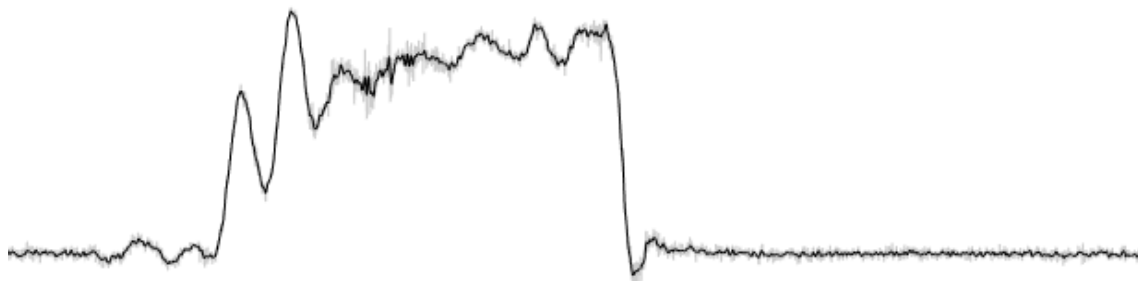




OTDK 2019

***A pálya-jármű kölcsönhatás mozgásgeometriai vizsgálata
közúti vasúti kitérőkben és kis sugarú pályaivekben
okostelefonok szenzoradatainak felhasználásával***

**Szerző:
Gonda Evelyn**



Konzulensek:

Dr. Vinkó Ákos, adjunktus, BME Út és Vasútépítési Tanszék

Előhegyi Zoltán, osztályvezető, VAMAV Vasúti Berendezések Kft.

Budapest, 2019. március 21-23.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. A pálya-jármű rendszer rezgésdiagnosztikai megközelítése	4
1.1. Az inerciális elvű hagyományos pálya-állapotfelmérési módszerek.....	5
1.2. Az inerciális elvű pályaállapot-megítélési szempontok.....	7
2. Inerciális elvű mérési módszer szolgáltatott adatainak feldolgozási módszerei	9
2.1. Modell alapú módszerek	9
2.2. Jelfeldolgozási módszerek.....	10
3. A kinematikai mozgásjellemzőkre vonatkozó hatályos hazai, uniós és külföldi előírások	11
3.1. Pályatervezési előírások általános alapelvei.....	11
3.2. Hazai előírások	12
3.3. Külföldi, uniós előírások.....	13
3.4. Szabványokban rögzített oldalgyorsulás és annak időbeli változására vonatkozó határértékek.....	20
4. A jármű kinematikai mozgásjellemzőinek alkalmazott mérési módszere	22
4.1. A mérő applikáció bemutatása	22
4.2. A mért és szolgáltatott paraméterek	25
4.3. A mérőrendszer által szolgáltatott adatok validálása.....	34
4.4. A vizsgált járművek mozgásgeometriai jellemzői	35
4.5. A mértékadó keresztmetszetek meghatározása	43
5. Kitérőcsoportok, vágánykapcsolások és csatlakozó pályaívek mozgásgeometriai vizsgálata	46
5.1. A mérési és vizsgálati helyszínek kiválasztásának szempontjai	46
5.2. Mérések kiértékelése	48
6. Összefoglalás	52
6.1. Mérési eredményeket befolyásoló tényezők:	52
6.2. Csatlakozó pályaívek vizsgálati tapasztalatai (általános tapasztalatok).....	52
6.3. Kitérő vizsgálatok tapasztalatai	53
Irodalomjegyzék	58
Mellékletek	60

Bevezetés

A közúti vasúti üzemben utazó álló utasokat – a jármű sebességétől és szerkezeti kialakításától függően – jelentős többlet-igénybevétel érheti kis sugarú ívekben és kitérőkben. Az utazási komfort szempontjából mértékadó paraméterek határértékei (a_0 kiegyenlített szabad oldalgyorsulás és h oldalgyorsulás-változás) azonban a jelenlegi szabályozásban nincsenek alátámasztva a Budapesten üzemeltetett közúti vasúti járművek, mérésel meghatározott mozgásgeometriai viselkedésének statisztikai vizsgálatával. A célom a kitérők eltérítő ágán és a hozzájuk csatlakozó íveken járműáthaladáskor tapasztalható keresztirányú mozgásgeometriai jellemzők (a_0 , h) tényleges meghatározása gyorsulásmérésre alkalmas okostelefonokkal.

A jármű kinematikai mozgásjellemzőinek mérésére egy telefonos applikációt fejlesztettünk¹, amely alkalmas a telefon összes szenzoradatának és a GPS helyadatoknak az időalapú szinkronizált rögzítésére. A szolgáltatott adatok validálása során a telefonok **gyorsulás-, dőlés- és elfordulás adatainak** valós fizikai tartalmát ellenőriztük ismert szöghelyzet, elfordulás és pozíció esetén. Az elvégzett kalibrációs tesztek minden vizsgált szenzoradat (gyorsulásmérő, dőlésmérő, giroszkóp) esetén nagy pontossággal visszaadták a fizikából jól ismert alap törvényszerűségeket.

A Budapesten üzemeltetett közúti vasúti járművek közül a CAF Urbos3 típusú modern villamosok futási tulajdonságait vizsgáltam kiváló műszaki állapotú „Ph” rendszerű kitérőkön való áthaladás esetén. A vizsgált kitérők eltérítő ágán és a csatlakozó pályáiveiken való áthaladáskor jellemző járműreakció vizsgálata előtt meghatároztam a 3 és az 5 modulus CAF járművek keresztirányú utazási komfort szempontjából mértékadó keresztmetszetét, s ennek ismeretében a kitérőméréseket már csak a mértékadó járműkeresztmetszetben végeztem el.

A dolgozatomban az alábbi vizsgálatokat és összevetéseket végeztem el:

- A.) Keresztirányú utazási komfort megítélése a kocsiszekrényen mért oldalgyorsulás és egy 3 tengelyű giroszkóp szögsebesség adatai alapján;
- B.) Mért és a közelítő képletekkel becsült oldalgyorsulás adatok összevetése;
- C.) Az egyenes és ív közvetlen csatlakozásánál fellépő dinamikus oldalgyorsulás-változás összevetése a szabványokban meghatározott kvázi-statisztikus határértékekkel;
- D.) A rögzített gyorsulás jelalak kiugró értékeinek és jellegzetességeinek vizsgálata különböző szerkezeti és geometriai kialakítású kitérők esetén.

¹ Csikós Attila szoftverfejlesztő közreműködésével, az iránymutatásom alapján.

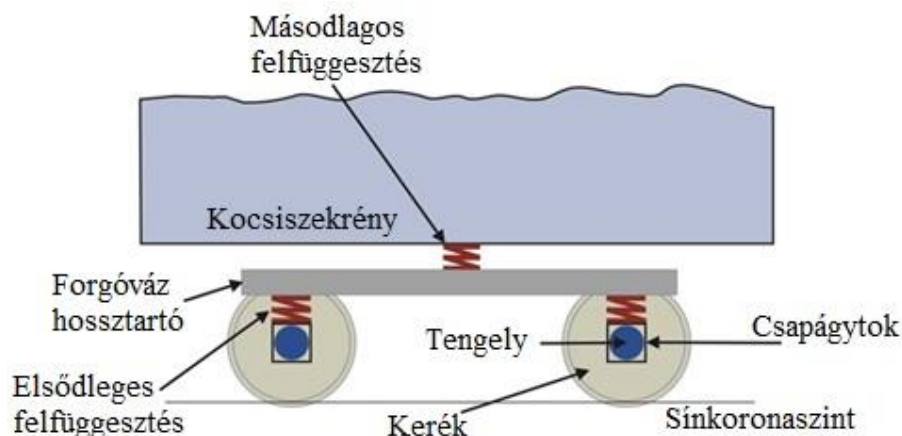
1. A pálya-jármű rendszer rezgésdiagnosztikai megközelítése [1] [2] [3]

A vasúti üzem egy kötöttpályás közlekedési mód, amely vizsgálata során nem lehet külön csak a járműről, vagy csak a pályáról beszélni, hiszen a kettő elválaszthatatlan rendszert képez. A vasúti pálya avulása egy öngerjesztő romlási körfolyamat, amely a pálya-jármű kölcsönhatásnak köszönhetően mind a pálya, mind pedig a jármű műszaki állapotától is függ. Az avulási folyamat kezdetén geometriai elváltozások, míg a folyamat előrehaladtával szerkezeti, anyagfáradási hibák is megjelennek. Ideális vágánygeometria esetén a jármű szabályos mozgást végez a pályán követve annak vonalvezetését. Az ideálistól eltérő vágánygeometria esetén az előbb említett szabályos mozgásra ráhalmozódnak a pályahibák által keltett szabálytalan járműmozgások (pl. támoalgó, bólintó, kígyózó mozgás), amely a járműben is és a pályában is káros rezgéseket és lengéseket generál. Ezért elsődleges fontosságú a vágánygeometria pontos megépítése, majd építés után a pálya-jármű rendszerben fellépő többlet igénybevételek minimalizálása. Az üzemeltető cégek célja biztosítani a pályaszerkezet és járművek lehető leghosszabb élettartamát úgy, hogy a minél magasabb szintű utazási komfort folyamatosan fenntartható legyen.

A vasúti járművet tömegrugó rendszereként modellezhetjük (**1. ábra**). A jármű fődarabjait a lengéscsillapításuk jellege szerint az alábbi csoportokba oszthatjuk:

- Rugózott tömeg (kocsiszekrény)
- Részben rugózott tömeg (forgóváz)
- Kvázi rugózatlan tömeg (kerékpár)

Fontos megjegyezni, hogy a jármű felfüggesztésének köszönhetően, valamint a kocsiszekrény tömegének tehetetlenségéből adódóan a pályahibáktól független dinamikai hatások is mérhetők a kocsiszekrényen és a forgóvázon. Egy adott sebesség felett a rugózott és rugózatlan tömeg mechanikailag elkülönül egymástól és a magas frekvenciájú rezgések elsősorban csak a rugózatlan tömegen lesznek mérhetők, míg az utasok a járműrugózás által csillapított rezgéseket fogják csak érzékelni. Természetesen, attól függően, hogy a kerék-sín érintkezési pontjától mennyire távolodunk el, annak mértékétől függően fognak megjelenni a mért jelben a pályahibára jellemző mennyiségek mellett a jármű lengéscsillapítását jellemző mennyiségek is. Az előbb ismertetett mechanikai folyamatok alapján a jármű bármely elemén elhelyezett gyorsulásmérő szenzor jó indikátora lehet közvetlen módon a jármű és közvetett módon a pálya műszaki állapotának.



1. ábra: Kéttengelyes, forgóvázvasúti jármű egyszerűsített részmodellje

1.1. Az inerciális elvű hagyományos pálya-állapotfelmérési módszerek [1] [3]

A technika fejlődésével az inerciális szenzorok (giroszkóp, gyorsulásmérő) mérete lecsökkent és a gazdaságos gyártásnak is köszönhetően egyre jobb minőségben és nagyobb tudással válnak elérhetővé a hétköznapi emberek számára is. Az inerciális szenzorok mára már a mindennapi élet részévé váltak, hiszen minden okostelefonban megtalálhatók és szinte bármilyen környezetben alkalmazhatók. Mindezek miatt az elmúlt pár évben egyre több inerciális szenzorokat alkalmazó mérőrendszert állítanak üzembe a vasúti pályadiagnosztikával foglalkozó hazai és külföldi szakemberek. [4] [5] [6]

A vasúti járművekre szerelt inerciális szenzorok által szolgáltatott adatokból (a tényleges vágánygeometria meghatározása nélkül) következtethetünk a pálya műszaki állapotára. A pályadiagnosztikában alkalmazott inerciális szenzorok gyakori mérési elrendezései a következők:

A.) Csapágytokra és forgóváz-hossztartóra szerelt gyorsulásmérő szenzor

A vasúti kerékpár függőleges irányú mozgása esetén feltételezhetjük, hogy folyamatosan érintkezik a sínszállal, azaz követi a pálya függőleges vonalvezetését, ezáltal a csapágytokra szerelt gyorsulásmérő szenzorok önmagukban is alkalmasak a rövid hullámhosszú lokális hibák (hullámos kopás, hibás hegesztések, elverődött sínillesztések) azonosítására. Hátrányuk azonban, hogy a kerék-sín kapcsolatából, illetve a csapágytok szerkezeti rezgéséből eredő járulékos zaj aránya a hasznos jelhez viszonyítva rendkívül magas.

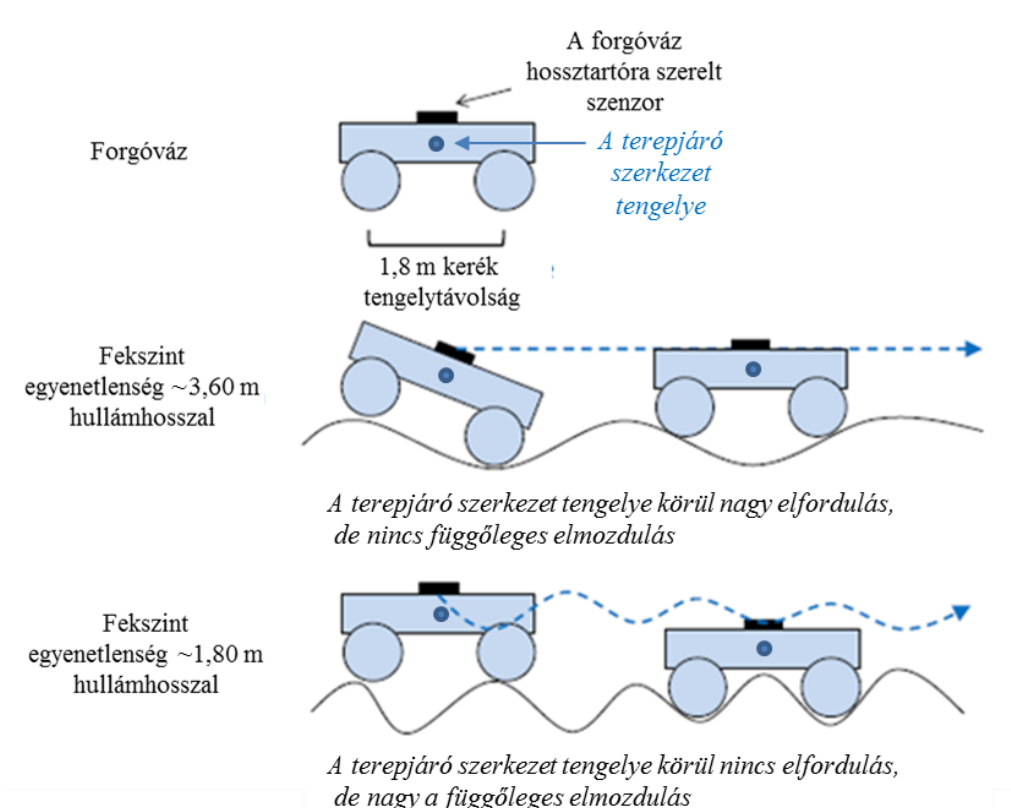
A járulékos zajból, illetve többletterhekből adódó mérési pontatlanság kiküszöbölésére a csapágytok helyett (esetleg kiegészítő szenzorként) a forgóvázra helyeznek még egy gyorsulásmérőt. Az elsődleges rugózás szűrő hatásának következtében a forgóvázon jóval kisebb gyorsulásértékeket lehet mérni, viszont ezeket a gyorsulásadatokat könnyen

befolyásolhatja a kocsiszekrény rugózásából eredő többletterhelés. Emiatt a forgóvázon a gyorsulásmérő szenzorok mellett elmozdulás mérő szenzorokat is célszerű alkalmazni, melyek képesek mérni a forgóváznak és a csapágytoknak a relatív függőleges elmozdulását.

B.) Forgóvázra szerelt giroszkóp

A giroszkóppal való mérés esetén a hasznos jel és a mérési zaj aránya kezelhetőbb, hiszen szögsebesség az elfordulással egyenesen arányos, míg a centripetális gyorsulás és a szögsebesség közötti összefüggés négyzetes.

A keréktengely távolság nagyban befolyásolja a forgóvázra szerelt szenzor által érzékelhető pályahibákat (2. *ábra*). Ha a jármű egy a keréktengely távolság közel kétszeresének megfelelő hullámhosszú pályahibán halad, akkor a forgóváz-hossztartó a terepjáró szerkezet tengelye körül nagy elfordulásokat végez, de a tengelynek függőleges irányú elmozdulása nem lesz tapasztalható. Abban az esetben, ha a jármű a keréktengely távolsággal közel megegyező hullámhosszúságú fekszinthibán halad, akkor nem lesz elfordulás, viszont jelentős függőleges irányú elmozdulás lesz tapasztalható. A valóságban a pályahibák hullámhossza folyamatosan változik, de a forgóváz előzőekben említett mozgásai jellegzetes jelalakot jelentenek a mért gyorsulásadatokban.



2. ábra: A forgóváz-hossztartóra szerelt szenzor geometriai szűrési effektusa a pályahibák érzékelése szempontjából [4]

A giroszkóp ebben a mérési elrendezésben alacsony sebesség esetén ($V < 50$ km/h) is lehetővé teszi a nagyobb hullámhosszú pályahibák azonosítását.

C.) Kocsiszekrényre szerelt inerciális szenzorok

A kocsiszekrényen elhelyezett szenzorokkal jelentősen nehezebb azonosítani a nagy hullámhosszú pályahibákat a járműfelfüggesztés csillapító hatása, illetve a kocsiszekrény tehetetlensége miatt. A fentiekben bemutatott hatások miatt a kocsiszekrényre szerelt gyorsulásmérő szenzorokat elsősorban az utazási komfort jellemzők számítására használják (bővebben: **3. fejezet**), de alkalmas járműmodell kidolgozásával a pályageometria (mint gerjesztő hatás) és a jármű szerkezeti elemeinek lengései, rezgései is elkülöníthetők egymástól. Fontos megemlíteni továbbá, hogy a vasúti pályadiagnosztikában a kocsiszekrényre szerelt giroszkóp adatait felhasználják a túlemlés és az abból származtatott minősítő számok előállításához is.

Összegzésként elmondható, hogy csak a forgóvázra szerelt szenzorok nem teszik lehetővé a jobb és bal sínzál egyenletlenségeinek elkülönítését, és nem adnak információt a nyomtávról vagy a síktorzulásról sem. A pályahibák a 35 - 70 m hullámhosszúságú tartományban jól mérhetők a forgóvázra szerelt giroszkóp segítségével. A kisebb hullámhosszú (ütésjellegű) hibák azonosítására a csapágytokra szerelt gyorsulásmérő szenzor alkalmas.

Jelen kutatómunka szempontjából elsősorban a kocsiszekrényre szerelt inerciális szenzorok az érdekesek, amelyek közül a gyorsulásmérő alkalmas a lökés és lengések jellemzésére, míg a giroszkóp csak a lengések jellemzésére használható eredményesen, szóval a két szenzor nem helyettesít, hanem kiegészíti egymást.

1.2 Az inerciális elvű pályaállapot-megítélési szempontok [7] [2] [1] [8]

A pályaállapot minősítés egy adott vonal, vonalszakasz alkalmasságát vizsgálja az engedélyezett vagy engedélyezni kívánt sebesség szempontjából, illetve meghatározza, hogy a kívánt sebesség eléréséhez a vasúti pálya mely részein kell beavatkozást, fenntartási munkát végezni. Egy adott tengelyterhelésű vonalnál az engedélyezett sebességet meghatározó, a sín-kerék kapcsolat dinamikai kölcsönhatását jellemző szempontok a következők: **siklásbiztonság, futásjószág és utazási komfort**. Az inerciális mérőrendszereket többek között ezen szempontok minősítésére használják, amelyek adatfeldolgozási és kiértékelési módszerei részletesen szabályozottak a különféle külföldi és uniós előírásokban.

A.) Utazási komfort

Az utazási komfortot több tényező befolyásolja, de a vasútépítő mérnökök számára a pálya-jármű rendszer okozta rezgések és járműlengések jelentik az elsődleges befolyásoló hatást. Az utas komfortérzete nagyban függ a rezgés frekvenciájától. A szabványok a 0,5 - 80 Hz-es frekvenciatartomány vizsgálatát írják elő az utazási komfort minősítésekor. Az ennél magasabb frekvenciakomponensek kellemetlen hanghatásként jelentkeznek. Az utazási komfortérzet az utasok szubjektív érzékenysége a kocsiszekrényen fellépő lengésekre, gerjesztésekre. Ugyanakkor az ISO 2631 szerint az emberi test a függőleges és vízszintes elmozdulásokra a 3 - 7 Hz közötti frekvenciájú rezgéstartományban a legérzékenyebb.

B.) Futásjóság

A futásjóság vizsgálatok a jármű műszaki állapotát ítélik meg. A vasúti járműkerekek kúpos kialakítása az ívekben lehetővé teszi a belső és külső sínzál közötti úthossz-különbség kiegyenlítését, ugyanakkor egyenes pályaszakaszokon a kúpos kialakítás lehet felelős a szinuszos jellegű ún. kígyózó jellegű mozgásokért. A futásjóság vizsgálata során két különböző lengési jelleget különböztethetünk meg:

Stabil futás esetén a közlekedő jármű a pályageometria és pályahibák hatására egyre csökkenő szinuszos jellegű hullámmozgásba kezd (köszönhetően a kúszási erőknek), majd visszatér a nyugalmi állapotba a jármű.

Instabil futás esetén a hullámmozgás egyre növekszik, melyet bizonyos sebességig a nyomkarima képes lehatárolni, viszont, ha a sebesség túl nagy, az egyre növekvő energiatartalmú keresztlengések hatására bekövetkezik a jármű kisiklása. Az instabil futás bekövetkezését minden esetben kerülni kell, ennek megfelelően szükséges meghatározni az engedélyezett sebességet.

C.) Siklásbiztonság

A siklás veszélye akkor áll fenn, amikor nagy terelőerő mellett az egyik oldali kerék részleges tehermentesülése bekövetkezik. Intenzíven kopott sín és nem megfelelő kerékprofil esetén ez a jelenség nyomkarima kiemelkedését, a jármű kisiklását okozhatja.

D.) A pályára ható (jármű okozta) többlet-igénybevételek

A korábban felsorolt három megítélési szempont esetén részletesen kidolgozott adatfeldolgozási módszerek állnak rendelkezésre, viszont az inerciális mérőrendszerek a pálya-jármű rendszerben fellépő többlet-igénybevételek meghatározására is alkalmasak.

A jármű mozgása során fellépő többlet-igénybevételek a pálya és a jármű alkatrészeinek káros rezgéseit okozzák. Rezonancia esetén, átlagon felüli erők is felléphetnek, melyek ciklikusan ismétlődve a sín és a kerék kopását, meghibásodását idézik elő. A sín futófelületének meghibásodásai (hullámos és kagylós kopások, hámlások kipördülési helyek) komoly hatással vannak az alépítmény állapotára a pálya-jármű rendszer kölcsönös egymásra hatása miatt. A mai modern közúti vasúti szerelvényekbe csúszás és kipörgés gátló berendezéseket építenek be, de ennek ellenére egy hirtelen indulás vagy vészfékezés komoly többlet-igénybevételt jelent a pálya számára, így a többlet-igénybevételek azonosítása fontos feladat.

2. Inerciális elvű mérési módszer szolgáltatott adatainak feldolgozási módszerei

Az inerciális szenzorokat alkalmazó mérőrendszerek leggyakrabban alkalmazott adatfeldolgozási módszerei a következők:

- **modell alapú módszerek** (rendszerleíró, illetve rendszer állapot és paraméter becslő eljárások)
- **jelfeldolgozás, idősor elemzési módszerek** (idő-, és frekvenciatartományon, illetve fázissíkon értelmezett elemző eljárások)

A dolgozatban főként a jelfeldolgozás és az idősor elemzés módszereit használom fel a jármű kinematikai mozgásjellemzőinek vizsgálatakor.

2.1. Modell alapú módszerek [8]

A modell alapú módszerek esetén a valóságot valamilyen szintű közelítéssel írjuk le és a rendszer paramétereit többszöri szisztematikus beállítással, vagy mérési eredmények alapján rendszer-identifikációval határozzuk meg.

A validált modell alapú módszerek (alkalmas fizikai modell, és a jelenség megfelelő leírása esetén) lehetővé teszik a közvetlenül nem mért paraméterek meghatározását is. A vasúti pályaállapot-felmérés szakirodalmában leggyakrabban az **inverz mechanikai jármű modellt** alkalmazzák. Ebben a modellben a jármű két tömegből (felső tömeg a kocsiszekrény tömegének negyede, az alsó tömeg a tengelyterhelés fele), egy csillapításból és egy rugóból áll. Hátránya, hogy sok egymástól független paraméterből kell meghatározni a valós modellt.

2.2. Jelfeldolgozási módszerek [8] [2]

A jelfeldolgozási módszerek alkalmazása során az időszorelemzési és idő-frekvencia síkot elemző módszereket használhatjuk.

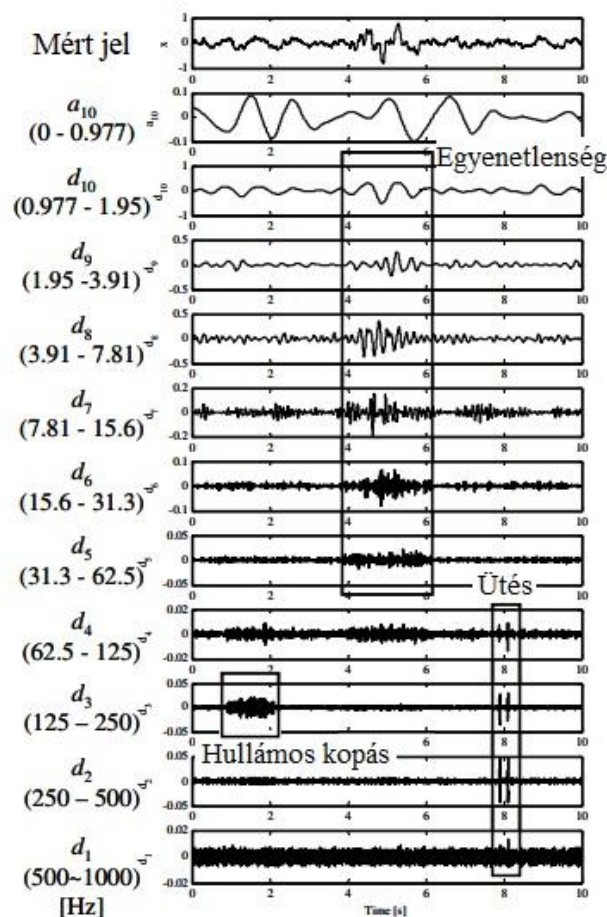
A.) Időszorelemzés

Az időszorelemzési módszerek a vasúti pályadiagnosztikában két csoportba oszthatók: az általános minősítési módszerek és a lokális hibák kiértékelése. Adott hosszon képzett mérőszámok és minősítő számok alapján **általános minősítést** végzünk, míg az egyes paraméterek lokális határérték túllépésének során pedig **lokális hibákat minősíthetünk**. Az általános minősítés fajtái: szóráselvű-, területi elvű -, hibamaximum elvű értékelés és a vetületi elvű értékelés. A lokális hibák minősítésének két fajtája az alapvonalról - csúcsig értelmezés és a csúcstól - csúcsig értelmezés. Az alapvonal lehet statikus vagy dinamikus.

B.) Idő-frekvencia sík elemző módszerek

A pályahibák az esetek túlnyomó többségében együttesen jelentkeznek, így az általuk keltett dinamikus hatások is egymásra halmozódnak. A gyorsulásmérő szenzor által szolgáltatott adatsorok különböző hullámhosszú (frekvenciájú) komponensekből tevődnek össze. A jármű szerkezeti kialakításától és a mérési sebességtől függően a különböző típusú pályahibák különböző frekvenciakomponensű gerjesztést fognak generálni. A **3. ábra** egy sínillesztés által generált ütés, valamint hullámos kopás és fekszinthiba által okozott gyorsulás (rezgés) különböző frekvenciatartománybeli jellegzetességeit mutatja be.

A pontszerű pályahibák, rövid idejű, intenzív hatást jelentenek, amely oszlopszerű kiugró értéként jelentkezik a 62,5 – 1000 Hz közötti frekvenciasávokban. Ilyen típusú hibajelenség például egy hibás hegesztés, vagy a legyűrődött sínvég egy sínillesztésnél. A hosszabb kiterjedésű pályaeegyenetlenségnek folytonos gerjesztő hatása van: például a hullámos kopás magas frekvenciás periodikus gerjesztésként jelenik meg a 125 – 250 Hz-es frekvenciasávon, míg a függőleges és oldalirányú pályaeegyenetlenségek kis frekvenciájú periodikus gerjesztésként azonosíthatók (az alkalmazott mérési sebességtől függően).



3. ábra: A pályahibák azonosítása különböző frekvenciatartományokban [5]

A jelfeldolgozás módszerének előnye az inverz járműmodellel szemben, hogy konstans mérési sebesség mellett a rögzített mérési adatokra sávszűrőt (Band Pass filter) alkalmazva időalapon beazonosítható a pályahiba típusa, helye és mértéke is.

3. A kinematikai mozgásjellemzőkre vonatkozó hatályos hazai, uniós és külföldi előírások

3.1 Pályatervezési előírások általános alapelvei [2]

„A vasúti vágány geometriai paramétereit úgy kell megtervezni adott tervezési sebesség figyelembevétele mellett, hogy az utazási komfortra vonatkozó előírások maradéktalanul teljesüljenek. Az utazási komfort minősítése kocsiszekrényen mért gyorsulásadatok (mozgásjellemző vektorok) szabványosított kiértékelési módszerein alapszik. A kiértékelés fontos eleme a figyelembe vett sebesség. Különböző sebességfogalomról beszélhetünk, attól függően, hogy tervezésről, vagy fenntartásról beszélünk:”

Tervezési sebesség: az alkalmazott geometriától függő, a pálya paraméterei alapján engedhető maximális sebesség.

Fejlesztési sebesség: az előírásokban meghatározott maximálisan elérhető sebesség, amely a meglévő vonalon az engedélyezett sebesség növelésével érhető el.

Engedélyezett sebesség: a vonalanként, vonalszakaszonként biztosított maximális sebesség a pálya műszaki állapotától függően.

A szabad oldalgyorsulásnak és a szabad oldalgyorsulás időbeni változásának megengedett értékei alapján kell – a helyi viszonyokat is figyelembe véve – a maximális pályára engedélyezhető sebességnek megfelelően az ívsugár és a túlemelés nagyságát megválasztani, valamint az átmeneti ívet megtervezni.

A vasúti pálya feladata a vasúti járművek vezetése és alátámasztása, emiatt a vasúti pálya geometriai elemeinek tervezését nagymértékben befolyásolják a rajta közlekedő járművek paraméterei is. A közúti vasúti járművek lehetnek forgóvázas és nem forgóvázas (Muki, UV pótkocsi) kialakításúak is. Forgóvázas kialakítás esetén a járműnek csökken pályáívből az ellenállása, valamint a kerekek könnyen be tudnak fordulni közel sugárirányú helyzetbe. Ez utaskényelmi szempontból is fontos, ugyanis kisebb függőleges és vízszintes erőhatások érik az utasokat, mint a nem forgóvázas (csuklós, multicsuklós) járművek esetében.

3.2 Hazai előírások

OVSZ: Országos Vasúti Szabályzat II. kötet 2. fejezete (helyi közforgalmú vasutakra)

„A fejezet a helyi közforgalmú vasúti pályák tervezésére, építésére, fenntartására, felügyeletére vonatkozó alapvető előírásokat, továbbá azok főbb műszaki jellemzőinek a járművek futásbiztonsága és az elvárható utazási komfort érdekében betartandó értékhatárait, valamint azok meghatározási módját tartalmazza.”

3.2.1 Közúti vasúti pályaépítési és fenntartási előírás [9]

A BKV Zrt. vonalain alkalmazandó Közúti vasúti pályaépítési és fenntartási műszaki adatok és előírások című előírás (továbbiakban „Sárga könyv”) tartalmazza a budapesti villamoshálózatra vonatkozó tervezési, építési és fenntartási előírásokat. Az utasítás az Országos Vasúti Szabályzat helyi közforgalmú vasutakra vonatkozó előírásainak megfelelő, azoknak ellentmondó szabályokat nem tartalmaz.

Jelen kutatómunkám során az utazási komfortérzetre vonatkozó mértékadó paraméterek határértékeinek (oldalgyorsulás és oldalgyorsulás-változás) megfelelőségét vizsgáltam, melyet a Sárga könyv 5.3. Vízszintes vonalvezetés című fejezete határozza meg a következőképp:

„A közúti vasúti pályák vízszintes vonalvezetését a fejlesztési sebesség² alapulvételével úgy kell megtervezni,

- a **pozitív szabad oldalgyorsulás** értéke lehetőleg **0,65 m/s²**-nél nagyobb ne legyen;
- az **oldalgyorsulás időbeli változásának** ajánlott értéke **0,2 m/s³**;
- az oldalgyorsulás időbeli változása **0,4 m/s³**-nél semmilyen körülmények között **nem lehet nagyobb**;
- az oldalgyorsulás időbeli változása **kitérőben 0,8 m/s³-t nem haladhatja meg**;
- a **negatív szabad oldalgyorsulás** megengedett **legnagyobb értéke 0,85 m/s²**.

A fentiekől eltérően új közúti vasútvonal építésénél olyan átmeneti íves íveket kell tervezni, amelyekben a pozitív szabad oldalgyorsulás értéke 0,52 m/s²-nél nem nagyobb. Meglévő vonalakon és kötöttségek esetén a fentiekől eltérő vonalvezetés is tervezhető, de csak részletes műszaki és gazdasági indoklás mellett.”

3.3. Külföldi, uniós előírások

Jelen kutatómunkában az utazási komfort szempontjából mértékadó paramétereket vizsgálom, így az ehhez kapcsolódó külföldi szabályozásokat is ismertetem.

A.) ISO 2631 szabványcsalád [10] [11] [12] [13] [14]

A szabvány elsődleges célja, hogy az emberi testre ható rezgések mérési és minősítési módszereit meghatározza. A meghatározás során az előírás figyelembe veszi a rezgések emberi egészségérzetre gyakorolt hatását, illetve a jármű futásjóságára vonatkozó kritériumokat is. A fellépő rezgéseket és lengéseket, azok jellemző frekvenciatartománya szerint, az előírás az alábbi csoportba sorolja: az első a 0,5 Hz és 80 Hz közötti intervallum, mely az egészségi-, élettani- és komfortérzetre gyakorolt hatás alapján figyelembe vett tartomány, míg a második a 0,1 Hz és 0,5 Hz közötti intervallum, mely a szabálytalan járműfutas szempontjából mértékadó.

² 5.1.2. Fejlesztési sebesség

A közúti vasutak tervezésekor figyelembe veendő fejlesztési sebességek a következők: burkolt pályaszerkezet esetén 50 km/h, nyitott pályaszerkezet esetén 60 km/h, elkülönített pályás közúti vasúton 70 km/h, végállomási vágányokon 20 km/h. A sebesség meghatározásánál ezenkívül figyelembe kell venni a megállóhelyek távolságait, a geometriai és beépítési kötöttségeket, a lejtviszonyokat, a jelző- és biztosítóberendezéssel kapcsolatos előírásokat.

A kiértékelés egyik lehetséges módja, hogy a kocsiszekrény padlóján mért különböző mérési irányokban eltérően súlyozott gyorsulástartatok RMS³ értékét összehasonlítjuk az **1. táblázat**ban felsorolt határértékekkel.

1. táblázat: Az utazási komfort lengéskényelmi határértékei az ISO 2631-1 szabvány szerint

RMS [m/s ²]	Utazási komfort, lengésérzékenység
$a_w < 0,315$	Kényelmes
$0,315 \leq a_w < 0,63$	Kissé kényelmetlen/majdnem kényelmes
$0,5 \leq a_w < 1,0$	Meglehetősen kényelmetlen
$0,8 \leq a_w < 1,6$	Kényelmetlen
$1,25 \leq a_w < 2,5$	Nagyon kényelmetlen
$a_w \geq 2$	Rendkívüli módon kényelmetlen

A másik módszerben a súlyozott RMS gyorsulástartatokat frekvenciatartományban ábrázoljuk, majd összehasonlítjuk a szabványban megadott határértékgörbékkel, amelyek segítségével azonosíthatók azok a frekvenciakomponensek, amelyek kapcsolatba hozhatók az utazási komfortérzettel.

B.) Sperling-index [1] [11] [15] [16]

Sperling összefüggést keresett az utasok komfortérzete és az azt befolyásoló rezgés amplitúdók és frekvenciák között. Számítási módszere során pedig a frekvencia tartományban súlyozott RMS gyorsulástartatok alapján meghatározott vágányszakaszt vizsgál. Ez az index minden irányban meghatározásra kerül, ugyanakkor a hátránya ennek a mérési módszernek, hogy a gyorsulásvektor komponenseit külön kell kezelni. Jelenleg is széles körben alkalmazzák a komfortérzet és futási tulajdonságok meghatározására.

C.) UIC 513 [17] [18]

Az UIC 513 döntvényben ismertetett komfortjellemzők számítása a mért gyorsulástartatok négyzetes középértékén alapszik. A kocsiszekrényen mért gyorsulások és az utasok reprezentatív csoportjának értékelése alapján, 5 másodperces intervallumonként történik a kiértékelés. A határérték összehasonlítható a 95%-os meghaladási valószínűséggel.

D.) UIC 518 [19] [20]

Ez a döntvény tartalmazza a terhelés alatti pálya (hagyományos járművek, új technológiájú járművek és speciális járművek által) vizsgálati módszereit a siklásbiztonsággal kapcsolatos járműdinamikai viselkedés szempontjából, illetve a pályahibák és futási tulajdonságok nemzetközi forgalomban elfogadott határértékeit. A jármű-pálya kapcsolatot több szempontból

³ RMS (Root Mean Square) = négyzetes középérték

vizsgálja, mint például a pálya geometriája, a sebesség és avulás, illetve a sín-kerék kapcsolat. Ugyanakkor meghatározza a vizsgálatok végrehajtásának feltételeit (teljes vizsgálat, illetve rész vizsgálatok) és a mérési módszereket is.

E.) EN 13803-2:2006 [21] [22]

A jelenleg már hatályon kívül helyezett előírás szerint az utazási komfort és a pályatervezési paraméterek szempontjából is mértékadó oldalgyorsulás az alábbi komponensekből áll: egyrészt a kocsiszekrény padlójával párhuzamosan értelmezett kvázi-statisztikus oldalgyorsulásból, amely a pálya vonalvezetésétől és a jármű sebességétől függ, másrészt pedig a hirtelen ugrásos görbületváltozás esetén fellépő (a jármű felfüggesztésétől is függő) tranziens jellegű oldalgyorsulás adatokból.

A szabvány érdekessége, hogy figyelembe veszi az egyenes-ív csatlakozásánál járműáthaladáskor fellépő dinamikus hatásokat is. Ebben az esetben a gyorsulásértékéhez hozzáadódik egy dinamikus, tranziens jellegű oldalgyorsulás komponens a csatlakozási pontban, így az egyenes és ív csatlakozásánál egy jóval nagyobb oldalgyorsulás értéket enged meg ez a szabvány (**4. táblázat**).

F.) EN 12299:2009 [23] [24] [25]

Az előírás számszerűsíti a kocsiszekrény lengéseinek és rezgéseinek az utasok komfortérzetére gyakorolt hatását, valamint a jármű futásjóságának és műszaki állapotának megítélési módszereit is. Fontos megemlíteni, hogy a szabvány hatálya kiterjed a nagyvasúti fő és mellékvonalakra, az elővárosi gyorsvasutakra, valamint iránymutatásként alkalmazható a metróban és a közúti vasúti üzemben is! A szabvány több különböző részletességű módszer alkalmazását írja elő utazási komfort meghatározására (**2. táblázat**):

2. táblázat: EN 12299 szabványban ismertetett komfortjellemzők és számítási módszerek [25]

	Egyszerűsített átlagos utazási komfort jellemző	Átlagos utazási komfort jellemző		Folytonos komfort jellemző	Komfort jellemző számítása átmenetiíven	Komfort jellemző számítása lokális pályahibákon
Komfort jellemző	N_{MV}	N_{VD}	N_{VA}	$C_{CX}; C_{CY}; C_{CZ}$	P_{CT}	P_{DE}
Mért mozgásjellemző	3 tengelyű gyorsulásmérő szenzor	3 tengelyű gyorsulásmérő szenzor		3 tengelyű gyorsulásmérő szenzor	oldalgyorsulás, h-vektor, giroszkóp	oldalgyorsulás
Mérés helye	járműpadló	járműpadló	ülés	járműpadló	járműpadló	járműpadló
Pályageometria					✓	
Pályafenntartás	✓			✓		✓
Járműkarbantartás	✓			✓		

- **Szabványos meghatározás:**

Az észlelt kényelmi szint meghatározása figyelembe véve a vizsgált jármű lengési és rezgési tulajdonságait és azoknak az emberi egészségérzetre gyakorolt hatását. A méréseket a jármű padlóján vagy üléseken elhelyezett 3 tengelyű gyorsulásmérőkkel végzik, általában hosszú időtartamot vizsgálva. Két al módszer tartozik ide:

- Egyszerűsített átlagos utazási komfort jellemző
- Átlagos utazási komfort jellemző

Az egyszerűsített jellemző esetén csak a járműpadlóra helyezett gyorsulásmérő adatai, míg a teljes módszer esetén a székekre helyezett szenzorok adatai is felhasználásra kerülnek.

- **Speciális mérési módszerek:**

- Folytonos komfort jellemző: az észlelt kényelmi szint meghatározása figyelembe véve a mért rövid idejű vibrációs hatásokat (általában 5 másodpercesek), a mérést itt is a jármű padlóján végzik 3 tengelyű gyorsulásmérővel.
- Az észlelt kényelmi szint meghatározása figyelembe véve:
 - a pályaegyenetlenségek hatását (P_{DE})
 - átmenetiívek hatását (P_{CT})

A szabványban az alábbi kényelmi szinteket határozták meg, a C_C (Folytonos komfort jellemző) oszlopban a meghatározott szintek kapcsolatát láthatjuk a frekvenciasúlyozott RMS alapú pályairányú és oldalgyorsulás határértékeivel.

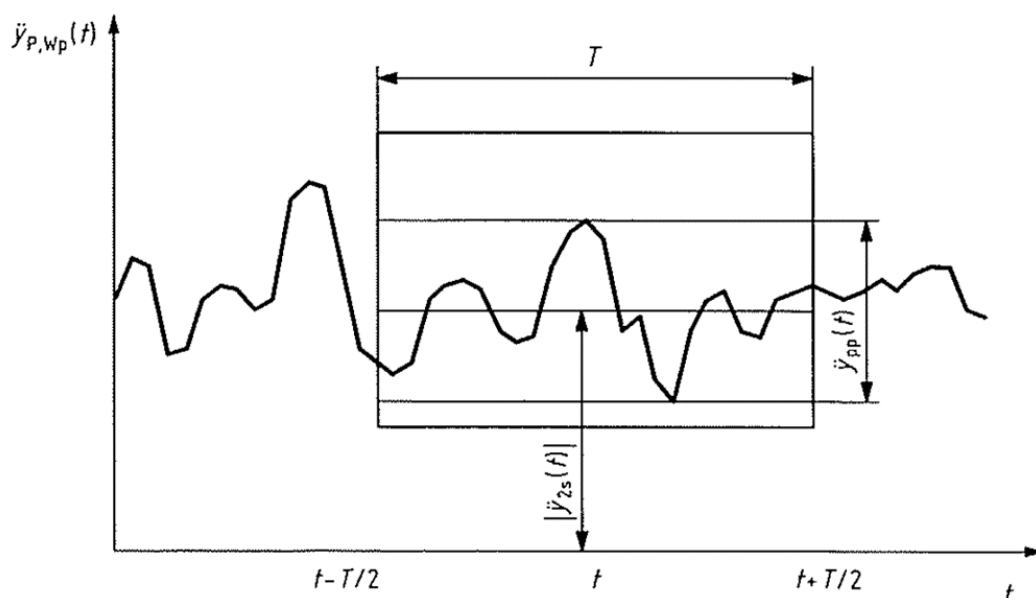
3. táblázat: Komfortfokozatok és értékei az EN 12299:2009 szerint

Értékelési skála	Komfortérzet leírása	C_C gyorsulás adatok [m/s^2]
$N < 1,5$	Nagyon kényelmes	$C_C < 0,2$
$1,5 \leq N < 2,5$	Kényelmes	$0,2 \leq C_C < 0,3$
$2,5 \leq N < 3,5$	Tolerálható	$0,3 \leq C_C < 0,4$
$3,5 \leq N < 4,5$	Kényelmetlen	$0,4 \leq C_C$
$N \geq 4,5$	Nagyon kényelmetlen	

A pályaívek utazási komfort szempontú vizsgálata során két módszert mutat be a szabvány: **P_{CT} (ride comfort on transition curve)** folytonos görbületváltozással kialakított ívek esetén és **P_{DE} (ride comfort on discrete event)** utazási komfort számítása jelentős pályageometriai hibával rendelkező ívekben és egyenesekben.

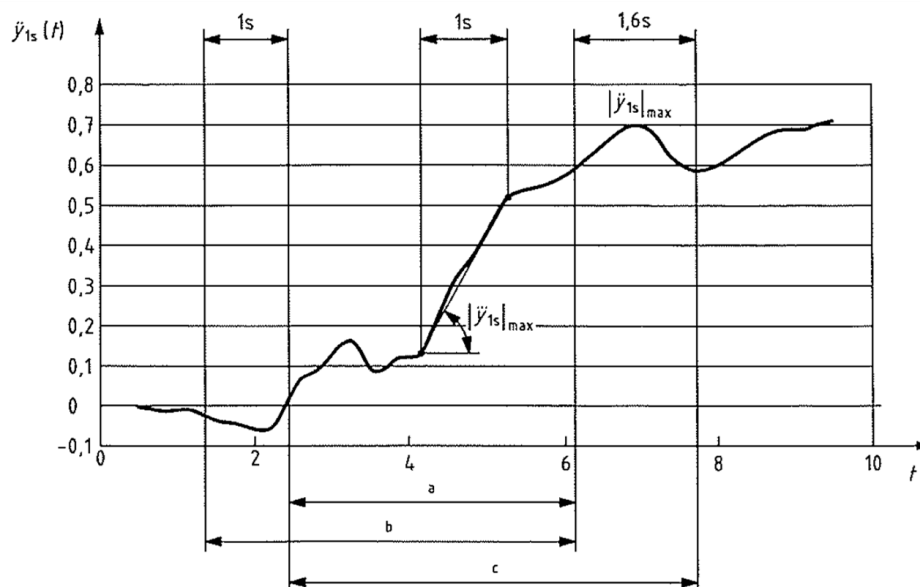
A **P_{DE} módszer** (Komfort jellemző számítása lokális pályahibákon) a kocsiszekrény padlóján mért kiegyenlített szabad oldalgyorsulás értékét használja fel a pályaegyenetlenségek okozta

komfortproblémák jellemzésére. A módszer az oldalgyorsulás dinamikus alapvonali értéke mellett figyelembe veszi az értékek hirtelen változását is 2 másodperces időablakon belül értelmezett mozgóátlag és csúctól-csúcsig kiértékelés alkalmazásával (**4. ábra**). A jármű kinematikai mozgásjellemzők mellett az átlagos utasok statisztikai alapon meghatározott komfortérzetét is figyelembe veszi. A fentiek szerint meghatározott komfortjellemző minden járműre alkalmazható, bármely sebességnél és bármilyen pálya esetén. A kiértékelt eredmények esetén kapcsolat mutatható ki az elégedetlen utasok, az átlagos oldalgyorsulás és annak időbeli változása között.



4. ábra: P_{DE} komfortjellemző számításának alapelve [25]

A **P_{CT} módszer** (Komfort jellemző számítása átmenetiívben) a kocsiszekevény padlóján mért oldalgyorsulást, oldalgyorsulás változást és a jármű támolygó mozgásának (keresztirányú dőlésének) jellemzésére alkalmas giroszkóp adatait használja fel és minősíti a jármű kocsiszekevényének mozgásjellemzőit átmenetiívben. Ezt a módszert csak klotoid átmenetiív (lineáris görbületátmenet) esetén validálták, rövid átmenetiívek esetén nem is alkalmazható. A kiértékelés végrehajthatóságához a járműnek legalább 2 másodpercig kell az átmenetiívben tartózkodnia. Egyéb nem lineáris görbületátmenet geometriák és ugrásos görbületváltozás esetén (átmenetiív nélküli pályáívek) nincs széleskörűen elfogadott és validált számítási módszer az utazási és lengéskényelmi komfort megítélésére vonatkozóan.



5. ábra: Oldalgyorsulás adatok kiértékelése a P_{CT} módszer szerint [25]

A kiértékelés során egyrészt meghatározzuk az átmenetiív előtt 1 másodperctől az átmenetiív végéig tartó szakaszból a legnagyobb h -vektor értéket, azaz a legmeredekebb oldalgyorsulás érintőt (lásd 5. ábra), másrészt pedig az átmenetiív elejétől a vége után 1,6 másodpercig tartó szakaszból a legnagyobb átlagos oldalgyorsulás értéket. A kocsiszekrény keresztirányú lengéséből a teljes ívre vonatkozó legnagyobb értéket vesszük figyelembe. A fentiekben bemutatott értékeken kívül a módszer figyelembe veszi a statisztikai alapon kiértékelt utas komfortérzetet is a komfort jellemző számítása során (5. ábra).

Mindkét módszer esetén érdemes megjegyezni, hogy az értékelés nagyban függ a jármű utasainak komfortérzetétől (mely nem csak a menetdinamikai jellemzőkből áll, hanem az utazás során elvárt szolgáltatások összességéből).

Fontos megemlíteni, hogy az európai szabványok a kiegyenlített szabad oldalgyorsulást a vágány síkjában értelmezik, de mérni csak a jármű padlóján tudjuk, ahol az aktuális sebességtől és a jármű keresztirányú rugózási jellemzőinek megfelelően a kocsiszekrény bedől és ennél nagyobb gyorsulásadatokat mérhetünk. A kiegyenlített szabad oldalgyorsulást az (3.1) összefüggéssel számoljuk.

$$a_z = (1 + s_r) \cdot a_0 \quad (3.1)$$

ahol: a_0 : kiegyenlített szabad oldalgyorsulás a pálya síkjában
 a_z : mért oldalgyorsulás a kocsiszekrény padlóján
 s_r : dinamikus dőlési tényező
 $(1+s_r)$: dőlési együttható

3.4 Szabványokban rögzített oldalgyorsulás és annak időbeli változására vonatkozó határértékek

4. táblázat: A szabványokban rögzített oldalgyorsulásra vonatkozó határértékek

Szabvány	a [m/s ²]	Megjegyzés
OKVPSZ	a ₀₊ =0,654	V≤160 km/h (pozitív szabad oldalgyorsulás) ⁴
	a ₀₋ =0,654	V≤160 km/h (negatív szabad oldalgyorsulás) ⁵
„Sárga könyv”	a ₀₊ =0,650	maximum érték (pozitív szabad oldalgyorsulás)
	a ₀₋ =0,850	maximum érték (negatív szabad oldalgyorsulás)
„Sárga könyv” (tervezet) ⁶	a ₀₊ =0,520	általános érték
	a ₀₊ =0,650	kötöttségek esetén, kivételes esetben
ISO 2631-1	a<0,315	Szűrt oldalgyorsulás RMS értéke, kényelmes-kissé kényelmetlen/majdnem kényelmes érzékelési besorolás
	a≥2,000	Szűrt oldalgyorsulás RMS értéke, rendkívül kényelmetlen érzékelési besorolás
EN 13803-2:2006 ⁷	a=1,400	ajánlott érték (I. kategória 80≤V≤120 km/h)
	a=1,600	maximális érték (I. kategória 80≤V≤120 km/h)
UIC518 ⁸	a ₀ =1,500	kvázi statikus oldalgyorsulás
MSZ EN-12299:2009	a < 0,200	Szűrt oldalgyorsulás RMS értéke, nagyon kényelmes érzékelési besorolás
	0,200 ≤ a < 0,300	Szűrt oldalgyorsulás RMS értéke, kényelmes érzékelési besorolás
	0,300 ≤ a < 0,400	Szűrt oldalgyorsulás RMS értéke, közepesen kényelmes érzékelési besorolás
	0,400 ≤ a	Szűrt oldalgyorsulás RMS értéke, kevésbé kényelmes érzékelési besorolás

⁴ Pozitív szabad oldalgyorsulásról beszélünk, ha a gyorsulásvektor a körívbeli kifelé mutat.

⁵ Negatív szabad oldalgyorsulásról beszélünk, ha a gyorsulásvektor a görbületi középpont irányába mutat.

⁶ Még nem hatályos, jelenleg is kidolgozás alatt áll.

⁷ A szabványt hatályon kívül helyezték. A határérték egyenes és ív csatlakozásán értendő és figyelembe veszi a járműrugózás hatását is!

⁸ A feltüntetett értékek minden esetben személyszállító járművekre vonatkoznak és a kocsiszekrényen mérve irányadóak.

