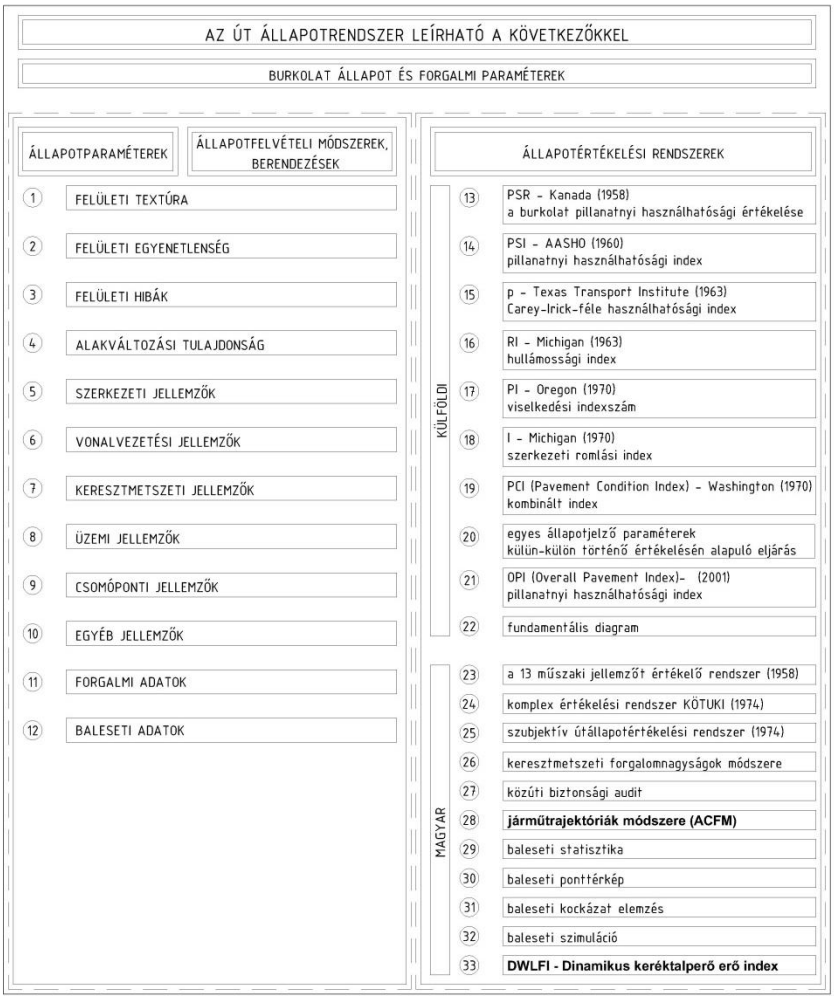
A hatodik fejezetben a jövőbeni célokat és fejlesztési lehetőségeket mutatom be.

A disszertáció felépítésénél szempont volt, hogy az egyes fejezetek logikai sorrendben kövessék egymást és a szükséges részletességgel ismertessék a létesítmény állapotértékelési rendszerét, a hozzá tartozó állapotparamétereket valamint azok felvételi módját. Ezenkívül bemutassa a vizsgálat tárgyát képező pályaszerkezet jellemzőket.

1 AZ ÚT ÁLLAPOTRENDSZERE

Az út állapotának szűkebb értelemben az útburkolat állapotának értékelési és az értékeléshez szükséges állapotfelvételi módszerekkel több kutató is foglalkozott már. Az útburkolat állapotparamétereit *Gáspár (1983)* három osztályba sorolta, a változatlan, a korlátozottan változó, valamint a változó. A paraméterek kategorizálásához létrehozta a felületi textúra, a felületi egyenletesség, az alakváltozási tulajdonságok, a felületi hibák, az egyéb szerkezeti tulajdonságok és az egyéb jellemző csoportokat [10].

Az egyes állapotparaméterek rendszerbe sorolásakor én szintén három különböző osztályba soroltam. Az első az időben változó, a második az időben változó levezetett és az időben változatlan kategória, ahogy az az I. mellékletben látható. Elvégeztem az állapotparaméterek, állapotfelvételi módszerek valamint az állapotértékelő rendszerek kategorizálását, rendszertani besorolását, ahogy azt a **4. ábra** szemlélteti. Az állapot paramétereket tizenkét csoportba soroltam. Külön megemlítendő, hogy az első öt kategória a burkolat állapotát, a következő öt kategória az úthálózat állapotát jellemzi, míg az utolsó kettő forgalmi paraméter.



4. ábra Az út állapotrendszere

1.1 ÁLLAPOTPARAMÉTEREK

Az egyes állapotparaméterek lehetnek időben változók és időben változatlanok. Amennyiben több paraméter együttes változásából áll össze, akkor időben változó levezetett állapotparaméterről beszélünk [10]. Az állapotparaméterek kategóriájánál részletesen kifejtem, hogy milyen paramétereket lehet mérni és figyelembe venni.

1.1.1 FELÜLETI TEXTÚRA

A felületi textúra a kopóréteg felszínén jelentkezik, ezt pedig elsősorban a felhasznált ásványi anyagkeverék tulajdonságai és a bedolgozás módja határozza meg. A fenntartási szakaszban a forgalomtól és a téli fenntartás módjától is függ. A felületi textúrát jellemzi a mikro- és a makroérdesség. A makroérdesség mértékét jellemzi, hogy a gumiabroncs a felületről milyen mértékben tudja kiszorítani a vizet. A mikroérdességet az egyes kőszemcsék felületén jelentkező egyenetlenségek alkotják [11] [12] [10].

1.1.2 FELÜLETI EGYENETLENSÉG

A felületi egyenetlenség a pálya tervezett síkjától való eltérés. Az egyenetlenségeket hossz- és keresztirányban is lehet mérni. A pálya felületén kialakulhatnak különböző nagyságú hullámok [13] [10]. A kialakult hullámok hossza és amplitúdója hatással van a pályaszerkezet állékonyságára. A kialakult hullámok függőleges gyorsulásokat eredményeznek a jármű kerekében és felépítményében [10].

A bitumen a hőmérséklet emelkedésével egyre inkább plasztikusabbá válik, így ugyanannál a terhelésnél maradó alakváltozás jön létre.

A hosszirányban kialakult hullámszerű felületi hiba a járművek fékezéséből és elindulásából, illetve a pályaszerkezet hibájából adódnak, míg a keresztirányú nyomvályúk a földmű és az alap gyengesége, illetve a burkolat kopásából keletkeznek [10].

A keréknyomvályú képződésének esélye magas hőmérsékleten, nagy és lassú nehézgépjármű forgalom mellett a legnagyobb [14].

1.1.3 FELÜLETI HIBÁK

Félmerev pályaszerkezet esetén előfordulhat reflexiós repedés a felületen. Ezek kiváltó oka lehet az anyagfáradás, a megnövekedett igénybevétel, egyenlőtlen süllyedés, az elégtelen vízelvezetés, az elégtelen összeköttetés a rétegek között. A hirtelen hőmérséklet ingadozás termikus feszültséget eredményezhet, ami repedéshez vezet. A repedések megelőzésére az alap-

réteget mikrorepesztik vagy feszültségelosztó bitumen réteget (SAMI) építenek, esetleg az alapréteg és a burkolati réteg közé aszfaltrácsot tesznek.

Betonburkolatoknál előforduló felületi hiba lehet egy fagyveszélyes réteg a tábla alatt, az altalaj elégtelen tömörítése, a szemcsés talaj szétrázódása, kiüregelődése, a nem megfelelő vízelvezetés, helytelen vasalás, dilatációs hézagkialakítás, és a nem megfelelő betonkeverék-összetétel [10] [15].

A felületi hibák közé sorolható a lépcsőképződés, ami az aszfaltréteg megbontásából, valamint visszadolgozásából keletkezik. Ide sorolhatók a foltozások, a burkolati jelek is, amelyek vizsgálatára létezik gépi mérőeszköz. További állapotparaméterek a kötőanyag szegény állapot, a porozitás, az anyagkipergés, a kötőanyag feldúsulás, a textúra inhomogenitása, a zúzalék mennyisége, a zúzalék eloszlása, amelyek megítélése szubjektív módon történik [15].

1.1.4 ALAKVÁLTOZÁSI TULAJDONSÁG

A tengelyáthaladások száma deformációt okoz a pályaszerkezetben. Mindemellett a padka, az útszegély, útszél és a vízelvezető árkok is alakváltoznak az idő folyamán. Ez a változás statikus (Benkelman tartó) és dinamikus módszerekkel (FWD) is mérhető. A padka és az árkok alakváltozását szemrevételezéssel is elégséges megállapítani az állapotértékeléshez. Az alakváltozás pontosabb meghatározásához ma már korszerű lézeres távolságmérő, lézerszkenner, illetve a fotogrammetria is rendelkezésre áll.

1.1.5 SZERKEZETI JELLEMZŐK

A fő szerkezeti jellemzőket foglalja össze az I. melléklet. A szerkezeti jellemzők mérési módszerei a behajláson alapuló módszer és az újfajta keréktalperő mérésen alapuló módszer. A behajlásból megállapítható a pályaszerkezet teherbírása, a hátralévő élettartam, sőt a rugalmassági modulus is. A dinamikus keréktalperő a pályaszerkezet állapotát jellemző tényező, ugyanis a leromlási folyamat során szemmel látható felületi hibák, egyenetlenségek alakulnak ki, amik a terhelőerő növekedését okozzák ugyanannál az áramlási sebességnél.

1.1.6 VONALVEZETÉSI JELLEMZŐK

A megtervezett út vízszintes vonalvezetését helyszínrajzon ábrázoljuk, minden egyenes hosszát, az ívviszonyokat, ívadatokat rögzítjük a rajzon. A magassági vonalvezetésre hosszszelvényi ábrázolást alkalmazunk, ahol az egyenes szakaszok meredekségét százalékban adjuk meg. Az egyenes szakaszokat domború vagy homorú ívekkel kerekítjük le, amelyek le-

hetnek tiszta körívek, parabola ívek, vagy esetleg esésváltásos módszerrel egyenes szakaszok is. Az ívek tervezésénél figyelemmel kell lenni az előzési, megállási, fékezési távolságokra, valamint a beláthatóságra is. Ebbe a kategóriába sorolható az útcsatlakozásokkor kialakított szegély lekerekítések is, amelyek tiszta körívekből állnak. A lekerekítés egy ív helyett lehet két vagy akár három részes kosárgörbe is.

1.1.7 KERESZTMETSZETI JELLEMZŐK

A keresztirányú profilmérést az út véletlenszerűen kiválasztott, de egymástól legfeljebb 500 m távolságra levő keresztmetszeteiben kell felvenni. Jellemzője a profil hullámossága a nyomvályúk miatt, és a keresztesése a víztelenítés miatt. A keresztmetszetet jellemzi a szabályozási, építési szélesség, valamint a közterület szélessége. A forgalmi és kapaszkodó sávok száma és szélessége is ide sorolható. A tervezés során, keresztmetszeti rajzon rögzítjük az oldalesés értékét, ezenkívül az építési és forgalomtechnikai méreteket is fel kell tűntetni. A keresztmetszeten az épülő pályaszerkezet rétegrendje is látszik, esetenként a földben lévő közművezetékeket is feltüntetik. Jelölni kell továbbá a forgalom irányát és a berendezési tárgyakat (növényzet, villanyoszlop…) is.

1.1.8 ÜZEMI JELLEMZŐK

Az üzemi jellemzők csoportjába tartoznak a városközpontok átkelési szakaszai, az útkeresztezések száma, az oldalirányú akadályok melyek a forgalomáramlásra vannak hatással. A baleset megelőzésben a burkolat üzemi paraméterei játszanak szerepet, úgymint az erőátadás, kerékellenállás, a burkolati kopás. A statikus tengelysúly határértékének átlépése a jármű menetdinamikájára és szerkezetére van hatással, ami szintén balesetveszélyes állapothoz vezethet. Az út üzemeltetéséhez a vízelvezető rendszer (csatorna) az úttest alatti közművek hozzátartoznak. A forgalomtechnika jelzésrendszere szintén a biztonságos közlekedést szolgálja, tehát a jelzőlámpás forgalomszabályozás is ebbe a kategóriába sorolható.

1.1.9 CSOMÓPONTI JELLEMZŐK

A csomópontok tervezésekor bizonyos szempontoknak meg kell felelni. Ilyen szempont a csomópont észlelhetősége, áttekinthetősége, a helyszínrajzi kialakítása, melyek szubjektív módon megítélhetők. A balra kanyarodás lehetősége, a járhatóság vagy esetleg, hogy szükség van-e jelzőlámpás forgalomirányításra, mind olyan paraméterek, amelyek megítéléséhez szakember által készített mérések, számítások, vizsgálatok szükségesek.

1.1.10 EGYÉB JELLEMZŐK

Az egyéb jellemzők kategóriába olyan paraméterek esnek, amelyek nem befolyásolják az út üzemeltetését. Ilyen paraméter a fényvisszaverő képesség, amely az úthasználhatóság szempontjából lényeges tulajdonság. Az utazási kényelem, a töltőállomások vagy a parkolók száma a gépjárműhasználók kényelmét szolgálják. A személygépjárműből tömegközlekedési eszközre történő átszállás lehetősége is a kényelmet szolgálja. A vízköd képződése a közlekedésbiztonságára lehet hatással, ennek számszerűsített mérésére alkalmas módszerek még nem terjedtek el [10] [16]. A zaj keletkezése környezetvédelmi szempontból fontos paraméter, amelyet útépítésnél környezeti hatástanulmány keretében vizsgálnak.

1.1.11 FORGALMI PARAMÉTEREK

A forgalmi adatoknak legfőképp a pályaszerkezet méretezésénél van szerepe, de az út állapotértékelésénél vagy a forgalomszabályozásban is nélkülözhetetlen. A legfontosabb paraméterek a forgalomnagyság, a forgalomsebesség és a forgalom sűrűség. Ezek összefüggését *Greenshields* vizsgálta először 1935-ben, amikor a forgalomnagyságot ábrázolta a sebesség függvényében. Az ő nevéhez fűződik a fundamentális diagram [17]. A pályaszerkezet terhelése szempontjából az előbb említett paraméterek mellett a forgalom összetétele is számít, hiszen nem mindegy, hogy csak személygépjármű vagy nagyarányú nehézgépjármű is megjelenik a forgalomban. Emiatt a terhelés számításakor egységtengely terheléssel számolnak. A forgalmi paraméterekhez tartozik az egyes járművek sebessége, amit lehet térben és időben is átlagolni, ami így a forgalomáramlás sebességét jelenti. A forgalomáramlásban ismeretes az oszcilláció jelensége, amely a járművek feltorlódását, majd a kialakult oszloptól való leszakadását jelenti. Emiatt egy hullám alakul ki a forgalomban, amely lehet álló, de terjedhet térben előre vagy hátrafelé is. Ennek a kialakult hullámnak van terjedési sebessége is, ami a hullám frontján, közepén és hátulján eltérő lehet [S3][S1].

A forgalom modellezését makroszkópikus és mikroszkópikus forgalmi paraméterekkel is el lehet végezni [S2] [18]. Számos tudós tett erőfeszítéseket, hogy olyan matematikai modellt alkosson, amely jól szemlélteti a forgalomáramlás dinamikáját. Ezen modellek két fő megközelítéssel élnek. Az első a járműkövetési modell, a második a „Forgalmi folyam” modell, amely a folyadékáramlás tudományán alapszik. Jelenleg e modellek alkotják a szakirodalom alapjait. Ebben a témában a legfontosabb három szakirodalom *Herman, Haight és Gerlough* nevéhez fűződik [19]–[21].

A mikroszkópikus forgalommodellezésben az egyedi járművek mozgását leíró egyenletek játszanak szerepet [S2] [22]. Ezen a szinten a makroszkópikus forgalmi paraméterek már nem adnak kellő pontosságot a modellezéshez. Ha egy jelzőlámpás csomópont forgalomirányítását tervezzük, akkor másodperc pontossággal meg kell határozni az érkező járművek sebességét, a keresztmetszeten áthaladt járművek darabszámát, illetve egy adott útszakaszon egy időpillanatban tartózkodó járművek mennyiségét. Ez utóbbit a szakirodalomban forgalomsűrűségnek (traffic density) nevezik. *Tettamanti* egy adott pillanatban jelen levő járművek számát és a szakasz hosszának hányadosát forgalomsűrűségnek vagy járműsűrűségnek nevezi [23]. *Gilicze* a közlekedési áramlatok c. munkájában forgalomsűrűséget említ [24]. A diplomamunkám során 2008-ban egy forgalombefolyásoló rendszert terveztem meg, aminek működési elve egy állapotér alapú szabályozás. Egyedülállóan a csomópont jelzés tervét úgy készítettem el, hogy azt a követő útszakasz forgalma befolyásolja. A forgalom leírható a szakasz pillanatnyi forgalomsűrűségével vagy az általam járműszaturációnak nevezett jellemzővel. Az én megfogalmazásomban a járműszaturáció az adott hosszúságú szakaszon tartózkodó járművek hosszának összege, valamint a szakasz hosszának hányadosát fejezi ki.

$$JS = \frac{\sum_i^j l_j}{L} [\%] \tag{1.1}$$

,ahol

l_j a szakaszon tartózkodó járművek hossza [m],

L a szakasz hossza [m].

Bizonyos esetekben, például állapottér alapú szabályozás esetén ezt a paramétert javaslom szabályozni.

1.1.12 BALESETI PARAMÉTEREK

A baleset bekövetkeztének tényét baleseti jegyzőkönyvben rögzítik. Ezt a jegyzőkönyvet a rendőrség tartja nyilván, amelyből baleseti statisztikát készítenek. A baleseti statisztika az úttervezésben is használatos fogalom, miszerint egy csomópont átépítés szükségességét, vagy kerékpárút tervezés során a létesítménytípus kiválasztását, annak elhelyezését, kialakítását befolyásolja. Egy közlekedési létesítmény forgalombiztonsági szintjét a baleseti adatokkal lehet mérni. Ezek a paraméterek a baleset bekövetkezésének pontos helye, ideje, oka, a kimenetel súlyossága, a keletkezett anyagi kár valamint az időjárási viszonyok.

1.2 ÁLLAPOTFELVÉTELI MÓDSZEREK, ESZKÖZÖK

Az állapotfelvételi módszerek kategorizálását az állapotparaméterek kategóriájával azonosan végeztem el, mivel ezek egymáshoz kapcsolódó fogalmak.

A nyugatnémet Szövetségi Közlekedési Minisztérium megbízása alapján a kölni Bundesanstalt für Strassenwesen /BASt/ 1981-ben kidolgozott egy anyagot, ami a burkolat állapotfelvételi eljárásokat és berendezéseket értékeli [10]. Ez kiindulási alapot adott a jelenleg ismert állapotfelvételi eljárások kategorizálásához. Nem célom az összes módszer részletes tárgyalása, ezért csak említés szintjén foglalkozok vele a kategóriák tárgyalása során. Kivétel ez alól a saját módszereim, melyet a harmadik és negyedik fejezetben fejtek ki részletesen. A saját szubjektív nézőpontom szerint az állapotfelvételi módszerek lehetnek kézi vagy gépi jellegűek, ez utóbbi járműhöz vagy útpályához kötött.

1.2.1 A FELÜLETI TEXTÚRA MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

A burkolat felületi textúrája a felületi érdesség segítségével vizsgálható. Ez a paraméter hatással van a gumiabroncs és az útpálya közötti erőátadásra. Ennek egy mérési módja a Moore-féle kifolyás mérő eszköz, melyet Németországban fejlesztettek ki. Egy másik módszer a sztereofényképezés, amellyel a pontos profil megrajzolható [10]. Emellett megemlíthető a korszerűnek tekinthető lézerszkennerrel felszerelt RST mérőkocsi.

1.2.2 A FELÜLETI EGYENETLENSÉG MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

A hossz-és a keresztirányú felületi egyenetlenségek mérését elvileg ugyanazzal az eszközzel lehetséges mérni. A nemzetközi gyakorlatban elterjedt készülékek listáját a I. sz. melléklet tartalmazza. Létezik olyan mérőeszköz, amely járműre szerelt érzékelőből áll. Ebben az esetben fontos fogalom az átviteli tényező, amely azt jelenti, hogy adott hullámhossztartományban a szóban forgó készülék a tényleges hullámmagasságok hányszorosát mutatja (*Gáspár*). A keresztirányú egyenetlenséget a nyomvályú mélységével lehet kifejezni, amit 4 m-es léc alatt mérnek [10].

Az AASHO útkísérlet során az esésváltozás meghatározására a CHLOE Profilometer-t használták, amely 5 km/h sebesség mellett képes mérni. A burkolat állapotfelvétel igénye azt kívánta meg, hogy évenként több ezer km úthossz legyen bemérve. A nagymennyiségű út, a mérőautó lassúsága, az utakon lévő nagy járműforgalom balesetveszélyesnek mutatkozott. Ezért elkezdtek olyan mérőberendezést fejleszteni, ami az utak üzemi sebessége mellett képes mérni. Vizsgálták, hogy a személygépkocsi és a benne ülő személy függőleges irányú mozgá-

sai hogyan hozhatók összefüggésbe a burkolathullámokkal. A gépkocsiban ülő személyek utazáskényelme és a jármű gumiabroncs nyomásának változása közti összefüggést is vizsgálták. Végül megállapították, hogy egy normál személygépkocsit mérőeszköznek tekintve az értékelés pontosságát és a nyert adatoknak a vizsgált útszakasz viselkedésével való kapcsolatát nehéz biztosítani. Ez irányban több sikertelen próbálkozás volt, viszont 1965-ben a Brokaw-féle vagy másnéven PCA Road Meter készülék az addigi legpontosabb eredményt érte el. Ez akkoriban gyors mérési módszernek számított az esésváltozás rögzítésében. Napjainkban már lézerszkenneres mérőautó létezik az útprofil pontos felvételéhez.

1.2.3 A FELÜLETI HIBÁK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

A felületi hibákat általában szemrevételezéses módszerrel állapítják meg, de létezik gépi módszer is. Különböző fényképezési eljárásokat alakítottak ki, hogy kevésbé legyen szubjektív az állapotjellemzés. Ezzel a módszerrel 60 km/óra sebességgel haladó járműből lehet felvételt készíteni. Ezek a rendszerek képesek a repedések, hézagok, foltozások azonosítására, sőt még a burkolati jelek hiányossága is megítélhető. A szakirodalomban fellelhető fontosabb berendezések a japán Roadrecon, a francia GERPHO illetve a kölni BASt fotóautó [10], [25].

1.2.4 AZ ALAKVÁLTOZÁSI TULAJDONSÁG MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

Alakváltozási tulajdonságon csak a rugalmas változást értjük, mivel a plasztikus alakváltozás nyomvályú formájában felmérhető. A pályaszerkezet ilyen jellegű állapotváltozását (behajlását) csak valamilyen műszerrel lehet mérni. Ennek mérésére a három legelterjedtebb módszer a Benkelman tartó, a Lacroix-deflektográf és a Dynaflect mérőberendezés [10], [26], [27].

1.2.5 A SZERKEZETI JELLEMZŐK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

A szerkezeti jellemzők egy részét tervdokumentációból meg lehet állapítani, úgymint a burkolat típusát vagy a pályaszerkezet rétegrendjét illetve a bitumentartalmat. Más paraméterek, mint a pályaszerkezet teherbírása, hátralévő élettartama, rugalmassági modulusa vagy a dinamikus keréktalperő csak valamilyen mérőberendezéssel, illetve számítás útján határozható meg. Az előbb említett Dynaflect mérőberendezés képes teherbírás, rugalmassági modulus meghatározására, amelyből hátralévő élettartam számolható. A dinamikus keréktalperő felvételére alkalmas módszert a 4. fejezetben mutatom be.

1.2.6 A VONALVEZETÉSI ÉS KERESZTMETSZETI JELLEMZŐK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

Egy út tervezési paraméterei időben nem változnak számottevően, de egy alkalommal hasznos lehet a bemérésük. Ehhez a feladathoz használhatunk analóg szintezőt, teodolitot vagy digitális eszközöket, mint pl. mérőállomás vagy lézeres távolságmérő. Ezek a mérőeszközök egyébként alkalmasak a keresztmetszeti állapotparaméterek felvételére is.

1.2.7 AZ ÜZEMI JELLEMZŐK MÉRÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

Az üzemi jellemzők egy részét különböző szolgáltatók, hatóságok, szervezetek adatbázisaiból szerezhetjük be. A burkolat és a jármű gumiabroncsa között fellépő erőhatások, mint üzemi jellemzők mérésére többféle eszközt fejlesztettek. A legegyszerűbb mérési mód - amely tulajdonképpen nem is mérőeszköz - egy gépkocsi fékútjának mérése. A legismertebbek közül néhány berendezés [10]:

- a Skiddometer, ami a pályán állandó sebességgel haladó utánfutó blokkolt kerekének fékező erejét méri;
- a SCRIM, amely egy ferdén elhelyezett mérőkerék maximális oldalirányú fékező erejének mérését teszi lehetővé;
- az LPC csúszásellenállás-mérő egy járműből és egy vontatott részből áll. A vontatott kereket az állandó sebesség mellett haladó jármű 2 mp-ig befékezi. A kerék előtt a pályán vízfilmet képeznek, a fékezéskor pedig a blokkolt keréken kialakuló nyomatékot mérik [10].

1.2.8 A CSOMÓPONTI ÉS EGYÉB JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSÁNAK ESZKÖZEI

A csomóponti jellemzőket csak szemrevételezéses módszerrel veszik figyelembe. Az egyéb jellemzők közül pedig a fényvisszaverődésre létezik gépi megoldás mégpedig a Grandel/Hörz-féle mérőberendezés [10] [28].

1.2.9 A FORGALMI ÉS BALESETI ADATOK RÖGZÍTÉSÉRE ALKALMAS ESZKÖZÖK

A forgalmi adatok mérésére számos berendezést fejlesztettek ki. A mérés módját tekintve ez lehet útpályához vagy járműhöz kötött. Az útpályához kapcsolódó járműérzékelők vagy az útburkolatban vannak elhelyezve vagy pedig az út mellett illetve felett helyezkednek el.

Az induktív hurokdetektor a legelterjedtebb detektor típus, melyet az útburkolatba építenek be, a mérési mód pedig az elektromágnesesség elvén alapul. A hurok felett elhaladó jármű az elektromos vezetőben örvényáramot generál, ami így megváltoztatja a hurok eredeti mágneses terét, amely leginkább a jármű fémtömegétől függ, így akár járműosztályozásra is alkalmazható. A földmágnesességen alapuló járműérzékelők a geomágneses erőteret érzékelik. Az elhaladó jármű fémtömege ebben az erőtérben zavart okoz, melyet az érzékelőben levő erre alkalmas fémötvözet detektálni képes. A pneumatikus detektor egy rugalmas tömlő, melyet a forgalom irányára merőlegesen helyeznek el. Az elhaladó jármű kereke nyomásimpulzust generál, melyet a tömlő végén elhelyezett membrán elektromos impulzussá alakít. A piezoelektromos járműérzékelő működési elve a piezo kristályok anyagának tulajdonságára épül. A kristályokban nyomás hatására feszültség indukálódik a nyomásváltozással arányosan. Csak dinamikus hatás érzékelhető, mert a nyomás állandósulása után már nem keletkezik feszültség. A képfeldolgozáson alapuló járműérzékelő a fényintenzitást méri, így képes a járművet a környezettől megkülönböztetni. A fénymegszakításon alapuló érzékelő egy adó- és egy vevőegységből áll, melyeket az út két szélén helyeznek el pontosan szemben egymással. Az adó fényt bocsát ki, amit a vevő érzékel, az elhaladó jármű pedig megszakítja a fény útját. Ez a mérési mód érzékeny az időjárásra, ráadásul bármi megszakíthatja a fény útját, tehát nem csak fém tárgyat érzékel. Az infravörös járműérzékelő a tárgyak infravörös sugárzását detektálja. Minden anyag, aminek hőmérséklete nagyobb az abszolút nulla foknál, infrasugárzást bocsát ki magából. Az érzékelőt az úttest fölé helyezik, aminek része az érzékelő, az optika és egy kiértékelést végző elektronika, amely kiszűri a nem járműből érkező sugarakat. Az ultrahangos detektorok egy adó-vevő párból állnak. A kisugárzott hanghullámok visszaverődnek, amelyet a vevő egység dolgoz fel. A visszavert jelet impulzus- vagy Doppler módszerrel használja fel a vevőegység. Az impulzus módszer esetében periodikus jelet bocsát ki, aminek azonos a frekvenciája. A jel visszaérkezésének idejéből lehet tudni, hogy jármű tartózkodik az érzékelő alatt. A Doppler-módszer esetén a visszaverődő hullámok frekvenciája eltér a kibocsájtott jelétől, ebből mozgó járműre lehet következtetni. A radar- és lézer elvű detektorok hasonlóan az ultrahangos megoldáshoz a visszavert hullámok érzékeléséből következtetnek jármű jelenlétre. A különbség csak a közvetítő jelben van. Ezek ugyanis elektromágneses sugárzást bocsátanak ki [23].

A közösségi közlekedés járműveinek helymeghatározásához villamosok és trolibuszok esetén, a felsővezetéken elhelyezett jeladót használnak. Buszok esetén rádiós kapcsolaton keresztül a megállókban elhelyezett adót a járművön elhelyezett vevő érzékeli, amely jelet a forgalomirányító központba továbbít.

Járműhöz kötött érzékelő a GPS technológia, amely nem csak közösségi közlekedési eszköz, hanem bármely jármű nyomkövetésére alkalmas. Ennek a módszernek a pontossága forgalomban haladva 10 m körüli.

A forgalmi paraméterek jellemzésére szolgáló járműtrajektória mérés [S4, S5] az eddigi legpontosabb mérési módszer, melyet a 3. fejezetben mutatok be részletesen.

A baleseti adatokat a helyszínen készített baleseti jegyzőkönyvben rögzítik, melyből később közlekedési szakember készít baleseti statisztikát és baleseti ponttérképet.

1.3 ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSI RENDSZEREK

Az 50-es években folyt útkísérletek alkották meg az útburkolatok állapotértékelési rendszerét. Idehaza és külföldön is végeztek útvizsgálatokat, mely eredményeként számos út állapotjellemző és az ezekhez kapcsolódó állapotértékelő rendszer került kidolgozásra. Alapelvük és a gyakorlatban való alkalmazhatóságuk is jelentősen eltér egymástól, ha figyelembe vesszük az eltérő igényeket és a rendelkezésre álló mérőeszközök számát és minőségét [10].

1.3.1 MAGYAR BURKOLAT ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSI RENDSZEREK

Magyarországon 1957-58-ban javaslatot készítettek az utak megfelelőségének osztályzására, amely **13 műszaki jellemző** értékelésén alapul. A műszaki jellemzőket három csoportba sorolták, az üzemi, a biztonsági és a szerkezeti jellemzők [10].

Ebben a rendszerben a megfelelőségi mutató 0 és 100 pont között változhat [10]. A 100 pont jelenti az újonnan megépített út állapotát.

1974-ben a Közúti Közlekedési Tudományos Kutató Intézet **komplex értékelési rendszert** dolgozott ki, ami három különböző eljárást tartalmazott a gazdasági számításon alapuló, a becsléssel történő értékelés és az objektív állapotértékelési módszert [10]. Az objektív módszer esetén az egyes állapotparamétereket 0-5 értékkel pontozzák, a komplex állapotjellemző számot pedig súlyozott átlaggal kapjuk meg. Ha az átlag 2,9-nél kisebb, akkor „rossz” minősítést kap, ha 3,9 akkor pedig éppen jó.

A szubjektív útállapot értékelési rendszer során egy erre a célra összeállított táblázatba 1 és 5 közötti 0,5 pontosságú számot írnak. Az értékelést több szakember egyszerre végzi, majd az értékeket átlagolják [10], [29].

Az üzemi célú burkolat állapotfelvétel és értékelő rendszer az utak állapotának gyors értékelésére szolgál. Ez az eljárás szubjektív állapotbecslésen alapszik. A jellemzés tárgyát a burkolat, a padkák és az árkok alkotják. A minősítő osztályzat 1-től 5-ig terjedő skálán adható érték. Az értékelendő szakaszhosszt 200 m-ben határozták meg, amely egy 20 km/h sebességgel haladó járműből megfigyelve elegendő idő áll rendelkezésre az állapotértékelő lap kitöltéséhez. A szakaszokat homogenizálják és a homogén szakaszokra kiszámítják az átlagot [10].

1.3.2 KÜLFÖLDI BURKOLAT ÁLLAPOTÉRTÉKELÉSI RENDSZEREK

A pillanatnyi használhatósági értékelés (**Present Serviceability Rating, PSR**) az úthasználók szubjektív megítélésén alapszik. Ez az értékelési módszer kidolgozása az amerikai AASHO útkísérletekkel kezdődött. Az Egyesült Államokban 1950-51-ben Marylandben, 1952-54 között az Idaho állambeli Maladban, majd Mississippi államban végezték. A legnagyobb szabású útkísérletre az Illinois állambeli Ottawa mellett került sor. Az útkísérlet során ismert tengelyterhelésű járművek különböző típusú pályaszerkezettel épült szakaszokon haladtak 1958 novemberétől egészen 1961 közepéig. A kísérlet célja volt, hogy adatot szerezzenek a közúti szállítási költségek (üzemi költségek) és az útépítési ráfordítások közötti összefüggésről. A másik célja az volt, hogy megvizsgálják az útszakaszok leromlási folyamatát [10], [30]. A járművezetők szubjektív véleményét egy értékelő lapon rögzítették, a burkolat értékelése 0-5-ig terjedő skálán változott, 0-1: nagyon rossz, 1-2: rossz, 2-3: közepes, 3-4: jó, 4-5: nagyon jó.

A burkolatállapot felmérését Kanadában 1958 óta kutatják. Az ottani szakemberek véleménye szerint az útszakasz pillanatnyi használhatósága függ a a pályaszerkezet teherbírásától, az altalaj osztályától, a földmű víztelenítési osztályától, a burkolat korától, a forgalom nagyságától és összetételétől, a burkolat szélességétől, a pályaszerkezet összetételétől és vastagságától, a padka szélességétől és típusától, valamint az éghajlattól [10]:

Az útszakaszok pillanatnyi használhatósági értékeléséhez Kanadában olyan értékelő lapot használtak, amely 0 és 10 közötti osztályzást tesz lehetővé. A kanadaiak közel négyszáz útszakaszt vizsgáltak éveken át a főbb tapasztalatok pedig, hogy az aszfaltburkolat pillanatnyi használhatósága az idő függvényében csökken, elenyésző az összefüggés a pályaszerkezet-teherbírásváltozásával, vagy a forgalmi terhelés nagyságával. A Benkelman-tartóval mért rugalmas behajlások alapján megbízhatóan becsülhető a burkolat jövőbeni állapota (elsősorban szemcsés talaj estén). Jelentős hatással van a pillanatnyi használhatósági értékre a forgalmi terhelés nagysága a kevésbé teherbíró földművek esetében [10].

A pillanatnyi használhatósági index (**Present Serviceability Index, PSI**) kiszámításához Carey és Irick 1960-ban az AASHO útkísérletekből nyert adatokat elemezve, a hajlékony útpályaszerkezet esetében a következő összefüggést határozták meg. A használhatóság függ a hosszirányú esésváltozástól, az átlagos keréknyomvályú mélységétől, a nagy repedések arányától, a foltozás mértékétől [10]:

Az AASHO útkísérletek által használt útszakaszokat újjáépítették, majd 1962-ben új kutatásba kezdtek [31]. A cél az volt, hogy a különböző alappal készült pályákat vegyes forgalommal terhelve kutassák. A Texas Transportation Institute and Center for Highway Research kutatóintézetben azt tapasztalták, hogy CHLOE profilometer túlságosan leértékeli a durva textúrájú, nagy érdességű szakaszokat. Ezért a PSI értékelést a felületi érdességet jellemző taggal egészítették ki [10] [32] [31]:

A Minnesota-i Egyetem 1973-ban olyan módszert dolgozott ki amely csak egy paramétert, a csúszásellenállást méri, a többit pedig szemrevételezéssel, szubjektív módon értékeli [33].

Az amerikai Michigan államban 1959-62 közötti időszakban vizsgálták a burkolatok viselkedését, állapotromlását [34], [35]. A vizsgálat ideje alatt több, mint 15 000 km hosszúságú út felületi egyenetlenségét mérték az úgynevezett Michigan Truck-Mounted Profilometer használatával. Ez az eszköz a keréknyomban mérhető függőleges elmozdulást regisztrálja hüvelyk/mérföld mértékegységben. Az AASHO útkísérlet során használt CHLOE profilometer által meghatározott esésváltozás (SV) és a **michigan-i hullámossági index (RI)** között összefüggés áll fenn [10]. Kimutatták az RI és a PSI közti összefüggést is.

Kisebb forgalmú, főként erdős utak tanulmányozását végezték Oregon államban 1970-es években [36]. A kapott eredményekből azt állapították meg, hogy a keréknyomosodás és az elérhető legnagyobb sebesség kapcsolatban van az úthasználók szubjektív véleményével. Erre megalkották a **viselkedési számot,** ami függ a sebességtől, a keréknyomképződéstől, a nedvesítések között eltelt időtől, a járművek számától, valamint a fenntartások közt eltelt időtől [36].

Betonburkolatok viselkedését vizsgálták 1951 és 1963 között Michigan államban [37]. Célja az volt a kutatásnak, hogy a betonburkolat romlását kifejező deformáció, csatlakozások, lépcsők repedések egyetlen mérőszámmal értékelhetők legyenek. Az AASHO útkísérletek

során alkalmazott PSR és PSI értékeket szubjektív alapon fejlesztették. A michigan-i **szerkezeti romlási index** sokkal inkább objektív, és a következő paraméterektől függ:

- hosszirányú repedések, mérföldenként,
- keresztirányú repedések, mérföldenként,
- felületi hámlás négyzetlábban, mérföldenként,
- deformációk, mérföldenként,
- sarokletörések a kereszthézagoknál, mérföldenként,
- sarokletörések a keresztirányú repedéseknél, mérföldenként,
- magassági lépcső a kereszthézagoknál, mérföldenként,
- magassági lépcső a keresztirányú repedéseknél, mérföldenként,
- maradó magassági lépcső, mérföldenként.

A minősítésre jellemző, hogy nulla érték jelenti a tökéletes burkolatállapotot, a leromlás növekedésével pedig bármekkora érték adódhat. Megfigyelték, hogy a szerkezeti romlási index és a burkolat kora között lineáris a kapcsolat [10]:

A Pavement Condition Index (PCI) az úthibákra vonatkozó kombinált index. Ezt a módszert Washingtonban fejlesztette *LeClerc és Marshall* 1970-ben. Ők csökkentő tényezőkkel változtatják az állapotértéket [38]. Az értékelést egy 100 fokozatú skálán végezték, ahol a hibamentes utat tekintik száz pontosnak. Ez a módszer csak az út műszaki állapotát értékeli az ember által megítélhető használhatóságot figyelmen kívül hagyva.

Az Overall Pavement Index (OPI) a burkolathibák kiterjedését és súlyosságát is figyelembe veszi. Az út állapotértékelését súlyozó tényezőkkel lehet elvégezni.

Az egyes állapotparaméterek külön-külön történő értékelésén alapuló eljárást Németországban fejlesztették ki [39]. Az állapotparaméterek számára ötfokozatú értékelő rendszert alakítottak ki, az állapotparaméterek határértékeit pedig három útkategóriára külön meghatározták [10].

Ezen kívül még létezik néhány ismert módszer a világban. *Karan* 1983-ban szakértők által adott információk statisztikai feldolgozása után fejlesztette ki a **Pavement Quality Index-et (PQI)**. Ennek továbbfejlesztéseként hozták létre az **(RCI)**, a **(SAI)**, és az **(SDI)** indexeket

[40]. *Juang és Amirkhaninan* 1992-ben fejlesztették ki az **(UPDI)** indexet [41]. *Zhang* 1993-ban egy átfogó értékelési rendszert fejlesztett a hajlékony pályaszerkezetnek megfelelő **(OAI)** Fuzzy logikán alapuló indexet [42]. *Shoukry* 1997-ben egy Fuzzy logikán alapuló megközelítést alkalmazott, amely egy univerzális veszélyességi index volt **(FDI)**. Ez a módszer képes volt az utat a beavatkozás szükségessége szerint rangsorolni [43]. *Yogesh* 2013-ban fejlesztette ki az **(OPCI)** és az **(RQR)** indexeket [44].

1.3.3 A FORGALMI PARAMÉTEREK ÉRTÉKELŐ RENDSZERE

Az úttervezés alapját a forgalmi adatok képezik, mely nélkülözhetetlen a gazdaságos pályaszerkezet tervezéséhez, továbbá a meglévő úthálózaton kialakult forgalmat sem lehet enélkül megfelelően menedzselni. A forgalomirányítás szükségességét már az 1930-as években felismerték. Amerikában már létezett jelzőlámpás irányítás. Azóta számos irányítási stratégiát dolgoztak ki és a forgalom megfigyelése is sokat fejlődött.

Egy folyópályaszakasz vagy egy csomópont tervezése során forgalmi és szerkezeti méretezést is kell végezni. A forgalmi méretezés azt jelenti, hogy a létesítménynek mekkora lesz a várható kapacitás-kihasználtsága. Ha közel száz százalék, vagy azt meghaladó, akkor bővíteni szükséges. A szerkezeti méretezés pedig a pályaszerkezet teherbíró képességét jelenti. Mindkét tervezési lépéshez szükséges a tervezési forgalom meghatározása, amely a burkolat tervezett élettartama alatt várható összes teherismétlés számát jelenti. Az egységtengely, melyet minden járműtípusra át kell számítani 100 kN tengelynyomásnak felel meg. Az út geometriai méreteinek meghatározásához a szabvány táblázatokat tartalmaz, amelyhez szintén ismerni kell a tervezési forgalmat.

A forgalmi paraméterek értékelő rendszerét saját szubjektív véleményem szerint a következő kategóriákra osztom:

1) A hullámterjedési sebességet kifejező forgalmi paraméter értékelő rendszerek:

- fundamentális diagram,
- Pipes-féle módszer,
- keresztmetszeti forgalomnagyságok módszere,
- járműtrajektóriák módszere (lásd 3.2.2).

Az úthálózat forgalmi paraméterei közül a legfontosabb az egyes elemek, illetve a teljes úthálózat kapacitáskihasználtsága. A forgalomáramlásban létezik egy fogalom az oszcilláció, ami a gépjárművek feltorlódását, majd egymástól történő lemaradását jelenti. Ez a jelenség a

forgalomáramlásra negatív hatással van, csökkenti a sebességét így a forgalomnagyságot is, ezáltal csökken az út teljesítőképessége. Az oszcilláció lökéshullámot indít el a forgalomban, ami lehet térben álló, terjedhet térben előre és hátrafelé is. A lökéshullám magától kimúlik, ha teljesül, hogy a két szomszédos terület sűrűsége azonos lesz vagy a sebességük aránya a sűrűségük arányának reciprokával egyezik meg. Emiatt az úthálózat jellemzésére a kialakult hullámterjedés sebesség jól használható mérőszám, amely optimális esetben nulla.

A fundamentális diagramot a múlt század elején találták fel. Az 1930-as években az Egyesült Államokban a járműforgalom elérte azt a szintet, ami megkövetelte a forgalom szervezését, irányítását. Az első lépés ez irányban a forgalmi adatok gyűjtése volt. Az egyes keresztmetszetekben fényképeket készítettek, amelyen megszámlálható volt a gépjárművek darabszáma. Ezeket az adatokat egy diagramon ábrázolták, amelyet fundamentális diagramnak neveztek és a forgalomnagyságot jelenítették meg a forgalomsűrűség függvényében.

Lighthill és Whitham aztán később Richards előállt egy teóriával a forgalomáramlás kapcsán. Ez a teória a folyadékáramlási modell helyett az egyéni járműveket vette számításba [45], [46]. Ez volt a fundamentális hipotézis, amely Greenshields nevéhez fűződik [17]. Ő mérte a forgalomnagyságot az utakon, amelyet különböző diagramokon szemléltetett. A forgalomnagyság és sűrűség közti összefüggés a következő alakban írható fel.

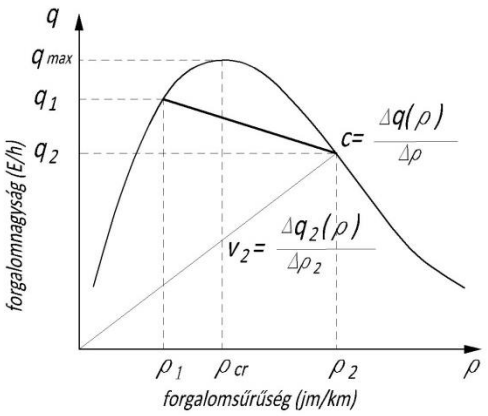
$$q(t,x) = \rho(t,x)v(t,x) \qquad (1.2)\ [17]$$

Számos sebesség-sűrűség függvény létezik a szakirodalomban, de *Péter T.* azt mondja, hogy ezek nem veszik számításba a környezeti tényezőket, amelyek viszont befolyásolják a sebességet [47].

Makroszkópikus modell esetén a térbeli átlagsebesség egyenlő az egyensúlyi sebességgel.

$$v(t,x) = V(\rho(t,x)) \qquad (1.3)[47]$$

Ezért az LWR hipotézis egyértelműen megfogalmazza, hogy a forgalomsűrűség meghatározza az átlagsebességet állandósult állapot esetén. Ez a kapcsolat azonnali reakciót feltételez, nem veszi számításba a járművezető véges reakcióidejét és a jármű gyorsulási, lassulási képességét. A hullámterjedés sebességét a fundamentális diagram [48] két különböző forgalomsűrűséghez tartozó pontját összekötő egyenes meredekségével határozhatjuk meg (**5. ábra).**

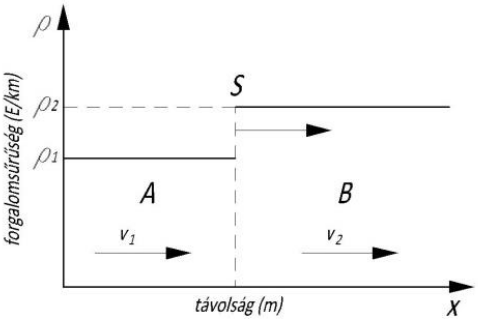


5. ábra A hullámterjedés sebességének értelmezése a fundamentális diagramon

A fundamentális diagramon látható ρ_1 helyen ritkább, de nagyobb a forgalom mint a ρ_2 helyen. Ezért a vonal meredeksége negatív, ami azt jelenti, hogy térben hátrafelé mozog a hullám.

Ha el tudjuk különíteni a két különböző sűrűségű területet és ismejük a terület forgalomsűrűségét és sebességét, akkor a fundamentális diagram segítségével az (1.4)-es képlet alapján meghatározható a hullámterjedés sebessége.

A Pipes-féle módszer két különböző sűrűségű terület határán levő vonal haladási sebességét írja le, ami a hullámterjedés sebességét jelenti [49]. Az S-el jelölt vonal két különböző sűrűségi területre osztja a forgalmat, amelyet ρ_1 és ρ_2 sűrűség jellemez **(6. ábra)**. A függőleges határvonal c sebességgel halad pozitív x irányba.



6. ábra Az S vonal mozgása

A járművek átlagsebessége az A területen v_1 és a B-n pedig v_2. Könnyen belátható, hogy a $(v_1 - c)$ az A területen mozgó járművek (S) vonalhoz mért relatív sebessége és $(v_2 - c)$ pedig a B területen haladó járművek relatív sebessége.

A hullámterjedés sebessége így felírható a következő alakban:

$$c = (\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1)/(\rho_2 - \rho_1) \qquad (1.4)\ [49]$$

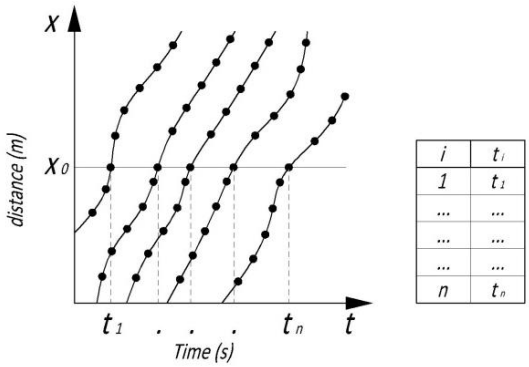
Az (1.14)-es egyenlet kifejezhető a forgalomnagyságokkal is:

$$c = (q_2 - q_1)/(\rho_2 - \rho_1) \qquad (1.5)\ [49]$$

Ennél a módszernél a szakirodalom nem tér ki arra, hogy lehet meghatározni a területek határát [49].

