



**Ágh Csaba**

**A vasúti vágány fekszint- és irányméréseinek  
értékelése járműdinamikai szempontból**

**doktori tézisek**

témavezető:

**Dr. Horvát Ferenc PhD**

**Professor Emeritus, a közlekedéstudomány kandidátusa**

**Széchenyi István Egyetem**

**Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése**

**Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

**Győr, 2024.**

# TARTALOM

1 A kutatás motivációja, célkitűzései.....	2
2 Alkalmazott módszerek .....	3
2.1 A mérési eljárások torzításának értékelési módszerei.....	3
2.2 Mérőkocsis mérések és feldolgozásuk .....	6
2.3 Alkalmazott szoftver .....	8
3 Eredmények.....	8
3.1 A húrmérés torzító hatásai (I. tézis) .....	8
3.2 A sáváteresztő szűrés hibanagyság-torzító hatása (II. tézis) .....	11
3.3 A sáváteresztő szűrés torzító hatása a pálya-jármű rendszerben (III. tézis).....	13
3.4 Hosszfekszint és függőleges jármű-többletterhelések közti összefüggés (IV. tézis) .....	14
3.5 Keresztfekszint és keresztirányú csapágytok-gyorsulások közti összefüggés (V. tézis) .....	16
4 Következtetések .....	17
A szerző publikációinak listája .....	19
A tézisfüzetben hivatkozott további irodalom.....	20

## 1 A KUTATÁS MOTIVÁCIÓJA, CÉLKITŰZÉSEI

A vasúti vágányok fenntartásának célja a vonatok balesetmentes közlekedésének biztosítása, a pálya eredeti teljesítőképességének (megengedett sebesség és tengelyterhelés) megtartásával. A közlekedő vonatok hatására a pályában meglévő vágánygeometriai deformációk fokozatosan növekednek. A vágány geometriájának rendszeres mérése, minősítése feltétlenül szükséges a balesetek megelőzéséhez, illetve az egyes pályaszakaszok általános romlási trendjeinek figyelembevételével a gazdaságos pályafenntartási stratégia kialakításához.

Kutatásomat főként a következő két műszaki probléma motiválta.

- Egyrészt a vágánygeometriai „hosszfekszint” (más néven süppedés) és „irány” paraméterek mérésére alkalmazott hárompontos húrmagasságmérés, valamint az inerciális vagy húrmérések kiértékelésére előírt sáváteresztő szűrés a lokális deformációk

hibaalakját torzítja [Haigermoser et al., 2015], azonban sok esetben nem ismert ennek mértéke.

- Másrészt a vasúti pálya-jármű rendszer [Zobory, 2015] megfelelőségét a jelenlegi nemzetközi pályafenntartási gyakorlatban rendszerint pusztán a pálya alrendszer egyes geometriai jellemzőivel minősítik, melyek nincsenek kellően szoros kapcsolatban a pálya-jármű rendszerben kialakuló reakcióerőkkel [Luber, 2011].

Napjainkban a mozdonyokra és személyszállító járművekre szerelt, mérőszemélyzet nélküli, a vágányhibákat szokatlan járműreakciók segítségével észlelő diagnosztikai eszközök gyors terjedésének vagyunk tanúi a világban [Hoelzl et al., 2022]. Ezért egyre sürgetőbb a vágánygeometria és a szabálytalan járműmozgások közti kapcsolatok vizsgálata bonyolult szilárdtest-modellek [Zhai et al., 2009] nélkül.

Kutatásom során analitikus úton, matematikai levezetésekkel, illetve numerikus szimulációkkal vizsgáltam három különböző referencia-hibaalakon a különböző mérési elrendezések torzításait. A hosszfekszinthibákra vonatkozóan új, pálya-jármű rendszerszemléletű értékelési módszereket vezettem be. Egyes megállapításaimat az FMK-007 jelű mérőkocsi egyidejű vágánygeometriai és járműdinamikai mérésein végzett új típusú kiértékelések statisztikai feldolgozásával igazoltam.

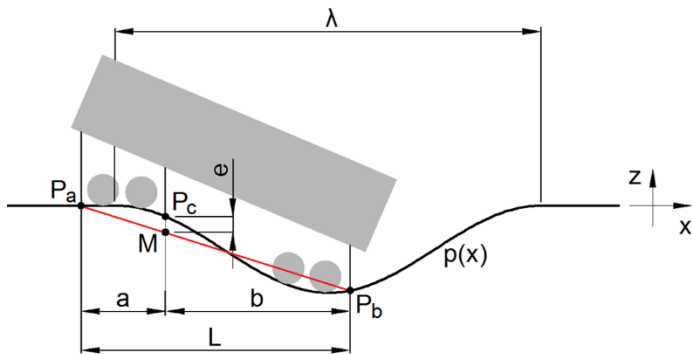
## **2 ALKALMAZOTT MÓDSZEREK**

### **2.1 A MÉRÉSI ELJÁRÁSOK TORZÍTÁSÁNAK ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREI**

#### **2.1.1 A húrmagasságmérés szimulációja és a sáváteresztő szűrés**

Az irány- és hosszfekszintmérésre kézi mérőhúrok, kézzel tolható vágánymérő kiskocsik, illetve mérőjárművek által is használt aszimmetrikus (ill. szimmetrikus) hárompontos húrmérést (**1. ábra**) – amit ívmagasságmérésnek vagy húrmagasságmérésnek is nevezünk – rendszerelméleti szempontból lineáris rendszerként vettem figyelembe.

