

## **MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS**

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

**Böröcz Péter János**



Széchenyi István Egyetem

Győr, 2023

## Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés .....</b>	<b>5</b>
<i>Az értekezés célja.....</i>	<i>5</i>
<i>Az értekezés felépítése .....</i>	<i>6</i>
<b>1. A szállítási csomagolások rázóvizsgálati módszereinek elméleti háttere és gyakorlati vonatkozásai.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1. A csomagolt termékeket érő környezeti igénybevételekről általában .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2. A szállítás fizikai környezetének jellemzői .....</b>	<b>8</b>
1.2.1. <i>A szállítás közbeni rázkódás jelensége, illetve annak csomagolással kapcsolatos összefüggései.....</i>	<i>8</i>
1.2.2. <i>Az áruszállítás közben megfigyelhető rezgések elméleti háttere.....</i>	<i>9</i>
<b>1.3. A véletlenszerű rázkódások elemzésének módszertana.....</b>	<b>11</b>
1.3.1. <i>A Fourier elemzés .....</i>	<i>12</i>
1.3.2. <i>A spektrális gyorsulás(teljesítmény)-sűrűség (PSD) .....</i>	<i>14</i>
1.3.3. <i>Terepi mérések berendezései és módszertana.....</i>	<i>16</i>
1.3.4. <i>A mintavételezési módszertan hatása az eredményekre.....</i>	<i>17</i>
<b>1.4. Laboratóriumi szimulációs technika és rendszereik .....</b>	<b>19</b>
1.4.1. <i>Rázóvezérlők véletlenszerűen generált jeleinek kritikája .....</i>	<i>21</i>
<b>1.5. Időgyorsítási eljárások elméleti és gyakorlati megközelítései .....</b>	<b>22</b>
<b>1.6. Kutatási korlátok .....</b>	<b>23</b>
<b>2. A közép-európai vasúti áruszállítások során mért rezgés gyorsulások elemzése .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. A kutatási részterület szakirodalmi háttere és megalapozottsága .....</b>	<b>25</b>
2.1.1. <i>A vasúti áruszállítás Közép-Európában.....</i>	<i>26</i>
<b>2.2. A terepi felmérés során alkalmazott vasúti járművek és útvonalak .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3. A mérési rendszer konfigurációja és az elemzéshez használt módszertan.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4. A mérési eredmények értékelése .....</b>	<b>29</b>
<b>2.5. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségek, tézisek.....</b>	<b>34</b>
2.5.1. <i>Tézisek.....</i>	<i>34</i>
<b>3. A közúti futárszolgálatos szállítások során végzett felmérések és eredményei</b>	<b>36</b>
<b>3.1. A mérési rendszer konfigurációi és az elemzéshez használt módszertanok ...</b>	<b>38</b>
3.1.1. <i>Mérőműszer és beállításai .....</i>	<i>38</i>
3.1.2. <i>Az átlagos PSD megállapításához alkalmazott mérési körülmények .....</i>	<i>38</i>
3.1.3. <i>A különféle útpályák hatásának elemzéséhez alkalmazott körülmények.....</i>	<i>39</i>
3.1.4. <i>A terhelő tömeg és laprugószám változásának vizsgálatához alkalmazott körülmények .....</i>	<i>40</i>
3.1.5. <i>Az elemzéshez használt módszertanok .....</i>	<i>41</i>

3.2. Az átlagos PSD szint meghatározása kompozit PSD görbék megadásával ...	42
3.3. A változó útpálya minőségének elemzése .....	45
3.3. A változó terhelőtömeg és laprugó számok hatása a rezgésgyorsulásokra ....	48
3.4. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek .....	51
3.4.1. Tézisek.....	51
<b>4. A kombinált (multimodális) áruszállítás körülményeinek felmérése és elemzése .....</b>	<b>53</b>
4.1. A kutatási részterület elméleti és gyakorlati vonatkozása.....	53
4.2. A kutatás során alkalmazott körülmények (útvonal relációk), műszerezettség .....	55
4.2.1. A felmérés disztribúciós körülményei .....	55
4.2.2. A műszerezettség és beállításai .....	57
4.2.3. Adatok elemzésének módszertana .....	57
4.3. A változó disztribúciós csatornák véletlenszerű eseményei és elemzésük .....	58
4.3.1. Átrakodási feladatok során tapasztalt rázkódás jellegű események .....	58
4.3.2. A kontinentális közúti szállítási feladatok felméréseinek eredményei .....	60
4.3.3. Kombinált áruszállítás tengeri hajós szakaszának eredményei.....	61
4.3.4. Kompozit PSD spektrumok a multimodális áruszállítás során.....	62
4.4. Komparatív értékelés a változó szállítási ágazatok igénybevételének hatásairól.....	62
4.5. A kutatás eredményeinek korlátjai .....	64
4.6. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek .....	64
4.6.1. Tézisek.....	64
<b>5. Hosszirányú és hosszú időtartamú terepi rázkódások kistehergépjárművel végzett áruszállítás rakomány-stabilitási vizsgálataihoz.....</b>	<b>65</b>
5.1. A kutatási részterület elméleti és gyakorlati vonatkozása.....	65
5.2. A kutatás során alkalmazott körülmények (útvonal relációk), műszerezettség .....	66
5.2.1. A szállítási feleadatok körülményei a mérések során .....	66
5.2.2. A műszerezettség és beállításai .....	67
5.2.3. Adatok elemzésének módszertana .....	67
5.2.4. Kompozit görbék .....	68
5.2.5. A rándulás vektora .....	68
5.3. A véletlenszerű gyorsítási és fékezési események és elemzésük.....	68
5.3.1. A rándulás időtartama .....	70
5.3.2. A tartós gyorsulás időtartam .....	71
5.3.3. A tartós gyorsulás átlagos értéke.....	71

5.3.4. Kompozit teszt görbék.....	71
5.3.5. A rándulási erő vektora .....	72
5.4. A kutatás korlátjai.....	73
<b>5.5. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek .....</b>	<b>73</b>
5.5.1. Tézisek.....	73
<b>6. Halmazolt rakományok terepi rázkódásainak elemzése .....</b>	<b>74</b>
6.1. A kutatási részterület elméleti és gyakorlati vonatkozása.....	74
6.2. A felmérések körülményei .....	76
6.2.1. Többutas speciális autópári szállítóállvány .....	76
6.2.2. Kicsomagok mérési körülményei a futárszolgálatos vizsgálat során.....	78
6.3. A szállítóállványos halmazolás vizsgálata nehéztehergépjárművön .....	81
6.4. Halmazolt kicsomagok vizsgálata futárszolgálatok kistehergépjárműves kiszállításánál .....	87
6.4.1. A kutatás eredményeinek a korlátai .....	90
<b>6.5. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek .....</b>	<b>91</b>
6.5.1. Tézisek.....	91
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>93</b>
<b>Hivatkozott saját publikációk.....</b>	<b>94</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>95</b>

## Bevezetés

### Az értekezés célja

A logisztikai célú csomagolás hétköznapi megjelenése gyakorlatilag évezredekkel korábbra tehető. Az áruk szállítása és mozgatása közben felmerülő igénybevételek számos árukárhoz és veszteséghez vezethetnek. Mi is mindannyian nap, mint nap találkozunk a csomagolással, de ezt a hasznot csak nehezen értelmezzük a hétköznapijainkban. A közvetlen érintkezés szinte kizárólag a fogyasztói csomagolással történő találkozás emlékeként él bennünk. Pedig kevésbé közismert, hogy az ipari felhasználású csomagolások éves kibocsátása a csomagolások teljes tömegét tekintve a világban meghaladja a teljes kibocsátás felét. Csak az Európai Unióban 2017-ben az egy főre jutó csomagolási kibocsátás meghaladta a 174 kg-ot (Eurostat, 2017), továbbá egyes statisztikák szerint a globális csomagolási piac éves kibocsátásának értéke 2024-re meghaladja az 1 000 milliárd USA dollárt (Smithers and Pira Lab, 2019).

A tömegtermelés és a vállalati hatékonyság felértékelődését követően az ipari csomagolás is olyan új szerepeket kapott, amelyek máig csak nagyon kis részben képezik a tudományos mainstream részét. A csomagolás védelmi, logisztikai és környezetgazdálkodási szerepe egyelőre még mindig csak az ipari csomagolással közvetlenül foglalkozó kutatók és mérnökök "terepe", továbbá a kutatásokban továbbra is előnyt élveznek a marketing szempontú és elsősorban fogyasztói csomagolás szerepét részletező tudományos munkák.

A helyzetet tovább bonyolítja az a tény is, hogy a modern tömegtermelést követően előtérbe került a globális piac közvetlen elérhetőségének fontossága és a nemzetközi áruszállítások egyre inkább növekvő igénye, amely mind abba az irányban hat, hogy a szállított áruk értékesíthető állapotát a célhelyre való távoli eljutásig is meg tudjuk őrizni. Ennek oka, hogy az ellátási láncok térbeli megnyúlása és komplexitása ma már rendkívül szignifikáns mértékű költségeket (vállalati veszteségeket) okoz a nem megfelelő állapotú termékek leszállításával. Ez oda vezetett, hogy az áruk védelmét (vagy a környezet védelmét) ellátó csomagolási rendszerek tervezése és vizsgálata is mindinkább fontossá vált az ipari gyakorlat számára a felmerülő árukárok elkerülése érdekében. Mindez egy olyan optimalizálási folyamathoz vezetett, amely egyrészt a historikus és tradicionális csomagolással kapcsolatos tudás alkalmazását, másrészt a költséges "túlcsomagolás" vagy az árukár kockázatát növelő "alulcsomagolás" között egy ideális (műszakilag és költség szempontból egy optimálisnak tekinthető) helyzetet kíván létrehozni. Ez az ideális helyzet a társadalmi környezeti hatásokkal kapcsolatos elvárásokat és a vállalati gazdaságossági szempontokat ma már együttesen kívánja a fókuszba helyezni (Böröcz és Mojzes, 2008).

Az előző bekezdés gondolatai indikálták, hogy a háború utáni vezető gazdaságok számos egyetemi kutatóhelyet és vizsgálólaboratóriumot hoztak létre a témában. Ezek főként az USA-ra (Virginia Tech, Michigan State University, Clemson University, Rochester Institute of Technology és Calpoly College), továbbá Ausztráliára koncentráltak (Victoria University). Európában ekkor még csak néhány ilyen jellegű labor (Dortmund, Hamburg) alakult, a kelet-európai blokkban pedig csak a 70-es években jelentek meg (Győr, Varsó). Jelenleg is ez a tendencia érvényesül, leszámítva Kínát, ahol gomba módjára szaporultak az elmúlt évtizedben a szállítási csomagolások

vizsgálatával foglalkozó laboratóriumok. 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.

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 régióink ilyen jellegű kutatásainak és ipari igényeinek kiszolgálásában. Ugyanakkor ez a tudáskoncentráció csak az elmúlt közel 10 évben tudott a nemzetközi térben is megjeleni. Ez az értekezés azokat a kutatásokat és eredményeket igyekszik a szállítási csomagolások rázóvizsgálatának szakterületén bemutatni, amelyek a győri laboratóriumban születtek, részben a saját kutatási eredményeim alapján, részben pedig a már végzett, vagy jelenleg aktív PhD kutatások során, a témavezetésemmel.

Különös cél volt, hogy mivel a régióban, sőt Európában a nyerges-szerelvényekkel történő áruszállítást leszámítva gyakorlatilag nem születtek felmérések, elemzések és új vizsgálati módszertanok, ezért az ide vonatkozó ismeretanyagot tudományosan is bővítsem. 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.

Az értekezés alapvető tudományos kérdése, hogy a kutatások során alkalmazott körülmények és szállítási megoldások ismeretében a nemzetközi szakirodalom megfelelő információt nyújt-e a szállítási csomagolások laboratóriumi vizsgálataihoz, illetőleg megfelelő mértékben járul-e hozzá a várható sérülések kockázatának mérsékléséhez. További tudományos cél volt, hogy definiálásra kerüljenek olyan ismeretek, amelyek az eddigieknél pontosabb információt nyújthatnak a szállítás során várható körülmények laboratóriumi reprodukálásához.

### **Az értekezés felépítése**

Az értekezés 1. fejezete a logisztikai célú csomagolások kapcsán is felmerülő elméleti háttérrel röviden és az ipari, tervezői gyakorlatban egyre nagyobb teret nyerő vizsgálati módszerek ismertetését. 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 meglévő és 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.

Az értekezésen végigvonuló témakör a közlekedési rendszerekben az áruszállítást végző járművek véletlenszerű rezgés gyorsulásainak szállítás közben való felmérését, elemzését és laboratóriumi reprodukálásukat tárgyalja. Az egyes fejezetek külön tárgyalják az egyes disztribúciós csatornáknál (vasúti, kombinált és expressz szállítások során) fellépő rázkódás jellegű eseményeket.

Az 5-ik fejezete az értekezésnek a kistehergépjárművel végzett szállítási feladatokban során megfigyelhető fékezési és gyorsítási manőverekből származó tartós gyorsulási és rándulási események vizsgálatával foglalkozik azzal a céllal, hogy a csomagolást tervező és laboratóriumi körülmények között vizsgáló kutatók és mérnökök számára az eddigieknél pontosabb információkat nyújtson.

A 6-ik fejezetben a halmazolt rakományok dinamikájának vizsgálata került a kutatás fókuszába. Mint elsőre is tisztán látható ez nem elsősorban magának a disztribúciós csatornával, vagy az alkalmazott szállítási ágazat megválasztásával együtt járó rázkódások elemzésével foglalkozik, hanem a logisztika azon sajátosságából adódó körülménnyel, hogy az áruk optimalizált egységbe foglalása a járművek kapacitásának jobb kihasználása végett elengedhetetlen feltétellé vált. Ez ugyanakkor azt jelenti, hogy a halmazolt rakományok rázkódásra adott válaszrezgései a halmazolt rakományban megváltoznak. Viszont ezt a széleskörben elterjedt szabványok nem tárgyalják. E témakörben a kutatások nemrég kezdődtek, de a már megjelent közlemények kapcsán elegendő eredményre jutottam, hogy következtetéseket vonjak le a rakományok viselkedéséből, majd az eredményeket implementálni próbáljuk az ipari gyakorlatba.

# 1. A szállítási csomagolások rázóvizsgálati módszereinek elméleti háttere és gyakorlati vonatkozásai

## 1.1. A csomagolt termékeket érő környezeti igénybevételekről általában

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, amelyek a csomagolt termék értékesíthetőségét befolyásolják, vagy akár annak tönkremeneteléhez járulhatnak hozzá. Ha a tökéletes biztonságra törekednénk, akkor a már a bevezetőben is említett olyan mértékű "túlcsomagolást" kellene terveznünk, amely egyrésztől ésszerűtlen és gazdaságtalan lenne, másrésztől értelmetlen környezeti hatásokat okozna (Böröcz, 2022).

Így a csomagolás megtervezéséhez, majd annak megfelelőségi vizsgálataihoz információkat kell szerezni, felméréseket kell végezni az ellátási láncok különféle értékesítési csatornáin, illetőleg a logisztika legkülönbözőbb anyagmozgatási területein. A minimálisan szükséges csomagolás védelmi funkciójának megtervezésénél a termék által elviselhető hatások és a külső környezetből érkező hatások különbségét kell csak a csomagolt-termék rendszernek elviselni. Ilyen jellegű környezeti hatás a rázkódás jelensége is, amelyről ismereteink nélkülözhetetlenek a csomagolás szakszerű optimalizálásához. Általánosan, ezeket a környezeti feltételeket a logisztikában az alábbiak szerint csoportosíthatjuk.

1. Szinuszos stacionárius rezgés
2. Véletlenszerű stacionárius és nem stacionárius rezgés
3. Nem stacionárius rezgések (leesés, borulás, ringás)
4. Állandó gyorsulás

A kutatásaim során az áruszállítások során véletlenszerűen létrejövő rezgések megfigyelésével foglalkoztam, azok felmérésével és elemzésével.

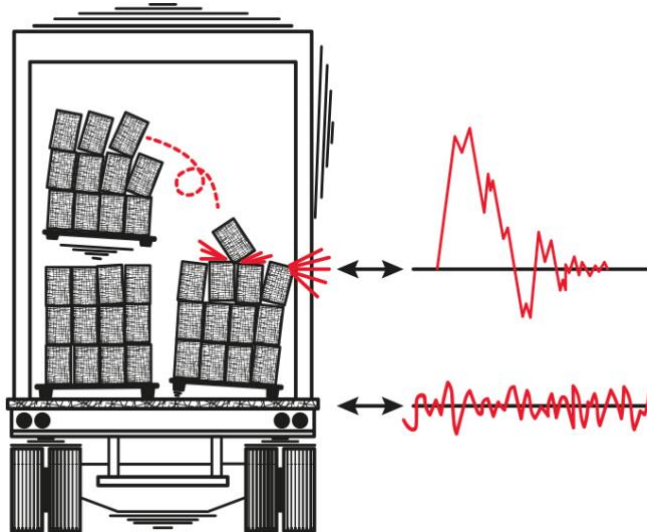
## 1.2. A szállítás fizikai környezetének jellemzői

### 1.2.1. A szállítás közbeni rázkódás jelensége, illetve annak csomagolással kapcsolatos összefüggései

A csomagok, termékek, egységpakományok, a szállítójárművek, az anyagmozgató gépek és berendezések által átadott, generált vagy elszenvedett mozgásszerű események a rázkódás jelenségével írhatók le. A szállítás közben felmerülő rázkódás jellegű mozgások általában nem kívánt jelenségek, mivel elsődleges forrásai lehetnek a szállított termékek vagy áruk károsodásának.

A szállítás közben felmerülő rázkódások alapvetően kettő forrásból származhatnak. Külső forrásúak például a pályaegyenetlenség által gerjesztett mozgások, illetőleg belső forrásúak például a jármű kerekei által átadott kiegyensúlyozatlan forgómozgások, vagy maga a jármű motorjától származó rázkódások (Gillespie, 1985). A járműre a pálya által gerjesztett mozgás hat, majd ez pedig a jármű kerekeinek és azok felfüggesztésén keresztül a jármű szerkezetével együtt átadódik a szállított termékekre, amelyeket a rakodófelületen helyeznek el. Ezt mutatja be a 1.1 ábra.





1.1. ábra. Útpálya által gerjesztett rázkódások átadódása a járműszekrényben elhelyezett áru (Brandenburg and Lee, 1991)

A jármű padlóján fellépő rezgéseket három térirányú összetevőre bonthatjuk fel: függőleges, keresztirányú (oldalirányú) és hosszanti irányú (menetirány szerinti). A szakirodalomban általánosan elfogadott, hogy közúton közlekedő teherautók rakterében és a félpótkocsikban a legnagyobb intenzitású rezgés a hátsó tengely felett és a függőleges irányban figyelhető meg (Marcondes et al., 1988) (Singh SP, 1992).

A csomagolással foglalkozó mérnökök általános feladata, hogy olyan csomagolószerkezetet tervezzenek, amelyek ezeket a rezgéseket, illetve annak hatásait mérsékeljék, ezáltal védve a szállított áruk minőségét (Tihanyi-Kovács et al, 2023). Ugyanakkor csak a valós rázómozgások megfigyelése és elemzése adhat pontos információt arról, hogy milyen párnázó vagy rezgés csillapító rendszert tervezzen egy csomagolási mérnök.

### 1.2.2. Az áruszállítás közben megfigyelhető rezgések elméleti háttere

A rezgéseket általában két kategóriába sorolhatjuk: 1) a gerjesztett (ha folyamatos külső gerjesztés van) és 2) külső gerjesztés nélkül létrejövő szabad rázkódást (a bemeneti forrás megszűnik). A szállítás során fellépő rázkódás típusa alapvetően gerjesztett rendszer, de bekövetkezik szabad rezgést is, amikor a külső kényszerítő erő megszűnik, de a rendszer még folyamatosan csökkenteni rezgésszintjét egészen addig, amíg teljesen le nem áll. Hasonlóképpen akkor is, amikor a jármű például egy kátyúra fut, amelyen a gerjesztett rezgés erőteljesebbé válik mialatt a kátyún áthalad a jármű, majd azután átvált szabad mozgásba, amíg a gerjesztett rázkódás energiája el nem tűnik vagy véget nem ér. A járműrendszerekben (Blake, 1988) a csillapítás mindig jelen van és elvezeti azt az energiát, amely a rendszert gerjesztette egészen addig, amíg a csillapítás miatt a mozgás (rázkódás) teljesen meg nem szűnik.

#### 1.2.2.1. A rezgésgyorsulás, RMS gyorsulás és a mozgás frekvenciája

A rezgés aktuális állapotát annak frekvenciájával és a mozgás amplitúdójával lehet jellemezni. Egy rakodófelületen elhelyezett rakomány olyan, mint egy rugóra helyezett fel-, és lefelé lengő tömeg. Ezt a harmonikus mozgást a frekvenciája és a

csúcsgyorsulása határozza meg. A frekvencia az a szám, ahányszor egy mozgási ciklus megismétli önmagát egy időegység alatt, és a csúcsgyorsulás egy teljes ciklus gyorsulásának maximálisan felvett értéke. Ha egy rendszer szabadon rezeg, akkor a természetes frekvenciáján végez rezgést (Newland, 1984), ez a természetes frekvencia elsősorban a tömeg és a rendszer merevségének függvénye. A csúcsgyorsulás pedig az egyensúlyi helyzetből való maximális elmozdulás mértékeként értelmezhető. A rendszer rezgésének frekvenciája a következő összefüggéssel írható le.

$$a_{pk} = \frac{d_{max}(2\pi f)^2}{g} \quad (1.1)$$

, ahol  $a_{pk}$  a csúcsgyorsulás  $g$ -ben kifejezve (nehézségi gyorsulás értéke,  $9,81\text{m/s}^2$ ),  $d_{max}$  az egyensúlyi helyzetből való elmozdulás mértéke,  $f$  a frekvencia értéke.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

Az egyenlet lineárisan módon leírható rendszerekre alkalmazva azt mutatja, hogy a csúcsgyorsulás egyenesen arányos a maximális elmozdulással és a rezgés frekvenciájának négyzetével. A gyakorlatban ez esetünkben azt jelenti, hogy ha a járműrakodófelületének rezgés gyorsulása eléri az 1  $g$ -t (leküzd a nehézségi gyorsulás értékét), akkor a felrakodott áruk "ugrálni" kezdenek. Mivel a csomagokat ritkán rögzítik közvetlenül a jármű rakodófelületére, így, ha a jármű padlójának függőleges rezgése 1  $g$ -nél nagyobb, akkor a csomag nem követi azt amikor a padló lefelé mozog, hanem egy pillanatra a levegőben marad, majd utána a padlónak ütközik. Ennek hatására a csomagok jellemzően meghaladják a gerjesztő rezgés csúcsgyorsulás szintjeit.

Itt külön hangsúlyozni kell, hogy háromféleképpen is kifejezhetjük (meghatározhatjuk) a megfigyelhető gyorsulásértéket. A csúcsgyorsulás értékével (amplitúdójával, zero to peak amplitúdó), vagy a gyorsulás szinusz hullámon vett csúcstól csúcsig tartó amplitúdójával (peak to peak amplitúdó), illetőleg az RMS érték (root mean square) megadásával. Az RMS érték gyakorlatilag a mozgás effektív energiataralmát hivatott kifejezni a görbe alatti terület nagyságának megadásával.

#### 1.2.2.2. A gerjesztett rezgőmozgás szállított árura gyakorolt jellemzői

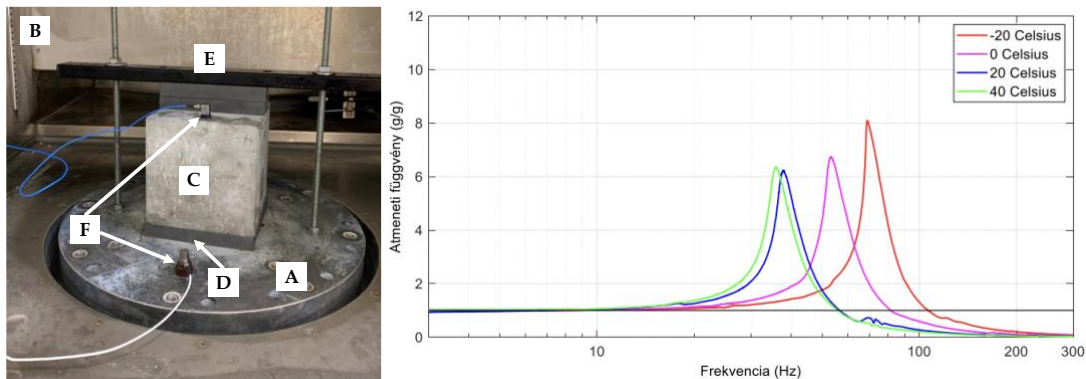
Tapasztalati ismereteinkből és matematikai analízisből három általános megállapítás vonható le az áruszállítás közben felmerülő lengésekkel kapcsolatban (Newland, 1984) (Brandenburg and Lee, 1991) (Pánczél, 2008):

1. A szállított áru válaszrezgésének frekvenciája megegyezik a gerjesztő-mozgás frekvenciájával, azaz a csomagolt termék nem a saját frekvenciája szerint fog rezegni.
2. A csomagolt rendszer rezgésének kimenő amplitúdója egy kalkulálható arányban áll a gerjesztő rezgés bemenő amplitúdójával (ez a szám az erősítési tényező), azaz a Kimenő amplitúdó = Bemenő amplitúdó x Erősítési tényező.
3. A mozgó csomagon mérhető maximális gyorsulás közvetlen összefüggésben van a gerjesztő rezgésnek maximális gyorsulásával ugyanezen erősítési tényező által, azaz Maximum Kimenő Gyorsulás = Maximum Bemenő Gyorsulás x Erősítési Tényező (M).

A fenti áttekintésben egy egyszerű kifejezés került felírásra a csomagolt terméken válaszként tapasztalható kimenő mozgásra. Amennyiben  $f_f$  gerjesztő, vagy bemenő frekvencia, és  $f_n$  a lineáris lengőrendszer saját frekvenciája az erősítési tényező ( $M$ ) a következőképpen értelmezendő (Pánczél, 2008): ahol az  $f_f/f_n$  arány nagyon kicsi, ott az  $M$  értéke alacsony, ez azt jelenti, hogy ahol a gerjesztő frekvencia sokkal kisebb, mint a saját frekvencia, ott a kimenő és bemenő frekvencia közel egyenlő egymással.

Ahol a gerjesztő frekvencia értéke közelíti a saját frekvencia értékéhez, ott az  $M$  értéke nagyon gyorsan emelkedik, azaz az arány 1-hez közelít. Ez azt jelenti valójában, hogy a kimenő frekvencia többszöröse a bemenő értékének. Az  $f_f/f_n = 1$  pontban, ahol a gerjesztő frekvencia pontosan egyenlő a saját frekvenciával, az  $M$  értéke matematikailag meghatározhatatlanná válik. Ez a jelenség a rezonancia, mely valójában azt jelenti, hogy a nagyon kicsi bemenő rezgés is különösen nagy kimenő rezgést okoz.

Az 1.2. ábrán egy laboratóriumi példán keresztül mutatom be a fentebb taglalt elméleti összefüggések, ahol XPE (cross-linked polyethylene) csomagolásokban alkalmazott rezgést csillapító hab rezgésátviteli tulajdonságait vizsgáltuk változó hőmérséklet mellett a Csavajda Péter végzett PhD hallgatómmal.

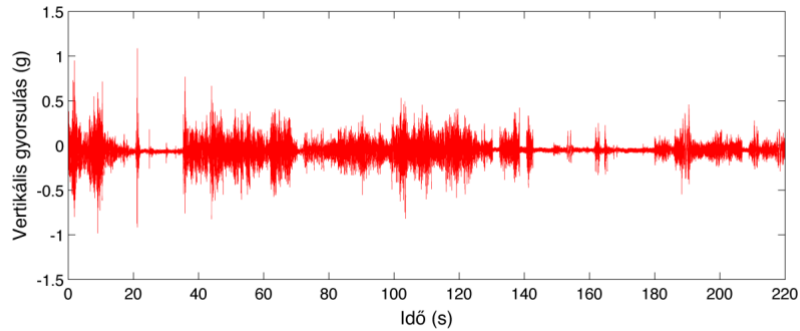


1.2. ábra. A laboratóriumi mérési rendszer XPE csomagolás párnázóanyag csillapítási karakterisztikájának mérésére (a) rázórendszer, (b) klímasekrény, (c) terhelő betontömeg, (d) vizsgálati minta, (e) rögzítő elem és (f) gyorsulásszenzor (Csavajda és Böröcz, 2020)

A csomagolóanyag csillapítási karakterisztikájának becslésére lineáris egyszabadságfokú rendszer viszkózus csillapítási egyenletei alkalmazhatók (Mojzes és Böröcz, 2015) (Military Standardization Handbook, Package Cushioning Design, 1978), amellyel meghatározható a csomagolóanyag csillapítási tulajdonsága rezgésátviteli függvény megismerésével (Goodwin and Young, 2011), (Guo és Zhang, 2004).

### 1.3. A véletlenszerű rázkódások elemzésének módszertana

A valóságban az áruszállítás közben a csomagolt termékeket érő hatásokat nem egy tisztán szinuszos jelalakú és adott frekvenciájú rázkódás éri. Ezt mutatja be az 1.3. ábra. Ez a véletlenszerű rázkódás felfogható több különböző frekvencián létrejövő és különböző amplitúdóval rendelkező szinuszos jellegű mozgásnak. Bármely időpillanatot veszünk alapul gyakorlatilag ezt a megállapítást tehetjük.



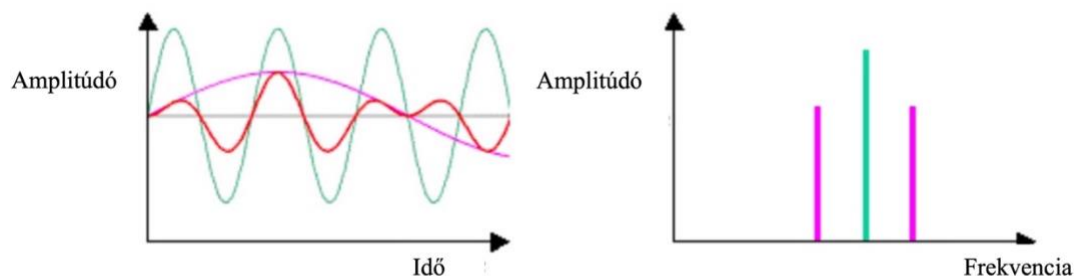
1.3. ábra. Véletlenszerű rezgés egy nyerges félpótkocsi rakodófelületén (Böröcz, 2017)

Könnyen belátható, hogy ez a típusú rezgésgerjesztés teljesen különbözik a fejezet korábbi részeiben bemutatottaktól. Azaz kijelenthető, hogy egy adott termék-csomagolási rendszer egy adott frekvencián történő gerjesztése nem adhat egzakt választ a valóságban létrejövő árukárok forrására. Így például, ha egy csomagolt terméknek kettő kritikus pontja, amelyet védeni kell és azok eltérő sajátfrekvenciával rendelkeznek, akkor válaszrezgéseik is eltérőek lesznek egy adott frekvencián gerjesztett mozgásra, azaz, ha egyszerre több frekvencián lép fel gerjesztés, akkor az már kárt okozhat.

Fentebb részletezett az oka annak, hogy a csomagolásvizsgálatok során a legelterjedtebb vizsgálati módszerek véletlenszerűen gerjesztett rázómozgásokkal operálnak, hiszen valóságghűbb igénybevételt szimulálnak. A fejezet további részében ezzel fogok foglalkozni.

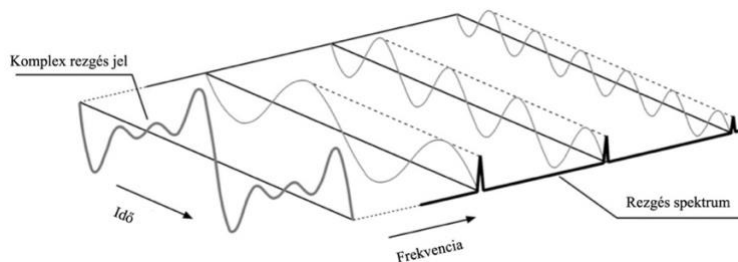
#### 1.3.1. A Fourier elemzés

A korábbiakban bemutatott szerint a csúcsgyorsulások bemutatását az amplitúdó, vagy RMS amplitúdó nagyságával jellemeztük. Ugyanakkor van egy módszer, amely a lezajló rázkódási eseményt frekvenciatartománya alapján tudjuk elemezni. Ezt mutatja be az 1.4. ábra.



1.4. ábra. Különböző frekvenciájú rázkódások frekvenciatartományban történő ábrázolása (National Instruments, 2020)

Az 1800-as évek elején Jean-Baptiste Fourier bizonyította, hogy különböző szinuszos hullámformák összeadásával komplex hullámok hozhatók létre (az 1.5. ábra ezt illusztrálja) az eredeti hullámformák frekvenciája és amplitúdójuk alapján.



1.5. ábra. Különböző frekvenciájú szinuszos jelekből képzett komplex jelalak

Esetemben e matematikai analízis azon tulajdonsága használható, hogy ez fordítva is érvényes. Azaz, a meglévő komplex hullám (felvett rázkódási jel) bontható fel egyszerű szinuszos összetevőkre, majd az egyes összetevők így ábrázolhatóvá és elemezhetővé válnak azok frekvenciaösszetevőik szerint. Ezt a matematikai elemzési formát hívjuk Fourier elemzésnek.

A kutatásaimban a fentebb bemutatott elemzés használatára a következők szerint fogalmazható meg. Az áruszállítás közben megfigyelhető véletlenszerű, ugyanakkor nem tökéletesen harmonikus mozgási (rázkódási) esemény transzformálható olyan formába, amelyben az egyes frekvenciájú komponensek teljesítménye (intenzitása) azonosítható, ezáltal meghatározva azokat a kritikus teljesítményű frekvenciasávokat.

A Fourier elemzés úgynevezett Fourier sorokat alkalmaz, amely sorozat a 1.3. egyenlet alapján összegezi a szinuszos és koszinuszos összetevőket. A Fourier sor egy adott jel esetén  $x(t)$ , amelynek a  $T$  periódusa a következőképpen néz ki:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t \quad (1.3)$$

, ahol  $a_n$  és  $b_n$  koefficiensek az alábbiak szerint:

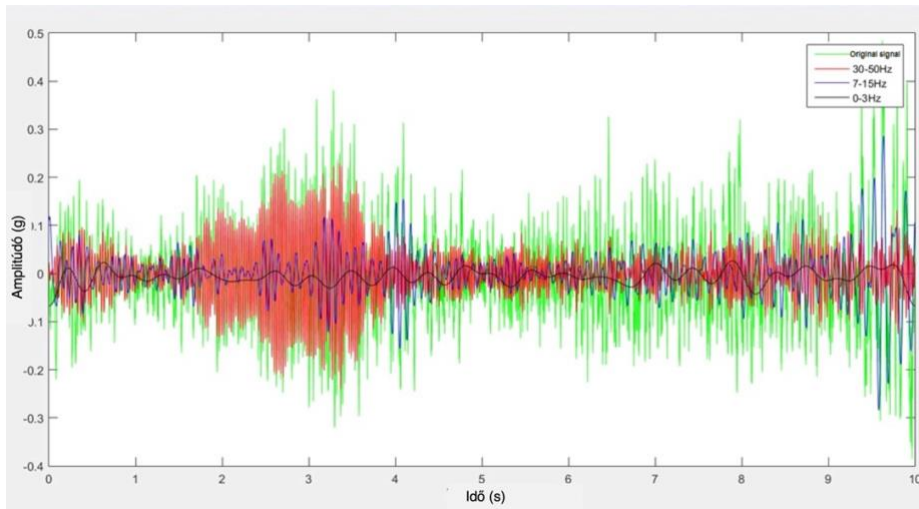
$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos k\omega t \quad (1.4)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin k\omega t \quad (1.5)$$

Az  $a_n$  és  $b_n$  képviselik azon szinuszos és koszinuszos hullámok amplitúdóját képviseli, amelyből képezhető az eredeti  $x(t)$  jelforma.

Ugyanakkor az elemzésnek előfeltétele annak ismerete, hogy milyen frekvenciahatárok között várható a valós eseményekben a jelentős (kritikus) teljesítménnyel rendelkező csúcsgyorsulás jelek. Számos tanulmány igazolja, hogy a közlekedési rendszerekben az áruk rakódóterében az 1 – 200 Hz tartományban található, illetőleg a légi szállítás esetén 1 – 300 Hz tartományban. Ez azt jelenti, hogy a csomagolt termékeket gerjesztő intenzív mozgásoknak ez a frekvenciatartománya, azaz ezt kell megfigyelni, felmérni és elemezni, majd laboratóriumban szimulálni. Továbbá olyan felbontásban kell ezt megtennünk, amely biztosít olyan értelmezhető frekvenciasávokat a vizsgálandó tartományban, amely választ adhat a kritikus intenzitású frekvenciapontokra. A csomagolásvizsgálatban ezt az úgynevezett BPF (band pass filter, sávszűrő) alkalmazásával érhetjük el (Brandenburg and Lee, 1991). Ha elegendő sávszűrőt alkalmazunk ahhoz, hogy lefedjünk egy vizsgálandó frekvenciatartományt (esetünkben a 200 Hz-ig tartó tartományt), akkor értelmezhetjük egy adott frekvenciasávban a

szinuszos összetevőket, azok frekvenciája és amplitúdója szerint. Ezt mutatja be a 1.6. ábra.



1.6. ábra. Félpótkocsis szerelvény rakodóterében rögzített gyorsulásértékek időszerinti függvénye sávszűrés nélkül és sávszűréssel (zöld: eredeti jel, piros: 50–70 Hz, kék: 7–15 Hz, fekete: 0–3 Hz) (Pidl és Böröcz, 2019)

### 1.3.2. A spektrális gyorsulás(teljesítmény)-sűrűség (PSD)

Az előző alfejezetben bemutatott Fourier elemzés és sávszűrők alkalmazása a véletlenszerű rázkódások közeli megismerését teszik lehetővé, ugyanakkor van egy fontos hiányosságuk, mégpedig az, hogy bármely szinuszos összetevő amplitúdója a Fourier analízisben konstans, miközben a véletlenszerű rázkódás karakterisztikája az, hogy az egyes frekvenciasávokban felvett jelek amplitúdója folyamatosan változó mennyiségben fordulnak elő. Így például lehet, hogy egy bizonyos 1 Hz-es sávzélességben 0,5 g csúcsgyorsulást mérünk az egyik időpillanatban, de a következőkben már 0,2 g-t fogunk mérni.

