

## **MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI**

ÁRUSZÁLLÍTÁSI RENDSZEREK TEREPI MÉRÉSEI ÉS  
ELEMZÉSÜK LABORATÓRIUMI  
CSOMAGOLÁSVIZSGÁLATOKHOZ KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A  
VÉLETLENSZERŰ REZGÉSEKRE

**Böröcz Péter János**



Széchenyi István Egyetem  
Győr, 2023

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>3</b>
1.1. <i>Az értekezés célja .....</i>	<i>3</i>
1.2. <i>Az értekezés felépítése .....</i>	<i>4</i>
<b>2. A kutatások módszertana .....</b>	<b>4</b>
2.1. <i>Az adatok elemzésének módszertana .....</i>	<i>4</i>
2.2. <i>A terepi mérések során alkalmazott műszerezettség .....</i>	<i>6</i>
2.3. <i>A mérések körülményei és műszerbeállítások .....</i>	<i>8</i>
2.4. <i>A kutatások korlátai .....</i>	<i>10</i>
<b>3. Új tudományos eredmények.....</b>	<b>11</b>
3.1. <i>A közép-európai vasúti áruszállítások kapcsán.....</i>	<i>11</i>
3.1.1. <i>Tézisek.....</i>	<i>12</i>
3.2. <i>A közúti futárszolgálatos szállítások során végzett felmérések és eredményei kapcsán.....</i>	<i>14</i>
3.2.1. <i>Tézisek.....</i>	<i>14</i>
3.3. <i>A kombinált (multimodális) áruszállítási körülmények kutatása kapcsán .....</i>	<i>16</i>
3.3.1. <i>Tézisek.....</i>	<i>16</i>
3.4. <i>Hosszirányú és hosszú időtartamú terepi rázkódások kistehergépjárművel végzett áruszállítás rakomány-stabilitási vizsgálatai kapcsán .....</i>	<i>17</i>
3.4.1. <i>Tézisek.....</i>	<i>18</i>
3.5. <i>Halmazolt rakományok rázkódásainak elemzése kapcsán .....</i>	<i>18</i>
3.5.1. <i>Tézisek.....</i>	<i>19</i>
<b>Hivatkozott saját publikációk .....</b>	<b>20</b>
<b>Irodalomjegyzék .....</b>	<b>21</b>

# 1. Bevezetés

## *1.1. Az értekezés célja*

Az áruk szállítása és mozgatása közben felmerülő igénybevételek számos árukárhoz és veszteséghez vezethetnek. Mindez egy olyan optimalizálási folyamathoz vezetett, amely egyrészt a historikus és tradicionális csomagolással kapcsolatos tudás alkalmazását, másrészt a költséges "túlcsomogolás" vagy az árukár kockázatát növelő "alulcsomagolás" között egy ideális (műszakilag és költség szempontból egy optimálisnak tekinthető) helyzetet kíván létrehozni (Böröcz és Mojzes, 2008).

Az áruszállítás során fellépő hatások igen eltérőek lehetnek. A megfelelő csomagolás megtervezéséhez viszont szükséges tudni, hogy az egyes szállítási relációkban milyen nagyságrendben és milyen valószínűséggel léphetnek fel olyan igénybevételek (Csavajda és Böröcz, 2019).

A kutatásaim során az áruszállítások során véletlenszerűen létrejövő rezgések megfigyelésével foglalkoztam, azok felmérésével és elemzésével. Azért vált az értekezés kutatási témájának meghatározó területévé a szállítási csomagolások vizsgálata, mivel Magyarországon és Közép-Európában is egyedülálló infrastruktúrával ellátott győri Széchenyi István Egyetem laboratóriuma jelentős szerepet töltött be a mi régióknak ilyen jellegű kutatásainak és ipari igényeinek kiszolgálásában. Ugyanakkor ez a tudáskoncentráció csak az elmúlt közel 10 évben tudott a nemzetközi térben is megjeleníteni.

Különös cél volt, hogy mivel a régióban, sőt Európában sem születtek csomagolásvizsgálati célokból felmérések, elemzések és új vizsgálati módszertanok, ezért az ide vonatkozó ismeretanyagot tudományosan is bővítem. Ezért is választottam a kutatási területemül az ide érkező, itt áthaladó és innen elszállított áruk vasúti, kombinált és expressz disztribúciós csatornák vizsgálatát. A kutatás eredményei egyrészt azonnal implementálhatók az ipari gyakorlatban, másrészt új adatokkal és eredményekkel szolgálnak nemzetközi kitekintésben a témával világszerte foglalkozó kutatók számára. Nehezítette a kutatásokat, hogy a csomagolásvizsgálat területén hazánkban, de még csak a közeli földrajzi régióban

sincsenek kutatók és intézetek, amelyek a témával foglalkoznak, sőt alapvető szakirodalmi háttére sem készült el a témának hazánkban.

### ***1.2. Az értekezés felépítése***

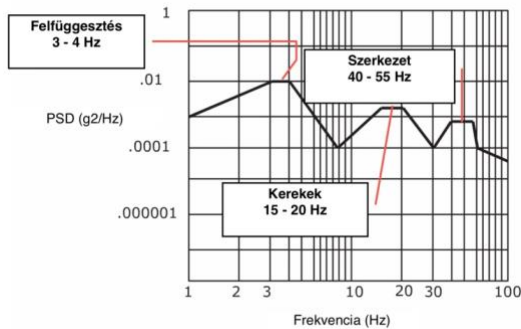
Az értekezés 1. fejezete a logisztikai célú csomagolások kapcsán alkalmazott vizsgálati és megfigyelési módszerek ismertetését, azok összefüggéseit tárgyalja. Mindez azért is nagyon fontos, mivel a hazai (de egyébként európai) felsőoktatásban ez a téma gyakorlatilag nem jelenik meg, miközben a fejlett gazdaságok mindenhol integrálják ezt a tudást a BSc és MSc oktatásba is.