A keresztmetszeti forgalomnagyságok módszerével egy útszakaszra vonatokozó hullámterjedési sebességet lehet meghatározni, adott keresztmetszetekben elhelyezett forgalomszámláló berendezés adatainak feldolgozásával [S1], [50]. A kaliforniai Berkeley Egyetem kutató professzorai vizsgálatot végeztek az Ontarioban található Queen Elizabeth út 10 km hosszú szakaszán. *Mauch* szerint a hullámterjedés sebessége 22 és 24 km/h körüli attól függően, hogy a sorban hol méri.

A számításhoz előbb adatot kell gyűjteni a forgalomról. A forgalomnagyság jármű menynyiséget fejez ki, amely az időegység alatt egy keresztmetszeten áthaladni képes jármű darabszámot jelenti. Ennek értelmezéséhez út-idő grafikont lehet készíteni az **7. ábrán** látható módon.



7. ábra Az elhaladt járművek időpontjának rögzítése

A megfigyelő az x_0 pontban helyezkedik el és rögzíti az elhaladás időpontját egy táblázatban. Ekkor a megválasztott számítási időalapnak megfelelő forgalom nagysága az x_0 helyen:

$$\boldsymbol{q(x_0) = \frac{N_y(x_0)}{T_y}} \tag{1.6}$$

,ahol

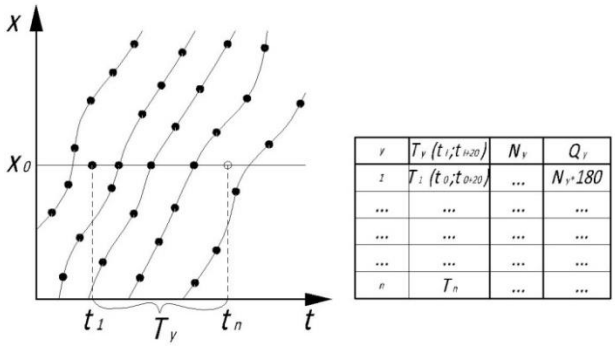
$q(x_0)$ forgalomnagyság [E_j/h],

$N_y(x_0)$ a járművek darabszáma az x_0 helyen [db],

T_y számítási időalap [s].

A járművek darabszám összegzésének, időintervallumának nincs elméleti határa, de az órás forgalomnagysághoz igazodva egy perc alatti intervallumot célszerű felvenni. Például, ha húsz másodperces intervallumot határozunk meg, akkor száznyolcvannal megszorozva órás forgalomnagyságban kapjuk meg az eredményt.

$$Q_y(x_0) = N_y * 180 \tag{1.7}$$

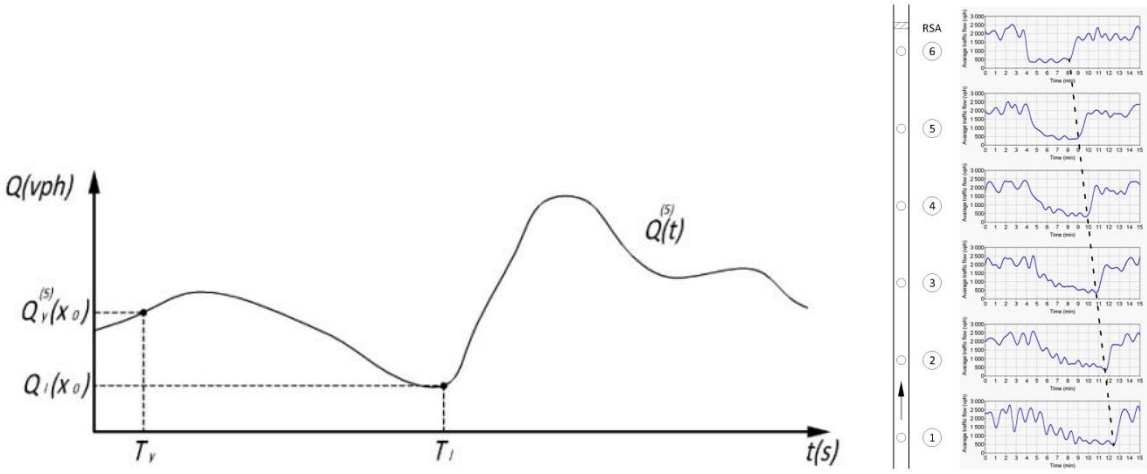


8. ábra Az elhaladt járművek időintervallum szerinti összegzése

Az adattáblában rögzített időpontok alapján összegezhető a választott időalap szerint a járművek darabszáma. Ha az összegzésnél a t időt egész számnak tekintjük, akkor a t_1 oldalról zárt és t_n oldalról nyílt intervallum között megszámlálható a járműdarabszám. Végül a kapott számsort egy ötszörös periódusú mozgó átlaggal simítom.

$$Q_y^{(5)}(T_y) = \frac{Q(T_{y-2}) + Q(T_{y-1}) + Q(T_y) + Q(T_{y+1}) + Q(T_{y+2})}{5} \tag{1.8}$$

Az így számított adatokat az egyes keresztmetszetekben az idő függvényében lehet ábrázolni, majd meg kell keresni a mélypontokat (**9. ábra**).



9. ábra A keresztmetszeti forgalomnagyságok minimum helyeit összekötő egyenes ábrázolása

A minimum helyeket összekötő egyenes vonal meredeksége adja meg a hullámterjedés sebességét. Miután meghatároztuk az első és az utolsó mérési helyeken az időpontokat a távolság ismeretében, az alábbi összefüggéssel számítható a hullámterjedés sebessége:

$$c = \frac{1000}{t_i(x_f) - t_i(x_l)} * 3{,}6 \left[\frac{km}{h}\right] \tag{1.9}$$

,ahol

$t_i(x_f)$ a hullám indulásának időpontja az első mérési helyen,

$t_i(x_1)$ a hullám indulásának időpontja az utolsó mérési helyen.

2) A biztonságot kifejező forgalmi paraméter értékelő rendszerek:

- közúti biztonsági audit,
- baleseti statisztika, szimuláció (ACFM).

Közúti biztonsági auditot kell készíteni minden újonnan tervezett közúti létesítményhez. A biztonsági audit kiterjed a tervfázisra, a kivitelezés fázisára, a műszaki átadás-átvételi időpontra valamint az üzemeltetés korai időszakára. Az auditáláshoz rögzítik az alapadatokat, úgymint:

- megbízó,
- vállalkozó,
- projekt megnevezése,
- auditálási fázis,
- auditorok adatai,
- időpont,
- időjárási és látási viszonyok,
- forgalmi adatok,
- baleseti adatok.

Az auditálás során a létesítményt vagy a róla készült terv egyes pontjait helyszínrajzi, kereszt- vagy hossz-szelvényi nézetben kell bemutatni, a tervezett állapot, a probléma, cél, javaslat rend szerinti leírással. Az értékelést egy kockázati mátrix segítségével lehet elvégezni, ami egy három fokozatú értékelést ad eredményül (**1. táblázat**).

1. táblázat Kockázati mátrix [1]

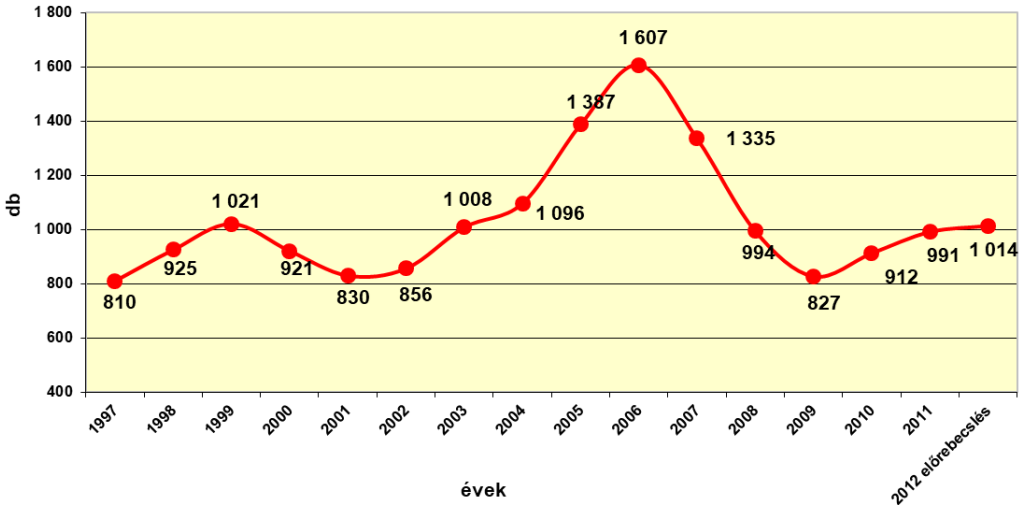
Kockázati fok		Előfordulás valószínűsége		
		NAGY (3)	KÖZEPES (2)	CSEKÉLY (1)
Kimenetel súlyossága	SÚLYOS (2)	Magas (6)	Közepes (4)	Alacsony (2)
	KÖNNYŰ (1)	Közepes (3)	Alacsony (2)	Alacsony (1)

Az út biztonságát kifejező forgalmi paramétereket **baleseti statisztikával** lehet szemléltetni. Komplex baleseti mutatószám jelenleg még nincs, de a baleseti adatok diagramon vagy

ponttérképen való ábrázolásával értékelhető az úthálózat baleseti helyzete. A győri Útkezelő Szervezet működted saját baleset nyilvántartó rendszert, amihez a győri Rendőrkapitányság szolgáltat adatot. A rendszer a következő adatokat rögzíti:

- hely, általában utca házszám szerint,
- dátum és időpont,
- okozó,
- részes,
- súlyosság (anyagi káros, könnyű, súlyos sérülés, illetve halálos kimenetelű baleset)
- előidéző ok a KSH kód szerint.

A baleseti statisztika egyik eszköze a balesetszám időbeli alakulása egy adott területre (**10. ábra).** A baleset számának csökkentése mindig célja a közlekedésépítési beruházásoknak. A baleseti értékelésnél ezzel a módszerrel kimutatható a csökkenés.



10. ábra Az összes közúti baleset alakulása Győr város területén (db/év)

Kerékpárút tervezéshez szükséges a település Kerékpárforgalmi Hálózati Tervét elkészíteni. A terv tartalmi része a közlekedésbiztonság javítása. Az elvárt eredmény a balesetek számának csökkenése, az ehhez szükséges intézkedést a tervnek tartalmazni kell. A balesetszám mellett fontos tudni, hogy hol és milyen kimenetelű baleset történt, ezt baleseti ponttérképen lehet ábrázolni (**11. ábra**).

11. ábra Súlyos sérüléses közúti balesetek 2012. I. félévben (Győr déli rész)

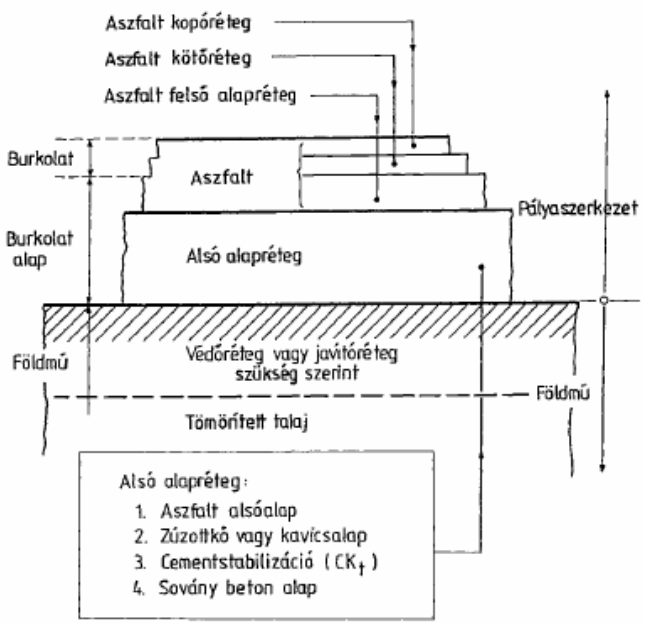
Egy közlekedési baleset okát közúti közlekedésbiztonsági műszaki (balesetelemzés) igazságügyi szakértő vizsgálhatja a 9/2006 (II.27.) IM rendelet 5. számú melléklete 26 szerint. A jármű balesetrekonstrukció során **baleseti szimulációt** készítenek. Az ütköző járművek mozgási jellemzőinek, úgymint az ütközés előtti haladási sebesség, az ütközési helyzetek, az ütközés előtti és utáni mozgások szimulációja. A szimulációhoz a járműmozgásokat leíró matematikai modelleket használnak. A szakirodalomban számos járműkövetési modell létezik, amit erre a célra lehet használni [51]–[58].

2 A PÁLYASZERKEZET FELÉPÍTÉSE, VIZSGÁLATI MÓDSZEREI

Ahhoz, hogy megértsük a kutatás során végzett vizsgálatokat, tisztázni kell a pályaszerkezet felépítését, anyagait, azok tulajdonságait, az építés technológiáját, a vizsgálati módszereket, a méretezési metódust. A következő részben bemutatott pályaszerkezeti anyagok közt van, amit ma már nem használnak az útépítésben, de fontosnak tartom megemlíteni, mivel régen épült pályaszerkezetek vizsgálatára fejlesztettem ki a vizsgálati módszerem.

2.1 A PÁLYASZERKEZET RÉTEGRENDJE

A közutak pályaszerkezete három csoportra osztható: hajlékony, félmerev és merev. A hajlékony vagy félmerev pályaszerkezet burkolata aszfalt, a merev szerkezeté pedig beton. A félmerev pályaszerkezet alapja cementstabilizáció, amelyre 10 cm-nél vastagabb aszfaltréteget fektetnek [59].



12. ábra A hajlékony pályaszerkezet elvi felépítése [59]

2.2 A PÁLYASZERKEZETI RÉTEGEK ANYAGAI

2.2.1 A FÖLDMŰ

A földművet homlokrakodóval, illetve gréderrel vagy egyéb földmunkagéppel alakítják ki a helyszínen nyert vagy anyagnyerőhelyről szállított földből. Az eredeti terep és a végső felület között kialakult kubatúrát földműnek nevezzük [60].

2.2.2 JAVÍTÓRÉTEG

A földmű azon része, amelyet megfelelő anyagból, vagy behordott talaj stabilizálásával állítanak elő, a földmű teherbírásának növelése érdekében. A javítóréteg nem része a pályaszerkezetnek [60].

2.2.3 FAGYVÉDŐ RÉTEG

A teherbíró földműre épített olyan fagyálló anyagú réteg, amelynek feladata az olvadási vagy fagykár megelőzése. A fagyvédő réteg nem része a pályaszerkezetnek. A javítóréteg vastagsága beszámítható a fagyvédő réteg vastagságába, ha kielégíti a fagyvédelemre vonatkozó előírásokat és ugyanabból az anyagból készül, mint a fagyvédő réteg [60].

2.2.4 BURKOLATALAP

Az útpályaszerkezet egy vagy több rétegű része, amely a burkolatról átadódó terhelést közvetíti a földműre. A burkolatalap készülhet kötőanyag nélküli szemcsés anyagból (zúzottkő, kohósalakkő, mechanikai stabilizáció, folytonos szemmegoszlású zúzottkő), vagy kötőanyagot (cement, mész, bitumen, pernye) is tartalmazó keverékből [60].

2.2.5 KÖZBENSŐ FESZÜLTSÉGELOSZTÓ RÉTEG

A hidraulikus kötőanyagú burkolatalapra készített olyan bitumenréteg, amely kőzúzalékot is tartalmaz, ezáltal olyan felületi érdességet lehet elérni, ami megakadályozza a felette lévő rétegbe kialakuló reflexiós repedéseket [60].

2.2.6 BURKOLAT

A pályaszerkezet legfelső egy vagy két rétegből álló része a burkolati réteg, aminek anyaga aszfalt ez pedig bitumenből és adalékanyagokból (zúzalék, homok, mészkőliszt) áll. Két réteg esetén kopó- és kötőréteg kerül beépítésre. A kopóréteg érintkezik a járművek gumiabroncsaival, ezért viselnie kell a forgalmi és környezeti hatásokat is. A kötőréteg pedig lehetővé teszi a kopó- és alapréteg együttdolgozását, teherelosztó hatása révén növeli a szerkezet alakváltozással szembeni ellenállását. A bitumen kötőanyagként szolgál, amellyel szemben a következő követelményeket támasztjuk: az adalékanyaghoz jól kössön, ne legyen hőérzékeny, bírja a szélsőséges hőmérsékletet, és lassan öregedjen. Három fajtáját különböztetjük meg [59]:

- útbitumen (B) felhasználáskor magas hőmérsékletre hevítik,

- olajjal hígított bitumen (HB) felhasználásakor a higítás miatt alacsonyabb hőmérsékletre kell hevíteni,
- bitumen emulzió vízzel és emulgeáló szerrel állítják elő, felhasználáshoz nem szükséges hevíteni.

2.3 A PÁLYASZERKEZETI RÉTEGEK MÉRETEZÉSE

A pályaszerkezeti rétegek méretezéséhez nyújt segítséget a tervezési útmutató, amit ugyan nem vezettek be, viszont ezen keresztül megismerhetjük az egyes rétegek vastagságának számítási metódusát. Az e-ÚT 06.03.13. „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése” [60] című útügyi műszaki előírás a típus-pályaszerkezet kiválasztását jelenti, amihez az alapréteg fajtáját és a tervezési forgalmat kell ismerni. Mind a típus-pályaszerkezet kiválasztásos mind az analitikus pályaszerkezet méretezés lényege, hogy a tervezési időtartam alatt előforduló egységtengely áthaladás számot, tehát a tervezési forgalomnak megfelelő terhelési ismétlésszámot elviselje a pályaszerkezet. Az útpályaszerkezet szükséges üzemeltetési és fenntartási munkálatait rendszeresen az állapotvizsgálati eredmények alapján kell elvégezni.

2.3.1 A FORGALOM, MINT A PÁLYASZERKEZET FIZIKAI TERHELÉSE

A járművek a gumiabroncson keresztül átadják a jármű súlyából származó terhelést a pályaszerkezetnek. Ennek a terhelésnek a mértéke tervezés szempontjából a jármű tengelyére ható erő. Az eltérő típusú járművek, különböző tengelysúlyt adnak át a szerkezetnek, ezért a számításhoz ezeket egységesíteni kell. Az egységtengely terhelést a szabvány 100 kN-ban határozza meg, amelyre minden járműkategóriát át kell számítani. Ehhez járműátszámítási szorzót használunk, amelynek értékeit az e-ÚT 06.03.13 „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése” című útügyi műszaki előírás szerint az országos közúthálózaton 1996-2000 között mért tengelyterhelés-mérések adatainak értékelése alapján határozták meg.

A tervezési forgalom (TF) számításával kezdődik a pályaszerkezet méretezése, ezek alapján pedig a jellemző forgalmi terhelési osztály (A, B, C, D, E, K és R) megállapítása. A tervezési forgalom a szerkezet élettartama alatt várható egységtengelyre átszámított teherismétlés számmal egyenlő. A tervezési élettartam 10-20 év közötti időtartam, ami az út kategóriájától függően változik. A tervezéshez szükséges kiindulási forgalmi adatokat az Országos Közúti Adatbankból kell venni, ennek hiányában forgalom számlálási mintából, a különböző időszaki

és területi tényezők figyelembevételével becsülhető a forgalom nagysága. A járműosztályokra meghatározott ÁNF értékből is számítható a tervezési forgalom [59].

2.3.2 TÍPUS-PÁLYASZERKEZET KIVÁLASZTÁSA

A típus-pályaszerkezetek kiválasztásának módszerét az e-ÚT 06.03.13 ÚME előírás tartalmazza részletesen. Az előírás alkalmazásával a hazai klimatikus körülményeket figyelembe véve a tervezési forgalom meghatározásán túl nincs szükség további méretezési eljárásra. A pályaszerkezet variánsokat forgalmi terhelési osztályonként táblázatos formában foglalták össze. A méretezés alapelve, hogy alapréteg fajtánként és forgalmi terhelési osztályonként csoportosították a típus-pályaszerkezeteket. A szükséges aszfaltréteg-összvastagságokat pedig a többrétegű útpályaszerkezetek mechanikai modellje alapján a hajlítási, húzó-nyomó igénybevételeket figyelembe véve fáradási kritériumok alapján méretezték. A tervezési élettartam végén hálós repedések kialakulhatnak. Ez a módszer a nyomvályú képződést nem kezeli, ezt a helyi viszonyoknak megfelelően megválasztott összetételű aszfaltkeverék alkalmazásával lehet kezelni [60].

2.3.3 ANALITIKUS PÁLYASZERKEZET MÉRETEZÉS

A módszer alapelve, hogy az útpályaszerkezetet, mint rugalmas, végtelen izotróp féltéren fekvő, többrétegű hajlékony lemez kezeli. Az egyes rétegeket a rugalmassági modulus (E), a Poisson- tényező (μ) és a réteg vastagsága (h) jellemez [61] [62]. Méretezés szempontjából a kritikus igénybevételeket az aszfalt alsó szálának fajlagos megnyúlása (ε_t), valamint az úttükör felszínén keletkező fajlagos összenyomódása (ε_v) jelenti. A méretezést három rétegre kell elvégezni, a földmű, az burkolatalap és az útburkolati rétegre.

A klasszikus fáradási modellek az aszfalt alsó szálában ébredő feszültséget tekintik kritikusnak. A legtöbb analitikus méretezési eljárás a lineárisan rugalmas többrétegű féltérmodellen alapszik. Sokáig az volt a szemlélet, hogy a forgalmi terheket statikusan, egyenletesen megoszló teherként vették figyelembe, amely kör felületen hat. Újabb kutatási eredmények ezt árnyalják (*Molenaar, 2004*). Számos kutatás (*De Beer, Fisher és Jooste, 2002*) világít rá, hogy nem csak egyenletesen megoszló függőleges erők hatnak.

2.3.3.1 A földmű méretezése

Az e-ÚT 06.03.13. ÚME előírás meghatározza az úttükrön a statikus teherbírási modulust. Ezt $E_{2m} = 40\ MPa$ értékben határozza meg. A földmű teherbírás ellenőrzéséhez a talajból mintát vesznek, majd laboratórimban az MSZ 2509-3 szerint közvetlenül, vagy az MSZ 2509-2 szerint CBR (California Bearing Ratio) vizsgálattal határozzák meg a talaj statikus modulusát. A CBR vizsgálat lényege, hogy összehasonlítja a talaj teherbírását a tömör zúzottkő réteg teherbírásával. Az eljárás során egy 5 cm átmérőjű hengert nyomnak a talajba és közben mérik a benyomódáshoz szükséges erőt. Ez alapján felveszik a penetrációs görbét, aminek két pontját (2,5 mm, ill. 5 mm) összehasonlítják a tömör zúzottkőréteg penetrációs görbéjével. A CBR értékből számított talaj statikus teherbírási modulusa:

$$E_{2talaj} = 10 \cdot (CBR)^{2/3} \qquad (2.1)\ [60]$$

A laboratóriumi vizsgálatot meghatározott víztartalom mellett kell végezni a legkedvezőtlenebb esetre. Ha a talaj teherbírási modulusa nem elégíti ki a szabványos értéket, akkor javítóréteget kell tervezni. A javítóréteg tervezésével és beépítésével el kell érni a szabványban megadott teherbírási értéket a megadott tömörségi fok mellett. A földmű teherbírását ellenőrizni kell az alábbi összefüggéssel:

$$E_{2talaj} \geq E_{2m} \qquad (2.2)\ [60]$$

Ha teljesül a feltétel, akkor a földmű teherbírása megfelelő, ellenkező esetben javítóréteget kell betervezni. A javítóréteg vastagsága, a javító réteg felszínén és az úttükrön mért modulusok hányadosának függvényében változik, amely így egy grafikonról leolvasható.

2.3.3.2 Alapréteg méretezése

Az alapréteg készülhet kötőanyag nélküli zúzottkőből vagy valamilyen kötőanyaggal stabilizált keverékből, ami vagy hidraulikus, vagy bitumen alapú lehet. Az alapréteg modulusára vonatkozó megkötés, hogy $E_b \leq 500\ MPa$ értéknél. Amennyiben az alapréteg FZKA-ból készül, úgy a tervezett vastagságot 100 és 800 mm közöttire, a Poisson-tényezőt pedig $\mu = 0{,}40$ értékre vehetjük fel. A méretezés az alapréteg modulusának meghatározását, majd a határértéknek történő megfeleltetését jelenti. Ezek alapján az alapréteg modulusa az alábbi egyenlettel számítható [62]:

$$E_b = 2{,}46 \cdot E_{2m} + 0{,}64 \cdot h_b - 54{,}6 \qquad (2.3)\ [62]$$

,ahol

E_b az FZKA réteg modulusa [MPa],

E_{2m} az úttükör modulusa [MPa],

h_b az FZKA réteg vastagsága [mm].

Általában az FZKA réteg vastagság 200-300 mm közötti.

2.3.3.3 *A burkolati réteg méretezése*

Az aszfaltburkolat modulusa erősen hőmérséklet függő. A Miner-féle fáradási összefüggést felhasználva rétegenként meghatározták az egyenértékű aszfalt modulusokat. A különböző modulusú aszfaltrétegeket egy rétegre át kell számítani. Elmondható, hogy két réteg modulusa egyenlő az alsó réteg modulusával $E_a = E_{a2}$, vastagsága pedig az alábbi kifejezéssel számítható [62]:

$$h_a = \left[\frac{A^4+4A^3N+6A^2N+4AN+N^2}{(A+1)^3(A+N)}\right]^{1/3} \cdot (h_{a1} + h_{a2}) \qquad (2.4)\ [62]$$

,ahol

$A = \frac{h_{a2}}{h_{a1}}$ és $N = \frac{E_{a1}}{E_{a2}}$,

E_{ai} az i-dik aszfaltréteg modulusa [MPa],

h_{ai} az i-dik aszfaltréteg vastagsága [mm],

h_a az aszfaltrétegek egyenértékű vastagsága [mm].

Az aszfaltrétegek számozása fentről lefelé haladva nő.

2.3.3.4 *Ellenőrzés a tervezési élettartamra*

A forgalom és a fáradási görbe alkalmazásával lehetőség van a megengedhető megnyúlások számítására. A tervezési forgalomhoz tartozó megengedett fajlagos vízszintes megnyúlás a következő képlet szerint számítható[62]:

$$\varepsilon_{eng}^{aszfalt} = \left[\frac{F}{SF}\right]^{0,2} \cdot \left[\frac{10^4\cdot(0,856\cdot V_b+1,08)}{E_a^{0,36}\cdot TF^{0,2}}\right]^5 \qquad (2.5)\ [62]$$

,ahol

$\varepsilon_{eng}^{aszfalt}$ a számított vízszintes fajlagos megnyúlás [$\mu strain$],

TF a megengedett (F100) egységtengely áthaladási szám [db],

V_b a bitumen térfogata 11,0 és 12,8 között [%],

E_a az aszfaltréteg modulusa, javasolt értéke 4000 és 5800 között [MPa],

F biztonsági tényező, javasolt értéke 1,0 vagy 1,5,

SF a eltolási tényező (shift factor), javasolt értéke 2,5 és 5,0 között.

Ha az $\varepsilon_{mértékadó}^{aszfalt} \leq \varepsilon_{eng}^{aszfalt}$ akkor a szerkezet megfelel fáradásra. A földmű függőleges összenyomódásának számítása:

$$\varepsilon_{eng}^{földmű} = \frac{6000}{TF^{0,23}} \quad (2.6)\ [62]$$

Mivel a földmű süllyedése nyomvályú kialakulásához vezet, ezért az mondható, hogy a szerkezet megfelel a nyomvályú kritériumnak, ha $\varepsilon_{mértékadó}^{földmű} \leq \varepsilon_{eng}^{földmű}$ feltétel teljesül.

2.4 PÁLYASZERKEZET RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Manapság elterjedőben van a roncsolásmentes vizsgálat típusok fejlesztése, mert ezekkel elkerülhető a vizsgálati tárgy esztétikai, illetve szerkezeti károsodása, valamint költséghatékony megoldást jelent. Legyen szó épületről [63], gépről, vagy jelen esetben az útburkolatról [64]–[66], minden területen jelen van ez a vizsgálat típus. 1957-58-ban az Útügyi Kutató Intézet javaslatot készített a közutak megfelelőségi osztályozására. Ez az útszakasz műszaki jellemzőinek felvételét jelentette, amiket részben üzemi, biztonsági, részben szerkezeti jellemzők csoportjába sorolták. A megfelelőségi mutatót ezekre a jellemzőkre adott pontszám alapján állapították meg. A jellemzők egy részének értékelése szubjektív módon, egy része pedig fizikai méréssel történt [10]. Ma már sok mérést szenzorok segítségével lehet elvégezni, akár egy okos telefon segítségével, mivel ezekbe az eszközökbe olyan szenzorokat építenek be, amik egy mérőműszer pontosságával megegyezőek. Tehát ezek a telefonok mérőeszköznek tekinthetők.

A pályaszerkezet roncsolásmentes vizsgálatai a burkolat központi behajlásán alapulnak. A roncsolásmentes pályaszerkezet vizsgálatok közé tartozik többek közt a dinamikus ejtősúlyos teherbírásmérés. A járműforgalom hatása olyan dinamikus igénybevétel, amelyet dinamikus mérésre alkalmas berendezéssel célszerű vizsgálni. Ezek fejlesztése már az 1960-as években elindult és 2003-ban *Brandl* egy olyan berendezéssel kísérletezett, amely 30 cm átmérőjű tárcsával és 11,9 kg súllyal működött [67]. 1961-ben változtatható ejtési magasságú berendezést fejlesztettek, amelynek 25 cm-es tárcsája volt és vibrográffal mérték a süllyedést. *Kudla* az elhaladó jármű terhelési idejét mérte 1991-ben, hogy a berendezések terhelési idejét ehhez tudják igazítani [68]. Az 1970-es években, hazánkban is folytak vizsgálatok a KÖTUKI-ban, ahol *Boromisza* az NDK-ban kifejlesztett berendezéssel mért. Az elmozdulást tasztográffal mérték, de emellett gyorsulásmérővel is kísérleteztek. A 80-as években megkezdődtek az elektronikus mérési technológiák fejlesztése. A mérési pontosságot *Brandl* a korszerű technológiákkal 0,01 mm-re fejlesztette. Ezeket a berendezéseket folyamatosan fejlesztik, elsősorban az adattárolás, feldolgozás valamint az adatátvitel tekintetében, továbbá a beépített érzé-

kelők segítségével a komplex mérőberendezések irányába. Az ejtősúlyos berendezés működési elve, hogy egy vezetőrúd mellett leejtett tömeg által keltett erőt visz át egy körtárcsán keresztül a talajra, majd az elmozdulást méri. Különbséget a tárcsa átmérőjében, az ejtősúly tömegében, az ejtés magasságában, a csillapítóelemben, valamint a tárcsa elmozdulásának mérésében (geofon vagy gyorsulásmérő) találunk. Statikus mérés esetén az elmozdulás mérőórával megoldható, de dinamikus mérés esetén ez nem alkalmazható. A legtöbb berendezés geofon segítségével mér, az érzékelőket közvetlenül a talajra helyezve [69]. A nehéz ejtősúlyos teherbírásmérő berendezést (FWD) a teljes pályaszerkezet vizsgálatára alkalmazzák, melyet Dániában fejlesztettek ki. Az FWD mérésből a rugalmassági modulus visszaszámolható, amely a rétegeket lineárisan rugalmasnak feltételezi. Ez kötött pályaszerkezeti rétegek esetén megfelel, de szemcsés alaprétegre már nem alkalmazható.

A roncsolásmentes vizsgálatokhoz tartozik a földradar módszer is. A Ground Penetrating Radar (GPR) technológia egy geofizikai mérőeszköz. A radar nagyfrekvenciás jelet küld a vizsgálandó anyagba, a visszavert jel amplitúdóját pedig az idő függvényében rögzíti. A dielektromos állandó a közeg fizikai tulajdonsága, amely a hullám terjedési sebességét befolyásolja. Így különböző anyagokban különböző hullámterjedési sebességek alakulnak ki. Az eltérő sebességek detektálásával pedig elkülöníthetők a különböző rétegek.

A földművek és más szemcsés anyagok építésének minőségellenőrzésekor használt B&C (Small-Plate Bearing Capacity & Compactness-rate Tester) egy könnyű-ejtősúlyos mérőberendezés, amely szintén a roncsolásmentes vizsgálati módszerek közé tartozik. A mérőberendezés tárcsaátmérője 163 mm, a leejtett ejtősúly tömege 11kg. A 70-75 cm magasságból leejtett súly a vizsgált felületen egy 0,35Mpa dinamikus terhelést hoz létre. A mérőberendezés gyorsulásmérő segítségével méri a függőleges elmozdulást és a süllyedési amplitúdót. Az ejtések hatására létrejövő alakváltozásokból pedig meghatározza a tömörségi fokot. [70]

2.5 A PÁLYASZERKEZET ÉLETTARTAMA

2.5.1 AZ UTAK ÉLETTARTAMÁNAK ÉRTELMEZÉSE

Az „élettartam” mint fogalom széles körben, élő és élettelen dolgokra is használt szó, amely első hallásra könnyen értelmezhető. Ha egy élőlény élettartamára gondolunk, akkor a születésétől a haláláig tartó időtartamról beszélünk, ha pedig egy tárgyról, akkor a használatba vételtől a tönkrementelig tartó időről. Egy egyszerű tárgy esetén ez könnyen meghatározható, főleg ha a rendeltetése is egy funkció, de összetett esetleg több funkciót is ellátó berendezés, vagy létesítmény esetében ez más. Ez utóbbi esetben a gazdaságosságot figyelembe véve [2]

nem dobjuk ki a meghibásodott berendezést, vagy bontjuk el a hibás létesítményt, hanem bizonyos részeit javítjuk [71].

Az út egy összetett létesítmény, amely több jól elkülöníthető, anyagában és rendeltetésében is eltérő részből áll. Az építés és a fenntartás is külön kategorizálható [71]. Az út részei a földmű, a pályaszerkezet, a forgalomtechnika, az úttartozékok, a műtárgyak és a növényzet.

Ezek élettartama külön meghatározható és a fenntartási folyamatban is külön kezelendőek. Minden résznek megvan az éves fenntartási terve, amelyet különböző jogszabályok írnak elő [71].

Az egyes elemek élettartamának vége a minőséget jellemző állapotparaméterek (tömörség, teherbírás, felületi egyenetlenség…) olyan kedvezőtlen szintre süllyedését jelenti, amikor az egyes rész gazdaságos üzemeltetése már nem tartható. Az egyes állapotparaméterek leromlási sebessége sem egyforma, ebből pedig következik, hogy a szóban forgó rész élettartamának végét a kritikusnak bizonyuló állapotparaméter szintjének beavatkozási határra történő süllyedése határozza meg, még akkor is, ha, a többi paraméter megfelelő szinten van [71].

Az élettartam gyakorlati szempontból azt jelenti, hogy a végének elérésekor az út kezelője állapotjavító beavatkozást hajt végre. A valóságban viszont ez gyakran pénzügyi okból elmarad, így a gazdaságtalan üzemeltetésű útszakaszon továbbra is halad a forgalom.

2.5.2 AZ ÚTPÁLYASZERKEZETEK ÉLETTARTAMÁT BEFOLYÁSOLÓ FŐBB TÉNYEZŐK

A következőkben sorra veszem azon tényezőket, amelyeket már a tervezőnek is figyelembe kell vennie a pályaszerkezet tervezésekor. A tervezéshez rendelkezésre állnak útügyi műszaki előírások és tervezési útmutatók. Ezen előírások, valamint a szakirodalom áttekintése után az alábbi kategóriákba sorolhatók a tényezők [10]:

- forgalmi paraméterek,
- környezeti hatások,
- tervezéssel összefüggő jellemzők,
- az építéssel összefüggő jellemzők,
- fenntartási jellemzők,
- az állapotjavító beavatkozásokkal kapcsolatos jellemzők.

A forgalmi paraméterek közül a pályaszerkezet tervezésekor az úgynevezett mértékadó forgalomnagyságot veszik alapul. A pályaszerkezetre történik egy forgalmi méretezés és ellenőrzés is [72]. Tervezéskor tulajdonképpen azt mondjuk meg, hogy a tervezési élettartam alatt

mennyi lesz a terhelés ismétlésszám. Később a fenntartási szakaszban viszont a meglévő állapot vizsgálatából kell megbecsülni a hátralévő élettartamot, a burkolat gazdaságos felújítása érdekében. Erre több számítási metódust is kifejlesztettek az elmúlt évtizedekben [14], [30], [73]. Ezek a módszerek a pályaszerkezet teherbíró-képességének megállapításán alapulnak [71], [74]. Az útpályaszerkezetek méretezése mechanikai módszerrel történik, ahol az egyes szerkezeti rétegek vastagságát határozzák meg [75], [76]. Az eljárás során, a kritikus helyeken meghatározzák az igénybevételeket, amelyet a határ igénybevételekhez hasonlítanak. A már megépült útburkolat esetén egy felülvizsgálat során megmérik a teherbírását, amely történhet egy pontban, illetve folyamatosan is [8], [9].

Annak érdekében, hogy minél tovább használható legyen a megépített pályaszerkezet, egy bizonyos idő után szükségessé válik a burkolat megerősítése. Ezt a feladatot az útfenntartás során végzik úgy, hogy előbb szemrevételezik, majd teherbírás méréssel folytatják az útállapot felvételét [71]. A megerősítés végrehajtását megelőzően, méretezik az erősítő réteg vastagságát, így gazdaságosan tervezhető az útfenntartási munka. Ma már fejlett érzékelők, mérőműszerek állnak a szakemberek rendelkezésére, de az emberi tényező, a szakember tudása nem nélkülözhető.

Részletes útállapot felvétel során a pályaszerkezet teherbírására is sor kerül, amire többféle módszer létezik [8], [9] de a legelterjedtebb, amit Magyarországon is használnak az az FWD (Falling Weight Deflectometer). Ez a módszer a behajlási teknőt méri, amit egy ejtősúly okoz. Jellemzője a műszernek a nagy önsúly valamint, hogy jármű után kapcsolva mozgatható. A behajlási teknőből állapítható meg a teherbírás mértéke, amiből hátralévő élettartamot lehet számolni.

A gépjármű az út használója és rongálója is egyben. A legfontosabb paraméter, amely a használatból származó tönkremenetelt okozza, a tengelyterhelés, ezért fontos a gépjárműgyártók és a közúti szakemberek közti álláspontok megvitatása. Ha az elmúlt fél évszázadot tekintjük és összehasonlítjuk a meglévő úthálózat hosszát és a gépjármű állományt a 2019-es adatokkal, akkor azt tapasztaljuk, hogy a gépjárműállomány arányszáma több mint tízszerese az úthosszénak. 1955-ben a magyarországi közúthálózat makadám rendszerű úthálózat hossza 22 655 km, ez 2019-ben 164 539 km. A gépjárműállomány 1955-ben 32 447 db volt, míg ez 2019-ben 3 812 013 db [77]. Ha elosztjuk a mai értékeket az 1955-ös adatokkal, akkor a gépjármű arány 117,48 az úthossz arány mindössze 7,26. Ha a jármű darabszámot viszonyítjuk az úthálózat hosszához és feltételezzük, hogy mind mozgásban van, az eloszlásuk pedig egyenletes, akkor megkapjuk a hálózaton kialakult forgalomsűrűséget. Ez a sűrűség 1955-ben 1,43 jmű/km, míg 2019-ben már 23,16 jmű/km-re emelkedett. Az elmúlt évek statisztikáit meg-

nézve látható, hogy a motorizációs szint emelkedésével együtt jár az úthálózat növekedése is. Az is megfigyelhető, hogy az útépítés, úthálózat fejlesztés mindig le van maradva a gépjárműállomány fejlesztéséhez képest. Nagyon fontos, hogy a forgalomsűrűség értéke ne haladja meg a kritikus értéket, mert az rendkívüli módon csökkenti az úthálózat kapacitását, ez pedig fokozottan csökkenti a várható élettartamot. A fundamentális diagram alapján a kritikus forgalomsűrűség felett csökken a forgalomáramlás sebessége, a lassú jármű pedig nyári meleg időben nagyobb kárt okoz az aszfalt burkolatban.

Az útpályaszerkezetek vagy útburkolatok élettartamának meghatározása az útgazdálkodásban nagy jelentőséggel bíró műszaki-gazdasági tényező. Már a tervezési fázisban is az élettartamra végzik a pályaszerkezet méretezését. A szerkezet tervezésekor a kiindulási paraméter a tervezési forgalom (TF) az útügyi műszaki előírás szerint. Ezt a forgalmat bonyolult képlet alapján előrebecslik a tervezési élettartamra, majd egy táblázat segítségével kiválasztják a típus-pályaszerkezetet. Ebből látszik, hogy az élettartam szempontjából kiemelt szerepe van a forgalomnak, hiszen ez jelenti a fő terhelést.

2.5.3 A HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM SZÁMÍTÁSI METÓDUSAI

A szakirodalomban található néhány hátralévő élettartam számítást bemutató matematikai modell [2], [73]. Az útburkolat élettartam meghatározása nem egyszerű feladat, mivel több tényező befolyásolja, ráadásul egy rendszer része, tehát nem csak a burkolatnak, de az út egyéb részeinek is van egy élettartama, mint például a földmű, az úttartozékok, a műtárgyak, és ezek egymás élettartamára is hatással vannak. Az egyes részrendszerek más anyagokból készülnek, más funkciót látnak el és az életciklusuk is eltérő. Minden egyes rész külön karbantartási terv szerint időnként felújításra kerül, így maga az út, mint rendszer élettartama tervezhető és hosszútávon fenntartatható lesz. Egy esetleges útfelújítás során, egészen a kopóréteg javításától a teljes pályaszerkezet és egyéb úttartozékok és részrendszerek felújításáig terjedhet a feladatvégzés. Azt, hogy milyen mértékben kell a pályaszerkezethez hozzányúlni, a károsodás jellege határozza meg. A felújítás időszerűségére és mértékére a technológia is hatással van, hiszen ha rendelkezésre áll olyan eszköz, amellyel kompletten a helyszínen újra lehet építeni a teljes pályaszerkezetet a meglévő visszabontott anyagból, akkor nagyobb mértékű károsodás is megengedhető. Ezzel szemben, a hagyományos útépítő gépekkel kisebb részletekben és nagyobb gyakorisággal kell beavatkozni az állagmegóvás érdekében. Az Amerikai Egyesült Államokban létezik olyan útépítő gépsor, amely elbontja a teljes pályaszerkezetet, majd újraépíti azt.

A legtöbb esetben a burkolat hátralévő élettartamának számítása a behajlás méréséből adódik. Hazánkban behajlásmérések már az 1950-es években is történtek. A behajlás mérése jellemzően drága és időigényes munkával lehetséges, amelyre több fajta eszköz is rendelkezésre áll, úgymint az FWD (Falling Weight Deflectometer), a Benkelman tartó, a Lacroix mérőkocsi, a Curivameter, a TSD. Az első „billenőkaros" behajlásmérő készülék 1955-ben elkészült [65]. Később ennek az egyszerű mérőeszköznek a továbbfejlesztésével foglalkozott *Primusz* [73]. A fejlesztés során a hagyományos analóg mérőeszközt digitálisra cserélte, így gyorsítva a mérést.

A pályaszerkezet hátralévő élettartamának, a megengedhető forgalom, pontosabban az egységtengely áthaladások számának meghatározását különböző módon lehet végezni. Az egyik az AASHO útkísérletből az alábbi képlettel számítható:

$$F_{100}^{eng} = 10^{(5{,}271-4{,}55\lg(s_m))} \qquad (2.7)\ [30]$$

,ahol

F_{100}^{eng} a burkolat tönkremeneteléig megengedhető forgalom, (100 kN e.t. áthaladás [db]),

s_m a vizsgált szakasz mértékadó behajlása [mm].

A homogén szakaszok mértékadó behajlása:

$$s_m = \bar{s} + c \cdot \sigma \qquad (2.8)\ [60]$$

,ahol

$\bar{s}$ a vizsgált szakaszon mért behajlások átlaga [mm],

c megbízhatósági szorzó, javasolt értéke 1,6-2,0 közötti,

σ a vizsgált szakaszon mért behajlások szórása [mm].

Ez a számítás empirikus úton alakult ki és azt a megengedett forgalmat jelenti, amelynél a pályaszerkezet használhatósági indexe egy előre megadott érték alá csökken.

Ha csak a burkolat tönkremenetelét vizsgáljuk, akkor mechanikai számításokból levezetett megoldást kell választanunk. A kerékterhelésből behajlási teknő alakul ki a burkolaton, amelyből származó görbületi sugár felhasználásával számítható az aszfalt burkolat alsó szálának megnyúlása, ami kritikus a tönkremenetel szempontjából. Az aszfalt kúszási tulajdonsága [14] miatt a kutatók a valós forgalmi terhelés számításánál különböző szorzótényezőket javasolnak. A burkolat megengedett forgalmi terhelése így az alábbi képlettel számítható:

$$F_{100}^{eng} = v \cdot \left(\frac{K_1}{\varepsilon_t}\right)^{K_2} \qquad (2.9)\ [78]$$

,ahol

F_{100}^{eng} A burkolat tönkremeneteléig megengedhető forgalom, (100 KN e.t áthaladás [db]),

v eltolási tényező, javasolt értéke 10,

ε_t a számított vízszintes fajlagos megnyúlás [$\mu strain$],

K_1 anyagállandó, aszfaltnál 1600 értékkel vehető figyelembe (20°C-on),

K_2 anyagállandó, aszfaltnál 5,62 értékkel vehető figyelembe.

Az Európai Unió 2004-ben vizsgálatot végeztetett, „Az útburkolatok teljesítményi mérőszámai" tárgyú COST 354-es akciót. A munka fő célja az egységes európai teljesítményi mérőszámok meghatározása volt, amely az úthasználók és útkezelők igényeit is figyelembe veszi. A munka eredményeként a következő teljesítményi mérőszámok kerültek megfogalmazásra [7]:

- hosszirányú felületi egyenletesség,
- keresztirányú felületi egyenletesség,
- makró érdesség,
- csúszás ellenállás,
- gördülőzaj,
- légszennyezés,
- pályaszerkezet teherbírás.

A COST 354-es akcióban a megfelelő teljesítményi mérőszámokat kiválasztották, kijelölték a célértékeket és határértékeket.

A felsorolt teljesítményi mérőszámok közül a teherbírás teljesítményi mérőszámaként ötféle műszaki paramétert különböztetnek meg a pályaszerkezet behajlás, a szerkezeti szám, a hátralévő élettartam, az E modulus, a pályaszerkezet behajlási sebesség [7].

A COST 354-ből kiderül, hogy az országok többsége a pályaszerkezet behajlást választotta műszaki paraméternek [7]. Ugyanakkor a legtöbb teherbírás teljesítmény mérőszámmal foglalkozó tanulmány rámutat, hogy erre a célra a pályaszerkezet hátralévő élettartama a legmegfelelőbb mutatószám, amelyet a burkolat pillanatnyi állapota alapján számítanak.

A pályaszerkezet tervezése során figyelembe kell venni azt a forgalmi terhelést, melyet a tervezési idő alatt a szerkezetnek el kell viselnie. Tehát már a tervezési fázisban körültekintően meg kell becsülni a várható úgynevezett tervezési forgalmat (TF). A tervezési útmutató

alapján a megtervezett pályaszerkezetet forgalmi terhelésre ellenőrizni kell a következő összefüggéssel:

$$N_{eng} = \frac{F}{SF} \cdot \left[\frac{10^4 \cdot (0{,}856 \cdot V_b + 1{,}08)}{E_a^{0{,}36} \cdot \varepsilon_t}\right]^5 \qquad (2.10)\ [62]$$

,ahol

N_{eng} a megengedett (F100) egységtengely áthaladási szám [db],

V_b a bitumen térfogatszázaléka 11,0 és 12,8 között [%],

E_a az aszfaltréteg modulusa, javasolt értéke 4000 és 5800 között [MPa],

ε_t a számított vízszintes fajlagos megnyúlás [$\mu strain$],

F biztonsági tényező, javasolt értéke 1,0 vagy 1,5,

SF eltolási tényező, javasolt értéke 2,5 és 5,0 között.

A fenti összefüggés figyelembe veszi az anyag tulajdonságait is, egyrészt a bitumen térfogatszázalékával, másrészt pedig a shift faktorral, amely értékét az aszfaltkeverék laboratóriumi körülmények közötti vizsgálatából állapítottak meg [79].

2.6 ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA

2.6.1 BURKOLATALAP

Az alapréteget a burkolattal megegyező oldalesésben és azonos vastagságban kell megtervezni. Fontos szabály, hogy a burkolatalapnak szélesebbnek kell lennie a burkolatnál. Aszfaltburkolat esetén a kötőanyag nélküli alapréteget a legalsó aszfaltréteg vastagságával mindkét oldalt szélesebbre kell építeni, a hidraulikus kötőanyagú alapréteget pedig 10-10 cm-rel. Alapvetően vagy zúzottkőből, vagy pedig soványbetonból készítenek burkolatalapot [59].