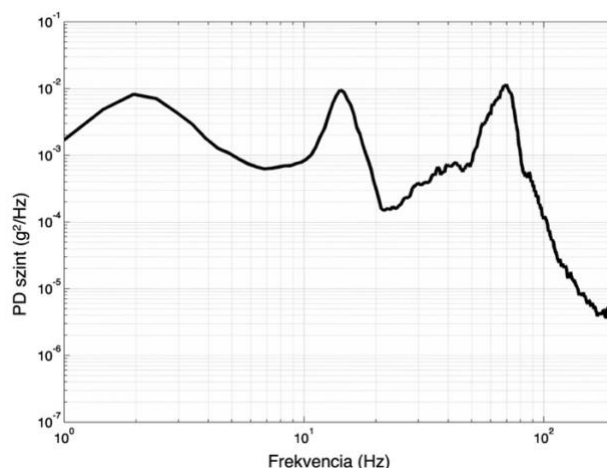
Az előző bekezdésben kifejtett probléma feloldására a Fourier elemzés a mérnöki gyakorlatban a statisztikát hívja segítségül. Feltételezve, hogy a megfigyelt események statisztikai eloszlása a normális (Gauss-i) eloszlást követi, egy adott frekvenciasávban megfigyelt jelek frekvenciakomponensek szerint kalkulálható intenzitása a következőképpen alakul:

$$PD = \frac{1}{BW} \sum_{i=1}^n (RMS G_i^2) / n \quad (1.6)$$

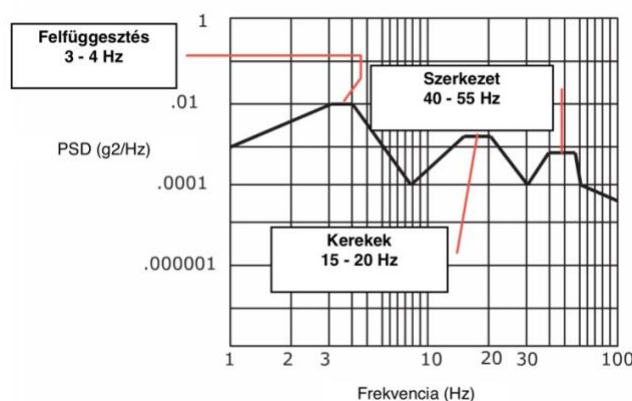
, ahol az RMS  $G_i$  ( $m/s^2$ ) fejezi ki a megfigyelt csúcsgyorsulás négyzetes középértékét bármely felvett  $i$  helyen.  $N$  a rögzített (elemezni kívánt) minták száma,  $BW$  pedig az a sávzélesség (Hz), amelyben a vizsgálni kívánt események frekvenciakomponensei találhatóak.  $PD$  (Power Density,  $g^2/Hz$ ) fejezi ki az ebben a frekvenciatartományban megfigyelt események átlagolt gyorsulásteljesítmény szintjét. Ez magyarul gyajran teljesítménysűrűségnek szokás nevezni. Mint látható a módszer átlagolást alkalmaz, amelynek hátrányairól a kutatási korlátok alfejezetben részletesebben írok. Az 1.7a. és 1.7b. ábrák egy kisteherautóban, illetve egy tipikus félpótkocsi rakodószerelvényének a platóján felvett függőleges irányú rázkódások  $PD$  szintjeit mutatják be az 1 – 200 Hz-



es frekvenciatartományban. Egy ilyen tipikus teljesítménysűrűség frekvenciatartományban való ábrázolását szokás PSD-nek is hívni (Power Spectral Density), azaz spektrális teljesítmény-sűrűségnek (Butkunas, 1967), esetünkben spektrális gyorsulás-sűrűségnek is. Az 1.7b ábra is egy ilyen általánosnak tekinthető PSD görbét mutat be azzal a kiegészítéssel, hogy jelöli azokat a frekvenciasávokat, amelyen egy (laprugóval szerelt) nyerges félpótkocsi szerelvény egyes szerkezeteinek saját frekvenciatartományait, ahol jelentősebb rezgés gyorsulásokat mutatnak (felfüggesztés, kerekek, járműszekrény).



1.7a. ábra. Kisteherautó rakodóterében mért függőleges gyorsulásértékek PSD görbéje (Böröcz, 2018)



1.7b. ábra. Egy tipikus félpótkocsi rakodóterében mért függőleges gyorsulásértékek PSD görbéje (Singh J, 2006)

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). 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

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

### 1.3.2.1. 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 frekvenciatartományon értelmezhető "energiaátadással" 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. A teljes  $G_{rms}$  érték egyenlő a mintaként rögzített egyes események RMS értékeinek négyzetgyökével, kifejezve:

$$Teljes (Overall) Grms = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} PSD(f) df} = \sqrt{\sum_{i=1}^N RMS G_i} \quad (1.7)$$

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.

### 1.3.3. Terepi mérések berendezései és módszertana

A rázkódások felmérésére általánosan elterjedt módszer a gyorsulásszenzorok alkalmazása. Ezek olyan érzékelőket tartalmaznak, amelyek a gyorsulással arányos elektromos kimeneti jelet produkálnak. A műszerek mereven kerülnek felszerelésre a szállítójármű azon pontjára, ahol egyébként a gyakorlatban is a szállított áru elhelyezésre kerül. A gyorsulásmérők fontos jellemzője a mérőeszköz érzékenysége (kimeneti mennyiség g-ben megadva). Ez az érzékenység a következőképpen adható meg:

$$gyorsulás = \frac{kimenő\ feszültség}{érzékenység}$$

Így például egy 10mV / g érzékenységű gyorsulásmérő, ha 6 mV csúcs-amplitúdójú rezgést érzékel, a gyorsulás a következők szerint kalkulálható: 6 mV / (10 mV / g) = 0,6 g.

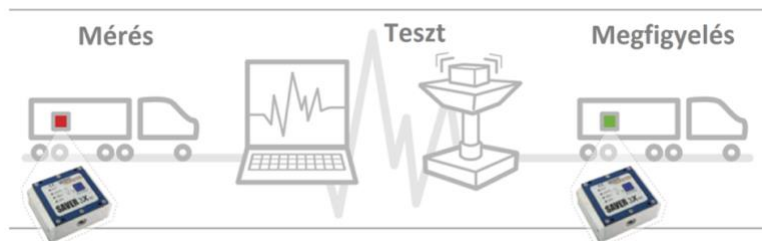
Alapvetően kétféle módja van a terepi rázkódások mérésének: 1) folyamatos jelet rögzítő analóg vagy 2) a szakaszosan (mintavételi technikákat alkalmazó) rögzítő digitális módszer. Mindkét módszernek ismeretesek előnyei és hátrányai egyaránt.

Az analóg felmérés esetén gyakorlatilag egy kezelő folyamatos jelenléte szükséges, és az alkalmazott műszerek fizikai terjedelme nagy mértékben megnehezíti a járműszekrényekben való elhelyezésüket, illetve a rögzített adatokat további elemzés céljából további műszerekbe kell átmásolni.

A modern digitális műszerek lehetővé teszi az előreprogramozott jel és idő alapú küszöbértékeknek megfelelő automatizált eseményrögzítéseket. Ezen 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 fő előnyük, hogy a programozható



automatizáltságuknak köszönhetően csak a megfigyelni szándékozott események kerülnek felvételre és rögzítésre, ezáltal jelentősen meghosszabbítható a rendszer időbeli képessége a terepi mérésre, akár 90 napra is. Ez utóbbi jellemzőjük teszi lehetővé, hogy széles földrajzi lokációkban, hosszú szállítási szakaszon lehessen méréseket végezni. A módszertan lényegét a 1.8. ábra mutatja be.



1.8. ábra. Rezgés mérő műszer terepen való alkalmazásának sémája (Pidl, 2019)

Kutatásaimhoz én a Lansmont Corp. által kimondottan csomagolásvizsgálatokhoz alkalmazott felmérésekhez gyártott 3X90 műszert használtam. 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 méréshatárig)
- Mintavételi frekvenciája maximum 5000 minta / másodperc
- Anti-alias szűrés alul áteresztővel, 10 – 500 Hz között

#### 1.3.4. A mintavételezési módszertan hatása az eredményekre

A terepen készült felméréseknek számos oka lehet (Charles, 1993). Ezek például, hogy meg szeretnénk tudni becsülni, hogy melyek a legveszélyesebb rezgés gyorsulások; vagy egy előre definiált szállítási környezetben milyen rezgés gyorsulások merülnek fel intenzitásuk és frekvenciájuk alapján; vagy meg szeretnénk határozni a statisztikai jellemzőit a várható eseményeknek; végül pedig laboratóriumi vizsgálati környezetet kívánunk fejleszteni. A felmérés mintavételezési módszerének és beállítási paramétereinek az elérni kívánt célhoz kell igazodnia (Richards, 1990). A következőkben taglalt mintavételi paraméterekkel kell különösen foglalkozni, mielőtt a mérést végrehajtanánk. Az értekezésben bemutatott kutatásaim során minden fejezetben, minden felmérésnél külön megadom a műszerezettség pontos beállításait. Ha szükséges, akkor az adott beállítás indokolását is közlöm. A 1.9. ábra egy ilyen beállítási paraméter sort mutat be.

CH	Active in Signal Partition	Active in Timer Partition	Channel Description	Full Scale	Trigger	Trigger Level	Filter	Ext Sensitivity	Input Source
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Channel 1	100.0 G	<input checked="" type="checkbox"/>	2.50 G	250 Hz	---	Charge Amp
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Channel 2	100.0 G	<input checked="" type="checkbox"/>	2.50 G	250 Hz	---	Charge Amp
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Channel 3	100.0 G	<input checked="" type="checkbox"/>	2.50 G	250 Hz	---	Charge Amp

1.9. ábra. Rezgés mérő műszer terepen való méréséhez beállítási paraméterek megadása a szoftver programozási felületén (Böröcz, 2018)

#### 1.3.4.1. A mintavételi frekvencia

Számos tanulmány és felmérés született úgy, hogy a műszer alapértelmezett mintavételi frekvenciájával végezték el, de például nem alkalmaztak antialiasing szűrést. Aztán vannak olyan hibák is, amikor a mintavételi frekvencia túl alacsony volt annak érdekében azért, hogy a digitális műszer rendelkezésre álló memóriáját tartogassák a rögzítési idő növeléséhez. Tehát korántsem triviális a műszer használata és beállítása. Lényegében a mintavételi frekvenciának kellően nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy a végső Fourier-elemzésnek alávett jelek megfeleljenek a Nyquist – Shannon kritériumnak, azaz a mintavételi frekvencia legyen legalább kétszer akkora, mint a vizsgálni kívánt frekvenciatartomány sávszélessége.

#### 1.3.4.2. A PSD felbontás

Ez a paraméter elsősorban a vizsgálni kívánt spektrális felbontás igényéből származik. Az egyes alrekordok vizsgálatok a Fourier transzformálódó szakasz ablakfüggvény megválasztásánál az 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). Meg kell jegyezni, hogy ha a vizsgálandó rezgések várhatóan nem stacionáriusak, akkor ajánlott, hogy az alrekord mérete a lehető legkisebb legyen. Ki kell emelni, hogy a rögzített rekordok jelsorozatának összefűzése is lehetséges egyetlen folyamatos jellé, így más elemző szoftverek is alkalmazhatók, mint például MATLAB.

#### 1.3.4.3. Trigger szintek

A terepi felmérések során a leggyakrabban ez a paraméter okozza a legtöbb zavart a szakemberek számára, ezért gyakran az idő alapú és jelalapú trigger módszert egyszerre használják. Pedig ez nagyon gyakran torz adatokhoz vezethet (Rouillard és Sek, 2005). Ezért ezen paraméter beállítását több tényező megfontolása alapján kell elvégezni, amely természetesen össze kell függjön a felmérés valódi céljával.

Ha a cél a legnagyobb rezgésszintek felmérése és annak megállapítása, hogy egy előre meghatározott rezgési szintet túllépnek-e a szállítás során, akkor érdemesebb a jelalapú

rögzítést választani. Viszont az így rögzített adatok később számított átlagos PSD-je semmilyen körülmények között nem értelmezhető egy jellemző PSD görbéként. Valójában ez csak a folyamat egy adott hányadának az átlagos PSD-je. Ugyanakkor, ha a trigger szint kellően alacsonyra volt beállítva, akkor a rezgések jelentős részének rögzítését eredményezi, így már ésszerű elemzést vagyunk képesek elvégezni az átlagos nagyságrendre nézve is. Ha viszont a terepen végzett felmérés fő célja egy adott szállítási ágazat környezetének jellemzése, vagy egy valósághű laboratóriumi vizsgálati szimulációs környezet létrehozása, akkor észszerűbb időalapú triggerelési módszert alkalmazni. Ilyen esetekben a rögzített adatok válogatás nélküli és elfogulatlan mintákat fognak tartalmazni. Az idő és a jel alapon vett mintákat érdemes mindig külön elemezni.

Tudni kell továbbá, hogy a mintavételi periódus átlagos PSD-re gyakorolt hatása sokszor nem szignifikáns, ugyanakkor a spektrális PD szintekben jelentős eltérések alakulhatnak ki (Steinwolf, 2005) miatta.

#### 1.3.4.4. A rögzített események statisztikájához alkalmazott mutatószámok

Mint az a korábban ismertetett elméleti részekből, és majd később a laboratóriumi rendszerek bemutatásánál és a kutatási eredmények elemzésénél és az eredmények gyakorlati implementálásánál (a rázóberendezést vezérlők jelgenerálásánál) fel fog bukkanni, fontos lesz ismernünk kell a bekövetkező rázkódási események valószínűségét egy valós szállítás során. Ehhez a felmérések során rögzített adatok eloszlását és sűrűségfüggvényeit, illetőleg annak jellemzőit kell ismernünk. Ahogy azt majd az 1.4. alfejezet részletesen kifejti, a rázóberendezések jelgenerátorai normális eloszlás (Gauss) alapján képezik a jelsorozatot. A normális eloszlásnak kettő jellemző értéke lesz majd fontos a kutatások eredményeinek elemzése során is. Az egyik az eloszlás laposságai, vagy csúcsossági értékét mutató kurtózis (kurtosis), illetőleg a ferdeségét (skewness) mutató értékek. A normális eloszlás kurtózisa 0, a pozitív kurtózis csúcsosabb eloszlást jelez, míg a negatív kurtózis laposabb eloszlást. Matematikai formája a következő:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right\}^4 \quad (1.8)$$

A ferdeség, ha 0 értéket mutat, akkor felel meg a normális eloszlásnak, és szimmetrikus eloszlásról beszélünk, ha attól eltér, akkor aszimmetrikus eloszlásról.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right\}^3 \quad (1.9)$$

, ahol  $N$  a felvett rázkódási események mintái,  $\mu$  az átlag és  $\sigma$  pedig a szórás értéke. Utóbbi a gyakorlatban azt is jelenti, hogy egy adott irányban több gyorsulási eredmény került rögzítésre, azaz a rakfelületen mért gyorsulások iránya sűrűségük szerint eltolódott az egyik irányba.

### 1.4. Laboratóriumi szimulációs technika és rendszerek

Alapvetően a laboratóriumi vizsgálatok kapcsán az elmúlt évtizedekben számos módszert fejlesztettek ki a szállított áruk rezgésszimulációjára. Ennek a komplex rezgésnek a mivoltából adódóan ezen vizsgálati módszerek eléggé változatosak és

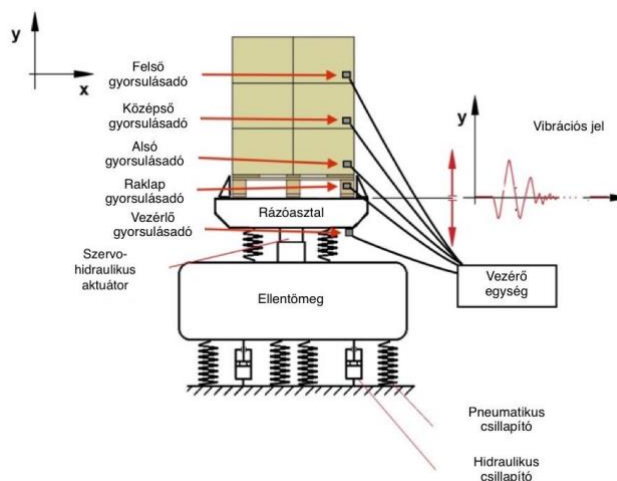
mindegyik módszer megpróbálja kezelni más módszerek különféle korlátait (Huang YY et al. 2021). A leggyakoribbak három módszer köré csoportosulnak:

1. Az időalapon felvett jelsorozat laboratóriumi reprodukálása
2. Szabványosított véletlenszerű jelalakok generálása PSD görbék alapján
3. Harmonikus rezgések szimulációja

A kutatásom a 2-ik pont alá csoportosuló szabványos vizsgálatok köré koncentrálódik. A leggyakrabban széles körben alkalmazott ilyen szabványos vizsgálatok a következők:

- ATM D4728 - Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers (részletes PSD görbék az ASTM D4169 szabvány tartalmaz)
- MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests". United States Department of Defense. 2014.
- ISO 13355:2016(en), Packaging — Complete, filled transport packages and unit loads — Vertical random vibration test
- ISTA Test Series Random Vibration Procedures for Packaged-Products. International Safe Transit Association: East Lansing, 2006

Ezek a szabványok részletezik a laboratóriumi szimulációk során alkalmazott berendezéseket, beállításokat és értékelési módszertant. A laboratóriumban végzett szimuláció elvi struktúrája látható a következő 1.10. ábrán.



1.10. ábra. Laboratóriumi műszerezettségi igény egység-akomány rázóvizsgálata esetén (Molnár és Böröcz, 2021)

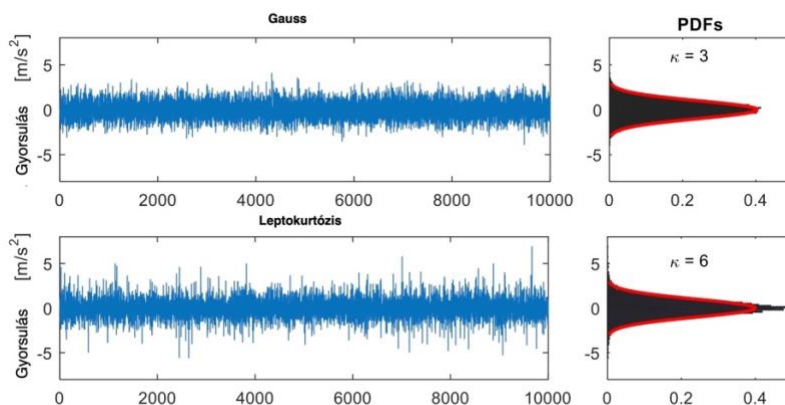
A jelenlegi szimulációs technikák alapvetően hidraulikus rázórendszereket alkalmaznak. Ennek az az oka, hogy a szállított rakományok olykor meghaladják az 1000 kg-os mintatömeget, továbbá mivel a felső vizsgált frekvenciatartomány a 300 Hz-et nem haladja meg, ezért műszaki felépítésében a legalkalmasabb ilyen jellegű vizsgálatok lefolytatására. A rázópadokat olyan rázásvezérlő rendszerek vezérlik, amelyek zárt hurkon keresztül az asztal mozgását gyorsulásszenzorok által gyűjtik be, majd annak Fourier elemzését követően az elvárt PSD görbéhez igazítják az új, lejátszani kívánt jelet, amelyből viszont inverz Fourier módszerrel útamplitúdót

képeznek és a hidraulikus aktuátor alatt elhelyezett elmozdulásra vezérelt útdón keresztül informálják a szervó szelepeket a soron következő véletlenszerűen generált jel létrehozásához.

#### 1.4.1. Rázóvezérlők véletlenszerűen generált jeleinek kritikája

A PSD görbéken alapuló véletlenszerű rezgésvizsgálat a legelterjedt szimulációs módszer a csomagolások tesztelésére. Ugyanakkor számos kutató azonban megkérdőjelezi az ezzel a módszerrel előidézett rezgés normális eloszlású (Gauss) jellegének érvényességét (Zhou és Wang, 2017) (Rouillard, 2007) (Rouillard, 2008) (Böröcz, 2017) (Böröcz, Horváth és Huang YY, 2022). Jómagam is a későbbi fejezetekben fel fogom erre hívni a figyelmet a terepi méréseket követő elemzések eredményeként.

Ennek a módszernek a fő hiányossága az, ahogy magát a rázkódási jelet a tesztelés alatt úgy hozza létre a vezérlő szoftver, hogy a rezgés gyorsulásokat tartalmazó jelsorozat normális eloszlást kövessen. Az 1.11. ábrán egy olyan véletlenszerű jelsorozatot mutatok be, amelyet egy szabványos vizsgálat által elérni kívánt PSD görbéjéhez generál egy vezérlő. Ugyanakkor, ahogy azt már az 1.3. és 1.6. ábrákon is láthattuk, a valóságban tapasztalható tényleges gerjesztés más képet mutat. Ez azért probléma, mert a közúti jármű rezgése közismerten nem Gauss-féle eloszlást követ, pontosabban leptokurtikus (magas kurtózis értékű eloszlást). Mivel a PSD görbéknek nincsenek időinformációik, ezért csak az átlagos teljesítmény-sűrűséget adják meg a frekvencia függvényében, majd vezérelnek ezáltal. Ezt úgy oldják meg, hogy a véletlenszerű jel létrehozásához a PSD-t véletlenszerű fázissal rendelkező amplitúdó-spektrummá alakítják át. Ezt a spektrumot azután inverz Fourier transzformációval átalakítják az időtartományba.



1.11. ábra. Felső ábra: egy laboratóriumban Gauss alapon generált véletlenszerű jelsorozat szabványos vizsgálati céllal, b) közúti járművön mért jelsorozat

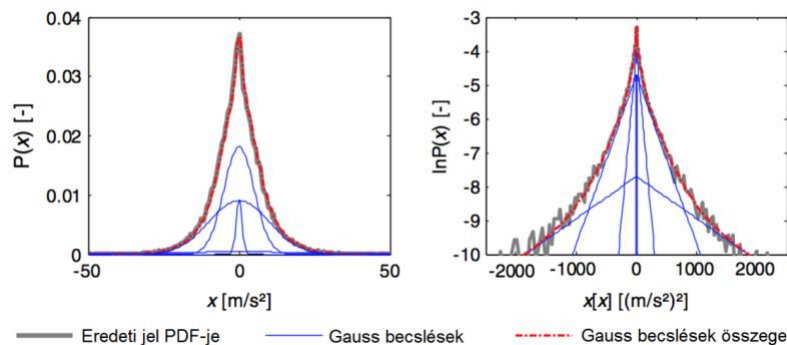
A nem-Gauss eloszlás szimulációjára egyes kutatók azt javasolják, hogy a cél PSD görbét több különböző nem-Gauss eloszlás reprodukálásával érjük el. (Steinwolf és Connon, 2005) (Van Baren, 2005). Ugyanakkor ez is rendelkezik azzal a korláttal, hogy nem képes reprodukálni a rakodófelületen ébredő rázkódások nem stacionárius jellegét. Ugyanis a jármű sebessége és a pályaegyenetlenség által átadott gerjesztés nem stacionárius, hanem a különböző intenzitású rázkódások véletlen Gauss-i folyamatainak szekvenciált kombinációja (Pidl, 2019).

A fenti gondolat tovább igazolja a felvett jelsorozat szétbontásának használhatóságát közúti rezgések szimulálására (Chonhenchob, 2017) (Singh, J 2006) (Böröcz, 2017) (Böröcz, 2018), amelyre jómagam is számos példát fogok közölni terepen mért eredmények elemzésénél és összegzésénél.

További megoldás lehet a nem-stacionárius közúti rezgések megközelítésére annak feltételezése, hogy a PSD görbe alakja konstans, majd szét lehet darabolni a jelsorozatot különböző amplitúdójú Gauss-i szegmensekre. A véletlenszerű Gauss-sorozat szétbontását (random Gaussian sequence decomposition, RGSD) több tanulmány is javasolta már (Charles, 1993 vagy Rouillard, 2007). Ahogy azt Pidl 2019-es értekezésében is megtalálhatjuk egy csúcsos normál eloszlású járműrezgés tekinthető Gauss-eloszlások összegeként is. Ez viszont nem ad azonban információt arról, hogy egy jelszekvenciának milyen a hossza és a jelsorozaton belüli miként helyezkedik el. Mindegyik sorozat közreműködése  $\sigma_i$  szórással (RMS érték) súlyozásra kerül egy úgynevezett vibrációs  $D_i$  dózissal a jeladatsor eloszlásához igazítva, amelynek képlete:

$$p(x) = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (1.10)$$

Az elképzelést, hogy a jármű rakfelületén ébredő nem Gauss-eloszlású rázkódási jelet több Gauss-eloszlásra bontjuk az 1.12. ábrán látható.



1.12. ábra. Gauss-i bontás lineáris skálán a bal oldalon, logaritmus skálán a jobb oldalon (Lepine et al., 2015)

### 1.5. Időgyorsítási eljárások elméleti és gyakorlati megközelítései

A valóságban az áruk legtöbbször sok-sok órát, de akár napokat vagy heteket is utazhatnak mire a célhelyre érkeznek. Ennek laboratóriumi szimulációját jelentősen megnehezíti az a tény, hogy erre az iparban sem tesztidő, sem költségáfordítás ésszerű keretek között nem allokálható. Ez, - a főként 80-as években bevezetett - már korábban említett szabványos vizsgálatok esetén azt jelenti, hogy a terepi mérések eredményeként létrejövő szabványos cél PSD görbék mellé rövidebb tesztidőket javasolnak, mivel a PSD görbe intenzitásának mesterséges nagyításával elvi lehetőség nyílik a tesztidő rövidítésére (Shires, 2011).

A csomagolások kapcsán alkalmazott véletlenszerű rázóvizsgálatok területén kifejezetten három módszer terjedt el. Az első a Basquin által kifejlesztett kifáradási



modellen (Curtis et al., 2010) alapul, amely a már említett intenzitás növeléssel dolgozik. A kapcsolat a tényleges és a teszt időtartama között az alábbiak szerint fejezhető ki:

$$\frac{t_j}{t_t} = \left( \frac{a_t}{a_j} \right)^k \quad (1.10)$$

, ahol  $t_t$  = tesztidő,  $t_j$  = az aktuális szállítási reláció várható időtartama,  $a_t$  = a teszt intenzitása (Overall  $G_{rms}$ ),  $a_j$  = a szállítási útvonalon mért PSD intenzitása (Overall  $G_{rms}$ ),  $k$  egy konstans, amely a csomagolt-terméktől függ. Itt külön ki kell emelni, hogy ez utóbbi egy feltételezett kapcsolat, hiszen a csomagolás teszteléséhez a kifáradási modellek alkalmazhatósága egyelőre még nem bizonyított. A Basquin modell alapvetően fém szerkezetek kifáradásnak jelenségével foglalkozik. Gondoljunk csak bele a számos felhasznált inhomogén anyag kombinációjára, amely megjelenik egy szállítási csomagolásban (papír, hullámpapírlemez, műanyag habok, fóliák, rakodólapok, stb.). A csomagolásvizsgálatok kapcsán  $t_j/t_t$  kvóciens tipikusan 5-re van korlátozva (Young, 1993) (Kipp, 2000). Az időtömörítést általában egy adott érték többszöröseként fejezik ki (például: 5x).

A második módszer a csomagolásvizsgálattal foglalkozó szabványok által alkalmazott megoldások. Az ASTM D47286 úgy fogalmaz, hogy „A vizsgálati idő rövidítése érdekében a tesztszinteket gyakran növelik a tényleges terepi adatokhoz képest. Ezeket a kísérleteket körültekintően kell végrehajtani, és az ilyen típusú „ekvivalencia” technikák alkalmazása feltételezheti a minta reakciójának linearitását a teszt bemeneti gerjesztésére, ami a valóságban nem valószínű”. Az ASTM D4169 szabvány és az ISTA 3A és 3F szimulációs eljárásai a tesztek időtartama és intenzitása alapján megjelenítik az időtömörítés használatát, de erről külön nem tesznek említést. Kipp 2000-ben született elemzésben azt sugallja, hogy az ASTM D4169 rázkódási szintek időalapú tömörítése a már korábban említett 5x-ös érték közeli. Az ISTA 3E eljárás pedig konkrét kapcsolatot ad meg:

$$t_t = \frac{d_j}{8} \quad (1.11)$$

, ahol  $t_t$  = teszt időtartam (min),  $d_j$  = a szállítás távolsága (km). Ez a módszer nem az utazási időt veszi alapul, hanem a tesztidő viszonyát adja meg a szállítási távolsághoz, és akkor ad 5x-ös időtömörítést, ha az átlagos utazási sebesség egyébként 96 km / h.

Megjegyzendő, hogy gyakran foglalkoznak még a kutatók más lineáris kifáradási modellek alkalmazásával is a csomagolásvizsgálati területen (mint harmadik módszer), de ezek eddig gyakorlati hasznót és eredményt nem igazoltak vissza. Ezek közül is leggyakrabban a Palmgren – Miner hipotézis alkalmazása említhető, ami viszont ugyancsak fémből készült szerkezetek kifáradásával foglalkozik.

## 1.6. Kutatási korlátok

Az értekezés ezen a pontját megfogalmaztam azokat a korlátokat, amelyek a kutatások eredményeinek értelmezést vagy felhasználását közvetlenül érintik. Mivel a kutatási témám és eredményeim hasonló vagy ugyanolyan módszertannal készültek, ezért ezt nem fejezetenként, hanem összefoglalva itt adom meg.

1. A laboratóriumi csomagolásvizsgálat során széles körben alkalmazott berendezések sokszor ideális körülményeket feltételeznek és egyszerűsített módon reprodukálják a valóságos környezetet (pl. egy szabadságfokú lengőrendszerként definiálható 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 rezgésgyorsulások előállítására, 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.
6. Általános következtetéseket csak és kizárólag olyan mértékben vonhatunk le a kutatási eredményekből, amelyek a statisztikai érvényesség mellett a rezgésgyorsulásokat befolyásoló külső paramétereket is figyelembe veszi (így pl. hasonló átlagos útpályaminőség, hasonló átlagos menetsebesség, hasonló járműszerkezet és rugózás, hasonló terhelő tömegek, stb.).



## 2. A közép-európai vasúti áruszállítások során mért rezgésgyorsulások elemzése

### 2.1. A kutatási részterület szakirodalmi háttere és megalapozottsága

A vasúti szállítás az elmúlt évszázad alatt az egyik olyan kiemelkedő árutovábbítási ágazatává vált, amely az egész világon elterjedt az áruk relatív olcsó, de nagy tömegű célhelyre való juttatásában. Közép-Európában is széles körben használják az áruk disztribúciójára. Az 1990-es évektől (főként kelet európai országok rendszerváltozását követően) a közép-európai országok közötti kapcsolatok nagymértékben javultak, mindez együtt járt az áruk és vasúti áruforgalmazási szolgáltatások egyenletesebb megoszlásával. A vasút emellett egy olyan lehetőséget biztosít intermodális jellegű kialakításával az áruszállító hajók és a közúti teherszállító járművek között, amely közvetlen összeköttetést biztosít a kontinensek és óceánok különböző földrajzi régiói között, megkönnyítve ezáltal a kontinentális kereskedelmet. Közép-Európa keleti része a politikai struktúra megváltozását követően, elsősorban kedvező földrajzi elhelyezkedésének köszönhetően, egyre inkább disztribúciós logisztikai központtá válik a vasúti áruszállítás területén is. Hat jelentős európai közlekedési folyosó halad át a területen, gyakorlatilag páratlan hozzáférést biztosítva így Európa minden részéhez, északról délre és nyugatról keletre.

A csomagolásvizsgálat szakterületén számos tanulmány született a vasúti szállítmányokra ható rezgésgyorsulások mérése és elemzése kapcsán, amelyek jellemzőit a már említett PSD görbék bemutatásával, illetve azok által javasolt tesztelési módszerek kifejlesztésével adták meg (Singh SP et al., 2006, Singh SP et al., 1995, Association of American Railroad, 1992, Rouillard és Richmond, 2007). Európában eddig csak olyan tanulmány jelent meg e tárgykörben, de az is csak említés szintén foglalkozott a vasúti áruszállítás ilyen jellegű kérdésével. Ez a tanulmány (SRETS, Source Reduction by European Testing Schedules) Braunmiller szerkesztésében jelent meg 1999-ben, és a nagyon részletes félpótkocsis szerelvényvel végzett közúti szállítási mód mellett mintegy 400 km-es vasútszakaszon is végzett felmérést, de a vasúti adatokat később nem használták fel az eredmények értékeléséhez, mivel az alacsony mértékű mintavétel nem biztosította a statisztikai reprezentativitását a rázkódási események szakszerű értékeléséhez.

A fenti Európában végrehajtott tanulmányon kívül Észak-Amerikában (Lamoreaux et al., 1981, Singh SP et al., 2012, Singh SP et al., 2014), Indiában (Singh SP et al., 2007), Ausztráliában (Rouillard és Richmond, 2007) és Thaiföldön (Chonhenchob et al., 2010) végeztek átfogónak tekinthető méréseket. Ezek a vizsgálatok elsősorban régióspecifikus eredményeket nyújtottak a tudományos közösségnek, hiszen a vasúti pályaszerkezetek, az alkalmazott vasúti kocsik és menetsebességek a vasúti árutovábbításban nem csak kontinensenként, de kontinensen belül, akár régióként is eltérnek. Erre az értekezés későbbi részében (kombinált áru fuvarozás mérése részénél) ugyancsak rámutatok. Viszont egyértelmű eredményei a szakirodalmi kutatásoknak, hogy a vasúti szállításnál a függőleges irányú rezgésgyorsulások szignifikánsan magasabbak voltak, mint a vasúti kocsira nézve a kereszt és hosszirányú rezgésgyorsulás intenzitások.

Ugyanakkor a szakirodalmat áttekintve egyáltalán nem található olyan publikált, vagy akár összefoglaló irányelvet bemutató kutatás, amely ezek a rázkódási szinteket Közép-Európában, vagy akár Magyarországon mérte és elemezte volna. Ezért ennek a kutatásnak az volt a célja, hogy terepen végezzen méréseket a vasúti disztribúció során, majd az elemzett adatokat összehasonlítsa más régióban végrehajtott mérésekkel, illetőleg összehasonlítsa szabványos vizsgálati módszerekben ismertetett rázóvizsgálati előírásokkal is, továbbá az eddigieknél pontosabb információkkal szolgáljon a csomagolási mérnökök számára a megfelelő védelmi funkciót ellátó csomagolás megtervezéséhez és teszteléséhez.

Felmerülhet a kérdés, hogy miért Közép-Európa volt a felmérés földrajzi területe. Meg kell jegyezni, hogy ilyenfajta mérés hosszú vasútvonalon, a műszer átrakódása nélkül, annak nyomon-követhetőségével (értéke miatt épségét biztosítva), továbbá le-, és felszerelhetőségét garantálva kell megoldani. Így, olyan fuvarfeladatot kellett kiválasztani a hosszú ideig tartó mérésekhez, amelyre hazánkban nem nyílt volna lehetőség a nagyobb intenzitású, de mégis relatív rövidnek tekinthető vasútvonalakon.

A fenti körülmények alapozták meg, hogy a kutatás során közép-európai főbb vasútvonalakon végezzen méréseket, amelyek elemzik a teherkocsiban ébredő és a csomagolt termékekre ható rázkódásokat, majd később az eredmények elemzésével laboratóriumi szimulációra alkalmas formában nyújtson új információkat a labormérnökök és csomagolási mérnökök számára. Az adatok összehasonlításra kerültek az általánosan elterjedt olyan vizsgálati szabványok által részletezett protokollokkal is, amelyek széles körben elterjedtek a gyakorlatban. Az összehasonlítás alapját a PSD görbék, illetőleg a rázásvizsgálatot vezérlő véletlenszerű eseményeket generáló sűrűségfüggvények képezték. Ezek a szabványok az ASTM D4169 (American Society of Testing and Materials, 2008), az ISTA 3H (International Safe Transit Association 2006), a MIL-STD-810G (United States Military Standards, 2008) és a DEF STAN 00-35 (United Kingdom Defense Standard, 2008).

### *2.1.1. A vasúti áruszállítás Közép-Európában*

Európa az egyik legjobban és átfogóan ellátott vasúti hálózattal rendelkezik, amelyen a távosi áruszállításnak szignifikáns szerepe van. A vasúti infrastruktúra fejlesztése új lendületet kapott Közép-Európában az 1990-es rendszerváltozásokat követően. Ez a fejlesztés jelenleg is folyik az Európai Unió hathatós támogatásával.

A vasútvonalak nyomtávolsága Közép-Európában 1435mm széles és a villamos hálózattal ellátott vonalak 15kV és 50Hz-en működnek. Váltakozóáramú rendszert használ Ausztria, Németország, Svájc és Magyarország, továbbá 3kV-os egyenáramú rendszert használ Csehország, Szlovákia, Lengyelország és Szlovénia. A teljes vasútvonal hálózat hossza az EU 27 tagországában (még Nagy-Britanniával együtt) körülbelül 216 200 km volt 2012-ben, amelyen 407 milliárd árutonnakilómétert (tkm) teljesítettek (EU Bizottság statistical pocketbook, 2014). Ez nagyjából 20%-a az USA éves teljesítménynek (EUROSTAT, 2015).



2.1. ábra. A közép-európai vasúti hálózat fővonalai, jelölve a kutatásban végzett felmérések vasútvonalait

A vasúti hálózat hierarchiája követi a világ más régiójában is alkalmazott rendszert, tartalmaz fővonalakat, mellékvágányokat és ipari vágányokat. Továbbá itt kell megjegyezni, hogy Közép-Európán halad át az transeurópai vasúti hálózat (TEN-T) kilenc jelentős folyosójából öt.

## 2.2. A terepi felmérés során alkalmazott vasúti járművek és útvonalak

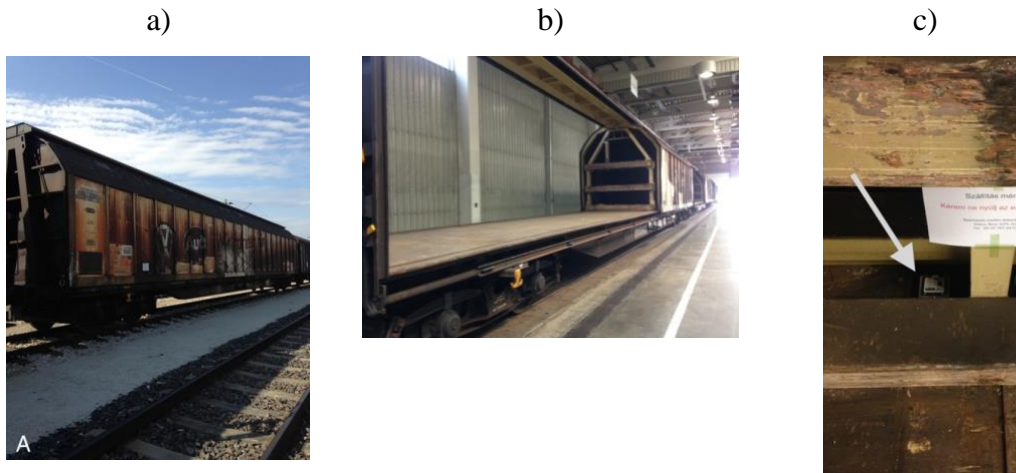
A korábban 2.1. ábrán bemutatott vasútvonalakon történtek a mérések, amelyek a 2.1. táblázat szerinti vonalakat és hosszokat fedték le Magyarországon, Ausztriában, Németországban, Szlovákiában és Csehországban. A mért vonalak több mint 80%-a fővonalon történt. A mérések lefolytatása 2015 márciusában történt.