A 2. – 6. fejezetek mindegyike a kutatási területemen már ismert illetőleg általam létrehozott új eredmények bemutatásával, elemzésével és összefoglalásával foglalkozik. A fejezetek egy, az adott témát ismertető általános résszel és az irodalomjegyzékre való hivatkozással kezdődnek, ezt követően kerül bemutatásra az általam végzett kutatási munka, majd az egyes fejezetek végén az új tudományos eredmények összefoglalása, végül a tézisek megfogalmazása zárja a fejezeteket. Itt, a tudományos eredmények összefoglalása mellett kitérek az adott eredmények gyakorlati alkalmazásának lehetőségeire és fontosságára is.

## **2. A kutatások módszertana**

### ***2.1. Az adatok elemzésének módszertana***

**A spektrális gyorsulás(teljesítmény)-sűrűség (PSD):** a véletlenszerű rázkódások közeli megismerését teszik lehetővé Fourier elemzés segítségével. Az alábbi ábra egy ilyen általánosnak tekinthető PSD görbét mutat be azzal a kiegészítéssel, hogy jelöli azokat a frekvenciasávokat, amelyen egy (laprugóval szerelt) nyerges félpótkocsis szerelvény egyes szerkezeteinek saját frekvenciatartományait, ahol jelentősebb rezgés gyorsulásokat mutatnak (felfüggesztés, kerekek, járműszekrény) (Singh J et al., 2006; Lu et al., 2010; Garcia-Romeu-Martinez et al., 2008; Zhou et al., 2015; Böröcz P et al., 2015a).



1. Ábra. Egy tipikus félpótkocsi rakodóterében mért függőleges gyorsulásértékek PSD görbéje

Statisztikai értelemben bármely frekvencián értelmezett PD szint (teljesítménysűrűség szintje) egy 0 gyorsulású átlagértékkel rendelkező adatsor varianciája. Így, - elméletben - megbecsülhetjük egy komplex, - a csomagolt termékre ható - rázkódás gyorsulásintenzitás mértékeit annak frekvenciakomponenseivel (Kerr, 1982; Kipp, 2008). Ez a következőt jelenti a gyakorlatban.

±1 PD intenzitású értékek fordulnak elő az esetek 68,5%-ban

±2 PD intenzitású értékek fordulnak elő az esetek 95,4%-ban

±3 PD intenzitású értékek fordulnak elő az esetek 99,7%-ban a véletlenszerű jelsorozatban.

**Teljes  $G_{rms}$  szint (Overall  $G_{rms}$ ):** a gyakorlatban nem csak egy PSD görbe azon pontjait vizsgáljuk, ahol kiugróan magasak az intenzitások, hanem a görbét a vizsgált teljes frekvenciatartományon értelmezhető effektív teljesítménnyel is jellemezzük. Ez gyakorlatilag a PSD görbe alatti terület nagysága. Ez arra is lehetséges ad, hogy egy adott alakú PSD görbe teljesítményszintjét a laboratóriumi szimulációk során változtatni tudjuk (Böröcz, 2016b). A teljes  $G_{rms}$  érték egyenlő a mintaként rögzített egyes események RMS értékeinek négyzetgyökével, kifejezve:

$$Teljes (Overall) Grms = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} PSD(f) df} = \sqrt{\sum_{i=1}^N RMS G_i}$$

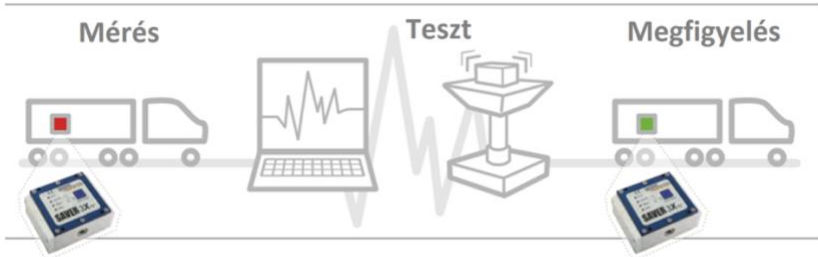
Ezt a teljes (overall)  $G_{rms}$  értéket minden esetben szokás megadni a PSD görbe mellé, nem csak a szabványokban, hanem a kutatási eredmények kapcsán is (Rouillard és Sek, 2013; Singh SP et al., 2008; Singh SP et al., 2012; Rissi et al., 2008; Singh SP, 2007)

**Statisztikához alkalmazott mutatószámok:** a kutatási eredmények elemzésénél és az eredmények gyakorlati implementálásánál (a rázóberendezést vezérlők jelgenerálásánál) fontos ismernünk a bekövetkező rázkódási események valószínűségét egy valós szállítás során (Rouillard és Sek, 2010; Rouillard, 2007; Rouillard, 2009). Ehhez a felmérések során rögzített adatok eloszlását és sűrűségfüggvényeit, illetőleg annak jellemzőit kell ismernünk. Az egyik az eloszlás laposságai, vagy csúcossági értékét mutató kurtózis (kurtosis), illetőleg a ferdeségét (skewness) mutató értékek.

## ***2.2. A terepi mérések során alkalmazott műszerezettség***

A rázkódások felmérésére általánosan elterjedt módszer a gyorsulásszenzorok alkalmazása. Ezek olyan érzékelőket tartalmaznak, amelyek a gyorsulással arányos elektromos kimeneti jelet produkálnak. Alapvetően kétféle módja van a terepi rázkódások mérésének: 1) folyamatos jelet rögzítő analóg vagy 2) a szakaszosan (mintavételi technikákat alkalmazó) rögzítő digitális módszer. Mindkét módszernek ismereteseek előnyei és hátrányai egyaránt.

A modern digitális műszerek belső memóriát használnak az események rögzítésére és olyan belső energiaellátó rendszert használnak, amely relatív hosszú ideig képes a rázkódások rögzítésére és tárolására. Ez úgy történik, hogy egy előre meghatározott időközönként aktiválódik a műszer és rögzíti az éppen felmerülő esemény, vagy egy előre beállított küszöbérték felett aktiválódik csak. Ezek a műszerek általában méretüknél fogva könnyebben elhelyezhetők a szállítás során. A módszertan lényegét az alábbi ábra mutatja be (Pidl és Böröcz, 2019a).