A szórt burkolatalapot legfeljebb 15 cm vastagságban, Z55/80 zúzottkőből készítik, ennél nagyobb vastagság esetén két rétegben. A réteget 20%-kal vastagabban terítik, acélköpenyes hengerrel a burkolat szélétől kezdve 1/3 sávátfedéssel tömörítik, közben vízzel locsolják, a tetejére 4 cm homok kerül. Tömörsége akkor megfelelő, ha az acélhenger elé dobott zúzott kő nem nyomódik be, hanem széttörik [59].

Az FZKA (folytonos szemmegoszlású zúzottkő) réteget először egyenletesen szétterítik, majd kisebb felületen lapvibrátorral, nagyobb felületen vibrohengerrel tömörítik, majd a felső réteget szintbe terítik és újból a végső szintnek megfelelően hengerlik [59].

Zúzottkőből lehet készíteni szakaszos szemmegoszlású makadám rendszerű burkolatalapot, amihez útépítési zúzottkőanyagot (KZ, NZ, Z) vagy kohósalakot használnak [59].

A mechanikai stabilizációs burkolatalapot (M22, M56, M80) elő lehet állítani zúzottkő, természetes aprozódású kőzetek (murva), kavics homok, kohósalak, betontörmelék, vegyes falazattörmelék keverékéből [59].

A soványbeton alapot, amely homokos kavics adalékanyaggal készül, 15-25 cm vastagságban finisherrel terítik, könnyűhengerrel tömörítik. Az utókezelése locsolással történik, 7 napos szilárdulás után következhet a ráépítés. A soványbeton alapot a reflexiós repedések kialakulása ellen mikrorepesztik [59].

2.6.2 ÚTBURKOLAT

Az aszfaltbetonburkolat anyaga keverőtelepen készül, az adalékanyagot szemnagyság szerint elkülönítve tárolják. Az adalékot az egyes frakciókból a kívánt mennyiségben szállítószalagra rakják, azután egy szárítódobban 170-200 C°-on szárítják és melegítik a zúzalékot. A forró adalékot újból szétrostálják, majd meleg bunkerekben tárolják. Mérlegelés után keverőteknőbe helyezik, ahol forró bitument tesznek hozzá. Az aszfalt 40-60 másodperces keverés után tároló bunkerbe, vagy szállító járműre kerül. A szállítást ponyvázott teherautóval végzik, majd a helyszínen a finisherbe töltik, ami ezután teríti. A tömörítést 100 C° felett gumiabroncsos majd acélköpenyes henger végzi 4 cm-es vastagság esetén mintegy 8-10 menetben.

A zúzalékvázas masztixaszfalt (ZMA) egy aszfalthabarccsal kitöltött stabil vázú aszfalt, amelynek 2,5 cm vastagságú változata is van. Nehéz és igen nehéz forgalmú utak építésére használják. Modifikált (javított minőség) bitumennel készülnek, maximális szemnagyságuk 8 mm, finom aszfaltbetonnak minősül [59].

Az útburkolat építésénél megemlítendők a környezettudatos korszerű remix technológiák, amik lehetnek hideg vagy meleg eljárások. Hideg eljárás esetén a felmart aszfaltot keverőtelepen feljavítják, esetleg pótolják a kőanyagot, majd a helyszínen finisherrel újra terítik. A meleg eljárás lényege, hogy a felmarást megelőzően a burkolat felső rétegét felmelegítik, így az aszfalt kőváza nem sérül.

3 ÚJ MÓDSZEREK A FORGALMI PARAMÉTEREK ÉRTÉKELŐ RENDSZERÉBEN

A szakirodalomkutatás során sorra vettem azon forgalmi paramétereket, amelyek hatással vannak az úthálózat terheltségére. Úttervezésnél a pályaszerkezet meghatározásakor kiindulási paraméter a forgalom nagyság, de nem csak itt használják ezt, hanem az út geometriájához illetve a forgalomszabályozás tervezéséhez is. Hosszú távú stratégiai célú tervezés során, mint pl.: hálózattervezés vagy egy útdíjas tarifarendszer bevezetését megalapozó tanulmánytervhez szintén a forgalomnagyság a kiinduló adat, amelyet az OKA adatbázisból lehet beszerezni vagy keresztmetszeti forgalomszámlálással meghatározni. Tehát a forgalomnagyság sok területen felhasználható paraméter. A forgalomnagyságot viszont más paraméterek, mint a forgalomáramlás sebessége, az egyedi járműsebesség, az útszakasz forgalmi telítettsége, az oszcilláció-jelenség okozta forgalmi hullám terjedési sebessége befolyásolja. Ez utóbbi paraméter meghatározása nehéz, részben az adatgyűjtés technológiája, részben az adatfeldolgozás módszere és nagy számítási igénye miatt. Mivel a forgalomnagyság fontos paramétere az állapotértékelési rendszernek, ezért a hullámterjedést részletesen vizsgáltam, aminek eredményét ebben a fejezetben ismeretetek.

3.1 A FORGALMI PARAMÉTEREK FELVÉTELI MÓDSZEREI

Miután elvégeztem a forgalmi paraméterek, azok felvételi és értékelési rendszereinek kategorizálását, a forgalmi hullámterjedést kezdtem vizsgálni és arra az eredményre jutottam, hogy a járműtrajektóriák módszere mind közül a legmegbízhatóbb és a legpontosabb. Az összehasonlító elemzést, majd „*A közúti forgalmi hullámok terjedési sebesség meghatározásához szükséges járműtrajektóriák módszere*" részben fogom ismertetni.

A járművön belül elhelyezett szenzorokkal történő járműtrajektóriák rögzítése ma még utópisztikusnak számít, mivel nem lehetséges minden közlekedésben részt vevő járműről mozgás közben adatot gyűjteni, részben a technológia, részben pedig társadalmi, jogi akadályok miatt. Ennek ellenére én kidolgoztam egy módszert, amely alkalmas a járműtrajektóriák felvételére. A jelenleg használt mérési módszerekkel szemben az az előnye, hogy olcsó mérési mód, mivel egy gyorsulás szenzor, egy giroszkóp és az adatrögzítéshez szükséges laptop, vagy akár egy mobiltelefon felhasználásával lehetséges a mérés a közúti forgalomban a megengedett sebességgel haladva. Másrészt jóval pontosabb, mint a GPS alapú mérés.

3.1.1 GYORSULÁSSZENZORON ALAPULÓ JÁRMŰTRAJEKTÓRIA ELŐÁLLÍTÁSI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA [S4]

A járműtrajektória előállításához időben folytonosan három változót lehet mérni, a távolságot, sebességet, gyorsulást. A rendelkezésre álló eszközeimmel a gyorsulást tudom mind közül a legpontosabban mérni.

A járműtrajektória a közlekedéstervezésben használt fogalom, amely a jármű által megtett utat írja le az idő függvényében egy adott útszakaszon. A pályaszakasznak csak a hossza számít, a magassági, illetve a vízszintes vonalvezetését figyelmen kívül hagyjuk.

3.1.1.1 A trajektória előállítása, a követési távolság, a követési idő számítása

A közúti közlekedés térben és időben lezajló folyamat, amelynek egyik szemléltető eszköze a járművek mozgásának tér-idő diagramon történő ábrázolása [48], [49], [80]. Ehhez minden jármű pozícióját rögzíteni kell menet közben. Makroszkopikus szinten a megfigyelés álló koordináta rendszerben történik és vagy egy adott időpillanatban mérjük le a távolságokat, vagy egy adott helyen a követési időket, így határozzuk meg a forgalomnagyságot illetve a forgalomsűrűséget. Mikroszkopikus esetben egy jármű $t = 0$ időpontbeli kezdőpozícióját az $x_1(0)$, trajektóriáját az $x_1(t)$ adja meg (**13. ábra)**. Az s követési távolság változása pedig matematikailag a következő módon írható le:

$$s(t) = x_1(t) - x_2(t) \tag{3.1}$$

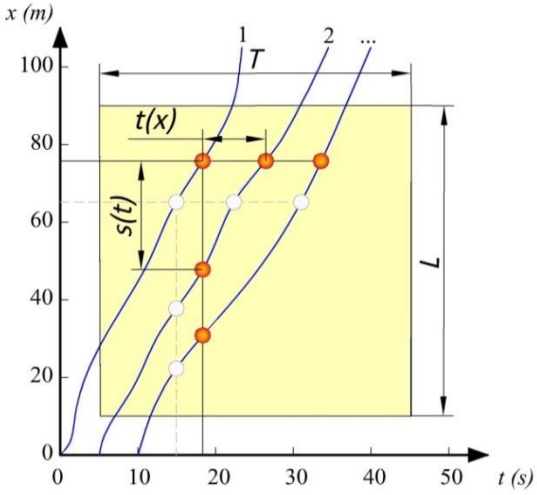
,ahol x_1 az 1-es számú, x_2 az 2-es számú jármű pozíciója a t pillanatban.

Az t követési idő változását akkor kapjuk meg, ha a tér különböző pontjain vesszük fel a követési időket, így a követési idő az alábbi képlettel számítható:

$$t(x) = t_2(x) - t_1(x) \tag{3.2}$$

,ahol t_1 az 1 számú, t_2 a 2 számú járműre vonatkozó időpillanat az x helyen.

A mikroszkopikus modellekben a járművek mozgását tér-idő, sebesség-idő, gyorsulás-idő függvények írják le. Bármelyik paraméter mérhető, így abból számítással előállítható a másik kettő.



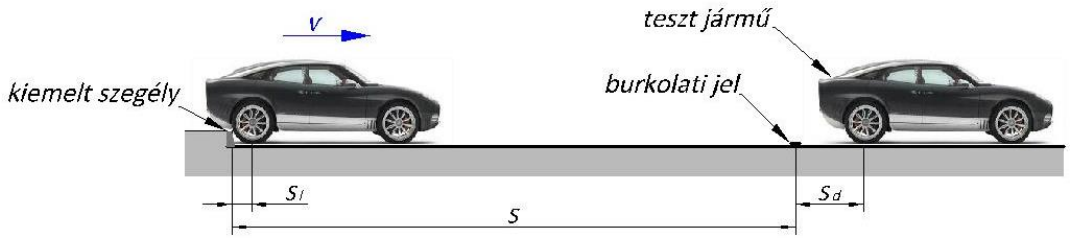
13. ábra A követési idő és a követési távolság változása

3.1.1.2 A jármű gyorsulásának mérése, az adatok rögzítése

A mérés végrehajtásához felhasznált mérőeszközök:

- Gyorsulás szenzor: BOSCH BMI120
- Adatgyűjtő: Okostelefon
- Távolságmérő: LEICA DISTO S910+Tripod

A vizsgálathoz először a helyszínt választottam ki. A kiválasztásnál szempont volt, hogy legyen legalább egy 100 m hosszúságú egyenes útszakasz, amely közel vízszintes és a keresztesése is enyhe. A Győri Ipari Parkban, az Almafa utca végén találtam egy zsákutcát, aminek a forgalma elenyésző és az utca végén a burkolatot kiemelt szegélykő zárja, ami kiválóan alkalmas a jármű pontos pozícionálásához. Először a 100 m-es szakaszt jelöltem ki az útburkolaton a távolságmérő segítségével. A szegélykő felső éle és a burkolati jel középvonala S távolságra van egymástól (**14. ábra)**, viszont számolni kell azzal, hogy ha a szegélykőhöz áll a jármű, akkor a kerék nekiütközik a szegélynek, így annak tengelyvonala S_t távolságra kerül. A lézeres távolságmérő segítségével, cm pontossággal tudtam a jármű pozícióját mérni, így a jelig megtett távolság 99,70 m-re csökkent.



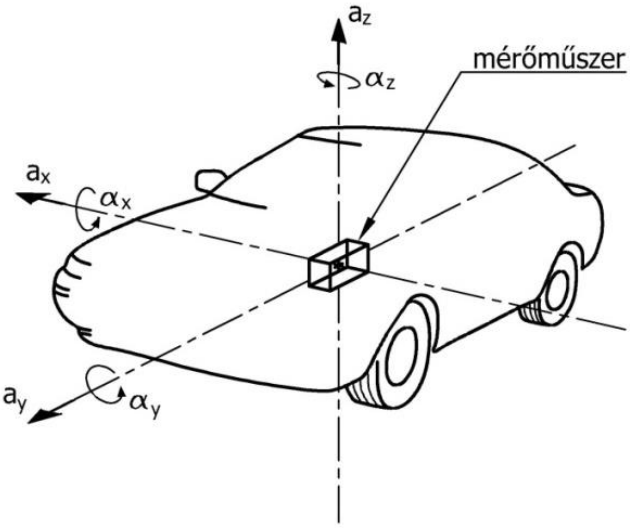
14. ábra Az útszakasz kijelölése

A tesztjárművel nem lehet pontosan a vonalon megállni, ezen kívül a számítás során alkalmazott korrekciós tényezőhöz szükséges maximális sebességet km/h-ban, a mérés irányát, valamint a burkolati jel felé történt mérésnél a hátsó kerék burkolati jeltől való eltérését cm-ben, minden mérés alkalmával jegyzőkönyvben rögzítettem.

(a) (b) (c)

1. kép A tesztjármű kezdő- és végpozíciójának, valamint az adatrögzítő elhelyezésének illusztrálása, nevezetesen (a) kiemelt szegély, (b) burkolati jel, (c) okostelefon

A gyorsulásadatok rögzítését okos telefonnal végeztem, amit a középkonzolon a váltókar mögötti közel vízszintes felületen rögzítettem ügyelve arra, hogy menet közben ne tudjon elmozdulni (**1. kép).** A kiemelt szegély környezetében a gépjármű közel vízszintes helyzetben volt, ennek ellenére a műszert vízszintbe állítottam, majd egyirányú méréseket végeztem a burkolati jel felé. Ez után az ellenkező irányba megismételtem a méréseket úgy, hogy induláskor az első kerék a burkolati jelen volt, a műszer vízszintes helyzetben, a jármű pedig a kiemelt szegélykőnél állt meg. A harmadik méréssorozat alkalmával oda-vissza történt a mérés, a műszert egyszer állítottam vízszintbe a kiemelt szegély környezetében, viszont az első mérés a kiemelt szegély irányába történt. A mérési adatokat összegző táblázatból látszik, hogy ebben a mérési sorozatban a vissza úton, vagyis a kiemelt szegély felé magasabb számított értékek adódtak. Azért, hogy még változatosabb legyen a mérés különböző sebességekre gyorsítottam fel menet közben.



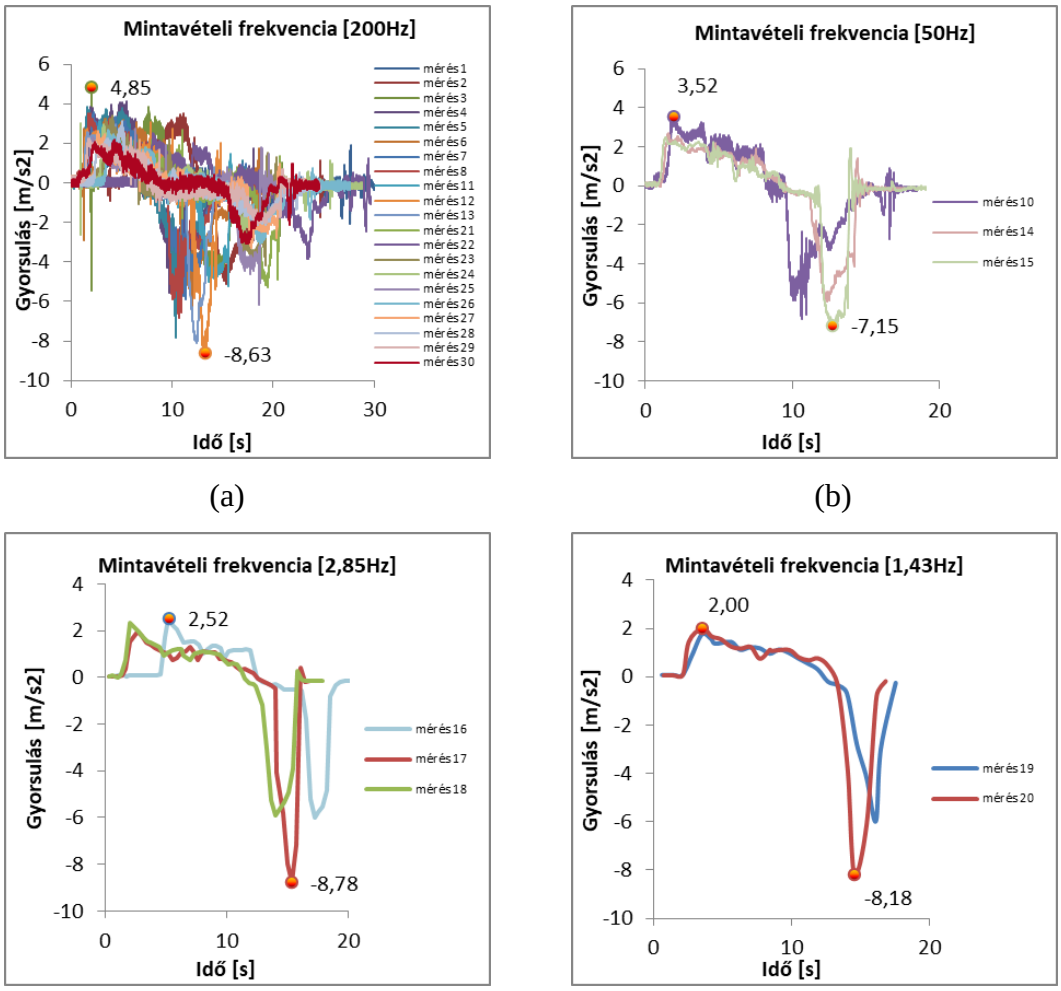
15. ábra A gyorsulás irányok értelmezése, a műszer elhelyezkedése a járműben

A mérőműszert úgy állítottam be a járművön belül, hogy az x tengely a jármű keresztirányú, az y tengely a jármű haladási irányának megfelelő, a z tengely pedig a függőleges irányú gyorsulást mérje (**15. ábra).**

3.1.1.3 A rögzített adatok kiértékelése

A mérést végző program sor adatot gyűjt, méri az x,y,z irányú gyorsulásokat. Megfigyeltem álló helyzetben, hogy lejtőn a dőlésszög miatt a gyorsulás értéke megváltozik. Az utolsó tíz mérésből a **2. táblázatban** jól látszik, hogy milyen mértékben befolyásolja a kezdeti dőlésszög a számított távolságértéket.

A mérés során beállítható a mintavételi frekvencia, amely 1,43-200 Hz között 4 diszkrét értékre állítható. A mérési eredményeket összehasonlítva látható, hogy minden mérés azonos mintát követ, vagyis egyértelműen látszik a jármű hirtelen elindulása, a gyorsítási szakasz, majd az azt követő lassítási szakasz, végül visszatér 0 közeli állapotba (**16. ábra).** Az is látszik, hogy nem mindig tér vissza a nullába, ami az út hosszesésével magyarázható. Tehát már minimális 1% alatti hosszesés is hatással van a mérésre. A számítás során kiderült, hogy egy bizonyos pont után csökken a távolság, ami lehetetlen, mivel csak előre történt a mozgás, ezért ez nem csökkenhet, vagyis a számítás során nem az utolsósorban lévő adat a helyes, hanem a számított maximum. Megfigyelhető, hogy a mintavételi frekvencia csökkenésével nem tűnnek el a kiugró értékek, sőt a negatív értékek esetén hasonlóan alakulnak. A pozitív értékeknél a kiugrások között egyértelmű különbség mutatkozik, melyet a csekély számú minta okoz.



16. ábra A szenzor a_y irányú gyorsulás adatai különböző mintavételi frekvencia (a) 200Hz, (b) 50Hz, (c) 2,85Hz, (d) 1,43Hz szerint ábrázolva. A kiugró értékek jelölve vannak a diagramokon.

A gyorsulásadatokból számítással meghatároztam a távolságadatokat, amelyet az **2. táblázatban** foglaltam össze, ezek a normál **számított távolságok**. A **mért távolság** meghatározása lézeres távolságmérő és mérőszalag segítségével történt.

A táblázat utolsó oszlopában a számított távolságok pontosságát határoztam meg a mért és a számított távolságok különbségéből, vagyis a mérés hibájából, ami korrekció nélkül 93% pontosságot eredményezett.

2. táblázat A normál mérési eredmények összefoglalása.

s.sz.	Mérés iránya	Jeltől való eltérés (m)	Mintavételi frekvencia (Hz)	Mintavétel időtartama (s)	Mintavételi darabszám (db)	Mért távolság (m)	Számított távolság (m)	Távolság eltérés (m)	Mért sebesség maximuma (km/h)	Pontosság
1	KSZ	0	200	30,98	6196	99,70	100,11	0,41	31	99,59%
2	KSZ	0	200	27,24	5448	99,70	100,67	0,97	51	99,03%
3	KSZ	0	200	24,08	4816	99,70	101,98	2,28	47	97,71%
4	KSZ	0	200	20,39	4078	99,70	103,75	4,05	53	95,94%
5	KSZ	0	200	18,85	3770	99,70	103,54	3,84	51	96,15%
6	KSZ	0	200	20,31	4062	99,70	102,93	3,23	52	96,76%
7	KSZ	0	200	18,92	3784	99,70	103,84	4,14	51	95,85%
8	KSZ	0	200	19,95	3990	99,70	104,32	4,62	51	95,37%
9	KSZ	0	200	18,53	3706	99,70	102,91	3,21	52	96,78%
10	KSZ	0	50	54,55	2728	99,70	105,71	6,01	17	93,97%
11	BJ	-0,42	200	17,52	3504	99,28	102,93	3,65	41	96,32%
12	BJ	0,02	200	16,08	3216	99,72	100,38	0,66	44	99,34%
13	BJ	0,31	200	17,02	3404	100,01	100,66	0,65	46	99,35%
14	BJ	0,97	50	17,64	882	100,67	99,63	-1,04	43	98,97%
15	BJ	0,22	50	19,09	955	99,92	100,20	0,28	42	99,72%
16	BJ	-0,10	2,85	20,35	58	99,60	104,29	4,69	40	95,29%
17	BJ	-0,99	2,85	17,47	50	98,71	100,12	1,41	39	98,57%
18	BJ	-0,62	2,85	17,89	51	99,08	98,18	-0,90	41	99,09%
19	BJ	-0,04	1,43	17,51	25	99,67	98,50	-1,17	39	98,83%
20	BJ	-0,11	1,43	16,79	24	99,60	100,69	1,10	44	98,90%
21	KSZ	0	200	23,90	4780	99,70	134,74	35,04	31	64,85%
22	BJ	-0,35	200	33,35	6670	99,35	105,78	6,43	31	93,53%
23	KSZ	0	200	23,74	4748	99,70	130,38	30,68	31	69,23%
24	BJ	0,97	200	28,78	5756	100,67	100,75	0,08	29	99,92%
25	KSZ	0	200	22,36	4472	99,70	128,57	28,87	28	71,04%
26	BJ	-0,1	200	27,57	5514	99,60	100,94	1,34	29	98,65%
27	KSZ	0	200	23,12	4624	99,70	127,11	27,41	30	72,51%
28	BJ	-0,62	200	24,61	4922	99,08	99,53	0,45	28	99,55%
29	KSZ	0	200	23,13	4626	99,70	124,22	24,52	31	75,41%
30	BJ	-0,11	200	24,51	4902	99,60	98,26	-1,33	28	98,66%
										93,16%

**KSZ* *Kiemelt szegély felé*
***BJ* *Burkolati jel felé*

Mivel a pontosságnak nincsen általános érvényű definíciója, ezért én ebben a vizsgálatban úgy definiálom, hogy a távolságeltérés, vagy más néven mérési hiba elfogadható mértéke az egy személyautó átlagos hosszának fele, vagyis 2,5 m.

Azért, hogy a számított távolságértékek jobban közelítsenek a mért távolsághoz, egy a_k korrekciós tényezőt vettem figyelembe. A korrekciós tényező a mért sebességtől függ és minden méréssorozatra egyedi, így az átszámított eredmények alapján a pontosság 98%-ra nőtt (**3. táblázat**). A gyorsulás szenzor dőlésszöge miatt a számított távolság a megállást követően csökken. Ezért, ha a megtett távolságot függvényként írjuk fel, akkor annak maghatározása egy optimalizálási feladat, aminek az általános alakja:

$$\max S(t), t \in R^{+} \tag{3.3}$$

Először a gyorsulást korrigáltam az a_k gyorsulás értékkel, amely egy konstans szám. Az $a_y(t)$ pedig a mért gyorsulás érték, így a pillanatnyi gyorsulás a következő képlettel számolható:

$$a(t) = a_y(t) + a_k \tag{3.4}$$

A sebesség a gyorsulás-idő grafikon görbe alatti területe:

$$v = \int_{t_1}^{t_2} a\, dt \tag{3.5}$$

A megtett távolság a sebesség-idő grafikon görbe alatti területe:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} v\, dt \tag{3.6}$$

A korrekciós tényező értékét úgy határoztam meg, hogy a kiszámolt sebesség maximuma megegyezzen a mért értékkel, majd hozzáadtam minden egyes mérési adathoz, így kaptam meg a **3. táblázatbeli** korrigált számított távolság értékeket.

3. táblázat A korrigált mérési eredmények összefoglalása

s.sz.	Mérés iránya	Jeltől való eltérés (m)	Mintavételi frekvencia (Hz)	Mintavétel időtartama (s)	Mintavételi darabszám (db)	Mért távolság (m)	Korrekciós tényező	Korrigált számított távolság (m)	Távolság eltérés (m)	Mért sebesség maximuma (km/h)	Pontosság
1	KSZ	0	200	30,98	6196	99,70	-0,0112	97,62	-2,08	31	97,91%
2	KSZ	0	200	27,24	5448	99,70	-0,0105	98,63	-1,07	51	98,93%
3	KSZ	0	200	24,08	4816	99,70	-0,0175	99,39	-0,31	47	99,69%
4	KSZ	0	200	20,39	4078	99,70	-0,0169	101,93	2,23	53	97,76%
5	KSZ	0	200	18,85	3770	99,70	-0,0310	100,82	1,12	51	98,88%
6	KSZ	0	200	20,31	4062	99,70	-0,0147	101,10	1,40	52	98,60%
7	KSZ	0	200	18,92	3784	99,70	-0,0155	102,04	2,34	51	97,65%
8	KSZ	0	200	19,95	3990	99,70	-0,0119	102,98	3,28	51	96,71%
9	KSZ	0	200	18,53	3706	99,70	-0,0001	102,90	3,20	52	96,79%
10	KSZ	0	50	54,55	2728	99,70	-0,0550	101,46	1,76	17	98,23%
11	BJ	-0,42	200	17,52	3504	99,28	-0,0098	101,76	2,48	41	97,50%
12	BJ	0,02	200	16,08	3216	99,72	-0,0140	99,00	-0,72	44	99,28%
13	BJ	0,31	200	17,02	3404	100,01	-0,0130	99,44	-0,57	46	99,43%
14	BJ	0,97	50	17,64	882	100,67	-0,0193	97,75	-2,92	43	97,10%
15	BJ	0,22	50	19,09	955	99,92	-0,0085	99,41	-0,51	42	99,49%
16	BJ	-0,10	2,85	20,35	58	99,60	-0,0120	102,29	2,69	40	97,30%
17	BJ	-0,99	2,85	17,47	50	98,71	-0,0163	98,19	-0,52	39	99,47%
18	BJ	-0,62	2,85	17,89	51	99,08	-0,0006	98,11	-0,97	41	99,02%
19	BJ	-0,04	1,43	17,51	25	99,67	-0,0073	97,51	-2,16	39	97,84%
20	BJ	-0,11	1,43	16,79	24	99,60	-0,0220	98,84	-0,75	44	99,24%
21	KSZ	0	200	23,90	4780	99,70	-0,1310	101,05	1,35	31	98,65%
22	BJ	-0,35	200	33,35	6670	99,35	-0,0186	100,32	0,97	31	99,02%
23	KSZ	0	200	23,74	4748	99,70	-0,0755	109,44	9,74	31	90,23%
24	BJ	0,97	200	28,78	5756	100,67	0,0018	100,15	-0,52	29	99,48%
25	KSZ	0	200	22,36	4472	99,70	-0,1370	99,56	-0,14	28	99,86%
26	BJ	-0,1	200	27,57	5514	99,60	0,0010	101,26	1,66	29	98,33%
27	KSZ	0	200	23,12	4624	99,70	-0,0730	108,11	8,41	30	91,56%
28	BJ	-0,62	200	24,61	4922	99,08	-0,0090	98,32	-0,76	28	99,23%
29	KSZ	0	200	23,13	4626	99,70	-0,0805	104,12	4,42	31	95,57%
30	BJ	-0,11	200	24,51	4902	99,60	0,0034	98,97	-0,63	28	99,37%
											97,94%

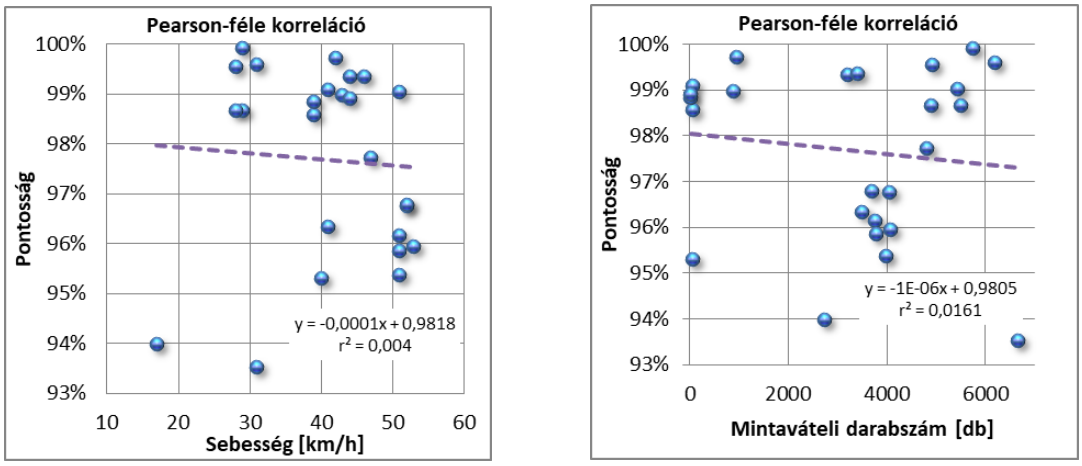
*KSZ *Kiemelt szegély felé*
**BJ *Burkolati jel felé*

Mivel a mérést különböző sebességekkel és mintavételi frekvencián végeztem, ezért elvégezhető a sebesség-pontosság, valamint a mintavételi darabszám-pontosság közötti összefüggés vizsgálat, amelynek eredményét a **17. ábra** mutatja.

A mérési adatok közötti összefüggés leírására a korrelációs együttható szolgál. A vizsgálatból kideríthető a két adat közt lévő kapcsolat létezése, iránya, illetve az összefüggés szorossága. A számításhoz a Pearson-féle korrelációs együtthatót alkalmaztam.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{3.7}$$ [81]

Ha az $r(x, y) = \pm 1$, akkor a két változó között lineáris a kapcsolat, pozitív előjel esetén egyenes, negatív előjel esetén pedig fordított. A szorosságot az határozza meg, hogy az r értéke mennyire áll közel a -1-hez vagy a +1-hez. A nulla közeli állapot pedig azt jelenti, hogy gyenge, illetve hogy nincs lineáris kapcsolat a két változó között.



(a) (b)

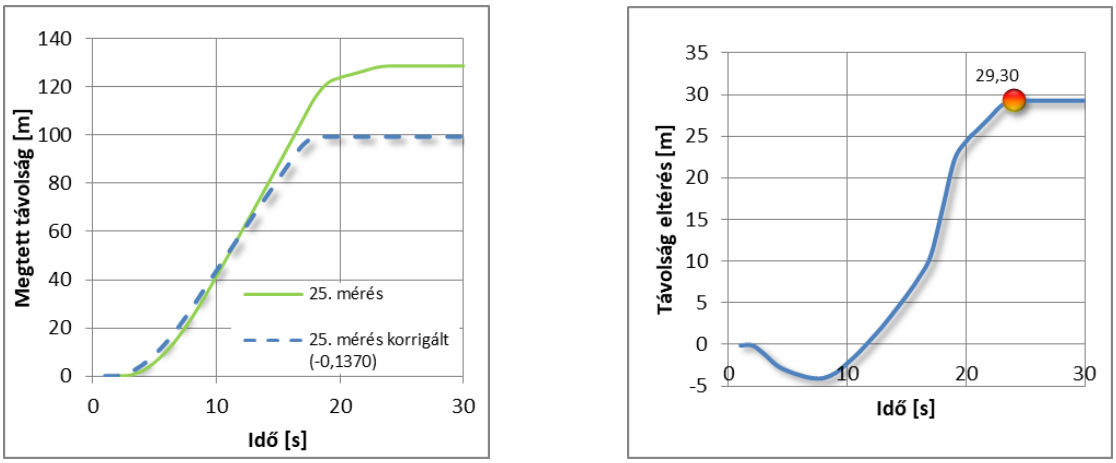
17. ábra A korreláció vizsgálat eredménye (a) sebesség-pontosság, (b) mintavételi darabszám-pontosság

Megvizsgáltam a sebesség, pontosságra gyakorolt hatását korrelációszámítással. A 60 és 80% közötti értékek a műszer beállításából adódó hibák, ezeket nem vettem számításba, így a sebesség-pontosság összefüggésre a determinációs együttható értéke $r^2 = 0{,}004$, a mintavételi darabszám-pontosság között pedig $r^2 = 0{,}0161$, tehát egyik esetben sincs lineáris kapcsolat a változók között.

3.1.1.4 A vizsgálatból származó új tudományos eredmény

A mérési eredményeket út-idő diagramokon mutatom be. A gyorsulást tudtam mérni megfelelő pontossággal menet közben, így ebből állítottam elő a járműtrajektóriákat, abból pedig az eredeti és a korrigált mérések közötti távolságeltéréseket.

Megvizsgáltam egy, a normál mérések között alacsony pontosságú mérést **(18. ábra).** Önmagával összehasonlítva látható, hogy a korrigált trajektória vége megközelíti a várt értéket a 99,70 m-t. A távolságeltérés időbeni alakulásából jól látszik, hogy korántsem egyenletes és a maximuma 29,30 m, tehát korrigálást követően ennyivel csökkent a számított távolság értéke.



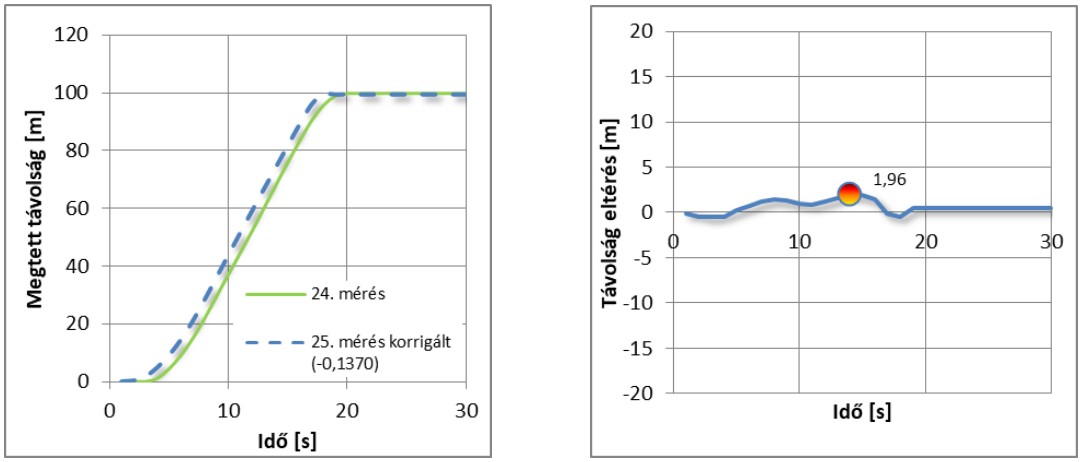
(a) (b)

18. ábra (a) Az eredeti 25. mérés és a 25. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni alakulása

A további vizsgálatokhoz kiválasztottam a normál táblázatból a 30 km/h körüli értékek közül a legnagyobb pontosságú mérést, ami a 24. sorban van és 99,92%-os a pontossága, ez lesz a viszonyítási alap.

Két szélsőséges esetet különítettem el. Az egyik esetben a legjobb korrigált mérést, a másik esetben a legrosszabb korrigált mérést hasonlítottam a viszonyítási alaphoz.

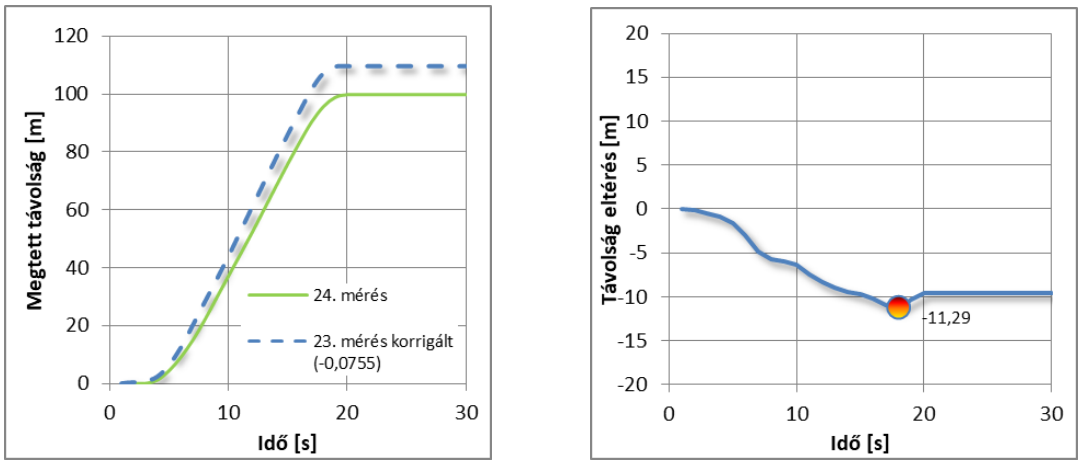
A legjobb esetben a korrigált táblázatból a 25. mérést választottam, aminek pontossága 99,86%. A **19. ábra** szemlélteti a két trajektória közti különbséget, amely szerint 1,96 m a legnagyobb eltérés menet közben. Ez a mérés egy járműhossz felénél kisebb tévedést jelent, tehát alkalmas lehet a validálásához.



(a) (b)

19. ábra (a) Az eredeti 24. mérés és a 25. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni alakulása

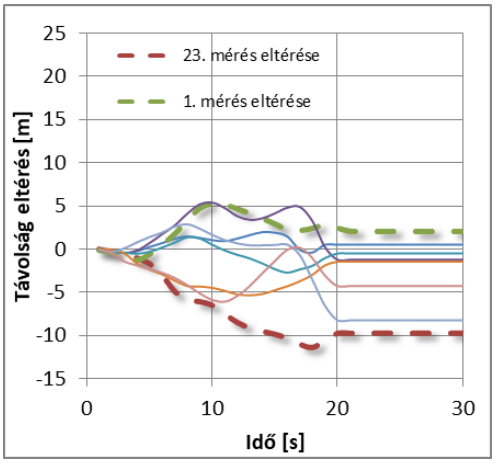
A legrosszabb esetben a korrigált táblázatból a 23. mérést választottam, aminek pontossága 90,23%. A **20. ábrán** látható trajketóriák az előző esethez képest nagyobb eltérést mutatnak, az alacsonyabb pontosság miatt. A tévedés mértéke ebben az esetben 11,29 m, ami a pontosság definíciója szerint nem elfogadható.



(a) (b)

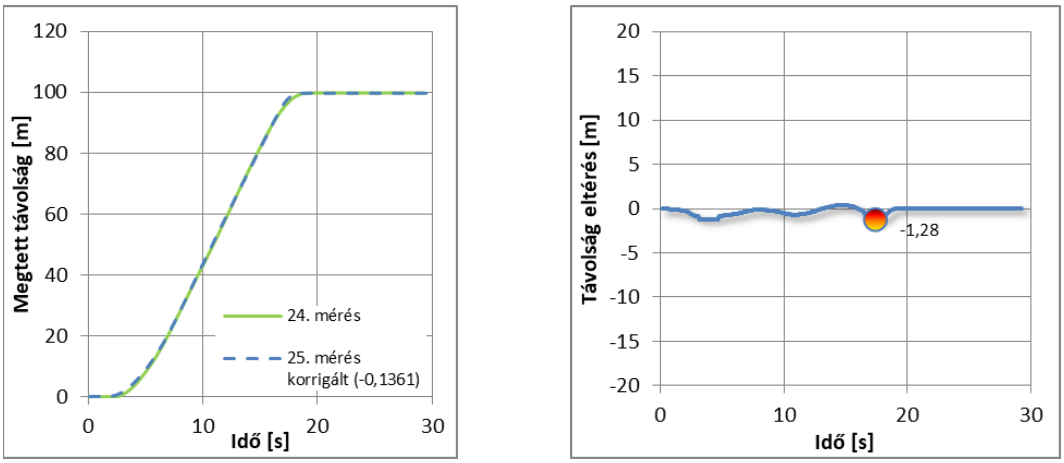
20. ábra (a) Az eredeti 24. mérés és a 23. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni alakulása

A következő **21. ábra** a 30-as sebességhez tartozó csoportban lévő összes mérés eltérését mutatja. Jól látszik, hogy az első időpillanatban mindegyik a nulla pontból indul, majd a végén vagy pozitív, vagy negatív értéket vesz fel, tehát két szélső görbe közt van az összes többi. Ha a szélső görbéket elemezzük, akkor ez azt jelenti, hogy az alábbi vizsgálat összhangban van a táblázattal, ugyanis a táblázatban szereplő két legnagyobb eltérést mutató mérés az 1. és a 23.



21. ábra Az eredeti 24. méréshez viszonyított, a 30km/h sebességértékek körüli korrigált mérések távolság eltérései

Abban az esetben, ha tovább szeretnénk javítani a mérés pontosságát, akkor az eddiginél pontosabb mért sebesség adatokra van szükség a korrekciós tényező előállításához. A 24. mérésből meghatároztam a sebességértéket század pontossággal, majd ehhez igazítottam a 25. korrigált mérést. Az eredmény a **22. ábrán** látható. A távolságeltérés 1,96 m-ről 1,28 m-re csökkent, ami egyértelmű javulást jelent.



(a) (b)

22. ábra (a) Az eredeti 24. mérés és a ráillesztett 25. korrigált mérés trajektóriái (b) a távolságeltérés időbeni alakulása

A vizsgálat alapján az alábbi megállapításokat teszem:

- a legrosszabb esetben 11,29 m távolság különbség adódott menet közben 90,23%-os pontosság mellett, így ez a tévedés nem elfogadható mértékű,
- a legjobb esetben 1,96 m távolság különbség adódott 99,86%-os pontosság mellett, amely a korrekciós tényező változtatásával 1,28 m-re csökkent, ezáltal a pontosság definíciója szerint ez elfogadható hiba,
- a sebesség valamint a mintavételi darabszám nem befolyásolja a mérés pontosságát.

3.1.2 GIROSZKÓPPAL KOMPENZÁLT GYORSULÁSSZENZOROS JÁRMŰTRAJEKTÓRIA ELŐÁLLÍTÁSI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA [S5]

A giroszkóppal kompenzált gyorsulásmérés a gyorsulásszenzoros mérés egy továbbfejlesztett változata. A gyorsulásszenzoros járműtrajektória előállítása sík, vízszintes terepen viszonylag könnyen megvalósítható. A problémát az útburkolat lejtése, nyomvonalvezetése és a felületi egyenetlensége okozza. Ezek befolyásolják a műszer dőlés szögét, így a mérés végeredményét is. Ez indokolta, hogy giroszkópot alkalmazzak, ami a műszert folyamatosan vízszintesen tartotta a mérés során, így tudtam ezt a hibát kiküszöbölni. A vizsgálatból kiderül, hogy milyen körülmények között és milyen pontossággal lehet a mérést elvégezni.

3.1.2.1 A gyorsulásadatok feldolgozási módszere

A gyorsulásadatok rögzítése során előfordul, hogy álló helyzetben nullától eltérő értékeket mutat, ami végül a végeredmény torzulásához vezet, ezért ezeket ki kell szűrni és egy korrekciós tényezővel helyesbíteni szükséges. Annak eldöntésére, hogy mi alapján kompenzáljam a mért adatokat, hogyan találjam meg az álló és mozgó szakaszok határát, több kísérletet is elvégeztem. Az első kísérlet épületen belül történt, aminek célja annak eldöntése, hogy az álló és a mozgó szakaszok határa milyen módszerrel állapítható meg, illetve milyen számítási módszerrel dolgozzam fel az adatokat. A kísérletet vízszintes felületen végeztem, a megtett távolságokat jelöltem az asztalon. A műszert szabad kézzel mozgattam, de a sebességben nem volt szignifikáns eltérés az egyes szakaszokon. A mérés szakaszosan történt, a megtett teljes távolság 0,60 m volt, az egyes szakaszok pedig 0,15 m-esek.

Cél, hogy a sebességgörbét a valóságnak megfelelő állapotba hozzam a gyorsulás értékek korrigálásával úgy, hogy ne alakuljon ki negatív sebességérték. A korrekció a gyorsulásértékek pozitív vagy negatív eltolását jelenti. Így a pillanatnyi gyorsulás az alábbi képlettel számítható:

$$a(t) = a_y(t) + a_k \tag{3.8}$$

,ahol az a_k az adott szakasz korrekciós tényezője.

A mért adatok korrigálását az alábbi különböző módszerekkel végeztem. A mérés során a műszer vízszintes helyzetű, a mozgás szakaszos jellegű, a megtett távolság pedig 60 cm. Az álló szakaszokon mért gyorsulás értékeket minden esetben kinulláztam:

a, *a teljes gyorsulás adatsor elejének a 0-ra igazítása sima eltolással (+/-) értékkel,*

b, *az álló helyzetben mért sebességadatokat szakaszonként összegzem, majd ezt és a mozgásban mért sebességadatok utolsó elemét nullára helyezem,*

c, *az álló helyzetben mért gyorsulás értékeket eltolom (+/-) értékkel úgy, hogy ne alakuljon ki negatív sebességérték. A mozgásban mért adatok utolsó elemét eltolom a nullába.*

A nyers gyorsulásadat önmagában nem használható fel a megtett távolság számításához, mert álló helyzetben eltér a nullától az átlag gyorsulás, ezért mindenképp korrigálni kell azokat. A szakaszos mérés közben 4 alkalommal indult újra az eszköz, tehát 5 álló és 4 mozgó rész van egy mérésben. A szakaszok határát a gyorsulás értékek kiugrásából lehet tudni. A

korrekciós tényező számítása egy optimalizációs probléma, amelyet lineáris programozási modell segítségével a következőképpen lehet felírni:

$$\sum_{i=1}^{n} v_i \rightarrow 0 \tag{3.9}$$

,ahol v_i a sebesség értéke az *i*-edik időpillanatban.

A korlátozó feltételek:

a) $a_k \in R$

b) $-10 \leq a_k \leq 10$

c) $v_0 = 0$

$d)\ i = 1, \dots, n$

A sebességet a következő képlet alapján lehet számolni:

$$v_i = v_{i-1} + (a_{yi} + a_k) \cdot \Delta t \tag{3.10}$$

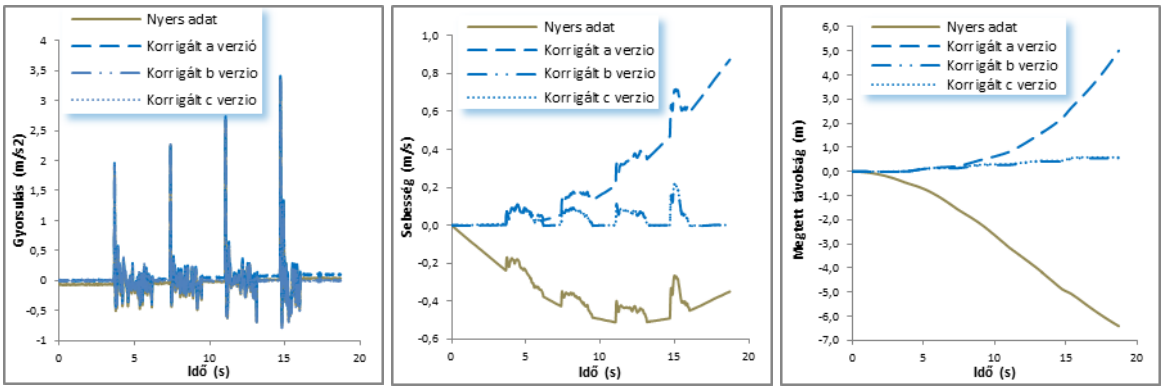
,ahol

a_{yi} a mért gyorsulás érték az i-edik időpillanatban,

a_k korrekciós tényező,

Δt a mintavételi időköz (állandó=0,02s).