2.1. táblázat. A mérés során érintett vasútvonalak és távolságaik

Útvonal	Kategória	Távolság (km)
<i>Mérés 1:</i> Győr (H) – Wien (A) – Regensburg (GE) – Ingolstadt (GE) – és vissza	Iparvágány	2x 2
	Fővonal (Trans-European)	2x 545
	Mellékvonal	2x 76
<i>Mérés 2:</i> Győr (H) – Rusovce (SK) – Lanzhot (CZ) – Bad Schandau (GE) – Wolfsburg (GE) – és vissza	Iparvágány	2x 1
	Fővonal (Trans-European)	2x 927
	Mellékvonal	2x 2
<i>Mérés 3:</i> Győr (H) – Kutty (SK) – Lichkov (CZ) – Poznan (PL) – és vissza	Iparvágány	2x 3
	Fővonal (Trans-European)	2x 696
	Mellékvonal	2x 12
<b>Teljes:</b>		<b>4 528</b>

Az egyes és kettes útvonalon 4 tengelyes Habiins 274-es típusú, a hármas vonalon Habiins 284-es típusú zárt vasúti kocsik kerültek felhasználásra, amelyek 180 m<sup>3</sup>, illetve 186 m<sup>3</sup> kapacitással rendelkeznek, és maximálisan 50 000 kg hasznos terhet szállíthatnak. A járművek a 2.2. ábrán láthatók. A mérés során a vasúti kocsik GPS adói

szerint 50-110 km/h sebességgel haladtak. A felrakott áruk a kifelé tartó irányban 45 400 – 49 900 kg között voltak, illetve 42 500 – 46 700 kg között a visszaúton. Az összes felmért útvonal hossza 4 528 km volt.



2.2. ábra. A) A méréshez használt egyik zárt szekrényes vasúti kocsi, b) eltolt oldalfalakkal rakodáshoz és c) a mérőműszer elhelyezésének pozíciója a rakodótér középvonalánál

### 2.3. A mérési rendszer konfigurációja és az elemzéshez használt módszertan

A rázkódás jellegű fizikai eseményeket egy háromirányú gyorsulásadót tartalmazó Lansmont gyártmányú SAVER 3X90-es megnevezésű műszerrel (Shock and Vibration Environment Recorder, Lansmont Corp., CA, USA) rögzítettem, mindhárom térirányban. A haladási irányra nézve függőlegesen (vertical), annak megfelelően (longitudinal) és keresztirányban (lateral). A mérőműszer olyan akkumulátort tartalmaz, amely 90 napig képes biztosítani az adatok felvételét, függően a beállítási paramétereiktől és a memória tárhelytől. A mérőműszer a rakodófelületen került elhelyezésre, a kocsi hosszanti szelvényének felénél található szekrény és oldalkapu merevítő szerkezetek között. A bemutatott mérések során alkalmazott beállítások:

- 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

A rázkódás szintek elemzéséhez a felmért adatokból PSD függvényeket készítettem. Mindhárom mérés adatsora együttesen került kiértékelésre. E kombinációnak az volt az oka, hogy az alkalmazott vasúti kocsik gyakorlatilag azonos járműszerkezettel rendelkeznek, ezáltal ez nem befolyásolja a mért eredmények értelmezését. Így az összes mérés együttes elemzése lefedte a különböző menetsebességeket, pályaminőséget és terhelő tömegeket. Azaz a kalkulált PSD görbe jelentős mérési időtartamot és jelentős számú rögzített eseményt tartalmaz, ezáltal az átlagolt értékek

olyan nagyszámú mintát vonnak be az elemzésbe, amely alapján általános következtetéseket lehet levonni.

A felmérés eredményei 0,5 és 200 Hz között kerültek elemzésre és ábrázolásra. Az elemzés megkezdése előtt a teljes adatállományon szűrést hajtottam végre, hogy eltávolítsam azokat a nem kívánt zaj vagy nem rázkódás jellegű eredményeket, amelyek nem szükségesek az elemzéshez. Mindezt az az események, amelyek 0.01 G<sub>rms</sub> alatt voltak, eltávolításra kerültek.

A PSD görbék előállítását négyféleképpen végeztem el. A rögzített események intenzitása alapján a legmagasabb 5%-ára, 20%-ára, illetve az alsó 80%-ára a PSD görbék külön előállítottam. Ennek okát az 1. fejezetben a terepi adatok felmérésnek és elemzésének módszertanánál már bemutattam. Ezt követően az összes (100%) esemény alapján is elkészítettem az átlagolt PSD görbét. A PSD görbék mindhárom térirányban felvett eseményekre elkészültek. Végül a rögzített adatokra vonatkozó statisztikai elemzést is elvégeztem. Így a rögzített eseményekhez megadtam a csúcsgyorsulások adathalmazon a valószínűségi-eloszlás sűrűségfüggvényekhez (PDF, probability density function) tartozó lapultsági (K, kurtózis) és ferdeségi (S) mutatóit.

További statisztikai elemzés volt a rögzített csúcsgyorsulások kapcsán a kumulatív eloszlásfüggvények (CDF, cumulative distribution function) megadása azért, hogy egyértelműen meghatározható legyen egy valószínűségi szinthez tartozó diszkrét érték. Az adatokat kétparaméteres Weibull eloszlási modellbe illesztettem. Ennek az eloszlásmodellnek megválasztásának nem volt különösebb oka, egyszerűen csak erre az eloszlásra illeszkedtek a MATLAB elemzés során a legjobban az adatok. A Weibull eloszlás széles körben használt a mérnöki gyakorlatban egyszerűségének köszönhetően. A Weibull kumulatív eloszlásfüggvénynek kettő paramétere van, amelyet a 2.1. egyenlet mutat be, ahol:  $\alpha > 0$  az skálaparaméter,  $\beta > 0$  az alakparaméter.

$$F(x|\alpha, \beta) = \int_0^x \beta \alpha^{-\beta} t^{\beta-1} e^{-(t/\alpha)^\beta} dt = 1 - e^{-(x/\alpha)^\beta} \quad (2.1)$$

#### 2.4. A mérési eredmények értékelése

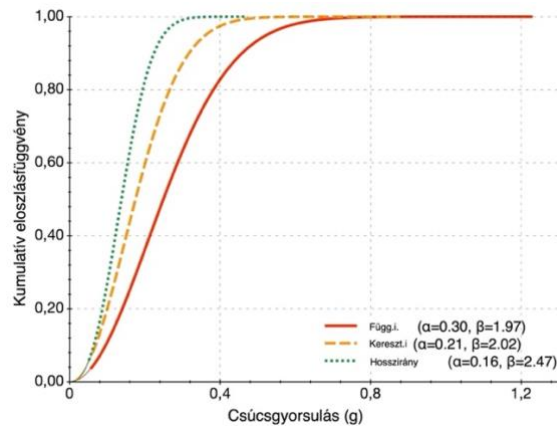
A 2.2. táblázat és ábra a rögzített csúcsgyorsulások eredményeit és eloszlásfüggvényeit mutatják be, mindhárom tengelyre. A CDF-ek azoknak az eseményeknek a százalékos arányát mutatják, amelyeknél a mért csúcsgyorsulás egy bizonyos szintje alatt volt.

##### 2.2. táblázat. A rögzített csúcsgyorsulások összegzése

Csúcsgyorsulások (g)	Hosszanti irány	Keresztirány	Függőleges irány
Maximum (g)	0,47	0,88	1,24
99%-os előfordulás (g)	0,29	0,45	0,65
95%-os előfordulás (g)	0,25	0,36	0,52
90%-os előfordulás (g)	0,22	0,32	0,45

Látható, hogy a gyorsulás értékei hosszirányban általában alacsonyabbak voltak, mint a függőleges vagy az keresztirányúak. Ezek a jelenségek részben a vasúti járművek oldalirányú lengéseinek tudhatók be (Katz et al., 1958). A legmagasabb csúcsgyorsulás értékek a felmérés során a függőleges irányban voltak tapasztalhatók. A 2.3. táblázat tartalmazza az eloszlásfüggvények statisztikai paramétereit, amelyek a legjobban

illeszkedő regressziós elemzésen alapulnak. Az R-négyzet értékek az illeszkedés konfidenciaszintjét mutatja a három különböző megfigyelt irányban (1 jelenti a 100%-ot).

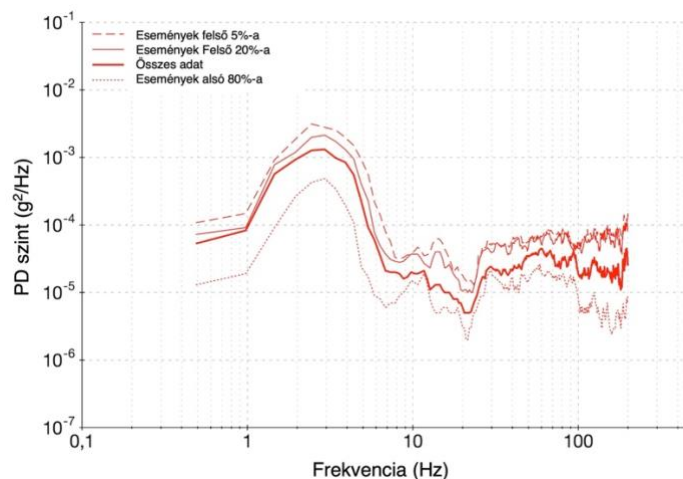


2.3. ábra. A csúcsgyorsulások kumulatív eloszlásfüggvényei (CDF-ek) a három mért irányban

2.3. táblázat. A legjobban illeszkedő regressziós függvényhez tartozó eloszlások statisztikai paraméterei

	Becsült átlag	Aktuális átlag	Variancia	Becslés $\alpha$	Becslés $\beta$	R- négyzet	hiba RMSE
Függőleges	0,28	0,29	0,06	0,31	1,97	0,923	0,08
Hosszi.	0,14	0,14	0,01	0,21	2,02	0,871	0,12
Kereszti.	0,20	0,21	0,04	0,16	2,47	0,907	0,06

A 2.4 – 2.6 ábrák mutatják be a mérési eredmények elemzését követően kalkulált PSD görbéket a mind a függőleges, kereszt és hosszirányban. Az ábrák tartalmazzák a felső 5%, felső 20%, illetve az alsó 80% osztályba került adatokat külön is.

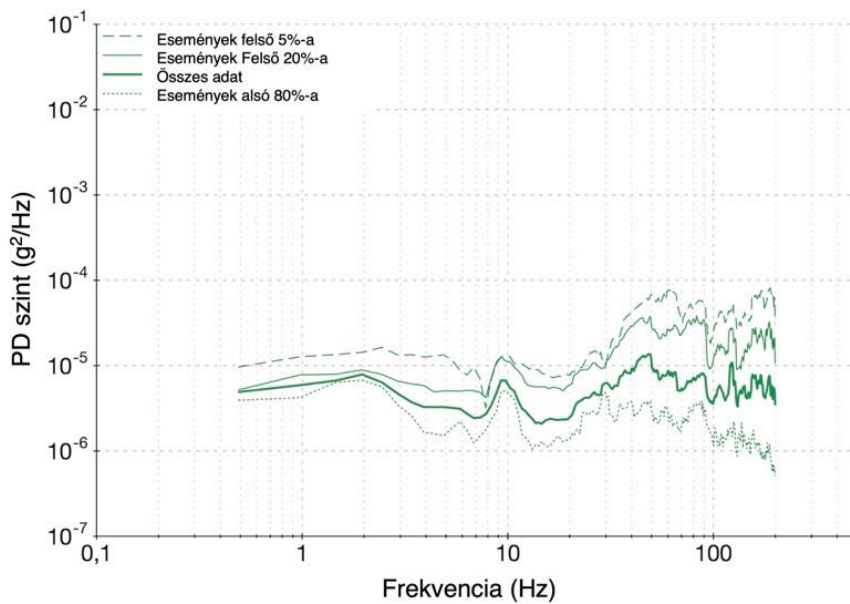


2.4. ábra. A függőleges irányban kalkulált PSD görbék a vasúti felmérés során (Böröcz és Singh SP, 2017)

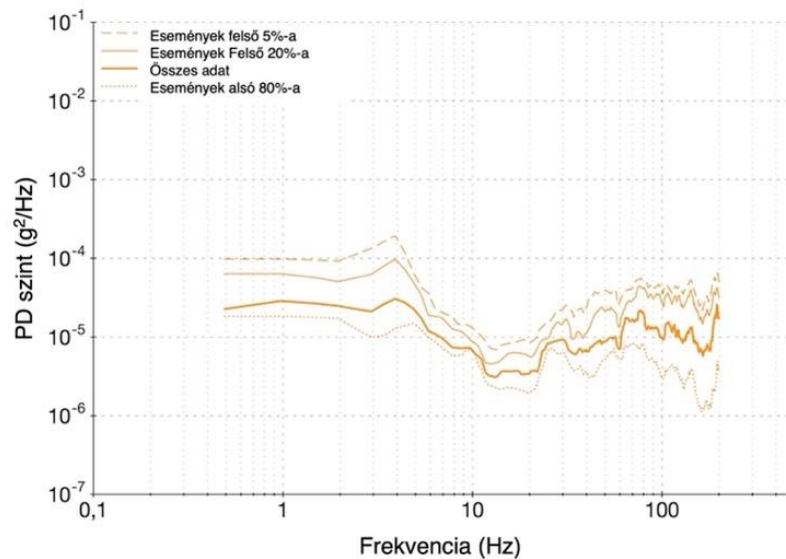
Megállapítható, hogy a legmagasabb intenzitás a függőleges irányban volt tapasztalható, 1 – 5 Hz között. Ez az eredmény nagyon hasonlít korábbi kutatások



eredményére, amelyek Ausztráliában (Rouillard és Richmond, 2007), Indiában (Singh SP et al., 2007), Thaiföldön (Chonhenchob et al., 2010) és az Egyesült Államok (Singh SP et al., 2012) kapcsán kerültek publikálásra. Megállapítható az is, hogy 8 Hz felett a PD (Power Density, teljesítménysűrűség) szintek általában véve alacsonyok voltak. További fontos megfigyelés, hogy a PD szintek 20 Hz környékén közel 10-szer alacsonyabbak voltak, mint más tanulmányok alapján várható lett volna. Ez alól csak a Melbourne és Perth között, Rouillard professzor által vezetett kutatás volt kivétel (2007). Az oka ennek a jelenségnek a relatív állandó menetsebesség és a fővonalak kedvező pályaminősége. Általában ismert tény, hogy a vasútvonalak Európában jobb minőségűek mint, Észak-Amerikában vagy Indiában.



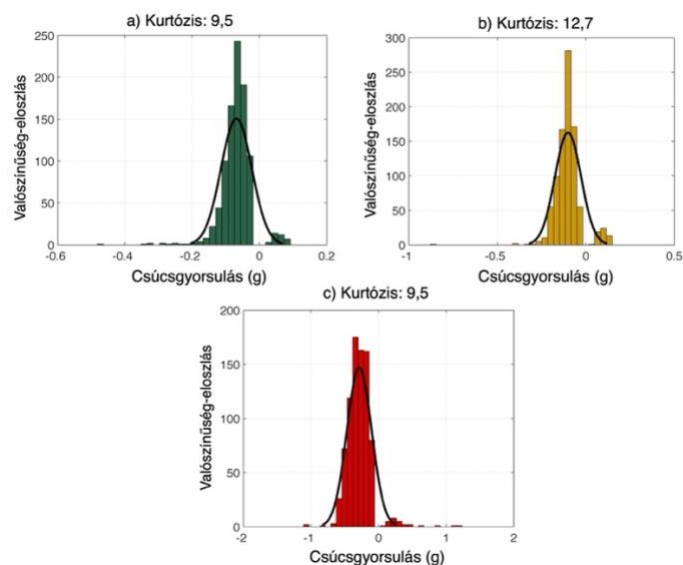
2.5. ábra. A hosszirányban kalkulált PSD görbék a vasúti felmérés során (Böröcz és Singh SP, 2017)



2.6. ábra. A keresztirányban kalkulált PSD görbék a vasúti felmérés során (Böröcz és Singh SP, 2017)

Meg kell jegyezni, hogy a tehergépjárművekhez hasonlóan a véglegesen kalkulált PD szinteket számos változó befolyásolja, így például a vasúti kocsi menetsebessége, a vasúti kocsi felfüggesztésének merevsége és csillapítása, a hordott teher, a jármű általános állapota, valamint a műszer elhelyezésének pozíciója és beállítási paraméterei is (trigger szintek). Emellett a rezgési környezetet tovább bonyolítja a vasúti kocsik közötti kapcsolatot biztosító szerkezetek dinamikus kölcsönhatása, amelyek a haladás közben merülnek fel. Ezért az eredmények más tanulmány eredményeivel csak óvatosan hasonlítható össze egymással közvetlenül. A 2.5. és 2.6. ábrák által bemutatott eredmények visszaigazolták azt a korábban már igazolt jelenséget, hogy a keresztirányban ébredő rázkódások intenzitása magasabb a hosszirányban mérhetőnél. Mindkét esetben a más földrajzi régiók kapcsán korábban publikáltakhoz képest alacsonyabbak voltak a kalkulált PD szintek.

A 2.4. táblázat tartalmazza a numerikus értékeket a PSD görbék kapcsán számított teljes  $G_{rms}$ -hez (0,5 – 200 Hz) és a mérőműszer által rögzített csúcsgyorsulásértékek sűrűségfüggvényeihez a lapossági (kurtózis) tényezőket. Korábbi tanulmányok már bemutattak eredményeket arra vonatkozólag, hogy a járművek által átadott rezgések nem Gauss természetűek, ugyanakkor ezek a tanulmányok közötti járművek megfigyelése során kerültek igazolásra (Rouillard és Sek, 2010) (Otari et al., 2011) (Rouillard, 2009). E kutatás eredményei azonban bizonyították ezt vasúti kocsival történő árutovábbítás esetén is. A 2.7. ábra mutatja be a felmérés során nyert adatokból képzett sűrűségfüggvényeket.



2.7. ábra. A rögzített események eloszlásainak sűrűségfüggvényei és kurtózis értékei, (a) hosszirány, (b) keresztirány, (c) függőleges irány

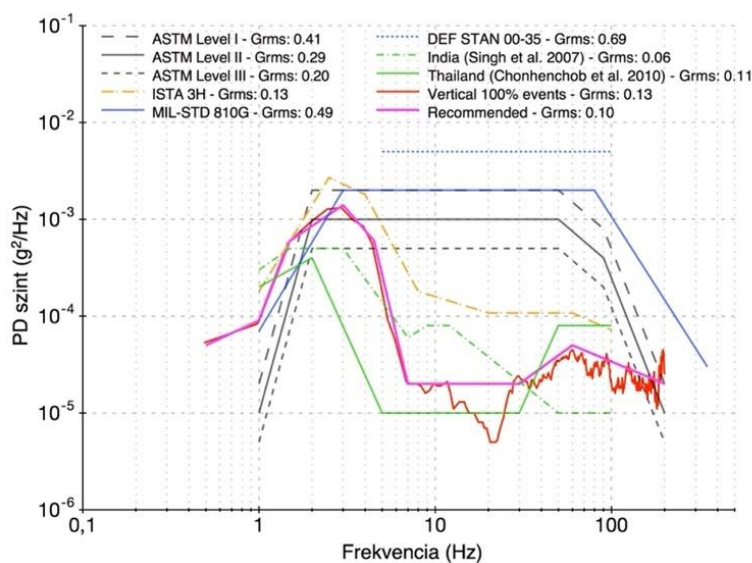
A 2.8. ábra egy olyan általam kidolgozott PSD görbét mutat be, amely a felmérés során szerzett összes adatot alkalmazza, és az eddigieknél pontosabb teszt spektrumot javasol, megadva annak frekvencia töréspontjait és PD szintjeit. A PSD függvény 9 törésponttal egy gyakorlatilag burkológörbéként megadott görbét javasol, amely lefedi a vasúti rázkódás szimulációs intenzitását a vizsgált frekvenciatartományon (frekvenciasávokban).



2.4. táblázat. A vizsgált spektrumon (0,5 – 200 Hz) kalkulált teljes  $G_{rms}$  értékek és csúcossági tényezők.

Események	Függőleges irány		Keresztirány		Hossz irány	
	Kurtózis	$G_{rms}$	Kurtózis	$G_{rms}$	Kurtózis	$G_{rms}$
Felső 5%	2,1	0,352	5,1	0,237	2,7	0,115
Felső 20%	3,8	0,220	5,3	0,140	2,9	0,070
100%	9,5	0,136	12,7	0,074	9,5	0,038
Alsó 80%	4,5	0,056	1,7	0,036	6,3	0,020

A 2.8. ábra bemutatja azokat az iparban széles körben elterjedt szabványos PSD görbéket is, amelyek jelenleg a vasúti áruszállítási rázkódásának szimulációjára az ipari szereplők alkalmaznak. Így az ASTM D4169 Assurance Level I, II, III, ISTA 3H, MIL-STD 810G és DEF-STAN 00-35 vasúti PSD spektrumokat. A célja ennek a grafikus összehasonlításnak, hogy megadható legyen, hogy mely spektrumra hasonlít leginkább a Közép-Európában felmérték. Könnyen belátható, hogy a fentiek közül egyedül az ISTA 3H protokoll, amely hasonlít a mérés eredményeire. A többi PSD görbe szignifikánsan különbözik. A teljes frekvenciatartományon a mérés eredményei a teljes  $G_{rms}$ -t tekintve a javasolt teszt spektrum az ISTA test körülbelül 77%-a teljesítményét tekintve a 0,5 – 200 Hz tartományban, és 63%-a az 1 – 100 Hz tartományban.



2.8. ábra. A függőleges rázkódások összehasonlító PSD görbéi és azok frekvenciatartományban értelmezhető teljesítményei (teljes  $G_{rms}$ )

A 2.5. táblázat a teljes  $G_{rms}$  értékeket közli azokra a PSD spektrumokra, amelyeket a 2.8. ábrán mutattam be különböző frekvenciatartományokban (1 – 10 Hz, 10 – 100 Hz and 1 – 100 Hz). Ez a fajta felosztása a frekvenciatartománynak széles körben elterjedt, mivel az egyes szabványok láthatóan a tartományonként eltérő intenzitásokat alkalmaznak. Így jobban kitűnik, hogy a korábbi eredmények fényében egyedül 1 – 10 Hz között hasonlít az ISTA protokoll által alkalmazottakhoz a javasolt spektrum és minden más szabványos vizsgálat értékeit meghaladja, majd 10 Hz felett jelentősen azok alá csökkent.

2.5. táblázat. A teljes  $G_{rms}$  értékek különböző frekvenciatartományokat tekintve

	1 – 10Hz	10 – 100Hz	1 – 100Hz
ISTA 3H	0,088	0,040	0,130
ASTM Level II	0,091	0,262	0,277
DEF STAN 00-35	0,158*	0,671	0,689*
MIL-STD 810G	0,121	0,423	0,441
India (SP Sing et al.)	0,043	0,041	0,060
Thaiföld (Chonchenchob et al).	0,024	0,070	0,074
Jelen kutatás 100% eseményei	0,062	0,049	0,084
Javasolt teszt spektrum	0,059	0,057	0,082

\* A DEF STAN 00-35 szabvány alsó frekvenciahatára 5 Hz

## 2.5. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségek, tézisek

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 eddigiéknél precízebben és szakszerűbben lehet elvégezni a vonatkozó rázóvizsgálatokat, amelyek hozzásegítenek elkerülni a felesleges túlcsoomagolásokat, 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 teszt programokat. (Jelenleg az eredményeket közlő folyóirat jogtulajdonosával folynak ez ügyben tárgyalások).

### 2.5.1. 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 "túlsomagolás" 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  $G_{rms}$  értéket a javasolt teszt spektrum során 0,10-re kell állítani.

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

<i>Javasolt PSD spektrum a közép-európai vasúti áruszállítások szimulációjához</i>	
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. A közúti futárszolgálatos szállítások során végzett felmérések és eredményei

A csomagküldő és -szállító ágazat az elmúlt tíz év során töretlen növekedésen megy keresztül. Gyakorlatilag ez a szolgáltatás az egyik legfontosabb szállítási mód lett, amely egyedi és többnyire kisméretű és könnyű csomagot gyorsan szállít belföldön és nemzetközi szinten egyaránt. Tovább növeli a forgalmát az online rendelések számának jelentős emelkedése, amely manapság már nem csak az ünnepi időszakokban állítja komoly kihívás elé a logisztikai szakembereket.

Csomagolástervezési szempontból azért is van e szállítási formának kiemelkedő jelentősége, mivel a csomagolt termékek olyan új értékesítési csatornán jutnak el a végső fogyasztóig, amely az eddigiekben kevésbé kutatott környezeti igénybevételeket okoznak a szállítás során. Sőt, a vállalat alapvető célja az olyan egységes csomagolás megtervezése, amely minden disztribúciós formában egyaránt alkalmas a termék védelmére.

Az expressz fuvarozók szolgáltatásai általában nagyvárosi területek és/vagy városi központok között létrejövő hatalmas hálózatot alkot, amely magában foglalja a helyi átvételt és kiszállítást is. A kézbesítő cégek az ilyen fuvarfeladatok végrehajtásához számos szállítási módot és járművet használnak. Így egyaránt használnak repülőgépeket, nehéz és közepes méretű teherautókat, ahogy (Lin és Sheu-Hua, 2004) (Singh SP et al., 2015) tanulmányai bemutatják. Ugyanakkor a csomagok a teljes szállítási idő egy jelentős részét kisteherautón töltik, amely időtartam többek között a napi szállítási útvonal hosszától, a szállítandó csomagok számától, a központi elosztóbázis távolságától, a feladó-, és célállomások távolságától függően változhat.

Globálisan az úgynevezett kistehergépjárművek (Light commercial vehicles, LCV) rendkívül fontos szerepet játszanak a logisztikában. Csak az Európai Unióban több, mint 1,5 millió olyan jármű van regisztrálva, amely maximum 3,5 tonnás teljes tömeggel közlekedik és közel 1,75 milliárd tonnakilométer teljesítményt végez együttesen (IBIS statisztika, 2020).

Annak ellenére, hogy a kisteherautók használata széles körben elterjedt mégis csak nagyon kevés információ ismert a kisteherautóval való szállítás közben fellépő rázkódás jellegű igénybevételek okozta károkról és magáról a környezetről, annak változóiról.

Terepen készült felmérések is csak nagyon kis számban állnak rendelkezésre a csomagküldésre használt kistehergépjárművekben. A szakirodalom áttekintése során a következőket találjuk. Az Egyesült Államokban üres kistehergépjárműben végzett méréseket Chonhenchob és társai 2012-ben, illetve Stallings és társai 2010-ben, illetőleg Ausztráliában Rouillard és Sek 2013-ban, ahol kb. 60% hasznos terhelés (700kg) mellett vizsgálta az útpálya változásának hatásait a rezgésgyorsulásokra. Továbbá egy tanulmány fellelhető még Angliából, ahol szupermarket áruházból való közvetlen kézbesítés esetén végeztek méréseket (Griffiths et al., 2010).

Pedig feltételezhető, hogy hasonlóan a közúti nyergesszerelvények kapcsán már részletesen megfigyeltekhez, itt is a szállítás közben felmerülő rázkódások az áruk elsődleges kárforrásai (Kipp, 2008) (Yam, 2009), továbbá károkat okozhatnak a

csomagolt termékekben ugyanúgy, mint a nehéz tehergépjárművek rakodóterében (Singh SP et al., 2006) (Chonhenchob és Singh SP, 2004), egységrakományokban (Singh SP és Gorzynski, 1998) (Böröcz et al., 2015).

Továbbá itt kell megjegyezni, hogy a járműsebesség, a járműfelfüggesztés típusa és kerék és gumiköpeny méretek, illetve ezek merevsége, továbbá a terhelő tömeg és a különféle pályaviszonyok ugyanúgy befolyásolják a jármű által átadott rezgésgyorsulásokat. Ezek már a nehéz tehergépjárművek esetén számos tanulmány által bizonyítva lettek (Singh SP és Marcondes, 1992) (Garcia-Romeu-Martinez, 2008) (Singh J, 2006) (Lu et al., 2006) (Zhou et al., 2015). Meg kell jegyezni azt is, hogy a korábbi fejezetben bemutatott kutatási eredmények hasonló következtetésre jutottak a vasúti kocsik szállítás esetén is (Böröcz, 2017).

Az értekezés ezen fejezete alapvetően három részre csoportosította a futárszolgálatos szállításokra vonatkozó kutatási eredményeket.

1. Ebben a földrajzi régióban (egyébként Európában sem) történt felmérés a futárszolgálatos szállítási forma által okozott rázkódásokról. Pedig a szállító járművek típusai és műszaki felépítésük eltér a világ más részein CEP ágazatban használt járművektől. Így cél volt egy olyan átlagos PSD görbe megalkotása, amely ezen típusú szállításokra laboratóriumi szimuláció során alkalmazható.
2. Korábban nem vizsgálták a terhelő tömeg és járműfelfüggesztési megoldás közvetlen hatását a rakodóterben felmerülő rezgésgyorsulások intenzitására.
3. Nincsen szakirodalmi információ arra vonatkozólag, hogy az útminőség miként befolyásolja a kistehergépjárművek rakodóterében fellépő rázkódásokat.

A kutatási eredmények természetesen ugyancsak összehasonlításra kerültek azokkal a rázóvizsgálati profilokkal, amelyeket konszenzusos vizsgálati módszerekként alkalmaznak napjainkban és olyan szabványosító szervezetek adták ki, mint az American Society of Testing and Materials (ASTM) vagy az International Safe Transit Association (ISTA).

Tudni kell, hogy a kisteherautók többségét általában félelliptikus laprugóval látják el a hátsó részen, és lég- vagy féllégrugós rendszert alkalmaznak az első tengelynél. Természetesen az áruszállítás szempontjából a hátsó rugónak különleges jelentősége van. Ebben a kutatásban külön foglalkoztam ezzel, így egy félelliptikus rugót, illetve a kettő rugót alkalmazó járművet is vizsgáltam. Az útviszonyok hatása kapcsán külön végeztem méréseket a városban, autópályán és mellékútvonalakon is. A terhelő tömeg hatásainak meghatározásához pedig különféle terhelőtömeg mellett is végeztem méréseket. Az átlagos PSD görbe megalkotásához pedig több járművön, állandóan változó terhelő tömegek, útpályaviszonyok és menetsebességek mellett végeztem számos mérést.

A kutatások gyakorlati célja pedig a jelenleg alkalmazott szabványos vizsgálatok kritikája, új tudományos megállapítások létrehozása, és javaslat kidolgozása az eddigieknél pontosabb PSD spektrum alkalmazására régióinkban.

### 3.1. A mérési rendszer konfigurációi és az elemzéshez használt módszertanok

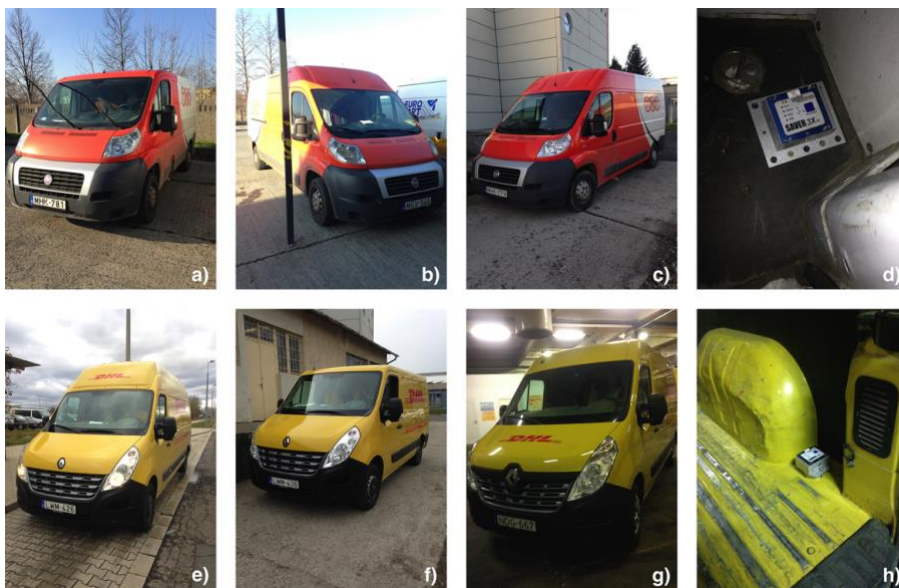
#### 3.1.1. Mérőműszer és beállításai

Az előző fejezetben is bemutatott műszert alkalmaztam a felmérések során, ugyancsak rögzítve mindhárom térirányban az adatokat. A 3.1. ábra d) és h) kis ábráin látható, ahogy a műszer csavarokkal mereven a rakodótér hátsó részében, a hátsó felfüggesztéshez közel rögzítésre került. A mérőműszer beállításai a következők voltak.

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

#### 3.1.2. Az átlagos PSD megállapításához alkalmazott mérési körülmények

Az átlagos PSD teljesítmények megállapításához 6 különböző kistehergépjárművet (angol megfelelője: 'Van' – az ábrákban ennek megfelelően alkalmazva) alkalmaztam, két különböző szolgáltatónál. A járműveket a 3.1. ábra mutatja be, specifikációjukat pedig a 3.1. táblázatban helyeztem el. A mérések helyszíne Győr-Moson-Sopron megye, Vas megye és Komárom megye volt. A 3.2. táblázat tartalmazza a méréshez tartozó útviszonyokat, megtett úthosszokat, átlagos terheléseket és menetsebességeket.



3.1. ábra. Az átlagos PSD görbe meghatározásához alkalmazott kistehergépjárművek és az elhelyezett műszer pozíciója

Minden egyes jármű egy munkanapján keresztül megfigyelésre került, amely kb. 8 órát jelentett. Ebből a járművek 5,5 – 6,5 óra között a mozgásban. 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. A méréseket 2018 decemberében folytattam le.

## 3.1. táblázat. A felméréshez használt járművek főbb műszaki tulajdonságai

Mérés	Gyártási év	Jármű saját tömege (kg)	Hasznos kapacitás (kg)	Konténer mérete (m <sup>3</sup> )	Tengelytáv (mm)
Jármű (Van 1) Fiat Ducato	(2010)	1935	1165	8,0	3000
Jármű (Van 2) Fiat Ducato	(2012)	1975	1525	13,0	4035
Jármű (Van 3) Fiat Ducato	(2009)	2000	1300	11,5	3450
Jármű (Van 4) Renault Master	(2010)	2010	1490	14,8	4332
Jármű (Van 5) Renault Master	(2011)	1811	1489	8,0	3182
Jármű (Van 6) Renault Master	(2014)	1880	1420	10,8	3682

## 3.2. Az átlagos PSD meghatározásához a mérés során alkalmazott körülmények

Mérés	Átlagos menetseb. (km/h)	Terhelés nagysága (kg)	Autópálya hossza (km)	Főútvonal hossza (km)	Mellékútvonal hossza (km)	Városi utak hossza (km)	Teljes megtett távolság (km)
Van (1)	53,7	110–400	0	192	107	38	337
Van (2)	49,2	80–650	57	103	83	83	326
Van (3)	46,6	90–500	13	69	143	70	295
Van (4)	33,1	140–1000	0	13	14	131	158
Van (5)	40,8	10–530	27	65	97	56	245
Van (6)	57,5	160–620	67	98	81	69	315

## 3.1.3. A különféle útpályák hatásának elemzéséhez alkalmazott körülmények

A jármű terhelő tömege ekkor mindig 400 kg volt (a hasznos terhelés kb. 1 500 kg) A vizsgált jármű típusa a 3.1. ábra b) kisábrán látható FIAT Ducato volt (a jármű egy laprugóval szerelt hátul). Az útviszonyok hatásának elemzéséhez a felmért útszakokat négy csoportba osztottam.

- Autópálya (A) ahol a jármű menetsebessége 100–130km/h közötti volt,
- Főútvonal (FÚ) ahol a jármű menetsebessége 50–90 km/h volt,
- Mellékútvonal (MÚ) ahol a jármű menetsebessége 50–90 km/h között volt, és
- Városi utak (V), ahol a jármű sebessége 1-50 km/h között volt.

Minden esetben a járművön a mérés 120 percig tartott, és a jármű ezalatt folyamatosan mozgásban volt. Az autópálya szakasz Győrből Budapestre és vissza, a főútvonal Győrből Sopron felé tartó útvonal, a mellékútvonalak pedig a Szigetközben kerültek felmérésre. A városi mérést Győrben folytattam.



### 3.1.4. A terhelő tömeg és laprugószám változásának vizsgálatához alkalmazott körülmények

A terhelő tömeg és laprugó számhatásának vizsgálatához kettő járművet alkalmaztam (későbbiekben Van "A" és Van "B"). 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 200kg) volt. A 3.2. és 3.3. ábrák mutatják be a járműveket és rugókat a hátsó felfüggesztésnél. A járművek műszaki specifikációját a 3.3. táblázat tartalmazza.

3.3. táblázat. A terhelő tömeg és laprugó szám hatásának vizsgálatához alkalmazott járművek

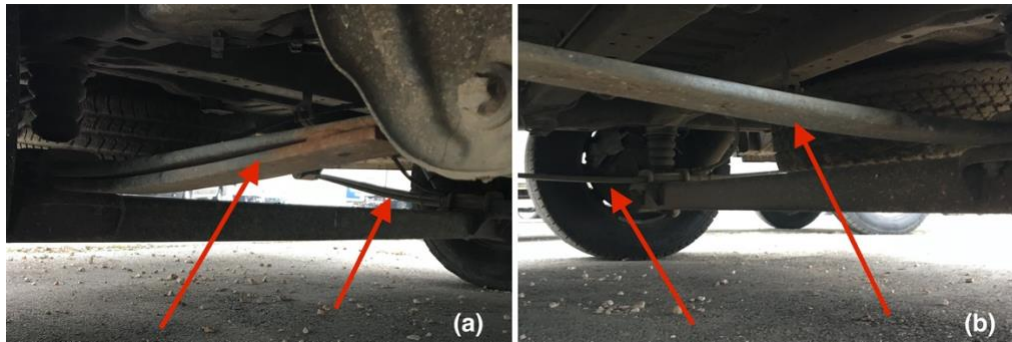
Jellemző	Van 'A'	Van 'B'
	Kettős laprugós	Egy laprugós
Modell	FORD Transit	FIAT Ducato
Gyártási év	2012	2012
Felfüggesztés hátul	Laprugó	Laprugó
Laprugók száma	2	1
Tengelytáv (mm)	4 035	3 750
Konténer méret (m <sup>3</sup> )	15,1	13
Saját tömeg (kg)	1 975	2 018
Hasznos kapacitás (kg)	1 525	1 482

A járművek a mérés során relatíve állandó menetsebességgel közlekedtek, 110-130 km/h között mindig autópályán. A választott útvonal mindkét esetben az 'M1' és 'M0' jelzésű utak voltak, győri indulással és budapesti (Vecsés) érkezéssel. Az útvonalak hossza esetenként kb. 300 km volt.