5. táblázat: A szabványokban rögzített oldalgyorsulás időbeli változására vonatkozó határértékek

Szabvány	h [m/s ³]	Megjegyzés
OKVPSZ⁹	$h=0,30$	klotoid átmenetiívvel
	$h=0,40$	koszinusz átmenetiívvel
	$h=0,65$	meglevő pályán klotoid átmenetiívvel
	$h=0,70$	átmenetiív nélkül meglevő pályán
	$h=0,80$	átmenetiív nélkül kitérőben
„Sárga könyv”	$h=0,20$	ajánlott érték
	$h=0,40$	megengedett legnagyobb érték
	$h=0,80$	kitérőben megengedett legnagyobb érték
„Sárga könyv” (tervezet)¹⁰	$h=0,20$	$R \leq 50\text{m}$
	$h=0,25$	$50\text{ m} < R \leq 150\text{ m}$
	$h=0,30$	$150\text{ m} < R \leq 500\text{ m}$
	$h=0,40$	$500\text{ m} < R$
ISO 2631-1		
EN 13803-2:2006 (hatályon kívül)¹¹	$h=0,70$	ajánlott érték (I. kategória $80 \leq V \leq 120\text{ km/h}$)
	$h=0,95$	maximális megengedhető érték (I. kategória $80 \leq V \leq 120\text{ km/h}$)
UIC518		
MSZ EN-12299:2009		

A fenti összefoglaló táblázatok alapján megállapítható, hogy a hazai szabályozás jóval szigorúbb az európai normákhoz képest.

⁹ Az OKVPSZ nem tér ki arra, hogy az oldalgyorsulást túlemelt ívben milyen módon kell számolni.

¹⁰ Még nem hatályos, jelenleg is kidolgozás alatt áll.

¹¹ A határérték egyenes és ív csatlakozásán értendő és figyelembe veszi a járműrugózás hatását is!

3.4.1 A hatályos hazai szabályozás hiányosságai [8]

A közúti vasúti pályatervezési előírásokat tekintve a megkívánt tervezési sebességhez tartozó átmeneti ív és minimális ívsugár paraméterek megadása a kvázi-statisztikus oldalgyorsulás-változás megengedett értékétől függ. Közúti vasúton, a járművön álló utasoknak is a legjobb utazási komfortot kell biztosítani, ebből a feltételből a minél szigorúbb, kisebb h -vektor érték következik. Ha nagyon szigorú a h -vektor értéke, akkor nagy átmeneti ívhosszakat kell betervezni, ami közúti vasúton nem minden esetben fér el a kötöttségek és a rendelkezésre álló szűk hely miatt. Ilyenkor vagy a tervezési sebesség csökkentése mellett döntenek a tervezők (ami utazási komfort szempontjából nem szerencsés), vagy felmentést kérnek a hatóságtól.

A hazai közúti vasúti pályatervezési előírásokban ugyan van határérték a kinematikai mozgásjellemzőkre, azonban ezek nem határozzák meg azok pontos mérési körülményeit.

Az uniós előírások közül fontos megemlíteni az EN 12299:2009 szabványt, ahol tisztázott a mérés folyamata, helye és a kiértékelés módja is. A szabvány kitér a jármű mértékadó keresztmetszetének meghatározási módszerére és a mérés magassági pozíciójára (ülő, vagy álló utas esetében mért pontok) is. Fontos megjegyezni, hogy a fenti szabványban leírt mérési feltételek csak nagyvasúti járművek esetén lettek validálva. A közúti vasúti járművek nagyvasúttól eltérő sajátosságai miatt csak iránymutatásként alkalmazhatók a szabványban megfogalmazott kritériumok, azok közúti vasúti alkalmazhatóságát vizsgálni kell!

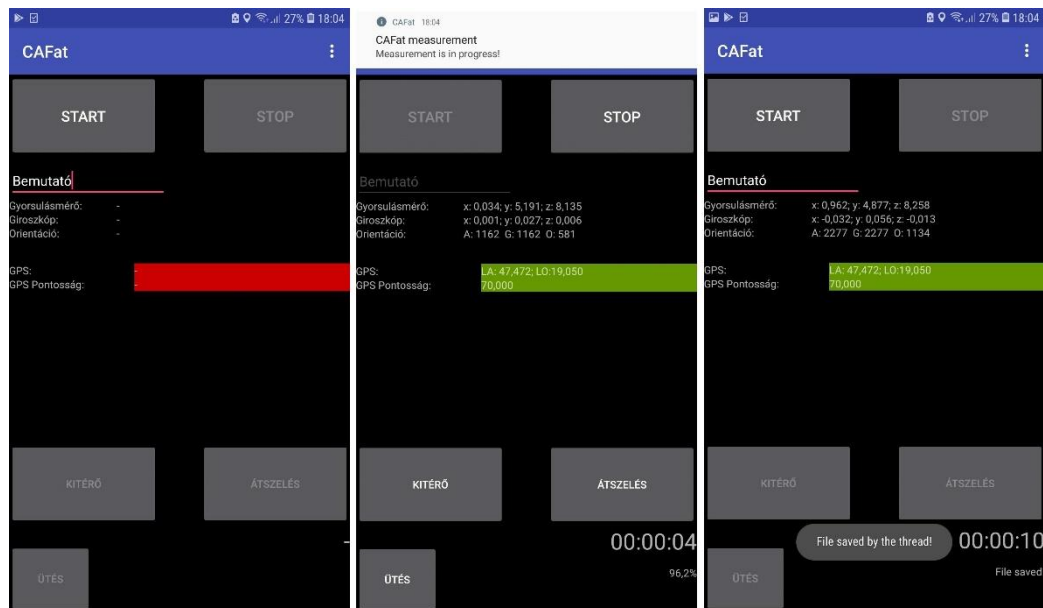
A hazai előírások esetében a nagyvasúti előírásokat szigorították gyakorlati tapasztalatok alapján. Emiatt a határértékek megállapításához célszerű lenne, hogy a Budapesten közlekedő összes járművön mérésekre kerüljön sor és ezek közül a mértékadó oldalgyorsulás-változást kellene figyelembe venni.

4. A jármű kinematikai mozgásjellemzőinek alkalmazott mérési módszere

4.1 A mérő applikáció bemutatása

Napjainkban már a középkategóriás telefonokban szenzorok sokasága megtalálható. Többek között a már említett gyorsulásmérő, giroszkóp, iránytű, mely adatait a kinematikai mozgásjellemzők méréséhez is fel lehet használni. Ehhez szükséges egy jól megtervezett adatlekérő szoftver, jelen esetben a SensorApp [8] és az újonnan, de a SensorApp használata során leszűrt tapasztalatok és szükséges igények alapján továbbfejlesztett **CAFat** applikáció, amelyet Csikós Attila szoftverfejlesztő közreműködésével dolgoztam ki.

A CAFat-ba számos újítás is belekerült, melyeknek a mérések elvégzése és kiértékelése során nagy szükségét éreztük (**1. kép és az I. melléklet 3. kép**). A legfontosabb módosításokat az **I. mellékletben** foglalom össze.



1. kép: A CAFat működéséről készült képernyőfelvétel
(a.) a program indítása előtt, b.) mérés közben c.) fájl mentésekor)

Az **1. kép** és az **I. melléklet 3. képe** a telefonos applikáció elindítása és működése közben készült. Jól látható, hogy álló nézetrel (mely a kalibrációk elkészítése során hasznos) illetve fekvő nézetrel (**I. melléklet, 3. kép**-mely a járművön végzett mérés esetén hasznos) is rendelkezik.

Mind a két képsorozat esetében elmondható, hogy az első kép a mérés megkezdése előtt készült, amikor még a GPS jelet nem találta meg az applikáció, ezért található egy piros sor, mely erre figyelmeztet. Erre azért volt szükség, mert a mérés – ezzel egyetemben – a GPS elindítása még nem garantálta azt, hogy értékelhető adatot ad majd vissza.

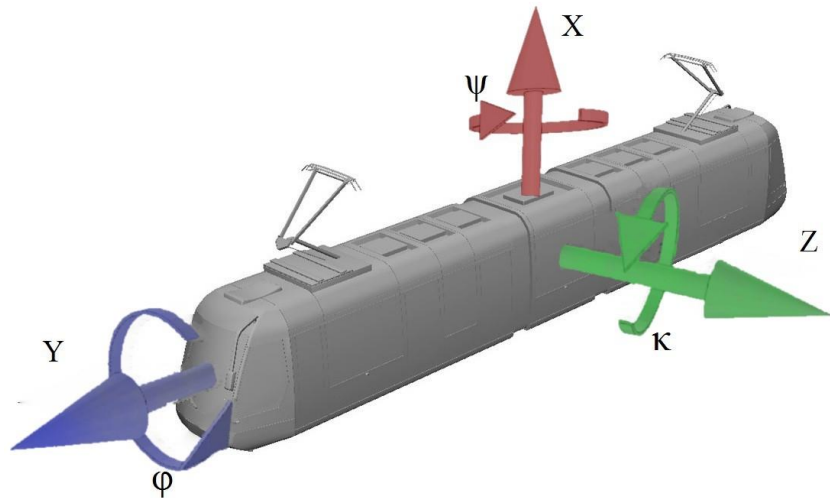
A második képeken az elindítás látható, itt már a piros sáv zöld színűre váltott, mert a GPS jelet megtalálta az applikáció. A START gomb megnyomásával pedig elindul a mérés, hangjelzés és felugró ablak kíséretében.

A harmadik képen pedig a leállítás pillanatát rögzítettem, mely esetében szintén látható egy felugró ablak arról, hogy a mérési fájl mentése megtörtént.

Szolgáltatott adatok egy *.csv fájlban kerülnek kiírásra (**I. melléklet, 21. ábra**), a mért paraméterek az **I. mellékletben** kerülnek felsorolásra.

A **6. ábra** a mérési irányokat és a rajtuk azonosítható szabálytalan járműmozgásokat szemlélteti.

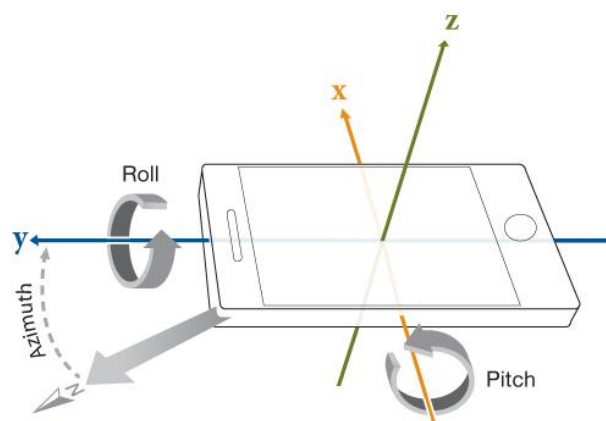
X tengely: rázás
 Y tengely: rángatás
 Z tengely: szitálás
 φ : támo lygás
 κ : bólintás
 ψ : kígyózás



6. ábra: CAFat applikáció mérési tengelyeinek értelmezése és a szabálytalan járműfutas kapcsolata

4.1.1 Mérési elrendezés

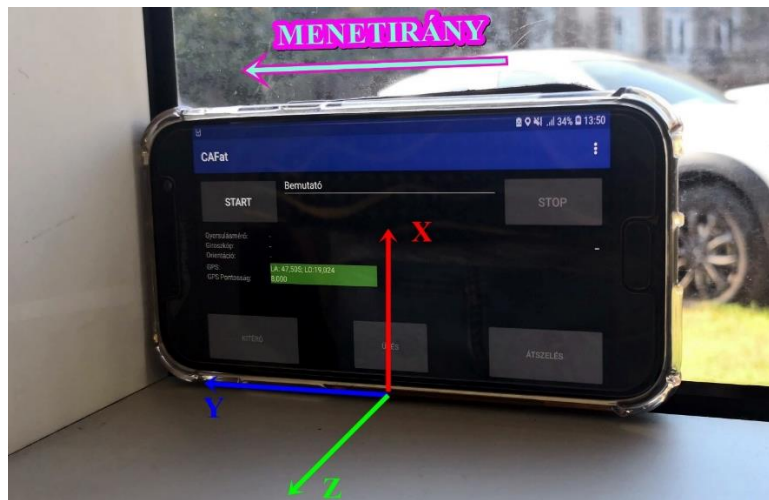
Az okos telefonokban lévő szenzorok tengelyelrendezése telefontípustól független, szabványosított elrendezés. A gyorsulásmérő, mágneses iránytű és a giroszkóp alkalmasak a térbeli mozgás leírására (3 mérési tengely) és a mérési tengelyeik jobb kezes koordináta rendszert követnek. Amennyiben a telefont, vízszintes felületen, kijelzővel felfelé helyezzük magunk elé, úgy, hogy a töltő csatlakozója legyen hozzánk közelebb, akkor az x-tengely jobbra, az y-tengely a telefon hosszú oldala mentén a kamera irányába, míg a z-tengely pozitív iránya függőlegesen felfelé mutat. Ezen tengelyek körüli elfordulások pozitív irányát is a jobbkezes szabály határozza meg (**7. ábra**)



7. ábra: A szenzorok mérési tengelyeinek és a pozitív forgási irányok értelmezése [26]

A mérések során a telefont a hosszú oldalával fektetve helyezzük a kocsiszekrény falára úgy, hogy az y-tengely pozitív iránya megegyezzen a menetiránnyal. A jármű választott mérési

keresztmetszetében, a **8. ábra** szerinti elhelyezés a célszerű. A mérések túlnyomó részében egy szilikon pad segítségével rögzítettem a jármű ablakához a készüléket, ezzel elkerülhetővé vált az, hogy emberi hiba által rögzített mozgás rossz eredményt adjon.



8. ábra: Célszerű mérési elrendezés a CAF villamos ablakának alsó sarkában
(gumipaddal rögzítve)

4.2 A mért és szolgáltatott paraméterek értelmezése, adatfeldolgozási módszerek a mértékadó járműkeresztmetszet meghatározása során

A.) Oldalgyorsulás adatok feldolgozása és értelmezése [2]

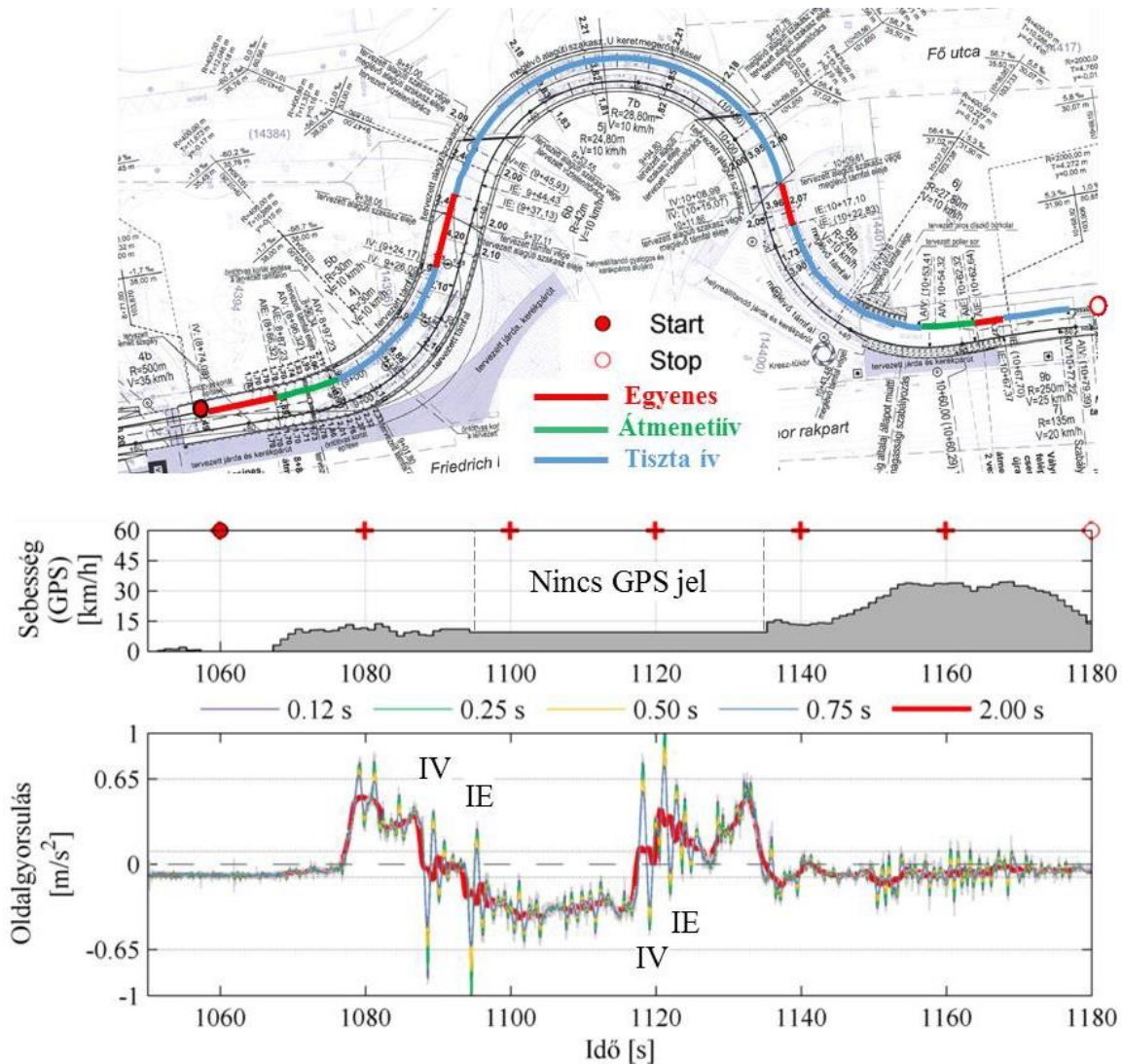
A kocsiszekrényen mért gyorsulásadatok rendkívül zajosak, így közvetlenül nem használhatók fel, előzetes feldolgozás szükséges. A kinematikai vizsgálat szempontjából nem releváns magasabb frekvenciájú rezgések eltávolítása érdekében a kocsiszekrényen mért nyers oldalgyorsulásra kétoldali mozgóátlagot alkalmazunk, melyet a **(4.1) összefüggés** szerint állítunk elő.

$$\hat{a}_t = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=-k}^k a_{t+j} \quad t = k+1, k+2, \dots, n-k \quad (4.1)$$

ahol: k : a mozgóátlag számításához figyelembe vett tagok száma,
 $2k+1$: mozgóátlagolt szakaszok száma,
 $\hat{a}_t$: a számított mozgóátlag,
 a_t : a kocsiszekrényen mért rezgés gyorsulás. $a_t = a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, ahol n a mért jel elemszáma.

A mozgó átlag során alkalmazott ablakszélesség, azaz a figyelembe vett adatpontok számának megválasztása nem triviális. A különböző járművek eltérő futási tulajdonságokkal és szerkezeti kialakítással rendelkeznek, így a megfelelő ablakszélességet vélhetően járművenként külön kell vizsgálni. A mozgóátlag során figyelembe vett adatpontok számának növelésével leszűrhetők

a jármű parazita mozgásai, a görbületváltozások helyeken tapasztalható hirtelen lökések. Túl kis adatmennyiség figyelembevétele esetén a hasznos jel mellett a járulékos zajok is megjelenhetnek, amelyek a kiértékelés szempontjából nem relevánsak. Az ívviszonyok jellegének azonosításához 1-2 s szélességű mozgóablak alkalmazása célszerű. Ennél kisebb ablakszélesség esetén már megjelennek a jármű hirtelen lökésszerű parazita mozgásai is, amelyek jelen vizsgálat esetén fontosak lesznek. **A mérési adatok feldolgozása során a 0,25 s, 0,5 s és 0,75 s ablakszélesség alkalmazhatóságát vizsgáltam.**



9. ábra: Különböző időablak szélességre meghatározott oldalgyorsulás mozgóátlag vizsgálata a Clark Ádám téri Lánchíd alagútban (Samsung Galaxy A5, CAF 2209 menetirány szerinti első vezetőfülke ablakán mérve a Batthyány tér felé) (konzulensi segítséggel történő kiértékelés)

A különböző ablakszélességek vizsgálatát a **9. ábra** szemlélteti. A Clark Ádám téri pályaívek lehetőséget biztosítanak a különböző görbület-átmeneti geometriák vizsgálatára, hiszen kosárv, tisztaív és csak bemenő-, vagy kimenő átmenetiívvel rendelkező pályaívek is megtalálhatók a vizsgálati helyszínen. A mérés során a készülék a CAF szerelvény menetirány

szerinti első vezetőfülkéjének ablakán lett elhelyezve, gumipaddal rögzítve. A nyers oldalgyorsulás adatokban 5 különböző ablakszélességű mozgóátlagot alkalmaztunk: 0,12 s; 0,25 s; 0,5 s; 0,75 s; 2,00 s.

A 0,12 másodperces ablakszélesség esetén szignifikáns kiugró érték látható az első ív végénél (1089 s), a második ív elejénél (1095 s) és végénél (1118 s), valamint a harmadik ív elejénél (1122 s). A fent említett helyeken „ugrásos” görbületváltozás található, hiszen egyenes és tisztaív csatlakozik egymáshoz. Az alkalmazott ablakszélesség növelésével a mozgóátlagolt oldalgyorsulásban megjelenő lökések amplitúdója csökken, amíg teljesen el nem tűnik. A 2,00 másodperces mozgóátlag már teljesen eltünteti a kiugró értékeket. A 0,12 másodpercnél kisebb ablakszélesség esetén a kiugró értékek amplitúdója 1%-nál kisebb arányban változik. Tehát 2,00 másodperces mozgóátlag az ívviszonyok jellemzésére, míg 0,12 és 1,00 másodperc közötti mozgóátlag a kocsiszekrény lökéseinek vizsgálata során alkalmazható.

Az átlagos oldalgyorsulás adatok tekintetében azt is vizsgáltuk, hogy a gyakorlatban alkalmazott közelítő képletek nagyságrendileg milyen adatot szolgáltatnak. A szabad oldalgyorsulást a tiszta körív hosszán vizsgáltuk, annak érdekében, hogy feltárjuk a mért és az elméleti közelítő értékek közötti kapcsolatot. A tiszta ív és az átmeneti ívek hosszát a BKV Zrt. térképállományának adataiból határoztuk meg. A mért és számított adatok eltéréseit százalékban megadva fejeztük ki. A szabad oldalgyorsulás értékét a **(4.2) összefüggéssel** szokás meghatározni egy konkrét pályaív esetén:

$$a_0 = \frac{V^2}{3,6^2 R} - 9,81 \cdot \frac{m}{1500} = \frac{V^2}{3,6^2 R} - \frac{m}{153} \quad (4.2)$$

Egy hosszabb pályaszakasz vizsgálatához elő kell állítani a pálya úthossz szerinti görbület és túlemelés függvényeit **(4.3) összefüggés**.

$$a_0 = \frac{1}{3,6^2} \cdot V^2 G(l) - \frac{m(l)}{153} \quad (4.3)$$

ahol V [km/h]: mért járműsebesség,
 R [m]: ívsugár,
 m [mm]: túlemelés
 $m(l)$: túlemelés függvény a megtett út függvényében,
 $G(l)$: görbületfüggvény a megtett út függvényében

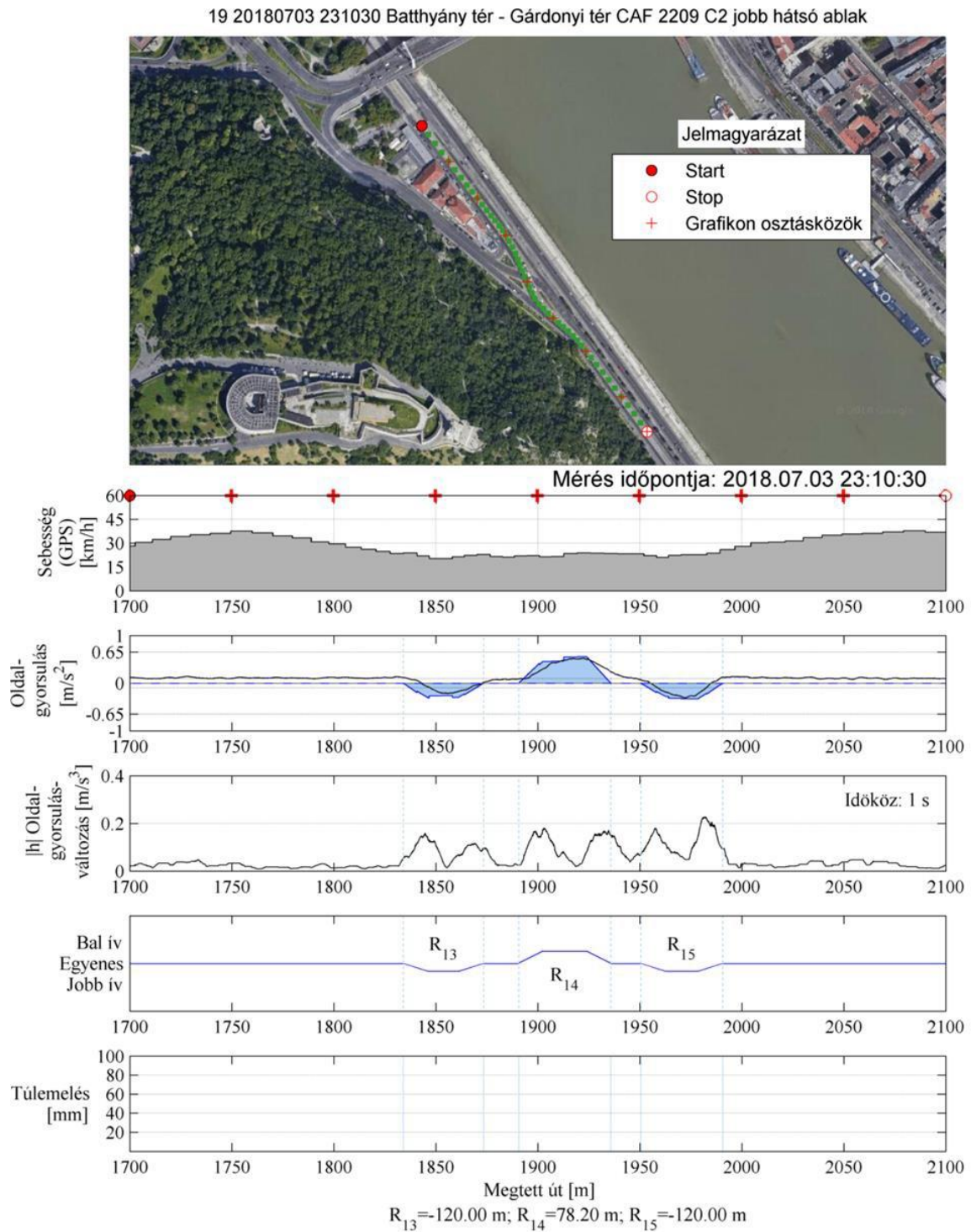
Oldalgyorsulás vizsgálata esetén az aktuális pozícióhoz tartozó sebességet, túlemelés értéket és görbületet helyettesítettük be a **(4.3) összefüggésbe**.

A szabad oldalgyorsulás közelítő képletében, **(4.2) és (4.3) összefüggés** a változó sebesség figyelembe vehető, de a jármű ívérzékelését jelentősen befolyásoló mozgásérzékelő hosszt nem

tartalmazza. Hirtelen, „ugrásos” görbületváltozás esetén a jármű ívérzékelését a **(4.2) összefüggés** nem tudja figyelembe venni, így az átmeneti ív nélküli pályáívek egyenessel való csatlakozásánál, az átlagosnál nagyobb eltérés is tapasztalható.

Az oldalgyorsulás-változás a kocsiszekrényen mért oldalgyorsulás mozgóátlagából, adott konstans időközönként számított minimum-maximum eltéréssel számolt származtatott mennyiség. A vizsgálatok során a számított értékeket az 1,00 másodperces lépésköz alapján határoztam meg, mivel 1 másodperc alatt már az utas számára is érzékelhetővé válnak az utazási komfort szempontjából lényeges igénybevételek.

A különböző pályáívek vizsgálatánál diagramon ábrázoltam az okostelefon által szolgáltatott járműsebességet, a kocsiszekrény szabad oldalgyorsulásának mozgóátlagát és az oldalgyorsulás-változás abszolút értékét, a görbületfüggvényt, valamint a túlemelés függvényt. Az ábrákon a grafikonok a megtett út függvényében láthatók, amelyet a telefon sebességadatának integrálásával határoztam meg. Az ilyen módon meghatározott megtett út adat jelenleg csak korlátozottan alkalmazható, csak azokon a helyszíneken, ahol a GPS jel pontossága tartósan jobb, mint 10 m. A **10. ábra** egy kiértékelési példát szemléltet a Rudas Gyógyfürdő és a Szent Gellért tér közötti pályaszakasz Samsung Galaxy S8 telefonnal végzett felméréséről. A **10. ábra** második grafikonján a kékkel kitöltött görbe a tényleges túlemelés és görbületfüggvény, illetve az aktuális mérési sebességet figyelembe véve a **(4.2) összefüggéssel** határoztuk meg, míg a fekete görbe 2,00 másodperces mozgóátlaggal meghatározott mért oldalgyorsulás adat. A mért és a számított adatok jellegükben és nagyságrendjüket tekintve is hasonlóak.



10. ábra: Az okostelefonnal mért oldalgyorsulás adatok összehasonlítása a gyakorlatban széleskörűen alkalmazott közelítő képletekkel (konzulensi segítséggel történő kiértékelés)

B.) Giroszkóp adatok feldolgozása és értelmezése

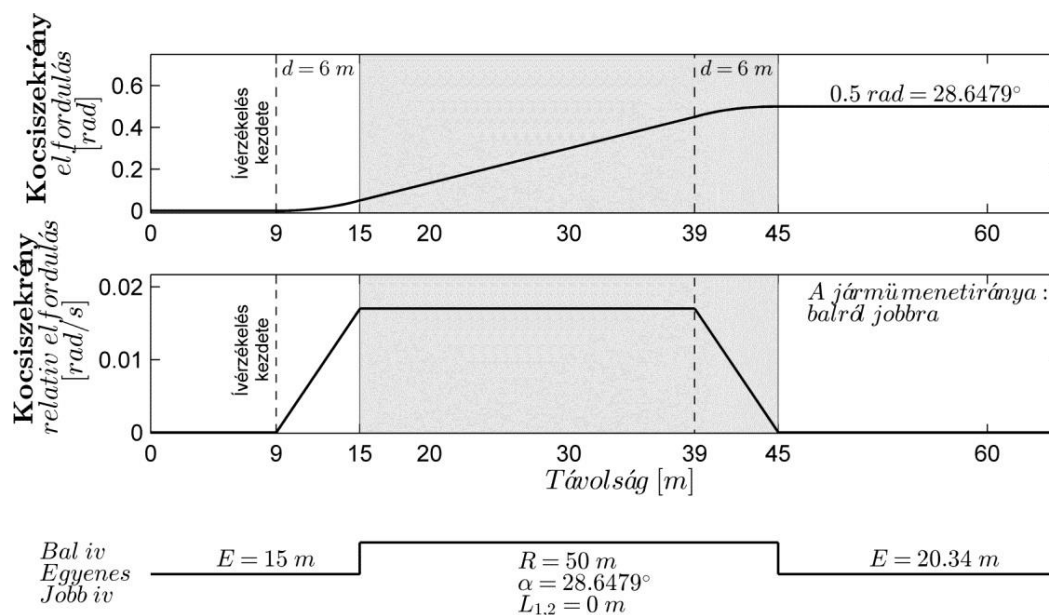
A giroszkópot a pályadiagnosztikában elsősorban a túlelemelés és az ívviszonyok meghatározására használják. A fentiekén túlmenően a giroszkóp alkalmas még a kocsiszekrény nem hirtelen bekövetkező lengéseinek, szabálytalan mozgásainak leírására. A rövid idő alatt hirtelen bekövetkező ütésszerű hatásokat csak a gyorsulásmérő szenzorokkal lehet eredményesen kimutatni. Jelen projekt keretében a kocsiszekrény kigyózó, bólintó és támolygó mozgásának leírására alkalmazhatjuk a giroszkópot. Az alábbiakban az ívérzékelés során való alkalmazhatóságot szemléltetjük.

A mérés során a jármű mozgásérzékelő hosszának (forgócsap-, és keréktengely távolságának) függvényében lehet meghatározni az ívviszonyokat. A forgóvázaz járművek ívbe történő behaladása a mozgásérzékelő hossz alatt következik be.

A **11. ábra** egy $d=6$ m-es forgócsap távolságú, két forgóvázaz jármű ívérzékelését állandó mérési sebesség mellett szemlélteti. Az ábrán jól látható, hogy a jármű az ív előtt 6 m-el már elkezd érzékelni az ívet. A Budapesten üzemszerűen közlekedtetett járművek mozgásérzékelő hossza jelentősen eltér egymástól. Például egy T5C5 kocsit tekintve a mozgásérzékelő hossz a $d=6,7$ m forgócsap távolsággal egyezik meg. Az ipari csuklós villamos (továbbiakban: ICS) esetén a mozgásérzékelő hosszat a 6 m-es forgócsap távolság jelenti. Ebben az esetben viszont figyelembe kell venni, hogy a jármű 3 kocsiszekrényből áll, így kisebb elfordulások fognak kialakulni az ívbe történő behaladáskor, de jellegében az előzőekhez hasonló jelenség tapasztalható.

A nem forgóvázaz, modern alacsonypadlós járművek mozgásérzékelő hossza jelentősen eltérhet az előzőekben felsoroltaktól és a konzolos kialakításnak köszönhetően a pálya görbületváltozások helyein való vizsgálatuk fontos lesz.

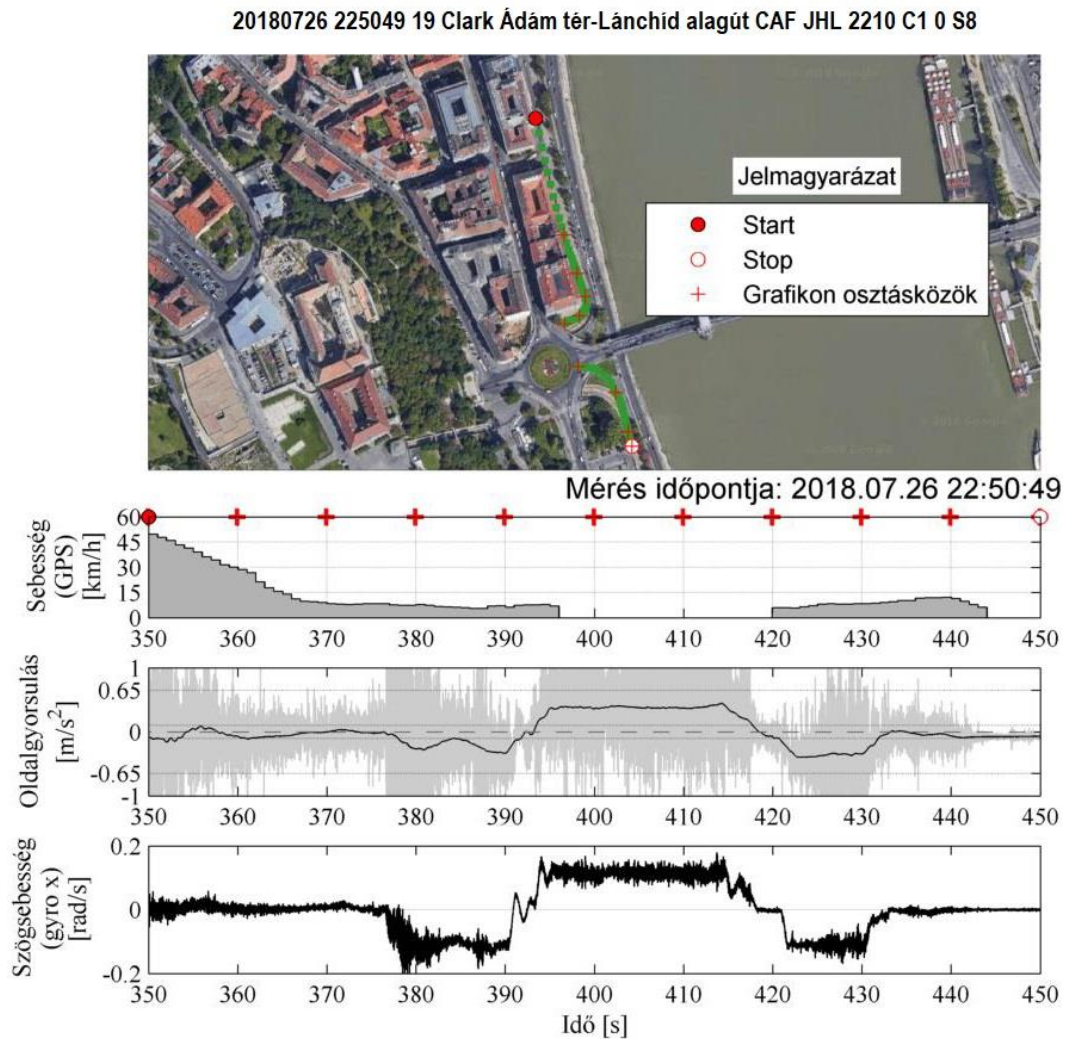
Összességében elmondható, hogy a giroszkóp az alkalmazott mérési sebességtől függően alkalmas a **11. ábra** második grafikonjának előállítására, a járművek mozgásérzékelő hosszának meghatározására és az ívviszonyok szemléltetésére is.



11. ábra: Egy 6 m-es forgócsap távolságú, két forgóvázas jármű ívrézkéltése átmenetiív nélküli ívben (a jármű balról jobbra haladt végig az íven állandó sebességgel)

C.) Oldalgyorsulás és giroszkóp adatok kapcsolata

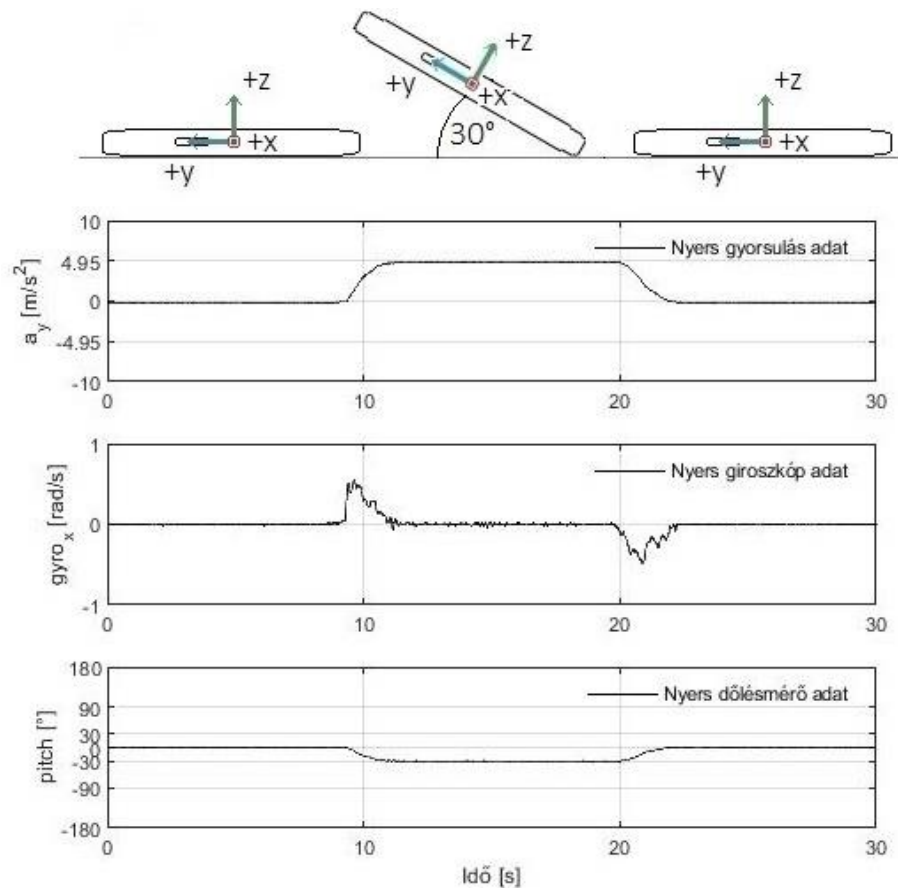
A **12. ábra** az oldalgyorsulás és a giroszkóp adatokat hasonlítja össze. A felső diagram a jármű sebességét, a középső a nyers (szürke) és az ívviszonyokat jellemző szűrt oldalgyorsulás komponenset (fekete), míg az alsó a szűrés nélküli giroszkóp adatot ábrázolja. A mérés során egy CAF Urbos3, 5 modulós villamos jobb hátsó ablakánál végzett mérés látható a Clark Ádám tér és a Halász utcai megálló között, a Lánchíd alagútban. A CAF villamos utazási komfort szempontjából kedvező rezgési tulajdonságokkal rendelkezik, amely a mért oldalgyorsulás adatokban is megmutatkozik (lásd **12. ábra** középső diagram szürke grafikonja). Az ívviszonyokat jellemző oldalgyorsulás komponenset (lásd **12. ábra** középső diagram fekete grafikonja) megkaphatjuk a nyers gyorsulásadatok szűrésével (0,5 Hz-es alul-áteresztő szűrő, vagy 1,00 másodperces mozgóátlag alkalmazásával), míg a giroszkóp esetén már a nyers adatok is egyértelműen tartalmazzák ezt az információt. Fontos megemlíteni, hogy a jó futási tulajdonságokkal rendelkező járművek vizsgálata esetén a nyers gyorsulásadatokban is egyértelműen látszanak az ívviszonyok.



12. ábra: Ívek kimutatása gyorsulás és giroszkóp adatokkal (CAF villamossal - Samsung Galaxy S8 készülékkel, konzulensi segítséggel történő kiértékelés)

D.) A dőlésmérő és giroszkóp adatok kapcsolata

A dőlésmérő és a giroszkóp között a lényegi különbség az, hogy dőlésmérőnél a mérőeszköz relatív helyzetéhez képesti elfordult állapotot mutatja, míg a giroszkóp a relatív helyzettől való szögelfordulás sebességét – mint mozgást – mutatja. Az ívviszonyok és a túlemelés meghatározáshoz, mind a két szenzor adata egyaránt használható. A dőlésmérő adataiból rögtön a túlemeléshez tartozó szöget, míg a giroszkópból szögsebességet [rad/sec] kapjuk kimenő adatként, amit igény szerint át lehet számolni szögbe. A **13. ábra** mutatja be a két szenzor közötti különbséget, illetve a gyorsulásmérővel való kapcsolatukat.



13. ábra: A gyorsulásmérő, giroszkóp és dőlésmérő közötti különbség szemléltetése: 30°-os elforgatás az x-tengely körül

A **14. ábrán** látható, hogy a telefon x-tengelye körüli 30 fokos elforgatás majd visszaforgatás milyen gyorsulás, milyen giroszkóp és milyen dőlésmérő függvényt eredményez.

A 11. és 20 másodperc között a gyorsulásmérő függvény értéke Newton dinamikai alapegyenletéből, az **(4.4) összefüggésből** származtatható. A vizsgált érték meghatározásához pedig a **(4.5) összefüggést** használok fel.

$$\sum F = m \cdot a \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - F_{ny} &= m \cdot a \rightarrow \frac{F_{ny}}{m} = g \cdot \sin(\alpha) - a \\ a &= g \cdot \sin(\alpha) = 9,81 \cdot \sin(30^\circ) = 4,95 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ahol: $\sum F$: az összes készülékre ható erő eredője,
 m : a gyorsítandó tömeg,
 a : a gyorsulás
 g : nehézségi gyorsulás
 F_{ny} : az érzékelő által a tömegre ható erő,

A 11. és a 19. másodperc között a dőlésmérő értéke 30 fokig kúszik, majd megtartja az értéket mindaddig, amíg újra nem kerül vízszintesbe a mérőeszköz.

Ezzel szemben a giroszkóp, ami csak a nyugalmi helyzetből való elmozdulást érzékeli, a 11. másodperben újra nyugalmi állapotba kerül, függetlenül a mérőeszköz aktuális helyzetétől.

4.3 A mérőrendszer által szolgáltatott adatok validálása

4.3.1 Szenzoradatok fizikai tartalmának ellenőrzése

Annak ellenére, hogy a mérések során nem kerül felhasználásra az összes szolgáltatott adat, fontosnak tartottam a rendszer megbízhatóságának szemléltetése érdekében az összes paraméter ellenőrzését.

Az okostelefonokban szabványosított tengelyelrendezés található a különféle szenzorok tekintetében, hiszen telefontípustól függetlenül csak így biztosíthatók a ma már nélkülözhetetlen funkciók, mint például a képernyő automatikus elforgatása, a lépésszámlálók vagy számos a játékelményt növelő apróság. Az interneten elérhető technikai leírások szerint az okostelefonokban jobbsodrású koordináta-rendszert alkalmaznak. A kalibrálás során ennek az állításnak a helyességét is vizsgáltam, amelynek során a telefont számos pozícióba emeltem/forgattam annak érdekében, hogy az összes tengely gyorsulását/elmozdulását/elfordulását megvizsgálhassam. Minden mérés esetén igyekeztem 15 másodperces időközt tartani az egyes pozíciók között.

A.) Gyorsulásérzékelő és a giroszkóp kalibrálása

A kalibráció során azt vizsgáltam, hogy a különböző tengelyeket függőleges pozícióba állítva mekkora gyorsulásértéket mérhetek. Alapvető elvárás, amennyiben a vizsgált mérési tengely függőleges és a gravitációs gyorsulás irányába néz, akkor $+9,81 \text{ m/s}^2$, míg ellenkező esetben $-9,81 \text{ m/s}^2$ gyorsulást kell kapnunk közelítőleg. A giroszkóp esetében pedig csak a készülék mozgatasakor (szögelfordulasakor) jelentkeznek értékek, melyek a mozgatas irányától függően lehetnek negatív illetve pozitív értékek is.

Fontos megjegyezni, hogy a gravitációs gyorsulás sem állandó, illetve a telefon helyzete is eltérhet az ideális függőleges pozíciótól, emiatt jelentkeznek a mért értékek eltérései az elméleti értékektől, ugyanakkor ez még értékelhető, valós eredményt ad.

A teljes kalibrációs folyamatot és annak részletes leírását a **II. melléklet** „Gyorsulásérzékelő és giroszkóp kalibrálása” című alfejezete szemlélteti.

B.) A dőlésmérő kalibrációja

Az x-, y-, és z-tengely körüli elforgatás

Ebben az esetben a készülék három tengelye körüli elfordulást egy mérésben vizsgálni. Jelen esetben a tengelyek körül a készüléket a síkkal bezárva 45° -kal emeltem/forgattam, majd visszaengedtem/forgattam a kiinduló helyzetbe. Alapelvárás, hogy az egyes emelési/forgatási periódusok megjelenésekor a további két tengely értéke közel nulla és az emelés tengelyén jelentkeznek kiugró értékek.

Fontos megjegyezni, hogy az x-tengely körüli (pitch) és az y-tengely körüli (roll) forgatás esetében 0° -ról indul a mérés, míg a z-tengely körüli elfordulás (azimuth) esetében nem 0° -kal hanem (jelen esetben) 75° -kal indul a mérés. Ennek oka, hogy az „azimuth” a mágneses észak és a telefon y-tengelye által bezárt szöget adja vissza, ehhez adódik relatív elfordulásként a telefonnal végzett elfordulás.

A kalibrációs folyamatot részletesen a **II. melléklet** „A dőlésmérő kalibrációja” című alfejezet ismerteti részletesen.

Ezen vizsgálatok során a mért értékeket hasonlítottam össze az elméleti értékekkel. A kapott eredmények tükrében megállapítottam, hogy a készülékkel jól mérhetők az egyes tengelyek irányában történő és tengelyek körüli mozgásjellemzők, így a készülék jól alkalmazható a jármű mozgásgeometriai jellemzőinek mérésére.

4.4 A vizsgált járművek mozgásgeometriai jellemzői [8] [27] [28] [29]

A méréseket valós forgalmi körülmények között (utasokkal együtt) végeztem, egyes esetekben részleges pályalezárásokkal (ekkor nyílt lehetőség több vonali visszafogó kitérő mérésére is). Budapesten a jelenleg üzemszerűen közlekedő járműpark nem tekinthető homogénnek, illetve az OVSZ (Országos Vasúti Szabályzat) sem tér ki arra, hogy a kinematikai mozgásjellemzőket a jármű kocsiszekrényén belül pontosan hol kellene értelmezni. A gyakorlatban alkalmazott közelítő képletekben a jármű tömegközéppontjában értelmezzük őket. A mozgásjellemző vektorok értékei azonban a súlyponttól távolodva jelentősen változhatnak. Különösen igaz ez az állítás a multicsuklós járművek esetén, ahol a „forgóvázak” és a járműszekrények között elhelyezett csuklók konzolosan kapcsolódnak egymáshoz. Ez a szerkezeti kialakítás jelentős többlet igénybevételt jelent a pálya számára, így a vizsgálatok során egy új beszerzésű multicsuklós villamos, a CAF futási tulajdonságait vizsgáltam.

CAF Urbos3

A BKK és a Spanyolországi Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF) gyár megállapodása szerint 2015 és 2016 folyamán a BKV igényei alapján legyártott CAF Urbos3 típusú villamosok érkeztek Budapestre. 2015-től kezdve összesen 35 darab rövid, 5 modulós,

2016-tól kezdve pedig összesen 12 darab hosszú, 9 modulós CAF villamos (**2. kép**) állt forgalomba.

A megrendelt villamosok az Urbos100 forgóváz szerkezettel vannak felszerelve, melyek garantálják a 350 mm-es alacsony padlómagasságot. A jármű befüggesztett (hajtás nélküli) és hajtott kocsiszekrényrészekből áll, ugyanakkor minden kerék hajtott és egymástól függetlenül képesek ívben, kis mértékben sugárirányba befordulni.



2. kép: 2101 pályaszámú CAF Urbos3, 9 modulból álló járműve (Etele út/Fehérvári úti megállóhely)

A vizsgálatok során az elsődleges cél az utas komfortérzet meghatározása volt, ezért a járművön belüli mérési keresztmetszetek kiválasztásakor az utasok lehetséges szélső helyzete volt a mértékadó.

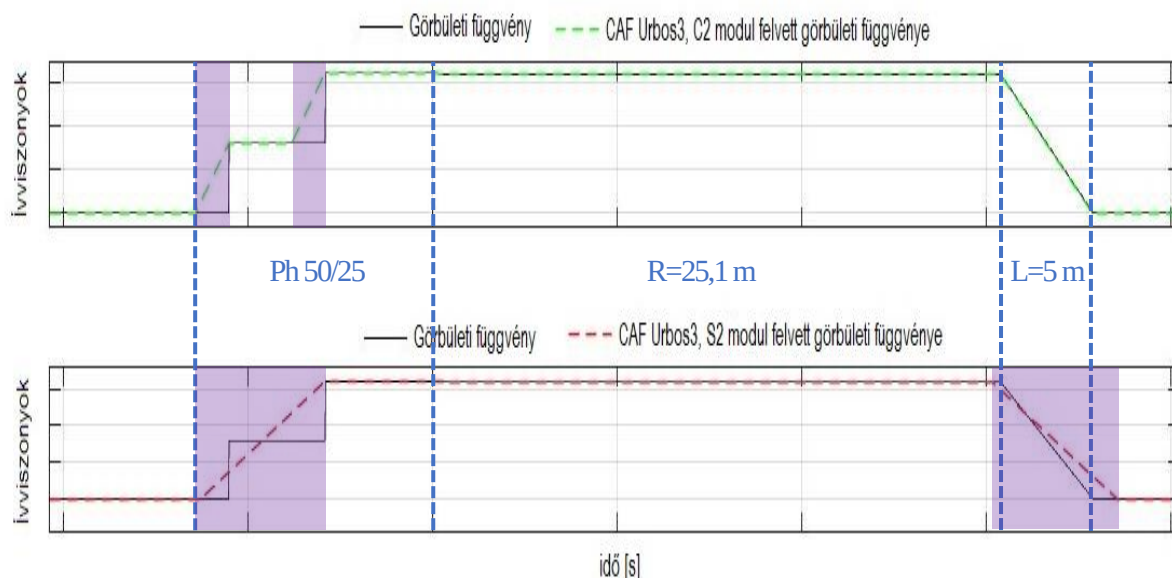
4.4.1 A CAF villamos mozgásérzékelő hossza

A jármű mozgásérzékelő hosszának meghatározása során a Margit híd, budai hídfőnél található, Ph50/25-ös kitérőt és a hozzá csatlakozó 25,1 méter sugarú, 5 méteres átmenetiívvel kialakított pályaívet vizsgáltam. A helyszín kiválasztása szempontjából meghatározó volt, hogy a lehető legkisebb tervezhető geometriával rendelkező helyszín vizsgálhassam, hiszen itt jelenhetnek meg a legmarkánsabban a járműdinamikai hatások.

Feltételezhető, hogy a CAF Urbos3 típusú jármű különböző moduljainak a mozgásérzékelő hossza eltérő. A **14. ábrán** időalapú görbületi függvények láthatók, melyeken jelöltem a vizsgált szakaszhoz tartozó egyes geometriai elemek végeit (kék szaggatott vonal), illetve a jármű mozgásérzékelő hosszait (lila terület). Jól látható, hogy a C2 modul kisebb

mozgásérzékelő hosszal rendelkezik (1,8 m), így a kitérőbe való behaladáskor és a kitérő változó sugarai között egy „plató” keletkezik. Ez nem csak a mozgásérzékelő hossz rövidegéből adódik, hanem a jármű dinamikai hatásaiból is, hiszen a C2 modul konzolos kialakítású, a dinamikai többletterhelése jóval nagyobb, mint egy teljesen alátámasztott vagy befüggesztett modulnak. Ezzel szemben az S2 modul esetében a „plató” megjelenése elmarad, helyette a modul mozgásérzékelő hossza (6,745 m) „kisimítja” ezeket az ugrásokat. Ez köszönhető annak, hogy a dinamikai hatások kevésbé érvényesülnek itt. Emellett az átmenetiívre vonatkozóan is megállapítható, hogy ha a jármű mozgásérzékelő hossza nagyobb, mint az átmenetiív hossza, a mozgásérzékelő hossz felveszi és kisimítja az itt megjelenő hatásokat (a kocsiszekrény dőlése nem az átmenetiív hosszán kerül „kifuttatásra”, hanem a mozgásérzékelő hosszán), míg a kisebb mozgásérzékelő hossz esetében az átmenetiív hossza megjelenik.