A húrmérési rendszer működése matematikai értelemben konvolúciót valósít meg [Mauer, 1995]: az eredeti pályaalakot leíró  $p(x)$  függvényt és a mérőrendszerre jellemző  $h(x)$  függvényt konvolválja, így kaptam az  $e(x)$  mérési eredményt. A diszkrét konvolúció szokványos képletébe helyettesítve a mérési folyamat a következőképpen írható le:



**1. ábra.** Hárompontos húrmérő rendszer

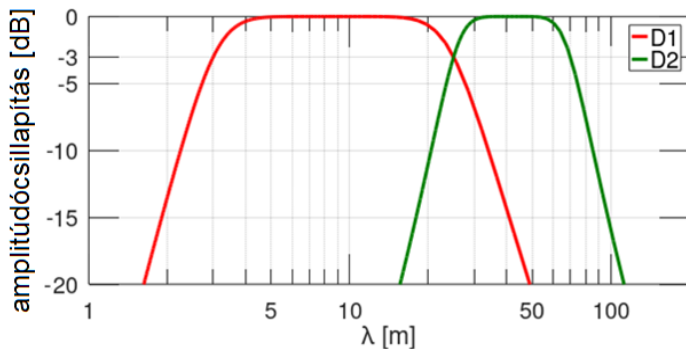
$$e(x) = (p * h)(x) = \sum_{\xi=-\infty}^{\infty} [p(\xi) h(x - \xi)] , \quad (1)$$

ahol  $e(x)$  a mérési regisztrátum,  $h(x)$  a rendszer egységimpulzusra adott válasza, azaz egységimpulzus-válasza.

A húrméréssel torzított pályaalak torzításmentesítése matematikai értelemben dekonvolúciót valósít meg. A dekonvolúció a Fourier-transzformáltakon osztási műveletnek felel meg [Mauer, 1995]:

$$P(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{H(\lambda)} . \quad (2)$$

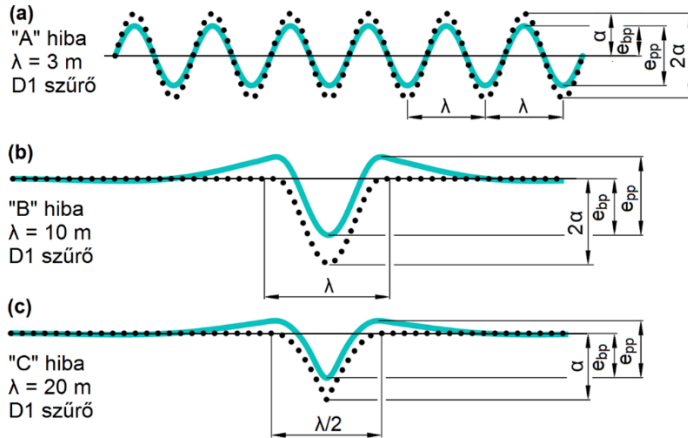
A vonatkozó európai és magyar szabvány [MSZ EN 13848-1] részletesen tárgyalja az alkalmazandó sáváteresztő szűrőket (**2. ábra**). Munkám során a szabványnak megfelelő szűrőket alkalmaztam.



**2. ábra.** D1 és D2 jelű szabványos sáváteresztő Butterworth-szűrők erősítése a hullámhossz függvényében

### 2.1.2 Referencia-hibaalakok amplitúdótorzulás-vizsgálata

A torzításokra vonatkozó kutatásom során az **3. ábrán** látható *A*, *B*, és *C* jelű referencia-hibaalakokat vizsgáltam, amelyeket létrehozó alapfüggvények hullámhossza  $\lambda$ , ábráról leolvasható amplitúdója  $\alpha$  (*B* jelű hiba esetén  $2\alpha$ ).



**3. ábra.** Példa a szabványos D1 hullámhossz-tartományra szűrés (világoskék) eredményére A, B, C jelű hibaalakok esetében (fekete pontozott vonalak)

### 2.1.3 Elméleti függőleges többleterő

Amennyiben az  $m$  tömegű,  $v_x$  sebességgel haladó merev kerék a  $p$  függőleges pályafüggvényt (hosszfekszintet) követi, akkor a sínszál és a kerék között fellépő, nyugalmi súlytól vett eltérést kifejező  $F_z$  elméleti többleterő nagysága:

$$F_z = m a_z = m \frac{dv_z}{dt} = m \frac{d\left(\frac{dz}{dt}\right)}{dt} = m \frac{d^2z}{dt^2} = m \frac{d^2p}{dt^2} = m v_x^2 \frac{d^2p}{dx^2}, \quad (3)$$

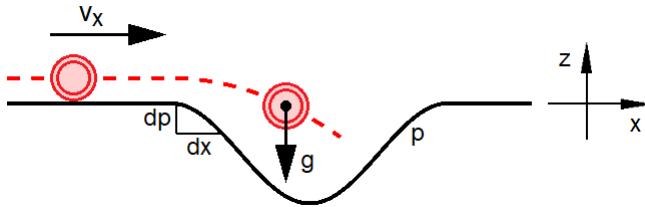
ahol  $v_z$  és  $a_z$  a kerék függőleges sebessége és gyorsulása,  $t$  az idő,  $x$  a pálya mentén befutott úthossz.

### 2.1.4 Elméleti elemelkedési sebesség

Amikor a fent levezetett  $F_z$  elméleti többleterő negatív, és nagysága megegyezik a kerék nyugalmi súlyával, a kerék elemelkedik a sínről (**4. ábra**). Az „elemelkedés” nem feltétlenül jelent felemelkedést, hanem azt, hogy a kerék nem futja be a hosszfekszint-deformációval terhelt sínkoronavonalat. Egy ismert alakú hiba teljes hosszára vonatkozóan a kerék  $v_{x,lift}$  kritikus sebességét — amikor a legkedvezőtlenebb pontban a támaszerő éppen

megszűnik – a pályahibát leíró hosszfekszintfüggvény út menti második deriváltjának negatív szélsőértéke határozza meg:

$$v_{x,lift} = \sqrt{\frac{g}{\min\left(\frac{d^2p}{dx^2}\right)}}. \quad (4)$$



**4. ábra.** Szabadon gördülő kerék elemelkedése egy hosszfekszinthibánál

### 2.1.5 Elméleti igénybevételi impulzus

A pályára a pályahibából adódó, lefelé ható többleterőkkel terhelt szakaszáról származó teljes  $J$  elméleti igénybevételi impulzusváltozást – az elméleti függőleges többleterőnél alkalmazott jelölésekkel – a következőképp definiáltam:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} F_z dt = m \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2p}{dt^2} dt = m v_z(t_2) - m v_z(t_1) = m v_x \left\{ \left[ \frac{dp}{dx} \right]_{x_2} - \left[ \frac{dp}{dx} \right]_{x_1} \right\}. \quad (5)$$