Az elvégzett számítás után a következő eredményre jutottam, amelyet az alábbi **23. ábra** szemléltet.



(a) **(b)** **(c)**

23. ábra A különböző számítási módszerek összehasonlítása (a) gyorsulás, (b) sebesség, (c) megtett távolság

A gyorsulásértékek között nincs jelentős különbség, ezért a sebesség és a megtett távolság diagramokat elemzem. Az jól látszik a diagramokból, hogy a nyers adat és az „**a" számítási verzió** torzképet mutat, tehát egyértelműen kijelenthető, hogy nem alkalmasak a mérési adatok feldolgozására. A másik két változat viszont közel azonos eredményt produkál.

A számított eredményeket az alábbi táblázatban foglalom össze. A részszakaszok hossza a kezdőponttól értendő, amelyek pontosságát is összehasonlítom.

4. táblázat Az egyes feldolgozási módszerek eredményei

A mérési eredmények összefoglalása a mérési adat feldolgozási módszer szerinti bontásban									
Szituáció	**1. szakasz hossza (m)**	**1. szakasz pontossága**	**2. szakasz hossza (m)**	**2. szakasz pontossága**	**3. szakasz hossza (m)**	**3. szakasz pontossága**	**4. szakasz hossza (m)**	**4. szakasz pontossága**	**Átlag pontosság**
a	0,173	84,6%	0,556	14,5%	1,554	0,0%	3,057	0,0%	27,3%
b	0,139	92,8%	0,271	90,4%	0,414	92,1%	0,557	92,8%	92,1%
c	0,162	91,6%	0,299	99,7%	0,445	99,0%	0,591	98,6%	97,2%

A mérési eredmények átlag pontosság értékéből megállapítható, hogy az „**a" verzió** szignifikánsan eltér a másik kettőtől, az értéke csak 27,3% amit nem tekintek pontos értéknek. A másik két verzió viszont alkalmazható a mért nyers adatok feldolgozásához.

3.1.2.2 A mérési sebesség és a frekvencia vizsgálata

A mért adatokat különböző mintavételi frekvencián rögzítem, így megállapítható, hogy mennyire érzékeny a mérés a frekvenciára. Korábban folytattam vizsgálatot személygépjárművel sík terepen, ahol szintén különböző frekvenciákon történt a mintavétel és arra a következtetésre jutottam, hogy ez nem befolyásolja jelentős mértékben a végeredményt [S4]. Most ebben a megváltozott környezetben, ahol a megtett távolság csak 1 m körüli, a sebesség is csak 1 m/s körüli, tehát nagyságrenddel kisebb, ezért szükségesnek tartom az újbóli vizsgálatot.

Kis frekvencia tartományban 1,43-2,85 Hz a mintavételi idő instacionárius, emiatt nehéz megállapítani a mozgásban lévő tartományt, ami a végeredmény erős torzulásához vezethet. A frekvenciavizsgálathoz négy különböző frekvencián és különböző mérési sebesség mellett végeztem mérést. Az egyes szakaszokon mért átlagsebesség a következő kifejezéssel számítható.

$$\bar{v} = \frac{x}{t_k - t_i} \tag{3.11}$$

,ahol

x a mérőműszerrel mért megtett távolság,

t_i a mért adatsorból a szakasz elején levő idő adat,

t_k a mért adatsorból a szakasz végén levő idő adat.

5. táblázat: A mérési eredmények összefoglalása a különböző mintavételi frekvenciák és mérési sebességek szerint

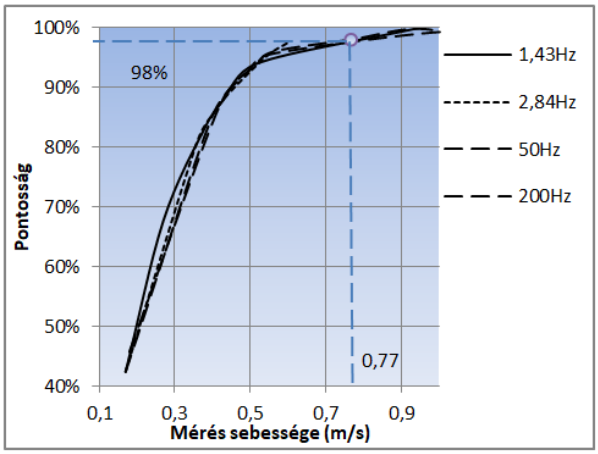
1,43 Hz		2,85 Hz		50 Hz		200 Hz	
Mérés sebessége (m/s)	Pontosság (%)	Mérés sebessége (m/s)	Pontosság (%)	Mérés sebessége (m/s)	Pontosság (%)	Mérés sebessége (m/s)	Pontosság (%)
0,17	2,5%	0,17	31,7%	0,17	62,1%	0,18	44,4%
0,43	97,4%	0,44	97,6%	0,55	94,9%	0,56	95,1%
0,27	68,9%	0,36	92,4%	0,40	95,2%	0,42	91,1%
0,52	98,6%	0,60	98,0%	1,00	99,1%	1,18	99,7%
0,38	80,0%	0,41	96,8%	0,49	95,7%	0,51	94,1%
0,95	99,6%	0,54	97,4%	1,08	98,3%	0,97	97,8%

Megvizsgáltam, hogy a mérési sebességtől hogyan függ a mérés pontossága. Erre a legjobb módszer a regresszió analízis, jelen esetben nemlineáris regressziót alkalmaztam a pontos görbeillesztés miatt. A legjobb illeszkedés egy hatvány függvénnyel érhető el, amit a következő alakban írtam fel:

$$f(x) = A \cdot x^B \cdot e^{C \cdot x} + D \qquad (3.12)\ [81]$$

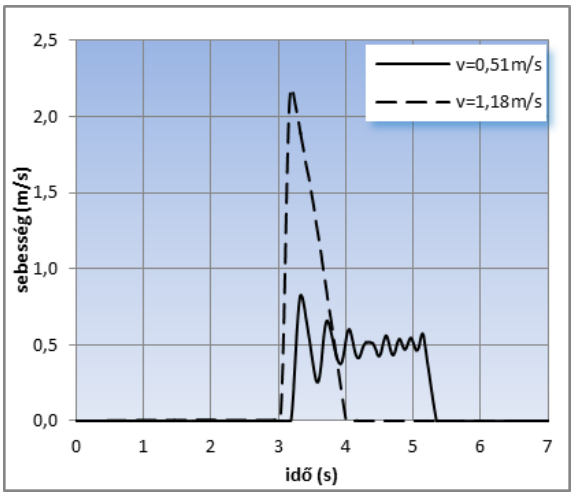
A regressziós együtthatók	
A:	21,11
B:	0,04
C:	-0,05
D:	-19,17

A regresszió vizsgálatot követően a négy különböző frekvenciagörbét diagramon ábrázoltam, amin bejelöltem a 98%-os pontosságot, amihez 0,77 m/s mérési sebesség tartozik. Ez azt jelenti, hogy legalább ekkora sebességgel célszerű mérni, ha 98%-os pontosságot akarunk elérni. Természetesen nem csak ez az egy tényező befolyásolja a mérést, ezért kisebb sebesség mellett is kaphatunk ilyen pontosságot és fordítva, nagyobb sebesség mellett is előfordulhat kisebb pontosság. A vizsgálat csak arra mutat rá, hogy ideális esetben a különböző mérési sebességek mellett milyen pontosság érhető el, valamint az is kiderül, hogy a mintavételi frekvenciák közt nincs szignifikáns különbség.



24. ábra A mérés pontossága a sebesség függvényében különböző frekvenciákon

A vizsgálatból az is kiderül, hogy ilyen kis távolság és sebesség esetén is gyenge az összefüggés a mintavételi frekvencia valamint a mérés pontossága között. Mindazonáltal ajánlott a magasabb frekvencia alkalmazása, mert ez megkönnyíti a szakaszhatárok azonosítását, továbbá a sebességet is pontosabban ki lehet számolni. Még egy dolog megfigyelhető a **24. ábrán** mégpedig az, hogy a kezdeti szakaszban meredeken szinte lineárisan növekszik, majd 0,5 m/s-nál van egy törés itt 92% körüli pontosság érték van, innentől pedig lassú a növekedés. A 92%-os mérési pontosság durva közelítő méréshez megfelelő lehet és elegendő 0,5 m/s-os sebesség, ami kisebb, mint egy gyalogosé és ezt nem nehéz elérni. A mérési módszert gépjárműre fejlesztettem ki, ami ettől lényegesen nagyobb sebességekre képes, így nagy valószínűséggel a mérés sebessége nem fog hibát eredményezni a kiértékelésnél.



25. ábra A sebességgörbék összehasonlítása

Érdemes megfigyelni a sebességgörbék alakját is. A sebesség növekedésével egy érdekes jelenség tapasztalható, ami miatt a görbe kisimul és egyenletes lesz. Ez a jelenség 1 m/s sebességértéknél jelentkezik a **25. ábrán** látható módon. Tehát magasabb sebességnél a zaj el-

tűnik a sebességgörbéből. Terepi mérés során ez a jelenség nem volt tapasztalható, mert ott nagyságrenddel nagyobb sebességértékek alakultak ki [S4].

3.1.2.3 A különböző szituációk vizsgálata

A számítási metódust különböző szituációkon teszteltem. A valóságban egy utazás során nem végig folyamatosan, hanem menet közben a jelző lámpák, gyalogosok vagy egyéb nem várt esemény miatt meg kell állni, ezért a mérési módszernek tudni kell kezelni ezt a szituációt. Továbbá az út nyomvonal vezetése általában nem teljesen sík, ezért vizsgálni fogom a lejtőn mért adatokat is. Emiatt szükséges a következő vizsgálat elvégzése, amelyre hat különböző szituációt fogalmaztam meg. A mérést 200 Hz mintavételi frekvencia mellett 1 m/s körüli sebességgel végeztem. A lejtőt egy faék képezte, aminek hajlásszöge 6,00°. A hajlásszög méréséhez Leica disto s910 mérőműszert használtam. A megtett távolságot minden esetben egyedileg mértem le és ehhez hasonlítottam a számítottat. A mérési szituációkat az alábbiak szerint fogalmaztam meg és a **26. ábra** szemlélteti.

a, *az adatgyűjtő vízszintesen mozog, a mérés iránya megegyezik a mozgás irányával,*

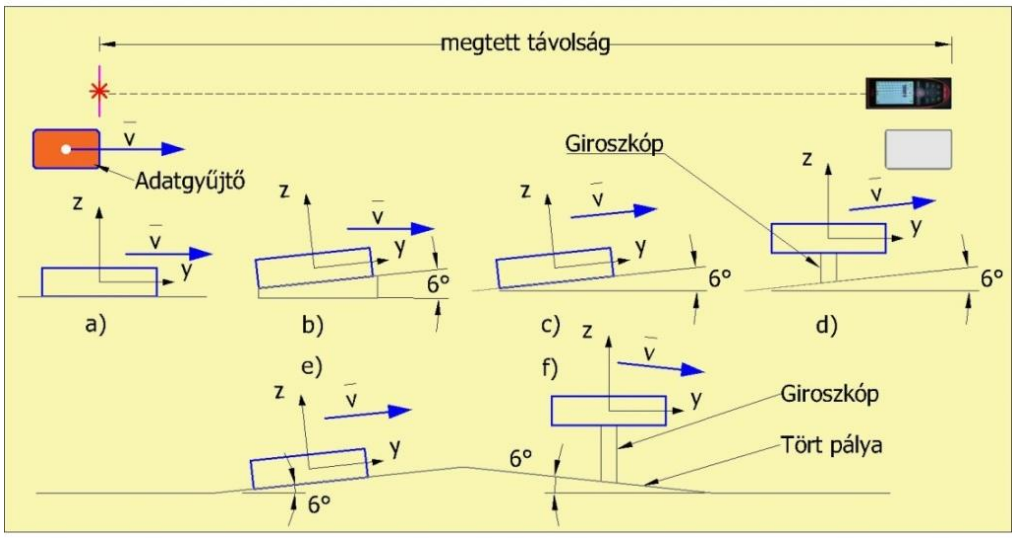
b, *az adatgyűjtő dőlt helyzetű és vízszintesen mozog, a mérés iránya nem egyezik a mozgás irányával,*

c, *a terep dőlt az adatgyűjtő párhuzamos irányú a mozgással, a mérés iránya megegyező a mozgás iránnyal,*

d, *a terep dőlt az adatgyűjtő vízszintesen mozog,a mérés iránya nem egyezik a mozgás irányával,*

e, *a terepben emelkedő és lejtő van, a műszer a pálya síkjával párhuzamosan mozog,*

f, *a terepben emelkedő és lejtő van, a műszer vízszintes helyzetben mozog.*



26. ábra A mérési szituációk

A vizsgálattal megválaszolandó kutatói kérdések.

- Az első négy szituáció közül melyikben történt pontos mérés?
- Fontos-e a műszert vízszintesen tartani?
- Tört pálya teszt. Van-e különbség a sima és a giroszkópos mérés közt?
- Van-e hatása a kezdeti gyorsulás értéknek a pontosságra?
- Befolyásolja-e a mért és a számított sebesség különbsége a pontosságot?

A mérés végrehajtásához felhasznált mérőeszközök:

- Gyorsulás szenzor: BOSCH BMI120
- Adatgyűjtő: Okostelefon
- Távolságmérő: LEICA DISTO S910

A vizsgálatot egy asztalon végeztem el 200Hz mintavételi frekvencián. A kiindulási pontot jelöltem az asztalon, mint bázispontot. A mérést az első négy szituáció esetén kétszer hajtottam végre, egyszer megállás nélkül, egyszer pedig megálltam a mérés közben. Ez utóbbit szaggatott mérésnek neveztem el a **6. táblázatban**. Mivel a mérés sebessége befolyásolja a pontosságot, ezért ezt feltűntettem a táblázatban, viszont a szaggatott mérésnél a két mozgásban lévő szakasz átlagát adtam meg. Az **e** és az **f szituációk** esetén csak folytonos mérés történt.

6. táblázat: A különböző szituációkban elért pontosságok

	Mérés sebessége (m/s)	Pontosság (%)
a) szituáció folytonos	0,82	96,7
a) szituáció szaggatott	0,53	99,9
b) szituáció folytonos	0,46	94,9
b) szituáció szaggatott	0,61	46,2
c) szituáció folytonos	0,85	98,0
c) szituáció szaggatott	0,74	94,2
d) szituáció folytonos	0,77	99,8
d) szituáció szaggatott	0,28	97,5
e) szituáció folytonos	0,85	60,3
f) szituáció folytonos	0,36	93,1

A **b** és az **e** szituációk alacsony pontosságot értek el. A két szituáció viszont különbözik egymástól. Ha összehasonlítjuk őket, akkor az alapvető különbség az, hogy a műszer vízszintes vagy dőlt helyzetű a mérés közben. Három esetben az **a, d, f** vízszintes és a másik három esetben pedig dőlt helyzetű. A pontatlanság két esetben (**b** és **e**) szignifikánsan jelentkezett. A közös bennük, hogy mindkét esetben dőlt helyzetű a műszer, de az **e** esetben két irányban is dőlt a mérés során, egyszer emelkedőn, egyszer lejtőn haladt. A **c** esetben is dőlt helyzetű a műszer, viszont itt elég magas értéket ért el a pontosság.

A törtpálya teszt során giroszkóp nélkül 60%, míg giroszkóppal 93% pontosságot értem el 0,36 m/s sebesség mellett, ami a **24. ábra** alapján is csak 87% körüli pontosságnak felel meg, ami alapján elég meggyőző a giroszkóppal elért eredmény.

3.1.2.4 Giroszkópos terepi mérés, ipari park

A mérés végrehajtásához felhasznált mérőeszközök:

- Gyorsulás szenzor: BOSCH BMI120
- Adatgyűjtő: Okostelefon
- Távolságmérő: LEICA DISTO S910+Tripod

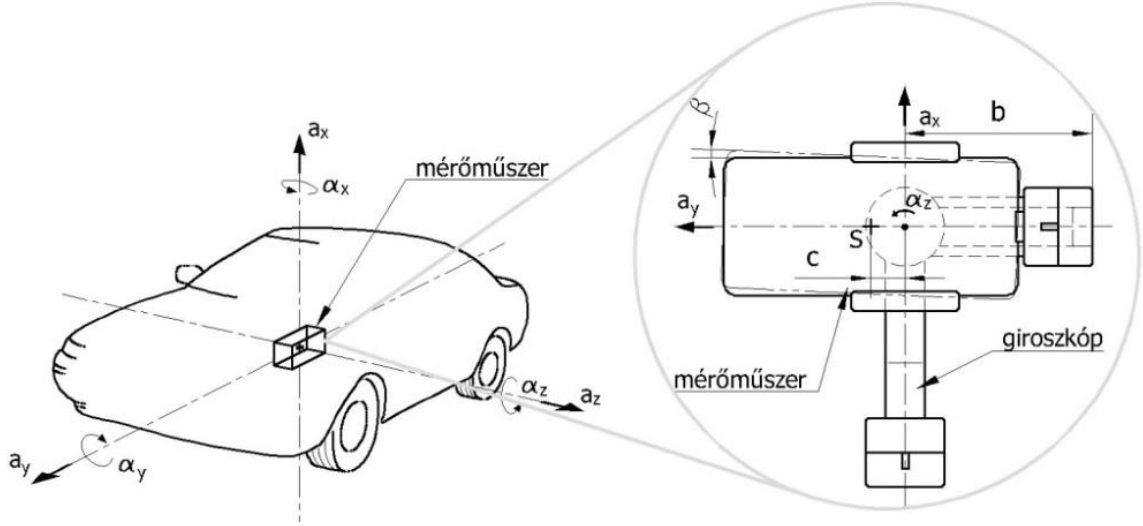
A mérés helyszíneül a korábbi gyorsulásszenzoros vizsgálat helyszínét választottam [S4]. A vízszintes útszakaszon kimértem a távolságmérővel száz métert **2. kép**.

(a) (b) (c) (d) (e)

2. kép A 100m-es szakasz és a szintkülönbség kimérése (a) lézeres távolságmérő, (b) célpont, (c) a mért távolság (d) a szintkülönbség (e) a burkolati jeltől mért távolság

A gépjárművel a kijelölt szakaszon mentem végig mindkét irányban felváltva, úgy ahogy azt a korábban is tettem (**14. ábra)**. Amikor a kiemelt szegély felé hajtottam a kezdő pozícióban, az első kerék a burkolati jelen volt és végpozícióban a kiemelt szegélynek ütközött, így a keréktalppontja eltolódott S_t távolságra ezért a megtett távolság lecsökkent 99,70 m-re, amit a **7. táblázatban** is feltüntettem. Az ellenkező irányba történő mérésnél a kezdő pozícióban a hátsó kerék a kiemelt szegéllyel érintkezik, ezért a jelig 99,70 m tesz meg a jármű, a megállást követően pedig minden esetben lemértem a kerék talppontjának távolságát (**2. kép)** és jegyzőkönyvben rögzítettem.

A műszer elhelyezése a jármű középkonzolán rögzített giroszkópon történt. A műszert a jármű hossztengelyével megegyezően, vagyis a menetiránynak megfelelően állítottam be. A gyorsulási irányok értelmezését a **27. ábra** mutatja.



27. ábra A mérőműszer elhelyezkedése a járműben és a gyorsulási irányok értelmezése

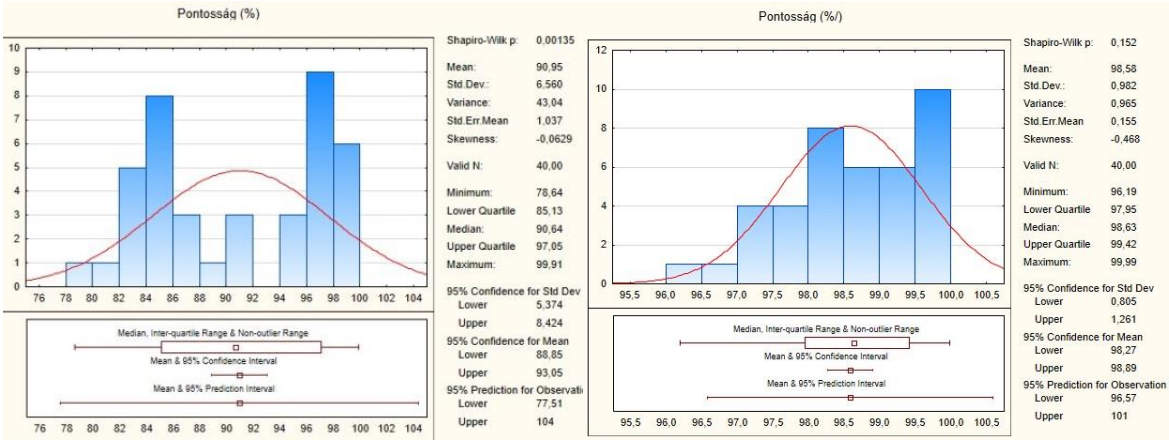
A giroszkóp egyensúlyban tartja a műszert. A giroszkóp bekapcsolása előtt a telefon súlypontját a forgásközéppontba kell állítani a giroszkóp vízszintes karjának növelésével, aminek hosszát a **27. ábrán** b-vel jelöltem. Úgy kell elvégezni a beállítást, hogy a súlypont a forgásközéppontban legyen. A kiegyensúlyozást követően a műszer egy bizonyos határon belül még egy β szöggel elforgatható, ezt szemlélteti a **27. ábra**. A kijelölt szakaszon negyven mérést hajtottam végre 50 Hz-es mintavételi frekvencián, a mérés eredményeit a **7. táblázatban** foglaltam össze.

7. táblázat Az Ipari parki terepi mérés adatait összefoglaló táblázat

	Eredeti mérés										Korrigált mérés		
s.sz.	Mérés iránya	Jeltől való eltérés (m)	Mért távolság (m)	Számított távolság (m)	Távolság eltérés (m)	Mért sebesség maximuma (km/h)	Számított sebesség maximuma (km/h)	A sebesség-különbségek (km/h)	A kezdeti gyorsulás érték (m/s2)	Pontosság (%)	Számított távolság (m)	Távolság eltérés (m)	Pontosság (%)
1	KSZ		99,70	88,41	-11,29	40	33	7	-0,53	88,68	98,20	-1,50	98,50
2	BJ	-0,68	99,02	100,63	1,61	48	44	4	-0,58	98,37	100,63	1,61	98,37
3	KSZ		99,70	85,48	-14,22	46	39	7	-0,52	85,74	98,61	-1,09	98,91
4	BJ	-0,78	98,92	95,35	-3,57	41	36	5	-0,35	96,39	99,27	0,35	99,65
5	KSZ		99,70	85,17	-14,53	42	36	6	-0,29	85,43	97,31	-2,39	97,60
6	BJ	-0,02	99,68	99,95	0,27	45	41	4	-0,38	99,73	99,95	0,27	99,73
7	KSZ		99,70	85,97	-13,73	42	34	8	-0,31	86,23	102,64	2,94	97,05
8	BJ	-0,36	99,34	102,15	2,81	43	40	3	-0,40	97,17	97,99	-1,35	98,64
9	KSZ		99,70	84,75	-14,95	40	33	7	-0,43	85,01	102,38	2,68	97,31
10	BJ	-0,40	99,30	96,85	-2,45	42	37	5	-0,35	97,53	96,85	-2,45	97,53
11	KSZ		99,70	83,39	-16,31	41	33	8	-0,46	83,64	100,42	0,72	99,28
12	BJ	0,35	100,05	99,55	-0,50	41	37	4	-0,40	99,50	99,55	-0,50	99,50
13	KSZ		99,70	85,34	-14,36	43	35	8	-0,40	85,60	101,80	2,10	97,89
14	BJ	0,35	100,05	102,35	2,30	41	39	2	-0,30	97,70	96,24	-3,81	96,19
15	KSZ		99,70	84,13	-15,57	41	33	8	-0,30	84,38	101,65	1,95	98,04
16	BJ	0,07	99,77	94,93	-4,84	41	36	5	-0,36	95,15	98,85	-0,92	99,08
17	KSZ		99,70	90,93	-8,77	44	39	5	-0,21	91,20	96,45	-3,25	96,74
18	BJ	0,26	99,96	103,50	3,54	44	41	3	-0,37	96,46	99,02	-0,94	99,06
19	KSZ		99,70	87,55	-12,15	44	36	8	-0,17	87,81	101,11	1,41	98,59
20	BJ	0,13	99,83	99,92	0,09	43	39	4	-0,51	99,91	99,39	-0,44	99,56
21	KSZ		99,70	87,50	-12,20	44	37	7	0,00	87,76	102,28	2,58	97,41
22	BJ	-0,08	99,62	102,69	3,07	41	38	3	0,00	96,92	98,25	-1,37	98,62
23	KSZ		99,70	83,46	-16,24	40	32	8	-0,10	83,71	101,88	2,18	97,81
24	BJ	-0,76	98,94	99,45	0,51	42	38	4	0,00	99,48	98,60	-0,34	99,66
25	KSZ		99,70	83,47	-16,23	41	32	9	-0,34	83,72	102,69	2,99	97,00
26	BJ	0,10	99,80	103,72	3,92	41	38	3	0,00	96,07	100,90	1,10	98,90
27	KSZ		99,70	82,42	-17,28	40	32	8	-0,40	82,67	99,69	-0,01	99,99
28	BJ	0,00	99,70	102,77	3,07	41	38	3	0,00	96,92	97,71	-1,99	98,00
29	KSZ		99,70	85,67	-14,03	37	30	7	-0,10	85,93	99,79	0,09	99,91
30	BJ	0,30	100,00	104,10	4,10	42	39	3	-0,12	95,90	99,69	-0,31	99,69
31	KSZ		99,70	82,52	-17,18	41	33	8	0,15	82,77	101,58	1,88	98,11
32	BJ	1,13	100,83	90,82	-10,01	38	32	6	0,36	90,07	98,97	-1,86	98,16
33	KSZ		99,70	81,16	-18,54	39	29	10	0,22	81,40	100,54	0,84	99,16
34	BJ	1,48	101,18	100,96	-0,22	38	35	3	0,01	99,78	101,08	-0,10	99,90
35	KSZ		99,70	85,00	-14,70	39	31	8	0,45	85,26	100,36	0,66	99,34
36	BJ	0,20	99,90	91,74	-8,16	40	34	6	-0,43	91,83	100,08	0,18	99,82
37	KSZ		99,70	78,40	-21,30	38	29	9	-0,25	78,64	98,98	-0,72	99,28
38	BJ	-0,10	99,60	97,40	-2,20	40	36	4	-0,42	97,79	98,36	-1,24	98,76
39	KSZ		99,70	84,22	-15,48	39	32	7	-0,33	84,47	101,33	1,63	98,37
40	BJ	0,90	100,60	95,79	-4,81	40	34	6	-0,60	95,22	102,52	1,92	98,09
										90,95			98,58

A táblázatban szürke aláfestéssel jelöltem a 92% alatti pontosságú méréseket és az tapasztalható, hogy minden második, vagyis a kiemelt szegély felé történő mérés az. Tehát valami hiba történt a mérés során. A feltételezésem az, hogy a műszer beállításából adódhatott a hiba, mivel egy bizonyos β szöggel elfordulhat a befogáskor és csak egyszer a mérés kezdetén állítottam be a műszert. Az úttestnek pedig van egy enyhe 0,4%-os hosszesése (**2. kép)**. Amennyiben csak a burkolati jel felé történő mérést nézem, úgy 96,9%-os a pontosság.

A pontosság vizsgálata során, ami meglepő módón a két irányt külön átlagolva szignifikáns különbséget mutat, megfigyelhető, hogy az adatok nem a mediánnál, hanem az alsó illetve a felső kvartiliseknél vannak nagyobb számban. Nagyjából ugyanannyi darabszámban, ami igazolja, hogy a két irány eltérő pontosságot mutat. A kiemelt szegély felé 85%, a burkolati jel felé pedig 97% a pontosság.



(a) **(b)**

28. ábra A mért adatok statisztikai feldolgozása (a) normál (b) korrigált

A jelen mérési eredmények elég meggyőzőek, viszont ha a korábbi Ipari parki normál mérés [S4] eredményével összevetem, ahol a normál mérés 93% lett, akkor ez jobbnak mondható, de ha irányonként külön vizsgálom, akkor a giroszkóppal kompenzált mérés mutat jobb eredményt. A korrigált mérési adatok feldolgozásából megállapítható, hogy a pontosság számtani átlaga 98,58% lett, ami a mérési módszer pontossága.

A későbbi mérési eredmények értékeléséhez meghatározom a mérési módszer konfidencia intervallumát matematikai statisztikai módszerrel [81]. Legyen a becsült várható érték $\widehat{m}_n = 98$, ami az általam kidolgozott mérési módszer pontossága. A konfidencia intervallum 95%-os megbízhatósági szintjén az $\varepsilon = 0{,}05$, a mintából vett statisztikai szórás $\sigma = 0{,}98$, a minta darabszáma pedig $n = 40$. A várható értéket valószínűségi változónak tekintve a következő összefüggés írható fel.

$$P\left(C_{n,\varepsilon}^1 \cdot \hat{\beta}_n + \widehat{m}_n < m_n < C_{n,\varepsilon}^2 \cdot \hat{\beta}_n + \widehat{m}_n\right) = 1 - \varepsilon \qquad (3.13)\ [81]$$

$$\hat{\beta}_n = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad (3.14)\ [81]$$

A fenti képlet alapján $\hat{\beta}_n = 0{,}16 > 0$ ezért a $C_{n,\varepsilon}^i$ értékeket a

$$\Phi\left(C_{n,\varepsilon}^2\right) = 1 - \frac{\varepsilon}{2},\ \Phi\left(C_{n,\varepsilon}^1\right) = \frac{\varepsilon}{2} \qquad (3.15)\ [81]$$

összefüggésből határozom meg, ahol Φ a standard normális eloszlás eloszlásfüggvényét jelöli. Mivel a standard normális eloszlás eloszlásfüggvénye szimmetrikus, azaz a $\Phi(-x) = \Phi(x)$, ezért $C_{n,\varepsilon}^1 = C_\varepsilon$ és $C_{n,\varepsilon}^2 = -C_\varepsilon$ alakú, ahol $\Phi(C_\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{2}$. Az $\varepsilon = 0{,}05$ esetben a $\Phi\left(C_{0,05}\right) = -1{,}96$ lesz.

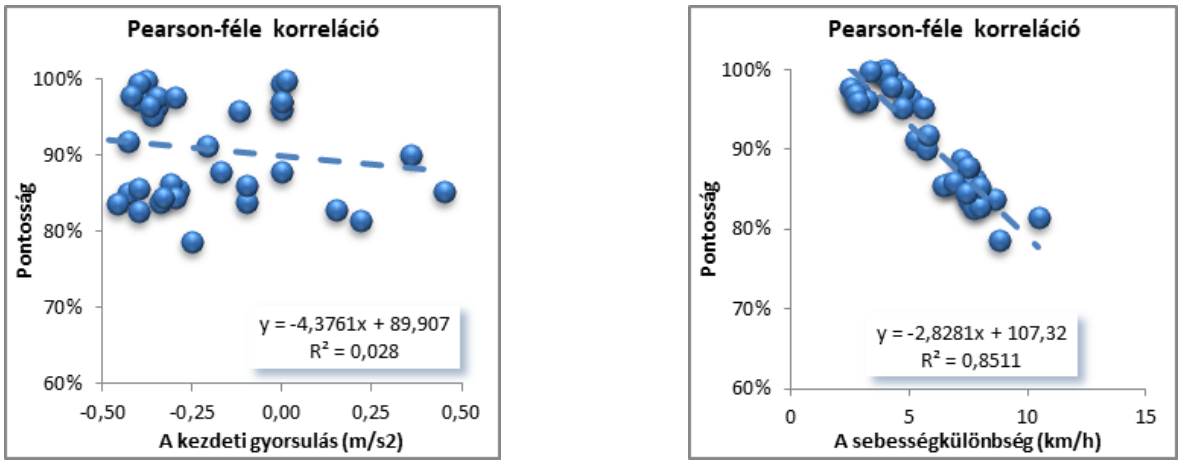
Így a konfidencia intervallum

$\left(C_{n,\varepsilon}^{1} \cdot \hat{\beta}_n + \widehat{m}_n; C_{n,\varepsilon}^{2} \cdot \hat{\beta}_n + \widehat{m}_n\right) = (-1{,}96 \cdot 0{,}16 + 98; 1{,}96 \cdot 0{,}16 + 98) \approx$ $(97{,}68; 98{,}31)$ lesz.

A statisztikában a korreláció vizsgálat a statisztikai adatok egymás közötti kapcsolatának vizsgálatára szolgál. A mérés során hiba származhat a műszer vízszintbe helyezéséből, mivel ha nincs vízszintbe, akkor nem a valós gyorsulást fogja mérni a műszer. Az elfogadható érték $\pm 0{,}5\ m/s^2$, ebben az esetben azt mondható, hogy nincs hatással a kezdeti gyorsulás érték a pontosságra (**29. ábra**).

A két változót a Pearson-féle korrelációval vizsgáltam az Ipari Parkban mért adatokkal. Amennyiben az együttható értéke $r(x, y) = \pm 1$, akkor a két változó között lineáris a kapcsolat, pozitív előjel esetén egyenes, negatív előjel esetén pedig fordított. A szorosságot az határozza meg, hogy az r értéke mennyire áll közel a -1-hez vagy a +1-hez. A nulla közeli állapot pedig azt jelenti, hogy gyenge illetve, hogy nincs lineáris kapcsolat a két változó között. A korrelációs együtthatót a következő összefüggéssel számoltam [82]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad (3.16)\ [82]$$



(a) **(b)**

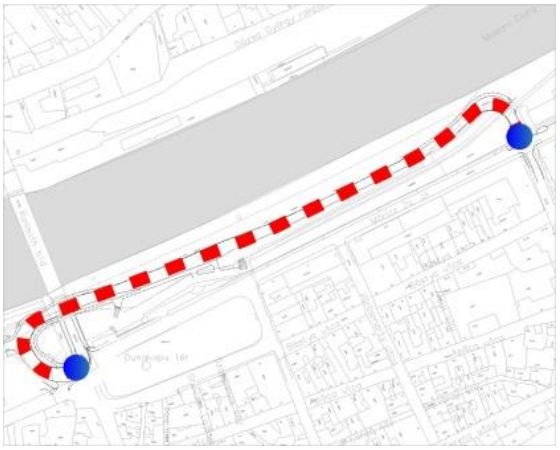
29. ábra A korreláció számítás eredménye, (a) a kezdeti gyorsulás-pontosság, (b) a sebességkülönbség-pontosság

A sebességkülönbség pontosságra gyakorolt hatása szignifikáns (**29. ábra**), vagyis fontos a sebesség pontos ismerete. A mért adatok korrigálásához viszont elegendő egy utazás során a maximális sebességet meghatározni és ez alapján kiszámolni a szükséges korrekciós tényezőt.

3.1.2.5 Giroszkópos terepi mérés, alsó rakparti út

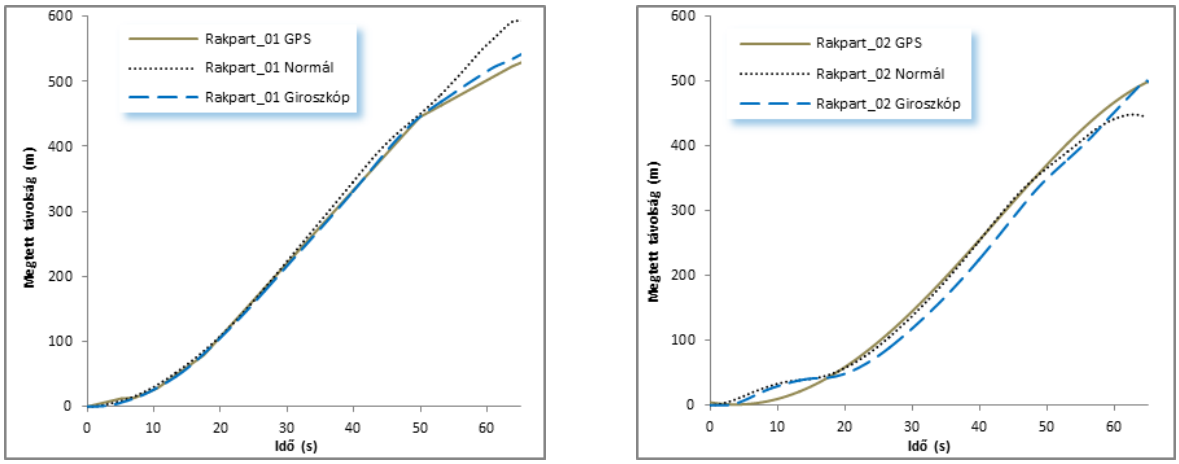
Az alsó rakparti úti mérés lényege, hogy teszteljem a giroszkóppal kompenzált mérési módszert. Az útvonal kiválasztásánál szempont volt, hogy változatos lejt- és ívviszony legyen

benne. A mérés során három műszert használtam, egyet a GPS nyomkövetésre, egyet a normál gyorsulásra, egyet pedig a kompenzált gyorsulásmérésre. A mérést 50 Hz-en végeztem mindkét műszerrel. A **30. ábrán** látható EOV koordináta rendszerben levő helyszínrajzról pontosan lemértem mindkét irányban a megtett távolságot. Ezután összevetettem a helyszínrajzi és a GPS által mért távolságot, ami egyik irányba 99,7% a másik irányba 99,9%-os egyezést mutatott. Menet közben figyeltem a jármű sebességmérőjét, ami 5 km/h-val többet mutatott a GPS-nél. A kettő közül én a GPS által mért sebességet vettem alapul, a távolság nagypontosságú egyezése miatt.



30. ábra A kísérleti útszakasz (Győr, alsó rakparti út)

A helyszínrajzról lemért távolság a forgalmi sáv közepén történt. A helyszínen pontosan álltam fel a járművel a Kossuth-híd felé, a kezdő pont az árvízvédelmi fal vonala volt, a végpont pedig a híd lábánál lévő jelzőlámpához felfestett felállási vonal, amely közt a távolság 497,54 m. A Dunapart Rezidencia felé a kezdő pont a híd lábánál lévő zebra, míg a végpont a Dunapart Rezidencia előtti gyalogátkelőhely előtti pont, amely közti távolság 511,40 m.



(a) **(b)**

31. ábra A három különböző mérési módszer eredménye út-idő diagramon (a) Kossuth-híd felé (b) Dunapart Rezidencia felé

A mérési eredményeket út-idő diagramokon mutatom be (**31. ábra)**. A Kossuth-híd irányába történő mérés során a normál méréssel 607,11 m távolságot, így 78% pontosságot értem el, míg a giroszkóppal kompenzált méréssel 507,28 m, azaz 98% pontosságot. A Dunapart Rezidencia felé 448,45 m távolságot, vagyis 87,7% pontosságot, míg a giroszkóppal 500,75 m, tehát 97,9% pontosságot mértem.

3.1.2.6 A vizsgálatból származó új tudományos eredmény

A mérést különböző frekvencián lehet elvégezni, ami a pontosságra gyenge hatással van, de a mintavételi időnek állandónak kell lennie. A vizsgálatban használt műszer 50 és 200 Hz esetén használ állandó mintavételi időt, ami sok adatot generál, ezáltal könnyebb az egyes szakaszhatárok megtalálása.

A szituációk vizsgálatánál alapvetően két kategóriára lehet osztani az esetet. Az egyik, amikor teljesen vízszintes helyzetben van a műszer, a másik amikor dőlt. A hat szituációból kettőnél (**b** és **e**) jelentkezett szignifikáns eltérés a pontosságban 46 és 60%, ami nem megfelelő. A **c** szituáció esetén is dőlt a műszer, viszont itt magas volt a pontosság értéke. Ez azzal magyarázható, hogy a mérés párhuzamosan történt a mozgással és nem változik a dőlés szöge, valamint a mérés sebessége a megtett távolsághoz viszonyítva nagy. Tehát az első kutatási kérdésre a válasz a pontosság konfidencia tartományát figyelembe véve az **a, c**, és a **d** szituációban történt pontos mérés.

A második kérdésre válaszolva, a megállapításokból az a következtetés vonható le, hogy a mérés során vízszintes helyzetben kell tartani a műszert, vagyis a giroszkóppal kompenzált mérési metódus használható bármilyen nyomvonalvezetés esetén.

A harmadik kutatói kérdésre az a válasz, hogy szignifikáns különbség mutatkozik a sima és a giroszkópos mérés között, változó esésviszonyok esetén. Ezért a terepi mérés során a giroszkóppal kompenzált mérési metódust lehet használni a megbízható, pontos méréshez.

A negyedik és ötödik kutatói kérdésre a választ a korrelációvizsgálat adja. Amennyiben a kezdeti gyorsulás érték $\pm 0{,}5\ m/s^2$ közötti, ami származhat a rossz beállításból is, úgy nincs hatással a pontosságra. A mért és a számított sebesség különbsége egyértelműen hatással van a pontosságra, ami azt jelenti, hogy a mérés során fontos a sebesség pontos rögzítése.

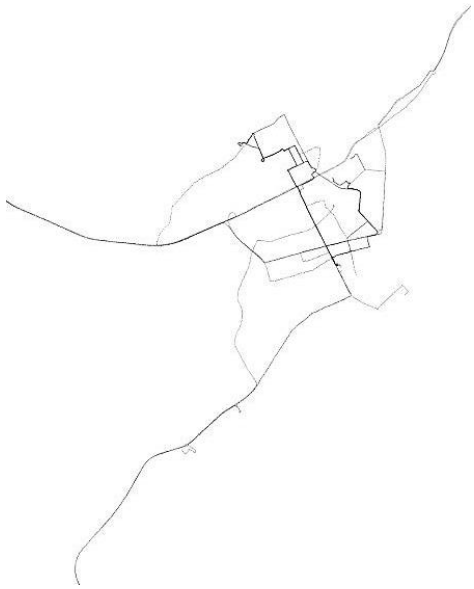
3.1.3 ADOTT ÚTSZAKASZ SEBESSÉGHATÁR TARTÁSÁNAK VIZSGÁLATI MÓDSZERE

A módszer kidolgozásának lényege, egy adott útszakaszra megengedett sebesség fajlagos betartásának kimutatása. A sebesség rögzítésére az FCD (Floating Car Data) módszert választottam, aminek előnye, hogy GPS alapú és a forgalomban haladó mérőautó pontossága 85% megbízhatósággal képes meghatározni a forgalomáramlási sebességet [23].

A mérést Győrben végeztem, kiegészítve az 1-es főút Budapest-Hegyeshalom közti, valamint a 68-as út 84+181 – 94+945 m, a 76-os út 0+0 – 7+861 m, a 71-es út 90+266 – 116+473 m, a 84-es út 0+0 – 23+837 m, a 7324-es út 0+0 – 20+185 m, a 8402-es út 0+0 – 23+380 m, valamint a 83-as út 23+780 m szelvénytől a végéig. A vizsgálat eredménye nem általánosítható, csak a vizsgált útszakaszra jellemző állapotot reprezentál. A helyi vezetői szokások, a gépjárműforgalom nagysága, a gépjárműállomány és a környezeti hatások mind befolyásoló tényezők.

3.1.3.1 A mért GPS adatok CAD szoftveres feldolgozása

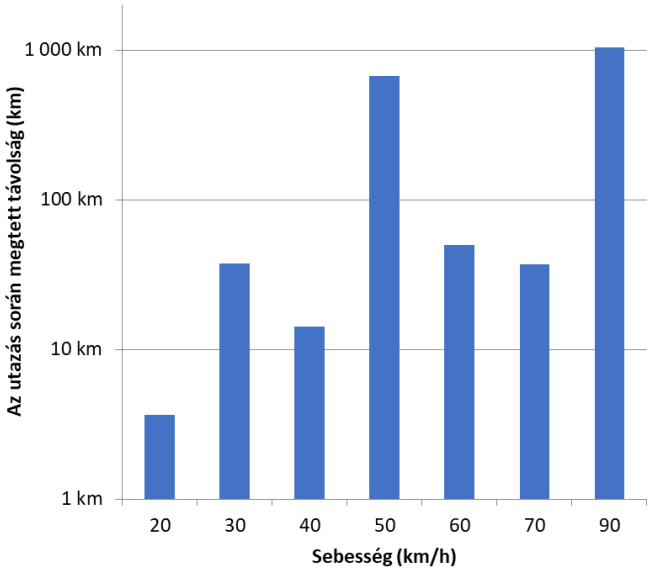
A GPS által rögzített adat formátuma gpx, amit Excel programmal be lehet olvasni, majd a CAD szoftver számára megfelelő formátumba, txt kiterjesztésben lementeni. A CAD szoftverben egy koordináta transzformációt kell végezni, mégpedig a WGS84-ből EOV-be kell konvertálni. A bemért úthálózatot a feldolgozás után csak Győrre korlátozva az **32. ábra** mutatja.



32. ábra A bemért úthálózat győri szakaszai

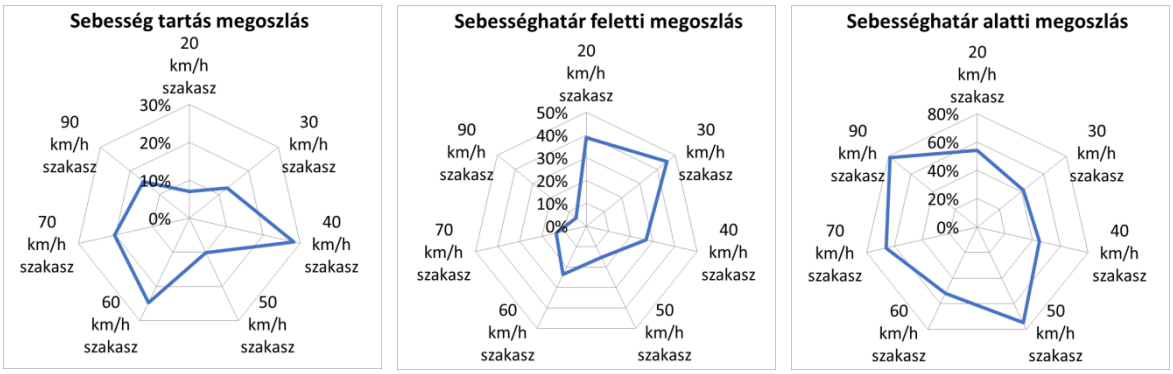
A legtöbb útszakaszon többször is végighaladt a mérőautó. A mérésben különböző korú és nemű sofőrök vettek részt saját gépjárművel. Ezzel kizárható, az egy járművezetői típus miatti torzítás.

A mért adatokat Excelben dolgoztam fel, amihez szükséges volt a vizsgált útszakaszokon megengedett sebességhatár pontos szakaszhatárait felvenni. Az egyes sebességhatárok tartását ±5 százalékos megengedett eltéréssel határoztam meg. Így el tudtam végezni a statisztikai feldolgozást, aminek eredményét a **33. ábrán** mutatom be.



33. ábra Az utazások során megtett távolságok megoszlása a különböző megengedett sebességű útszakaszok szerint

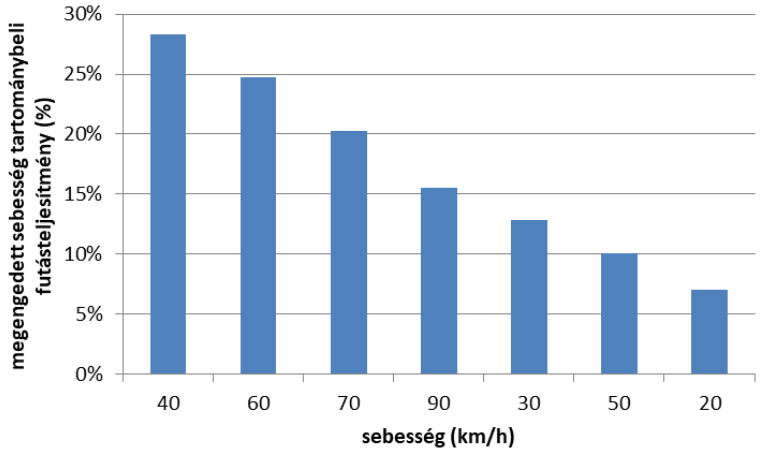
A **33. ábrán** látszik, hogy a legnagyobb megtett távolságok a 90 km/h-ás és az 50 km/h-ás sebességű útszakaszokon történtek. A teljes vizsgált úthossz 1865 km, ami 42 órát vett igénybe, ez pedig 44 km/h átlagsebességet jelent. Magyarország országos közúthálózata körülbelül 33 ezer km. A teljes főúthálózat ebből 9 ezer km körüli, ezt pedig egy mérőautóval történő bemérése kevesebb, mint két hónap alatt lehetséges. A sebességtartást kategóriánként összegeztem, ez látható a **34. ábrán.**



34. ábra A sebességtartás kategóriánkénti megoszlása

3.1.3.2 A vizsgálatból származó új tudományos eredmény

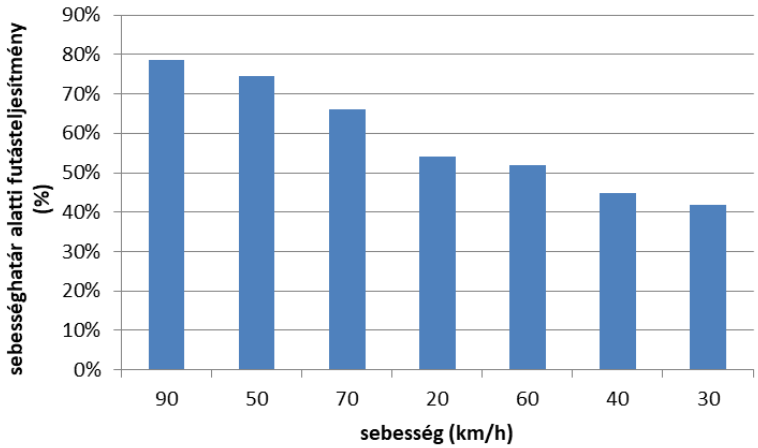
A mért adatok statisztikai feldolgozását az egyes sebességtartománybeli futásteljesítmény hisztogramon való ábrázolása jelenti. Elsőként azt vizsgáltam, hogy az egyes tartományokban a teljes megtett szakasz hány százalékán mértem a megengedett sebességet (**35. ábra**).