Ezek alapján a **14. ábrán** látható görbületi függvények jellegét kívánom alátámasztani a **15. ábrán** szemléltetett mérések kiértékelésével.



14. ábra: A feltételezett mozgásérzékelő hosszakból adódó görbületi függvények ábrái

A kiértékelés során egy időben a jármű két különböző moduljában rögzített adatokat használtam fel. A jármű végében elhelyezkedő C2-es modulban egy Samsung Galaxy A5 típusú készülékkel (**15/2. ábra**), míg az S2-es modulban egy Samsung Galaxy S8 típusú készülékkel (**15/3. ábra**) rögzített adatok láthatók.

Csak azok a mérések használhatók megfelelően, amelyek felmérésénél a járműsebesség közel állandó volt. Abban az esetben, ha a sebesség nem állandó, akkor a giroszkóp és gyorsulásmérő szenzorból származó ábra jelentősen eltérhet, mely eltérést a bedőlő kocsiszekrény okozza. A

mozgásérzékelő hossz megállapítása során a **9. táblázat**ban látható kiértékelési módszert alkalmaztam, illetve a **(5.1) összefüggést**.

A szakaszhatárok kijelölésekor a kitérőn és a hozzá csatlakozó pályaíven áthaladáskor rögzített legnagyobb sebességet vettem alapul, majd az egyes geometriai elemek hosszát ismerve számoltam az áthaladásukhoz szükséges időtartamot másodpercben a **(4.6) összefüggés** felhasználásával, ennek segítségével pedig előállítottam az időalapú görbületfüggvényét a mérésnek.

$$t = \frac{s}{v} \quad (4.6)$$

ahol t [s]: az áthaladáshoz szükséges idő,

s [m]: az egyes geometriai elemek hossza,

v [m/s]: a kitérő elejétől a csatlakozó ív végéig rögzített sebesség maximuma

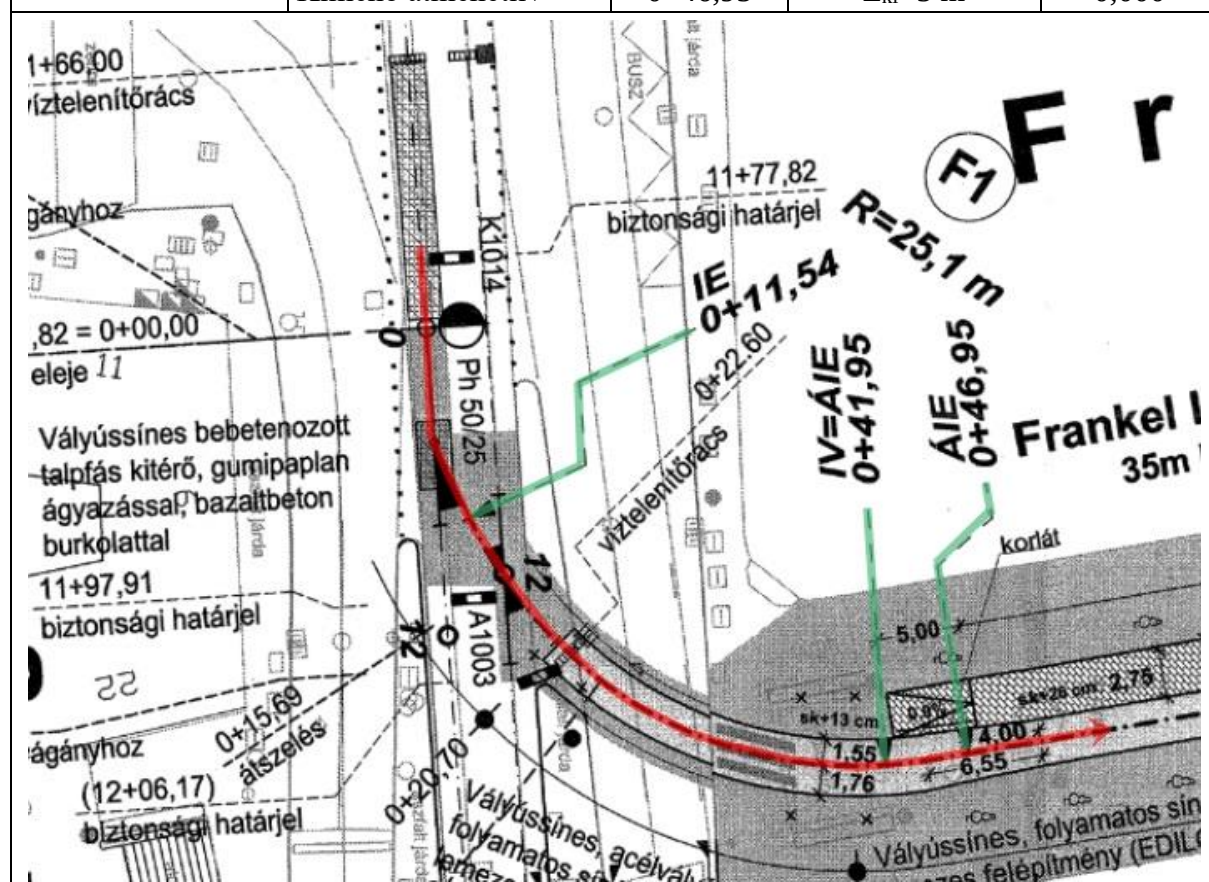
Ez után az egyes szakaszokon található, giroszkópból származó oldalgyorsulás maximumát határoztam meg, ezzel vettem össze a számított oldalgyorsulás maximumát (melyet már a **(5.1) összefüggés** felhasználásával számoltam és ábrázoltam). Ezzel az iterációs folyamattal bizonyítottam, hogy a **15. ábrán** látható mérés esetén a jármű mozgásérzékelő hossza a C2 modul esetében 1,8 méternek felel meg (amely a tengelytávolság), míg az S2 modul mozgásérzékelő hossza 6,7 méternek felel meg (amely megközelítőleg a modul hossza). Az egyes szakaszokon található eltérések a nem egyenletes sebességből adódtak.

A **15/1. ábrán** láthatók a mérés körülményei, a vizsgált helyszín geometriai adatai, az egyes elemekhez tartozó szelvénytávolságok, illetve a helyszínrajz.

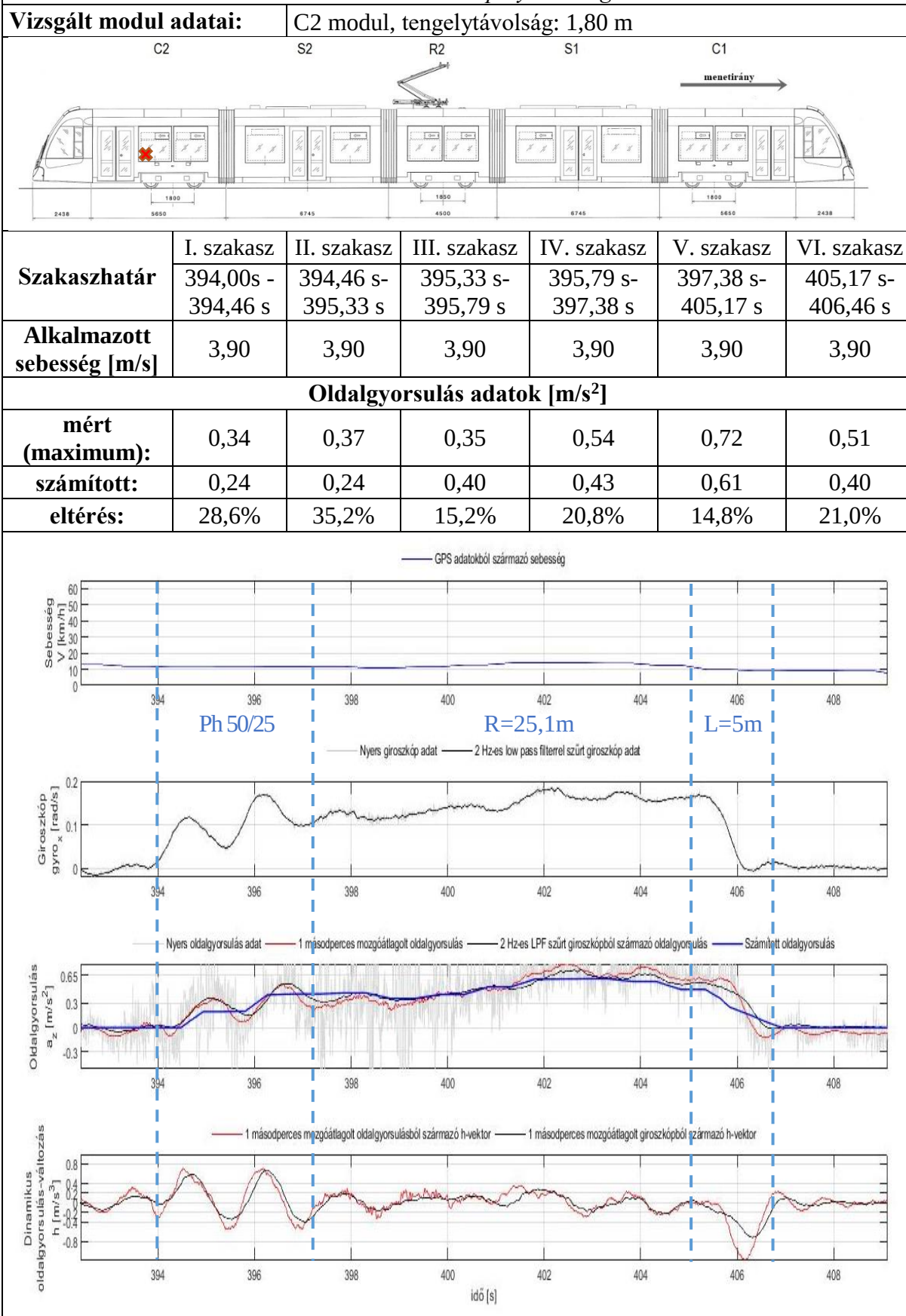
A **15/2. és 15/3. ábra** esetében pedig a két modulban rögzített és számított adatokat mutatom be részletesen, az iterációs folyamat segítségével pedig, a **14. ábrán** látható feltételezésem kívánom igazolni.

15/1. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

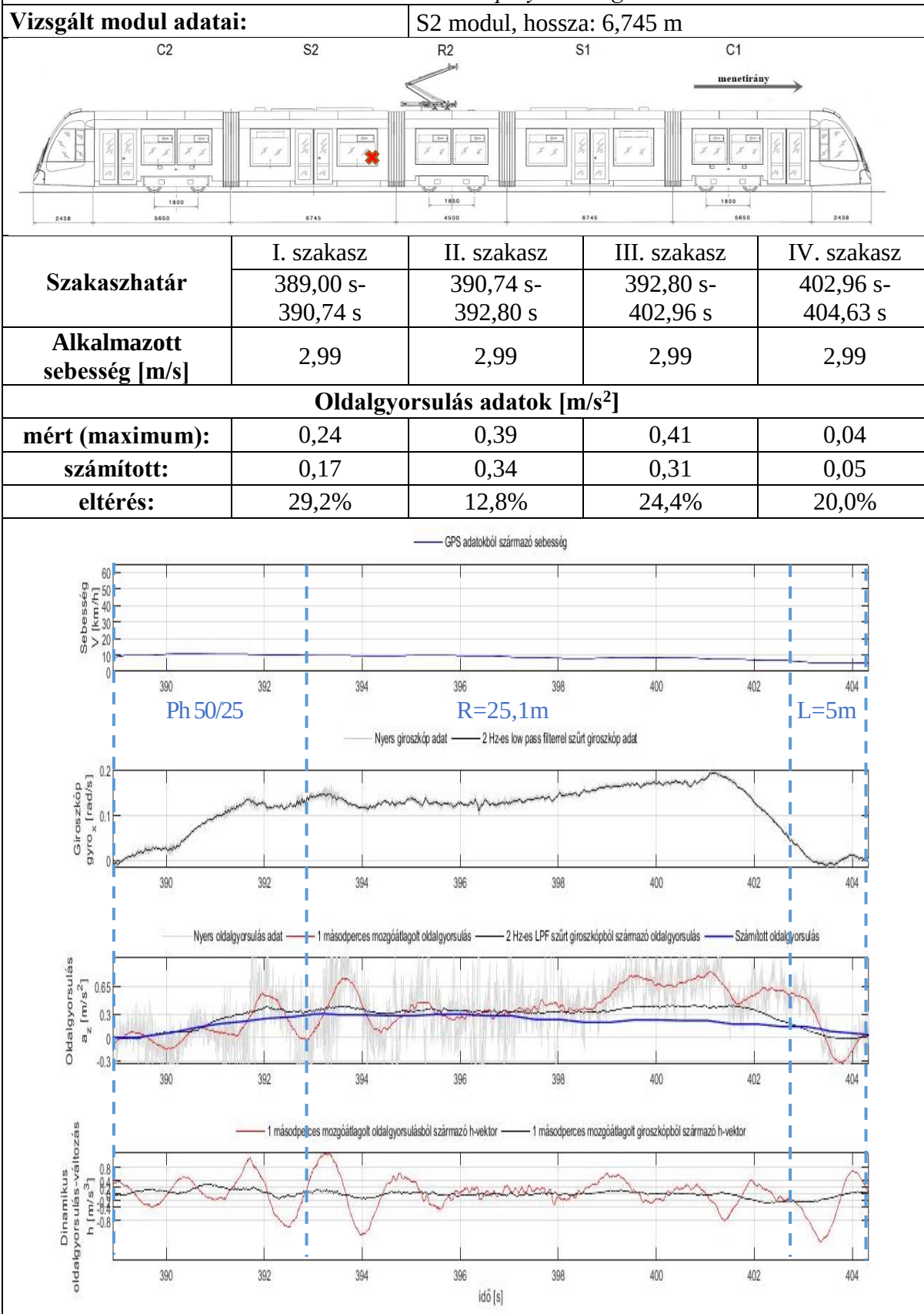
Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcsból kitérőirány			
Vizsgált helyszín:	17-es villamos, Margit híd, budai hídfő H			
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulos, 2219 pályaszámú jármű			
Mérés időpontja:	2018.09.22. 10:55:01	Vizsgált kitérő száma:	K1014	
Vízszintes vonalvezetés:	<i>Pályaelem</i>	<i>Szelvény</i>	<i>Geometriai elem</i>	<i>Görbület</i>
	Kitérő eleje	0+00,00	R _{k1} =50 m	0,020
	Kitérő első sugara	0+05,20		
	Kitérő második sugara	0+11,54	R _{k2} =25 m	0,040
	Csatlakozó pályáiv	0+41,95	R ₃ =25,1 m	0,398
	Kimenő átmenetiív	0+46,95	L _{ki} =5 m	0,000



15/2. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata



15/3. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

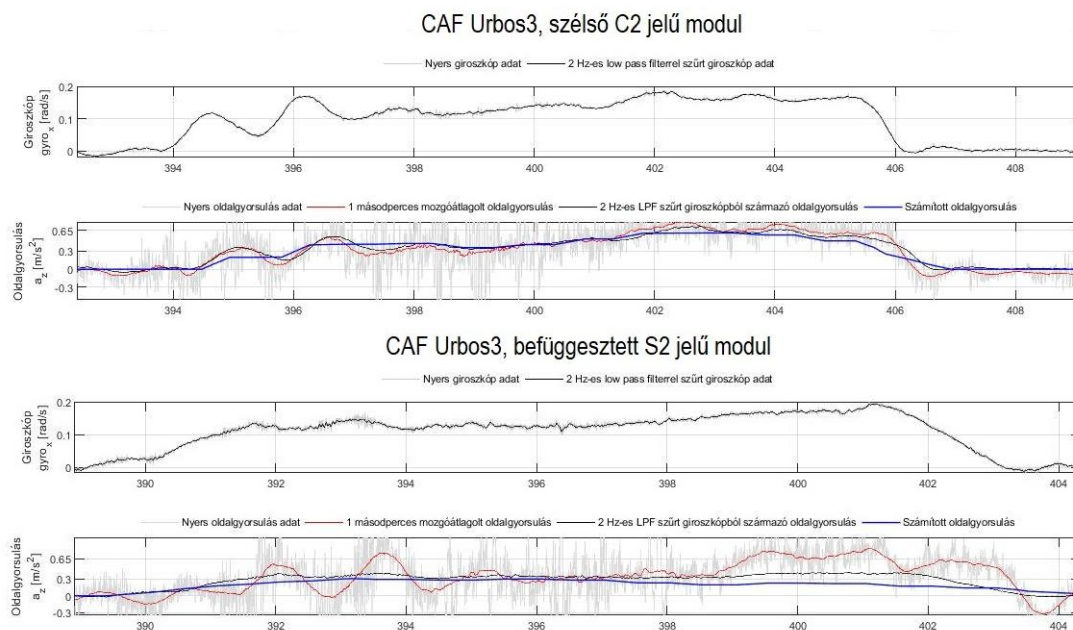


A **15/2. ábrán** látható, hogy a jármű szélső modulja, azaz a C2 modul tengelytávolsága 1,8 m hosszú a modul esetében a hirtelen fordulások a modul sajátos kialakításának és a rövid mozgásérzékelő hosszának a következményei. Ebben a modulban mért giroszkópból származó oldalgyorsulás (fekete) jól követi a gyorsulásmérővel rögzített oldalgyorsulás görbáját (piros). Ennek oka, hogy a szögelfordulás sokkal hirtelenebb, a C modul sajátos kialakítása miatt a dinamikus többletterhelések jelentkeznek, míg az átmenetiív esetében ezek a többletterhelések kisimulnak. Ugyanakkor a **14. ábra** első grafikonján látható feltételezés beigazolódik, az **(5.1) összefüggéssel** meghatározott értékeket (kék) követi a giroszkópból származó oldalgyorsulás (fekete), a görbületfüggvény tehát a feltételezések szerint alakul.

A **15/3. ábrán** látható, hogy a jármű befüggesztett modulja, azaz az S2 modul 6,745 m hosszú. Az ábrázolt mérési grafikonokon megfigyelhető, hogy a giroszkópból származó oldalgyorsulás grafikonja (fekete) nem követi egy az egyben a gyorsulásmérővel rögzített oldalgyorsulás görbáját (piros). Ennek oka, hogy a giroszkóp a jármű lengéseit rögzíti, ebben az esetben pedig a modul szögsebessége kevésbé szabálytalan, sokkal inkább igazodik a **(5.1) összefüggéssel** meghatározható értékekhez (kék), míg a gyorsulásmérő a jármű lengéseit és ütésszerű szabálytalan mozgásait rögzíti, amely esetében viszont a teljes szerelvény befolyással bír. Ezen modulnál a kitérőbe való behaladáskor megjelenő rámpa egyenletes, ugrások nélküli, azaz egy viszonylag hosszú távolságon veszi fel a jármű a pálya ívét. Az iterációs folyamat során, megállapítható, hogy az S2 modulban a modul hossza, 6,745 m lesz a mozgásérzékelő hossz. Ugyanakkor a **14. ábra** második grafikonján látható feltételezés itt is beigazolódik, hogy a kitérőbe való behaladáskor a jármű mozgásérzékelő hossza, vagyis a 6,745 m veszi fel és simítja a dinamikus hatásokat, az átmenetiív esetében pedig a kocsiszekrény dőlésének „kifuttatása” a mozgásérzékelő hosszon történik.

Az S2 és a C2 modul gyorsulásadatokat tartalmazó **16. ábrán** található grafikonokat összehasonlítva felfedezhető, hogy a **14. ábrán** bemutatott feltételezésnek megfelelő járműmozgás ment végbe a vizsgált szakaszon való áthaladás során. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a modulok kialakítása is szerepet játszik az egyes dinamikai többletterhelések megjelenésekor. A C típusú modulok konzolos kialakításúak, mely esetében a rövid mozgásérzékelő hossz és a konzol geometriájából adódóan nagyobb többletterhelések jelennek meg, mint a teljes alátámasztással rendelkező R és M jelű modulok esetében, ahol a mozgásérzékelő hosszak szintén 1,8 m körül alakulnak (tengelytávolságtól függően), emellett az S jelű, befüggesztett modulok viselkedése másképp alakul, hiszen ott a modul teljes hossza

veszi fel a dinamikus hatásokat. A mozgásérzékelő hosszak meghatározására számos mérést végeztem, minden esetben megállapítható volt a **15/2-15/3. ábrán** látható jellegű járműmozgás.



16. ábra: C2 és S2 modulok rögzített mozgásadatai

Az ellenőrző mérések kiértékelése után látható, hogy a CAF járművek mozgásérzékelő hossza modulonként változik, 5 modulos, mind a 9 modulos jármű esetén a **6. táblázatban** látható értékeket veszi fel. Emellett megfigyelhető, hogy a gyroszkópból számolt oldalgyorsulás jól korrelál a közelítő képletekből származó **((5.1) összefüggés)** értékekkel.

6. táblázat: CAF Urbos3 járművek mozgásérzékelő hossza modulonként

CAF Urbos3, 5 modulos jármű			CAF Urbos3, 9 modulos jármű		
Modul jele	Mozgásérzékelő hossz		Modul jele	Mozgásérzékelő hossz	
C1, C2	tengelytávolság	1,800 m	C1, C2	tengelytávolság	1,800 m
S1, S2	modul hossza	6,745 m	S1, S2, S3, S4	modul hossza	6,745 m
R2	tengelytávolság	1,850 m	R1, R2	tengelytávolság	1,850 m
			M	tengelytávolság	1,800 m

4.5 A mértékadó keresztmetszetek meghatározása¹²

A keresztirányú utazási komfort szempontjából mértékadó keresztmetszet(ek) meghatározása CAF Urbos3 típusú járművek esetén [2]

A kritikus járműkeresztmetszet meghatározására olyan pályáíveket és ívelrendezéseket vizsgáltunk, ahol a pálya műszaki állapota kiváló (avult állapotú pálya és jármű esetén a

¹² Erre a fejezetre vonatkozó mérések során közreműködői segítséget kaptam (így sikerült a jármű több keresztmetszetén egy időben elvégzett méréseket készíteni). A kiértékelést a konzulensemvel közösen végeztem.

járulékos (többlet) igénybevételek jelentősen torzíthatják a hasznos gyorsulásjelet), és a vágánygeometriai paraméterek jelentős hatással vannak a jármű kinematikai mozgásjellemzőire. Emiatt elsősorban kissugarú ($R < 150$ m) és nagy középponti szögű pályaiíves szakaszokat választottunk ki.

Továbbá fontos szempont volt az is, hogy csak olyan ívelrendezések vizsgálhatók, amelyek felmérésénél a járműsebesség közel állandó volt. Abban az esetben, ha az ív bármely pontján a jármű megáll, akkor nem keletkezik szabad oldalgyorsulás, így a kinematikai mozgásjellemzők sem vizsgálhatók. Ugyanakkor fontos azt is megjegyezni, hogy ha az ív végén a járművezető kigyorsítás céljából emeli a jármű sebességét, esetleg már az ívben sem állandó a sebesség, akkor a giroszkóp és gyorsulás ábrája jelentősen eltérhet, mely eltérést a bedőlő kocsiszekrény okozza. Az alábbiakban a CAF Urbos3 típusú járművek 5 modulos (**III. melléklet**) és 9 modulos (**17. ábra** és a **III. melléklet**) változatainak vizsgálati eredményeit ismertetem.

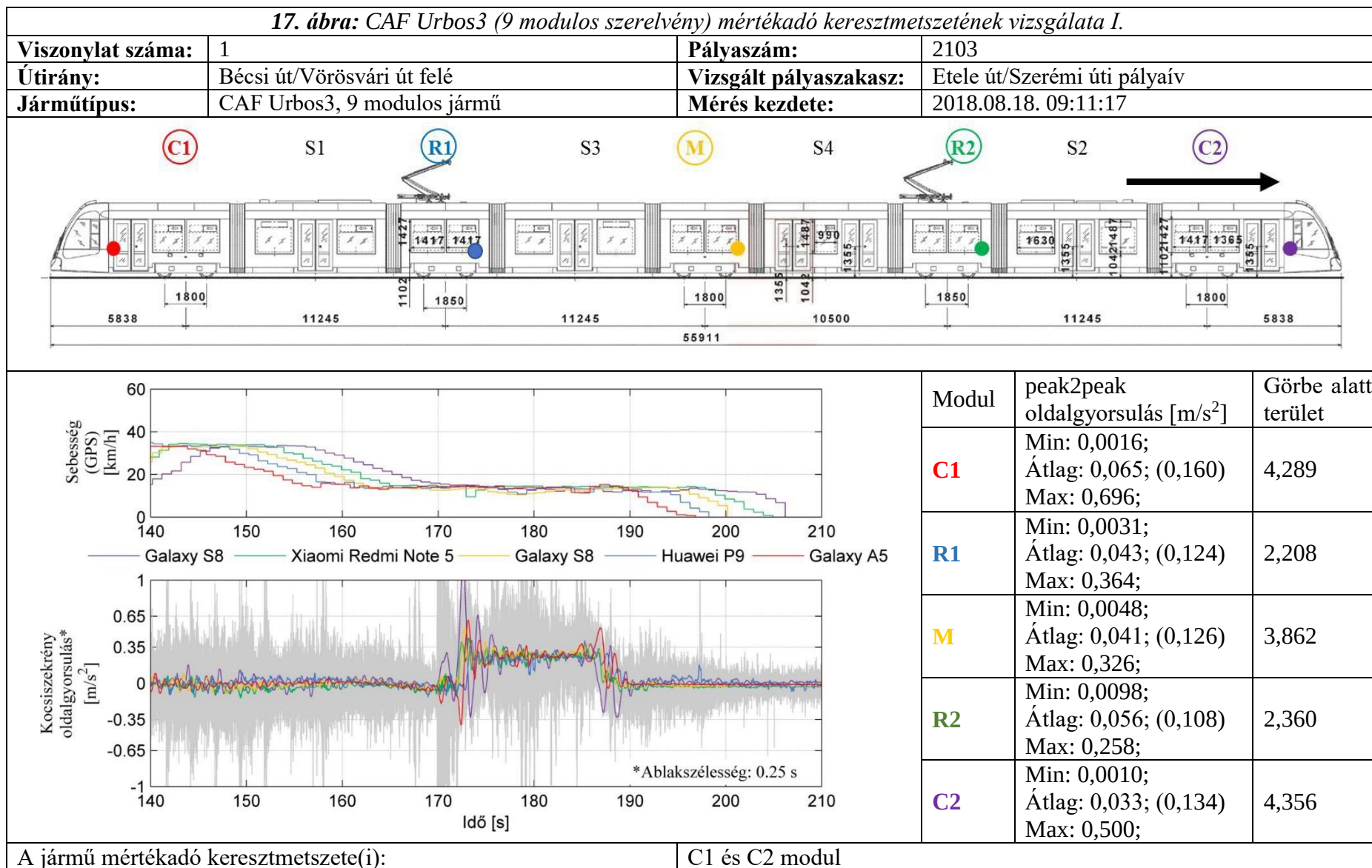
CAF Urbos3 (9 modulós szerelvény)

A keresztirányú utazási komfort szempontjából mértékadó keresztmetszetet az 1-es villamos *Etele út / Fehérvári út* és *Közvágóhíd* megállók között vizsgáltuk. Jelen fejezetben az Etele út/Szerémi úti pályaiövet kívánom részletesen ismertetni, a **III. melléklet**ben a „CAF Urbos3 (9 modulós szerelvény)” alfejezetben további mérési eredményeket ismertetek a mértékadó keresztmetszet meghatározásával kapcsolatban.

Etele út/Szerémi úti pályaiív (Bécsi út/Vörösvári út felé)

A vizsgált pályaiív $R = 42$ m sugarú, 10 m-es szimmetrikus kialakítású átmenetiívekkel. Az ívbe való behaladáskor és kihaladáskor a jármű menetirány szerinti első és hátsó vezetőfülkéjénél lökést azonosítottunk (**17. ábra**). A mérési keresztmetszetek kiértékelése 0,25 másodperces mozgóablakkal számolt csúcstól-csúcsig eltérés és a mozgóátlagolt oldalgyorsulás görbe alatti terület értéke alapján történt. Az ívbe való behaladáskor a menetirány szerinti első vezetőfülkénél volt a legnagyobb a sebesség (17 km/h), a többi vizsgált járműmodul esetén a sebesség közel állandó volt (~ 14 km/h). A sebesség különbség nem indokolja a vezetőfülke és többi modul közötti jelentős eltérést (**17. ábra**). A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulását a **17. ábra** szemlélteti.

17. ábra: CAF Urbos3 (9 modulós szerelvény) mértékadó keresztmetszetének vizsgálata I.



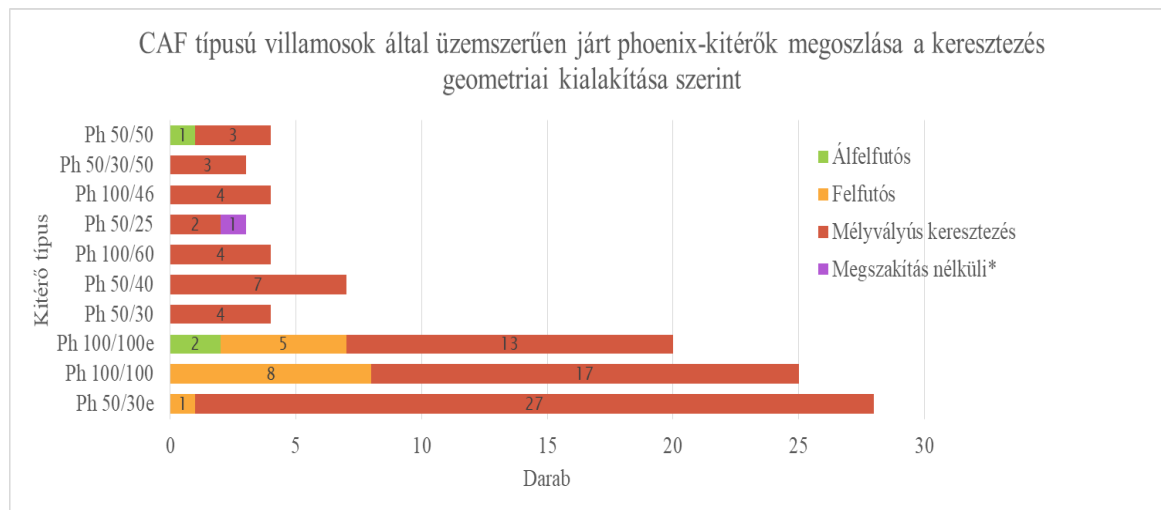
4.5.1 A vizsgált járművek összesítő kinematikai értékelése

A vizsgált járművek (CAF Urbos3 9 modulos és 5 modulos járműtípus) esetében elvégzett vizsgálatok során egyértelműen megállapítható, hogy mind a két jármű esetében a mértékadó keresztmetszet a C1 és C2 modul lesz. Ezek közül is általában az a modul, amely a menetirány szerint hátul van. Ennek oka, hogy a járművezetők az ívből való kihaladáskor „felgyorsítanak”, de ekkor még nem haladt át a jármű teljes hosszban az íven, így az utolsó modul esetében „ostorcsapás szerűen” jelentkeznek a többlet-terhelések. Ez a sebesség grafikonokon (az utolsó modul sebessége a vizsgált szakasz végén nagyobb) és az oldalgyorsulás grafikonokon (17. ábra, illetve a III. mellékletben található ábrák) a legtöbb esetben jelentkezik egy komolyabb kiugró érték is jól látszik.

5. Kitérőcsoportok, vágánykapcsolások és csatlakozó pályaívek mozgásgeometriai vizsgálata

5.1 A mérési és vizsgálati helyszínek kiválasztásának szempontjai [9] [30]

Jelen kutatómunkában csak a Phoenix típusú kitérőkkel foglalkoztam. Azon belül is csak a CAF típusú villamosok által járt vonalakon elhelyezkedő kitérőkkel. A fenti szempontok alapján kiválasztott kitérőket a 18. ábra szemlélteti.



18. ábra: CAF típusú villamosok által járt Phoenix-kitérők megoszlása a keresztezési csúcs geometriai kialakítása szerint^{13,14,15}

A vizsgált kitérők kiválasztása során (7. táblázat) igyekeztem minden járatos típust figyelembe venni. A különböző szerkezeti és geometriai kialakítású kitérők összehasonlítása során az elsődleges szempont a szabálytalan járműmozgás (oldalirányú lökések és keresztirányú

¹³ Az kimutatást a BKV hozzájárulásával készítettem el, a tőlük kapott összesítő kitérő adatbázis alapján.

¹⁴ A *-gal jelölt keresztezési csúcs a 2018-as nyári felújítás során került beépítésre, tesztjelleggel.

¹⁵ A különböző geometriai kialakítású keresztezések részletes ismertetése a IV. mellékletben található.

lengések) mértékének számszerűsítése és a kitérő paramétereivel való kapcsolat keresése volt. A járművek futásjóságát az alábbi kitérő paraméterek befolyásolhatják: kitérő sugara, végérintő szöge, keresztezési rész szerkezeti kialakítása, csúcspól típusa és szerkezeti kialakítása. A fenti paraméterek közül kiemelten foglalkoztam a kitérők végérintő szögének **(7. táblázat)** vizsgálatával és annak járműfutasra gyakorolt hatásaival. Ennek megfelelően pedig olyan vizsgálati helyszíneket kerestem, amelyek alkalmasak arra, hogy megvizsgáljam melyik az a végérintő szög, amely esetében nem tapasztalható szignifikáns szabálytalan járműmozgás. Itt az egyszerű, egyedülálló kitérőket és a vonali visszafogásokat, végállomási keresztkapcsolatokat is vizsgáltam.

A mérések kiértékelése során nem csak a kitérőbe eltérítő ágon való behaladáskor jellemző szabálytalan járműmozgásokat, hanem a csatlakozó kissugarú ívekben való mozgásjellemzőket is vizsgáltam. A pontos helyszínek kiválasztása során igyekeztem olyan kiváló műszaki állapotú kitérőket kiválasztani **(7. táblázat)**, ahol tiszta ív, esetleg átmeneti íves körívek csatlakoztak a kitérő eltérítő ágához. A kiváló műszaki állapot fontos kritérium, hiszen pályahibák esetén a dinamikai hatások sokszorozódnak (a mért adatok zajjal terheltek), így nehezebb a szabályos jellegzetességeket megfigyelni.

7. táblázat: A kiválasztott és vizsgált kitérők adatai¹⁶

Kitérő típusa	Végérintő szög	Kitérő száma	Helyszín	Közlekedő viszonylat
Ph 100/100e	8-37-00	K4210	Etele út/Fehérvári út	1
Ph 100/100e	8-37-00	K2021	Puskás Ferenc Stadion	1
Ph 100/100	12-00-00	K2504	Döbrentei tér	19
Ph 100/100	12-00-00	K2902	Frankel Leó utca	17
Ph 100/46	14-48-14	K1813	Körösi Csoma út-Kápolna utca	3
Ph 50/50	14-48-14	K2506	Szent Gellért tér	19
Ph 50/40	16-24-25	K2417	Móricz Zsigmond körtér	17
Ph 50/30e	14-48-14	K2753	Savoya Park	17
Ph 50/30e	14-48-14	K2754	Savoya Park	17
Ph 50/25	20-36-37	K2901	Vidra utcai kiágazás	19
VPh 50/25	20-36-37	K1014	Margit híd, Budai hídfő	17

¹⁶ A csúcspól geometriai kialakítása a Ph 100/100e típusú kitérő esetében érintőköríves, míg a táblázatban felsorolt további kitérőtípusok metszőköríves kialakítású csúcspóllal rendelkeznek.

5.2 Mérések kiértékelése

Ebben a fejezetben csak egy mérést értékelek ki részletesen, viszont a további kiválasztott helyszínekhez tartozó részletes és kiegészítő mérések az **V. mellékletben** találhatók. Ezek alapján vizsgáltam a mért adatok jellegzetességeit és a közelítő képletek alkalmazhatóságát is.

Az oldalgyorsulás kiértékelése során a mért és a közelítő képletekkel számolt értékek **(5.1) összefüggésben** található eltérését vizsgáltam. Abban az esetben, ha az eltérés nem haladta meg a 20%-ot úgy megfelelő az oldalgyorsulások eltérése, melyet zöld színnel emeltem ki. Abban az esetben, ha minimálisan lépte túl, azt nem emeltem ki, míg ha a többszöröse a 20%-os eltérésnek, azt piros kiemeléssel jeleztem a **20/2. ábrán és az V. mellékletben** látható kiértékelési táblázatokban.

$$a_0 = \frac{v^2}{R} \quad (5.1)$$

ahol: a_0 : a számolt oldalgyorsulás értéke [m/s²]

v : a mérés során rögzített sebesség [m/s]

R : a megadott körívsugár [m] (kitérők esetében R_{k1} és R_{k2} jelölést alkalmaztam)

A dinamikus oldalgyorsulás esetében a BKV által használt „Sárga könyv” határértékeit vettem alapul, ehhez hasonlítottam a mért értékeimet **(8. táblázat)**.

8. táblázat: A "Sárga könyv" alkalmazott határértékei

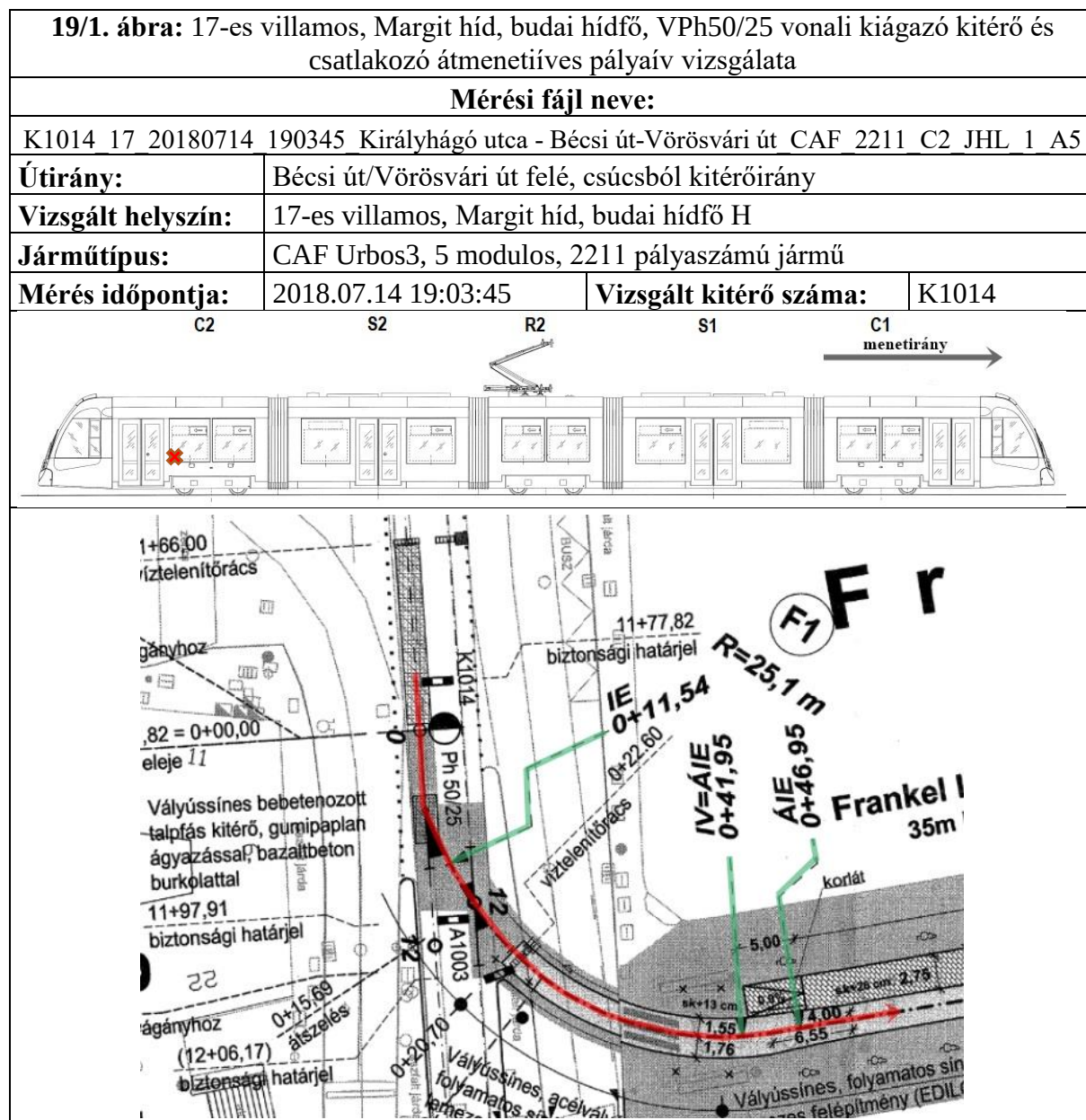
$h=0,40 \text{ m/s}^3$	pályaívokban és folyópályában megengedett legnagyobb érték
$h=0,80 \text{ m/s}^3$	kitérőben megengedett legnagyobb érték

A **9. táblázatban** pedig az alkalmazott adatfeldolgozási módszert, a szűrők és mozgóátlagok paramétereit mutatom be.

A **19. ábra és az V. mellékletben található ábrák** esetében az ábra első része tartalmazza a mérések körülményeit (a mérés pontos dátumát, az útirányt, a viszonylat számát, a vizsgált helyszínt, kitérő számát és típusát, a közlekedő jármű típusát és pályaszámát) és a mérési helyszín vágányépítési helyszínrajzát. Minden mérési helyszín esetén az ábra második részében foglaltam össze a különböző vágánygeometriai elemekhez tartozó (egyenes, ív átmenetiív) tartozó alapadatokat és a mért paraméterek **(5.1) összefüggés** szerint számított értékeit: az ívadatokat, a sebességek szórását, maximumát és minimumát, az oldalgyorsulás mért értékeit, illetve a dinamikus oldalgyorsulás-változás értékeit. A különböző vágánygeometriai elemeken számított kinematikai mozgásjellemzőket összehasonlítottam „Sárga könyv” vonatkozó határértékeivel.

9. táblázat: Az alkalmazott kiértékelési módszer paramétere

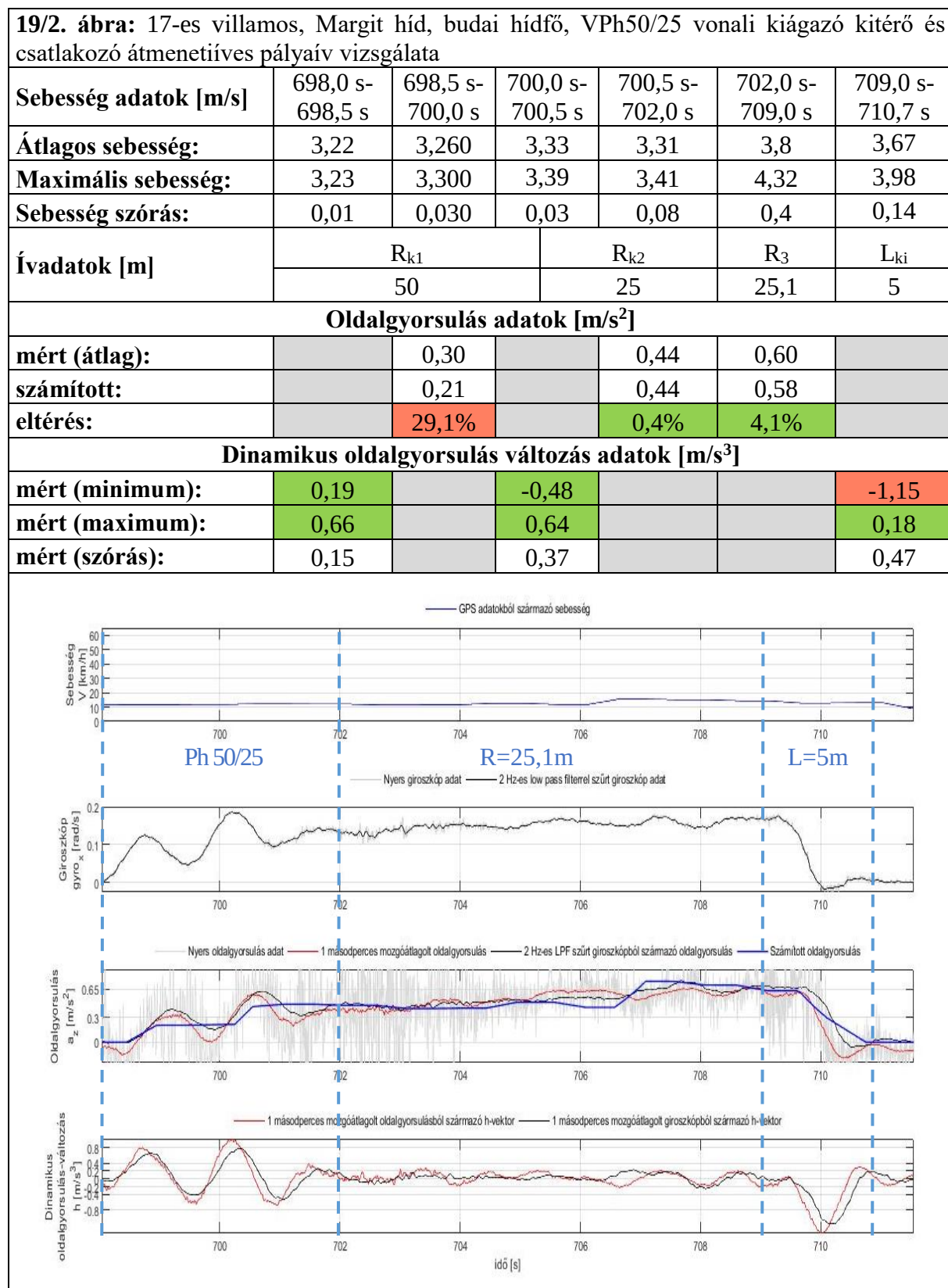
<u>SEBESSÉG adatok „simítása”</u>	<u>GIROSKÓP</u>
A GPS sebesség adatok esetleges ugrása miatt kialakuló lépcsőzetes jelalak simítása szükséges T=1,5 s ablakszélességű mozgó-átlag alkalmazásával: v [m/s]	A jármű függőleges tengelye körüli szögsebességét jellemző giroszkóp (gyro_x) esetében a járulékos zajok leszűrése, 2 Hz-es alul áteresztő szűrővel (EN 12299): $gyro_{x.LPF}$ [1/s]
<u>OLDALGYORSULÁS</u> A rögzített nyers oldalgyorsulás adatok esetében mozgóátlagolást alkalmaztam, melynek időköze: T=0,5 s A már szűrt giroszkópból pedig oldalgyorsulást számoltam: $a_{gyro} = v \cdot gyro_{x.LPF} \quad (5.2)$ ahol: a_{gyro}: a szűrt giroszkóp adatokból számított oldalgyorsulás [m/s²] v: a mozgóátlagolt sebesség [m/s] $gyro_{x.LPF}$: az aluláteresztő szűrt x-tengelyű giroszkóp [rad/s]	
<u>DINAMIKUS OLDALGYORSULÁS - VÁLTOZÁS</u> Numerikus deriválás segítségével számítottam a dinamikus oldalgyorsulás változást a már előzetesen mozgóátlagolt oldalgyorsulásból, illetve a giroszkópból származó oldalgyorsulásból is a (5.2) összefüggés szerint. $h_{acc} = \frac{da_0}{dt} \quad (5.3)$ ahol: h_{acc}: a (5.3) összefüggés szerint meghatározott, mért oldalgyorsulás idő szerinti deriváltjából származó dinamikus oldalgyorsulás-változás [m/s³] a_0: a készülékkel rögzített, mozgóátlagolt oldalgyorsulás [m/s²] $h_{gyro} = \frac{da_{gyro}}{dt} \quad (5.4)$ ahol: h_{gyro}: a (5.4) összefüggés szerint meghatározott dinamikus oldalgyorsulás-változás, melyet a (5.2) összefüggés segítségével számított oldalgyorsulás idő szerinti deriváltjából állítottam elő [m/s³] a_{gyro}: a (5.2) összefüggés segítségével meghatározott oldalgyorsulás [rad/s] Majd a kapott értékeket (azok zajossága miatt) szintén mozgóátlagoltam, mely esetében a T=0,5 s mozgóátlagot alkalmaztam.	



A **19/2. ábrán** láthatók a vizsgált szakasz egyes geometriai elemei szerinti szakaszokra bontása, a kitérő elhelyezkedése, illetve a **9. táblázatban** meghatározott módszer szerinti mozgásgeometriai jellemzők grafikonjai. Az oldalgyorsulást ábrázoló grafikonon látható az **(5.1) összefüggés** szerint számított oldalgyorsulás (kék). Melyet ezen az ábrán az egyes geometriai elemek határainak szemléltetése céljából jelöltem.

Jól látható, hogy az oldalgyorsulás grafikonján a jármű rövid mozgásérzékelő hossza miatt 2 „rampa” is kialakul a kitérőben, az első az egyenes és 50 m sugarú ív közvetlen csatlakozásánál, míg a második az 50 m sugarú körív és a 25 m sugarú körív csatlakozásánál alakul ki. Ezt követően egy viszonylag konstans szakasz következik, de a növekvő járműsebesség miatt a csatlakozó ívben és a kimenő átmeneti ívben már igen nagy oldalgyorsulás értékeket rögzítettem.

A dinamikus oldalgyorsulás-változást ábrázoló grafikonon látható, hogy hol helyezkednek el a görbületváltozások helyek, melyek esetében a „Sárga könyv” értékeit vettem alapul és az annak való megfelelést vizsgáltam.



6. Összefoglalás

6.1. Mérési eredményeket befolyásoló tényezők:

- **A pálya műszaki állapota**
Igyekeztem kiválasztani azokat a kitérőket és csatlakozó pályaszakaszokat, amelyek a lehető legjobb műszaki állapotban vannak, ezzel minimalizálva ezt a hatást. Emiatt a mért lengések és lökések elsősorban a jármű futási tulajdonságait jellemzik, adott geometria és kitérő esetén.
- **Kocsiszekrény, mint rugózott tömeg hatása (jármű műszaki állapot és szerkezeti kialakítás)**
A jármű ívekben való haladásakor a kétoldali gumirugók (járműfelfüggesztés) eltérő aszimmetrikus összenyomódása miatt a kocsiszekrény az ív irányultságának megfelelően bedől. Ez a hatás az aktuális sebesség függvényében jelentősen növelheti a mért oldalgyorsulás adatokat.
- **Közelítő képlet alkalmazhatósági korlátai [31]**
A gyakorlatban alkalmazott közelítő képletek jelentős egyszerűsítéseket tartalmaznak. A járművet tömegpontként, a vasúti pályát pedig térgörbéként jellemzik. A jármű súlypontpályája eltér a vágánytengely tényleges vonalvezetésétől. Különösen jelentős ez az eltérés kis sugarú ($R < 40$ m), átmeneti ív nélküli pályáívek esetén.

6.2. Csatlakozó pályáívek vizsgálati tapasztalatai (általános tapasztalatok)

A különböző pályáívek és kombinációik kinematikai vizsgálatából összességében megállapítható, hogy az általam vizsgált jó műszaki állapotban lévő pályáíveken – ahol a kitérőkön és átszelésen való áthaladás nem befolyásolja a mért eredményeket – a legtöbb esetben 20% alatti eltérés tapasztalható a kocsiszekrényen az okostelefon által mért és az **(5.2) összefüggéssel** a giroszkóp adatokból számított szabad oldalgyorsulás értékek között.

Az egyes pályáívek geometriáját tekintve a kocsiszekrényen mért szabad oldalgyorsulás megbízhatóan jellemzi az ívviszonyokat, azok görbületváltozásának alapjellegzetességeit:

- az ívek irányultsága (bal/jobbs **19. ábra és V. melléklet ábrái**),
- két ellenirányú ívet összekötő közbenső egyenes (Puskás Ferenc Stadion **V. melléklet, 44. ábra**),
- inflexiós átmenetiíves ellenívek (Margit híd, budai hídfő-csoportos mérések, **17. ábra és a III. melléklet ábrái**)

Méréseim alapján az oldalgyorsulás és a dinamikus oldalgyorsulás-változás esetében megállapítható, hogy a vártak megfelelően, hosszabb átmenetiívek esetén alacsonyabb oldalgyorsulás és dinamikus oldalgyorsulás-változás értékeket azonosítottam, mint rövidebb átmenetiívek esetén, mely eredményeket a **10. táblázat**ban ismertetek. Az itt látható értékek esetében fontos megjegyezni, hogy nagyban függ a keletkező oldalgyorsulás a jármű sebességétől. Erre jó példa a 10. táblázatban látható Margit híd, budai hídfő mérése és a Vidra utcai mérés. Jelen esetben a két dinamikus oldalgyorsulás-változás értékei kötött nagy a különbség, pedig a helyszínrajzi elrendezés mind a két kitérő esetében ugyan az, a fő különbség a mért járműsebesség (ez a példa jól szemlélteti, hogy az oldalgyorsulás négyzetesen függ a sebességtől).

