

**Molnár Bence**

**Rázkódási és ütési igénybevételek felmérése és  
elemzése egymásra halmazolt csomagolási  
rendszerek esetében**

**Doktori értekezés**

**Témavezetők:**

**Dr. habil. Böröcz Péter, Széchenyi István Egyetem**

**Dr. habil. Koltai László, Óbudai Egyetem**

**Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése  
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

**2023**

**Széchenyi István Egyetem**

# Tartalomjegyzék

<b>1. BEVEZETÉS.....</b>	<b>4</b>
1.1. A KUTATÁSI TÉMA BEMUTATÁSA.....	4
1.2. A KUTATÁS MOTIVÁCIÓJA.....	5
1.3. A KUTATÁS MÓDSZERTANA.....	6
1.4. A DOKTORI ÉRTEKEZÉS FELÉPÍTÉSE.....	7
<b>2. CSOMAGOLÁSTERVEZÉS ÉS TERMÉKVÉDELEM A LOGISZTIKÁBAN .....</b>	<b>9</b>
2.1. A CSOMAGOLÁS FOGALMA ÉS FUNKCIÓI .....	9
2.2. A VÉDELMI SZEMPONTÚ CSOMAGOLÁSTERVEZÉS FOLYAMATA .....	18
2.3. A VÉDELMET MEGHATÁROZÓ ÜTÉSI ÉS RÁZKÓDÁSI IGÉNYBEVÉTELEK.....	22
2.3.1. <i>Ütés jellegű igénybevételek.....</i>	<i>22</i>
2.3.2. <i>Rázkódások.....</i>	<i>27</i>
2.3.3. <i>Statikus és dinamikus halmazterhelés.....</i>	<i>34</i>
<b>3. SZAKIRODALMI HÁTTÉR ÉS A JELENLEGI LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK .....</b>	<b>36</b>
3.1. KORÁBBI KUTATÁSOK EREDMÉNYEI.....	36
3.2. RÁZKÓDÁSOK ÉS ÜTÉSEK LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATAI.....	41
<b>4. FÉLMEREV MŰANYAG FALÚ, HALMAZOLT HORDÓK CSILLAPÍTÁSI TULAJDONSÁGAINAK MÉRÉSE ÉS ELEMZÉSE ÜTÉSI IGÉNYBEVÉTEL ESETÉN .....</b>	<b>45</b>
4.1. A LABORATÓRIUMI MÉRÉS SORÁN ALKALMAZOTT MINTÁK ÉS ESZKÖZÖK.....	45
4.2. A MÉRÉS FOLYAMATÁNAK BEMUTATÁSA .....	46
4.3. A MÉRT GYORSULÁS ÉRTÉKEK BEMUTATÁSA ÉS ELEMZÉSE .....	48
4.4. MEGÁLLAPÍTÁSOK AZ EREDMÉNYEK ALAPJÁN .....	54
<b>5. EGYSÉGRAKOMÁNYBA HALMAZOLT HULLÁMPAPÍRLEMEZ DOBOZOK MOZGÁSÁNAK MEGFIGYELÉSE, LABORATÓRIUMI RÁZÁSSZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL.....</b>	<b>56</b>
5.1. A LABORATÓRIUMI MÉRÉS KÖRÜLMÉNYEI .....	56
5.2. A MÉRÉS EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA ÉS ELEMZÉSE .....	60
5.2.1. <i>Eredmények szinuszos pásztázás esetén .....</i>	<i>60</i>
5.2.2. <i>Mérési eredmények véletlenszerű gerjesztés esetén.....</i>	<i>61</i>
5.3. A MÉRÉS EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA.....	68
<b>6. RÁZKÓDÁSI SZINTEK FELMÉRÉSE ÉS ELEMZÉSE HALMAZOLT, KISMÉRETŰ CSOMAGKÜLDEMÉNYEK ESETÉN A SZABAD ELMOZDULÁS FÜGGVÉNYÉBEN .....</b>	<b>69</b>
6.1. A MÉRÉS KÖRÜLMÉNYEINEK ISMERTETÉSE .....	70
6.1.1. <i>A méréshez használt eszközök.....</i>	<i>70</i>
6.1.2. <i>A mérés lebonyolításának körülményei.....</i>	<i>71</i>



6.2. A MÉRÉSI ADATOKBÓL SZÁRMAZÓ ADATOK ELEMZÉSE .....	73
6.2.1. A mért gyorsulás adatok elemzése.....	73
6.2.2. Az egymásra halmazolt csomagolások rezgésszintjei a szabad elmozdulásuk függvényében.....	77
6.2.3. A gyorsulás adatok statisztikai jellemzői.....	80
6.2.4. A kutatás korlátozó tényezői.....	81
6.3. A KUTATÁSBAN ISMERTETETT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA .....	82
<b>7. EGYMÁSRA HELYEZETT KISMÉRETŰ CSOMAGOK RÁZKÓDÁSI SZINTJEINEK FELMÉRÉSE ÉS ELEMZÉSE TEREPI ÉS LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK ÖSSZEHASONLÍTÁSÁNAK SEGÍTSÉGÉVEL .....</b>	<b>83</b>
7.1. A MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK ISMERTETÉSE .....	83
7.1.1. A méréshez használt minták és mérőberendezések .....	83
7.1.2. A mérőrendszer felépítése.....	84
7.1.3. Szállítási útvonalak és rázóvizsgálati profil .....	85
7.2. A MÉRÉSI ADATOK ELEMZÉSÉHEZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK .....	87
7.2.1. Statisztikai módszerek a gyorsulási csúcsertékek és az RMS (g) meghatározására.....	87
7.2.2. A PSD görbék adatelemzési módszerei a teljes frekvenciatartományban.....	88
7.2.3. A PSD elemzés módszerei frekvenciatartományonként .....	88
7.3. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE .....	89
7.3.1. A gyorsulási csúcsertékek és az RMS (g) elemzésének eredményei .....	89
7.3.2. Empirikus kumulatív eloszlásfüggvények a gyorsulás csúcsok (g) és az RMS (g) adatokhoz .....	91
7.3.3. PSD-k elemzése a teljes frekvenciatartományban, útkategóriák szerint.....	94
7.3.4. PSD-k elemzése az egyes frekvenciatartományokban.....	98
7.3.5. A gyorsulási csúcsok és az RMS(g) statisztikai jellemzői .....	103
7.3.6. A kutatás gyakorlati korlátozó tényezői.....	105
7.4. A KUTATÁS ÖSSZEFOGLALÁSA ÉS FŐBB MEGÁLLAPÍTÁSAI .....	105
<b>8. AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI .....</b>	<b>108</b>
<b>9. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK.....</b>	<b>110</b>
<b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>111</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>112</b>
<b>FÜGGELÉK .....</b>	<b>113</b>
<b>ÁBRAJEGYZÉK.....</b>	<b>117</b>
<b>TÁBLÁZATJEGYZÉK .....</b>	<b>121</b>
<b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>122</b>

# 1. Bevezetés

## 1.1. A kutatási téma bemutatása

A kutatásom alapvető célja, hogy a termelő vállalatoknak és termékeik csomagolását tervező szakembereknek többletinformációkat szolgáltatson az ellátási láncokban felmerülő, a termékeket károsító igénybevételek jellemzőiről, amelyek pontosabb ismerete lehetővé teszi az optimális termék-csomagolási rendszer tervezését és laboratóriumi vizsgálatát. A megfelelő egyensúly megtalálása csomagolás alapvető funkciói között, mint a termékvédelem, marketing, környezetvédelem és költséghatékonyság legtöbb esetben kompromisszumos döntés elé állítja a vállalati döntéshozókat. Az ellátási láncban felmerülő és várható igénybevételek jellemzőinek pontosabb megismerése, lehetőséget biztosít arra, hogy a laboratóriumi csomagolásvizsgálatok paramétereinek az igénybevételekhez való igazítása, a lehető legjobban reprezentálja a valós igénybevételeket. Ezzel hozzásegítve a csomagolástervező szakembereket az optimális termék-csomagolási rendszer kialakításához, valamint elkerülhetővé teszi a csomagolások laboratóriumi alul-, vagy túlvizsgálatát. Az értekezésem célja ezért továbbá, hogy a kutatásomban felmért és elemzett környezeti hatások, fókuszálva a halmazolt rakományokat érő rázkódások és ütések tulajdonságainak pontosabb megismerésével, a csomagolásokat vizsgáló szakemberek a valóságot az eddigiéknél pontosabban reprezentáló laboratóriumi vizsgálati programokat alakíthassanak ki a megtervezett, bevezetni kívánt csomagolások számára. Az optimális termékvédelmi képességekkel megtervezett csomagolási rendszerrel elkerülhetőek az alul- és túlcsomagolásból fakadó negatív externáliák, biztosítva egy környezetbarátabb és költséghatékonyabb csomagolási rendszer használatát.

A téma aktualitását és fontosságát a globalizáció és az e-kereskedelem hatására átalakuló egyre hosszabb és komplexebb ellátási láncokon áthaladó termékek volumenének folyamatos növekedése adja. Az ellátási láncok megnövekedett hossza és komplexitása egyre nagyobb kihívásokkal állítja szembe a csomagolásokat tervező szakembereket, ugyanis ezekben az ellátási láncokban a csomagolt termékeket sokszor földrészeken átvitelően, számos szállító és anyagmozgató járművet alkalmazva, a csomagolt termékek többszöri átrakása mellett továbbítják a célállomásuk felé. Ezek a körülmények, mind különböző hatású és mértékű környezeti igénybevételeknek teszik ki a csomagolt termékeket, úgy, mint a különböző klimatikus igénybevételek, halmazterhelés vagy a rázkódások és ütések. Az igénybevételekkel szembeni optimális csomagolás megtervezéséhez általában az alábbi három körülményt kell megvizsgálni:

- szállítási lánc és várható igénybevételek tulajdonságai, mint például földrajzi távolság és időjárás, szállítási idő, átrakodások száma és módja, alkalmazott szállítójárművek és anyagmozgatóeszközök és az ezekből származó rázkódási és ütési paraméterek
- termék tulajdonságai, mint például az érzékenységi jellemzők (G érték), sajátfrekvencia, elfogadható terméksérülés mértéke, tárolási hőmérséklet,
- alkalmazható csomagolóanyagok és csomagolóeszközök tulajdonságai, például a párnázóanyagok csillapítási karakterisztikái, a külső tárolóedényzet tartós teherviseléssel szembeni ellenállóképessége, vagy a hőszigetelési képesség.

A csomagolástervezés egyik végső lépése a megtervezett csomagolások védelmi képességeinek laboratóriumi vizsgálata, amely során a csomagolt tervező szakemberek megbizonyosodhatnak arról, hogy a kialakított termék csomagolási rendszer képes megvédeni a terméket a várható szállítási láncban. A laboratóriumi csomagolásvizsgálatok során, idealizált környezetben szimulálhatóak egy adott szállítási lánc igénybevételei. Ahhoz, hogy a laboratóriumi vizsgálatok eredményei megfelelően reprezentálják a várható igénybevételeket és ne eredményezzenek fals pozitív vagy fals negatív eredményt, a várható igénybevételek lehető legpontosabb felmérésére és elemzésére, majd implementálására van szükség.

A doktori disszertációm céljának tűztem ki a szállítási láncokban felmerülő ütési és rázkódási igénybevételek felmérését és elemzését, valamint ezen hatások halmazolt csomagolásokra gyakorolt hatásának a vizsgálatát. A kutatásom további célja, hogy a felmért és elemzett adatok segítségével a halmazolt csomagolások ütés és rázóvizsgálatai az adott szállítási láncban felmerülő igénybevételeket a valóságot a lehető legjobban megközelítve szimulálják.

## **1.2. A kutatás motivációja**

Az elmúlt 10 évben a Széchenyi Egyetem Audi Hungária Járműmérnöki Kar Csomagolás és Környezetállósági Vizsgálólaboratóriumának a munkatársaként számos csomagolási rendszer vizsgálatában vettem részt. A csomagolások laboratóriumi ütés és rázóvizsgálatinak paraméterei általában valamilyen iparági csomagolásvizsgálati szabvány írja elő, azonban a szabványos rázóvizsgálatok rázóprofiljai olyan szállítójárművek és útvonalak felméréséből származó adatokon alapulnak, amelyek tulajdonságai jelentősen eltérőek az Európában használt szállítójárművek és útviszonyok tulajdonságaitól. A rázkódások felmérésével foglalkozó korábbi kutatások fókuszosa a legtöbb esetben a szállítójárművek rakfelületén keletkező rázkódásokra és ütésekre irányult, azonban az egymásra halmazolt csomagolások esetében az egyes csomagolási szintek bizonyos frekvenciatartományokban erősíthetik vagy

csillapíthatják a felsőbb szintekre ható rázkódások intenzitását. Amennyiben a laboratóriumi vizsgálatok során, a csomagolást tervező mérnökök bizonyosan megfelelő információhoz kívánnak jutni egy halmazolt csomagolási rendszer védelmi képességeit illetően, az a rázóasztalok rakfelületet szimuláló rázómozgásának köszönhetően csak a teljes, eredeti termékkel töltött halmazolt csomagolási rendszer vizsgálatával lehetséges. A gyakorlatban ez sokszor kivitelezhetetlen feladat, mind infrastrukturális, mind gazdasági szempontból. Infrastrukturális szempontból a vizsgálat akadályát legtöbbször a rázóasztalok terhelhetősége, valamint a rázóasztalok felett kialakított hely szűkösége adja. Gazdasági szempontból a teljes halmazban történő vizsgálat akadályát legtöbbször az, hogy nem áll rendelkezésre elég minta termékből vagy a csomagolásból, azok prototípusának költségessége miatt, illetve, ha a csomagolási rendszer nem megfelelően védi a terméket és vizsgálat során a termék megsérül, akkor az jelentős költséget jelent a termék gyártójának. Ez alapján a disszertációban arra keresem a választ, hogy egyes halmazban szállított csomagolási egységekben milyen rázkódási jelenségek keletkeznek ütés, valamint rázóerjesztés hatására, amely információkkal lehetőség nyílhat halmazolt csomagolási rendszer szintenként történő rázóvizsgálatára, elkerülve a fentebb említett gazdasági és infrastrukturális korlátozó tényezőket. Ennek a kérdésnek a megválaszolására laboratóriumi ütés és rázószimulációkat végeztem, valamint terepi méréssel vizsgálatam és elemeztem egy szállítójármű által gerjesztett rázkódásokat halmazolt csomagok esetében.

### **1.3. A kutatás módszertana**

A doktori kutatásom során, a halmazolt csomagolások rázkódási tulajdonságainak vizsgálatához induktív és empirikus kutatási és bizonyítási módszereket alkalmaztam. Az empirikus eredmények terepi mérések és laboratóriumi körülmények között végrehajtott mérésekből kaptam. A méréseket a Széchenyi István Egyetem a már korábban említett laboratórium mérőeszközeinek segítségével hajtottam végre. A mérési eljárások kidolgozásához és kivitelezéséhez a laboratóriumban töltött 10 éves mérés technikai tapasztalataimra támaszkodtam.

A laboratóriumi és terepi mérések összesített adatai alapján, matematikai statisztikai módszerek alkalmazásával induktív következtetéseket dolgoztam ki a halmazolt csomagolások szintjein felmerülő rázkódási igénybevételek tulajdonságairól.

Elsőként halmazolt műanyag hordók vizsgálatait végeztem el különböző paraméterű ütési igénybevételek esetén. A mérés során nyert válaszgyorsulás adatok csúcsgyorsulás és idő adatait összehasonlítással elemeztem.

A kutatásom következő részében egy hullámpapírlemezdobozból képzett egységtrakomány szintjen jelentkező rezgés gyorsulás adatokat mértem szinuszos és véletlenszerű gerjesztés segítségével. A laboratóriumi mérés során a gyorsulást pántolt és nyújtható fóliával rögzített rakományon is vizsgáltam. A mintarakomány egyes szintjein mért gyorsulás adatokat matematikai – statisztikai és összehasonlító elemzéssel értékeltem ki.

A kutatásom utolsó részében terepi és laboratóriumi méréseket végeztem. A terepi mérés során egy expressz csomagküldő szolgáltatások során alkalmazott szállítójárműben felépített, halmazolt csomagolási egységek rázkódásintenzitását vizsgáltam. A terepi méréseket követően, a terepi mérések során összeállított mérési rendszeren mértem a halmazolt csomagok rázkódásintenzitását a laboratóriumban, szabványos rázóvizsgálati eljárással. A mérés során számos mérési paraméter megváltoztatásával olyan átfogó statisztikai és összehasonlító elemzésre törekedtem, amely segítségével a hasonló szállítási környezetben szállított küldeménydarabok laboratóriumi szimulációja elvégezhető.

#### **1.4. A doktori értekezés felépítése**

A doktori disszertációm bevezetésében bemutatom a kutatási témám és megindokolom a kutatási téma időszerűségét és fontosságát. A bevezetésben ismertetem a kutatásom motivációját, valamint ismertetem a doktori kutatásom módszertanát és felépítést. A második fejezetben ismertetem a csomagolás funkcióit, valamint a csomagolás jelentőségét a hagyományos és e-kereskedelmi ellátási láncokban, továbbá ismertetem vegy a védelmi szempontú csomagolástervezési módszert. A fejezet végén bemutatom a disszertációm szempontjából lényeges, az ellátási láncban felmerülő környezeti igénybevételek alapvető tulajdonságait, hiszen a csomagolás elsődleges feladata ezen igénybevételek elleni termékvédelem. A harmadik fejezetben a kutatásom alapjául szolgáló, az ellátási láncokban felmerülő igénybevételek mérésével és elemzésével foglalkozó szakirodalmi háttérrel, valamint az ipari gyakorlatban alkalmazott csomagolásvizsgálati eljárásokat ismertetem. A negyedik fejezetben halmazolt műanyag hordók válaszgyorsulás csúcserőértékeinek és bekövetkezési idejének adatait vizsgálom és elemzem, különböző ütési igénybevételek esetén. Az ötödik fejezetben egy egységtrakomány szintjen tapasztalható rezgés gyorsulásokat mérem és elemzem a rakományrögzítés típusa és a gerjesztési mód függvényében. A hatodik fejezetben egy

kistehergépjárműbe felépített, halmazolt kisméretű csomagokból álló mérési rendszerből származó gyorsulásadatait elemzem a szabad elmozdulások függvényében. Ezt követően a hetedik fejezetben, egy a hatodik fejezetben felállított mérési rendszer segítségével mérem és elemzem a kistehergépjárműre és a halmazolt csomagokra ható rázkódások tulajdonságait az útminőség függvényében. Az így kapott eredményeket összehasonlítom a laboratóriumi gyakorlatban alkalmazott vizsgálati eljárás során mért adatokkal. A nyolcadik fejezetben, a disszertációmban megfogalmazott következtetések és megállapítások alapján ismertetem a doktori kutatásom téziseit. A disszertáció az ábrák és táblázatok, valamint a felhasznált szakirodalom jegyzékével zárul.

## 2. Csomagolástervezés és termékvédelem a logisztikában

### 2.1. A csomagolás fogalma és funkciói

A csomagolást leginkább úgy lehet leírni, mint az áruk szállításra, elosztásra, tárolásra, kereskedelemre és használatra való előkészítésének összehangolt rendszerét. A legalapvetőbb formában a csomagolás tartalmazza, védi/megőrzi, szállítja és tájékoztatja/eladja az árut. A csomagolás olyan szolgáltatási funkció és termék, amely önmagában nem létezhet, így a csomagolás létjogosultságához minden esetben termékre van szükség. Amennyiben nincs termék, nincs szükség csomagolásra sem. [1]

Hellstörn szerint a csomagolás olyan rendszert jelent, amelynek célja a termék védelme és hatékony és eredményes szállítása, kezelése és tárolása a teljes ellátási láncban. [2] Kirwan szerint, a termék biztonságának és eltarthatóságának fokozásával kulcsfontosságú szerepet játszik a gazdaságban, ezért meghatározása a termék tárolására és megőrzésére szolgáló anyag egyszerű jelölésén túl egy olyan összehangolt rendszerre bővült, amelynek célja az áruk előkészítése és védelme az ellátási lánc mentén, miközben biztosítja a hatékonyságot és az optimális értékesítést. [3]

Az európai szövetség megfogalmazása szerint a csomagolás *minden olyan, bármilyen anyagból készült termék, amelyet az áruk tárolására, védelmére, szállítására és bemutatására használnak, a nyersanyagoktól a feldolgozott árukig.* [4]

A csomagolást gyakran tekintik olyan rendszernek is, amelyet a csomagolás különböző, egymással összefüggő szintjei képviselnek, amelyeket elsődleges, másodlagos és harmadlagos csomagolási szinteknek nevezhetünk. Az elsődleges csomagolás van a legközelebb a termékhez, gyakran ez a termékhez közvetlenül kapcsolódik és a termék ebben a csomagolásban kerül értékesítésre, ezért fogyasztói csomagolásnak is nevezzük. A másodlagos csomagolás az elsődleges csomagolások bizonyos mennyiségét tartalmazza, gyakran csoportos, gyűjtő vagy kiskereskedelmi csomagolásnak is nevezik, míg a harmadlagos csomagolás több másodlagos csomagolást tartalmaz, gyakran szállítási vagy elosztási csomagolásnak nevezik, ez lehet például egységpakomány. A csomagolás megjelenési szintjeit az 2.1. ábra mutatja be.

A csomagolás rendszerként való szemlélése nemcsak a többféle szerep és funkció között tesz különbséget, hanem azt is elismeri, hogy a csomagolás teljesítményét rendszerként kell értékelni. [5][6]



2.1. Ábra – A csomagolás szintjei (Forrás: saját szerkesztés [2] alapján)

A fentebb leírtak alapján látható, hogy a csomagolás és a csomagolási rendszerek összetett, különböző funkciókat látnak el. Paine szerint a csomagolás alapvető funkciói a védelem, a tárolás, a termék megőrzése és kommunikáció. A csomagolás nem csak a terméket védi a külső behatásoktól, hanem a környezetet is védi terméktől. [7] Twede és Ben szerint a csomagolás funkciói a védelem, a hasznosság és a kommunikáció, [8] bár Stock és Lambert a csomagolás funkcióinak részletesebb osztályozását a következőképpen írta le:

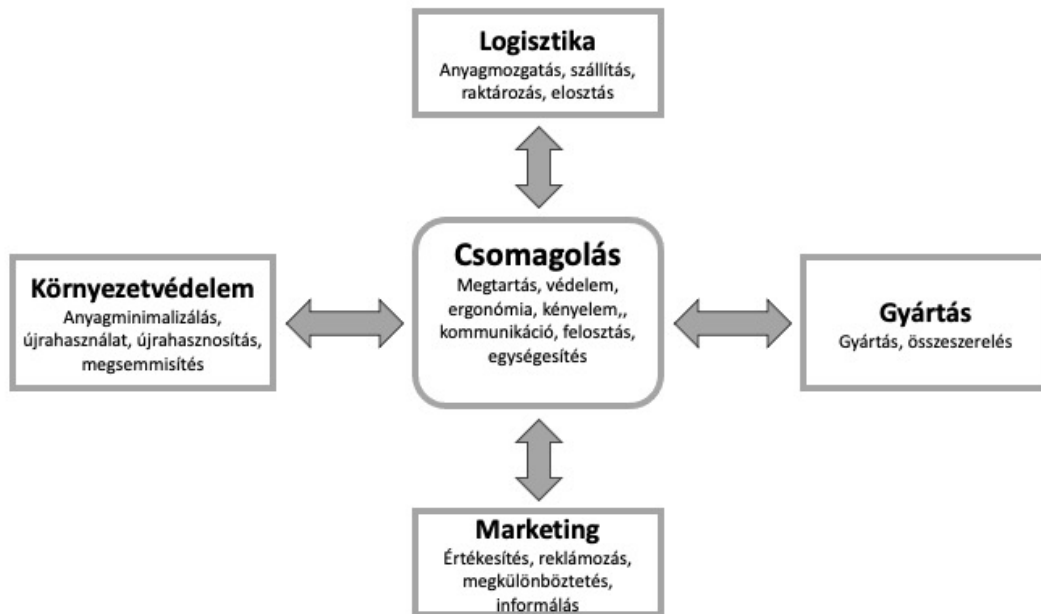
- Tartalmazás, megtartás; a termék megőrzése, magában foglalása;
- Védelem; a fizikai környezettel szemben;
- Felosztás; a termék kezelhető méretűvé alakítása;
- Egységképzés; a termékek és/vagy a másodlagos csomagolás csoportosítása;
- Kényelem; a könnyebb kezelés révén csökkenti a hulladék mennyiségét;
- Kommunikáció; olvasható logisztikai és termékinformációkat hordoz. [9]

Johansson [10] az előző kutatóktól eltérő módon osztotta fel három fő részre a csomagolási rendszer funkcióit, amelyek kölcsönhatásban vannak egymással: áramlás, piac és környezet. Az áramlási funkció olyan csomagolási jellemzőkből áll, amelyek hozzájárulnak a hatékonyabb kezeléshez a forgalmazás során. A csomagolási logisztika, a belső anyagáramlás, az elosztás, a kicsomagolás, az ártalmatlanítás és a visszaküldés kezelése tartozik ebbe a funkcióba. A piaci funkcióban olyan jellemzők vannak jelen, mint a tervezés, az elrendezés, a kommunikáció, az ergonómiai jellemzők, amelyek értéket teremtenek a termék és a márka számára, amelyek ugyancsak fontos jellemzői a csomagolási rendszernek. [11] A piaci funkció célja a vásárlók elégedettsége és a termékeladások növelése. Manapság egyre fontosabbá válik a csomagolási rendszer környezeti funkciója, amely alatt csomagolási rendszerek környezetre gyakorolt negatív hatásainak csökkentését értjük. A csomagolás tervezés során is egyre



hangsúlyosabb a környezetbarát csomagolóanyagok használata, a csomagoló anyagok mennyiségének csökkentése, valamint többutas csomagolási rendszerek alkalmazása.[12]

Az előző bekezdésekben leírtak alapján is könnyen észrevehető, hogy a csomagolási rendszerek funkciói nagyon komplexek és több területhez egyaránt kapcsolódnak [13]. A csomagolási funkciók kölcsönhatásait a 2.2. ábra szemlélteti.



2.2. Ábra – A csomagolás kapcsolódó szakterületei (Forrás: saját szerkesztés [14] alapján)

A vállalatok a csomagolás komplexitása miatt szinte elkerülhetetlen dilemmákkal szembesülnek egy adott csomagolás tervezése, bevezetése esetén, ahol elkerülhetetlen a kompromisszum (trade-off) a csomagolás logisztikai, marketing vagy környezetvédelmi funkciói között. Ezzel a kérdéskörrel foglalkozott Kassaye és Verma, [15] akik azt mondták, hogy kétségtelenül az egyik legnehezebb feladat a termékek gyártói és forgalmazói számára a környezetvédelmi szempontok és a csomagolás alapvető funkcióinak összehangolása. A gyártók egyik fő gondja a könnyebb csomagolások biztonságának kérdésköre, amely esetén az aggodalom a kevesebb csomagolásból adódó kompromisszum, vagyis az, hogy a kevesebb csomagolóanyag nem eredményez-e kevesebb reklámfelületet, kevesebb védelmet és kevesebb értékesítési bevételt. Livingstone és Sparks [16] hasonlóképpen látja: A vállalatok olyan dilemmákkal szembesülnek, hogy olyan csomagolást kell biztosítaniuk, amely környezetvédelmi szempontból elfogadható, de mégis praktikus, megvédi a terméket, és ezt olyan vonzó módon teszi, hogy népszerűsítse azt. A csomagolásokkal kapcsolatos

kompromisszum kényszerek nem csak a vállalati döntésekben vannak jelen, hanem az ellátási lánc egyes szereplői között is.

A csomagolás az egyik legfontosabb, átfogó elemként jelenik meg, amely támogatja a fenntartható stratégiák megvalósítását az ellátási láncokban. Ráadásul a csomagolás maga is a termékek, eljárások és anyagok innovációjának forrása, ami megerősíti stratégiai hozzájárulását a versenyképesség javításához. A csomagolás funkciói döntő szerepet játszanak az ellátási lánc valamennyi tevékenységében (pl. beszerzés, termelés, értékesítés, szállítás stb.). Átívelő szerepet töltenek be más ipari funkciókkal, mint például a logisztika, a termelés, a marketing és a környezetvédelmi szempontok. Ezért, Lancioni és Chandran szerint a csomagolás az egyik legfontosabb tényező az ellátási láncokban. [17]. Az ellátási lánc tagjai közötti koordináció és integráció iránti megnövekedett igény a csomagolások ellátási láncának teljesítménye érdekében magában foglalja az összes érintett szereplő által támasztott követelmények figyelembevételének kihívását. E követelmények sokfélesége azonban gyakran kompromisszumokat (trade-off) eredményez. [14] [18] Palsson et al. [19] egy modellt állított fel, amely többek között csomagolóanyag választás, anyagmozgatás és szállíthatóság szempontjából vizsgálta a vállalat csomagolás rendszerét és állapított meg összefüggéseket. Svanes et al. [20] egy olyan csomagolóeszköz kiválasztási módszert dolgozott ki, amely figyelembe veszi a fenntarthatóságot, az elosztási költségeket, a termékvédelmet a piaci és felhasználói igényeket is. Ebben a két tanulmányban bemutatott módszerek megfelelő megoldásokat találnak a megfelelő csomagolási rendszer kiválasztásához, azonban a módszerüket mind a két tanulmányban, egy hagyományos ellátási láncban alkalmazott csomagolási rendszeren igazolták.

A hagyományos ellátási láncokban (2.3. ábra) a csomagolt termékeket az előző fejezetben bemutatott módon, általában három szintű csomagolási rendszerben, fogyasztói- és gyűjtőcsomagolás, valamint egységcsomagolás formájában továbbítják az egyes szereplők között. Ezekben az ellátási láncokban a csomagolt termékek szállítási időtartalma, a szállítójárművek és az anyagmozgatási események jól determinálhatóak, így a csomagolások szükséges védelmi képességeinek meghatározása is jól előrejelezhető. [14]

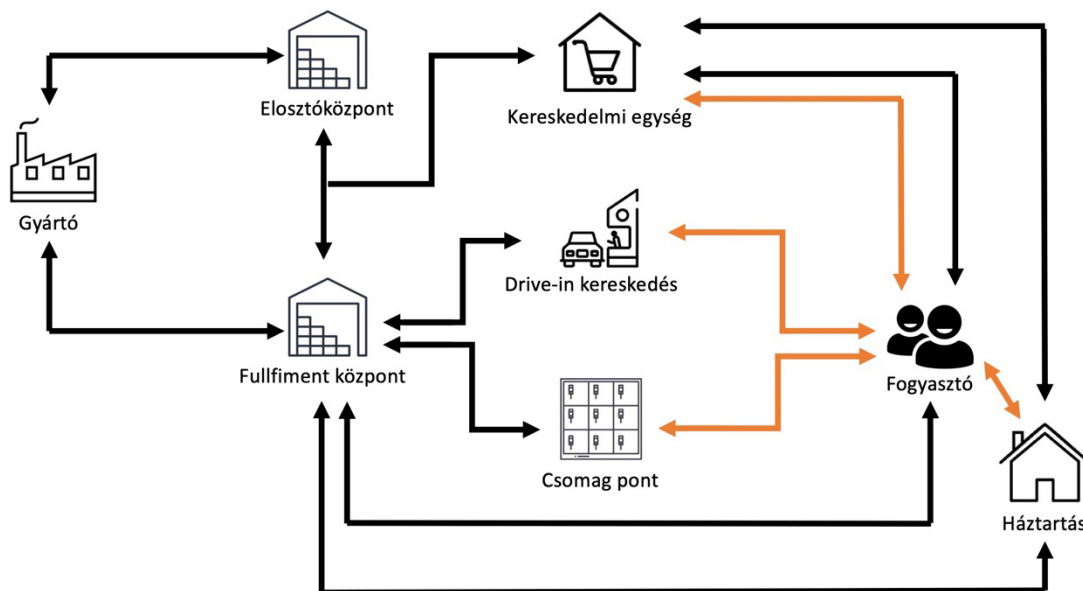


2.3. Ábra – Hagyományos ellátási lánc egyszerűsített modellje

(forrás: saját szerkesztés [14] alapján)

Az elmúlt évtizedekben azonban az ellátási láncok egyre hosszabbak és komplexebbek lettek, amelynek okai visszavezethetők minden bizonnyal a globalizáció, a gyártási helyek és a fogyasztás helye közötti növekvő távolságokra, az eldobható termékek számának növekedésére, a demográfiai változások és életmód változására, az önkiszolgáló forgalmazás fejlődésére és az e-kereskedelem és házhozszállítási szolgáltatások növekedésére. [21]–[24] Az elmúlt két évtizedben az e-kereskedelmi eladások növekedése több mint 20% volt éves szinten és a világ kiskereskedelmi forgalmának 18,8 %-a történt online formában a 2021-es évben. [25] A Covid-19 világjárvány hatása felgyorsította az e-kereskedelmi eladásokat 2020 folyamán, valamint az e-kereskedelem növekedését a fogyasztók által használt digitális eszközök egyre szélesebb körű használata is elősegíti. Az e-kereskedelem növekedése és a digitális eszközök alkalmazásának növekedése mind a fogyasztó, mind az ellátási lánc szereplői körében, a fogyasztói igények jobb és gyorsabb kiszolgálását teszi lehetővé. Azonban, ez egyben azt is eredményezi, hogy a logisztikai folyamatok összetettebbé válnak a szereplők között. [26] Az elektronikus és a fizikai kiskereskedelem ma már jobban összekapcsolódik, mint korábban, és a határok a különböző értékesítési csatornák között eltűnnek. [27] Ennek hatására, a termékeket már nem egy közvetlen csatornán értékesítik a fogyasztóknak, hanem egymással párhuzamosan futó disztribúciós csatornákon (2.4. ábra) keresztül juttatják el termékeket a fogyasztókhoz.[28]–[30] Az elektronikus és fizikai kiskereskedelmi csatornák úgynevezett omni-csatornába történő integrálása előnyökkel járhat a vásárlási kényelem és a logisztikai hatékonyság szempontjából, de a megvalósítása összetett

folyamat. [31] A komplexitás az egyre inkább elmosódó földrajzi határokhoz kapcsolódik, ahol mind a nemzeti, mind a nemzetközi disztribúciós létesítményeket és folyamatokat kell összekapcsolni, amelyek mindegyike saját működési, földrajzi és jogi jellemzőkkel rendelkezik. [32] Ez azt eredményezi, hogy a termékeket egyre nagyobb távolságokra szállítják, [33] változatos szállító járművek alkalmazásával, különböző csatornákon keresztül, amelyek mindegyike sajátos követelményeket támaszt a csomagolással szemben, mind a csomagolás termékvédelmi funkciója, mind a fogyasztói élmény, mind a kezelés és szállítás hatékonysága tekintetében. Továbbá, az e-kereskedelem tekintetében a magas megtérülési arányok elvárásai nyomást gyakorolnak az értékesítési rendszerre, így nagy szerep hárul a csomagolás költséghatékonyságára is. [34]

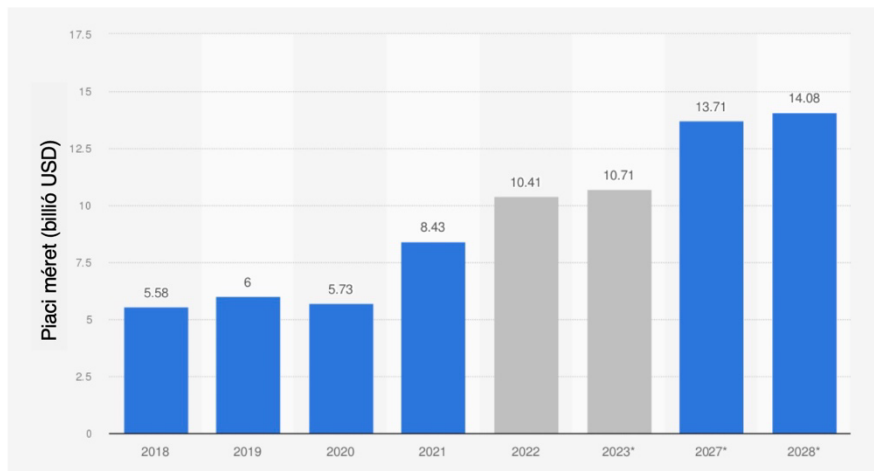


2.4. Ábra – Omni-csatorna ellátási lánc egyszerűsített modellje

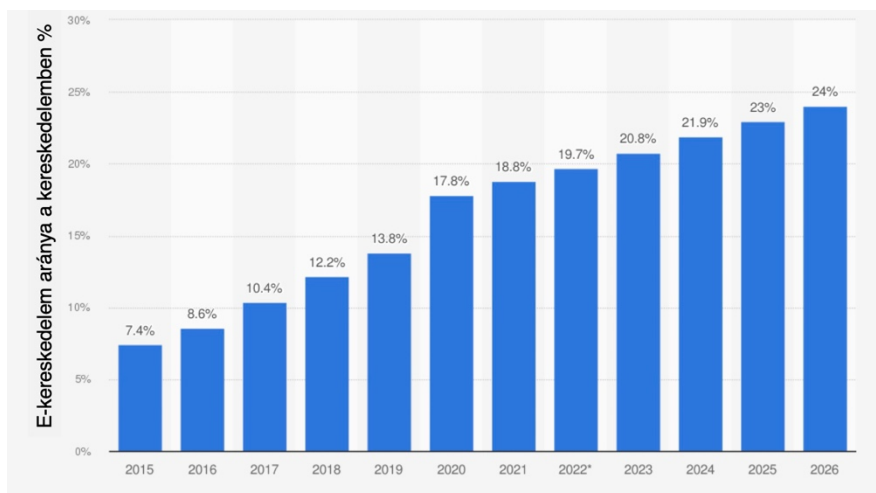
(Forrás: Saját szerkesztés [28] alapján)

A hosszú és összetett ellátási láncok kialakulására utal az is, hogy 2021-ben a globális logisztikai ipar mérete elérte a 8,43 billió USA dollárt, ami 2020-as évhez képest 48 % -os növekedést jelent. Az előrejelzés szerint a következő években is az iparág jelentős bővülését várják, amely szerint a logisztikai ipar mérete 2028-ig közel megduplázódik. Ezt szemlélteti a 2.5. ábra. [35] Ez a drasztikus növekedés nagy valószínűséggel azzal magyarázható, hogy a Covid-19 pandémia hatására, a hagyományos értékesítési csatornák visszaszorultak és az e-kereskedelem részaránya a teljes kereskedelemben jelentősen növekedni kezdett, amelynek során termékek a komplex omni-csatorna ellátási láncokban érnek el a felhasználási helyükig. Ahogy már korábban említésre került, a 2021-ben az e-kereskedelem a világ kereskedelmének

18,8 százalékát tette ki, amely az előrejelzések szerint 2026-ra a kereskedelem közel negyede ebben a formában fog lebonyolódni [36].



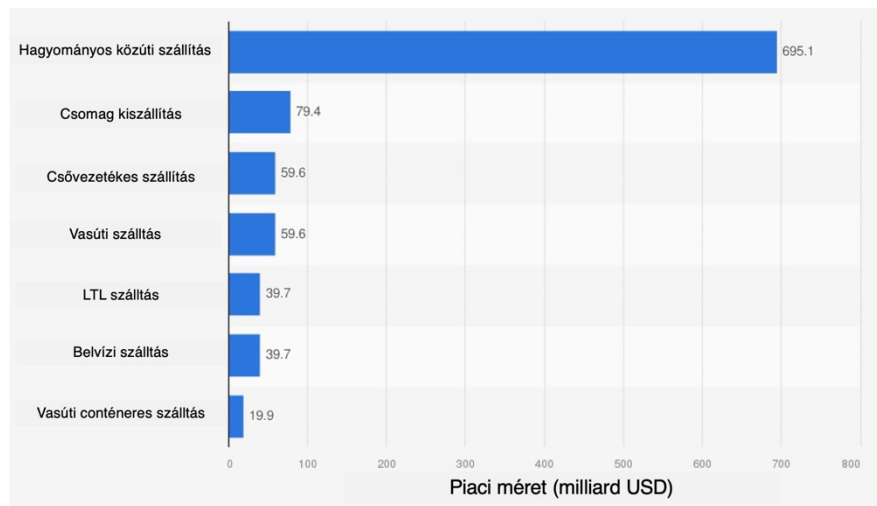
2.5. Ábra – Globális logisztikai ipar piaci mérete 2018 és 2022 között, előrejelzéssel 2028-ig (1000 milliárd dollárban kifejezve) (Forrás: [35])



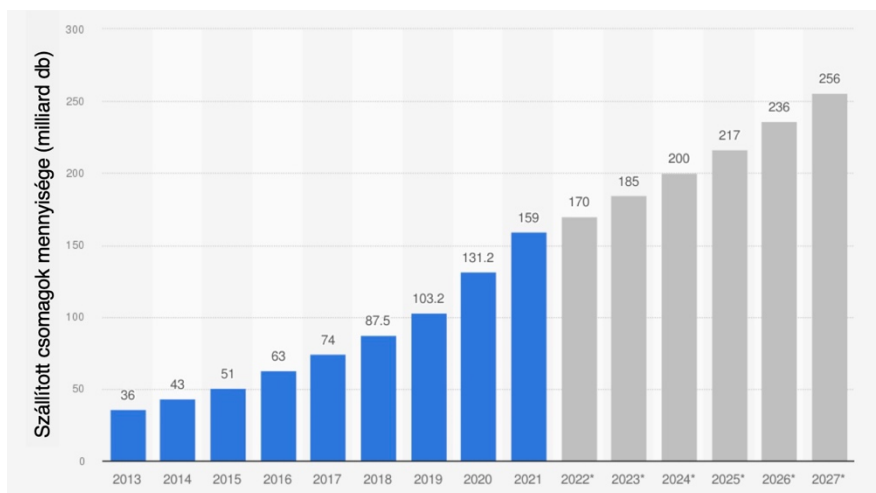
2.6. Ábra – Az e-kereskedelem százalékos aránya a teljes kereskedelemben (Forrás: [36])

Az e-kereskedelemben a termékek 3 fő útvonalon kerülhetnek a végfelhasználóhoz. Az első esetben a fogyasztó az online-rendelését követően, saját maga viszi el a terméket a kereskedőtől. A második esetben a kereskedő a végfelhasználó által kijelölt csomag szekrénybe, a harmadik esetben a fogyasztó által kijelölt címre szállítja a megrendelt árut. Az utóbbi a szállításokat expressz, csomag- vagy futárszolgálatos (parcel delivery), vagy úgynevezett utolsó mérföldes (last mile delivery) nevezzük. Ezeknél a szállításoknál a termékeket önállóan, nem egységpakolásban vagy gyűjtő csomagolásban továbbítják a feladási helytől a fogyasztóig. Ennek a szállítási módnak a gyors növekedését bizonyítja az Amerikai Kamionos Szövetség által készített statisztika (2.7. ábra), amely azt mutatja, hogy már 2018-ban is ezt a szállítási módot alkalmazták a második legtöbbször, a belföldi szállítások esetén. [37] Ez a belföldi

szállítások 8%-a jelenti, a kocsirakományú szállítás (FTL – Full Truck-load) 70 % -át, a darabáru szállítás (LTL- Less than Truck-load) 4 % -át tette ki a belföldi szállításoknak. Amennyiben azonban megvizsgáljuk a globálisan küldött csomagok volumenét, azt láthatjuk, hogy még 2018-ban 87,5 milliárd csomagot továbbítottak ilyen módon, addig ez a szám 2021-re már 159 milliárd csomagot jelentett. [38] Ebből kifolyólag, az előbb bemutatott arányok biztosan eltolódtak a csomag és expressz szállítások felé az utóbbi években.



2.7. Ábra – Amerikai szállítási piac mérete szállítási módok szerint 2018-ban (milliárd USD-ben kifejezve) (Forrás: [37] )

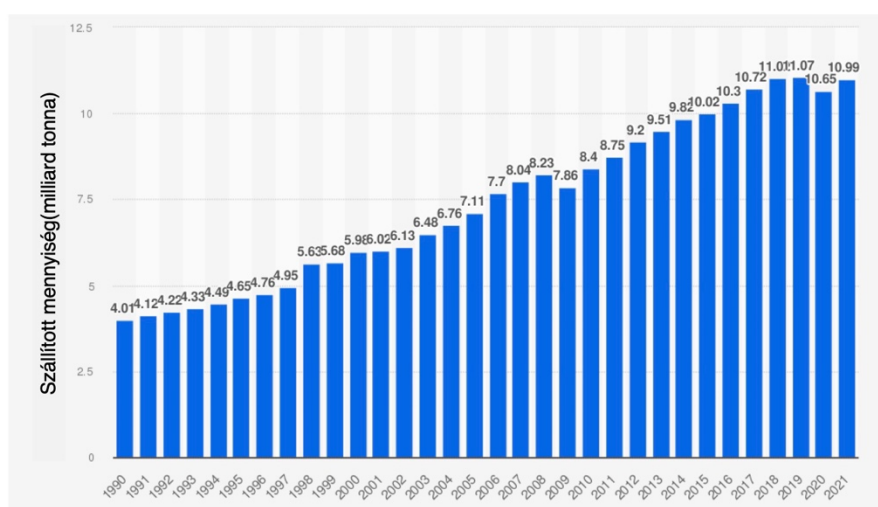


2.8. Ábra – Expressz csomag szállítás volumene 2013-2022 között, előrejelzéssel 2027-ig (milliárd db-ban kifejezve) (Forrás: [38])

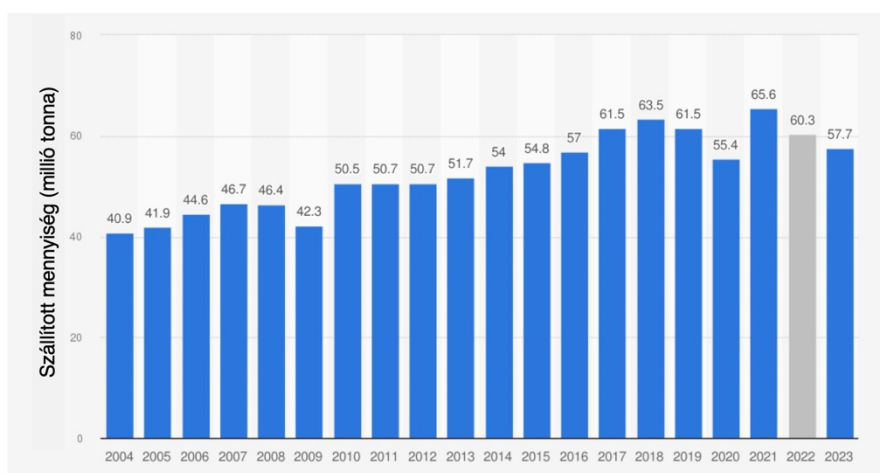
A futárszolgálatos kiszállítási mód azt eredményezi, hogy a csomagolt termékeket hosszabb útvonalon, több anyagmozgatási folyamat mellett továbbítják. Ezekben a folyamatokban a csomagolt termékeket érő rázkódások és ütések mennyisége megnövekedik, amivel a csomagolásokat tervező szakembereknek számolniuk kell. A termékvédelmi funkció

megtervezését továbbá az is bonyolítja, hogy a hagyományos szállítási módokkal szemben, ebben az esetben a csomagok pozíciója, elhelyezkedése a szállítójárműben, valamint a rájuk nehezedő halmaznyomás nem ismert. Ebből kifolyólag, a termékek védelmét a fogyasztói csomagolást további pótlólagos, hozzáadott csomagolásokkal egészítik ki, mint például papírdoboz, légpárnás fólia stb., amelyek jelentős csomagolási hulladékot eredményeznek. Kim és szerzőtársai [39] 2022-es kutatásában azt mutatta ki, hogy azonos összegű vásárlás esetén az online vásárlás sokkal több csomagolási hulladékot termel, mint az offline vásárlás. Például, míg az online vásárlás 100 dolláros növekedése az átlagos szinthez képest 4,24 kg csomagolási hulladékot termel, addig ugyanez a növekedés az offline vásárlás esetén csak 0,88 kg csomagolási hulladékot eredményez. Ez azt mutatja, hogy az e-kereskedelem 4,8-szor több csomagolási hulladékot termel, mint az offline kereskedelem. Ez ellen olyan csomagolások kialakításával lehet eredményesen fellépni, amelyek a megváltozott ellátási láncokban is képesek a termék védelmét biztosítani, különböző hozzáadott, kiegészítő csomagolások nélkül is. Ehhez szükséges a környezeti igénybevételek tulajdonságainak lehető legpontosabb felmérése, amelyek alapján a csomagolás védelmi funkcióját vizsgáló laboratóriumi szabványok és eljárások igazíthatóak.