35. ábra Sebességtartás az egyes tartományokban

A legjobban a 40 km/h-ás sebességet lehet tartani, míg a legkevésbé a 20 km/h-át. A 90 km/h-ás sebesség is csak a 4. helyen szerepel, megelőzve az utána következő 6. helyen álló 50-est. Az mindenképpen figyelemre méltó, hogy a belterületi 50-es sebességet is mindössze 10%-ban lehet betartani.

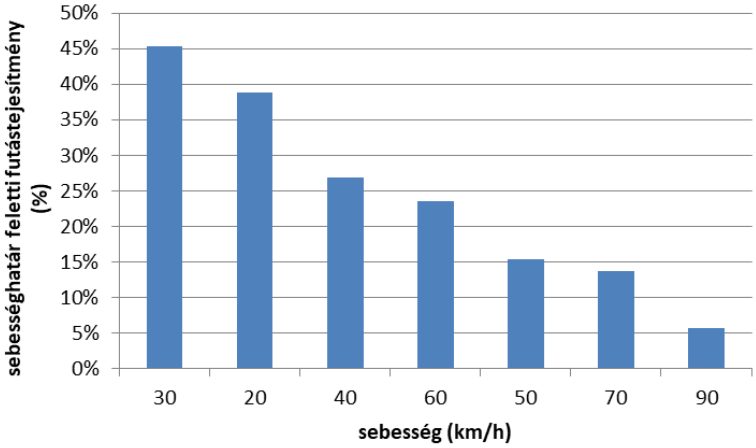
A következő vizsgálatból arra kapunk választ, hogy a sebességtartomány alatt vagy felett haladnak inkább a járművek.



36. ábra A megengedett sebességhatár alatti futásteljesítmény

Az egyes tartományok jelentős eltérést mutatnak. Míg a sebességtartás 7-28% között mozgott, addig a sebességhatár alatti futásteljesítmény 42-79% között van. Ebben a vizsgálatban a 90-es áll az első helyen, majd ezt követi az 50-es. Mindkét tartományban 70% feletti az arány,

ami meglehetősen magas érték. Ebből arra lehet következtetni, hogy elég rossz a forgalomáramlás, jellemzően alacsony áramlási sebességek alakulnak ki, csak rövid ideig tartó, feltehetően előzési szándékkal érnek el a járművezetők a megengedettnél nagyobb sebességet.



37. ábra A megengedett sebességhatár feletti futásteljesítmény

Ha a sebességhatár feletti futásteljesítményeket nézzük, akkor a 90-es sebesség a legutolsó helyen, míg az első helyen a 30-as sebesség áll. A két tartomány e tekintetben helyet cserélt egymással a rangsorolásban. Az arány 6 és 45% között alakul, ami közel nyolcszoros eltérést jelent a legkisebbhez viszonyítva. A 30-as tartomány kiemelkedően magas értéket vesz fel. Elgondolkodtató, hogy a külterületi 90 km/-ás sebességet csak 5%-ban haladják meg. Ennek egy lehetséges oka az út nyomvonalvezetése. Feltéve, hogy egy jármű nem képes a megengedett sebességgel végighaladni az úton, a követő járművek megpróbálják azt megelőzni. Egy másik feltétel, hogy az útszakaszon kevés az egyenes jól belátható rész, amely előzésre alkalmas. Ennek következtében a forgalom feltorlódik, vagyis nő az útszakasz forgalmi telítettsége. Egy bizonyos szint felett kötött forgalomáramlásról beszélünk, ahol a járművezetők már nem a saját maguk által megkívánt sebességgel haladnak. Ebben az állapotban oszcilláció figyelhető meg a kialakult konvojban, ami csökkenti a forgalomáramlás sebességét. Egy másik kauzális magyarázat lehet a járművezetői közlekedési szokás, illetve magatartás.

3.2 ÚJ FORGALMI PARAMÉTER ÉRTÉKELŐ RENDSZER KIDOLGOZÁSA

A forgalmi paraméter értékeléséhez szükséges paraméterek közül lehet olyan, amit nem lehet egyszerű mérő eszközzel mérni, vagy egyáltalán nincs lehetőség a mérésre. Ha a forgalom egy részéről gyűjtünk információt, akkor matematikai modell segítségével elő állítható a szükséges teljes adatsor. A forgalmi nagyság ismeretében járműkövetési modell segítségével szimulálható egy adott útszakasz vagy hálózat forgalma. A forgalomnagyságot kézi vagy gépi

forgalomszámlálással határozzuk meg. A forgalmi hullám terjedési sebességének meghatározásához minden egyes jármű pozícióadatára szükség van, amit jelenleg még nem lehetséges gyűjteni, ezért ezt az adatot csak szimuláció útján lehet előállítani. A pozíció adatok feldolgozását valamint a hullámterjedés sebességét a járműtrajektóriák módszerével végeztem. A szimulációhoz létrehoztam egy új matematikai modellt, amely az eddigi modelleknél realisztikusabb képet ad. Ezt a modellt ACFM-nek (Adaptive Car Following Model) neveztem el. Az állapotértékelési rendszerhez szükség van az ACFM modellre és a járműtrajektóriák módszerére.

3.2.1 AZ ADAPTÍV JÁRMŰKÖVETÉSI MODELL (ACFM) [S2]

A járműkövetési modell megalkotásánál figyelembe vettem azt a tényt, hogy a mai korszerű autók már alapfelszereltségként tartalmaznak járművezetőt segítő rendszereket, úgymint az ABS, TCS, ESP [57], [83], amik a biztonságos vezetést szolgálják. Ezeken kívül számos utazási komfortot növelő rendszer kerülhet beépítésre, mint az adaptív fényszóró, automatikus világítás kapcsoló, fényre sötétedő visszapillantó tükör, esőérzékelő, digitális több zónás klíma, navigáció, ADAS, ACC rendszer és még sorolhatnám. Ezek a rendszerek a járművezető biztonságérzetét növelik, ezáltal feltehetően kisebb követési távolságot fog tartani. A járművek menetdinamikai tulajdonsága és az előbb felsorolt tényezők miatt erősebb reakció keletkezik, ami gyakoribb és nagyobb hullámokat eredményez.

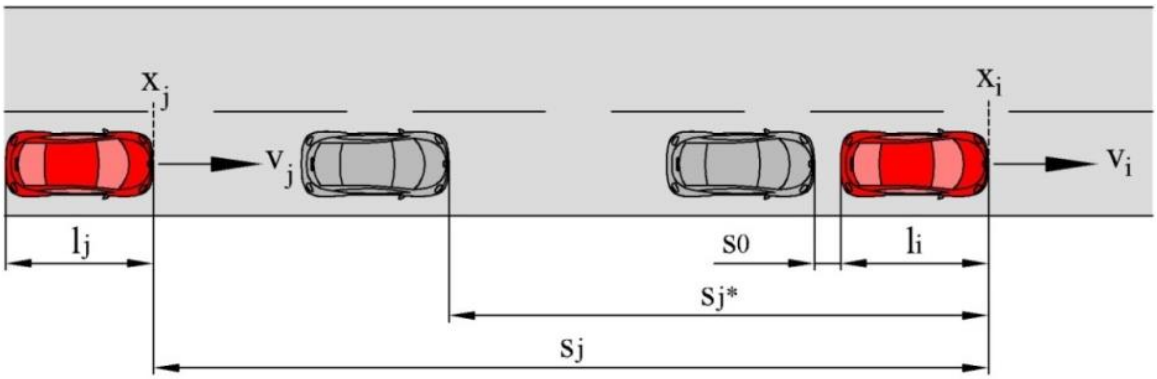
A megalkotott járműkövetési modellnek tudnia kell kezelni ezt a szituációt. A jelenlegi modellek egy esetleges fékezési szituációban túlzott reakciót okoznak [22], [52], [53], [55], [56], [58]. A járműgyártók szigorúan védve fejlesztik a járművezetőt segítő rendszereket, ennek ellenére a kutatóknak muszáj figyelembe venni ezeket a tényezőket a mikroszimuláció során [24], [54]. Az ACFM modell adaptív módon képes meghatározni a jármű fékezési és gyorsítási erejét, ami a biztonságos követési távolság érzékelésén alapszik. A modell az emberi érzékelésre alapoz és megenged más modellekhez képest kisebb követési távolságot azáltal, hogy képes a fékezési erőt az előtte levő jármű mozgásához igazítani. A fékezést követően pedig a megengedett sebességet próbálja elérni úgy, hogy a megengedettnél nagyobb sebességet is elérhet, a biztonságos követési távolságot figyelembe véve.

3.2.1.1 A járműkövetési modell matematikai levezetése

A legtöbb járműkövetési modell a jármű gyorsulását módosítja egy feltételrendszernek megfelelően. A gyorsulásparamétert járműcsoportokra lehet bontani. A szimulációs szoftver

másodpercként számítja ki, hogy gyorsítani vagy lassítani kell és ezt a maximális gyorsulás értékkel teszi. A járműkövetési modellek közül az intelligens járműkövetési modell (Intelligent Driving Model, IDM) egy intelligens fékezési stratégiát használ, ami egy lágy átmenetet képez a gyorsítás és lassítás között [56]. Bár a legtöbb helyzetben jól működik, de a tényleges követési távolság kisebb, mint a megkívánt távolság, ezért a követő jármű hirtelen fékez, ami túlzott lassulást eredményez, emiatt pedig kritikus helyzet áll elő.

Ezért én egy olyan mikroszkopikus egysávos járműkövetési modellt dolgoztam ki, ami egy érzékenységi tényezőt határoz meg, és ezzel állítja be a gyorsulás értékét. Az érzékenységi tényező a biztonságos követési távolságtól függ, ami a sebesség függvényében változik. Ez a modell a valósághoz közelebb áll, mivel az ember a távolságot a sebességnél jobban meg tudja határozni és ennek függvényében változtatja a fékerőt. A modellben az érzékenységi tényező állítható, adott forgalomra kalibrálható. A **38. ábra** az adaptív járműkövető modell felépítését és paramétereit ábrázolja.



38. ábra Az ACFM értelmezése, a modell paraméterek. Az ábrán látható az s_j^* távolság, ami a követő jármű megkívánt távolsága

Az ACFM modellben a járművezetők feltételezik, hogy az előttük haladó jármű nem áll meg egy pillanat alatt, ezért nem a féktávolságot tartják, hanem a lehető legközelebb kerülnek az előttük haladókhoz. Abban az esetben, ha az elől haladó jármű vészfékezést hajt végre, akkor a követő járműnek olyan távolságot kell tartani, amivel elkerülhető az összeütközés. Ez folyamatos figyelmet követel meg a járművezetőtől, viszont ismeretes, hogy az ember nem tud folyamatosan koncentrálni, tehát csak késve képes reagálni a bekövetkező eseményre, ezért ezt a tényezőt is tartalmaznia kell a modellnek. Ezek alapján a megkívánt követési távolság a következő egyenlettel írható le:

$$s_j^*(t) = l + s_0 + \tau v_j(t) + \frac{v_j^2(t)}{2g\left(\mu \pm \frac{e}{100}\right)} - \frac{v_i^2(t)}{2g\left(\mu \pm \frac{e}{100}\right)} \qquad (3.17)[22]$$

,ahol

l a jármű hossza [m],

s_0 a biztonsági távolság a felálláskor [m],

τv_j a j-dik jármű reakcióidő alatt megtett távolsága [m],

v_j a követő jármű sebessége [m/s],

v_i az elől haladó jármű sebessége [m/s],

μ súrlódási együttható [-],

e a pálya lejtése [%],

g a gravitációs gyorsulás [m/s2].

A képletben szereplő két tört a vészfékezés alatt megtett távolságot írja le, figyelembe véve a súrlódási tényezőt, a pálya hosszesését és a gravitációt. A súrlódási tényezőt a gumi nyomása is befolyásolja, ezért a modell kalibrálása során ezt figyelembe kell venni [84], [85].

A modell azt feltételezi, hogy a követő jármű az útviszonyoknak megfelelő sebességet választ, attól gyorsabban nem akar haladni, ezért meg kell határozni a v_0 sebességmaximumot.

$$v_j(t) = \begin{cases} v_j(t), & v_j(t) < v_0 \\ v_0, & egyébként, \end{cases} \tag{3.18}$$

Az ACFM gyorsulás egy folytonos függvény, amely különböző szituációkban a megadott határok között változik. Mellesleg a követő jármű sebességét $v_j(t)$ az aktuális követési távolság és a megkívánt távolság különbsége határozza meg, amelyet érzékenységi tényezőnek neveztem el és a következő képlettel határozható meg:

$$\delta(t) = \frac{\sqrt{\Delta s^2}}{100} = \begin{cases} 1, & \delta > 1 \\ \delta, & egyébként, \end{cases} \tag{3.19}$$

A fékezési feltétel az ACFM modellben a legrosszabb esetben, mikor az elől haladó jármű hirtelen fékez a lehetséges maximális lassulással, akkor a követő jármű összeütközhet az előtte haladóval. Tény, hogy a járművezetők a valóságban nem számítanak arra, hogy az előttük levő jármű vészfékezik, ezért a lehető legközelebb kerülnek egymáshoz, de egy megkívánt (s_j^*) távolságot tartanak. Abban a szituációban mikor az aktuális követési távolság kisebb, mint a megkívánt követési távolság, ami túlzott reakciót vált ki, az ACFM modell szabályozza a lassulást 0 és a maximális lassulás érték közt az érzékenységi tényezővel.

$$a_{ACFM}(t+1) = \begin{cases} \delta a, & \gamma > 1 \\ -\delta b, & egyébként, \end{cases} \tag{3.20}$$

,ahol

δ az érzékenység tényező [-].

A (3.20)-as egyenlet az ACFM modell. A feltételrendszerrel eldönthető, hogy adott pillanatban gyorsítani vagy lassítani kell.

$$\gamma(t) = \delta(t) + \beta(t) \tag{3.21}$$

Ha a követő jármű és az elől haladó jármű közti távolság kisebb, mint a megkívánt követési távolság, akkor $\beta(t)$ nulla, tehát a $\gamma(t)$ kevesebb, mint 1 lesz ezért lassítani fog, ellenkező esetben gyorsít.

$$\beta(t) = \begin{cases} 0, & s_j^*(t) > s_j(t) \\ 1, & egyébként, \end{cases} \tag{3.22}$$

A modell paramétereket a járműkövetési modellekben általánosan használt értékeknek megfelelően vettem számításba (**8. táblázat**).

8. táblázat Az ACFM modell paraméterei

Modell paraméter	Tipikus értékek
Jármű hossza l	5 m
Biztonsági távolság a felálláskor s_0	0.5 m
Megkívánt sebesség v_0	120 km/h
Súrlódási tényező μ	0.5
Reakció idő τ	1 s
Maximum gyorsulás a	4 m/s^2
Maximum lassulás b	8 m/s^2

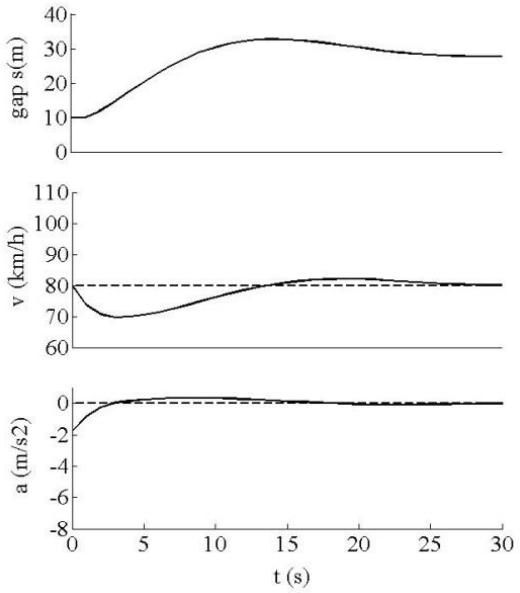
A maximum gyorsulásértékét az aktuális követési távolság és a megkívánt távolság határozza meg. A megkívánt követési távolság magában foglalja a jármű hosszát és a biztonsági felállási távolságot, a reakcióidő alatt megtett távolságot és egy dinamikusan változó távolságot, ami csak akkor aktív, ha a forgalom sebessége nem állandósult, vagyis a $\Delta v \neq 0$. Az utolsó tag egy intelligens vezetői magatartást jelent, mert egy érzékenységi tényezőt határoz meg, amely lágy átmenetet képez a gyorsulás és lassulás közt.

3.2.1.2 Az ACFM szimulációból származó új tudományos eredmény

Az ACFM modell a következő feltevésekkel él:

- a járművek gyorsulása időben nem állandó,
- a járművek nem váltanak sávot,
- a járművek nem használnak ACC rendszert,
- az pillanatnyi gyorsulás, lassulás értékek mindig a maximum értéknél alacsonyabbak,
- a megkívánt követési távolság az időben folytonos.

Ezekkel a feltételekkel elvégeztem egy szimulációt *Kesting* nyomán [51], amely két forgalmi szituációt vizsgál. A **39. ábrán** egy közepesen kritikus fékezési szituációt láthatunk. Az elől haladó autó hirtelen fékez, mert elé vág egy másik jármű. A követő jármű ugyanazzal a sebességgel, *80 km/h-val* halad és *10 m* a két jármű közti távolság. A szimuláció paraméterei az **8. táblázat** szerint lettek beállítva. Az esemény bekövetkezését követő 10 másodpercben már 30 m a követési távolság, ami pár másodperc múlva 27 m-re csökken, tehát a megkívánt követési távolságra. Ez a szituáció nem kritikus, mivel a követési távolság nem csökken 10 m alá, vagyis az ACFM modell nem okoz kényelmetlen lassulást vagy ütközést, csak ($2m/s^2$) körüli értéket. Ezzel szemben az IDM modell egy ilyen szituációban túlzott reakciót eredményez és eléri a maximális ($8m/s^2$) értéket [51]. A követő jármű mindkét modellben ugyanannyi idő alatt szerzi vissza az eredeti haladási sebességét. Az incidenst követően az ACFM modellben a követő jármű sebessége a megkívánt sebesség alá csökken, majd mérsékelten gyorsítani kezd, egy kicsit átlépi a megkívánt sebességet, ezután ismét enyhén lassít, majd beáll 80 km/h-ra. Más járműkövetési modellek sosem lépik át a megkívánt sebességet, tehát alulról közelítik meg azt. Ebben különbözik az ACFM modell a többitől.

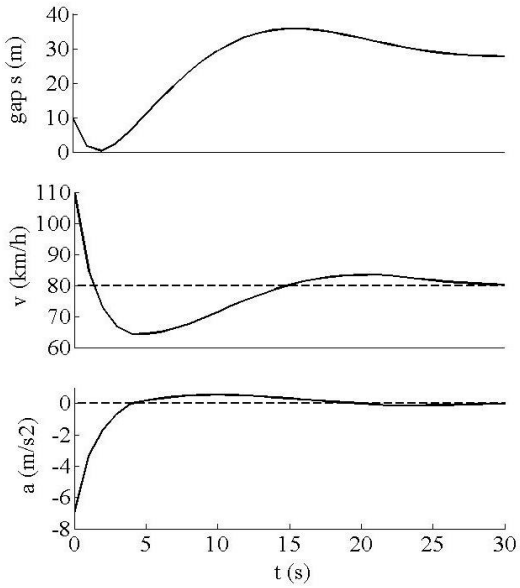


39. ábra Egy jármű reakciója az ACFM modellben (a folytonos vonal a követő jármű, a szaggatott pedig az első jármű), mikor hirtelen a követő jármű elé bevág egy másik jármű. A kezdeti sebesség 80 km/h és a kezdeti követési távolság 10 m. Ezt egy mérsékelten kritikus szituációnak tekinthetjük.

Egy másik körülmény, mikor a követő jármű sebessége sokkal nagyobb, mint az előtte haladóé. Ez egy komoly kritikus helyzetet teremt, ahogy azt a **40. ábra** mutatja. A kezdeti követési távolság az előző kísérletben használt 10 m, de a követő jármű gyorsan közeledik, ezért hirtelen vészfékezést hajt végre, hogy elkerülje az ütközést. A vészfékezés ellenére a követési

távolság majdnem nullára csökken, ezért ez a szituáció nagyon veszélyes helyzetet jelent. A fékezés után a követő jármű felveszi az elől haladó jármű sebességét a biztonságos követési távolság mellett. Ez esetben mind az IDM mind pedig az ACFM modell a kezdeti maximumhoz közeli lassulást produkál. Az ACFM modell viszont lassan csökkenti egy finom átmenettel a fékerőt a kényelmes lassulás eléréséhez. Ezzel ellentétben az IDM modell [51], a fékezési manőver során végig vészfékezési üzemmódban van. Ha összehasonlítjuk a két modellt ebben a szituációban, akkor az ACFM modell közelebb engedi a járművet az előtte haladóhoz (5,5 m szemben az 1,4 m-rel), de a jármű sebessége mindkét modell esetén 66 km/h körül alakul.

A maximális lassulás befolyásolja a járműmozgások stabilitását az adott szakaszon. A túlzott reakció alapján feltételezhetjük, hogy a sorban harmadik jármű már ütközik az előtte haladóval.



40. ábra Egy jármű reakciója az ACFM modellben (a folytonos vonal a követő jármű, a szaggatott pedig az első jármű), mikor hirtelen a követő jármű elé bevág egy másik jármű. A kezdeti sebesség 110 km/h és a kezdeti követési távolság 10 m. Ezt egy kritikus szituációnak tekinthetjük.

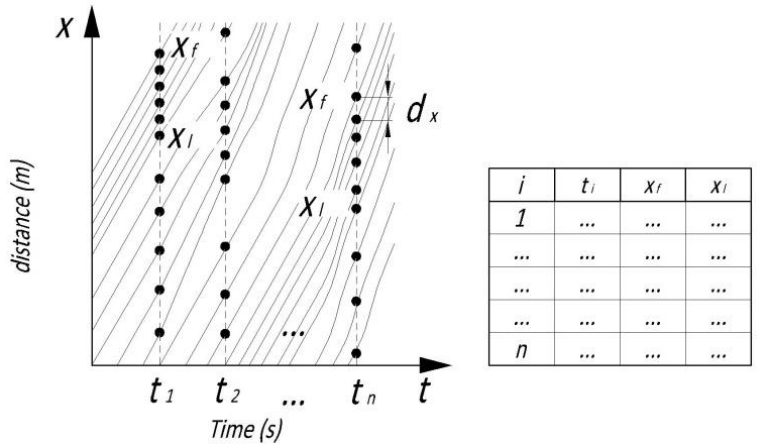
Az ACFM modell jellemzéséhez elvégeztem két különböző szituáció gyorsulás, lassulás vizsgálatát. A vizsgálatból kiderült, hogy mérsékeltebb reakciót vált ki, mint az IDM modell, amely csökkenti a hullámterjedés sebességét, így javítja a forgalomáramlást. Sikerült egy új, egyszerűen alkalmazható járműkövetési modellt megalkotnom, amely realisztikusabban modellezi a valóságot, az érzékenységi tényezőnek köszönhetően. Az ACFM modellben a járművezetők érzékelik azt, hogy a biztonságos követési távolságon belül vannak így ehhez mér-

ten képesek a fékezés intenzitását meghatározni. A létrehozott ACFM modell mikroszimulációhoz és járműbe épített szabályozó rendszerként egyaránt használható.

3.2.2 A KÖZÚTI FORGALMI HULLÁMOK TERJEDÉSI SEBESSÉG MEGHATÁROZÁSÁHOZ SZÜKSÉGES JÁRMŰTRAJEKTÓRIÁK MÓDSZERÉNEK KIDOLGOZÁSA [S1],[S3]

A **járműtrajektóriák módszeré**hez a közlekedésben részt vevő minden jármű pozícióját rögzíteni kell. A rögzítés sűrűsége legalább másodpercenként kell, hogy történjen. Az adatrögzítést járművön belül elhelyezett eszközzel kell megoldani, amely forgalomirányító központhoz csatlakoztatva felhasználható a jelzőlámpa programok optimalizálásához. A giroszkóppal kompenzált gyorsulásszenzoron alapuló járműtrajektória módszerrel pontosan előállítható a vizsgálathoz szükséges alapadat. A vizsgálat eredménye felhasználható a különböző forgalomirányító stratégiák kialakításakor [86].

A mozgó járművek pozíció adatai gyűjtésének elvi működését mutatja az alábbi ábra.



41. ábra A kialakult sor értelmezése, a trajektória adatok rögzítése

Ha egy időpillanatot tekintünk, akkor a járművek térbeli eloszlását láthatjuk. Két jármű közti távolságot a (3.23) kifejezéssel határozhatjuk meg. A kialakult konvoj meghatározásához szükséges egy minimum követési távolságot felvenni, melyet d_{xmin}.-nel jelölök. Eszerint azok a járművek tartoznak egy konvojba, amelyek a d_{xmin} távolságnál kisebb vagy egyenlő távolságra követik egymást. A követési távolságot a következő egyenlettel határozhatjuk meg:

$$d_x = (x_k - x_{k+1}) \tag{3.23}$$

Az egy konvojba sorolás feltétele, hogy

$$d_x \leq d_{xmin} \tag{3.24}$$

A térben hátrafelé mozgó hullám frontoldalával találkozik a menetirány szerint előre haladó jármű. Ellenkező esetben a hátoldalával. A vizsgálatból kiderül, hogy a hullámfronton egy

jól kivehető törésvonal jelentkezik, amely meredeksége megadja a hullámterjedés sebességét. A hullám hátoldalán már nem ilyen egyszerű megállapítani a törésvonalat. A hullám magától kimúlik, ha teljesül a $c_b < c_k$ feltétel. A pontokra illesztett regressziós egyenest kell meghatározni, a következő összefüggéssel.

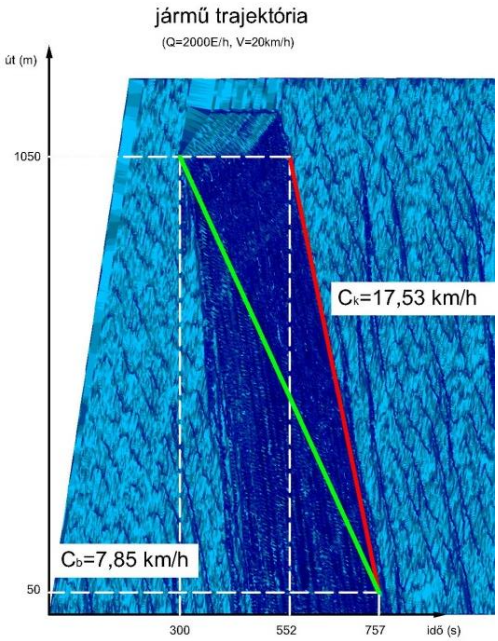
$$\boldsymbol{a} = \frac{\overline{(t_i * x_f(t_i))} - \bar{t}_i * \overline{x_f(t_i)}}{\overline{(t_i^2)} - (t_i^2)} \tag{3.25}$$

A regressziós egyenest felhasználva az alábbi képlettel számítható a hullámterjedés sebessége:

$$c = \frac{a}{20} * (-3{,}6) \left[\frac{km}{h}\right] \tag{3.26}$$

A hullám kioltásának illusztrálásához különböző sebességek mellett végeztem szimulációt a sajátfejlesztésű ACFM modellemmel.

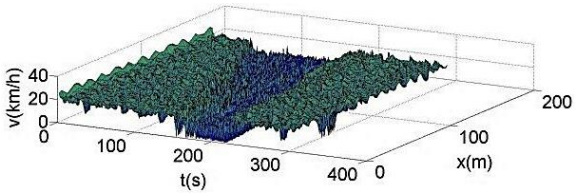
A hullámterjedés sebességének grafikus módszerrel történő meghatározását a **42. ábrán** mutatom be, ahol jól kivehető a hullám kiinduló illetve végpontja. A vizsgálatot elvégeztem 20-90 km/h-ás sebesség között, amelyről a jobb észlelhetőség érdekében 3D hatású ábrákat készítettem **(43. ábra)**. A sebesség meghatározásának módját viszont csak egy a 20 km/h forgalomáramlási sebesség és 2000-es forgalomnagyság mellett elvégzett vizsgálat eredményén keresztül mutatom be. A többi sebesség mellett is hasonló az ábra, nyilván a kialakult hullám terjedés sebességek változnak, ahogy az a **43. ábrán** látszik. A **42. ábrán** jól kivehető, a hullám frontja a sötét és világoskék terület határvonala, míg a hullám hátoldalán nem ilyen éles az átmenet. Az utolsó jármű a torlódott területen viszont egyértelműen meghatározható.



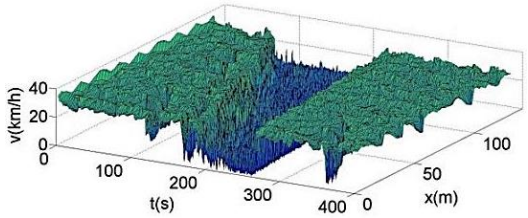
42. ábra A hullámterjedés sebességének grafikus ábrázolása a hullámfronton és a hullám hátoldalán

A hullám kezdete helyen látható, hogy az első jármű trajektóriájában törés van 300 s-nél és eltart az 552 s-ig. A hullám hátoldalán, amely a torlódott terület belépő oldala, a C_b-vel jelölt hullám sebességet úgy kapjuk, hogy a kezdőpontot összekötjük a végponttal a 300 s-től a 757-ik másodpercig, ahogy azt a zöld vonal mutatja. A kilépő oldalon a hullámterjedés sebességét csak az 552-ig másodperctől lehet meghatározni.

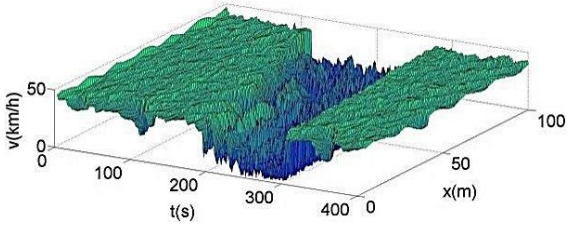
Minden sebesség esetén elmondható, hogy a hullám kialakulása ugyanúgy történik **(43. ábra)**, tehát a hullámfront minden esetben zavaros, de 60 km/h sebesség felett kissé határozottabb vonal rajzolódik ki és a hullám alja is egyenletesebb. Ezt azért tapasztalhatjuk, mert a sebesség ingadozása a nagyobb sebességtartományban fajlagosan kisebb. A hullám hátoldalán viszont minden esetben egy határozott törésvonalat láthatunk.



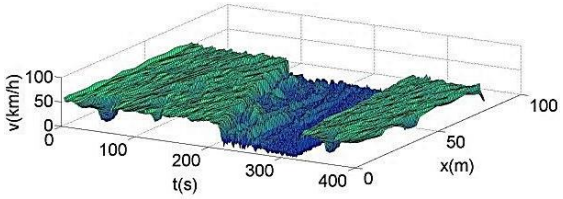
(a) 20 km/h-ás áramlási sebesség mellett



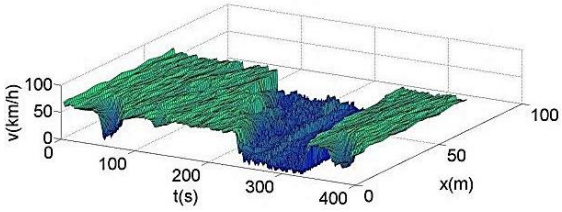
(b) 30 km/h-ás áramlási sebesség mellett



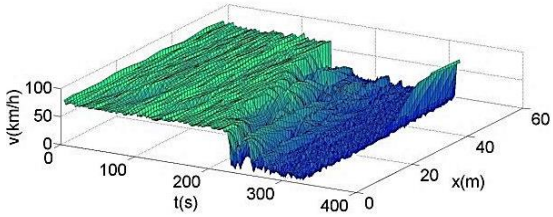
(c) 40 km/h-ás áramlási sebesség mellett



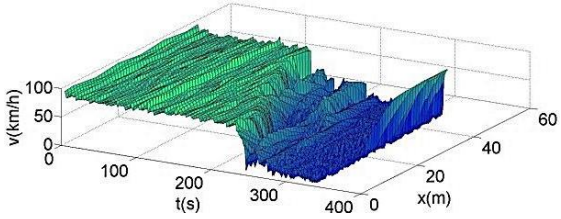
(d) 50 km/h-ás áramlási sebesség mellett



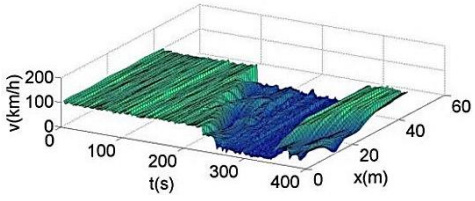
(e) 60 km/h-ás áramlási sebesség mellett



(f) 70 km/h-ás áramlási sebesség mellett



(g) 80 km/h-ás áramlási sebesség mellett

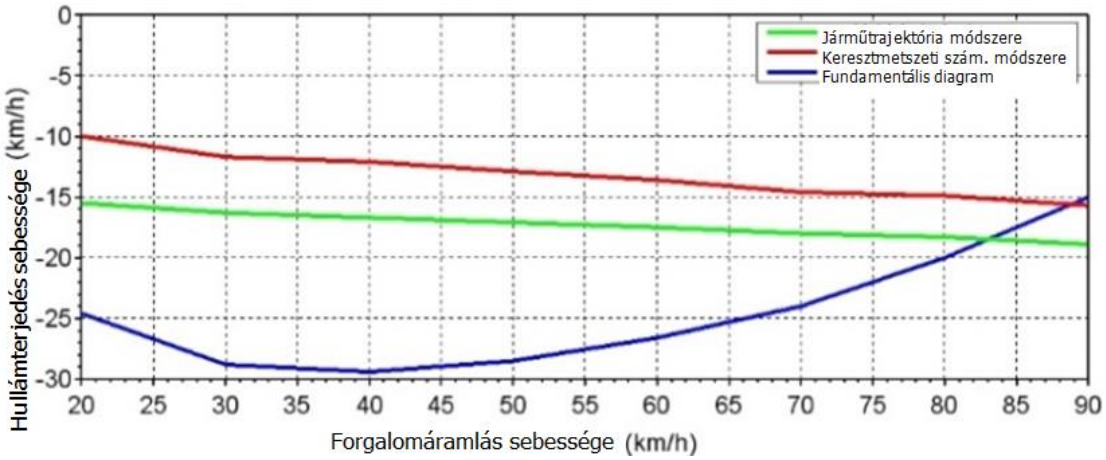


(h) 90 km/h-ás áramlási sebesség mellett

43. ábra A szimulált forgalmi hullám tér-idő dinamikája

3.2.2.1 A forgalmi hullámok terjedési sebességének vizsgálatából származó új tudományos eredmények

Elvégeztem három különböző vizsgálati módszer elemzését, a fundamentális diagram, a keresztmetszeti forgalomnagyságok és a járműtrajektóriák módszerét. A kiértékelt adatokat egy diagramon ábrázoltam (**44. ábra**). Látható, hogy a fundamentális diagramból kapott eredmény jellegre is eltérő a másik módszerektől. A görbének minimuma van a 40km/h sebesség értéknél. Az is megfigyelhető, hogy a 20 és a 70 km/h környezetében ugyanolyan a hullámterjedés sebessége. A másik két módszer esetében egyenes arányosság áll fenn a forgalomáramlás sebessége és a hullámterjedés sebessége közt.



44. ábra A hullámterjedés sebessége és a forgalomáramlás sebessége közti összefüggés

A járműtrajektória és a keresztmetszeti forgalomnagyságból kapott eredmény közt 5 km/h sebességkülönbség van. Ha meg akarjuk határozni a hullám érkezésének időpontját, akkor a két módszer különbözőségéből adódóan egy egymástól 100 m távolságra lévő csomópont esetében 14 másodperc időkülönbséget tapasztalhatunk. Ez pedig a jelzőlámpa program tervezésénél egy fázis zöld idejét jelentheti.

A vizsgálatból kiderül, hogy a hullámterjedés sebessége kimutatható a forgalomnagyság különböző diagramokon történő ábrázolásával. Megállapítottam, hogy a forgalmi hullám kialakulása és terjedése ábrázolható a különböző helyeken mért adatok feldolgozásából. A legpontosabb és egyben a legtöbb adatot tartalmazó mérési módszer a járműtrajektória (járművön belüli adatrögzítés).

Megállapítottam, hogy a fundamentális diagramból származó sebességértékek eltérnek a másik két módszerrel kapott értékektől.

3.2.3 A FORGALMI PARAMÉTER ÉRTÉKELÉS MÓDSZERE

A forgalmi paraméter értékelését egy ötfokozatú skálán lehet elvégezni a vizsgált paraméterek külön-külön történő pontozásával. A végeredményt a végső pontszámok számtani átlaga jelenti, ami 2,5 alatt „Jó” 2,5 és 4 között „Megfelelő” 4 feletti értékelés esetén „Rossz” minősítést jelent. Az értékelésben három forgalmi paraméter szerepel, a forgalmi telítettség, a forgalomáramlás sebessége, a forgalmi hullám terjedési sebessége. A hullám terjedési sebességét csak térben hátrafelé veszem számításba, mivel ez okozhat forgalmi dugót. A kialakult hullámterjedés sebességet abszolút értékben veszem figyelembe a táblázatban.

A forgalomáramlási sebességarány paramétert a következők szerint lehet meghatározni. Miután elvégeztük az adott útszakasz forgalomáramlási sebességvizsgálatát egy súlyozott átlagot számolunk, a súlyszámok pedig,

- a megengedett sebességtartományban: 1
- a megengedett sebességtartomány felett: 2
- a megengedett sebességtartomány alatt: 47

9. táblázat Forgalmi paraméter értékelő rendszer

Sor-szám	Forgalmi paraméter	Paraméter leírása	Mér-ték-egy-ség	1. Állapot-szint Nagyon jó	2. Állapot-szint jó	3. Állapot-szint kielégítő	4. Állapot-szint eltűrhető	5. Állapot-szint elfogad-hatatlan
1.	Forgalmi telítettség	A létesítmény kapacitás kihasználtsága	%	≤ 50	60-69	70-79	80-89	90 ≤
2.	Forgalomáramlás sebesség-arány	A forgalomáramlási sebesség a megengedett sebesség-tartományon belüli és kívüli eloszlásának súlyozott számtani átlaga	%	≤ 50	60-69	70-79	80-89	90 ≤
3.	Forgalmi hullám terjedési sebessége	hullámterjedés sebessége a járműtrajektória módszer szerint	m/s	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤

4 ÚJ LEHETŐSÉGEK A PÁLYASZERKEZET RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREIBEN

Közismert, hogy az egyes nehézgépjárművek pályaszerkezet rongáló hatása a személygépjárművek tengelyterhelésének harmadik-hatodik hatványával arányos (Highway, 1962), függetlenül a pálya felületétől. Ezért egyetlen 100 kN tengelyterhelésű kamion burkolatrongáló hatása több százezer személygépkocsiéval egyezik meg. Figyelembe veendő tényező a jármű tengely elrendezése (száma, egymástól való távolsága) és a felfüggesztés módja.

A pályaszerkezet kétrétegű modelljében *Burmister* egy h vastagságú, E_1 rugalmassági modulusu és μ_1 Poisson tényezőjű anyagot vizsgált 1945-ben. Eredetileg nem a feszültséget, hanem az alakváltozást akarta meghatározni és a központi lehajlásra olyan összefüggést alkotott, amely a keréknyomásból képes a központi lehajlás számítására.

Az új roncsolásmentes vizsgálat alapgondolata az, hogy ahogy az anyag elfárad, úgy deformációs hibák keletkeznek, amelyek többletterhelést idéznek elő. Ennek detektálása gyorsulás szenzor segítségével lehetséges. Ebben a fejezetben bemutatom a dinamikus keréktalperő mérésén alapuló eljárást.

4.1 A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐN ALAPULÓ ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELŐ RENDSZER KIDOLGOZÁSA

Az értékelő rendszert DWLFI (Dynamic Wheel Loading Force Index)-nek neveztem el, mivel a legfontososabb paraméter ebben a rendszerben a keréktalperő. Az előző fejezetben kidolgozott forgalmi állapotértékelést is figyelembe vevő útállapot értékelési rendszert mutatok be. Ebben a rendszerben ötfokozatú skálán kell értékelni az egyes állapotparamétereket. A végső eredményt súlyozott átlaggal számíthatjuk, ahol a súlyok száma,

- forgalmi telítettség: 1
- forgalomáramlás sebességaránya: 3
- forgalmi hullám terjedési sebessége: 2
- keréktalperő görbe meredeksége: 50
- keréktalperő nagysága: 10
- hátralévő élettartam a keréktalperőből: 30
- központi behajlás aránya: 4

A súlyszámok meghatározását heurisztikus módon a vizsgált útszakasz szubjektív állapot értékelése alapján végeztem el. Egyrészt szemrevételezéssel a burkolatszél töredezettségét, a

repedések alakját vettem figyelembe, másrészt a felület lézeres műszerrel történő bemérésével a nyomvályú mélységet és a vizsgált szakasz teljes hosszában felvett hossz-szelvényi adatokat. Ezek alapján jutottam arra, hogy a vizsgált szakasz állapota az eltűrhető kategóriába tartozik. A fenti súlyszámokat pedig ennek megfelelően választottam meg.

10. táblázat A DWLFI útállapot értékelő rendszer

Sor-szám	Állapot-paraméter	Paraméter leírása	Mér-ték-egy-ség	1. Állapot-szint Nagyon jó	2. Állapot-szint jó	3. Állapot-szint kielégítő	4. Állapot-szint eltűrhető	5. Állapot-szint elfogad-hatatlan
1.	Forgalmi telítettség	A létesítmény kapacitás kihasználtsága	[%]	≤ 50	60-69	70-79	80-89	90 ≤
2.	Forgalom-áramlás sebesség-arány	A forgalom-áramlási sebes-ség a megenge-dett sebesség-tartományon belüli és kívüli eloszlásának súlyozott szám-tani átlaga	[%]	≤ 50	60-69	70-79	80-89	90 ≤
3.	Forgalmi hullám terj-edési sebes-sége	Hullámterjedés sebessége a járműtrajektóri a módszer szerint	[m/s]	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤
4.	Keréktalperő görbe mere-deksége	A meredekség százalékban	[%]	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤
5.	Keréktalperő nagysága	A keréktalperő nagysága a forgalomáram-lás sebességé-nek függvényé-ben	[kN]	50-54	55-59	60-64	65-69	70 ≤
6.	Hátralévő élettartam	A pályaszerke-zet hátralévő élettartam a keréktalperő alapján	[mEt]	≥ 81	80-61	60-41	40-21	20 ≥
7.	Központi behajlás aránya	Központi mért és megengedett behajlás aránya	[%]	≤ 20	21-40	41-60	61-80	81 ≤

Az 1. értékelési szint nagyon jó állapotot tükröz, gyakorlatilag az új építésű út esetén a műszaki átadás-átvételkori állapotot.

A 2. szint jó forgalmi állapotot jellemez. Itt már az új állapothoz képest kisebb esetenkénti forgalmi zavarok felléphetnek, de az útburkolat állapota nem befolyásolja az áramlást.

A 3. szint kielégítő forgalmi állapotra utal, amikor már gyakoribb torlódások alakulnak, a csúcsórákban magas a létesítmény kapacitáskihasználtsága, de olyan mértékű burkolathiba még nem jelentkezik, ami egyértelműen rontaná a forgalomáramlást.

A 4. szint eltűrhető állapotot jellemez, amikor már nem önmagában a forgalomnagyság, hanem a rossz burkolat állapota is szerepet játszik a forgalomáramlás romlásában. Rendsze-

ressé vált torlódások gátolják a haladást, a forgalom szabályozásával még lehetséges állapot javítás.

Az 5. szint jelenti az elfogadhatatlan állapotot, amikor már olyan mértékű a burkolat állapota, hogy forgalomkorlátozó intézkedés bevezetésére van szükség a további biztonságos közlekedéshez. A helyreállítás csak építési beavatkozás útján lehetséges.

4.2 A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MÉRÉSEN ALAPULÓ ÁLLAPOTFELVÉTELI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA [S7]

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 is befolyásolja. Az útpályaszerkezetek hátralévő élettartam számítására különböző matematikai modelleket alkalmaznak, függően a rendelkezésre álló adatoktól. Az általam kidolgozott hátralévő élettartam meghatározási módszer egy újfajta megközelítéssel élve roncsolásmentesen a dinamikus keréktalperő változásból határozza meg a várható élettartamot. Az elve, hogy a pályaszerkezet fizikai terhelése, ami az állapotromláshoz vezet, megnövekszik azáltal, hogy a pálya idő közben deformálódik. Ezt nem lehet egy egyszerű szorzó tényezővel figyelembe venni, mindenképp szükséges a többletterhelés meghatározása az adott útszakaszra. A következőkben a hátralévő élettartam számításához szükséges dinamikus keréktalperő meghatározásához használt mérési módszer kidolgozását mutatom be.

Az útburkolat gazdálkodás széles körben kutatott terület. A múlt század közepe óta számos cikk foglalkozott a pályaszerkezetek tönkremenetelével, a méretezéssel illetve a hátralévő élettartam számításával [14], [71], [73], [87]. A legtöbb tönkremenetelt meghatározó számítási módszer a pályaszerkezet aktuális teherbíró képességének a megállapítása, amely behajlás mérésen alapul. 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 [88]. Ennek eredményeképpen a modern szenzorok és rendszer identifikációs 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.

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 rendszertelenül változó fizikai paraméter. A különböző járműtömegek, a gravitációs középpont, a kerékfelfüggesztés, a lengéscsillapító fajtája, a csillapítási tényező, a gumiabroncs típusa, szerkezete, nyomása, sőt még az útfelület egyenetlensége is mind befolyásoló tényező. A szakirodalomban számos tanulmány foglalkozott a dinamikus keréktalperő változásának modellezésével [89], [90]. *Lechner* (2002) modelljében figyelembe veszi a szuperpozíció elvét, feltételezve, hogy a hosszanti és oldal irányú gyorsulások függetlenek. Van, aki 14 szabadságfokú modellel számol [91], ahol a forgásközéppont dinamikáját használja fel a függőleges erő megállapításához. *Nielsen* [92] munkájában a hosszanti és oldalirányú gyorsulások összekapcsolásával határozza meg a keréktalperőt. *Wenzel* [93] 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 eltérések a jármű tömegáthelyeződés számítási hibájának tulajdoníthatók.

Az 50-es években folyt kutatások 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 járművek fejlődésével. Az akkoriban épült utak szerkezete hamar tönkrement a növekvő gépjárműsúly és a forgalom miatt, ami nyomvályú kialakulásához, repedéshez, kátyúk kialakulásához vezetett. De ez nem csak a burkolatra jelentett veszélyt, hanem a járművekre is. A menetrendszerint 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 [77]. A rugótörések oka visszavezethető a többletterhelésre, ami az útvonal rossz állapota, felületi hibája miatt következik be. A mai 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 dinamikus keréktalperőn alapuló állapotfelvételi módszer fejlesztésének célja, hogy alkalmas legyen a jármű felfüggesztésére és az utastérbe szerelt 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 gyorsulásadatokból az útszakaszra jellemző átlagos dinamikus keréktalperő?
- Van-e összefüggés a rugózott és a rugózatlan tömegen mért gyorsulásértékek közt?

4.2.1 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, amelyben közreműködött Hajdu Flóra kolléganőm, akinek ezúton is köszönöm a segítségét.

A mért adatok feldolgozását már egyedül készítettem, aminek végeredménye egy felületmodell. Feltételezésem szerint azon az útszakaszon, ahol ekkora méretű kátyú van, ott sebességkorlátozásra 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 ezt mértem. 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.