2. Ábra. Rezgémérő műszer terepen való alkalmazásának sémája

Kutatásaimhoz én a Lansmont Corp. Által gyártott 3X90 műszert használtam. Egy esetben ettől eltértem, amelyet később külön kifejtök. A műszer rövid technikai specifikációja:

- Teljes gyorsulás-idő függvény és jelalak mérése
- Programozható küszöbértékre és ébredési gyakoriságra
- 90 napra alkalmas energiaellátó akkumulátorral rendelkezik
- Kis méret (473 gramm, 95 x 74 x 43 mm)
- Háromirányú gyorsulásmérőt tartalmaz (100g mérés határig)
- Mintavételi frekvenciája maximum 5000 minta / másodperc
- Anti-alias szűrés alul átérésztővel, 10 – 500 Hz között

A felmérés mintavételezési módszerének és beállítási paramétereinek az elérni kívánt célhoz kell igazodnia (Richards, 1990).

**A mintavételi frekvencia:** korántsem triviális a műszer használata és beállítása (Rouillard és Lamb, 2008). Lényegében a mintavételi frekvenciának kellően nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy a végső Fourier-elemzésnek alávetett jelek megfeleljenek a Nyquist – Shannon kritériumnak, azaz a mintavételi frekvencia legyen legalább kétszer akkora, mint a vizsgálni kívánt frekvenciatartomány sávszélessége.

**A PSD felbontás:** ez a paraméter elsősorban a vizsgálni kívánt spektrális (frekvencia) felbontás igényéből származik. Az egyes alrekordok vizsgálatához tartozó ablakszélességnek elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy legalább két vagy három teljes ciklust kalkuláljon a Fourier elemzés a jel várható legalacsonyabb frekvencia-összetevőjéből (Nigam, 1983). A közúti járművek rezgése esetén ez általában a fő felfüggesztési rezonanciának felel meg és általában 1 és 4 Hz közötti.

**Trigger szintek:** a terepi felmérések során általában az idő alapú és jelalapú trigger módszert egyszerre használjuk (bár ez torz adatokhoz vezethet egyes esetekben - Rouillard és Sek, 2013). Ezért ezen paraméter beállítását több tényező megfontolása alapján kell elvégezni, amely természetesen össze kell függjön a felmérés valódi céljával. Ha a terepen végzett felmérés fő célja egy adott szállítási ágazat környezetének jellemzése, vagy egy valóságghú laboratóriumi vizsgálati szimulációs környezet létrehozása, akkor ésszerűbb időalapú triggerelési módszert alkalmazni (Steinwolf, 2005).

### ***2.3. A mérések körülményei és műszerbeállítások***

#### ***Vasúti mérések***

Összesen több, mint 4 500 km hosszon Magyarországon, Ausztriában, Németországban, Szlovákiában és Csehországban végeztem méréseket. 4 tengelyes Habiins 274-es típusú és Habiis 284-es típusú zárt vasúti kocsik kerültek felhasználásra. A műszerbeállítások:

- Műszer ébredési periódusa: 60 másodpercenként (időzítő alapú trigger); Jel alapú trigger ébredésnek küszöbértéke: 2,0 G
- Felvétel hossza: 2,048 s, Mintavételi frekvencia: 500 Hz
- Minta mérete: 1024; Frekvencia felbontás PSD kalkulációhoz: 0,48 Hz; Anti-aliasing szűrés frekvencia értéke 250 Hz

#### ***Kistehergépjárműves futárszolgálati mérések körülményei***

Az előzőekben bemutatott módszert alkalmaztam a felmérések során, ugyancsak rögzítve mindhárom térirányban az adatokat. A mérőműszer beállításai a következők voltak.

- Műszer ébredési periódusa: 10 másodpercenként (időzítő alapú trigger); Jel alapú trigger ébredésnek küszöbértéke: 2,5 G
- Felvétel hossza: 2,048s ; Mintavételi frekvencia: 500 Hz
- Minta mérete: 1024; Frekvencia felbontás PSD kalkulációhoz: 0,48 Hz; Anti-aliasing szűrés frekvencia értéke 250 Hz

Az átlagos PSD teljesítmények megállapításához 6 különböző kistehergépjárművet alkalmaztam, két különböző futárszolgáltatónál. A mérések helyszíne Győr-Moson-Sopron megye, Vas megye és



Komárom megye volt. Minden egyes jármű egy munkanapján keresztül megfigyelésre került, amely kb. 8 órát jelentett. A mérések során a terhelő tömeg és menetsebesség folyamatosan változott a 10 – 1000 kg és 1 – 130 km/h tartományban. A terhelő tömeg nagysága mindig attól függött, hogy éppen mennyi csomagot vett fel, illetve szállított ki az adott napon a fuvarozó.

Az útviszonyok hatásának elemzéséhez a felmért útszakokat négy csoportba osztottam: a) Autópálya ahol a jármű menetsebessége 100 – 130 km/h közötti volt; b) Főútvonal ahol a jármű menetsebessége 50 – 90 km/h volt; c) Mellékútvonal ahol a jármű menetsebessége 50 – 90 km/h között volt és d) Városi utak ahol a jármű sebessége 1 – 50 km/h között volt. A városi mérést Győrben folytattam. A terhelő tömeg változásának és a laprugók számának vizsgálatához alkalmazott körülmények során kettő járművet alkalmaztam. Az egyik jármű egy, a másik kettő laprugóval volt ellátva. A terhelő tömeg az első esetben kb. a hasznos terhelhetőség 20%-a (300 kg), míg a második esetben 80%-a (1 200 kg) volt.