3.2. ábra. A különféle terhelő tömegek és laprugó számok hatásának vizsgálatához alkalmazott járművek





3.3. ábra. Az a) kettő, és b) egy laprugóval szerelt kistehergépjármű

### 3.1.5. Az elemzéshez használt módszertanok

#### 3.1.5.1. Statisztikai módszerek

Az útpályák változásának elemzéséhez először doboz ábrákat (box plots) és tapasztalati kumulatív eloszlás függvényeket (CDF, cumulative distribution function) határoztam meg. Utóbbi jelentését már a 2.4. alfejezet elején részleteztem. A CDF-eket ez esetben úgy mutatom be, hogy a tapasztalati értékeket Weibull eloszlásba illesztettem. A rögzített csúcsgyorsulások a korábban ismertetett csoportok szerint egyutas ANOVA (variancia-analízis, analysis of variance) módszerrel elemeztem, hogy összehasonlítsam a csoportok közötti különbségeket. Ezt követően utólagos analízis volt csoportpáronként való összehasonlításhoz post hoc elemzés is. Ehhez Tukey-féle eljárást alkalmaztam, 5% ( $p < 0.05$ ) szignifikancia szint mellett. Ugyancsak megvizsgáltam a rögzített csúcsgyorsulás események valószínűség sűrűségfüggvényéhez (PDF) tartozó kurtózis és ferdeségi értékeket (CI 95%).

A terhelő tömeg és rugó szám változásának részletesebb elemzéséhez kiszámítottam a Crest-tényezőket is. A Crest-tényező a zaj egyik fontos jellemző dimenziótlannal mennyiség, amely a csúcserték viszonyát fejezi ki az átlagos energiatartalomhoz képest. A Crest-tényező a következőképpen határozható meg:

$$C = \frac{|a|_{\text{csúcs}}}{a_{\text{RMS}}} \quad (3.1)$$

#### 3.1.5.2. Rezgés gyorsulások elemzéséhez alkalmazott módszerek

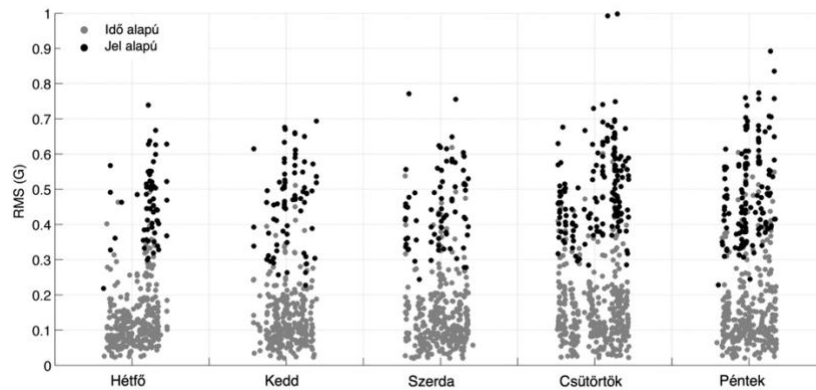
A rögzített adatok elemzéséhez és a PSD görbék meghatározásához a már bemutatott FFT elemzést alkalmaztam (Fast Fourier Transformation, gyors Fourier Transzformáció). Az adatok ugyancsak 0,5 – 200 Hz-es tartományban kerültek vizsgálatra. Az elemzést megelőzően, az átlagos PSD görbék meghatározásához rögzített események kapcsán, a RMS értéke szerint 0,03  $G_{\text{rms}}$  szint alatt lévő adatokat eltávolítottam. Ennek az az oka, hogy a futárszolgálatos kiszállítási esetén a jármű számtalanszor megáll az áruk le-, illetve felvételéhez. Ezeket a nem kívánt, inaktív szegmenseket el kellett távolítanom a vizsgálathoz. A terhelő tömeg és laprugó szám vizsgálata esetén erre nem volt szükség, mivel a járművek folyamatosan mozgásban voltak a mérés során.

Az átlagos PSD szint meghatározásához kétféle módszert használtam: a) az összes felmérés adatát egyben elemezve készítettem egy PSD görbét (Kompozit 1); b) minden egyes felmérés felhasználásával létrehoztam egy olyan burkológörbét (Kompozit 2) is, amely a legmagasabb PD szinteket veszi alapul az egyes frekvenciatartományokban.

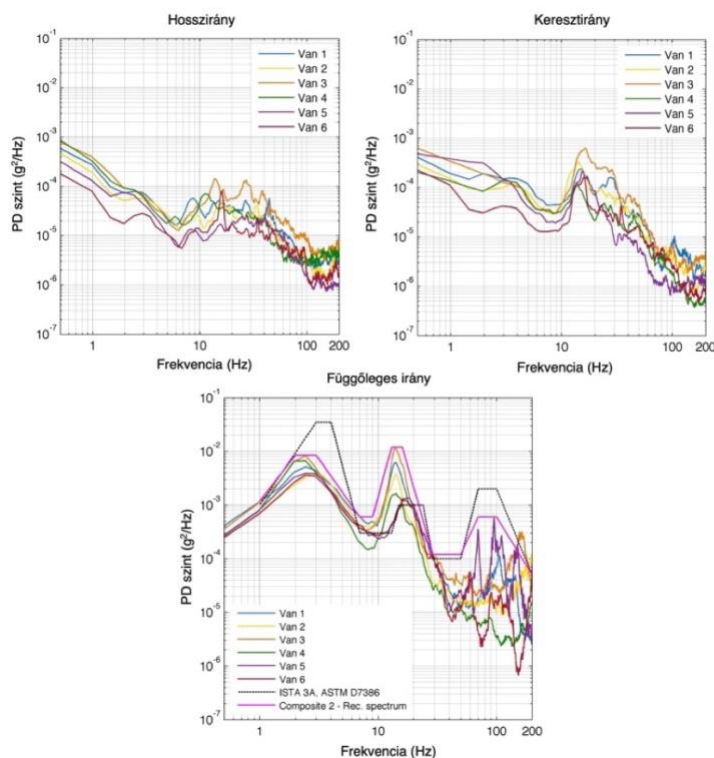
Minden esetben megadásra került a vizsgált frekvenciatartományon kalkulált teljes  $G_{rms}$  is. A változó terhelőtömeg és laprugó számok esetén ugyancsak PSD görbéket képeztem, elemeztem, és a teljes  $G_{rms}$  értéket riportálom.

### 3.2. Az átlagos PSD szint meghatározása kompozit PSD görbék megadásával

A hat járművel végzett mérés eredményei alapján került meghatározásra az átlagos PSD görbe. Egy járművön jel és idő alapú triggerrel rögzített események RMS gyorsulás értékeit mutatja be a 3.4. ábra, a munkahét napjai szerint. A 3.5. ábra a három irányban rögzített értékek alapján kalkulált PSD görbéket mutatja.



3.4. ábra. A rázkódási események RMS gyorsulás értékei egy járműben (Böröcz 2018)



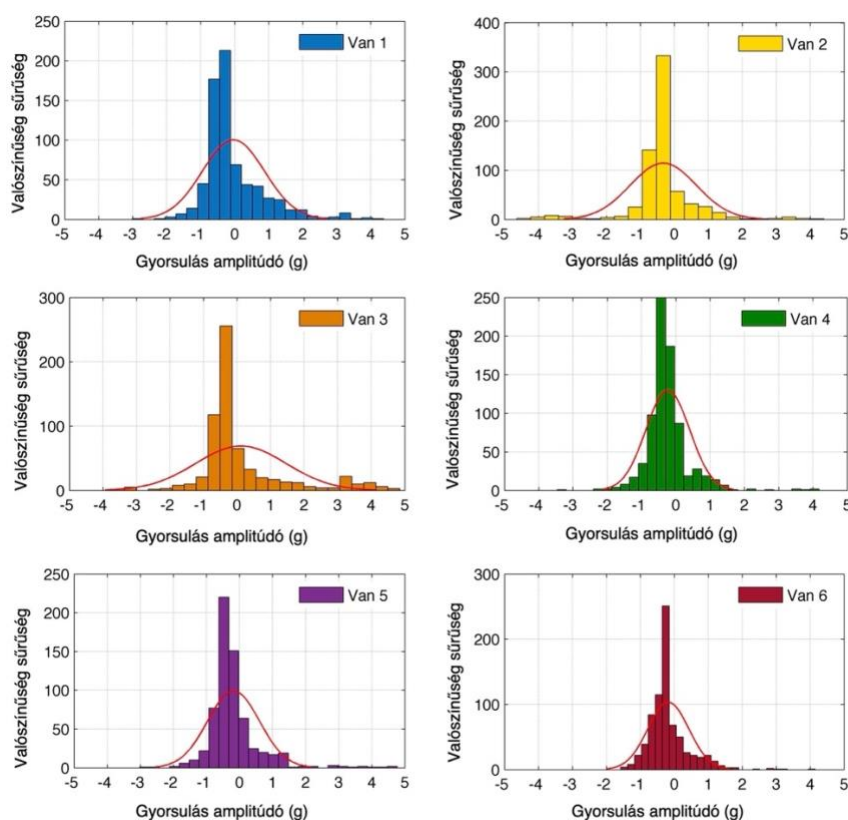
3.5. ábra. A 6 kistehergépjárművön mért rázkódások PSD görbéi (Böröcz és Singh SP, 2018)

Összehasonlítási céllal a széles körben alkalmazott ISTA 3A (2006) és ASTM D7386 (2012) szabványos vizsgálati programok PSD görbéit is ábrázoltam, illetőleg a már

korábban említett ‘Kompozit 2’ PSD spektrumát, amelyet a hat mérésből a legmagasabb értékekkel rendelkező PD szintekhez igazítottam. Természetesen a használhatóság miatt 12 törésponton egyszerűsítve lett (ezt a módszert az ISTA 2011-es Fedex előírás is alkalmazza).

A legmagasabb PD szintek 2 – 3 Hz és 13 – 16 Hz között voltak függőleges irányban. Fontos megfigyelés, hogy a korábban említett szabványok ezt 3 – 4 Hz közé, illetve 15 – 24 Hz között adják. Ez egy lényeges észrevétel, mivel egy adott frekvenciához tartozó különféle gyorsulás értékek más és más tényleges mozgási viszonyt jelentenek, főként az elmozdulásuk alapján, nemkülönben az eltérő frekvenciatartományban megjelenő rázkódások is. A felsőbb tartományokban, 50 Hz felett, a PD szintek általában meredeken csökkenni kezdtek, ez alól egyedül a függőleges irány a kivétel.

A 3.6. ábra a felvett események csúcsgyorsulás értékeihez tartozó statisztikai eloszlásokat azok kurtózis és ferdeségi mutatóit (3.2. táblázat is tartalmazza). Minden egyed eloszláshoz tartozó érték azt mutatta, hogy az eltér a Gauss-i eloszlástól. Ez azt jelenti, hogy ha a felvett adatokat azok iránya szerint vizsgáljuk, akkor az idő függvényében nem normális eloszlásúak voltak. A függőleges irányban 1,61 és 8,33, a keresztirányban 1,07 – 9,10 és hosszirányban 1,47 – 9,75 közötti értékek voltak. A 3.4. táblázat tartalmazza a teljes frekvenciatartomány  $G_{rms}$  értékeit is külön-külön minden mérésre. Ezek azt mutatják, hogy a korábban az Egyesült Államokban végzett felméréshez (Chonhenchob et al., 2012) képest magasabb az 1 – 200 Hz tartományban ez az érték [6].

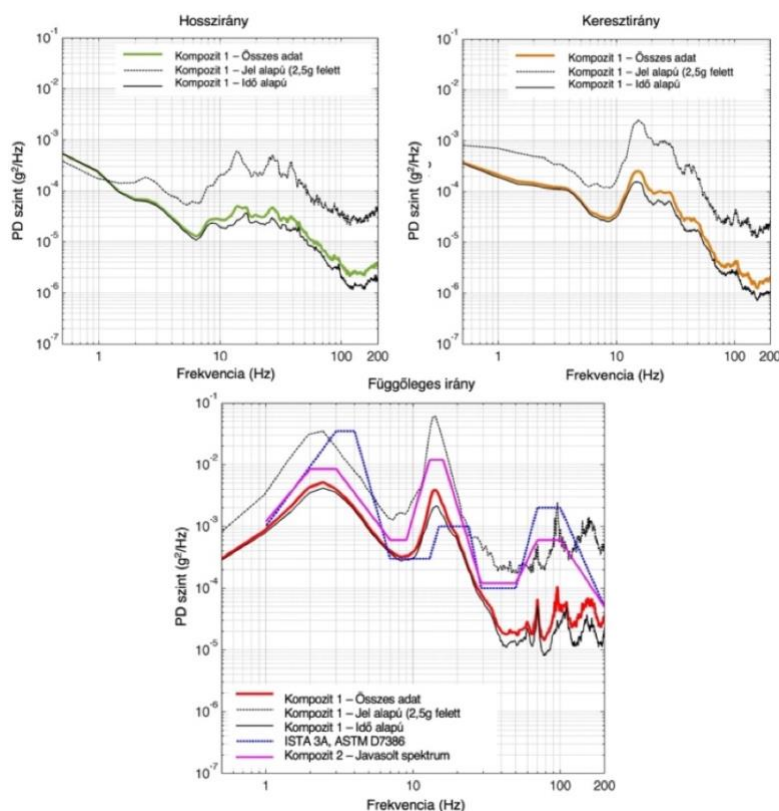


3.6. ábra. A függőleges irányban rögzített csúcsgyorsulás értékek eloszlásai (Böröcz és Singh SP, 2018)

3.4. táblázat A felmérés alapján kalkulált teljes  $G_{rms}$ , kurtózis (K) és ferdeségi (S, skewness) értékek.

Van	Hosszirány			Keresztirány			Függőleges irány		
	K	S	$G_{rms}$	K	S	$G_{rms}$	K	S	$G_{rms}$
Van 1	1,47	1,64	0,055	2,33	-0,61	0,074	2,23	1,72	0,223
Van 2	3,53	0,83	0,048	2,37	-0,14	0,068	6,46	0,33	0,191
Van 3	2,09	0,45	0,071	1,07	-0,13	0,097	1,61	1,51	0,277
Van 4	1,92	1,18	0,065	1,17	-0,63	0,073	8,33	2,12	0,177
Van 5	9,75	-1,98	0,096	9,10	1,89	0,120	7,23	2,38	0,188
Van 6	2,26	1,20	0,057	4,03	0,29	0,057	4,81	2,01	0,156

A 3.7. ábra két különböző kompozit spektrumot mutat be. A "Kompozit 2" már ismertette volt korábban, a "Kompozit 1" külön mutatja az összes felvett adat által képzett PSD görbét, illetőleg csak az időalapon felvett és külön csak a jel alapú triggerrel felvett adatokból képzett PSD görbéket. Utóbbi csak információs jelleggel lett megadva, ugyanis a teljes adatsor közel csak 3%-át adta ez a típusú adatrögzítés. Az adatok 100%-át felhasználó kompozit spektrum átfogó adatsor alapján egy olyan átlagolt PSD görbét kínál, amely jól leképezi a futárszolgálatos szállítási mód során felmerülő véletlenszerű rázkódási eseményeket 1 – 200 Hz között.



3.7. ábra. A kompozit PSD spektrumok és a kutatás alapján javasolt PSD spektrum (Böröcz és Singh SP 2018)

A kutatás eredményeként létrejövő laboratóriumi vizsgálatokhoz javasolt PSD görbe magasabb intenzitással rendelkezik a 15 – 25 Hz-es tartományban, mint a széleskörben elterjed szabványok javasolják. Azaz itt várható az „alulcsomagolás” jelensége, míg 3 – 4 Hz és 70 – 10 Hz között a terepi mérések alacsonyabb értékekhez vezettek, azaz a

vizsgálatok „túlcsoomagolás” irányában mozdítják el a csomagolástervezési folyamatokat. Továbbá 15 – 25 Hz között a keresztirányú rezgés gyorsulások intenzitása is relatív magas értékeket mutatnak (a függőleges iránnyal összevetve). Ezt a szakirodalom ezidáig nem tárgyalta, és nem közölte.

A 3.5. táblázat összehasonlítást mutat be a szabványos és jelen terepi mérések alapján meghatározott azon frekvenciasávokra nézve, amelyek jelentős intenzitást mutatnak. Így, az adott frekvenciasávban számított  $G_{rms}$  értékek közvetlenül összehasonlíthatóvá válnak. Látható, hogy 7 – 29 Hz között közel kétszer akkora intenzitást mutatnak a kutatás eredményei, mint a szabványos értékek.

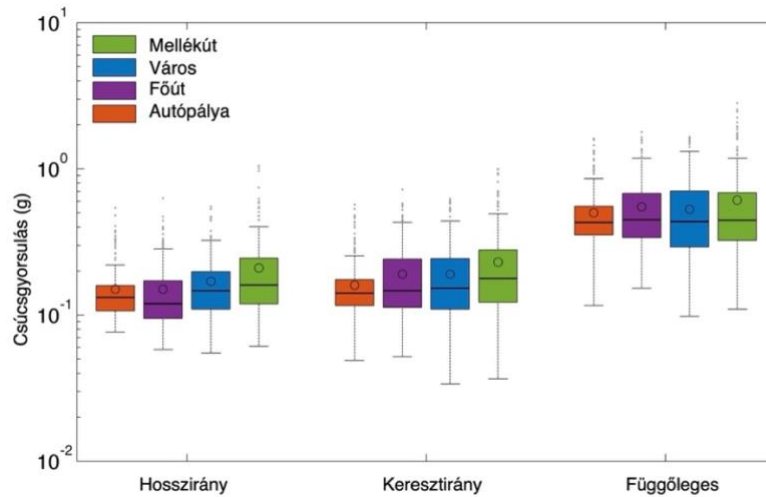
3.5. táblázat Különböző frekvenciasávokban a teljes  $G_{rms}$  értékek a felmérés és ISTA/ASTM szabványok alapján

	ISTA 3A és ASTM D7386	Javasolt	Intenzitás (a szabvány százalékában)
1 – 7 Hz	0,279	0,150	~54%
7 – 13 Hz	0,042	0,133	~317%
13 – 29 Hz	0,110	0,253	~230%
29– 50 Hz	0,046	0,050	~109%
50 – 200 Hz	0,343	0,209	~61%
Teljes (1 – 200 Hz)	0,460	0,388	~84%

### 3.3. A változó útpálya minőségének elemzése

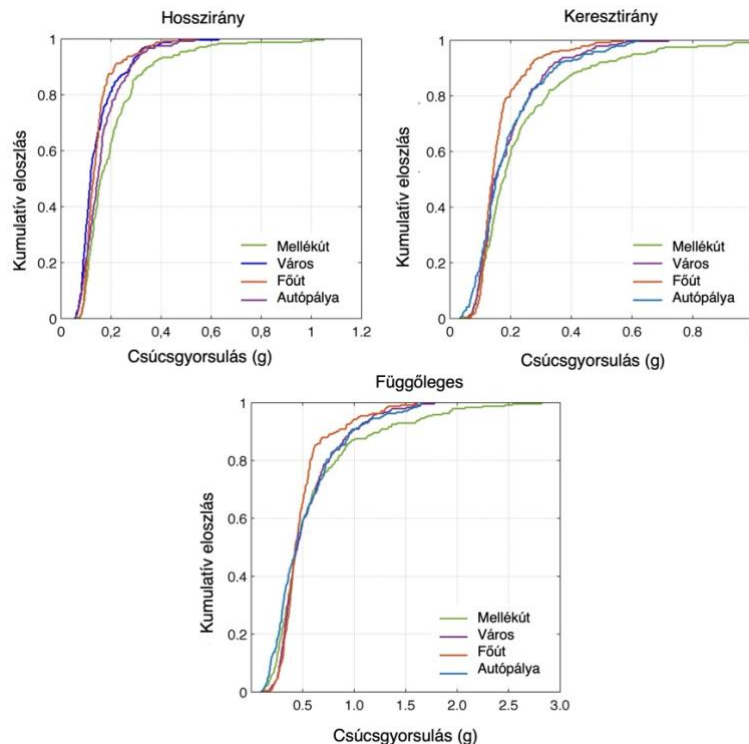
A 3.8. ábra az interkvartilis terjedelmeit mutatja be (IQRs) azoknak a rögzített csúcsgyorsulás értékeknek, amelyeket a különböző útviszonyok vizsgálatánál rögzítettem. Az interkvartilis tartomány a függőleges irányú adatoknál a városi utaknál volt a legszélesebb, és az autópályán a legszűkebb. Nyilvánvaló, hogy az autópályán a kisebb mértékű pályaegyenetlenség (jobb minőségű út) és szinte konstans menetsebesség egy „simább” járműfutást eredményez, amely az adatokban is meglátszik. A városi utak során az út minőségnek állandó változása eredményezi a jelentős változatosságot az értékekben. Az irányok szerinti nagyságrend a függőleges, a keresztirány, és végül a hosszirány sorrendjében volt megállapítható. A legmagasabb értékeket a műszer a mellékutakon, ahol a pályaminőség gyengébb, de a menetsebesség már relatíve nagy. Az itt rögzített adatok statisztikailag is különböztek az összes többi úton mérttől az ANOVA elemzés alapján. Nem volt statisztikai különbség a függőleges adatoknál a főútvonal és autópálya adatai között, a városi és főútvonalon mért adatok között keresztirányban, illetve a főútvonal és autópálya hosszirányban mért adatai között ( $p < 0.05$ ).

A függőleges irányú csúcsgyorsulások 1,21 – 1,37-ször nagyobbak voltak a mellékútvonalakon, mint bárhol máshol. Ez visszaigazolja azokat a korábbi kutatási eredményeket a nehéztehergépjárművek vonatkozásában, hogy a függőleges irányú gyorsulások a sebességgel, illetve a pályaminőség romlásával növekednek (Lu et al., 2010) (Garcia-Romeu-Matinez et al., 2008) (Zhou et al., 2015).



3.8. ábra. A terepi mérések során különböző útviszonyok mellett rögzített csúcsgyorsulás értékek interkvartilis terjedelmei (Böröcz és Singh SP 2018)

A 3.9. ábra és 3.6. táblázat a mért adatok eloszlásfüggvényeit mutatja be. Könnyen belátható, hogy a legmagasabb kockázat arra, hogy a szállított áru károsodást szenvedjen, a mellékútvonalon való szállítás során van, ahol szállítás egyszerre relatív magas sebesség mellett rossz minőségű úton halad a kistehergépjármű. Kereszt-, és hosszirányban ez hirtelen fékezésekkel és nagy sebességgel a számos kanyaron áthaladó járműre is jellemző a mellékutak esetén.



3.9. ábra. A különböző útviszonyok során rögzített csúcsgyorsulás értékek tapasztalati eloszlásfüggvényei (CDF-ek) (Böröcz és Singh SP, 2018)

Az útviszonyok alapján meghatározott PSD görbék a 3.10. ábrán láthatók. Ahogy az várható volt, itt is a mellékúton (SR) megfigyelt rázkódásokból származtak a legmagasabb PD szintek. Korábban nem került említésre, de a kereszt-, és

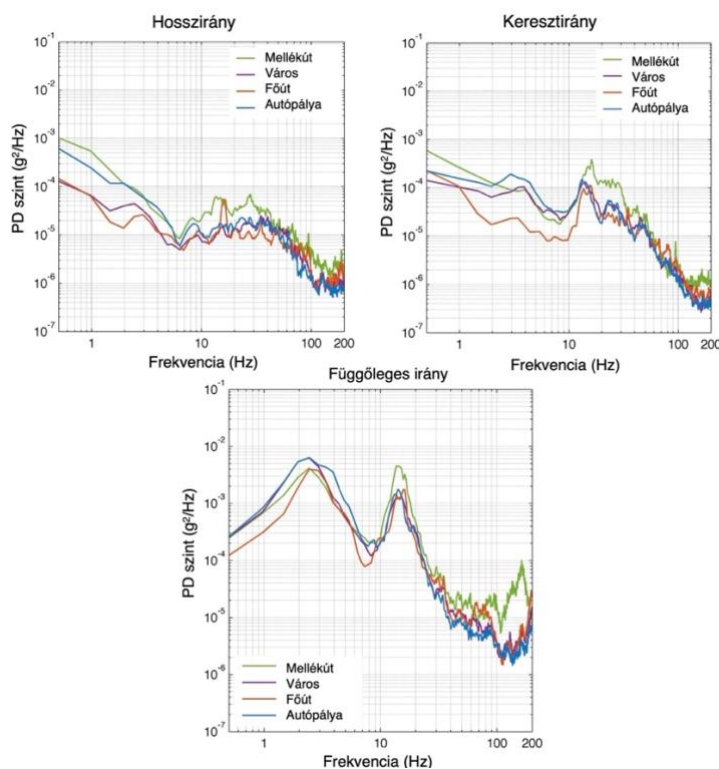


hosszirányban 1,5 Hz alatt nagy PD szintet mutató értékek előfordulása a jármű olyan hosszirányú mozgásából származhat, amely az alacsony sebesség mellett az aktuális forgalomhoz való igazodás miatt jön létre, illetőleg keresztirányban a szűk kanyarokban való fordulások miatt. A keresztirányban 15 – 18 Hz között tapasztalható intenzív mozgás pedig a sávváltásokhoz.

3.6. táblázat. A mért csúcsgyorsulás adatok statisztikájának összegzése

Csúcsgyorsulás adat (g)	Hosszirány				Keresztirány				Függőleges irány			
	A	V	FÚ	MÚ	A	V	FÚ	MÚ	A	V	FÚ	MÚ
Max	0,54	0,58	0,47	1,05	0,57	0,62	0,72	0,99	1,61	1,66	1,78	2,82
99% előfordulás	0,37	0,46	0,40	0,74	0,47	0,55	0,54	0,92	1,33	1,56	1,56	2,25
95% előfordulás	0,29	0,32	0,31	0,47	0,31	0,43	0,43	0,60	1,04	1,17	1,17	1,68
90% előfordulás	0,21	0,28	0,28	0,35	0,26	0,34	0,33	0,48	0,82	0,98	0,97	1,24

\* C: Város, M: Autópálya, MR: Főút, SR: Mellékút



3.10. ábra. A különböző útviszonyok mellett kalkulált PSD spektrumok (Böröcz és Singh SP, 2018)

E kutatásnál is meg kell említeni, hogy hasonlóan a nehéztehergépjárműveknél, vagy korábbi fejezetben bemutatott vasúti kocsiknál számos tényező befolyásolhatja még az aktuálisan mért PD szinteket, így többek között a felfüggesztés típusa, a kerekek mérete és a gumiköpeny merevsége vagy a terhelő tömeg.

A 3.7. táblázat alapján ugyancsak igazolásra került, hogy a fellépő csúcsgyorsulás értékek alapján számított valószínűség sűrűségfüggvények különböznek a Gauss-i normális eloszlástól. Ugyanakkor látható, hogy függőleges irányban a városi út kurtózis értéke már közelít a normális eloszlás felé. Itt meg kell azt is jegyezni, hogy az Ausztráliában kistehergépjárműveken végzett kutatásokhoz (Rouillard és Sek, 2013) képest e kutatás eredmények alacsonyabb kurtózis értékeket mutattak.



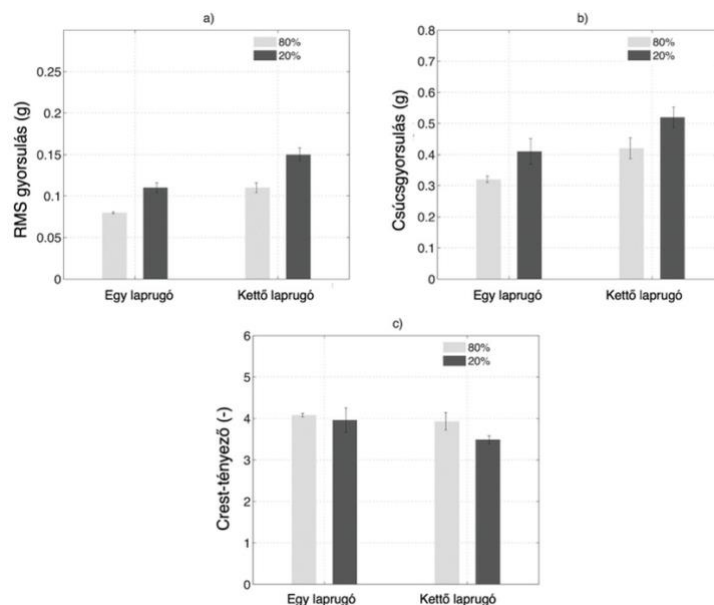
3.7. táblázat. A különféle útviszonyok során felmért adatok teljes  $G_{rms}$ , kurtózis (K) és ferdeségi (S, skewness) értékei.

Útpálya	Hosszirány			Keresztirány			Függőleges irány		
	K	S	$G_{rms}$	K	S	$G_{rms}$	K	S	$G_{rms}$
Város	0,74	0,66	0,041	0,34	-0,54	0,050	0,26	0,93	0,142
Autópálya	0,41	0,23	0,034	0,15	-0,32	0,042	4,34	2,46	0,139
Főút	0,68	0,73	0,035	1,46	1,69	0,048	1,29	1,53	0,152
Mellékút	1,84	1,04	0,057	0,37	-0,13	0,070	1,63	1,56	0,188

### 3.3. A változó terhelőtömeg és laprugó számok hatása a rezgés gyorsulásokra

Ebben az alfejezetben vizsgálom meg és elemzem a különböző terhelés és felfüggesztési megoldással rendelkező kistehergépjárművekben megfigyelt rázkódásokat. A 3.11. ábra mutatja be az itt mért csúcsgyorsulásokat, RMS gyorsulás értékeket és a kalkulált crest-tényezőket. A crest-tényező gyors és hasznos módszer a jelfeldolgozásban (Cron et al., 2004), amely megfelel egy adott csúcsgyorsulás maximális abszolút értéke és RMS értéke közötti aránynak.

A legalacsonyabb rázkódási szinteket a 80%-os terheléssel közlekedő és kettő laprugóval szerelt kisteherautónál mért, míg a legmagasabbat az egy laprugós és 20%-os terhelésű járműben. Statisztikailag igazolható különbség volt az egy, illetve a kettő laprugóval szerelt jármű között, ugyanígy a 20% és 80% terhelések között ( $p < 0.05$ ). A 20%-os terheltségű járműben mért csúcsgyorsulások 1,25 és 1,31-szer nagyobbak voltak, mint 80%-os terheltségűben. Ez az RMS gyorsulás értékekénél 1,34 és 1,38-szorosan volt magasabb. Ugyanakkor terhelő tömeg mellett az egy laprugóval szerelt kistehergépjármű 1,39 és 1,42-szer magasabb értékeket mutatott a csúcsgyorsulások, illetve RMS gyorsulások tekintetében.



3.11. ábra. Az egy, illetve kettő laprugóval szerelt kistehergépjárművek mért a) csúcsgyorsulás értékek, b) RMS gyorsulás értékek és c) crest-tényező (Böröcz, 2017)

Az RMS gyorsulásokból és csúcsgyorsulások adataiból képzett eloszlásfüggvényeket a 3.12. ábrán mutatom be (Weibull eloszlásfüggvény modellbe illesztve), illetve a 3.8. és

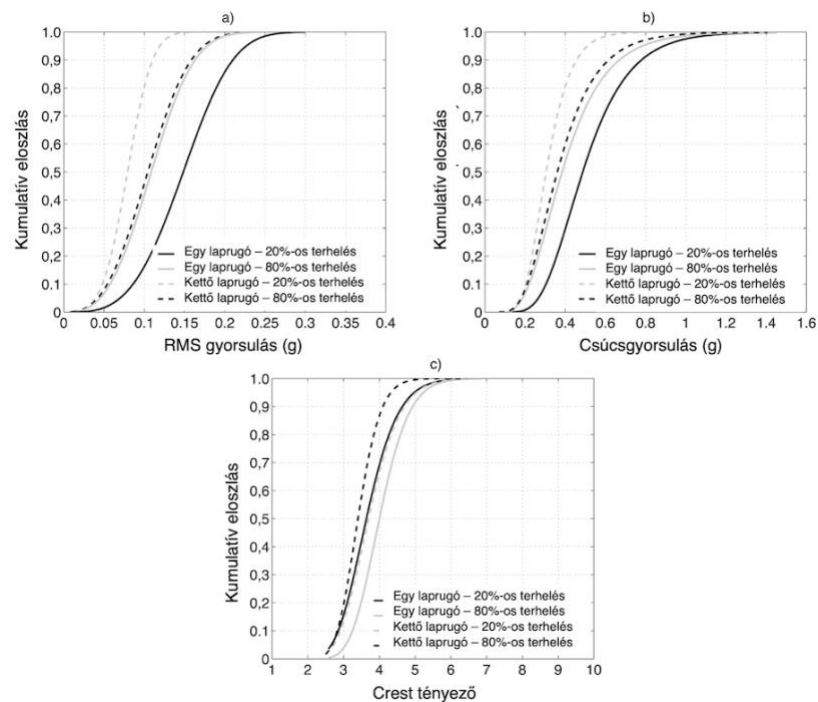
3.9. táblázat tartalmazza a numerikus adatokat az egyes értékek előfordulási nagyságrendjére vonatkozóan.

3.8. táblázat. A mért csúcsgyorsulás adatok statisztikájának összegzése

Csúcsgyorsulás adat (g)	Van 'A'		Van 'B'	
	80%-os teher	20%-os teher	80%-os teher	20%-os teher
Max.	0,97	1,40	1,43	1,46
98%-os előfordulás	0,71	1,13	1,19	1,25
95%-os előfordulás	0,52	0,72	0,82	0,92
90%-os előfordulás	0,43	0,61	0,64	0,78
Átlag	0,32	0,36	0,38	0,52

3.9. táblázat. A mért csúcsgyorsulás adatok statisztikájának összegzése

RMS gyorsulás adat (g)	Van 'A'		Van 'B'	
	80%-os teher	20%-os teher	80%-os teher	20%-os teher
Max.	0,19	0,26	0,29	0,31
98%-os előfordulás	0,14	0,20	0,21	0,26
95%-os előfordulás	0,12	0,18	0,18	0,23
90%-os előfordulás	0,11	0,17	0,16	0,21
Átlag	0,08	0,12	0,11	0,15

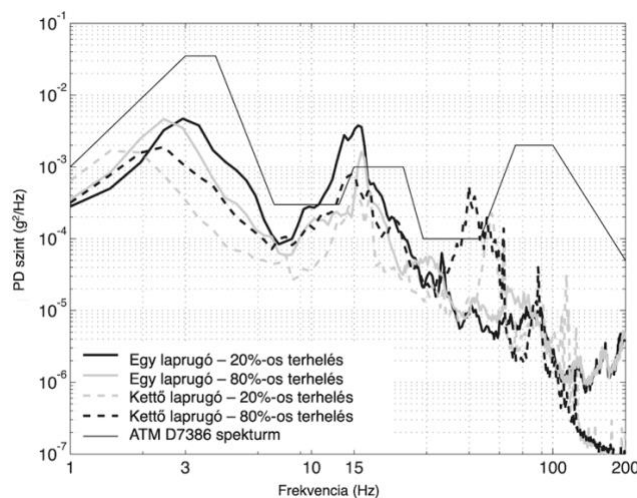


3.12. ábra. A kumulatív eloszlásfüggvények az egy, illetve kettő laprugóval szerelt kistehergépjárműveknél 20% és 80%-os hasznos terhelés mellett (a) RMS gyorsulás, (b) csúcsgyorsulás, (c) crest-tényező (Böröcz, 2017)

A 3.13. ábra mutatja be a kutatás során a terhelőtömegek változása és a kétféle laprugó szám mellett rögzített adatok PSD görbéit. Ahogy az már a kistehergépjárműves

csomagszállítás átlagos rázkódási szintjeinek meghatározásánál is látható volt, az intenzívebb PD szintek az alacsony 1,5 – 2,5 Hz között, illetve 15 Hz körül voltak. A ‘Van ‘A’ 25 Hz – 40 Hz között mutatkozó magasabb PD szintek vélhetően a járműszerény rezonanciafrekvenciáján történő gerjesztés miatt jelentek meg. Minden esetben a PD értékek 80 Hz felett gyorsan csökkentek. A rázkódási intenzitások a 20%-os terhelés mellett magasabbak voltak, mint a 80%-os mellett, azaz az alacsony terhelőtömeg növeli a rázkódási intenzitást egyéb más változatlan körülmény mellett. Azonos terhelőtömeg mellett a kettős laprugót alkalmazó teherautóban tapasztaltam alacsonyabb rázkódásokat intenzitásuk szerint.

Az ábra mutatja az ASTM D7386 szabvány pick-up and delivery vehicle (csomagszállításra alkalmazott jármű) PSD spektrumot összehasonlítási céllal. A felmérés során kinyert adatok részben azt mutatják, hogy a PD szintek az alsó frekvenciatartományban alacsonyabbak voltak, de 15 Hz környékén meghaladják a mesterséges intenzitás növeléssel meghatározott szabványos szinteket is, illetve kissé eltérnek a frekvenciasávokban azoktól. Ez a jelenség egyértelműen ahhoz köthető, hogy a legnépszerűbb szabványos vizsgálathoz az Egyesül Államokban alkalmazott járműveknek más a felépítésük, mint az Európában alkalmazottaké. De az is szerepet játszik az alsó frekvenciatartományban, hogy Európában alkalmazott kiszállítási módok során magasabb terheléseket alkalmaznak. Az USA-ban ezek a csomagszállítások polcokkal szerelt járművekben történnek, addig Európában túlnyomórészt rendezés nélküli halmazolt kiszállítás a jellemző.



3.13. ábra. A csomagszállító kistehergépjárműveknél mért rázkódások PSD spektrumai különféle terhelőtömeg és laprugószám esetén (Böröcz, 2017)

A kutatás ezen pontján ugyancsak kiszámításra került a vizsgálat frekvenciatartományon (1 – 200 Hz) a teljes  $G_{rms}$  érték. Ezt mutatja be a 3.10. táblázat. Látható, hogy a mért adatok 3 – 5-ször alacsonyabb értékeket mutatnak, mint az ASTM D7386 szabvány által javasolt, amely 0,46. Ez viszont abból is származhat, hogy a mérések kizárólag csak autópályát alkalmaztak a felmérésnél, hogy a lehetőségekhez mérten kizárják az útpálya minőségi változásának hatását az eredményekre, amely viszont azt okozta, hogy a kedvezőbb útpályaminőség hatása közvetlenül megjelent a kalkulált  $G_{rms}$  értékekben az alacsonyabb rázkódási intenzitások okán.

3.10. táblázat. A teljes  $G_{rms}$  értékek a felmérések során az 1 – 200 Hz frekvenciatartományban

PSD spektrum	Teljes $G_{rms}$ (1 – 200 Hz)
Van 'A' kettős laprugó – 80%-os terhelés	0,083
Van 'A' kettős laprugó – 20%-os terhelés	0,113
Van 'B' szimpla laprugó – 80%-os terhelés	0,117
Vann 'B' szimpla laprugó – 20%-os terhelés	0,160
ASTM D7386 – pick-up and vehicle spektrum	0,460

### 3.4. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek

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 javaslatai 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).

#### 3.4.1. 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  $G_{rms}$  értéket a javasolt teszt spektrum során 0,388.

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

Frekvencia töréspontok	PD szint $g^2/Hz$
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.

## 4. A kombinált (multimodális) áruszállítás körülményeinek felmérése és elemzése

### 4.1. A kutatási részterület elméleti és gyakorlati vonatkozása

A kutatásaim ezen részének van egy különleges aspektusa. A kombinált szállítások során megszervezni a felmérést a rengeteg áruakodás, távoli célállomások és a műszerezettség visszajuttatása miatt egy kimondottan nehéz körülmény, és sok szervezést igénylő feladat. Ez az oka annak, hogy csak néhány hasonló felmérés született a témában, és azok a kutatások is csak néhány szállítási relációt elemeztek. Ugyanakkor a távoli célhelyekre történő árutovábbítás napjainkban abszolút domináns szerephez jut a modern ellátási láncokban.