Az alábbi 2.9 és 2.10 -es ábrán látható a tengeri és légi szállítások volumenének változása, ez azt mutatja, hogy a szállított csomagok mennyisége folyamatosan növekszik. Ebből is következik, hogy amennyiben a csomagolás nem hatékony az adott ellátási lánc folyamataihoz, akkor az egyre nagyobb szállított mennyiség miatt, egyre jelentősebb negatív gazdasági és környezeti hatásokat fog eredményezni a csomagolt termékek eljuttatása a végfelhasználókhoz.



2.9. Ábra – Tengeri szállítások volumene 1990 és 2021 között (milliárd tonnában kifejezve) (Forrás [40])



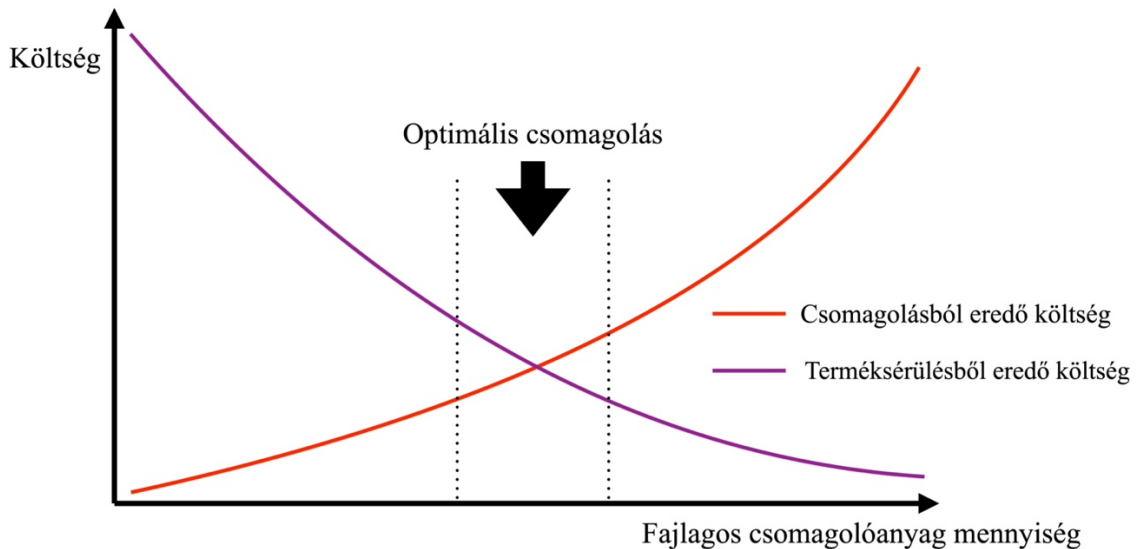
2.10. Ábra – Légiszállítások volumene 2004 és 2021 között (millió tonnában kifejezve) (Forrás: [41])

Ebben a fejezetben bemutatott összefüggések és statisztikák a csomagolási láncban betöltött szerepéről azt támasztják alá, hogy mind gazdasági, mind pedig környezetvédelmi szempontból kívánatos olyan csomagolások kialakítása, amely kellő termékvédelmi funkcióval, a lehető legminimálisabb csomagolóanyag felhasználása mellett képes hatékonyan biztosítani a termékek továbbítását az ellátási láncokban. Ez mutatja azt is, hogy elengedhetetlen a valóságot legjobban reprezentáló csomagolásvizsgáló szabványok kialakítása, amelyhez elengedhetetlen az ellátási láncban felmerülő igénybevételek felmérése.

## 2.2. A védelmi szempontú csomagolástervezés folyamata

Az anyagmozgatás és szállítás során fellépő terhelések jelentős árukárokat okoznak, amelyek átlagosan akár a teljes forgalom 14 %-át is elérhetik. A szállítási csomagolási rendszerek ezen károk megelőzését szolgálják, azonban fontos kiemelni, hogy a tervezés során a cél nem minden lehetséges hatás elleni védelem biztosítása, hanem az optimális csomagolás kialakítása a teljes költségvetés alapján. Ennek révén megfelelő védelmet nyújt a terhelésekkel szemben, ugyanakkor a csomagolás tervezése során felmerülő költségek (alapanyagok, csomagolási idő és munkaerő szükséglete) nem túl magasak, és nem növelik túlzottan a termék körül lévő térfogatot, ami növelné a szállítási költségeket egy szállítási egység esetén. A 2.11. ábrán látható, hogy ahogy a csomagolás költsége nő, úgy csökken a termékkárosodásból eredő költség. [42], [43]





2.11. Ábra – Csomagolt termék költség szemlélete (Forrás: [43] alapján)

Az optimális csomagolás tervezési módszerekkel több kutató is foglalkozott. Azzi és szerzőtársai [44] egy átfogó, a csomagolási funkciókat széleskörben elemző tervezési módszert vizsgált. Svanes és szerzőtársai [20], valamint Holdway és szerzőtársai [22] a fenntarthatóság szempontjából vizsgálták a csomagolástervezési módszereket. Sohrabpour és szerzőtársai [45] a csomagolás tervezési és fejlesztési eljárásokat vizsgálták az ellátási lánc hatékonysága és a csomagolási életciklus tekintetében. Azonban a logisztikai csomagolástervezésben a legszélesebb körben alkalmazott módszer, az úgynevezett „6 lépés” módszer, amelyet Parker írt le. [46] Ez a módszer a törékeny, valamint érzékeny termékek optimális csomagolásának kialakítását írja le 6 lépésben. A módszer célja egy olyan csomagolási rendszer megalkotása, amely csak az adott ellátási láncban várhatóan felmerülő igénybevételek ellen védi a becsomagolt termékeket, és nem törekszik minden igénybevételből fakadó káros hatások elleni védelemre. Ez által, a megfelelő mennyiségű és védelmi képességekkel rendelkező csomagolóanyag felhasználással könnyen elkerülhető mind az alul-, mind a túlcsomagolásból eredő költségtöbblet, így megvalósulhat a korábbiakban bemutatott terméksérülésből és csomagolóanyag ráfordításból eredő költségek optimuma.

A módszer a következő általános lépésekből áll:

*1. Az ellátási lánc igénybevételeinek felmérése és értékelése*

A tervezés megkezdése előtt meg kell vizsgálni az adott szállítási környezet paramétereit, szállítási távolságokat, alkalmazott szállítási módokat, várható klimatikus viszonyokat. Meg

kell határozni az ezekből fakadó környezeti igénybevételek tulajdonságait. Ezen információk begyűjtésére kétféle megközelítés áll rendelkezésre;

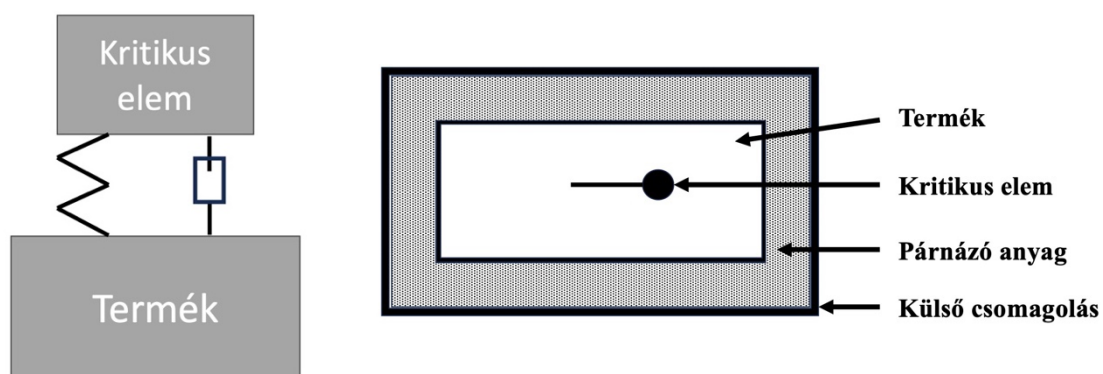
- Felmérni és számszerűsíteni egy tesztcsomag valós tapasztalatait a várható szállítási útvonalon,

vagy

- A szállítási környezet becslése egy megfelelő szabvány használata, amely a maximális veszélyességi szintet szimulálja. Ha a csomag szállítási útvonala nagymértékben változik, akkor egy szabvány használata megfelelőbb és költséghatékonyabb lehet.

## 2. A termék érzékenységének meghatározása

Érzékenységétől függően a termék természetes módon képes ellenállni és elnyelni a szállítási környezetből származó ütések és rezgések, valamint ellenállni a különböző klimatikus igénybevételeknek. A termékek érzékenységét a termék meghatározott magasságból történő leejtésével értékelik. Az ütések és rázkódások során el kell kerülni a rezonancia viselkedést, mivel a termék a gerjesztés felerősödésén megy keresztül, ami a kritikus elem lehetséges meghibásodásához vezet. A terméken belüli kritikus elem, amely a legérzékenyebb a károsodásra, lesz a tervezési költségtenyező. A kritikus elem a termék azon része vagy alkotóeleme, amely a legérzékenyebb vagy a leginkább hajlamos a károsodásra. A termékhez egy rugalmas elemmel (rugó) és egy csillapítóval rögzített kis tömegként modellezhető, amint azt az 2.12. ábra szemlélteti. Ez a kritikus elem természetes képességét mutatja az ütés- és rezgési energia elvezetésére. Károsodás nyilvánvalóan akkor következik be, ha a rugó a túlzott elhajlás miatt meghibásodik.



2.12. Ábra – Kritikus elem és tömeg – rugó modellje (Forrás: [47] alapján)

Itt meg kell jegyezni, hogy az ábra a termékszempontjából ismerteti a kritikus elemet, azonban kritikus elem lehet maga a párnázóanyag- és a külső csomagolás is. A külső csomagolás sérülése, vagy a párnázóanyag törése a felhasználóban olyan érzetet kelthet, hogy valószínűleg a termék is sérült. A tervezési folyamat folytatásához számszerűsíteni kell azt a pontot, ahol a kritikus elem meghibásodik. Ez történhet károsodási határgörbék [48] vagy tervezési számítások segítségével.

### *3. Termékfejlesztés lehetőségének vizsgálata*

Ezen a ponton lehet felülvizsgálni a termék érzékenységet. A sérülési határgörbék elkészítése után a termék újratervezésével csökkenthető a termék érzékenysége, és ezáltal csomagolási párnázóanyag takarítható meg. Ezen a ponton vizsgálni kell a termék újra tervezéséből fakadó, valamint a csökkentett csomagolóanyaggal elérhető megtakarítások arányát.

### *4. Párnázóanyagok csillapítási képességének meghatározása*

Ezen a ponton meg kell határozni a csomagoló és párnázóanyagok csillapítási képességeit. Ez alapján kiszámítható a termék védelméhez szükséges párnázóanyag mennyisége és vastagsága.

### *5. A csomagolási rendszer tervezése*

A csomagolás kialakítása a logisztikai környezet, a termék vagy a kritikus elem érzékenységének ismeretéből és a párnázóanyag pontos jellemzéséből következik.

A kezdeti csillapítási görbe tervezéséhez meg kell határozni a várható legnagyobb ütés és rázkódási szintet vagy az esési magasságot. Ezt általában úgy határozzák meg, hogy a bekövetkezés valószínűségét leíró adatokból megbecsülik az útvonalon várható ejtési és rázkódási események statisztikai valószínűségét. A legtöbb esetben az ilyen statisztikai eloszlásokat korlátozott adathalmazok felhasználásával állítják össze, és mint ilyenek, nem tudják reprezentálni az összes lehetséges eseményt. A várható szállítási útvonalon a pontosabb igénybevételek megállapítására át lehet küldeni egy adatgyűjtő eszközt, amely rögzíti a csomagolásra ható gyorsulás adatokat. Az adatrögzítő által gyűjtött és felmért adatok segítségével sokkal pontosabban lehet megállapítani a várható ejtési magasságokat, ütési és rázkódási igénybevételeket.

### *6. Az elkészült csomagolt termék tesztelése a szállítási igénybevételekkel szemben*

A csomagolási rendszer tervezésének befejezése után a teljes termék-csomagolási rendszert prototípusát laboratóriumi szállítási vizsgálatoknak vetik alá. A laboratóriumban az elkészített minta csomagolásokat vizsgálni lehet szabványos csomagolásvizsgálati eljárások, vagy az

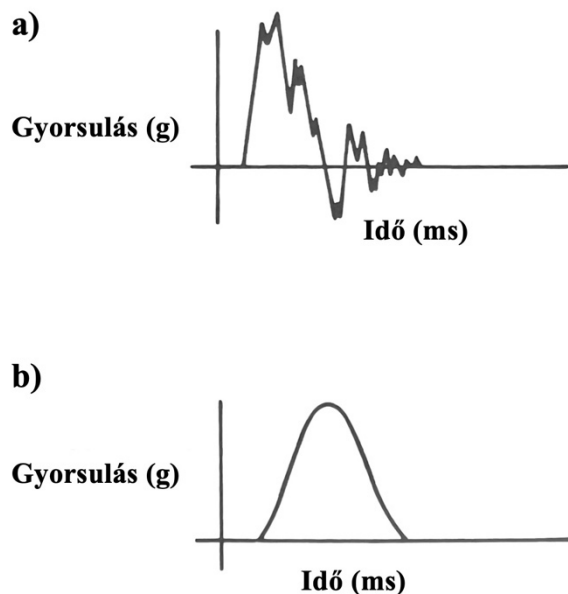
előzetesen felmért logisztikai környezet alapján felállított eljárás szerint. A laboratóriumi vizsgálatok eredményei információt nyújtanak a megtervezett csomagolás termékvédelmi teljesítményéről, és lehetőséget biztosítanak arra, hogy a csomagolási rendszer sorozatgyártása és bevezetése előtt költséghatékonyan újratervezhető legyen, amennyiben ez a vizsgálatok eredményei alapján szükséges.

Az értekezés további részében a környezeti igénybevételek jellemzésével, valamint valós környezeti igénybevételek felmérésével és elemzésével és ezek laboratóriumi szimulációjával foglalkozom, ami alapján, a doktori értekezésem témája szorosan kapcsolódik az itt bemutatott tervezési lépések első, ötödik és hatodik pontjához.

## **2.3. A védelmet meghatározó ütési és rázkódási igénybevételek**

### **2.3.1. Ütés jellegű igénybevételek**

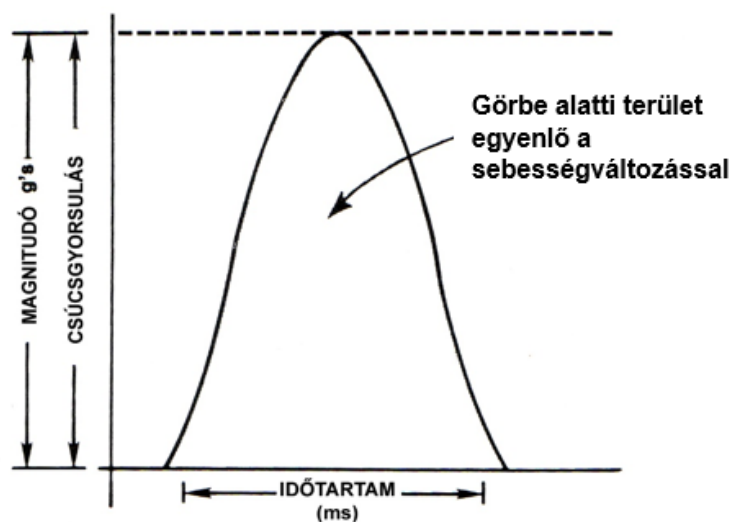
A logisztikai elosztási rendszerekben, a csomagok kezelése és mozgatása közben a csomagolt termékeket különböző ütés jellegű igénybevételek érhetik. Ezek származhatnak a csomagolások leejtéséből, rángatásából és egyéb durva kezeléséből, amelyek előfordulhatnak manuális anyagmozgatás, valamint gépesített anyagmozgatás során. A csomagolt termékeket a szállítás közben is érhetik különböző ütések, a szállítójármű egyenetlen útfelületen történő áthaladásakor, hirtelen gyorsításból vagy lassításból fakadóan, vasúti kocsik összekapcsolásakor. Minden esetben a csomag egy másik tárgynak ütközik, padlónak, teherautó platójának, raklapnak, válaszfalnak vagy egy másik csomagnak. Az ilyen ütközések következtében mindkét tárgyat mechanikai sokkhatás, ütési igénybevétel éri. A mechanikai ütés akkor következik be, amikor egy tárgy helyzete, sebessége vagy gyorsulása hirtelen megváltozik. Az ilyen ütések jellemzője lehet a gyorsulás gyors növekedése, amelyet nagyon rövid időn belül gyors csökkenés követ. A legtöbb ütés gyorsulás idő jelalakja elég összetett, mint azt a 2.13. ábra a) része is szemlélteti, ezért ezek megértéséhez és elemzéséhez általában a 2.13.-es ábra b) részén látható közelítést alkalmaznak [49][50]



2.13. Ábra – Ütés a) valós gyorsulás-idő függvénye, b) közelített, egyszerűsített gyorsulás-idő függvénye (Forrás: [49] alapján)

A csomagolások sérülése az ütségi igénybevétel három tényezőjétől függ (2.15. ábra):

- A csúcsgyorsulástól
- Az ütés időtartamától,
- és a sebességváltozás mértékétől.



2.14. Ábra – A csúcsgyorsulás, időtartam és a sebességváltozás kapcsolata (Forrás: [49] alapján)

A leggyakrabban bekövetkező ütségi igénybevétel a csomagok leejtése. Az ejtéskor fellépő igénybevétel a csomagolt termék padlón való felütközésekor végbemenő gyors sebességváltozásból fakad. A csomagok szabadesésénél az esés hossza ( $t$ ) és a szabadon eső

csomag sebessége az ütközés előtti pillanatban ( $v_i$ ) a következő 2.1-es és 2.2-es alapösszefüggésekkel határozhatóak meg [51].

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (2.1)$$

$$v_i = \sqrt{2gh}, \quad (2.2)$$

ahol  $h$  az esés magassága,  $g$  pedig a gravitációs gyorsulás ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Tapasztalatból tudjuk, hogy egy kis tárgy, például egy csomag, amely egy nagy tárgynak, például a padlónak ütközik, akkor bizonyos esetekben vissza fog pattanni. A visszapattanás mértéke az érintett tárgyak restitúciós együtthatójától függ. A visszapattanás sebességét a restitúciós együttható ( $e$ ) és a felütközés sebessége ( $v_i$ ) írja le (2.3):

$$v_r = ev_i, \quad (2.3)$$

Az ( $e$ ) együttható értéke 0 és 1 között mozog, a tipikus értéke általában 0,3 és 0,5 között mozog.[49]

A teljes sebességváltozás ez alapján meghatározható a felütközési sebesség ( $v_i$ ) és a visszapattanási sebesség ( $v_r$ ) abszolút értékének összegével (2.4).

$$\Delta v = |v_i| + |v_r|, \quad (2.4)$$

A földet érést követően a talaj keménységétől függően adott  $dt$  időtartam alatt lesz 0 az ütközési sebesség. Az alábbi összefüggés (2.5) segítségével meghatározható a lassulás ( $a$ ) értéke.

$$a = \frac{dv}{dt}, \quad (2.5)$$

ahol  $dv$  a sebességváltozás,  $dt$  pedig az eltelt időtartam. A kapott eredmény segítségével az ejtésből származó ütési igénybevétel ( $G$  érték, *érzékenységi fok*) meghatározható (2.6) szerint [52].

$$G = \frac{a}{g}, \quad (2.6)$$

ahol  $a$  a lassulás (gyorsulás),  $g$  a nehézségi gyorsulás. Ez az érték összevethető a gyártók által megadott, termékre vonatkozó  $G$  érzékenységi fokkal. Azt mutatja meg, hogy a termék a  $g$  nehézségi gyorsulás hányszorosát tudja elviselni sérülés nélkül. A 2.1 táblázat néhány általános értéket tartalmaz bizonyos termékkategóriákhoz [1], [53].

2.1. táblázat – Termékek érzékenységi foka (Forrás: [1], [53] alapján)

Kategória	G érték [G]	Termékek
különösen érzékeny	15 – 25	precíziós vizsgálókészülékek, rakétavezérlő rendszerek
nagyon érzékeny	25 – 40	elektronikai berendezések, vezérlőegységek
érzékeny	40 – 60	asztali számítógép, irodai elektronikus eszközök, pénztárgép
mérsékelten érzékeny	60 – 85	Antennák, repülőgép felszerelések
viszonylag érzéketlen	85 – 110	háztartási gépek
érzéketlen	110 –	motorok, transzformátorok

A felütközéskor az alábbi összefüggés (2.7) szerint ütközési energia mozgási energiaként ( $W_{kin}$ ) érvényesül [52].

$$W_{kin} = F \cdot s = \frac{m \cdot v_i^2}{2}, \quad (2.7)$$

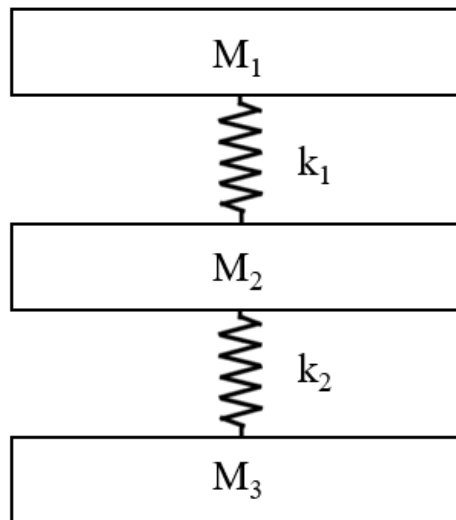
ahol  $F$  a felütközéskor ható erő,  $s$  a fékút,  $m$  a tömeg,  $v_i$  pedig az ütközési sebesség. Ez alapján a csomag padlóra ütközésekor ható erő ( $F$ ) a 2.8. számú összefüggés felhasználásával számítható [52] :

$$F = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} = F_s \cdot \frac{h}{s}, \quad (2.8)$$

ahol  $F_s$  a súlyerő,  $h$  az ejtési magasság,  $s$  a fékút.

A csomagolás szerepe, hogy az ütés során olyan mértékben növelje a gyorsulás (lassulás) időtartamát vagy a fékutat, amely következtében a termékre, valamint a kritikus elemre ható gyorsulás olyan mértékben csökken, amit a kritikus elem csomagolás nélkül is képes elviselni.

Ennek a célnak az elérése érdekében, a csomagolástechnikában különböző rugalmas anyagokat, másnéven párnázóanyagokat használnak. Ez alapján a csomagolási rendszert egyszerűsítve egy lineáris lengőrendszerként is modellezhetjük, amelyet a 2.15. ábra szemléltet. [52]



2.15. Ábra – A lineáris lengőrendszer modellje

$M_1$ : a kritikus elem tömege (kg);  $M_2$ : a termék tömege (kg);  $M_3$ : a külső csomagolás tömege (kg);  $k_1$ : kritikus elem rugóállandója (N/m);  $k_2$ : párnázás rugóállandója (N/m)

(Forrás: [49] alapján)

Annak érdekében, hogy a kritikus elem sérülését a párnázóanyag segítségével el lehessen kerülni, fontos meghatározni az erősítési tényező értékét (2.9) összefüggés szerint, amely a bemenő és a kimenő ütés szintje alapján számítható ki az alábbi összefüggés szerint:

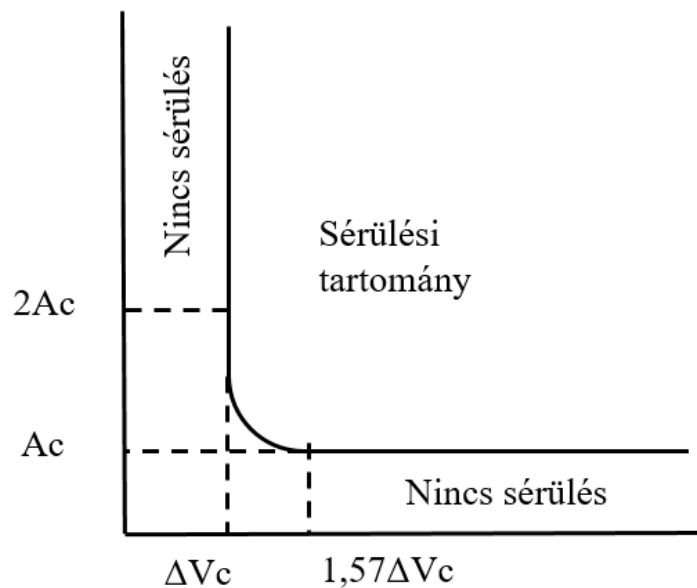
$$A_m = \frac{G_e}{G_m}, \quad (2.9)$$

ahol  $A_m$  az erősítési tényező,  $G_e$  a kritikus elem maximális gyorsulása,  $G_m$  a maximális gyorsulás. Az erősítés mértékét az ütés időtartamának hossza és a kritikus elem természetes lengési időtartama is befolyásolja [49].

A fentiek alapján látható, hogy annak érdekében, hogy a termék védelme szempontjából megfelelő csillapítási paraméterekkel rendelkező csomagolást tervezhessünk, elengedhetetlen információ a termék kritikus elemének érzékenysége. A 2.1. táblázatban bemutatott értékek csak általánosságban érvényesek, így a termékek érzékenysége sérüléshatár görbe segítségével



határozható meg, amely az y tengelyen a kritikus gyorsulást, az x tengelyen pedig a kritikus sebességváltozást szemlélteti (2.16.).

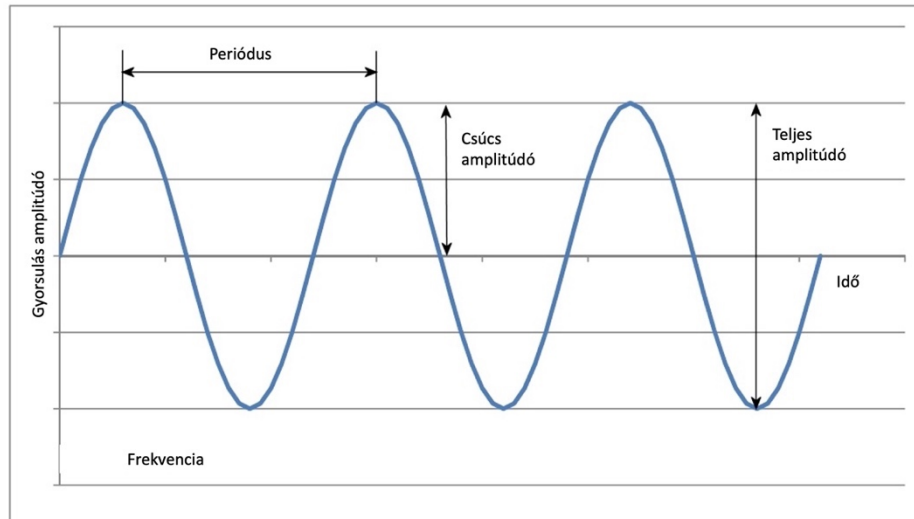


2.16. Ábra – Általános sérüléshatár görbe (Forrás: [51] alapján)

### 2.3.2. Rázkódások

A csomagolt termékek az ellátási rendszeren való áthaladás során, a pályaegyenetlenségekből fakadó, a szállítóeszközök rakfelületén átadott különböző rázkódásoknak vannak kitéve. Ezek a komplex rázkódási igénybevételek és a belőlük származó gyorsulásváltozások a csomagolt termékek sérüléséhez vezethetnek. A legjellemzőbb sérülések a különböző kopások, dörzsölődések, valamint a kifáradásból fakadó sérülések. A rázkódási igénybevétel akkor a veszélyes elsősorban, amikor úgynevezett rezonancia frekvencia jelenség lép fel. Ez azt jelenti, hogy a termék-csomagolási rendszerre ható, gerjesztett rázkódás frekvenciája, megegyezik a termék, vagy a kritikus elem saját frekvenciájával. [50]

A rázkódás leginkább egy referencia pont körüli periodikus mozgással, oszcillációval írható le [1]. Mielőtt rátérnék a komplex rázkódásokra, amelyek a szállítások során a termék csomagolási rendszert érik, az egyszerű harmonikus mozgás paramétereit és alapösszefüggéseit mutatom be a 2.17. ábra segítségével.



2.17. Ábra – Harmonikus mozgás paraméterei (Forrás: [49] alapján)

Periódus ( $p$ ): egy teljes ciklushoz szükséges idő. [s]

Frekvencia ( $f$ ): egységnyi idő alatt bekövetkező ciklusok száma. [Hz]

Amplitúdó ( $A$ ): A tömeg elmozdulásának mértéke a nulla vagy a referenciaponttól.

A tömeg – rugó lengőrendszer mozgása szinusz függvénnyel fejezhető ki az alábbiak szerint (2.10):

$$x = A \sin(pt), \quad (2.10)$$

Ahol  $x$  a tömeg referenciaponttól való távolságát fejezi ki az időben ( $t$ ). A körfrekvencia ( $p$ ) a 2.11. szerint határozható meg:

$$p = 2\pi f, \quad (2.11)$$

A csomagolástechnika szempontjából kis értékkel bír a tömeg helyzetének kiszámítása, azonban a sebessége ( $v$ ) és a gyorsulása ( $a$ ) lényeges tényező. A sebesség az elmozdulás idő szerinti deriváltja fejezi ki (2.12), a gyorsulást a sebesség idő szerinti deriváltja (2.13). [49]

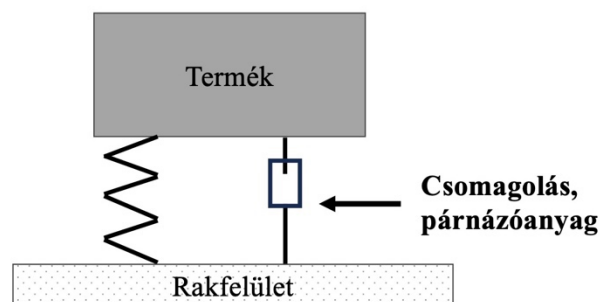
$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.12)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2.13)$$

Egy rugó – tömeg lengőrendszer mindig ugyan olyan frekvenciával fog rezegni, ha egy erő hatására szabad mozgásba kerül. Ezt a frekvenciát nevezzük saját frekvenciának ( $f_n$ ) amely (2.14) kifejezéssel szerint adható meg, amennyiben a rugóállandó ( $k$ ) és a test tömege ( $m$ ) ismert:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2.14)$$

Az alábbi ábrán (2.18.) a rakfelület, csomagolás és a termék tömeg-rugó modellje látható.



2.18. Ábra – A rakfelület, a csomagolás és a termék tömeg-rugó modellje (Forrás: [[49] alapján)

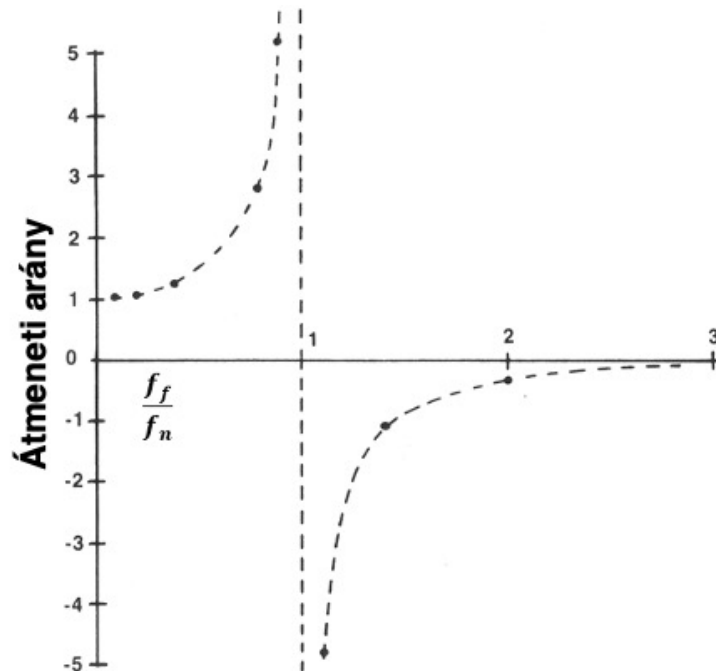
Elméleti és gyakorlati tapasztalatok alapján a rázkódásra vonatkozóan a következő megállapítások érvényesek [49]:

1. A gerjesztő frekvencia és a rendszer válaszrezgési frekvenciája megegyezik, ebben az esetben termék-csomagolás rendszer a gerjesztő frekvencia szerint és nem a saját frekvenciája szerint fog rezegni.
2. A lineáris lengőrendszer válaszrezgésének amplitúdója a gerjesztő rezgés amplitúdója közötti összefüggést az erősítési tényező adja meg. Eszerint a kimenő amplitúdó megegyezik a bemenő amplitúdó és az erősítési tényező szorzatával.
3. Az átmeneti arány segítségével a lengőrendszer maximális gyorsulása is megadható. (2.15).

$$M = \frac{\text{Maximális kimenő válasz rezgés}}{\text{Maximális gerjesztő rezgés}}, \quad (2.15)$$

ahol  $M$  az átmeneti arány. [49]

A 2.19. ábra az átmeneti arány értékét mutatja a gerjesztő frekvencia és a sajátfrekvencia arányának függvényében.

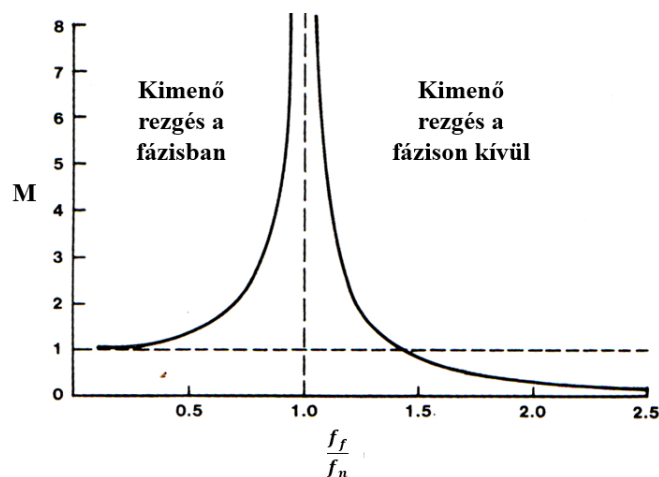


2.19. Ábra – Átmeneti arány a gerjesztő és kimenő frekvencia arányának függvényében (Forrás: [51] alapján)

Amennyiben ez a hányados nagyon alacsony, tehát a gerjesztő frekvencia jelentősen alacsonyabb, mint a sajátfrekvencia, ott a rezgés bemenő és a kimenő frekvenciája szinte megegyezik, vagyis az erősítési tényező értéke közel 1. Az átmenetitényező értéke gyorsan emelkedik, ha a gerjesztő és válaszrezgés frekvenciája elkezd közelíteni egymáshoz és amennyiben az értékük megegyezik, akkor az erősítési tényező értéke meghatározhatatlanná válik a (2.16) összefüggés szerint. Ezt az esetet nevezzük rezonancia frekvenciának, amikor a rendszerben nagyon alacsony intenzitású bemenő gerjesztés nagy intenzitású kimenő válaszrezgést okoz.

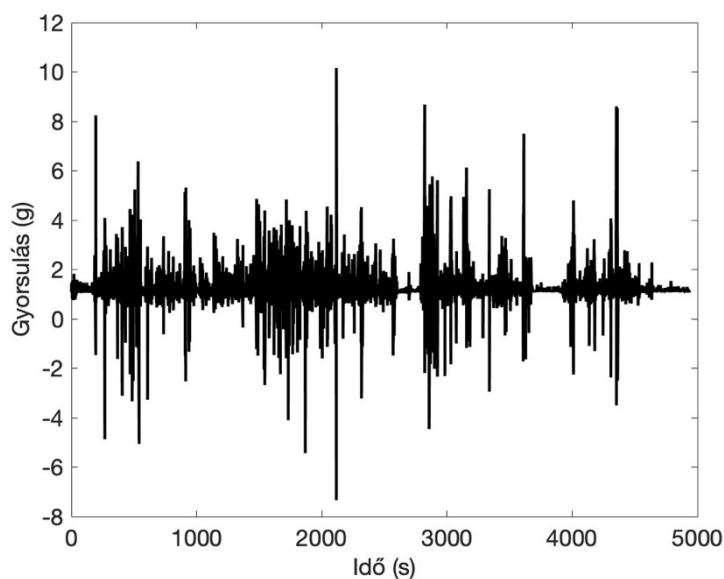
$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_f}{f_n}\right)^2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{1}\right)^2} = \frac{1}{0} \quad (2.16)$$

Abban az esetben amikor a gerjesztő frekvencia nagyobb a sajátfrekvenciánál, akkor az erősítési tényező értéke negatív lesz, akkor a gerjesztő és a gerjesztett mozgás ellentétes irányúak lesznek, vagyis fázison kívüli mozgás jön létre. (2.20. ábra).



2.20. Ábra – Az átviteli arány abszolút értéke a fázisban és fázison kívüli rezgés függvényében (Forrás: [51] alapján)

A valóságban a szállítási folyamatok során a csomagolási rendszert érő rázkódások azonban nem a fent leírt egy frekvenciás szinusz rezgés jellegűek, hanem véletlenszerűek, ahol a gerjesztés frekvenciája és amplitúdója (gyorsulása) az időben véletlenszerűen változik (2.21. ábra) Ezt a véletlenszerű rezgést úgy lehet elképzelni, mint több különböző frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos rezgés keverékét vagy összegét. A termék- csomagolási rendszert bármelyik pillanatban több szinuszos rezgés is gerjesztheti, ami teljesen más hatást válthat ki, mint az egyfrekvenciás gerjesztések. A termékcsomagolási rendszer egyfrekvenciás gerjesztéssel szinusz gerjesztéssel történő vizsgálata nem mindig elegendő a károsodás összes lehetőségének feltárására. [49]



2.21. Ábra – Szállítójármű rakfelületén rögzített rázkódás gyorsulás – idő diagramja (Forrás: [49] alapján)

Az rögzített adatok gyorsulás – idő függvénye azonban önmagában nem nyújt hasznos információt és ebben a formában a laboratóriumi rázószimulációkhoz sem használható. Annak érdekében, hogy a véletlenszerű rázkódásokat elemezni és használni tudjuk a csomagolások laboratóriumi rázóvizsgálata során, a gyorsulás adatokat idő térből frekvencia térbe kell transzformálni.

Fourier több mint száz évvel ezelőtt kimutatta, hogy bármilyen összetett hullámforma előállítható a megfelelő frekvenciájú és amplitúdójú szinuszhullámok összeadásával. Még hasznosabb az a tény, hogy ez az eljárás fordítva is alkalmazható, tehát egy összetett hullámformát egyszerű szinuszos összetevőkre bonthatunk. Ezt általában Fourier transzformációnak nevezik. A Fourier transzformációnak számos megközelítése létezik, amelyek közül a sávszűrő (BPF – Band Pass Filter) használata a legegyszerűbb, ezt gyors Fourier transzformációnak (FFT – Fast Fourier Transformation) nevezik. A BPF csak egy nagyon keskeny frekvenciasávot enged át, és minden más frekvenciát blokkol. A BPF sávzélessége a szűrőn áthaladó legmagasabb és legalacsonyabb frekvenciák közötti különbség, ami az általános gyakorlatban 1 Hz. Amennyiben elegendő sávszűrőt használunk egy széles frekvenciatartomány lefedésére, akkor bármilyen látszólag összetett hullámforma átalakítható ismert frekvenciájú és amplitúdójú szinuszhullámok érthető halmazává. A folyamat a véletlen jel páros időközönként történő mintavételezésével és az amplitúdóértékek eloszlásának vizsgálatával történik. Mivel az amplitúdókat általában gyorsulás értéként rögzítik, a matematikai kiértékelés alapjául általában a  $g$  mértékegységek szolgálnak. Mivel az amplitúdók pozitív és negatív értékűek is lehetnek, így egy nagy minta olyan eloszlást eredményez, amelynek átlaga nulla. Ennek az eloszlásnak a szórását úgy határozzuk meg, mint az átlagos gyorsulás négyzetes középértékét (RMS – Root Mean Square), amelyet a variancia négyzetgyökének határozunk meg, Gauss-eloszlás esetén. A  $g$ -értékek ( $G$ ) eloszlásának szórása ( $s$ ), egy ( $n$ ) számú mintanagyság esetén a következőképpen alakul (2.17) [51]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G - \text{átlagos gyorsulás})^2}{n - 1}} \quad (2.17)$$

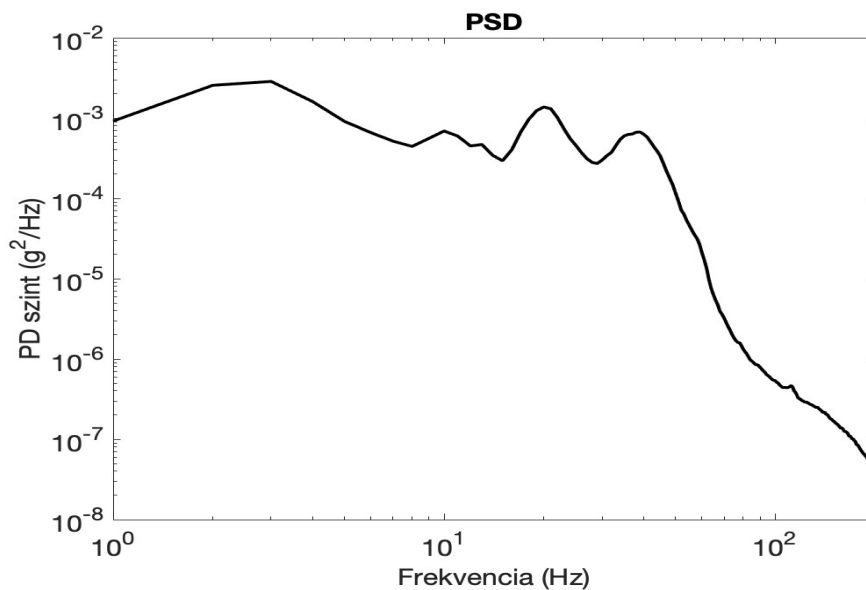
A nagy mintaszámból fakadóan a gyorsulások várható értéke 0, ezért a szórás következő lesz (2.18):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i^2} = G_{rms} \quad (2.18)$$

Az így kapott végeredményt, azaz a  $G_{rms}$  értéket egy adott frekvencián a véletlen jel amplitúdójának statisztikai mérésére használják, és a rezgés effektív energiájának tekinthetjük. Az egyes frekvenciák bármelyikének amplitúdója ábrázolható teljesítménysűrűségként (PD – Power Density) amely a következő (2.19) összefüggés segítségével adható meg:

$$PD = \frac{1}{BW} \sum_i^n \frac{(G_{rms})_i^2}{n} \quad (2.17)$$

Ahol a  $PD$  a Power Density [ $g^2/Hz$ ] mértékegységben kifejezve,  $G_{rms}$  a frekvenciasávon belüli átlagos négyzetgyökeres gyorsulás [ $g$ ], a  $BW$  a sáv szélesség, ahol az effektív értékek elemzésre kerültek [ $Hz$ ] és  $n$  a minták számát jelöli. A  $PD$  értékek ábrázolását a teljes frekvenciatartományban PSD-nek (Power Spectral Density) nevezzük, amelyet a 2.22. ábra szemléltet.



2.22. Ábra – Szállítójármű rakfelület rázkódásának PSD ábrája (Forrás: Saját szerkesztés)

A PSD görbe alatti terület nagysága megadja a teljes véletlenszerű rázkódás intenzitását.

A laboratóriumi véletlenszerű rázóvizsgálatok paraméterezését is PSD segítségével adjuk meg, úgy, hogy az egyes frekvencia töréspontokhoz tartozó  $PD$  értékét tápláljuk a rázóberendezés vezérlő szoftverébe.