Nem túlemelt, kis sugarú átmenetiíves pályáívek esetén a kocsiszekrény a túlemelés hiány értékének megfelelően kifelé dől, amely dőlésnek a kifutása nem az átmenetiív hosszon, hanem a jármű mozgásérzékelő hossza mentén történik.

6.3. Kitérő vizsgálatok tapasztalatai

Jelen fejezetben a bevezetőben már említett célkitűzés szerint végeztem az összefoglalásom.

A.) Keresztirányú utazási komfort megítélése a kocsiszekrényen mért oldalgyorsulás és egy 3 tengelyű giroszkóp szögsebesség adatai alapján

A vizsgált Ph50/25 típusú kis sugarú kitérőkön való közlekedés során a szabálytalan járműmozgás jól megfigyelhető, a keletkező oldalgyorsulások és az utasra ható mozgások kényelmetlenné tehetik az utazást ezen a szakaszokon. Abban az esetben, ha a szélső modulokban utazunk a jármű kialakítása miatt igen nagy dinamikai hatás éri az utasokat, ugyan ez igaz az alátámasztással rendelkező modulok esetében, azzal a különbséggel, hogy az érezhető rezgések azok, amelyek befolyásolják a komfortérzetet.

B.) Mért és a közelítő képletekkel becsült oldalgyorsulás adatok összevetése

A szabad oldalgyorsulás közelítő képletében a változó sebesség figyelembe vehető, de a jármű ívérzékelését jelentősen befolyásoló mozgásérzékelő hosszt nem tartalmazza. A közelítő képlet nem veszi figyelembe a járműdinamikai jellemzőket, sem azt, hogy jármű melyik pontjában végeztem a mérést. Fontos továbbá megemlíteni, hogy az egyenes és ív közvetlen csatlakozásánál jellemző tranziens jellegű hatásokat sem veszi figyelembe.

A mért és számolt eredmények között legtöbb esetben 20% alatti eltérés volt tapasztalható. Az ennél nagyobb eltérések a kitérők helyszínrajzi elrendezése, szerkezeti és geometriai

kialakításától függően jelentek meg. Egyedül álló egyszerű kitérőknél csak a kissugarú nagy törésszögű kialakítás esetén tapasztaltam szabálytalan járműmozgást. A vágánykapcsolatok vizsgálata során megállapítottam, hogy a kissugarú csatlakozó pályaívek, rövid ívhossz és a közbenső egyenes alkalmazása esetén a kedvező geometriai kialakítású Ph100/100e kitérőn is tapasztaltam szabálytalan járműfutást.

A Savoya Park és az Etele út/Fehérvári út esetében a giroszkóp adatok jól szemléltetik a szabálytalan járműfutást. Mindkét mérési helyszínen közel állandó volt a mérési sebesség, így a kigyózó jellegű szabálytalan mozgást vélhetően nem a sebesség befolyásolta. Az Etele úti vágánykapcsolat esetén a Ph100/100e kitérő a többi azonos geometriájú kitérőhöz képest relatíve nagyobb oldalgyorsulás-változásokat mutatott, amelynek oka a vágánykapcsolat után található rövid közbenső egyenes és rövid ívhosszú kissugarú ív.

C.) Az egyenes és ív közvetlen csatlakozásánál fellépő dinamikus oldalgyorsulás-változás összevetése a szabványokban meghatározott kvázi statikus határértékekkel

A közúti vasúti pályatervezési előírásokat tekintve a megkívánt tervezési sebességhez tartozó átmenetiív és minimális ívsugar paraméterek megadása az oldalgyorsulás-változás megengedett értékétől függ. Ezeket a határértékeket az **5. táblázat**ban ismertettem.

Jármű mozgásérzékelő hossza mentén közel lineárisan alakul ki a tisztaív stacionárius oldalgyorsulása. A két legmarkánsabb példa kitérőhöz csatlakozó pályaív átmenetiív nélküli esetében:

- Etele út/Fehérvári út, ahol a 40 m sugarú ív esetén a keletkező maximális dinamikus oldalgyorsulás-változás $0,70 \text{ m/s}^3$,
- A Puskás Ferenc Stadion esetében pedig a 100 m sugarú ellenív esetében a jármű behaladásakor maximálisan $0,57 \text{ m/s}^3$, kihaladáskor minimálisan $-1,14 \text{ m/s}^3$ dinamikus oldalgyorsulás rögzítettem.

Ebben az esetben is fontos megemlíteni, hogy a jármű sebessége igen nagy befolyással bír, hiszen az Etele úti vágánykapcsolathoz képest a Puskás Ferenc Stadiónnál körülbelül kétszer akkora sebességgel közlekedett a jármű.

10. táblázat: Csatlakozó pályaívek összehasonlító vizsgálata az átmenetiívben mért dinamikus oldalgyorsulás változás alapján (C modul)

Mérési helyszín	Vizsgált kitérő		Csatlakozó pályaív adatai			Mért adatok	
	Kitérő típusa	Helyszínrajzi elrendezése	R [m]	Pályaív középponti szöge α [° ' '']	L [m]	$V_{\text{átlag}}$ [m/s]	Maximális dinamikus oldalgyorsulás-változás (abszolút érték) [m/s ³]
Margit híd, budai hídfő (19. ábra, V. melléklet 44. ábra)	Ph 50/25	Egyedül álló egyszerű kitérő (vonalkiágazás)	25,1	69-25-00	5	3,67	1,15
Szent Gellért tér (V. melléklet 47. ábra)	Ph 50/50	Egyedül álló egyszerű kitérő (vonalkiágazás)	35	54-47-28	10	4,29	0,63
Vidra utca (V. melléklet 48. ábra)	Ph 50/25	Egyedül álló egyszerű kitérő (vonalkiágazás)	25,1	62-35-24	5	2,28	0,43
Frankel Leó utca (V. melléklet 49. ábra)	Ph 100/100	Egyedül álló egyszerű kitérő (vonalkiágazás)	150	16-31-26	15	5,73	0,35
Móricz Zsigmond körtér (V. melléklet 46. ábra)	Ph 50/40	Kétvágányú pályaelágazás	40	63-05-49	10	4,52	0,56

11. táblázat: Csatlakozó pályaívek összehasonlító vizsgálata az ívben mért dinamikus oldalgyorsulás változás alapján

	Vizsgált kitérő		Csatlakozó pályaív adatai		Mért adatok	
Mérési helyszín	Kitérő típusa	Helyszínrajzi elrendezése	R [m]	Pályaív középponti szöge α [° ' '']	$V_{\text{átlag}}$ [m/s]	Maximális dinamikus oldalgyorsulás változás (abszolút érték) [m/s ³]
Etele út/Fehérvári út (V. melléklet 50. ábra)	Ph 100/100e	Végállomási kifordított kettős vágánykapcsolat	40	8-36-57	3,98	0,70
Puskás Ferenc Stadion (V. melléklet 45. ábra)	Ph 100/100e	Egyedül álló egyszerű kitérő (vonalkiágazás)	100	8-36-00	7,39	1,14

A már nem hatályos EN 13803-2:2006 szabvány figyelembe veszi az egyenes és körív közvetlen csatlakozásából („ugrásos” görbületváltozás) adódó tranziens értékeket is.

Az ívek besorolásánál az alábbi szakaszokon „Sárga könyv” szerint a mért értékek meghaladták a megengedhető határértékeket, míg az EN 13803-2:2006 alapján nem: Szent Gellért tér kimenő átmeneti ív, Vidra utcánál a bemenő átmenetiív, Etele út/Fehérvári út, Kőbányai úti megállóhely. Tehát 4 esetben, a vizsgált 10-ből.

Az általam elvégzett mérések alapján megállapítható, hogy a tranziens hatás elhanyagolása miatt az – egyébként tervezéshez használt – Sárga könyv csak korlátozottan alkalmas a pályáívek mérések alapján történő utólagos megfelelőségi besorolásához.

D.) A rögzített gyorsulás jelalak kiugró értékeinek és jellegzetességeinek vizsgálata különböző szerkezeti és geometriai kialakítású kitérők esetén

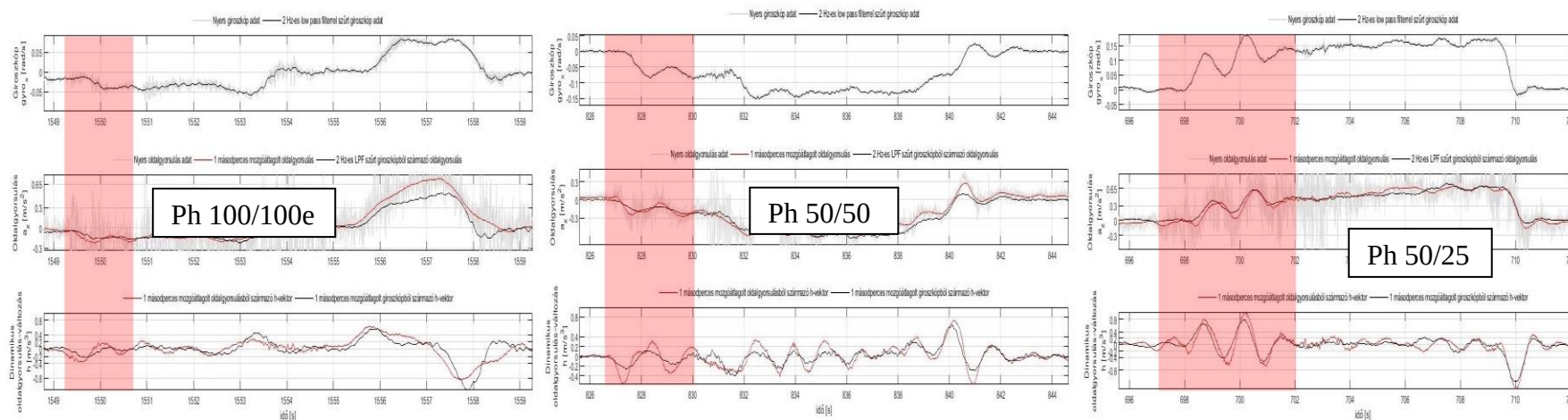
A **12. táblázat**ban és a **20. ábrán** foglaltam össze mérési tapasztalataimat a kiugró értékek és a végérintő szögek összefüggésének tekintetében. Jól látható, hogy:

- Állandó mérési sebesség mellett a **Ph 50/25** (20-36-37) és a **Ph 50/40** (16-24-25) típusú kitérőkön egyértelműen beazonosítható a kitérőbe való behaladáskor a szabálytalan, kígyózó jellegű járműmozgás,
- A **Ph 50/30e** (14-48-14) típusú kitérőt végállomási kettős vágánykapcsolatban vizsgáltam. Elleníves ágon történő haladás esetén a közbenső egyenesnél jelentős kiugró értékeket tapasztaltam. Vélhetően a rövid közbenső egyenes a nagy végérintőszög és kis sugár együttesen okozza ebben az esetben a szabálytalan járműfutást
- **Ph 50/50** (14-48-14) típusú kitérők esetén (valószínűleg az alacsony sebesség miatt) már csak minimálisan jelenik meg a kígyózó mozgás a kitérőbe való behaladáskor,
- A **Ph 100/46** (14-48-14) és a **Ph 100/100** (12-00-00) esetében csak minimálisan jelenik meg a kígyózó mozgás a kitérőbe való behaladáskor,
- A **Ph 100/100e** (8-37-00) esetében egyértelműen megállapítható, hogy nincsenek jelentős kiugrások a mért gyorsulásadatokban.

A vizsgálataim alapján megállapítható, hogy nagy végérintő szögű és kis sugarú kitérők esetén a kígyózó jellegű szabálytalan járműmozgás minden esetben megfigyelhető volt, a kisebb végérintőszögű és nagyobb sugarú kitérők esetén ez a kígyózó jellegű járműmozgás csökkent, míg a Ph100/100e kitérő esetén szinte teljesen megszűnt.

12. táblázat: Összesítés a végérintőszögek és kiugró értékek összefüggésére vonatkozóan

Kitérő típusa	Végérintő szöge	Vágánykép	Mérési helyszín	Kitérő száma	Dinamikus oldalgyorsulás változás szórása a kitérőn	Megtalálható-e? (igen, nem egyértelmű, közepesen, nem)
Ph 100/100e	8-37-00	Vonali kiágazó kitérő	Puskás Ferenc Stadion	K2021	0,09	nem
		Végállomási kifordított kettős vágánykapcsolat	Etele út/Fehérvári út	K4210	0,20	nem ¹⁷
Ph 100/100	12-00-00	Vonali kiágazó kitérő	Frankel Leó utca	K2902	0,09	nem egyértelmű
Ph 100/46	14-48-14	Vonali kiágazó kitérő	Kőbányai úti vasútállomás	K1813	0,14	nem egyértelmű
Ph 50/50	14-48-14	Vonali kiágazó kitérő	Szent Gellért tér	K2506	0,11	közepesen
Ph 50/30e	14-48-14	Végállomási keresztkapcsolat	Savoya park	K2753-2754	0,18	közepesen
Ph 50/40	16-24-25	Kétvágányú pályaelágazás	Móricz Zsigmond körtér	K2417	0,43	igen
Ph 50/25	20-36-37	Vonali kiágazó kitérő	Margit híd, Budai hídfő H	K1014	0,37	igen
		Vonali kiágazó kitérő	Vidra utca	K2901	0,43	igen



20. ábra: Szabálytalan járműmozgások mértékének összehasonlítása különböző sugarú és végérintő szögű kitérők esetén (pirossal kiemelve)

¹⁷ Végállomási kapcsolat geometriai kialakítása miatt lesz ez az érték ilyen nagy.

Irodalomjegyzék

- [1] J. D. C. C. D. Geada, Measurement and assessment of vibrations induced on a railway track, Técnico Lisboa, 2015.
- [2] R. Németh, A közúti vasúti pályatervezési előírások mozgásgeometriai vizsgálata Ganz ipari csuklós villamoson rendszeresített inerciális mérőrendszer alkalmazásával, Győr: Széchenyi István Egyetem: Építész-, Építő és Közlekedésmérnöki Kar, 2018.
- [3] Á. Vinkó, A közúti vasúti pálya-állapotfelmérésének rezgésdiagnosztikán alapuló módszere és a rendszer függőségeinek vizsgálata (doktori értekezés), Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út- és Vasútépítési Tanszék, 2018.
- [4] G. J. Yeo, P. F. Weston és C. Roberts, „The utility of continual monitoring of track geometry from an in-service vehicle,” *6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014)*, %1. kötet DOI:10.1049/cp.2014.0997, pp. 1-6, 2014.
- [5] H. Tsunashima, Y. Naganuma, A. Matsumoto, T. Mizuma és H. Mori, „Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle,” *Reliability and Safety in Railway*, p. 333–356, 2012.
- [6] Innorail, „Üzembe állt a mérővillamos,” Innorail, 2018. [Online]. Available: <http://innorail.hu/uzembe-allt-a-merovillamos/>.
- [7] J. Megyeri, „A MÁV új koncepciójú felépítményi mérőkocsija (FMK 007),” in *Fejlesztési és Kísérleti Intézet Évkönyve 2001-2002*, 2002, pp. 297-300.
- [8] V. Gáspár, Közúti vasúti pályaívek közelítő kinematikai vizsgálata különös tekintettel az egyes járművek eltérő szerkezeti tulajdonságaira és a megengedhető maximális igénybevételekre, Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem: Út- és Vasútépítési Tanszék, 2017.
- [9] B. K. R. BKV Zrt., Közúti vasúti pályaépítési és fenntartási műszaki adatok és előadások, Budapest: Fővárosi Közlekedési Felügyelet, 2007.
- [10] ISO2631-1:1997, „Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration,” 1997.
- [11] R. Narayanamoorthy, S. Khan, M. Berg, V. Kumar Goel, V. H. Saran és S. P. Harsha, „Determination of Activity Comfort in Swedish Passenger Trains,” Stockholm, 2005.
- [12] S. Yongsoo, „Study of Ride Comfort on the Korean Tilting Train eXpress through Bio-signal indices,” KRRI, Kyonggi-do, Korea, 2018.
- [13] „Performance-Based Track Geometry,” in *Transit Cooperative Research Program*, 2016.
- [14] ISO2631-4:2001, „Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration,” in *International Organization for Standardization*, First edition szerk., 2001, 2001.
- [15] D. Mădălina és L. Mihai, „Correlation between Ride Comfort Index and Sperling's Index for Evaluation Ride Comfort in Railway Vehicles,” *Trans Tech Publications, Switzerland*, pp. 201-206, 2018.
- [16] E. Sperling és C. Betzhold, „Contribution to the evaluation of comfortable running of railway vehicles,” Bulletin-International Railway Congress, 1957.
- [17] L. Wang és C. Chen, „The Comfort Measurement of Urban Railway Train Based on UIC513 Standard,” China Railway Eryuan Engineering Group Co., LTD. Liangjiang New Area, Chongqing, China, Shanghai, China, 2018.
- [18] Y.-G. Kim, S.-w. Kim, T.-W. Park, S. Choi és Y.-M. Kim, „An experimental study on the ride comfort of the Korean high-speed train,” *Experimental Techniques*, pp. 30-37, 2009.

- [19] UIC518, Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Rade quality, International Union of Railways, 2005.
- [20] G. Lauriks, J. Evans, J. Förstberg, M. Balli és I. Barron de Angoit, Investigation of ride comfort and comfort disturbance on transition and circular curves, Swedish National Road and Transport Research Institute, 2003.
- [21] EN13803-2:2006, Switches and crossings and comparable alignment design situations with abrupt changes of curvature, %1. kötetPart 2, London: British Standards Institution, 2006.
- [22] B. Dr Kufver, Szerző, *EN standards 13803-1 and 13803-2 for track alignment*. [Performance].
- [23] C. Ketchum, „Appendix: Ride Quality Literature Review,” in *Performance-Based Track Geometry*, Washington, DC, The National Academies, 2012, pp. 58-91.
- [24] ENV12299, „Railway applications - Ride comfort for passengers -Measurement and evaluation,” in *ENV Code 12299*, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 1997.
- [25] MSZEN12299:2009, MSZ EN 12299:2009, Brussels: European Committee for Standardization, 2009.
- [26] I. The MathWorks, „Capturing Azimuth, Pitch, and Roll Example,” 2013. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/40876/versions/8/previews/sensorgroup/Examples/html/CapturingAzimuthRollPitchExample.html?access_key=#2.
- [27] CAF, „BUDAPEST TRAM,” 2018. [Online]. Available: <https://www.caf.net/en/productos-servicios/proyectos/proyecto-detalle.php?p=268>.
- [28] BKK, „FRISSÍVE! 37 helyett 47 darab új villamos érkezik Budapestre,” 3 március 2014. [Online]. Available: <https://bkk.hu/2014/03/ujvillamosok/>.
- [29] G. Mészáros, „Lejebb a padlóval! I-VI. rész,” 24. július 2011. [Online]. Available: <http://iho.hu/hir/az-alacsonypadlos-villamosok-kialakulasa-es-tortenete-i>.
- [30] G. Tóth, Phoenix sínekkel készült közúti vasúti kitérő tervezése, Budapest: Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Út- és Vasútépítési Tanszék, 2014.
- [31] Constantin, „Virtual Transition,” 17 11 2015. [Online]. Available: <https://pwayblog.com/2015/11/17/virtual-transition/>.
- [32] K. L. G. S. L. Knothe, „Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies,” *Vehicle System Dynamics*, pp. 209-262, 1993.
- [33] „Motion sensors,” 07 augusztus 2018. [Online]. Available: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion#sensors-motion-accel.
- [34] P. Károly, „Mit mér a telefonunk gyorsulásmérő szenzora?,” [Online]. Available: <https://pilath.wordpress.com/mit-mer-a-telefonunk-gyorsulasmero-senzora/>.
- [35] GSMarena, „Sensors-definition,” [Online]. Available: <https://www.gsmarena.com/glossary.php3?term=sensors>.
- [36] G. Ryan, „Accelerometer vs. Gyroscope: What's the Difference?,” 30 may 2018. [Online]. Available: <https://www.livescience.com/40103-accelerometer-vs-gyroscope.html>.

Mellékletek

I.	Melléklet: <i>A mérő applikáció bemutatása</i>	61
II.	Melléklet: <i>Szenzoradatok fizikai tartalmának ellenőrzése.....</i>	67
III.	Melléklet: <i>Kritikus járműkeresztmetszet meghatározása.....</i>	75
IV.	Melléklet: <i>Kitérők keresztezési középrészének geometriai kialakítása.....</i>	92
V.	Melléklet: <i>További mérési kiértékelések</i>	95

Mellékletek

I.	Melléklet: <i>A mérő applikáció bemutatása</i>	61
II.	Melléklet: <i>Szenzoradatok fizikai tartalmának ellenőrzése.....</i>	67
III.	Melléklet: <i>Kritikus járműkeresztmetszet meghatározása.....</i>	75
IV.	Melléklet: <i>Kitérők keresztezési középrészének geometriai kialakítása.....</i>	92
V.	Melléklet: <i>További mérési kiértékelések</i>	95

I. Melléklet

A mérő applikáció bemutatása

A mérések során egy Samsung Galaxy A5 (2017) típusú telefont használtam, mely az alábbi műszaki specifikációkkal rendelkezik:

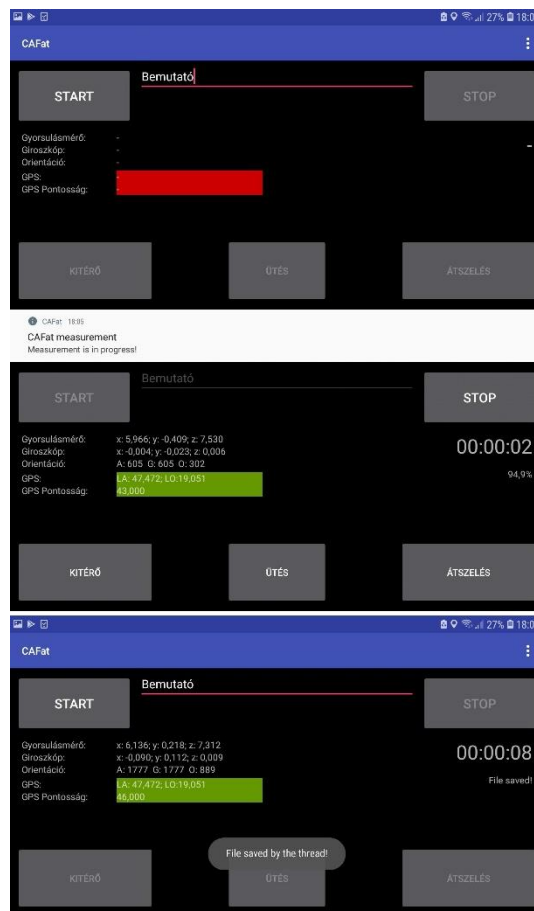
- Processzor magok száma: 8 mag,
- Processzor sebessége (órajele): 1.9 GHz,
- Memória (RAM): 3 GB
- Belső memória mérete: 32 GB,
- Operációs rendszer: Andorid 8.0.0 (Oreo),
- Akkumulátor kapacitása: 3000 mAh,
- Beépített szenzorok: gyorsulásmérő, giroszkóp, dőlésmérő, iránytű, magnetométer, barométer.
- Szenzorok legmagasabb mintavételezési frekvenciája: 200 Hz.

A CAFat-ba számos újítás is belekerült, melyeknek a mérések elvégzése és kiértékelése során nagy szükségét éreztük (**1. kép és 3. kép**). A legfontosabb módosításokat az alábbiakban foglalom össze:

- A mérés kezdeti és befejező időpontja ezredmásodperces pontossággal kerül kiírásra;
- A mérési fájl mentése nem közvetlenül a telefon RAM memóriájába történik, hanem belső tárhelyre, így a mérési idő jóval hosszabb és az elkészült fájl mentési ideje jóval rövidebb;
- A csoportos mérések¹ során merült fel az igény, hogy jó lenne a telefon típusát automatikusan megjeleníteni az export fájlban. Emiatt ez a mérési fájl nevében már automatikusan megjelenő információ;
- A kitérővizsgálatok során szintén felmerülő probléma volt, hogy célszerű lenne feljegyezni, mely időpontokban halad át a jármű a kitérő keresztezési részén, illetve hol tapasztaltunk jelentős ütések. Emiatt a markerezés is be lett építve az applikációba, mely megjelenik az export fájlban is.
- Célszerű azt is tudni, hogy mely megállóból kezdődött a mérés, illetve hol fejeződött be. Az applikáció a mérés megkezdése előtt lehetőséget biztosít jegyzet készítésére, amit később megjelenít a fájl nevében.
- A START és a STOP gomb elválasztva működik, így elkerülhető, hogy véletlen leállítsuk a mérést.

¹ Csoportos mérések során több készülékkel történt mérés ugyan azon jármű több keresztmetszetében, azonos időben.

- A START gomb megnyomását hangjelzés kíséri, mellyel könnyen azonosítható, hogy a mérést sikeresen elindítottuk.
- Mérés közben megjelenik, hogy a mérés kezdete óta a mérési fájl hány %-a van már elmentve a belső memóriába. Ezen kívül megjelenítésre kerültek a szenzorok mérési tengelyein rögzített aktuális értékek is. Ez utóbbi főként kalibrációs célok miatt került a szoftverbe.
- A SensorApp használata során, ha a telefon képernyője kikapcsolt, vagy amikor a háttérben futtattuk az alkalmazást, akkor a GPS jel megszűnt – ellenben a többi szenzorral -, az ebből adódó koordináták „kimerevednek” vagyis az utolsó ismert helyadat kerül az összes további szenzor által nyújtott adat mellé. Sajnos, amikor a képernyő visszakapcsol, vagy újra nem a háttérben mér az szoftver, a GPS ezzel együtt nem kapcsol vissza, tehát nem szolgáltat újra, friss helyadatokat. Ezt a problémát sikerült megszüntetni, így egy hosszabb mérést is nyugodtan el lehet végezni az applikációval.



1. kép: A CAFat applikáció működése közben készített képernyőfelvétel
(a.) a program indítása előtt, b.) mérés közben c.) fájl mentésekor) elforgatott helyzetben)

Szolgáltatott adatok egy *.csv fájlban kerülnek kiírásra (**21. ábra**), a mért paraméterek az alábbiakban kerülnek felsorolásra:

- A mérési fájl első sorában a **mérés kezdetének dátuma és időpontja** (ezredmásodperc pontossággal), míg a második sorában látható a **mérés befejezésének dátuma és időpontja** (ezredmásodperc pontossággal).
- A harmadik sorban a **mintavételezési frekvencia** található. Az applikáció a szenzor adatokat a telefonban elérhető maximális mintavételezés szerint olvassa ki. Telefon típusától függően 200 és 500 Hz között változhat. A jármű kinematikai jellemzőinek meghatározásához a 200 Hz-es mintavételezés elegendő, hiszen csak a 0-20 Hz közötti lengések befolyásolják a járművön mért kiegyenlítettlen szabad oldalgyorsulást. A magasabb frekvenciakomponensek csak rezgést okoznak.
- Az első paraméter a „t [s]” oszlopban található, ez a **mérés kezdetétől eltelt idő**: másodpercenként. Általában több mint 200 mintavétel készül, ezért ez az időpont is ezredmásodperc pontossággal került kiírásra.
- **Jármű sebesség** a „v [m/s]” oszlopban található, mely adott időpontban a GPS adatokból meghatározott pillanatnyi sebességet mutatja.
- A „lat” és „lon” oszlopok a **földrajzi szélességet és hosszúságot** mutatják. Ez alapján a földrajzi koordináta rendszerben megkapjuk a mérés helyét.
- Az „accuracy” oszlopban látható a **GPS helyadatok meghatározásának pontossága**. Ez a paraméter mutatja a helymeghatározás pontosságát méter dimenzióban. Minél több műhold szolgáltat adatot, annál pontosabban határozható meg az aktuális mérési pozíció.
- Az „ax”, „ay” és az „az” rögzített paraméterek a **három mérési tengelyhez tartozó gyorsulás adatokat** mutatják. A gyorsulásmérő szenzor alapvető feladata, hogy érzékelni tudja a telefon 3 tengely menti gyorsulását. Leggyakoribb felhasználása lépésszámlálók, mozgatóssal történő telefonvezérlés. Jelen kutatómunkában az oldalgyorsulás, vagyis a keresztirányú komfortérzet fő befolyásoló tényezőjének kimutatásában nyújt segítséget.
- A „pitch”, „roll” és az „azimuth” az **orientációs adatokat** mutatják (továbbiakban Dőlésmérő): a telefon térbeli elfordulását [°] a mágneses északhoz és a gravitációs vektorhoz képest. Ezek rögzített paraméterek, melyek az alábbi szabálytalan járműmozgásoknak feleltethetők meg: távolgás, kigyózás, bólintás. Az adatokat az Android kernel a gyorsulásmérő, giroszkóp és a mágneses iránytű szenzorból

származtatva állítja elő és a mára már kivezetés alatt álló programozási interfészén vannak lekérve (elavulás verziója: Android 4.4W, API level 20). Ennek segítségével például a túlemelés megléte ellenőrizhető lenne a vizsgált ívekben, de a termék típusától és az elektromágneses környezettől jelentősen zavartak lehetnek értékei.

- A „gyro_x”, „gyro_y” és a „gyro_z” a **háromtengelyű giroszkóp adatait** szemléltetik. Ezen paraméterek a giroszkóp pillanatnyi adatait adják vissza a három tengely függvényében. Többek között egy okostelefonban a giroszkóp, a képernyő vízszintes vagy függőleges beállításhoz, vagy a döntéssel vezérlehető játékok, alkalmazások irányításához használatos. Az orientációhoz hasonlóan a kötőtpályás közlekedés kinematikai vizsgálatánál, az ívviszonyok illetve a túlemelés kimutatásánál nyújt segítséget. Készüléktől függően, a giroszkópot költség-csökkentés érdekében helyettesíteni szokták gyorsulásmérőből számított adatokkal (virtuális giroszkóp).
- A „deg” oszlopban a **mágneses északtól való eltérés** került feltüntetésre. Ezek mutatják a mágneses északtól való eltérést fokban, lehetővé téve a készüléknek a helyadatok nélküli relatív helymeghatározását. Ennek segítségével információt kaphatunk a geometriáról akkor is, ha a GPS jel megszűnik, vagy ha a helymeghatározás pontossága nem megfelelő.
- Az utolsó, „event” oszlopban található a **markerezés**, mely a mérő applikáció beépített gombjainak adott időhöz tartozó megnyomásakor megjelenő információk kaptak helyet. Erre azért volt szükség, hogy a folyamatosan mért szakaszon az ütések könnyebben beazonosíthatók legyenek. Három beépített gomb található a mérő applikációban: a KITÉRŐ, az ÁTSZELÉS és az ÜTÉS. Ezen kívül az event oszlopban kapott helyet a felhasználói képernyő érintés markerezése arra az esetre, ha valahol rendellenes mozgások jelennének meg.

Bemutató_samsung_SM-A520F_20181008_223606[1].csv [Olvasásra] - Excel

Bejelentkezés

FÁJL KEZDŐLAP BESZÚRÁS LAPELRENDEZÉS KÉPLETEK ADATOK VÉLEMÉNYEZÉS NÉZET

Beillesztés

Calibri 11

F B A

Vágólap

Betűtípus

Igazítás

Szám

Egyéni

Feltételes formázás

Formázás

Cellatípusok

Beszúrás

Törlés

Formátum

AutoSzum

Kivétel

Törlés

Rendezés

Keresés és szűrés

Kijelölés

Szerkesztés

B1 : 2018.10.08 22:36:06

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Start	2018.10.08 22:36																		
2	End	2018.10.08 22:36																		
3	All sensor Fs	200 Hz"																		
4	parameters:	t[s]	v[m/s]	lat	lon	accuracy	ax	ay	az	pitch	roll	yaw	gyro_x	gyro_y	gyro_z	deg	event			
5		0.000	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
6		0.005	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
7		0.010	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
8		0.015	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
9		0.020	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
10		0.025	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
11		0.030	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
12		0.035	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
13		0.040	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
14		0.045	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15		0.050	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
16		0.055	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
17		0.060	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
18		0.065	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0.1173158	3.3494882	9.0309286	0	0	0	0	0	0	0	0			
19		0.070	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0.1173158	3.3494882	9.0309286	0	0	0	-0.026878(-0.0470366	-0.034208(-19.751358032						
20		0.075	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0.0718260	3.3063924	9.2080993	-19.75135(-0.446915(9.9889936	-0.026878(-0.0470366	-0.034208(-19.751358032								
21		0.080	0.520	47.471690	19.051189	47.00	0.0718260	3.3087866	9.3637228	-19.75135(-0.446915(9.9889936	-0.026878(-0.0470366	-0.034208(-19.751358032								
22		0.085	0.520	47.471690	19.051189	47.00	-0.004788(3.2537200	9.4379434	-19.75135(-0.446915(9.9889936	-0.019547(0.0659734	-0.032375(-19.751358032									
23		0.090	0.520	47.471690	19.051189	47.00	-0.004788(3.2537200	9.4379434	-19.75135(-0.446915(9.9889936	-0.019547(0.0659734	-0.032375(-19.751358032									
24		0.095	0.520	47.471690	19.051189	47.00	-0.004788(3.2537200	9.4379434	-19.75135(-0.446915(9.9889936	-0.019547(0.0659734	-0.032375(-19.751358032									

Bemutató_samsung_SM-A520F_20181008_223606.csv [Olvasásra] - Excel

Bemutató_samsung SM-A520F_20181008_223606.csv - Jegyzetkönyv

Fájl Szerkesztés Formátum Nézet Súgó

"Start";2018.10.08 22:36:06.489"End";2018.10.08 22:36:16.785"All sensor Fs";"200" Hz""parameters:";";t[s]";"v[m/s]";"lat";"lon";"accuracy";"ax";"ay";"az";"pitch";"roll";"yaw";"gyro_x";"gyro_y";"gyro_z";"deg";"event";"51189329475164";"47.00";"0.71826048";"3.306392431";"9.208099365";"-19.751358032";"-0.446915895";"9.988993645";"-0.026878078";"0.047036625";"-0.034208454";"-19.751358032";"-0.032375857";"-19.751358032";""

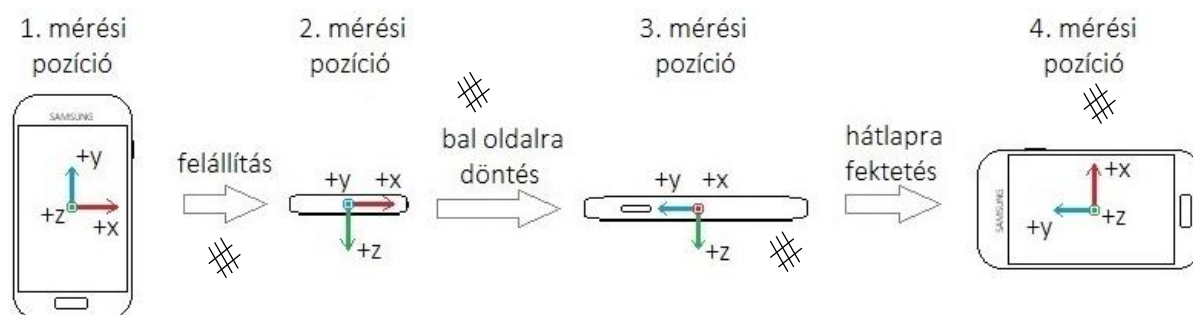
1. ábra: A szolgáltatott adatok Microsoft Excelben (fent) és Jegyzettömbben (lent) megnyitva

II. Melléklet

Szenzoradatok fizikai tartalmának ellenőrzése

A.) Gyorsulásérzékelő és a giroszkóp kalibrálása

Ebben az esetben azt vizsgáltam, hogy a különböző tengelyeket függőleges pozícióba állítva mekkora gyorsulást mérhetek. Alapvető elvárás, amennyiben a vizsgált mérési tengely függőleges és a gravitációs gyorsulás irányába néz, akkor $+9,81 \text{ m/s}^2$, míg ellenkező esetben $-9,81 \text{ m/s}^2$ gyorsulást kell kapnunk közelítőleg. Fontos megjegyezni, hogy a gravitációs gyorsulás sem állandó, illetve a telefon helyzete is eltérhet az ideális függőleges pozíciótól. A kalibrációs folyamatot és annak részletes leírását a **22. ábra** és a **13. táblázat** szemlélteti.

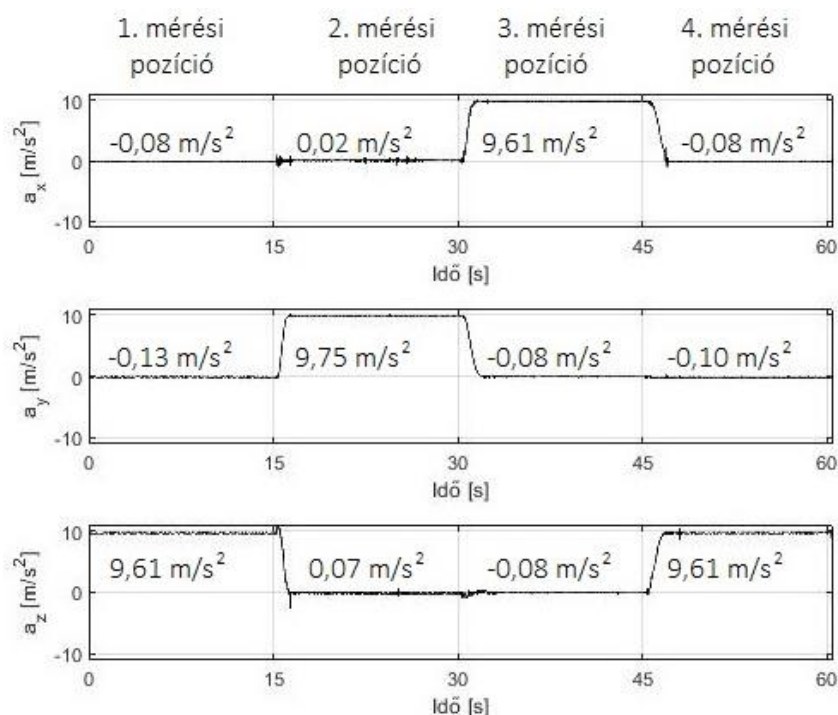


2. ábra: A gyorsulásmérő és a giroszkóp szenzor kalibrálása során vizsgált mérési pozíciók felülnézetben ábrázolva

1. táblázat: A gyorsulásmérő és a giroszkóp szenzor kalibrálása során végzett mérési folyamat részletes leírása elméleti értékekkel

1. mérési pozíció	Vízszintes felületen, hátlapon fektetve, 15 másodperces nyugalmi állapot	A z-tengely merőlegesen a készülék síkjára, felfele mutat ($a_z = +9,81 \text{ m/s}^2$)
A 2. pozíció eléréséhez a telefont a „talpára állítottam (x-tengely körüli 90°-os forgatás)		
2. mérési pozíció	Ugyan azon vízszintes felületen, az aljára állítva, 15 másodperces nyugalmi állapotot megtartva	Az y-tengely függőlegesen felfelé mutat ($a_y = +9,81 \text{ m/s}^2$)
A 3. pozíció eléréséhez a készüléket bal oldalra döntöttem (z-tengely körüli 90°-os forgatás).		
3. mérési pozíció	Továbbra is ugyan azon a vízszintes felületen tartva a telefon a bal oldalára fektetve helyezkedik el, 15 másodperces nyugalmi állapot megtartása mellett	Az x-tengely, függőlegesen felfelé mutat ($a_x = +9,81 \text{ m/s}^2$)
A 4. pozíció eléréséhez visszafektettem a hátlapjára a telefont (y-tengely körüli 90°-os forgatás).		
4. mérési pozíció	Továbbra is ugyan azon a vízszintes felületen tartva a telefon hátlapjára fektetve helyezkedik el, 15 másodperces nyugalmi állapot megtartása mellett	A z-tengely merőlegesen áll a készülék síkjára, felfele mutatva. ($a_z = +9,81 \text{ m/s}^2$)

A kalibrációs folyamat során rögzített gyorsulásadatok a **23. ábrán** tekinthetők meg. Az egyes mérési pozíciókhoz tartozó átlagos gyorsulás adatokat és azok eltérését az elméleti értékektől a **14. táblázat** foglalja össze. A minimális eltérések (a nyers adatokból) a nem tökéletes függőleges helyzetből adódtak, ugyanakkor ez még értékelhető, valós eredményt ad (**23. ábra**).



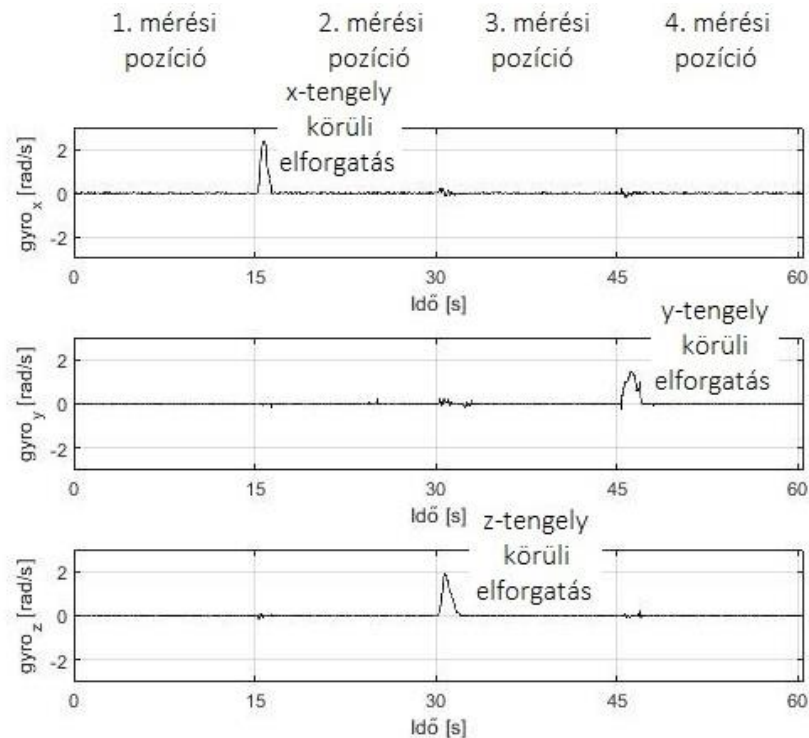
3. ábra A gyorsulásérzékelők kalibrálása során rögzített adatok (**22. ábra** szerinti mérési folyamat)

2. táblázat: A különböző mérési pozíciókban meghatározott átlagos gyorsulás adatok eltérései az elméleti gravitációs értéktől

Gravitációs gyorsulás	Vizsgált tengelyek					
	a_x [m/s ²]		a_y [m/s ²]		a_z [m/s ²]	
	elméleti	mért	elméleti	mért	elméleti	mért
	$\underline{a}$ elméleti		$\underline{a}$ mért		eltérés	
1. mérési pozíció	0,00	-0,08	0,00	-0,13	9,81	9,61
	9,81		9,61		2,03%	
2. mérési pozíció	0,00	0,02	9,81	9,75	0,00	0,07
	9,81		9,75		0,61%	
3. mérési pozíció	9,81	9,68	0,00	-0,08	0,00	-0,08
	9,81		9,68		1,32%	
4. mérési pozíció	0,00	-0,08	0,00	-0,10	9,81	9,61
	9,81		9,61		2,03%	

Mivel minden új pozíció esetében más-más tengely körüli forgás jön létre, így a giroszkóp adatokból látható, hogy az egyes pozíciók mely tengely körüli elfordulást okozzák. Időrendben haladva az első „kiugrás” az x-tengelyen érzékelhető 15-18 másodperc között (amikor a telefont

a „talpára” állítottam), a második kiugró érték a z-tengelyen jelent meg 29-33 másodperc között (amikor a telefont bal oldalára fektettem), a harmadik kiugró érték pedig az y-tengely körül érzékelhető 45-48 másodperc között (amikor a telefont a bal oldaláról a hátlapjára fektettem el) (24. ábra).



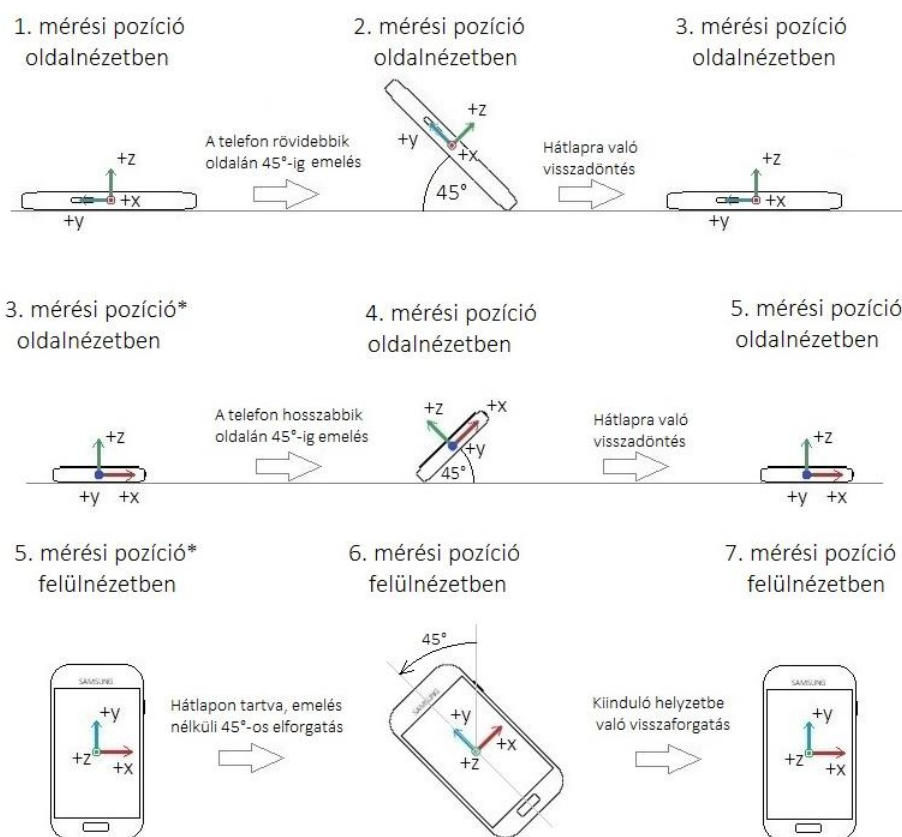
4. ábra: A giroszkóp kalibrálása során rögzített adatok (22. ábra szerinti mérési folyamat)

B.) A dőlésmérő kalibrációja

Az x-, y-, és z-tengely körüli elforgatás

Ezen kalibráció során a készüléket sík felületre helyeztem, majd első lépésben a rövidebbik oldalán emeltem fel a telefont 45°-ig, ezután visszaengedtem a sík felületemre. A második emelési sorozatban a visszaengedett készüléket a hosszabbik oldalánál fogva emeltem 45°-ig, majd engedtem vissza a sík felületemre. A harmadik emelési sorozat esetében a készüléket a már visszaengedett helyzetben, emelés nélkül forgattam el a hátlapján 45°-kal, ez után pedig vissza a kiinduló helyzetbe. Ezt a folyamatot részletesen a 25. ábra szemlélteti és a 15. táblázat ismerteti részletesen.

A kalibráció során lehetőségem volt mind a három tengely körüli elfordulást egy mérésben vizsgálni.

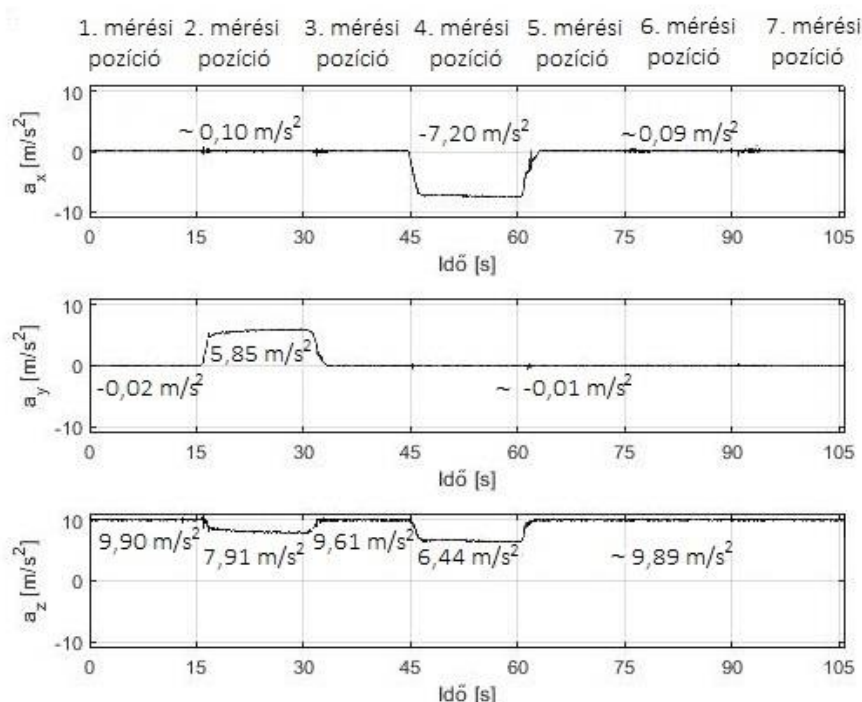


5. ábra: A dőlésmérő szenzor kalibrálása során vizsgált mérési pozíciók a *-gal jelölt mérési pozíciók az elmozdítás nélküli helyzetet jelölik, másik nézetben

3. táblázat: A dőlésmérő szenzor kalibrálása során vizsgált mérési pozíciók

1. mérési pozíció	Vízszintes felületen, hátlapon fektetve, 15 másodperces nyugalmi állapot	A z-tengely merőleges a készülék síkjára, felfele mutatva. ($a_z = +9,81 \text{ m/s}^2$)
A 2. pozíció eléréséhez a telefont a rövidebb oldalánál fogva emeltem egészen addig, míg 45°-os szöget nem zárt be a vízszintes felületemmel. 15 másodperces megtartása ennek a pozíciónak. (x-tengely körüli 45°-os forgatás)		
3. mérési pozíció	Ugyan azon vízszintes felületre való visszadöntés, 15 másodperces nyugalmi állapotot megtartva	A z-tengely merőleges a készülék síkjára, felfele mutatva. ($a_z = +9,81 \text{ m/s}^2$)
A 4. pozíció eléréséhez a készüléket hosszabbik oldalánál fogva emeltem egészen addig, míg a vízszintes felületemmel nem zárt be 45°-os szöget. 15 másodperces állapot megtartása ebben a szögben is. (y-tengely körüli 45°-os forgatás).		
5. mérési pozíció	A vízszintes felületre való visszadöntés után, a 15 másodperces nyugalmi állapotot megtartottam.	A z-tengely merőleges a készülék síkjára, felfele mutatva. ($a_z = +9,81 \text{ m/s}^2$)
A 6. pozíció eléréséhez a készüléket a hátlapján, emelés nélkül forgattam el, óramutató járásával ellentétesen 45°-kal. A 15 másodperces nyugalmi állapotot ebben az esetben is megtartottam. (z-tengely körüli 45°-os forgatás).		
7. mérési pozíció	Továbbra is ugyan azon a vízszintes felületre visszadöntve a telefon hátlapjára fektetve helyezkedik el, 15 másodperces nyugalmi állapot megtartása mellett	A z-tengely merőlegesen áll a készülék síkjára, felfele mutatva. ($a_z = +9,81 \text{ m/s}^2$)

Az alábbi gyorsulásadatokat tartalmazó ábrán (26. ábra) látható, hogy 7 fő szakaszra bontható a mérés mely során a 16. táblázat elméleti és mért értékeit hasonlítottam össze.