Alapvetően a konténeres áruszállítás során közúti, vasúti és tengeri szállítási ágazatok kombinációját használják, elsősorban nem „időérzékeny” áruk felhasználási helyre juttatásában. A kutatásom e körben a leggyakrabban alkalmazott 40 lábás ISO konténeres szállítás körülményeit vizsgálat, elemezte számos értékesítési csatorna felhasználásával. Minden egyes szállítás során az induló vagy célállomás között magyarországi célpont is szerepelt, és a szállítások olykor több hetes intervallumokat tettek ki. Rövid összefoglalása a szállítási relációknak:

- Magyarország – India
- Magyarország – Kína
- Magyarország – Mexikó
- Magyarország – Kína (Oroszországon keresztül)

A multimodális konténeres szállítás szerepét nagyra becsülik a logisztikai szakemberek. Ezeket a nagyméretű szabványosított konténereket úgy tervezték, hogy többféle szállítási módban is használhatók legyen, anélkül, hogy az árut ki, vagy be kellene rakodni. Viszont fontos tudni és ezáltal olyan vizsgálati módszereket is kidolgozni, hogy a konténeres áruszállításhoz alkalmazott disztribúciós körülmények mellett (amely magában foglalja mind a szárazföldi és tengeri szállítást is) milyen környezeti hatások merülnek fel. Az ilyen típusú konténeres szállítmányok szállítása és kezelése olyan fizikai eseményeket és hatásokat eredményez, amelyek befolyásolhatják a csomagolt termékek integritását (Singh SP et al., 2012) (Singh SP et al., 1993). A leggyakoribb ilyen fizikai események magukban foglalják a rázkódásokat is. A fent említett körülmények miatt a fizikai disztribúció környezete egyre bonyolultabbá válik (Masis J et al, 2022), hiszen nem csak a szállítási ágazat módja, hanem az egyes földrajzilag értelmezhető sajátosságok is jelentősen befolyásolhatják a felmerülő eseményeket úgy, mint például az eltérő vasúti és közúti pályák, járművek alkalmazása stb. Az ilyen összetett szállítási rendszerekben alkalmazott csomagolások hatékonyságának biztosítása és a biztonságos termékszállítás érdekében átfogó ismeretekre van szükségünk.

A kutatás során minden egyes különböző szállítási mód kapcsán a PSD spektrumok külön lettek elemezve, illetőleg az előző fejezetben már alkalmazottaknak megfelelően úgynevezett kompozit spektrum is meghatározásra került. A felmérés 12 különböző országot érintett összesen 21 átrakodással a különféle szállítási módok között. Egy ilyen konténeres átrakodóterminált mutat be a 4.1. ábra. A konténerek közúton

Magyarországon, Szlovákiában, Mexikóban, Indiában és Kínában kerültek szállításra, illetőleg vasúton Szlovákiában, Csehországban, Németországban, Lengyelországban, Fehéroroszországban, Oroszországban és Kínában.



4.1. ábra. Konténer terminál Hamburgban

Sajnos az elmúlt évtizedekben csak nagyon kevés kutatás foglalkozott ezzel a témakörrel. Történt felmérés az Egyesült Államok és India relációjában (Singh SP et al., 2012), illetve egy közlemény foglalkozott Honduras és az USA közötti (Singh SP et al., 1993) gyümölcs szállítás során felmerülő rázkódásokkal. Továbbá Böröcz és társai 2015-ben publikált még LTL (less than truckload) egységpakományokra részeredményeket Magyarország és Dél-Afrika szállítási relációban (Böröcz et al., 2015). Az eredmények röviden csak annyit mutattak be, hogy a legmagasabb intenzitású rázkódások a közúton történtek, majd a vasúton, de azokat részletesen nem elemezte, illetőleg nem hasonlított össze különféle relációkat. Meg kell jegyezni, hogy a fentebb bemutatott kutatások is leginkább a szállítás során a klímazónák átszeléséből származó hatások felmérést és elemzését helyezték a fókuszba, mint például Csavajda és Böröcz 2019-es közleménye.

A szakirodalmat áttekintve nem található olyan közlemény, amely bármely terepi felmérést végzett volna Európa és Amerika, vagy Európa és Távols-Kelet viszonylatában a konténeres áruszállítás során, Oroszországban pedig egyáltalán semmilyen felmérés korábban még nem készült. Ugyanez a megállapítás érvényes a közép-európai szállítási viszonylatokra is. Pedig az 1990-es éveket követően a közép-kelet-európai országokban lezajló rendszerváltozás eredményeképpen egyre mélyebb integrációt figyelhetünk meg a világgazdaságban, amely azt jelenti, hogy mindinkább kiveszik ezen országok gazdaságai a szerepüket a globális ellátási láncokban.

A korábbi fejezetben már tárgyaltaknak megfelelően a kombinált áruszállítás során megfigyelhető környezeti hatások is véletlenszerűek, mindezért fontos elegendő információt szereznünk ahhoz, hogy megfelelő védelmet nyújtó csomagolással láthassuk el a termékeket. Mivel a kockázatok és események egzakt módon nem becsülhetők, ezért itt is bizonyos mértékű biztonsági tényezőt használnak a mérnökök a csomagolás védelmi szempontú megtervezésénél. Viszont ehhez olyan mértékű alapinformációkra van szükségünk, amellyel eredményesen kerülhetjük el a költséges megoldásokat, illetve a várható károk mértékét redukálnunk szükséges.



A modern ellátási láncok hosszúsága miatt egy sérült termék cseréje egy új termékkel számos kérdést és problémát vet fel.

- Újabb terméket kell gyártani (vagy javítani kell a sérültet).
- Újabb erőforrásokat kell felhasználnunk az új csomagolás felhasználásához.
- Jelentős károkat eredményezhet a vevő elégedetlensége.
- Kiszámíthatatlan vállalati termelési logisztikai problémákat okozhat.
- Újabb szállítási költségek merülnek fel, és szállítási környezeti externáliákat okozunk.

Ezért általában az iparban egy kissé túlcsomagolják a termékeket, ha az optimális védelmi szintet nem tudják meghatározni a disztribúciós csatorna hatásainak megfelelő ismeretének hiányában. Ezért a csomagolótervezők és mérnökök általában historikus adatok alapján tradicionális megoldásokra törekednek, hogy biztosítsák a biztonságos és sérülésmentes szállítást.

Ezért a kutatásom e területen arra törekedett, hogy felmérjem, elemezzem és összehasonítsam azokat a környezeti rázkódásokat a kombinált konténeres áruszállítás során, amelyek új eredményeket biztosíthatnak a kutatók és mérnökök számára a fentebb taglalt problémák feloldására.

## 4.2. A kutatás során alkalmazott körülmények (útvonal relációk), műszerezettség

### 4.2.1. A felmérés disztribúciós 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 transzszibériai és transzmandzsúriai vasútvonalakon keresztül. Ezt mutatja be a 4.2. ábra. A 4.1 – 4.3. táblázatok a szállítások és használt járművek részletes specifikációját adja meg.



4.2. ábra. Közúti (zöld), vasúti (vörös) és hajózott (kék) útvonalak, amelyek megfigyelésre kerültek (Böröcz, 2019)

## 4.1. A szállítási távolságok és időtartamaik áruszállítási módokként

<b>Szállítási szakaszok</b>	<b>Mexikó</b>	<b>India</b>	<b>Kína</b>	<b>Kína (2) vasúttal</b>
Közút Európában (km)	60	60	62	-
Vasút Európában (km)	1 132	1 240	1 078	1 546
Vasút (Transz-Szibéria, km)	-	-	-	6 075
Vasút (Transz-Mandzsúria, km)	-	-	-	935
Konténeres hajózás (nap)	16	31	34	-
Közút Amerikában / Ázsiában (km)	280	411	924	295

## 4.2. táblázat. A konténerek átrakodási helyei

<b>Szállítási relációk</b>	<b>Átrakodási lokációk</b>
Magyarország – Mexikó	Győr (HU), Dunajska Streda (SK), Hamburg (DE), Veracruz (MX), San Jose Chiapa (MX)
Magyarország – India	Győr (HU), Dunajska Streda (SK), Hamburg (DE), Mumbai (IN), Aurangabad (IN)
Magyarország – Kína	Győr (HU), Dunajska S. (SK), C. Trbava (CZ), Bremerhaven (DE), Tianjin (CH), Changchun (CN)
Magyarország – Kína (2)	Győr (HU), Brest (BL), Zabaykalsk (RU), Harbin (CH), Changchun (CN)

## 4.3. táblázat. A szállítójárművek specifikációi

<b>Specifikáció</b>	<b>Magyarország – Mexikó</b>	<b>Magyarország – India</b>	<b>Magyarország – Kína</b>	<b>Magyarország – Kína (2)</b>
Jármű felfüggesztése Európában	Légrugó	Légrugó	Légrugó	-
Vasúti nyomtáv szélessége (mm)	1 435	1 435	1 435	1 435 / 1 520
Konténer helye a szállító hajón	Első fedélzet	Első fedélzet	Hátsó fedélzet	-
Jármű felfüggesztése a másik kontinensen	Légrugó	Légrugó	Légrugó	Légrugó
Terhelőtömeg (kg)	19 820	22 695	21 142	22 510

A teljes távolság, amin a konténerek közúton megfigyelésre kerültek 2 093 km volt, vasúton 12 006 km, és 81 napnyi hajózás. Európában a közúti szállítás csak addig lett igénybe véve, amíg a konténerek felfuvarozásra kerültek a az indító konténerterminálig. 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.

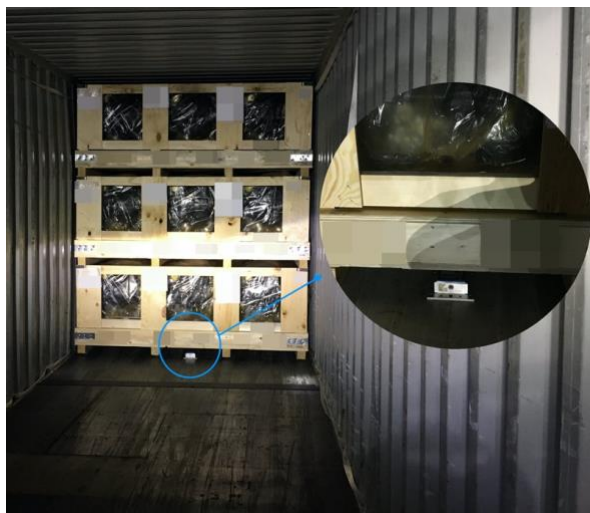
#### 4.2.2. A műszerezettség és beállításai

A már ismertett Lansmont (SAVER)<sup>TM</sup> 3X90 (Shock and Vibration Environment Recorder, Lansmont Corp., CA, USA) adatgyűjtő berendezéseket alkalmaztam a mérésekhez. A mérési beállításokat a 4.4-es táblázat tartalmazza. A műszerek közvetlen a konténer rakodófelületére lettek elhelyezve, az áruk közötti szabad területen, és csavarokkal rögzítettem őket (4.3. ábra).

#### 4.4. táblázat. A műszerek mérési paramétereinek beállításai

Jellemző	Jel alapon	Idő alapon
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	-
Felvétel előtte/utána (%)	20/50	-
Idő alapú ébredési gyakoriság (min)	-	7 min*

\* Az ébredési idő alapú trigger Magyarország és Kína között a transz-szibériai vonalon 5 perc volt.



4.3. ábra. A SAVER műszer elhelyezése a 40 lábás konténerben

#### 4.2.3. Adatok elemzésének módszertana

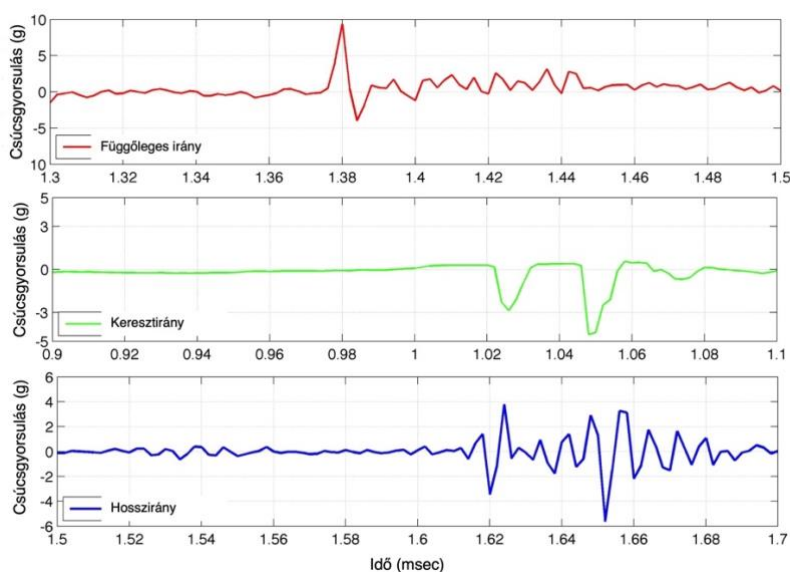
Először az átrakodások közben történt események kerültek leszűrésre és elemzésre, nagyságrendjeik szerint, mindhárom térirányt figyelembe véve. Ebből a már többször alkalmazott eloszlásfüggvények kerültek meghatározásra (CDF), illetve kétparaméteres Weibull modellbe is be lettek illesztve a tapasztalati adatok.

A korábbiakban megismerteknek megfelelően a spektrális gyorsulás-sűrűség (PSD) spektrumok és a rögzített adatok valószínűség sűrűségfüggvényei is megadásra kerültek az ipari gyakorlatba való implementáláshoz, illetőleg azok jellemző csúcossági (kurtózis, K) és ferdeségi (skewness, S) értékei. Mivel a szállítások során a konténerek számos alkalommal várakoznak, és nem történik ezalatt rázkódási esemény, az adatok az elemzést megelőzően szűrésre kerültek. Így minden nem kívánt adat, amely  $0,02 G_{rms}$  alatti értéket mutatott kirekesztésre került az elemzésből.

### 4.3. A változó disztribúciós csatornák véletlenszerű eseményei és elemzésük

#### 4.3.1. Átrakodási feladatok során tapasztalt rázkódás jellegű események

A műszerek a felmérések során 329 eseményt rögzítettek 21 konténer átrakodás közben. A 4.4. ábra a legnagyobb értékkel rendelkező ilyen eseményt mutatja be annak időbeli lefolyása és csúcsgyorsulása alapján, mindhárom irányban.



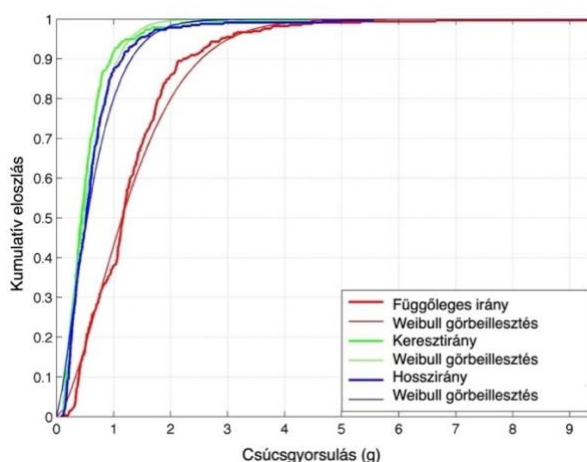
4.4. ábra. A legnagyobb gyorsulás értékek lezajlása a felmérések során

A 4.5. táblázat pedig a 10 legnagyobb értékkel rendelkező ilyen eseményt tartalmazza a szállítási reláció és esemény helyének megadásával. A legnagyobb csúcsgyorsulás értéket a hamburgi kikötőben mértem, amelynek az értéke  $9,37g$  volt és lefolyása  $8\text{ ms}$  ideig tartott. Ez vélhetően akkor történt amikor konténert egy másik konténerre helyezték, mivel a keresztirányú jel azt sugallja, hogy a konténer az egyik oldalával került először lehelyezésre. A legnagyobb kereszt-, illetve hosszirányú ( $4,45\text{ g}$  és  $5,55g$ ) gyorsulást a Szlovákiai terminálban mértem. Utóbbi a vasúti kocsik rendezésekor a tolatási lökés igénybevételénél került rögzítésre.

A 4.6. táblázat tartalmazza a csúcsgyorsulásokhoz tartozó előfordulási valószínűségeket, és a 4.5. ábra a tapasztalati eloszlásfüggvényeket és a Weibull modell által meghatározott eloszlás függvényeket. Látható, hogy a keresztirányú gyorsulások az átrakodási események közben alacsonyabb nagyságrendűek voltak, mint a függőleges vagy hosszirányúak. A legnagyobb értékeket a függőleges irányban mértem. A 4.7. táblázat a Weibull eloszláshoz tartozó statisztikai paramétereket tartalmazza, az R-négyzet jelzi a konfidenciaszintet (1 képviseli a 100% szintet).

4.5. táblázat. A 10 legjelentősebb esemény az átrakodási folyamatok közben

Csúcs-gyorsulás (g)	Időtartam (ms)	Írány	Reláció	Esemény
9,37	8	Függőleges	HU-IN	Kikötői rakodás (Hamburg)
6,65	12	Függőleges	HU-MX	Közút-vasút átrakodás (Dunajska S.)
5,55	6	Hossz	HU-MX	Közút-vasút átrakodás (Dunajska S.)
5,34	8	Függőleges	HU-IN	Gyáron belüli rakodás (Aurangabad)
4,99	6	Hossz	HU-CH	Kikötői rakodás (Bremerhaven)
4,65	6	Hossz	HU -MX	Közút-vasút átrakodás (Dunajska S.)
4,49	4	Függőleges	HU-CH (2)	Vasút-vasút átrakodás (Harbin)
4,45	9	Kereszt	HU - MX	Közút-vasút átrakodás (Dunajska S.)
4,30	11	Függőleges	HU - CH	Kikötői rakodás (Tianjin)
4,07	9	Függőleges	HU - CH	Kikötői rakodás (Hamburg)



4.5. ábra. Az átrakodáskor mért csúcsgyorsulások eloszlás függvénye

4.6. táblázat. Csúcsgyorsulások összegző adatai

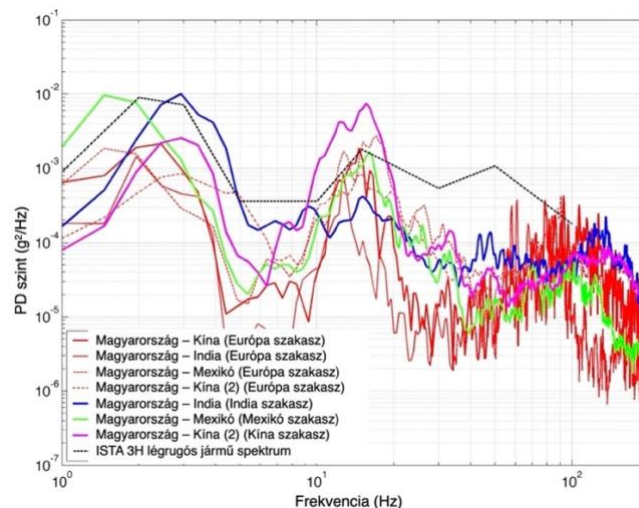
Rögzített adatok	Függőleges irány (g)	Keresztirány (g)	Hosszirány (g)
Maximum	9,37	4,45	5,55
99%-os előfordulás	4,48	2,15	2,51
95%-os előfordulás	2,97	1,21	1,42
90%-os előfordulás	2,32	0,96	1,14
80%-os előfordulás	1,81	0,72	0,86

4.7. táblázat. Statisztikai paraméterek a Weibull eloszlási modellbe illesztett tapasztalati adatokhoz

	Becsült átlag	Aktuális átlag	Variancia	Becsülés $\alpha$	Becsülés B	R-négyzet	RMSE
Függőleges	1,32	1,31	0,78	1,46	1,51	0,945	0,02
Keresztirány	0,58	0,58	0,15	0,60	1,43	0,916	0,06
Hosszirány	0,64	0,62	0,23	0,70	1,33	0,921	0,10

#### 4.3.2. A kontinentális közúti szállítási feladatok felméréseinek eredményei

A 4.6. ábra mutatja be a közúton konténerszállító nyerges szerelvényen mért függőleges irányú rázkódási események PSD spektrumát. Az ábra az ISTA 3H (ISTA, 2006) protokoll PSD görbét is tartalmazza, mivel ez az egyetlen olyan iparági szabvány, amely ehhez a szállítási módhoz hasonló tartályos szállításra vizsgálati körülményeket adatokat javasol. De itt is meg kell említenem, hogy csak információs céllal kerül ez bemutatásra, mivel közvetlen összehasonlítás a mért adatokkal csak nagyon óvatosan lehetséges a szabvány alkalmazott mesterséges intenzitás nagyítása miatt. Látható, hogy az alacsony frekvenciatartományban (1 – 6 Hz között) a terepen mért adatok hasonló PSD alakot mutatnak, ugyanakkor egyes földrajzi régióban a terepen közvetlen mért értékek magasabb PD értékeket produkáltak, mint a nagyított értékkel bíró protokoll. De például a 10 és 18 Hz között is a Kínai mérések azt mutatták, hogy jóval magasabbak a tapasztalati adatok, mint a szabvány által javasoltak. Ennek ugyanakkor lehet az az oka, hogy az alkalmazott konténerszállító járművek kerékátmérője kisebb a hagyományos nyerges szerelvényeknél. Összességében a teljes frekvenciatartományon (1 – 200 Hz) az Európai szakaszokon mért értékek mutatták a legalacsonyabb PD értékeket, a legmagasabbakat pedig Kínában figyeltem meg (0,221 teljes  $G_{rms}$ -el).

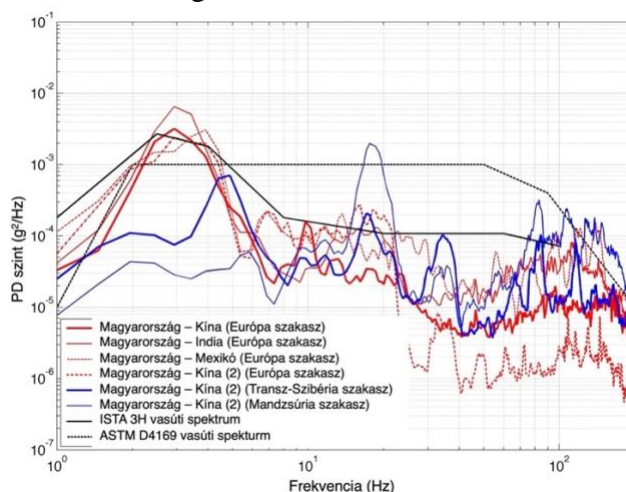


4.6. ábra. Függőleges irányú rázkódási események PSD spektrumai közötti konténerszállító nyerges szerelvényen különböző régiókban

A 4.7. ábra a kombinált konténeres áruszállítás vasúti szakaszain mért PSD spektrumokat mutatja be, ugyancsak kettő olyan szabvány javasolt PSD spektrumát is tartalmazva, amelyek vasút javaslatokat is tesznek (ISTA 3H és ASTM D4169, 2016). Az európai szakaszon mért PSD görbe nagyon hasonlít korábban közölt Európában végzett kutatásban (Böröcz, 2017) közöltekhöz, illetőleg az ISTA 3H által javasolt PSD spektrumhoz. Ugyanakkor a transzszibériai és transzmandzsúriai szakaszokon ettől nagyon különböző PSD görbék születtek. A jelentős PD szintek itt 5 Hz és 8 Hz-nél voltak, majd 80 és 100 Hz között. Ki kell emelni, hogy ez Európában 2 Hz körül volt. Ehhez a jelenséghez számos ok hozzájárulhatott. Egyrészt a konténerkocsik felfüggesztési megoldása Oroszországban különböző, alapvetően spirál rugós megoldású, míg Európában ez merev rendszerű. Másrészt a szélesebb vasúti nyomtávon kevésbé billeg a kocsi teljes felépítménye, miközben egyébként a rendkívül hosszú szerelvények relatív alacsony sebességgel haladnak, maximum 80 km/h-al. Az



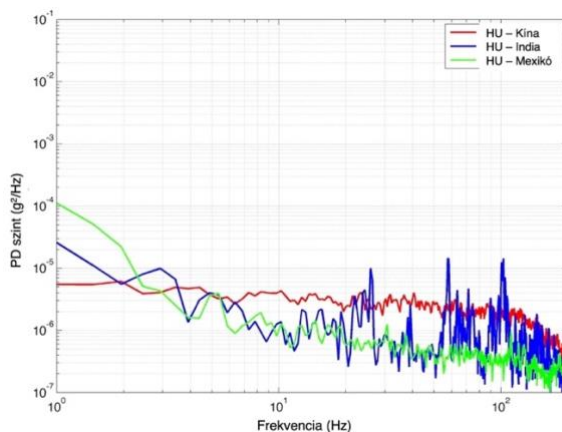
alacsony frekvencián tapasztalható kisebb PD értékek ellenére 20 Hz felett az oroszországi vonalak viszont magasabb intenzitású rázkódásokat okoztak.



4.7. ábra. Függőleges irányú rázkódási események PSD spektrumai vasúti konténerszállító szerelvényen különböző régiókban

#### 4.3.3. Kombinált áruszállítás tengeri hajós szakaszának eredményei

A 4.8. ábrán a tengeri konténerszállító hajón mért rázkódási események PSD spektrumait ábrázolom. Meg kell említeni, hogy rendkívül kevés minta származott ezekből a szakaszokból. Aminek kettő oka van. Első, hogy jel alapon egyetlen minta sem került felvételre, másodsorban pedig a szűrési előfeltétel során a rögzített események többsége 0,02  $G_{rms}$  alatt volt. Így összesen Mexikó felé 36 db, India felé 21 db, Kína felé 26 db mérési esemény került be az elemzésbe. Noha a hajó szakaszainak adatai mintahiányban szenvednek, a rögzített események alapján két megállapítást tehetünk. Egyrészt a PSD spektrumok azt mutatják, hogy extrém alacsony intenzitás várható, szóval a hajó fedélzetén lévő rezgésnek nincs jelentős szerepe a csomagolási rendszer tervezési kritériumaiban, ahogy azt például Brandenburg és Lee 1991-es ide vonatkozó irodalma feltételezi. Másrészt, amikor a konténert a hátsó fedélzetre helyezték (Magyarország–Kína), ezek a PD-szintek valamivel magasabbak voltak, mint az első fedélzeten, ez pedig betudható annak, hogy ekkor a konténer közelebb állt a hajó gépházához.

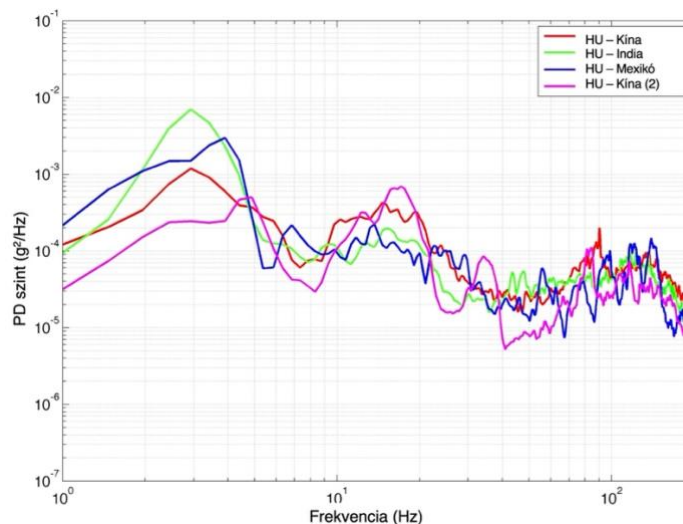


4.8. ábra. Függőleges irányú rázkódási események PSD spektrumai a konténerszállítókon



#### 4.3.4. Kompozit PSD spektrumok a multimodális áruszállítás során

A 4.9. ábra a mérések szakaszokra bontása nélküli teljes adatsora alapján képzett átlagolt kompozit PSD spektrumokat a függőleges irányokra nézve mutatja be. Azonnal látható, hogy a PSD görbéket dominálta a vasúti szállítás, ezáltal ezek az adatok nem alkalmasak arra, hogy önmagukban reprezentálják egy kombinált szállítás rázkódásait a gyakorlatban. A teljes szállítási utakat tekintve az 1 – 6 Hz, aztán 8 – 22 Hz és 80 – 150 Hz közötti szakaszok intenzívek. Tovább fontos azt megjegyezni ezen a ponton, hogy abban a felmérésben, amely Magyarország és Kína között az oroszországi vasúton keresztül folyt csak egy rendkívül rövid tehergépjárművel végrehajtott szakasz volt. Ha a kutatás során kapott adatokat összehasonlítjuk azzal az egy korábbi közleménnyel, amely a témában megjelent az elmúlt 10 évben (Singh SP et al., 2012), amely egyébként csak egy mérést elemzett, akkor azt láthatjuk, hogy jelen felmérés eredményei jobban reprezentálják a kombinált áruszállítás közben felmerülő rázkódás jellegű igénybevételeket, és magasabb intenzitásokat mutattak.

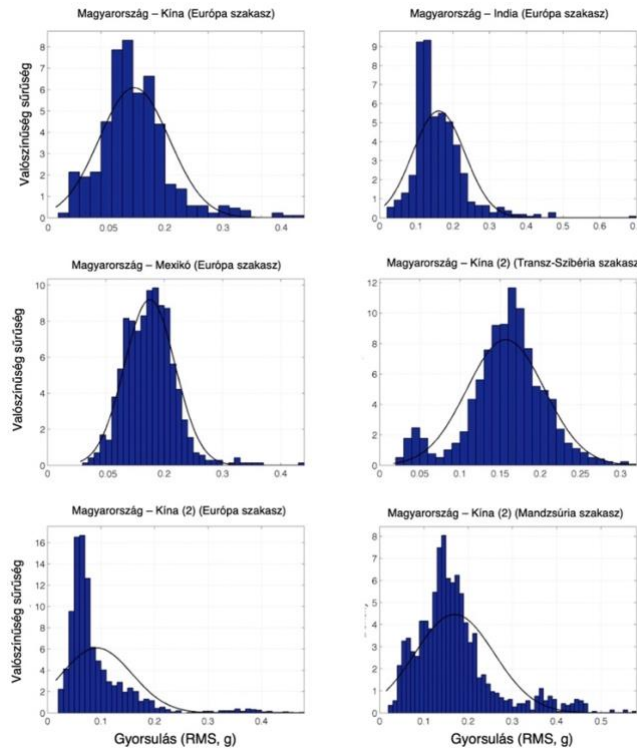


4.9. ábra. Függőleges irányú rázkódási események kompozit PSD spektrumai

#### 4.4. Komparatív értékelés a változó szállítási ágazatok igénybevételének hatásairól

A 4.8. és 4.9. táblázat tartalmazza az egyes felmért szakaszok kapcsán kalkulált teljes  $G_{rms}$  értékeket a vizsgált 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban, illetőleg a rögzített események RMS gyorsulásértékekből képzett valószínűség sűrűségfüggvények kurtózis (K) és ferdeségi (S) értékeit. A 4.10. ábra pedig grafikusán ábrázolja a PDF-eket (valószínűségeloszlás sűrűségfüggvényeket). Az adatok alapján látható, hogy a kurtózis értékek 3,52 és 10,79 között voltak a függőleges irányban rögzített események kapcsán, azaz az adatok igazolták, hogy nem Gauss-i eloszlást követtek az adatok, a kombinált áruszállítások során sem.

Meg kell jegyezni, hogy az oroszországi vasúti szakaszon volt a legmagasabb a kurtózis érték, amely azt jelzi, hogy itt több olyan esemény történt, amely magasabb rázkódási szintet okozott.



4.10. ábra. Eloszlások a vasúton függőleges irányban mért RMS gyorsulások értékeire

4.8. táblázat. Az egyes szakaszokról származó PSD spektrumok teljes  $G_{rms}$  értékei az 1 – 200 Hz frekvenciatartományban

	<b>Magyarország Mexikó</b>	<b>Magyarország India</b>	<b>Magyarország Kína</b>	<b>Magyarország Kína (2)</b>
Közút (Európa)	0,131	0,118	0,127	-
Vasút (Európa)	0,073	0,082	0,058	0,061
Vasút (Transz-Szibéria)	-	-	-	0,096
Vasút (Transz-Mandzsúria)	-	-	-	0,125
Konténerszállító hajó	0,023	0,022	0,020	-
Közút (más kontinens)	0,151	0,176	0,139	0,145
Kombinált (Total route)	0,124	0,139	0,125	0,109

4.9. táblázat. A rögzített RMS gyorsulásértékek valószínűség sűrűségfüggvényeinek kurtózis (K) és ferdeségi (Skewness, S) értékei

	<b>Magyarország Mexikó</b>		<b>Magyarország India</b>		<b>Magyarország Kína</b>		<b>Magyarország Kína (2)</b>	
	(K)	(S)	(K)	(S)	(K)	(S)	(K)	(S)
Közút (Európa)	4,46	0,16	8,13	1,18	10,79	1,35	-	-
Vasút (Európa)	4,04	-0,83	7,82	0,96	3,73	1,20	3,52	-0,34
Vasút (Transz-Szibéria)	-	-	-	-	-	-	9,13	1,73
Vasút (Transz-Mandzsúria)	-	-	-	-	-	-	5,48	1,43
Konténerszállító hajó	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Közút (más kontinens)	5,65	0,08	8,57	3,49	4,48	1,80	7,78	-0,16
Kombinált (Total route)	4,79	1,77	8,49	2,65	10,04	2,29	4,92	1,80

#### 4.5. A kutatás eredményeinek korlátjai

E fejezetben a korábbiaktól eltérően egy további kutatási korlátot meg kell adni, mivel lényege eltér az általános korlátoktól, amelyeket az 1.6. alfejezetben részleteztem. Mégpedig azt, hogy a tengeren történő konténeres szállítás során felmerülhetnek olyan időjárási körülmények egyes szezonzokban és földrajzi térségekben, amelyek extrém mértékű hullámzást okozhatnak a tenger felszínén, ezáltal jelentősen befolyásolva a lehetséges mérési értékeket.

#### 4.6. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek

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.

##### 4.6.1. 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 rezgésyorsulások 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 csúcsyorsulások 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.*

## **5. Hosszirányú és hosszú időtartamú terepi rázkódások kistehergépjárművel végzett áruszállítás rakomány-stabilitási vizsgálataihoz**

### **5.1. A kutatási részterület elméleti és gyakorlati vonatkozása**

Ahogy az már a 3-as fejezetben kifejtésre került a modern ellátási láncok világszerte alkalmazzák a kistehergépjárművel végzett szállítási módokat kisebb mennyiségű egységpakomány, illetőleg a nem homogén csomagokból álló raklapos tételek szállításához. Ennek fő oka, hogy bár viszonylag drága, de gyakran ez a leggazdaságosabb módja annak, hogy egyes lokációkhoz szállítási szolgáltatást lehessen nyújtani.

Az előző fejezet szakirodalmi elemzése során már kiderült, hogy a szállítási csomagolások vizsgálatával foglalkozó kutatók fő fókuszja a jármű vagy termék-csomagolás rendszer függőleges irányú mozgása (rezgése), mint a legintenzívebb mozgási irány. A közelmúltig csak ritkán vizsgálták a hosszirányú (vízszintes) mozgásokat, különösen azokat, amelyek alacsony csúcsgyorsulásúak és hosszabb ideig tartanak. Ilyen esemény például a tartós a járművek gyorsítása vagy lassítása, amelyek főként a rakomány stabilitásvesztésének egyik okozói, majd ennek következményeként árukárt okozhatnak. A fellelhető kevés számú kutatás is elsősorban a nyerges-tehergépjárművekre korlátozódtak azzal a céllal, hogy vészhelyzeti manőverek során vajon az egyépakományként képzett áruk stabilitása miként alakul. Ugyanakkor ennek a jelenségnek az átfogó ismerete lenne szükséges, hiszen az állandó jellegű menetsebességváltás nem csak vészhelyzeti manőverek esetén okozhatja a rakományok sérülését, továbbá a változó ellátási láncokban az egyes szállítóeszközök széles választékán előfordulhat, nem csak a leggyakrabban alkalmazott nyerges szerelvényeken.

Az alacsony gyorsulású és hosszú időtartamú események szállítási csomagolási rendszerekre gyakorolt hatását vizsgáló laboratóriumi szimulációkhoz input adatok csak részben állnak rendelkezésre. A szakirodalmat áttekintve eddig csak néhány olyan kutatás született, amely dokumentálja a vízszintes (hosszanti) eseményeket szállítási csomagolások vizsgálatának céljából, továbbá ezek egyike sem mérte vagy elemezte a kistehergépjárművek esetén. Juwet és munkatársai 2018-ban közzétettek egy tanulmányukat, amelyben egy rakodólapon vizsgálták a horizontális dinamikus hatásokat rövid időtartamú (0,3 s) és kis gyorsulású (0,5 g és 0,8 g) eseményekkel, hogy értékeljék a vizsgált egységpakományok reakcióját. Egy másik 2019-es tanulmányban Greco és munkatársai mutattak be egy gyorsítóművet, amellyel a rakományok vízszintes hosszú időtartamú gyorsulás-szimulációja végezhető el. Dunno és Ge 2021-ben és 2022-ben végzett terepi méréseket ilyen vízszintes események jellemzésére egy közepes méretű zárt szekrényes légrugóval szerelt tehergépjárművön az Egyesült Államokban.

Meg kell jegyezni, hogy a rakományok laboratóriumi stabilitásvizsgálatához három vizsgálati protokoll is él javaslattal, amelyek kiindulási pontja egyébként a már említett vészhelyzeti manőverek eredményeként bekövetkező árusérülések. Az első a Federal Motor Carrier Safety Administration (FMCSA) előírása, amely 0,05 – 0,8 g

csúcsgyorsulású teljesítménykövetelményt ír le a rögzített rakomány-rendszerek esetében, de figyelmen kívül hagyja az esemény időtartamát. Az Európai Unióban az EUMOS 40509 direktíva 0,8 g-os tartós gyorsulást javasol viszonylag rövid, 300 ms-os tartási időtartammal és 50 ms-os rándulási időtartammal. Megjegyzendő, hogy ezt az irányelvet kifejezetten vészfékezési eseményekre dolgozták ki. Végül az ISO 2244:2000 szabvány egységterhelés-stabilitási vizsgálatához javasol 1 g-os célgyorsulást, 100 ms-os felgyorsítási idővel és 300 ms-os tartási idővel meg.

Jelen fejezetben bemutatott kutatás célja, hogy részletes információt szerezzen a menetirány szerinti dinamikus eseményekről a kistehergépjárművekre fókuszálva, amelyeket alacsony gyorsulás és egyben relatív hosszú időtartammal jellemezhetünk. Ennek fő oka, hogy a jármű tömege és sebessége, illetve gyorsulási és fékezési képessége merőben más, mint a nagyobb és nehéz teherautóknak. Tehát az olyan események jellemzése, mint a fékezés és a gyorsítás egy szállítókocsiban, hasznos lehet az egységterhelés stabilitásának értékeléséhez.