### 2.1.6 Elméleti igénybevételi energia

A pályahibán áthaladó kerék függőleges irányú mozgásienergia-változásból eredő, pályával közölt  $\Delta E_k$  kinetikus energiáját a munkatétel alapján a következőképp számítottam:

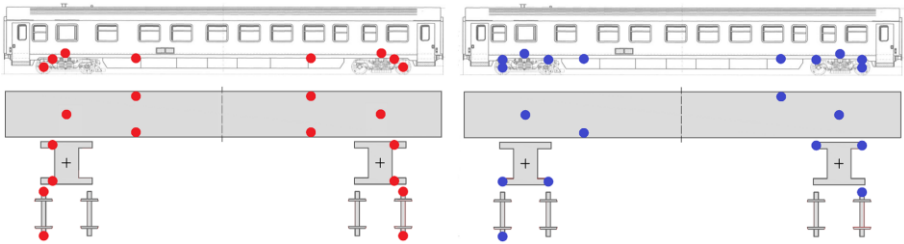
$$W = \Delta E_{kin} = \int_{z_1}^{z_2} F_z dz = m v_x^2 \int_{p_1}^{p_2} \frac{d^2p}{dx^2} dp = \frac{m v_x^2}{2} \left\{ \left[ \left( \frac{dp}{dx} \right)^2 \right]_{x_2} - \left[ \left( \frac{dp}{dx} \right)^2 \right]_{x_1} \right\}. \quad (6)$$

## 2.2 MÉRŐKOC SIS MÉRÉSEK ÉS FELDOLGOZÁSUK

### 2.2.1 A mérésekhez használt jármű és mérőrendszerek

A vizsgálataimat a MÁV KfV Kft. *FMK-007* jelű mérőkocsijának mérési eredményei alapján végeztem el. A mérőkocsi hat lézerprofilozót és egy inerciális egységet tartalmazó vágánygeometriai mérőrendszert, illetve a mérőkocsi csapágytokjain, forgóvázkeretein és kocsiszekrényén elhelyezkedő

huszonnégy gyorsulásmérő szenzoron alapuló járműdinamikai mérőrendszert (5. ábra) hordoz.



**5. ábra.** Az FMK-007 mérőkocsi járműdinamikai mérőrendszerét alkotó függőleges (piros) és keresztirányú (kék) gyorsulásmérő szenzorok elhelyezkedése a kocsiszekrényen, forgóvázkereteken és csapágytokokon

A járműdinamikai mérőrendszer a MÁV Fejlesztési és Kísérleti Intézete által 1998-ban kifejlesztett „indirekt WRIM” módszeren [Császár és Pálfi, 2013] alapul.

### 2.2.2 A második térbeli differenciák számítása

A mérőkocsi vágánygeometriai mérések adatsorainak második differenciáját  $\Delta x = 0,75$  m lépésközzel a következő módon állítottam elő. Hosszfekszint esetén:

$$LL''(x) = LL_{D1}(x - \Delta x) - 2 LL_{D1}(x) + LL_{D1}(x + \Delta x) \quad [\text{mm}], \quad (7)$$

keresztfekszint esetén:

$$CL''(x) = CL(x - \Delta x) - 2 CL(x) + CL(x + \Delta x) \quad [\text{mm}]. \quad (8)$$

### 2.2.3 A többváltozós regressziószámítás

Az FMK-007 mérőkocsi mérőmenetei alapján a függőleges pályaegyenletlenségek ( $\sigma(LL')$  és  $\sigma(LL)$ ), az átlagos járműsebesség ( $\bar{v}$ ) és a függőleges dinamikus pálya-jármű erők ( $\sigma(Q_{ax})$  és  $\sigma(Q_{wh})$ ) összetartozó értékeire háromváltozós, nemlineáris regressziós felületet illesztettem. Az alábbi nemlineáris modell  $c$ -vel jelölt konstansainak optimális értékeit a modell logaritmusszámítással történő linearizálása útján határoztam meg.

$$\sigma(Q_{(j)}) = c_1 (\bar{v})^{c_3} [\sigma(LL^{(k)})]^{c_2} + \varepsilon. \quad (9)$$

## 2.2.4 Korrelációanalízis

A keresztirányú csapágytokgyorsulások ( $\dot{y}$ ) és a keresztfekszint második térbeli differenciája ( $CL''$ ) közti összefüggést precíz szinkronizáció után korrelációjuk erősségével jellemeztem:

$$\text{corr}(CL'', \dot{y}) = \frac{\sum_{i=1}^N (CL''_i - \overline{CL''})(\dot{y}_i - \bar{\dot{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (CL''_i - \overline{CL''})^2 \sum_{i=1}^N (\dot{y}_i - \bar{\dot{y}})^2}}. \quad (10)$$

## 2.3 ALKALMAZOTT SZOFTVER

A fent említett dekonvolúciókat, szűréseket, szimulációkat, mérésfeldolgozásokat Octave szoftverben programoztam.