### ***Tartós gyorsulások mérési körülményei***

A korábbiakban bemutatott műszerhez képest a tartós gyorsulás jelenséget egy arra alkalmas (DC táplálású), alacsony frekvenciatartományban tartósan fennálló jel adatrögzítésre képes MEMS gyorsulásszenzorral szerelt Lansmont SAVER™ 3D15 műszerrel végeztem. A műszer beállítása a következők voltak:

- Jel alapú trigger értéke: 0,15g
- Rögzítése időtartama: 10 s
- Mintavételezési frekvencia: 100 Hz
- Minta mérete: 1000
- Pre-trigger rögzítés nagyságrendje: 20 %

### ***Multimodális (konténeres) szállítások mérési körülményei***

Négy mérés került elvégzésre ehhez a kutatáshoz 2017 januárja és 2018 októbere között. Minden esetben az induló állam a konténerek számára Magyarország (Győr) volt. A célállomások a következők voltak: India (Aurangabad), Mexikó (San Jose Chiapa), és Kína (Changchun). Kínába kettő külön szállítási reláció került meghatározása. Az egyik konténer tengeren keresztül utazott, míg a

másik vasúton Oroszországon, a transz-szibériai és transz-mandzsúriai vasútvonalakon keresztül. A teljes távolság, amin a konténerek közúton megfigyelésre kerültek 2 093 km volt, vasúton 12 006 km, és 81 napnyi hajózás. A konténerek töltött tömege 19 820 – 22 695 kg között volt. Minden esetben a fuvarozási megbízó kérése volt a közúti szerelvényeknél a légrugós járművek alkalmazása.

*1. táblázat. Mérőműszer beállításai*

<b>Jellemző</b>	<b>Jel alapon</b>	<b>Idő alapon</b>
Felvétel hossza (ms)	2 048	2 048
Minta / másodperc (Hz)	500	500
Mintaméret	1024	1 024
Anti-aliasing szűrési frekvencia (Hz)	250	250
Frekvencia felbontás PSD-hez (Hz)	0,488	0,488
Jel alapú trigger (G)	0,50	-
Idő alapú ébredési gyakoriság (min)	-	7 min

## **2.4. A kutatások korlátai**

Az értekezés ezen a pontját megfogalmaztam azokat a korlátokat, amelyek a kutatások eredményeinek értelmezést vagy felhasználását közvetlenül érintik.

1. A laboratóriumi csomagolásvizsgálat során széles körben alkalmazott berendezések sokszor ideális körülményeket feltételeznek és egyszerűsített módon reprodukálják a valóságos környezetet (pl. egy szabadságfokú lengőrendszerként azonosítható rázóberendezések használatával). Ennek egyrésztől műszaki-technológiai, másrésztől anyagi (költség/haszon elvű) megfontolás az alapja.
2. A laboratóriumi rázóberendezések jelentős része nem képes olyan extrém fizikai igénybevételek előállítására, amely a valóságban megtörténhetnek, és meg is történnek. Ez a rázóvizsgálatokra is általánosan érvényes. A berendezések főként az átlagos igénybevételekhez vannak igazítva, így

például túlméretes áruk vizsgálatára nem alkalmasak, vagy olyan extrém amplitúdóval, vagy nagyon rövid / hosszú jellefutású időtartammal rendelkező rezgés gyorsulások elállítására, amelyek a valóságban előfordulhatnak.

3. Az alkalmazott (és e kutatásban is javasolt) PSD görbék az átlagos intenzitás alapján vannak kalkulálva, ezáltal eleve nem is tartalmazzák azokat a jelsorozatokat, amelyek extrém igénybevételek közben fordulnak elő.
4. A korábban kifejtettek szerint a rázóberendezések vezérlése során alkalmazott normális eloszlást követő véletlenszerű jelgenerátorok nem veszik figyelembe a tárgyalt nem-stacionárius és nem Gauss-i jelenségeket, hacsak a vezérlőberendezés nem alkalmas a felhasználó általi kézi programozásra (pl. kurtózis kontrollra).
5. A szabványos vizsgálatok jelentős része időgyorsítási megoldásokat alkalmaz a teszt idő rövidítésére, a lezajló rezgésgerjesztések teljesítményének mesterséges növelésével. Ezért a terepen szerzett adatok csak megfelelő óvatossággal hasonlíthatók össze a szabványok által alkalmazott teljesítményszintekkel.

Általános következtetéseket csak és kizárólag olyan mértékben vonhatunk le a kutatási eredményekből, amelyek a statisztikai érvényesség mellett a rezgés gyorsulásokat befolyásoló külső paramétereket is figyelembe veszi (így pl. hasonló átlagos útpályaminőség, hasonló átlagos menetsebesség, hasonló járműszerkezet és rugózás, hasonló terhelő tömeg, stb.)

### **3. Új tudományos eredmények**

#### ***3.1. A közép-európai vasúti áruszállítások kapcsán***

A kutatás során Közép-Európában egyedülállóan elvégzett mérésekkel laboratóriumban közvetlenül felhasználható véletlenszerű gerjesztésű rázóvizsgálati javaslatokat tettem a csomagolással foglalkozó tervező-, és vizsgálómérnökök számára. Az eredmények a nemzetközi kutatások és általánosan elterjedt nemzetközi szabványokkal is összehasonlításra kerültek. Az

eredmények felhasználásával a vasúti áruszállításban alkalmazott csomagolás pontosabb tervezéséhez, illetve megfelelőségének ellenőrzéséhez járultam hozzá. Az új vizsgálat módszerekkel az eddigieknél precízebben és szakszerűbben lehet elvégezni a vonatkozó rázóvizsgálatokat, amelyek hozzásegítenek elkerülni a felesleges túlcsomagolásokat, vagy megelőzhetik a csomagolás elégtelenségéből fakadó árukárokat. Jelen kutatás eredményei (Böröcz és Singh, SP 2017) a Packaging Technology and Science folyóiratban 2017-ben jelentek meg, továbbá 2016-ban a IAPRI (International Association of Packaging Research Institutes) 20-ik világkonferencián is bemutatásra kerültek (Böröcz és Singh SP, 2016).

Külön meg kell említeni, hogy a kutatás eredményei bekerülnek az ISTA 4AB szimulációs környezeti javaslatai közé (Enhanced Simulation Performance Test), amely a ténylegesen ismert disztribúciós csatornák alapján javasol tesz programokat. (Jelenleg az eredményeket közlő folyóirat jogtulajdonosával folynak ez ügyben tárgyalások).