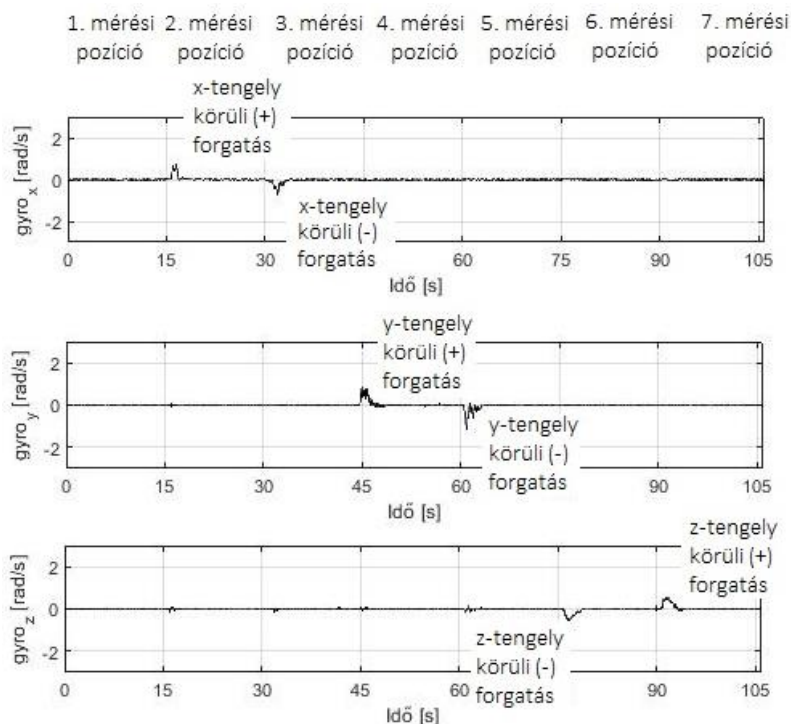
6. ábra: A dőlésmérő szenzor kalibrációjának gyorsulásadatokat tartalmazó grafikonja (25. ábra szerinti mérési folyamat)

4. táblázat: A dőlésmérő szenzor kalibrációjának gyorsulásadatokat tartalmazó táblázata

Gravitációs gyorsulás	Vizsgált tengelyek					
	a_x [m/s ²]		a_y [m/s ²]		a_z [m/s ²]	
	elméleti	mért	elméleti	mért	elméleti	mért
	<u>a</u> elméleti		<u>a</u> mért		eltérés	
1. mérési pozíció	0,00	0,93	0,00	-0,02	9,81	9,90
	9,81		9,94		1,36%	
2. mérési pozíció	0,00	0,03	6,94	5,85	6,94	7,91
	9,81		9,84		0,24%	
3. mérési pozíció	0,00	0,10	0,00	0,00	9,81	9,61
	9,81		9,61		2,03%	
4. mérési pozíció	-6,94	-7,20	0,00	0,00	6,94	6,44
	9,81		9,66		1,58%	
5. mérési pozíció	0,00	0,09	0,00	-0,01	9,81	9,89
	9,81		9,89		0,82%	
6. mérési pozíció	0,00	0,06	0,00	0,08	9,81	9,89
	9,81		9,89		0,82%	
7. mérési pozíció	0,00	0,11	0,00	0,03	9,81	9,90
	9,81		9,90		0,92%	

A giroszkóp ábráján (27. ábra) megfigyelhető az első emelési periódus x-tengely körüli elfordulás emelés (+)-visszaengedés (-) sorozata, majd a második emelési periódus y-tengely körüli elfordulás emelés (+)-visszaengedés (-) sorozata, majd a harmadik emelési periódus során a z-tengely körüli elfordulás emelés (+)-visszaengedés (-) sorozata.

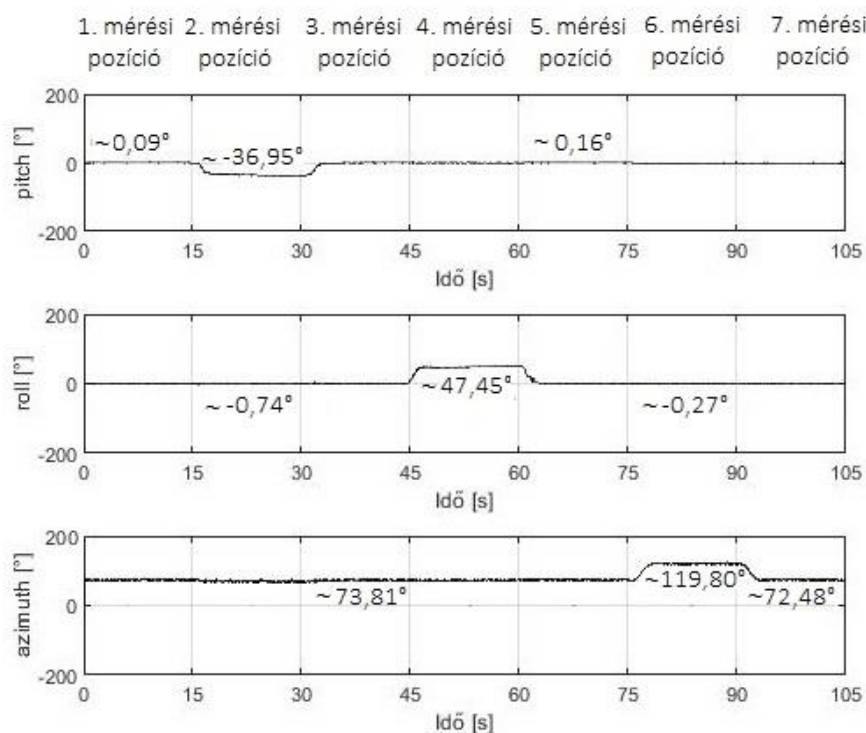
Az is jól látható, hogy az egyes emelési periódusok megjelenésekor a további két tengely közel nulla, míg az emelés tengelyén vannak kiugró értékek. Minden emelés esetében látható, hogy pozitív irányba ugrik a giroszkóp jel, míg leengedés során a negatív irányba találhatók a kiugró értékek.



7. ábra: A dőlésmérő kalibráció giroszkóp adatainak ábrázolása (26. ábra szerinti mérési folyamat)

Az z-tengely körüli szögelfordulások mértéke (a 17. táblázat és a 28. ábra) $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 0^\circ$ jelen esetben nem teljesen egyértelmű. Ami egyértelműen látszik az az, hogy a hozzá tartozó (azimuth) nevű grafikonon történt mozgás/elfordulás, viszonylag szabályos, 45° -os lépcsőben történt.

Az viszont első látásra is feltűnik, hogy nem 0° -kal hanem 75° -kal indul a mérés. Ennek oka, hogy az „azimuth” a mágneses észak és a telefon y-tengelye által bezárt szöget adja vissza, ehhez adódik relatív elfordulásként a telefonnal végzett elfordulás.



8. ábra: A dőlésmérő kalibráció során megjelenő szögelfordulások mértéke (25. ábra szerinti mérési folyamat)

5. táblázat: A dőlésmérő kalibráció során megjelenő szögelfordulások mértéke

Szögelfordulások mértéke	Vizsgált tengelyek					
	pitch [°]		roll [°]		azimuth [°]	
	elméleti	mért	elméleti	mért	elméleti	mért
	eltérés		eltérés		eltérés	
1. mérési pozíció	0,00	0,09	0,00	-0,48	75,00	73,03
	0,05%		-0,27%		-2,63%	
2. mérési pozíció	-45,00	-36,95	0,00	-0,74	75,00	66,00
	17,89%		-0,41%		-12,00%	
3. mérési pozíció	0,00	0,18	0,00	-0,78	75,00	73,81
	0,10%		-0,43%		-1,59%	
4. mérési pozíció	0,00	-0,01	45,00	47,45	75,00	71,28
	-0,01%		5,44%		-5,0%	
5. mérési pozíció	0,00	0,16	0,00	-0,56	75,00	73,28
	0,09%		-0,31%		-2,29%	
6. mérési pozíció	0,00	-0,37	0,00	-0,27	120,00	119,80
	-0,21%		-0,15%		-0,17%	
7. mérési pozíció	0,00	-0,13	0,00	-0,62	75,00	72,48
	-0,07%		-0,34%		-3,36%	

III. Melléklet

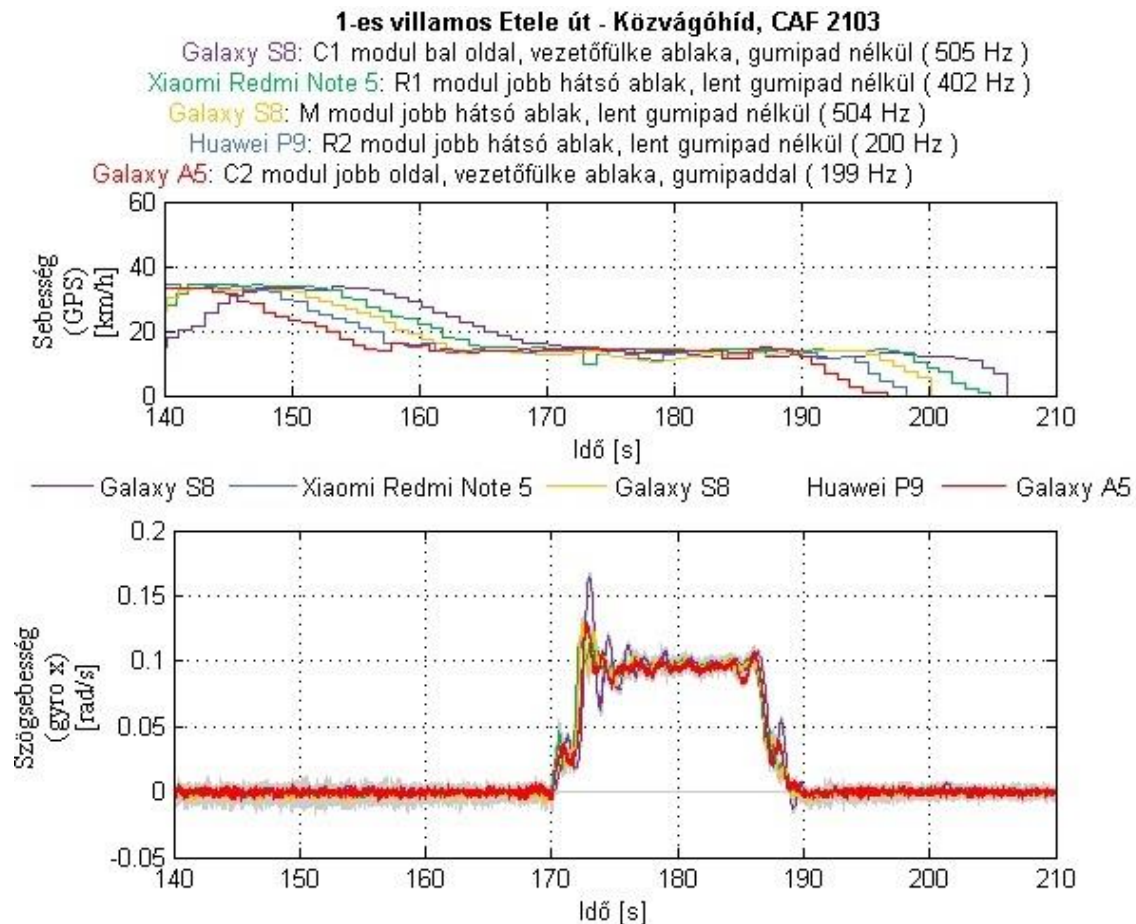
Kritikus járműkeresztmetszet meghatározása

CAF Urbos3, 9 modulós jármű

A jármű hossza mentén 5 különböző keresztmetszetet egyidejűleg vizsgáltunk. A befüggesztett járműrészek (S jelű modulok) jelentős csillapítással rendelkeznek mind függőleges, mind pedig keresztirányban, emiatt csak a hajtással ellátott, nem befüggesztett kocsiszekrény-részekben mértünk (C, R és M jelű modulok). Egy-egy okostelefont rögzítettünk a jármű két végén a vezetőfülke ablakához, míg további 3 telefont az R1, M és R2 jelű modulok menetirány szerinti hátsó ablakaira. A jármű ablakainál megtalálható perem megfelelő megtámasztást biztosít a keresztirányú, a függőleges és a menetirányban fellépő hatásokkal szemben, viszont a vezetőfülke esetén gumipad alkalmazására volt szükség a keresztirányú erőhatások megbízható mérése érdekében.

A mérési helyszín az 1-es villamos újabb szakasza, kiváló műszaki állapotban van. Mivel az 1-es villamos idei nyári felújítási munkái miatt a szerelvények üzemszerűen visszafogtak a Közvágóhíd H megállóhelynél, így lehetőség nyílt a Közvágóhídi csúccsal szemben járt Ph50/30e és Ph 50/50 kitérőkből kialakított vonali visszafogás és az Etele úti végállomási vágánykapcsolat vizsgálatára is.

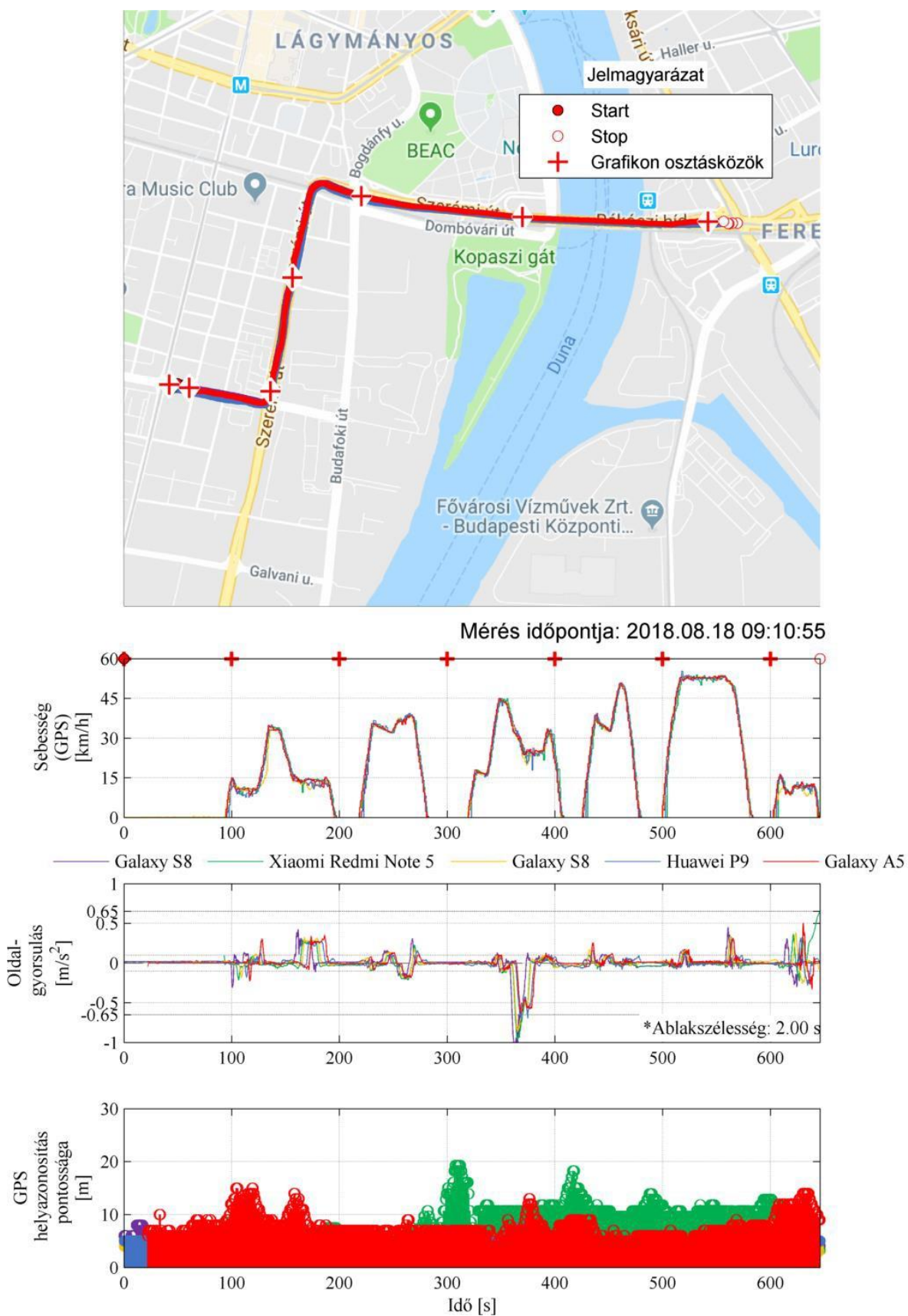
A **29. ábrán** egyértelműen beazonosítható egy lökés az első vezetőfülkénél mért adatok esetében a bemenő átmenetiívénél (175 s). A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulásának változása szépen kiemeli a vizsgált ív alapjellegzetességeit. A szimmetrikus „rámák” szimmetrikus átmenetiíves kialakításra utalnak. A pályáív töréses görbületváltozások helyeinél, mindegyik vizsgált modul esetén mértünk kisebb kiugró értéket.



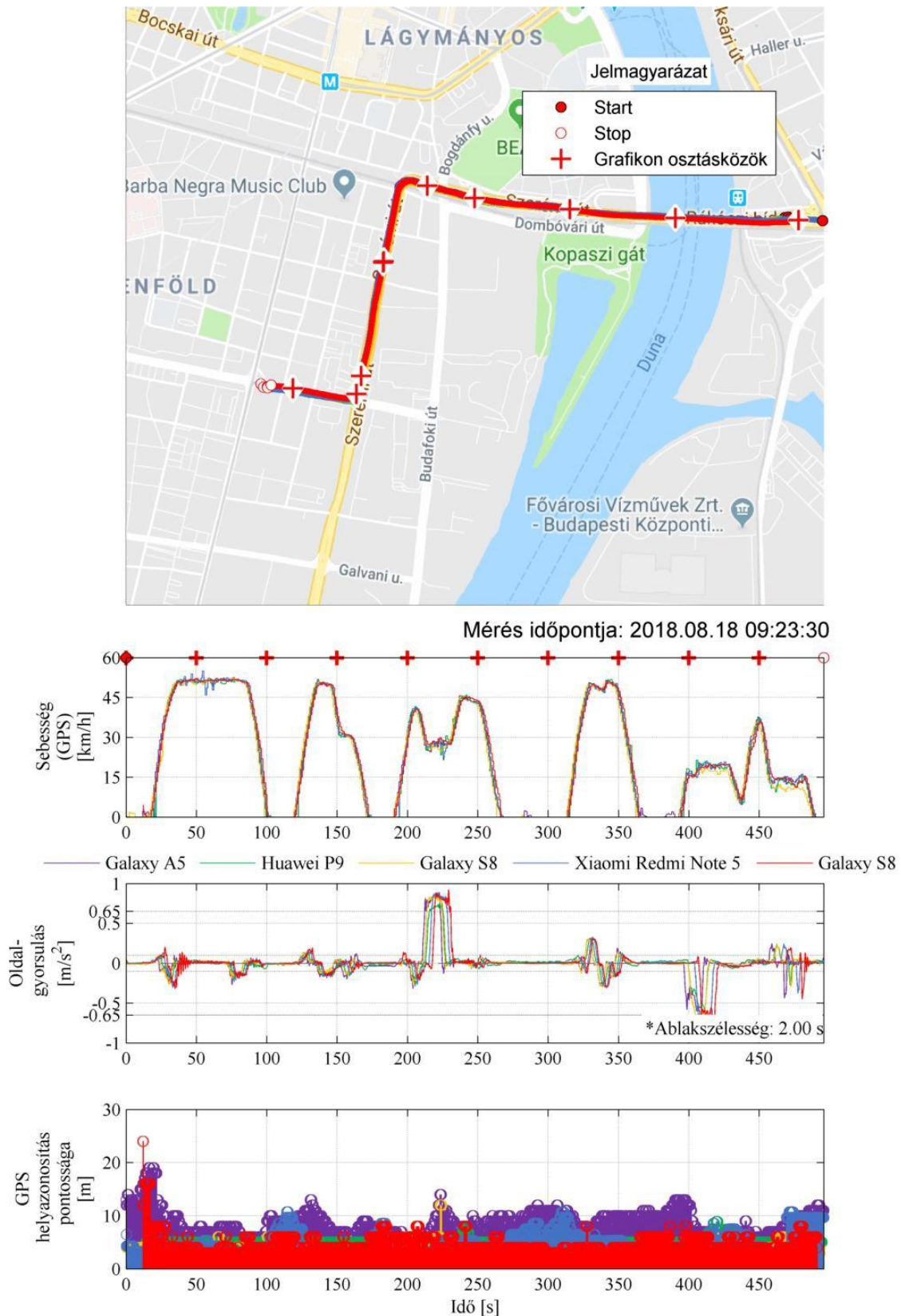
9. ábra: A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulásának időbeli változása (Szerémi út/Etele út pályáiv)

A különböző mérési menetek esetén rögzített kocsiszekrény oldalgyorsulásokat a **30-32. ábrák** szemléltetik. Az oldalgyorsulás 2 másodperces időablakra számított mozgóátlagát ábrázoltuk. Az alkalmazott „nagy” időablak szélesség kiszűri a jármű szabálytalan mozgásait (kigyózó, támolygó, imbolygó), viszont jól jellemzi a pálya ívviszonyait.

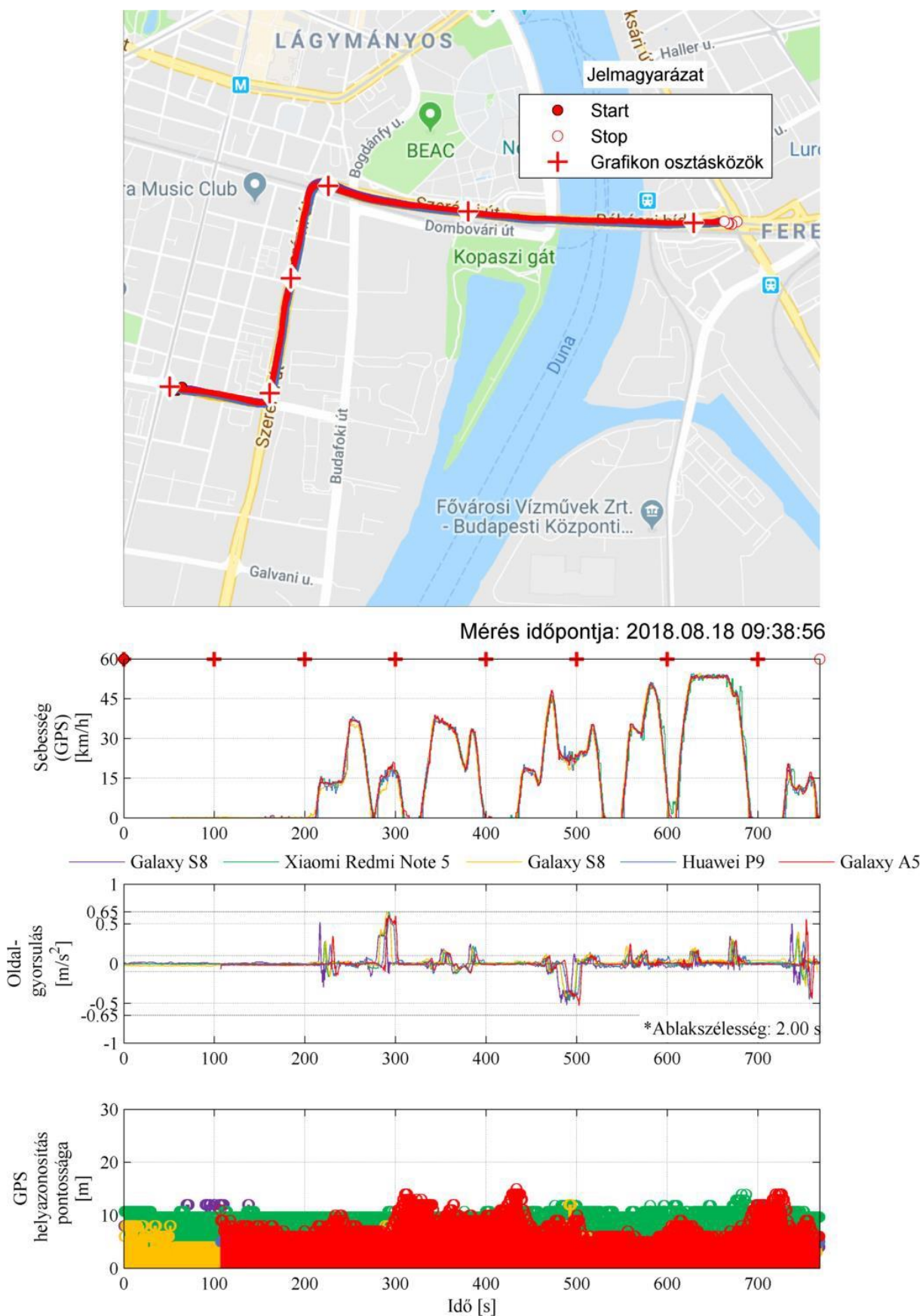
Amennyiben a GPS helyazonosítás pontossága 10 m alatti és nem változik, akkor a GPS sebességadatból számított megtett út szerint ábrázolt kocsiszekrény oldalgyorsulás jó közelítéssel jellemzi a vizsgált szakasz ívviszonyait.



10. ábra: CAF 9 modulok szerelvény vizsgált keresztmetszeteiben rögzített oldalgyorsulás
 (Etele út/Fehérvári út - Közvágóhíd)

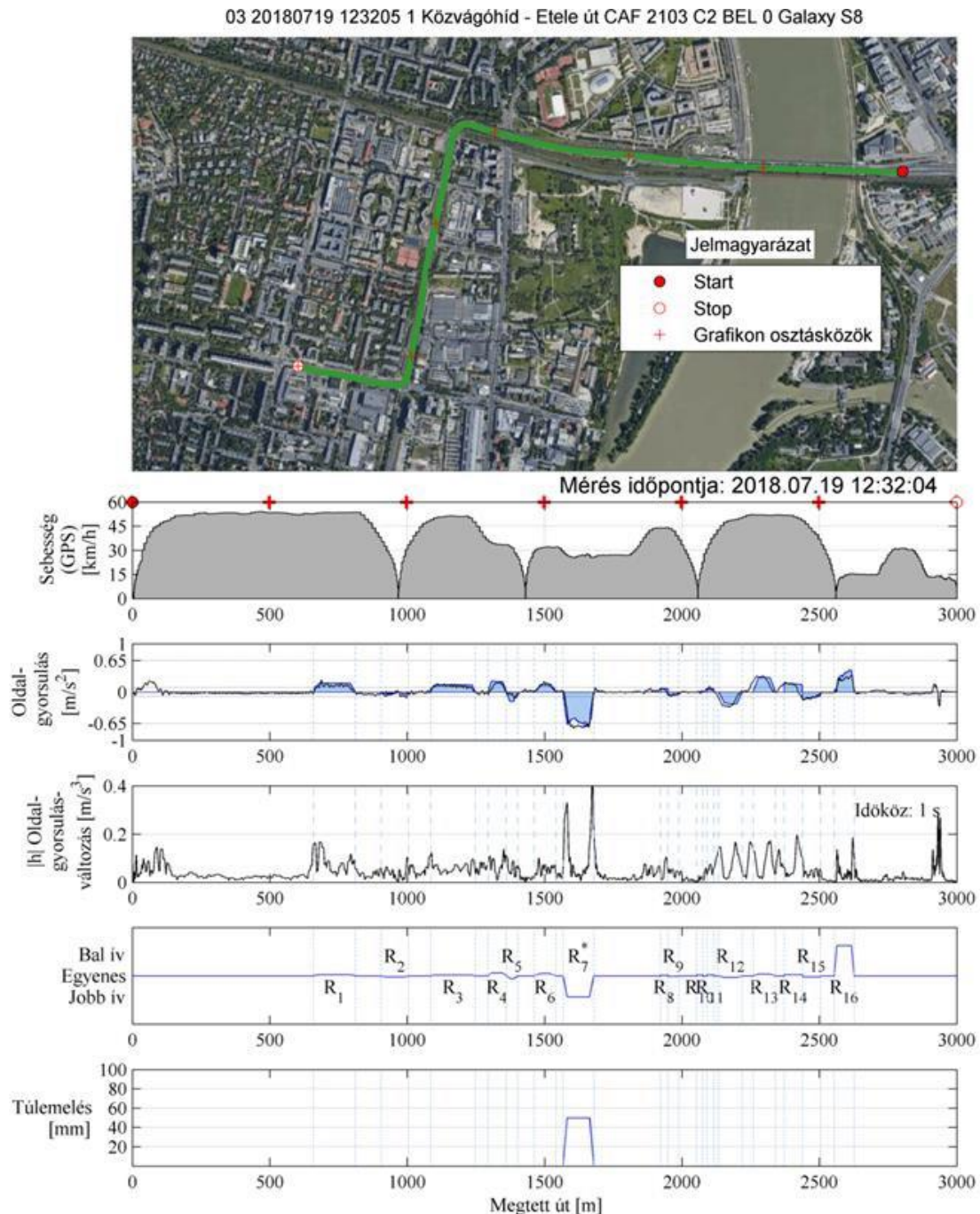


11. ábra: CAF 9 modulós szerelvény vizsgált keresztmetszeteiben rögzített oldalgyorsulás
(Közvágóhíd - Etele út/Fehérvári út)



12. ábra: CAF 9 modulok szerelvény vizsgált keresztmetszeteiben rögzített oldalgyorsulás
(Etele út/Fehérvári út - Közvágóhid)

A **33. ábrán** a vizsgált szakasz térképi adatai alapján felvett görbület és túlemelés függvényt, valamint az aktuális járműsebesség figyelembevételével számított oldalgyorsulást és a kocsiszekrényen mért oldalgyorsulást ábrázoltuk. Az ábra alapján egyértelműen kijelenthető, hogy az ívviszonyokat jól jellemzi a kocsiszekrényen okostelefonnal mért oldalgyorsulás.

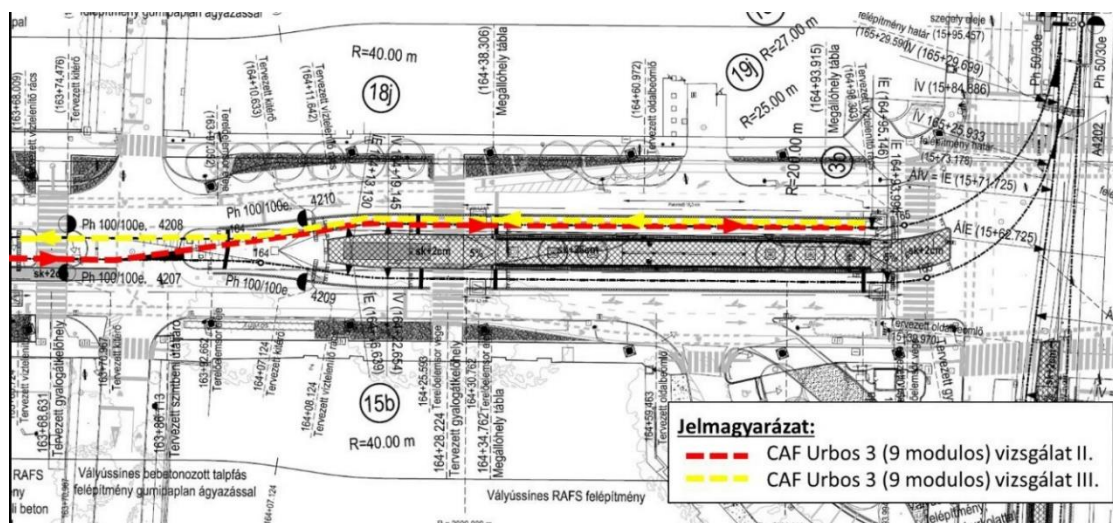


13. ábra: Ívviszonyok jellemzése: a C2 modul bal első ablakán mért kocsiszekrény oldalgyorsulás és a közelítő képletekkel számított gyorsulásadatok összehasonlítása

Etele út / Fehérvári úti vágánykapcsolat

A vizsgált végállomási vágánykapcsolat helyszínrajzát és a különböző mérési meneteket a **34. ábra** szemlélteti. A szimmetrikusan kifordított kettős vágánykapcsolaton való áthaladás

lényegében egy közbenső egyenessel kialakított elleníves geometriai elrendezést jelent, ahol $R_1=40$ m, $R_2=100$ m, míg a közbenső egyenes hossza a bejárt úttól függően 6 m, vagy 28 m. A mérések során a jármű közel állandó sebességgel haladt át a vágánykapcsolaton.



14. ábra: Etele út / Fehérvári úti vágánykapcsolat helyszínrajza a felmért szakaszok és a mérési irányok jelölésével (a mérési menetek részletes kiértékelése és a mérési grafikonok a 38. és a 39. ábrákon tekinthetők meg)

1-es villamos Etele út - Közvágóhíd, CAF 2103

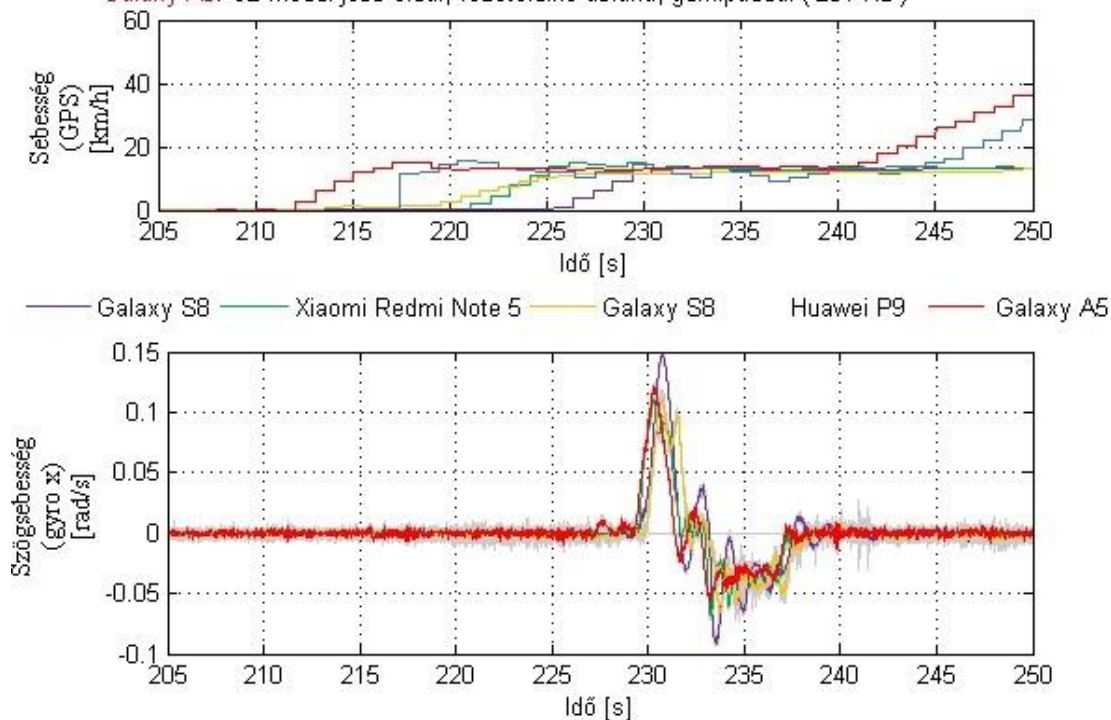
Galaxy S8: C1 modul bal oldal, vezetőfülke ablaka, gumipaddal (450 Hz)

Xiaomi Redmi Note 5: R1 modul jobb hátsó ablak, lent gumipad nélkül (402 Hz)

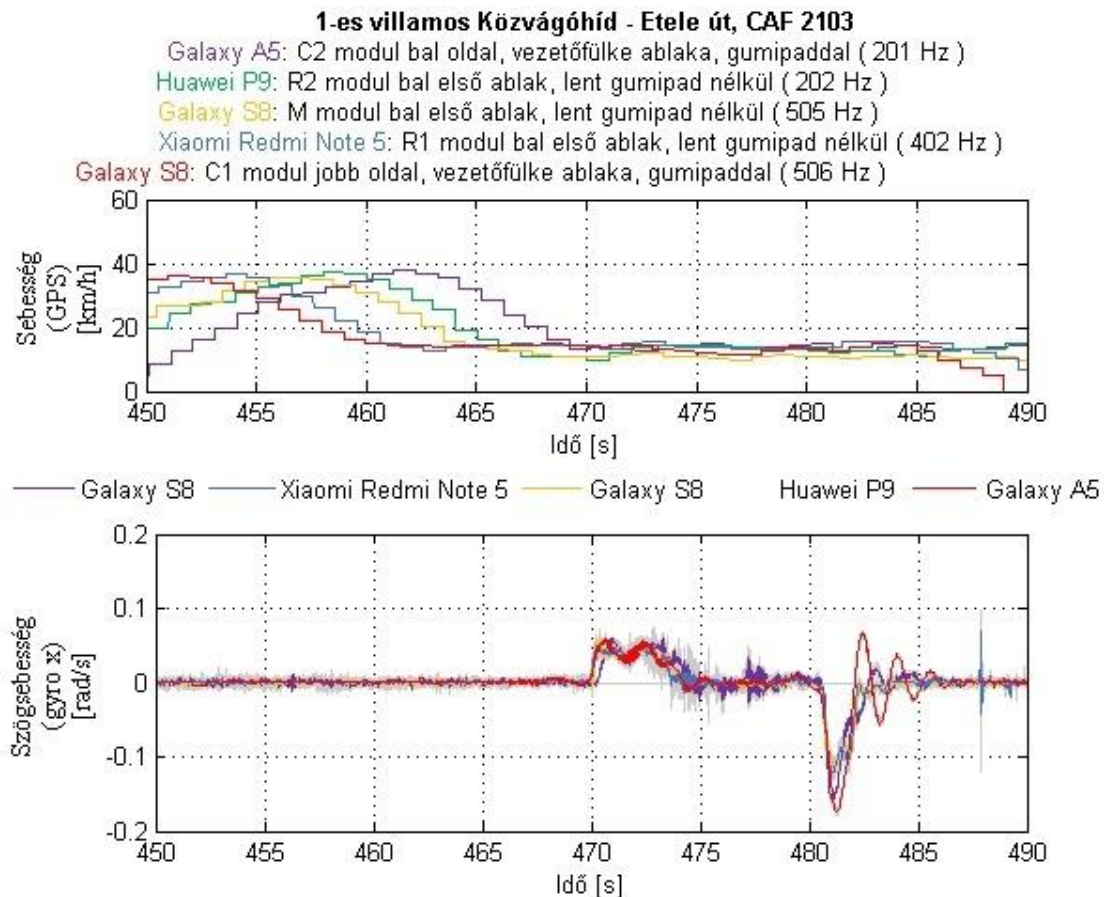
Galaxy S8: M modul jobb hátsó ablak, lent gumipad nélkül (505 Hz)

Huawei P9: R2 modul jobb hátsó ablak, lent gumipad nélkül (202 Hz)

Galaxy A5: C2 modul jobb oldal, vezetőfülke ablaka, gumipaddal (201 Hz)



15. ábra: A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulásának időbeli változása (Etele út/Fehérvári út végállomási szimmetrikusan kifordított kettős vágánykapcsolat, vizsgálat II.)

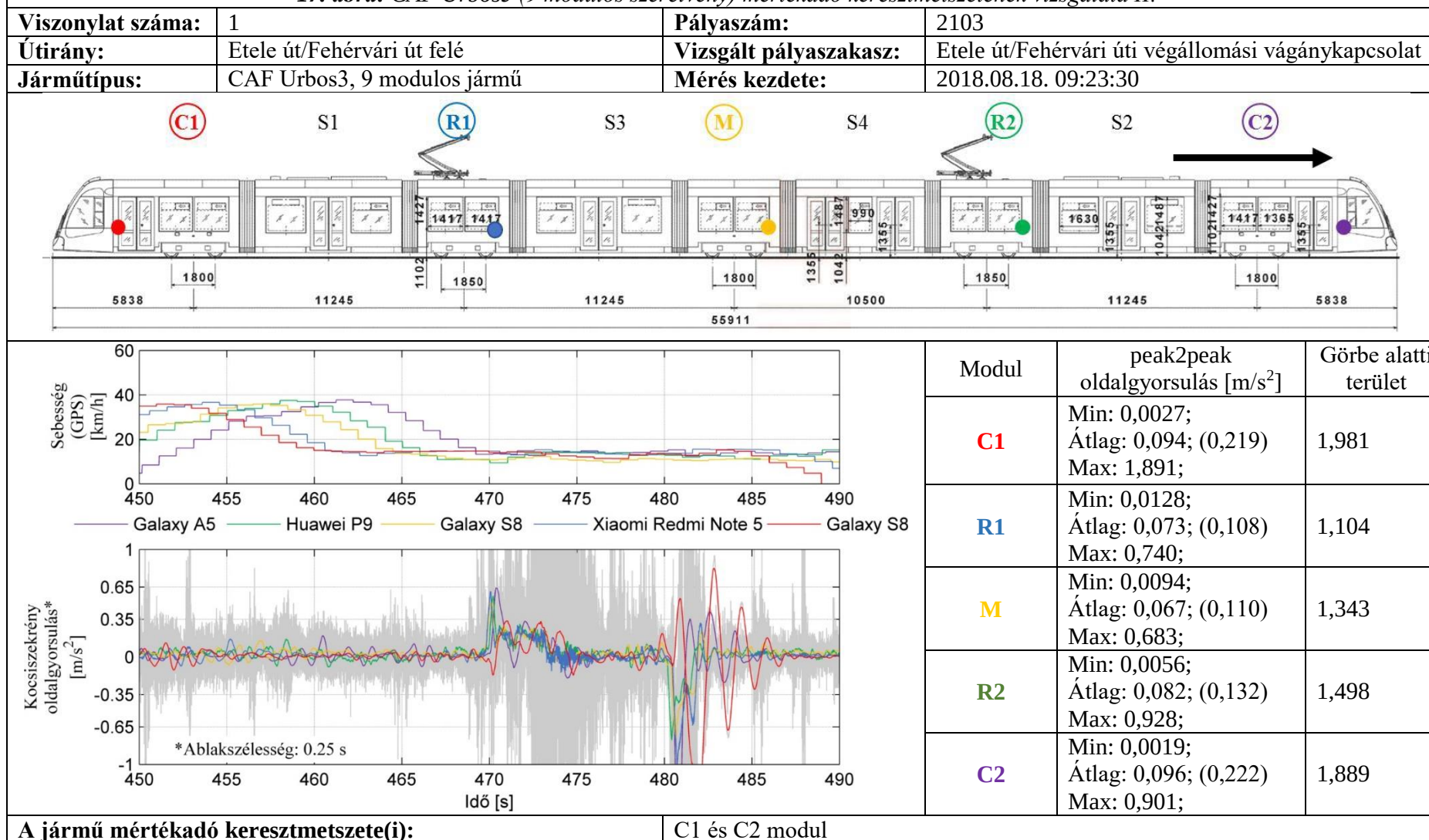


16. ábra: A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulásának időbeli változása (Etele út / Fehérvári út végállomási szimmetrikusan kifordított kettős vágánykapcsolat, vizsgálat III.)

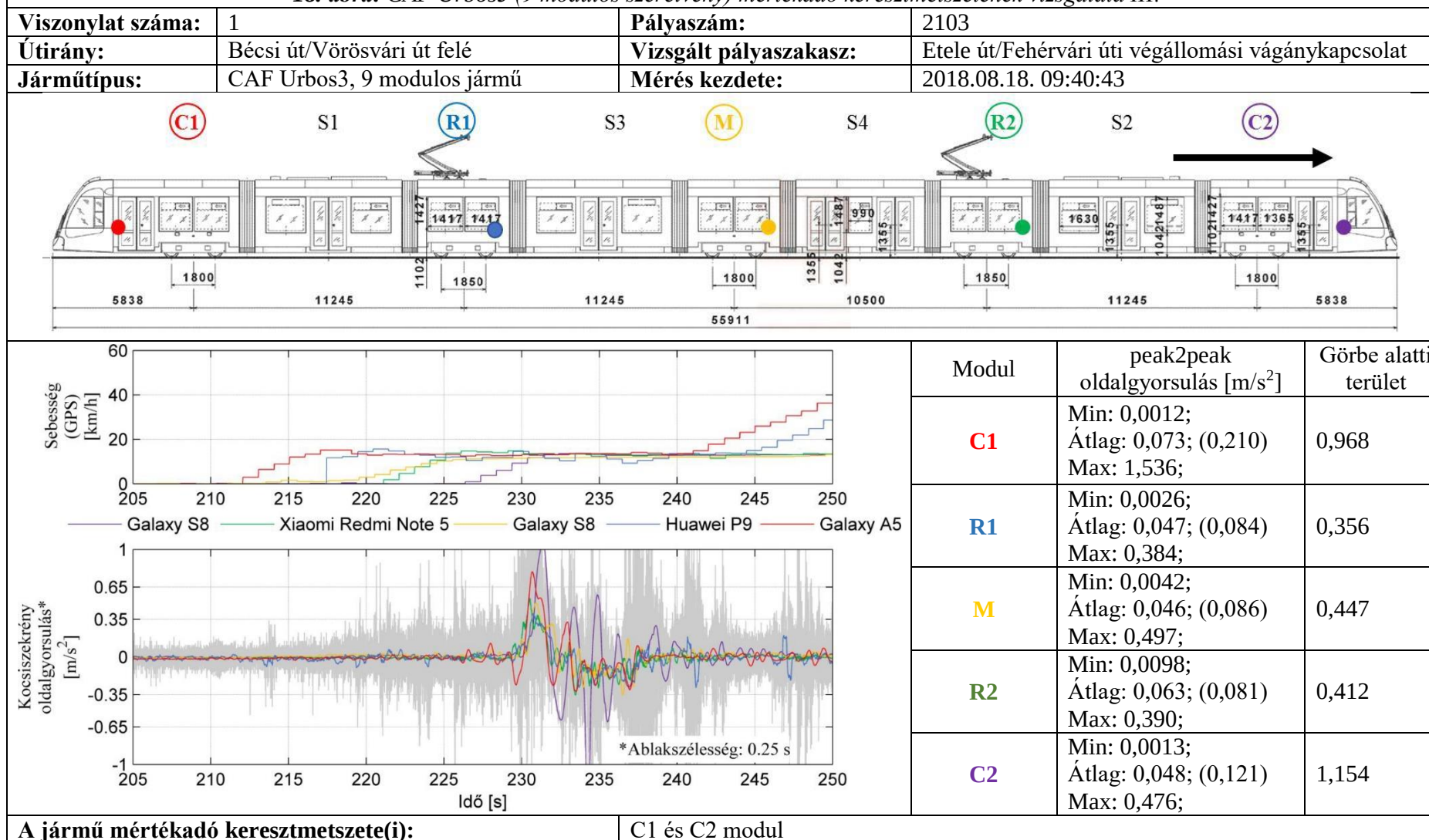
A végállomási bal vágányra közlekedés esetén (**37. ábra**) a Ph100/100e kitérőbe való behaladáskor minden mérési keresztmetszet mutatott kiugró értéket, de a legjelentősebb értéket a menetirány szerinti első vezetőfülkénél mértük. Ezután a kisebb sugarú ($R_2 = 40$ m) ellenkező irányú ívben pedig a menetirány szerinti hátsó vezetőfülkénél rögzítettük a mértékadó oldalgyorsulást.

A végállomási bal vágányról kihaladva (**38. ábra**) a 40 m sugarú ív kezdőpontján az első és a hátsó vezetőfülke is mutatott kiugró értéket, míg a Ph100/100e kitérőn az első vezetőfülke mutatott jelentős kiugró értéket.

17. ábra: CAF Urbos3 (9 modulós szerelvény) mértékadó keresztmetszetének vizsgálata II.



18. ábra: CAF Urbos3 (9 modulós szerelvény) mértékadó keresztmetszetének vizsgálata III.



CAF Urbos3, 5 modul

A jármű keresztirányú utazási komfort szempontjából mértékadó keresztmetszetét az 19-es villamos Bécsi út/Vörösvári út és a Batthyány tér végállomások között vizsgáltuk. Az augusztus 20-ai nemzeti ünnep előkészületei miatt a Batthyány tértől délre a rakparton nem közlekedett a 19-es villamos. Részletesen ismertetem a Margit híd alatti fonódó pályaszakaszt (**39.-41. ábra**) és a Batthyány téri vonali visszafogás (**42. és 43. ábra**).

A vizsgált jármű 5 modulból áll és mindegyikben egyidejűleg mértünk, a különböző keresztmetszeteiben rögzített kocsiszekrény oldalgyorsulásokat a **39-43. ábra** szemlélteti. Ebben az esetben is az oldalgyorsulás 2 másodperces időablakra számított mozgóátlagát ábrázoltuk.

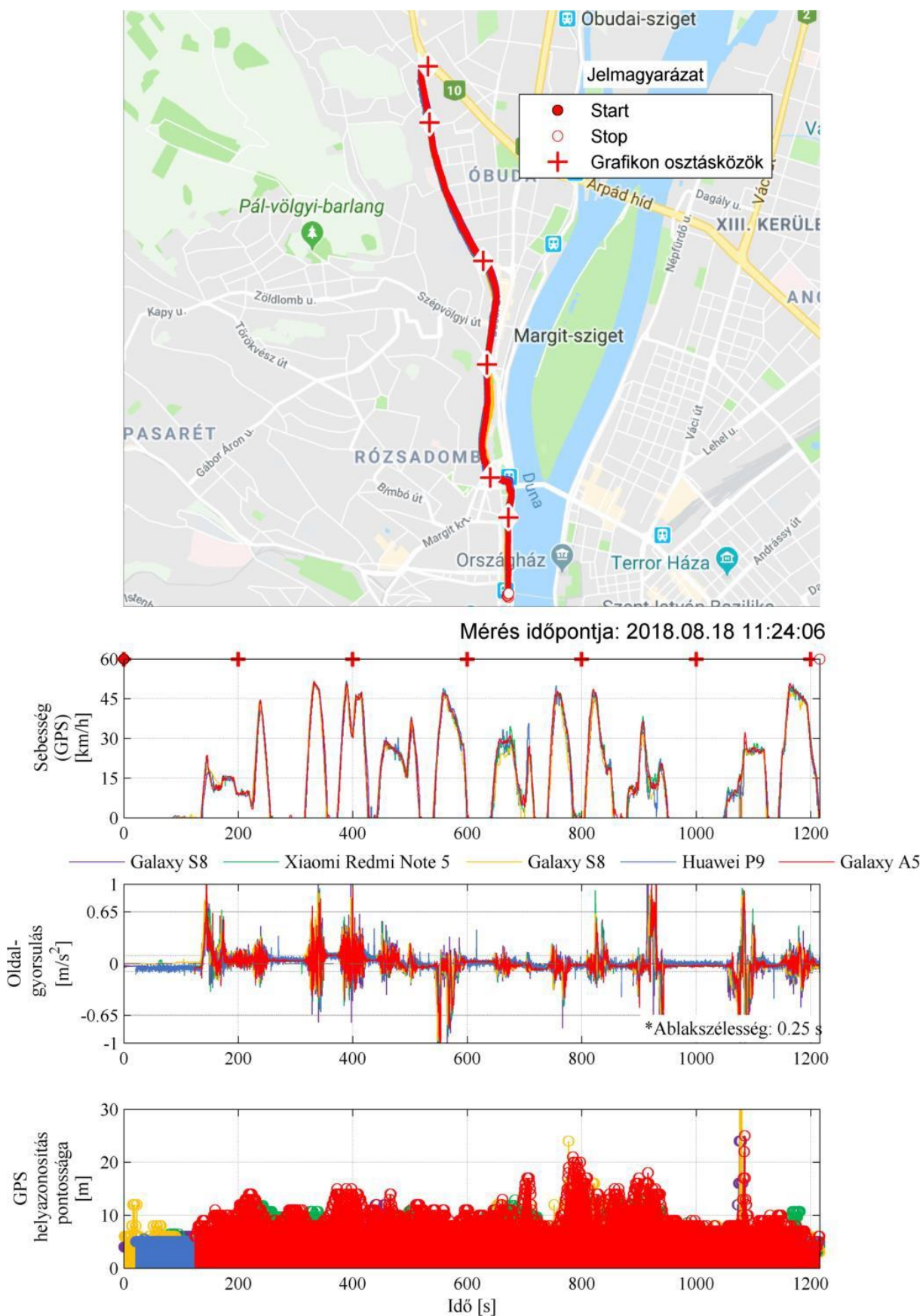
A dinamikai hatásokat az első és az utolsó modul vezetőfülkéjén, illetve a többi modul esetén a menetirány szerinti jobb hátsó ablakoknál mértük.

Margit híd alatti fonódó pályaszakasz vizsgálata

A vizsgált pályáívek görbületváltozásos helyein az R2 jelű modul kivételével mindegyik modul mutat kiugró értékeket az oldalgyorsulás ábrákon (**40. ábra**). Az ívbe való behaladáskor a jármű sebességétől függően a jármű eleje vagy vége a mértékadó, míg az inflexiós elleníveknél a befüggesztett modulok is mutattak kiugró értéket.