### 2.3.3. Statikus és dinamikus halmazterhelés

A legtöbb csomagolt terméket egymásra helyezve raktározzák és szállítják, a gazdaságos helykihasználás érdekében. A termékek védelme érdekében, olyan csomagolás kialakítására van szükség, amely képes elviselni a termék - csomagolási rendszerre nehezedő nyomóigénybevételt. A nyomóigénybevételeket két fő csoportba osztják:

- Függőleges irányú halmaznyomás (csomagolt termékek közvetlen egymásra helyezése esetén lép fel) és
- Vízszintes irányú szorítónyomás (anyagmozgató gép megfogó szerkezete váltja ki)

A halmaznyomás lehet statikus, illetve dinamikus is. Statikus halmaznyomásról jelentkezik, amikor a csomagolt termékeket raktározás során halmazoltan tárolják. A szállítójárművekben halmazoltan továbbított termékekre a pályaegyenletlenségből származó ütések és rázkódások következtében nagyobb dinamikus nyomóigénybevételnek hatnak

A halmazolás során a legalsó csomagolást éri a legnagyobb terhelés. Azonos csomagolás halmazolása esetén a terhelő erő a következő összefüggéssel (2.18.) számítható ki:

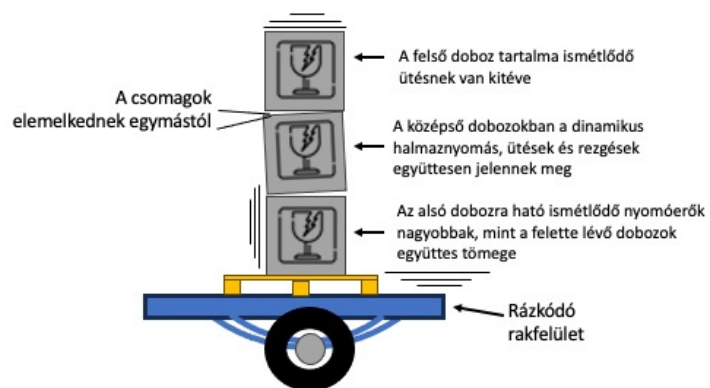
$$F = 9,81 \frac{H - h}{h} Q \quad (2.18)$$

Ahol,  $F$  a nyomó erő [N],  $Q$  a csomagolás tömege [kg],  $H$  a halmazolási magasság [m],  $h$  a csomagolás függőleges élhossza [m],  $9,81$  a tömeg és a súlyerő közötti átszámítási tényező

Ez a képlet csak statikus homogén csomagolások és raktározás esetén alkalmazható. [50] Az LTL és futárszolgálati kiszállítások esetében, a rakományok inhomogén jellegűek, így nem lehet előre definiálni a csomagolásokra nehezedő halmazterhelést. Ilyen esetekben a csomagolást tervezőknek azzal is számolniuk kell, hogy az adott csomagolásra helyezett teher nem megoszló, az egymásra helyezett csomagolások pozíciói eltérőek lehetnek, így az adott csomagolás ellenálló képessége a nyomóigénybevétellel szemben, jelentősen csökken.

A dinamikus halmazterhelés a szállítás során ébred a halmazolt rakományokban. Azonban ebben a jelenségben nem csak a halmazterhelés játszik szerepet, ugyanis a rakfelületről származó rázkódások és ütések teszik dinamikussá az alsóbb szinteken ébredő halmaznyomást. A halmazban szállított csomagolások esetében létrejöhet a „halmazrezonancia” jelenség, amikor minden egyes következő csomag rezonanciába kerül az előzővel, aminek a következtében az egyes rakat szintek pattogva elválnak egymástól, ami az egyes csomagok esetében egy ismétlődő ütés jelenséget eredményez. Ezt szemlélteti a 2.23. ábra.





2.23. Ábra – Halmazolt rakományok dinamikus terhelése rázkódás hatására (Forrás: Saját szerkesztés)

Egy ilyen rendszerben az alsó csomagokra ható dinamikus terhelés több nagyságrenddel nagyobb lehet, mint a rajta nyugvó tényleges súly. A felső csomag szélsőséges ismétlődő ütéseknek és rezgéseknek van kitéve. Mivel a felső réteg egy egységgrakományban rövid ideig lényegében súlytalan, a kis oldalirányú terhelések, például egy oldalról érkező ütközés, " vagy mozgást eredményeznek.

### 3. Szakirodalmi háttér és a jelenlegi laboratóriumi vizsgálatok

#### 3.1. Korábbi kutatások eredményei

Az előző fejezetekben bemutattam, hogy a különböző szállítási folyamatok során a termékeket különböző rázkódások és ütések érhetik, amelyek könnyen terméksérüléshez vezethetnek. [54] Ezeknek az igénybevételeknek a paramétereit nem egyszerű feladat megjósolni, ugyanis számos változótól függ. A szállító járművek rakfelületén ébredő rázkódások és ütések befolyásolja, a szállítójármű típusa, a pálya minősége és állapota, a jármű felfüggesztésének típusa, valamint a jármű által szállított teher és annak megoszlása. [55] Ebből kifolyólag a csomagolási igénybevételeket vizsgáló kutatók a terepi mérések adatai alapján következtetnek egy adott szállítási formában felmerülő rázkódási és ütési igénybevételek tulajdonságaira. Ezeknek a kutatásoknak az eredményit foglalom össze a következő oldalakon a fent említett rázásokat befolyásoló paraméterek szerint.

Singh és szerzőtársai az észak-amerikai úthálózaton mérték fel egy lég-, illetve laprugós tehergépjármű rakfelületének rázkódási paramétereit egy a rakfelületre rögzített adatrögzítő berendezéssel, az eltérő felfüggesztés függvényében, és azt találták, hogy a légrugós felfüggesztés lényegesen alacsonyabb rezgés intenzitást okoz a szállítójármű rakfelületén. [56] Egy korábbi kutatásuk is hasonló eredményt hozott, abban a tanulmányban még jelentősebb különbség volt a két felfüggesztés között. [57] Garcia és szerzőtársa, mindezt annak függvényében is vizsgálták, hogy a jármű rakfelületének rázkódása, hogyan alakul üresen vagy megrakodva. A kutatásuk megerősítette az előbbi kutatók megállapításait a felfüggesztést illetően és kimutatták, hogy egy nyerges szerelvény esetében a felfüggesztésből fakadó rázkódások intenzitása légrugós felfüggesztés esetén 1,5 – 2 Hz között van, még a laprugós felfüggesztés esetén 4 – 5 Hz. A kutatás megállapította azt is, hogy üresen futás esetén a rakfelületen magasabb intenzitású rázkódások ébrednek. [55]

A kutatók felmérték a vasúti szállítások során keletkező rázkódások paramétereit is. Singh és szerzőtársai Indiában és Észak-Amerikában felmérték a vasúti kocsik rázkódási intenzitását és összehasonlították az eredményeket az iparági csomagolás vizsgálati szabványok vasúti rázóvizsgálati spektrumával. A felmért vasúti kocsik rázkódásintenzitása a valóságban az alsó frekvenciatartományban (1 – 5 Hz) 10 – 70-szer nagyobb intenzitást mutatott, mint a szabványokban előírt vizsgálati spektrum. A kutatásuk eredménye arra is rávilágított, hogy a vasúti szállítás során és a teherautókon jelentkező jelentős rázkódási szintek eltérő frekvenciatartományokban figyelhetők meg. [58] Egy későbbi kutatásban a két ország között

létrejövő intermodális szállítás során is vizsgálták a rázkódási és ütési igénybevételeket, ami alapján elmondható, hogy a konténer közúti és vasúti szállítása során jelentős ütési igénybevételeknek van kitéve [59] Chonchenchob és szerzőtársai Tájföldön vizsgálta a vasúti rázkódási eredményeket, ami alapján egy vizsgálati spektrumot fejlesztett az ott szállított csomagolások vizsgálatára. Zhao és szerzőtársa, valamint Zhu, a vasúti szállítások során fellépő véletlenszerű rázkódások nem-normális eloszlásból származó tulajdonságait vizsgálta, valamint kidolgozott egy szimulációs eljárást a csomagolások válaszreagenseire [60], [61]. Böröcz és szerzőtársa közép-európai vasútvonalakon mérte fel a rázkódási szinteket egy adatrögzítő mérőműszer segítségével. Megállapították, hogy a 10 Hz feletti rázkódások intenzitása ebben a régióban elmarad a fent említett kutatás során mért indiai és észak-amerikai felmérésekben vizsgált rázkódás intenzitásoktól, ami jobb pályaminőségnek tudható be. A kutatás igazolta Zhao állítását is, miszerint a vasúti kocsikon mért véletlenszerű rázkódások, nem-normális eloszlást mutatnak. [62]

A csomagolásokat érő rázkódásokat a légi szállítás során is vizsgálták a korábbi tanulmányokban. Ilic és szerzőtársai nem kimondottan a csomagolás szempontjából vizsgálták különböző repülőgépek rázkódási viszonyait, ám az általuk felmért adatok hasznos képet adnak repülőgépek rázkódási paramétereiről, amelyek akár a csomagolásvizsgálatok során felhasználhatóak [63]–[65]. Singh és szerzőtársai egy légiszállításnál használatos konténer (ULD -Unit Load Device) rakfelületére erősített adatrögzítő segítségével rögzítette a repülés során mért rázkódási intenzitásokat és megállapították, hogy az ULD-k reptéri anyagmozgatása és légi szállítása során mért rázkódások, eltérnek az alkalmazott csomagolás vizsgálati eljárásoktól, ezért azok fejlesztése szükséges. [66] Dunno és szerzőtársai felmérték a rázkódási igénybevételeket a légcsavaros és sugárhajtóműves meghajtású repülőgépek rakodóterében, megállapították, hogy a legjelentősebb gyorsulások a fel- és leszállás alatt keletkeznek, azonban repülési magasságon mért rázkódási szintek alacsony intenzitásúak, továbbá csomagolásvizsgálatokhoz alkalmazható PSD burkológörbéket fejlesztettek ki a mérések alapján, közben rámutatva arra, hogy jelenlegi szabványokban szereplő vizsgálati PSD-k jelentősen eltérnek a valóságban mérhető rázkódások jellégétől. [67], [68] A következő néhány kutatás, nem konkrétan a légiszállítás során keletkező rázkódásokra fókuszál, hanem az előző fejezetben bemutatott omni-csatorna ellátási lánc expressz kiszállításainak igénybevételeire. Ugyanis, ilyen esetben a termékeket légi szállítás igénybevételével juttatják el a felhasználási pontra. Ezekben a tanulmányokban egy adatrögzítő műszert helyeztek a feladott csomagokba, amelyek a teljes út során rögzítették a csomagban ébredő gyorsulásokat, ezek alapján

megállapították, hogy a csomag mérete nincs hatással a reptéri anyagmozgatás esetén bekövetkező ütési igénybevételek nagyságára, a folyamat automatizáltságából fakadóan. A csomagolás vizsgálatának ejtés vizsgálatának alkalmazandó magasságaira ajánlást tettek a felmért adatok alapján [69]–[71].

Amint az előző fejezet statisztikai is bizonyítja, a csomagolt termékek jelentős mennyiségét tengeri úton is szállítják, ugyanis a hosszú gyakran földrészekén átívelő ellátási láncokban különböző intermodális szállítási láncokon haladnak át a csomagolt termékek. Ezeknek a részét képezik a tengeri szállítások, ahol a csomagolt termékeket konténerekbe helyezve továbbítják. A korábbi tanulmányokban a kutatók a konténerbe rögzített adatrögzítő mérőműszer segítségével megállapították, hogy a tengeri utazás során a vertikális rázkódások alacsony szinten vannak, azonban a kikötői anyagmozgatás során nagy mennyiségű ütési esemény következik be [59], [72]–[74].

Természetesen a legtöbb felmérés és kutatás a közúti szállítás során fellépő rázkódási és ütési igénybevételek felmérésére irányult az elmúlt években. Ahogy fejezet elején már bemutattam a közúti szállítás esetén a rázkódási igénybevételek szempontjából jelentős körülmény a szállítójármű felfüggesztés és terhelése, ahogy a fejezet korábbi részében már leírtam. Zhou és szerzőtársai ugyan ezek a paraméterek függvényében vizsgálta a közúti tehergépjárműveken ébredő rezgésintenzitásokat, és amellett, hogy igazolta a korábban leírtakat, megállapította, hogy a nagyobb utazási sebesség magasabb rezgés intenzitást eredményez a felfüggesztés típusától és a terheléstől függetlenül [75]. A sebesség növekedésének hatását Park is igazolta egy Koreában végzett felmérés esetén [76]. Jones és szerzőtársai a szállított alma sérülésének a mértékével igazolták, hogy a legnagyobb rázkódások a rakfelületen a hátsótengely fölött és után keletkeznek [77]. Lu és szerzőtársai egy négytengelyes teherautó rakfelületén végeztek méréseket Japánban, és arra következtetésre jutottak, hogy a rázkódások mellett, jól detektálható ütési igénybevételek is jelentkeznek a szállítójármű rakfelületén, amiért a laboratóriumi csomagolásvizsgálatok esetén érdemes a rázóvizsgálatok mellett, ütés vizsgálatokat is végezni a csomagolt termékek vizsgálata esetén [78]. Pidl és Böröcz Magyarországon rögzítette a rázkódásokat egy nyergesszerelvény rakfelületén és capstrum analízissel elemezte az adatokat. Megállapításuk szerint a jármű rakfelületén nem keletkeznek stacionárius gerjesztések, valamint rávilágítottak arra tényre, hogy a rossz útminőség miatt az 5 Hz alatti frekvenciatartományban a PSD szintek akár ötször magasabbak is lehetnek, mint a jó minőségű utakon [79]. Garrido és szerzőtársai Spanyolországban vizsgálták az útminőség hatását (autópálya és főút) a rakfelület rezgésintenzitására, ők két intenzitás nagyságú PSD

burkológörbét határoztak meg (a magasintenzitású:  $0,21 G_{rms}$ ; az alacsony:  $0,15 G_{rms}$ ) és azt javasolják, hogy amennyiben a teljes szállítási útvonalon a főút aránya eléri avagy meghaladja 7%-ot akkor a magas intenzitású PSD görbét érdemes választani a csomagolásvizsgálathoz, amennyiben nem, akkor az alacsony intenzitásút [80]. Az útburkolat hatását vizsgálták Jarimopas és szerzőtársai, ahol azt találták, hogy burkolatlan utak eredményezik a legmagasabb rázkódási intenzitásokat, amelyet a beton és aszfalt utak követnek [81]. Chochenchob és szerzőtársai kis méretű szállítójárművek, köztük 3,5 tonna alatti kistehergépjármű, Pick-up, valamint személyautó rakfelületének a rázkódásait mérték és elemezték. Azt találták, hogy a  $G_{rms}$  szintek a Pick-up teherautókban a legmagasabbak, ezt követi a személygépkocsi, majd végül a kereskedelmi áruszállító furgonok és kisméretű áruszállító teherautók [82]. Böröcz és szerzőtársa kutatásokat végzett a kisméretű maximum 3,5 tonna összerhelésű teherautók rakfelületének rázkódási paramétereinek feltérképezésére. A Magyarországon végzett kutatásukban, amely során több típusú szállítójármű rakfelületének felmérését végezték. A tanulmányukban megállapították, hogy a legmagasabb PD szintek függőleges irányban jelentkeztek 2 – 3 Hz és 13 – 16 Hz között eltérően a vonatkozó szabvány előírásaitól, ahol ezek a csúcspontok 3 – 5 Hz és 15 – 24 Hz. Továbbá azt találták, hogy 15 – 20 Hz -es frekvencia tartományban a korábbi kutatásoktól eltérően, magasabb oldalirányú mozgások jelentkeztek, valamint, hogy 5 és 18 Hz között a mért PD szintek meghaladták a gyakorlatban használt csomagolásvizsgálati szabványokban előírt időgyorsított és felerősített rázóprofil PD szintjeit [83], [84]. Fontos tény azonban, hogy ezekben a kutatásokban, szinte kivétel nélkül a rakfelület által gerjesztett rázómozgásokat mérték fel a kutatók, [85] azonban az ellátási láncokban történő szállítási tevékenységek során a gazdaságos raktér kihasználás érdekében a csomagolt termékeket leggyakrabban egymásra helyezve, halmazoltan szállítják. Ennek következtében, a rakfelület által gerjesztett rázkódások és ütések, a csomagolások erősítési tényezőjétől függően felerősíthetők, vagy csillapíthatják a felsőbb szintekre ható rázkódási intenzitások mértékét. [1]

Az utóbbi években több kutató is vizsgálni kezdte a halmazolt csomagolások mechanikai környezetét. Wang és Fang az egymásra helyezett hullámpapír dobozok rezgési viselkedését vizsgálta szinuszos és véletlen gerjesztésű rezgésszimuláció során [86]. Fang és szerzőtársa az egymásra rakott hullámpapír dobozok érintkezési felületén fellépő erő maximumainak statisztikai jellemzőit vizsgálta véletlenszerű rezgés esetén. [87] Godshall a kutatásokban a halmazolt hullámpapírdobozok csillapítási és átviteli karakterisztikáját vizsgálta [88]. Paternoster halmazolt sör csomagolások esetén mérte fel a rázkódási intenzitásokat a halmazolt csomagolásokon. A belga úthálózaton végrehajtott terepi mérés során sörös hullámpapírlemez

dobozokon, valamint műanyag rekeszeken mérte a válaszrezgéseket. Arra a megállapításra jutott, hogy a halmazolt csomagok felső szintjei felé haladva a rázkódási intenzitások emelkednek, amely hatására a 25 Hz felett a műanyag rekeszek esetében a rázkódás intenzitás akár a bemeneti gerjesztés kilencszerese is lehet. Azonban, 25 Hz felett a sörökkel töltött hullámpapapírlemez dobozok csillapították a bemenő gerjesztéseket [89]. Roulliard, valamint Bernard és szerzőtársak matematikai modelleket állítottak fel a halmazolt csomagolások rezgéstulajdonságainak a becslésére. [90], [91] A halmazolt rakományok rázkódási és ütési paramétereinek felmérése további kutatási lehetőségeket nyújt, hiszen a fentebb ismertetett, a szállítójármű rázkódását befolyásoló tényezőkön kívül, a halmazolt csomagolások felsőbb szintjein ébredő rázkódásokat az alsóbb sorokban elhelyezkedő csomagok tulajdonságai is befolyásolják. Az egyes csomagolóeszközök és csomagolóanyagok ilyen jellegű hatásainak kutatása, lehetőséget biztosít a laboratóriumi rázkódásvizsgálatok fejlesztésére.

A rázkódási igénybevételek előrejelzését tovább bonyolítja az e-kereskedelmet kiszolgáló ellátási láncok bonyolultsága, amelyek esetében a csomagolt termékek végső kiszállítása általában expressz csomagküldő szolgáltatásban, futárszolgálatok igénybevételével történik.[92] Ebben a formában lebonyolított kiszállítások esetén számos csomagkezelésből fakadó ütési esemény következik be [93], valamint nem ismert vagy becsülhető, sem a csomag pozíciója és rögzítése, sem a szállítás közben a csomagra nehezedő halmaznyomás. Ennek a szállítási környezetnek a csomagolásokra ható rázkódási és ütési igénybevételeinek felmérésével több kutató is foglalkozott. A kutatások során egy adatgyűjtő eszközt használtak, amely rögzítette a szállítási és anyagmozgatási környezetből fakadó gyorsulásokat, amelyeknek az eredményeit a légi szállítások szakirodalmi feldolgozásnál ismertettem. [69], [70] Itt szeretném megjegyezni, hogy az itt leírt kutatásokban, a teljes kiszállítási folyamat során keletkezett gyorsulási események rögzítésre és elemzésre kerültek. A futárszolgálatok a kiszállítási tevékenységük során, általában kisméretű szállítójárműveket alkalmaznak, amelyek rakfelületének rázkódási tulajdonságai jelentősen eltérnek a nagy méretű teherautók, nyerges szerelvényeken a korábbiakban ismertetett rázkódási tulajdonságaitól. [82], [83], [93]–[97].

A fentiekben bemutatott kutatások is megmutatták, hogy a laboratóriumi gyakorlatban jelenleg általánosan alkalmazott, szabványos vizsgálati eljárások nem fedik le jól a földrajzi különbségekből fakadó, különböző infrastruktúrát használó változatos szállítójárművek rázkódási különbségeit [51]. Ennek következtében, a csomagolások optimális megtervezéséhez és szállítási láncot a legrealisztikusabban reprezentáló csomagolásvizsgálati protokollok kialakításához és fejlesztéséhez, elengedhetetlenül szükségesek a széles körben, számos

szállítójárművön, valamint rakomány típuson végzett, rázkódások és ütési igénybevételek terepi felmérése.

### **3.2. Rázkódások és ütések laboratóriumi vizsgálatai**

A 2.2. fejezetben ismertetett csomagolás tervezési folyamat utolsó lépése a bevezetni kívánt csomagolási rendszer védelmi képességének a laboratóriumi vizsgálata. A szállítási csomagolás vizsgálatok eredményei információt nyújtanak a csomagolástervező szakembernek a tervezés sikerességéről és lehetőséget biztosítanak arra, hogy a megtervezett csomagolási koncepciók (amennyiben több is van) közül, a megfelelő védelmet biztosító és legköltséghatékonyabb változat kerüljön bevezetésre. Erre a célra, az ipari gyakorlatban, a laboratóriumi vizsgálatok elvégzésére különböző szabványok állnak rendelkezésre. Ezek közül a széleskörben alkalmazott és nemzetközileg elfogadottak a következők:

- ASTM D4169 [98]
- ASTM D7386 [99]
- ISTA sorozatok, amelyek közül a teljes disztribúciós környezetet szimulálók:
  - ISTA 3A [100]
  - ISTA 3B [101]
  - ISTA 3E [102]
  - ISTA 6 (AMAZON, Fedex, stb) [103]

Az itt felsorolt szabványok a teljes disztribúciós környezet szimulálására nyújtanak vizsgálati előírásokat, így tartalmazznak klimatikus vizsgálatokat, halmazterhelés vizsgálatokat, horizontális ütköztető vizsgálatokat, valamint ejtés és rázkódás vizsgálatokat. A legtöbb eljárásban, a várható ellátási lánc függvényében egyes vizsgálatok opcionálisak. Azonban, az ejtés és rázóvizsgálatok mindegyik előírás kötelező elemei, hiszen nem létezik olyan disztribúciós környezet, ahol ezek az igénybevételek ne fordulnának elő nagy valószínűséggel.

Az ASTM D4169 különböző vizsgálati programokat ajánl a szállítási csomagolások vizsgálatára a várható ellátási lánc és a vizsgálandó csomag paramétereinek alapján, megkülönböztetve különféle szállítási módokat, csomag méreteket és rendszereket. Ez a szabvány tartalmazza a legtöbb vizsgálati paramétert. Az ASTM D7386 szabvány az expressz csomagküldő szolgáltatások disztribúciós környezetének vizsgálatának követelményeit tartalmazza. Az ISTA 3E a homogén egységcsomagok, míg a 3B az LTL rakományok vizsgálatának előírásait tartalmazza. Az ISTA 3A és 6 (AMAZON, Fedex, Samsclub) protokollok az ASTM D7386-hoz hasonlóan az expressz csomagküldő szolgálatok és az e-

kereskedelmi ellátási láncok igénybevételeihez igazított vizsgálati előírásokat tartalmazzák. Ugyan az ISTA sorozat szabványai az ipari gyakorlatban a legnépszerűbbek a közérthetőségük és elérhetőségük miatt, azonban tudni kell, hogy az ISTA által nyújtott procedúrák paraméterei, szinte kivétel nélkül az ASTM D4169 és ASTM D7386 szabvány követelményein alapulnak, így ezekben az egyes rázóvizsgálati spektrumok paraméterei a fent említett előírásokban megegyeznek. Ezért a következőkben az utóbbi két szabványban meghatározott rázóvizsgálati spektrumokat mutatom be.

Az ASTM D4169 közúti rázóvizsgálati PSD (Steel Spring Truck) spektruma, a laprúgós szállítójármű rakfelületének gerjesztőmozgását hivatott szimulálni (1 – 200 Hz), amely a fejezet korábbi szakaszában bemutatott terepi mérések alapján indokolt. Ez, három biztonsági szintből áll, amelyek frekvencia töréspontjai megegyezők, azonban a töréspontok PD szintjei eltérőek, így a következő összesített  $G_{rms}$  teljesítménnyel rendelkeznek: 1. biztonsági szint: 0,7  $G_{rms}$ , 2. biztonsági szint: 0,54  $G_{rms}$ , 1. biztonsági szint: 0,4  $G_{rms}$ . A vizsgálat során ezeket a szinteket úgy kell alkalmazni, hogy egy egyórás vizsgálat során 5 percig az első, 20 percig a második, a fennmaradó 40 percben a harmadik biztonsági szintű vizsgálati profillal kell csomagolásokat tesztelni. A három biztonsági szintű spektrum közül az ISTA előírások csak a második, középső intenzitású spektrumot alkalmazzák. Ezt a spektrumot a későbbi fejezetben bemutatott kutatásomban is alkalmazom és a PSD töréspontjait, valamint PSD görbét is bemutatom.

Az ASTM D7386 PSD (Pick-up and delivery) spektruma (1 – 200 Hz) az expressz csomagoló szolgáltatások furgonos kiszállításának környezetét kívánja szimulálni. Ennek a spektrumnak az összesített  $G_{rms}$  teljesítménye 0,46  $G_{rms}$ . A spektrum a paramétereit a 6. fejezetben, a futárszolgálati kiszállítások rázkódási igénybevételeivel foglalkozó kutatásomban ismertetem.

A rázóvizsgálati időtartalmak 30 és 240 perc között változhatnak a ASTM D4169 szabvány szerint. Az ASTM D4169 nem nyújt a teszt idővel kapcsolatban több információt, de az ISTA előírásokban szerepel a tesztidőre vonatkozó összefüggés, amely szerint a vizsgálati idő a következő képen számítandó ki (3.1):

$$\text{Vizsgálati idő} = \frac{\text{Várható szállítási útvonal hossza}}{8} \quad (3.1)$$

Ahol, a várható szállítási útvonal hosszát kilométerben adjuk meg, és a vizsgálati időt percben kapjuk. Megjegyzem, ez nem vonatkozik az ASTM D7386 futárszolgálati rázóvizsgálat teszt idejére. Ott, irányonként 30 perc az előírt vizsgálati idő.



Ebből is látszik, hogy a rázóvizsgálati spektrumok nem ismert erősítési tényezőt alkalmaznak annak érdekében, hogy a rázkódási körülmények gazdaságosan lehessen szimulálni a laboratóriumban. Azonban az nem ismert, hogy mekkora az erősítési tényező a vizsgálati spektrumok esetében. Kipp kutatása alapján a teszt időtartam ( $T_t$ ) és intenzitása ( $I_t$ ), valamint a terepi felmérésből származó rázkódás összesített  $G_{rms}$  intenzitása ( $I_o$ ) és a felvétel ideje között ( $T_o$ ), a következő összefüggés áll fent (3.2): [104]

$$I_t = I_o \sqrt{\frac{T_o}{T_t}} \quad (3.2)$$

Ez alapján megadható egy vizsgálati spektrum erősítési tényezője egy adott terepi felmérés rázkódási intenzitására vonatkozóan.

Az említett csomagolásvizsgálati szabványok és eljárások azonban nem veszik figyelembe a halmazolt csomagolási egységek különböző szintjein ébredő eltérő rázkódási és ütési hatásokat. Ugyan számolnak azzal, hogy a csomagolások halmazoltan kerülnek kiszállításra, és ezért tartalmaznak olyan követelményeket, amelyek a csomagolásra nehezedő halmazterhelést kívánják szimulálni a rázóvizsgálatok során, azonban, ez csak arra szolgáltat információt, hogy a vizsgált csomagolás képes-e ellenállni a ránehezedő halmaznyomásnak és megvédeni a termékeket a szállítás során. Mivel a felsőbb szinteken elhelyezett, az alsó csomagolásokon keresztül átadott rázógerjesztések tulajdonságai nem ismertek és jelenleg kevés erre irányuló kutatás létezik. Ennek okán egy halmazolt csomagolási rendszer védelmi képességeinek vizsgálatához a teljes töltött és halmazba rendezett csomagolási rendszert kellene vizsgálni. Ennek az ipari gyakorlatban számos korlátja van, ugyanis a legtöbb esetben nem áll rendelkezésre a megfelelő mennyiségű termék és csomagolás prototípus, vagy a teljes halmaz tömege és magassága meghaladná a rázóasztal teherbírását és a rendelkezésre álló helyet.

A laboratóriumi rázóvizsgálatok során a szinuszos gerjesztés nem szokványos, azonban a fent említett szabványok tartalmaznak szinuszos jelalakú vizsgálati eljárást. Itt egy fixen beállított amplitúdóval (2,54 mm) kell gerjeszteni a csomagolt terméket és addig emelni a rázkódás frekvenciáját, ameddig a csomagolás elemelkedik a rázóasztal felületéről, tehát fázison kívüli mozgás jön létre. Ez a vizsgálat úgynevezett ismétlődő ütési igénybevétellel szembeni ellenállóképességét vizsgálja a termék-csomagolási rendszernek.

Az ütési igénybevételek vizsgálatára a csomagolásvizsgálati szabványok lejtőpályás, horizontális ütési igénybevételeket írnak elő, valamint különböző pozíciókból és magasságokból történő ejtés vizsgálatokat. A fent említett szabványok azonban ütőasztallal vagy rázóasztal segítségével előállított ütés vizsgálatokat nem írnak elő. Amennyiben ilyen vizsgálatokat is megkövetel a disztribúciós környezet, akkor általában az MSZ EN 60068-2-27 [105] szabvány alapján kerül elvégzésre a vizsgálat. Ugyan, ez a szabvány nem kimondottan csomagolásvizsgálatokra vonatkozik, de alkalmazható ezekre a vizsgálatokra is. A szabvány félszínusz jelet, 6 – 11 msec időtartamot ajánl szállítási vizsgálatok esetén.

A fejezet korábbi részében ismertetett kutatások többsége a járművek rakfelületén ébredő rázkódásokra fókuszál és hasonlítja össze a laboratóriumi rázóvizsgálatok paramétereivel, ám azt nem vizsgálják, hogy a rakfelületen sokszor többretegben elhelyezett csomagolási egységeken, ezek függvényében, milyen válaszrezgések ébrednek. Ezért az értekezésem következő fejezeteiben bemutatott kutatásomban a halmazolt rakományokon ébredő ütési és rázkódási események paramétereit vizsgálom, különböző laboratóriumi rázóasztalon végzett mérésekkel, valamint terepi felmérésekkel, egy kistehergépjármű rakterébe halmazolt csomagolási rendszer esetén.

## 4. Félmerev műanyag falú, halmazolt hordók csillapítási tulajdonságainak mérése és elemzése ütési igénybevétel esetén

Ebben a fejezetben a félmerev falú, halmazolt műanyag hordók ütési igénybevétel esetén mért válaszgyorsulásainak a csúcserkére és csillapítási fázisára vonatkozó kutatást mutatom be. A kutatásom tárgyának azért választottam a műanyag hordókat, mert egy olyan széleskörben használt csomagolóeszközzel van szó, amelyet a korábbi kutatások során még nem vizsgáltak. Továbbá, nem találtam olyan korábbi tanulmányt, ami kimondottan a rögzítés és a töltési fok hatását vizsgálta ütési igénybevétel esetén, műanyag, halmazolt csomagolóeszközökön. A halmazolt csomagolási egységek dinamikus viselkedését olyan változók mentén vizsgálom, mint a töltési magasság, a bemeneti gerjesztési szint (G-ben), valamint a csomagolási egységek szabad vertikális elmozdulásának korlátozása racsnis heveder segítségével. A kutatás eredményei megmutatják, hogy ezeknek a műanyag csomagolóeszközök milyen mértékben erősítik vagy csillapítják a felsőbb rakat szintek felé a rázóasztal által gerjesztett ütési igénybevételeket.

### 4.1. A laboratóriumi mérés során alkalmazott minták és eszközök

A mérések elvégzéséhez polietilén (PE) anyagból készült hordókat alkalmaztam, amelyeket három rétegben halmazba rendeztem a rázóberendezésen. A hordók űrtartalma 60 liter, átmérője és magassága 400 mm és 800 mm, valamint önsúlya 4,1 kg volt. A hordók falának átlagos vastagsága a termék adatlap szerint 5 mm. A mérés elvégzéséhez a hordókat polietilén műanyag granulátummal töltöttem fel, az egyik vizsgálat során félig, majd teljesen. A mintákat és a töltőanyagot az 4.1. ábra szemlélteti.



4.1. Ábra – A méréshez használt mintacsomagolás, a.) félig töltve, b.) teljesen töltve (Forrás: Saját ábra)

A mérés elvégzésére és a halmazolt mintacsomagolások viselkedésének megfigyelésére egy szervohidraulikus rezgésvizsgáló rendszert (HV-60 Vibration Test Machine, L.A.B., USA) használtam. A rázóvizsgáló berendezés vezérlését, valamint a gyorsulás adatok gyűjtését egy VR9500 rezgésvezérlő berendezés, valamint a hozzá tartozó VibrationView2017 szoftver (Vibration Research Co., USA) végezte. A rázóberendezés vezérléséhez, valamint a halmazolt csomagolásokon ébredő válaszgyorsulások méréséhez PCB piezoelektromos gyorsulásmérőket használtam. A gyorsulásmérők a hordók oldalának függőleges középpontjára kerültek rögzítésre erős kétoldalú ragasztószalag segítségével. A 4.2. ábra a műanyag hordókból felépített kísérleti összeállítást szemlélteti a rázóasztalon, ahol az első gyorsulásmérő az alsó sorban lévő hordóra (a későbbiekben 1. Hordó), a második a középső (későbbiekben 2. Hordó), a harmadik pedig a felső hordóra (későbbiekben 3. Hordó) került felrögzítésre. A 4.2. ábrán a gyorsulásérzékelők helyzete is megfigyelhető.



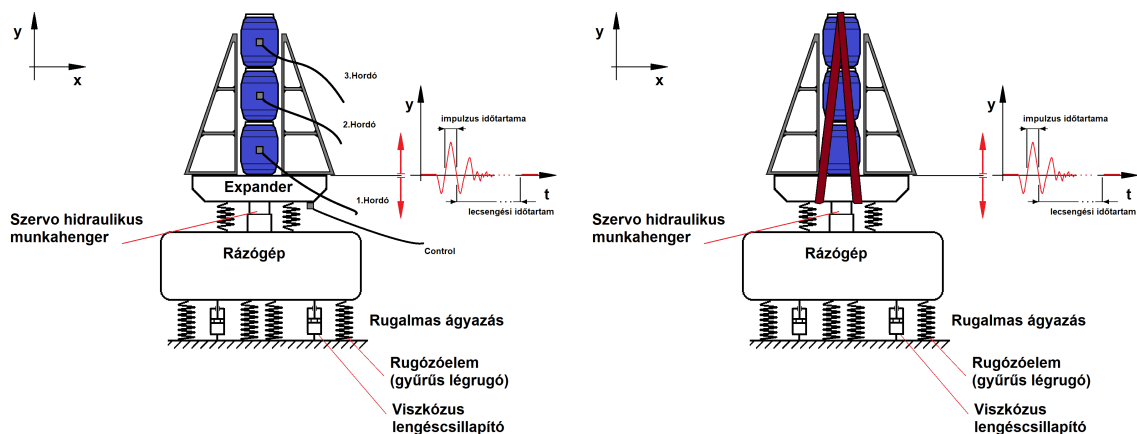
4.2. Ábra. – A halmazolt hordókból összeállított mérési rendszer (Forrás: Saját ábra)

#### **4.2. A mérés folyamatának bemutatása**

Az egymásra helyezett hordók viselkedésének megfigyelése érdekében három különböző változót változtattam a mérések során. Először a hordók töltési szintjét, a második mérési sorozat esetében a rögzítési módszerét, valamint az ütések csúcsgyorsulását.

Az első kísérletnél a hordók a teljes kapacitásukig kerültek megtöltésre, ebben az esetben minden egyes hordó súlya 32,5 kg volt, majd a második kísérletnél a hordók majdnem teljesen (99 %) megtöltésre kerültek, amikor súlyuk egyenként 65 kg volt. Elsőként rögzítés nélkül

került a minta rakat felhelyezésre a rázóasztal közepére biztosítva a mintacsomagolások szabad függőleges mozgását, majd második körben a mintacsomagolások racsnis heveder segítségével rögzítésre kerültek a rázóvizsgálóberendezés tárgyasztalához. A mintarakat keresztirányú mozgásának, valamint a halmazolási pozíciójuk biztosítása érdekében, a minták alumínium kerettel lettek körülvéve. Itt fontos megjegyezni, hogy az alumínium keret nem érintkezett közvetlenül az egymásra helyezett csomagolással így nem befolyásolta a csomagolásokon ébredő gyorsulás adatokat. A kísérleti körülmények sematikus modellje a 4.3 a.) és 4.3 b.) ábrán látható.



4.3. Ábra – A rögzítés nélküli és hevederrel rögzített mintacsomagolások mérési körülményeinek vázlatos ábrázolása a) és b) (Forrás: Saját szerkesztés)

Minden mérési összeállítás esetén, mind a félig és teletöltött, mind a rögzített és rögzítetlen esetben egyforma ütésimpulzus sorozattal gerjesztettem a mintarakatot. Az ütésimpulzus fő alapvető paraméterei, amelyek megadása szükséges a mérés kivitelezéséhez: az ütési impulzus sebességváltozása, csúcsgyorsulása és az alakja. [106] Az előző fejezetben bemutatott felmérések eredményei alapján, az ütés vizsgálatok kivitelezése a következő paraméterek beállítása mellett lett végrehajtva:

Az ütésimpulzus alakja: félszínusz

Az ütésimpulzus időtartama: 6 msec

Az ütésimpulzus csúcsgyorsulása: 0,5 G, 1 G, 1,5 G, 1,5 G, 2 G és 2,5 G.

A rázóasztal vezérlő és adatgyűjtő egységével a válaszgyorsulási adatok az impulzusok kezdetétől számított 1000 msec hosszúságban kerültek rögzítésre, amely során a mintavételi frekvencia 10 000 Hz volt, 5000 Hz-es aluláteresztő szűrővel szűrve az adatokat a túlzott zaj elkerülése érdekében.

Itt azonban meg kell jegyezni, hogy a rázóasztal vezérlője nem tudta a beállított csúcsgyorsulás értékeket pontosan regenerálni, különösen abban az esetben amikor a mintacsomagolások nem kerültek rögzítésre a vizsgáló berendezéshez. Így, bár gerjesztések a

3 dB-es tűréshatárokon belül maradtak, nem feleltek meg tökéletesen a mérések tervezése során leírtak szerint kívánt amplitúdónak.

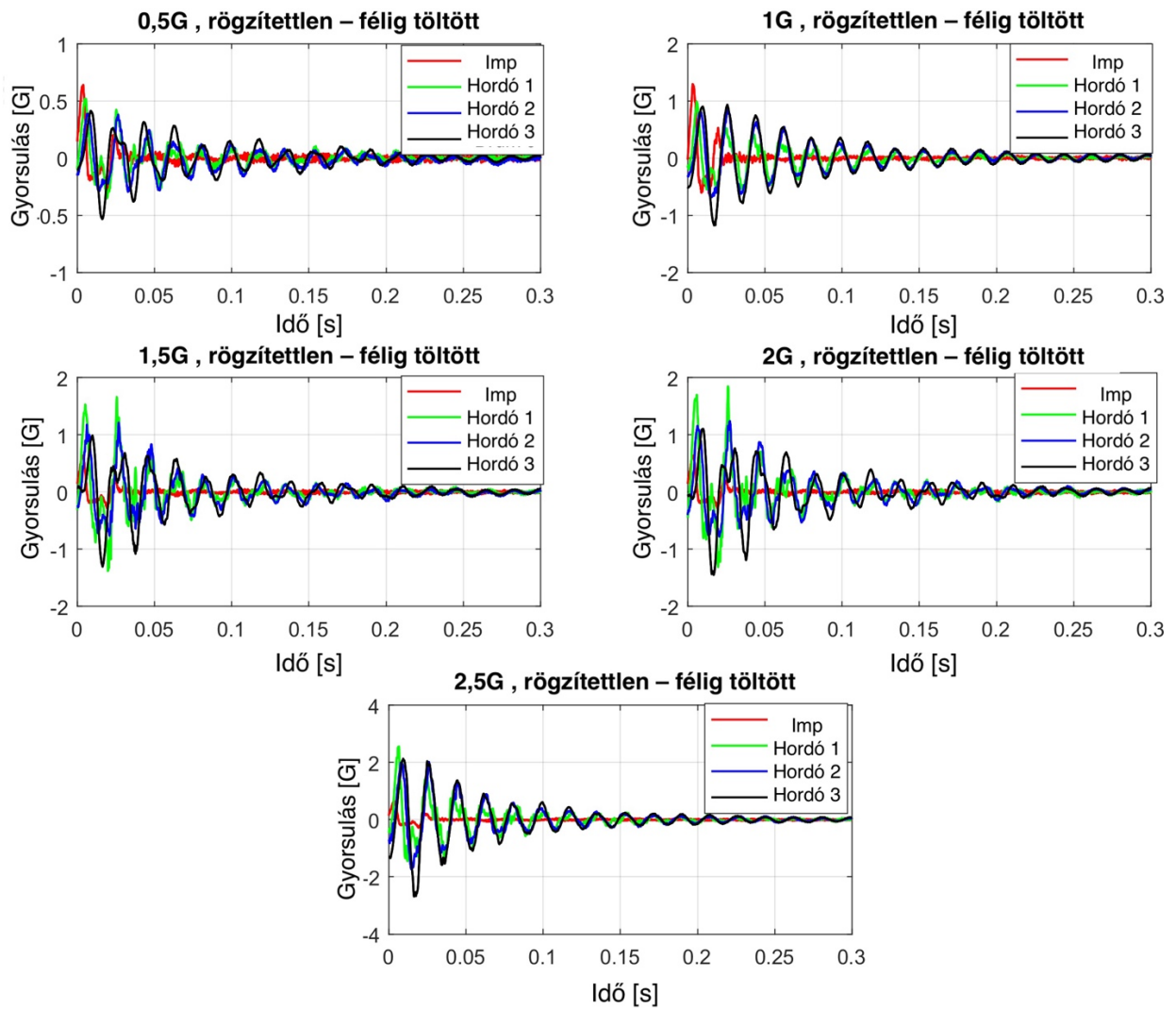
Végezetül, mivel a műanyagból készült félmerev csomagolások nagyon érzékenyek lehetnek a klimatikus változásokra, amikor rugalmasági vagy szerkezeti viselkedéseiket vizsgálják, ezért a vizsgálati minták 24 órán keresztül 23 C° és 50 %-os relatív páratartalom mellett előkondicionálásra kerültek klímakamra segítségével.

### **4.3. A mért gyorsulás értékek bemutatása és elemzése**

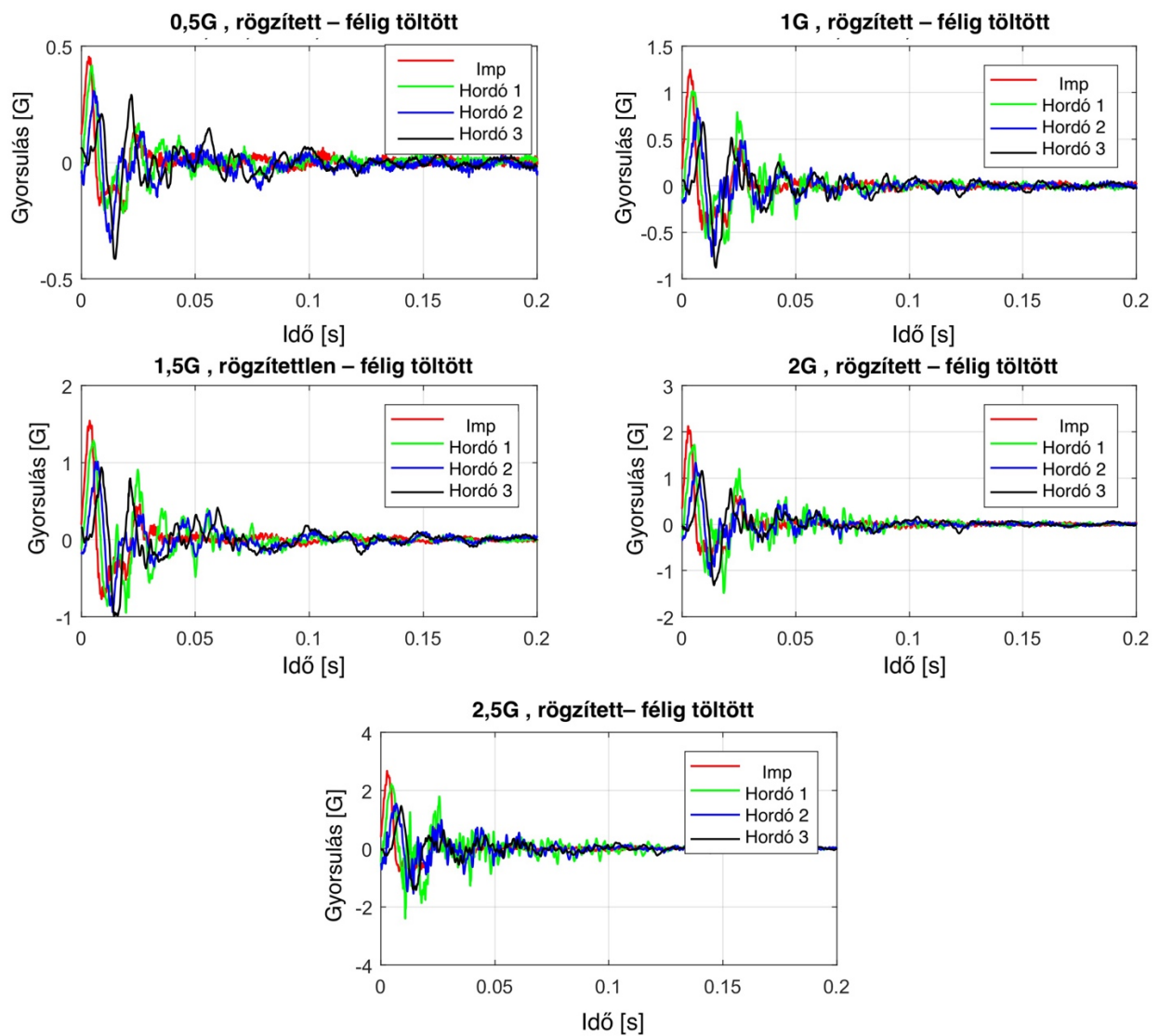
A hordókon és a rázóasztal felületén mért gyorsulásokból származó adatokat MATLAB R2021 szoftver segítségével elemeztem. A felmért adok gyorsulás – idő grafikonjait 4.5 – 4.7. ábra mutatja be. Az ábrák alapján következtetéseket lehet levonni arra vonatkozóan, hogy a rétegek időben hogyan vették át a rázóasztal gerjesztését. Az ábrák azt mutatják, hogy az első mért maximális pozitív amplitúdó közelít a gerjesztés amplitúdójához. Azonban egyes rétegek nem érik el a maximális amplitúdót közvetlenül a gerjesztési időszak után, hanem csak később jelentkeznek.