### **3.1.1. Tézisek**

---

**1. tézis.** *Vizsgálataimmal megállapítottam, hogy Közép-Európában a zárt szekrényes vasúti áruszállítások során a rakodófelületen elhelyezett áruk mely frekvenciasávokban és milyen intenzitású véletlenszerű rezgéseket szenvednek el. Ehhez megadtam a függőleges irányú véletlenszerű rázkódások várható legmagasabb intenzitásait és annak frekvenciatartományait, illetve a véletlenszerű rezgések PSD burkológörbéjét.*

1. Mindez lehetővé teszi a szállítási ágazatban a kedvezőbb szállítási csomagolás kialakítását a felesleges többletanyag felhasználáshoz vezető "túlcsomagolás" elkerülésével és az "alulcsomagolásból" származó károk minimalizálásával.

2. Megalkottam egy véletlenszerű rázóvizsgálatokhoz alkalmazandó PSD teszt spektrumot (2.6. táblázat), megadva a PSD görbe frekvencia töréspontjait és intenzitás szintjeit. A teljes (Overall)  $G_{rms}$  értéket a javasolt teszt spektrum során 0,10-re kell állítani.

2. táblázat. A közép-európai vasút rakományok rázóvizsgálati tesztjeihez javasolt PSD spektrum

Frekvencia (Hz)	PD szintek $g^2/Hz$
0.5	0,00005
1	0,00009
1,5	0,00060
3	0,00140
4,5	0,00060
7	0,00002
30	0,00002
60	0,00005
200	0,00003

**2. tézis.** A zárt szekrényes vasúti áruszállítás során felmerülő véletlenszerű rezgések laboratóriumi szimulációjához alkalmazott PSD görbék összehasonlítását követően megállapítottam, hogy a közép-európai vasúti szállítási rendszer kalkulálható PSD görbéje alakjában hasonlít a népszerű ISTA teszt spektrumra, de annak csak közel 66%-os intenzitása mérhető a vizsgálati tartományban (1 – 100 Hz).

1. A véletlenszerű rázkódási események eloszlása nem Gauss-görbe szerű. Mindez jelentősebb befolyásolja a kialakítandó rakomány és csomagolt rendszer által elviselni szükséges rezgések intenzitását és annak időtartamát, amely közvetlen befolyásolja a várható károk kivédésére tervezett megoldások szükséges tömeg és térigényét a szállítás során. Ez laboratóriumi tesztek esetén azzal a következménnyel jár, hogy a rázóberendezés mozgását indukáló véletlenszerű jelgenerátor valószínűség-eloszlás sűrűségfüggvény alapon vett ellenőrzése során a normális eloszláshoz képest a függvény kurtózisának értékét függőleges irányú rázóvizsgálat esetén 9 körül kell meghatározni.

### ***3.2. A közúti futárszolgálatos szállítások során végzett felmérések és eredményei kapcsán***

A futárszolgálati ágazatban szállított csomagok megállíthatatlan térhódítása új kihívások elé állítja a csomagolás-, és tesztmérnököket. A nemzetközi kutatások és szakirodalmak is csak az elmúlt években kezdtek foglalkozni ezzel a kérdéskörrel. A kutatásaim során olyan új eredményekre jutottam, amelyek gyakorlati alkalmazásokba való bevezetése szinte azonnal lehetséges, és szükséges is. Egyrészt új eredményeket mutattam be az Európában elterjedt expressz szállítási környezet rázkódásai kapcsán, másrészt meghatároztam azon input változók hatását, amelyek végeredményben a rázkódásokat befolyásolják. Az eredmények felhasználásával az expressz futárszolgálatos áruszállításban alkalmazott csomagolás pontosabb tervezéséhez, illetve azok megfelelőségének precízebb ellenőrzéséhez járultam hozzá. Jelen kutatás eredményei (Böröcz és Singh SP, 2018) a Packaging Technology and Science folyóiratban jelentek meg, 2017-ben a Journal of Testing and Evaluation folyóiratban (Böröcz, 2017), és az FME Transactions folyóiratban (Böröcz, 2018).

Külön meg kell itt is említeni, hogy várhatóan az ISTA 4AB szimulációs környezeti javaslatok közé is bekerülnek a kutatás eredményei (Enhanced Simulation Performance Test), amely a ténylegesen ismert disztribúciós csatornák alapján javasol teszt programokat. (Jelenleg az eredményeket közlő folyóiratnál jogtulajdonosi egyeztetés van folyamatban).

#### ***3.2.1. Tézisek***

---

**3. tézis.** *Széles körű terepi mérésekkel megállapítottam, hogy Magyarországon a futárszolgálatok által alkalmazott kistehergépjárművek rakodófelületen elhelyezett csomagok mely frekvenciasávokban és milyen intenzitású véletlenszerű rezgéseket szenvednek el a megfigyelt 1 – 200 Hz tartományban.*

1. Mérésekkel meghatároztam egy véletlenszerű jelekből generált rázóvizsgálatokhoz alkalmazandó PSD teszt spektrumot

(3.11. táblázat), megadva a PSD görbe frekvencia töréspontjait és intenzitás szintjeit. A teljes  $G_{\text{rms}}$  értéket a javasolt teszt spektrum során 0,388.

*3. táblázat. A Magyarországon (Európában) a futárszolgálatoknál alkalmazott kistehergépjárművekben fellépő rázkódás jelenségét szimuláló javasolt PSD spektrum*

Frekvencia töréspontok	PD szint g <sup>2</sup> /Hz
1	0,00120
2	0,00850
3	0,00850
7	0,00060
9	0,00060
13	0,01200
16	0,01200
29	0,00012
50	0,00012
70	0,00060
100	0,00060
200	0,00005

2. A laboratóriumi szimulációhoz használható PSD görbe beállítása kapcsán figyelemmel kell lenni, hogy a kritikus frekvenciatartományai (2 – 3 Hz és 13 – 16 Hz) eltérnek a szakirodalomban közöltektől (3 – 5 Hz és 15 – 24 Hz).