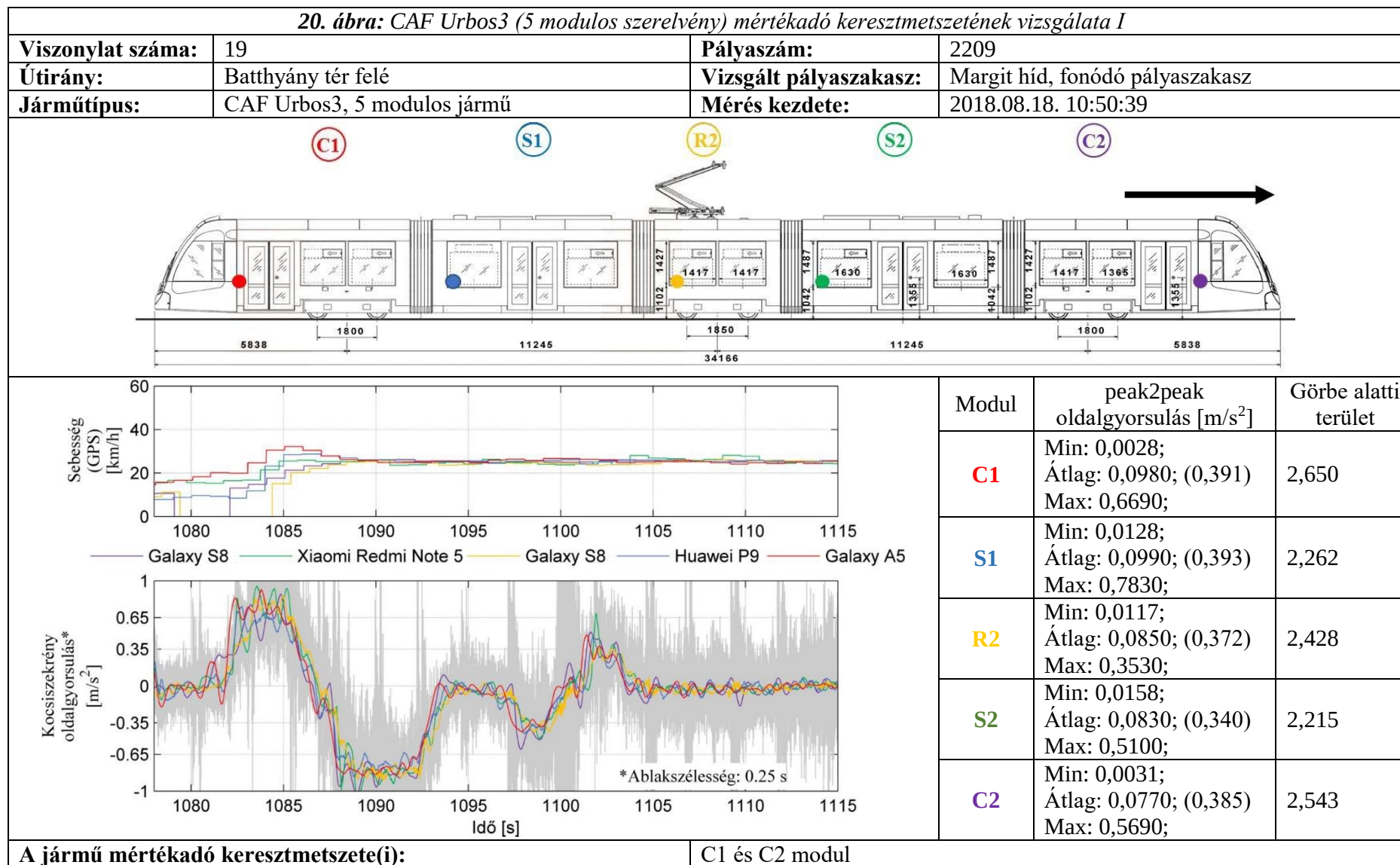
Batthyány tér vonali visszafogó vizsgálata:

A hajtott, alátámasztással rendelkező C1, R2 és C2 jelű modul elemeken kiugró értéket tapasztaltunk a görbület „ugrásos” helyeken. A giroszkóp adatokat tekintve (**43. ábra**) szépen elkülönül a befüggesztett és a nem befüggesztett modulok elfordulása. Az S1 jelű befüggesztett modul elfordulása sokkal kiegyenlítettebb, nincsenek benne hirtelen kiugrások a görbületváltozásos helyeken. Köszönhetően a modulonként változó mozgásérzékelő hosszának.



19. ábra: CAF (5 modulos) vizsgált keresztmetszeteiben rögzített oldalgyorsulás (Bécsi út/Vörösvári út - Batthyány tér)

20. ábra: CAF Urbos3 (5 modulos szerelvény) mértékadó keresztmetszetének vizsgálata I





19-es villamos Bécsi út - Batthyány tér, CAF 2209

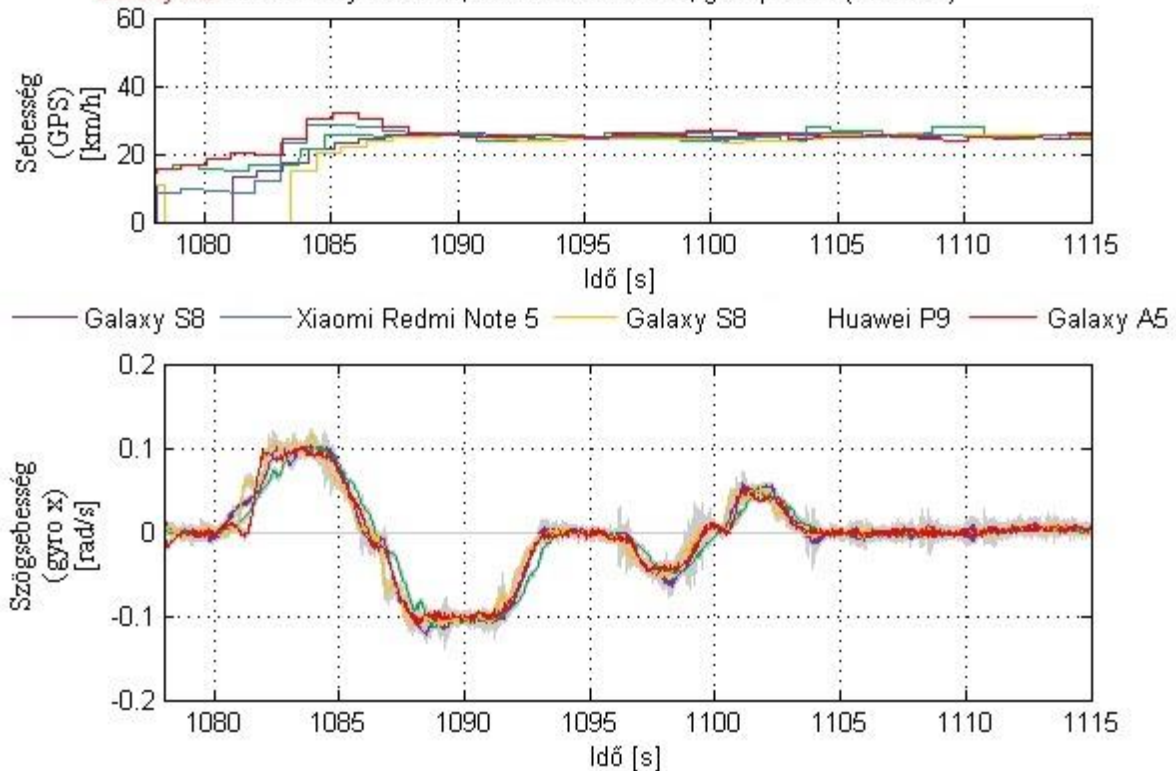
Galaxy S8: C2 modul bal oldal, vezetőfülke ablaka, gumipaddal (504 Hz)

Xiaomi Redmi Note 5: S1 modul jobb hátsó ablak, lent gumipad nélkül (402 Hz)

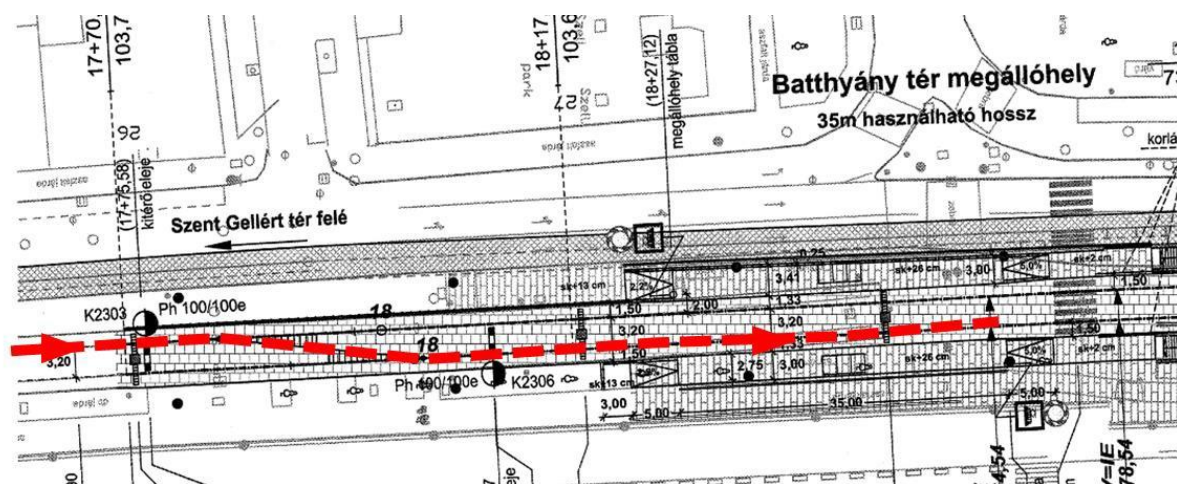
Galaxy S8: R2 modul jobb hátsó ablak, lent gumipad nélkül (504 Hz)

Huawei P9: S2 modul jobb hátsó ablak, lent gumipad nélkül (202 Hz)

Galaxy A5: C2 modul jobb oldal, vezetőfülke ablaka, gumipaddal (202 Hz)



21. ábra: A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulásának időbeli változása (Margit híd, fonódó pályaszakasz, CAF 2209, 5 modulos szerelvény)



19-es villamos Batthyány tér - visszafogó, CAF 2209

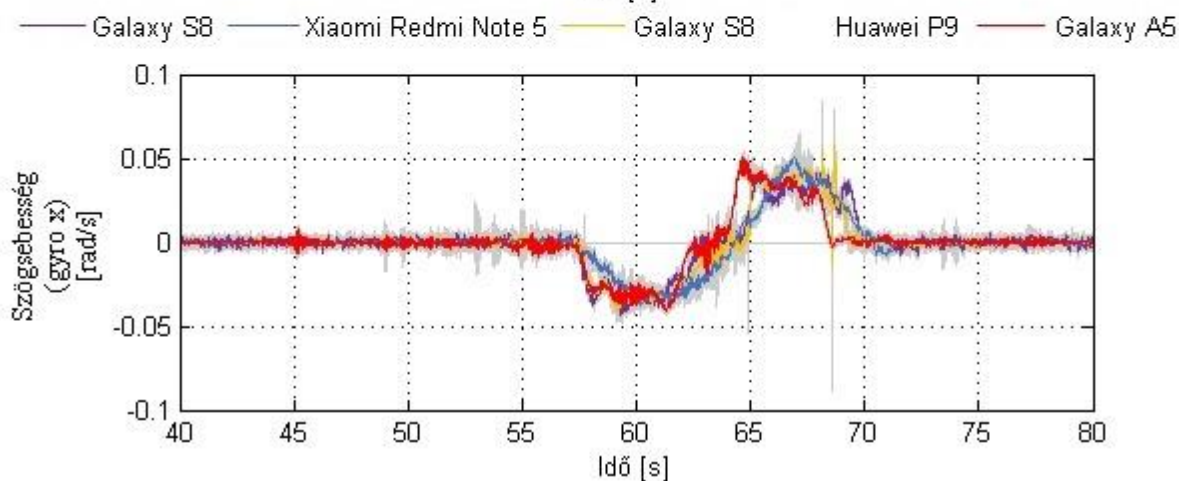
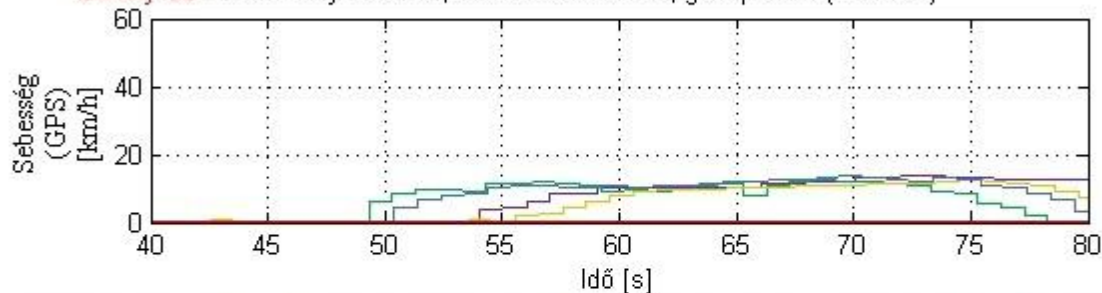
Galaxy A5: C1 modul bal oldal, vezetőfülke ablaka, gumipaddal (200 Hz)

Huawei P9: S2 modul bal első ablak, lent gumipad nélkül (202 Hz)

Galaxy S8: R2 modul bal első ablak, lent gumipad nélkül (505 Hz)

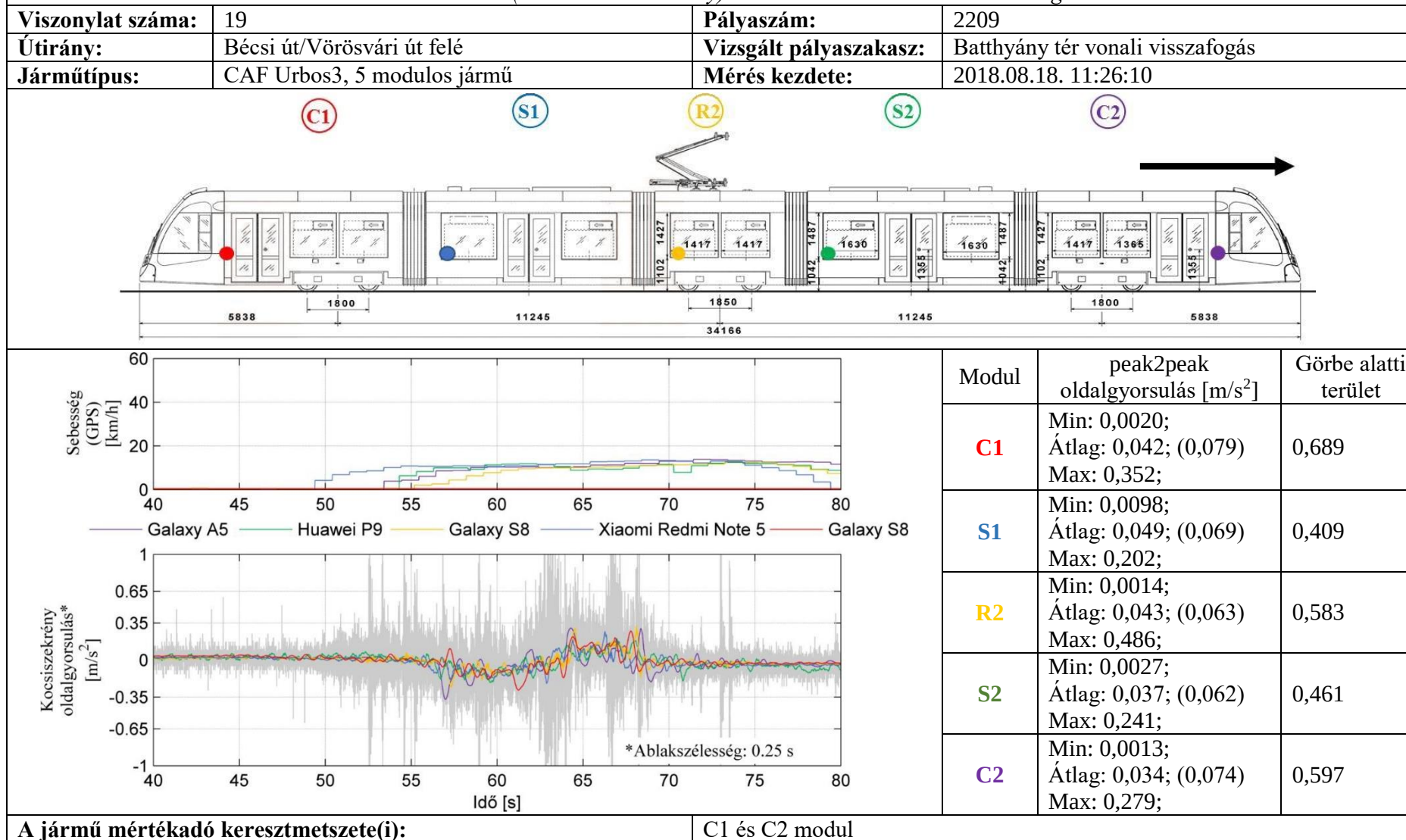
Xiaomi Redmi Note 5: S1 modul bal első ablak, lent gumipad nélkül (402 Hz)

Galaxy S8: C2 modul jobb oldal, vezetőfülke ablaka, gumipaddal (505 Hz)



22. ábra: A kocsiszekrény függőleges tengely körüli szögelfordulásának időbeli változása (Batthyány tér vonali visszafogás; CAF 2209, 5 modulos szerelvény)

23. ábra: CAF Urbos3 (5 modulós szerelvény) mértékadó keresztmetszetének vizsgálata II



IV. Melléklet

Kitérők keresztezési középrészének geometriai kialakítása

Felfutós (laposvályús) keresztezés

A laposvályús keresztezésnél a kerék nem a futófelületen, hanem a vályúfenék fokozatos emelésével, a nyomkarimán gördülve halad át a keresztezési csomóponton, ezzel kiküszöbölhető, hogy a keresztezési csúcs elverődjön és az áthaladás is csendesebbé válik. Ugyanakkor, amit a pálya oldalon nyerünk, azt elveszítjük a nyomkarima és az egész hajtáslánc megnövekedett terhelésén, hiszen a kerekek nem a természetes felületen érintkeznek a sínrel. A felfutós keresztezéseket teltfejű sínprofilból, forgácsolással kell kialakítani. A felfutó rámpát és a laposvályút mindkét sinszámban ki kell képezni, párhuzamos felfuttatással. Az alkalmazott nyomszűkítést és vályúsűkítést a felfutó lejtő hosszában kell kifuttatni.

Álfutós (csökkentett vályúméllységű) keresztezés

A csökkentett vályúméllységű keresztezések elméletben úgy vezetnek a keresztezésen át a nyomkarimát, hogy közben a futófelület is feltámaszkodik a könyökre. A nyomcsatorna méretei, a vezetés- és nyomtáv megegyeznek a mélyvályús szerkezetek méreteivel. A biztonsági lejtő legmeredekebb hajlása 1:20, kezdő mélyisége legkevesebb 32 mm. A csökkentett vályúméllységű szakasz szokásos mélyisége 24 mm. A kialakítás előnyei közé tartozik, hogy a karima és a hajtáslánc a felfutós keresztezéssel összehasonlítva rövidebb idejű terhelésnek van kitéve, illetve megmarad a zajmentes áthaladás.

Hátránya, hogy csak elméletben működik: A kerékkopások következtében hol felfutósként, hol mélyvályúsként fog működni a keresztezés: egy kopott futófelületű kerék számára felfutós lesz így a vályú fenéket koptatja majd jobban, ha viszont egy új futófelületű abroncs halad át az a futófelületen fog haladni.

Megszakítás nélküli keresztezés kialakítása

Ezt a fajta keresztezést célszerű alkalmazni abban az esetben, ha túlnyomórészt egy irányban járt a kitérő. Lényege, hogy megszakítás nélkül vezeti át a jármű kerekeit a fő irányában, míg a másik irány esetében a jármű kerekei „átugranak” a sínkoronán.

Mélyvályús keresztezés

A hagyományos mélyvályús keresztezésnél a csatlakozó sínek az eredeti vályúméllységgel csatlakoznak, a kerekek a futófelületükön futnak, a keresztezésben pedig létrejön egy vezetetlen szakasz. Ennek a kialakításnak előnye, hogy nem kell megváltoztatni a csatlakozó sínek profilját, azonos vályúméllységgel és vályúbősséggel csatlakoztathatók egymáshoz. Hátránya, hogy zajos, és a csúcs elverődhet. Míg nyitott Vignol kitérőkben a csúcs cseréje viszonylag

egyszerűen kivitelezhető (akár szerelt, akár csúcsbetétes kialakítású), addig burkolt Phoenix-kitérőkben ez jóval komplikáltabb.

Mélyvályús kialakítás elvén működnek az alább felsorolt kitérők is:

Emelt könyöksínes keresztezés

Az emelt könyöksínes keresztezés a csúcs védelmére ad megoldást. A kialakítás elve, hogy a keresztezés környezetében a könyöksín emelésével a kerék futófelülete a könyöksínre támaszkodik fel, így nem jön létre vezetetlen szakasz, a csúcs nem verődik el és normál kerék-igénybevételek lépnek fel.

Az emelt könyöksínes keresztezés gyártástechnológiai okokból Phoenix-rendszerben is MÁV 48-as sínrendszerből, szerelt kivitelben készül. Ez az oka annak, hogy ez a megoldás nem terjedt el, hiszen a csavarkötés bonyolult és sok alkatrészt igényel. Phoenix-rendszerbe csak átmenettel illeszthető. Mindezek mellett csak a Ph 100/100e rendszerben használható.

Az emelt könyöksínes keresztezés a szerelt kivitel miatt nem az előírt vályúbősséggel készül, az egységes 36 mm helyett 42 mm vályúbősségű Phoenix-sínek kerülnek beépítésre és a Vignol sínek futó és vezetőéle közötti távolság 40 mm.

Süllyesztett csúcsos keresztezés

Az emelt könyöksínes kialakítás szerkezetének egyszerűsítése miatt fejlesztette ki a VAMAV az úgynevezett süllyesztett csúcsos keresztezési középrészt. Ez a megoldás elméletben ötvözi az emelt könyöksínes és a tömörsínes szerkezet előnyös tulajdonságait.

A tömörsínhez hozzáhegeszthetők a csatlakozó sínek. így elkerülhető hogy bonyolult, szerelt szerkezetet kelljen kialakítani. A kerékátvezetés elve az emelt könyöksínes szerkezethez hasonló, csak itt nem a könyöksín – illetve itt csak elméleti könyöksínről beszélhetünk – emelésével, hanem a csúcs süllyesztésével érik el azt, hogy a kerék futófelülete feltámaszkodjon a könyöksínre. A futóoldal végig Phoenix-profilra van megmunkálva. Az egyenletes teherátadásért az 1:20 hajlású lejtős felület, az úgynevezett „nyuszifül” felelős. A csúcs kis mértékben hegyezve van. Nyomkarima terhelés nem lép fel, vezetetlen szakasz nincsen, mert a futófelület folyamatosan feltámaszkodik a sínprofilra.

A kialakítás hátránya hogy a járműszekrény kis mértékben „bebillen” a süllyesztett csúcsba, de ennek hatása a lejtő kifuttatás helyes megválasztásával csökkenthető.

A süllyesztett csúcsos keresztezés a mélyvályús keresztezés vezetés- és nyomtávolság illetve vályúbősség paramétereivel készül.

V. Melléklet

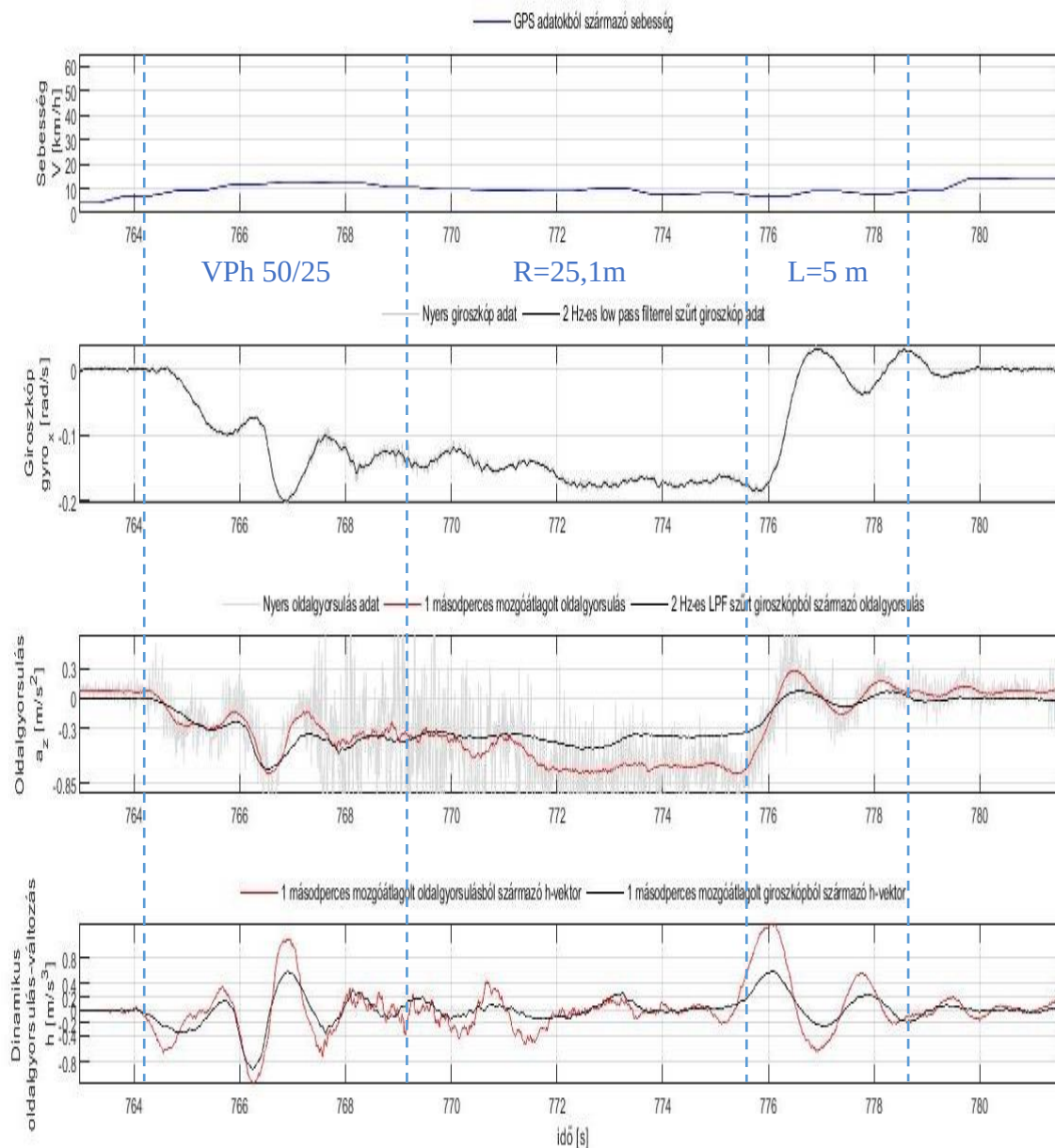
További mérési kiértékelések

24/1. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K1014 17 20180715 163234 Csörsz utca - Bécsi út-Vörösvári út CAF 2220 C2 BEL 1 A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Margit híd, budai hídfő H		
Mérés időpontja:	2018.07.15 16:23:34	Vizsgált kitérő száma:	K1014
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulós	Vizsgált kitérő típusa:	VPh 50/25
Pályaszám:	2220	Viszonylat száma:	17

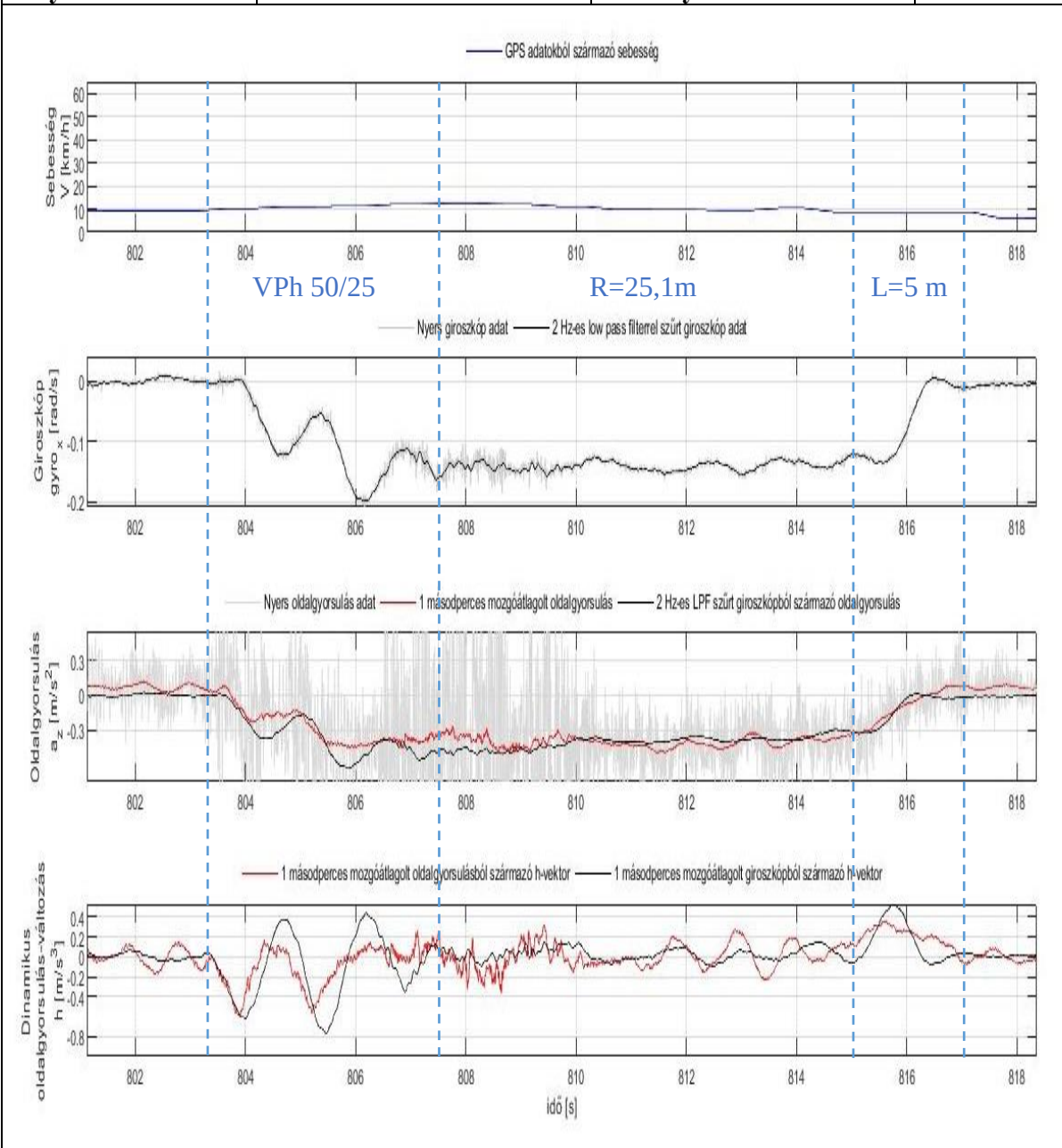


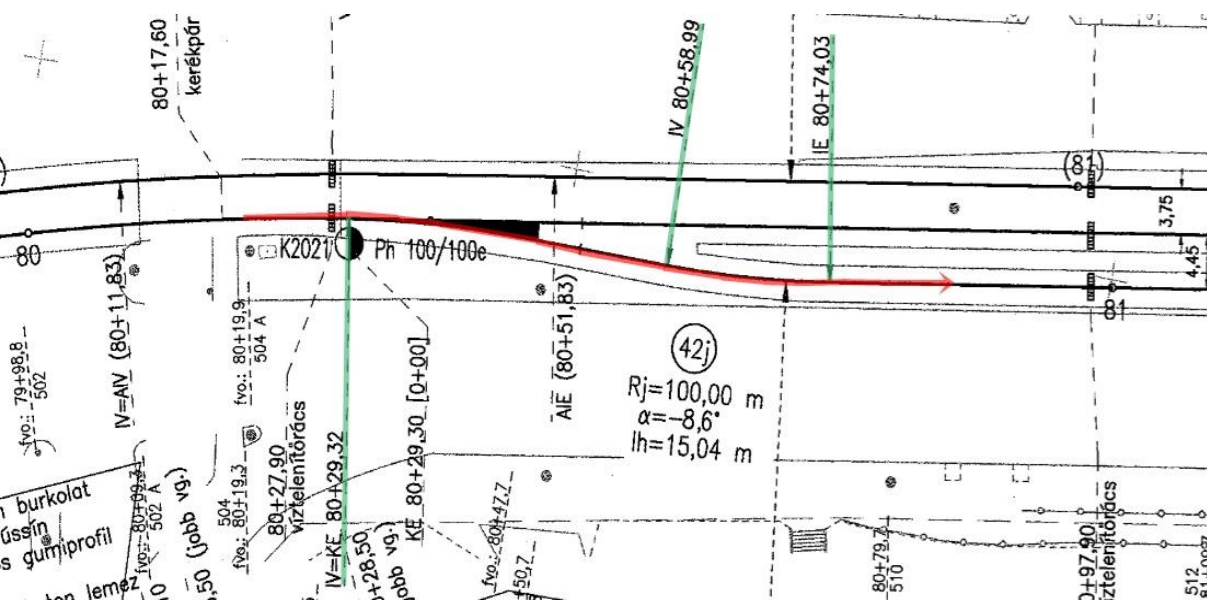
44/2. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K1014 17 20180729 203206 Csörsz utca - Bécsi út-Vörösvári út CAF 2206 C1 JEL 1 A5

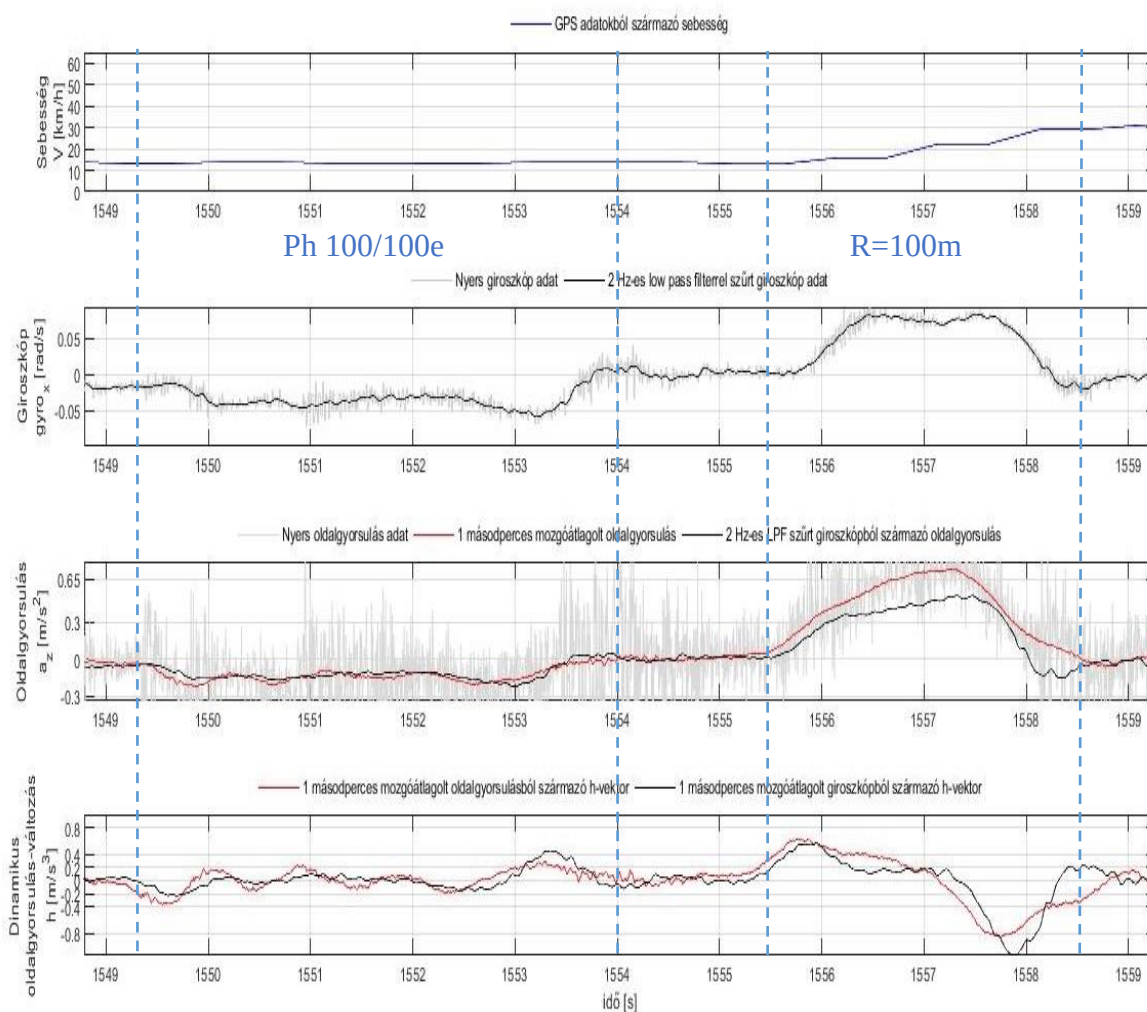
Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Margit híd, budai hídfő H		
Mérés időpontja:	2018.07.29 20:32:06	Vizsgált kitérő száma:	K1014
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	VPh 50/25
Pályaszám:	2206	Viszonylat száma:	17



25/1. ábra: 1-es villamos, Puskás Ferenc Stadion, Ph 100/100e vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata			
Mérési fájl neve:			
K2021_1_20180704_113659_Bécsi út-Vörösvári út_Puskás Ferenc Stadion M_CAF_2112_C2_JHK_1_A5			
Útirány:	Etele út/Fehérvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	1-es villamos, Puskás Ferenc Stadion		
Jármútípus:	CAF Urbos3, 9 modulós, 2112 pályaszámú jármű		
Mérés időpontja:	2018.07.04 11:36:59	Vizsgált kitérő száma:	K2021
			
			

45/2. ábra: 1-es villamos, Puskás Ferenc Stadion, Ph 100/100e vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Sebesség adatok [m/s]	1549,5 s- 1550,0 s	1550,0 s- 1553,0 s	1553,0 s- 1554,0 s	1555,5 s- 1556,5 s	1556,5 s- 1557,5 s	1157,5 s- 1558,5 s
Átlagos sebesség:	3,74	3,76	3,85	4,10	5,51	7,39
Maximális sebesség:	3,81	3,87	3,85	4,39	6,19	8,14
Sebesség szórás:	0,04	0,07	0,01	0,295	0,70	0,76
Ív adatok [m]	R _{k1,2} *			R ₃		
	100			100		
Oldalgyorsulás adatok [m/s ²]						
mért (átlag):		-0,14			0,42	
számított:		0,14			0,30	
eltérés:		1,9%			27,6%	
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s ³]						
mért (minimum):	-0,23		-0,12	-0,01		-1,14
mért (maximum):	0,01		0,45	0,57		0,07
mért (szórás):	0,08		0,09	0,17		0,38



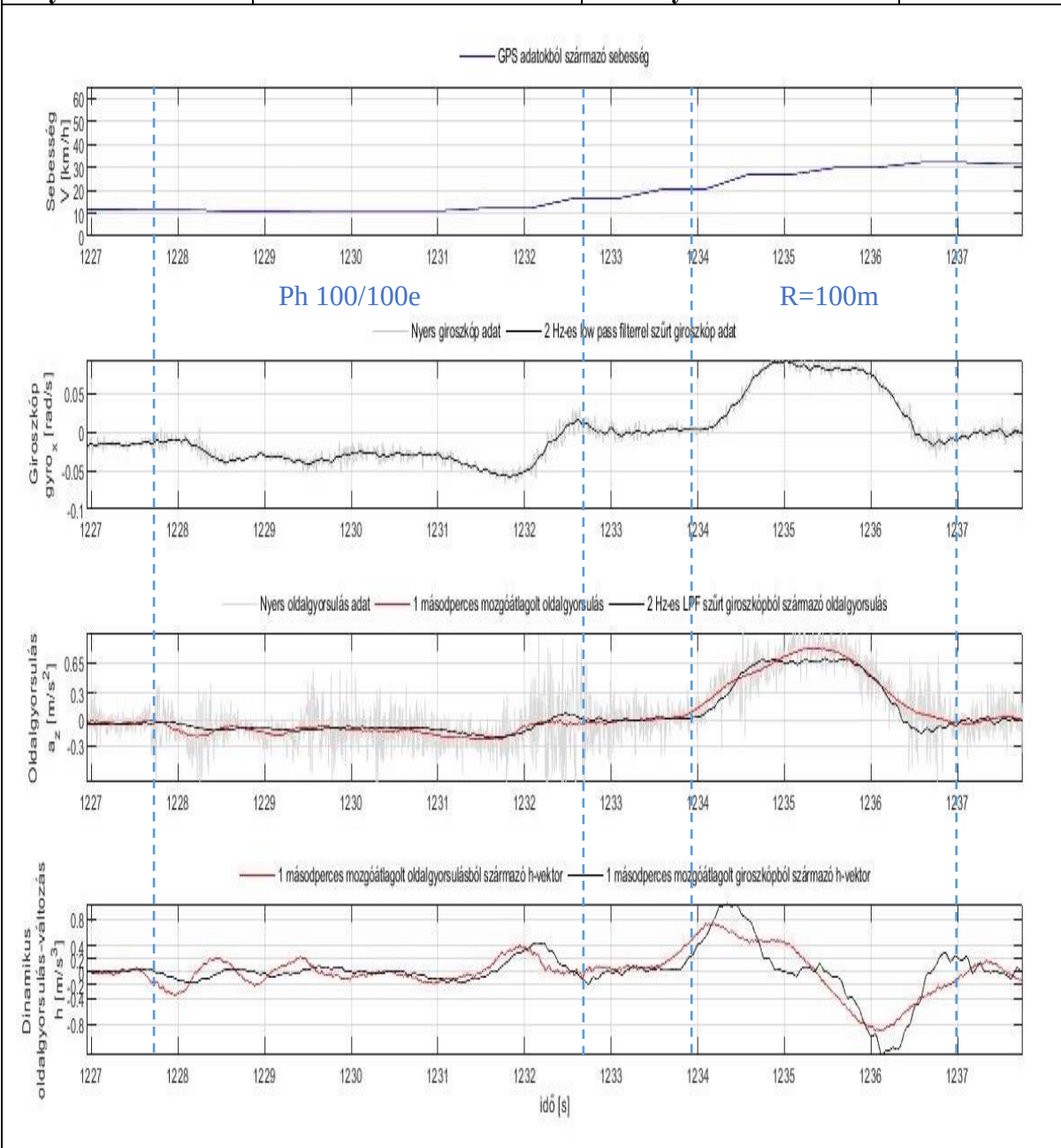
*A közbenső egyenesben nem keletkezik oldalgyorsulás, emiatt nincs feltüntetve.

45/3. ábra: 1-es villamos, Puskás Ferenc Stadion, Ph 100/100e vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K2021 1 20180704 133756 Óbudai rendelőintézet Puskás Ferenc Stadion M CAF 2112 C2 JHF 1 A5

Útirány:	Etele út/Fehérvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Puskás Ferenc Stadion		
Mérés időpontja:	2018.07.04 13:37:56	Vizsgált kitérő száma:	K2021
Járműtípus:	CAF Urbos3, 9 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/100e
Pályaszám:	2112	Viszonylat száma:	1

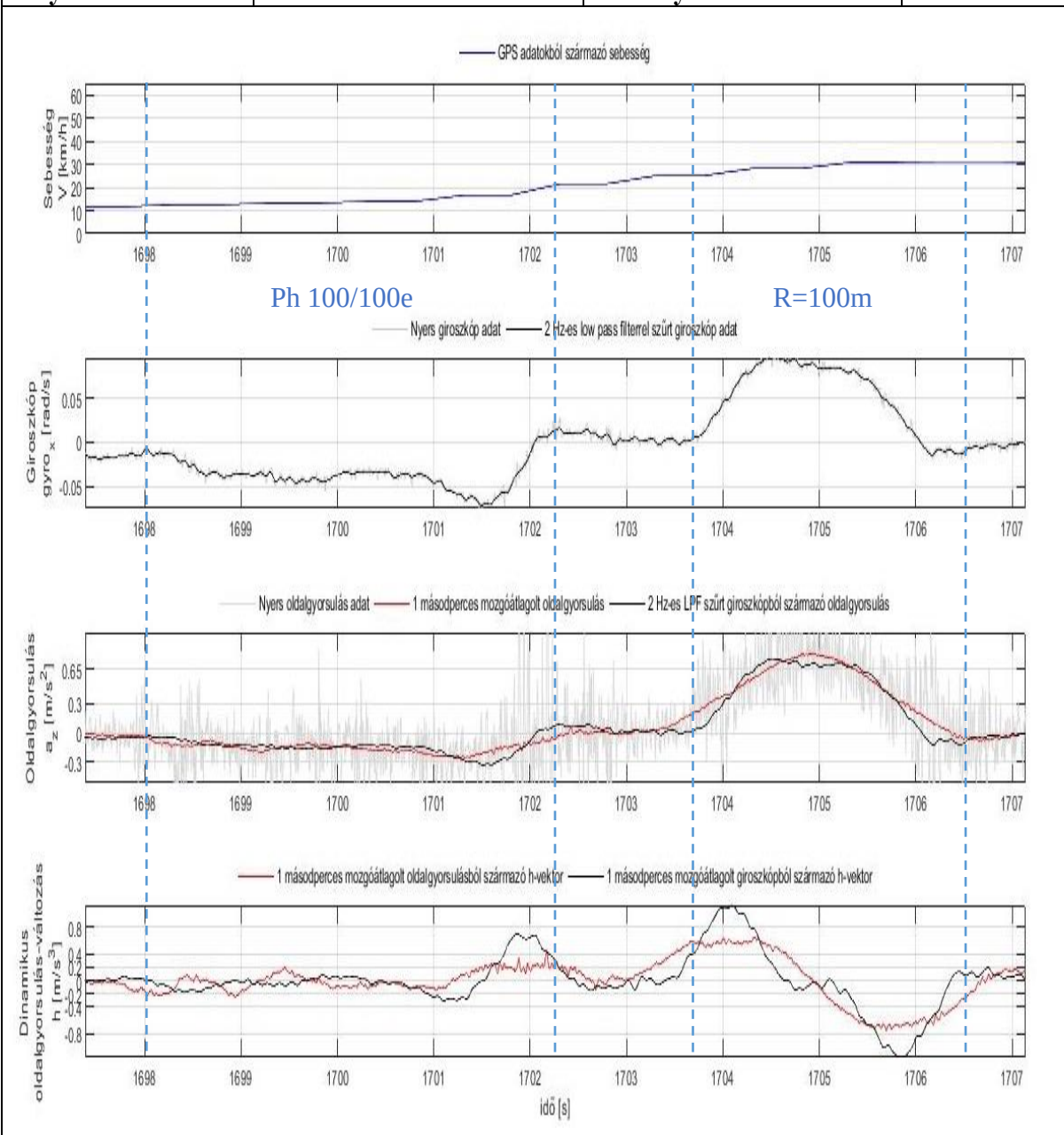


45/4. ábra: 1-es villamos, Puskás Ferenc Stadion, Ph 100/100e vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K2021 1 20180914 145234 Bécsi út-Vörösvári út - Puskás Ferenc Stadion M_CAF_2109_C2_JHL_1_A5

Útirány:	Etele út/Fehérvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Puskás Ferenc Stadion		
Mérés időpontja:	2018.09.14 14:52:34	Vizsgált kitérő száma:	K2021
Járműtípus:	CAF Urbos3, 9 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/100e
Pályaszám:	2109	Viszonylat száma:	1

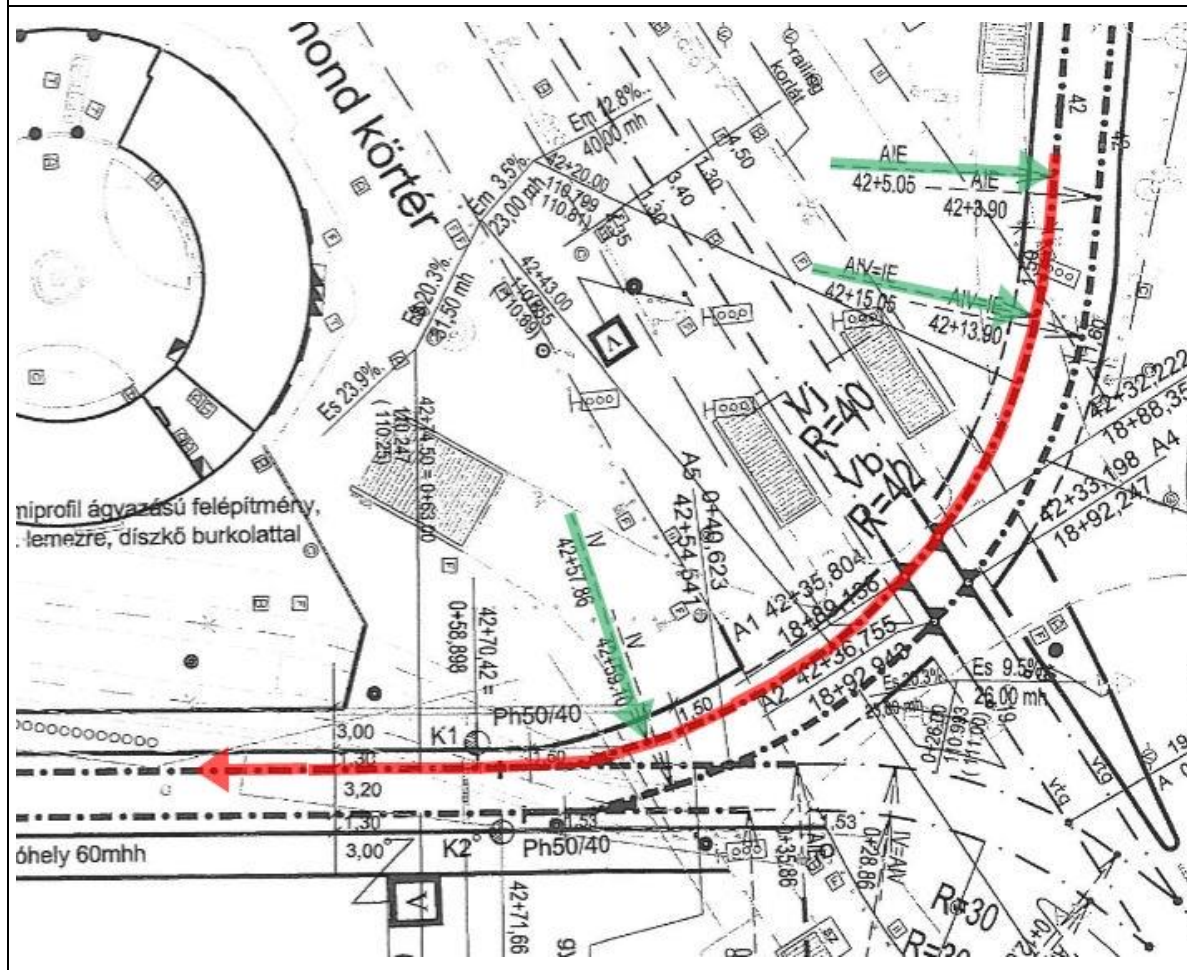
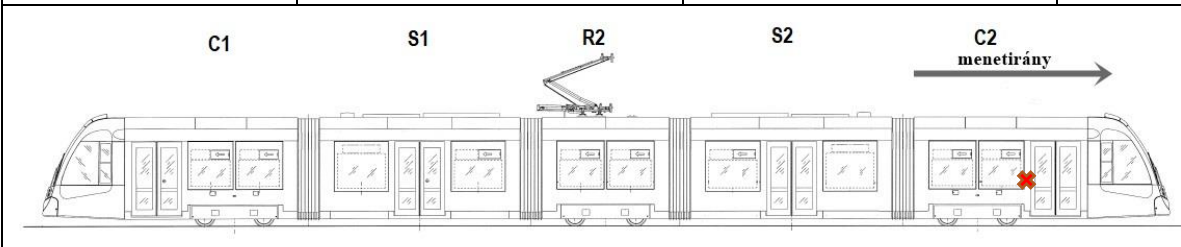


26/1. ábra: 17-es villamos, Móricz Zsigmond körtér, kétvágányú pályaelágazás Ph 50/40 kitérője és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

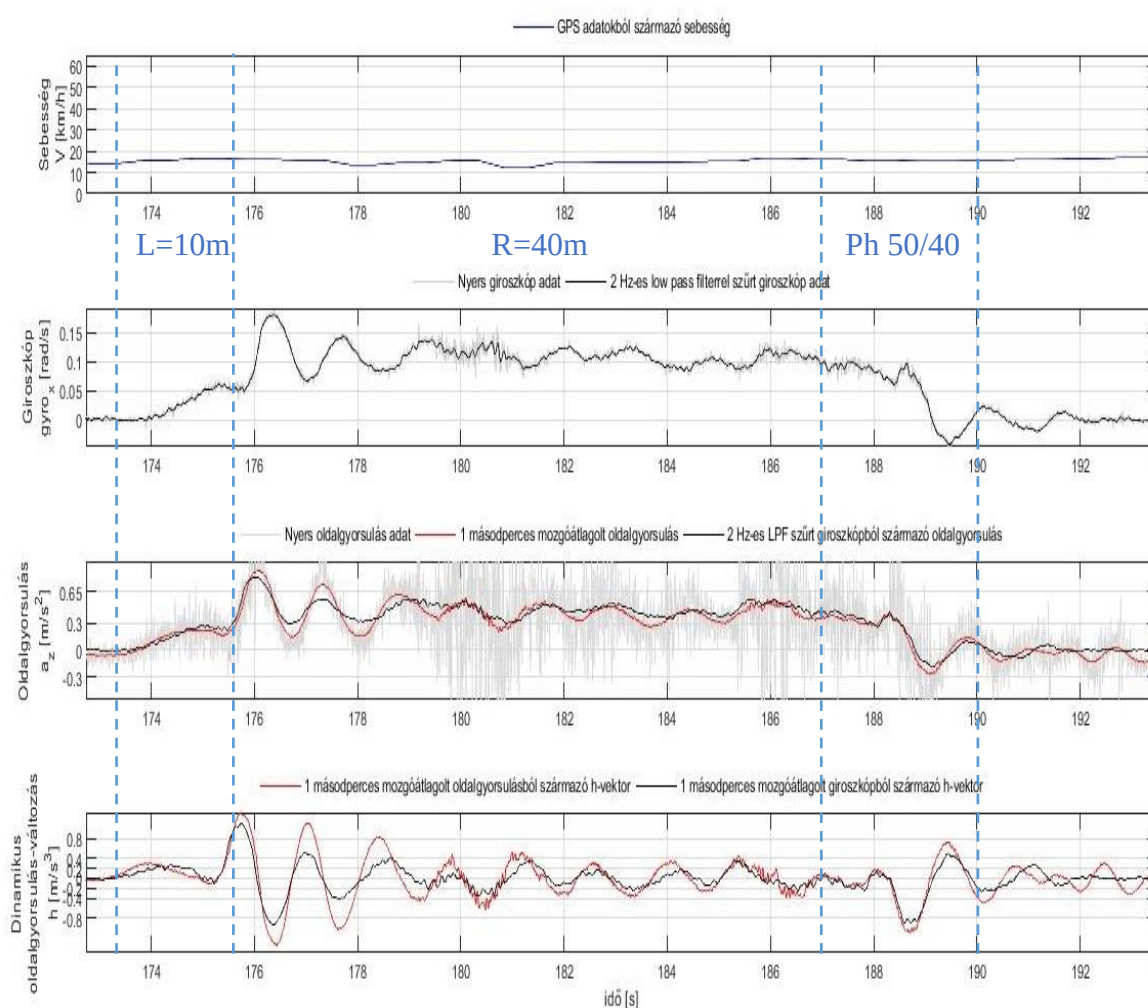
K2417_17_20180714_201640_Tas vezér utca - Savoya park_CAF_2211_C2_BEL_1_A5

Útirány:	Savoya park felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	17-es villamos, Móricz Zsigmond körtér		
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulos, 2211 pályaszámú jármű		
Mérés időpontja:	2018.07.14 20:16:40	Vizsgált kitérő száma:	K2417



46/2. ábra: 17-es villamos, Móricz Zsigmond körtér, kétvágányú pályaelágazás Ph 50/40 kitérője és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Sebesség adatok [m/s]	173,6 s- 175,8 s	175,8 s- 178,0 s	178,0 s- 183,0 s	183,0 s- 186,6 s	186,6 s- 188,0 s	188,0 s- 190,0 s
Átlagos sebesség:	4,52	4,29	3,97	4,25	4,52	4,44
Maximális sebesség:	4,60	4,50	4,35	4,67	4,67	4,59
Sebesség szórás:	0,10	0,24	0,28	0,16	0,12	0,07
Ív adatok [m]	L _{be}	R _{3,k2}			R _{k1}	
	10	40			50	
Oldalgyorsulás adatok [m/s ²]						
mért (maximum):			0,44		0,43	
számított:			0,39		0,40	
eltérés:			10,3%		7,0%	
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s ³]						
mért (minimum):	-0,10	-0,93		-0,26		-0,90
mért (maximum):	0,56	1,10		0,37		0,49
mért (szórás):	0,11	0,61		0,15		0,43



*176 másodpercnél látható kiugró érték a rövid átmenetiív és körív csatlakozásánál keletkezik.