A teletöltött hordók esetében a nagyobb amplitúdójú gerjesztéseknél érdemes megfigyelni, hogy a nagyfrekvenciás jelkomponens mikor kezd jelentős szerepet játszani a jelképzésben. A teletöltött hordók nagyon sajátosan viselkednek, különösen rögzített esetben. Ez a nagyfrekvenciás jel 20 msec jelentkezik (már 1 G-s ütésnél is látható) és kisebb intenzitású a rögzített esetben. Ezek a nagyfrekvenciás jelek viszonylag rövid idő alatt csillapodnak, bár nagy amplitúdóval rendelkeznek. Ez megfigyelhető a nem rögzített, félig töltött hordók esetében is, ahol a nagyon magas frekvenciájú komponensek dominálnak a válaszgyorsulás jelében, ami 8 G gyorsulást okoz az 1. hordón kb. 20 és 50 msec között a csillapítási időszakban. Ezek a magas G értékek azonban csak nagyon rövid ideig tartanak, és emellett magas frekvenciával rendelkeznek, így nem okozhatnak deformációt a hordókban.

Rögzített esetekben a félig és a teljesen megtöltött hordók mozgása jól láthatóan nincsen fázisban egymással. Továbbá megállapítható, hogy a félig töltött hordók esetében a csillapítási időszak rövidebb, ha a hordók a rázóasztalhoz vannak rögzítve, de a teljesen töltött hordók esetében ez az állítás nem egyértelműen megállapítható.

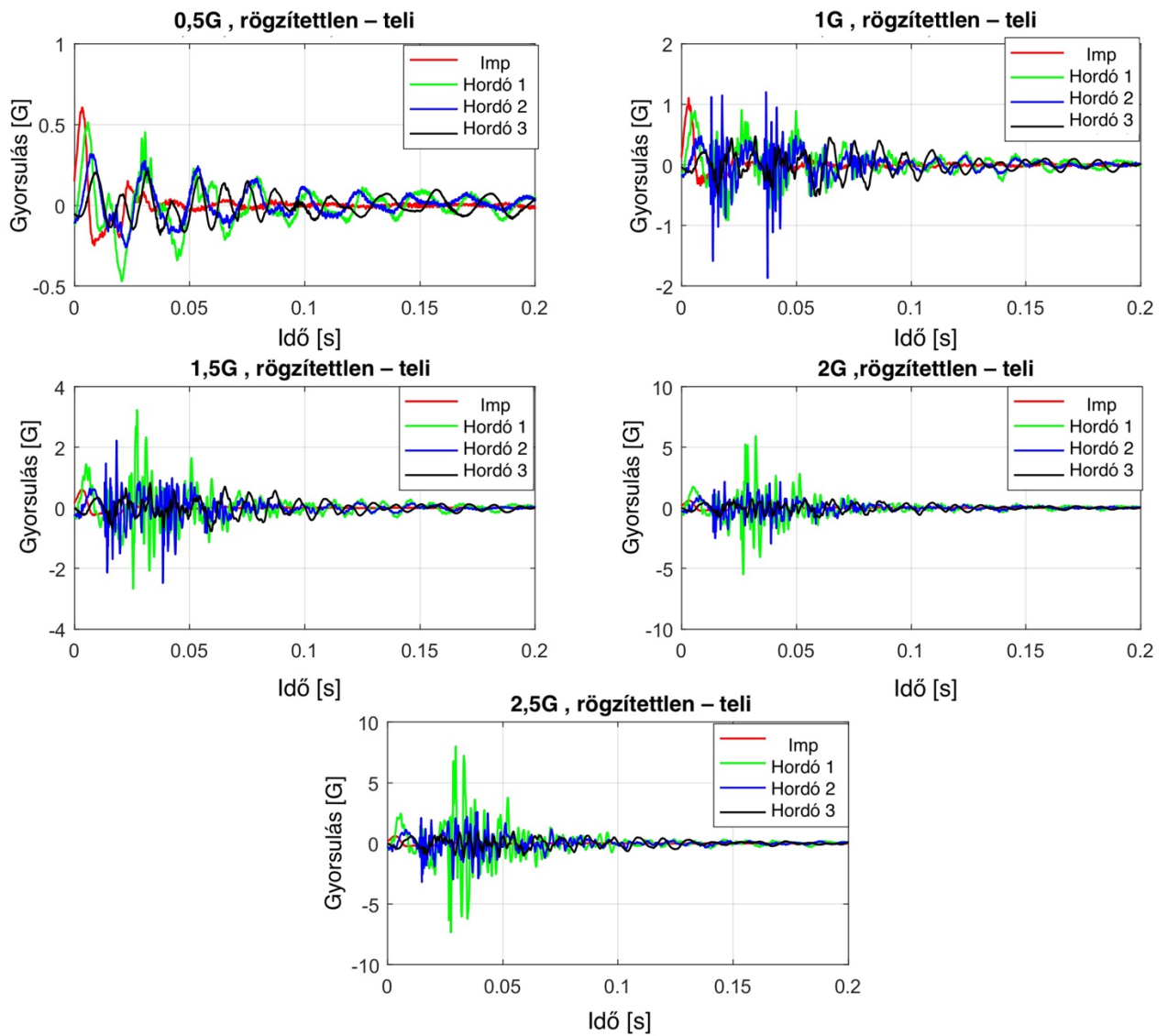


4.4. Ábra – Félig töltött, nem rögzített hordókon mért válaszgyorsulások (Forrás: Saját szerkesztés)

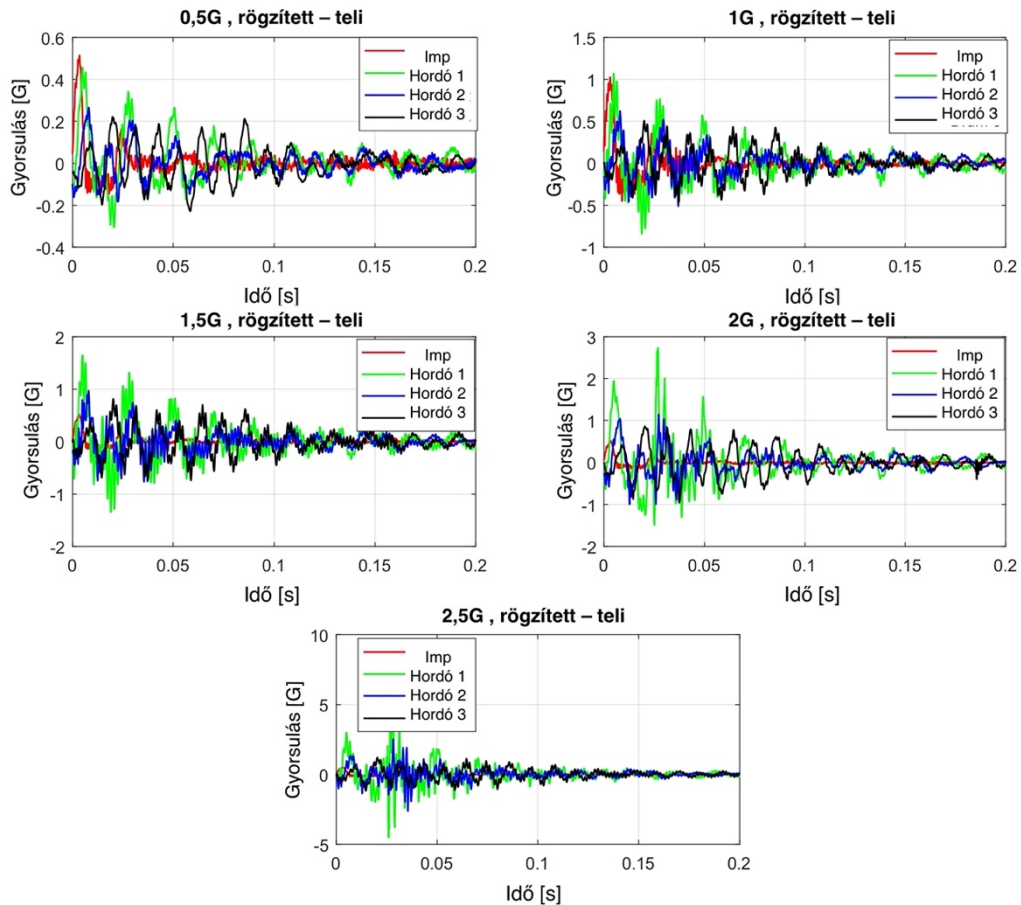


4.5. Ábra – Félig töltött, rögzített hordókon mért válaszgyorsulások (Forrás: Saját szerkesztés)





4.6. Ábra – Teljesen megtöltött, nem rögzített hordókon mért válaszgyorsulások (Forrás: Saját szerkesztés)



4.7. Ábra – Teljesen megtöltött, rögzített hordókon mért válaszgyorsulások (Forrás: Saját szerkesztés)

Az egymásra helyezett félmerev csomagolások viselkedésének megértése érdekében megvizsgáltam a hordók első maximális csúcsgyorsulási értékeit az ütésimpulzus után, és ezeknek a csúcsértékeknek a késését a rázóasztalonon mért csúcsgyorsulás időpontjához viszonyítva. Az alábbi 4.1. – 4.4. táblázat ezeket az adatokat mutatja be.

4.1. táblázat – Csúcsyorsulás amplitúdók és időkései az impulzus indítása után, rögzített, félig töltött, egymásra halmazolt hordók esetében (Forrás: Saját szerkesztés)

		Rázóasztal			1. Hordó		2. Hordó		3. Hordó	
Elvárt Impulzus	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]
<b>1 G</b>	1,246	3,6	1,017	4,7	0,8306	6,7	0,6815	9,3		
<b>1,5 G</b>	1,545	3,7	1,288	5,3	1,014	7,2	0,9367	8,8		

<b>2 G</b>	2,122	2,7	1,72	5,4	1,331	6	1,156	8,8
<b>2,5 G</b>	2,675	2,7	2,228	4,5	1,55	6,7	1,466	8,9

4.2. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkései az impulzus indítása után, rögzítetlen, félig töltött, egymásra halmazolt hordók esetében (Forrás: Saját szerkesztés)

	<b>Rázóasztal</b>		<b>1. Hordó</b>		<b>2. Hordó</b>		<b>3. Hordó</b>	
<b>Elvárt Impulzus</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>
<b>0,5 G</b>	0,6385	3,8	0,5177	5,1	0,3856	6,6	0,4112	8,8
<b>1 G</b>	1,291	3,2	0,9872	5,8	0,803	8,4	0,8988	9,8
<b>1,5 G</b>	1,595	3,5	1,528	5,1	1,177	6,2	0,9867	9,8
<b>2 G</b>	2,143	2,8	1,696	5,9	1,156	6,3	1,101	10
<b>2,5 G</b>	3,645	3,1	2,553	6,6	1,99	7,7	2,127	9,3

4.3. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkései az impulzus indítása után, rögzített, teli, egymásra helyezett halmazolt hordók esetében (Forrás: Saját szerkesztés)

	<b>Rázóasztal</b>		<b>1. Hordó</b>		<b>2. Hordó</b>		<b>3. Hordó</b>	
<b>Elvárt Impulzus</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>	<b>Amp [G]</b>	<b>Késés [msec]</b>
<b>0,5 G</b>	0,5141	3,5	0,4565	5	0,2656	8	0,1031	8,7
<b>1 G</b>	1,025	3,1	1,069	4,9	0,623	8,1	0,2111	8,7
<b>1,5 G</b>	1,746	2,7	1,646	5,1	0,9687	8	0,3964	8,8
<b>2 G</b>	2,162	3,1	1,945	5	1,045	8,1	0,4194	8,8
<b>2,5 G</b>	2,866	3	2,996	5,1	1,334	7	0,6345	9

4.4. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkései az impulzus indítása után, rögzítetlen, teli, halmazolt hordók esetében (Forrás: Saját szerkesztés)

	Rázóasztal		1. Hordó		2. Hordó		3. Hordó	
Elvárt Impulzus	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]	Amp [G]	Késés [msec]
0,5 G	0,6053	3,4	0,5141	5,8	0,3173	7,1	0,2055	9,5
1 G	1,105	3,1	0,8892	5,8	0,477	8,5	0,2132	10,3
1,5 G	1,633	3,2	1,438	5,1	0,637	6,7	0,3452	10,1
2 G	1,979	2,8	1,728	5,2	1,006	8	0,4401	10
2,5 G	2,898	3,1	2,45	5,7	1,135	8	0,5959	10,5

Az elemzett adatok azt mutatják, hogy a csúcsgyorsulás késése nem függ a töltési szinttől és a gerjesztés amplitúdójától, mert mindkét töltési szint esetében a késleltetés egyforma volt, azonban a csúcsgyorsulások késése eltérő, amikor a hordók a rezgőasztalhoz rögzítettek vagy rögzítetlenek voltak. A rögzített esetekben a csúcsgyorsulások késésének az ideje a 3. hordón 5,2 és 6,1 msec között voltak, a nem rögzített dobozok esetében pedig ezek az értékek 6,1 és 7,4 msec között voltak.

A mérési eredményekből jól látható, hogy a hordókon mért csúcsgyorsulások értékei egyik esetben sem érik el a rázóasztal által leadott bemenő gerjesztés gyorsulását. A csúcsgyorsulások értékei a magasabb csomagolási rétegek felé haladva egyre csökkentek. Azonban az eredményekből az is megállapítható, hogy a hordók csillapítási tényezője a hordók töltési szintjétől függ. Amikor a hordók félig voltak megtöltve, a 3. hordón mért csillapítási tényező körülbelül 0,5 és 0,7 között volt, amikor a hordók a teljes kapacitásukig voltak megtöltve, ez a tényező 0,2 és 0,23 közé csökkent. A félig töltött, rögzítetlen hordók esetében a csillapítás alacsonyabb, mint a rögzített esetben, amikor a gerjesztés 0,5 és 1 G volt. A többi esetben a rögzítés nem befolyásolta a csillapítást.

#### 4.4. Megállapítások az eredmények alapján

Az eredmények azt mutatják, hogy az első pozitív amplitúdó maximuma gerjesztés után a magasabb rétegeken egyre inkább megközelíti az gerjesztés mértékét. A félig és teljesen megtöltött hordók mozgásai nincsenek fázisban egymással. A félig töltött hordók esetében a

csillapítási időszak rövidebb, amennyiben a hordók a rázóasztalhoz vannak rögzítve, de a teljesen teletöltött hordók esetében ez az állítás nem állapítható meg egyértelműen. A nagyfrekvenciás jelet a csillapítási fázisban mértük, ezekben a nagyfrekvenciás jelekben a gyorsulás eléri az eredeti gerjesztési szint többszörösét, de ezek a mért nagy gyorsulások valószínűleg nem okoznak károkat a csomagolási rendszerben.

Az egymásra helyezett hordókon mért csúcsgyorsulások késése nem függ a töltési magasságtól és a gerjesztés amplitúdójától, azonban függ a rázóasztalhoz való rögzítéstől. Az adatok azt mutatják, hogy a csillapítási tényező a hordók töltési szintjétől függ. A csillapítási tényező a töltési szinttől függően 0,2 és 0,7 érték között állapítható meg. [107]

## **5. Egységtrakományba halmazolt hullámpapírlemez dobozok mozgásának megfigyelése, laboratóriumi rázásszimuláció segítségével**

A szállítási csomagolások egyik legáltalánosabb formája az egységtrakomány, amely esetében általában egy rakodólaphoz, valamilyen elrendezés mellett hullámpapírlemez dobozokat halmazolnak egymásra. Az egységtrakományképzés esetén a legelterjedtebb eljárás, amikor a hullámpapírdobozokat, vagy nyújthatófóliás, vagy pántolós megoldással rögzítik a sík rakodólaphoz, ezért a fejezetben ismertetett kutatásomban is ily módon felépített egységtrakományokat vizsgálok. A több sorban halmazolt hullámpapírlemez dobozokból felépített egységtrakományok esetén felmerül, hogy az egységtrakomány különböző rétegeiben, a rakfelület által gerjesztett rázkódások más intenzitással jelentkeznek. Mivel a laboratóriumi szabványos rázóvizsgálatok során, a teljes egységtrakomány kerül vizsgálat alá, így a terméksérülések jó eséllyel megállapíthatók a vizsgálatok elvégzésével. Ez abban az esetben jelenthet problémát, ha egy olyan csomagolási rendszer vizsgálatát kell elvégezni, amelynél valamilyen okból kifolyólag nem áll rendelkezésre egy egész egységtrakományra elegendő termékminta. Ilyen esetekben, alkalmas lenne egy olyan rázó gerjesztést alkalmazni a vizsgálat során, amely a várhatóan a legintenzívebben rázkódó réteg intenzitását szimulálja. Így elegendő lenne csak az egységtrakomány egy rétegét tesztelni a rázóasztalon, így kevesebb termék mintával is, nagyobb biztonsággal állapítható meg az adott termék-csomagolási rendszer megfelelése.

Ebből a célból készült ez a kutatás, amely során két hullámpapírlemez dobozokból álló egységtrakomány rétegmozgásai kerültek megfigyelésre. A megfigyelés tárgya volt továbbá rétegmozgások különbözősége, annak a függvényében, hogy az egységtrakomány képzés nyújthatófóliával vagy pántszalaggal történt. Ugyanis, a két egységtrakományképzési eljárás során eltérő rázkódási intenzitások ébredhetnek az egységtrakomány egyes szintjein, így a kutatásból kinyert információk segítséget jelenthetnek, a rázkódásokra érzékeny termékek szállítási csomagolásának tervezésénél.

### **5.1. A laboratóriumi mérés körülményei**

Ahogy fentebb is említésre került, a rétegmozgások megfigyeléséhez két egységtrakomány került összeállításra, a különbség csak a dobozok rakodólaphoz való rögzítésének módja volt. Az egyik trakomány esetében a dobozok rögzítése pántszalaggal történt, míg a másik esetben

nyújthatófóliával. Mind a kettő rakomány egy EUR palettára (800x1200 mm) került felépítésre, melyen összesen 12 ötrétegű tető-feneklapolt hullámpapírlemez doboz (600x400x400 mm) lett elhelyezve, 4 oszlopban és 3 sorban elrendezve. A mintarakomány dobozai egyenként 15 kg PE granulátummal lettek megtöltve, ami fóliaszákban került a mintadobozokba. A 15 kg-os érték a ASTM D4169 szabvány [98] által használt, átlagos szállítási sűrűség faktorból került kiszámításra. Annak érdekében, hogy a doboz alján egységes legyen súlyeloszlás, a granulátummal töltött fóliaszák alá egy 5 cm vastag polisztirol habból készült lap lett behelyezve. A dobozok töltési módját az 5.1. ábra szemlélteti.

A töltőanyag PE (polietilén) granulátum volt fóliaszákban, és EPS (expandált polisztirol) elem az egységes súlyeloszlást biztosította a dobozok alján, vastagsága 50 mm volt. A vizsgálati minták az (5.2. ábrán) láthatók. A teljes egységcsomag mérete 1200x800x1360 mm volt, súlya pedig 206 kg.



5.1. Ábra – A vizsgált csomagolások töltési módja (Forrás: Saját ábra)

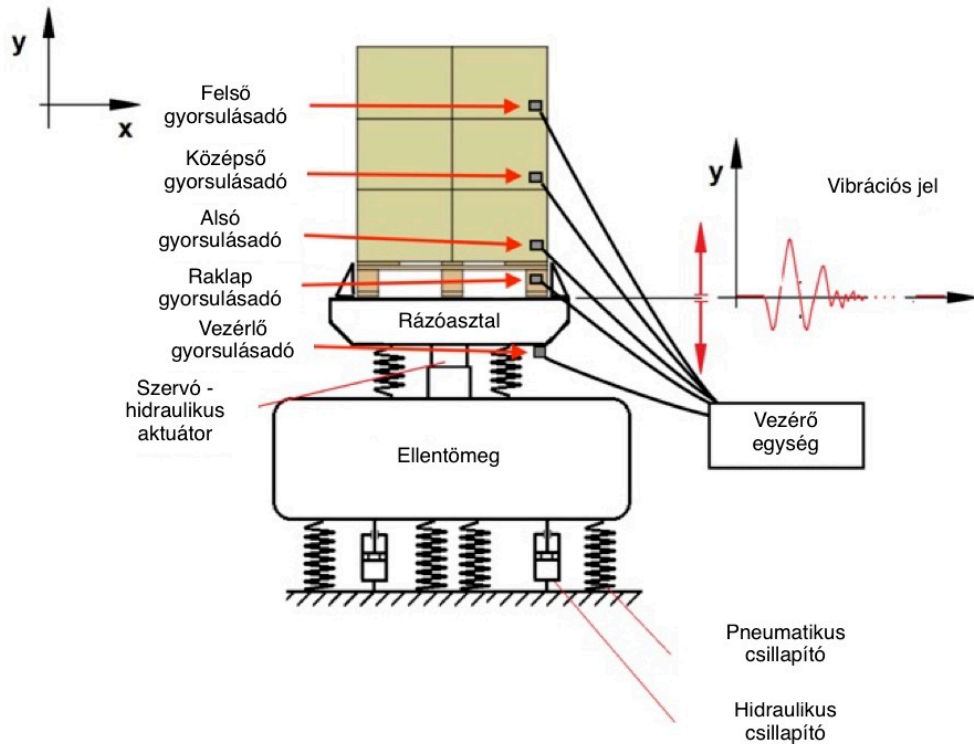
A mintarakomány méretei és alkotó elemei úgy kerültek kiválasztásra, hogy egy minél általánosabb egységcsomag felépítését tükrözze. Az egységcsomagok mérete 1200x800x13060 mm volt, a tömegük 206 kg. A nyújthatófólia szélessége 500 milliméter, vastagsága pedig 20 mikron volt. A pántoláshoz polipropilén pántszalag került felhasználásra, aminek a szélessége 15 mm, vastagsága 2 mm. A pántszalagok megfeszítése manuálisan történt. A megfigyelt mintarakományok az 5.2 a.) és 5.2. b.) ábrán láthatóak.



5.2. Ábra – Nyújtható fóliás a.) és pántolt b.) vizsgálati minta rakomány (Forrás: Saját ábra)

A mintarakományokat egy hidraulikus erőátvitelű rázóasztalon (LAB HV-60) vizsgáltuk. A laboratóriumi szimuláció alapvetően egy szabadságfokú rendszer, amely a várhatóan legintenzívebb gerjesztési irányt szimulálja. Nyilvánvaló, hogy ez a pályaegyenetlenségből származó függőleges irány lesz. A mérések során az egységtrakományok nem voltak rögzítve a rázóasztalhoz, így függőleges irányban szabadon mozoghattak, csak az oldal irányú elmozdulás volt korlátozva. A rázóasztal vezérléséhez magas érzékenységű egyirányú gyorsulásadó, a válaszgyorsulások méréséhez 4 db 3 irányú gyorsulásadó lett alkalmazva. A rázóasztal vezérléséhez, valamint a válaszgyorsulások méréséhez egy VR9500 rázóasztalvezérlő egység és VibrationView szoftver került alkalmazásra. A válaszgyorsulások méréséhez használt gyorsulásadók, az egységtrakomány minden rétegére, így a rakodólap oldalára, valamint a dobozok alsó sarkaira lettek felhelyezve, kétoldalú ragasztószalag segítségével. A mérések során a mintavételi frekvencia 1634 Hz volt. A gyorsulás adók pozícióit a 5.3. ábra szemlélteti.





5.3. Ábra – A gyorsulásmérők helyzete a mérés során (Forrás: Saját szerkesztés)

A vizsgálat során három eltérő rázó gerjesztés volt alkalmazva, egy szinuszos pásztázás, valamint kettő véletlenszerű rázkódás. Mind a nyújthatófoliás mind a pántolt egységgrakomány esetében ugyanolyan paraméterek mellett történtek a mérések. A véletlenszerű rázkódás szimulációk az ASTM D4169 [98] szabvány által előírt közepes intenzitású közüti rázó profilja szerint, valamint az ISTA 3A [100] légi szállításhoz alkalmazandó rázó profilja szerint történtek.

A szinuszos pásztázás paraméterei:

- Frekvencia tartomány: 2 – 200 Hz
- Amplitúdó:
  - 2 Hz és 4,41 Hz között 25 mm
  - 4,41 Hz és 200 Hz között 1 g

A véletlenszerű szabványos rázkódás szimulációk PSD (Power Spectral Density) burkológörbéinek töréspontjait az 5.1. táblázat mutatja be.

5.1. táblázat – ASTM és ISTA véletlenszerű rázásszimulációk PSD töréspontjai (Forrás: [99], [100] alapján)

ASTM D4169		ISTA 3A	
Frekvencia (Hz)	PD-szint ( $g^2$ /Hz)	Frekvencia (Hz)	PD-szint ( $g^2$ /Hz)
1	0,00072	2	0,00020
3	0,01800	12	0,01000
4	0,01800	100	0,01000
6	0,00072	300	0,00001
12	0,00072		
25	0,00360		
30	0,00360		
40	0,00072		
80	0,00360		
100	0,00360		
200	0,000012		
Teljes $G_{rms}$	0,542	Teljes $G_{rms}$	1,052

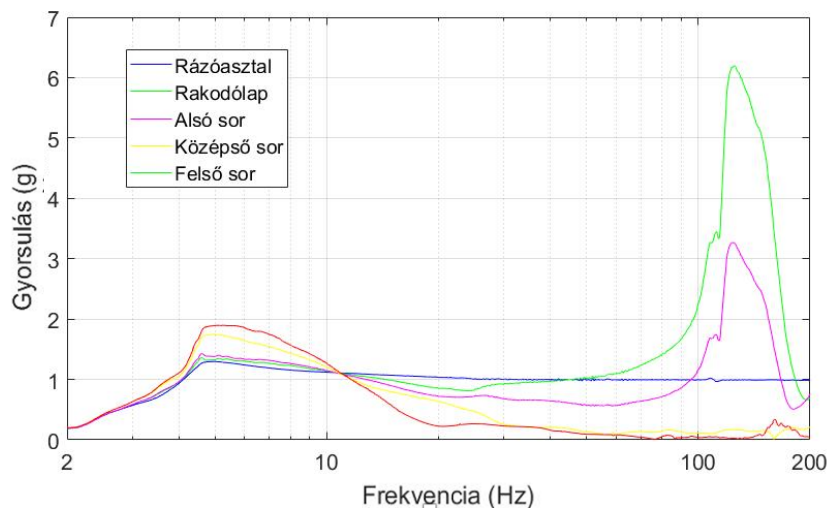
A rázás szimulációk során, a rázóasztal vezérlő egység (VR research 9500) a rázóasztal vezérlése mellett egyben adatgyűjtésre is alkalmas, így ennek az eszköznek a segítségével kerültek rögzítésre, a csomagoláson elhelyezett gyorsulás adókból származó válaszgyorsulás adatok. Az adatok kiértékelése a vezérlő saját szoftvere mellett (VibrationWiev 2016), Matlab R2017 szoftver segítségével történt.

## 5.2. A mérés eredményeinek bemutatása és elemzése

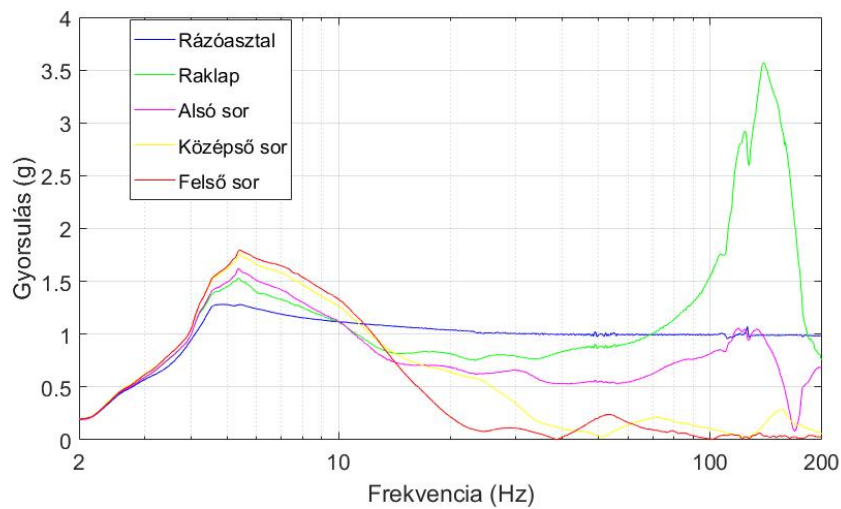
### 5.2.1. Eredmények szinuszos pásztázás esetén

Az alább látható ábrák, a mérés során felvett gyorsulás adatokból kerültek kirajzolásra. Az 5.4. és 5.5. ábra a szimuláció során mért gyorsulás - frekvencia függvényt ábrázolja, melyeken jól látszik a különböző rétegek eltérő mozgása. Az adatokból kiolvasható, hogy a legnagyobb eltérés a gerjesztéshez képest a legfelső, illetve a középső sorban található dobozokon volt mérhető a 4 – 10 Hz-es frekvencia tartományban. Amint az várható volt, a pántolt egységakomány esetén a gerjesztéstől való eltérés, valamivel alacsonyabb volt, mint a nyújtható fóliás változat esetében, ebben a frekvencia tartományban. 10 Hz fölött a felső és alsó soron mért gyorsulások erősen csökkentek és jóval elmaradtak a bemeneti gerjesztés, valamint a raklapon és alsó dobozon mért gyorsulás értékektől. 100 Hz felett mindkét rakomány esetében, a rakodólapon mért gyorsulás jelentősen magasabb a bemeneti gyorsulásnál, de az egységakomány felső, illetve középső során ez egyáltalán nem tapasztalható egyik rakomány esetében sem. A 100 – 180Hz-es tartományban a raklapon és az alsó rétegben a gyorsulási szintjei elérték voltak és 3,26 g-s és 6,12 g-s értéket mutattak az 1 g-s bemeneti értékekhez képest. Az alsó dobozok esetében, a nyújthatófóliás

rakományváltozatnál tapasztalható hasonló jelenség, de jóval alacsonyabb mértékben, mint a raklap esetében.



5.4. Ábra – Nyújtható fóliás egység rakományon mért gyorsulás-frekvencia függvény (Forrás: Saját szerkesztés)



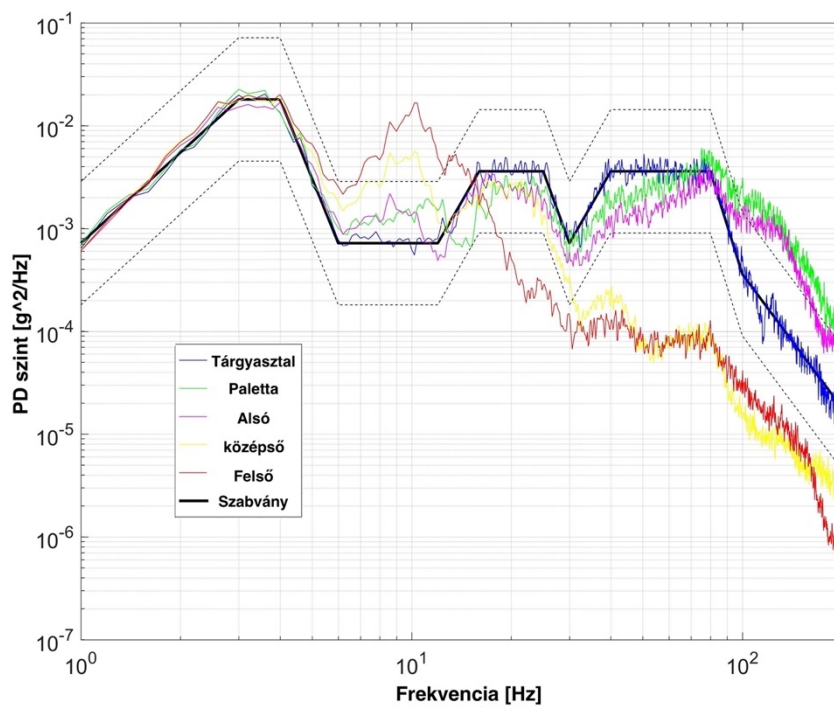
5.5. Ábra – Pántolt egység rakományon mért gyorsulás-frekvencia függvény (Forrás: Saját szerkesztés)

A pántolt változat esetében a 4 – 10 Hz-es frekvenciatartományban az előző kísérlethez hasonlóan minden válasz gyorsulás szintje meghaladta a bemeneti értéket, és 10 Hz felett a bemeneti érték alá csökkent, kivéve a raklap válasz rezgéseit. A legmagasabb rögzítési gyorsulási szint a raklapon volt, 3,53 g-s értékkel, 139,6 Hz-en.

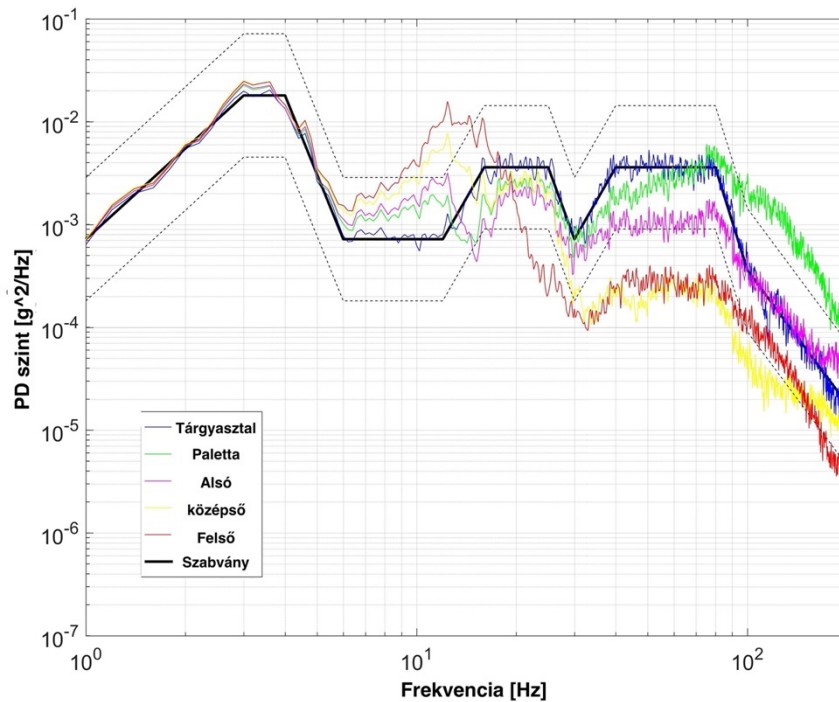
### 5.2.2. Mérési eredmények véletlenszerű gerjesztés esetén

A véletlenszerű gerjesztések az ASTM és ISTA csomagolásvizsgálati szabványokban előírt közötti, illetve légi szállítás szimulációjára alkalmazott rázkódás profiljával történtek. A 5.6. és

5.7. ábra szemlélteti a közúti rázkódás szimuláció során felmért adatokat. A mérések után megállapítható, hogy az egység rakomány középső és felső során mért válasz rezgések intenzitása a 6 – 16 Hz-es frekvencia sávban jóval meghaladta az rázóasztal rázkódási intenzitását, és a szabványban előírt tūrést. Az eltérés abban tapasztalható a két egység rakomány típus között, hogy az eltérés csúcspontja eltérő frekvencia pontban helyezkedik el. 16 Hz felett a felső és középső szint rázkódási intenzitása jelentős csökkenést mutat, és jóval elmarad a beviteli gerjesztés intenzitásától a fennmaradó teljes frekvencia tartományon. 100 Hz felett a raklapon és az alsó rétegben is megfigyelhető volt a felerősödött PD (Power Density) szint. Itt látható továbbá, hogy a pántolt egység rakomány alsó rétege volt az egyetlen, amely szinte a teljes frekvenciatartományban követte a bemenő gerjesztést.

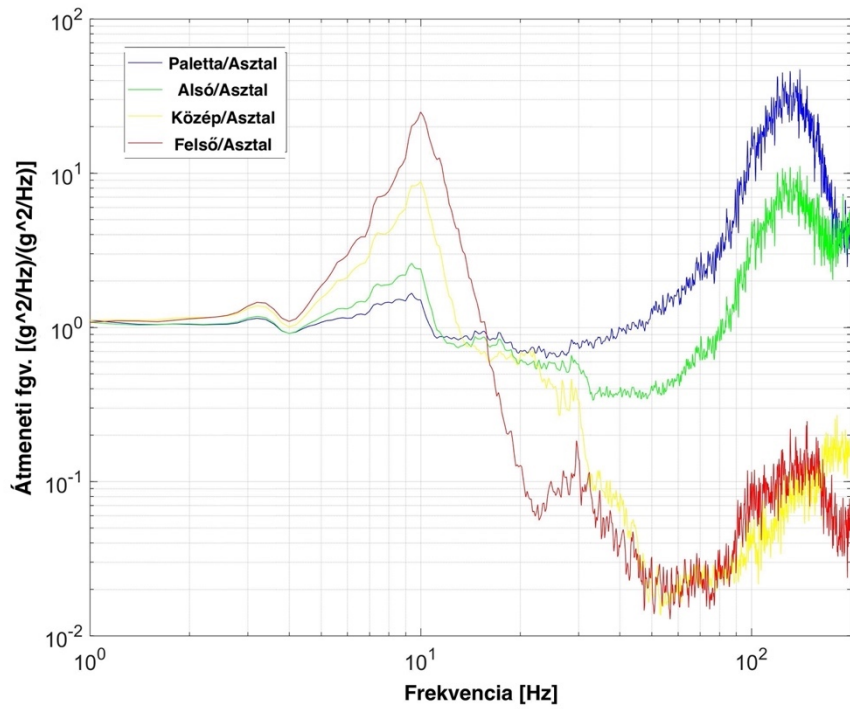


5.6. Ábra – Nyújthatófóliás egység rakományon mért PSD, ASTM D4169 közúti rázóprofil esetén  
(Forrás: Saját szerkesztés)

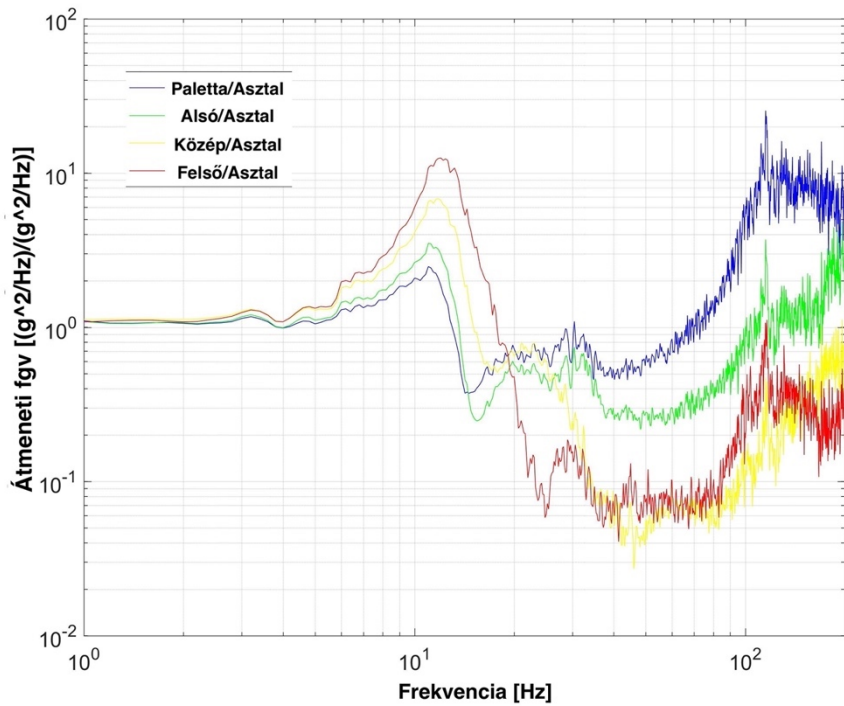


5.7. Ábra – Pántolt egységgrakományon mért PSD, ASTM D4169 közötti rázóprofil esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

Az 5.8. és a 5.9. ábra a két egységgrakomány rezgés válaszainak különbségeit mutatja, a mérés átmeneti függvény ábráin. Az átmeneti függvények csúcsa a nyújtható fóliás egységgrakomány felső rétegének az esetében 10,2 Hz-nél volt, itt a bemeneti és kimeneti rázkódás intenzitás aránya 24,91. Ezek az értékek a pántolt egység esetében 12,4 Hz és 12,54 voltak. A középső réteg átviteli értékei 8,83 Hz körül voltak, 6,83-as értékkel. A raklap és az alsó réteg nem tudja követni az asztal mozgását 80 Hz felett, az átviteli függvény csúcsa 130,8 Hz-nél volt, 38,44-es értékkel a nyújtható fóliával csomagolt egységgrakomány esetében, és 115,8 Hz-nél, 23-as értékkel a pántolt rakomány esetében.

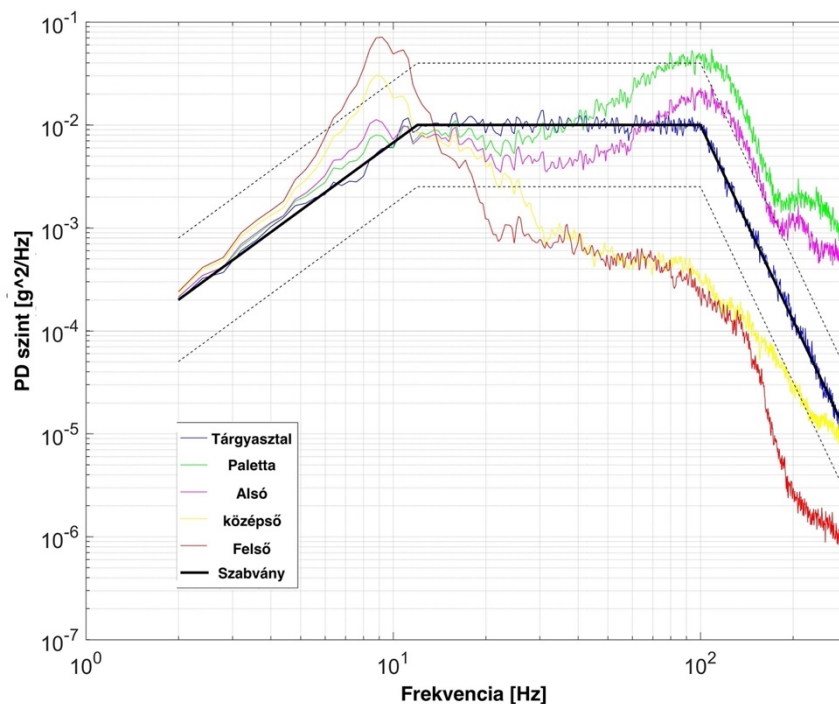


5.8. Ábra – A nyújthatófoliával csomagolt rakomány átviteli függvény diagramja közötti rázószimuláció esetén (Forrás: Saját szerkesztés)



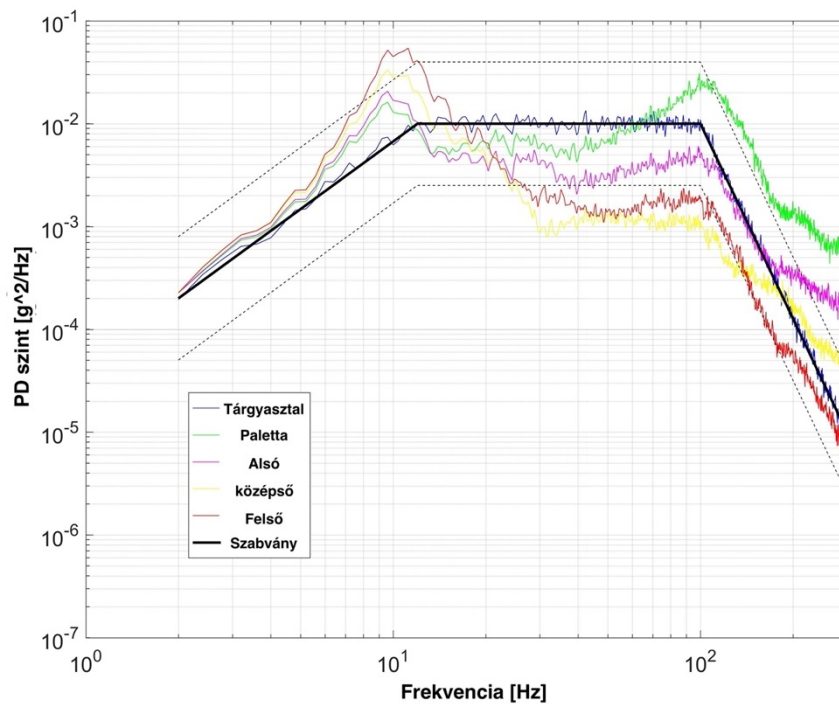
5.9. Ábra – A pántolt egység rakomány átviteli függvény diagramja közötti rázószimuláció esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

Végül az egységtrakományok rétegeibeiben fellépő gyorsulásokat felmértem az ISTA 3A légi szállítást szimuláló rázóvizsgálati eljárása szerint is, és hasonlóan a közúti rezgésszimulációhoz, ebben az esetben is kidolgoztam a mérési adatok alapján a rezgések PSD és az átmeneti ábráit. Ezek az 5.10. – 5.13 ábrán láthatóak. Az ASTM közúti véletlenszerű szimulációjához hasonlóan a felső és középső réteg mozgása lényegesen eltérő volt az alsó és a raklaprétegek mozgásától az 5 – 13 Hz-es frekvenciatartományban, ahol az alsó rétegek és a rakodólap tulajdonképpen lekövette a rázóasztal gerjesztését. Az közúti véletlenszerű és a szinuszos rezgésszimulációhoz hasonlóan a középső és a felső réteg gyorsulása 13 Hz felett jelentősen csökkent. A rétegeknek a viselkedése 130 Hz felett az egységtrakomány rögzítési típusától függően eltérőek voltak, ugyanis a nyújtható fóliával készített rakat alsó sorában és a raklapon mért PD-szintek 65 Hz-től jelentősen növekedtek. Továbbá megfigyelhető volt ebben az esetben, hogy a pántolt rakomány szintjei sokkal jobban együtt mozogtak, mint a nyújtható fóliás rakomány esetében.