# 3 EREDMÉNYEK

## 3.1 A HÚRMÉRÉS TORZÍTÓ HATÁSAI (I. TÉZIS)

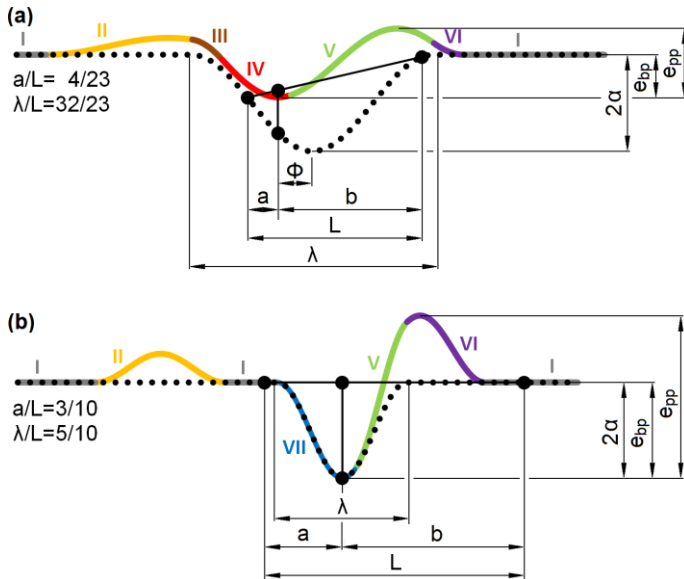
### 3.1.1 A húrmérés torzító hatása lokális hibánál

Meghatároztam a  $B$  jelű referencia-hibaalakok esetén a különböző hűrelrendezések és hibahosszak esetén adódó, húrmérési képek függvénydarabjait (**6. ábra**) leíró képleteket. A mérési képben megjelenő lokális szélsőértékekből adódó torzítási értékeket a **7. ábra** felületdiagramjain ábrázoltam.

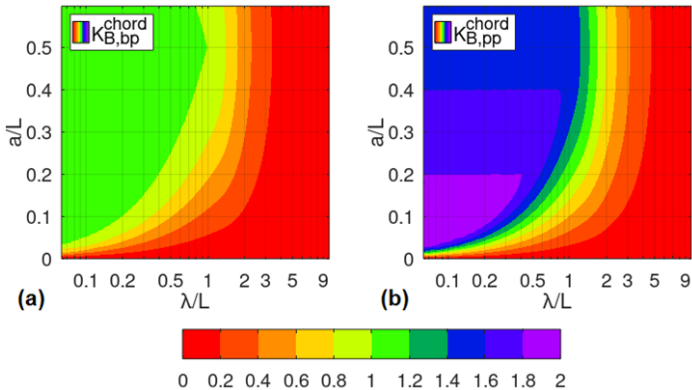
Látható, hogy abban az esetben, ha  $2a \geq \lambda$ , akkor – feltéve, hogy  $a$  a rövidebbik részhúr-hosszat jelöli – a  $B$  jelű referencia-pályahiba húrmérési regisztrátumban megjelenő képe a pályahibáéval azonos negatív szélsőértéket vesz fel, nincsen torzítás, vagyis  $K_{B, bp}^{chord} = 1$ .

A szimuláció alapján levont egyik legfontosabb következtetés ezért az I. tézis első részében olvasható.





6. ábra. Példák a hárompontos aszimmetrikus húrral (fekete folytonos vonalak; húr méretei bal oldalon) felvett  $e_{I-VII}$  matematikai részzszakaszból álló mérési regisztrátumokra (színes vonalak) B jelű referencia-hibaalak (pontozott vonalak) esetén



7. ábra. B jelű referencia-hibaalak hárompontos aszimmetrikus húrmérésre vonatkozó amplitúdótorzítási tényező  $\lambda$  hibahossz-paraméter,  $L$  húrhossz, ill. a részhúrhossz esetén  $\lambda/L$  és  $a/L$  függvényében "alaponaltól csúcsig" (bp), ill. "csúcstól csúcsig" (pp) típusú kiértékeléssel

### 3.1.2 A húrmérés torzító hatása periodikusan ismétlődő deformációsorozatnál

A szakirodalomból [Lichtberger, 2005] ismert, hogy az  $A$  jelű referencia-hibaalakot a húrmérés az eredeti szinuszhullámokat azonos hullámhosszú, de eltérő amplitúdójú szinuszhullámokká transzformálja, és a létrejövő amplitúdóváltozási tényező nagysága

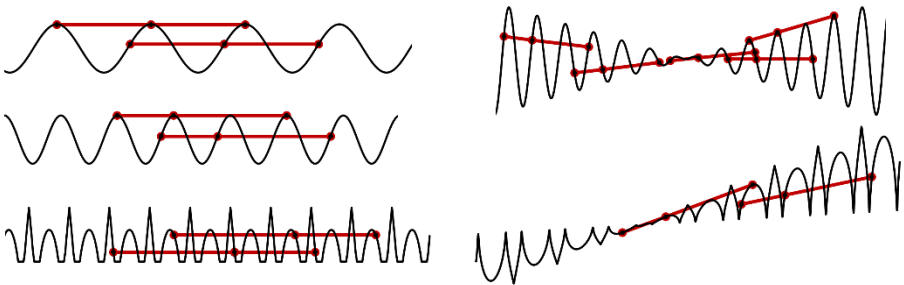
$$K_A^{chord} = \sqrt{\left[1 - \frac{a}{L} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} b\right) - \frac{b}{L} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} a\right)\right]^2 + \left[\frac{b}{L} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} a\right) - \frac{a}{L} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b\right)\right]^2}. \quad (11)$$

Megvizsgáltam azon feltételeket, amelyek teljesülése esetén a húrmérési regisztrátum semmilyen információt nem tartalmaz, értéke azonosan zérussá válik. Azt találtam, hogy ehhez az alábbi feltételek (12) teljesülése szükséges:

$$\begin{cases} a = k_a \lambda, & k_a \in \{1; 2; 3; 4; \dots\} \\ b = k_b \lambda, & k_b \in \{1; 2; 3; 4; \dots\} \end{cases} \quad (12)$$

ahol  $k_a$  és  $k_b$  egyaránt pozitív egész számok. Az átviteli függvény zérushelyeinek megfelelő pálya-húrelrendezés kombinációk nem csak a szinuszos vagy koszinuszos hibaalakokra vonatkoznak, hanem bármilyen tetszőleges, periodikusan ismétlődő hibaalakra.

Találtam továbbá olyan deformációsorozatokat is, melyek nem tekinthetők periodikusnak, mégis érzékelhetetlenek a (12) feltételnek megfelelő húrmérő rendszerekkel (8. ábra).