## 5.2. A kutatás során alkalmazott körülmények (útvonal relációk), műszerezettség

### 5.2.1. A szállítási feleadatok körülményei a mérések során

A hosszirányú gyorsulások méréséhez 5 eltérő méretű és felépítésű járművet alkalmaztam, ez látható az 5.1-es ábrán. Az 5.1-egy táblázat pedig tartalmazza a járművek részletes műszaki specifikációit.



5.1. ábra. (a) a mérésekhez alkalmazott kistehergépjárművek, (b) a mérőműszer pozíciója

### 5.1. táblázat. A kistehergépjárművek műszaki jellemzői

Jármű (gyártási év)	Saját tömeg (kg)	Terhelési kapacitás (kg)	Induló terhelés (kg)	Átl. sebesség (km/h)	Szállítás távolság (km)
Renault Master (2016)	1885	1420	680	51,4	262
Renault Master (2021)	1880	1480	210	37,3	135
Renault Master (2015)	2185	1300	140	32,8	86
Renault Master (2015)	1890	1490	680	58,5	331
Renault Master (2018)	1885	1525	230	46,6	248

A mérések földrajzi lokációja Győr-Moson-Sopron, Veszprém és Komárom-Esztergom megyék voltak. Minden egyes jármű egy teljes munkanapon keresztül

megfigyelés alatt volt, ez 5,2 – 6,1 óra közötti aktív futási időt jelentett. A mérések során a járművek terhelése folyamatosan változó volt 80 – 1100 kg között, illetőleg sebessége 1 – 130 km/h közötti tartományban volt.

### 5.2.2. A műszerezettség és beállításai

A korábbiakban bemutatott műszerhez képest a tartós gyorsulás jelenséget egy arra alkalmas (DC táplálású), alacsony frekvenciatartományban tartós jel adatrögzítésre képes MEMS gyorsulásszenzorral szerelt Lansmont SAVER™ 3D15 műszerrel végeztem. A műszer mereven került felszerelésre a jármű rakodóterében (5.1. ábra) és menetirány szerinti gyorsulás események rögzítésére került beállításra. 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 %

### 5.2.3. Adatok elemzésének módszertana

Első lépésként minden egyes rögzített esemény idő-gyorsulás függvénye került az alakja szerint szemrevételezéssel ellenőrzésre. Ezt követően fuzzy logika alkalmazásával a rögzített események öt csoportba került besorolásra. Az az esemény, amely egyértelműen trapéz alakúnak volt tekinthető, az 1,0 pontot kapott, a kvázi trapéz alakúak 0,75 pontot, trapézhoz hasonlóak 0,50 pontot, a majdnem trapéz alakúak 0,25 pontot, a nem trapéz alakúak 0,00 pontot. Ez értékelés öt laboratóriumi mérnök pontozásával történt, majd ezt követően minden mintára átlag került kiszámításra. Ha egy idő-gyorsulási esemény 0,75 pontnál nagyobb vagy azzal egyenlő átlagos pontszámot kapott, akkor az eseményt a logika további feldolgozásra és elemzésre választotta ki a kutatáshoz. A fennmaradó mintákat, amelyek 0,74 pontnál kevesebbet kaptak, eltávolításra kerültek az elemzésből. Ennek az az oka, hogy ha nincs legalább egy párhuzamos oldala felvett jel alakjának az időtengellyel, akkor a gyorsulás nem lehet állandósult. Másrészt a jelenlegi vizsgálati módszerek ezt a trapéz alakot használják a gyorsulási idő függvény meghatározásához, hogy gyorsulási tesztek generáljanak a stabilitás elemzéséhez.

Második lépésként a fuzzy logika minimális 0,75 elfogadási küszöbét elérő események manuálisan szűrésre kerültek aszerint, hogy csak a legalább 200 ms-os állandó gyorsulási időtartammal rendelkező események kerültek további felhasználásra. Ennek a küszöbértéknek a megválasztásának az volt az oka, hogy egyrészt a rövidebb időtartamú események feltehetően valamilyen rezgésből vagy lökészerű impulzusból származhatnak, másrészt (bár a szabványok 300 ms minimális időtartamot határoznak meg) információs okok miatt érdemes megfigyelni és elemezni, hogy milyen események történnek valamivel 300 ms alatti időtartammal. Ezt követően az a tartós gyorsulási szakasz kezdő és záró pillanatáig (a trapéz alakú esemény felső alapvonala mentén) MATLAB-bal átlagolásra kertes a rögzített gyorsulás értékek, hogy megkapjuk a tartós gyorsulási fázis átlagos gyorsulási értékét. Utolsó lépésként meghatározásra került az az időtartam és érték, amely az esemény felfutási ideje volt a

addig a gyorsulás pontig ameddig az állandó gyorsulási fázis kezdő pillanata tartott, hogy elemezhető legyen az esemény gyorsulásának változása (rándulás). A csomagolás dinamikáját vizsgálva a rándulás az a sebesség, amellyel a szállítójármű vagy eszköz gyorsulása az idő függvényében változik.

A terepen végzett fékezési és gyorsítási események (manőverek) statisztikai jellemzőihez empirikus kumulatív eloszlási függvények (CDF) kerültek kiszámításra. Ezt követően az átlagos gyorsulás, és a fékezési és gyorsítási manőverek csoportjai varianciaanalízis segítségével is elemzésre kerültek (Tukey-féle összehasonlítással,  $p < 0,05$ ).

#### 5.2.4. Kompozit görbék

A mérési adatokból trapéz alakú kompozit görbék kerültek kialakításra úgy, hogy azok illeszkedjenek a rögzített események bekövetkezési valószínűségéhez, felhasználva a gyorsulási értékek közül a 20-ik, 80-ik percentilishez tartozót, illetőleg az átlagos értéket a megfelelő 80-ik, 20-ik percentilis rándulási időtartammal és átlagos időtartammal, illetőleg tartós gyorsulási időtartammal.

#### 5.2.5. A rándulás vektora

A rándulás vektormennyiség, és az alábbiak szerint határozható meg.

$$j = \frac{da}{dt} \quad (5.1)$$

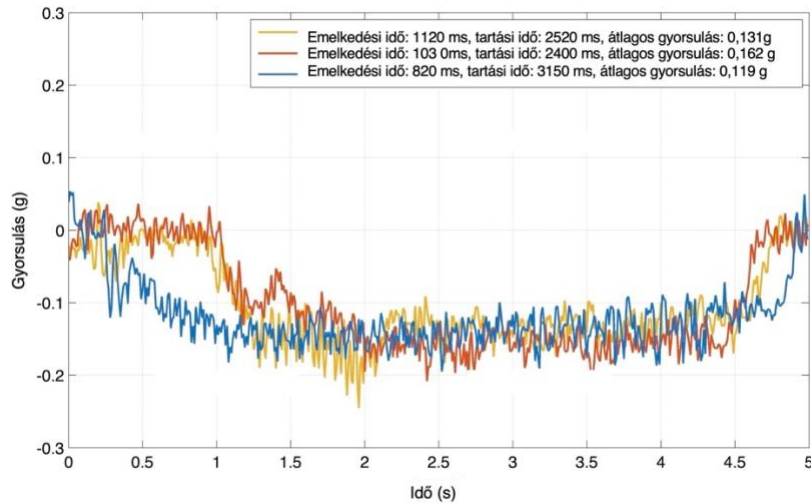
Jelen mérési körülmény során ez azt jelentette, hogy ha vektor pozitív volt, akkor az a szállítójármű sebességének növekedését jelentette, míg a negatív érték a jármű fékezését (lassulását).

Így a vizsgálat során az átlagos rándulási idő a SAVER adatrögzítő által mért események átlagos gyorsulási (vagy fékezési) eseményeinek statisztikai átlaga alapján került kiszámításra. Továbbá, ahogy az már említésre került, a gyorsítások és lassítások gyorsulásértékeinek és rándulási időtartamainak a 80-ik és 20-ik percentilishez tartozó értékei is felhasználásra kerültek. Erre azért volt szükség, hogy a rándulásvektor generálására a terepi adatok és a labortechnika közötti különbség alaposan kivizsgálásra kerülhessen. A 20-ik percentilis meghatározásának az a jelentősége, hogy a rövidebb rándulási időtartama miatt az esemény felfutási ideje rövid, ezáltal ez van a legjelentősebb hatással a rántás abszolút értékének a nagyságára.

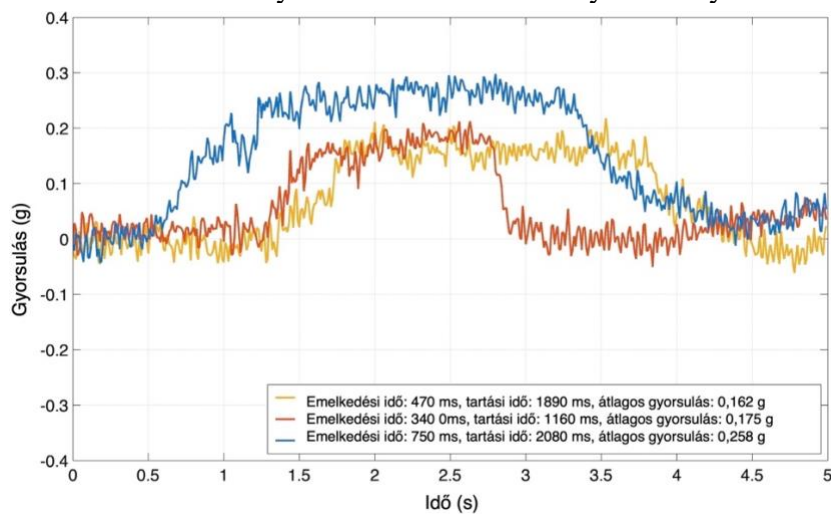
### 5.3. A véletlenszerű gyorsítási és fékezési események és elemzésük

A teljes mérési periódus alatt 947 gyorsítási és 692 fékezési manőver került rögzítésre, amelyekből a manuális szűrést követően 616 és 475 minta került az elemzésbe. A fékezési adatok alacsonyabb száma annak tudható be, hogy a fékezés általában csak enyhe sebességkorrekciót jelent a gyakorlatban állítást, így a jelek jelentős része nem jutott túl a szűrési fázison. A jármű indításakor tapasztalható gyorsulás azonban mindig jelentős, hosszabb ideig tartó mozgásállapot-változással jár együtt. A 5.2. és 5.3. ábrák a terepen gyűjtött nyers adatok egy-egy reprezentatív eseményeit mutatja. A 5.4. ábra az előfordulási valószínűséget mutatja egy adott gyorsulásérték szinten, a 5.2. táblázat pedig a mért rándulási időtartamot, a tartós gyorsulási időket és az átlagolt tartós gyorsulási értékek statisztikai eredményeit tartalmazza.





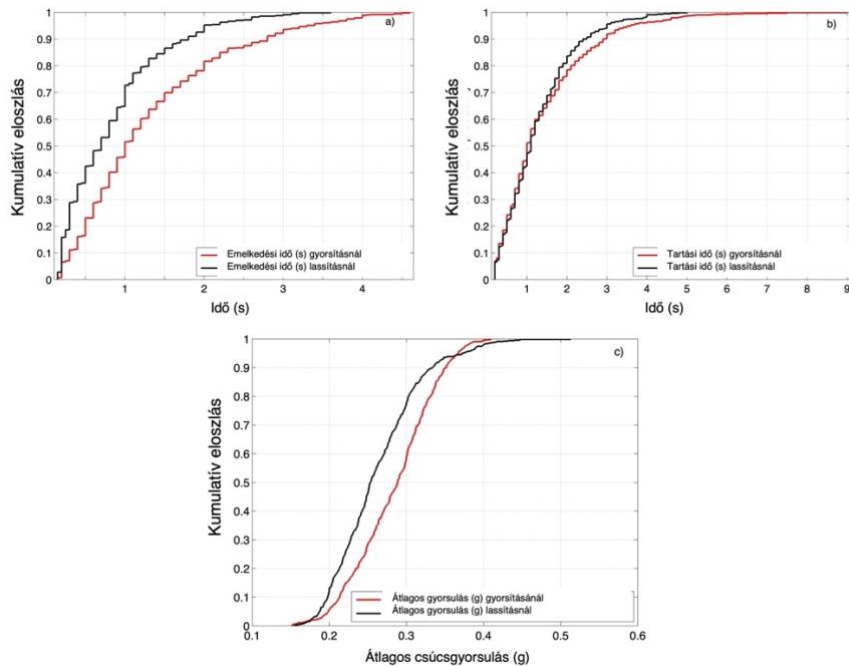
5.2. ábra. Gyorsítási manőver néhány eseménye



5.3. ábra. Fékezési manőver néhány eseménye

2. táblázat. Az egyes manőverek statisztikai karakterisztikája

Esemény	Gyorsulás változása (s)	Tartós gyorsulás (s)	Gyorsulás (g)
Lassítás			
Maximum	3,6	5,0	0,52
99%-os előfordulás	3,0	4,0	0,41
95%-os előfordulás.	2,0	3,0	0,37
90%-os előfordulás	1,8	2,4	0,34
80%-os előfordulás	1,3	1,9	0,31
Átlag	0,83	1,27	0,25
20%-os előfordulás	0,30	0,50	0,21
Szórás	0,63	0,88	0,06
Gyorsítás			
Maximum	4,6	9,0	0,41
99%-os előfordulás	4,0	5,2	0,38
95%-os előfordulás	3,3	3,5	0,36
90%-os előfordulás	2,8	2,9	0,35
80%-os előfordulás	2,0	2,1	0,33
Átlag	1,29	1,39	0,28
20%-os előfordulás	0,50	0,40	0,24
Szórás	0,95	1,17	0,05



5.4. ábra. (a) a manőverek gyorsulás változásának időtartamaihoz, (b) a tartós gyorsulás időtartamaihoz, (c) a tartós gyorsulás átlagaihoz mért értékek eloszlásfüggvényei

A felvett adatok azt mutatják, hogy a járműgyorsítási és lassítási manővereknél a tartós átlagos gyorsulási értékek 100%-a 0,52 g alatt volt, 80%-a pedig 0,33 g, illetve 0,31 g alatt. A legmagasabb átlagos gyorsulási szintek a jármű lassítási manőverei során voltak megfigyelhetők. A gyorsítási manőverek átlagos rándulási ideje 1,29 s, ami 55%-kal nagyobb, mint a lassítási manőverek esetén, amelyek 0,83 másodperces átlagos időtartamot jelentettek. A tartós gyorsulás átlagos időtartama 1,27 s volt fékezési manővereknél és 1,39 s járműgyorsítási manővereknél. Meg kell azonban jegyezni, hogy a maximális tartós gyorsulási időtartamok meglehetősen hosszúak voltak, 5,8 s, illetve 9,0 s értékkel a fékezésnél és a gyorsításnál. Statisztikailag szignifikáns különbség volt megfigyelhető a jármű gyorsítási és lassítási manővereiből származó rándulási idők és átlagos gyorsulások tekintetében. Itt ki kell emelni, hogy az átlagos gyorsulás és annak időtartamainak statisztikai átlaga magasabb és hosszabb volt a járműgyorsítási manővernél, mint a fékezésnél. Továbbá pozitív korreláció állt fenn az alacsonyabb átlagos gyorsulási érték és a hosszabb időtartam között, a gyorsítási manővereknél 0,78-as, lassítási manővereknél pedig 0,91-es együtthatóval.

### 5.3.1. A rándulás időtartama

Garrott és társai (2012) tanulmányukban arról számoltak be, hogy a nyerges-félpótkocsi szerelvény kontrollált körülmények között megfigyelt lassulási eseménynek rándulási ideje 0,27 s és 0,56 s között volt. Dunno és a Ge (2022) közepes méretű zárt szekrényes teherautót megfigyelése során véletlenszerű terepi mérések során 1,01 s átlagos rándulási időtartamot figyeltek meg. Jelen kutatás a fékezési manőverek során az átlagos rándulási időtartam esetén 0,83 s, a gyorsítási manővereknél pedig 1,29 s figyelt meg. Az eredmények azt mutatták, hogy a fékezési és gyorsulási minták nagyon hasonlóak más, az egységgrakomány szállítást célzó terepi mérések eredményeihez. A

jelenleg alkalmazott tesztprotokollokkal szemben, amelyben ezek az időtartamok az EUMOS esetén 50 ms és az ISO esetén 100 ms, viszont 10-20-szor hosszabbak.

### 5.3.2. A tartós gyorsulás időtartam

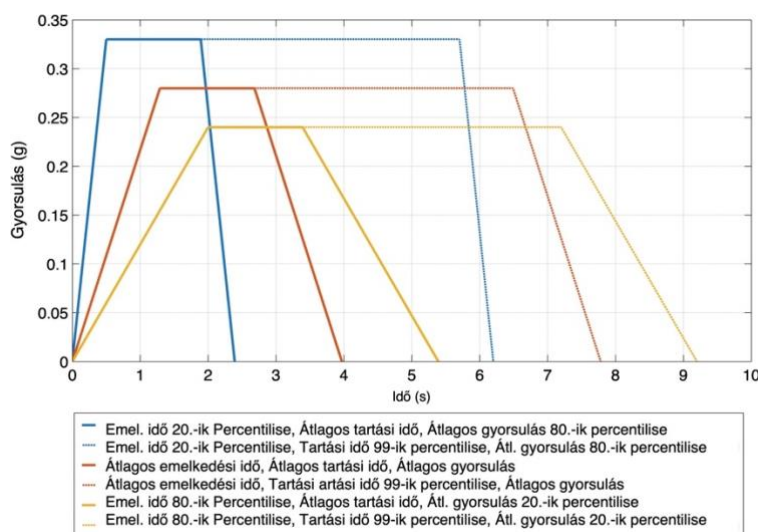
A fékezési és gyorsítási manővernél az esemény steady-state részétől (tartási idő) számított átlagos időtartam 1,27 s, illetve 1,39 s volt. Az eredmények azt mutatják, hogy a tartási idő rövidebb volt, mint a Dunno és Ge kutatásban közölt szállítódobozos teherautóé, ahol ez 4,2 s és 11,3 s között változott. Természetesen ez feltehetően a jelen vizsgálat során alkalmazott könnyebb járműveknek köszönhető, amelyek viszonylag rövid időn és távolságon keresztül teszik lehetővé a kívánt sebesség elérését vagy megállást. Itt azonban meg kell jegyezni, hogy a szállítószállító kisteherautó kompaktsága több időt biztosít a vezetőknek olyan lassítási vagy gyorsítási manőverek elvégzésére, amelyek nagyobb szállítójárművekkel nem érhetők el. A vizsgálat átlagos tartási ideje a tesztprotokollhoz képest több mint négyszer hosszabb, mint az EUMOS és ISO tesztprotokollokban (0,3 s).

### 5.3.3. A tartós gyorsulás átlagos értéke

A fékezési és gyorsítási manővernél a tartós gyorsulások átlagos időtartama 1,27 s, illetve 1,39 s volt. Az eredmények azt mutatják, hogy ez az időtartam rövidebb volt, mint a Dunno és Ge (2022) által közölt eredmények, amelyben ez 4,2 s és 11,3 s között változott. Ennek oka, hogy az alkalmazott könnyebb szállítójárműnek rövidebb időtartamon és távolságon belül képes elérni a kívánt menetsebességet, vagy akár teljes megállást. Itt azonban fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a kisteherautó kompaktsága több lehetőséget biztosít a járművezetőnek az egyes lassítási vagy gyorsítási manőverek elvégzésére. Az átlagos tartós gyorsulás időtartama a tesztprotokollhoz (EUMOS és ISO tesztprotokollokban 0,3 s képest több mint négyszer hosszabb volt.

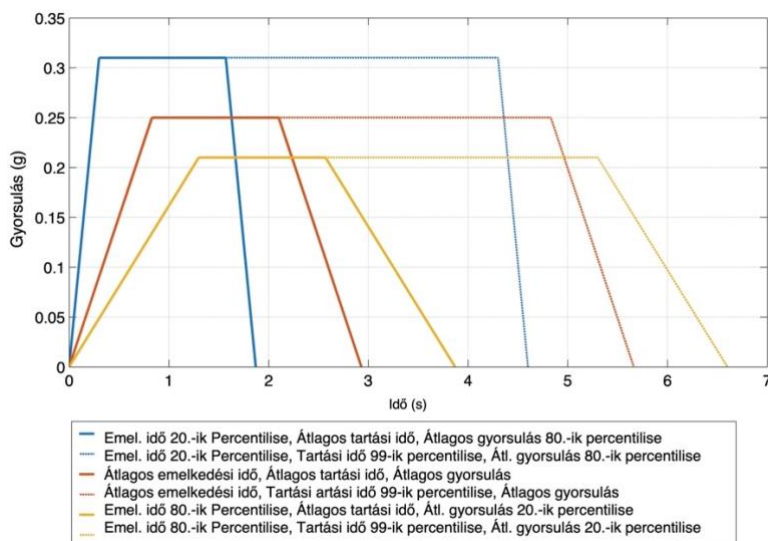
### 5.3.4. Kompozit teszt görbék

Laboratóriumi vizsgálati célokra kompozit görbék kerültek kidolgozásra (5.5. és 5.6. ábrák). A görbék alakja követi a már korábban hivatkozott tesztek trapéz alakú profilját.



5.5. ábra. Kompozit görbék fékezési manőver szimulációjához

Ezek a kompozit görbék lefedik a rögzített események egy adott előfordulási szintje feletti eseményeket a módszertani alfejezetben ismertettek szerint. Az egyes ábráknál a szaggatott vonalak jelzik a terepi mérésből megfigyelt tartós gyorsulási időtartam 99-ik percentiliséhez tartozó értéket, ezzel kizárva a rögzített, de kiugró értékeket. Ezek a kompozit profilok közvetlenül használhatók a rakományok stabilitását vizsgáló laboratóriumi tesztszimulációkban.



5.6. ábra. Kompozit görbék gyorsítási manőver szimulációjához

### 5.3.5. A rándulási erő vektora

Az 5.3. táblázat tartalmazza az átlagos gyorsulási értékhez és az átlagos rándulási időtartamhoz kalkulált rándulási vektor nagyságát, illetőleg a 20-ik percentilis rándulási időtartamhoz és a 80-ik percentiliséhez tartozó átlagos gyorsulási érték szerint kalkulált vektor nagyságát. Az utóbbi veszélyesebb állapotnak tekinthető a rövidebb időtartama miatt, ami természetesen közvetlenül növeli a rándulásvektor nagyságát. A fékezési és gyorsítási manőver átlagos rándulása 3,01, illetve 2,17  $m/s^3$  volt. Ezek az értékek azt mutatják, hogy a fékezési manővereknek nagyobb rándulási nyomatékuk van, mint a gyorsításoknak. Ezek az átlagos rándulási értékek közel megegyeztek a Dunno és Ge (2022) által közepes méretű zártszekrényes szállítójárművön megfigyelttel, amely 2,93  $m/s^3$  volt. A rándulási vektor értéke a fékezési manőver esetén az átlagos gyorsulási érték 80-ik percentilisének és a rándulási idő 20-ik percentilisének 10,3  $m/s^3$  volt. Ezzel szemben az EUMOS-ban leírt vizsgálati protokollok által javasolt rándulás mértéke 160  $m/s^3$ , amely lényegesen magasabb, mint bármely, a felmérés során gyűjtött adat.

5.3. táblázat. A fékezési és gyorsítási manőverek rándulási erővektorainak értéke (percentilis a rándulási időtartam értékében)

	Rándulási időtartam 20-ik percentilise és az átlagos tartós gyorsulás 80-ik percentilise alapján	Átlagokhoz tartozóan
Fékezési manőver ( $m/s^3$ )	10,3	3,01
Gyorsítási manőver ( $m/s^3$ )	6,6	2,17

#### 5.4. A kutatás korlátjai

A terepi események rögzítése során a módszertan 0,15 g-os küszöbértékkel jel alapú trigger módszert használt. Bár előfordulhat, hogy ezen küszöbérték alatt sérülés vagy árukár keletkezik az áru- vagy egységpakomány stabilitásvesztése miatt, de amennyiben jelentős számú rögzített ilyen esemény bekerült volna az elemzésbe, úgy az jelentősen befolyásolta volna a statisztikai hitelességét a ténylegesen stabilitásvesztés (majd kárt) okozó események feltérképezésének. Továbbá fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a kisméretű járművekben szállított egységpakományok vagy egyedi csomagok megfigyelése önmagukban nem nyújtanak elegendő információt ahhoz, hogy a csomagolással foglalkozó mérnökök minden egységstabilitással kapcsolatos kérdésre választ kapjanak.

#### 5.5. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek

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 túlcsomagolási reakcióval jár együtt. Jelen kutatás eredményei (Böröcz, 2023) a Packaging Technology and Science folyóiratban jelentek meg.

##### 5.5.1. 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).

## 6. Halmazolt rakományok terepi rázkódásainak elemzése

### 6.1. A kutatási részterület elméleti és gyakorlati vonatkozása

Az elmúlt évtizedben a logisztikai folyamatok tervezése mindinkább abba az irányba fordult, hogy a rendelkezésre álló infrastruktúra kapacitások optimalizálása került előtérbe. Ez egyet jelent a szállítási kapacitások minél hatékonyabb kihasználásával is. Az ipari szereplők ezért minden lehetőséget megragadnak, hogy a lehető legtöbb árut egy egységbe, illetve a szállítójárműbe helyezzenek. Ez gyakorlatilag egyet jelent a rakodások olyan tervezésével, amely igényli a rakományok, szállítási egységek egymásra helyezését, halmazolását. Viszont ez a megoldás a csomagolás megfelelősége szempontjából jelentős problémákat okoz a laboratóriumi megfelelőségi vizsgálatok során. Ennek több oka is van. A laboratóriumi berendezések legtöbbször nem alkalmasak közel háromméteres magasságú rakományok kezelésére, illetőleg a vizsgálóberendezések terhelhetősége is korlátos, sőt bizonyos esetekben a vizsgálatok lefolytatásához szükséges mintaszámok a nagyobb értékű és jelentős térfogatú mintákkal költséghatékonysági kérdéseket is felvet. Továbbá a halmazolás olyan rázkódási körülményeket is okoz a szállítások során, amely a korábbi fejezetekben bemutatott eredményekkel megfelelő pontossággal nem magyarázható, illetőleg nem produkál valóságközeli laboratóriumi szimulációs körülményeket. Azaz itt kell megemlíteni azt a feltételezést is, hogy ha a járművek által a rakodófelületen tapasztalható rezgéseket is csak közelítőleg tudjuk szimulálni, akkor ez vajon milyen további eltéréseket okoz a valósághoz képest a halmazolt rakományok felsőbb soraiban.

A fentieknek megfelelően a kutatások bemutatásáról szóló értekezésem ezen fejezete azzal foglalkozik, hogy a halmazolt rakományok milyen rezgéseket szenvednek el a járművek rakodófelületén tapasztaltakhoz képest.

Külön ki kell emelnem, hogy jelenleg is kettő doktorjelölttel a kutatási témán folyamatosan dolgozunk, így jelen értekezés keretei között az eddig megjelent közleményeink bemutatása és az azokból levont megállapítások kerülnek csak integrálásra. Azaz, a területen sok elvégezni kívánt munkám van még és csak az eddig vizsgált körülmények kapcsán tesztek megállapításokat, amelyek értelemszerűen fontosok, de nem elégségesek a halmazolt rakományokra vonatkozó általános érvényű, illetőleg minden termék-csomagolás rendszerre kiterjedően, viszont a körülmények ismerete fontos a már vizsgált szállítási megoldásokban.

A fejezetben kettő, - a témakör részben szélsőségeinek tekinthető - mérési feladat végrehajtását, elemzését és eredményeit ismertetem. Az első esetben egy olyan visszatérő csomagolási rendszert (speciális autóiipari szállítóállvány) vizsgáltam, amely merev rendszerként értelmezhető, és elméletben a rázkódások egy merev csomagolási rendszeren keresztül hatnak a rakományokban és rakományok a járműszekrényhez rögzítésre kerültek. A vizsgálat nehéztehergépjárművön történt. A második esetben kis méretű félig merev csomagolást alkalmazó, úgynevezett egyutas csomagolást vizsgálok, amelyeket halmazolás közben nem rögzítettek a járműszekrényhez és a vizsgálat kistehergépjárműben történt. Előbbi kutatás eredménye egy magyarországi autóiipari vállalat termékének visszatérő csomagolási rendszer felméréséből származik, utóbbi pedig a már korábban is felmerült futárszolgálatos szállítási keretek között.



Az újratervezhető csomagolások használata az autópárhban világszerte elterjedt megoldás. Ezekben főként olyan acélállványokra helyezik az árukat, amelyek függőleges oszlopokkal rendelkeznek a négy függőleges élen és üres állapotukban nagy visszaforgási arányt tesznek lehetővé azáltal, hogy térfogatuk jelentősen redukálható összehajtással (lásd. 6.1. ábra).

A futárszolgálatos vizsgálatokat az tette fontossá, hogy az elmúlt években a fent említett függőleges rögzítés nélküli halmazolási körülmények rendkívül gyakran megfigyelhetővé váltak a csomagküldési módszerekben (Németh Zs. Et al, 2021). Ennek az az oka, hogy az áruk igen intenzív áramlásra váltanak olyan időszakokban, amikor a vásárlók megrendeléseit az online áruházakon keresztül történnek, vagy ünnepi időszakok előtt hirtelen megemelkedik a kereslet, de ilyen helyzet például a COVID-19 által generált forgalom is, amikor az áruk személyes vásárlása szigorúan korlátozott. Ilyen körülményeket mutat be az 6.2a és 6.2b ábrák.



6.1. ábra. Autópárhban használatos összehajtható többutas speciális szállítóállvány



6.2. ábra. Kistehergépjárműves csomagszállítás során az áruk halmazolása

A szakirodalmat áttekintve csak nagyon kevés számú kutatást találhatunk jelenleg. Leginkább kettő közleményre kell felhívni a figyelmet, amelyek a témával foglalkoznak, de azok sem terepen végzett mérések, hanem laboratóriumi keretek



között. Wang 2016-ban a halmozott hullámpapír dobozból készült három szintes rakomány viselkedését vizsgálta különféle leszorító erők mellett szinuszos és véletlenszerű rezgésszimuláció mentén laboratóriumban. Fang és társai 2018-ban pedig hasonló rakományok között kapcsolódó felületei érintkezési erő maximumainak statisztikai jellemzőit vizsgálta. Csomagküldés esetén egyáltalán nem található korábbi kutatás, vagy közlemény a témakörben.

## 6.2. A felmérések körülményei

### 6.2.1. Többutas speciális autóipari szállítóállvány

A felmérés során egy RENAULT Premium 385.19.T vontató (1999) és egy WILKEN gyártmányú nyerges félpótkocsit használtam (6.3. ábra) Az öttengelyes szerelvény légrugós megoldású felfüggesztéssel volt felszerelve. A vizsgálat során a terhelő tömeg 19 460 kg volt, amely nagyjából a lehetséges kapacitás 80%-a. Az állványok teljesen kitöltötték a rakodóteret, és 50 mm széles hevederekkel kerültek rögzítésre a járműszekrényhez. A heveder 20 500 daN maximális lekötési erőt biztosíthat. A felmérés során ennek 11%-a volt a beállítás. A heveder a rakodófelülethez képest 79 fokos szöveget zárt be. Egy ilyen állvány mérete 2 240 mm szélességű, 1 750 mm hosszú és 985 mm magassággal rendelkezik, 4 db kivehető oszloppal a sarkain.

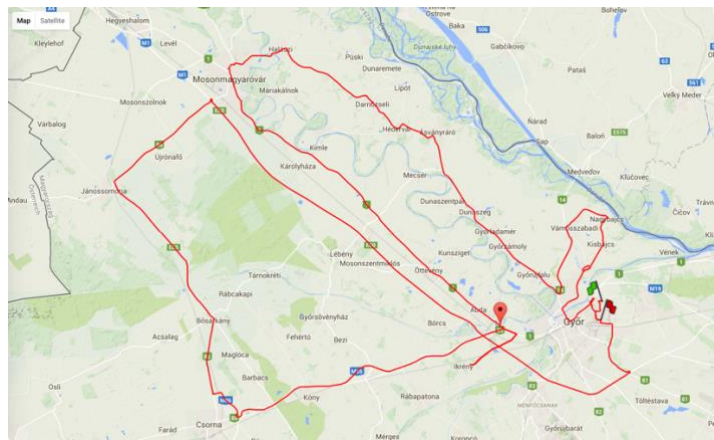
A felmérés során külön vizsgáltam az útpályák minőségének és a menetsebesség változásának hatását a rázkódási szintekre. Így négy útminőséget alkalmaztam: autópálya, elsődleges, másodlagos és harmadlagos utakat. A menetsebesség pedig három csoportra lett osztva: 40 km/h, 60 km/h és 80 km/h. A GPS adatok alapján a beállított menetsebesség pontossága 2–3 % tolerancia határon belül volt. Minden egyes szakasz során 30 perc mérést végeztem el az adatok begyűjtéséhez. A felmérés során külön végeztem mérést az útpályák olyan jellegű speciális pályaegyenetlenségen, mint a vasút szintbeli kereszteződésen, illetve útpályán elhelyezett geometriai sebességcsökkentő elemen (fekvő rendőr). Ehhez a következő áthaladási sebességeket alkalmaztam: vasúti átkelőhelynél 25 km/h és 50 km/h, illetőleg a fekvőrendőr esetén 5 km/h, 10 km/h és 15 km/h menetsebességet. Az 6.3. és 6.4. ábra ezeket a mérési helyeket mutatja be. Az 6.1-es táblázat pedig a felmérés adatait tartalmazza.

6.1. táblázat. Az útviszonyok és menetsebességek a felmérés során

Útpálya	Menetsebesség	Lokáció
Autópálya	60 és 80 km/h	M1
Elsődleges út	40, 60 és 80 km/h	1
Másodlagos út	40, 60 és 80 km/h	85, 86
Harmadlagos út	40, 60 és 80 km/h	140
Vasúti kereszteződés	20 és 40 km/h	Ikrény külterület
Fekvőrendőr	5, 10 és 15 km/h	Kinizsi utca, Győr

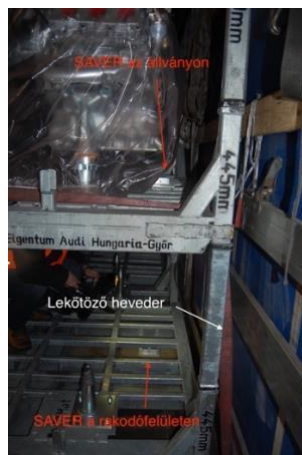


6.3. ábra. A járműszerelvény vasúti kereszteződésen és geometriai sebességcsökkentő elemen való áthaladása



6.4. ábra. A felmérés útvonala

A méréshez a már ismert Lansmont SAVER-eket alkalmaztam, és itt is minden irányban rögzítettem az adatokat. A mérőműszerek pozíciója a következő volt. Egyik műszer a rakodófelületen került elhelyezésre a járműszekrényben a hátsó hármastengely felett, a másik pedig közvetlenül a halmazolt rakományhoz tartozó állvány alsó síkjában futó keresztmervítő szálhoz. Ez látható a 5.5. ábrán.



6.5. ábra. A műszerek pozíciója a járműszekrényben (Böröcz, 2020)

A műszer beállításának paraméterei a következők voltak:

- Ébredési gyakoriság (idő alapú trigger): minden 1 másodpercben
- Felvétel hossza: 1000 ms
- Minta/másodperc: 500 Hz
- Minta méret: 1000
- Frekvencia felbontás PSD-hez: 1,00 Hz
- Anti-aliasing szűrő frekvencia: 250 Hz

Az elemzés során a már korábban is ismertetett statisztikai jellemzőket vizsgáltam meg, részben ANOVA-val (analysis of variance) és Tukey-féle post hoc eljárás alkalmazásával, hogy összehasonlítsam a meghatározott csoportok közötti különbségeket ( $p < 0.05$ ), illetőleg külön megvizsgáltam a jelentős útpálya változások (vasúti kereszteződés és fekvőrendőr) által generált idő alapon felvett gyorsulás jeleket.

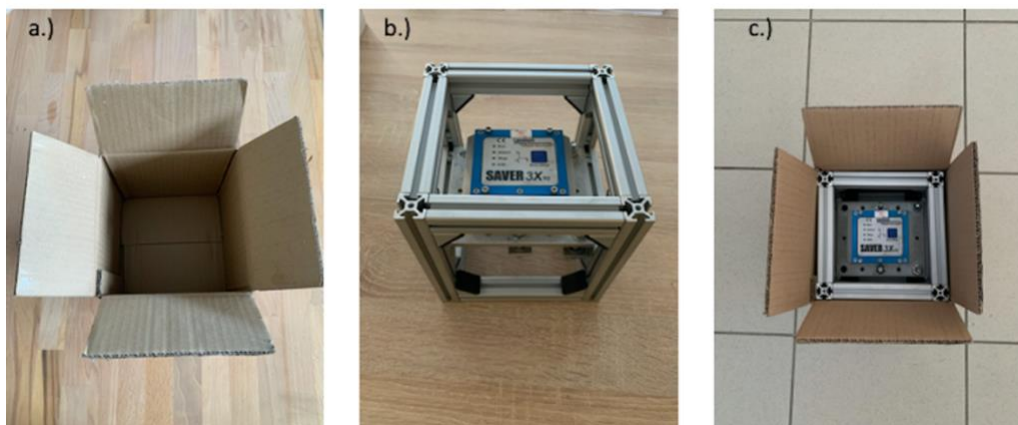
A frekvencia alapú rázkódási események elemzéséhez ismét az adatok spektrális gyorsulássűrűség függvényeit készítettem el (PSD), megadva azok teljes  $G_{rms}$  értékeit a 1 – 200 Hz-es tartományban.

#### 6.2.2. Kiscsomagok mérési körülményei a futárszolgálatos vizsgálat során

A méréshez 4 db SAVER adatrögzítő műszert használtam fel, amelyek ugyancsak mindhárom (függőleges, kereszt és hossz) irányban felvették a rázkódási eseményeket. A műszerek közül egy a jármű rakodófelületére lett közvetlenül rögzítve, illetve a többi műszer három mintadobozból készült halmazolt rakományban került elhelyezésre. A műszerek mereven tartásához 20 x 20 mm keresztmetszetű alumínium profilokból tartókeretek készültek, majd a műszerek ehhez lettek rögzítve, és a dobozokba helyezve. Az 6.2 táblázat és a 6.6. ábra mutatja be a műszerek elhelyezését menet közben, illetve a felhasznált minták műszaki specifikációját és a mérőműszerek beállítását.

#### 6.2. táblázat. A felhasznált minták specifikációja és a mérőműszer beállításai

Csomagok specifikációja		SAVER-ek	
Hullámpapírlemez	35BC	Idő alapú trigger	1 s
HPL tömege	742 g/m <sup>2</sup>	Felvétel hossza	1000 ms
ECT érték	9,0 kN/m	Minta/ másodperc	500 Hz
BST érték	1,685 kPa	Minta mérete	500
Doboz tömege	190 g	PSD frekvencia felbontás	0,50 Hz
Mérete	180x180x195 mm	Anti-Aliasing frekvencia	200 Hz
Alu keret tömege	1 440 g		
Teljes tömeg	2 630 g		



6.6. ábra. A mintákba helyezett műszer és annak merev rögzítése (Böröcz és Molnár, 2020)

A halmazolt rakomány acélból készült keretek között lett elhelyezve (6.7a ábra), és a hátsó tengely felett lett pozicionálva a járműszekrényben. Ilyen előírásokat a szabványok is tartalmaznak, mint például az ASTM D7386-12, vagy ISTA 3A protokoll. A 6.7b ábrán látható a laboratóriumi körülmények közötti vizsgálat. Az acélkeretek alkalmazásának az is az oka, hogy ne boruljon fel a halmazolt rakomány, hiszen a csomagszállítások során, bár rögzítve nincsenek, mégis kissé egymást tartják oldallapjukon keresztül a csomagok.