5.10. Ábra – Nyújtható fóliás egységtrakományon mért PSD ISTA 3A légi szállítási rázóprofil esetén  
(Forrás: Saját szerkesztés)

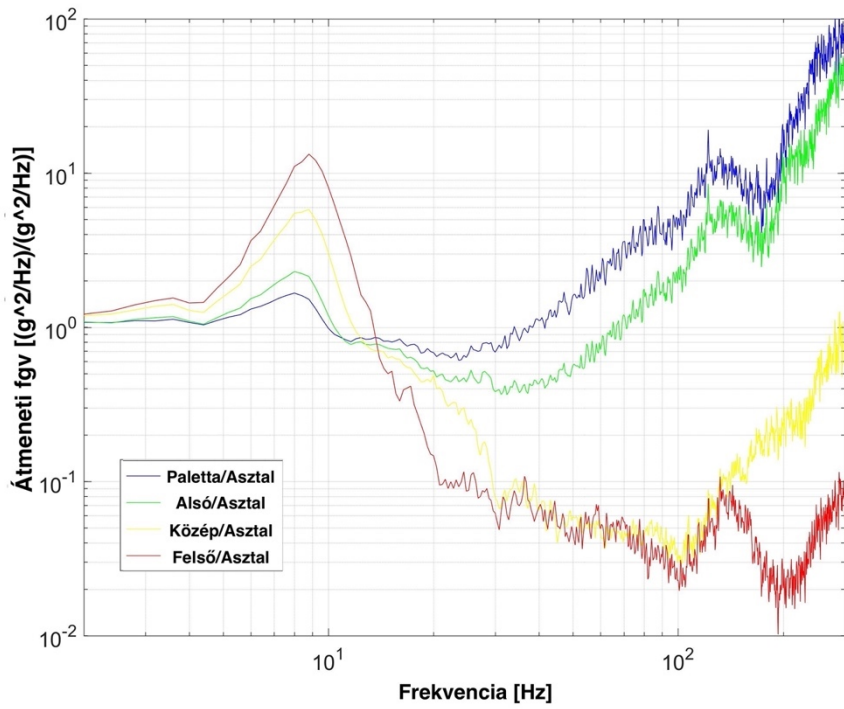




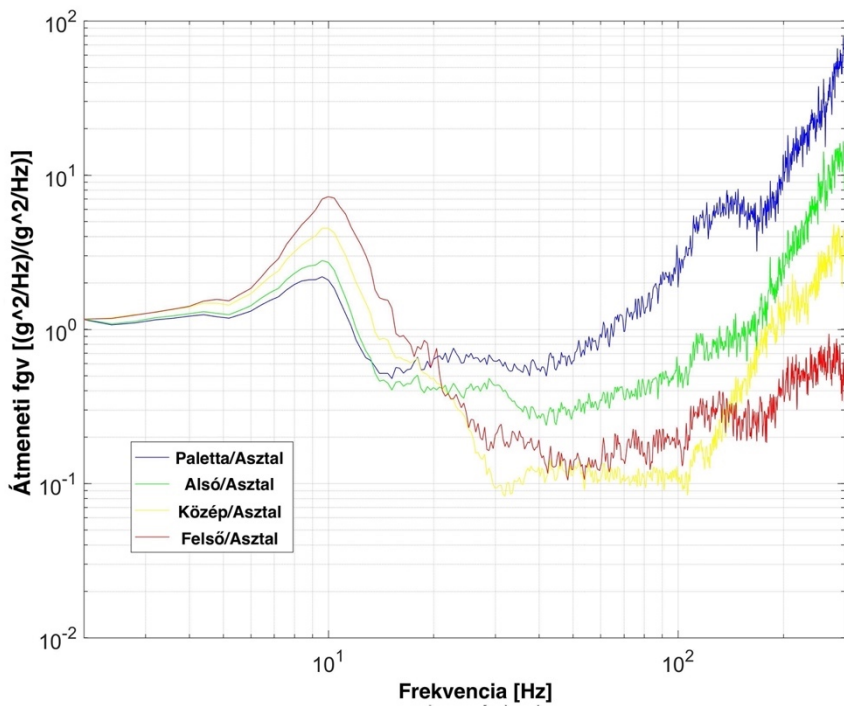
5.11. Ábra – Pántolt egységalkományon mért PSD ISTA 3A légi szállítási rázóprofil esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

A fent említett jelenséget a következő két ábrából (5.12. és 5.13. ábra) is ki lehet mutatni, amelyeken a rétegek és a rázóasztal bemenete közötti átmeneti arányt mutatom be. A két ábrát összehasonlítva azonnal látható a különbség a két változat rétegeinek mozgásában. Az átmeneti függvény csúcsa a nyújthatófóliával rögzített változat esetén a legfelső rétegben 8,8 Hz-nél volt, itt az átmeneti függvény értéke 13,28, míg a pántolt változat esetén ezek az értékek 10 Hz és 7,26 voltak. A középső réteg átviteli függvényének értékei ennél ugyan ezekben a frekvenciapontoknál 5,8 és 4,53 voltak. Az is jól látható, hogy a raklap és az alsó réteg 80 Hz felett nem tudja követni a rázóasztal mozgását, és ettől a frekvenciaponttól kezdve az átmeneti függvény értéke folyamatosan nőtt.





5.12. Ábra – Nyújtható fóliás egység rakományrakomány átviteli függvény diagramja légi rázószimuláció esetén (Forrás: Saját szerkesztés)



5.13. Ábra – Pántolt egység rakományrakomány átviteli függvény diagramja légi rázószimuláció esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

Itt szeretném megjegyezni, hogy a PSD-módszer a gyors Fourier-transzformációs (FFT) eljárás alkalmazásával történik, és ennek köszönhetően a PSD-profil a rezgés átlagos intenzitását tartalmazza a vizsgált frekvenciatartományban. Továbbá a bemutatott PD-szintek rezgésszimulációra való használata nem teszi ki a vizsgálat csomagolásokat szélsőséges rezgésszinteknek vagy tranzienseknek, például ütési eseményeknek, amelyek a valós szállítás során előfordulhatnak.

### **5.3. A mérés eredményeinek összefoglalása**

Az vizsgálatokból leszűrt eredmények azt mutatják, hogy az egységtrakományba halmazolt hullámpapáírlmez dobozok középső és felső rétegeiben, a rázás szimulációk során mérhető válaszgyorsulások 5 – 16 Hz-es frekvencia tartományban jelentősen magasabbak, mint a rázóasztal által gerjesztett rázkódás gyorsulásai, függetlenül a dobozok raklaphoz való rögzítésének módjától. Az átviteli függvények megmutatták, hogy ezen a frekvencia tartományon ugyan mind a két egységtrakomány esetében jelentős eltérés volt, de minden esetben a nyújthatófóliával rögzített egységtrakományok esetében volt mérhető nagyobb eltérés a gerjesztéstől. Ezeknek a maximuma az ASTM D4169 rázó profillal történő gerjesztés esetén volt mérhető, a nyújthatófóliás rakomány változat esetében 10,2 Hz-nél, itt a bemeneti és kimeneti rázkódás intenzitás aránya 24,91, ugyan ezek az értékek a pántolt egység esetében 12,4 Hz és 12,54. A legnagyobb eltérés az ASTM közúti rázóvizsgálati profiljával történő szimuláció esetében volt megfigyelhető. Ennek oka az lehet, hogy a pántolással történő rakományrögzítés jobban meg tudja akadályozni a függőleges irányú mozgásokat, mint a nyújtható fóliával összeállított csomagolás. Ezeknek az információnak a birtokában elmondható, hogy a rázkódásra érzékeny termékek csomagolástervezése esetén, kívánatosabb az egységtrakományok rögzítésénél a pántolást választani, a nyújthatófóliás rögzítés helyett. A kutatás eredménye alapján elmondható továbbá, hogy a 100 Hz feletti frekvencia tartományban a rakodólap mozgása minden esetben eltért a gerjesztéstől, továbbá jelentősen meg is haladta a gerjesztés intenzitását, azonban ez nem eredményezte a rakodólapon elhelyezett dobozok válaszgyorsulás értékeinek emelkedését. [108]–[110]

## 6. Rázkódási szintek felmérése és elemzése halmazolt, kisméretű csomagküldemények esetén a szabad elmozdulás függvényében

Az értekezésem ezen fejezetében, az expressz csomagküldő, futárszolgálati kiszállítások rázkódási igénybevételeinek felmérésre irányuló kutatásomat mutatom be. Ahogy a második, illetve a harmadik fejezetben is írtam, az ilyen kiszállítások során csomagok elhelyezkedése a szállítójármű rakterében nem előre jelezhető. Ezekben az ellátási láncokban, a csomagolt termékek eljuttatása a felhasználási pontra legtöbbször 3,5 tonna alatti össztömegű kistehergépjárművekkel történik. A kiszállítás során ezek rakterében sokszor teljesen eltérő méretű, és tömegű csomagokat rakodnak be a csomagok rakfelülethez való rögzítése nélkül. Ebből kifolyólag a termékek raktérbe rendezése bonyolult, így az egymásra halmazolt csomagok között szabad tér keletkezik, amely lehetőséget teremt a csomagok szabad mozgására a tér minden irányában. Ezt a körülményt szemléltetem a 6.1. ábrával.



6.1. Ábra – Csomagok elhelyezkedése a rakodótérben (Forrás: Saját fénykép)

Az 3. fejezetben feldolgozott szakirodalmakban csak olyan kutatásokkal találkoztam, amelyek vagy egy csomagot a teljes szállítási láncon végig küldve rögzítették a rázkódási igénybevételeket, vagy kistehergépjármű rakfelületének rázkódási tulajdonságait vizsgálták. Ebből kifolyólag, ebben a fejezetben bemutatott kutatásomban egy mérési rendszer felállításával mérem és elemzem egy kistehergépjármű rakfelületén és a benne felépített három kisméretű halmazolt csomagokon ébredő rázkódásokat függőleges, hossz- és oldalirányban. Továbbá, felmérem és elemzem ezeket a rázkódásokat a halmazolt csomagok hossz- és oldalirányú szabad elmozdulása esetén is.

A kutatásból származó adatok összehasonlíthatók a gyakorlatban alkalmazott szabványos rázóvizsgálati eljárásokkal, a csomagolások védelmi funkciójának vizsgálatára. Továbbá, a járművek rakfelületén történő általános rázógerjesztés ajánlott módszereiként is használhatóak. Az új adatok hasznos technikai információként szolgálhatnak a csomagolási mérnökök számára, a csomagolások szállítás előtti vizsgálati eljárásainak kidolgozásához, és csomagolások védelmi funkcióinak megtervezéséhez.

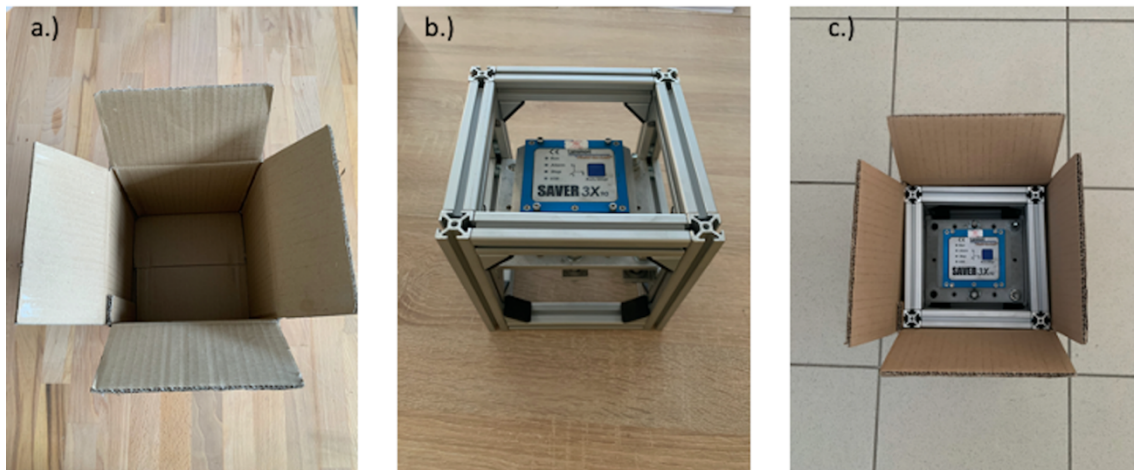
## 6.1. A mérés körülményeinek ismertetése

### 6.1.1. A méréshez használt eszközök

A terepi mérésekhez négy darab SAVER™ 3X90 adatgyűjtő készülék (Lansmont Corp., CA, USA) segítségével kerültek rögzítésre a gyorsulás adatok. A műszer úgy volt beállítva, hogy a függőleges irányú gyorsulások mellett a kereszt és hosszirányban fellépő gyorsulás adatokat is rögzítse. A négy darab SAVER adatgyűjtő eszköz közül egy közvetlenül a méréshez használt jármű rakfelületéhez volt rögzítve, még a többi adatgyűjtő a kisméretű hullámpapírlemez (HPL) dobozok geometriai középpontjába lett elhelyezve. A SAVER-ek dobozokban való rögzítéséhez alumínium ITEM profilból (©item Industrietechnik GmbH) készült, 20 x 20 mm keresztmetszetű merev kereteket alakítottam ki, amelyek biztosították az adatrögzítő stabil helyzetét a dobozokban. A doboz mérete és töltött tömege úgy került kiválasztásra, hogy az illeszkedjen az futárszolgálati igénybevételek laboratóriumi vizsgálatokat leíró ISTA 3A [100], valamint az ASTM D7386 szabványokban [99] specifikált kisméretű csomagolások kategóriájába. Az 6.1. táblázat tartalmazza a méréshez használt hullámpapírlemez dobozok és a SAVER adatgyűjtő beállításainak specifikációit. A méréshez használt mintacsomag összeállítását 6.2. ábra mutatja be.

6.1. táblázat – A mintacsomagolás adatai és SAVER-beállítások paraméterei (Forrás: Saját szerkesztés)

HPL dobozok specifikációja		SAVER adatrögzítő beállításai	
HPL típusa	35BC	Időzítő által felvett adatok	1 s
HPL tömege	742 g/m <sup>2</sup>	Ébresztési időköz	1 s
ECT értéke	9,0 kN/m	Felvételi idő	1.000s
BST értéke	1,685 kPa	Minta / sec	500 Hz
A doboz önsúlya	190 g	A minta mérete	500
A doboz mérete (hxsxzm)	180x180x195 mm	Frekvencia felbontás (PSD)	0,50 Hz
Az ALU-keret súlya	1,440 g	Anti-Aliasing frekvencia	200 Hz
Töltött tömeg	2,630 g		



6.2. Ábra – a) Hullámkarton, b) Alu-profil és c) A vizsgálathoz használt vizsgálati minta (Forrás: Saját fotó)

### 6.2.2. A mérés lebonyolításának körülményei

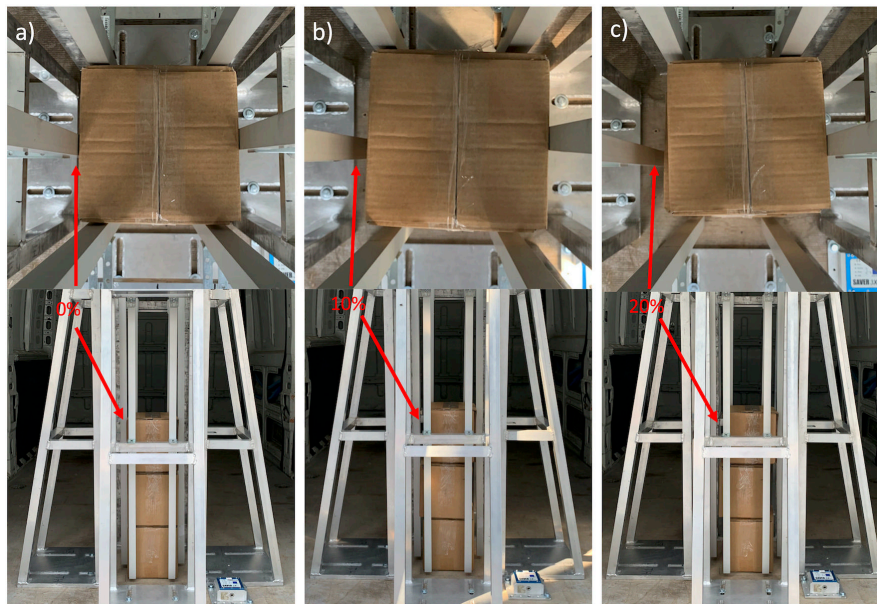
Az előző pontban összeállított mintacsomagolások három rétegbe halmazolva kerültek behelyezésre a mérés során alkalmazott kistehergépjárműbe. A mérési rendszert a gépjármű hátsó tengelye fölé telepítettem, ugyanis hátsó felfüggesztés felett ébrednek a legmagasabb intenzitású rezgések a kistehergépjárművek futása során [95]. A mérés során a szállítójármű rakterében a mérőrendszeren kívül nem volt egyéb rakomány, így a jármű tulajdonképpen üresen futott a mérés során. A halmazolt csomagok függőleges irányban szabadon mozoghattak, de a kereszt és hossz irányú elmozdulásukat alumínium keret segítségével korlátoztam. Ez a felépítés megegyezik az ASTM D7386-12 [99] és az ISTA 3A [100] protokollok szerinti rázóvizsgálat során alkalmazott teszt felépítéssel, hogy a vizsgálati idő alatt az egymásra helyezett egységet összetartsák, és elkerüljék az egység oldalirányú és hosszirányú szabad elmozdulását (továbbiakban SZE). A halmazolt csomagolások körüli szabad mozgástér (SZE) szerepének (oldalirányú és hosszirányú) meghatározásához a helyszíni méréseknél az SZE-ok mérését három csoportra osztottam, az alábbiakban ismertetett módon:

1. Nincs SZE (0 % szabad elmozdulás);
2.  $\pm 5\%$  SZE a doboz szélességében/hosszában (összesen 10 % SZE).
3.  $\pm 10\%$  SZE a doboz szélességében/hosszában (összesen 20 % SZE).

A keretek beállításait az SZE-hoz és mintaraktat felépítését a 6.3 ábra mutatja be. A 10%-os és 20%-os szabad mozgás mellett végzett mérésnél a szabad mozgástér csak síkbeli elmozdulást engedett a dobozoknak, azonban meggátolta, hogy leessenek, vagy hogy a vízszinteshez képest eltérő szögben helyezkedjenek el a szállítás közben. A keretek széthúzásával, és a dobozok

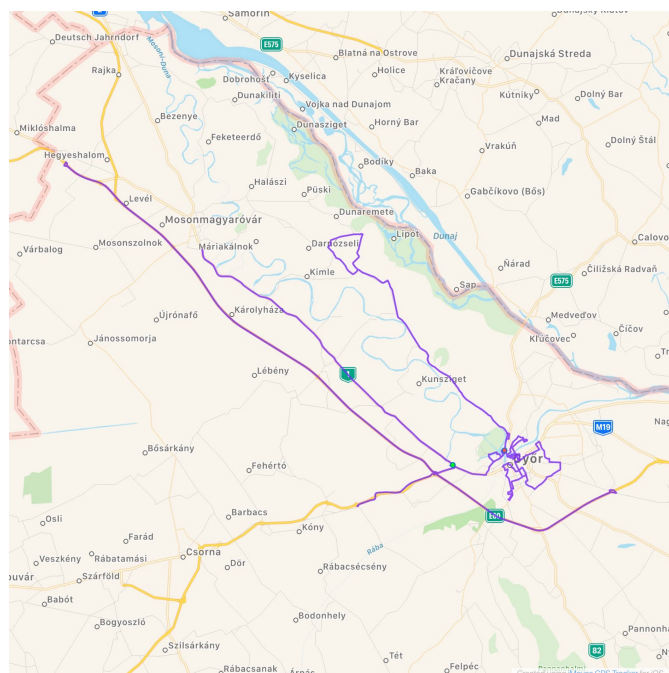


szabad hossz és keresztirányú elmozdulásával a dobozok átfedése a szállítás közben változhatott. A mérés közben a dobozok átfedése közti különbségek akár 36 mm-esek is lehettek (20 %), amikor az egyik doboz az egyik irányba mozdult el, míg a fölötte vagy alatta lévő doboz a teljesen ellentétes oldalra mozdult.



6.3. Ábra – a) A felépített mérési rendszer SZE 0%, b) SZE 10% és c) SZE 20% esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

A mérési rendszer egy FIAT Ducato (2008, 2300 cm<sup>3</sup> -es, 11 m<sup>3</sup> raktérfogat, az első és hátsó tengely közötti távolság 4 035 mm, hátul egy parabolikus laprugó) típusú kistehergépjárműben került összeállításra. A terepi mérés során rezgési adatok gyűjtését autópályán, főutakon, mellékutakon és városi utakon végeztem, annak érdekében, hogy a mérési eredmények megfelelően reprezentálják a hazai úthálózati viszonyok során történő szállítások rázkódási környezetét. A három mérési eset miatt a méréseket három menetben végeztem el, első alkalommal SZE 0 %, második alkalommal SZE 10 % és harmadik alkalommal SZE 20 % -os mérési rendszer beállítás mellett. A mérési útvonal úgy került kialakításra, hogy minden út típusból 60 perc került rögzítésre, így egy mérési beállítás teljes felmérése 240 percig tartott. Minden mérést ugyanazon az útvonalon éjszaka végeztem, amikor a jármű viszonylag nagyobb sebességgel és kisebb forgalom mellett tudott haladni, annak érdekében, hogy a mérési adatok közé a legkevesebb olyan esemény kerüljön be, amikor a jármű a forgalom miatt állóhelyzetben van. A mérési útvonal a 6.4. ábrán látható. A vizsgálat során a jármű átlagos sebességére és a megtett távolságra vonatkozó adatok a 6.2. táblázatban láthatóak.



6.4. Ábra – A felmért útvonalak ábrázolása a térképen (Forrás: saját szerkesztés)

6.2. táblázat – A méréshez használt kistehergépjármű útvonalainak és járműsebességeinek jellemzői (Forrás: Saját szerkesztés)

	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
Mellék út	51,5	54	51,4	57	51,2	53
Városi út	38,4	35	38,7	34	39,0	37
<b>Összes</b>	<b>291,0</b>	<b>69,1</b>	<b>290,6</b>	<b>68,1</b>	<b>291,7</b>	<b>69,7</b>

## 6.2. A mérési adatokból származó adatok elemzése

### 6.2.1. A mért gyorsulás adatok elemzése

A rázkódási eseményeket és a szabad mozgástér rezgésszintekre gyakorolt hatását MATLAB R2014a (MathWorks Inc, Massachusetts, USA) programmal elemeztem. Először empirikus kumulatív eloszlásfüggvényeket (CDF – Cumulative Distribution Function) számoltam (amelyek egy adott érték alatti események százalékos arányát képviselik) a rögzített gyorsulási csúcsertékekre (g) vonatkozóan, lehetővé téve a halmazolt csomagolási rétegek rezgésjellemzőinek mélyebb megértését. Ezenkívül a megfigyelt gyorsulási események

statisztikai eloszlásait is elemeztem a rétegek szerint a rögzített gyorsulás adatoknak, megadva a mért gyorsulások valószínűségi sűrűségfüggvényeit (PDF – Probably Density Function), valamint ezek kurtózisát és ferdeségét 95 %-os konfidenciaintervallum használatával. A kurtózis és a ferdeség adatok az eloszlások csúcosságát (K) és aszimmetriáját (S) mutatják a Gauss-féle normális eloszláshoz képest [111]. A véletlen jel gyakorlatilag stacionárius, nulla átlagú normális eloszlással, és statisztikai tulajdonságai nem változnak az idővel [112].

A 6.3. táblázat tartalmazza a mért csúcsgyorsulási értékek eredményét függőleges, hossz és oldalirányban. A mérési adatok alapján a legnagyobb gyorsulási értékek függőleges irányban jelentkeztek a jármű rakfelületén, ezt követte az oldalirányú, a legalacsonyabb gyorsulásadatok a hosszirányban léptek fel. Ezek az eredmények összhangban vannak, olyan korábbi kutatások eredményeivel, amik a rakfelület rázkódás intenzitását vizsgálták kistehergépjárművek esetében [93], [95]–[97], [113], [114]. Nagyon érdekes azonban, hogy a vizsgálat során a teljes rakatban rögzített adatok közül a harmadik rétegben és oldalirányban voltak a legmagasabb gyorsulás csúcserkékek, 4,16 g, 4,93 g és 5,94 g a 0 %, 10 % és 20 % SZE mérési összeállítások esetén. Eközben a legnagyobb függőleges irányú gyorsulás csak 3,99 g volt 20 %-os SZE összeállítás mérése során, szintén a harmadik legfelső rétegben. Ez a jelenség a vidéki úthálózat rossz minőségű, kanyargós útjának tulajdonítható, ugyanis, miközben a szállítójármű viszonylag nagy sebességgel halad, akkor a harmadik rétegben szabadon mozgó csomagok először a jobb vagy bal oldalon az alumínium kerítésnek ütköznek, majd nagy amplitúdóval vissza. Gyakorlatilag, minden egyes mérésnél megfigyelhető volt, hogy a legnagyobb gyorsulások a harmadik rétegben voltak, amelyet a második., az első réteg és majd a rakfelület követett. Ez igaz minden irányra, kivéve a hosszirányú irányt 10 % SZE összeállítás esetén, ahol a rögzített események gyorsulás adatainak 50 %-a az első rétegben magasabb volt, mint a második rétegben. Utóbbi jelenség a különböző mérések során, a változó forgalom miatti eltérő hirtelen fékezési körülményekkel magyarázható.

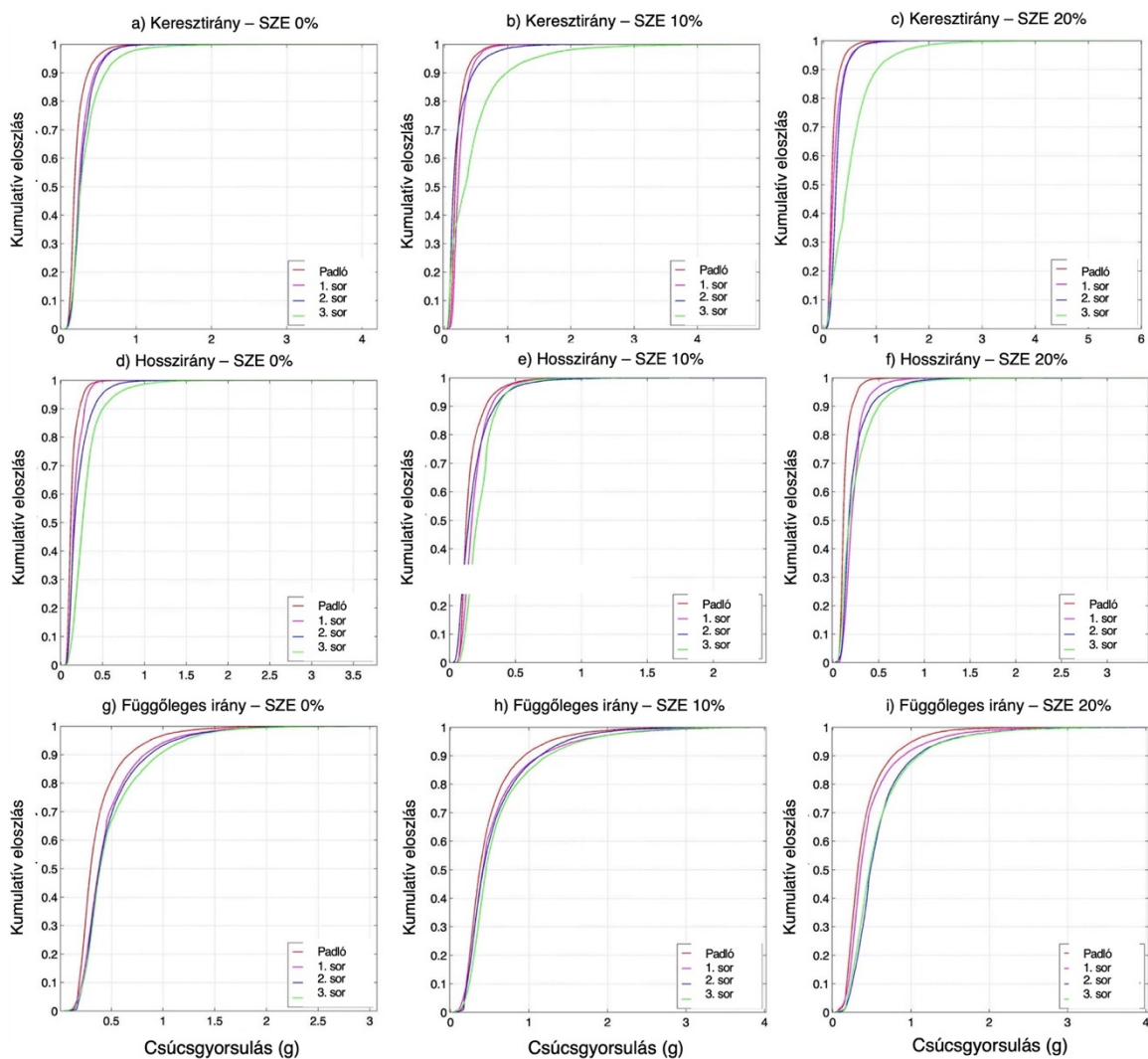


6.3. táblázat –A mért gyorsulási adatok összefoglalása (Forrás: Saját szerkesztés)

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

A 6.5. ábra mutatja be a kumulatív eloszlásfüggvényeket (CDF), valamint az adott gyorsulási szintnél fellépő valószínűségeket. Az ábrán bemutatott adatok szerint, függőleges irányban a rakfelületen mért gyorsulások 50 %-a 0,37 g alatt volt, a harmadik rétegben pedig 0,48 g alatt. Oldalirányban és hosszirányban a gyorsulásértékek 50 % -a 0,18 g és 0,13 g alatt volt a rakfelületen, 0,45 g és 0,26 g alatt a harmadik rétegben.

A rögzített gyorsulás adatok és a számított kumulatív eloszlások alapján megállapítható, hogy több szabad mozgástér esetén magasabb gyorsulási értékek figyelhetők meg. Függőleges irányban ez a magasabb rétegekben 1,21 – 1,51-szeres, oldalirányban 1,44 – 2,81-szeres, illetve 1,63 – 2,36-szoros értékeket jelent a rakfelülethez képest. A halmazolt csomagolások felső rétegeiben jelentkező magasabb függőleges gyorsulás értékek nagyobb kockázatot jelentenek a szállítás során bekövetkező károk szempontjából. Hossz- és oldalirányban is megnövekednek a csomagolásokon mért gyorsulás értékek, amennyiben a csomagnak nagyobb szabad mozgástér marad a hirtelen és normál fékezési/gyorsítási események, valamint a kanyargós utak hatásai miatt.



6.5. Ábra – A csúcsgyorsulás értékek empirikus kumulatív eloszlásfüggvény ábrái, a)-c) oldalirányban SZE 0%,10%,20%, d)-f) hosszirányban SZE 0%,10%,20%, g)-i) függőleges irányban SZE 0%,10%,20%. (Forrás: Saját szerkesztés)

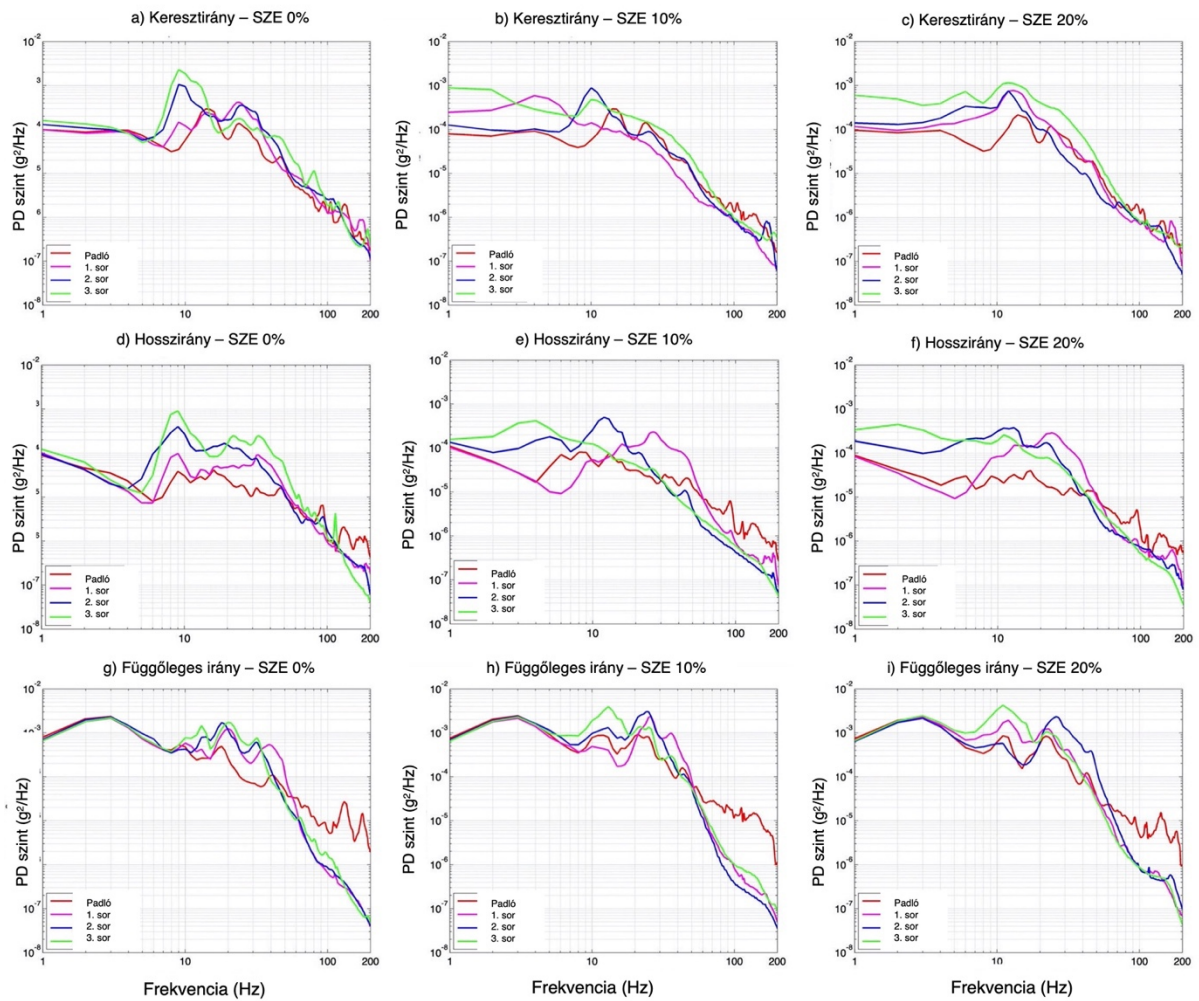
### 6.2.2. Az egymásra halmazolt csomagolások rezgésszintjei a szabad elmozdulásuk függvényében

Ebben az alfejezetben a felmért gyorsulás adatokból számított (Lansmont Xware szoftver beépített gyors Fourier-transzformációjának (FFT) segítségével) rezgésszintek PSD-ként kerülnek bemutatásra mindhárom térbeli irányban. Ezek a teljesítménysűrűség (PD) szintek 1 és 200 Hz közötti frekvenciatartományban kerülnek bemutatásra. A rögzített adatokon nem végeztem további szűrést, mivel a jármű folyamatosan, szinte megállás nélkül közlekedett, csak anti-alias szűrést alkalmaztam. A PSD-spektrumokat minden rétegre külön-külön, mindhárom irányban is ábrázolom 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban, majd a teljes spektrum effektív intenzitását is bemutatom a  $G_{rms}$  értékeken keresztül. Végezetül a halmazolt csomagolások átmeneti függvényeit ismertetem a rakfelülethez viszonyítva.

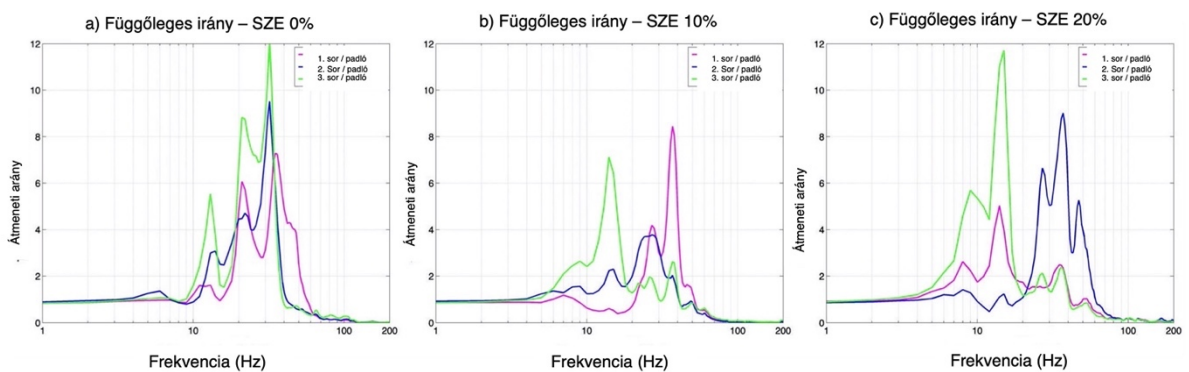
A 6.6. ábra mutatja a PSD görbék által reprezentált rezgésszinteket különböző SZE mérési összeállítások és rétegzóciók esetén mindhárom irányban. Az eredmények azt mutatták, hogy minden rétegben a legmagasabb rezgésszintek a függőleges irányban jelentkeztek, amelyet az oldalirányú és a hosszirányú követett. Függőleges irányban a legintenzívebb rezgésszinteket a magasabb rétegekben a 8 – 50 Hz-es frekvenciatartományban mértem. 8 Hz alatt a rezgésintenzitás a magasabb rétegekben majdnem ugyan olyan, mint a rakfelületen. Azonban a 40 – 50 Hz körül egy keresztfrekvencia figyelhető meg, amely felett az intenzitás gyorsan a rakfelület rázkódás intenzitása alá csökken. Az 1 és 8 Hz közötti azonos rezgésintenzitást magyarázhatja az alkalmazott minta egymásra helyezett csomagolások egysége lehet, amely tömege miatt ebben a frekvenciatartományban együtt mozog a járművel. Az eredmények azt is megmutatták, hogy hosszirányban is megtalálható ez a keresztfrekvencia, amely felett az intenzitás szintén a rakfelület intenzitása alá csökken. Oldalirányban azonban a rezgésintenzitás a magasabb rétegekben már az alsó frekvenciatartományban, 8 Hz alatt is magasabb volt. Ez a hosszirányban is igaz, amennyiben a halmazolt csomagolásnak bármekkora szabad elmozdulást biztosítunk, ami jelen kutatásban SZE 10 % vagy 20 % volt.

A 6.7. ábra a függőleges irányú, egymásra halmazolt csomagolási egységek átviteli függvényét mutatja be különböző SZE terek mellett, 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban. A harmadig halmazolási rétegben az átviteli függvény arányának csúcsai 21 Hz -nél 11,9, 15 Hz -nél 7,2 és 16 Hz -nél 11,8 voltak sorrendben SZE 0 %, 10 % és 20 % esetén. Az átmeneti függvények esetén a legmagasabb csúcs arány az első rétegben volt megfigyelhető SZE 10 % mérési rendszer összeállítás mellett. Ez a jelenség a kátyúk vagy szigorú útegyenetlenségek által okozott sokk (ütés) impulzusnak tulajdonítható a jelen felmérés esetében. Világosan látható

azonban, hogy az erősödés SZE 0 % összeállításnál és a magasabb rétegekben jelentős a 8 – 50 Hz-es frekvenciatartományban, ha azonban bármilyen SZE-tér alkalmazásra kerül, akkor ez a frekvenciatartomány szélesebb lesz, mint ahogyan az SZE 10 % és 20 % esetén látható. Itt meg is szeretném jegyezni, hogy a középső réteg dinamikus halmazterhelésnek van kitéve a legfelső csomag által, és ez tükröződik a rögzített rázkódási szinteken. Ezt a jelenséget már korábbi kutatásokban is megfigyelték laboratóriumi rezgésszimulációk során, egységtrakományok esetén [108]. A 6.3. táblázat a különböző rétegekre számított PSD görbék összesített, teljes  $G_{rms}$  értékeit tartalmazza az 1 – 200 Hz-es tartományban, minden mérési összeállítás esetén. A legmagasabb összesített  $G_{rms}$  értékeket minden esetben a harmadik rétegben, függőleges irányban volt megfigyelhető, amelyet az oldal- és hosszirányok  $G_{rms}$  értékei követték. Az elemzett 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban az összesített  $G_{rms}$  értékek a rakfelülettől a legmagasabb pozícióban elhelyezkedő csomagolás irányába emelkedtek. Függőleges irányban a halmazolt rétegekre számított összesített  $G_{rms}$  értékek 1,22 – 1,48-szor, hosszirányban 1,29 – 2,3-szor, és oldalirányban 1,08 – 2,28-szor magasabbak, mint a rakfelületen.



6.6. Ábra – A különböző rétegek PSD görbéi az egymásra helyezett csomagolásokban és a rakfelületen SZE 0 %, 10 % és 20 % mellett, a) – c) hosszanti, d) – f) oldalirányú és g) – i) függőleges tengelyekben (Forrás: Saját szerkesztés)



6.7. Ábra – A különböző rétegek átviteli függvény ábrái függőleges irányban a) SZE 0 %, b) SZE 10 % és c) SZE 20 % esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

6.4. táblázat – Összesített  $G_{rms}$  értékek a különböző rétegek és SZE-ok esetében, mindhárom irányban 1-200 Hz frekvenciatartományban (Forrás: Saját szerkesztés)

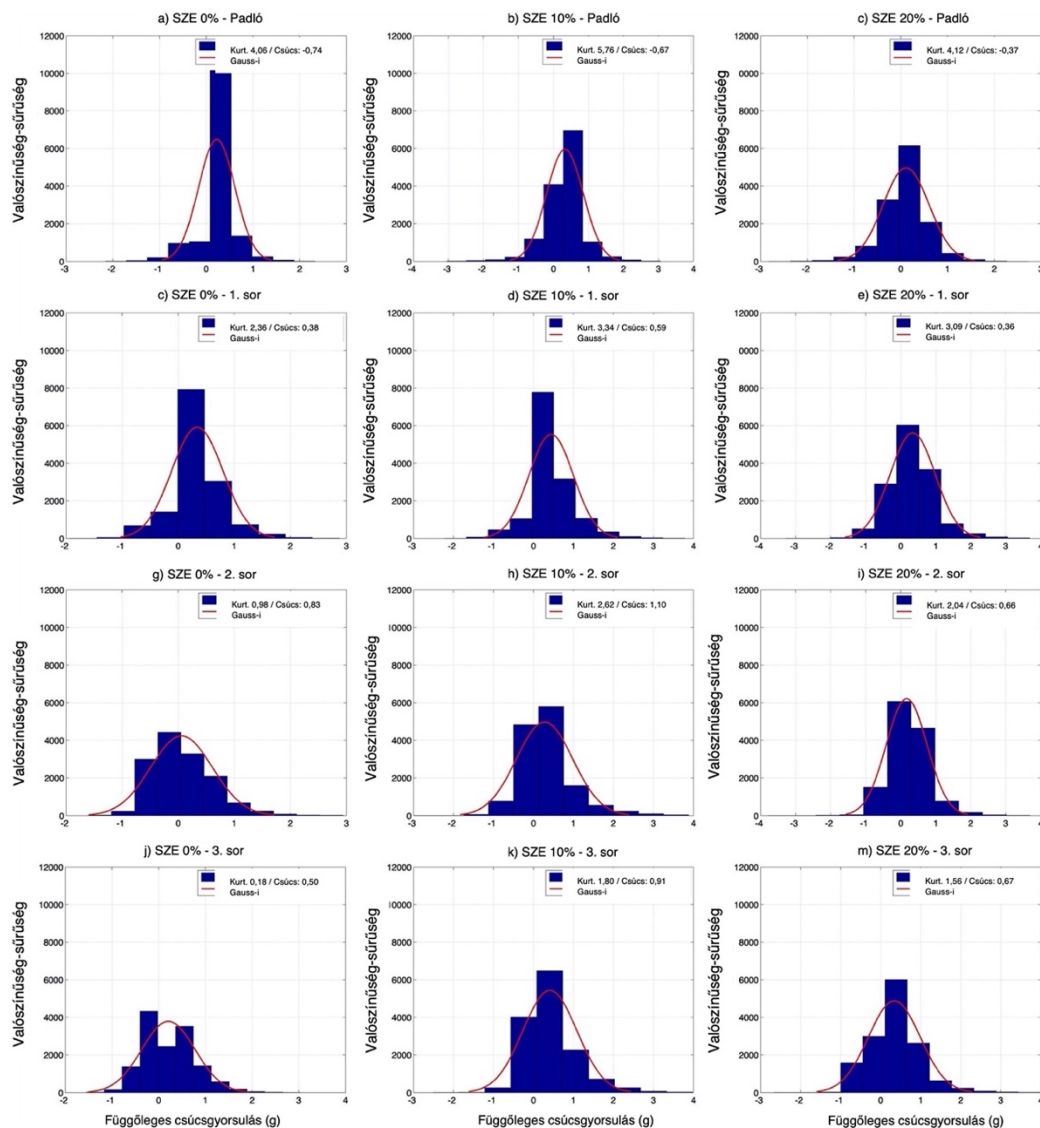
SZE	Helyszín	Oldalirányú	Hosszirányú	Függőleges
0%	Rakf.	0,064	0,037	0,136
	1.	0,085	0,051	0,166
	2.	0,101	0,069	0,170
	3.	0,118	0,095	0,181
10%	Rakf.	0,063	0,044	0,146
	1.	0,068	0,057	0,193
	2.	0,079	0,067	0,216
	3.	0,098	0,070	0,217
20%	Rakf.	0,059	0,036	0,149
	1.	0,081	0,070	0,182
	2.	0,090	0,073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

### 6.2.3. A gyorsulás adatok statisztikai jellemzői

A 6.8. ábrán a rögzített gyorsulási adatok valószínűségi sűrűségfüggvényei láthatóak függőleges irányban. Az A. függelék tartalmazza az összes kurtózis és ferdeség értékre vonatkozó numerikus adatokat mindhárom irányban, valamint az összes rétegre és SZE-ra vonatkozóan. A kurtózis és a ferdeség értékek bemutatásának oka, hogy a laboratóriumban a véletlenszerű rezgésvizsgálatok esetén, a rázóasztal vezérlőberendezés többnyire normál eloszlású vezérlő jelet generál, így a mérés során rögzített gyorsulás adatok kurtózis értékei bemeneti paraméterként használhatóak a rezgésszimuláció során, a véletlenszerű jel valóság-hű változékonyságának leképzéséhez.

A rögzített gyorsulási események minden egyes mérésnél és minden egyes rétegben pozitív csúcosságot mutattak (pozitív kurtózis), és látható eltérést (konfidenciaszint: 95%) a normál Gauss-eloszláshoz képest, ahol a kurtózis nulla. Ez egy úgynevezett "nehézfarkú" eloszlást jelez. Ennek a jelenségnek az a jelentése, hogy a terepem mért gyorsulási értékek (pozitív vagy negatív irányultsággal használva) nem követték a normális Gauss-eloszlást az idő függvényében. A függőleges irányban rögzített gyorsulás események kurtózis értékei 1,18 – 6,76 között voltak. Ezek a rakfelületre vonatkozó értékek megerősítik a szállítójárművek véletlenszerű járműrezgéseinek nem-Gaussi jellegéről bemutatott korábbi cikkek eredményeit [115]–[117]. A kurtózis értékek azonban a magasabb csomagolási rétegekben tendenciálisan csökkentek, ami azt jelenti, hogy a halmazolt csomagolásokban a magasabb rétegek olyan véletlenszerű rezgést szenvednek el, amely majdnem normális eloszlást követ. A magasabb rétegek és a különböző SZE-k esetében a hosszirányú és oldalirányú rögzített események kurtózis értékei 8,08 – 19,83, illetve 5,97 – 15,86 között voltak.