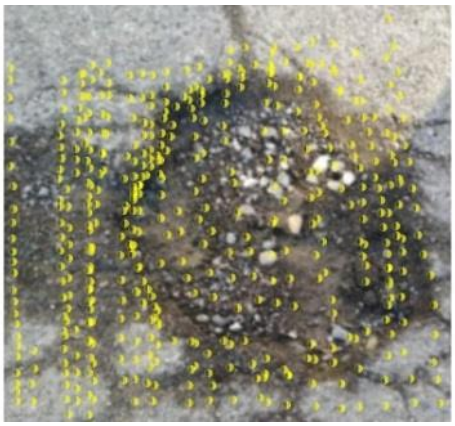
Az útpályán haladó jármű a futóművén keresztül adja át a terhelést a pályaszerkezetnek. Az erőhatásokból az egyes pályaszerkezeti rétegekben kialakuló feszültségek eltérő hatást fejthetnek ki, ilyenek a rugalmas és a plasztikus alakváltozás, a törés és a szerkezeti átalakulás [94]. Egy jól megtervezett és megépített pályaszerkezetben csak rugalmas alakváltozás engedhető meg. A tönkremenetel során felületi és szerkezeti hibák jelentkeznek. Méretezéskor

arra kell figyelni, hogy az aszfalt réteg alsó szálában keletkező húzófeszültség ne haladja meg a kifáradási határfeszültséget. A hajlékony pályaszerkezet nagyobb hajlítási igénybevételt szenved el, vagyis nagyobb eséllyel keletkezik repedés ugyanannál a forgalomnál.

A vizsgálathoz felhasznált eszköz:

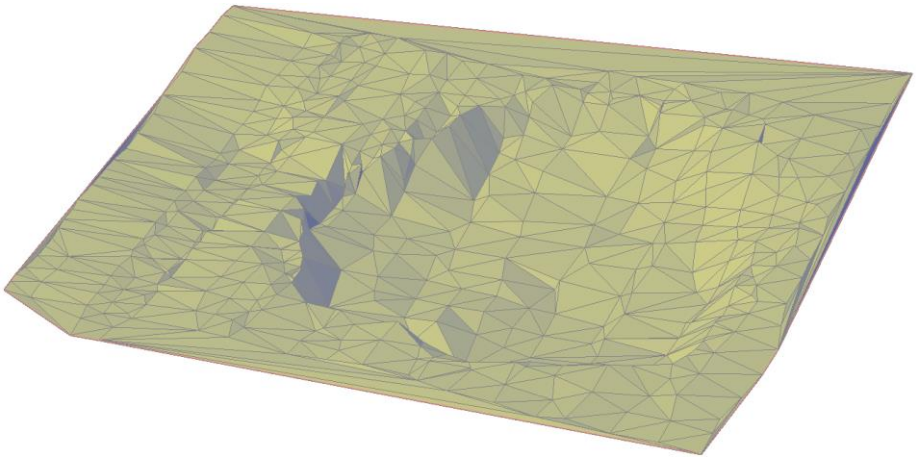
- Távolságmérő: Leica Disto S910+Tripod

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 a **3. képen** látható.



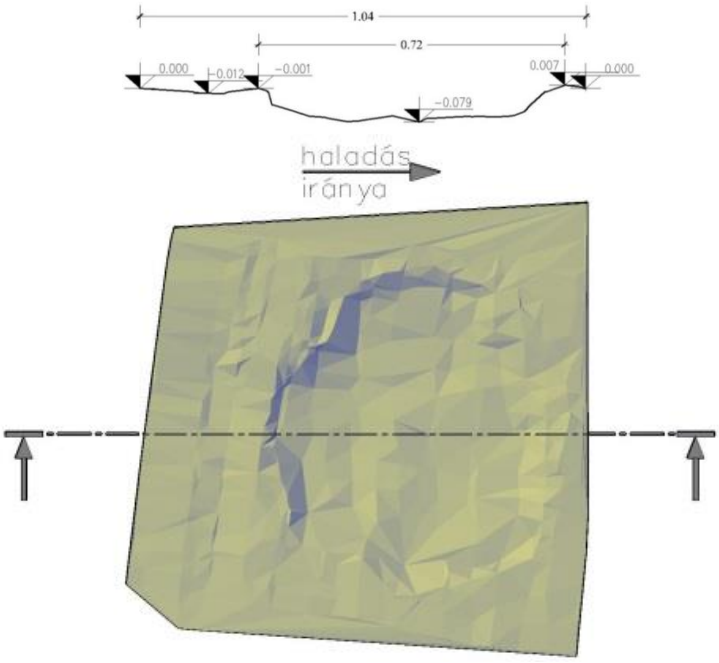
3. kép A bemért pontok

A bemért pontokból elkészítettem a felületmodellt, a háromszögelés módszerével (**4. kép)**, amelyből a keréknyom vonalában egy hossz-szelvényt készítettem **(45. ábra)**. A felületmodell 483 pontból áll és 1,03 m2 a kétdimenziós kiterjedése.



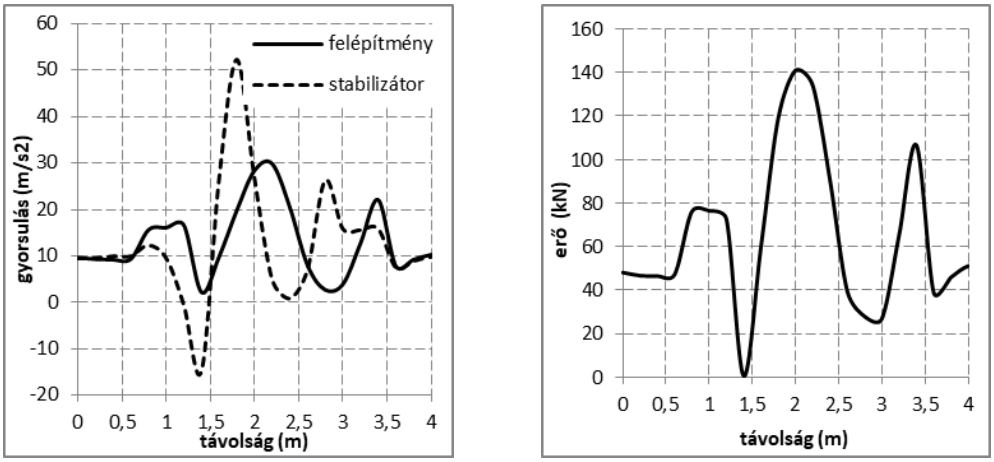
4. kép A bemért pontokból készült 3d felületmodell

A szelvényből kiderül, hogy mekkora a kátyú legnagyobb mélysége a pályaszinthez viszonyítva és az átmérő is meghatározható. A **45. ábra** szemlélteti a felületmodellből készített szelvényt és annak pozícióját.



45. ábra A felületmodellből készített szelvény és a szelvény nyomvonala

A bemért útprofil és a dinamikus keréktalperő összehasonlításához a kátyún át kell hajtani a mérő kocsival 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 hogyan alakul a dinamikus keréktalperő. A számítás során az egységtengelyt vettem figyelembe. A mérés eredményét a **46. ábrán** mutatom be.



(a) (b)

46. ábra A kátyú okozta gyorsulásváltozás (a) és a keletkezett dinamikus keréktalperő (b)

A kátyún 30 km/h-ás sebességgel áthajtva, a stabilizátoron 52 m/s^2-nyi, míg a felépítményen 30 m/s^2-nyi gyorsulást mértem. Ugyanezen kátyút felhasználva egy teherautó paramétereivel szimulációt végeztünk a futómű viselkedésének vizsgálatához [S10]. Később ezen adatokat felhasználva végeztem el egy személygépjármű és egy teherautó rugózott és rugózatlan tömegein mért gyorsulásainak összehasonlító elemzését.

4.2.2 JÁRMŰDINAMIKAI SZEMPONTOK

Annak eldöntésére, hogy függ-e a jármű típustól a dinamikus keréktalperő mérés, különböző kategóriájú járművekkel végeztem mérést ugyanazon az útszakaszon. Mindkét járműtípuson a rugózott és rugózatlan tömegen került elhelyezésre szenzor és pontosan ugyanazon a szakaszon történt a mérés.

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 burkolat közötti normál erő ismerete közlekedésbiztonsági szempontból nélkülözhetetlen. Ez a függőleges erő meghatározza a jármű stabilitását, a kanyarban a merevségét, amely a vízszintes irányú tapadóerőt befolyásolja. A burkolat terhelése szempontjából, mind a függőleges, mind pedig a vízszintes erőknek szerepe van. A hátralévő élettartamnál figyelembe vett erő viszont a függőleges dinamikus keréktalperő, mivel az aszfalt alsó szálában kialakuló feszültség jelenti a kritikus terhelést, ami tulajdonképpen egy hajlító feszültség, ez pedig a függőleges erőből származik.

A hátralévő élettartam becslő modellemben az egységtengely figyelembevételével meghatározott statikus tengelyterhelés közelében egy 1 kN-os terhelésváltozás 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 egyenetlenségtől 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 [95], nő a gépjárművezető igénybevétele, romlik az utazási komfort, növekszik a felépítmény, 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 vizsgált személygépjármű egy OPEL ASTRA J típus volt, míg a teherautó egy CSEPEL CSD-755-10. Ez utóbbin több ponton elhelyezett gyorsulás szenzorral végeztünk mérést közúton [S8],[S9]. Az adatok feldolgozása után össze tudtam hasonlítani a két kategóriában mért adatokat, amit a **11. táblázat** tartalmaz.

11. táblázat A mért gyorsulások (m/s2) arányai személygépkocsi és teherautó esetén különböző sebességek mellett

	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*

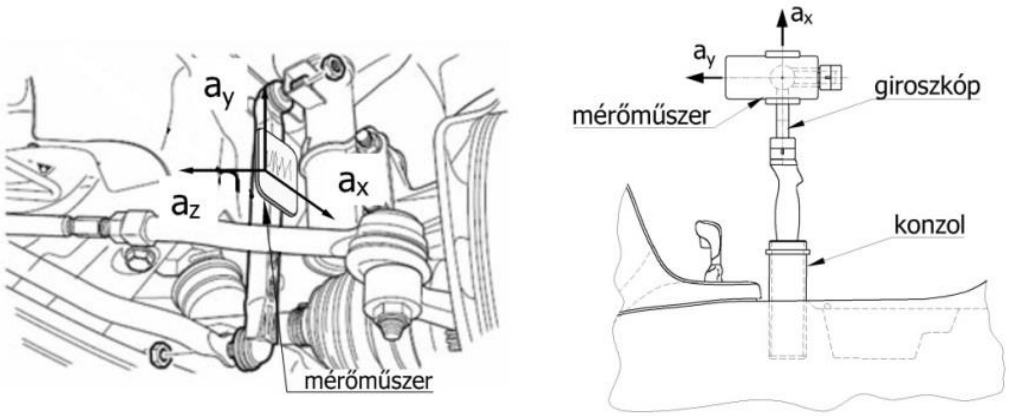
Mivel jelentős eltérés van a két szenzoron mért gyorsulás között, emiatt a dinamikus keréktalperő meghatározásához mindkét tömegen szükséges a gyorsulást mérni. Az is megfigyelhető, hogy a rugózott és rugózatlan tömegen mért gyorsulások arányai nem azonosak egymással. Ez a sebesség, illetve a rugózott (M) és rugózatlan (m) tömeg aránya miatt alakul így. Ha összehasonlítjuk a személygépjármű illetve a tehergépjármű rugózott és rugózatlan tömegein mért gyorsulásokat meghatározott sebesség mellett, akkor azt tapasztaljuk, hogy nagyságren-

dileg azonos értékeket kapunk. Ez azt jelenti, hogy járműtípustól függetlenül a mért adatok átszámíthatók minden további nélkül az egységtengelyre.

4.2.3 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 hibájának köszönhető, 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 *Őri Péter* kollégám segítségével.

A járműre felszereltem az érzékelőket ugyanúgy, mint amikor közúton végeztem 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. A vizsgálat célja, hogy kiderítsem van-e szignifikáns különbség az egyes sebességek mellett tapasztalható gyorsulás között, nem pedig a kerék pontos gyorsulásának meghatározása. A szenzorok elhelyezkedését a **47. ábra** mutatja, ahol a koordináta rendszer az elhelyezett mérőeszközhöz kapcsolódik. A forgalmi sávban haladó jármű egy álló koordináta rendszerben mozog, ahol a forgalmi irányt az y, a függőlegest pedig a z irány jelöli (**54. ábra**). A fékpadon végzett vizsgálatot öt különböző sebesség mellett végeztem, a lengéscsillapító esetében pedig a jobb oldali felfüggesztés lett megvizsgálva.



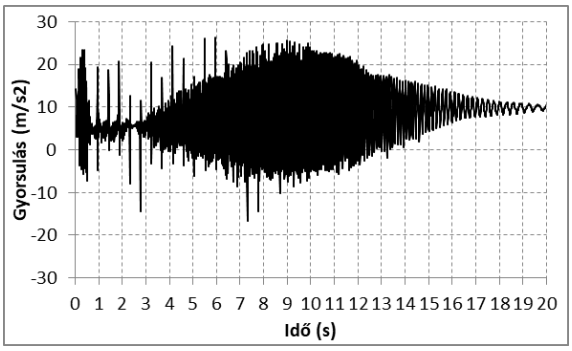
47. ábra A gyorsulás szenzorok elhelyezkedése a járműben

A műszaki vizsgán a lengéscsillapító hatékonyságát is ellenőrzik az EUSAMA [95] szerint. Ez az eljárás a talperő ingadozása alapján minősíti a lengéscsillapítót. A talperő viszony a

statikus és a dinamikus talperők hányadosaként értelmezhető. Ez a lengéscsillapító vizsgálatakor alkalmazott határértékek az EUSAMA ajánlása szerint:

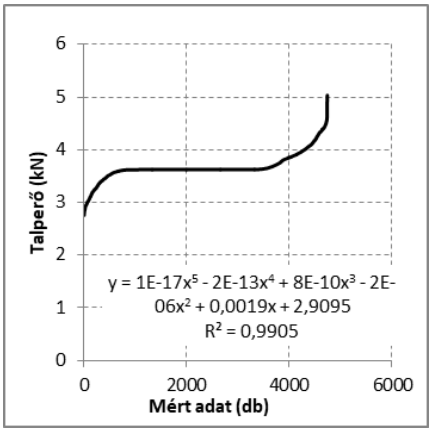
- 61-100% nagyon jó
- 46-60% jó
- 31-45% gyenge
- 21-30% elégtelen
- 1-20% veszélyes
- 0% nincs érintkezés a talajjal

Elvégeztem a lengéscsillapító diagnosztikáját az EUSAMA eljárással. A vizsgálat során csak a jármű tömegéből származott a talperő, plusz teher nem volt, aminek eredménye a **48. ábrán** látható.



48. ábra A felfüggesztésen mért gyorsulásértékek

A mért gyorsulás adatokat 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 meghatározásához a talperőre kapott értékeket sorrendbe állítottam és elvégeztem a regresszió analízist egy ötödfokú polinomiális függvénnyel. A regressziós függvény és a korreláltság mértéke a **49. ábrán** látható.



49. ábra A felfüggesztésen mért gyorsulás értékek

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

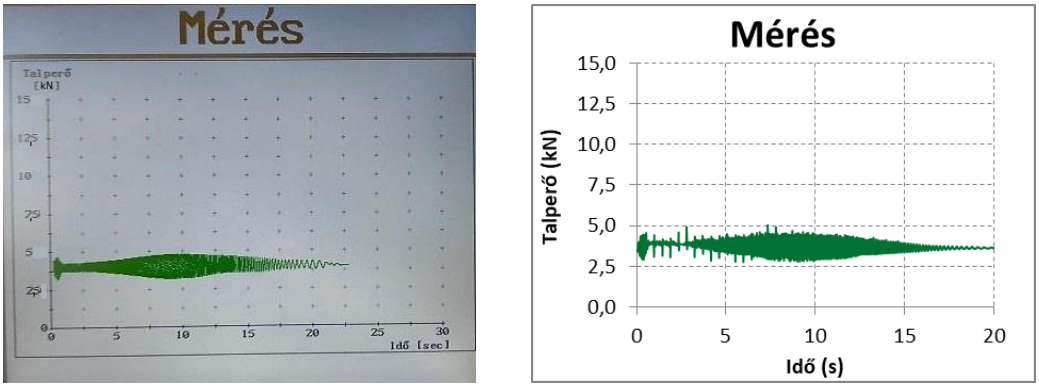
$$A[\%] = 100 \cdot \frac{F_{min}}{G_{stat}} \qquad (4.1)\ [95]$$

A **49. ábrán** látható diagramról 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 az **5. képen** látható.

5. kép A vizsgálópad által mért tömegek

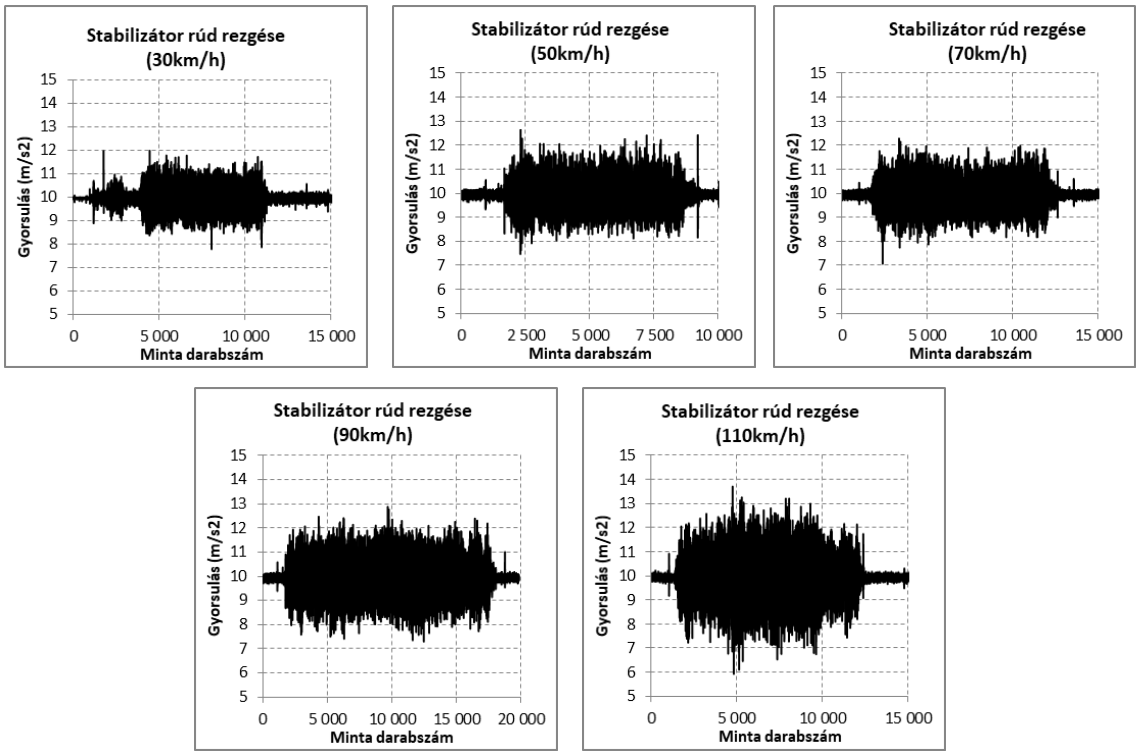
Az (4.1)-es összefüggést felhasználva a viszonyszám 72,3%-ra adódott, ami közel azonos a vizsgálópadon mérttel (**5. kép).** A lengéscsillapító minősítése így nagyon jó lett.

A lengéscsillapító vizsgálata során, a keréken mért gyorsulást is rögzítettem. A vizsgálópad és a keréken mért gyorsulás értékek összehasonlítását is elvégeztem. A két mérés között szignifikáns eltérés nem tapasztalható, tehát a felfüggesztésre rögzített gyorsulásszenzor alkalmas a dinamikus keréktalperő mérésére.



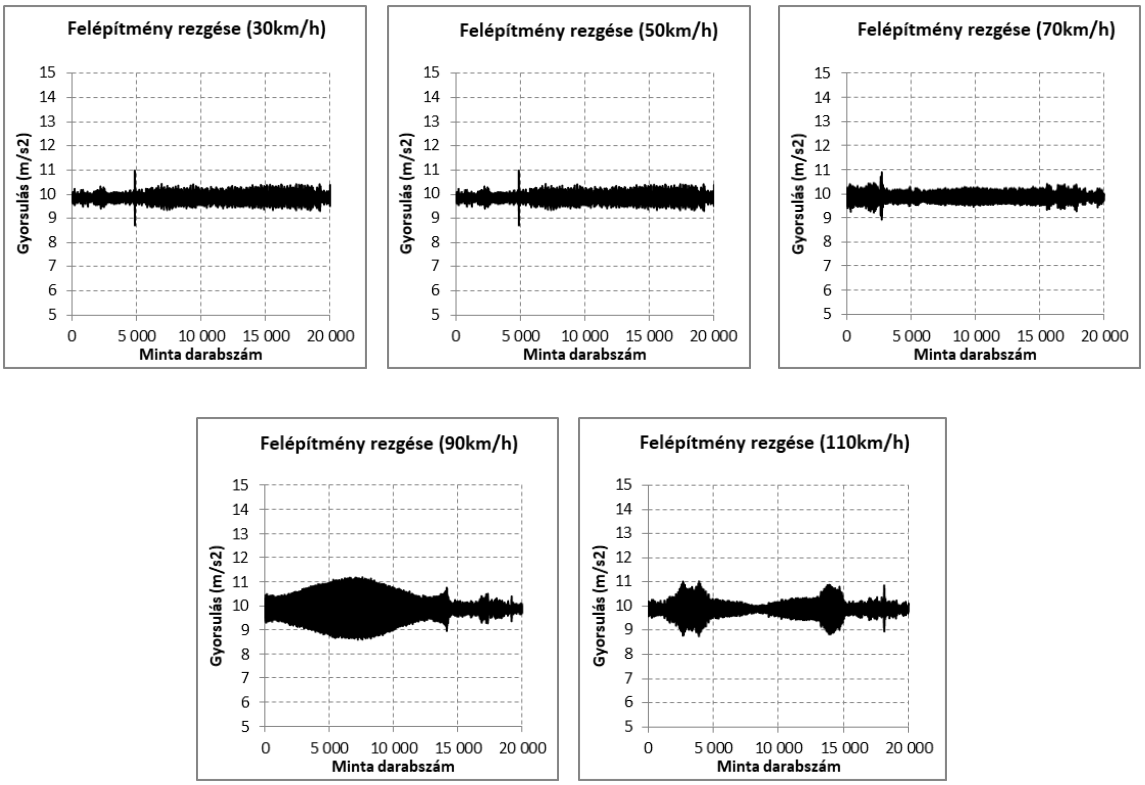
(a) (b)

50. ábra A vizsgálópad (a) és a gyorsulásszenzor általi mérések (b) összehasonlítása



51. ábra A stabilizátor rúdra rögzített gyorsulásszenzor adatai a fékpadi mérés során

A fékpadon történő mérés úgy tekinthető, mintha a jármű egy tökéletesen síkfelületen haladna. Ebből az következik, hogy a mért rezgések, lengések csak a járműben keletkezhetnek. A fékpadon végzett mérés eredményét az **51. ábra** és **52. ábra** szemlélteti.



52. ábra Az utastérben elhelyezett gyorsulás szenzor adatai a fékpadi mérés során

A stabilizátor rúdon mért értékek a sebesség növekedésével egyértelműen nőnek. A jármű utasterében lévő szenzor adatai kissé eltérő alakúak. A legszembetűnőbb alakzat a 90 km/h sebességnél látható, de a 110 km/h-ás mérés sem mondható egyenletesnek. Ez utóbbinál két kiemelkedő értéket is láthatunk, ami azért történt, mert a gyorsítási illetve a lassítási szakaszban is átment a 90 km/h-ás sebességen. Ebből a vizsgálatból kiderült, hogy a felépítmény, vagy más néven rugózott tömegnek van egy saját frekvenciája, ami 90 km/h sebességnél jelentkezik.

4.2.4 A MÉRT GYORSULÁS ADATOK SZINKRONIZÁLÁSA AZ ÚTPOZÍCIÓHOZ

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 [89]. Az egyes menetdinamikai alrendszerek, úgymint a blokkolásgátló (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.

A vizsgálathoz felhasznált eszközök:

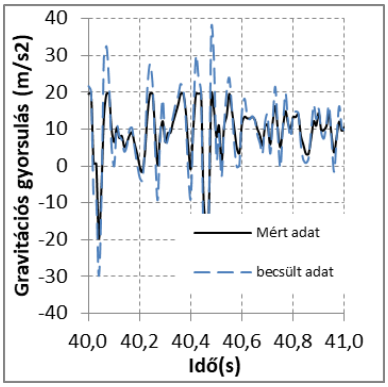
- Jármű: OPEL ASTRA J
- Gyorsulás szenzor: BOSCH BMI120

A vizsgálati szakasz egy rossz minőségű teszt szakaszon végeztem mérést. A járművet egy lengőrendszernek tekintve, a rugózott és a rugózatlan tömegen is szükséges volt a mérést elvégeznem. A szenzor elhelyezésénél ügyelnem kellett arra, hogy a kerék függőleges mozgását kövesse le, tehát a függőleges irányra. Az **47. ábrán** látható a szenzorok elhelyezkedése a járművön, illetve a gyorsulási irányok 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-ás sebesség mellett is nagyobb gyorsulások keletkeztek. A járműdinamikában ismeretes, hogy a keréken akár 150 m/s2-es gyorsu-

lás 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 **53. ábra** mutatja egy 100 adatból álló mintán.



53. ábra A mért és a becsült gyorsulásértékek idősora

A becslési módszer a mért adatok különbségén alapul. Először a gyorsulásértékek különbségét képeztem, majd ezek átlagát hozzáadtam a mért gyorsuláshoz. A számítást diszkrét értékekre a következő képlettel végeztem.

$$d_i = a_i - a_{i-1} \tag{4.2}$$

$$\bar{d}_i = \frac{d_{i-1}+d_i}{2} \tag{4.3}$$

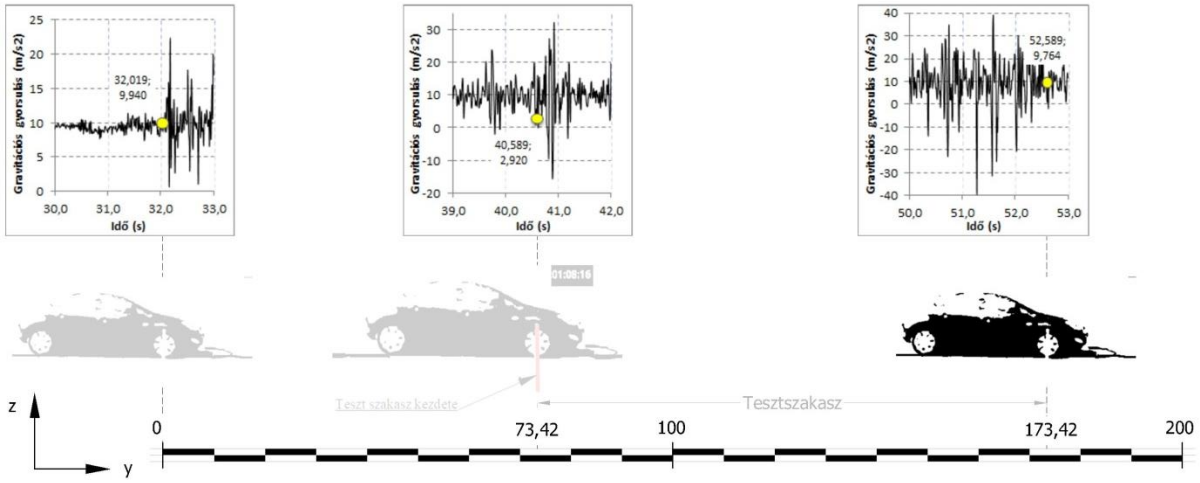
$$\hat{a}_i = a_i + \bar{d}_i \tag{4.4}$$

A becsült érték nagyságát lehet befolyásolni, ha mozgó átlagot alkalmazunk, amely periódusának növelésével, mérséklődik a becsült érték. Ezzel lehetőség van úgy becsülni a hiányzó gyorsulást, hogy az a lehető legjobban igazodjon a járműdinamikában ismert függőleges keréksebességhez [95], amelynek értéktartományára – kritikusan gerjesztett, jó lengéscsillapító esetében, utazáskényelmi és biztonsági okokból - 0,7-1,5 m/s vehető fel.

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

A mérés során a vizsgálati szakasz kezdőpontjába nagysebességű kamerát állítottam, valamint egy függőlegesen leszúrt karót helyeztem a kezdőszelvénybe. 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 0,001 s-os pontossággal,

mivel itt a gyorsulásértéke kiugró (**54. ábra)**. A jármű indulásával egy időben indult a video-felvétel. A nagysebességű felvételből pedig az indulás időpillanatától a tesztszakasz kezdetéig eltelt időt tudom meghatározni szintén ezred másodperc pontossággal. A mérés során a jármű, valamint a kezdőszakasz GPS koordinátái is rögzítésre kerültek, amiből meghatározható a kezdő szakasz pozíciója. Az alábbi ábrán mutatom be az adatsor szinkronizálás folyamatát.



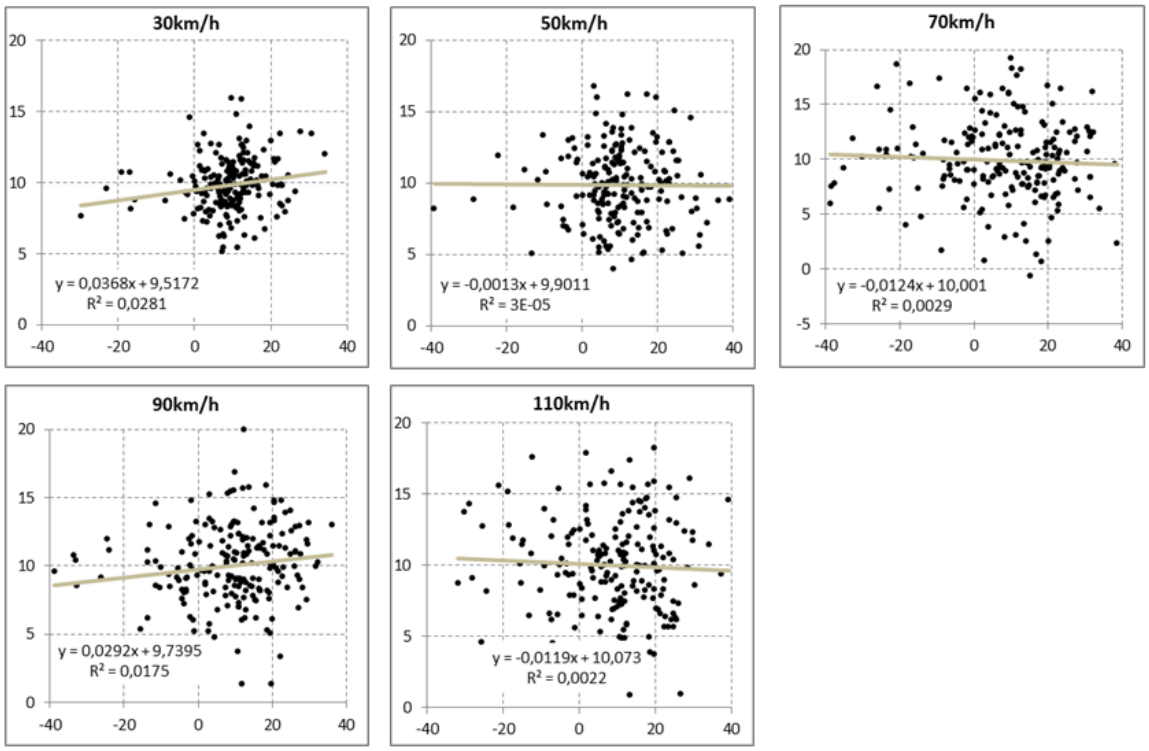
54. ábra A mért gyorsulás adatok úthoz igazítása

Visszaszámolva ez azt jelenti, hogy a 30 km/h-ás mérésnél a kezdet a 40,589 másodpercnél van. A szakasz végét pedig egyszerű meghatározni, mivel a jármű egyenletes sebességgel haladt, köszönhetően a sebességtartó automatikának. Az állandó 8,333 m/s-os sebességgel számolva pontosan 12 másodperc kell a száz méter megtételéhez, vagyis 52,589 s-nál van a szakasz vége.

4.2.5 A MÉRT ADATOK KIÉRTÉKELÉSE, AZ ÁTLAGOS DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MEGHATÁROZÁSA

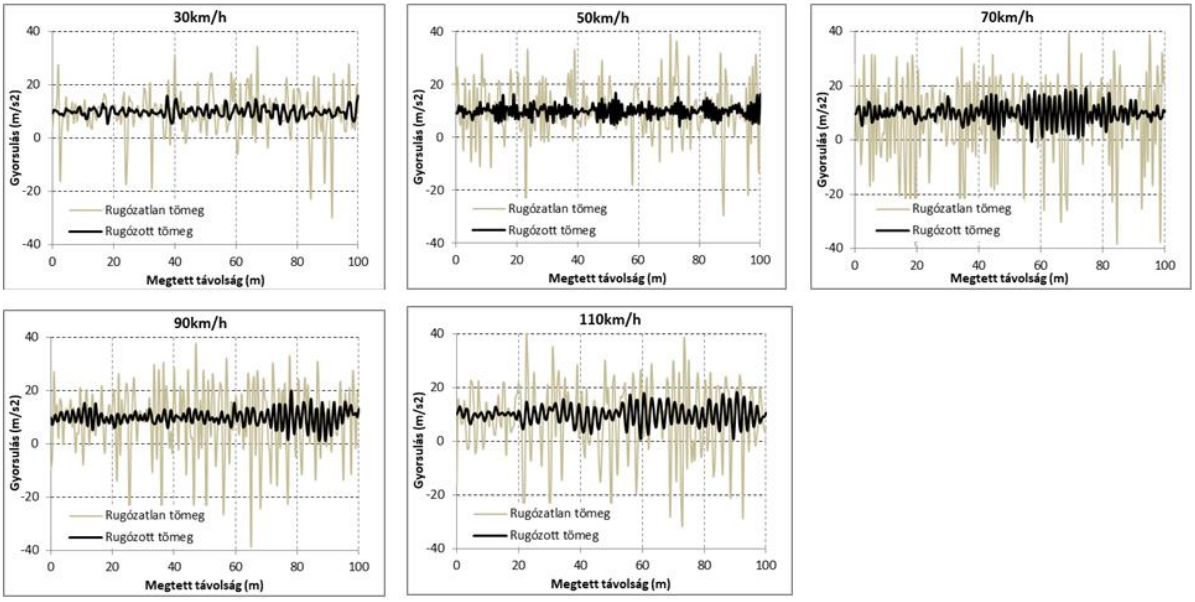
Ha egy konkrét vizsgált útszakaszon akarjuk meghatározni az átlagos dinamikus keréktalperőt, akkor az ebben a fejezetben kidolgozott mérési módszert lehet alkalmazni. A sima számtani átlagot a kialakult gyorsulás maximumok befolyásolják, ami az útprofil egyenetlenségéből adódóan nem egyenletes eloszlású, tehát nem célszerű a maximum érték alapján meghatározni a keréktalperőt. Ezért a mért adatsor mértékadó szintjének 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) értéke, amely az **55. ábrán** látható. Tehát valós körülmények között egy régi, burkolati hibákkal teli útszakaszon végighaladó jármű futóművén és a felépítményén mért gyorsulások közt nincs összefüggés.



55. ábra A rugózott és a rugózatlan tömeg gyorsulásai közti összefüggés

Megvizsgáltam a rugózott és a rugózatlan tömeg gyorsulásait a kijelölt 100 m-es útszakaszon. Mindkét tömeg gyorsulásértékei a sebesség növekedésével egyenes arányban növekednek, ahogy az az **56. ábrán** látható.

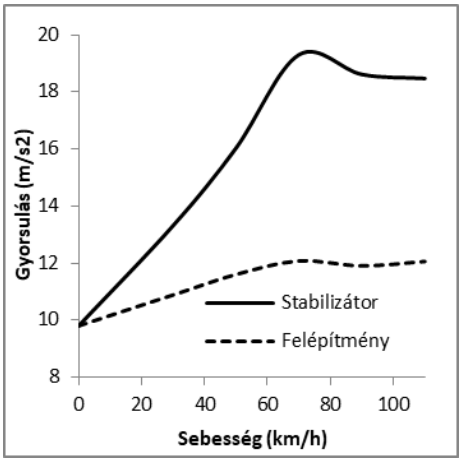


56. ábra A rugózott és a rugózatlan tömegek gyorsulásai különböző sebességek mellett

A dinamikus keréktalperő meghatározásához kiszűrtem a teljes mérési adatsorból a vizsgált száz méteres útszakaszhoz tartozó gyorsulás értékeket. A vizsgált útszakaszt 50 cm-es

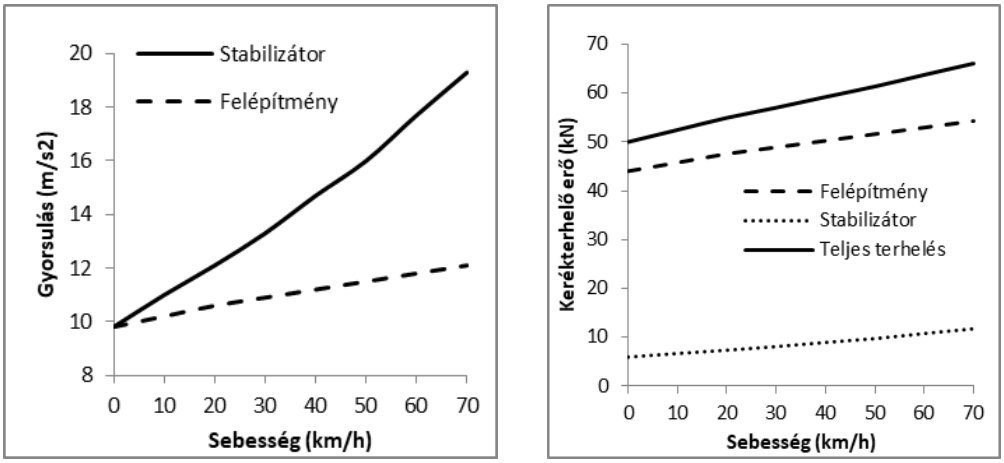
szakaszokra osztva ez 201 mintát jelent. A minta statisztikai feldolgozását a 4. mellékletben szereplő táblázat mutatja.

A szakaszon mért mértékadó gyorsulás a felső kvartilis értéke, amit ha diagramon ábrázolunk (**57. ábra)**, akkor megfigyelhető, hogy 70 km/h-nál éri el a maximumot és 90 km/h-nál pedig visszaesés tapasztalható. Mivel 70 km/h-ig közel lineárisan változik a gyorsulás értéke, ezért a továbbiakban csak eddig a szintig fogom figyelembe venni a mért adatokat.



57. ábra A felső kvartilisek a sebesség függvényében

A 70 km/h sebességnél kialakul a maximális dinamikus keréktalperő, ami 66 kN (**58. ábra**) és ha ezt hasonlítjuk a statikushoz, akkor ez 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 többletterhelés 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 célszerű meghatározni.



58. ábra A gyorsulásértékek (a) és a 100 kN tengelyterhelésre átszámolt (b) dinamikus keréktalperő változása

Ebből a vizsgálatból kiderül, hogy a különböző sebességek mellett mért gyorsulás értékek 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 felépítmény pedig 10,5 m/s2 gyorsulást mértem.

4.2.6 A DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ VIZSGÁLATBÓL SZÁRMAZÓ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNY

A módszer alkalmas a dinamikus keréktalperő mérésére, amely a sebesség függvényében szignifikáns változást mutat, ez pedig felhasználható eredményül szolgál a hátralévő élettartam számításához.

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 52 m/s2, míg a felépítményen 30 m/s2 gyorsulás keletkezik.

A második kérdéshez két külön kategóriájú jármű gyorsulásait mértem ugyanazon útszakaszon. Mindkét jármű futóművén és felépítményén is gyorsulás szenzor volt elhelyezve. A rugózatlan és a rugózott tömegen 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 gyorsulás szenzorok adatait vizsgáltam meg, amire 2,12-2,34 arány adódott, függően a mérés sebességétől és a járműkategóriától. Az arányok közti eltérés pedig a jármű rugózott és rugózatlan 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 gyorsulás értékek statisztikai feldolgozását végeztem el. A felső kvartilisek közti különbségek szignifikáns eltérést mutatnak és 70 km/h-ás 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 gyorsulás adatokon. Arra az eredményre jutottam, hogy nincs összefüggés a rugózott és a rugózatlan tömegen mért gyorsulás értékek közt.

4.3 HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM SZÁMÍTÁS A KERÉKTALPERŐBŐL [S6]

A szakirodalomban fellelhető modellekhez szükséges a behajlás értékét meghatározni, aminek hátránya, hogy az adatgyűjtés és kiértékelés miatt egy műszerrel csak körülbelül 5000 km út/év mennyiség mérhető. A pályaszerkezet méretezési elve, hogy az alapréteg fajtánként és forgalmi terhelés osztályonként csoportosított típus-pályaszerkezeteknél a szükséges aszfaltréteg összvastagságokat a többrétegű útpályaszerkezet mechanikai modellje alapján, hajlító és húzó-nyomó igénybevételeket figyelembe vevő fáradási kritériumok alapján határozzák meg. Ez a számítási mód viszont nem veszi figyelembe a burkolaton kialakult deformációkat, úthibákat és az ebből adódó többletterhelést. Emiatt az ÚME (Útügyi Műszaki Előírás) különböző aszfaltkeverékek alkalmazását írja elő. A méretezés megkezdése előtt viszont mindenképp szükséges az útszakasz állapotának ismerete. Az e-ÚT 06.03.13-as útügyi műszaki előírás tartalmazza azokat a tevékenységeket, amelyeket az állapotértékeléshez szükséges elvégezni. Az egyik ilyen tevékenység a teherbírásmérés, amely készülhet statikus vagy dinamikus teherbírás mérő készülékkel [65]. A Fontos megjegyezni, hogy azonos behajlásértékek különböző pályaszerkezetek mellett is létrejöhetnek, tehát pusztán erre hagyatkozni nem érdemes, erről több szerző is beszámolt már korábban (*Boromisza T., Primusz P.*). Sokkal pontosabb képet kapunk, ha a központi behajláson túl a görbületi sugár értékét is ismerjük.

Amennyiben nem áll rendelkezésre a behajlási teknő, illetve a görbületi sugár vagy figyelembe vesszük az úthibákból adódó többletterhelést is, úgy másik módszerre van szükség. Én három tényező alapján, az útprofil, a kerékterhelés és a forgalomáramlás sebessége ismeretében készítek becslést. Tehát a burkolat állapotára, a hátralévő élettartamára, a burkolat felületi egyenetlenségéből valamint a forgalomáramlás sebességéből következtetek. A tervezési útmutató a megengedhető forgalom nagyságot egy ötödfokú hatványfüggvénnyel írja le. Ebből kiindulva én is egy hatványfüggvényt alkalmazok a becsléshez, amit a következő alakban írtam fel:

$$F_{100}^{eng} = \frac{F}{SF}\left(\frac{A_k}{F_{kmax}^{a+b}}\right)^7 \tag{4.5}$$

,ahol

F biztonsági tényező, javasolt értéke 1,0 vagy 1,5,

SF eltolási tényező, javasolt értéke 2,5 és 5,0 között,

A_k A gépjármű gumiabroncsának útpályával érintkező felülete [mm2],

F_{kmax} A maximális keréktalperő [kN],

a A burkolat egyenértékű rugalmassági modulusától függő tényező,

b Az aszfalt burkolati réteg vastagságától függő tényező.

A matematikai modellt úgy alkottam meg, hogy a mért keréktalperőt közvetlenül a képletbe lehessen helyettesíteni, de az egyéb körülményeket is figyelembe vevő eltolási tényező, a biztonsági tényező értéke mellett két olyan paramétert is számításba vettem, amik nagymértékben befolyásolják a becsült értéket. Az egyik, az aszfalt rugalmassági tényezőjét fejezi ki, a másik pedig az aszfaltréteg vastagságától függő paraméter. Az (a) és (b) paraméterek meghatározásához lineáris interpolációt alkalmaztam, a tartományt pedig a **12. táblázatban** tüntettem fel. A tervezési útmutatóban az egyes aszfaltrétegek rugalmassági modulusa a beépítés helyétől függ. Tehát alap, kötő vagy kopóréteget építenek be, ennek megfelelően az **12. táblázaton** szereplő modulusokhoz meghatároztam az (a) paraméter értékeit.

Az (a) paraméter tartományértékét heurisztikus módon az aszfalt rugalmassági modulusának változtatása mellett 0,71 és 0,738 értékekben határoztam meg. A (b) paraméter tartományértékét pedig szintén az előbb említett módszerrel a rétegvastagság változtatása mellett 0 és 0,071 közötti értékben állapítottam meg. A jellemző modulus értékek és rétegvastagságok esetén a **12. táblázat** szerint alakulnak a paraméter értékek.

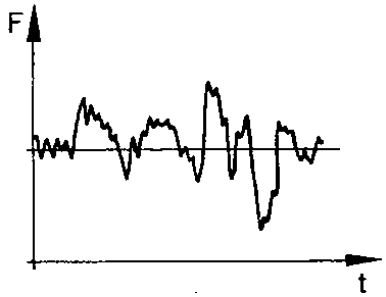
12. táblázat A paraméter értékek a kitüntetett helyeken. Az (a) tényező értéke az egyenértékű rugalmassági modulus és (b) az aszfaltréteg vastagsága függvényében

	E=4000	E=4500	E=5800
a	0,738	0,731	0,710

	h=120	h=200	h=290
b	0	0,033	0,071

Az (4.5)-ös összefüggés elméleti magyarázata, hogy az útburkolat fizikai állapotleromlása következtében nem csak anyagfáradás történik, hanem a szerkezetben deformáció is létrejön a forgalom és a környezeti körülmények hatására. A keréktalperő pedig függ a felületi egyenetlenségtől, valamint a jármű sebességétől. Vagyis ugyanaz a gépjárműforgalom egy rossz minőségű úton haladva nagyobb terhelést ad át a pályaszerkezetnek, mint jó minőségű útburkolat esetén. A megalkotott matematikai modell alkalmas arra, hogy a forgalomáramlás sebességének és az útfelület deformálódásának figyelembevétele mellett adjon becslést a hátralévő élettartamra. E két tényező hatással van a menet közben kialakuló keréktalperőre, amelynek változását kell mérni, az eredményeket pedig rögzíteni. A kiindulási érték az egységtengelyből származó $50\ kN$ statikus kerékterhelés, amelyből a felületi egyenetlenség és a sebesség miatt egy rendszertelen terhelés, instacionárius változó terhelés lesz **59. ábra**. A számításnál a

kerék érintkezési felületét és a többi paramétert állandónak tekintem, csak a terhelés értéke változik.



59. ábra Rendszertelen terhelés [96]

A terhelés mértékének meghatározását statisztikai számítás útján egy érvényességi szakaszra kell elvégezni.

4.3.1 A BEHAJLÁS ÉS A VÍZSZINTES MEGNYÚLÁS KÖZTI ÖSSZEFÜGGÉS

Burmister a kétrétegű rendszerében egy h vastagságú, E_1 rugalmassági modulusu és μ_1 Poisson tényezőjű anyagot vizsgált. A feladat a felső és alsó rétegben keletkező feszültségek meghatározása volt. Ezt a mechanikai modellt *Burmister* 1945-ben alkotta meg, melyet 1954 és 1956 között kiterjesztett n réteg esetére is [97]. *Burmister* eredetileg nem a feszültségekkel, hanem az alakváltozással foglalkozott és a központi lehajlás számítására egyrétegű rendszernél a következő képletet alkalmazta:

$$D_0 = \frac{2pr}{E_2}(1-\mu^2)F \qquad (4.6)\ [97]$$

,ahol

p a felületi nyomás [N/mm2],

r a gumiabroncs érintkezési felületét leíró kör sugara [mm],

E_2 az alapréteg modulusa [N/mm2],

μ a Poisson tényező,

F E_2/E_e arányszám,

E_e az aszfaltréteg egyenértékű rugalmassági modulusa [N/mm2].

A kötött rétegekben keletkező igénybevételt a réteg alján kialakuló megnyúlás jelenti, amely meghatározható, amennyiben ismert az adott pontban a görbületi sugár és a rétegvastagság [6]. A fajlagos megnyúlás nagysága a (h) vastagságú pályaszerkezeti réteg alján a következő összefüggéssel számítható:

$$\varepsilon(x) = \frac{h}{2R(x)} \quad (4.7)\ [97]$$

,ahol

h a rétegvastagság [mm],

$R(x)$ a behajlási teknő görbületi sugara a terhelés tengelyétől x távolságra [mm].