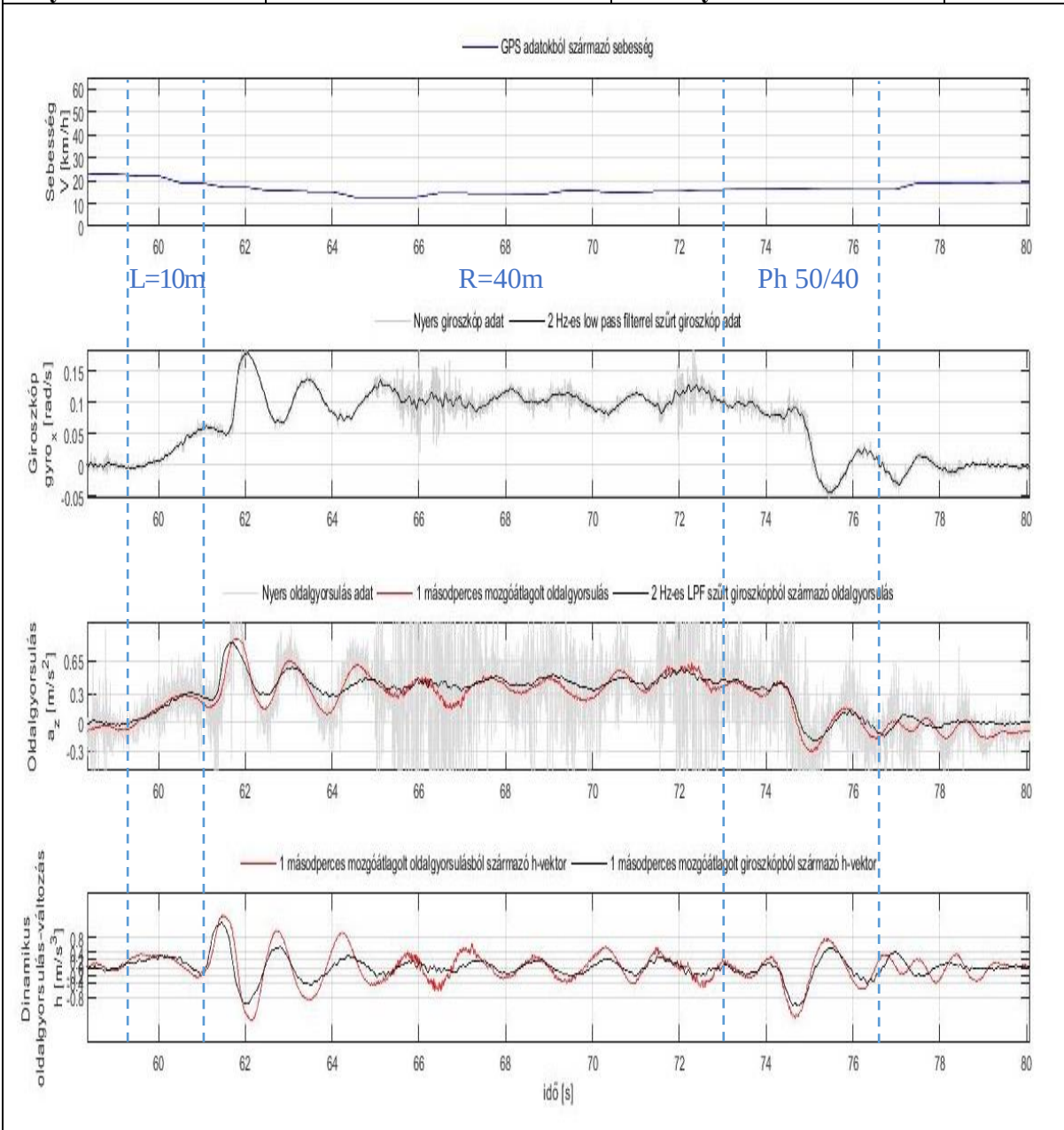
**179 és 181 másodperc között átszelésen haladt át a jármű.

46/3. ábra: 17-es villamos, Móricz Zsigmond körtér, kétvágányú pályaelágazás Ph 50/40 kitérője és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

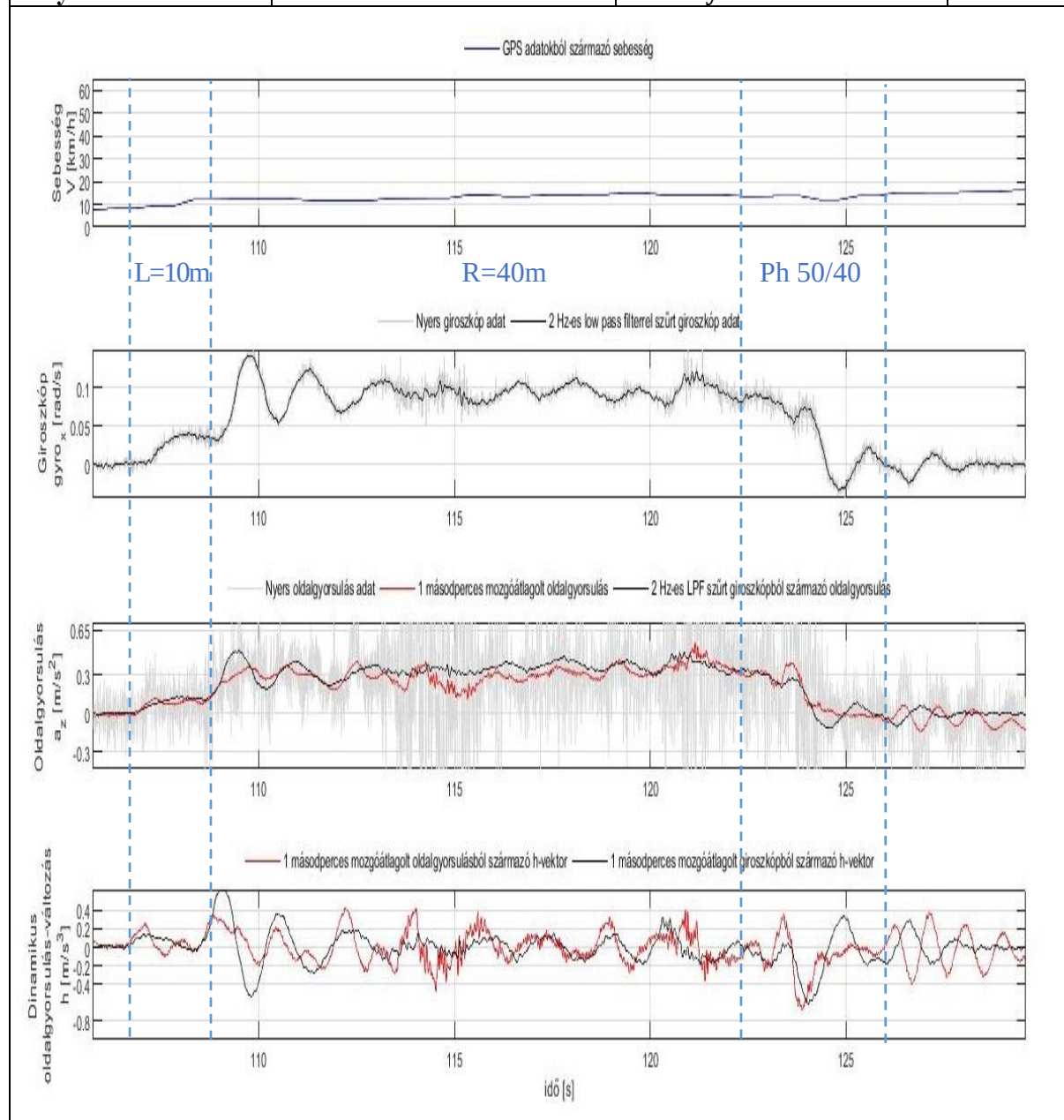
K2417_17_20180717_203209_Móricz Zsigmond körtér M-Villányi út - Savoya park_CAF_2211_C1_BEK_1_A5

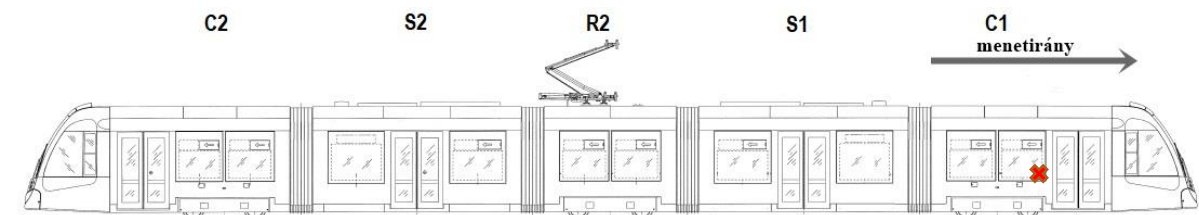
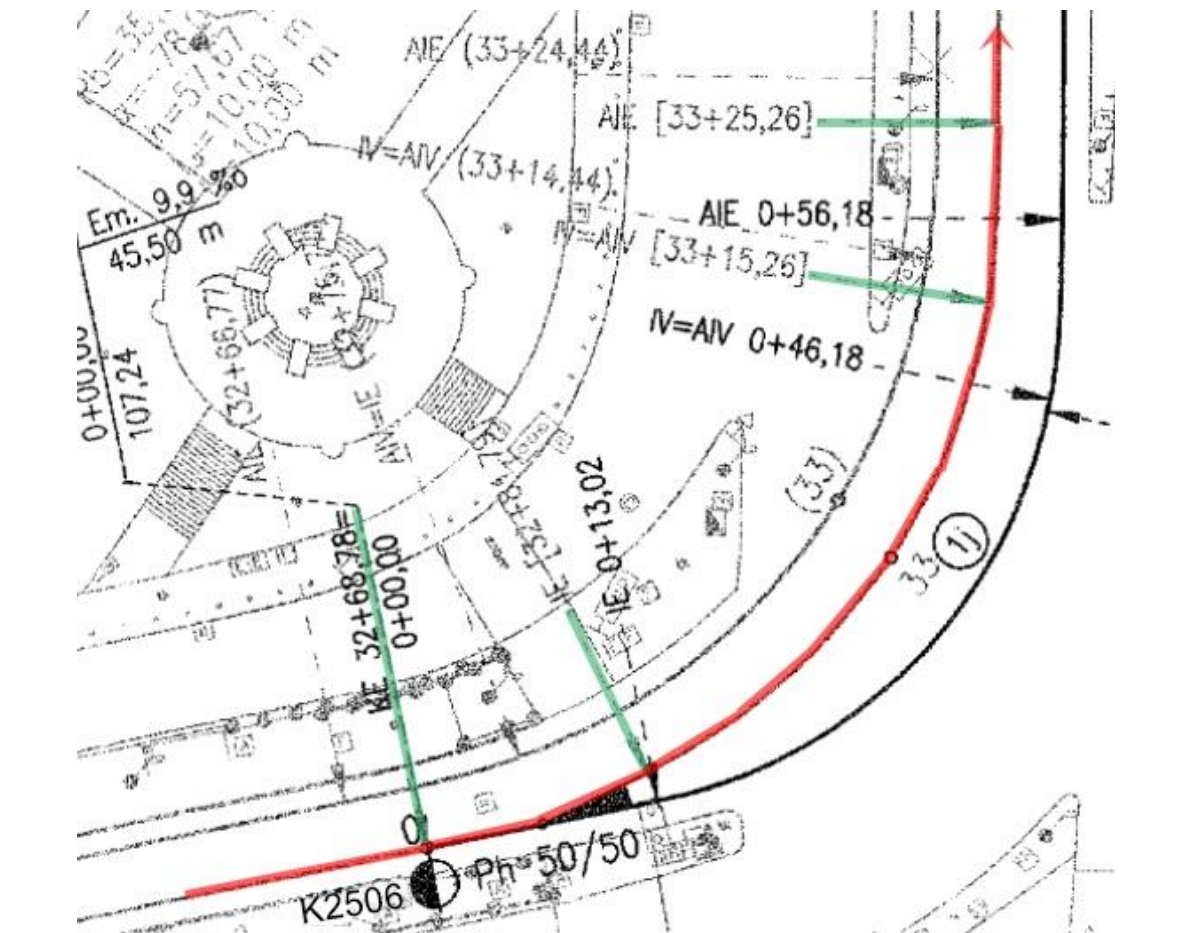
Útirány:	Savoya park felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Móricz Zsigmond körtér		
Mérés időpontja:	2018.07.17 20:32:09	Vizsgált kitérő száma:	K2417
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulós	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 50/40
Pályaszám:	2211	Viszonylat száma:	17



46/4. ábra: 17-es villamos, Móricz Zsigmond körtér, kétvágányú pályaelágazás Ph 50/40 kitérője és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

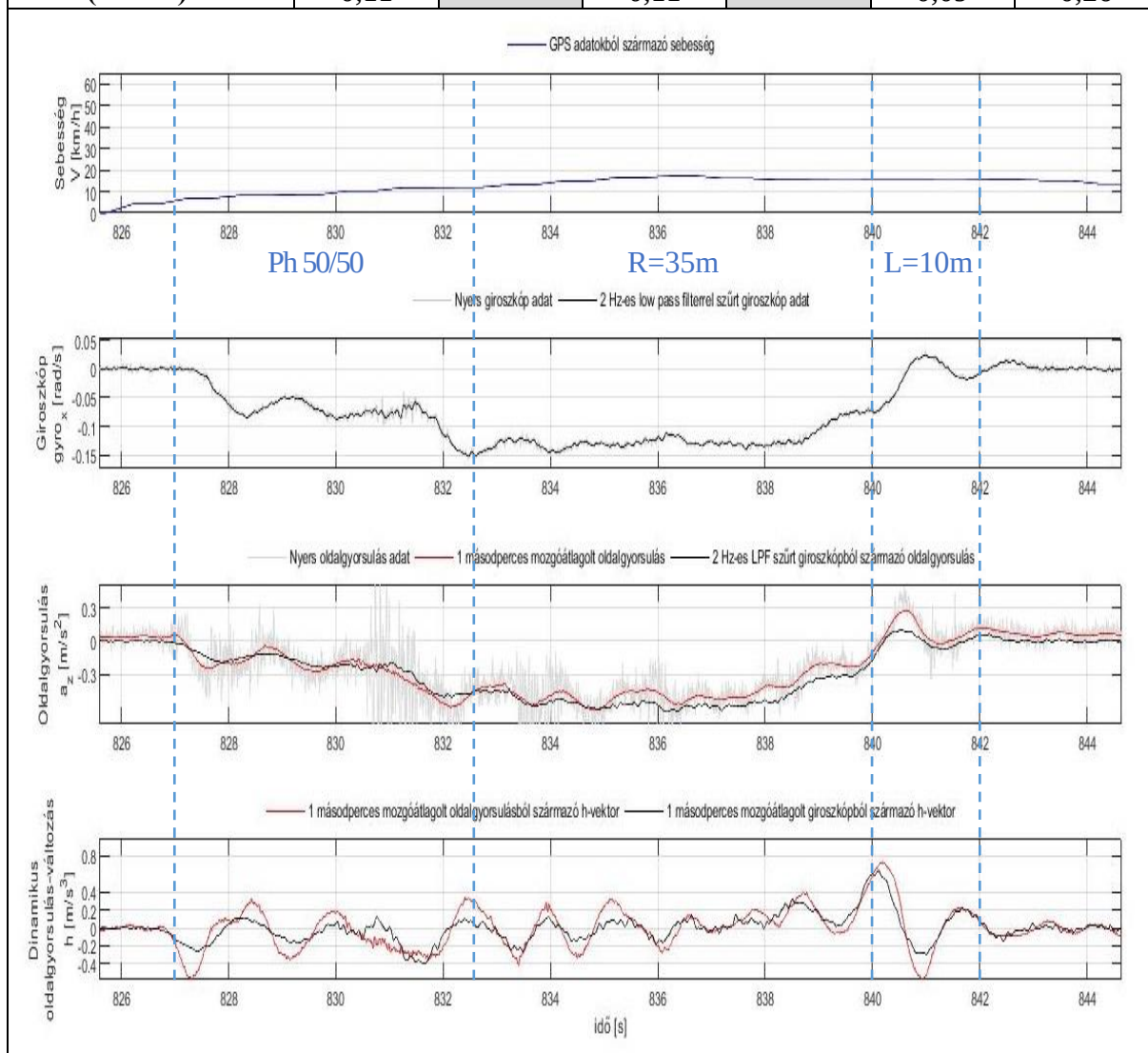
Mérési fájl neve:			
K2417_17_20180729_214618_Móricz Zsigmond körtér-Villányi út - Savoya park_CAF_2206_BHL_1_A5			
Útirány:	Savoya park felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Móricz Zsigmond körtér		
Mérés időpontja:	2018.07.29. 21:46:18	Vizsgált kitérő száma:	K2417
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulós	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 50/40
Pályaszám:	2206	Vizonylat száma:	17



27/1. ábra: 19-es villamos, Szent Gellért tér, Ph 50/50 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata			
Mérési fájl neve:			
K2506_19_20180704_161001_Kelenföld vasútállomás M_Szent Lukács Gyógyfürdő_CAF_2210_C1_BEL_1_A5			
Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	19-es villamos, Szent Gellért tér		
Jármútípus:	CAF Urbos3, 5 modulós, 2210 pályaszámú jármű		
Mérés időpontja:	2018.07.04 16:10:01	Vizsgált kitérő száma:	K2506
			
			

47/2. ábra: 19-es villamos, Szent Gellért tér, Ph 50/50 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Sebesség adatok [m/s]	827,0 s- 830,0 s	830,0 s- 831,5 s	831,5 s- 832,5 s	832,5 s- 838,0 s	838,0 s- 840,0 s	840,0 s- 842,0 s
Átlagos sebesség:	2,20	2,99	3,30	4,24	4,29	4,29
Maximális sebesség:	2,65	3,28	3,32	4,80	4,38	4,33
Sebesség szórás:	0,23	0,19	0,02	0,46	0,03	0,03
Ív adatok [m]	R _{k1,2}			R ₃		L _{ki}
	50			35		10
Oldalgyorsulás adatok [m/s ²]						
mért (átlag):		-0,23		-0,55		
számított:		0,18		0,51		
eltérés:		21,3%		6,9%		
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s ³]						
mért (minimum):	-0,26		-0,40		-0,01	-0,29
mért (maximum):	0,11		-0,03		0,32	0,63
mért (szórás):	0,11		0,11		0,09	0,26

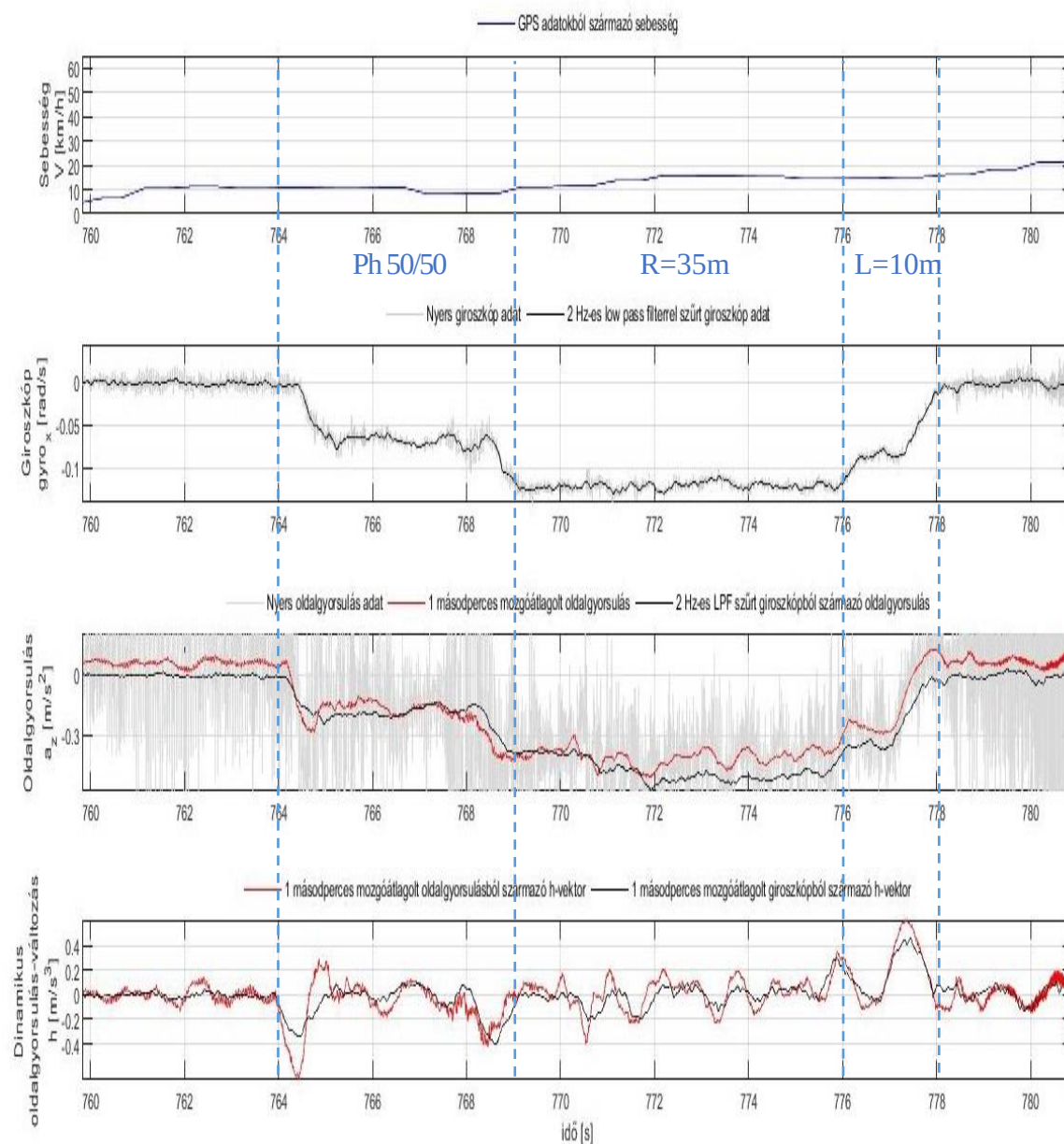


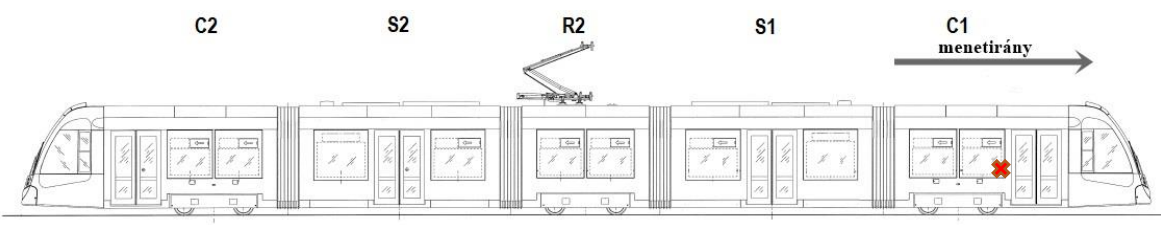
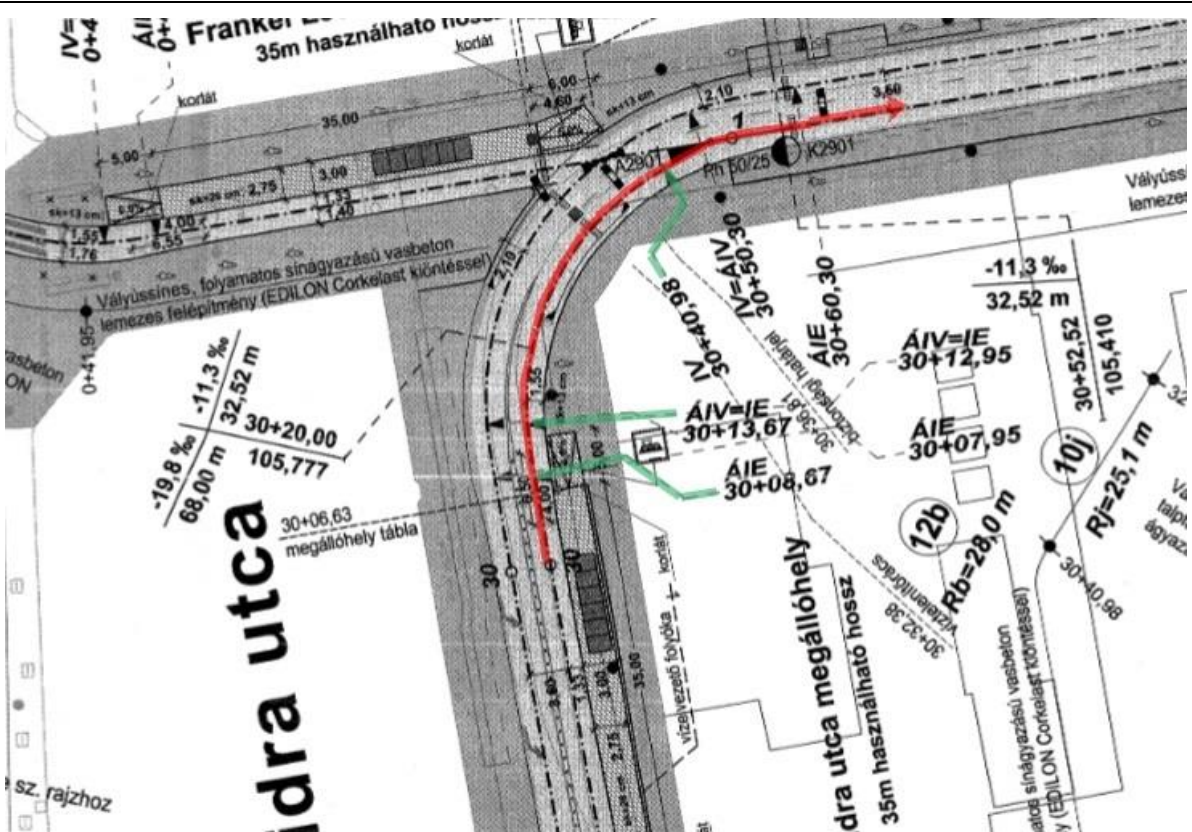
47/3. ábra: 19-es villamos, Szent Gellért tér, Ph 50/50 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

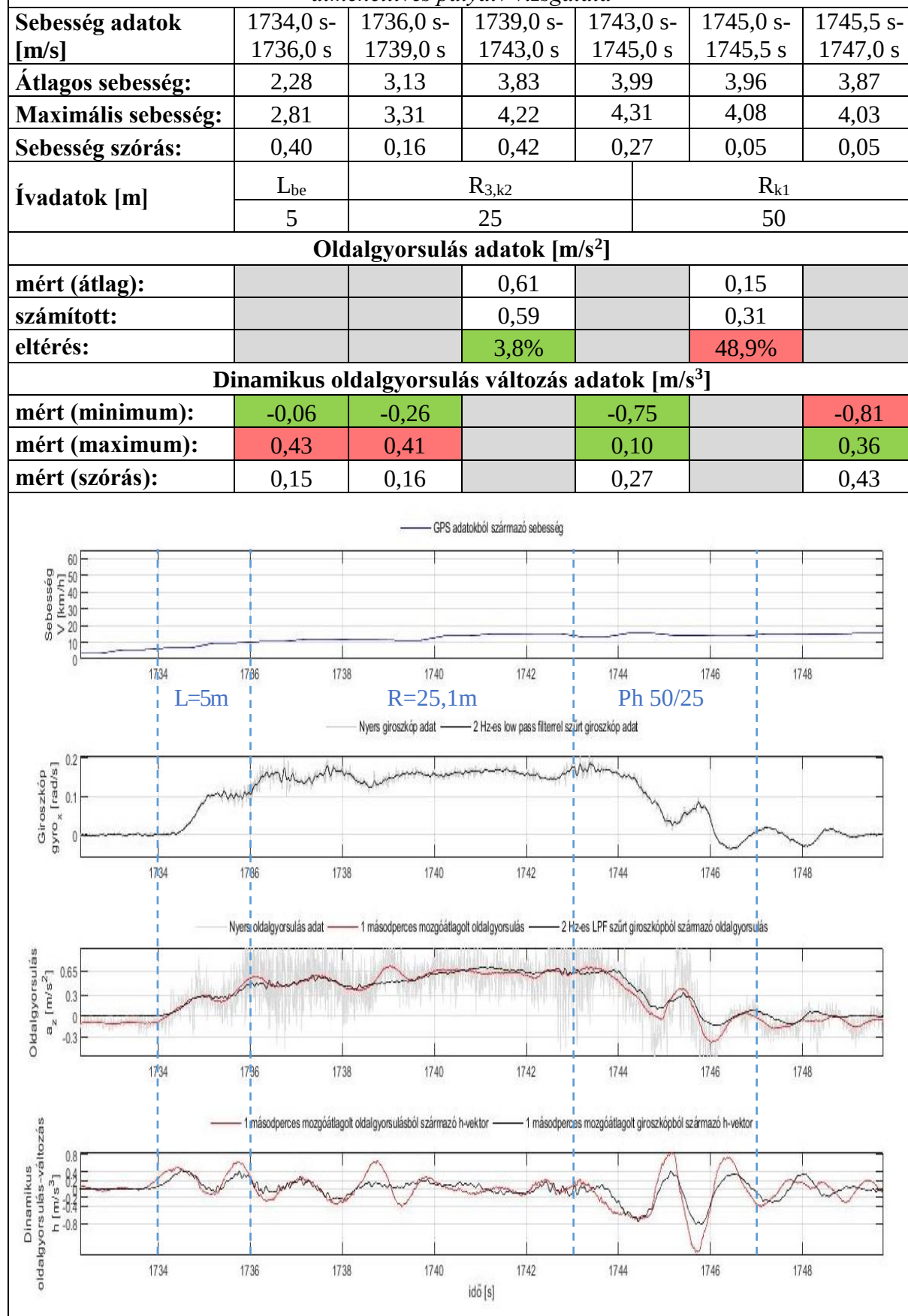
K2506_19_20180803_145839 Kelenföld vasútállomás - Szent Lukács
gyógyfürdő CAF 2201 R2 BKL A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Szent Gellért tér		
Mérés időpontja:	2018.08.03. 14:58:39	Vizsgált kitérő száma:	K2506
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulós	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 50/50
Pályaszám:	2201	Viszonylat száma:	19



28/1. ábra: 19-es villamos, Vidra utca Ph 50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata			
Mérési fájl neve:			
K2901_19_20180704_161001_Kelenföld vasútállomás - M_Szent Lukács Gyógyfürdő_CAF_2210_C1_BEL_1_A5			
Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	19-es villamos, Vidra utca		
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulós, 2210 pályaszámú jármű		
Mérés időpontja:	2018.07.04 16:10:01	Vizsgált kitérő száma:	K2901
			
			

48/2. ábra: 19-es villamos, Vidra utca Ph 50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

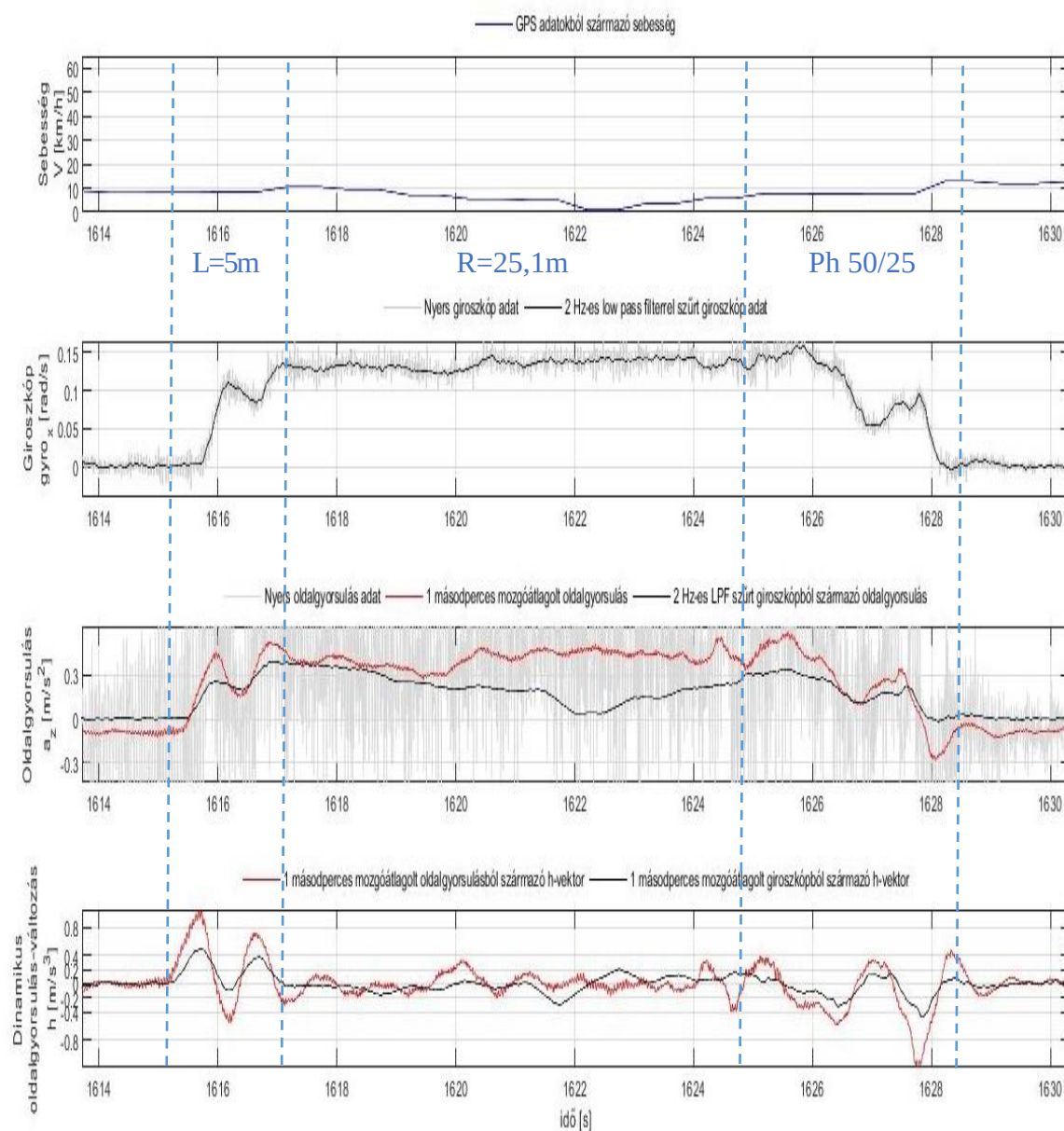


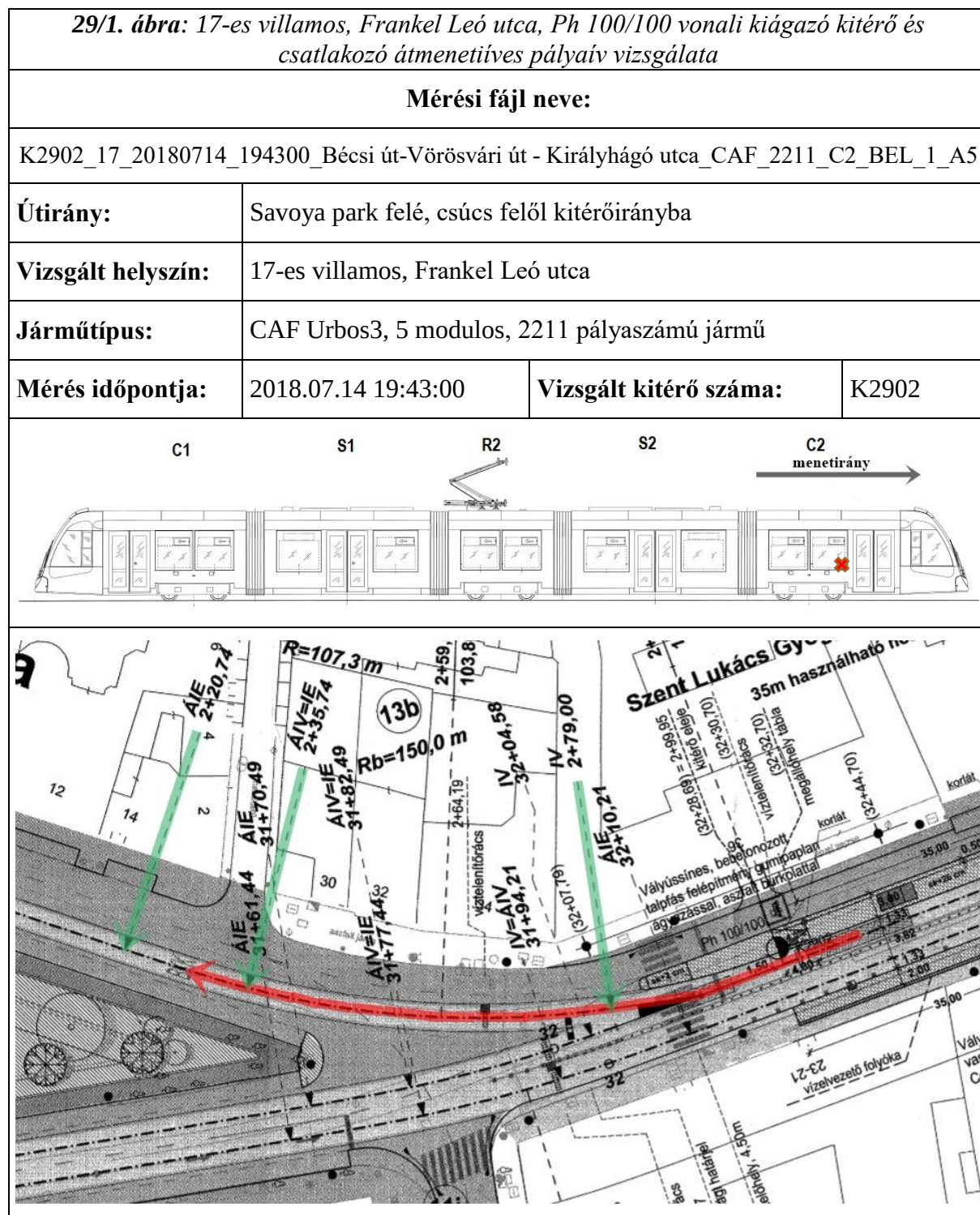
48/3. ábra: 19-es villamos, Vidra utca Ph 50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

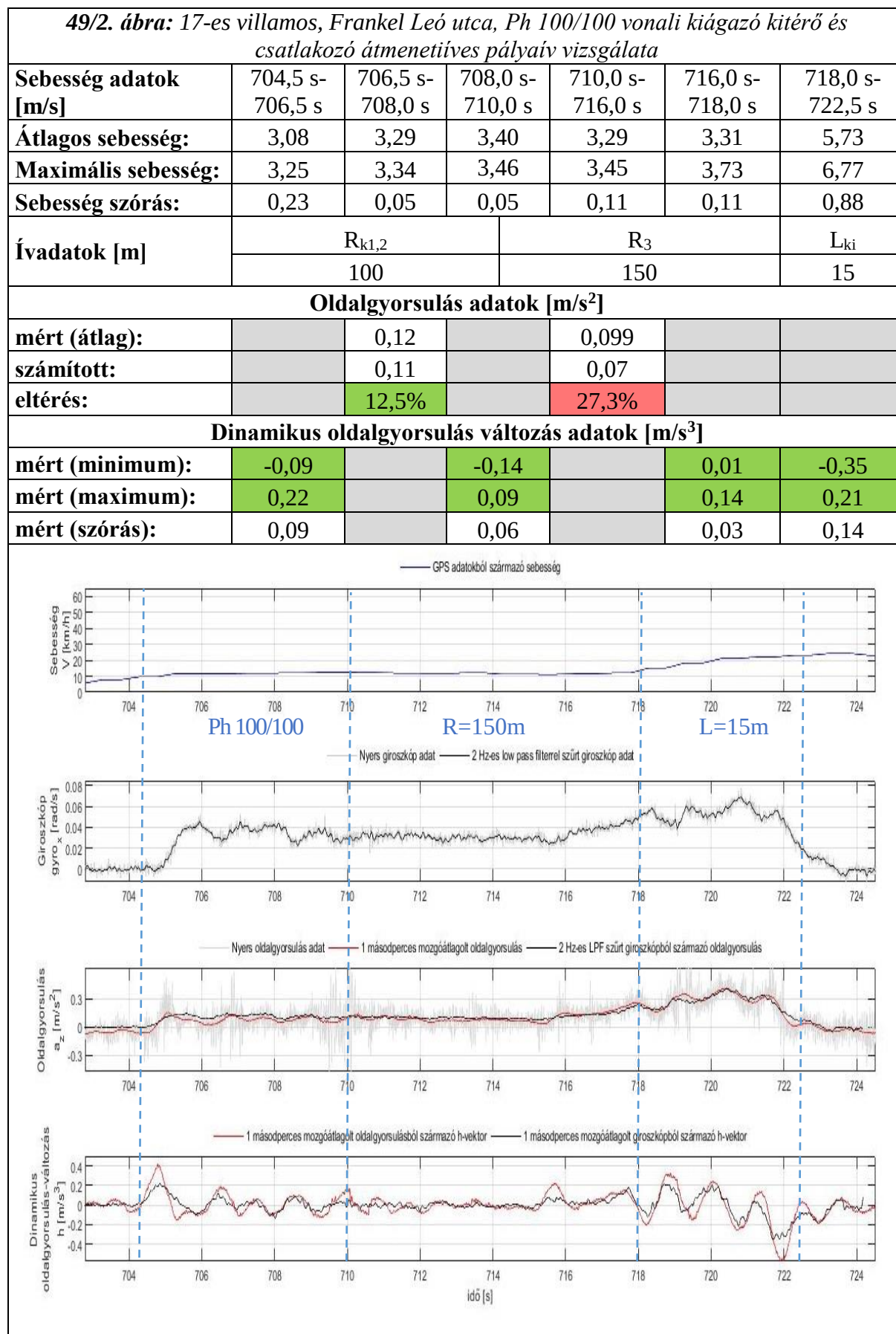
Mérési fájl neve:

K2901_19_20180803_145839_Kelenföld vasútállomás - Szent Lukács gyógyfürdő_CAF_2201_R2_BKL_A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Vidra utca		
Mérés időpontja:	2018.07.04 16:10:01	Vizsgált kitérő száma:	K2901
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 50/25
Pályaszám:	2210	Viszonylat száma:	19







49/3. ábra: 17-es villamos, Frankel Leó utca, Ph 100/100 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K2902 17 20180717 195718 Bécsi út-Vörösvári út - Csörsz utca_CAF_C1_2207_BEK_1_A5

Útirány: Savoya park felé, csúcs felől kitérőirányba

Vizsgált helyszín: Frankel Leó utca

Mérés időpontja: 2018.07.17 19:57:18

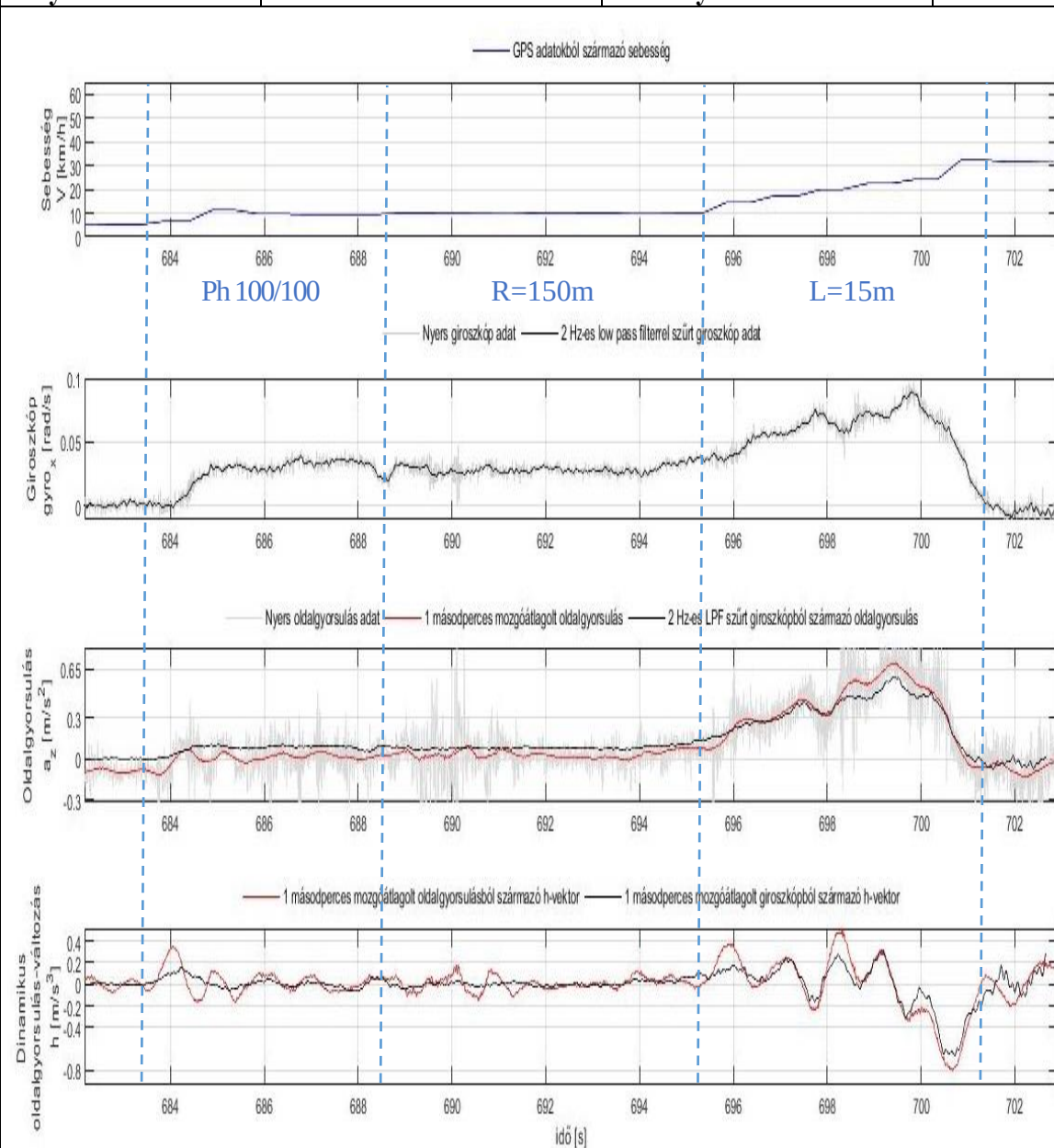
Vizsgált kitérő száma: K2902

Járműtípus: CAF Urbos3, 5 modulos

Vizsgált kitérő típusa: Ph 100/100

Pályaszám: 2207

Viszonylat száma: 17



49/4. ábra: 17-es villamos, Frankel Leó utca, Ph 100/100 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K2902 17 20180729 210852 Bécsi út-Vörösvári út - Csörsz utca_CAF_2206_C1_BHL_1_A5

Útirány: Savoya park felé, csúcs felől kitérőirányba

Vizsgált helyszín: Frankel Leó utca

Mérés időpontja: 2018.07.29 21:08:52

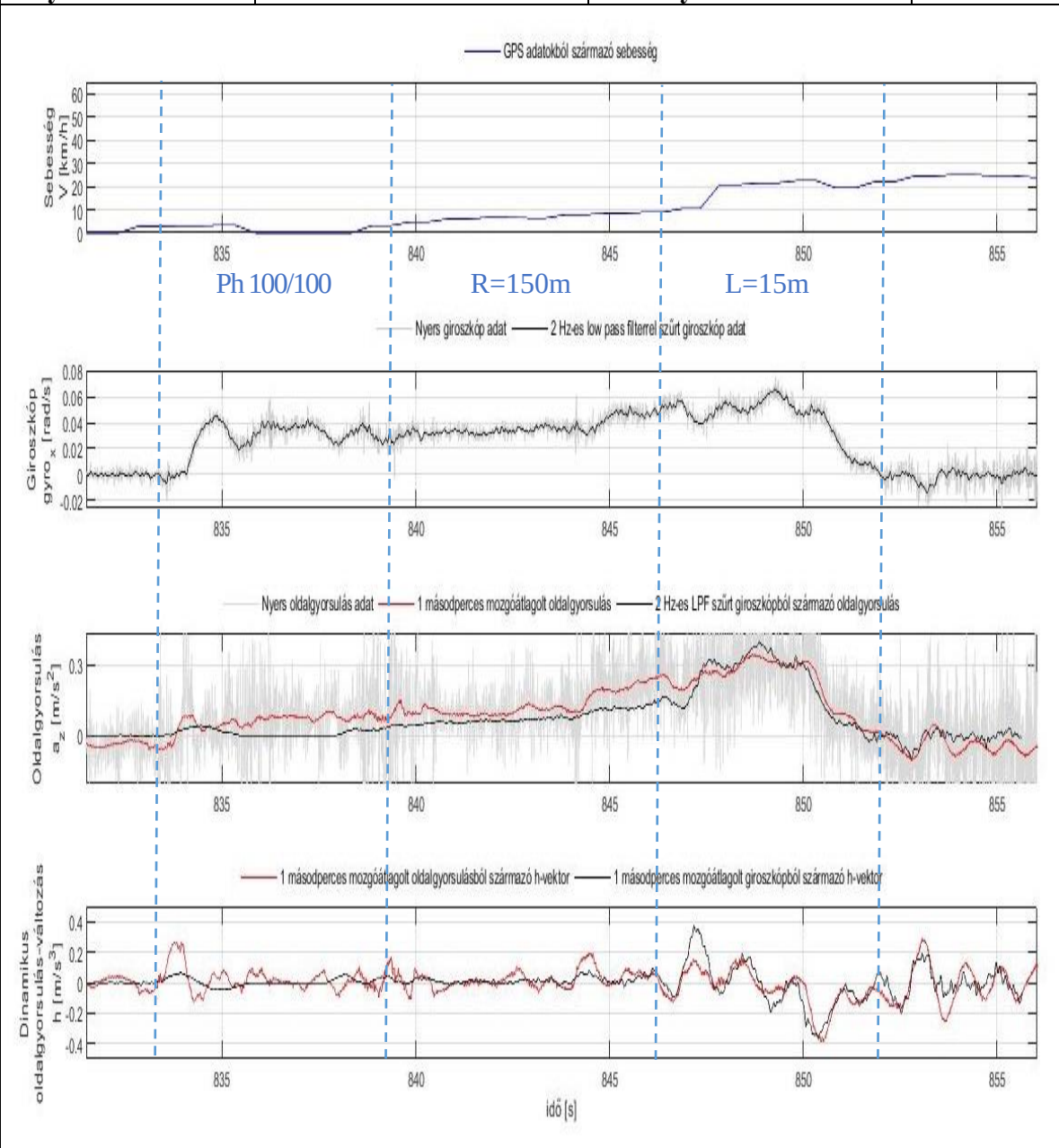
Vizsgált kitérő száma: K2902

Járműtípus: CAF Urbos3, 5 modulos

Vizsgált kitérő típusa: Ph 100/100

Pályaszám: 2206

Viszonylat száma: 17

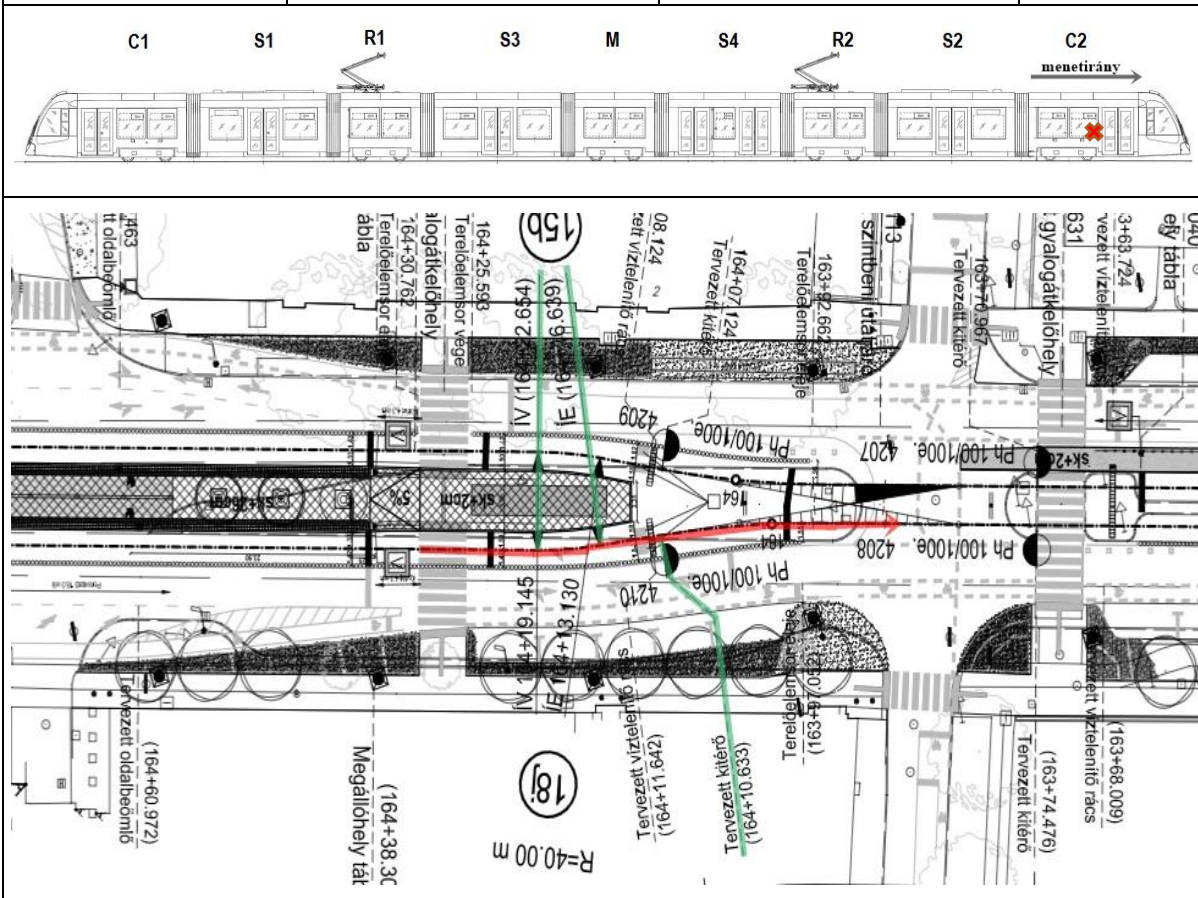


30/1. ábra: 1-es villamos, Etele út/Fehérvári út, Ph 100/100e végállomási kifordított kettős vágánykapcsolat és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