A ferdeségértékek minden esetben az átlag nullától való eltérését mutatattják, ami aszimmetrikus eloszlást jelez. Ezek az értékek függőleges irányban -0,74 és 1,10, oldalirányban 1,99 és 3,43, hosszirányban pedig 2,15 és 3,87 között voltak. A jármű rezgése a rakfelületen és függőleges irányban is negatívan ferde volt, így ezek az eloszlások jobbra irányuló aszimmetriát mutattak. Ez annak tulajdonítható, hogy a függőleges irányban több negatív előjelű gyorsulási esemény történt.



6.8. Ábra – A függőleges gyorsulási adatok eloszlásai, valamint csúcsosság és ferdeség értékei a) – d) SZE 0 %, e) – h) SZE 10 % és i) – l) SZE 20 % esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

#### 6.2.4. A kutatás korlátozó tényezői

Itt szeretném felhívni a figyelmet arra a tényre, hogy a gyors Fourier-transzformációt (FFT) alkalmazásával előállított PSD a megfigyelt frekvenciatartományban átlagolt intenzitást mutat. Így a bemutatott PD-szintek nem tartalmaznak néhány súlyos vagy szélsőséges rezgésszintet,

amelyek a valós szállítás során előfordulhatnak. A csomagküldő szolgálatok általában más járműveket, például kisbuszt, közepes méretű vagy nehéz teherautót is használnak a küldemények kézbesítéséhez. Így a kutatásból származó adatok csak korlátozottan használhatók a teljes ellátási láncra. Végül, de nem utolsósorban, elmondható, hogy az egymásra helyezett csomagok elméleti dinamikája nemlineáris szabad rezgésként írható le egy összekapcsolt tömeg-rugó rendszerben. Ennélfogva a csomagok különböző geometriai méretei és különböző súlyai nemlineáris módon változtatják a rezgésintenzitást.

### **6.3. A kutatásban ismertetett eredmények összefoglalása**

A kutatásomban bemutattam, hogy a felmért környezetben a halmazoltan szállított csomagok felsőbb pozícióiban elhelyezkedő csomagokon nagyobb gyorsulási értékek figyelhetők meg és ez igaz minden térbeli irányban. A legmagasabb gyorsulási értékek oldalirányban voltak, 4,16 g, 4,93 g és 5,94 g, valamint függőleges irányban 3,99 g volt. Megállapítható, hogy magasabb gyorsulási szintek figyelhetők meg abban az esetben, amikor a csomagok elrendezésénél a csomagok oldal- és hosszirányú elmozdulásai nem korlátozottak. A függőleges irányban a legintenzívebb rezgésszinteket a 8-50 Hz-es frekvenciatartományban találtam, ráadásul ez a magasabban elhelyezkedő halmazrétegekben felerősödött. 8 Hz-es frekvencia alatt a rezgésintenzitás a magasabb rétegekben majdnem megegyezik a rakfelület rezgésintenzitásával. 40 Hz – 50 Hz körül egy keresztfrekvencia található, amely felett a halmazolt csomagolások rezgésintenzitása gyors ütemben a rakfelület intenzitása alá csökken. Minden halmaz rétegében a legmagasabb rezgésszintek a függőleges irányban jelentkeztek, amelyet az oldalirányú és a hosszirányú rezgések intenzitás nagysága követ. A legmagasabb összesített  $G_{rms}$  értékeket az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban a harmadik rétegben figyelhetők meg, és ebben a frekvenciatartományban minden esetben függőleges irányban a legmagasabb, amelyet oldalirányú és hosszirányú  $G_{rms}$  értékek követnek. A terepi mérés során rögzített függőleges irányú gyorsulás események kurtózis statisztikai értékei 1,18 és 6,76 közötti értékeket mutattak, ami a véletlenszerű rezgés nem-normális eloszlás jellegét mutatja azonban a felső sorok gyorsulásának eloszlása közelít a normális eloszláshoz függőleges irányban. [118].



## **7. Egymásra helyezett kisméretű csomagok rázkódási szintjeinek felmérése és elemzése terepi és laboratóriumi mérések összehasonlításának segítségével**

Ebben a fejezetben bemutatott kutatásomban komparatív elemzéssel vizsgálom a terepen felmért halmazolt kisméretű csomagküldemények függőleges rázkódási tulajdonságait, és hasonlítom össze a laboratóriumi gyakorlatban általánosan használt csomagküldemények védelmi funkciói vizsgálatára előírt szabvány rázkódás profiljával mért adatokkal, a terepi mérésen is alkalmazott halmazolt csomagolásokon. A kutatás alapjául az szolgál a 6. fejezben említettek mellett, hogy az expressz csomagszállítás szimulációjára általánosan elterjedt protokollok, nem foglalkoznak halmazolt szállítási körülményekkel. Az ASTM D7386 [99] szabvány vonatkozik a csomagküldemények laboratóriumi vizsgálatára, azonban a kisméretű csomagszállítást szimuláló rázóvizsgálat során csak felső teher felhelyezésével a dinamikus terhelést próbálják szimulálni. Így a halmazban gerjedő csillapítások vagy erősítések hatása nem ismert a vizsgálatok során. A kutatásomban elvégzett mérések eredménye alapján a csomagolásokat tervező és vizsgáló szakemberek többlet információt kaphatnak a pontosabb szállítási vizsgálatok elvégzéséhez.

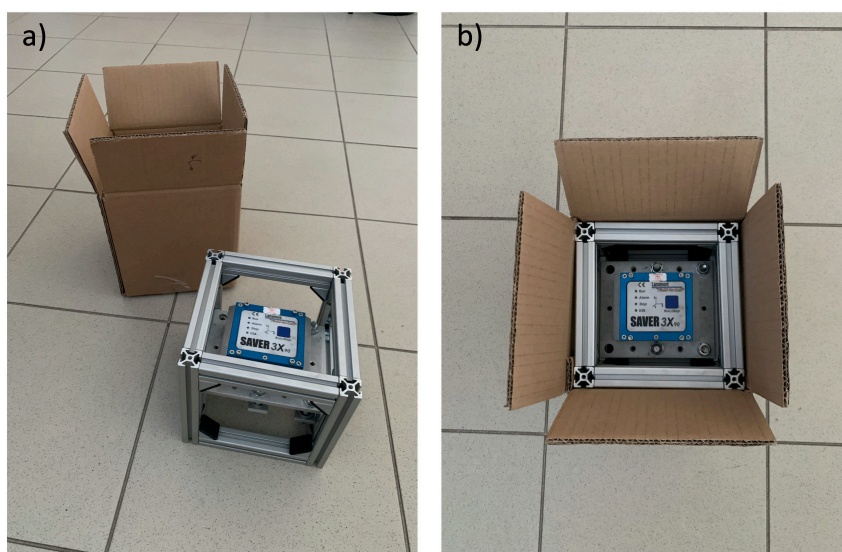
### **7.1. A mérési körülmények ismertetése**

#### **7.1.1. A méréshez használt minták és mérőberendezések**

A kutatásban három egyforma, hullámpapírlemezről (HPL) készült kisméretű mintacsomag került összeállításra a három rétegben halmazolt csomagolások rázkódási tulajdonságainak rögzítéséhez a terepi és laboratóriumi mérések során. Minden egyes mintacsomagolás tartalmazott egy Lansmont SAVER 3x90 terepi adatgyűjtő műszert (Lansmont Corp., CA, USA), amely egy alumíniumkeretre rögzítve került elhelyezésre a mintacsomagolásokba. A csomagoláson belül ez az ITEM alumínium profil keret (©item Industrietechnik GmbH) biztosította a SAVER adatgyűjtők merev rögzítését és a dobozok geometriai méretéhez való legjobb illeszkedést. Ezt az összeállítást a 7.1. ábra szemlélteti. Így összesen négy SAVER adatrögzítő volt használva a mérésekhez, amelyek közül három SAVER a három rétegben halmazolt mintadobozokban volt, egy pedig közvetlenül a mérést végző jármű rakfelületére a terepi mérés során, illetve a rázóberendezés tárgyasztalára volt rögzítve. Az 7.1. táblázat ismerteti a vizsgálatához használt mintacsomagolások adatait és a SAVER adatgyűjtő műszer beállításait.

7.1. táblázat – A SAVER adatgyűjtő beállítások paraméterei és a kutatáshoz használt minta adatai  
(Forrás: Saját szerkesztés)

HPL dobozok adatai		SAVER adatrögzítő beállításai	
HPL típusa	35BC	Időzítő által felvett adatok	1 s
HPL tömege	742 g/m <sup>2</sup>	Ébresztési időköz	1 s
ECT értéke	9,0 kN/m	Felvételi idő	1 s
BST értéke	1,685 kPa	Minta / sec	500 Hz
A doboz önsúlya	190 g	A minta mérete	500
A doboz mérete (hxsxzm)	180x180x195 mm	Frekvencia felbontás (PSD)	0,50 Hz
Az ALU-keret súlya	1,440 g	Anti-Aliasing frekvencia	200 Hz
Töltött tömeg	2,630 g		



7.1. Ábra – A mérésekhez összeállított minta csomagolás és adatgyűjtőműszer (Forrás: Saját szerkesztés)

### 7.1.2. A mérőrendszer felépítése

A kutatáshoz két egyforma mérőrendszert lett felépítve, egy a terepi mérésekhez és egy a laboratóriumi szabványos rázóvizsgálathoz a rezgésszintek megállapítása és összehasonlítása érdekében. Az első lépésben a terepi rezgésszinteket mértem fel, ehhez egy FIAT Ducato (2008, 2.2. Multijet, terhelhetősége 3,5 t, raktérfogata 11 m<sup>3</sup>, tengelytávja: 4 035 mm, hátsó felfüggesztése: parabolikus laprugó) használtam. A halmazolt csomagolási mintákból felépített rakomány, a kistehergépjármű hátsó tengelye felett került elhelyezésre, és egy alumíniumból készült határoló keret akadályozta meg a rakomány oldalirányú és hosszirányú elmozdulását. Itt fontos megjegyezni, hogy a határoló keret nem szorította össze a halmazolt minta rakományt, így azok függőleges irányban szabadon mozoghattak a mérés során. A rakfelület gyorsulás és rázkódás adatainak méréséhez, a negyedik SAVER adatrögzítő szorosan a mintarakomány mellett, közvetlenül a rakfelületre került rögzítésre csavarok segítségével. Ez a beállítás a 7.2. ábra a.) részében látható.

A második lépésben szabványos laboratóriumi rázóvizsgálatot végeztem a fent leírt mintákon, a terepi méréssel megegyező összeállítással, annak érdekében, hogy a terepi mérés során gyűjtött adatok összehasonlíthatóak legyenek a laboratóriumi szimulációkkal. Ehhez a rázószimulációhoz egy hidraulikus rázóberendezés (LAB HV-60) használtam VR 9500 rázóvezérlő berendezéssel. A minta rakomány felépítése a rázóasztalon megegyezett a terepi mérés során összeállított rendszerrel, azzal a különbséggel, hogy a rázóasztal rezgéseit rögzítő mérőműszer csavarkötés helyett, ragasztással került rögzítésre. A laboratóriumi vizsgálathoz használt elrendezést a 7.2. b.) ábra mutatja.



7.2. Ábra – a) A mérőrendszer összeállítása a kistehergépjárműben és b) a laboratóriumban (Forrás: Saját fénykép)

### 7.1.3. Szállítási útvonalak és rázóvizsgálati profil

A terepi rezgés adatok gyűjtéséhez, a mérési útvonal olyan módon lett kialakítva, hogy a mérést végző jármű négy különböző útkategóriát egyforma arányban érintsen. Így, a méréseket autópályán, főúton, mellékúton és városi utakon végeztem. A különböző útkategóriák felmérésének a célja, amellett, hogy így átfogó képet kaphatunk a csomagolásokat érő rázkódási szintekről, az, hogy összehasonlíthatóak legyenek a különböző útkategóriák közötti rezgésszintek, és megtalálható legyen annak az útkategóriának a rezgéstulajdonságai, amely a legközelebb áll a laboratóriumi rázóvizsgálatok rázkódásszintjeihez. A mérési adatok rögzítése útkategóriánként 60 percig tartott. A méréseket kizárólag éjszaka végeztem, így a furgon a kisebb forgalom miatt viszonylag nagyobb utazási sebességet tudott tartani. Ez azért fontos, mert a nagyobb járműsebesség, nagyobb rezgésintenzitást eredményez [55], [78], [95]. A mérések útvonalai a 7.3. ábrán láthatók, a 7. 2. táblázat pedig a távolságokra és a jármű átlagos sebességére vonatkozó információkat tartalmazza.

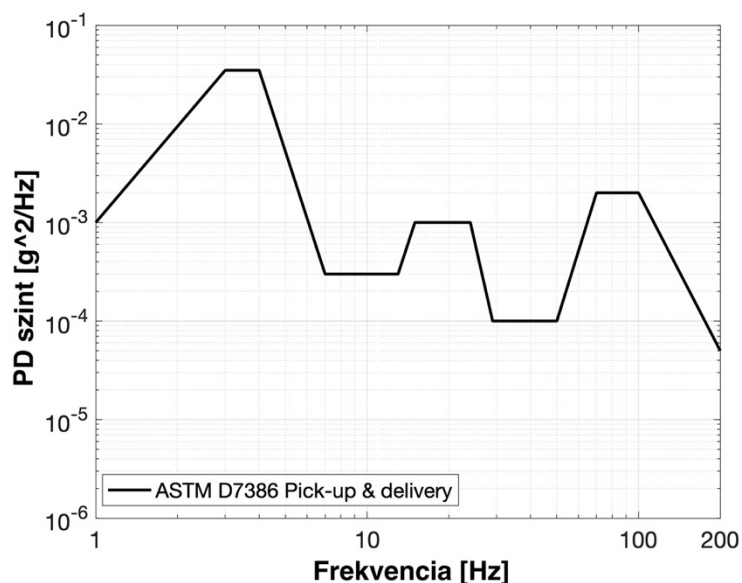
7.2. táblázat – A felmért útvonalak és járműsebességek jellemzői (Forrás: Saját szerkesztés)

	Távolság (km)	Átlagos sebesség (km/h)
Autópálya	120,9	114
Főút	80,2	73
Mellékút	51,5	54
Városi utak	38,4	35
Összesen	291	69,1



7.3. Ábra – A mért útvonalak ábrázolása a térképen a) autópálya, b) főút c) országút d) városi út (Forrás: Apple Maps, Saját szerkesztés)

A laboratóriumi mérések, a terepi mérések után kerültek elvégzésre. A laboratóriumi méréshez az ASTM D7386 (Pick-up and delivery) [99] futárszolgálati igénybevételek laboratóriumi vizsgálatára vonatkozó szabvány rázóvizsgálatának paramétereit alkalmaztam. Ez a vizsgálati eljárás a csomagolt termékek futárszolgálatos szállításához általánosan használt vizsgálati eljárás. A szabványban szereplő vizsgálati PSD-görbe a kistehergépjárművekre jellemző rezgést szimulálja a vizsgálati eljárásban. Ennek a rázkódásprofilnak a frekvenciatartománya és összesített  $G_{rms}$  értéke 1 – 200 Hz és 0,46  $G_{rms}$ . A vizsgálati spektrumot a 7.4. ábra mutatja.



7.4. ábra. ASTM D7386 - PSD burkológörbe a csomagküldő kiszállítások szabványos rázóvizsgálatához (Forrás:[99] alapján)

## 7.2. A mérési adatok elemzéséhez alkalmazott módszerek

### 7.2.1. Statisztikai módszerek a gyorsulási csúcsértékek és az RMS (g) meghatározására

Az összegyűjtött gyorsulási események statisztikai elemzését a MATLAB R2021a (MathWorks Inc, Massachusetts, USA) programmal végeztem. Először a függőleges gyorsuláscsúcsok és számított RMS értékük (négyzetes középérték) csoportosítását végeztem el az útkategóriák és rétegszintek szerint, majd egyirányú ANOVA (varianciaanalízis) segítségével a csoportok közötti különbségeket elemeztem és hasonlítottam össze oszlop diagramok bemutatásával. Ebben a lépésben egy post-hoc (Tukey's) többszörös összehasonlítási tartománytesztet is alkalmaztam. Az elemzés szignifikancia szintjét 5%-ban határoztam meg ( $p < 0,05$ ). Ezután a mért függőleges gyorsulások csúcsértékeit (g) és RMS értékeit (RMS g) empirikus kumulatív eloszlásfüggvények segítségével elemeztem. Ez egy adott érték alatti események százalékos arányát mutatja, ami segít alaposabban megérteni az adott réteg rezgés viselkedését a halmazolt csomagolások esetén. Ezenkívül a mért gyorsuláscsúcsok (g) és effektív gyorsulások (RMS g) statisztikai eloszlásait számítottam ki a rétegenként mért adatokra 95 %-os konfidenciaszint mellett. Kiszámításra és ábrázolásra kerültek ezen események valószínűségi sűrűségfüggvényeinek kurtózis és ferdeség értékei is. A kurtózis a függvény csúcsosságának eltérését mutatja a Gauss-féle normális eloszlástól, a ferdeség az adatok aszimmetriáját mutatja [111], [117]. A kurtózis értékek a (7.1) összefüggés szerint kalkulálhatóak:

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\chi_i - \mu}{\sigma} \right\}^4, \quad (7.1)$$

### 7.2.2. A PSD görbék adatelemzési módszerei a teljes frekvenciatartományban

A PSD-eket a mért gyorsulási adatokból az Xware szoftver és a MATLAB R2021a (MathWorks Inc, Massachusetts, USA) gyors Fourier-transzformációjának (FFT) segítségével készítettem el. A teljesítménysűrűség (PD) szintek értékeit 1 – 200 Hz között mutattam be. Ez a frekvenciatartomány azokat a rezgési eseményeket képviseli, amelyek elég intenzívek ahhoz, hogy befolyásolják az használt termék-csomagolási rendszer integritását. Továbbá ez a frekvenciatartomány tartalmazza azokat a rezgésválaszokat, amelyek a kisméretű tehergépjárművek esetében megfigyelhetők a jármű karosszériaszervezetéből, a felfüggesztési rendszerből, a gumibroncsokból stb. által gerjesztett rezgésekből származnak. A kisebb forgalom és a megállások hiánya miatt, ebben a vizsgálatban a felmért adatok szűrésére a nem kívánatos események eltávolítása érdekében nem volt szükség. A PSD görbék a halmazolt mintarakomány minden egyes rétegére és a jármű rakfelületére vonatkozóan mutatják be rezgésszinteket minden útkategóriára külön és összesítve, valamint laboratóriumi mérésből származó adatokra. A könnyebb összehasonlíthatóság érdekében az ábrákon az ASTM D7386 szabvány szerinti spektrum is ábrázolásra került. Ezenkívül a PSD görbék effektív intenzitását mutató összesített  $G_{rms}$  értékek is kiszámításra kerültek minden rétegre és mérési összeállításra vonatkozóan 1-200 Hz közötti frekvenciatartományban. A számításhoz felhasznált képleteket a 2. fejezetben ismertettem.

### 7.2.3. A PSD elemzés módszerei frekvenciatartományonként

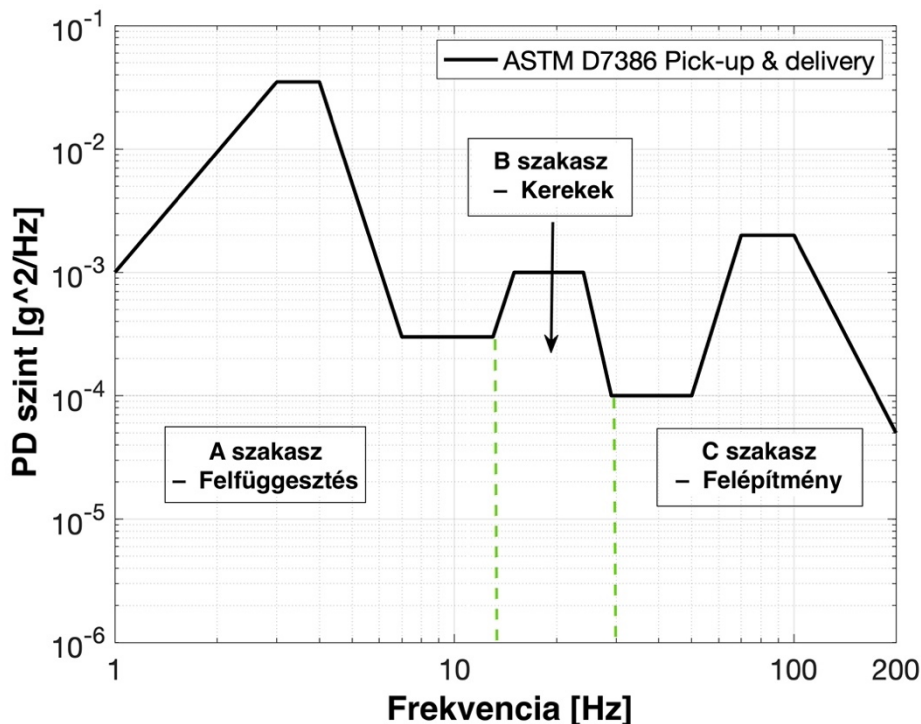
Egy hagyományos tehergépkocsi véletlenszerű rezgésének PSD-je különböző frekvencia szakaszokra oszthatóak a tehergépkocsik egyes elemeinek, például a felfüggesztési rendszernek, a gumibroncsoknak vagy az alkalmazott szállító jármű karosszériaszervezetének válaszrezgései szerint. [58], [114] Az adatok kiértékelése során az ASTM D7386 (Pick-up and delivery) PSD burkológörbéjét felosztottam a fent említett a három frekvenciatartományra, amelyet 7.5. ábra szemléltet. Ez lehetővé teszi a rezgés tulajdonságainak mélyebb elemzését a gerjesztő hatások forrása szerint. A mérésekből származó adatokat első lépésben az 1 – 200 Hz teljes frekvenciatartományában elemeztem, majd ezt követően a kialakított frekvenciatartomány szakaszok szerint elemeztem az adatokat:

A szakasz – Felfüggesztés, frekvenciatartomány: 1 – 13 Hz



B szakasz – Gumiabroncsok, frekvenciatartomány: 13 – 29 Hz

C szakasz – Felépítmény/karosszériaszervezet, frekvenciatartomány: 29 – 200 Hz



7.5. Ábra – A frekvenciatartományok elemzett szakaszai (Forrás: Saját szerkesztés [58], [83], [99] alapján)

Ez alapján az egyes szakaszok PSD görbéit alakítottam ki a halmazolt csomagolásokon, a terepen és a laboratóriumban felmért adatok alapján, bemutatva minden szakaszban az egyes csomagolási rétegek rázkódás intenzitását. Ez után az egyes szakaszok PSD görbéinek a  $G_{\text{rms}}$  értékeit is kiszámítottam, amiket grafikusán és numerikusan is megjelenítettem. Az elemzés során ezeket az adatokat, valamint a mért adatok alapján fejlesztett PSD-eket, összevettem az ASTM D7386 szabványban található csomagolásvizsgálati rázkódásprofilal.

### 7.3. A mérési eredmények ismertetése

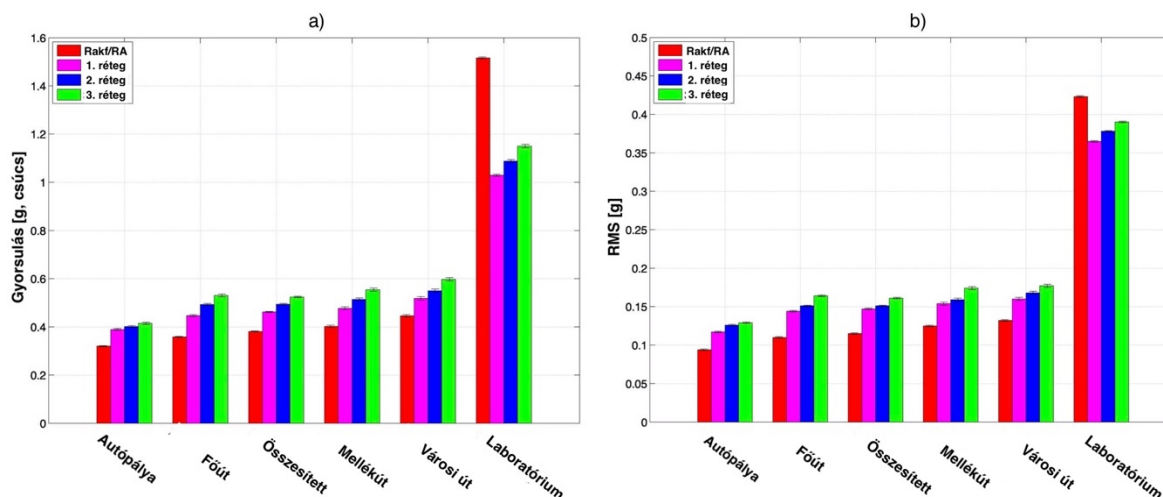
#### 7.3.1. A gyorsulási csúcserőértékek és az RMS (g) elemzésének eredményei

A 7.6. ábra a terepi és laboratóriumi mérés során rögzített csúcsgyorsulás (g) és effektív gyorsulás (RMS g) értékek oszlopdiagramjait mutatja az összes halmazrétegre és a rakfelületre vonatkozóan az útkategóriák függvényében mutatja be. Ahogyan az várható volt, a legmagasabb gyorsulás és RMS g értékeket a szállítójármű futása során a városi utakon jelentkeztek, annak ellenére, hogy itt volt a legalacsonyabb a jármű utazási sebessége. Nyilvánvalóan, ennek a jelenségnek az oka, a városi utak viszonylag rosszminőségű burkolatai,

ugyanis a városi utakon sok úthiba és felújítatlan út található. A rétegek alapján a legmagasabb értékek a harmadik halmazolási szinten voltak, amelyet a második követett, a legalacsonyabb gyorsulás értékek pedig a halmazolt rakat első szintjén jelentkeztek. A terepen mindig a rakfelületen mért gyorsulások értékei voltak a legalacsonyabbak, és az értékek a halmazolt rétegek szerint felfelé növekedtek. A laboratóriumi vizsgálat során azonban a rázóberendezés tárgyasztalán mért értékek voltak a legmagasabbak, és a gyorsulási értékek általában a felső három halmazolt szinten voltak alacsonyabbak, természetesen szintről szintre felfelé növekedve. Az utóbbi jelenség oka az, hogy a vizsgálati szabványok rázóvizsgálati profilja erősített intenzitású, annak érdekében, hogy a valós szállítások ideje alatt fellépő rázkódásintenzitást a laboratóriumban gazdaságosan, rövidebb idő alatt szimulálni lehessen [119], [120] és ezen a rezgésszinten, a HPL dobozok csillapító tulajdonságai jobban érvényesülhetnek.

Az autópályán rögzített gyorsulási csúcserőértékeknel nem volt statisztikailag szignifikáns különbség az első és a második halmazolási szint között; a főút és az országút között a gyorsulási csúcserőértékek és az effektív gyorsulás értékek esetében a második halmazolási szint esetében; valamint az autópályán rögzített effektív gyorsulás értékei között a halmazolt csomagolások második és harmadik szintjén ( $p < 0,05$ ). A laboratóriumban a rázóasztalon mért gyorsulási értékek 1,31–1,48-szor nagyobbak voltak, mint a halmazolt csomagok felső szintjein mért értékek a terepen. A terepi mérések során azonban a rakfelületen mért gyorsulási értékek 0,72 – 0,82-szer alacsonyabbak voltak, mint a mintarakomány felső szintjein mért értékek. Ezek a megállapítások jól láthatóak az összesített adatokból. A halmazolt csomagolások rétegeinek összesített adatait tekintve, a gyorsulási értékek 1,21, 1,29 és 1,37-szer magasabbak voltak (első, második, és harmadik szint) a rakfelülethez képest. A laboratóriumi mérés esetében is megállapítható volt, hogy a halmazolt csomagolások gyorsulás értékei növekvő tendenciát mutattak egymáshoz képest, de a rázóberendezés tárgyasztalához képest nem.





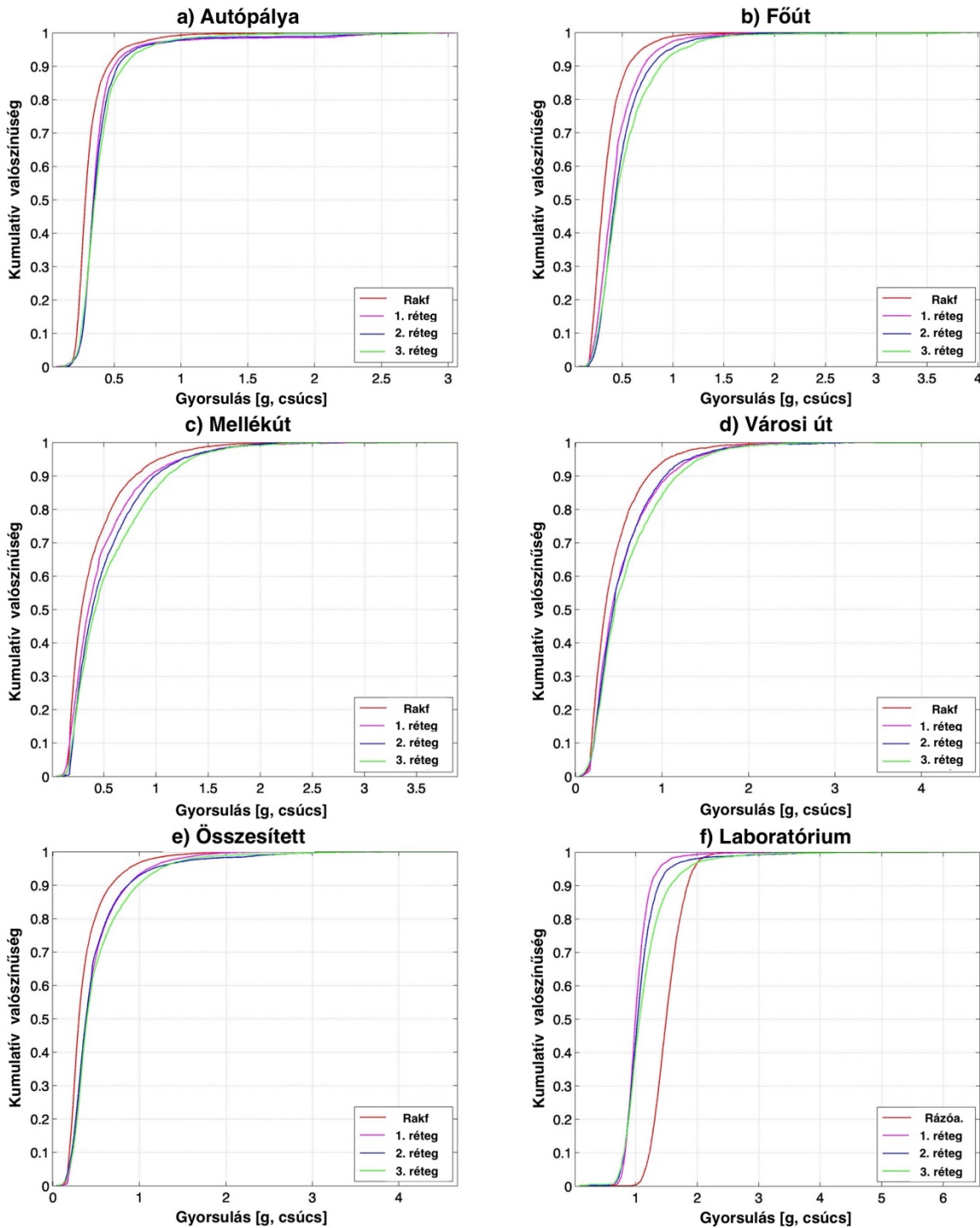
7.6. ábra: a) Az halmazolt csomagolások és a rakfelület gyorsulási csúcsértékei és b) RMS (g) -értékei különböző útkategóriák mellett és a laboratóriumban (Forrás: Saját szerkesztés)

### 7.3.2. Empirikus kumulatív eloszlásfüggvények a gyorsulás csúcsok (g) és az RMS (g) adatokhoz

A 7.7. és a 7.8. ábra a csúcsgyorsulások (g) és az effektív gyorsulásértékek (RMS g) kumulatív eloszlásfüggvényeit mutatja, amely azon események százalékos arányát fejezi ki, amelyek egy adott gyorsuláscsúcsérték vagy effektív gyorsulásérték alatt vannak. A kumulatív eloszlásfüggvényeket az egyes útkategóriák, a laboratóriumi vizsgálat, és minden rakat rétegre kiszámítottam és ábrázoltam.

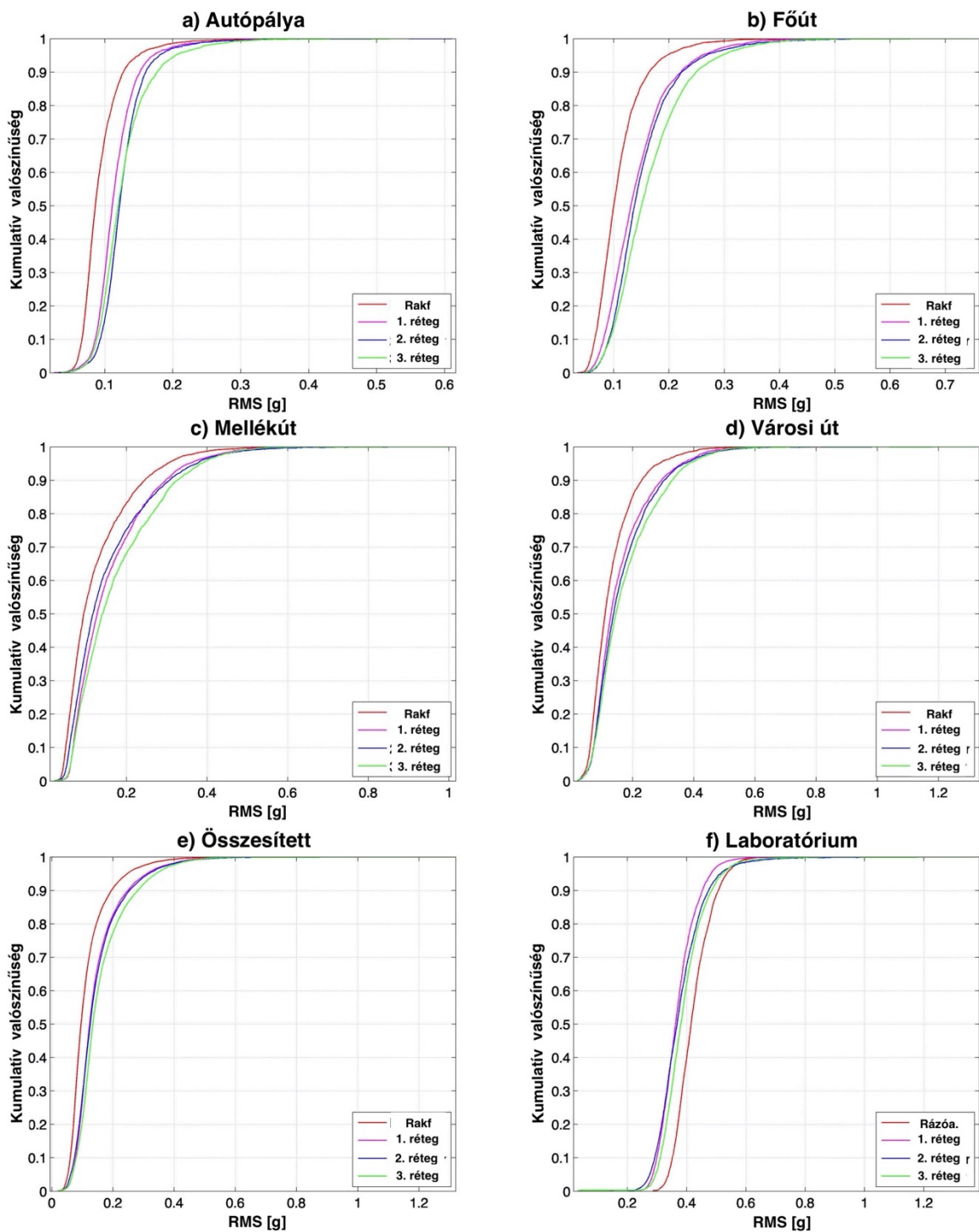
A gyorsulási adatok (7.8. ábra) azt mutatják, hogy a legnagyobb gyorsulási értékek a városi utakon, terepen kerültek rögzítésre. A szállítójármű rakfelületén az összes esemény 90 %-a 0,85 g alatt volt, a harmadik halmazolt rétegben 1,18 g alatt, ami körülbelül kétszerese az autópályán az első, második és harmadik rétegben mért értékeknek, és 1,8-szorosa a rakfelületen mért értékeknek. A laboratóriumi vizsgálat esetében az adatok azt mutatják, hogy a rázóasztalon mért értékek 50 %-a és 90 %-a 1,49 g, valamint 1,84 g alatt volt, ami 2,2-szer és 4,35-ször magasabb, mint a városi utakon rögzített adatok esetében, azonban ezek a jelentős különbségek nem jelennek meg a laboratóriumban vizsgált csomagolási egységek rétegeinek adataiban. Itt ezek az értékek 1,2-szer (első réteg esetében), 1,28-szor (második réteg esetében) és 1,33-szor (harmadik réteg esetében) voltak magasabbak. A laboratóriumi vizsgálat és az összesített terepi adatok összehasonlításánál 90 %-os előfordulási szintnél látható, hogy a laboratóriumi események a rakfelületen 2,73-szor, a csomagrétegekben felfelé rendszerint 1,43, 1,58 és 1,59-szer magasabbak voltak. Nagyon érdekes megfigyelés, hogy a laboratóriumi vizsgálatban a rázóasztal adatai alapján megrajzolt eloszlásfüggvény 96 %-os és 98 %-os

ponton keresztezte a harmadik és második halmazréteg görbéjét, ami azt jelentheti, hogy a rázóberendezés vezérlője által generált egyes rázkódási események nagyobb gyorsulási eseményeket eredményeznek az egymásra helyezett csomagolási rétegeken. Ez a jelenség az RMS (g) adatok kumulatív eloszlásfüggvényén is megfigyelhető.



7.7. Ábra – A csúcsgyorsulási értékek empirikus kumulatív eloszlásfüggvények, a) autópálya, b) főút, c) mellékút, d) városi utak, e) összesített, f) laboratórium (Forrás: Saját szerkesztés)

Az RMS (g) adatok kumulatív eloszlásfüggvényeinek ábrái (7.9. ábra) alapján jól látható, hogy az egymásra helyezett rétegek eloszlásfüggvényei 50%-os valószínűség alatt szinte egybeesnek. A legmagasabb RMS (g) értéket ezen a ponton a harmadik rétegben a városi utakon számítottam, ez 1,25 RMS (g), a rakfelületen pedig 1,11 RMS (g) volt a legmagasabb. Ezeket az értékeket összehasonlítva az autópályán mért adatokkal, ezek 90 %-os előfordulási szinten minden rétegben körülbelül 1,9-szer magasabbak voltak. A laboratóriumban végzett vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy az RMS-értékek 90 %-a 0,51 RMS (g) alatt volt a rázóasztal felületén, és 0,45, 0,47 és 0,49 RMS (g) az első, második és harmadik rétegek között, és ezek az értékek 2,6, 1,8, 1,9 és 1,7-szer magasabbak voltak, mint a terepi mérés összesített értékei a rakfelülettől a harmadik rétegig, ahol ezek 0,20, 0,25, 0,26 és 0,28 RMS (g) voltak. Az értekezés B. és C. függeléke tartalmazza a kumulatív eloszlásfüggvények számításához felhasznált adatokat.

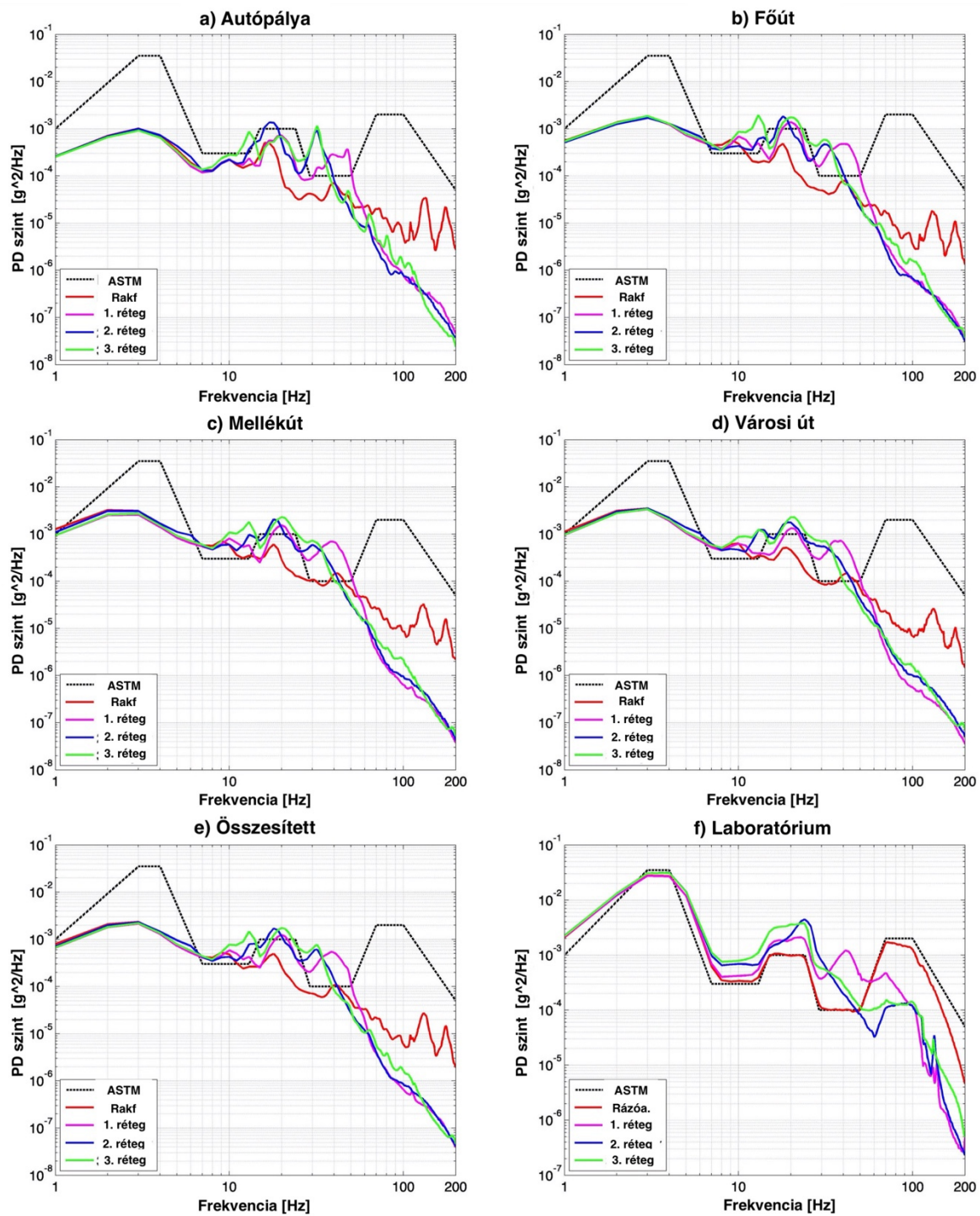


7.8. Ábra – Az RMS (g) értékek empirikus CDF grafikonjai, a) autópálya, b) főút, c) mellékút, d) városi utak, e) összesített, f) laboratórium (Forrás: Saját szerkesztés).

### 7.3.3. PSD-k elemzése a teljes frekvenciatartományban, útkategóriák szerint

A terepi és laboratóriumi mérés során gyűjtött adatok alapján PSD-eket dolgoztam ki. A 7.9. ábra a halmazolt mintacsomagolások és a rakfelület egyes rétegeire számított PSD görbét mutatja, kiegészítve az ASTM D7386 szabvány rázóvizsgálati spektrumával. Látható, hogy a

mért PD-szintek a terepi mérések esetében 1 – 8 Hz, a laboratóriumi mérések esetében pedig 1 – 6 Hz között szinte azonosak minden rétegben. A laboratórium kivételével a PD-szintek ebben a frekvenciatartományban nem érték el a vizsgálati spektrum szintjét, de az útkategóriák függvényében növekedtek. A rakfelületen megfigyelt rezgésszintek körülbelül 18 Hz-től kezdve minden útkategória esetén csökkentek, azonban a mellékutak és városi utak esetében 29 – 48 Hz között ez a rezgésszint majdnem egybeesik az ASTM D7386 szabvány vizsgálati spektrumával. A terepi felmérés során, a legmagasabb PD-szinteket a harmadik rétegen 9 – 14 Hz és 19 – 33 Hz között, a második rétegen 16 – 19 Hz között, az első rétegen pedig 35 – 51 Hz között kaptam. Megállapítható az is, hogy az összes egymásra halmazolt csomagréteg rázkódási intenzitása 50 Hz felett gyorsan csökkent, és 55 – 60 Hz felett végig a rakfelület rezgésintenzitása alatt volt. Ezek a jelenségek a laboratóriumi mérés esetén is megfigyelhetők, azzal a különbséggel, hogy a jelenségek frekvenciatartományai eltérőek. Ebben az esetben a legmagasabb PD-szinteket a harmadik rétegen 8 – 22 Hz között, a második rétegen 22 – 33 Hz között, az első rétegen pedig 33 - 56 Hz között jegyeztem fel.