Matematikai úton levezethető a függőleges elmozdulásból származó görbületi sugár értéke, amelyre végtelen homogén féltér esetén *Müller és Ullidtz* 1998-ban publikált képlete alapján a központi behajlás és a görbületi sugár között a következő kapcsolat írható fel:

$$R_0 = \frac{2r^2}{D_0} \quad (4.8)\ [97]$$

4.3.2 A HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM SZÁMÍTÁSÁNÁL HASZNÁLT PARAMÉTEREK VIZSGÁLATA

Az előzőekben bemutatott matematikai modellekben alkalmazott paramétereket a **13. táblázatban** foglaltam össze, az értékeket pedig részben szakirodalomból, részben pedig tapasztalati úton határoztam meg. Ahhoz, hogy összehasonlíthatóvá váljanak az egyes modellek, szükséges a közös változót meghatározni, ami jelen esetben az aszfalt alsó szálának vízszintes fajlagos megnyúlása. A pályaszerkezet fizikai tulajdonságait roncsolásmentes vizsgálattal is meg lehet határozni, ami után a hátralévő élettartam becsülhető.

Ha a pályaszerkezet méretezésből indulok ki, akkor először a forgalmi terhelésből a szerkezetre megengedhető határigénybevételt szükséges meghatározni. Ezután a szerkezet geometriai méreteit kell kiszámítani, figyelembe véve az e-ÚT 06.03.13 „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése” útügyi műszaki előírást, amely az úttükör szintjén a földmű statikus méretezési teherbírási modulusát $E_{2m} = 40\ MPa$ értékben rögzíti. Tehát méretezésnél minden egyes réteg vastagságát, teherbírási modulusát és a Poisson tényezőjét meg kell határozni. A rétegvastagság pedig a teherbírási modulustól függ. Az igénybevétel számításánál a terhelést a $100\ kN$ egységtengely egyik kerekére ható $50\ kN$ erő jelenti, egy $r = 150\ mm$ sugarú körtárcsa felületén megoszló $p = 0{,}7\ MPa$ nyomás formájában. A háromrétegű pályaszerkezet modellben a kritikus terhelést az aszfaltréteg alsó szálában értelmezett $\varepsilon_t(\mu strain)$ nyúlás, a földmű tetején értelmezett $\varepsilon_v(\mu strain)$ összenyomódás jelenti. A határigénybevétel meghatározásához pedig szükséges a tervezési forgalom ismerete. A hátralévő élettartamot pedig a pályaszerkezeten megengedhető egységtengely áthaladás számaként definiálhatjuk.

A forgalomnagyság ismerete lehetővé teszi a megengedhető nyúlások vagy feszültségek meghatározását. A (2.10)-es összefüggést átalakítva és a $N_{eng} = TF$ jelölést bevezetve kapjuk a tervezési forgalomhoz tartozó megengedett vízszintes fajlagos megnyúlás értékét.

$$\varepsilon_{eng} = \left[\frac{F}{SF}\right]^{0,2} \cdot \frac{10^4 \cdot (0,856 \cdot V_b + 1,08)}{E_a^{0,36} \cdot TF^{0,2}} \qquad (4.9)\ [62]$$

A fenti képletben a változókat a korábbi (2.10) képletnél megadott módon kell értelmezni.

A földmű összenyomódásra a következő összefüggés alkalmazható:

$$\varepsilon_v = \frac{6000}{TF^{0,23}} \qquad (4.10)\ [62]$$

A fajlagos megnyúlás képletébe (4.7-es összefüggés) a 4.6-os és a 4.8-as összefüggéseket helyettesítve a következő egyszerűsített képletet kapjuk, ahol (r) a korábbiakban ismertetett sugár érték:

$$\varepsilon_t = \frac{hp}{2E_e r}(1 - \mu^2) \qquad (4.11)\ [62]$$

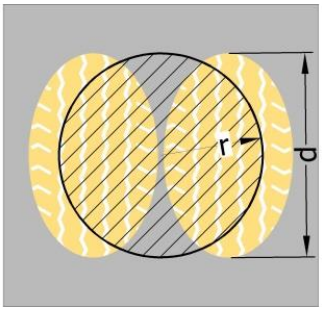
Ezzel a (h) rétegvastagság és a felületre jutó terhelés függvényében, a réteg rugalmassági modulusa és Poisson tényezője ismeretében kiszámolható a fajlagos megnyúlás, amely hajlékony pályaszerkezet esetén érvényes. A rétegvastagság értékének megállapításához, a szabványban szereplő típus-pályaszerkezeteknél alkalmazott vastagságokat vettem figyelembe [59]. Így a négy számítási mód közül háromnál a fajlagos megnyúlást tudom alkalmazni az összehasonlításhoz, a negyediket pedig külön vizsgálom. A képletben szereplő paramétereket középértékkel vettem számításba és egyszerre csak egyet változtattam.

A különböző számítási módszerek összehasonlításához összegyűjtöm az egyes változókat és a hozzájuk tartozó intervallumot, melyet táblázatos formában mutatok be.

13. táblázat A hátralévő élettartam számítása során használt paraméterek

Paraméter jele	Paraméter megnevezése	Értéke	Mértékegysége	Hivatkozás
$\bar{s}$	a vizsgált szakaszon mért behajlások átlaga	0,05-1,85	[mm]	
c	megbízhatósági szorzó	1,6-2,0		[30]
σ	a vizsgált szakaszon mért behajlások szórása	0,01	[mm]	
s_m	a vizsgált szakasz mértékadó behajlása	0,07-1,87	[mm]	
K_1	anyagállandó	1600		[76]
K_2	anyagállandó	5,62		[76]
ε_t	számított vízszintes megnyúlás	18-512	$[\mu strain]$	[62]
E_a	az aszfaltréteg modulusa	2000-5800	[MPa]	[62]
V_b	az aszfaltkeverék bitumen térfogata	11,0;11,4;12,8	[%]	[62]
F	biztonsági tényező	1,0;1,5		[62]
SF, v	eltolási tényező	2,5-10,0		[62]
a	A burkolat egyenértékű rugalmassági modulusától függő tényező	0,71-0,77		[S6]
b	Az egyenértékű aszfaltréteg vastagságától függő tényező	0-0,071		[S6]
A_k	A kerék burkolattal érintkező felülete	70 686	[mm2]	[6]
F_{kmax}	A maximális keréktalperő	15 000-150 000	[N]	[S6]
p	felületi nyomás	0,21-2,12	[MPa]	
h	rétegvastagság	120-290	[mm]	[59]
μ	Poisson tényező	0,35		[62]
r	Gumiabroncs érintkezési felületét leíró kör sugara	150	[mm]	[6]

A **13. táblázatban** szereplő (A_k) paraméter az egységtengely terhelés számításához használt tehergépjármű gumiabroncs érintkezési felülete [6]. Pályaszerkezet méretezés során az útpályaszerkezetet terhelő erő egy (r) sugarú körtárcsán egyenletesen megoszló (p) terhelést hoz létre. Ez a megoszló terhelés tehergépkocsi esetén $p = 0{,}707\ MPa$. A dupla kerék burkolattal érintkező felületét az aszfaltmegnyúlás számításához, egy kör területével helyettesítik, amely ebben az esetben a **60. ábra** szerint értelmezhető.



60. ábra A gumiabroncs érintkezési felületét helyettesítő kör területének értelmezése

Abban az esetben, ha a két ellipszis alakú felületet egy körrel helyettesítjük és ismerjük a felületi nyomást, akkor ki tudjuk számítani az érintkezési felület nagyságát a következő összefüggéssel:

$$A_k = \frac{F_{kmax}}{p} \qquad (4.12)[98]$$

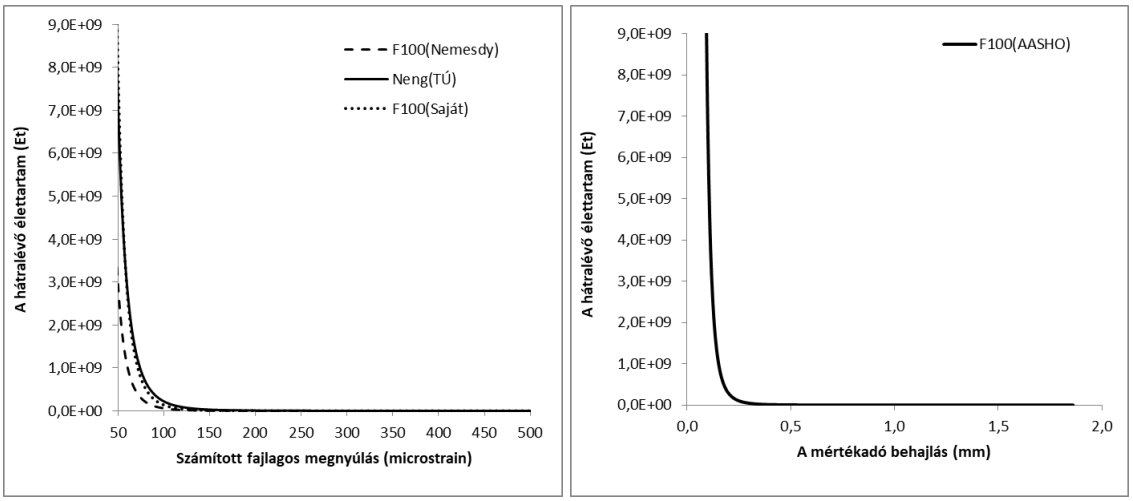
A járműdinamikában ismeretes, hogy az átadódó nyomóerő eloszlása a gumiabroncs fajtájától, a keréknyomástól, sőt még a lengéscsillapító fajtájától is függ. Vagyis a keréktalperő meghatározása nem egyszerű feladat. Mivel a vizsgálat lényege a hátralévő élettartam meghatározása valamint a befolyásoló tényezők vizsgálata, nem pedig a keréktalperő pontos meghatározása, ezért az egyszerűség kedvéért a (4.12) összefüggést alkalmazva, $F = 50\ kN$ terhelést és $p = 0{,}707\ MPa$ felületi nyomást figyelembe véve az $A_k = 70\,686\ mm^2$ –re adódik. Ezt az értéket konstansnak tekintem a vizsgálat során.

Az egyes modellek paraméter használata közt van átfedés, vagyis létezik olyan paraméter, amely egyszerre kettő modellben is szerepel. A paraméterek modellekben való részvételét, illetve a kiindulásként alkalmazott értékeket a **14. táblázatban** foglaltam össze.

14. táblázat Az egyes számítási módok által használt paraméterek összefoglaló táblázata

s_átl	c	σ	sm	v	K_1	K_2	ε_t	E_a	V_b	F	SF	a	b	A_k*2	F_kmax	p	h	μ	r
AASHO				Nemesdy										p		ε_t			
							Tervezési útmutató												
										Saját modell									
0,05	2	0,01	0,07	10	1600	5,62	100	3 400	11,4	1	3	0,748	0,019	70 686	50000	0,71	165	0,35	150

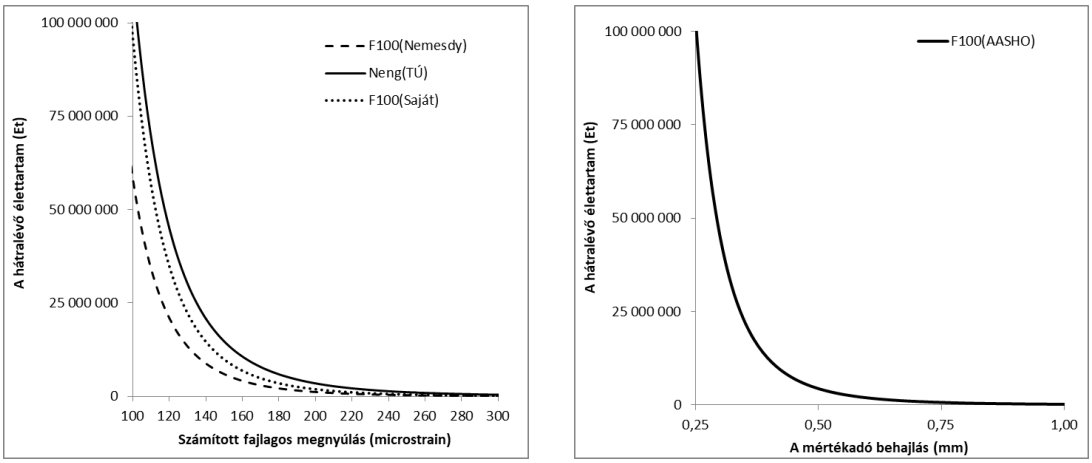
Beállítottam a **14. táblázatbeli** kezdeti paraméter értékeket, amelyek közül egyedül az F_{kmax} volt a változó, ez idézte elő a megnyúlást. Az AASHO útkísérletnél alkalmazott modellben pedig a mértékadó behajlás változott. A hátralévő élettartam a **61. ábrán** látható módon változik. A körülbelül $100\ \mu strain$ érték esetén ez olyan nagymértékű élettartambeli változás, hogy azt átszámítva több évtizednek felelne meg.



61. ábra A hátralévő élettartam modellek összehasonlítása

Az egyes modellek közti különbség jobb érzékeléséhez a valósághoz közelebb eső értéktartományt állítottam be. A kapott függvénygörbéket a **62. ábra** mutatja. Az (ε_t) megnyúlás

tartományát 100 és 300 közöttire állítottam, ez közelebb áll a valósághoz, mivel a tervezési útmutatóban is 92 $\mu strain$ mellett 102 millió egységtengely áthaladás adódott. Megfigyelhető, hogy mindegyik modell hasonló mértékű élettartamot becsül. A behajlásból származó módszert külön diagramon ábrázoltam mivel más a változó paraméter. Azonban a behajlás mértékét itt is a valóságnak megfelelően vettem számításba. A fajlagos megnyúlásból számoló modellek esetén elmondható, hogy a saját modellem a tervezési útmutatóban szereplő modellhez áll közelebb. A két szélső görbe közt elég nagy különbség adódott, ugyanis a tervezési útmutatóban szereplő illetve a saját modell kis megnyúlás esetén kétszer akkora értéket mutat, mint a Nemesdy-féle. Nagyobb nyúlás esetén ez az érték lecsökken a másfélszeresére.



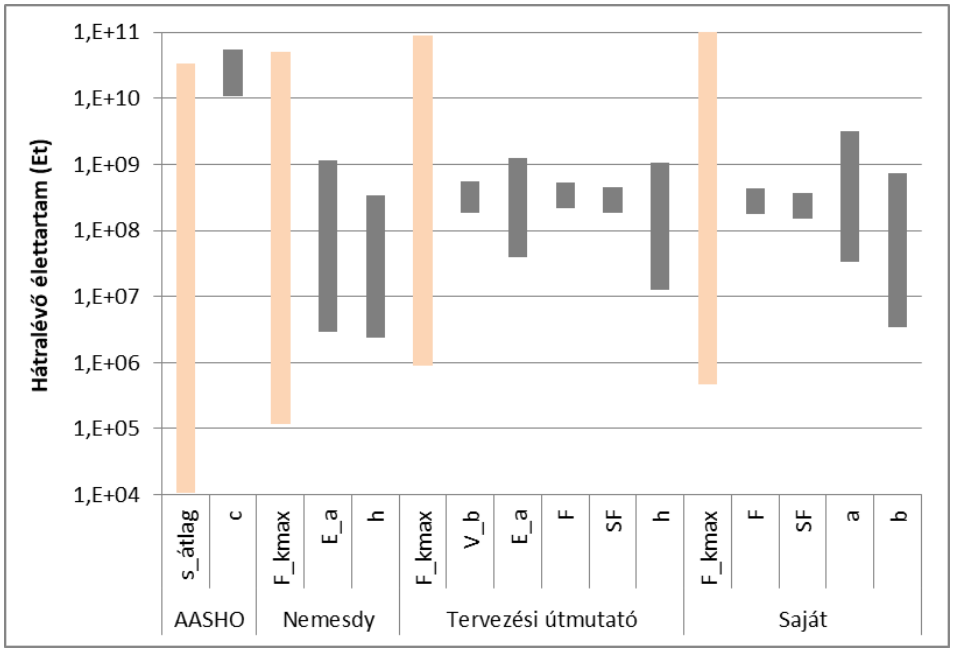
62. ábra A hátralévő élettartam modellek összehasonlítása a valóságnak megfelelő nyúlás tartományon belül

A vizsgálat nem terjed ki minden egyes szituációra, ami alatt az egyes paraméterek összes lehetséges variációját értem, de ezek közül nyolc esetében a paraméterek szélsőértékre történő állításával kiszámoltam a minimális és a maximális élettartamot. Ezt a számítást az **63. ábrán** mutatom be, amelyen az átlagos értékekkel kiszámolt élettartamot is feltüntettem. Az átlagszámításnál csak az F terhelő erő változott, míg a többi paraméter esetén az (F) erő azonosan 50 kN volt. A számított értékeket a **15. táblázat** tartalmazza.

15. táblázat A legkisebb és a legnagyobb elméleti élettartam a különböző paraméterek és modellek szerint

		Legkisebb élettartam (Et)	Legnagyobb élettartam(Et)
AASHO	s_átlag	10 817	33 558 606 439
	c	10 695 388 931	43 860 653 009
Nemesdy	F_kmax	119 068	49 635 661 998
	E_a	2 897 960	1 150 188 656
	h	2 403 246	342 354 810
Tervezési útmutató	F_kmax	884 288	88 428 801 762
	V_b	183 017 766	363 019 004
	E_a	39 333 579	1 186 962 665
	F	214 881 988	322 322 982
	SF	184 184 561	257 858 386
	h	12 812 378	1 056 120 578
Saját	F_kmax	476 180	111 370 844 043
	F	177 692 858	260 331 540
	SF	148 760 880	213 231 429
	a	33 309 353	3 085 755 763
	b	3 380 730	731 810 334

A vízszintes fajlagos megnyúlás közvetlenül befolyásolja a Nemesdy és a tervezési útmutató szerinti számítást, de közvetett módon a saját modellemet is, mivel a megnyúlás képletében szerepel a felületi nyomás, az pedig a változó kerékterheléstől függ. A vizsgálat során nyolc darab paramétert változtattam, a korábban megadott értéktartományon belül.



63. ábra Az egyes modellek paraméter-érzékenységének összehasonlítása

Az összehasonlító diagramon mikor csak a terhelő erőt változtattam minden modellben a maximum értékek hasonló nagyságrendűre adódtak. A minimum értéket esetén viszont eltérés tapasztalható, mindazonáltal a tervezési útmutató értéke közel áll a saját modellem értékéhez. A Nemesdy-féle egy az AASHO pedig két nagyságrenddel kisebb minimum értéket mutat. A

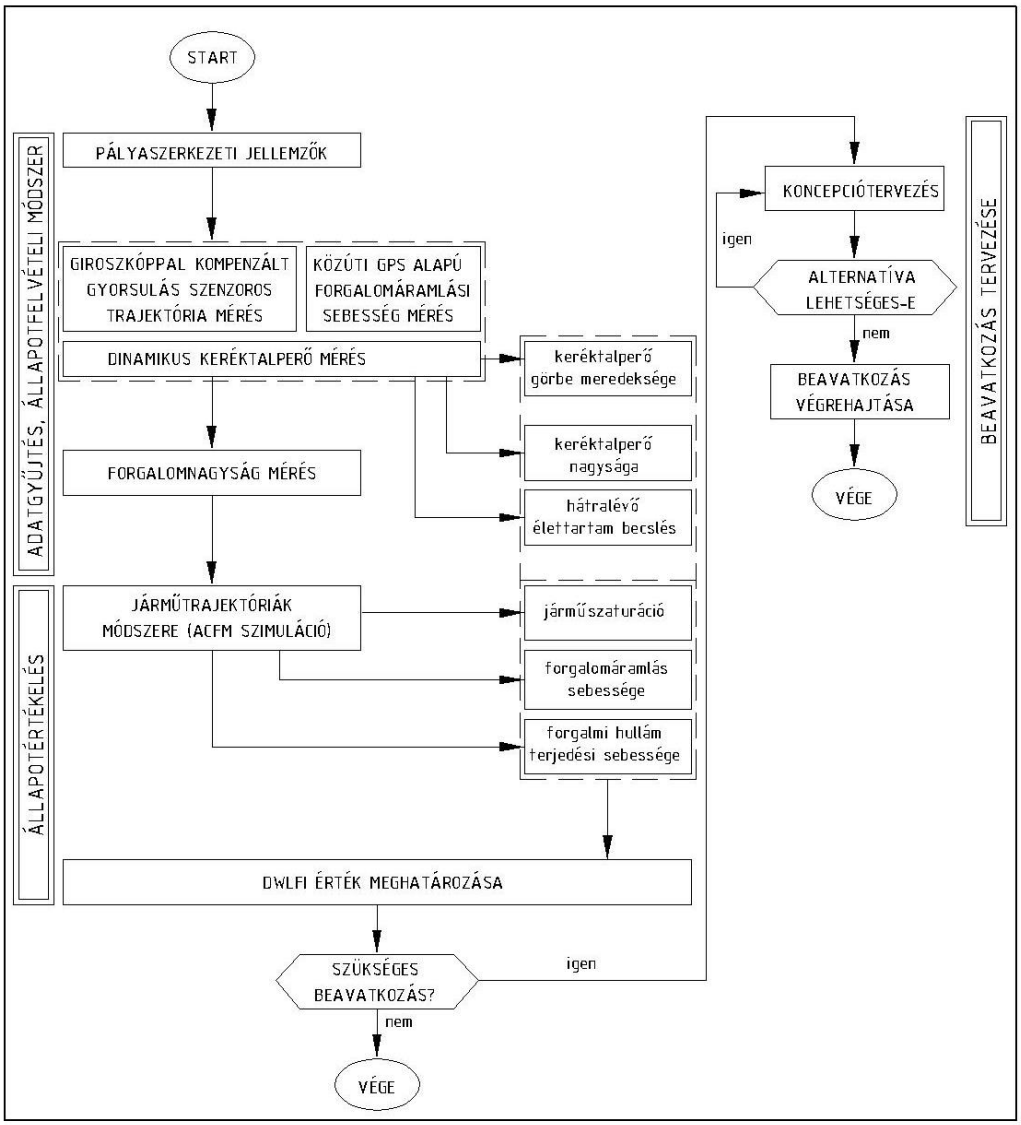
terhelő erőt ezután 50 kN-ra állítottam és a többi paraméter határértékeit vizsgáltam. A rugalmassági modulus valamint az aszfaltréteg vastagsága okoz még nagyságrendbeli változást a hátralévő élettartamban. A saját modellemben ezt a változást az (a) valamint a (b) paraméterek fejezik ki. A rugalmassági modulus maximális értéke mindhárom modellnél azonos nagyságrendű, de a minimum érték a Nemesdy-féle modellben egy nagyságrenddel alacsonyabb szinten van. Az aszfaltréteg vastagság változása a maximum értékek tekintetében nagyságrendileg azonosak, de a minimum érték esetén a tervezési útmutatóban szereplő modell egy nagyságrenddel nagyobb szinten van. A többi paraméter változtatása nem eredményezett nagyságrendbeli változást a hátralévő élettartamban.

4.3.3 A HÁTRALÉVŐ ÉLETTARTAM VIZSGÁLATBÓL SZÁRMAZÓ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A vizsgálatból kiderült, hogy az általam megalkotott hátralévő élettartam becslő modell hasonló eredményt produkál, mint a szakirodalomban megtalálható modellek. A bemutatott becslő módszer alkalmas a valós kerékterhelésből a várható élettartam meghatározására. A módszer megfelelően érzékeny az (F) keréktalperő változására, ami a valóságban előforduló megnyúlásokat eredményez. A modell használhatósága azon múlik, hogy mennyire pontos a számítás alapját képező terhelő erő értéke. Ennek meghatározására a dinamikus keréktalperő mérési módszerére van szükség.

4.4 AZ ÚJFAJTA DINAMIKUS KERÉKTALPERŐ MÉRÉSEN ALAPULÓ ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELÉSI MÓDSZER BEMUTATÁSA VALÓS ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT

Az állapotértékelést a 4. fejezetben bemutatott dinamikus keréktalperő mérésen alapuló állapotfelvételi módszer során vizsgált útszakaszra végzem el. Az értékelés elvégzésének lépéseit az alábbi folyamatábra mutatja.



64. ábra Az útállapot értékelésének folyamatábrája

4.4.1 A PÁLYASZERKEZETI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA

Az útszakasz pályaszerkezetéről pontos információ nem állt a rendelkezésemre, a győri Útkezelő Szervezet tájékoztatása szerint, makadám rendszerű pályaszerkezettel épült. Ezért egy tipikus pályaszerkezettel számolok a továbbiakban. A forgalmi terhelési osztályt C típus-

nak tekintve a burkolatalapot M50 mechanikai stabilizációnak veszem, akkor a burkolatalap vastagság 20 cm, az aszfalt rétegé pedig 16 cm. Az aszfaltréteg egyenértékű modulusát $E_a = 2000\ MPa$-nak veszem fel, ez egy ennyi idős útnál lehetséges, a Poisson-tényezőt pedig 0,35-re.

4.4.2 MÉRÉS VÉGREHAJTÁSA A KÖZÚTI FORGALOMBAN

Egyszerre három paramétert képes rögzíteni a kidolgozott forgalom állapotfelvételi módszerem. A trajektória előállításához szükséges gyorsulást, a forgalomáramlási sebesség meghatározásához szükséges GPS koordinátákat és a dinamikus keréktalperő meghatározásához szükséges gyorsulás értékeket.

A forgalomáramlás az útszakaszra megengedett *40 km/h*, ami átszámítva *11 m/s2*. A forgalom időbeni eloszlása egyenletes, és 5 percenként 6 db érkezik a szakaszra, így *550 m*-ként követik egymást a járművek. Ebből a forgalom sűrűség *1,8 j/km*, így sem torlódás, sem forgalmi hullám nem alakul ki a vizsgált szakaszon. Amennyiben a forgalmi sáv kapacitása a szabvány szerint *1200 E/h*, a mértékadó forgalom *48 E/h* így a forgalmi telítettsége *4%*-ra adódik. A forgalomáramlás sebességaránya a 3.2.3 fejezet szerint számítva 2-re adódik.

A dinamikus keréktalperő mérésből (4.2. fejezet) a többletterhelés 59,3 kN-ra adódik, a terhelési görbe meredeksége 22,8%. A hátralévő élettartam a 4.3. fejezet szerinti módszerrel számítva 33,4 millió egységtengely áthaladás. A 4.3.1. fejezet részletesen leírja, hogyan határozható meg a központi behajlás értéke a keréktalperő változása függvényében. Az e-ÚT 06.03.13 Útügyi Műszaki Előírás szerint pedig meghatározható az adott szakaszra megengedhető valamint a szakaszok homogenizálása után, a mértékadó behajlás értéke.

4.4.3 DWLFI ÉRTÉK MEGHATÁROZÁSA

A végső útállapot értékelést a forgalmi és útburkolat paraméterek meghatározása után az alábbi szempontrendszert figyelembe véve végeztem.

16. táblázat A DWLFI állapotértékelő lap a Nép utca felméréséről

DWLFI ÚTÁLLAPOT-ÉRTÉKELŐ LAP

ÚT ÉS IDŐJÁRÁSI ADATOK

Dátum:	Időjárás:	Út adatok:
2020.03.29	Száraz idő [X] Esős idő [ ]	Út neve: Nép utca Út száma: Szelvényszám-től: Szelvényszám-ig: Útburkolat szélessége: 6,0 m HRSZ: 030/1/1

ÚTÁLLAPOT ADATOK HATÁRÉRTÉKEI

Sorszám	Állapotparaméter	Állapotjellemző	Mértékegység	1. Állapotszint Nagyon jó	2. Állapotszint jó	3. Állapotszint kielégítő	4. Állapotszint eltűrhető	5. Állapotszint elfogadhatatlan
1.	Forgalmi telítettség	A létesítmény kapacitás kihasználtsága	[%]	≤ 50	51-63	64-76	77-89	90 ≤
2.	Forgalom áramlás sebesség arány	A forgalomáramlási sebesség a megengedett sebességtartományon belüli és kívüli eloszlásának súlyozott számtani átlaga	[%]	≤ 50	51-63	64-76	77-89	90 ≤
3.	Forgalmi hullám terjedési sebessége	Hullámterjedés sebessége a járműtrajektória módszer szerint	[m/s]	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤
4.	Keréktalperő görbe meredeksége	A meredekség százalékban	[%]	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤
5.	Keréktalperő nagysága	A keréktalperő nagysága a forgalomáramlás sebességének függvényében	[kN]	50-54	55-59	60-64	65-69	70 ≤
6.	Hátralévő élettartam	A pályaszerkezet hátralévő élettartam a keréktalperő alapján	[mEt]	≥ 81	80-61	60-41	40-21	20 ≥
7.	Központi behajlás arány	Központi mért és megengedett behajlás aránya	[%]	≤ 20	21-40	41-60	61-80	81 ≤

ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELÉS

				Forgalom-nagyság (E/h)	Forgalmi sáv kapacitása (E/h)		Forgalmi telítettség	Adott pontszám	Súlyszám	Pont érték
1.	Forgalmi telítettség	A létesítmény kapacitás kihasználtsága	[%]	48	1200		0,04	1	1	1
				A megengedett tartományban (S1)	A megngedett felett (S2)	A megengedett alatt (S47)	Súlyozott átlag	Adott pontszám	Súlyszám	Pont érték
2.	Forgalom áramlás sebesség arány	A forgalomáramlási sebesség a megengedett sebességtartományon belüli és kívüli eloszlásának súlyozott számtani átlaga	[%]	35	45	20	21,3	1	3	3
				Mért érték	Adott pontszám				Súlyszám	Pont érték
3.	Forgalmi hullám terjedési sebessége	Hullámterjedés sebessége a járműtrajektória módszer szerint	[m/s]	0	1				2	2
4.	Keréktalperő görbe meredeksége	A meredekség százalékban	[%]	22,8	4				50	200
5.	Keréktalperő nagysága	A keréktalperő nagysága a forgalomáramlás sebességének függvényében	[kN]	59,3	2				10	20
6.	Hátralévő élettartam	A pályaszerkezet hátralévő élettartam a keréktalperő alapján	[mEt]	33,4	4				30	120
				A megengedhető behajlás értéke	A mértékadó behajlás értéke	Behajlások aránya	Adott pontszám		Súlyszám	Pont érték
7.	Központi behajlás arány	Központi mért és megengedett behajlás aránya	[%]	0,32	0,25	0,78	4		4	16
								Végső pontszám		3,62
									ÉRTÉKELÉS	4

Az egyes állapotparaméterek meghatározása után a DWLFI útállapot-értékelő lapot kell kitölteni. A végeredményt az értékelő lapon feltüntetett súlyszámokkal elvégezett súlyozott átlag jelenti. Az értékelést az ötfokozatú skála szerint végezhetjük úgy, hogy a kerekítés szabályai szerint képezzük a végeredményt. A súlyozott átlag 3,6 lett, ami 4-es osztályzatot jelent.

5 TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEGZÉSE

Jelenleg az aszfaltburkolatú utak pályaszerkezeti rétegeinek fáradási jellegű burkolattönkremenetellel végződő hátralévő élettartamát az úgynevezett SCI értékek alapján számolják, ami azt jelenti, hogy szükséges a burkolat behajlását mérni. Emellett nem zárható ki az idő előtti tönkremenetel, amely maradandó alakváltozás formájában jelenik meg. A keletkező igénybevételek becslésére több mechanikai számításon alapuló regressziós modellt is kidolgoztak. Az ilyen modellek alkalmazása előtt viszont az elemzésnél használt útpályaszerkezet paramétereinek (Poisson tényező, E modulus, rétegvastagság) egyeznie kell a valósággal, amihez labor vizsgálat szükséges, de erre nem minden esetben kerül sor.

1. tézis: Gyorsulásszenzoros járműtrajektória mérés esetén giroszkóp használatával nincs szükség a mért adatok kompenzálására (3.1.1, 3.1.2 fejezetek)

Igazoltam, hogy egy lejtőn giroszkópra helyezett gyorsulásszenzort mozgatva a vízszintes síkra vetített távolság az adott síkon pontos lesz.

Feltételezésem szerint egy változatos nyomvonalvezetésű útszakaszon végighaladva a járműben fixen elhelyezett háromtengelyes gyorsulásszenzorral nem lehet pontosan nyomon követni a jármű mozgását. A mért értéket mindenképp kompenzálni kell. Ezt a hipotézist igazolja a giroszkóppal kompenzált gyorsulásszenzoros járműtrajektória mérés. Kísérleti úton bizonyítottam, hogy giroszkóppal történő kompenzáláskor 98% feletti mérési pontosság érhető. A mérés pontosságát nem befolyásolja a mintavételi frekvencia és független a jármű sebességétől.

A tézishez tartozó saját publikációim:[S4],[S5]

2. tézis: Egy útszakaszon a megengedett sebességhatár tartása és a sebességhatár értéke közt nincs összefüggés (3.1.3 fejezet)

Kidolgoztam egy GPS alapú mérési módszert, amellyel az egyes útszakaszok megengedett járműsebesség tartásának térbeli eloszlását lehet jellemezni. A kidolgozott módszerrel egy forgalomban haladó mérőautóval GPS koordinátákat kell rögzíteni, majd az adatok utólagos feldolgozásával meghatározható az áramlási sebesség. A módszer megfelelőségét helyszíni vizsgálattal ellenőriztem.

Feltételezésem szerint az általam vizsgált úthálózaton, a külterületi útszakaszokon jellemzően 90km/h sebesség alatt lehet haladni. Ezt a hipotézist igazolja az adott útszakasz sebes-

séghatár tartásának vizsgálata miszerint a megtett út közel 80%-ában a megengedett sebességhatár alatt volt a forgalomáramlás sebessége.

A másik feltételezésem szerint a vizsgált úthálózaton nem a 20km/h-ás sebességet lehet legjobban tartani. A hálózaton mért sebességek vizsgálatával kimutattam, hogy a legnagyobb mértékű sebességtartás a 40km/h sebességhatár esetén történt.

3. tézis: A forgalmi hullámok terjedési sebességének meghatározási módszerei jelentős eltérést mutatnak a kialakult hullámterjedés sebesség tekintetében (3.2.1, 3.2.2 fejezet)

Rámutattam, hogy a forgalomban haladó minden jármű rendelkezésre álló helyadata alapján a forgalom lefolyása jellemezhető a járműtrajektóriákkal. Jelenleg nincs minden közúti jármű felszerelve pozícióméró eszközzel, így nem lehetséges a teljes járműfolyam pozíció adatainak gyűjtése és feldolgozása, ezért modellezésre van szükség.

Feltételezésem szerint, a hullámterjedés sebességének meghatározásához alkalmazott módszerek eredményei eltérést mutatnak. A helyadatok rögzítése gyorsulásszenzorral lehetséges (lásd 1. tézis). A járműtrajektóriák előállításához olyan járműkövetési modellt dolgoztam ki, amely a követési távolságból számított érzékenységi tényezővel lágy átmenetet képes megvalósítani a gyorsítás és lassítás között, így realisztikusabb reakciót eredményez egy incidens során. Ezzel a modellel állítottam elő a járműtrajektóriákat. A forgalmi hullámok terjedési sebességének meghatározásához járműtrajektória alapú mérési módszert dolgoztam ki. A hullámterjedés sebességét a forgalomáramlás sebességének függvényében ábrázolva kimutattam a mérési módszerek eredményei közti különbséget.

A tézishez tartozó saját publikációim:[S1],[S2],[S3]

4. tézis: A dinamikus keréktalperő forgalomban mért adataiból meghatározható a burkolat felületi egyenetlenségéből adódó többletterhelés (4.2. fejezet)

Bebizonyítottam, hogy a megfelelően megválasztott peremfeltételek esetén meghatározható a felületi egyenlőtlenségből adódó többletterhelés. A járművön belül a rugózott tömegen a bólintási centrum, a jobb első keréknél a forgáspont közelében elhelyezett gyorsulásszenzorral egy kátyún áthajtva kimutatható az úthiba okozta többletterhelés.

Feltételezésem szerint egy egyenetlen felületű burkolaton haladó jármű kerekére jutó többletterhelés szignifikánsan nő a jármű sebesség növekedésével. Ezt a hipotézist igazolja a dinamikus keréktalperő mérése közúti forgalomban. A vizsgálat szerint egyenetlen útfelület

esetén a sebességgel egyenes arányban nő a dinamikus keréktalperő. Kidolgoztam egy módszert a dinamikus keréktalperő mérésére, amely a közúti forgalomban is alkalmazható 70km/h sebességig. Kimutattam, hogy 70km/h sebességgel haladva a vizsgált úton 30%-kal nő a dinamikus keréktalperő. További vizsgálattal igazoltam, hogy a személygépjármű és a tehergépjármű rugózott és rugózatlan tömegen mért gyorsulásértékei nagyságrendileg azonosak, így a mérőeszközzel személygépjárműre vagy teherautóra telepítve is lehet mérni. Az eljárás megfelelőségét valós közúti forgalmi viszonyok közötti méréssel ellenőriztem.

A tézishez tartozó saját publikációm:[S7], [S8], [S9], [S10]

5. tézis: A hátralévő élettartamot leginkább a dinamikus keréktalperő befolyásolja (4.3. fejezet)

Kidolgoztam egy módszert, amely alkalmas közvetlenül a keréktalperőből hátralévő élettartam számításra. Ha egyenetlen az útfelület, akkor adott sebesség mellett a statikus terheléshez viszonyítva nagyobb terhelőerők lépnek fel (lásd 4. tézis). A megnövekedett terhelőerő deformációs meghibásodáshoz vezethet, de nem ritka a fáradási jellegű törés sem, ami csökkenti a hátralévő élettartamot.

Feltételezésem szerint a leromlási folyamatban a dinamikus keréktalperő a legnagyobb jelentőséggel bíró tényező. A saját matematikai modellemben ennek az erőnek az ismerete és a helyes modell paraméterek beállítása mellett jól becsülhető a hátralévő élettartam. A befolyásoló paraméterek összegyűjtése után elvégeztem egy összehasonlító elemzést. Kimutattam, hogy a legnagyobb változást a dinamikus keréktalperő okozza. Kimutattam, hogy a modell megfelelően érzékeny ennek az erőnek a változására, ami a valóságban előforduló megnyúlásokat eredményez. A modell használhatósága az erő pontos meghatározásán múlik.

A tézishez tartozó saját publikációm:[S6]

6 KÖVETKEZTETÉSEK, JÖVŐBELI CÉLOK, FEJLESZTÉSEK

Kutatásom során arra jutottam, hogy még mindig szükség van az útállapot értékelő rendszerek fejlesztésére. A nagypontosságú szenzorok, a vezeték nélküli technológia, a térinformatikai rendszerek fejlődésével lépést kell tartania az úttal foglalkozó szakembereknek is. A kutató munka mellett aktívan részt veszek úttervezési projektekben, ahol a különböző intézményekben dolgozó szakemberekkel működöm együtt. Ez irányú tevékenységem is ösztönzött egy olyan állapotértékelő rendszer kidolgozására, amely az önkormányzatok, illetve más tervezőirodák munkáját is segíthetik. Egy önkormányzat számára a burkolatgazdálkodás kardinális kérdés. A projektek előkészítéséhez az útépítés, felújítás rangsorolásához szükséges a meglévő úthálózat állapotának ismerete. Jelenleg is tapasztalható, hogy a költségvetés tervezéséből ez irányú tevékenység rendszerint kimarad, emiatt csak a szakemberek sokévnyi tapasztalatára támaszkodva készítik el a rangsorolást. Következésképp szükség van a gyors és hatékony útállapot értékelő rendszerre, hogy időben a lehető legjobb döntés szülessen az utak sorsáról, ezáltal gazdaságossá váljék az útfenntartás.

Egyik jövőbeli célom, hogy a kidolgozott szimulációs modellem kalibrálásához a közúti forgalomban végezzek méréseket. A gyorsulásszenzoros dinamikus keréktalperő mérő módszeremmel pedig egy település szintű úthálózat vizsgálatát tűztem ki célul. További célom, hogy összehasonlító elemzést végezzek a szabványban elfogadott Benkelman-tartó által mért és a saját módszerem által mért eredményekre, amelyből egy átviteli függvényt alkothatok. Ez egyben a település forgalomáramlásának vizsgálatát is jelenti. Így feltérképezhető a hálózat forgalmi állapota is. Céljaim közé tartozik, hogy a járműkövetési modell paramétereinek vizsgálataihoz, egy tesztpályán végezzek méréseket, mely a járműmozgásokat rögzíti a giroszkóppal kompenzált gyorsulásszenzoros járműtrajektória módszerrel. Ezenkívül még a járművezetők reakcióidejének mérése lenne a vizsgálat célja.

A doktori értekezésemben kidolgozott gyorsulásszenzor alapú járműtrajektória mérési módszerhez szükséges eszköz fejlesztését fogom majd elvégezni. A gyorsulás szenzor giroszkóppal történő integrálása a cél. Fejleszteni fogom az adatfeldolgozás módszerét, a feldolgozási idő csökkentése érdekében. A mérési adatok „freeze frame” jellegű rögzítése is a jövőben megoldandó feladat. Ez a plusz információ segítséget nyújt a hiba előállásakor bekövetkező körülményeinek vizsgálatához. Rövid szakaszok részletes vizsgálatakor szükség lehet az élő adatok megfigyelésére, ezért ennek fejlesztését is el fogom végezni a jövőben.

ÖSSZEGZÉS

A kutatási munkám az útfenntartás területén a gyakorlatban is felhasználható eredményeket tartalmaz. A végső útállapot értékelő rendszer mind a forgalmi, mind pedig a burkolatállapot jellemzőit figyelembe veszi. A rendszer nagyobb súllyal veszi számításba a keréktalperőt, valamint az abból számolható hátralévő élettartamot.

A forgalmi paraméterek meghatározásához újfajta mérési módszert dolgoztam ki. A gyorsulásszenzoros járműtrajektória módszer validálásához terepi méréseket végeztem. A vizsgálatot előre kijelölt 100 m hosszú jó minőségű egyenletes és vízszintes felületű úton kezdtem. A vizsgálatból megállapítottam, hogy lehetséges a trajektória mérés, viszont ahhoz, hogy bármilyen útvonalvezetés esetén alkalmazható legyen, szükséges giroszkópot alkalmazni. További giroszkóppal kompenzált mérést végeztem valós forgalmi környezetben egy olyan belvárosi utcán, amely változatos vízszintes és függőleges vonalvezetéssel rendelkezik. A vizsgálat bizonyította, hogy a kidolgozott módszer pontosabb a GPS-nél.

A forgalmi hullám terjedési sebességének meghatározására kidolgozott járműtrajektóriák módszerét implementáltam. Megállapítottam, hogy ez a módszer adja a legpontosabb eredményt, viszont ennek a legnagyobb az adat és számítás igénye. A járműtrajektóriák létrehozásához a saját fejlesztésű adaptív járműkövetési modellt (ACFM) implementáltam, amely azzal az előnnyel rendelkezik a szakirodalomban található hasonló modellekhez képest, hogy mérsékeltebb reakciót vált ki, mint az IDM modell, amely csökkenti a hullámterjedés sebességét, így javítja a forgalomáramlást. Sikerült egy új, egyszerűen alkalmazható járműkövetési modellt megalkotnom, amely realisztikusabban modellezi a valóságot, az érzékenységi tényezőnek köszönhetően. A járműkövetési modell használatához kidolgoztam egy MATLAB kódot, amellyel a szimulációt végrehajtottam.

Vizsgálattal igazoltam, hogy a forgalomáramlás sebességének ismerete szükséges a pontos keréktalperő maghatározásához. Főként Győr város belterületén, de külterületi hosszú távú utazások során összesen 1865 km megtett távolságot rögzítettem GPS segítségével. A megengedett sebességhatárokat pontos helykoordinátáknak megfelelően EOV rendszerben CAD szoftverrel rögzítettem. Rámutattam, hogy a vizsgált útszakaszokon a legnagyobb arányban a 40 km/h-ás sebességet lehet tartani. Bizonyítottam, hogy a vizsgálat alkalmas a forgalomáramlási sebesség meghatározására.

Kidolgoztam egy gyorsulásszenzoron alapuló mérési eljárást, amellyel mérhető a dinamikus keréktalperő a közúti forgalomban egészen 70 km/h sebességig. A mért eredmények fel-

használhatók az útfenntartáshoz szükséges újfajta dinamikus keréktalperőn alapuló útállapot értékelő rendszer (DWLFI) számára.

Az áramlási sebesség és az útfelület egyenetlensége függvényében változik a keréktalperő nagysága, a keréktalperő görbe meredeksége, a hátralévő élettartam és a központi behajlás értéke. Ezeket valamint a forgalmi állapotparamétereket figyelembe véve a DWLFI rendszer az útállapot gyors értékelését teszi lehetővé.

SUMMARY

My research includes results that can be used in practice in the field of road maintenance. The final road condition assessment system takes into account the characteristics of both the traffic and the pavement condition. The system takes greater account of the wheel load and the remaining life that can be calculated from it.

To determine the traffic parameters, I developed a new type of measurement method. To validate the acceleration sensor vehicle trajectory method, I performed field measurements. I started the study on a pre-designated 100 m long high-quality road with a smooth and horizontal surface. From the study I concluded that it is possible to measure the trajectory, but in order to be applicable to any route guidance, it is necessary to use a gyroscope. I performed an additional gyroscope-compensated measurement in a real-world traffic environment on a downtown street with a variety of horizontal and vertical lines. The study proved that the developed method is more accurate than GPS.

I implement the vehicle trajectories methods, which is performed to determining the speed of propagation of a traffic wave. I found that this method gives the most accurate results, but it requires the most data and calculation. I implement of the self-developed adaptive vehicle tracking model (ACFM) to create the trajectories. It has an advantage over other models in the literature, because elicits a more moderate response than the IDM model, which improves wave propagation speed and thus improves traffic flow. I was able to create a new applicable vehicle tracking model that models more realistically, according to the sensitivity factor. To use the vehicle tracking model, i developed a MATLAB code to perform the simulation.

I proved by examination that knowledge of the traffic flow rate is necessary to determine the exact wheel loading force. Mainly in the inner city of Győr, but during long-distance trips outside the city, I recorded a total distance of 1865 km with the help of GPS. I recorded the permitted speed limits in EOV system with CAD software according to the exact location coordinates. I pointed out that the speed of 40 km / h can be maintained in the highest proportion on the examined road sections. I proved that the study is suitable for determining the traffic flow rate.

I have developed an acceleration sensor-based measurement procedure that can measure the dynamic wheel load in road traffic up to a speed of 70 km/h. The measured results can be used for a new type of measurement which based on dynamic wheel load, and part of the road condition assessment system (DWLFI) for road maintenance. From this measure can be determine the magnitude of the wheel load as a function of flow rate, the slope of the wheel load

curve, the remaining service life and the central deflection. Taking these as well as the traffic condition parameters into account, the DWLFI system allows a quick road condition assessment.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] D. Miletics and E. Makó, "Közúti biztonsági audit jelentés az Öttevény-Kunsziget között épülő kerékpárút engedélyezési tervéhez," pp. 1–27, 2018.
[2] L. Gáspár, *Útgazdálkodás*. Budapest: Akadémia kiadó, 2003.
[3] G. Fekete and K. Almássy, "Smart City megoldások a Budapest Közút Zrt.-nél," *MJIK*, 2017.
[4] D. Rys, J. Judycki, and J. Jaskula, "Impact of overloaded vehicles on load equivalency factors and service period of flexible pavements," *CD-ROM Proceedings of BCRRA*, pp. 459–465, 2017.
[5] L. Gáspár, "A 10. Utak, Vasutak és Repülőterek Teherbírásával foglalkozó Nemzetközi Konferencia," vol. 9, no. 15, 2017.
[6] P. Primusz and I. Szentpéteri, "Útpályaszerkezetek modellezése 3.rész," *Útügyi lapok*, 2014.
[7] T. Boromisza, L. Gáspár, and R. Károly, "Útpályaszerkezetek teherbírása Hazai és külföldi eredmények és problémák," *Közúti és mélyépítési szemle*, vol. 58, no. 5–6, pp. 1–9, 2008.
[8] B. Vásárhelyi, *Útépítéstan*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1951.
[9] J. Tímár and G. Major, "Az útburkolatok állapotának felmérése új vizsgálati módszerek segítségével," presented at the Minnotech konferencia, Velence, 2017.
[10] L. Gáspár, *Útburkolat-állapotfelvételi és- értékelési rendszerek*. Budapet: Közlekedéstudományi Intézet, 1983.
[11] W. Hofferberth, "Aquaplaning - Kraftschluss von Fahrzeigreifen auf nassen Strassen," *Strassen- und Tiefbau*, vol. 7, 1966.
[12] H. J. Hücker, "'Nasse' Fharbahnoberflachen - Definition und Einflussfaktoren," *Strasse und Autobahn*, vol. 10, 1971.
[13] E. Fiala, "Strassenwelligkeit, Fahrkomfort und Radlastschwankungen," *Strasse und Autobahn*, vol. 2, 1967.
[14] E. Nemesdy, K. Ambrus, I. Pallós, and K. Török, "Az aszfaltkeverékek mechanikai, és fizikai tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatai," 2000.
[15] B. Reimer, "Fehlerquellen beim Bau Von Betonfahrbahnen," *Strassenbau - Technik*, vol. 11, 1972.
[16] E. Hörz and J. Grandel, "Untersuchung der Sprühfahnenbildung in Abhangigkeit von verschiedenen Fahrbahnoberflachen, Fahrgeschwindigkeiten und Wasserfilmdicken sowie Reifenprofilen," *Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr*, 1978.
[17] B. D. Greenshields, "A study of traffic capacity," *Proc. Highw. Res. Board*, no. 14, pp. 448–477, 1935.
[18] T. Tettamanti, I. Varga, and A. Csikós, *Közúti mérések*. Budapest: Typotex, 2016.
[19] R. Herman, "Theory of Traffic Flow," *American Elsevier Publishing Co.*, 1961.
[20] F. A. Haight, "Mathematical Theories of Traffic Flow," 1963.
[21] D. L. Gerlough and D. G. Capelle, "An Introduction to Traffic Flow Theory," *Highway Research Board*, 1964.
[22] T. Luspay, T. Tettamanti, and I. Varga, *Forgalomirányítás: Közúti járműforgalom modellezése és irányítása*. Budapest: Typotex, 2011.
[23] T. Tettamanti and I. Varga, "Közúti forgalomtechnikai paraméterek mérése és becslése," 2015.
[24] É. Gilicze and G. Debreczeni, "Közlekedési áramlatok," 2014.
[25] "Ethiopian Road Authority: The Developement of Vertical Photography from a Land Rover to Monitor the Performance of Gravel Roads," *Proceeding of Pan African Conference on Highway Maintenance and Rehabilitation*, 1977.