A kutatás egyik egyediségét az adta, hogy a vizsgálatokat úgy is elvégeztük, hogy egyre nagyobb helyet hagyunk a csomagoknak a kereszt-, és hosszirányú elmozdulásokra, azaz fizikális teret hagyunk a rakomány körül. Ennek mértékét három csoportra osztottuk úgy, hogy a további elmozdulási hely nagyságát a mintadobozok méretének %-os arányában határoztuk meg:

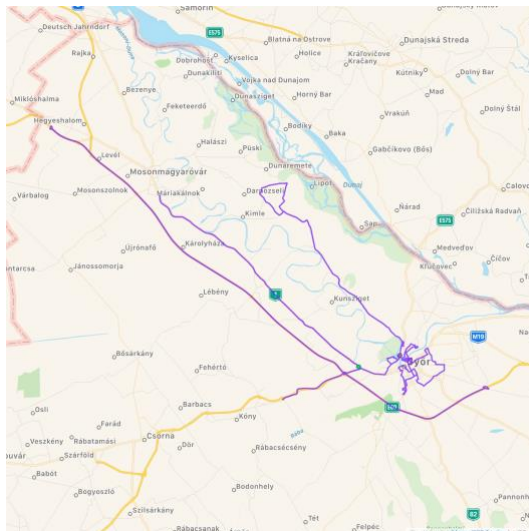
1. Nincsen szabad elmozdulásra hely (SZE 0%);
2.  $\pm 5\%$  SZE a mintacsomag kereszt-, és hosszirányában (18mm);
3.  $\pm 10\%$  SZE a mintacsomag kereszt-, és hosszirányában (36mm).

Az indokok a szabad elmozdulás lehetőségére a következők: a) az operátorok általában próbálják torlasztani az árukat a rakodótérben, de a gyakorlatban ez nem homogén áruk szállítása során lehetetlen tökéletes mértékben; b) így mindig maradnak kisebb helyek a csomagok között, még az azonos csomagok között is, mivel azok sem kerülnek külön összefogásra; c) ha a csomagok között a felmérés során túl sok helyet hagynánk, akkor a csomagok nem a megfigyelni szándékozott rázkódást hozzák létre, hanem felborulnak és egymásnak ütköznek sokk jellegű impulzusokat produkálva; d) laboratóriumi szimuláció esetén a rázóasztaloknak van egy maximális mérete, amelyen nem tudnánk ezt a jelenséget produkálni, ha túl sok helyet hagynánk. A felmérés során a maximális elmozdulás akkor jöhet létre, ha az egyik doboz éppen ellentétes irányban mozog, mint a felette lévő, így 36mm maximális relatív elmozdulás lehetett a csomagok között a vízszintes síkban.



6.7. ábra. A halmazolt csomagok a) kistehergépjárműben és b) laboratóriumban vizsgálva

A felmérés során alkalmazott jármű egy FIAT Ducato (2008, 2.2. Multijet, 11 m<sup>3</sup> konténer térfogatú, 4 035 mm tengelytávú, egy laprugóval szerelt) kistehergépjármű volt. A terepi adatokat egyaránt autópályán, főútvonalon, mellékúton és városban rögzítettük az 6.3. táblázat adatai alapján. Összesen 720 percen keresztül rögzítettük az adatokat. A mérést három körben folytattuk le, mindig ugyanazt az útvonalat alkalmazva (6.8. ábra). Ennek az volt az oka, hogy ki akartuk zárni azt a változót, hogy a rakományok ne pontosan ugyanazon a helyen legyenek elhelyezve a jármű rakodóterében. A felmérésekre minden esetben éjszaka került sor, így biztosítottuk, hogy a jármű a lehető legnagyobb átlagsebességet érje el. A méréseket Győr-Moson-Sopron megyében végeztük el, 2020 augusztusában.



6.8. ábra. A futárszolgálati halmazolt rakomány felmérése során alkalmazott útvonal

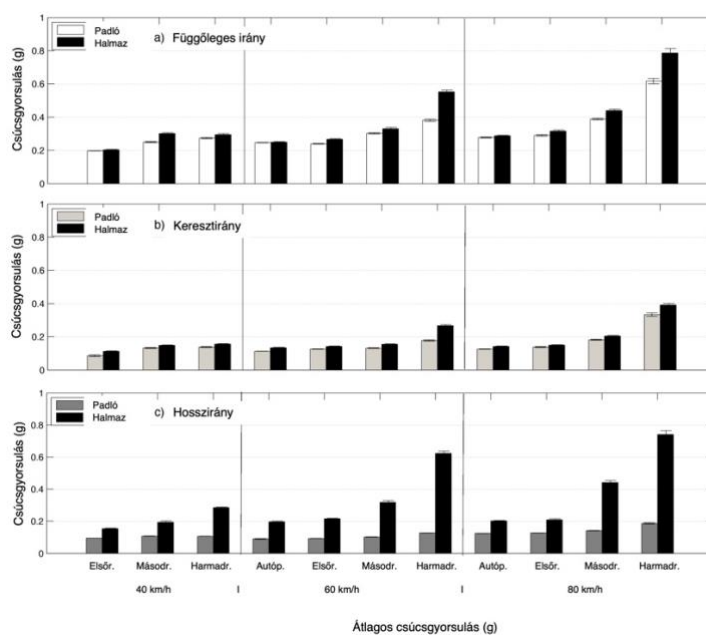


6.3. táblázat. A kistehergépjárműben végzett halmazolt rakomány felmérése során alkalmazott utak és menetsebességek

	SZE 0%		SZE 10%		SZE 20%	
	Távolság (km)	Átlagos sebesség (km/h)	Távolság (km)	Átlagos sebesség (km/h)	Távolság (km)	Átlagos sebesség (km/h)
Autópálya	120,9	114	120,7	115	121,4	117
Főút	80,2	73	79,8	68	80,1	71
Mellékút	51,5	54	51,4	57	51,2	53
Város	38,4	35	38,7	34	39,0	37
Összesen	291,0	69,1	290,6	68,1	291,7	69,7

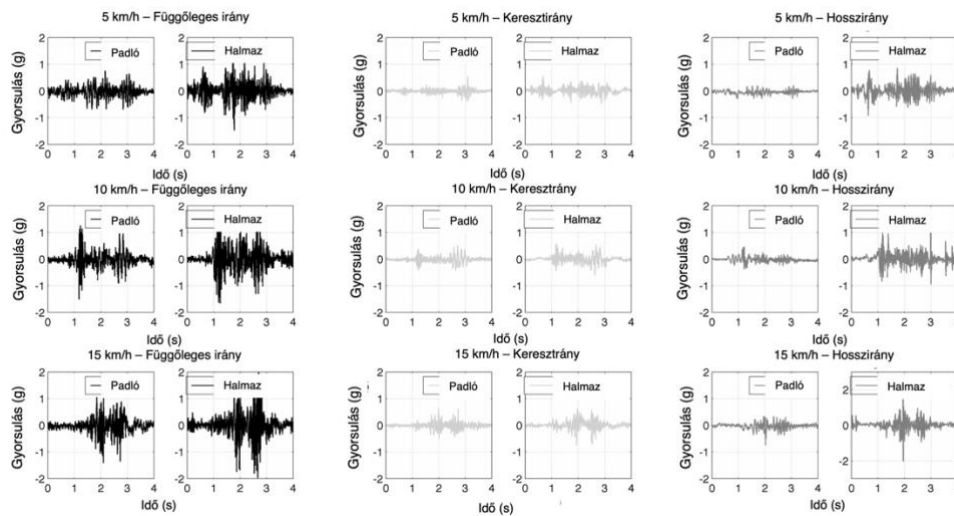
### 6.3. A szállítóállványos halmazolás vizsgálata nehéztehergépjárművön

Az 6.8. ábra az autóiipari speciális szállítóállvány mérésénél rögzített csúcsgyorsulás adatokat mutatja különböző menetsebességek és útpálya viszonyok mellett. Numerikus adatokat az 'A' függelék tartalmazza. A felső állványon mért adatok átlagosan 1,01 – 1,45-ször magasabbak voltak, mint a padlón, és emelkedő menetsebesség mellett (60 km/h és 80 km/h) ez 1,27 – 1,45-szörös volt. Ugyan annál a menetsebességnél a gyengébb útminőségen figyelhetünk meg magasabb csúcsgyorsulás értékeket. A különbségek a gyorsulás értékekben statisztikailag szignifikánsak voltak ( $p < 0.05$ ) harmadrendű úton 60 km/h és 80 km/h, másodrendű úton 40 km/h és 80 km/h, elsőrendű úton 60 km/h-es menetsebességek mellett. Keresztirányban statisztikailag szignifikáns különbség a harmadrendű úton 60 km/h és 80 km/h-es sebesség mellett volt. Itt a gyorsulás csúcsértékek 1,27 – 1,51-ször voltak magasabbak, mint a padlón mértek. A legnagyobb különbségek a hosszirányban (menetiránynak megfelelően) voltak tapasztalhatóak. A csúcsgyorsulások itt 1,62 – 4,90-szer magasabbak voltak, mint a jármű rakodófelületén.



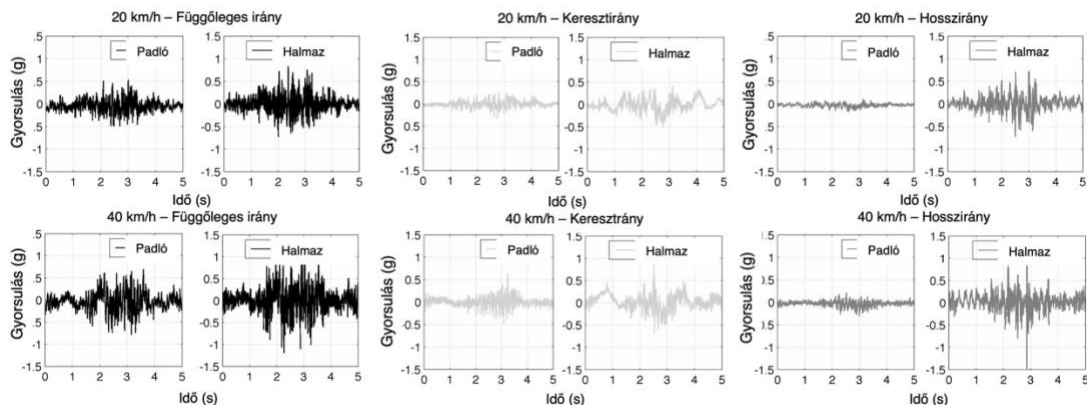
6.8. ábra. Csúcsgyorsulások a padlón és halmazolt rakományon mérve különböző menetsebességek és útviszonyok mellett (Böröcz, 2020)

Az 6.9. és 6.10. ábra gyorsulás-idő jeleket mutat be, amikor a jármű fekvőrendőrön, illetve vasúti kereszteződésen haladt át különböző sebességekkel. A 'B' függelék numerikus eredményeket részletez a mérésekhez. A maximális csúcsgyorsulás érték a halmazolt rakományon történt, értéke 2,52 g volt a hosszirányban, amikor a jármű 15 km/h sebességgel hajtott át menetsebességet csökkentő fekvőrendőrön. Ekkor a padlón 0,74 g-t volt megfigyelhető. Függőleges irányban ez az érték 1,99 g és 1,61 g volt. A csúcsgyorsulások a megválasztott menetsebesség növekedésével együtt nőttek. Meg kell jegyezni, hogy a felvett esemény nem mutatott sokkszerű hirtelen impulzust, mivel relatíve hosszabb idő telt el, mire a teljes jármű áthaladt a fekvőrendőrön, hanem az egy félig folytonos dinamikus gerjesztést okozott.



6.9. ábra. Gyorsulás-idő jel a geometriai sebességsökkentő elemen való áthaladáskor különböző menetsebességeknél (Böröcz, 2020)

A vasúti kereszteződésen való 40 km/h-s áthaladáskor a menetirányban 1,48 g-t mértünk a halmazolt rakományon, míg a padlón 0,31 g-t. A függőleges irányban 1.24 g-t a halmazolt rakományon, a padlón pedig 0,79 g-t.

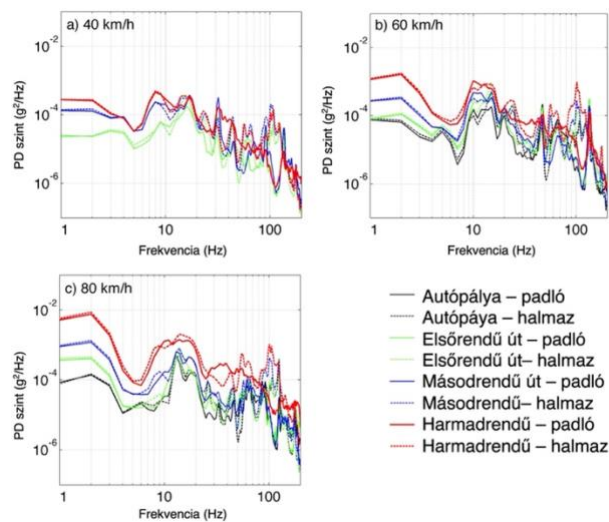


6.10 ábra. Gyorsulás-idő jel a vasúti kereszteződésen való áthaladáskor különböző menetsebességek mellett (Böröcz, 2020)

A rögzített események alapján kalkulált PSD görbéket az 6.11 – 6.13 ábrák mutatják be. Függőleges irányban 80 km/h-s sebesség mellett 2Hz-nél volt a legmagasabb PD

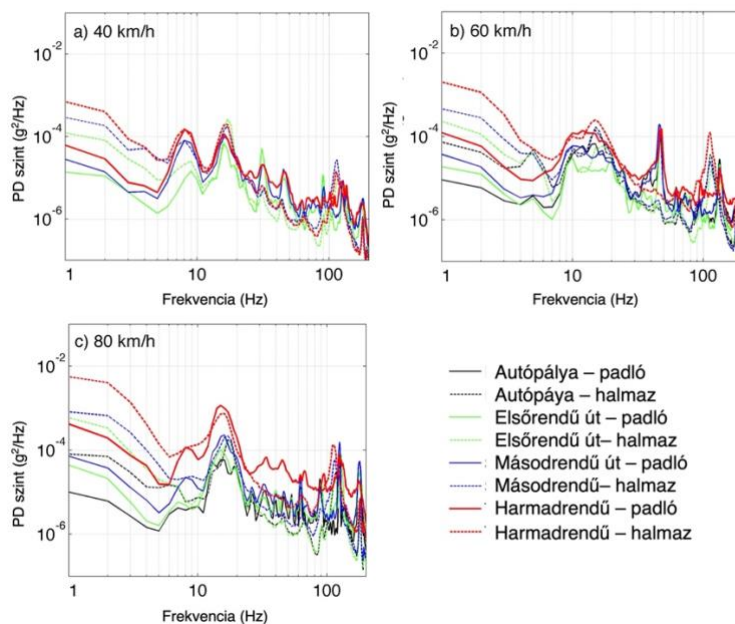


szint tapasztalható, majd 10 – 20 Hz között és 100 Hz környékén. Megfigyelhető, hogy függőleges irányban a merev állványok között csak kis mértékben erősödött fel a rázkódási szint, ami a halmazolt rakományon volt tapasztalható.

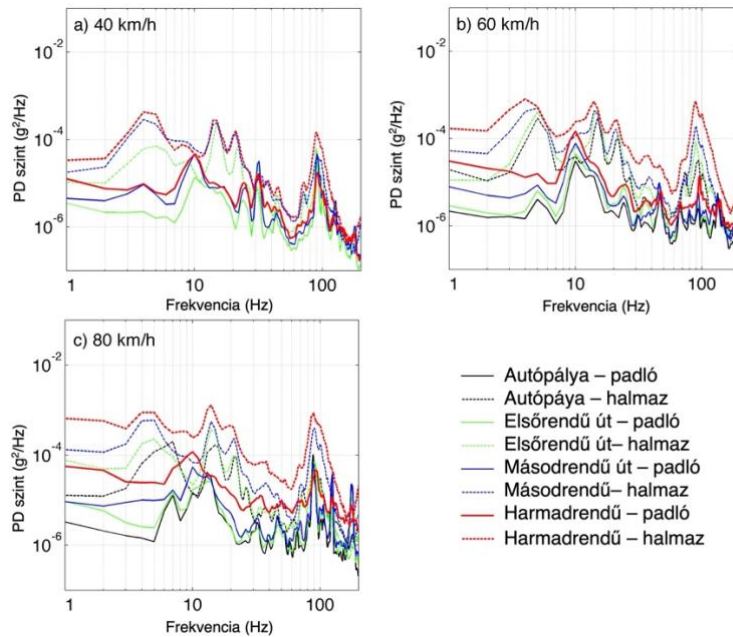


6.11. ábra. Függőleges irányú PD szintek különböző menetsebességek és pályaviszonyok mellett a) 40 km/h, b) 60 km/h és c) 80 km/h (Böröcz, 2020)

Keresztirányban a nyilvánvaló erősítés 1 – 10 Hz és 110 Hz környékén figyelhető meg. Ennek oka az, hogy a jármű karosszériája nemcsak a három merőleges irányban (függőleges, oldalirányú és hosszanti) mozoghat, hanem e tengelyek körül is elfordulhat, ezek a szöglengések pedig növelik a rázkódások intenzitását. Itt kell megjegyezni, hogy ezek a rázkódások nem mindegyike az útfelület egyenetlenségéből származik (Gillespie 1985). A főbb csúcsok a PSD görbén 80km/h-s sebesség mellett 10 – 18 Hz, 45 Hz és 110 Hz-nél voltak. Keresztirányban a PSD görbéről tisztán látható, hogy a rázkódások intenzitása a teljes vizsgált frekvenciatartományon sokkal magasabb volt, mint a padlón mértek. A PSD görbe csúcsai 4 – 5 Hz, 15 Hz, és 90 Hz-nél voltak.

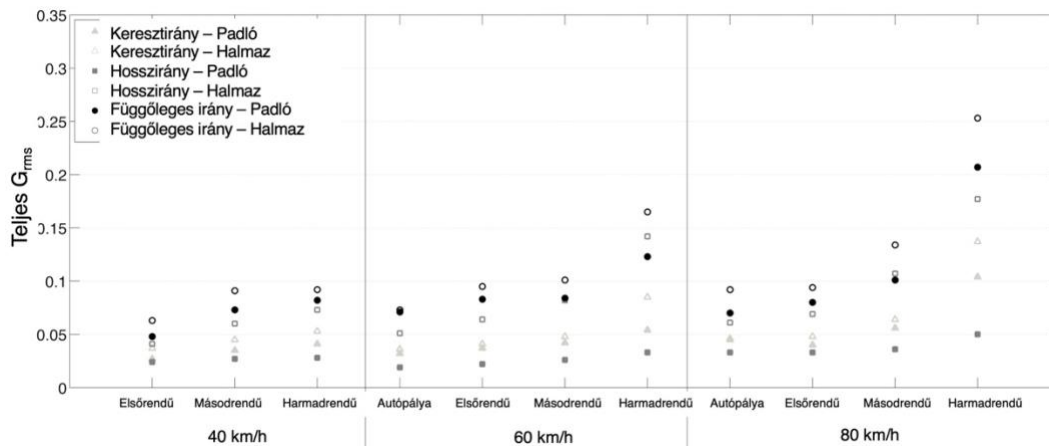


6.12. ábra. Keresztirányú PD szintek különböző menetsebességek és pályaviszonyok mellett a) 40 km/h, b) 60 km/h és c) 80 km/h (Böröcz, 2020)



6.13. ábra. Hosszirányú PD szintek különböző menetsebességek és pályaviszonyok mellett a) 40 km/h, b) 60 km/h és c) 80 km/h (Böröcz, 2020)

Az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományon a teljes  $G_{rms}$  értékeket az 6.4. táblázat tartalmazza, és grafikusán a jobb összehasonlíthatóságért az 6.14. ábra is ábrázolja. Ahogy azt az adatok mutatják, hogy a függőleges irányú rázkódások teljes  $G_{rms}$  1,02 – 1,34-ször magasabb volt a felső állványon, mint padlón; a hosszirányban a  $G_{rms}$  értékek 2,65 – 5,06-ször magasabbak voltak a halmazolt szállítóállványon, mint a padlón (nyilvánvaló oka ennek, hogy a leszorító hevederek ebbe az irányba nem csillapítják a felmerülő rázkódásokat).



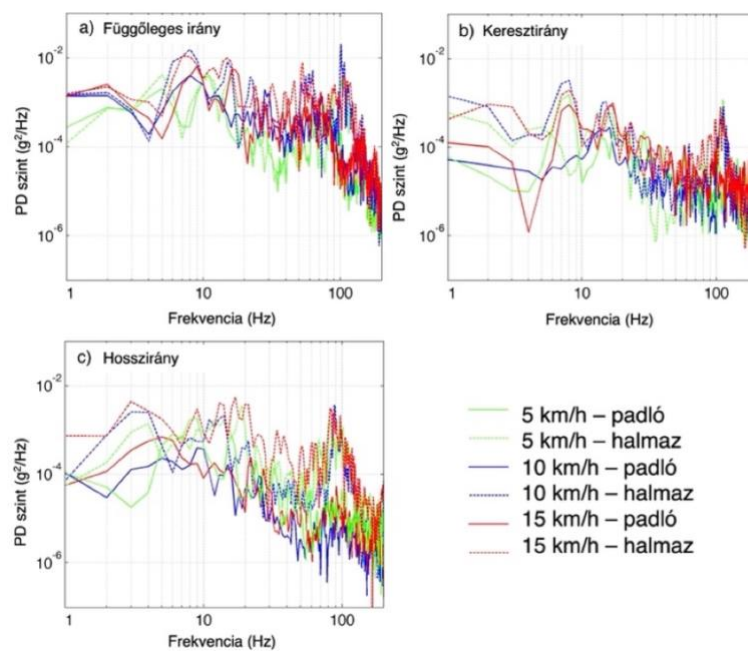
6.14. ábra. Teljes  $G_{rms}$  értékek az 1 – 200 Hz frekvenciatartományban különböző menetsebességek és útviszonyok mellett (Böröcz 2020)

A vasúti kereszteződésen és fekvőrendőrön való áthaladásakor felvett jelek PSD görbéit a az 6.15. és 6.16. ábrák mutatják be. A PSD csúcsok függőleges irányban 7 – 10 Hz, 15 Hz, 50 – 70 Hz és 110 Hz-nél voltak tapasztalhatóak. Egészen 20 Hz-től 140 Hz-ig az állványon mért értékek jelentősen növekedtek a padlón mértékhez képest. Keresztirányban az állványon ez az alsóbb 1 – 15 Hz tartományban volt megfigyelhető,

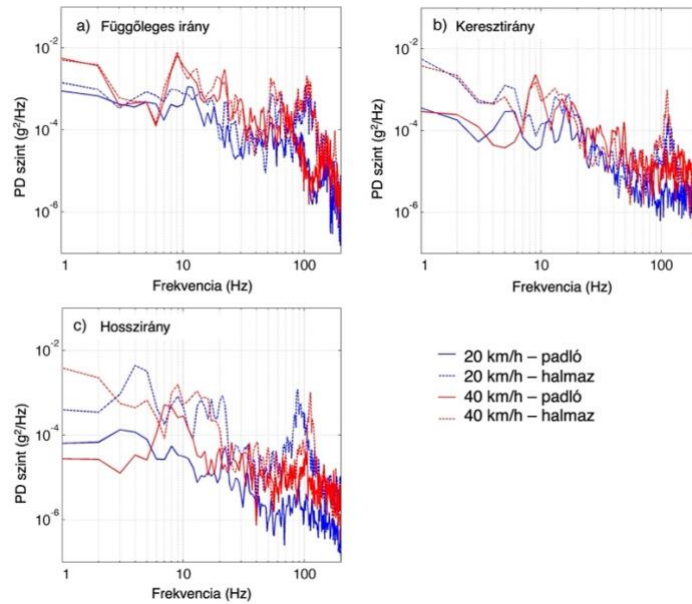
e felett viszont nem. Hosszirányban a PD szintek a teljes vizsgált tartományban erősödtek, sőt valójában elérték a függőleges irányú értékek nagyságrendjét

6.4. táblázat. A teljes  $G_{rms}$  értékek a különféle mérések során (1-200 Hz)

Sebesség	Útpálya	Függőleges irány ( $G_{rms}$ )		Keresztirány ( $G_{rms}$ )		Hosszirány ( $G_{rms}$ )	
		<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>	<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>	<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>
		40 km/h	Elsőrendű	0,048	0,063	0,027	0,037
	Másodrendű	0,073	0,091	0,035	0,045	0,027	0,060
	Harmadrendű	0,082	0,092	0,041	0,053	0,028	0,073
60 km/h	Autópálya	0,071	0,073	0,032	0,036	0,019	0,051
	Elsőrendű	0,083	0,095	0,037	0,041	0,022	0,064
	Másodrendű	0,084	0,101	0,042	0,048	0,026	0,082
	Harmadrendű	0,123	0,165	0,054	0,085	0,033	0,142
80 km/h	Autópálya	0,070	0,092	0,040	0,046	0,033	0,061
	Elsőrendű	0,080	0,094	0,045	0,048	0,033	0,069
	Másodrendű	0,101	0,134	0,056	0,064	0,036	0,107
	Harmadrendű	0,207	0,253	0,114	0,147	0,050	0,177

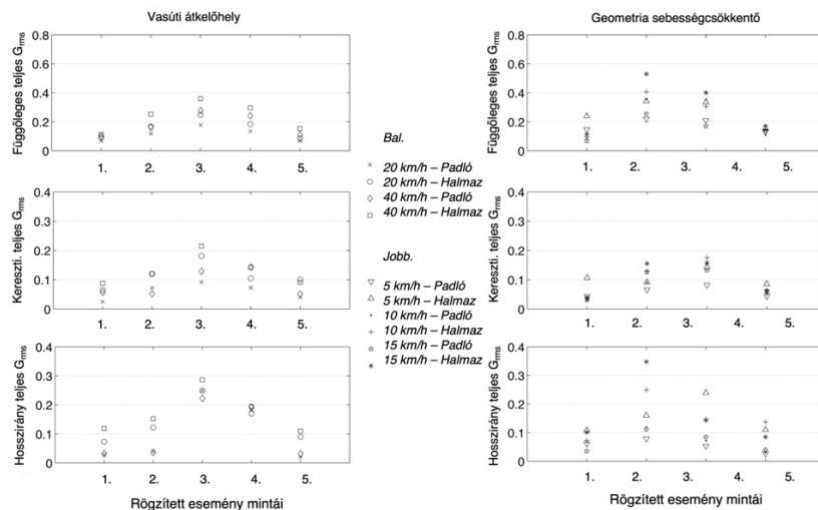


6.15. ábra. A geometriai sebességcsökkentő elemen való áthaladáskor felvett jelek PSD görbéi a) függőleges, b) kereszt-, és c) hosszirányban (Böröcz, 2020)



6.16. ábra. A vasúti kereszteződésben való áthaladáskor felvett jelek PSD görbéi a) függőleges, b) kereszt-, és c) hosszirányban (Böröcz, 2020)

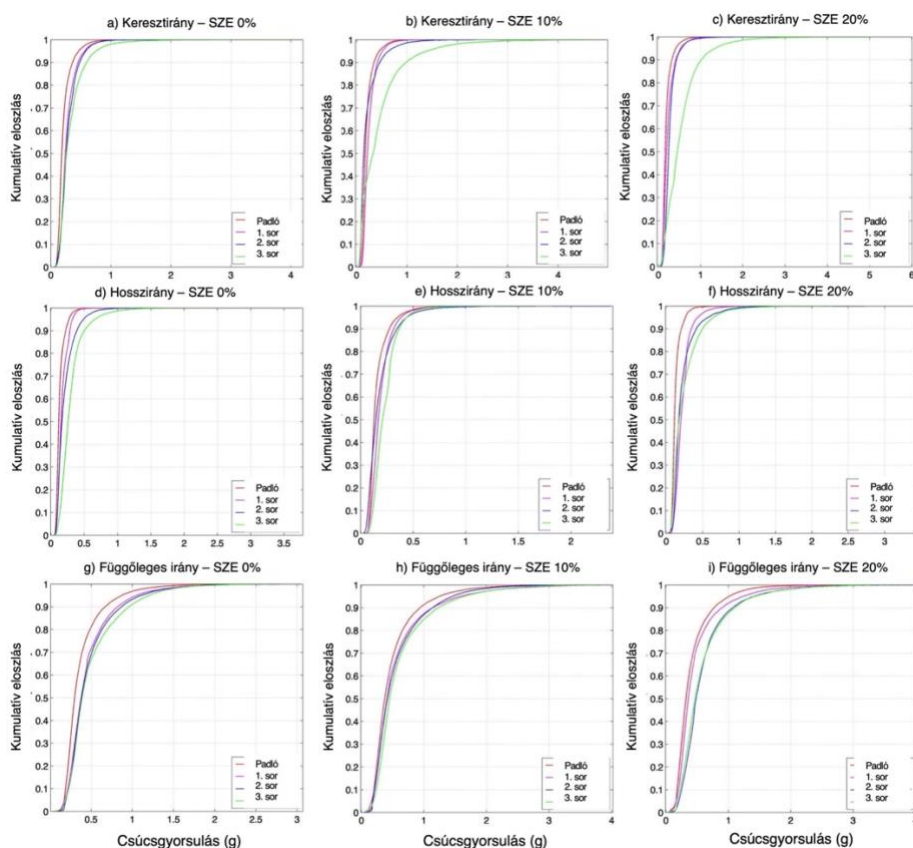
A vasúti kereszteződésen és fekvőrendőrön való áthaladáskor kalkulált PSD-k teljes  $G_{rms}$  értékeit (1 – 200 Hz) az 5.17. ábra mutatja be külön-külön minden egyes felvett 1000 ms hosszúságú mintára. A 'C' és 'D' Függelék tartalmazza a numerikus adatokat. A legmagasabb  $G_{rms}$  értéket akkor kalkuláltam, amikor a hármastengely áthaladt a vasúti kereszteződésen. Ez körülbelül 3 másodperccel később történt, mint ahogy az első tengelye a járműnek áthaladt. Az állványon minden esetben a 40 km/h-ás sebesség mellett voltak a magasabb értékek. A maximális  $G_{rms}$  érték a függőleges irányban 0,360, keresztirányban 0,215, és hosszirányban 0,286 volt. A teljes  $G_{rms}$  értékek a függőleges irányban 1,14 – 1,56-szor magasabbak voltak a halmazolt állványon, mint a padlón, 1,01 – 2,61-szer keresztirányban, és 1,00 – 4,73-szor hosszirányban.



6.17. ábra. A teljes  $G_{rms}$  értékek a vasúti kereszteződéskor és fekvőrendőrön való áthaladáskor (1 – 200 Hz) (Böröcz, 2020)

#### 6.4. Halmazolt kicsomagok vizsgálata futárszolgálatok kistehergépjárműves kiszállításánál

A három irányban felvett csúcsgyorsulások maximális értékeit és előfordulásainak valószínűségét az 'E' függelék tartalmazza. A legmagasabb értékek függőleges irányban voltak, aztán a kereszt-, és hosszirányban. Ugyanakkor az volt tapasztalható, hogy a teljes adatsorban felvettek között a harmadik sorban találhatóak voltak a magasabb csúcsgyorsulás értékek és nem függőleges irányban, hanem keresztirányban, 4,16 g, 4,93 g és 5,94 g-s mértékben a 0%, 10% és 20% SZE-oknál (szabad elmozdulás értéknél). A legmagasabb rögzített csúcsgyorsulás érték ugyancsak a harmadik sorban volt a függőleges irányt tekintve, értéke 3,99 g volt, amikor 20% volt az SZE értéke. Ez a jelenség azért fordulhatott elő, mert a városon kívüli mellékutakon relatív nagy sebességgel közlekednek a furgonok, ugyanakkor ezek az utak olyan "erős" ívű kanyarokat is tartalmaznak, amelyben áthaladásakor jelentősen dől a gépjármű, és vele együtt a halmazolt rakomány is. Az adatok eloszlásfüggvényeit az 6.18. ábra tartalmazza. Ezek azt mutatják, hogy a függőleges irányban az adatok 50%-a 0,37 g alatt volt a jármű padlóján, és 0,48g alatt a harmadik legfelső sorban. Kereszt-, és hosszirányban a rögzített értékek 50%-a a padlón 0,18 g alatt és 0,13 g alatt fordult elő, a harmadik sorban pedig 0,45 g és 0,26 g alatt.



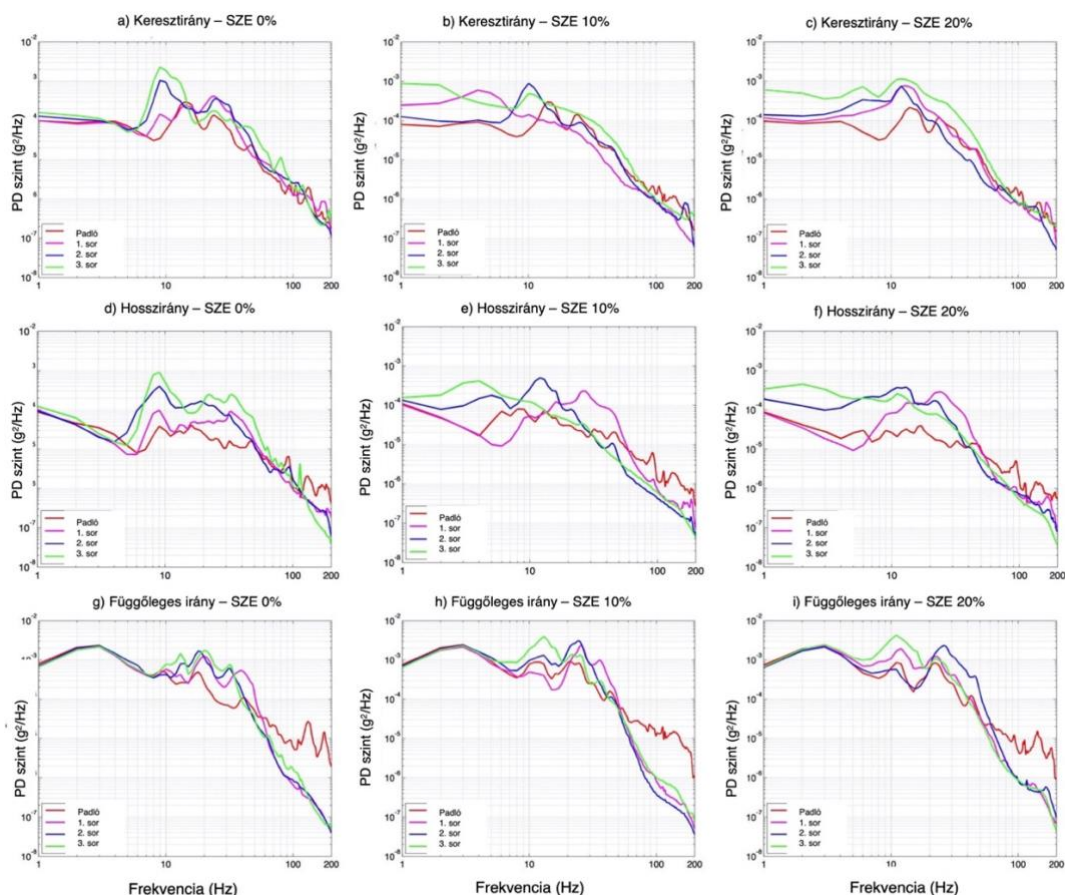
6.18. ábra. A mérés során rögzített csúcsgyorsulások tapasztalati eloszlásfüggvényei, a)-c) keresztirány 0%, 10%, 20% SZE-sal; d)-f) hosszirány 0%, 10%, 20% SZE-sal; g)-i) függőleges irány 0%, 10%, 20% SZE-sal (Böröcz és Molnár, 2020)

Gyakorlatilag kijelenthető, hogy minden mérés során a legmagasabb csúcsgyorsulások a felső, harmadik sorban ébredtek, aztán a másodikban, majd elsőben és végül a padlószinten. Ez minden térirányra is igaz, kivétel a 10%-os szabad elmozdulásnál a hosszirányban, ahol az adatok 50%-a úgy fordult elő, hogy az első sorban



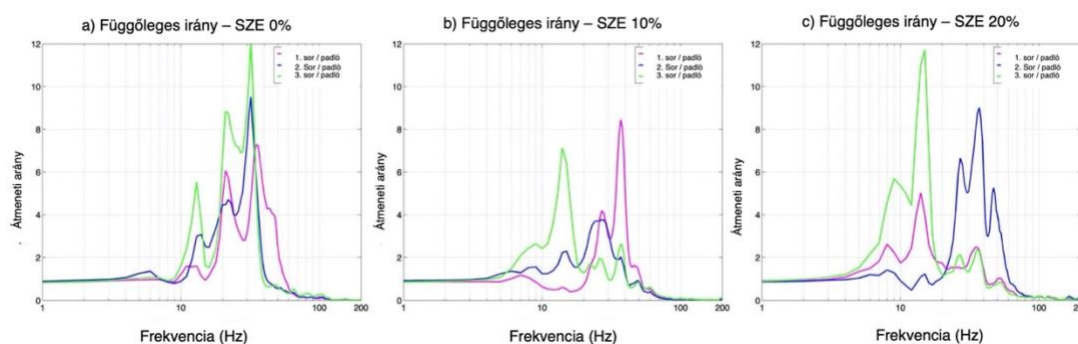
alacsonyabbak voltak az értékek, mint a másodikban. Ennek az oka az lehet, hogy változó forgalmi intenzitás mellett a jármű vezetője gyakran használta a fékpedált.

Kijelenthető, hogy a nagyobb elmozdulásra lehetőséget adó tér magasabb csúcsgyorsulás értékekkel jár együtt. A halmaz sorait tekintve a függőleges irányban 1,21 – 1,51-szer magasabb értékek voltak megfigyelhetők felfelé haladva, és 1,44 – 2,81-szer, illetőleg 1,63 – 2,36-szor magasabb értékek a kereszt-, és hosszirányban, a padlóhoz viszonyítva. Megállapítható, hogy a halmazolt rakományban minél magasabb réteget figyelünk meg, annál nagyobb a felmerülő magas csúcsgyorsulás mértékének a kockázata. A kereszt-, és hossziránynál ez fokozottan érvényes a szabad elmozdulás terének növekedésével is. A rögzített rázkódási események PSD görbéit az 6.19. ábra mutatja be. Minden mérőműszer pozícióban az állapítható meg, hogy a függőleges irányú rázkódások voltak a legintenzívebbek, amelyet a keresztirányú, majd a hosszirányú események követtek. Függőleges irányban a halmazban 8 – 50 Hz között jelentősen erősebb értékek voltak tapasztalhatók, míg 8 Hz alatt a rázkódások intenzitása gyakorlatilag megegyezett a padlón mértekkel. Ez arra enged következtetni, hogy 8 Hz alatt a rakomány gyakorlatilag együtt mozgott (fázisban volt) a járművel. Később 40 – 50 Hz között aztán található egy keresztfrekvencia, amely felett gyorsan csökken a rázkódások intenzitási szintje a felsőbb sorokban.