**8. ábra.** Példák a hárompontos húrméréssel érzékelhetetlen hibaalak-sorozatokra

A fentiek alapján az I. tézis második részét fogalmaztam meg.

## I. tézis

Meghatároztam az egyetlen koszinusz hullámmal modellezett, más vágánygeometriai deformációktól távol eső, úgynevezett lokális deformációk hárompontos húrmérési regisztrátumában megjelenő képre vonatkozó amplitúdótorzítási és fázistorzítási függvényeket. Megmutattam, hogy az ilyen deformációk képének „alapvonalról csúcsig” típusú kiértékelése pontosan a valós amplitúdót mutatja, ha a deformáció hossza nem haladja meg az aszimmetrikus mérőhúr kisebbik rész hosszának kétszeresét (szimmetrikus mérőhúr esetén a teljes húr hosszát), illetve a valósnál kisebb amplitúdót mutat minden más esetben.

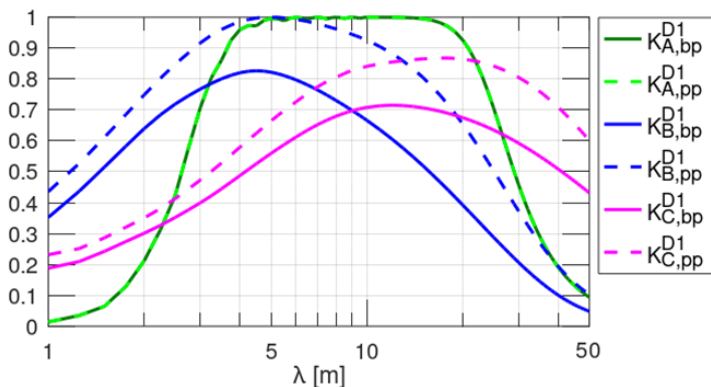
Általános érvényű törvényszerűséget találtam a hárompontos szimmetrikus és aszimmetrikus húrmérés által érzékelhetetlen deformációkra vonatkozóan: nincsen képe a húrmérési regisztrátumban a bármilyen alakú, de periodikusan ismétlődő deformációnak, ha a mérőhúr mindkét rész hosszára külön-külön igaz, hogy a deformációsorozat periódushosszával megegyezik vagy a periódushossz bármely egész számú többszöröse. A jelalak e feltételek teljesülése esetén akkor is érzékelhetetlen, ha a periodikus alapjel alapvonala és/vagy amplitúdója folyamatosan, de lineárisan változik.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [Ágh, 2018a; Ágh, 2021a]

## **3.2 A SÁVÁTERESZTŐ SZŰRÉS HIBANAGYSÁG-TORZÍTÓ HATÁSA (II. TÉZIS)**

Az eredeti pályaalak és a szűrt pályaalak megfelelő szélsőértékeinek viszonyát bemutató, kiszámított torzítási tényezőket a hiba hosszának, ill. hullámhosszának függvényében a **9. ábrán** mutatom be (figyelembe kell venni, hogy a  $C$  referencia-hibaalak esetében a hibahossz a  $\lambda$  hullámhossz értékének fele).

A periodikus, végtelen koszinusz hullámokból álló  $A$  jelű referencia-hibaalak esetén a szűrt amplitúdók tökéletesen megfelelnek a szűrő karakterisztikájából következő csillapítási értékeknek. Ezzel szemben a más geometriai alakváltozásoktól távol eső, lokális hibákat reprezentáló  $B$  és  $C$  jelű referencia-hibaalakok negatív szélsőértékének abszolútértékét a szűrés minden esetben csökkenti, és a csökkenés mértéke – különösen az „alapvonalról csúcsig” típusú kiértékelésnél – jelentős.



**9. ábra.** AD1 (a) és D2 (b) szűrő amplitúdó-torzítási tényezői az A, B, C referencia-hibaalakok és,  $\lambda$  hibahossz-paraméter esetén „alapvonaltól csúcsig” (bp) és „csúcstól csúcsig” (pp) kiértékeléssel

Ennek oka az, hogy a szűrés hatására a koszinusz hullám (mely a nullvonalról eredetileg csak lefelé tér ki) képe a nullvonalhoz képest „feltolódik”.

Főbb megállapításaimat az alábbi tézisben foglaltam össze.

## II. tézis

Szimulációs eljárást dolgoztam ki a más vágánygeometriai deformációktól távol eső deformációkat leíró mérési adatsorok sáváteresztő szűrésével járó szélsőérték-torzító hatás számszerűsítésére.

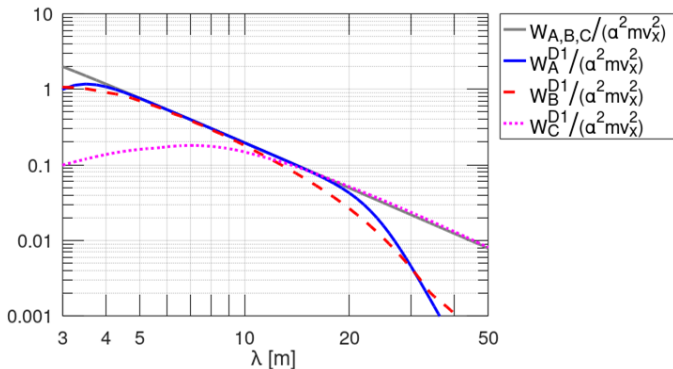
Megállapítottam, hogy az MSZ EN 13848 szabvány szerinti D1 és D2 hullámhossz-tartományokra történő sáváteresztő szűrés egyetlen koszinusz hullámmal modellezett, más vágánygeometriai deformációktól távol eső lokális deformációknál megjelenő szélsőérték-torzító hatása jelentős, és ilyen esetben a szűrt mérési regisztrátumnak a „csúcstól csúcsig” típusú kiértékelése mindig jobban közelíti a valós szélsőértéket, mint az „alapvonaltól csúcsig” típusú kiértékelés.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [Ágh, 2018a; Ágh, 2021a]

### 3.3 A SÁVÁTERESZTŐ SZŰRÉS TORZÍTÓ HATÁSA A PÁLYA-JÁRMŰ RENDSZERBEN (III. TÉZIS)

A vágánygeometriai mérési eredmények torzítását megvizsgáltam a fent definiált elméleti függőleges többleterőben, az elméleti elemelkedési sebességben, az elméleti igénybevételi impulzusban és az elméleti igénybevételi energiában.