---

**4. tézis.** *Igazoltam, hogy a futárszolgálatok által alkalmazott kistehergépjárművekben szállított csomagok laboratóriumi rezgésszimulációs vizsgálatainál a jelenleg széles körben alkalmazott szabványok alapján végzett vizsgálatok esetén az „alulcsomagolás” jelensége várható.*

1. Ennek oka, hogy a 5 – 18 Hz-es tartományban a valóságban szignifikáns mértékben magasabb rezgésintenzitások várhatók, mint a vizsgálati protokollban írtak. A vizsgálati eredményeimmel

eredményesebb védelmi rendszer tervezhető, amellyel elkerülhető az "alulcsomagolásból" származó esetleges árukár.

2. A kutatások méréseivel igazoltam, hogy a futárszolgálatos csomagszállítások kistehergépjárműves szállításai során a véletlenszerűen előforduló függőleges irányú rázkódási események valószínűség-eloszlás sűrűségfüggvények nem Gauss-i eloszlást követnek. A kurtózis értéke 0,74 – 1,84 között változik, útpálya viszonyoktól és menetsebességtől függően.

3. Meghatároztam, hogy a futárszolgálatok kistehergépjárműves szállításai során felmerülő csúcsgyorsulásokra milyen hatással van az útpálya minőségének, a terhelő tömeg változásának és a járműfelfüggesztéshez alkalmazott laprugók számának változása.

### **3.3. A kombinált (multimodális) áruszállítási körülmények kutatása kapcsán**

A kutatásból származó eredmények olyan új eredményeket közölnek, amelyek lehetővé teszik a konténerekben tapasztalható rázkódás jellegű igénybevételek szimulációját. Az eredmények hasznosítása csak úgy lehetséges, hogy az egyes áruszállítási módokhoz tartozó információkat külön-külön használjuk fel, mivel a vizsgálat igazolta, hogy a hosszú idejű vasúti szállítás a teljes szállítás lánc során felmért és átlagolással kalkulált PSD spektrumot túlságosan dominálja. Ugyanakkor az általános ismert PSD görbékhez képest megismert eltérések a laboratóriumi szimulációs gyakorlatban a vizsgálati körülmények reprodukálásakor azonnal implementálhatók. Jelen kutatás eredményei (Böröcz, 2019) a Packaging Technology and Science folyóiratban, illetve 2015-ben a Journal of Applied Packaging Research folyóiratokban (Böröcz et al., 2015) jelentek meg.

#### **3.3.1. Tézisek**

---

**5. tézis.** Széles körű terepi mérésekkel megállapítottam, hogy a multimodális konténeres áruszállítási rendszerben a nyerges szerelvényekkel és vasúti szállítással végzett szakaszokon milyen eltérésekkel várhatók a véletlenszerű rezgésgyorsulások a 1 – 200 Hz frekvenciatartományban.



1. A vizsgált földrajzi régiók vonatkozásában Indiában és Mexikóban a 1 – 6 Hz, Kínában pedig 10 – 18 Hz között magasabb rezgésintenzitás jelent. Vasúti szakaszokon Európában 3 Hz körül, Oroszországban és Kínában (transzszibériai és transzmandzsúriai vasútszakaszokon) pedig 5 – 6 Hz között várható a véletlenszerű rázkódási események legintenzívebb frekvenciasávjai. Utóbbi a teljes szállítás során kalkulálható kompozit PSD görbe alakját és csúcsait dominálja a megtett távolság (szállítási időtartam) függvényében.

---

**6. tézis.** *Megállapítottam, hogy a multimodális szállítások során alkalmazott konténerek átrakodásánál milyen mértékű csúcsgyorsulások várhatóak, milyen irányban és milyen nagyságrendben. A legmagasabb értékek függőleges irányban történnek, 99%-os előfordulással 4,45 g csúcsértékkel és 8 – 12 ms közötti jellefutási időtartammal.*

### **3.4. Hosszirányú és hosszú időtartamú terepi rázkódások kistehergépjárművel végzett áruszállítás rakomány-stabilitási vizsgálatainak kapcsán**

A kutatásból származó eredmények olyan új eredményeket közölnek, amelyek lehetővé teszik a kistehergépjárműben végzett szállítási feladatok során tapasztalható rakománystabilitást befolyásoló környezeti feltételek laboratóriumi szimulációját. A kutatás ebben a szállítási ágazatban elsőként került elvégzésre, továbbá szimulációs keretrendszer először került definiálásra a szállítójármű kategóriára. Az eredmények közvetlenül hatnak a helyes rakománykialakításra, a rakományképzéshez használt anyagok mennyiségileg és minőségileg helyes kiválasztására. Mindez elősegíti az árukárok előfordulási kockázatának mérséklését, illetőleg a túlzott anyaghasználatot a csomagolás kialakításához, amely gyakori jelenség a túlzott laboratóriumi szimulációs előírások kapcsán. Ez jelenleg a vészhelyzeti manőverekre való túlsomagolási reakcióval jár együtt. Jelen kutatás eredményei (Böröcz, 2023) a Packaging Technology and Science folyóiratban jelentek meg.

### **3.4.1. Tézisek**

---

**7. tézis.** *Vizsgálataimmal olyan laboratóriumi vizsgálati körülményeket határoztam meg, amely kistehergépjárművek áru- és rakományszállítása során megfigyelhető, menetirány szerinti fékezési és gyorsítási eseményekből származó, rakománystabilitási jelenségeket az eddigieknél pontosabb szimulációval teszi lehetővé laboratóriumban.*

1. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a jelenlegi tesztprotokollok szignifikáns mértékben túlzó előírásokat (rándulási erővektort) javasolnak a terepi körülmények során tapasztaltakhoz képest.

2. Kistehergépjárműves szállítás esetén a rándulás átlagos időtartama gyorsításnál 1,29 s a fékezésnél pedig 0,83 s, 3,01 m/s<sup>3</sup>, illetve 2,17 m/s<sup>3</sup> átlagos rándulási nagyságrend mellett. A tartós gyorsítási szakasz átlagos ideje 1,27 s fékezési és 1,39 s gyorsítási manőver esetén (0,25 g és 0,28 g átlagos csúcsgyorsulás mellett).