7.9. Ábra – A különböző rétegek PSD-spektrumai a halmazolt csomagok rétegeiben, a rakfelületen és az ASTM D7386 spektrumon a) autópályán, b) főúton, c) mellékúton, d) városi utakon, e) összesítve, f) laboratóriumban (Forrás: Saját szerkesztés)

Ezen a ponton fontos hangsúlyozni, hogy a rezgésszimulációs eljárások általában, a vizsgálati idő rövidítését a rázkódási intenzitás nagyságának növelésével valósítják meg a vizsgálatok során [119], [121], feltehetően az ASTM szabvány is ezt alkalmazza. A 7.10. ábrán azonban jól látható, hogy ez a mesterséges erősítés nem egyenletesen oszlik el a teljes vizsgált



frekvenciatartományban. Az egymásra helyezett egységben a rétegek PD-szintjei a 7 – 50 Hz-es frekvenciatartományban elérték vagy meghaladták az ASTM által javasolt vizsgálati spektrumszinteket, így itt a vizsgálati spektrum mesterséges erősítése nem értelmezhető. Azonban, az 1 – 6 Hz -es alsó frekvenciatartományban a rakfelület PD-szintjei és még a magasabb rétegekben elhelyezett csomagok rázkódási értékei is alacsonyabbak voltak a szabványban meghatározott PD-szintnél. 50 Hz felett a halmazolt csomagok válaszrezgése szintén alacsonyabb a vizsgálati spektrumnál. Tehát, ebben a két frekvenciatartományban a feltételezett időbeli tömörítés még az egymásra helyezett csomagok legfelső szintjére is érvényes, amennyiben csomagok nincsenek lerögzítve. Egy másik megfigyelés, hogy az egymásra helyezett csomagok mozgása 8 – 50 Hz között eltér a vibrációs asztal és a szállítójármű mozgásától.

Itt hangsúlyoznom kell, hogy az ASTM D7386 (Pick-up and delivery) rázóvizsgálati spektruma az Egyesült Államokban használt csomagszállító járművekkel végzett helyszíni méréseken alapul [95], és a csomagolásvizsgálati gyakorlatban világszerte elfogadott eljárás-ként használják (gyakorlatilag ez az egyetlen rázóvizsgálati spektrum a futárszolgálati kiszállításban továbbított csomagok rázkódásvizsgálatára), de néhány korábbi tanulmány kimutatta, hogy az Egyesült Államokon kívül használt szállítójárművek kissé eltérő PSD alakot mutatnak az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban [95]. Továbbá megállapítható, hogy a jelen kutatás során kapott PSD egy kicsit alacsonyabb intenzitást mutat, mint amit a korábban publikált kutatásokban megfigyeltek [95]. Ennek oka az lehet, hogy ebben a kutatásban csak egy konkrét járművet használtam a rezgési esemény terepen történő megfigyelésére, a halmazolt csomagokon mért rezgésszintekre összpontosítva, míg a korábbi tanulmány több különböző csomagszállító járművet figyelt meg a szállítójármű rakfelületének rázkódási tulajdonságainak felméréséhez.

7.3. táblázat – Felmért halmazolt szintek Grms értékei (1 - 200 Hz) (Forrás: Saját szerkesztés)

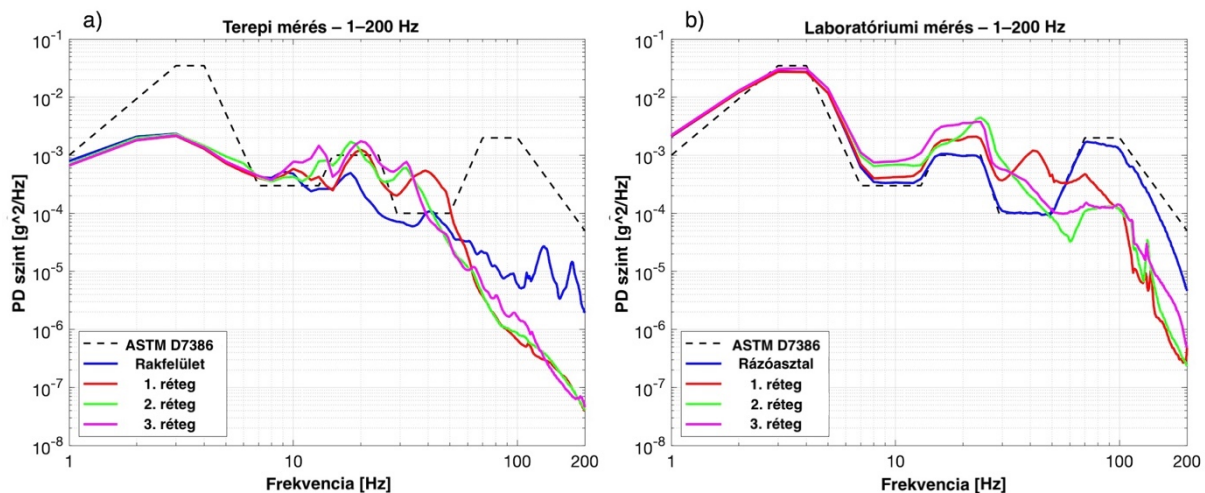
<b>Helyszín</b>	<b>Rakfelület</b>	<b>1. réteg</b>	<b>2. réteg</b>	<b>3. réteg</b>
Autópálya	0,099	0,122	0,131	0,135
Főút	0,119	0,164	0,156	0,177
Összesített	0,136	0,166	0,170	0,181
Mellékút	0,151	0,187	0,187	0,203
Városi út	0,154	0,187	0,197	0,204
Laboratórium	0,427	0,376	0,387	0,397

Az összesített Grms értékeket az egymásra helyezett csomagok minden egyes rétegére és a rakfelületre is kiszámításra került. Ezeket az adatokat a 7.3. táblázat tartalmazza. Az elemzett frekvenciatartományban (1 – 200 Hz) a  $G_{rms}$  értékek a magasabban elhelyezett csomag szintek

irányában növekedtek, kivéve a laboratóriumi mérés esetében, ahol ez a tendencia az egymásra helyezett csomagokra igaz, azonban ebben az esetben a legmagasabb  $G_{\text{rms}}$  érték a rakfelület szintjén jelentkezett. Az adatokból megállapítható, hogy nincs jelentős különbség a mellékutak és a városi utak rázkódási teljesítményét jellemző  $G_{\text{rms}}$  értékei között.

### 7.3.4. PSD-k elemzése az egyes frekvenciatartományokban

A 7.10. a.) és b.) ábra mutatja a kifejlesztett PSD görbéket mind a terepi, mind a laboratóriumi mérések 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban. Ebben a fejezetben azonban, az előző fejezettől eltérően, csak terepi mérés során felvett adatok összesített értékeiből kialakított PSD spektrumok szerepelnek. Ezek a spektrumok világosan megmutatják, hogy mind a rakfelületen, mind az egymásra helyezett csomagokban, a rezgésszintek jelentősen eltérnek 1 – 7 Hz között és 42 Hz felett, a vizsgálati spektrumtól, amit az ASTM D7386 szabvány előír. Ezekben a tartományokban a rezgésintenzitás sokkal alacsonyabb, mint a vizsgálati spektrumban. A laboratóriumi mérések esetében a rázóasztalon mért rezgésszint gyakorlatilag megegyezett a beprogramozott bemeneti spektrummal. Az egymásra helyezett rétegek rezgésszintje minden szinten és mindkét mérési típusnál eltért a gerjesztés rezgésszintjétől.

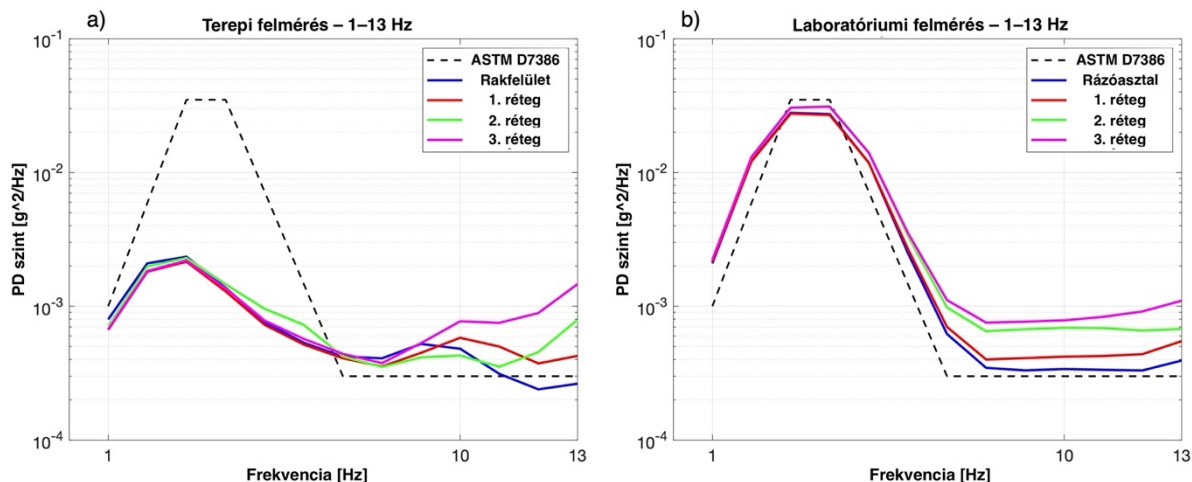


7.10. Ábra – A mért adatok 1 – 200 Hz-es PSD alakulása, a) terepi és b) laboratóriumi mérések esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

Az elemzés bemutatásának fejezetében leírtak alapján a teljes frekvenciatartományt három szakaszra bontottam. Elsőként az a szakasz PSD görbéit vizsgálom meg. Ebben a szakaszban PSD-eket készítettem az 1 – 13 Hz-es frekvenciatartományban, a felmért adatokból (7.11. a-b ábra). Az ábra frekvencia tengelyén a megszokott logaritmikus skála helyett lineáris skálát használtam az eredmények jobb megfigyelhetősége érdekében A jármű felfüggesztésének a



rezgésszintekre gyakorolt legjelentősebb hatása ebben a frekvenciatartományban található. [83]

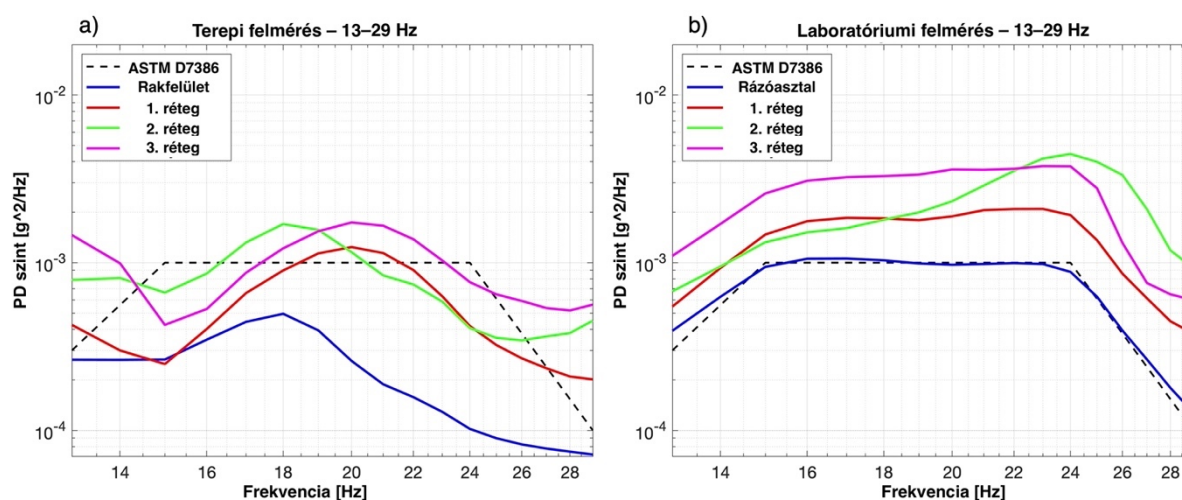


7.11. Ábra – A szakasz PSD görbéi 1 – 13 Hz-en, a) helyszíni és b) laboratóriumi mérések esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

Az ábrák azt mutatják, hogy a rezgésszintek az egyes halmazolási szinteken közel azonosak, a dobozok a terepi és a laboratóriumi mérések esetében is együtt mozognak, ez a jelenség azonban a terepi mérések esetében 8 Hz-ig, a laboratóriumi mérések esetében pedig csak 6 Hz-ig tart. Azonban, ezek felett a két mérési rendszer esetén felmerülő rezgés szintek eltérő képet mutatnak. A laboratóriumi mérések esetében ezen a teljes szakaszon a rezgésintenzitás a rázóasztaltól a harmadik halmazolási szinten elhelyezett dobozig egyre magasabb lett, a terepen azonban ez eltérően alakult. A terepi mérések esetében az egymásra helyezett csomagok második rétegének rezgésintenzitása 8 – 11 Hz között alacsonyabb volt, mint a rakfelület rezgésszintje, és 8 – 12 Hz között alacsonyabb, mint az első réteg rezgésszintje, ami az első rétegben lévő doboz csillapító hatásával magyarázható. A terepi mérések esetében, az egyes rétegek PSD görbéje nem hasonlított a vizsgálati profil spektrumához 1 – 7 Hz között. Itt, 3 Hz-nél a PD szint csúcserőértéke a rakfelületen  $0,0023 \text{ g}^2/\text{Hz}$  volt, szemben a szabványban előírt  $0,035 \text{ g}^2/\text{Hz}$  értékkel. 3 és 7 Hz között a PD szint a mért dobozokon és a rakfelületen is folyamatosan csökken, egészen  $0,00044 \text{ g}^2/\text{Hz}$ -re, de nem csökken a szabvány által 7 Hz-nél előírt  $0,003 \text{ g}^2/\text{Hz}$ -es értékre. A rakfelületen mért rezgésszintek 7 – 13 Hz között nagyjából megfelelnek a szabványos rezgésprofil szintjének. A harmadik dobozon mért rezgésszint 8 Hz felett folyamatosan emelkedett  $0,00035 \text{ g}^2/\text{Hz}$ -ről, és 13 Hz-nél elérte a  $0,0014 \text{ g}^2/\text{Hz}$  értéket. Ezzel szemben a harmadik doboz PD szintjének legalacsonyabb értéke  $0,00075 \text{ g}^2/\text{Hz}$  volt 8 Hz-es frekvencián, a legmagasabb érték pedig  $0,0011 \text{ g}^2/\text{Hz}$  volt 13 Hz-nél a laboratóriumi mérés esetében. Ez nagy valószínűség szerint azt jelenti, hogy a szállítás előtti laboratóriumi

vizsgálatok során, a csomagokon 1-7 Hz között túl, 8 – 13 Hz között alul vizsgálat történik a szabványos rázkódásvizsgálat esetén.

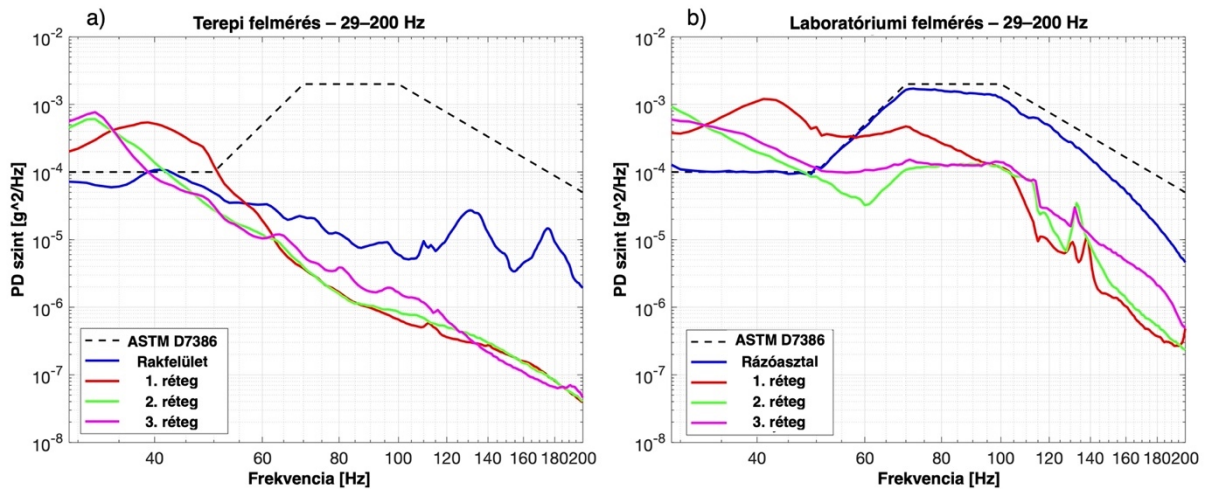
A B szakaszban a 13 – 29 Hz közötti adatok elemzéséhez is ábrázolásra kerültek a PSD görbék (7.12. ábra). Ez a frekvenciatartomány elsősorban a gumiabroncsok által gerjesztett rezgéseket reprezentálja. Ebben a tartományban mindkét mérési esetben a rakfelület, valamint a rázóasztal rezgésintenzitása volt a legalacsonyabb, és a harmadik réteg rezgésintenzitása magasabb volt, mint az első rétegé. Érdekes azonban megjegyezni, hogy a második réteg rezgésszintje bizonyos frekvencia sávokban magasabb, illetve alacsonyabb, mint az első vagy harmadik rétegé. Az is érdekes, hogy az alacsonyabb és magasabb rezgésszintek a két mérés szempontjából különböző frekvenciatartományokban helyezkednek el. A terepi mérések esetében a második réteg PD-szintje 14,5 és 19 Hz között a legmagasabb, ahol keresztezte a harmadik réteg PSD görbét, majd 20 – 24 Hz között egészen az első réteg PD szintje alá csökkent. A laboratóriumban ugyan ez a réteg némiképp elterjedtebben viselkedett, a rezgésintenzitása 18 Hz-ig szinte megegyezik az első rétegével, majd 22,5 Hz-nél meghaladta a harmadik réteg rezgésszintjét is, majd 22,5 – 29 Hz között ennek a rétegnek volt a legmagasabb a rezgésintenzitása.



7.12. Ábra – B szakasz PSD görbéi 13 – 29 Hz-en, a) helyszíni és b) laboratóriumi mérések esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

A harmadik, egyben az utolsó vizsgált frekvencia szakasz a C, ahol 29 – 200 Hz közötti rezgés szintek kerültek elemzésre. A 7.13. ábra a C szakasz PSD ábráit mutatja. Itt szeretném megjegyezni, hogy a szakasz PSD görbéit tartalmazó ábrákon, a tartomány szélessége miatt ismét logaritmusos skálázást alkalmaztam. A C szakaszban vizsgált frekvenciatartomány a felépítmény és a jármű karosszériaszervezetének válaszából származó rezgéseket

reprezentálja. Itt megállapítható, hogy terepi mérések során a mért rezgésszintek minden esetben jelentősen eltérnek a szabványos profil alakjától.

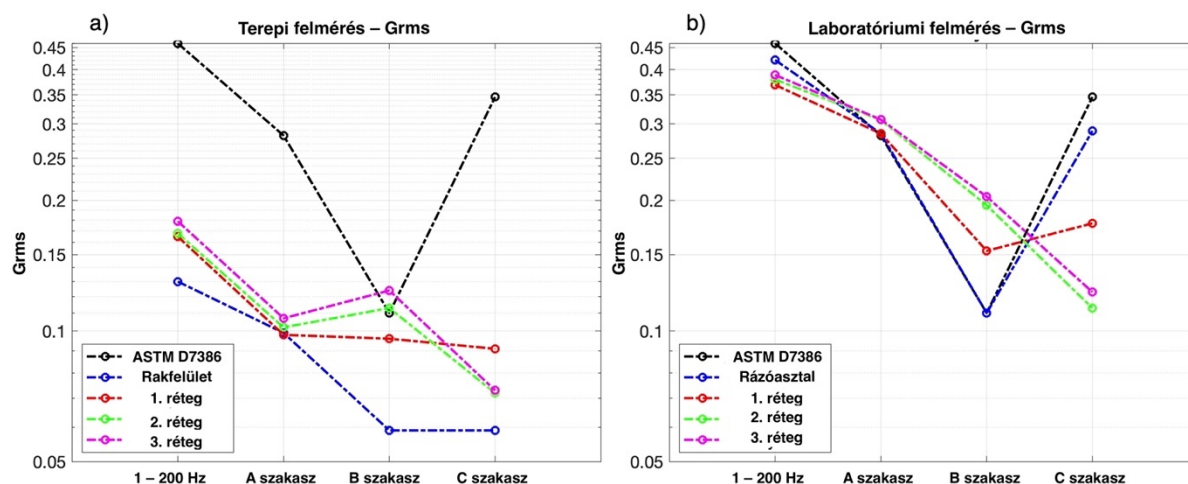


7.13. Ábra – PSD görbék 29 - 200 Hz-en, a) terepi és b) laboratóriumi mérések (Forrás: Saját szerkesztés)

A laboratóriumban az asztal rezgése 90 Hz-ig pontosan követte a beprogramozott vizsgálati profil rázkódási szintjét, azonban, ezt követően a 90 Hz feletti frekvenciatartományban a SAVER adatgyűjtő a vizsgálati profil szintjénél alacsonyabb rezgésszinteket rögzített, ami valószínűleg a kétoldalú ragasztószalaggal történő rögzítésnek, valamint a SAVER és a rázóasztalvezérlő közötti eltérő mintavételi frekvenciának tudható be. Mindkét mérési esetben megállapítható, hogy a második és a harmadik réteg rázkódásszintjei nagyon hasonlóan alakultak, de az első rétegben mért rezgésszintek eltérőek. Az első rétegben 34 Hz-ig a rezgésszint a legalacsonyabb volt az egymásra helyezett csomagokban, azonban ezt a frekvenciapontot követően a többi réteg intenzitása fölé emelkedett. A terepi mérések során az első réteg rázkódási intenzitása 40 Hz-nél érte el a maximális PD szintet, ahol a második és a harmadik réteg a rakfelület PD szintje alá csökkent. Ezen a frekvenciaponton a második, a harmadik és a rakfelület PD szintje megegyezett a vizsgálati szabvány által előírt PD értékkel, amely ott  $0,001 \text{ g}^2/\text{Hz}$  volt. Ezzel szemben az első réteg PD szintje csak  $0,0005 \text{ g}^2/\text{Hz}$  volt. 40 Hz felett az első réteg rázkódásintenzitása először a rakfelület rázkódásintenzitása alá csökkent, majd folyamatosan tovább csökkenve 200 Hz-ig, ahol PD értéke körülbelül  $0,000000005 \text{ g}^2/\text{Hz}$  volt. A laboratóriumi mérések során is megfigyelhető volt az a jelenség, hogy a legmagasabb rezgésszintek az egymásra helyezett dobozok első rétegében jelentkeztek 34 és 94 Hz között, majd 94 Hz-től 200 Hz-ig minden egyes csomagolási réteg rázkódási intenzitása csökkent.

Az előző fejezethez hasonlóan, az összesített  $G_{\text{rms}}$  értékek kiszámításra kerültek minden egyes szakaszon, annak érdekében, hogy az egyes szektorok rázkódás teljesítményei

összehasonlíthatóak legyenek a ASTM D7386 szabványban elvárt rázkódási teljesítménnyel. A kiszámított  $G_{rms}$  értékeket az egyes szakaszokra vonatkozóan a 7.5. táblázat tartalmazza. A szakaszok rázkódásteljesítményeinek átláthatóbb összehasonlításának érdekében az adatokat grafikusan is szemléltetem a 7.14. ábra segítségével.



7.14. Ábra – Számított  $G_{rms}$  értékek szakaszonként, a) terepi és b) laboratóriumi mérések esetén (Forrás: Saját szerkesztés)

7.4. táblázat – Számított Grms értékek szakaszonként, a) terepi és b) laboratóriumi mérések esetén

		Összesen 1 – 200 Hz	A szakasz 1 – 13 Hz	B szakasz 13 – 29 Hz	C szakasz 29 – 200 Hz
Terepi mérések	Rakfelület	0,130	0,099	0,059	0,059
	1. réteg	0,165	0,098	0,096	0,091
	2. réteg	0,168	0,102	0,113	0,072
	3. réteg	0,179	0,107	0,124	0,073
Laboratóriumi mérések	Rakfelület	0,421	0,285	0,110	0,289
	1. réteg	0,369	0,285	0,153	0,177
	2. réteg	0,380	0,306	0,195	0,113
	3. réteg	0,389	0,307	0,204	0,123
ASTM D7386		0,460	0,282	0,110	0,346

A teljes frekvencia tartományban (1-200 Hz) kiszámított  $G_{rms}$  értékek elemzését az előző fejezet végén mutattam be, ezért itt csak az egyes szakaszok rázkódás teljesítményének elemzését mutatom be a fent bemutatott szakaszok szerint.

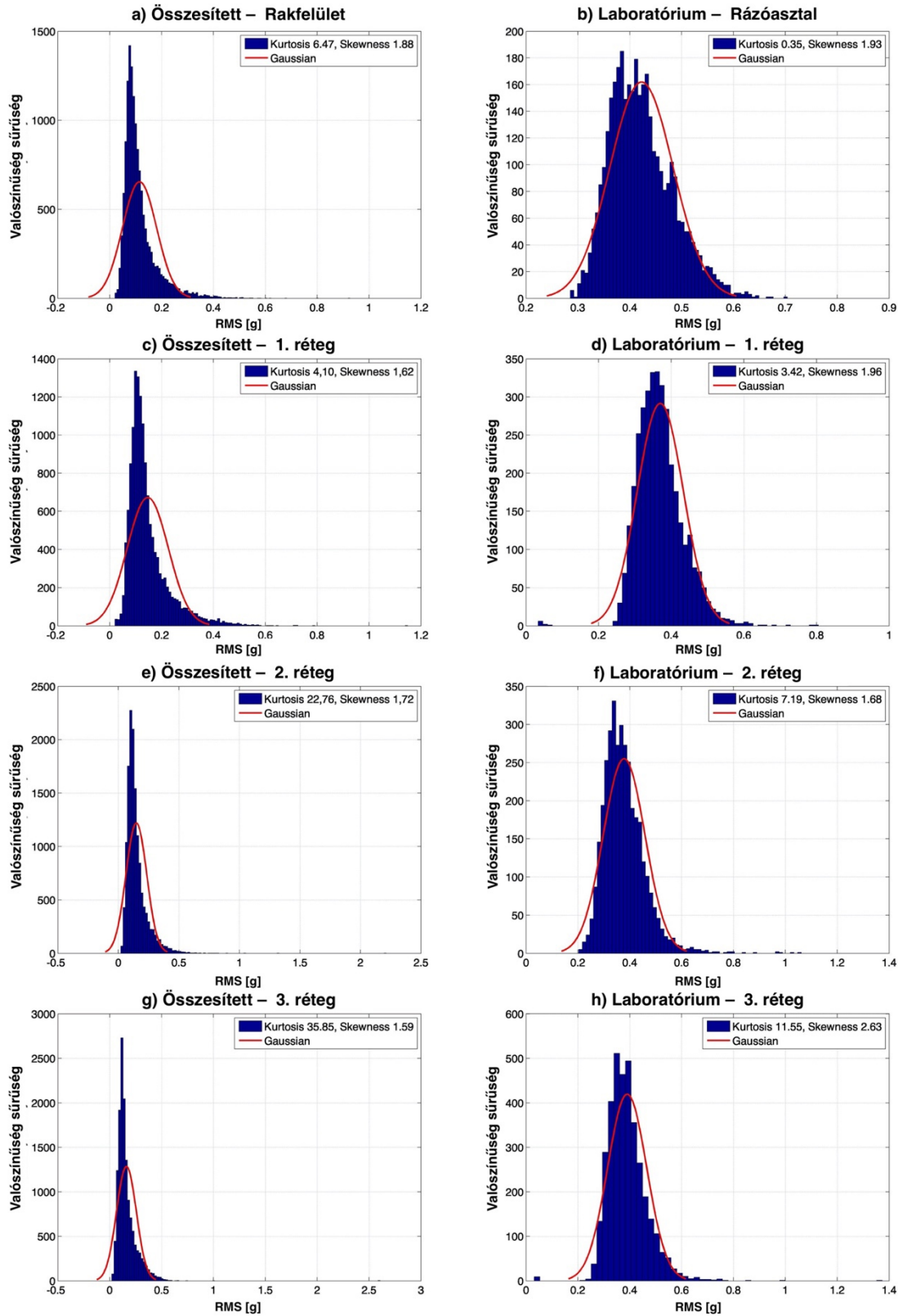
Az A szakaszban (1 – 13 Hz) az egyes halmazolási rétegek  $G_{rms}$  értékek is növekedtek a magasabb pozícióba helyezett csomagok irányába, de nem jelentős mértékben. A laboratóriumban az egymásra helyezett csomag rétegek  $G_{rms}$  értékei gyakorlatilag a szabványos követelménynek megfelelő értékeket mutattak, de ezek az értékek 2,8 – 3,0-szor magasabbak, mint a valóságban. Tehát a laboratóriumban a véletlenszerű rezgésintenzitás tekintetében túlvizsgálatról beszélhetünk.

A B szakasz (13 – 29 Hz) esetében a  $G_{rms}$  értékek mindkét mérésnél jelentős különbséget mutattak a rakfelület és a mintacsomagolások halmazolt rétegei között. A terepen 0,051  $G_{rms}$  különbség volt kimutatható a rakfelület és a szabványos rázókövetelmény értéke között, ami majdnem kétszeres különbséget jelent. A halmazolt csomagolások szintjein a laboratóriumi rázószimuláció esetén is 1,5 – 1,8-szor nagyobb  $G_{rms}$  értékeket mutattak, mint a terepi mérések, tehát ez valójában azt jelenti, hogy a laboratóriumi mérések követelményei túlméretezettek.

A C szakaszban (29 – 200 Hz között) jelentős különbség tapasztalható rakfelületen a terepi és a rázóasztalon végzett mérések között. Ez a különbség a terepen mért rázkódási teljesítmények és a laboratóriumi vizsgálat között 0,287  $G_{rms}$ , ami azt jelenti, hogy a laboratóriumi vizsgálatok során a szabványban megkövetelt a gerjesztés intenzitása 5,8-szor nagyobb, mint a valóságban. Ez az egyetlen olyan szakasz és eset, ahol a közvetlen gerjesztés (rázóasztal)  $G_{rms}$  értéke magasabb, mint az egymásra helyezett dobozokon mért  $G_{rms}$  értékek. Ez alapján, 29 Hz felett a mintadobozok az egymásra helyezett rakat rezgéscsillapító mechanizmusát mutatják. Másrészt, ebben a szakaszban a  $G_{rms}$  értékek rétegről rétegre emelkedő tendenciája nem érvényesül, így ebben a frekvenciatartományban jelentős túlvizsgálat történik a laboratóriumi vizsgálatok során.

### **7.3.5. A gyorsulási csúcsok és az RMS(g) statisztikai jellemzői**

A 7.15. ábra, a terepi mérésből és a laboratóriumi mérésből származó RMS(g) adatok számított valószínűségi sűrűségfüggvényeit mutatja. Minden ábrán feltüntettem a számított kurtózis és ferdeség értéket is. Az egymás mellett elhelyezett ábrák segítik a laboratóriumi vizsgálatokból és a terepi mérésekből származó adatok összehasonlítását. A véletlenszerű rázóvizsgálat esetén a rázóasztalt vezérlő berendezés Gauss-eloszlással működik, de a kurtózis megadásával a véletlenszerű rezgésvizsgálatot realisabb módon tudják elvégezni, amennyiben vezérlő rendszer tudja kezelni ezt.



7.15. Ábra – A rögzített függőleges RMS (g) valószínűség sűrűség függvényének értékei a helyszíni mérésnél és a laboratóriumban a következő helyeken: a) Összesített - rakfelület, b) Laboratórium - rázóasztal, c) Összesített-1. réteg, d) Laboratórium-1. réteg, e) Összesített-2. réteg, f) Laboratórium-2. réteg, g) Összesített-3. réteg, h) Laboratórium-3. réteg (Forrás: Saját szerkesztés)



Az RMS (g) értékekre számított eloszlás esetében a kurtózis értékek minden esetben pozitív csúcst mutattak. Mind a terepi, mind a laboratóriumi mérési esetben a legmagasabb kurtózis értékek a halmozott csomagolások harmadik rétegében voltak, 35,85 értékkel a terepi, és 6,54 értékkel a laboratóriumi esetben. A 7.16. ábrán a kurtózis értékének növekvő tendenciája figyelhető meg az egyre magasabb szinten elhelyezett csomagokon. Ezek a jelenségek összhangban vannak a korábbi publikációk eredményeivel, amelyekben a szállítójárművek véletlenszerű rezgéseinek nem-Gaussi jellegét vizsgálták [61], [112], [114], [116], [117]. A ferdeség értékek is minden esetben pozitív értékűek voltak, és rendszerint 1,62 – 2,63 értékek közé estek. Az ábrákon szereplő kurtózis és ferdeség értékeket táblázatba rendezve az értekezés D függelékében adtam meg.

### **7.3.6. A kutatás gyakorlati korlátozó tényezői**

Jelen kutatás gyakorlati korlátozó tényezői nagyban megegyeznek 6.3.4. fejezetben leírtakkal, azonban itt ki kell egészítenem az ott leírtakat azzal, hogy a csomagok a szállítások során az oldal- és hosszirányban is rázkódási eseményeknek vannak kitéve, de a laboratóriumban az elterjedt gyakorlat, az egy szabadsági fokú (SDOF – Single Degree of Freedom) rázkódási rendszert használja. Így a csomagok, a valós szállítási gyakorlatban összetettebb bemeneti gerjesztést szenvednek el, ami összetettebb rezgésválaszokat okozhat a csomagok rétegei között.

### **7.4. A kutatás összefoglalása és főbb megállapításai**

A rögzítés nélkül, függőlegesen egymásra helyezett csomagok expressz kézbesítése esetén a magasabb csomaghelyzetben a gyorsulási csúcsértékek (g) és az effektív gyorsulás értékei (RMS g) magasabbak. A különböző útkategóriák közül, a városi út során jelentkeztek a legnagyobb gyorsulási események, mind a szállítójármű, mind a mintacsomagolások estében. A legmagasabb érték 4,63 g volt, a halmozott csomagolások harmadik szintjén. Az adatok alapján egyértelmű, hogy minden 1 g feletti gyorsulás a csomagok elemelkedését okozza.

Ez a növekvő jelenség halmozott csomagolások magasabb rétegei irányába a rezgésintenzitásnál is megfigyelhető, azonban, a terepen mért rázkódási intenzitás elmaradt a laboratóriumi vizsgálat rezgésintenzitásától 1 - 200 Hz -es frekvenciatartományban, és ez, még a halmozott csomagok felső sorában is megfigyelhető volt, ahol a terepen mért rezgésintenzitás a legmagasabb értékeket mutatta. A terepen mért rázkódásintenzitás mindegyik halmozott csomagolási rétegben magasabb volt, mint a rakfelületen. Azonban, ez a laboratóriumi mérések

esetén nem igaz, mert a rázóasztalon mért PD szintek mindig magasabbak voltak a minta csomagolások fázison belüli mozgása miatt.

A halmazolt csomagolások PD szintjei a terepen, a 7 – 50 Hz-es frekvenciatartományban gyakorlatilag elérték vagy meghaladták az ASTM D7386 vizsgálati spektrum szintjeit, így itt a vizsgálati spektrum erősítési tényezője nem értelmezhető. Az 1 – 6 Hz-es alsó frekvenciatartományban, valamint 50 Hz felett a csomagolás rétegeinek a válaszrengése jelentősen elmaradt a vizsgálati spektrumétól. Ezek alapján elmondható, hogy aszállítási rakomány felső sorában célszerű olyan csomagokat elhelyezni, amelyek egyrészt kevésbé érzékenyek a rezgésekre, másrészt célszerű olyan csillapító anyagokat használni, amelyek 7 – 50 Hz -es frekvenciatartományban kedvezőbb csillapítási tulajdonságokkal rendelkeznek. Ez alapján, a 7 – 50 Hz-es frekvenciatartományban a szabványos rázóvizsgálat túlzott rázkódási intenzitást generál a halmazolt csomagok esetén. Különösen igaz ez, 13 – 29 Hz-es frekvenciatartományban. Továbbá megállapítható, hogy figyelmet kell fordítani az egymásra helyezett érzékeny áruk rögzítésére, hogy elkerülhető legyen a rezgésintenzitás felerősödése az egymásra helyezett csomagolások felső soraiban.

A PSD-k szakaszos elemzése alapján megállapítható, hogy az 1 – 13 Hz-es frekvenciatartományban (A kutatásban: A szakasz), a terepi mérés adatai azt mutatják, hogy az 1 – 7 Hz közötti rezgésszint jelentősen alacsonyabb, mint az ASTM D7386 szabvány rázóvizsgálati követelménye, azonban 8 – 13 Hz között a jármű rakfelületének a rázkódási szintje nagyjából a szabványban elvárt intenzitással megegyező rezgésszintet ért el. A 13 – 29 Hz-es frekvenciatartományban (a kutatásban: B szakasz) a rakfelület rezgésszintje a terepen alacsonyabb, mint a szabványos, míg az egymásra helyezett csomagolási rétegek rezgésszintje 18 – 23 Hz között magasabb. Amely azt jelenti, hogy ebben a frekvenciatartományban, a vizsgálati spektrum erősítési tényezője nem érvényesül a halmazolt csomagolások esetén. 29 – 200 Hz között (a kutatásban: C szakasz) a rakfelület rezgésszintje 45 Hz-ig nagyjából megegyezik a vizsgálati szabvány rázkódási intenzitásának a szintjével, ez fölött azonban gyorsan csökken, és a PSD görbe nem követi a szabványos rázkódás PSD görbét. Ez a tendencia az egymásra halmazolt csomagokra is érvényes.

Az 1 - 200 Hz-es frekvenciatartományban számított  $G_{rms}$  értékek a laboratóriumi vizsgálat során a terepi méréshez képest, közel 3,5-ször nagyobb rezgésintenzitást mutat a rázóasztal felületén és 2,2 - 3,0-szor nagyobbat az egymásra helyezett csomagolások rétegeiben. Ez igaz a halmazolt csomagok PSD görbéi esetében is, az 1 – 13 Hz, 13 – 29 Hz és 29 – 200 Hz közötti frekvenciatartományban, laboratóriumban mért értékek sorrendben 2,2 – 3,0, 1,5 – 1,8 és 1,7



– 1,9-szeresen magasabbak, mint a terepen mért csomagok esetében. A 29 – 200 Hz-es frekvenciatartományban a laboratóriumi vizsgálat során a rázóberendezés tárgyasztala által gerjesztett rázkódás intenzitása 5,8-szoros, a felmért jármű rakfelületéhez viszonyítva. Mindezek az eredmények azt mutatják, hogy az expressz, futárszolgálati csomagszállításához használt véletlenszerű rázkódási vizsgálatok a csomagolások termékvédelmi funkciójának ellenőrzésére túlvizsgálati módszert alkalmaznak. Amelyeknél a biztonsági tényező mértéke a kutatásban bemutatott rázkódási intenzitás eltérések alapján frekvenciatartománytól függően 2 és 5 között alakul. [122]–[124]

## 8. Az értekezés tézisei

**1. Tézis:** Fél-szinuszos jelalakú ütésvizsgálatokkal megállapítottam, hogy a töltött és halmazolt PE műanyag hordók esetén a felsőbb halmazszintek felé a rakomány csillapítja az ütési impulzusokat, a csillapítási tényező a hordók töltési szintjétől függ és mértéke 0,2 és 0,7 közé esik.

A tézishez tartozó publikáció: [107]

**2. Tézis:** Laboratóriumban végzett 3 – 200 Hz közötti szinuszos és véletlenszerű rázóvizsgálatokkal megállapítottam, hogy hullámpapírlemez dobozokból halmazolt egység rakomány esetén az 5 – 16 Hz-es frekvenciatartományban a középső és felső sorok rázkódásintenzitása lényegesen magasabb, mint a gerjesztő mozgás intenzitása. Ez a jelenség a rakományrögzítő pántszalag és/vagy nyújtható fólia megválasztásától független. Ugyanakkor 5 Hz alatt és 16 Hz felett a halmazolt rakomány rétegei gyakorlatilag követik a gerjesztő mozgás jellemzőit.

A tézishez tartozó publikációk: [108]–[110]

**3. Tézis** Kistehergépjárműben halmazolt és hullámpapírlemez alapú kisméretű csomagok terepi felmérése során megfigyeltem és rögzítettem a felmerülő véletlenszerű rázkódásokat, amelyek elemzése alapján megállapítottam, hogy az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban a vertikális irányban a legmagasabb a teljes spektrum összesített  $G_{rms}$  értéke, a hosszirányban pedig a legalacsonyabb. A halmazolt csomagolások vízszintes irányú szabad elmozdulási lehetőségének növelésével a hosszirányú és oldalirányú összehasonlítható  $G_{rms}$  értékek mellett a vertikális  $G_{rms}$  értékek is jelentős mértékben, közel 20 %-al emelkednek.

**3.1 Tézis** Halmazolt kisméretű csomagok terepi felméréséből származó csúcsgyorsulás adatok eloszlásainak vizsgálataival megállapítottam, hogy az egyre magasabb halmazolási szinteken olyan véletlenszerű rázkódás tapasztalható, amely közelít a normális eloszláshoz.

A tézisekhez tartozó publikáció: [118]

**4. Tézis:** Kistehergépjárműben halmazolt kisméretű csomagok terepi felmérése során a véletlenszerű rázkódások adatainak elemzése alapján megállapítottam, hogy az 1 – 200 Hz-es frekvenciatartományban a legintenzívebb függőleges irányú véletlenszerű rázkódás a kalkulálható teljes  $G_{rms}$  értékek alapján a városi szállítás során jelentkezik, amelyet a mellékutak, főutak és autópályákon való szállítás követ.

**5. Tézis:** Terepi és laboratóriumi összehasonlító vizsgálatokkal megállapítottam, hogy a terepen megfigyelt és egymásra halmozott kisméretű hullámpapírlemezdoboz küldemények esetében a 13 – 29 Hz közötti frekvenciatartományban a halmaz felső soraiban a rétegek rezgésintenzitásai eléri a széles körben alkalmazott ASTM D7386 vizsgálati program által előírt rezgésintenzitás szintjeit, ugyanakkor 1 – 13 Hz és 29 – 200 Hz között a  $G_{rms}$  értékek 62 % és 79 %-al alacsonyabbak, így ezeken a tartományokon a szabványos vizsgálat túlzott előírásokat követel meg.

**5.1. Tézis:** Az 1 - 200 Hz-es frekvenciatartományban számított  $G_{rms}$  értékek a laboratóriumi vizsgálat során a terepi méréshez képest közel 3,5-ször nagyobb rezgésintenzitást mutatnak a rázóasztal felületén és 2,2 - 3,0-szor magasabbat az egymásra helyezett csomagolások egyes rétegeiben.

A 4. és 5. tézishez tartozó publikációk: [122]–[124]

## 9. Következtetések és további kutatási irányok

Az értekezésemben elsőként bemutatott kutatásomban vizsgáltam a műanyag hordók válaszgyorsulásait különböző bemeneti ütésimpulzusok, a rögzítés és a töltöttségi fokuk függvényében. A kutatás eredményei megmutatták, hogy a csillapítási tényező függ a hordók töltési szintjétől. A további kutatásokban célszerű lenne, további műanyag csomagolóeszközökön is elvégezni a méréseket a kutatásban bemutatott mérési rendszer segítségével, hogy komplettebb kép alakulhasson ki a műanyag csomagolóeszközök csillapítási tulajdonságairól.

A hullámpapírdobozokból felépített egységtrakományon végzett kutatásomban megállapítottam azokat a frekvenciatartományokat, ahol a rakomány egyes szintjein ébredő rázkódások intenzitása meghaladja a gerjesztés intenzitását, azonban a kutatásomban az egységtrakomány rakatképzése egyféle elrendezést mért fel, így célszerű lenne a további kutatások során olyan vizsgálatok elvégzése, amikor a rakatképzés eltérő csomagelrendezéssel készül.

Az értekezésem utolsó két kutatásában terepi felmérést végeztem és adatgyűjtő műszer segítségével rögzítettem egy kistehergépjármű rakfelületén és az ott halmazolt, kisméretű csomagokon ébredő gyorsulásokat. A kutatások eredményei megmutatták a kritikus frekvencia tartományokat, ahol a halmazolt csomagok rázkódás intenzitása lényegesen meghaladja a rakfelület vagy a rázóasztal rázkódásintenzitását, valamint a csomagokon jelentkező rázkódások és gyorsulások változását a szabad elmozdulásuk és a szállítási útviszonyok függvényében. A kutatásaim során egyforma méretű és tömegű csomagokat használtam, azonban, ezek nem elhanyagolható tényezők a rázkódások szempontjából. Ezért a későbbi kutatásaimban az expressz kiszállítási láncban felmerülő igénybevételeket szeretném vizsgálni, eltérő méretű és tömegű csomagolások esetében, különös tekintettel ezek rázkódási és ütési igénybevételeire fókuszálva.

## Összefoglalás

Az átalakuló ellátási láncok egyre összetettebbé és hosszabbá váltak, amelyekben a csomagolások integritását negatívan befolyásoló környezeti igénybevételek hatásai és paraméterei kevésbé ismertek és jelentős kihívások elé állítják a csomagolások termékvédelmi képességeit tervező szakembereket. Ezért a doktori értekezésem célja, hogy laboratóriumi vizsgálatokkal és terepen végzett mérések segítségével többlet információt nyújtsak a csomagolások termékvédelmi képességeit károsító környezeti igénybevételekről és hatásukról az optimális csomagolás megtervezéséhez, fókuszálva a halmazolt csomagolások ütési és rázkódási igénybevételeire. Ez alapján, az értekezésem elején bemutatattam a csomagolás funkciót az átalakuló ellátási láncokban, valamint a csomagolástervezés lépéseit, majd ismeretem az ütések és rázkódásokat meghatározó fizikai folyamatokat. A kutatásaim bemutatása előtt részletesen bemutattam a kutatási témámban korábban megjelent szakirodalmak eredményeit, valamint az rázkódások és ütések szimulációjára használt iparági szabványok előírásait. Ezek alapján, az értekezésem következő fejezeteiben ismertett kutatásomban a halmazolt rakományokon ébredő ütési és rázkódási események paramétereit vizsgálom, különböző laboratóriumi rázóasztalon végzett mérésekkel, valamint terepi felmérésekkel, egy kistehergépjármű rakterébe halmazolt csomagolási rendszer esetén.

Az értekezésemben elsőként bemutatott kutatásomban vizsgáltam a műanyag hordók válaszgyorsulásait különböző bemeneti ütésimpulzusok, a rögzítés és a töltöttségi fokuk függvényében. A kutatás eredményei megmutatták, hogy a csillapítási tényező függ a hordók töltési szintjétől. A hullámpapírdobozokból felépített egységtrakományon végzett kutatásomban megállapítottam azokat a frekvenciatartományokat, ahol a pántolt vagy nyújtható fóliával elkészített rakomány egyes szintjein ébredő rázkódások intenzitása meghaladja a gerjesztés intenzitását. Az értekezésem utolsó két kutatásában terepi felmérést végeztem és adatgyűjtő műszer segítségével rögzítettem egy kistehergépjármű rakfelületén és az ott halmazolt, kisméretű csomagokon ébredő gyorsulásokat. A kutatások eredményei megmutatták a kritikus frekvencia tartományokat, ahol a halmazolt csomagok rázkódás intenzitása lényegesen meghaladja a rakfelület vagy a rázóasztal rázkódásintenzitását, valamint a csomagokon jelentkező rázkódások és gyorsulások változását a szabad elmozdulásuk és a szállítási útviszonyok függvényében.