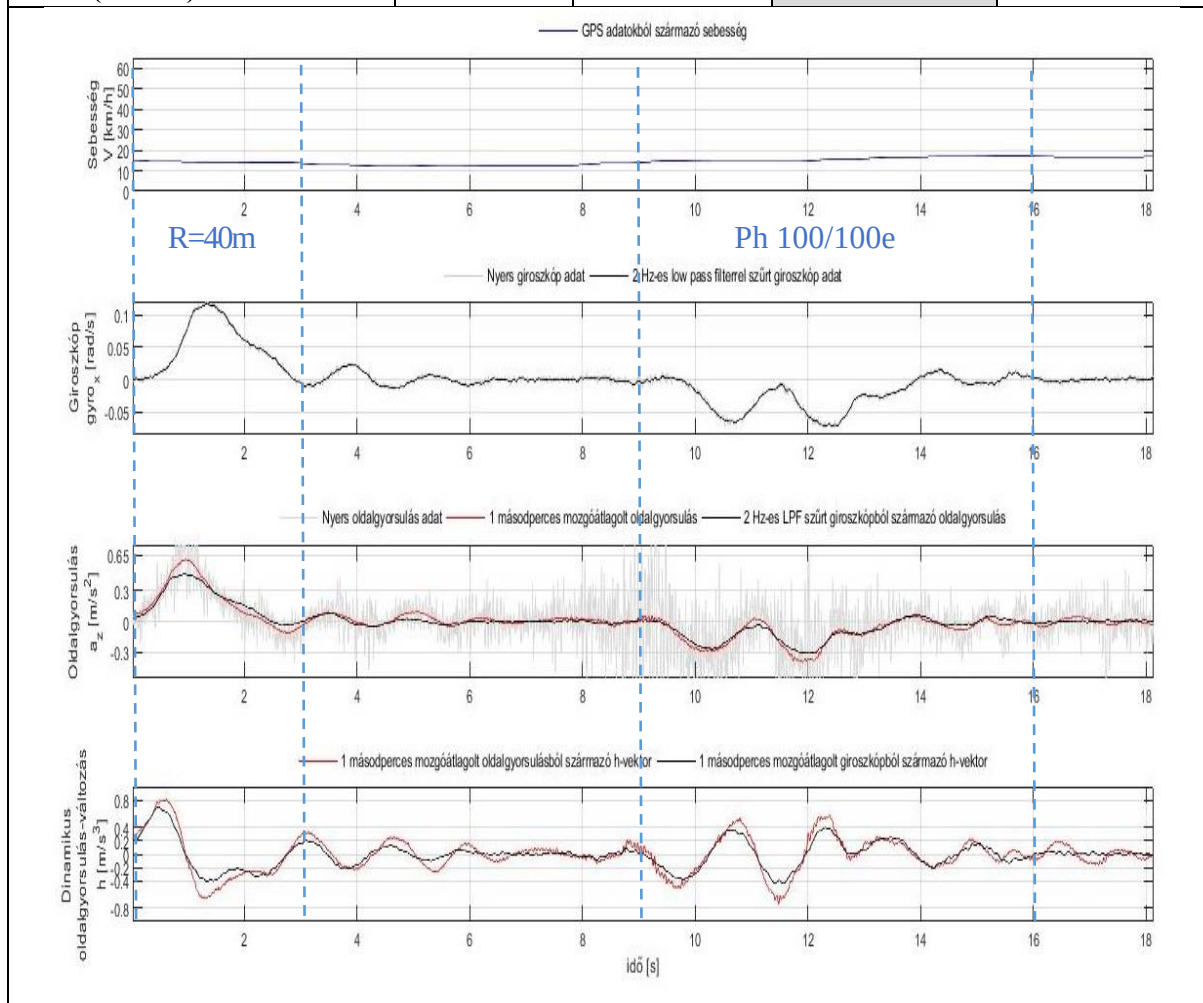
K4210_1_20180422_152904_Etele út-Fehérvári út - Hengermalom út_CAF_2103_C2_JEL_0_A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	1-es villamos, Etele út/Fehérvári út		
Járműtípus:	CAF Urbos3, 9 modulos, 2103 pályaszámú jármű		
Mérés időpontja:	2018.04.22 15:29:04	Vizsgált kitérő száma:	K4210



50/2. ábra: 1-es villamos, Etele út/Fehérvári út, Ph 100/100e végállomási kifordított kettős vágánykapcsolat és csatlakozó pályaív vizsgálata

Sebesség adatok [m/s]	0,0 s-3,0 s	9,0 s-11,0 s	11,0 s-12,5 s	12,5 s-16,0 s
Átlagos sebesség:	3,98	4,05	4,11	4,65
Maximális sebesség:	4,27	4,11	4,33	4,80
Sebesség szórás:	0,09	0,05	0,11	0,15
Ív adatok [m]	R ₃	R _{k1,2}		
	40	100		
Oldalgyorsulás adatok [m/s²]				
mért (átlag):			0,16	
számított:			0,17	
eltérés:			3,0 %	
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s³]				
mért (minimum):	-0,40	-0,38		-0,22
mért (maximum):	0,70	0,36		0,35
mért (szórás):	0,34	0,20		0,15

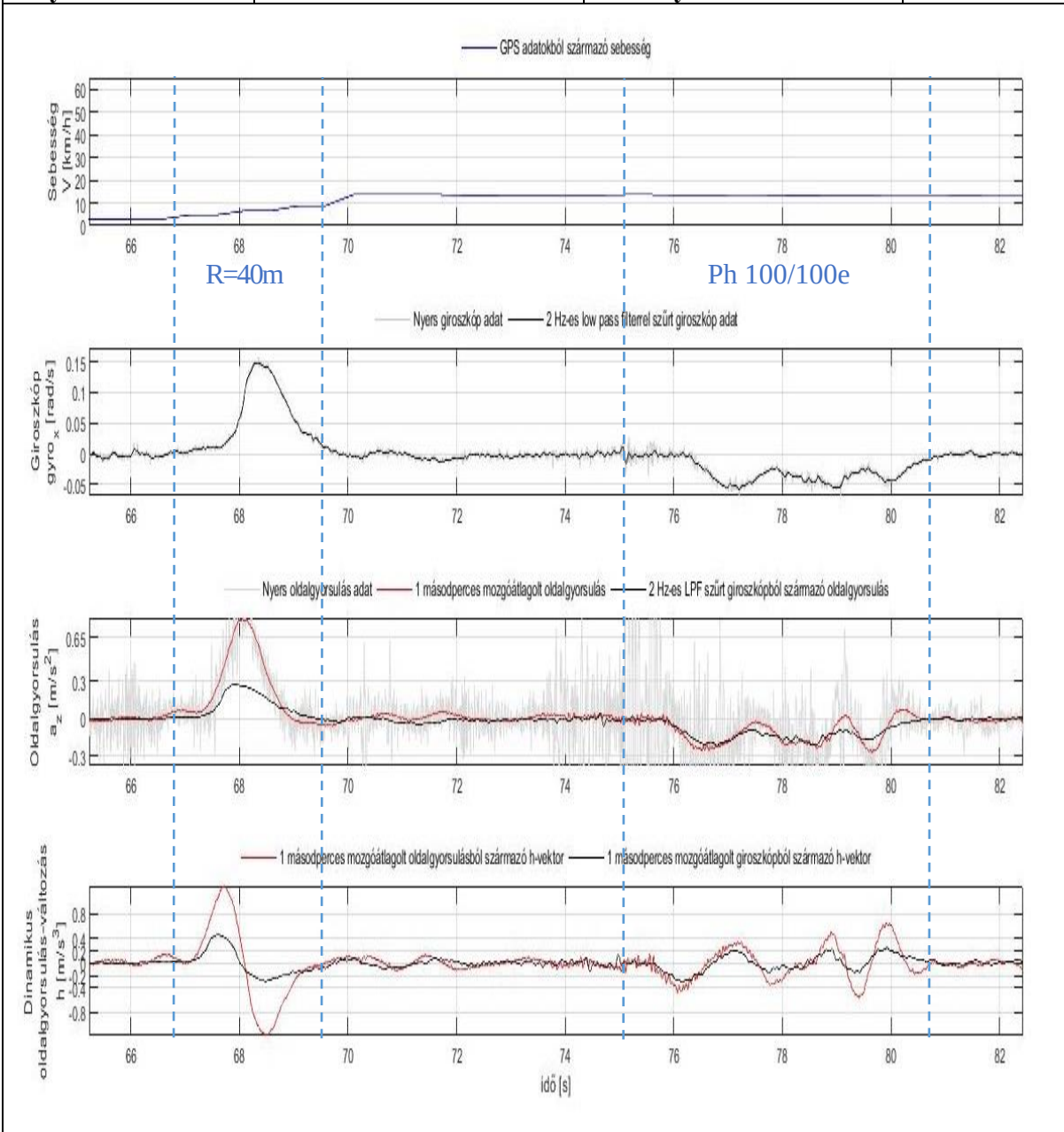


50/3. ábra: 1-es villamos, Etele út/Fehérvári út, Ph 100/100e végállomási kifordított kettős vágánykapcsolat és csatlakozó pályaív vizsgálata

Mérési fájl neve:

K4210_1_20180623_144107 Etele út-Fehérvári út - Szerémi út-Dombóvári út CAF 2105 C1 BEL 1 A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Etele út/Fehérvári út		
Mérés időpontja:	2018.06.23 14:41:07	Vizsgált kitérő száma:	K4210
Járműtípus:	CAF Urbos3, 9 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/100e
Pályaszám:	2105	Viszonylat száma:	1

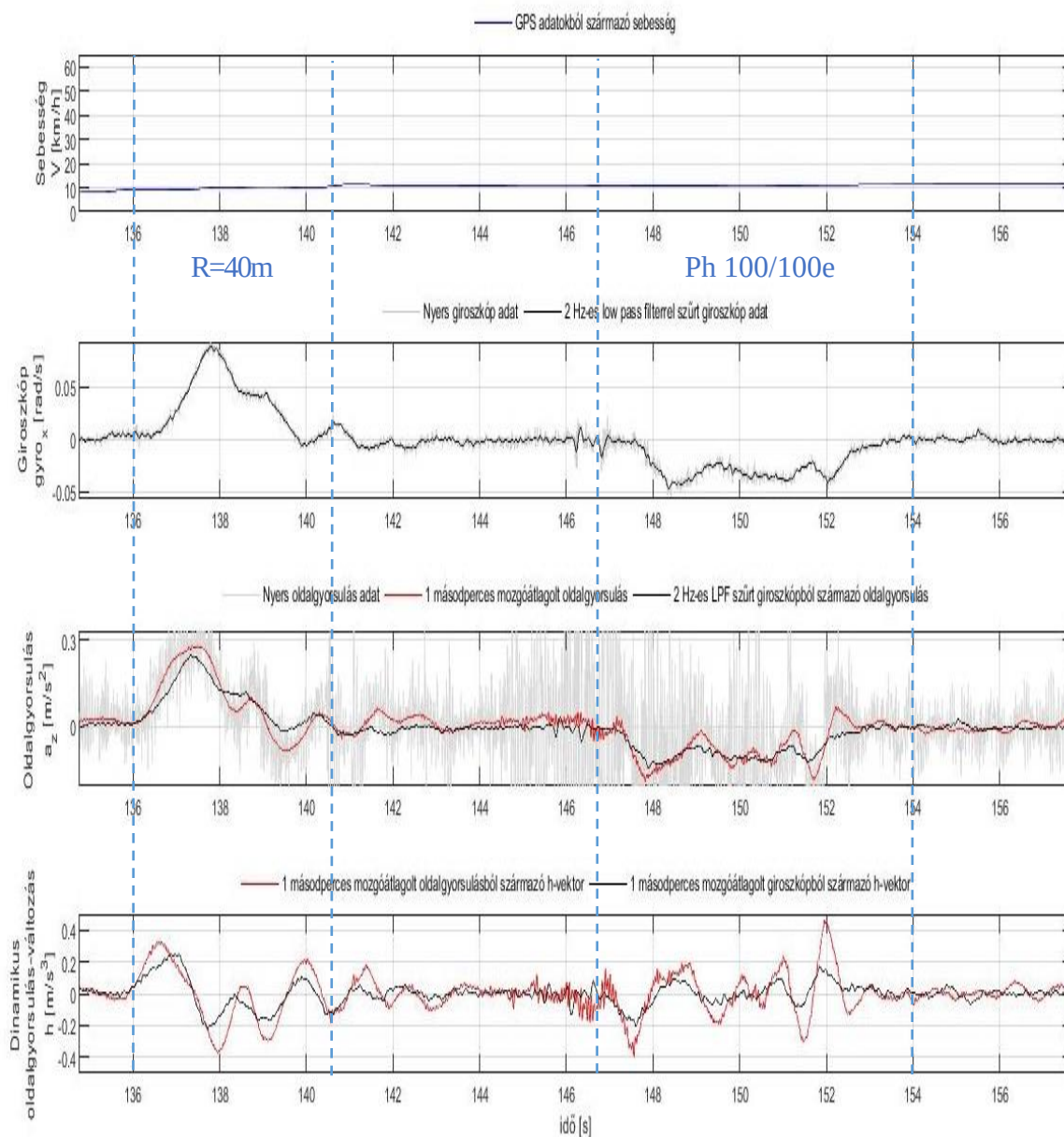


50/4. ábra: 1-es villamos, Etele út/Fehérvári út, Ph 100/100e végállomási kifordított kettős vágánykapcsolat és csatlakozó pályaív vizsgálata

Mérési fájl neve:

K4210 1 20180624 100950 Etele út-Fehérvári út - Népliget M_CAF_2105_C1_BEL_1_A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Etele út/Fehérvári út		
Mérés időpontja:	2018.06.24 10:09:50	Vizsgált kitérő száma:	K4210
Járműtípus:	CAF Urbos3, 9 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/100e
Pályaszám:	2105	Viszonylat száma:	1



31/1. ábra: 17-es villamos, Savoya Park Ph 50/30e végállomási keresztkapcsolat vizsgálata**Mérési fájl neve:**

K2753-2754_17_20180714_204743_Savoya park - Tas vezér utca_CAF_2211_C2_JHL_1_A5

Útirány:

Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba és gyök felől kitérő irányból

Vizsgált helyszín:

17-es villamos, Savoya Park végállomás

Járműtípus:

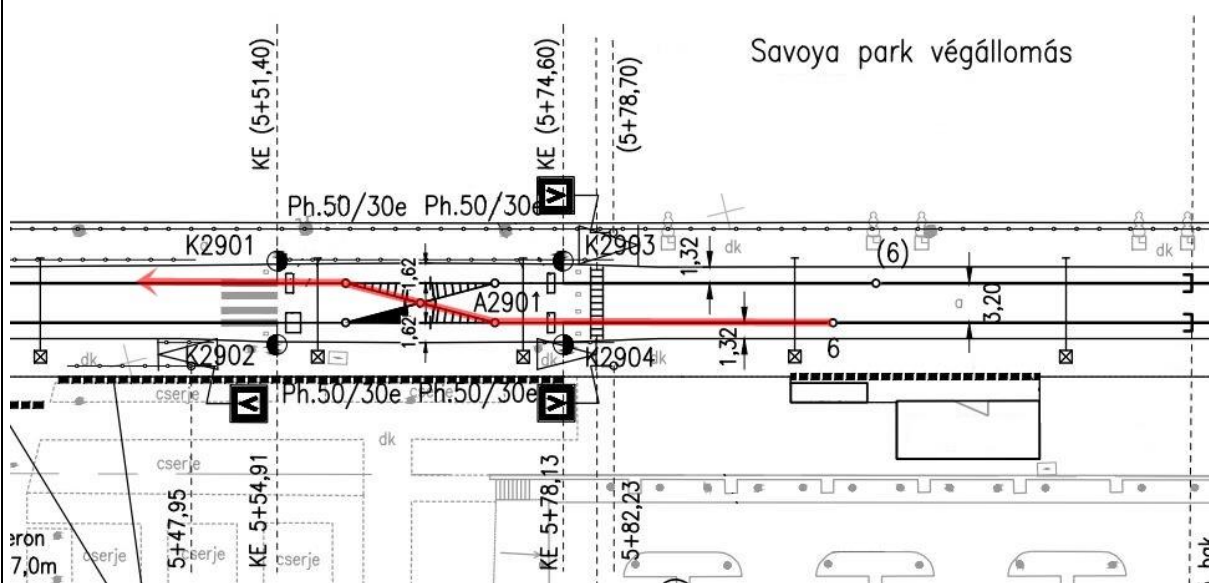
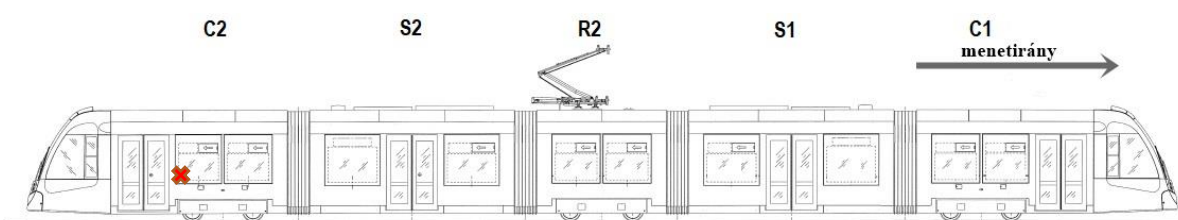
CAF Urbos3, 5 modulos, 2211 pályaszámú jármű

Mérés időpontja:

2018.07.14 20:47:43

Vizsgált kitérő száma:

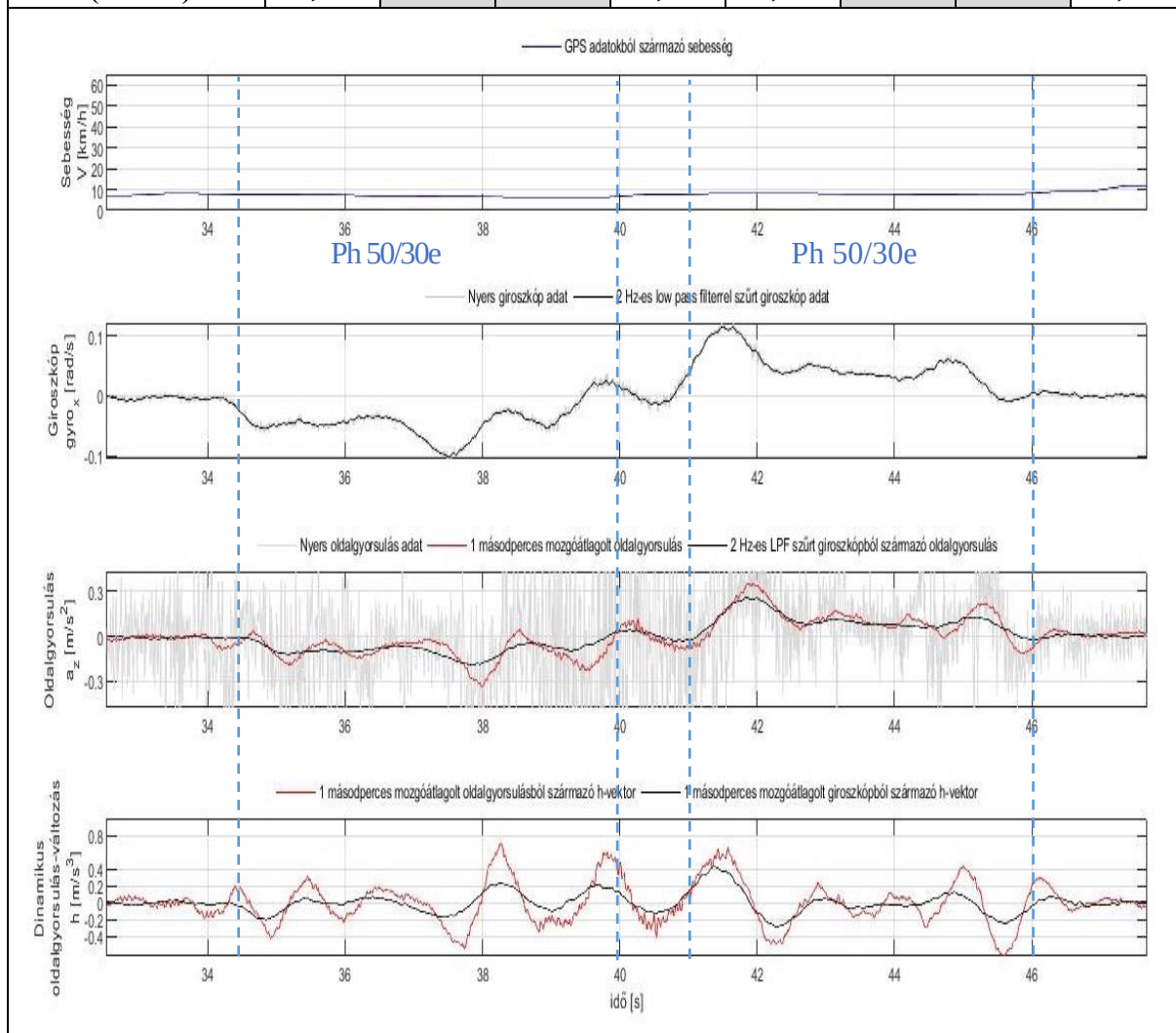
K2753-2754

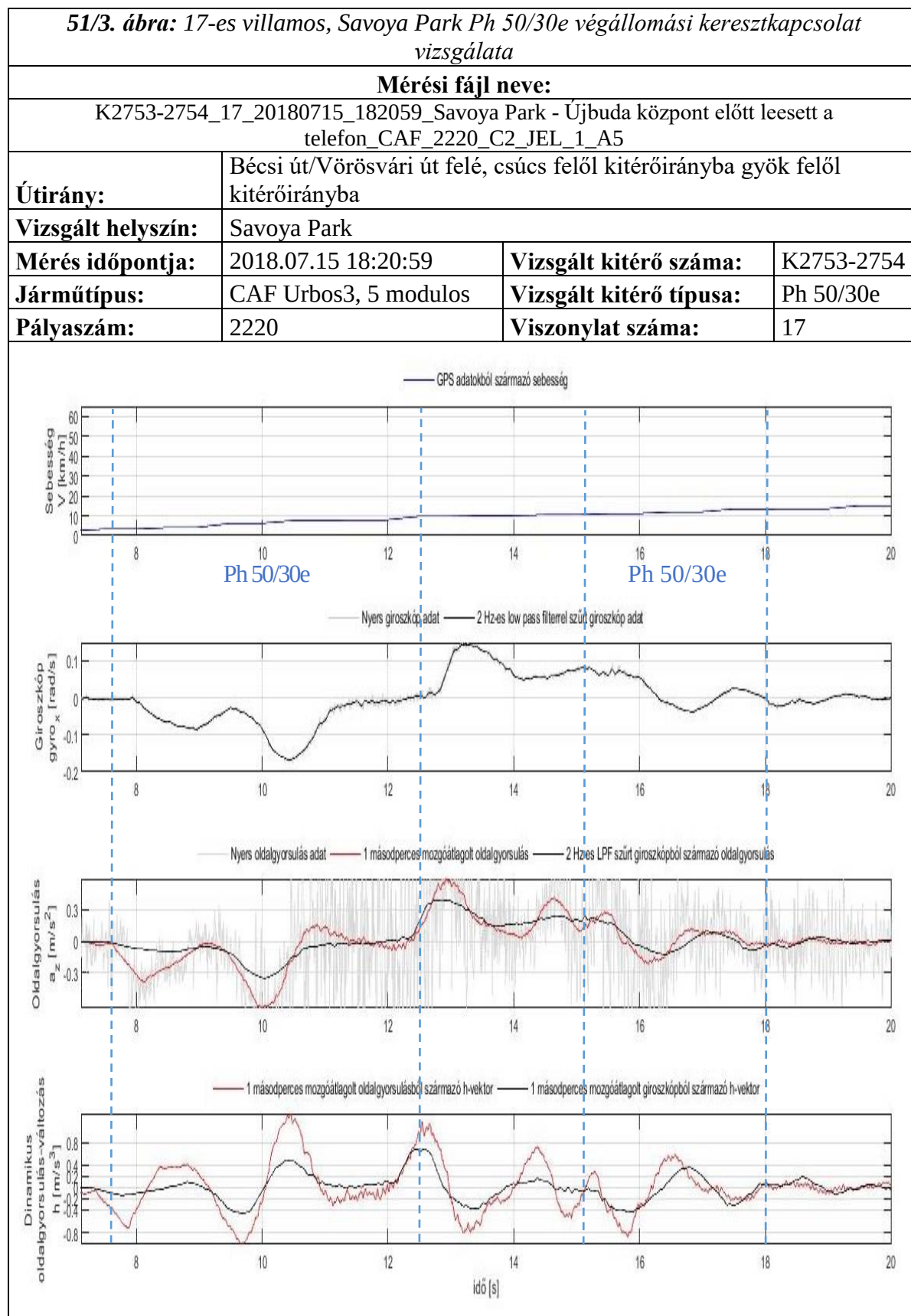


Az általam használt adatbázisban a vizsgált kitérők más névvel (K2753 és K2754) szerepelnek, mint a mellékelt helyszínrajzon.

51/2. ábra: 17-es villamos, Savoya Park Ph 50/30e végállomási keresztkapcsolat vizsgálata

Sebesség adatok [m/s]	34,5 s- 35,0 s	35,0 s- 37,0 s	37,0 s- 39,0 s	39,0 s- 40,0 s	40,0 s- 41,0 s	41,0 s- 43,0 s	43,0 s- 44,0 s	44,0 s- 46,0 s
Átlagos sebesség:	2,15	2,03	1,83	1,79	2,08	2,23	2,19	2,17
Maximális sebesség:	2,21	1,93	1,93	1,88	2,16	2,24	2,22	2,29
Sebesség szórás:	0,02	0,07	0,06	0,02	0,08	0,02	0,01	0,03
Ív adatok [m]	R _{1,k1}		R _{1,k2}		R _{2,k2}		R _{2,k1}	
	50		30		30		50	
Oldalgyorsulás adatok [m/s ²]								
mért (átlag):		-0,09	-0,11			0,16	0,16	
számított:		0,08	0,11			0,17	0,10	
eltérés:		6,1%	1,9%			6,8%	62,1%	
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s ³]								
mért (minimum):	-0,20			-0,08	-0,13			-0,25
mért (maximum):	0,03			0,22	0,42			0,13
mért (szórás):	0,07			0,09	0,18			0,12



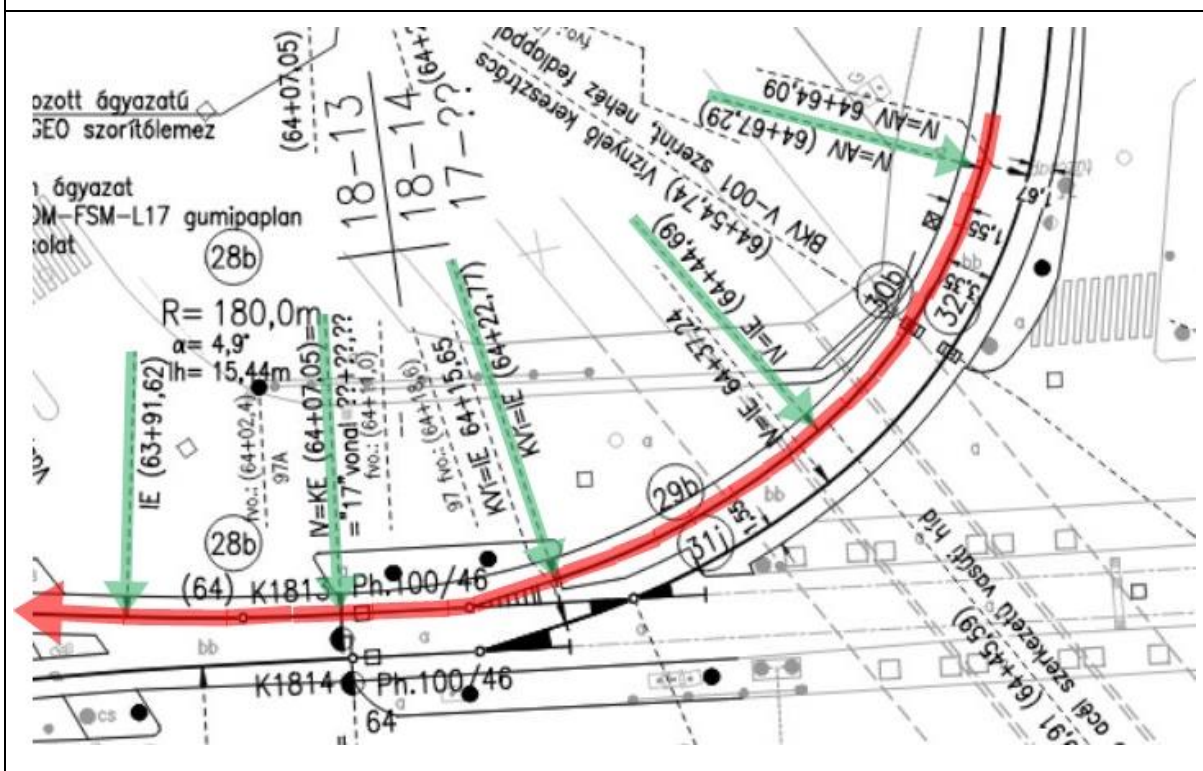
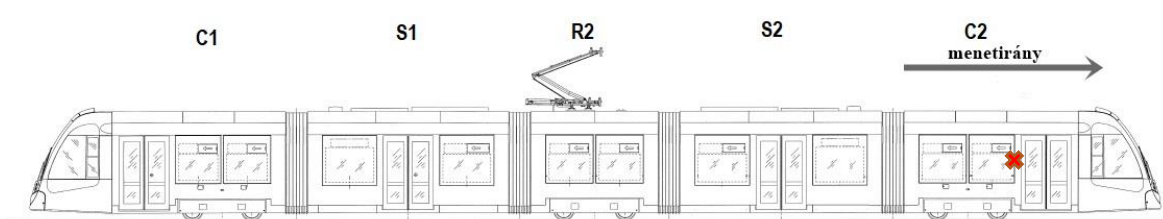


32/1. ábra: 3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás Ph 100/46 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

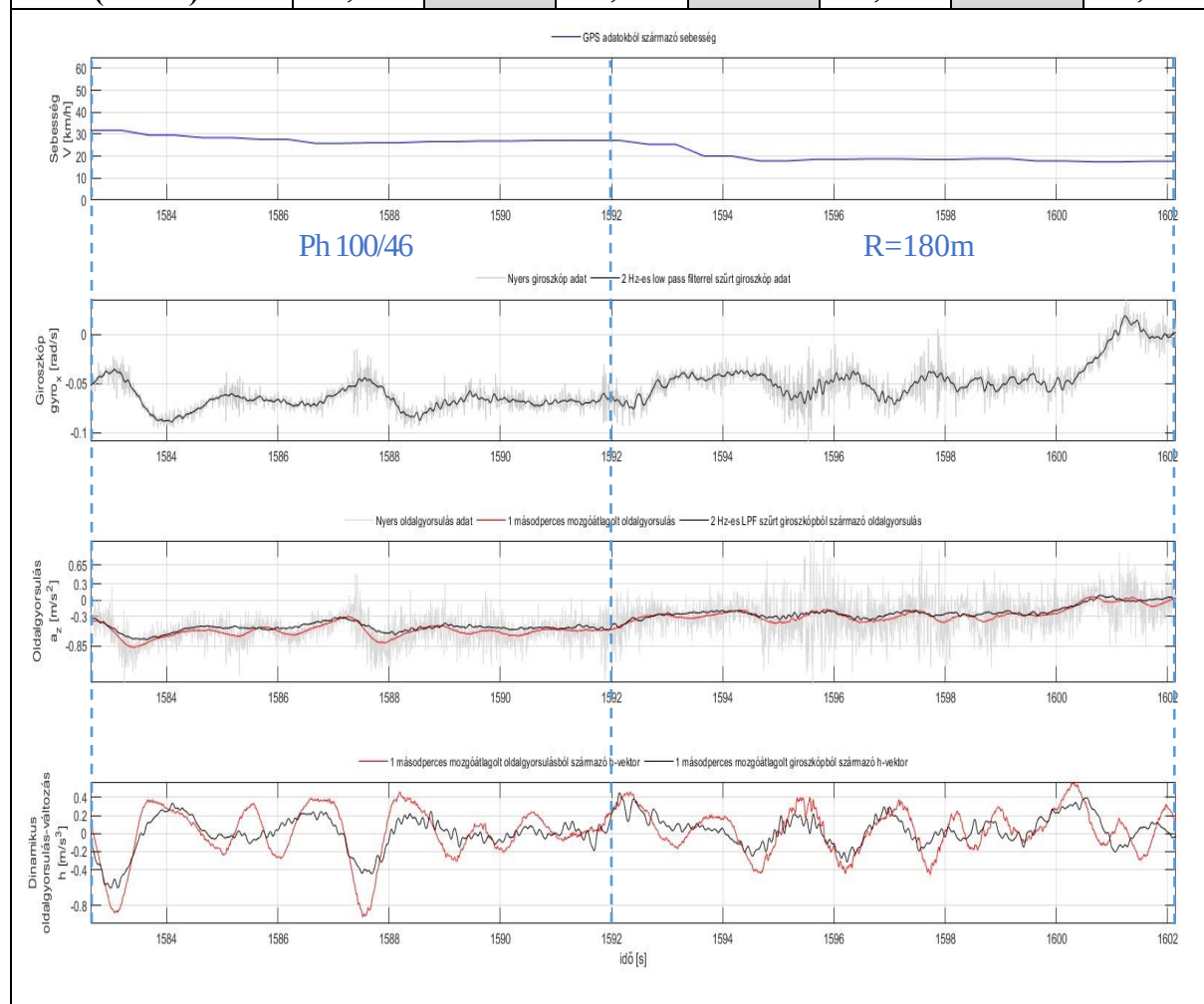
K1813_3_20180722_175308_Erzsébet királyné útja aluljáró - Fertő út_CAF_C2_2228_JEK_A5

Útirány:	Gubacsi út/Határ út út felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás		
Jármútípus:	CAF Urbos3, 5 modulos, 2228 pályaszámú jármű		
Mérés időpontja:	2018.07.22 17:53:08	Vizsgált kitérő száma:	K1813



52/2. ábra: 3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás Ph 100/46 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Sebesség adatok [m/s]	1583,0 s- 1585,0 s	1585,0 s- 1587,0 s	1587,0 s- 1589,0 s	1589,0 s- 1592,0 s	1592,0 s- 1594,0 s	1594,0 s- 1600,0 s	1600,0 s- 1602,0 s
Átlag:	8,25	7,58	7,28	7,50	6,71	5,16	4,89
Maximum:	8,83	7,90	7,40	7,55	7,54	5,57	4,95
Szórás:	0,30	0,25	0,07	0,05	0,70	0,13	0,03
Ív adatok [m]	R _{k2}		R _{k1}		R ₃		
	46		100		180		
Oldalgyorsulás adatok [m/s ²]							
mért (átlag):		-0,51		-0,51		-0,26	
számított:		1,25		0,56		0,15	
eltérés:		40,6%		11,5%		57,0%	
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s ³]							
mért (min.):	-0,61		-0,44		-0,19		-0,20
mért (max.):	0,33		0,24		0,45		0,40
mért (szórás):	0,32		0,24		0,14		0,18

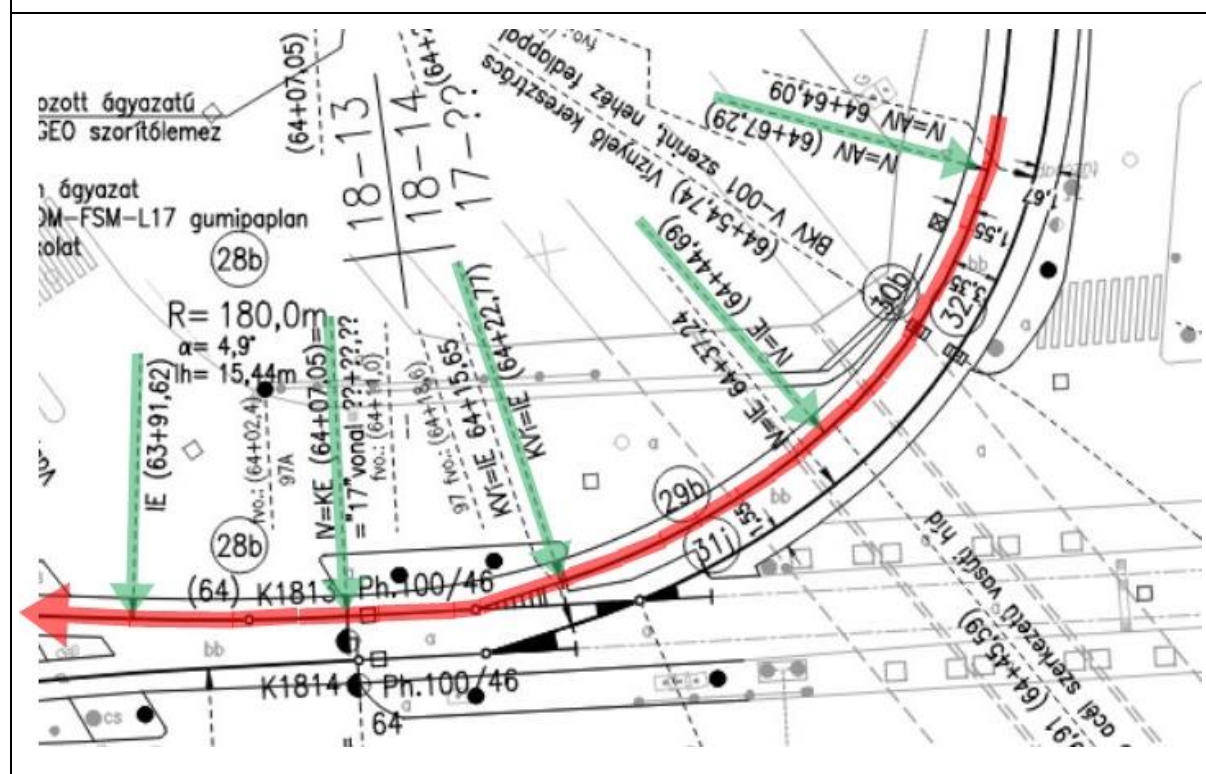
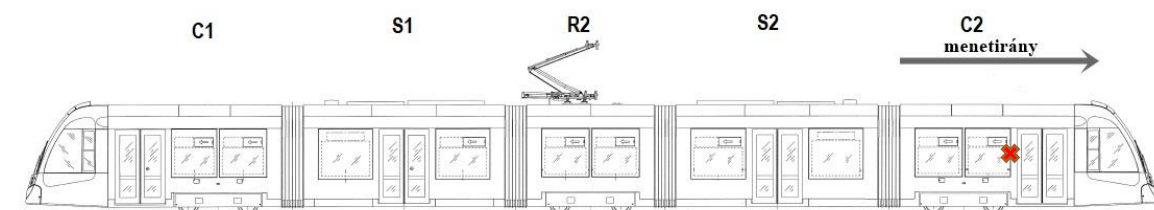


52/3. ábra: 3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás Ph 100/46 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

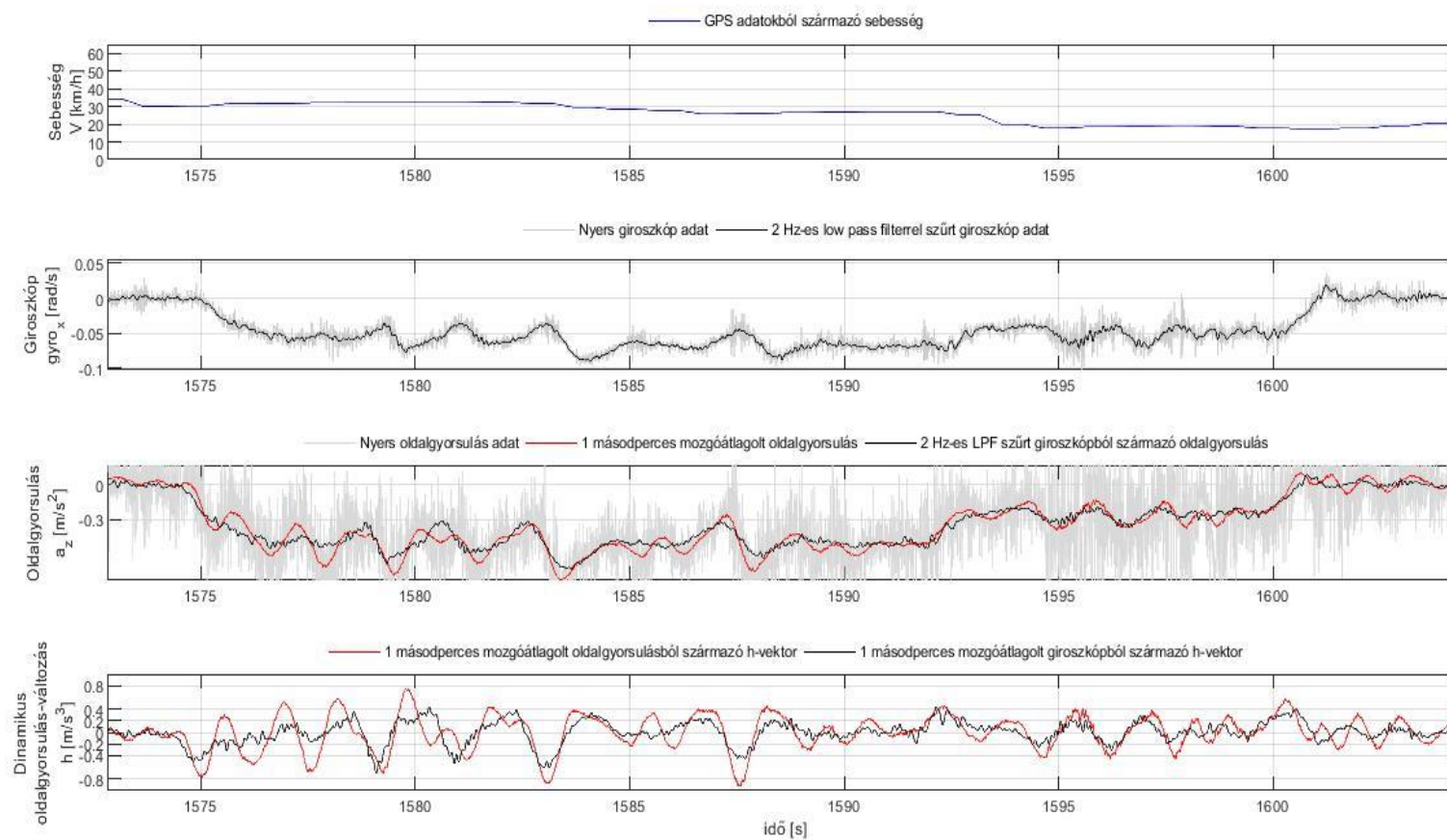
K1813_3_20180722_175308_Erzsébet királyné útja aluljáró - Fertő út_CAF_C2_2228_JEK_A5

Útirány:	Gubacsi út/Határ út út felé, gyök felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás		
Mérés időpontja:	2018.07.22 17:53:08	Vizsgált kitérő száma:	K1813
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/46
Pályaszám:	2228	Viszonylat száma:	3



52/4. ábra: 3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás Ph 100/46 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályaív vizsgálata										
Sebesség adatok [m/s]	1575s- 1579s	1579s- 1581s	1581s- 1583s	1583s- 1585s	1585s- 1587s	1587s- 1589s	1589s- 1592s	1592s- 1594s	1594s- 1600s	1600s- 1602s
Átlag:	8,820	8,955	8,959	8,252	7,584	7,279	7,503	6,712	5,155	4,891
Maximum:	8,950	8,960	9,040	8,830	7,900	7,400	7,55	7,540	5,570	4,95
Szórás:	0,135	0,004	0,077	0,300	0,248	0,074	0,048	0,696	0,133	0,034
Ív adatok [m]	L _{be}	R ₁	R ₂	R _{k2}			R _{k1}		R ₃	
	15,35	38	54	46			100		180	
Oldalgyorsulás adatok [m/s²]										
mért (átlag):					-0,508		-0,505		-0,259	
számított:					1,250		0,563		0,148	
eltérés:					246,1%		11,5%		57,0%	
Dinamikus oldalgyorsulás változás adatok [m/s³]										
mért (minimum):	-0,496	-0,699	-0,537	-0,605		-0,444		-0,190		-0,204
mért (maximum):	0,346	0,435	0,378	0,334		0,241		0,448		0,395
mért (szórás):	0,183	0,304	0,258	0,316		0,235		0,135		0,175

52/5. ábra: 3-as villamos, Kőbányai úti vasútállomás Ph 100/46 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályaív vizsgálata

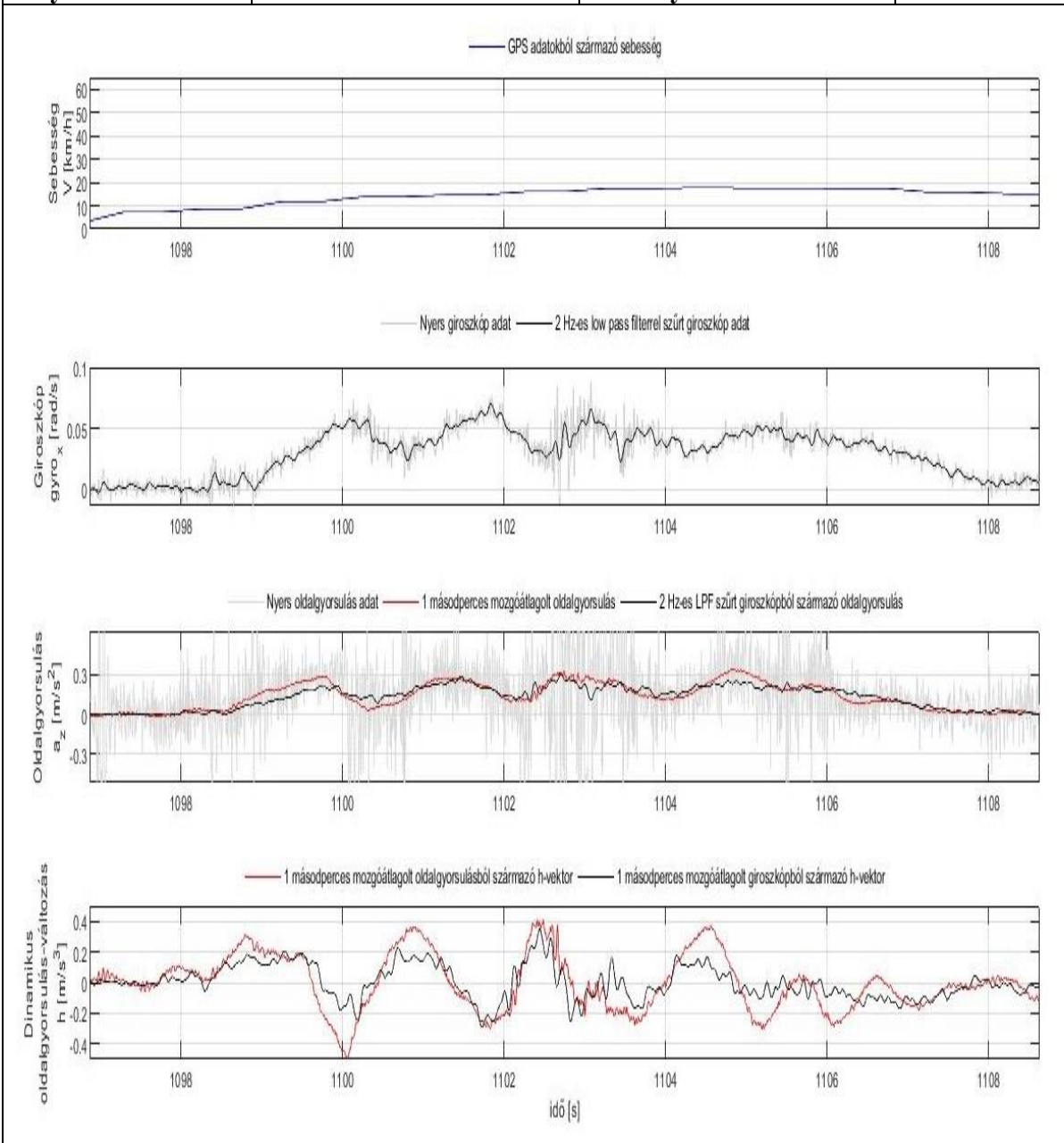


33/1. ábra: 17-es villamos, Döbrentei tér Ph 100/100e vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáin vizsgálata

Mérési fájl neve:

K2504_19_20180704_161001_Kelenföld vasútállomás M_Szent Lukács
Gyógyfürdő CAF 2210 C1 BEL 1 A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Döbrentei tér		
Mérés időpontja:	2018.07.04 16:10:01	Vizsgált kitérő száma:	K2504
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulos	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/100e
Pályaszám:	2210	Viszonylat száma:	19



53/2. ábra: 17-es villamos, Döbrentei tér Ph 100/100e vonali kiágazó kitérő és csatlakozó pályáiv vizsgálata

Mérési fájl neve:

K2504_19_20180803_145839_Kelenföld vasútállomás - Szent Lukács
gyógyfürdő_CAF_2201_R2_BKL_A5

Útirány:	Bécsi út/Vörösvári út felé, csúcs felől kitérőirányba		
Vizsgált helyszín:	Döbrentei tér		
Mérés időpontja:	2018.08.03 14:58:39	Vizsgált kitérő száma:	K2504
Járműtípus:	CAF Urbos3, 5 modulós	Vizsgált kitérő típusa:	Ph 100/100e
Pályaszám:	2201	Viszonylat száma:	19