### **3.5. Halmazolt rakományok terepi rázkódásainak elemzése kapcsán**

A legdinamikusabban növekvő szállítási ágazatban (kicsomagos futárszolgálat) és az járműgyártási iparban végeztem olyan kutatásokat, amelyek a halmazolt rakományok szállítási közbeni viselkedését, és annak lehetséges laboratóriumi reprodukcióját vizsgálta. A szállítás közben várható rázkódás jellegű hatásokat nem csak a járművek által a padlószinten közvetlen gerjesztett rázkódások szempontjából, hanem a halmazolt rakományban a feljebb lévő sorokban is vizsgáltam terepi körülmények között. Kutatásaim nem csak a függőleges irányú rezgéseket, hanem a menetiránnyal azonosan és arra keresztirányban is kiterjedtek. A kutatásaim eredményei új információkat nyújthat azon vállalatoknak, amelyek az autóiiparban speciális áruszállító állványokat halmazolnak és szállítanak közúton, illetőleg azon futárcégek számára, amelyek kistehergépjárműveik kihasználtságát az áruk halmazolásával ellensúlyozzák. A kutatások eredménye továbbá a csomagolási

mérnökök számára is új információkat nyújtanak a szállítás során felmerülő környezeti hatásokról, amellyel az eddigieknél pontosabban reprodukálhatnak szimulációs környezetet laboratóriumban.

Jelen kutatás eredményei (Böröcz, 2020) a Journal of Testing and Evaluation, az Applied Sciences (Böröcz és Molnár, 2020) (Böröcz és Molnár, 2021), illetve 2020-ban az FME Transactions folyóiratokban (Molnár és Böröcz, 2020).

### **3.5.1. Tézisek**

---

**8. tézis.** *Vizsgálataimmal meghatároztam, hogy az autóiparban a halmazolt rakományok szállításhoz alkalmazott speciális szállítóállványok szállítás közbeni függőleges rázkódása során a halmazban a felső állvány rázkódási intenzitása mennyiben tér el a rakodófelületen, illetőleg az alsó sorban elhelyezett árun tapasztalható rázkódástól az 1 – 200 Hz frekvenciatartományban.*

1. Függőleges irányban a 90 Hz alatti rezgésszintek (PD) az egymásra helyezett állványon hasonlóak voltak a padlóhoz; e fölött azonban a rezgésintenzitás jelentősen felerősödik, egészen 200 Hz-ig. Ez a tendenciózus erősödés a magasabb menetsebességgel és kedvezőtlenebb útviszonnyal növekedik.

2. Megállapítottam, hogy kereszt-, és hosszirányban is a szállítóállványok szállítás közben felmerülő rázkódásainak intenzitása az 1 – 200 Hz-es teljes frekvenciatartományban szignifikáns mértékben felerősödik a halmaz felső sorára nézve. Ez 80 km/h menetsebesség esetén a menetirány szerint főként 4 – 5 Hz tartományban, 15 Hz és 90 Hz körül, illetőleg keresztirányban 15 és 110 Hz körül jelentős, és nem elhanyagolható a függőleges rezgésintenzitásokhoz képest.

---

**9. tézis.** *Meghatároztam, hogy a futárszolgálatok kistehergépjárműves áruszállításakor a halmazolt kiscsomagok esetén az áru szabad elmozdulása esetén milyen csúcsgyorsulású és az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban milyen intenzitású*

*véletlenszerű rezgésintenzitásokat kell a csomagoknak elszenvednie az egyes térirányokban, halmazolt soronként.*

1. A megfigyelt események csúcsgyorsulásai esetén a legmagasabb értékek a haladási irányra nézve keresztirányban történnek a halmazban felfelé növekedő tendenciát mutatva (4,16 g, 4,93 g, and 5,94 g). Függőleges irányban a legmagasabb csúcsgyorsulás értéke 3,99 g volt. A csúcsgyorsulások abszolút értékei növekednek a csomagok szabad elmozdulásának növekedésével.

2. Megállapítottam, hogy a véletlenszerű rezgésintenzitások a halmazolt kicsomagok minden pozíciójában a függőleges irányban a legmagasabb, amelyet a keresztirányú és hosszirányú rázkódások intenzitása követnek. A legintenzívebb véletlenszerű rázkódás frekvenciatartománya 8 – 50 Hz között van, továbbá intenzitása a halmazolt rakományban felfelé növekszik.

3. Megállapítottam, hogy a rögzített jelek valószínűség-eloszlás sűrűségfüggvényének kurtózis értéke tendenciózusan közelített a nulla felé (azaz a Gauss-i normális eloszlás kurtózisa felé), ahogy egyre magasabb halmaz szintet vizsgálunk, amely azt jelenti, hogy a felsőbb sorokban lévő csomagok véletlenszerű rázkódása közel jól jellemezhető a normális eloszlással.

## **Hivatkozott saját publikációk**

### **A doktori mű témakörében készült és hivatkozott saját közlemények**

Böröcz P, Mojzes Á, Csavajda P. (2015a) Measuring and Analyzing the Effect of Openings and Vibration on Reusable Pharmaceutical Insulated Boxes with Daily Distribution. Journal of Applied Packaging Research 2015, 7(2), Paper 2. DOI: 10.14448/japr.04.0002

Böröcz P, Singh SP. Measurement and Analysis of Vibration Levels in Rail Transport in Central Europe. Packaging Technology and Science, DOI: 10.1002/pts.222. (2017a)

Böröcz P, Singh SP. Measurement and Analysis of Vibration Levels in Rail Transport in Central Europe. of IAPRI 20th World Conference of Packaging Campinas, Brazilia: Packaging Technology Center - CETEA, (2016a)

Böröcz, P, Mojzes, Á. A csomagolás jelentősége a logisztikában. TRANSPACK Csomagolási és Anyagmozgatási Magazin 8 : 2 pp. 28-32. , 5 p. (2008)