6.19. ábra. A különböző sorokban mért rázkódások PSD görbéi a halmaz soraiban és padlón, különböző SZE-ok mellett a)–c) hosszirányban, d)–f) keresztirányban és g)–i) függőleges irányban (Böröcz és Molnár 2020)

Az 6.20. ábra a rezgésátviteli függvényeket mutatja be a függőleges irányban a halmaz egyes sorai szerint, különböző szabad elmozdulási lehetőségek mellett. A legmagasabb átvitelek a harmadik sorban történtek, értékei: 11,9 (21 Hz-nél), 7,2 (15 Hz-nél) és 11,8 (16 Hz-nél), a 0%, 10% és 20% SZE-ok mellett. Tisztán látható, hogy a rázkódás erősödése 0% FM mellett a felső sorokban a 8 – 50 Hz közötti frekvenciatartományban volt tapasztalható. Ha növeltük a szabad elmozdulás lehetőségét akkor ez a frekvenciatartomány szélesebbé vált. Külön fel kell hívni a figyelmet arra a jelenségre, hogy a halmazban középen elhelyezett csomag rázkódását a felette lévő csomag elfojtotta és ezek az adatok visszatükröződtek az elemzések során is. Ezt a jelenséget már korábban is megfigyeltük laboratóriumi körülmények között (Molnár és Böröcz 2020). Az 6.5. táblázat tartalmazza a teljes  $G_{rms}$  értékeket a változó szabad elmozdulási helyek és halmaz sorok függvényében, a vizsgált 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban. A függőleges irányban a teljes  $G_{rms}$  értékek 1,22 – 1,48-szor magasabbak voltak a halmazban, mint a padlón kalkulált. Ez 1,29 – 20,3-szor volt magasabb a hosszirányban, és 1,08 – 2,28-szor a keresztirányban.



6.20. ábra. A halmazolt rakományokban megfigyel rezgésátviteli függvények

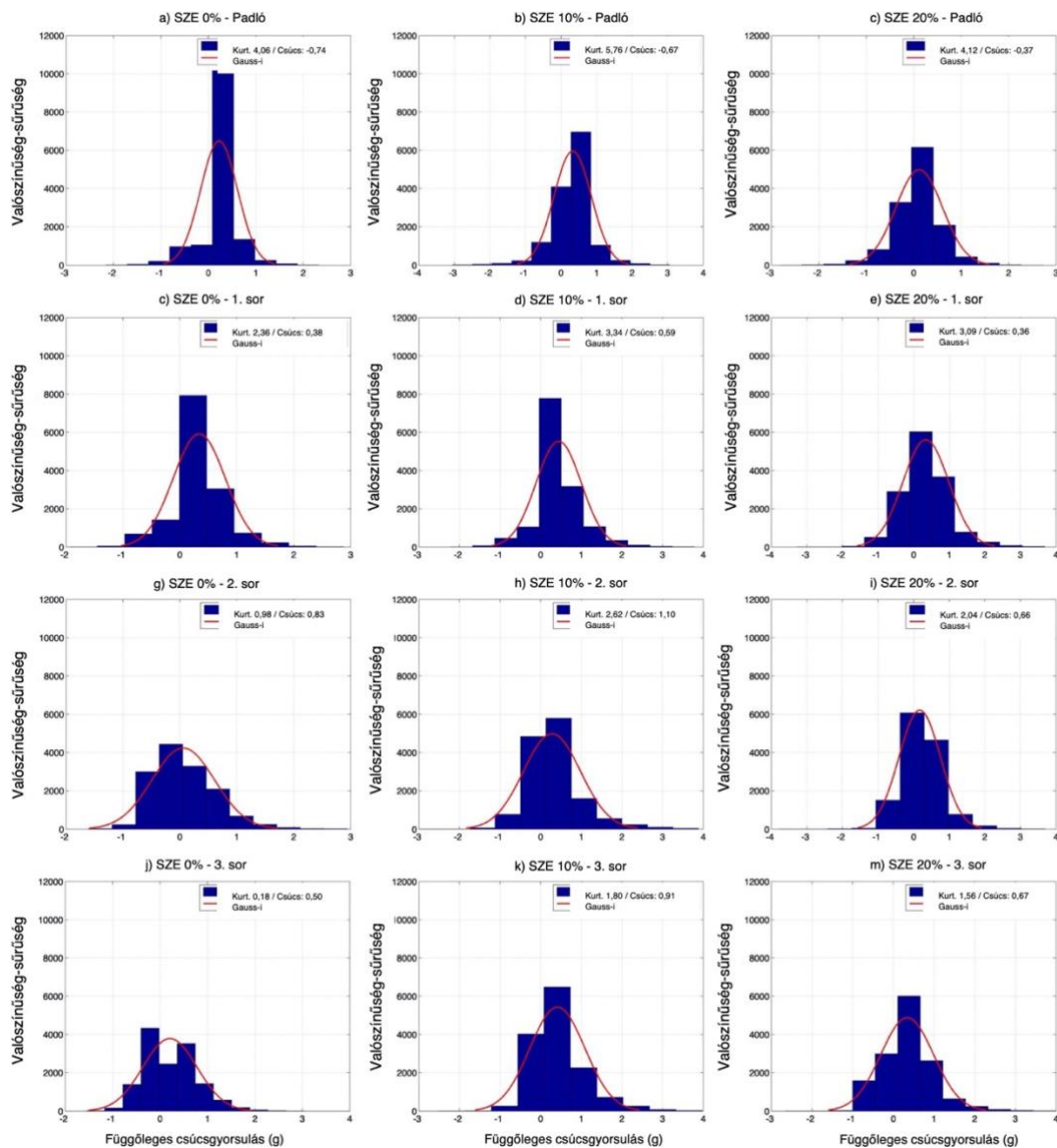
6.5. táblázat. A teljes  $G_{rms}$  értékek a halmazrakományban különböző SZE-ok mellett (1 – 200 Hz)

SZE	Pozíció	Kereszt	Hossz	Függőleges
0%	Padló	0,064	0,037	0,136
	1. sor	0,085	0,051	0,166
	2. sor	0,101	0,069	0,170
	3. sor	0,118	0,095	0,181
10%	Padló	0,063	0,044	0,146
	1. sor	0,068	0,057	0,193
	2. sor	0,079	0,067	0,216
	3. sor	0,098	0,070	0,217
20%	Padló	0,059	0,036	0,149
	1. sor	0,081	0,070	0,182
	2. sor	0,090	0,073	0,204
	3. sor	0,135	0,075	0,216

A mérések során gyűjtött függőleges irányú csúcsgyorsulás adatok valószínűség sűrűségfüggvényeit mutatja be az 6.21. ábra. Az 'F' függelék tartalmazza mindhárom irányban, sorban és SZE-sal felvett sűrűségfüggvények csúcossági (kurtózis) és ferdeségi értékeit. Ez azért is fontos, ahogy azt már korábban többször is említettem, mert laboratóriumi szimuláció esetén ezen értékek felhasználásával pontosabb és



valóságos körülményeket tudunk produkálni. Minden sűrűségfüggvény kapcsán elmondható, hogy azok kurtózisa pozitív (CI: 95%) volt, azaz különböztek a Gauss-i formától. A kurtózisok értékei 1,18 és 6,76 között voltak. Azonban meg kell jegyezni, hogy a kurtózis értéke ahogy egyre magasabb halmaz szintet vizsgálunk tendenciózusan közelített a nulla felé (azaz a Gauss-i normális eloszlás kurtózisa felé), amely azt jelenti, hogy a felsőbb sorokban lévő csomagok véletlenszerű rázkódása majdnem jól jellemezhető a normális eloszlással. A hosszirányban és keresztirányban rögzített csúcsgyorsulások sűrűségfüggvényeinek kurtózisa 8,08 és 19,83, illetőleg 5,97 és 15,86 között volt. A ferdeségi értékek minden esetben ugyancsak eltértek a nullától, azaz aszimmetrikus eloszlást mutattak.



6.21. ábra. A halmazolt rakományokban megfigyelt csúcsgyorsulások sűrűségfüggvényei a)-d) 0% SZE-nál, e)-h) 10% SZE-nál és i)-l) 20% SZE-nál

#### 6.4.1. A kutatás eredményeinek a korlátai

Ahogy az előző fejezetben, itt is az előzetesen bemutatott korlátok mellett külön észrevételeket kell tennem. Látható, hogy a halmazolt rakományok esetén jelentős a kereszt és hosszirányú rázkódások nagyságrendje. Ugyanakkor, ahogy az már első

fejezetben bemutatam, a laboratóriumi gyakorlatban alapvetően egyszabadságfokú rázóberendezéseket alkalmaznak, és a szabványok is erre vonatkozó körülményeket írnak elő. Mivel a halmaz rotációjának vizsgálatára még csak elvi lehetőség sincsen, ezért a kutatás adatai csak nagyon korlátozottan alkalmazhatók ilyen laboratóriumi körülmények között, leszámítva a függőleges irányú tapasztalatokat. Továbbá a futárszolgálatok a kistehergépjárművek mellett számos más fuvarozó járművet is alkalmaznak (mint például nehéz tehergépjárműveket a központi elosztó raktárak közötti szállításkor, amikor az áruk huzalhálós szétszedhető rakodólappal között kerülnek elhelyezésre). Ezért a bemutatott kistehergépjárműre vonatkozó adatok csak korlátozottan alkalmazhatók a futárszolgálatokban történő halmazolt szállítás teljes szimulációjához.

### **6.5. Új tudományos eredmények összefoglalása, gyakorlati implementálási lehetőségei, tézisek**

A legdinamikusabban növekvő szállítási ágazatban (kiscsomagos 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 autóiparban 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).

#### *6.5.1. 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 útviszonnal 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 kiscsomagok 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 tendenciózan 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.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönettel tartozom a győri Széchenyi István Egyetem Csomagolásvizsgáló Laboratórium kollektívájának azért, hogy az elmúlt évtizedben támogattak a kutatói munkám elvégzésében. A laboratórium munkatársai közül külön ki kell emelnem Pánczél Zoltán nyugalmazott laboralapító egyetemi docenst, aki már az első diplomamunkám során konzulensem volt, majd az egyetem elvégzése után marasztalt a laboratóriumban, később pedig szakmai mentorrá vált a kutatási eredmények állandó megvitatásával. Nagyszerű iránymutatásai és témaválasztási érzéke maradandó nyomot hagyott a kutatási eredményeimben.

Külön szeretnék köszönetet mondani azoknak a már végzett, vagy jelenlegi PhD hallgatóimnak, akik a kutatási témájuk megválasztásával értékes feladatokat oldottak meg, vagy jelenleg is oldanak meg velem közösen ezen a speciális kutatási területen.

Köszönetet kell mondanom Sher Paul Singh professzor emeritusnak a Michigan State University School of Packaging intézetéből, hogy az első kutatási lépéseimben és a kutatásaim nemzetköziesítésében kiemelkedő segítséget nyújtott.

A Széchenyi István Egyetemről köszönettel tartozom azon vezető kollégáknak az elmúlt 10 évből (rektorok, igazgatók, kancellárok, tanszékvezetők), akik hozzásegítettek a kutatási infrastruktúra létrejöttében és támogatták a laboratóriumi személyzeti politikát.

Külön szeretnék köszönetet mondani Friedler Ferenc professzor úrnak, hogy kellő motivációt biztosított az értekezés elkészítéséhez.

Végül köszönetet mondok családomnak és feleségemnek a kitartásukért!

### Hivatkozott saját publikációk

- Böröcz, P, Mojzes, Á. A csomagolás jelentősége a logisztikában. TRANSPACK Csomagolási és Anyagmozgatási Magazin 8: 2 pp. 28-32. , 5 p. (2008)
- Böröcz, P. (2016) 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.
- Böröcz, P. (2017). 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. (2018). 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. (2022). Decision on single-use and reusable food packaging: searching for the optimal solution using a fuzzy mathematical approach. Journal of the Science of Food and Agriculture., <https://doi.org/10.1002/jsfa.11745>
- Böröcz, P., Horvath, L., & Huang, Y. Y. (2022). Vertical Random Vibration Test Spectrum to Simulate Forklift Handling Environment. Journal of Testing and Evaluation, 50(2), 1236-1246.
- Böröcz, P., Singh, SP., Singh, J. (2015) "Evaluation of Distribution Environment in LTL Shipment between Central Europe and Africa." Journal of Applied Packaging Research, Vol. 7, No. 2, p. 2, <https://doi.org/10.14448/japr.04.0003>
- Böröcz P, Singh SP. (2016) 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
- Böröcz P, Singh SP. (2017) Measurement and Analysis of Vibration Levels in Rail Transport in Central Europe. Packaging Technology and Science, DOI: 10.1002/pts.222.
- Böröcz, P., Singh, SP. (2018). 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., Molnár, B. (2020) Measurement and Analysis of Vibration Levels in Stacked Small Package Shipments in Delivery Vans as a Function of Free Movement Space. Appl. Sci. , 10, 7821.
- Böröcz, P., Molnár, B. (2021) Experimental Comparison of Field and Accelerated Random Vertical Vibration Levels of Stacked Packages for Small Parcel Delivery Shipments. Appl. Sci., 11, 2927.
- 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>
- Csavajda P, Böröcz P. (2021) Dynamic vibration transmissibility of XPE and PE packaging cushioning material, Applied Sciences 11.2: 482.
- 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.
- Huang, Y. Y., Horvath, L., & Böröcz, P. (2021). Measurement and Analysis of Industrial Forklifts Vibration Levels for Unit Load Testing Purposes. Applied Sciences, 11(7), 2901.

- Masis, J., Horvath, L., & Böröcz, P. (2022). The Effect of Forklift Type, Pallet Design, Entry Speed, and Top Load on the Horizontal Shock Impacts Exerted during the Interactions between Pallet and Forklift. *Applied Sciences*, 12(14), 7035.
- Mojzes, Á; Böröcz, P. (2015) (Decision Support Model to Select Cushioning Material for Dynamics Hazards During Transportation, *ACTA TECHNICA JAURINENSIS* 8 : 2 pp. 188-200. , 13 p.
- Molnár, B., Böröcz, P. (2020). Performance and analysis of unitized stacked load units under vibration simulation. *FME Transactions*, 48(1), 96-101.
- Németh, Zs., Molnár, B., Pánczél, C., & Böröcz, P. (2021). Vibration levels of stacked parcel packages in laboratory test environment. Over-tested or under-tested?. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(3), 259-269.
- Pánczél Z, Böröcz P, Mojzes A. (2009) Logisztikai folyamatok kutatása - Csomagolási rendszer fejlesztése, a járművek által gerjesztett igénybevételének elemzése, *A Jövő Járműve: Járműipari Innováció: 3-4 pp. 25-29. 5 p.*
- Pidl, R, Böröcz, P. (2019) Discrete Fourier transform and cepstrum analysis of vibration events on semi-trailer truck. *FME Transactions* 47.1: 177-182.
- Tihanyi-Kovács, R., Böröcz, P., & Ásványi, B. (2023). The effect of transportation vibration on the microbiological status of bottled mineral water. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(3), 1059-1068. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11787>

### Irodalomjegyzék

- Association of American Railroads. Study of the Shock and Vibration Environment in Boxcars. Damage Prevention Research Report No. DP 7-92, November 1992.
- ASTM D4169-16, Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://doi.org/10.1520/D4169-16>
- ASTM D4728-17, Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D7386-12, Standard Practice for Performance Testing of Packages for Single Parcel Delivery Systems, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- ASTM Standard D4169-08. Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems. Annual Book of ASTM Standards, vol. 15.10. American Society of Testing and Materials: West Conshohocken, 2008.
- Brandenburg RK, J. J.-L. Lee. Fundamentals of Packaging Dynamics, LAB, Skaneateles, NY, 1991.
- Braunmiller U. Source Reduction by European Testing Schedules (SRETS) Final Report. Fraunhofer 1999, <http://www.cees.org/downloads/reports/SRETS%20Source%20Reduction%20by%20European%20Testing%20Schedules.pdf> [letöltés 2020.10.30]
- Butkunas, A. Power Spectral Density and Ride Evaluation. *Sound and Vibration* 1967.
- Charles D. Derivation of environment descriptions and test severities from measured road transportation data. *J. Inst. Environ. Sci.* 1993; 36(1): 37-42
- Chonhenchob V, Singh SP, Singh J, Sittipod S, Swasdee D, Pratheepthinthong S. Measurement and analysis of truck and rail vibration level in Thailand. *Packaging Technology and Science* 2010; 23(2), pp. 91-100. DOI: 10.1002/pts.881.

Chonhenchob V, Singh SP, Singh J, Stallings J, Grewal G. Measurement and analysis of vehicle vibration for delivering packages in small-sized and medium-sized trucks and automobiles. *Packaging Technology and Science* 2012; 25(1): 31–38. DOI: 10.1002/pts.955.

Chonhenchob V, Singh SP, Singh JJ et al. Measurement and analysis of vehicle vibration for delivering packages in small-sized and medium-sized trucks and automobiles. *Packaging Technology and Science* 2012; 25(1): 31–38.

Chonhenchob, V. Singh, SP, "Testing and Comparison of Various Packages for Mango Distribution," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 32, No. 1, 2004, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1520/JTE11888>. ISSN 0090-3973

Curtis AJ, Tinling NG, Abstein HT Jr. Selection and performance of vibration tests shock & vibration monograph 8. The Shock and Vibration Information Center, United States Department of Defence. 1971; Chapter 3.4. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD737830&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf> [letöltés 2020.11.02].

DEF STAN 00-335. Environmental Handbook for Defence Material, Part 3 Environmental Test Methods, Chapter 2-01 Annex A, UK Ministry of Defence, 2006

Dunno K, Ge C. Characterization of low-acceleration, long-duration horizontal events using a spring suspension straight delivery box truck. *Packag Technol Sci.* 2021;34(5):273-282. <https://doi.org/10.1002/pts.2557>

Dunno K, Ge C. Field assessment of horizontal accelerations using air ride suspension trailers. *Packag Technol Sci.* 2022; 35(5): 435-443. <https://doi.org/10.1002/pts.2641>

Dron, JP., Bolaers, F., and Rasolofondraibe, L. "Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a de-noising method by spectral subtraction: application to the detection of defects in ball bearings," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 270, No. 1-2, 2004, pp. 61–73., [https://doi.org/10.1016/S002-460X\(03\)00483-8](https://doi.org/10.1016/S002-460X(03)00483-8)

EUMOS 40509. Test method for load unit rigidity. Published online 2012.

European Commission. EU Transport in Figures. Statistical Pocketbook 2014., DOI: 10.2832/63317

EUROSTAT. European Statistical Database 2015. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ttr00003&plugin=1> [accessed 2020.10.30]

Eurostat. Packaging Waste Statistics 20178. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics) [letöltés 2020.11.01]

Fang K, and Wang Z.-W. The Statistical Characteristics of Maxima of Contact Force in Stacked Packaging Units under Random Vibration. *Packaging Technology and Science* 2018; 31, pp. 261-276, DOI: 10.1002/pts.2313

FMCSA. Cargo securement rules. <https://www.fmcsa.dot.gov/regulations/cargo-securement/cargo-securement-rules>

Garcia-Romeu-Martinez, MA., , Singh, SP. And 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*, Vol. 21, No. 8, 2008, pp. 439–451, <https://doi.org/10.1002/pts.798>

Garrott WR, Heitz M, Bean B. Experimental measurement of the stopping performance of a tractor-semitrailer from multiple speeds. Published 2012. <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-measurement-of-the-stopping-of-a-from-Garrott-Heitz/a4e5db40188d8f35b5f5c1de3ff38e8e29bb0403>

Gillespie TD. Heavy Truck Ride, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1985.



Goodwin, D.; Young, D.: Protective Packaging for Distribution, DEStech Publications, Inc., Lancaster, USA, 2011.

Greco A, Renzini A, Vaccari M, De Camargo FV. Testing methods and equipment for palletized products. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2019; 659:1-11, 012087. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012087>

Griffiths K, Hicks B, Keogh P, Shires D. Investigating the Suitability of Testing Standards for Simulating Vehicle Vibrations during supermarket Home Delivery, Proceedings of 17th IAPRI World Conference on Packaging, Scientific Research Publishing: 695–697, 2010

Guo, Y.; Zhang, J. Shock absorbing characteristics and vibration transmissibility of honeycomb paperboard. Shock Vib 2004, 11, 521-531. <https://doi.org/10.1155/2004/936804>

IBISWorld Inc., Global courier & delivery services market research report (Jan 2016), <http://www.ibisworld.com/industry/global/global-courier-delivery-services.html> [letöltés 2020.11.03]

ISO 13355:2016(en), Packaging — Complete, filled transport packages and unit loads — Vertical random vibration test

ISO 2244:2000. Packaging—complete, filled transport packages and unit loads—horizontal impact tests.

ISTA Procedure 3A. Packaged-Products for Parcel Delivery System Shipments 70 kg (150 lb) or Less (Standard, Small, Flat or Elongated). International Safe Transit Association: East Lansing, 2006

ISTA Procedure 3H. Performance Test for Products or Packaged-Products in Mechanically Handled Bulk Transport Containers. International Safe Transit Association: East Lansing, 2006.

ISTA Procedure 6-FEDEX-A/B. Testing Packaged Products Weighing up to 150 Lbs / Over 150 lbs. International Safe Transit Association: East Lansing, 2011

Juwet M, Esprit E, Vanden Berghe G. On horizontal dynamic effects on palletized goods during road transport: measurement of horizontal dynamic effects. Packag Technol Sci. 2018;31(5):310-330. <https://doi.org/10.1002/pts.2322>

Katz E, De Pater AD. Stability of lateral oscillations of a railway vehicle. Applied Scientific Research 1958, Section A, 7(6); pp. 393-407.

Kerr, M. Random vibration for package testing. IBM technical report TR 02.995, 1982

Kipp WI. Vibration Testing Equivalence: How Many Hours of Testing Equals How Many Miles of Transport? International Safe Transit Association: East Lansing, MI. Paper presented at ISTACON. 2000 updated December 2008; [http://www.ista.org/forms/Vibration\\_Testing\\_Equivalence-Kipp\\_2000.pdf](http://www.ista.org/forms/Vibration_Testing_Equivalence-Kipp_2000.pdf) [letöltés: 2020.11.02].

Kipp, B., "Environmental data recording, analysis and simulation of transport vibrations.". Packaging Technology and Science, Vol. 21, No. 8, 2008, pp. 437-438, <https://doi.org/10.1002/pts.842>

Lamoreaux, GH, Trujillo AA, Magnuson DF. Truck and rail shock and vibration environments during normal transport. Sandia National Laboratories Transportation Technical Center, Albuquerque, NM (USA), 1981. <https://www.osti.gov/servlets/purl/6065126> [letöltés 2020.10.30]

Lepine, J., Rouillard V., Sek M., Review on Road Vehicle Vibration Simulation for Packaging Testing Purposes, Packaging Technology and Science, 2015, DOI:10.1002/pts.2129, pp 672-682

- Lin CC, Sheu-Hua C. The hierarchical network design problem for time-definite express common carriers. *Transportation Research Part B: Methodological* 2004; 38(3): 271-283. DOI: 10.1016/S0191-2615(03)00013-4
- Lu, F., Ishikawa, Y., Shiina, T., and Satake, T., "Effect of vehicle speed on shock and vibration in truck transport." *Packaging Technology and Science*, Vol. 23, No. 2, 2006, pp. 479–489, <https://doi.org/10.1002/pts.841>
- Marcondes JA, S. P. Singh, and G. J. Burgess. *Dynamic Analysis of a Less Than Truckload Shipment*. ASME Winter Annual Meeting, paper 88-WA/EEP-17, Chicago, IL, 1988.
- MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests" (PDF). United States Department of Defense. *April 2014*.
- MIL-STD-810G, Environmental Engineering Consideration and Laboratory tests, Method 514.6. Annex C, *Transportation Tailoring Guidance for Vibration Exposure Definition*, US Department of Defense, 2008.
- Newland DE. *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*, 2nd edition, Longman, New York, 1984
- Nigam NC. *Introduction to Random Vibrations*. MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1983.
- Nolot J, Copinet A, Huart V, et al. Check analysis of horizontal, stresses in road transport. In: *27th IAPRI Symposium on Packaging*. 27th IAPRI Symposium on Packaging; 2015.
- Otari S, Odof S, Nolot JB, Vasseur P, Pellot J, Krajka N, Erre D. Statistical characterization of acceleration levels of random vibrations during transport. *Packaging Technology Science* 2011; 24(3). pp. 177–188. DOI: 10.1002/pts.926
- Pánczél Z. *Logisztikai szempontú csomagolás-tervezés az igénybevételek laboratóriumi szimulálásával*. Doktori értekezés, Győr, MMTDI, 2008
- Paul Singh, S. and Gorzynski, M., "Effect of Vibration as a Cause of Leakage in Aluminum Beer Cans in Palletized Loads," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 26, No. 4, 1998, pp. 389-392, <https://doi.org/10.1520/JTE12018J>. ISSN 0090-3973
- Pidl, R. *Nyergesszerelvények rakfelületének dinamikai elemzése csomagolás optimalizálási célból*, PhD doktori értekezés, Győr, MMTDI, 2019b
- Richards, D. P. (1990). Review of analysis and assessment methodologies for road transportation vibration and shock data. *Environmental Engineering*, 3, 23-6.
- Rouillard V, Richmond R. A novel approach to analysing and simulating railcar shock and vibrations. *Packaging Technology and Science* 2007; 20(1), pp. 17-26. DOI: 10.1002/pts.739
- 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. Simulation of non-stationary vehicle vibrations. *Proc. Inst. Mech. Eng. [H]* 2001; 215(10): 1069–1075.
- 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. Generating road vibration test schedules from pavement profiles for packaging optimization. *Packaging Technology and Science* 2008; 21(8): 501–514.
- 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.

- Shires D. On the time compression (test acceleration) of broadband random vibration tests. *Packaging Technology and Science* 2011; 24(2), pp. 75-87. DOI: 10.1002/pts.915
- 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.
- Singh SP, Antle J, Singh J, Topper E, Grewal G. Load Securement and Packaging Methods to Reduce Risk of Damage and Personal Injury for Cargo Freight in Truck, Container and Intermodal Shipments. *Journal of Applied Packaging Research* 2014, 6(1), DOI: 10.14448/japr.01.0005
- Singh SP, Burgess G, Rojuckarin P. Test Protocol for Simulating Truck and Rail Vibration and Rail Impacts in Shipments of Automotive Engine Racks. *Packaging Technology and Science* 1995, 8(1), pp. 33-41, DOI: 10.1002/pts.2770080107
- Singh SP, J. R. Antle, and G. J. Burgess,. Comparison Between Lateral, Longitudinal, and Vertical Vibration Levels in Commercial Truck Shipments. *Packag. Technol. Sci.* 5, 71– 75 (1992).
- 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): pp. 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
- Singh SP, Singh J, Joneson E. Measurement and Analysis of Global Truck, Rail and Parcel Shipments. 15th International IAPRI World Conference on Packaging, International Association of Packaging Research Institutes, Tokyo, Japan, 2006.
- Singh SP, Singh J, Saha K. Measurement and Analysis of Physical and Climatic Distribution Environment for Air Package Shipment. *Packaging Technology and Science* 2015; 28(8): 719-731. DOI: 10.1002/pts.2136
- Singh, S. P., Burgess, G. J., Marcondes, J. A., Antle, J. R. Measuring the package shipping environment in refrigerated ocean vessels. *Packaging Technology and Science* 1993, 6(4), pp. 175-181. <https://doi.org/10.1002/pts.2770060402>
- Singh, SP, Jarimopas, B., and Saengnil, W., "Measurement and Analysis of Vibration Levels in Commercial Truck Shipments in Thailand and Its Impact on Packaged Produce," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 34, No. 2, 2006, pp. 1-7.
- Singh, SP. and Marcondes, J., "Vibration Levels in Commercial Truck Shipments as a Function of Suspension and Payload," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 20, No. 6, 1992, pp. 466-469, <https://doi.org/10.1520/JTE11941J>. ISSN 0090-3973
- Singh, SP., Saha, K., Singh, J., Sandhu, A. P. S. 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), pp. 149-160. <https://doi.org/10.1002/pts.968>
- Smithers and Pira Lab. The Future of Global Packaging to 2024. <https://www.smithers.com/en-gb/services/market-reports/packaging/future-of-global-packaging-to-2024> [letöltés 2020.11.01]
- Stallings J, Singh J, Singh SP. Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Parcel Delivery Vehicles in Single Parcel Shipments. *Journal of Applied Packaging Research* 2010; 4(2): 75–82.
- Steinwolf, A, ConnonWH. Limitations of the Fourier transform for describing test course profiles. *Sound and Vibration* 2005; February: 12–17.

U.S. Department of Defense, Military Standardization Handbook, Package Cushioning Design, MIL-HDBK-304B, 1978

Van Baren P. The missing knob on your random vibration controller. *Sound and Vibration* 2005; 39(10): 10.

Wang, Z. -W., and Fang K. Dynamic Performance of Stacked Packaging Units. *Packaging Technology and Science* 2016; 29, pp. 491–511, DOI: 10.1002/pts.2232

Yam, KL., “Encyclopedia of Packaging Technology”, John Wiley & Sons Inc.: Hoboken, New Jersey, USA, 2009.

Young DE. Focused Simulation. Paper presented at ISTACON. International Safe Transit Association: East Lansing, MI, 1993

Zhou, H., & Wang, Z. W. (2018). A new approach for road-vehicle vibration simulation. *Packaging Technology and Science*, 31(5), 246-260.

Zhou, R., Yan, L., Li, B., and 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*, Vol. 28, No. 11, 2015, pp. 949–957, <https://doi.org/10.1002/pts.2176>

**'A' függelék.** Különböző útviszonyok és menetsebesség mellett mért csúcsgyorsulások átlagai

Sebesség	Útpálya	Függőleges irány (g)		Keresztirány (g)		Hosszirány (g)	
		<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>	<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>	<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>
40 km/h	Elsőrendű út	0,197	0,203	0,086	0,112	0,094	0,153
	Másdorendű út	0,250	0,301	0,132	0,148	0,107	0,193
	Harmadrendű út	0,273	0,295	0,138	0,156	0,106	0,284
60 km/h	Autópálya	0,247	0,250	0,113	0,134	0,090	0,196
	Elsőrendű út	0,239	0,267	0,126	0,142	0,092	0,215
	Másdorendű út	0,303	0,331	0,131	0,155	0,101	0,318
	Harmadrendű út	0,381	0,552	0,178	0,267	0,127	0,623
80 km/h	Autópálya	0,277	0,288	0,126	0,142	0,124	0,202
	Elsőrendű út	0,290	0,316	0,138	0,149	0,127	0,208
	Másdorendű út	0,388	0,440	0,182	0,204	0,141	0,442
	Harmadrendű út	0,616	0,787	0,333	0,392	0,187	0,741

**'B' függelék.** A vasúti útkereszteződésben és fekvőrendőrön való áthaladáskor mért csúcsgyorsulás értékek

Környezet	Sebesség	Függőleges irány (peak, g)		Keresztirány (peak, g)		Hosszirány (peak, g)	
		<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>	<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>	<i>Padló</i>	<i>Felső állvány</i>
Fekvőrendőr	5 km/h	0,77	1,47	0,54	0,56	0,29	0,92
	10 km/h	1,51	1,83	0,52	0,59	0,46	1,30
	15 km/h	1,61	1,99	0,63	0,76	0,74	2,52
Vasúti kereszteződés	20 km/h	0,54	0,84	0,34	0,53	0,17	0,73
	40 km/h	0,79	1,24	0,65	0,92	0,31	1,48

**'C' függelék.** A fekvőrendőrön való áthaladáskor mért függőleges rázkódások  $G_{rms}$  értékei az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban

Irány	Sebesség	<i>1<sup>st</sup> másodperc</i>		<i>2<sup>nd</sup> másodperc</i>		<i>3<sup>rd</sup> másodperc</i>		<i>4<sup>th</sup> másodperc</i>		<i>Teljes</i>	
		Padló	Állv.	Padló	Állv.	Padló	Állv.	Padló	Állv.	Padló	Állv.
Függőleges	5 km/h	0,146	0,239	0,219	0,342	0,210	0,334	0,133	0,153	0,185	0,308
	10 km/h	0,084	0,096	0,356	0,407	0,149	0,305	0,109	0,149	0,201	0,322
	15 km/h	0,068	0,113	0,354	0,530	0,170	0,401	0,137	0,170	0,213	0,389
Kereszt	5 km/h	0,043	0,106	0,066	0,092	0,082	0,144	0,044	0,086	0,058	0,116
	10 km/h	0,030	0,039	0,091	0,130	0,155	0,175	0,052	0,055	0,075	0,124
	15 km/h	0,031	0,040	0,126	0,155	0,132	0,158	0,062	0,063	0,103	0,136
Hossz	5 km/h	0,061	0,108	0,079	0,160	0,053	0,239	0,027	0,110	0,060	0,205
	10 km/h	0,067	0,073	0,120	0,249	0,072	0,147	0,030	0,137	0,079	0,232
	15 km/h	0,035	0,101	0,111	0,348	0,085	0,143	0,040	0,170	0,107	0,320

**'D' függelék.** A vasúti kereszteződésen való áthaladáskor mért függőleges rázkódások  $G_{rms}$  értékei az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban

Irány	Sebesség	<i>1<sup>st</sup> másodperc</i>		<i>2<sup>nd</sup> másodperc</i>		<i>3<sup>rd</sup> másodperc</i>		<i>4<sup>th</sup> másodperc</i>		<i>5<sup>th</sup> másodperc</i>		<i>Teljes</i>	
		Padló	Állv.	Padló	Állv.	Padló.	Padló	Padló.	Padló	Állv.	Padló	Állv.	Padló
Függőleges	20 km/h	0,068	0,091	0,118	0,168	0,178	0,249	0,135	0,184	0,068	0,086	0,121	0,201
	40 km/h	0,099	0,113	0,161	0,252	0,277	0,360	0,242	0,296	0,110	0,153	0,232	0,306
Kereszt	20 km/h	0,025	0,065	0,072	0,120	0,092	0,181	0,073	0,105	0,041	0,101	0,025	0,139
	40 km/h	0,057	0,088	0,052	0,121	0,129	0,215	0,143	0,142	0,051	0,091	0,115	0,157
Hossz	20 km/h	0,028	0,073	0,039	0,122	0,249	0,250	0,184	0,170	0,019	0,090	0,035	0,172
	40 km/h	0,032	0,119	0,036	0,152	0,222	0,286	0,192	0,194	0,032	0,110	0,063	0,209

'E' függelék. Futácsolgálatok kistehergépjárművén mért halmazolt kiscsomagjaiban mért csúcsyorsulások maximális értékeit és előfordulásainak valószínűsége

Csúcs- yorsulás (g)	FM	Pozíció	Max.	99%-os előfordulás	95%-os előfordulás	90%-os előfordulás	50%-os előfordulás
Kereszt- irány	0%	Padló	1,24	0,68	0,46	0,36	0,18
		1. sor	1,41	0,79	0,56	0,45	0,24
		2. sor	2,40	0,80	0,58	0,48	0,26
		3. sor	4,16	1,24	0,75	0,59	0,26
	10 %	Padló	1,58	0,68	0,45	0,38	0,17
		1. sor	2,15	0,74	0,51	0,41	0,22
		2. sor	2,35	1,09	0,63	0,46	0,15
		3. sor	4,93	2,50	1,39	0,98	0,33
	20 %	Padló	1,33	0,65	0,41	0,32	0,16
		1. sor	1,91	0,86	0,54	0,41	0,19
		2. sor	2,81	0,84	0,55	0,43	0,24
		3. sor	5,94	2,19	1,34	1,02	0,45
Hosszi- irány	0%	Padló	0,96	0,38	0,27	0,22	0,11
		1. sor	1,81	0,41	0,32	0,28	0,15
		2. sor	1,94	0,72	0,49	0,39	0,16
		3. sor	3,74	1,07	0,66	0,50	0,26
	10 %	Padló	1,11	0,55	0,35	0,27	0,13
		1. sor	1,72	0,59	0,38	0,31	0,19
		2. sor	1,82	0,61	0,43	0,35	0,16
		3. sor	2,38	0,71	0,43	0,36	0,20
	20 %	Padló	1,56	0,37	0,26	0,21	0,11
		1. sor	2,08	0,67	0,43	0,34	0,17
		2. sor	3,02	0,94	0,57	0,41	0,18
		3. sor	3,42	1,05	0,65	0,49	0,20
Függőle- s irány	0%	Padló	2,33	1,40	0,87	0,67	0,31
		1. sor	2,88	1,67	1,26	0,82	0,38
		2. sor	2,94	1,69	1,29	0,87	0,39
		3. sor	3,04	1,72	1,41	0,96	0,39
	10 %	Padló	3,06	2,05	1,26	0,94	0,37
		1. sor	3,79	2,18	1,46	1,14	0,41
		2. sor	3,88	2,62	1,64	1,14	0,42
		3. sor	3,98	2,82	1,66	1,24	0,45
	20 %	Padló	2,82	1,52	1,01	0,77	0,32
		1. sor	3,69	2,06	1,24	0,91	0,36
		2. sor	3,78	2,30	1,42	1,09	0,47
		3. sor	3,99	2,36	1,43	1,10	0,48



**‘F’ függelék.** Csúcsgyorsulás értékek eloszlásainak statisztikai mutatói kereszt-, hossz-, és függőleges irányban a futácsolgálatok kistehergépjárművén mért halmazolt kicsomagok során

Csúcsgyorsulás adatok (g)	FM	Pozíció	Ferdesség	
			Kurtózis	
Keresztirány	0%	Padló	8,08	2,54
		1. sor	17,23	2,27
		2. sor	8,77	2,54
		3. sor	19,83	3,29
	10%	Padló	9,19	2,89
		1. sor	9,28	2,15
		2. sor	12,40	2,73
		3. sor	16,86	3,16
	20%	Padló	12,12	3,57
		1. sor	12,43	2,65
		2. sor	19,71	3,87
		3. sor	14,85	3,04
Hosszirány	0%	Padló	8,51	2,46
		1. sor	5,97	1,99
		2. sor	9,64	2,26
		3. sor	14,48	3,35
	10%	Padló	8,22	2,71
		1. sor	9,41	2,47
		2. sor	11,7	3,17
		3. sor	9,28	2,87
	20%	Padló	8,23	2,75
		1. sor	12,41	3,01
		2. sor	15,86	3,43
		3. sor	11,73	2,72
Függőleges irány	0%	Padló	5,06	-0,74
		1. sor	2,36	0,38
		2. sor	1,98	0,83
		3. sor	1,18	0,50
	10%	Padló	6,76	-0,67
		1. sor	3,34	0,59
		2. sor	2,62	1,10
		3. sor	1,80	0,91
	20%	Padló	5,12	-0,37
		1. sor	3,49	0,36
		2. sor	3,04	0,66
		3. sor	1,56	0,67