Azt tapasztaltam, hogy – mivel a szabványos szűrő a pályafüggvény első és második deriváltját csak csekély mértékben változtatja meg – ezek a torzítások az  $A$  és  $B$  referencia-hibaalak esetében nem jelentősek (10. ábra).



**10. ábra.** Elméleti igénybevételi energia az eredeti A, B, C referencia-hibaalakokon történő áthaladáskor ( $W$ ) és a szűrt referencia-hibaalakokon történő áthaladáskor ( $W^{D1}$ ), egységnyi eredeti hibaamplitúdó, egységnyi keréktömeg és egységnyi haladási sebesség feltételezésével

Ezért megfogalmaztam az alábbi tézist.

#### III. tézis

Bevezetem a vágánygeometriai hosszfekszinthibák pálya-jármű rendszerszemléletű értékelési módszereit a kerékáthaladás során megjelenő

- elméleti függőleges többleterő,
- elméleti igénybevételi impulzus és
- elméleti igénybevételi energia

alapján, illetve a kerék-sín erőkapcsolat megszűnésének határsebességét jellemző

- elméleti elemelkedési sebesség

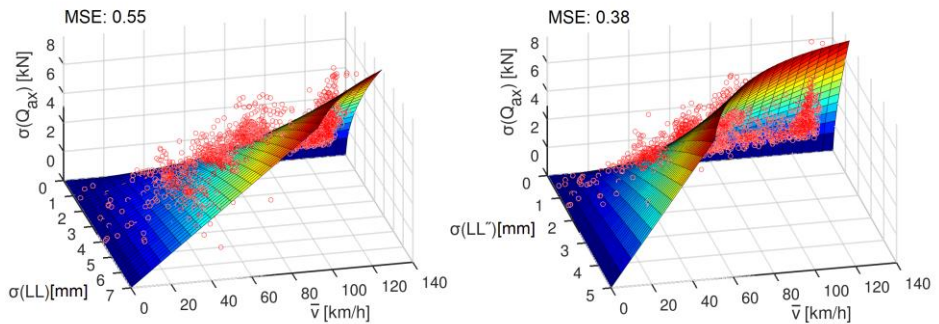
alapján.

Meghatároztam rájuk vonatkozóan a szabványos, D1 és D2 hullámhossz-tartományokra történő sáváteresztő szűrés egyetlen koszinusz hullámmal modellezett, más hosszfekszint-deformációktól távol eső lokális hosszfekszint-deformációknál megjelenő torzító hatását. Megmutattam, hogy ez a torzító hatás csekély, ezért a szabványosan szűrt mérési regisztrátumok alkalmasak a pályajármű rendszer pályafoldali gerjesztésének modellezésére.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [Ágh, 2018a; Ágh, 2021a]

### 3.4 HOSSZFEKSZINT ÉS FÜGGŐLEGES JÁRMŰ-TÖBBLETTERHELÉSEK KÖZTI ÖSSZEFÜGGÉS (IV. TÉZIS)

Az FMK-007 mérőkocsi mérőmenetei alapján a függőleges pályaeqyenetlenségek ( $\sigma(LL'')$  és  $\sigma(LL)$ ), az átlagos járműsebesség ( $\bar{v}$ ) és a függőleges dinamikus pályajármű erők ( $\sigma(Q_{ax})$  és  $\sigma(Q_{wh})$ ) összetartozó értékeit a **11. ábrán** látható háromdimenziós diagramokon piros körökkel jelöltem, a megalkotott megfelelő becslő függvényeket pedig színes felületekkel.



**11. ábra.** Az FMK-007 mérőkocsi első kerékpárjáról a vágányra átadódó függőleges erő szórását a sebesség és a hosszfekszint szórása (balra) ill. a hosszfekszint második differenciájának szórása (jobbra) függvényében becslő regressziós felületek

A második differencia alapján történő becslés jobbnak bizonyult, ezért az alábbi tézist fogalmaztam meg.

#### IV. tézis

Az FMK-007 jelű mérőkocsi mérései alapján megmutattam, hogy a függőleges dinamikus kerék-, ill. tengelyterhelések szórása a hosszfekszint második differenciájának szórása alapján jobban becsülhető, mint a hosszfekszint európai vágányminősítő referenciaindex szerinti differenciálatlan szórása alapján.

Az FMK-007 jelű mérőkocsi mérései alapján a függőleges dinamikus kerék-, ill. tengelyterhelések szórását becslő módszert alkottam meg egyenes pályaszakaszokra vonatkozóan, a hosszfekszint második differenciájának szórása és a jármű sebessége alapján. A függőleges dinamikus kerék-, ill. tengelyterhelések várható szórása a

$$\sigma(Q) = c_1 \cdot \bar{v} \cdot [\sigma(LL''_{D1})]^{c_2}$$

képletrel becsülhető 30...140 km/h tartományban, ahol

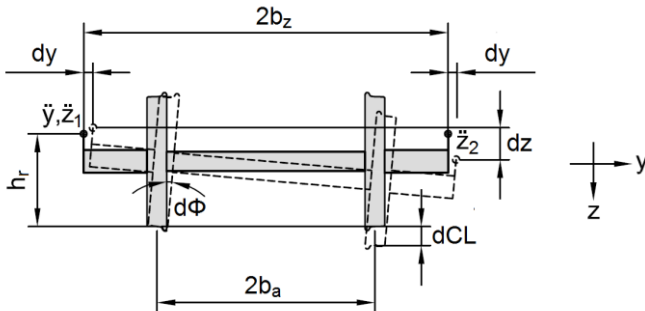
- $\sigma(Q)$  a vasúti kocsi 16 Hz-es aluláteresztő szűrésen átesett függőleges kerék- vagy tengelyterhelésének szórása  $kN$  mértékegységben,
- $\sigma(LL''_{D1})$  a sínszálak D1-es hullámhossz-tartományra szűrt hosszfekszintjének 0,75 méteres lépésközzel számított második térbeli differenciájából számított szórás (a jobb és bal sínszálra számított szórás átlaga)  $mm$  mértékegységben,
- $\bar{v}$  a vonat átlagsebessége  $km/h$  mértékegységben,
- $c_1$  és  $c_2$  az adott járműtől függő állandók, melyek értékei, illetve a becslések linearizált modellben számolt determinációs együtthatói ( $R^2$ ), valamint átlagos négyzetes hibái (MSE) az FMK-007 jelű mérőkocsi esetében a következők:

	$c_1$	$c_2$	$R^2$	MSE
<i>kerékterhelés (<math>Q_{wh}</math>) szórásának becslése esetén:</i>	0,040	0,75	0,79	0,22 kN <sup>2</sup>
<i>tengelyterhelés (<math>Q_{ax}</math>) szórásának becslése esetén:</i>	0,058	0,75	0,84	0,38 kN <sup>2</sup>

A tézishez kapcsolódó publikációk: [Ágh, 2018b; Ágh, 2019a; Ágh, 2019b; Ágh, 2023]

### 3.5 KERESZTFEKSZINT ÉS KERESZTIRÁNYÚ CSAPÁGYTOK-GYORSULÁSOK KÖZTI ÖSSZEFÜGGÉS (V. TÉZIS)

A 12. ábrán látható helyzetben az egyik sínszál differenciálisan kicsiny hosszfekszínhibája  $dCL$  nagyságú keresztfekszínhibát okoz, ami a kerékpár  $d\Phi$  mértékű elfordulásával jár.



12. ábra. A csapágytokok fölé szerelt gyorsulásmérő szenzorok ( $\ddot{y}$ ,  $\ddot{z}_1$ ,  $\ddot{z}_2$ ) keresztirányú és függőleges eltolódásának ( $dy$ ,  $dz$ ) összefüggése a keresztfekszint változásával ( $dCL$ )

Levezettem, hogy a sínkoronaszint felett  $h_r$  magasságban a csapágytokra erősített gyorsulásmérőn a keresztfekszint második differenciálhányadosától függő,

$$\ddot{y} = \frac{h_r}{2b_z} v_x^2 \frac{d^2 CL}{dx^2} \quad (13)$$

nagyságú gyorsulás mérhető.

Az FMK-007 mérőkocsi által mért keresztfekszint második differenciája és a mért gyorsulások közötti tapasztalati korrelációt vizsgáltam.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a keresztirányú csapágytokgyorsulásokat a keresztfekszint második differenciája szignifikánsan meghatározza, mivel a keresztfekszint 0,75 méteres lépésközzel számított második differenciája és a 16 Hz-es vágási frekvenciájú aluláteresztő szűrésen átesett keresztirányú csapágytokgyorsulás között 0,8-as együtthatójú korrelációt mutattam ki 80 km/h 130 km/h közötti, állandó haladási sebességek esetén.



## V. tézis

Megmutattam, hogy a vasúti járműkerékpár pillanatnyi keresztirányú gyorsulását irányhibamentes, egyenes pályaszakaszon a pálya keresztfekszintjének második térbeli differenciálhányadosa határozza meg a következő összefüggés szerint:

$$\ddot{y} = \frac{h_r}{2b_a} v^2 \frac{d^2 CL}{dx^2},$$

ahol

- $\ddot{y}$  a kerékpár keresztirányú gyorsulása  $h_r$  magasságban,
- $h_r$  a keresztirányú gyorsulásmérés helyének sínkoronaszinttől vett magassága,
- $2b_a$  a névleges futókörtávolság (1,500 m),
- $v$  a jármű sebessége,
- $\frac{d^2 CL}{dx^2}$  a pálya  $CL$  keresztfekszintjének második differenciálhányadosa  $x$  pályatengely mentén.

Az FMK-007 jelű mérőkocsi mérései eredményeinek feldolgozásával igazoltam, hogy egyenes pályaszakaszokon haladó személyszállító vasúti kocsik keresztirányú csapágytokgyorsulásait a pálya keresztfekszintjének második térbeli differenciája szignifikánsan meghatározza. Ezért a keresztfekszint második differenciáját is figyelembe vevő pályaállapot-minősítési eljárás bevezetését javaslom.

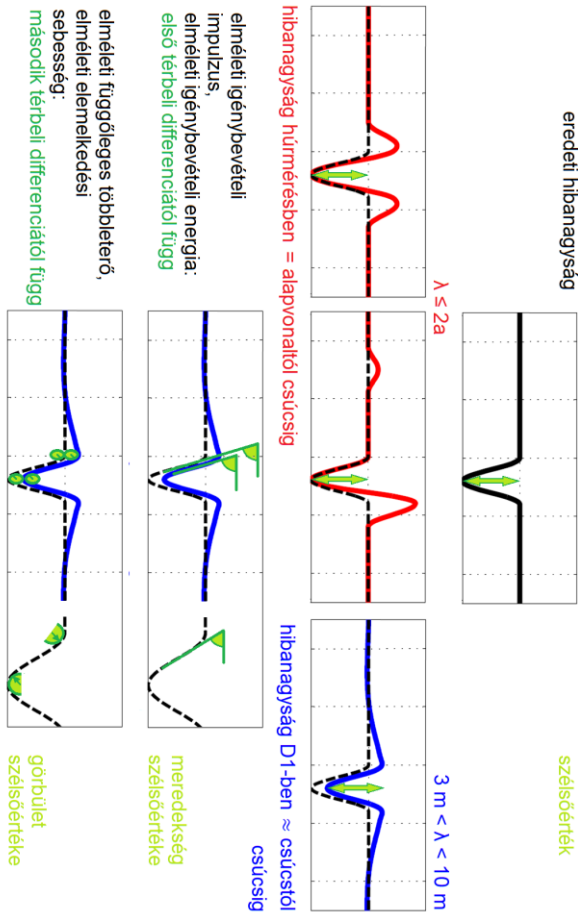
A tézishez kapcsolódó publikációk: [Ágh, 2018b; Ágh, 2019a; Ágh, 2019b; Ágh, 2023]

## 4 KÖVETKEZTETÉSEK

Eredményeim megvilágítják a vizsgált mérési eljárások leképezéseinek vasútszakmai szempontból jelentős törvényszerűségeit. Továbbá megmutattam, hogy a nemzetközi gyakorlatban ma alkalmazott, lokális szélsőértékek alapján történő minősítésen túl a vágánygeometriai regisztrátumok első és második térbeli differenciahányadosai, illetve differenciái is fontos információt hordoznak a várható járműreakciókról.