- Böröcz, P. (2017b). Vibration levels in vans as a function of payload and leaf spring sheet number. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(1), 236-243.
- Böröcz, P. (2018a). Averaged vibration levels during courier parcel delivery service in small truck in Hungary. *FME Transactions*, 46(2), 211-217.
- Böröcz, P. (2019). Vibration and acceleration levels of multimodal container shipping physical environment. *Packaging Technology and Science*, 32(6), 269-277.
- Böröcz, P. (2020). Vibration Levels of Stacked Automotive Engine Rack in Truck Shipments as a Function of Vehicle Speed and Road Condition. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(1).
- Böröcz, P. Evaluation of truck vibration levels for packaging testing purposes in Hungary, Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016), Debrecen, Magyarország: University of Debrecen Faculty of Engineering, pp. 64-69. , 6 p. (2016b)
- Böröcz, P., Pánczél, C., Dunno, K., & Singh, S. P. (2023) Measurement and analysis of low-acceleration and long-duration longitudinal events using delivery van. *Packaging Technology and Science*, Vol. 36, No.1, 2023, pp. 45-53. <https://doi.org/10.1002/pts.2691>
- Böröcz, P., Singh, SP. (2018b). Measurement and analysis of delivery van vibration levels to simulate package testing for parcel delivery in Hungary. *Packaging Technology and Science*, 31(5), 342-352.
- Böröcz, P., Singh, SP., Singh, J. (2015b) "Evaluation of Distribution Environment in LTL Shipment between Central Europe and Africa." *Journal of Applied Packaging Research*, Vol. 7, No. 2, 2015, p. 2, <https://doi.org/10.14448/japr.04.0003>
- Böröcz, P.; Molnár, B. Measurement and Analysis of Vibration Levels in Stacked Small Package Shipments in Delivery Vans as a Function of Free Movement Space. *Appl. Sci.* 2020, 10, 7821.
- Csavajda, P., Böröcz, P. (2019). Climate Conditions in ISO Container Shipments from Hungary to South Africa and Asia. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 47(3), 233-241.
- Molnár, B., Böröcz, P. (2020). Performance and analysis of unitized stacked load units under vibration simulation. *FME Transactions*, 48(1), 96-101.
- Pidl, R, Böröcz, P. Discrete Fourier transform and cepstrum analysis of vibration events on semi-trailer truck. *FME Transactions* 47.1 (2019a): 177-182.

## Irodalomjegyzék

- Brandenburg K, Lee JJ. *Fundamentals of packaging dynamics*. MTS Systems Corporation, 2nd Edition, 1985
- García-Romeu-Martínez MA, Singh SP, Cloquell-Ballester VA. Measurement and analysis of vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed. *Packaging Technology and Science* 2008; 21(8): 439-451, DOI:10.1002/ pts.798

- Kerr, M. Random vibration for package testing. IBM technical report TR 02.995, 1982
- Kipp B. Environmental data recording, analysis and simulation of transport vibrations. *Packaging Technology and Science* 2008; 21(8), pp. 437-438, DOI: 10.1002/pts.842
- Lu F, Ishikawa Y, Shiina T, Satake T. Effect of vehicle speed on shock and vibration in truck transport. *Packaging Technology and Science* 2010; 23(2): 479–489. DOI:10.1002/pts.841.
- Nigam NC. *Introduction to Random Vibrations*. MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1983.
- Rissi GO, Singh SP, Burgess G, Singh J. Measurement and analysis of truck transport environment in Brazil. *Packaging Technology and Science* 2008; 21(4), 231–246. DOI: 10.1002/pts.797
- Rouillard V, Lamb M. On the effects of sampling parameters when surveying distribution vibrations. *Packaging Technology and Science* 2008; 21(8): 467–477. DOI: 10.1002/pts.827.
- Rouillard V, Sek M. Creating transport vibration simulation profiles from vehicle and road characteristics. *Packaging Technology and Science* 2013; 26(2): 82–95, DOI: 10.1002/pts.1967
- Rouillard V, Sek M. Creating transport vibration simulation profiles from vehicle and road characteristics. *Packaging Technology and Science* 2013; 26(2): 82–95, DOI: 10.1002/pts.1967
- Rouillard V, Sek MA. Synthesizing nonstationary, non-Gaussian random vibrations. *Packaging Technology and Science* 2010; 23(8): 423–439. DOI: 10.1002/pts.907
- Rouillard V. *On the Synthesis of Non-Gaussian Road Vehicle Vibrations*. Monash University: Melbourne, Australia, 2007.
- Rouillard V. Statistical models for nonstationary and non-Gaussian road vehicle vibrations. *Engineering letters* 2009; 17(4), 227-237.
- Rouillard, V. Quantifying the Non-stationarity of Vehicle Vibrations with the Run Test. *Packaging Technology and Science* 2014; 27(3): 203-219. DOI: 10.1002/pts.2024
- Singh J, Singh SP, Joneson E. Measurement and analysis of US truck vibration for leaf spring and air ride suspensions, and development of tests to simulate these conditions. *Packaging Technology and Science* 2006; 19(6): 309-323, DOI: 10.1002/pts.732
- Singh SP, Joneson E, Singh J, Grewal G. Dynamic analysis of less-than-truckload shipments and test method to simulate this environment. *Packaging Technology and Science* 2008; 21(8): 453–466. DOI: 10.1002/pts.787
- Singh SP, Saha K, Singh J, Sandhu, APS. Measurement and analysis of vibration and temperature levels in global intermodal container shipments on truck, rail and ship. *Packaging Technology and Science* 2012; 25(3): 149-160. DOI: 10.1002/pts.968

Singh SP, Sandhu APS, Singh J, Joneson E. Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India. *Packaging Technology and Science* 2007; 20(6): 381–392. DOI: 10.1002/pts.764.

Steinwolf, A, ConnonWH. Limitations of the Fourier transform for describing test course profiles. *Sound and Vibration* 2005; February: 12–17.

Zhou R, Yan L, Li B, Xie J. Measurement of Truck Transport Vibration Levels in China as a Function of Road Conditions, Truck Speed and Load Level. *Packaging Technology and Science* 2015; 28(11): 949–957, DOI: 10.1002/pts.2176