[26] G. L. Dehlen, “A simple Instrument for Measuring the Curvature Induced in a Road Surfacing by a Wheel Load,” *The Civil Engineer in South Africa*, vol. Vol 4., no. No. 9., 1962.
[27] W. Schulte, “Messverfahren zur Beobachtung von Strassen in der Bundesrepublik Deutschland,” *Strasse und Autobahn*, no. 6, 1977.
[28] B. Wehner, “Zusammenwirken von Strassenoberflache und Reifen,” *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, vol. 19, 1962.
[29] L. Gáspár, “Aszfaltburkolatú utak állapotfelvétele,” *Műszaki Tudomány*, no. 58, 1979.
[30] R.R.Bartelsmeyer, C.D. Curtiss, and Wilbur S. Smith, “The AASHO Road Test,” *Highw. Res. Board*, no. Report 6, 1962.
[31] F. H. Scrivner and W. R. Hudson, “A Modification of the AASHO Road Test Serviseability Index Formula,” *Highway Research Record*, no. 46, 1963.
[32] M. Blumer, “Aszfaltburkolatú utak hosszú távú állapotváltozása az alsó és a felső alapréteg típusának függvényében,” *Mélyépítéstudományi Szemle*, no. 9, 1978.
[33] E. L. Skok and M. S. Kersten, “Surface Condition Rating System for Bituminous Pavements,” *NCHRP Research Result Digest*, no. 48, 1973.
[34] W. S. Housel, “Evaluation of Pavement Performance Related to Design Construction,” *Highway Research Board*, no. 46., 1963.
[35] W. S. Housel, “The Michigan Pavement Performance Study for Design Control and Serviceability Rating,” *First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, 1962.
[36] J. W. Lund and L. G. Hendrickson, “Performance Rating for Aggregate-Surfaced Roads,” *Highway Research Record*, no. 311, 1970.
[37] L. F. Holbrook, “An Examination of Concrete Pavement Structural Performance,” no. 311, 1970.
[38] R. V. LeClerc and T. R. Marshall, “Washington’s pavement rating system: procedures and applications,” p. 48, 1970.
[39] G. Suss and E. Axthelm, “Bestimung von Zustandsmerkmalen der flexiblen und starren Fahrbahnbefestigung und Entwurf eines Konzeptes zur Einzelbewertung der Zustandsmerkmale,” *Bericht zu den Forschungsauftragen*, 1981.
[40] M. A. Karan, T. J. Chiristison, A. Cheetlam, and G. Burdahi, “Development and implementation of Alberta’s pavement information nad needs system,” *Transportation Research Board*, pp. 11-20., 1983.
[41] C. H. Juang and S. N. Amirkhanian, “Unified pavement distress index for managing flexible pavements,” *Journal of Transportation Engineering*, pp. 686–699, 1992.
[42] Z. Zhang, N. Singh, and W. R. Hudson, “Comprehensive ranking index for flexible pavement using fuzzy sets model,” *Transportation Research Board*, pp. 96–102, 1993.
[43] S. N. Shoukry, D. R. Martinelli, and J. A. Reigle, “Universal pavement distress evaluator based on fuzzy sets,” *Transportation Research Board*, pp. 180–186, 1997.
[44] Y. U. Shah, S. S. Jain, D. Tiwari, and M. K. Jain, “Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 104, pp. 332–341, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.126.
[45] M. J. Lighthill and G. B. Witham, “On kinematic waves a theory of traffic flow on long crowded roads,” *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, no. 229, pp. 317–345, 1955.
[46] M. J. Lighthill and G. B. Whitham, “On Kinematic Waves. I. Flood Movement in Long Rivers,” *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 229, no. 1178, pp. 281–316, 1955.

[47] T. Péter and S. Fazekas, "Determination of vehicle density of inputs and outputs and model validation for the analysis of network traffic processes," *Period. Polytech. Transp. Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 53–61, 2014, doi: 10.3311/PPtr.7282.
[48] L. A. Pipes, "Car following models and the fundamental diagram of road traffic," *Transp. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–29, May 1967, doi: 10.1016/0041-1647(67)90092-5.
[49] L. A. Pipes, "Wave Theories of Traffic Flow," vol. 280, no. 1, pp. 23–41, 1965.
[50] M. Mauch and M. J. Cassidy, "Freeway Traffic Oscillations: Observations And Predictions," p. 20, 2002.
[51] A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing, "Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity," *Philos. Trans. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 368, no. 1928, pp. 4585–4605, 2010.
[52] B. S. Kerner, "Physics of traffic: empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory," *Springer-Verlag*, 2004.
[53] D. Helbing, "Traffic and related self-driven many-practical systems," *Rev. Mod. Phys.*, no. Vol. 73, pp. 1067–1141, 2001.
[54] W. Leutzbach, "Introduction to the Theory of Traffic Flow," *Springer-Verlag*, p. 204, 1988.
[55] M. Treiber, A. Kesting, and D. Helbing, "Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models," *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 360, no. 1, pp. 71–88, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.physa.2005.05.001.
[56] M. Treiber and D. Helbing, "Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell," p. 7, 2002.
[57] O. Derbel, T. Péter, B. Mourllion, and M. Basset, "Generalized velocity–density model based on microscopic traffic simulation," *Transport*, vol. 33, no. 2, pp. 489–501, Apr. 2017, doi: 10.3846/16484142.2017.1292950.
[58] S. Ossen, S. P. Hoogendoorn, and B. G. Gorte, "Inter-driver differences in car-following: a vehicle trajectory based study," *Transportation Research Record*, no. 1965, pp. 121–129, 2007.
[59] I. Fi, *Utak és környezetük tervezése*. Műegyetemi Kiadó, 2002.
[60] K. Adorjányi, K. Ambrus, M. Karoliny, A. Liptay, and I. Pallós, "Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése," *Útügyi Műszaki Előírás*, p. 34, 2005.
[61] C. Tóth and P. Primusz, "New hungarian mechanistic-empirical design procedure for asphalt pavements," *15.volume*, no. 1 issue, pp. 161–186, 2020.
[62] P. Primusz and C. Tóth, "Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek egyszerűsített analitikus méretezése," pp. 17–33, 2018, doi: 10.24228/KTSZ.2018.5.2.
[63] J. Bajza, *Szemrevételezéses épületdiagnosztika*. TERC KFT., 2003.
[64] G. Markó, P. Primusz, and J. Péterfalfi, "A Benkelman-tartó továbbfejlesztése a behajlási teknő automatizált rögzítéséhez," 2012.
[65] T. Boromisza and L. Gáspár, "Billenőkaros mérőeszköz az útburkolatok teherbíróképességének meghatározására," *Közlekedéstudományi szemle*, vol. 6, no. 6, 1956.
[66] T. Boromisza, "Útburkolatok behajlása," *Mélyépítéstudományi Szemle*, pp. 564–571, 1959.
[67] H. Brandl, D. Adam, F. Kopf, and R. Nidederbrucker, "Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät," *Schriftenreihe Straßenforschung Österr. Forschungsgemeinschaft Straße Verk. FSV*, 2003.
[68] W. Kudla, R. Floss, and C. Trautmann, "Dynamischer Plattendruckversuch – Schnellprüfverfahren für die Qualitatssicherung von ungebundenen Scichten," *Str. Autob.*, 1991.

[69] N. H. Thom and P. R. Fleming, "Experimental and Theoretical Comparison of Dynamic Plate Testing Methods," *Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields,* no. 1, pp. 731–740, 2002.
[70] I. Subert, "A dinamikus tömörségmérés aktuális kérdései," presented at the Geotechnika konferencia, Ráckeve, 2005.
[71] L. Gáspár, F. Horváth, and L. Lublóy, *Közlekedési létesítmények élettartama*. Győr: Universitas-Győr Nonprofit Kft., 2011.
[72] S. Koller, *Forgalomtechnika*. Budapest: Tamkönyvkiadó, 1976.
[73] G. Markó, P. Primusz, and J. Péterfalvi, "Hajlékony útburkolatok élettartamának meghatározása a továbbfejlesztett kézi behajlásmérés alkalmazásával," *Konf. Kiadv.,* Oct. 2011.
[74] I. Fi, "Háromrétegű rendszerek gépi úton való lehajlásszámítása útpályaszerkezetek méretezéséhez," *Mélyépítéstudományi szemle*, vol. XXIV. évf., no. 1, pp. 33–36, 1974.
[75] Á. Kézdi, *Talajmechanika II*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1954.
[76] E. Nemesdy, "Útpályaszerkezetek méretezésének és anyagállandó-vizsgálatainak mechanikai alapja," Budapest, 1985.
[77] B. Vásárhelyi, *Közúti közlekedésünk és útjaink helyzete, In:Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények*, vol. 1. Budapest: Akadémiai kiadó, 1958.
[78] T. Boromisza, "Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének gyakorlata," *Méret. Prakt.,* no. 16, 1997.
[79] Rowe, G. M. and Sharrock, M. J., "Alternate Shift Factor Relationship for Describing Temperature Dependency of Viscoelastic Behavior of Asphalt Materials," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* vol. 2207, no. 1, pp. 125–135, 2011.
[80] H. Greenberg, "An Analysis of Traffic Flow," *Oper. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 79–85, 1959.
[81] B. Kiss and A. Krebsz, *Valószínűségszámítás és matematikai statisztika*. 2006.
[82] K. Havancsák, *Mérési adatok kezelése és értékelése*. Typotex, 2012.
[83] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," *Phys. Rev. E,* vol. 62, no. 2, pp. 1805–1824, Aug. 2000, doi: 10.1103/PhysRevE.62.1805.
[84] G. Hoxha, A. Shala, and R. Likaj, "Vehicle Speed Determination in Case of Road Accident by Software Method and Comparing of Results with the Mathematical Model," *Strojnícky Cas. – J. Mech. Eng.,* vol. 67, no. 2, pp. 51–60, Nov. 2017, doi: 10.1515/scjme-2017-0017.
[85] A. P. Azodo, "Survey on Road-Tyre Contact Patch Pattern and Wear Related Aspects," *Strojnícky Cas. – J. Mech. Eng.,* vol. 67, no. 2, pp. 5–12, Nov. 2017, doi: 10.1515/scjme-2017-0013.
[86] R. A. Vincent and C. P. Young, "Self-optimizing traffic signal control using microprocessor: The TRLL MOVA strategy for isolated intersections," *Traffic Engineering and Control,* no. 27, pp. 358–387, 1986.
[87] Z. Soós, Zs. Igazvölgyi, and F. Szakály, "Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek megerősítésének diagnosztikai kérdései," *Útügyi Lapok,* vol. 5, no. 1, p. 11, 2017.
[88] Albert J., Bush III, and Gilbert Y. Baladi, *Nondestructive Testing of Pavement and Backcalculation of Moduli*. Philadelphia, PA 19103, 1989.
[89] 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.
[90] D. Lechner, "Analyse du comportement dynamique des vehicules routiers l´egers: d´eveloppement d'une m´ethodologie appliqu´ee `a la s´ecurit´e primaire.," *Ph. D, dissertation Ecole Centrale de Lyon, France,* 2002.

[91] 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.
[92] U. Kiencke and L. Nielsen, "Automotive control systems," *Springer*, 2000.
[93] 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.
[94] T. Boromisza, "Aszfaltburkolatú utak teherbírásának vizsgálata behajlásméréssel, In: Mélyépítéstudományi Szemle," vol. XXVI., no. 12, pp. 521–528, 1976.
[95] L. Ilosvai, "Gépjárművek tervezése és vizsgálata III. Kézirat," p. 126, 1983.
[96] Á. Zsáry, *Gépelemek I.*, vol. I. Kötet. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 1999.
[97] Burmister D. M., "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems," *Journal of Applied Physics*, vol. 16, no. 2, pp. 89–94, 1945.
[98] G. Bérces *et al.*, *A fizika alapjai*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 2002.

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

[S1] Mika P., ‘A közúti forgalmi hullámok vizsgálati módszereinek elemzése’, *Új Nemzeti Kiválóság Program Tanulmánykötet*, pp. 191–198, 2018.

[S2] P. Mika, ‘Adaptive Car Following Model’, *Strojnícky casopis – J. Mech. Eng.*, vol. 68, no. 3, pp. 281–288, Nov. 2018, doi: 10.2478/scjme-2018-0041.

[S3] P. Mika, ‘How to analyze traffic waves’, *Hadmérnök*, vol. XIII., no. 3, pp. 101–113, 2018.

[S4] Mika P., ‘Járműtrajektória előállítása gyorsulás szenzorból nyert adatokból’, *Közlekedéstudományi Szemle*, vol. 69, no. 5, pp. 18–28, 2019, doi: 10.24228/KTSZ.2019.5.2.

[S5] Mika P., ‘Giroszkóppal kompenzált gyorsulás szenzoros járműtrajektória mérés’, *Közlekedéstudományi Szemle*, vol. 70, no. 5, pp. 34-47, 2020, doi: 10.24228/KTSZ.2020.5.3.

[S6] Mika P., ‘Pályaszerkezet hátralévő élettartam becslés a keréktalperő alapján’, *Közlekedéstudományi Szemle*, vol. 70, no. 6, pp. 21-33, 2020, doi. 10.24228/KTSZ.2020.6.2

[S7] Mika P.., ‘Dinamikus keréktalperő mérés a közúti forgalomban’, *Közlekedéstudományi Szemle*, vol. 71, no. 2, pp. 33-47, 2021, doi. 10.24228/KTSZ.2021.2.

[S8] Hajdu, F., Szalai, P., Mika, P., Kuti, R.: Parameter Identification of a Fire Truck Suspension for Vibration Analysis, Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences, Vol. 14 No. 3, 2019, pp. 51-62.

[S9] Hajdu, F., Mika, P., Szalai, P., Horváth, P., Kuti, R.: Determination of Vibrations Caused by the Road Profile in Case of a Fire Truck, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and technology Vol. 6 No. 3, 2019, pp. 52-58.

[S10] Hajdu, F., Mika, P.: Road Failure Measurement for Numerical Simulation of a Nonlinear Fire Truck Suspension, Proceedings of the IIER International Conference, Helsinki, Finland, 17th-18th February 2019, pp. 1-6.

I. MELLÉKLET

AZ ÚT ÁLLAPOTRENDSZERÉNEK ISMERTETÉSE

AZ ÚT ÁLLAPOTRENDSZER LEÍRHATÓ A KÖVETKEZŐKKEL

BURKOLAT ÁLLAPOT / FORGALMI PARAMÉTER

PARAMÉTEREK

IDŐBEN ÁLLANDÓ

① FELÜLETI TEXTÚRA	② FELÜLETI EGYENETLENSÉG	③ FELÜLETI HIBÁK	④ ALAKVÁLTOZÁSI TULAJDONSÁG	⑤ SZERKEZETI JELLEMZŐK	⑥ VONALVEZETÉSI JELLEMZŐK	⑦ KERESZTMETSZETI JELLEMZŐK	⑧ ÜZEMI JELLEMZŐK	⑨ CSOMÓPONTI JELLEMZŐK	⑩ EGYÉB JELLEMZŐK	⑪ FORGALMI ADATOK	⑫ BALESETI ADATOK
				burkolat típusa pályaszerkezet felépítése egyenérték vastagság relatív bitumen tartalom	emelkedők vízszintes ívek sugara hosszelvényi ívek sugara szegély lekerekítőívek sugara előzési látótávolság megállási látótávolság fékezési látótávolság	szabályozási szélesség építési szélesség közterület szélessége kapaszkodó sávok száma forgalmi és várakozó sávok száma elválasztó sávok száma forgalmi sávok szélessége kiemelt szegély	átkelési szakaszok út- és vasútkeresztezés oldalirányú akadályok	*észlelhetőség *áttekinthetőség *helyszínrajzi kialakítás balra kanyarodás lehetősége			

IDŐBEN VÁLTOZÓ, LEVEZETETT

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
	esésváltozás	-egyes repedés a pályán -hálós repedés a keréknyomban -hézagok állapota -lépcsőképződés -foltozások -burkolatjelek	*útburkolat állapota *kopóréteg megfelelősége	pályaszerkezet teherbírása **dinamikus keréktalperő** hátralévő élettartam rugalmassági modulus tömörség			erőátadás kerékellenállás statikus tengelysúly	járhatóság jelzőlámpa szükségessége	fényvisszaverő képesség	ÁNF, MOF$_{50}$, ÉÁNF } forgalomnagyság csomóponti kapacitás járműsebesség forgalomáramlás sebessége hullámterjedés sebessége forgalomsűrűség, járműsűrűség **járműszaturáció** forgalomszaturáció időbeli foglaltság követési idő	

IDŐBEN VÁLTOZÓ

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
makroérdesség mikroérdesség	keresztirányú egyenetlenség hosszirányú hosszú hullámok hosszirányú rövid hullámok	*kötőanyagszegény áll. *porozitás *anyagkipergés *kötőanyag feldúsulás *textúra inhomogenitás *zúzalék mennyisége *zúzalék eloszlása	az egyes rétegek alakváltozása a teljes szerkezet alakváltozása víztelenítési viszonyok víztelenítő berendezések magas padka nyomvályú képződés	*padka teherbírása *szegély és padka állapota központi behajlás behajlási teknő görbülete		koronaszélesség útburkolatszélesség autóbusz megállók száma kerékpárút kiépítettsége csatornázás járda kiépítettsége	-közműadatok -forgalomszabályozás módja -burkolat kopásmérés		utazási kényelem vízködképződés zaj tömegközlekedési eszköz taxi töltőállomások parkoló		baleset helye baleset ideje *baleset oka kimenetel súlyossága keletkezett anyagi kár időjárási viszonyok

FELVÉTELI MÓDSZEREK

GÉPI

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
Moore-féle kifolyásmérő sztereofényképezés RST mérőkocsi	profilográf planográf goniográf zürichi ETH szögmérő BUMP integrator Bajor egyenetlenség mérő szovjet TKH-2 dinamikus hosszprofil elemző berlini Mű. Egy. mérőutánfutója High Speed Profilometer (HSP) FMPA Slopemeter Holland nyomvályú mérő BIFROST profilmérő fényképes vályúmélységmérő AASHO-profilometer CHLOE-profilometer sokkerekes profilometer APL hossz-szelv. elemző készülék Michigan Truck-M. Profilometer PCA Road Meter	Roadrecon (japán) GERPHO (francia) BASt fotoauto (Köln)	optikai behajlásmérő Benkelman tartó Lacroix-deflektográf Kaliforniai vagy Dán mozgó behajlásmérő Dynaflect mérőberendezés ejtősúlyos berendezés (FWD) lengetőberendezés Curivameter (francia) **dinamikus keréktalperő mérő** geofon	szintező teodolit lézeres távolságmérő mérőállomás CAMEROUTE-készülék GYROS-kocsi		gépkocsi fékút mérés Skiddometer Remorque LPC Stuttgarti surlódásmérő SCRIM My-Meter Stradograph SRT (angol) csúszásellenállásmérő neutronszonda beépített mérőcsap statikus tengelysúlymérés LS-WIM HS-WIM			Grandel/Hörz-féle mérő	-hurokdetektor -földmágnesességen alapuló módszer (VMI) -pneumatikus elven működő érzékelés -piezzoelektromos járműérzékelő -videokamera -fénymegszakításon alapuló mód. -infravörös érzékelő -ultrahangos érzékelő -LIDAR érzékelő -felsővezeték érzékelő -rádiós kapcsolaton alapuló érzék. **-giroszkóppal kompenzált gyorsulás szenzoros trajektóriamérő módszer (FCD)** -közúti GPS alapú forgalom áramlási sebességmérési módszer (FCD)	

KÉZI

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
homokszórásos módszer	mérőléc és ék gördülő mérőléc Ostwald-féle mérő	szemrevételezéses mód	szemrevételezéses módszer		mérőszalag mérőléc vízmérték esésmérő berendezés		eközmű rendszer KIRA	szemrevételezéses módszer		Kézi számlálás OKA	szemrevételezéses módszer baleseti jegyzőkönyv

ÉRTÉKELŐ RENDSZEREK

KÜLFÖLDI

BURKOLAT ÁLLAPOT

⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲
PSR (Present Serviceability Rating) Kanada (1958) pillanatnyi használhatósági értékelés	PSI (Present Serviceability Index) AASHO (1960) pillanatnyi használhatósági index	p – Texas Transport Institute (1963) használhatósági index	RI – Michigan (1963) hullámossági index	PI – Oregon (1970) viselkedési indexszám	I – Michigan (1970) szerkezeti romlási index	PCI (Pavement Condition Index) Washington (1970) kombinált index
⑳						
egyes állapotjelző paraméterek külön-külön történő értékelésén alapuló eljárás (1981)	PQI (Pavement Quality Index) (1983) minőségi index	RCI (Riding Comfort Index) (1983) utazási komfort index	SAI (Structural Adequacy Index) (1983) szerkezeti megfelelőségi index	SDI (Surface Distress Index) (1983) felület veszélyeségi index	UPDI (Unified Pavement Distress Index) (1992) egységes felület veszélyeségi index	OAI (Overall Acceptability Index) (1993) általános elfogadhaság index
	㉑					
FDI (Fuzzy Distress Index) (1997) Fuzzy veszélyességi index	OPI (Overall Pavement Index) (2001) pillanatnyi használhatósági index	OPCI (Overall Pavement Condition Index) (2013) általános kombinált index	RQR (Ride Quality Rating) (2013) utazási minőség index			

FORGALMI PARAMÉTER

㉒
fundamentális diagram

MAGYAR

㉓	㉔	㉕
a 13 műszaki jellemzőt értékelő rendszer (1958)	komplex értékelési rendszer – KÖTUKI (1974)	szubjektív útállapot értékelési rendszer – (1979)

㉖	㉗
keresztmetszeti forgalomnagyságok módszere	közúti biztonsági audit
㉘ **járműtrajektóriák módszere (ACFM modell)**	㉙ baleseti statisztika
㉚ baleseti ponttérkép	㉛ baleseti kockázat elemzés
㉜ baleseti szimuláció	

ÚT ÁLLAPOT

㉝
DWLFI - (2020) Dynamic Wheel Loading Force Index Dinamikus keréktalperő index

*szubjektív állapotparaméterek

II. MELLÉKLET

TÁBLÁZAT A SEBESSÉGHATÁROK BETARTÁSÁNAK VIZSGÁLATÁHOZ

			20 km/h szakasz				30 km/h szakasz				40 km/h szakasz				50 km/h szakasz				60 km/h szakasz				70 km/h szakasz				90 km/h szakasz			
Utazás száma	Megtett táv (m)	Utazási idő (perc)	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza	Sebességhatár alatti szakasz hossza	Sebességhatár feletti szakasz hossza	Sebességtartás szakasz hossza (10%)	Szakasz hossza
1	9 712	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 831	933	1 331	5 095	-	-	-	-	-	-	-	-	4 591	-	26	4 617
2	83 880	98	-	-	-	-	25	32	40	97	182	380	1 058	1 620	15 179	2 150	10 347	27 676	1 268	-	884	2 152	1 760	50	1 200	3 010	45 759	-	3 566	49 325
3	78 076	92	-	-	-	-	-	-	-	-	773	216	692	1 681	15 884	2 565	6 786	25 235	1 780	113	1 200	3 093	1 620	721	224	2 565	21 406	296	23 800	45 502
4	8 970	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 859	360	1 180	4 399	-	-	-	-	-	-	-	-	4 586	-	-	4 586
5	5 776	14	13	46	12	71	-	319	91	410	-	-	-	-	3 706	2 398	1 152	7 256	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	17 768	44	-	-	-	-	912	-	-	912	271	-	35	306	10 291	127	1 494	11 912	2 710	-	-	2 710	685	-	21	706	1 222	-	-	1 222
7	123 542	134	-	-	-	-	-	-	-	-	455	560	848	1 863	18 376	5 029	8 173	31 578	2 566	940	1 688	5 194	2 484	51	1 912	4 447	35 235	8 573	36 652	80 460
8	3 203	10	-	-	-	-	175	339	20	534	-	-	-	-	2 535	36	98	2 669	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	3 415	9	46	-	25	71	100	40	158	298	-	-	-	-	2 390	18	638	3 046	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3 589	11	58	-	-	58	157	362	176	695	-	-	-	-	2 336	-	500	2 836	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	3 765	11	91	81	13	185	176	334	39	549	-	-	-	-	2 869	-	162	3 031	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2 099	7	-	-	-	-	57	173	37	267	-	-	-	-	1 723		109	1 832	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	745	3	-	-	-	-	376	-	-	376	-	-	-	-	369	-	-	369	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	4 587	14	69	-	13	82	225	475	155	855	-	-	-	-	3 560	-	90	3 650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	4 688	16	108	61	39	208	195	355	202	752	-	-	-	-	3 684	-	44	3 728	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	500	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	-	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2 665	7	-	-	-	-	353	155	138	646	-	-	-	-	1 911	-	108	2 019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	2 973	11	-	-	-	-	462	102	76	640	-	-	-	-	2 303	-	30	2 333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	4 269	14	66	-	26	92	107	89	101	297	-	-	-	-	3 072	388	420	3 880	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3 779	13	94	62	42	198	140	355	20	515	-	-	-	-	3 037	-	29	3 066	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	501	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	501	-	-	501	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	527	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	527	-	-	527	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	155 527	165	-	-	-	-	465	340	213	1 018	739	827	204	1 770	22 205	5 795	14 106	42 106	1 451	1 139	1 292	3 882	1 704	256	742	2 702	65 025	7 360	31 664	104 049
24	4 944	8	-	-	-	-	200	-	-	200	-	-	-	-	1 587	-	153	1 740	148	-	18	166	-	-	-	-	2 839	-	-	2 839
25	680	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	680	-	-	680	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	1 285	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	931	-	353	1 284	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	735	2	-	-	-	-	23	-	-	23	-	-	-	-	713	-	-	713	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	17 185	22	-	-	-	-	-	-	-	-	75	15	38	128	4 418	108	1 561	6 087	219	-	498	717	988	-	64	1 052	9 200	-	-	9 200
29	134 890	150	-	-	-	-	338	12	18	368	1 131	15	60	1 206	30 396	1 055	5 305	36 756	2 857	421	280	3 558	3 347	-	-	3 347	89 444	-	211	89 655
30	14 069	18	-	-	-	-	139	-	-	139	-	-	-	-	1 359	38	194	1 591	1 423	-	-	1 423	339	-	22	361	10 503	-	53	10 556
31	3 720	9	-	-	-	-	112	-	66	178	-	-	-	-	1 981	-	346	2 327	668	-	197	865	-	-	-	-	350	-	-	350
32	4 553	12	79	56	13	148	144	470	93	707	-	-	-	-	3 158	415	125	3 698	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	5 452	15	-	-	-	-	199	-	19	218	-	-	-	-	2 097	594	121	2 812	259	-	56	315	-	-	-	-	2 080	-	27	2 107
34	5 820	16	47	30		77	235	670	56	961	-	-	-	-	3 660	491	632	4 783	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	2 695	8	-	-	-	-	325	162	149	636	-	-	-	-	1 797	187	75	2 059	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	5 648	15	36	164	-	200	298	1 060	112	1 470	-	-	-	-	2 920	729	328	3 977	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	7 083	14	116	67	37	220	75	152	38	265	-	-	-	-	3 388	1 859	888	6 135	-	-	-	-	141	-	47	188	221	-	54	275
38	5 647	15	36	93	-	129	243	1 017	74	1 334	-	-	-	-	3 055	770	358	4 183	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	7 058	14	116	67	37	220	28	237	-	265	-	-	-	-	3 446	1 877	812	6 135	-	-	-	-	188	-	-	188	221	-	54	275
40	44 104	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 976	4 145	207	8 328	631	630	355	1 616	-	286	116	402	15 157	10 223	8 378	33 758
41	16 271	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 792	2 714	690	6 196	-	-	-	-	-	-	-	-	3 245	399	6 431	10 075
42	7 880	11	28	30	-	58	80	-	19	99	-	-	-	-	1 783	574	182	2 539	-	-	-	-	170	-	-	170	4 486	-	528	5 014
43	3 787	11	-	-	-	-	177	351	37	565	-	-	-	-	2 994	213	15	3 222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	9 596	16	-	-	-	-	15	107	38	160	-	-	-	-	3 288	2 384	1 291	6 963	-	-	-	-	82	25	46	153	2 320	-	-	2 320
45	13 084	24	-	-	-	-	109	380	19	508	-	-	-	-	5 704	2 438	2 612	10 754	-	-	-	-	-	-	-	-	1 822	-	-	1 822
46	1 617	4	-	-	-	-	30	11	-	41	-	-	-	-	1 465	111	-	1 576	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	1 343	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 047	133	163	1 343	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	64 734	68	-	-	-	-	42	130	19	191	102	219	130	451	7 201	4 458	564	12 223	2 004	833	824	3 661	112	-	250	362	35 193	3 143	9 510	47 846
49	51 912	60	-	-	-	-	-	-	-	-	368	534	511	1 413	5 506	4 569	1 173	11 248	-	169	94	263	234	-	-	234	29 267	5 952	3 534	38 753
50	63 706	68	-	-	-	-	13	302	51	366	109	407	113	629	5 171	2 587	7 141	14 899	127	116	193	436	2 403	82	909	3 394	40 995	245	2 743	43 983
51	2 076	6	21	30	-	51	317	242	150	709	-	-	-	-	1 293	24	-	1 317	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	3 819	14	47	-	-	47	146	355	56	557	-	-	-	-	3 078	42	94	3 214	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	4 500	11	21	30	-	51	30	175	-	205	-	-	-	-	3 039	1 024	181	4 244	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	23 303	29	15	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	5 622	3 306	2 477	11 405	-	-	-	-	180	54	138	372	8 429	1 375	1 707	11 511
55	13 710	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 947	1 078	1 380	5 405	-	-	-	-	-	-	-	-	5 697	583	2 025	8 305
56	9 842	13	-	38	-	38	-	-	-	-	-	-	-	-	2 428	1 739	452	4 619	-	131	37	168	185	139	67	391	3 888	65	673	4 626
57	3 850	12	37	15	-	52	173	391	19	583	-	-	-	-	3 008	177	30	3 215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	4 391	15	32	30	-	62	242	438	18	698	-	-	-	-	3 518	42	71	3 631	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	4 369	13	36	-	-	36	362	329	37	728	-	-	-	-	3 497	107	-	3 604	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	19 551	26	-	-	-	-	149	-	-	149	-	-	-	-	3 969	1 690	1 392	7 051	177	-	-	177	-	-	-	-	11 933	65	176	12 174
61	1 598	4	-	-	-	-	102	60	131	293	-	-	-	-	1 177	37	90	1 304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	4 439	11	11	49	13	73	87	117	18	222	-	-	-	-	3 018	1 001	124	4 143	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	23 479	26	8	38	-	46	-	-	-	-	-	-	-	-	4 313	4 851	2 328	11 492	13	52	75	140	122	126	162	410	7 364	981	3 046	11 391
64	9 458	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 679	1 559	1 725	4 963	-	-	-	-	-	-	-	-	3 301	448	745	4 494
65	4 229	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	581	898	375	1 854	-	-	-	-	-	-	-	-	320	256	1 799	2 375
66	4 640	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 285	878	300	2 463	-	104	19	123	230	-	-	230	1 327	-	498	1 825
67	7 167	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 240	1 583	751	4 574	-	-	-	-	-	-	-	-	2 594	-	-	2 594
68	4 483	13	26	30	-	56	162	542	19	723	-	-	-	-	3 380	324	-	3 704	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	1 644	4	23	-	-	23	154	346	75	575	-	-	-	-	1 047	-	-	1 047	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	1 905	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 389	366	150	1 905	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	2 307	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 114	164	29	2 307	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	1 594	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 145	193	256	1 594	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	55 097	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 677	7 344	2 938	20 959	100	77	37	214	180	445	112	737	13 919	5 588	13 679	33 186
74	7 182	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	663	1 002	599	2 264	-	-	-	-	-	-	-	-	3 507	447	964	4 918
75	41 516	54	-	-	-	-	452	-	-	452	-	-	-	-	8 904	4 208	1 558	14 670	-	88	19	107	245	-	-	245	13 110	680	12 252	26 042
76	4 812	12	42	166	67	275	167	526	56	749	-	-	-	-	3 467	228	94	3 789	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	4 774	11	131	116	54	301	-	-	-	-	-	-	-	-	2 588	854	444	3 886	-	-	-	-	-	-	-	-	587	-	-	587
78	7 474	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5 993	954	167	7 114	-	-	-	-	-	-	-	-	361	-	-	361
79	4 610	11	19	45	-	64	238	554	55	847	-	-	-	-	3 363	244	92	3 699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	4 521	13	47	15	-	62	227	551	37	815	-	-	-	-	3 422	163	59	3 644	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	155 095	156	-	-	-	-	269	477	132	878	364	371	275	1 010	17 441	16 850	5 549	39 840	2 548	1 204	957	4 709	1 898	398	1 232	3 528	65 514	22 150	17 464	105 128
82	7 919	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 056	1 659	177	4 892	-	-	-	-	-	-	-	-	2 413	614	-	3 027
83	157 111	145	-	-	-	-	114	442	56	612	296	268	222	786	13 923	20 111	5 445	39 479	2 404	1 541	1 598	5 543	1 225	2 397	541	4 163	40 361	49 243	16 924	106 528
84	4 387	11	26	30	-	56	134	503	94	731	-	-	-	-	3 346	115	139	3 600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	2 593	9	90	75	14	179	293	333	56	682	-	-	-	-	1 664	37	31	1 732	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	3 040	10	-	-	-	-	332	195	139	666	-	-	-	-	2 173	141	60	2 374	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	1 868	4	-	-	-	-	102	64	112	278	-	-	-	-	1 255	257	79	1 591	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	2 024	5	-	-	-	-	53	175	37	265	-	-	-	-	1 619	95	45	1 759	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	4 530	14	21	30	-	51	287	494	28	809	-	-	-	-	3 467	159	45	3 671	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	3 019	8	26	15	-	41	131	23	-	154	-	-	-	-	2 450	344	30	2 824	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	2 618	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 925	453	240	2 618	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	5 755	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 949	2 444	362	5 755	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
93	4 180	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 321	1 319	540	4 180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	4 324	11	38	-	-	38	199	500	-	699	-	-	-	-	3 146	332	109	3 587	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
95	2 924	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 369	465	90	2 924	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
96	3 149	12	-	-	-	-	68	86	93	247	-	-	-	-	2 714	173	15	2 902	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	156 103	183	-	-	-	-	442	190	284	916	1 107	15	275	1 397	28 982	5 961	4 981	39 924	3 950	324	582	4 856	2 213	81	1 295	3 589	81 788	5 459	18 174	105 421
98	11 316	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 593	613	337	2 543	1 201	116	492	1 809	-	-	-	-	6 516	32	416	6 964
99	8 087	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4 089	942	-	5 031	-	-	-	-	-	-	-	-	2 920	136	-	3 056
100	14 368	20	-	-	-	-	669	4 215	38	4 922	-	-	-	-	375	209	46	630	1 111	192	530	1 833	-	-	-	-	6 405	96	482	6 983
ÖSSZEG:	1 865 km	42 h				4 km				38 km				14 km				674 km				50 km				37 km				1 050 km

	20 km/h szakasz			30 km/h szakasz			40 km/h szakasz			50 km/h szakasz			60 km/h szakasz			70 km/h szakasz			90 km/h szakasz		
Utazás száma	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)	Sebességhatár alatti szakasz (%)	Sebességhatár feletti szakasz (%)	Sebességtartás szakasz (%)
1										56%	18%	26%							99%	0%	1%
2				26%	33%	41%	11%	23%	65%	55%	8%	37%	59%	0%	41%	58%	2%	40%	93%	0%	7%
3							46%	13%	41%	63%	10%	27%	58%	4%	39%	63%	28%	9%	47%	1%	52%
4										65%	8%	27%							100%	0%	0%
5	18%	65%	17%	0%	78%	22%				51%	33%	16%									
6				100%	0%	0%	89%	0%	11%	86%	1%	13%	100%	0%	0%	97%	0%	3%	100%	0%	0%
7							24%	30%	46%	58%	16%	26%	49%	18%	32%	56%	1%	43%	44%	11%	46%
8				33%	63%	4%				95%	1%	4%									
9	65%	0%	35%	34%	13%	53%				78%	1%	21%									
10	100%	0%	0%	23%	52%	25%				82%	0%	18%									
11	49%	44%	7%	32%	61%	7%				95%	0%	5%									
12				21%	65%	14%				94%	0%	6%									
13				100%	0%	0%				100%	0%	0%									
14	84%	0%	16%	26%	56%	18%				98%	0%	2%									
15	52%	29%	19%	26%	47%	27%				99%	0%	1%									
16										100%	0%	0%									
17				55%	24%	21%				95%	0%	5%									
18				72%	16%	12%				99%	0%	1%									
19	72%	0%	28%	36%	30%	34%				79%	10%	11%									
20	47%	31%	21%	27%	69%	4%				99%	0%	1%									
21										100%	0%	0%									
22										100%	0%	0%									
23				46%	33%	21%	42%	47%	12%	53%	14%	34%	37%	29%	33%	63%	9%	27%	62%	7%	30%
24				100%	0%	0%				91%	0%	9%	89%	0%	11%				100%	0%	0%
25										100%	0%	0%									
26										73%	0%	27%									
27				100%	0%	0%				100%	0%	0%									
28							59%	12%	30%	73%	2%	26%	31%	0%	69%	94%	0%	6%	100%	0%	0%
29				92%	3%	5%	94%	1%	5%	83%	3%	14%	80%	12%	8%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
30				100%	0%	0%				85%	2%	12%	100%	0%	0%	94%	0%	6%	99%	0%	1%
31				63%	0%	37%				85%	0%	15%	77%	0%	23%				100%	0%	0%
32	53%	38%	9%	20%	66%	13%				85%	11%	3%									
33				91%	0%	9%				75%	21%	4%	82%	0%	18%				99%	0%	1%
34	61%	39%	0%	24%	70%	6%				77%	10%	13%									
35				51%	25%	23%				87%	9%	4%									
36	18%	82%	0%	20%	72%	8%				73%	18%	8%									
37	53%	30%	17%	28%	57%	14%				55%	30%	14%				75%	0%	25%	80%	0%	20%
38	28%	72%	0%	18%	76%	6%				73%	18%	9%									
39	53%	30%	17%	11%	89%	0%				56%	31%	13%				100%	0%	0%	80%	0%	20%
40										48%	50%	2%	39%	39%	22%	0%	71%	29%	45%	30%	25%
41										45%	44%	11%							32%	4%	64%
42	48%	52%	0%	81%	0%	19%				70%	23%	7%				100%	0%	0%	89%	0%	11%
43				31%	62%	7%				93%	7%	0%									
44				9%	67%	24%				47%	34%	19%				54%	16%	30%	100%	0%	0%
45				21%	75%	4%				53%	23%	24%							100%	0%	0%
46				73%	27%	0%				93%	7%	0%									
47										78%	10%	12%									
48				22%	68%	10%	23%	49%	29%	59%	36%	5%	55%	23%	23%	31%	0%	69%	74%	7%	20%
49							26%	38%	36%	49%	41%	10%	0%	64%	36%	100%	0%	0%	76%	15%	9%
50				4%	83%	14%	17%	65%	18%	35%	17%	48%	29%	27%	44%	71%	2%	27%	93%	1%	6%
51	41%	59%	0%	45%	34%	21%				98%	2%	0%									
52	100%	0%	0%	26%	64%	10%				96%	1%	3%									
53	41%	59%	0%	15%	85%	0%				72%	24%	4%									
54	100%	0%	0%							49%	29%	22%				48%	15%	37%	73%	12%	15%
55										55%	20%	26%							69%	7%	24%
56	0%	100%	0%							53%	38%	10%	0%	78%	22%	47%	36%	17%	84%	1%	15%
57	71%	29%	0%	30%	67%	3%				94%	6%	1%									
58	52%	48%	0%	35%	63%	3%				97%	1%	2%									
59	100%	0%	0%	50%	45%	5%				97%	3%	0%									
60				100%	0%	0%				56%	24%	20%	100%	0%	0%				98%	1%	1%
61				35%	20%	45%				90%	3%	7%									
62	15%	67%	18%	39%	53%	8%				73%	24%	3%									
63	17%	83%	0%							38%	42%	20%	9%	37%	54%	30%	31%	40%	65%	9%	27%
64										34%	31%	35%							73%	10%	17%
65										31%	48%	20%							13%	11%	76%
66										52%	36%	12%	0%	85%	15%	100%	0%	0%	73%	0%	27%
67										49%	35%	16%							100%	0%	0%
68	46%	54%	0%	22%	75%	3%				91%	9%	0%									
69	100%	0%	0%	27%	60%	13%				100%	0%	0%									
70										73%	19%	8%									
71										92%	7%	1%									
72										72%	12%	16%									
73										51%	35%	14%	47%	36%	17%	24%	60%	15%	42%	17%	41%
74										29%	44%	26%							71%	9%	20%
75				100%	0%	0%				61%	29%	11%	0%	82%	18%	100%	0%	0%	50%	3%	47%
76	15%	60%	24%	22%	70%	7%				92%	6%	2%									
77	44%	39%	18%							67%	22%	11%							100%	0%	0%
78										84%	13%	2%							100%	0%	0%
79	30%	70%	0%	28%	65%	6%				91%	7%	2%									
80	76%	24%	0%	28%	68%	5%				94%	4%	2%									
81				31%	54%	15%	36%	37%	27%	44%	42%	14%	54%	26%	20%	54%	11%	35%	62%	21%	17%
82										62%	34%	4%							80%	20%	0%
83				19%	72%	9%	38%	34%	28%	35%	51%	14%	43%	28%	29%	29%	58%	13%	38%	46%	16%
84	46%	54%	0%	18%	69%	13%				93%	3%	4%									
85	50%	42%	8%	43%	49%	8%				96%	2%	2%									
86				50%	29%	21%				92%	6%	3%									
87				37%	23%	40%				79%	16%	5%									
88				20%	66%	14%				92%	5%	3%									
89	41%	59%	0%	35%	61%	3%				94%	4%	1%									
90	63%	37%	0%	85%	15%	0%				87%	12%	1%									
91										74%	17%	9%									
92										51%	42%	6%									
93										56%	32%	13%									
94	100%	0%	0%	28%	72%	0%				88%	9%	3%									
95										81%	16%	3%									
96				28%	35%	38%				94%	6%	1%									
97				48%	21%	31%	79%	1%	20%	73%	15%	12%	81%	7%	12%	62%	2%	36%	78%	5%	17%
98										63%	24%	13%	66%	6%	27%				94%	0%	6%
99										81%	19%	0%							96%	4%	0%
100				14%	86%	1%				60%	33%	7%	61%	10%	29%				92%	1%	7%
ÖSSZEG:	54%	39%	7%	42%	45%	13%	45%	27%	28%	75%	15%	10%	52%	23%	25%	66%	14%	20%	79%	6%	16%

Átlagsebesség 44 km/h

Megtett távolság 90 es sebesség	56%
Megtett távolság 50 es sebesség	36%

Megj.: A megengedett eltérés +-10%.

III. MELLÉKLET

DWLFI ÚTÁLLAPOTÉRTÉKELŐ LAP

DWLFI ÚTÁLLAPOT-ÉRTÉKELŐ LAP

ÚT ÉS IDŐJÁRÁSI ADATOK

Dátum:	Időjárás:	Út adatok:
	Száraz idő ☐	Út neve: _____
	Esős idő ☐	Út száma: _____
		Szelvényszám-tól: _____
		Szelvényszám-ig: _____
		Útburkolat szélessége: _____
		HRSZ: _____

ÚTÁLLAPOT ADATOK HATÁRÉRTÉKEI

Sorszám	Állapotparaméter	Állapotjellemző	Mértékegység	1. Állapotszint Nagyon jó	2. Állapotszint jó	3. Állapotszint kielégítő	4. Állapotszint eltűrhető	5. Állapotszint elfogadhatatlan
1.	Forgalmi telítettség	A létesítmény kapacitás kihasználtsága	[%]	≤ 50	51-63	64-76	77-89	90 ≤
2.	Forgalom áramlás sebesség arány	A forgalomáramlási sebesség a megengedett sebességtartományon belüli és kívüli eloszlásának súlyozott számtani átlaga	[%]	≤ 50	51-63	64-76	77-89	90 ≤
3.	Forgalmi hullám terjedési sebessége	Hullámterjedés sebessége a járműtrajektória módszer szerint	[m/s]	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤
4.	Keréktalperő görbe meredeksége	A meredekség százalékban	[%]	0-10	11-15	16-20	21-25	26 ≤
5.	Keréktalperő nagysága	A keréktalperő nagysága a forgalomáramlás sebességének függvényében	[kN]	50-54	55-59	60-64	65-69	70 ≤
6.	Hátralévő élettartam	A pályaszerkezet hátralévő élettartam a keréktalperő alapján	[mEt]	≥ 81	80-61	60-41	40-21	20 ≥
7.	Központi behajlás arány	Központi mért és megengedett behajlás aránya	[%]	≤ 20	21-40	41-60	61-80	81 ≤

ÚTÁLLAPOT ÉRTÉKELÉS

				Forgalom-nagyság (E/h)	Forgalmi sáv kapacitása (E/h)		Forgalmi telítettség	Adott pontszám	Súlyszám	Pont érték
1.	Forgalmi telítettség	A létesítmény kapacitás kihasználtsága	[%]						1	
				A megengedett tartományban (S1)	**A megngedett felett (S2)**	**A megengedett alatt (S47)**	**Súlyozott átlag**	**Adott pontszám**	**Súlyszám**	**Pont érték**
2.	Forgalom áramlás sebesség arány	A forgalomáramlási sebesség a megengedett sebességtartományon belüli és kívüli eloszlásának súlyozott számtani átlaga	[%]						3	
				Mért érték	**Adott pontszám**				**Súlyszám**	**Pont érték**
3.	Forgalmi hullám terjedési sebessége	Hullámterjedés sebessége a járműtrajektória módszer szerint	[m/s]						2	
4.	Keréktalperő görbe meredeksége	A meredekség százalékban	[%]						50	
5.	Keréktalperő nagysága	A keréktalperő nagysága a forgalomáramlás sebességének függvényében	[kN]						10	
6.	Hátralévő élettartam	A pályaszerkezet hátralévő élettartam a keréktalperő alapján	[mEt]						30	
				A megengedhető behajlás értéke	**A mértékadó behajlás értéke**	**Behajlások aránya**	**Adott pontszám**		**Súlyszám**	**Pont érték**
7.	Központi behajlás arány	Központi mért és megengedett behajlás aránya	[%]						4	
								Végső pontszám		

ÉRTÉKELÉS	

IV. MELLÉKLET

A KÜLÖNBÖZŐ SEBESSÉGEK MELLETT MÉRT GYORSULÁSOK STATISZTIKAI FEL-DOLGOZÁSA

Mérés	Minta darabszám	Számtani közép	Konfidencia -95%	Konfidencia 95%	Medián	Módusz	Módusz frekvenciája	Szumma	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	6,186	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	2,928
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