Munkám legfontosabb eredményeit összefoglalva (13. ábra) elmondható, hogy a húrmérések alapján az elszigetelt, lokális vágánygeometriai irány- és hosszfekszint hibák „alapvonaltól csúcsig” vett nagysága rendszerint jól

megállapítható, azonban a pálya-jármű rendszerben a többlet-igénybevételeket vagy akár kisiklást okozó hatások modellezésére a hőmérés kevésbé alkalmas. Ezzel szemben az MSZ EN 13848-1 szabvány szerint számolt, D1-es hullámtartományra szűrt mérési eredmények „alapvontól csúcsig” értelmezett hibanagysága nem mutatja meg a valós hibanagyságot (a „csúctól csúcsig” értékelés az általam vizsgált hibaalak esetében közelíti azt), de a pálya-jármű rendszerben dinamikus többlet-igénybevételt vagy kisiklást okozó hatások modellezésére a D1-es adatsorok alkalmasabbak, mégpedig a megfelelő lépésközzel számított első vagy második differenciájuk vizsgálatával.



13. ábra. Összefoglaló megállapítások lokális hibaalak értékeléséhez

## A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓINAK LISTÁJA

- Ágh Cs. [2012]: Egyenértékű kúposág mérése Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás.  
*Sínek Világa*, 54 (6), pp. 10-13.
- Ágh, Cs. [2017]: Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből.  
*Sínek Világa*, 59(6), pp. 17-20.
- Ágh Cs. [2018a]: Vágánygeometriai irány- és fekszinthibák valós nagyságának értékelése húrmérési eredmények alapján.  
*Közlekedéstudományi Szemle*, 68(5), pp. 45-55.
- Ágh, Cs. [2018b]: A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety.  
*Konferenciakiadvány: Proceedings of 23rd International Seminar Track Maintenance Machines In Theory and Practice*. Zsolna, Szlovákia, pp. 7-14.
- Ágh Cs. [2019a]: Comparative analysis of axlebox accelerations in correlation with track geometry irregularities.  
*Acta Technica Jaurinensis*, 12(2), pp. 161-177.
- Ágh Cs. [2019b]: Az FMK-007 mérőkocsi új járműdinamikai mérőrendszere.  
*Sínek Világa*, 61(4), pp. 2-6.
- Ágh Cs. [2019c]: Vasúti pályák vizsgálatának korszerű módszerei.  
*Műszaki Katonai Közlöny*, 29(1), pp. 219-230.
- Ágh Cs. [2021a]: Measurement distortion analysis of repetitive and isolated track geometry irregularities.  
*Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(3), pp. 852-865.
- Ágh Cs. [2021b]: Modern vágánygeometria-, járműdinamika- és űrszelvénymérés virtuális helyazonosítási referenciapont-hálózattal.  
*Kiadvány: A MÁV Központi Felépítményvizsgáló Kft. 25 éve*. MÁV KfV Kft., Budapest, pp. 12-17.
- Ágh Cs. [2023]: Connection between track geometry quality and dynamic vehicle response at various speeds.  
*The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 18(3), pp. 169-187.
- Vinkó Á., Simonek T., Ágh Cs., Csikós A., Figura B. [2023]: Feasibility of onboard smartphones for railway track geometry estimation: sensing capabilities and characterization.  
*Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(1), pp. 200-210.

## A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT TOVÁBBI IRODALOM

- Császár L., Pálfi Cs. [2013]: Determination of wheel-rail contact forces using different measurement methods.  
*Konferenciakiadvány: Proceedings of the 9th International Conference on Railway Bogies and Running Gears*, Budapest, pp. 153-166.
- Haigermoser, A., Lubner, B., Rauh, J., Gräfe, G. [2015]: Road and track irregularities: measurement, assessment and simulation.  
*Vehicle System Dynamics*, 53(7), pp. 878-957.
- Hoelzl, C., Dertimanis, V., Landgraf, M., Ancu, L., Zurkirchen, M., Chatzi, E. [2022]: On-board monitoring for smart assessment of railway infrastructure: A systematic review.  
*Könyvfőjezet: The Rise of Smart Cities*, pp. 223-259.
- Lichtberger, B. [2005]: Track compendium.  
*Könyv: Eurail Press, Hamburg.*
- Lubner, B. [2011]: Methode zur Bewertung von Gleislageabweichungen auf Basis von Fahrzeugreaktionen.  
*Doktori értekezés. Grazi Műszaki Egyetem.*
- Mauer, L. [1995]: Determination of track irregularities and stiffness parameters with inverse transfer functions of track recording vehicles.  
*Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 24:sup1, pp. 117-132
- MSZ EN 13848-1 [2019]: Vasúti alkalmazások. Vasúti pálya. A vágánygeometria minősége. 1. rész: A vágánygeometria jellemzése.  
*Európai és magyar szabvány. Magyar Szabványügyi Testület.*
- Zhai, W., Wang, K., Cai, C. [2009]: Fundamentals of vehicle–track coupled dynamics.  
*Vehicle System Dynamics*, 47(11), pp. 1349-1376
- Zobory I. [2015]: A vasúti pálya-jármű rendszer dinamikája – mérése – minősítése.  
*Közlekedéstudományi Szemle*, 65(1) pp. 6-18.