A kutatásaim alapján az értekezés végén összesen 7 darab, 5 fő tézist és 2 altézist fogalmaztam meg.

## Summary

Changing supply chains have become increasingly complex and longer, in which the impacts and parameters of environmental stresses that negatively affect the integrity of packaging are less well understood and challenge the designers of packaging product protection capabilities. Therefore, the aim of my PhD thesis is to provide more information on environmental stresses and their effects on the product protection capabilities of packaging through laboratory studies and field measurements for optimal packaging design, focusing on the shock and vibration stresses of stacked packaging. Based on this, I will start my thesis with an introduction to the function of packaging in the changing supply chains and the steps of packaging design, followed by an introduction to the physical processes that determine vibration and shock. I have presented in detail the results of previous published literature on my research topic, as well as the specifications of industry standards used to simulate shocks and vibrations. Based on these, in my research presented in the following chapters of my thesis, I investigated the parameters of shock and vibration events on stacked packages, using various laboratory vibration table measurements and field measurements for a stacked packaging system in a van.

My research, presented for the first time in my thesis, investigated the response accelerations of plastic drums as a function of different input shock pulses, their fixation, and their degree of filling. The results of the research showed that the damping factor depends on the filling level of the plastic barrels. In my research on a unitized load of corrugated cardboard boxes, I have identified the frequency ranges where the intensity of the vibrations at each level of the stacked packages in the unitized load, prepared with strapped or stretch film, exceeds the intensity of the excitation. In the last two research of my thesis, I conducted a field measurement and recorded the accelerations on the loading surface of a van and inside the small, stacked packages on it, using a data acquisition instrument and compared it to laboratory vibration measurements. The results showed the critical frequency ranges where the vibration intensity of the stacked packages significantly exceeds the vibration intensity of the loading surface or the vibration table, and the change of the vibrations and accelerations on the packages as a function of their free space and the type of roads.

Based on my research, at the end of the thesis, I formulated a total of 7 theses, 5 main theses and 2 sub-theses.

## Függelék

A. függelék – A 6. fejezetben bemutatott kurtózis és ferdeség értékek táblázata

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

B. függelék – A kumulatív eloszlásfüggvények adatai a csúcsgyorsulás (g, csúcs) értékekhez a 7. fejezetben bemutatott kutatáshoz

Adatok	A mérés helye	A Saver helye	Gyorsulás (g) 50%	Gyorsulás (g) 90%	Gyorsulás (g) 95%	Gyorsulás (g) 99%	Maximális gyorsulás
Gyorsulás (g, csúcs)	Autópálya	Rakfelület	0,28	0,46	0,55	0,92	1,77
		1. réteg	0,34	0,50	0,63	2,09	2,88
		2. réteg	0,35	0,52	0,66	2,21	2,94
		3. réteg	0,35	0,57	0,72	1,24	3,04
	Főút	Rakfelület	0,31	0,56	0,70	1,03	1,89
		1. réteg	0,40	0,71	0,86	1,34	2,73
		2. réteg	0,43	0,80	0,98	1,52	2,63
		3. réteg	0,44	0,88	1,09	1,56	3,98
	Mellék út	Rakfelület	0,29	0,80	1,02	1,55	2,40
		1. réteg	0,35	0,94	1,26	1,88	3,33
		2. réteg	0,39	0,99	1,24	1,80	3,60
		3. réteg	0,42	1,10	1,33	1,88	3,85
	Városi út	Rakfelület	0,34	0,84	1,05	1,66	3,00
		1. réteg	0,42	1,04	1,31	1,89	3,00
		2. réteg	0,43	1,07	1,34	1,99	3,29
		3. réteg	0,45	1,18	1,43	2,01	4,63
	Összesített	Rakfelület	0,30	0,67	0,88	1,41	2,80
		1. réteg	0,38	0,87	1,11	1,70	3,33
		2. réteg	0,38	0,87	1,16	2,44	3,78
		3. réteg	0,39	0,98	1,25	2,11	4,63
	Laboratórium	Rakfelület	1,49	1,84	1,94	2,18	2,86
		1. réteg	0,99	1,25	1,38	1,83	3,96
		2. réteg	1,03	1,37	1,50	2,68	4,72
		3. réteg	1,06	1,57	1,84	2,68	6,53



C. függelék – A kumulatív eloszlásfüggvények adatai az RMS (g) értékekhez a 7. fejezetben bemutatott kutatáshoz

Adatok	A mérés helye	A Saver helye	RMS (g) 50%-	RMS (g) 90%	RMS (g) 95%	RMS (g) 99%	Maximális gyorsulás
RMS (g)	Autópálya	Rakfelület	0,09	0,13	0,15	0,22	0,39
		1. réteg	0,11	0,15	0,17	0,25	0,51
		2. réteg	0,12	0,16	0,18	0,25	0,55
		3. réteg	0,12	0,18	0,20	0,28	0,61
	Főút	Rakfelület	0,10	0,16	0,20	0,28	0,46
		1. réteg	0,13	0,22	0,26	0,35	0,67
		2. réteg	0,14	0,22	0,27	0,39	0,71
		3. réteg	0,15	0,25	0,30	0,39	0,71
	Mellék út	Rakfelület	0,09	0,25	0,30	0,42	0,68
		1. réteg	0,12	0,30	0,35	0,49	0,78
		2. réteg	0,13	0,31	0,38	0,49	0,89
		3. réteg	0,14	0,33	0,38	0,51	1,01
	Városi út	Rakfelület	0,11	0,23	0,29	0,41	0,80
		1. réteg	0,13	0,30	0,36	0,47	0,93
		2. réteg	0,14	0,30	0,37	0,51	1,15
		3. réteg	0,15	0,33	0,39	0,49	1,32
	Összesített	Rakfelület	0,10	0,20	0,25	0,37	0,93
		1. réteg	0,12	0,25	0,31	0,44	1,15
		2. réteg	0,13	0,25	0,32	0,45	2,21
		3. réteg	0,13	0,28	0,34	0,46	2,61
	Laboratórium	Rakfelület	0,42	0,51	0,53	0,59	0,70
		1. réteg	0,36	0,45	0,48	0,55	0,81
		2. réteg	0,37	0,47	0,51	0,64	1,06
		3. réteg	0,38	0,49	0,52	0,61	1,37

D. függelék – Kurtózis és ferdeség adatok táblázata a 7. fejezetben bemutatott kutatáshoz

Útviszonyok	Hely	Kurtózis (gyorsulási adatok, g csúcs)	Ferdeség (gyorsulási adatok, g csúcs)	Kurtózis (RMS g adatok)	Ferdeség (RMS g adatok)
Autópálya	Rakfelület	1,85	-1,15	11,64	2,83
	1.	1,75	1,23	10,35	2,42
	2.	3,71	1,89	6,29	2,15
	3.	7,27	0,29	16,16	2,63
Főút	Rakfelület	1,89	-0,98	3,18	1,93
	1.	1,21	0,42	3,54	1,96
	2.	0,03	0,59	2,47	1,68
	3.	0,59	0,74	1,82	1,44
Összefoglaló	Rakfelület	1,67	-0,62	6,47	2,43
	1.	0,51	0,11	4,10	2,11
	2.	1,04	1,51	22,76	3,12
	3.	-0,33	1,03	35,85	6,04
Mellék út	Rakfelület	1,89	-0,55	0,57	1,72
	1.	-0,90	0,22	1,54	1,49
	2.	-1,25	1,05	1,66	1,69
	3.	-2,83	0,43	-0,25	1,24
Városi út	Rakfelület	0,07	-0,27	2,31	1,88
	1.	-1,83	0,25	1,55	1,62
	2.	-2,25	0,70	2,23	1,72
	3.	-2,52	0,46	2,73	1,59
Laboratórium	Rakfelület	-0,17	-0,85	0,35	0,66
	1.	1,30	-1,30	1,42	0,59
	2.	1,82	0,61	4,19	1,66
	3.	1,49	3,50	6,54	1,41

## Ábrajegyzék

2.1. Ábra – A csomagolás szintjei	10.o.
2.2. Ábra – A csomagolás kapcsolódó szakterületei	11.o.
2.3. Ábra – Hagyományos ellátási lánc egyszerűsített modellje	13.o.
2.4. Ábra – Omni-ccsatorna ellátási lánc egyszerűsített modellje	14.o.
2.5. Ábra – Globális logisztikai ipar piaci mérete 2018 és 2022 között, előrejelzéssel 2028-ig (billió dollárban kifejezve)	15.o.
2.6. Ábra – Az e-kereskedelem százalékos aránya a teljes kereskedelemben	15.o.
2.7. Ábra – Amerikai szállítási piac mérete szállítási módok szerint 2018-ban	16.o.
2.8. Ábra – Expressz csomag szállítás volumene 2013-2022 között, előrejelzéssel 2027-ig	16.o.
2.9. Ábra – Tengeri szállítások volumene 1990 és 2021 között (millárd tonnában kifejezve)	17.o.
2.10. Ábra – Légiszállítások volumene 2004 és 2021 között (millió Tonnában kifejezve)	18.o.
2.11. Ábra – Csomagolt termék költség szemlélete	19.o.
2.12. Ábra – Kritikus elem és tömeg – rugó modellje	20.o.
2.13. Ábra – Ütés a) valós gyorsulás-idő függvénye, b) közelített, egyszerűsített gyorsulás-idő függvénye	23.o.
2.14. Ábra – A csúcsgyorsulás, időtartam és a sebességváltozás kapcsolata	23.o.
2.15. Ábra – A lineáris lengőrendszer modellje	26.o.
2.16. Ábra – Általános sérüléshatár görbe	27.o.
2.17. Ábra – Harmonikus mozgás paraméterei	28.o.
2.18. Ábra – A rakfelület, a csomagolás és a termék tömeg-rugó modellje	29.o.
2.19. Ábra – Átmeneti arány a gerjesztő és kimenő frekvencia arányának függvényében	30.o.

2.20. Ábra – Az átviteli arány abszolút értéke a fázisban és fázison kívüli rezgés függvényében	31.o.
2.21. Ábra – Szállítójármű rakfelületén rögzített rázkódás gyorsulás – idő diagramja	31.o.
2.22. Ábra – Szállítójármű rakfelület rázkódásának PSD ábrája	33.o.
2.22. Ábra – Halmazolt rakományok dinamikus terhelése rázkódás hatására	35.o.
4.1. Ábra – A méréshez használt mintacsomagolás, a.) félig töltve, b.) teljesen töltve	44.o.
4.2. Ábra. – A halmazolt hordókból összeállított mérési rendszer	45.o.
4.3. Ábra – A rögzítés nélküli és hevederrel rögzített mintacsomagolások mérési körülményeinek vázlatos ábrázolása a) és b)	46.o.
4.4. Ábra – Félig töltött, nem rögzített hordókon mért válaszgyorsulások	48.o.
4.5. Ábra – Félig töltött, rögzített hordókon mért válaszgyorsulások	49.o.
4.6. Ábra – Teljesen megtöltött, nem rögzített hordókon mért válaszgyorsulások	50.o.
4.7. Ábra – Teljesen megtöltött, rögzített hordókon mért válaszgyorsulások	51.o.
5.1. Ábra – A vizsgált csomagolások töltési módja	56.o.
5.2. Ábra – Nyújtható fóliás a.) és pántolt b.) vizsgálati minta rakomány	57.o.
5.3. Ábra – A gyorsulásmérők helyzete a mérés során	58.o.
5.4. Ábra – Nyújthatófóliás egységakományon mért gyorsulás-frekvencia függvény	60.o.
5.5. Ábra – Pántolt egységakományon mért gyorsulás-frekvencia függvény	60.o.
5.6. Ábra – Nyújthatófóliás egységakományon mért PSD ASTM D4169 közúti rázóprofil esetén	61.o.
5.7. Ábra – Pántolt egységakományon mért PSD ASTM D4169 közúti rázóprofil esetén	62.o.
5.8. Ábra – A nyújthatófóliával csomagolt rakomány átviteli függvény diagramja közúti rázószimuláció esetén	63.o.
5.9. Ábra – A pántolt egységakományrakomány átviteli függvény diagramja közúti rázószimuláció esetén	63.o.
5.10. Ábra – Nyújthatófóliás egységakományon mért PSD ISTA 3A légi szállítási rázóprofil esetén	64.o.

5.11. Ábra – Pántolt egységtrakományon mért PSD ISTA 3A légi szállítási rázóprofil esetén	65.o.
5.12. Ábra – Nyújthatófoliás egységtrakományrakomány átviteli függvény diagramja légi rázószimuláció esetén	66.o.
5.13. Ábra – Pántolt egységtrakományrakomány átviteli függvény diagramja légi rázószimuláció esetén	66.o.
6.1. Ábra – Csomagok elhelyezkedése a rakodótérben	68.o.
6.2. Ábra – a) Hullámkarton, b) Alu-profil és c) A vizsgálathoz használt vizsgálati minta	70.o.
6.3. Ábra – a) A felépített mérési rendszer SZE 0%, b) SZE 10% és c) SZE 20% esetén	71.o.
6.4. Ábra – A felmért útvonalak ábrázolása a térképen	72.o.
6.5. Ábra – A csúcsgyorsulás értékek empirikus CDF ábrái, a)-c) oldalirányban SZE 0%,10%,20%, d)-f) hosszirányban SZE 0%,10%,20%, g)-i) függőleges irányban SZE 0%,10%,20%	75.o.
6.6. Ábra – A különböző rétegek PSD görbéi az egymásra helyezett csomagolásokban és a rakfelületen SZE 0%, 10% és 20% mellett, a) – c) hosszanti, d) – f) oldalirányú és g) – i) függőleges tengelyekben	77.o.
6.7. Ábra – A különböző rétegek átviteli függvény diagramjai függőleges irányban a) SZE 0%, b) SZE 10% és c) SZE 20% esetén	77.o.
6.8. Ábra – A függőleges gyorsulási adatok eloszlásai, valamint csúcosság és ferdeség értékei a) – d) SZE 0%, e) – h) SZE 10% és i) – l) SZE 20%. esetén	79.o.
7.1. Ábra – A mérésekhez összeállított minta csomagolás és adatgyűjtőműszer	82.o.
7.2. Ábra – a) A mérőrendszer összeállítása a kistehergépjárműben és b) a laboratóriumban	83.o.
7.3. Ábra – A mért útvonalak ábrázolása a térképen a) autópálya, b) főút c) országút d) városi út	84.o.
7.4. ábra. ASTM D7386 - PSD burkológörbe a csomagküldő kiszállítások szabványos rázóvizsgálatához	85.o.

- 7.5. Ábra – A frekvenciatartományok elemzett szakaszai 87.o.
- 7.6. ábra: a) Az halmazolt csomagolások és a rakfelület gyorsulási csúcsértékei és b) RMS (g) -értékei különböző útkategóriák mellett és a laboratóriumban 89.o.
- 7.7. Ábra – A csúcsgyorsulási értékek empirikus CDF grafikonjai, a) autópálya, b) főút, c) mellékút, d) városi utak, e) összesített, f) laboratórium 90.o.
- 7.8. Ábra – Az RMS (g) értékek empirikus CDF grafikonjai, a) autópálya, b) főút, c) mellékút, d) városi utak, e) összesített, f) laboratórium 92.o.
- 7.9. Ábra – A különböző rétegek PSD görbéi a halmazolt csomagok rétegeiben, a rakfelületen és az ASTM D7386 spektrumon a) autópályán, b) főúton, c) mellékúton, d) városi utakon, e) összesítve, f) laboratóriumban 94.o.
- 7.10. Ábra – A mért adatok 1 - 200 Hz-es PSD-k alakulása, a) terepi és b) laboratóriumi mérések esetén 96.o.
- 7.11. Ábra – A szakasz PSD görbéje 1-13 Hz-en, a) helyszíni és b) laboratóriumi mérések esetén 97.o.
- 7.12. Ábra – B szakasz PSD görbéje 13-29 Hz-en, a) helyszíni és b) laboratóriumi mérések esetén 98.o.
- 7.13. Ábra – PSD görbék 29 - 200 Hz-en, a) terepi és b) laboratóriumi mérések 99.o.
- 7.14. Ábra – Számított Grms értékek szakaszonként, a) terepi és b) laboratóriumi mérések esetén 100.o.
- 7.15. Ábra – A rögzített függőleges RMS (g) valószínűség sűrűség függvényének értékei a helyszíni mérésnél és a laboratóriumban a következő helyeken: a) Összesített - rakfelület, b) Laboratórium - rázóasztal, c) Összesített-1. réteg, d) Laboratórium-1. réteg, e) Összesített-2. réteg, f) Laboratórium-2. réteg, g) Összesített-3. réteg, h) Laboratórium-3. réteg 102.o

## Táblázatjegyzék

2.1. táblázat – Termékek érzékenységi foka	25.o.
4.1. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkések az impulzus indítása után, rögzített, félig töltött, egymásra halmazolt hordók esetében	52.o.
4.2. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkések az impulzus indítása után, rögzítetlen, félig töltött, egymásra halmazolt hordók esetében	52.o.
4.3. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkések az impulzus indítása után, rögzített, teli, egymásra helyezett halmazolt hordók esetében	52.o.
4.4. táblázat – Csúcsgyorsulás amplitúdók és időkések az impulzus indítása után, rögzítetlen, teli, halmazolt hordók esetében	53.o.
5.1. táblázat – ASTM és ISTA véletlenszerű rázásszimulációk PSD töréspontjai	59.o.
6.1. táblázat – A mintacsomagolás adatai és SAVER-beállítások	69.o.
6.2. táblázat – A méréshez használt kistehergépjármű útvonalainak és járműsebességeinek jellemzői	72.o.
6.3. táblázat – A mért gyorsulási adatok összefoglalása	74.o.
6.4. táblázat – Összesített Grms értékek a különböző rétegek és SZE-ok esetében, mindhárom irányban 1-200 Hz frekvenciatartományban	78.o.
7.1. táblázat – A SAVER adatgyűjtő beállítások paraméterei és a kutatáshoz használt minta adatai	82.o.
7.2. táblázat – A felmért útvonalak és járműsebességek jellemzői	84.o.
7.3. táblázat – Felmért halmazolási szintek Grms értékei (1 - 200 Hz)	95.o.
7.4. táblázat – Számított Grms értékek szakaszonként, a) terepi és b) laboratóriumi mérések esetén	100.o.

# Irodalomjegyzék

## Hivatkozások

- [1] Walter Soroka, *Fundamentals of Packaging Technology*, 3rd Edition. Naperville, IL, USA: Institute of Packaging Professionals, 2002.
- [2] D. Hellström and M. Saghir, 'Packaging and logistics interactions in retail supply chains', *Packaging Technology and Science*, vol. 20, no. 3, pp. 197–216, May 2007, doi: 10.1002/pts.754.
- [3] M. J. Kirwan and R. Coles, *Food and beverage packaging technology*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] European Environment Agency, 'EEA Glossary'. 1994. Accessed: May 29, 2023. [Online]. Available: [http://europa.eu.int/eur-lex/en/search/search\\_lif.html](http://europa.eu.int/eur-lex/en/search/search_lif.html)
- [5] D. Hellström and M. Saghir, 'Packaging and logistics interactions in retail supply chains', *Packaging Technology and Science*, vol. 20, no. 3, pp. 197–216, May 2007, doi: 10.1002/pts.754.
- [6] H. Pålsson and D. Hellström, 'Packaging logistics in supply chain practice – current state, trade-offs and improvement potential', *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 19, no. 5, pp. 351–368, Sep. 2016, doi: 10.1080/13675567.2015.1115472.
- [7] F. A. Paine and I. of Packaging, *Fundamentals of Packaging*. Institute of Packaging, 1981. [Online]. Available: <https://books.google.hu/books?id=vIsUAAAACAAJ>
- [8] D. Twede, B. Parsons, and P. International, *Distribution Packaging for Logistical Systems: A Literature Review*. in Pira International Packaging Review Series. Pira International, 1997. [Online]. Available: <https://books.google.hu/books?id=wxC9OAAACAAJ>
- [9] J. R. Stock and D. M. Lambert, *Strategic logistics management*, vol. 4. McGraw-Hill/Irwin Boston, MA, 2001.
- [10] K. A. Johansson, Lorentzen Karlsson, C. Olsmats, and L. Tilander, *Packaging logistics*. Kista, Sweden: Packforsk, 1997.



- [11] E. Hansson and M. Olsson, 'Logistic and Transport Management Master Thesis No 2000:30 Ellos A case study in Operations Management and Packaging Logistics'.
- [12] P. M. Coelho, B. Corona, R. ten Klooster, and E. Worrell, 'Sustainability of reusable packaging—Current situation and trends', *Resources, Conservation and Recycling: X*, vol. 6. Elsevier B.V., May 01, 2020. doi: 10.1016/j.rcrx.2020.100037.
- [13] P. Böröcz and Á. Mojzes, 'A csomagolás jelentő sége a logisztikában', *TRANSPACK CSOMAGOLÁSI ANYAGMOZGATÁSI MAGAZIN*, vol. 8, no. 2, pp. 28–32, 2008.
- [14] A. Regattieri and G. Santarelli, 'The Important Role of Packaging in Operations Management', in *Operations Management*, InTech, 2013. doi: 10.5772/54073.
- [15] W. W. Kassaye and D. Verma, 'Balancing Traditional Packaging Functions with the New'Gree', *SAM Advanced Management Journal*, vol. 57, no. 4, p. 15, 1992.
- [16] S. Livingstone and L. Sparks, 'The New German Packaging Laws: Effects on Firms Exporting to Germany', *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 24, no. 7, pp. 15–25, Sep. 1994, doi: 10.1108/09600039410070957.
- [17] R. A. Lancioni and R. Chandran, 'The role of packaging in international logistics', *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 20, no. 8, pp. 41–43, 1990.
- [18] J. Lai, A. Harjati, L. McGinnis, C. Zhou, and T. Guldberg, 'An economic and environmental framework for analyzing globally sourced auto parts packaging system', *J Clean Prod*, vol. 16, no. 15, pp. 1632–1646, 2008.
- [19] H. Pålsson, C. Finnsgård, and C. Wänström, 'Selection of packaging systems in supply chains from a sustainability perspective: The case of volvo', *Packaging Technology and Science*, vol. 26, no. 5, pp. 289–310, Aug. 2013, doi: 10.1002/pts.1979.
- [20] E. Svanes, M. Void, H. Møller, M. K. Pettersen, H. Larsen, and O. J. Hanssen, 'Sustainable packaging design: A holistic methodology for packaging design', *Packaging Technology and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 161–175, Apr. 2010, doi: 10.1002/pts.887.
- [21] M. Jahre and C. J. Hatteland, 'Packages and physical distribution: Implications for integration and standardisation', *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 34, no. 2, pp. 123–139, 2004, doi: 10.1108/09600030410526923.

- [22] R. Holdway, D. Walker, and M. Hilton, ‘Eco-design and successful packaging’, *Design Management Journal (Former Series)*, vol. 13, no. 4, pp. 45–53, Jun. 2010, doi: 10.1111/j.1948-7169.2002.tb00330.x.
- [23] F. T. S. Chan, H. K. Chan, and K. L. Choy, ‘A systematic approach to manufacturing packaging logistics’, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 29, no. 9–10, pp. 1088–1101, Jul. 2006, doi: 10.1007/s00170-005-2609-x.
- [24] V. A. Lofthouse, T. A. Bhamra, and R. L. Trimmingham, ‘Investigating customer perceptions of refillable packaging and assessing business drivers and barriers to their use’, *Packaging Technology and Science*, vol. 22, no. 6, pp. 335–348, Oct. 2009, doi: 10.1002/pts.857.
- [25] Daniela Coppola, ‘E-commerce as percentage of total retail sales worldwide from 2015 to 2026’, 2023. Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/534123/e-commerce-share-of-retail-sales-worldwide/>
- [26] N. Boysen, R. de Koster, and F. Weidinger, ‘Warehousing in the e-commerce era: A survey’, *European Journal of Operational Research*, vol. 277, no. 2. Elsevier B.V., pp. 396–411, Sep. 01, 2019. doi: 10.1016/j.ejor.2018.08.023.
- [27] E. Brynjolfsson, Y. J. Hu, and M. S. Rahman, ‘Competing in the age of omnichannel retailing’, *MIT Sloan Manag Rev*, 2013.
- [28] B. Montreuil, ‘Omnichannel Business-to-Consumer Logistics and Supply Chains: Towards Hyperconnected Networks and Facilities’, 2016. [Online]. Available: [https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr\\_2016/19](https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2016/19)
- [29] V. S. Yadav, S. Tripathi, and A. R. Singh, ‘Bi-objective optimization for sustainable supply chain network design in omnichannel’, *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 30, no. 6, pp. 972–986, Oct. 2019, doi: 10.1108/JMTM-06-2017-0118.
- [30] N. Beck and D. Rygl, ‘Categorization of multiple channel retailing in Multi-, Cross-, and Omni-Channel Retailing for retailers and retailing’, *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 27, pp. 170–178, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jretconser.2015.08.001.

- [31] A. Hübner, J. Wollenburg, and A. Holzapfel, ‘Retail logistics in the transition from multi-channel to omni-channel’, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 46, no. 6–7, pp. 562–583, Jul. 2016, doi: 10.1108/IJPDLM-08-2015-0179.
- [32] J. P. Rodrigue, ‘The distribution network of Amazon and the footprint of freight digitalization’, *J Transp Geogr*, vol. 88, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102825.
- [33] A. Vafaei, S. Yaghoubi, J. Tajik, and F. Barzinpour, ‘Designing a sustainable multi-channel supply chain distribution network: A case study’, *J Clean Prod*, vol. 251, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119628.
- [34] S. Brüel Grönberg and K. Hulthén, ‘E-commerce packaging as an embedded resource in three network settings’, *International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, vol. 32, no. 4, pp. 450–467, 2022, doi: 10.1080/09593969.2022.2099950.
- [35] Research and Markets, ‘Size of the global logistics industry from 2018 to 2022, with forecasts until 2028’, *Statista*. 2022. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/943517/logistics-industry-global-cagr/>
- [36] eMarketer, ‘E-commerce as percentage of total retail sales worldwide from 2015 to 2026’, *Statista*. 2022. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/534123/e-commerce-share-of-retail-sales-worldwide/>
- [37] Werner, ‘Market size of the U.S. freight transportation in 2018, by segment (in billion U.S. dollars)’, *Statista*. 2019. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/939971/freight-transportation-market-size-by-segment-united-states/>
- [38] Statista, ‘Global parcel shipping volume between 2013 and 2027 (in billion parcels)’, *Statista*. 2022. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1139910/parcel-shipping-volume-worldwide/>
- [39] Y. Kim, J. Kang, and H. Chun, ‘Is online shopping packaging waste a threat to the environment?’, *Econ Lett*, vol. 214, May 2022, doi: 10.1016/j.econlet.2022.110398.
- [40] UNCTAD, ‘Transport volume of seaborne trade from 1990 to 2021’, *Statista*. 2022. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available:

- <https://www.statista.com/statistics/264117/tonnage-of-worldwide-maritime-trade-since-1990/>
- [41] IATA, ‘Worldwide air freight traffic from 2004 to 2021, with an estimate for 2022 (in million metric tons)’, *Statista*. 2022. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/564668/worldwide-air-cargo-traffic/>
- [42] G. Batt, ‘Primary Resonance Behavior of Expanded Polymer Cushion Material Under Low-Intensity Harmonic Excitations Recommended Citation’, 2013. [Online]. Available: [https://tigerprints.clemson.edu/all\\_dissertations](https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations)
- [43] Csavajda Péter, ‘Szállítási körülmények felmérése és elemzése műanyag csomagolószerek termékvédelmi vizsgálataihoz’, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2023.
- [44] A. Azzi, D. Battini, A. Persona, and F. Sgarbossa, ‘Packaging Design: General Framework and Research Agenda’, *Packaging Technology and Science*, vol. 25, no. 8, pp. 435–456, Dec. 2012, doi: 10.1002/pts.993.
- [45] V. Sohrabpour, P. Oghazi, and A. Olsson, ‘An Improved Supplier Driven Packaging Design and Development Method for Supply Chain Efficiency’, *Packaging Technology and Science*, vol. 29, no. 3, pp. 161–173, Mar. 2016, doi: 10.1002/pts.2194.
- [46] A. J. Parker, M. A. Sęk, and V. Rouillard, ‘A method of characterisation of the nonlinear vibration transmissibility of cushioning materials’, 2007.
- [47] A. J. Parker, M. A. Sęk, and V. Rouillard, ‘A method of characterisation of the nonlinear vibration transmissibility of cushioning materials’, 2007.
- [48] M. A. Sek, M. Minett, V. Rouillard, and B. Bruscella, ‘A new method for the determination of cushion curves’, *Packaging Technology and Science*, vol. 13, no. 6, pp. 249–255, Nov. 2000, doi: 10.1002/pts.517.
- [49] Ph. D. Richard K. Brandenburg and Ph. D. Julian June-Ling Lee, *Fundamentals of Packaging Dynamics*. Itasca, USA: L.A.B. Equipment, Inc., 2001.
- [50] Pánczél Zoltán and Böröcz Péter János, *Anyagmozgatás, Raktározás*. Győr: Universitas-Győr nonprofit Kft., 2008.
- [51] Daniel Goodwin and Dennis Young, ‘Protective Packaging for Distribution’. [Online]. Available: <http://www.destechpub.com>

- [52] Dr. Pánczél Zoltán, *Anyagmozgatás, csomagolás, raktározás*. Győr: Széchenyi István Egyetem, 2006.
- [53] Pánczél Zoltán, 'A csomagolás rendszerszemléletű értelmezése a logisztikában, és – reológiai – tervezési módszer kidolgozása a viszkoelasztikus csomagolóanyagokra', Széchenyi István Egyetem, Győr, 2009.
- [54] C. Fragassa, I. Macaluso, M. Vaccari, and G. Lucisano, 'Measuring the mechanical and climatic conditions encountered by palletized products in handling and transport', *FME Transaction*, vol. 45, no. 3, pp. 382–393, 2017, doi: 10.5937/fmet1703382F.
- [55] M.-A. Garcia-Romeu-Martinez, S. P. Singh, and V.-A. Cloquell-Ballester, '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, pp. 439–451, Dec. 2008, doi: 10.1002/pts.798.
- [56] J. Singh, S. P. Singh, and E. Joneson, '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*, vol. 19, no. 6, pp. 309–323, Nov. 2006, doi: 10.1002/pts.732.
- [57] S. P. Singh, 'Vibration levels in commercial truck shipments as a function of suspension and payload', *J Test Eval*, vol. 20, no. 6, pp. 466–469, 1992.
- [58] S. P. Singh, A. P. S. Sandhu, J. Singh, and E. Joneson, 'Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India', *Packaging Technology and Science*, vol. 20, no. 6, pp. 381–392, Nov. 2007, doi: 10.1002/pts.764.
- [59] S. P. Singh, K. Saha, J. Singh, and A. P. S. Sandhu, 'Measurement and Analysis of Vibration and Temperature Levels in Global Intermodal Container Shipments on Truck, Rail and Ship', *Packaging Technology and Science*, vol. 25, no. 3, pp. 149–160, Apr. 2012, doi: 10.1002/pts.968.
- [60] J. Zhao and D. P. Zhu, 'The simulation of non-gaussian vibration environment on railway', in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, 2014, pp. 1848–1852. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.1848.
- [61] D. Zhu, 'Digital generation of non-Gaussian random vibration signals in railway transportation and package response analysis', in *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, John Wiley and Sons Ltd, May 2019. doi: 10.1002/cpe.4795.

- [62] P. Böröcz and S. P. Singh, 'Measurement and Analysis of Vibration Levels in Rail Transport in Central Europe', *Packaging Technology and Science*, vol. 30, no. 8, pp. 361–371, Aug. 2017, doi: 10.1002/pts.2225.
- [63] Z. Ilić, B. Rašuo, M. Jovanović, and D. Janković, 'Impact of changing quality of air/fuel mixture during flight of a piston engine aircraft with respect to vibration low frequency spectrum', *FME Transactions*, vol. 41, no. 1, pp. 25–32, 2013.
- [64] Z. Ilic, B. Rasuo, M. Jovanovic, S. Pekmezovic, A. Bengin, and M. Dinulovic, 'Potential connections of cockpit floor-seat on passive vibration reduction at a piston propelled airplane', *Tehnički vjesnik*, vol. 21, no. 3, pp. 471–478, 2014.
- [65] Z. Ilić *et al.*, 'The efficiency of passive vibration damping on the pilot seat of piston propeller aircraft', *Measurement*, vol. 95, pp. 21–32, 2017.
- [66] J. Singh, P. Singh, and K. Saha, 'Evaluation of Vibration Profiles for ULD Dollies at Air-Cargo Sorting Hubs', *The Journal of Applied Packaging Research*, vol. 7, no. 1, pp. 15–26, Jan. 2015, doi: 10.14448/japr.03.0002.
- [67] K. Dunno and G. Batt, 'Analysis of in-flight vibration of a twin-engine turbo propeller aircraft', *Packaging Technology and Science*, vol. 22, no. 8, pp. 479–485, Dec. 2009, doi: 10.1002/pts.872.
- [68] K. Dunno, E. Joneson, P. McDavid, T. Somers, and M. Willard, 'Vibration Test Spectrum Simulating the In-Flight Jet Aircraft Transport Environment of Parcel and Unit Load Shipments', *J Test Eval*, vol. 51, no. 5, 2023.
- [69] S. P. Singh, G. Burgess, and J. Singh, 'Measurement and analysis of the second-day air small and light-weight package shipping environment within federal express', *Packaging Technology and Science*, vol. 17, no. 3, pp. 119–127, May 2004, doi: 10.1002/pts.647.
- [70] M. A. Garcia-Romeu-Martinez, S. P. Singh, V. A. Cloquell-Ballester, and K. Saha, 'Measurement and analysis of international air parcel shipping environment for DHL and FedEx between Europe and United States', *Packaging Technology and Science*, vol. 20, no. 6, pp. 421–429, Nov. 2007, doi: 10.1002/pts.775.
- [71] S. P. Singh, J. Singh, and K. Saha, 'Measurement and Analysis of Physical and Climatic Distribution Environment for Air Package Shipment', *Packaging Technology and Science*, vol. 28, no. 8, pp. 719–731, Aug. 2015, doi: 10.1002/pts.2136.

- [72] S. P. Singh, G. J. Burgess, J. A. Marcondes, and J. R. Antle, ‘Measuring the package shipping environment in refrigerated ocean vessels’, *Packaging Technology and Science*, vol. 6, no. 4, pp. 175–181, Jul. 1993, doi: 10.1002/pts.2770060402.
- [73] P. Böröcz, ‘Vibration and acceleration levels of multimodal container shipping physical environment’, *Packaging Technology and Science*, vol. 32, no. 6, pp. 269–277, Jun. 2019, doi: 10.1002/pts.2434.
- [74] P. Böröcz and B. Molnár, ‘Analysis of distribution climatic environment on a long-time shipping’, in *7th International Scientific Conference Management of Technology – Step to Sustainable Production : MOTSP2015*, Zagreb: Croatian Association for PLM, Jun. 2015, pp. 159–166.
- [75] R. Zhou, L. Yan, B. Li, and J. Xie, ‘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, pp. 949–957, Nov. 2015, doi: 10.1002/pts.2176.
- [76] J. Park, S. Choi, and H. M. Jung, ‘Measurement and analysis of vibration levels for truck transport environment in Korea’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 19, pp. 1–19, Oct. 2020, doi: 10.3390/app10196754.
- [77] C. S. Jones, J. E. Holt, and D. Schoorlt, ‘A Model to Predict Damage to Horticultural Produce During Transport’, 1991.
- [78] F. Lu, Y. Ishikawa, T. Shiina, and T. Satake, ‘Analysis of shock and vibration in truck transport in Japan’, *Packaging Technology and Science*, vol. 21, no. 8, pp. 479–489, Dec. 2008, doi: 10.1002/pts.841.
- [79] R. Pidl and P. Böröcz, ‘Discrete Fourier transform and cepstrum analysis of vibration events on semi-trailer truck’, *FME Transactions*, vol. 47, no. 1, pp. 177–182, 2019, doi: 10.5937/fmet1901177P.
- [80] M. Garrido, L. Esteban, P. Navarro, N. Herranz, F. J. Zabaleta, and V. Rouillard, ‘Measurement and analysis of truck vibration levels in logistic Spain distribution to simulate package testing’, *Packaging Technology and Science*, 2023, doi: 10.1002/pts.2730.

- [81] B. Jarimopas, S. P. Singh, and W. Saengnil, ‘Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit’, *Packaging Technology and Science*, vol. 18, no. 4, pp. 179–188, Jul. 2005, doi: 10.1002/pts.687.
- [82] V. Chonhenchob, S. P. Singh, J. J. Singh, J. Stallings, and G. Grewal, ‘Measurement and analysis of vehicle vibration for delivering packages in small-sized and medium-sized trucks and automobiles’, in *Packaging Technology and Science*, Jan. 2012, pp. 31–38. doi: 10.1002/pts.955.
- [83] P. Böröcz, ‘Averaged vibration levels during courier parcel delivery service in small truck in Hungary’, *FME Transactions*, vol. 46, no. 2, pp. 211–217, 2018, doi: 10.5937/fmet1802211B.
- [84] P. Böröcz, ‘Vibration levels of stacked automotive engine rack in truck shipments as a function of vehicle speed and road condition’, *J Test Eval*, vol. 49, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1520/JTE20180782.
- [85] Bence Molnár, ‘Simulation framework for packaging dynamics of stacked units’, in *PROCEEDINGS OF THE 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING*, Debrecen: University of Debrecen, Nov. 2017, pp. 366–371.
- [86] Z. W. Wang and K. Fang, ‘Dynamic Performance of Stacked Packaging Units’, *Packaging Technology and Science*, vol. 29, no. 10, pp. 491–511, Oct. 2016, doi: 10.1002/pts.2232.
- [87] K. Fang and Z. W. Wang, ‘The Statistical Characteristics of Maxima of Contact Force in Stacked Packaging Units under Random Vibration’, *Packaging Technology and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 261–276, May 2018, doi: 10.1002/pts.2313.
- [88] W. D. Godshall, *Frequency response, damping, and transmissibility characteristics of top-loaded corrugated containers*, vol. 160. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1971.
- [89] A. Paternoster, S. Vanlanduit, J. Springael, and J. Braet, ‘Measurement and analysis of vibration and shock levels for truck transport in Belgium with respect to packaged beer during transit’, *Food Packag Shelf Life*, vol. 15, pp. 134–143, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.fpsl.2017.12.007.



- [90] C. Bernad, A. Laspalas, D. González, E. Liarte, and M. A. Jiménez, ‘Dynamic study of stacked packaging units by operational modal analysis’, *Packaging Technology and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 121–133, Apr. 2010, doi: 10.1002/pts.883.
- [91] V. Rouillard, M. A. Sek, and S. Crawford, ‘The dynamic behaviour of stacked shipping units during transport. Part I: Model validation’, *Packaging Technology and Science*, vol. 17, no. 5, pp. 237–247, Sep. 2004, doi: 10.1002/pts.645.
- [92] S. Iglesias-Pradas and E. Acquila-Natale, ‘The Future of E-Commerce: Overview and Prospects of Multichannel and Omnichannel Retail’, *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, vol. 18, no. 1, pp. 656–667, Mar. 2023, doi: 10.3390/jtaer18010033.
- [93] J. Stallings, J. Singh, and S. P. Singh, ‘Measurement and analysis of vehicle vibration for parcel delivery vehicles in single parcel shipments’, *Journal of Applied Packaging Research*, vol. 4, no. 2, pp. 75–82, 2010.
- [94] K. Dunno and P. Chavan, ‘Measurement and Analysis of Crowdsourced Vehicle Vibration Levels during Last Mile Delivery Segments for Parcel Shipments’, *Vibration*, vol. 5, no. 4, pp. 792–802, Dec. 2022, doi: 10.3390/vibration5040046.
- [95] P. Böröcz and S. P. Singh, ‘Measurement and analysis of delivery van vibration levels to simulate package testing for parcel delivery in Hungary’, *Packaging Technology and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 342–352, May 2018, doi: 10.1002/pts.2327.
- [96] P. Böröcz, ‘Vibration Levels in Vans as a Function of Payload and Leaf Spring Sheet Number’, *J Test Eval*, vol. 46, no. 1, p. 20160538, Dec. 2017, doi: 10.1520/JTE20160538.
- [97] V. Chonhenchob, S. P. Singh, J. J. Singh, J. Stallings, and G. Grewal, ‘Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small-Sized and Medium-Sized Trucks and Automobiles’, *Packaging Technology and Science*, vol. 25, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2012, doi: 10.1002/pts.955.
- [98] ASTM D4169-16, ‘Standard practice for performance testing of shipping container systems’. ASTM, USA, PA, 2016.
- [99] ‘ASTM D7386-16: Standard Practice for Performance Testing of Packages for Single Parcel Delivery Systems’, *PA 19428-2959 USA*. ASTM (‘ASTM’), West Conshohocken, PA 19428-2959 USA, 2016.

- [100] 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, 2021.
- [101] ISTA, ‘Procedure 3B: Packed - Products for Less-Than-Truckload (LTL) Shipment’, *ISTA*. 2021.
- [102] ISTA, ‘Procedure 3E: Similar Packed-Products in Unitized Loads for Truckload Shipments’, *ISTA*. 2021.
- [103] ISTA, ‘Porcedures 6: e-Commerce Fulfillment of Parcel Delivery Shipment’, *ISTA*. 2021.
- [104] W. I. Kipp, ‘Vibration testing equivalence – How many hours of testing equals how many miles of transport?’, in *ISTA Con 2000*, International Safe Transit Association, 2000.
- [105] MSZ EN 60068-2-27, ‘Environmental testing. Part 2-27: Tests. Test Ea and guidance: Shock; ISO 16750-3 EN Road vehicles’, *Magyar Szabványügyi Testület*. 2009.
- [106] F. Li, D. Twede, and J. W. Goff, ‘Method for deriving the correlation between free fall and shock machine drop height’, *Packaging Technology and Science*, vol. 6, no. 3, pp. 139–146, May 1993, doi: 10.1002/pts.2770060306.
- [107] Bence Molnár, Antal Bakonyi, Sher Paul Singh, and Böröcz Péter, ‘Response performance of semi-rigid stacked plastic drum units along shock impulses’, in *Serving Society – innovative perspectives on packaging, Proceedings of 29th IAPRI Symposium on Packaging 2019*, Roland ten Klooster, Ed., Enschede, Hollandia: University of Twente, 2019, pp. 213–220.
- [108] B. Molnár and P. Böröcz, ‘Performance and analysis of unitized stacked load units under vibration simulation’, *FME Transactions*, vol. 48, no. 1, 2020, doi: 10.5937/fmet2001096M.
- [109] B. Molnar and P. Böröcz, ‘Observation of stacked corrugated paper boxes’ motion under vibration simulation’, in *21st IAPRI World Conference on Packaging 2018 - Packaging: Driving a Sustainable Future*, 2019.
- [110] B. Molnár, ‘Egységalkományba halmazolt hullámpapírlemez dobozok mozgásának megfigyelése, laboratóriumi rázásszimuláció segítségével’, *LOGISZTIKAI ÉVKÖNY*, vol. 25, pp. 259–268, 2019.

- [111] V. Rouillard and M. A. Sek, ‘Synthesizing nonstationary, non-Gaussian random vibrations’, *Packaging Technology and Science*, vol. 23, no. 8, pp. 423–439, Dec. 2010, doi: 10.1002/pts.907.
- [112] V. Rouillard, ‘On the synthesis of non-Gaussian road vehicle vibrations’, Monash University, 2007.
- [113] H. Zhou and Z. W. Wang, ‘Measurement and analysis of vibration levels for express logistics transportation in South China’, *Packaging Technology and Science*, vol. 31, no. 10, pp. 665–678, Oct. 2018, doi: 10.1002/pts.2404.
- [114] P. Böröcz, ‘Averaged vibration levels during courier parcel delivery service in small truck in Hungary’, *FME Transactions*, vol. 46, no. 2, pp. 211–217, 2018, doi: 10.5937/fmet1802211B.
- [115] S. Otari *et al.*, ‘Statistical characterization of acceleration levels of random vibrations during transport’, *Packaging Technology and Science*, vol. 24, no. 3, pp. 177–188, Apr. 2011, doi: 10.1002/pts.926.
- [116] V. Rouillard, ‘On the Non-Gaussian Nature of Random Vehicle Vibrations.’, in *World Congress on Engineering*, 2007, pp. 1219–1224.
- [117] M.-A. Garcia-Romeu-Martinez, V. Rouillard, and V.-A. Cloquell-Ballester, ‘A Model for the Statistical Distribution of Road Vehicle Vibrations.’, in *World Congress on Engineering*, Citeseer, 2007, pp. 1225–1230.
- [118] P. Böröcz and B. Molnár, ‘Measurement and analysis of vibration levels in stacked small package shipments in delivery vans as a function of free movement space’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 21, 2020, doi: 10.3390/app10217821.
- [119] D. Shires, ‘On the time compression (test acceleration) of broadband random vibration tests’, *Packaging Technology and Science*, vol. 24, no. 2, pp. 75–87, Mar. 2011, doi: 10.1002/pts.915.
- [120] B. Kipp, ‘Editorial: Environmental data recording, analysis and simulation of transport vibrations’, *Packaging Technology and Science*, vol. 21, no. 8, pp. 437–438, Dec. 2008. doi: 10.1002/pts.842.
- [121] W. I. Kipp, ‘Vibration testing equivalence how many hours of testing equals how many miles of transport?’, International Safe Transit Association, 2008.

- [122] B. Molnár and P. Böröcz, ‘Experimental comparison of field and accelerated random vertical vibration levels of stacked packages for small parcel delivery shipments’, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, 2021, doi: 10.3390/app11072927.
- [123] B. Molnár, Z. Németh, L. Koltai, and P. Böröcz, ‘Comparison of field and standard random vibration for small-sized and stacked shipments during parcel delivery’, *J Test Eval*, vol. (0090-3973 1945-7553): 51 6 Paper 20220490. (2023).
- [124] B. Molnár, S. P. Singh, and P. Böröcz, ‘Field and Accelerated Random Vertical Vibration Levels of Stacked Packages for Parcel Delivery’, in *Proceedings of 30th IAPRI Member Conference*, East Lansing (MI): International Association of Packaging Research Institutes, Jun. 2021, pp. 84–102.