

# VÁLASZFELÜLETEK MÓDSZERÉNEK ALKALMAZÁSA GÉPJÁRMŰVEK AKUSZTIKAI VIZSGÁLATÁBAN

## APPLICATION OF RESPONSE SURFACE METHODOLOGY IN CASE OF ACOUSTIC STUDIES OF VEHICLES

*Lukács Judit, lukacs.judit@bgk.uni-obuda.hu*  
*Melegh Gábor, PhD, CSc, gabor.melegh@gjt.bme.hu*

### ABSTRACT

The investigations of the vehicle interior in acoustic sense is a key question nowadays, since the sound quality is an important demand from consumer side. This paper deals with the objective evaluation of the sound pressure level in the cabin. By help of response surface methodology a model was introduced based on measured data. In addition, the applicability was verified by further confirmation measurements.

### 1. BEVEZETÉS

Napjaink személygépjárműveinek komplex elvárásokat kell teljesítenie mind gyártói, mind pedig felhasználói oldalról. A vásárlóközönség által támasztott kritériumok egyike a megfelelő mértékű utazási komfort biztosítása. Ez alatt nem csupán az ülések és egyéb működtető elemek (kormánykerék, sebességváltókar, kézifékkar, stb.) ergonomikus, kézre eső kialakítása értendő. Jelentős hangsúlyt kell fektetni az utastér akusztikai kényelmére is.

A környezetből érkező hanghatások kényelmi okok miatti tökéletes kizárása azonban közlekedésbiztonsági szempontból nem lehetséges. A kis intenzitású gépjármű ütközések (amikor az ütközési sebesség  $v=1...5$  km/h [1]) vizsgálata során ugyanis kulcskérdés az észlelhetőség megítélése, ami alapján az eset a szándékossággal összefüggésbe hozható.

A balesetek észlelhetőségének megítélése nem teljes mértékben egyértelmű. Schneider [2] azt a folyamatot írja le, amely alapján egy szakértői vélemény során megállapításra kerül, hogy az ütközés a járművön belül észlelhető volt-e. Elsősorban három területet emel ki. A vizuális érzékelés azon alapul, hogy a sofőr látta-e az érintkezést. Személygépjárművek esetén elsősorban parkolóhelyről való kitolatáskor a vezetőülésből meglehetősen rossz látási viszonyok adódnak. Legfontosabb szempont a megítélésnél, hogy az ütközés bekövetkezésekor a vétkes sofőr tekintete a kontaktus felé irányult-e. Az akusztikus érzékelhetőség alatt az értendő, hogy

a balesetet kísérő hanghatás a járművön belül hallható volt-e. Ezt számos tényező befolyásolja. Háttérzajnak tekintendő a külső (motor és környezet) és a belső (rádió, klímaberendezés, egyéb) eredetű zajforrások összessége. Az utastér a külső hatások elől árnyékolva van, mely kis intenzitású ütközések esetén a hang érzékelhetőségét lényegesen rontja. A harmadik lehetőség – a taktilis és kinezetikai érzékelés – a bekövetkező lökés észlelésén alapul, felhasználva az egyensúlyérzetet. Ez elsősorban az érintkezési pont elhelyezkedésén múlik, mivel a karosszéria merevsége nem azonos. A gyengített részek közé tartoznak például az ajtók. Ennek következtében a lökés 75%-kal alacsonyabb szintű ajtónak ütközéskor, mint pl. a B-oszlop esetén.

Számos kutatás igazolta [3-6], hogy az esetlegesen bekövetkező közúti balesetek súlyosságát jelentős mértékben befolyásolja – a járművezető rutinjának mértékén felül – a gépkocsin belüli társaság jelenléte, viselkedése, jellemzői is.

Orsi és társai [3] azt tanulmányozták, hogy az utastársak jelenléte – mind fiatalabb, mind tapasztaltabb, idősebb sofőrök esetében – hogyan befolyásolja a közlekedési balesetek kimenetét. Vizsgálataik alapját az olaszországi Pavia városban 2004-2005-ben bejelentett incidensek képezték. Keresték az ütközések súlyosságát befolyásoló tényezőket.

Chung és társai [4] a tapasztalatlan koreai gépjárművezetők viselkedését tanulmányozták. Három vizsgálati csoportot különítettek el:

- egyedül vezetőket,
- tapasztalt, de passzív utassal közlekedőket és
- tapasztalt, aktívan résztvevő, vezetésbiztonsági tanácsokat adó társal utazókat.

Az összes megfigyelt személy ugyanazon szimulátorbeli pályaszakaszon haladt végig. Megállapították, hogy a legjelentősebb különbséget a segítő instrukciók jelentették. Az

ehhez tartozó csoport lényegesen lassabb tempóban, nagyobb körülményekkel közlekedett. A passzív utassal, valamint az egyedül vezetőik között a sebesség tekintetében érdemi eltérést nem tapasztaltak.

Bose és társai [5] a gépjárművezető a baleset során bekövetkező elhalálozásának kockázata és a hátsó ülésen tartózkodó nyughatatlan utas jelenléte közötti összefüggést vizsgálták az USA-ban 2001-2009 között bekövetkezett, halálos kimenetelű frontális karambolok esetén. Kizárólagosan olyan incidenseket vettek figyelembe, melyek 1998-as évjáratnál fiatalabb, kormánylégszákkal szerelt járműveket érintettek.

Lee és társai [6] az 1999-2003 közötti floridai balesetek alapján szoros összefüggést találtak az utasok és a baleset jellemzői között. Vizsgált paramétereik a járművezető kora és neme, valamint az utas(ok) életkora voltak.

Az észlelhetőség azonban számos egyéb tényezőtől is függ. Kulcskérdés a jármű belterének hangminősége is. Napjaink járműveivel szemben ugyanis jelentős vevői elvárás a megfelelő szintű utazási komfort biztosítása. Ez alatt értendő a kocsiszekrény zajszigetelő képessége, vagyis a környezetből érkező, nem kívánatos, zavaró hanghatások mértékének, erősségének tompítása, esetlegesen teljes kizárása.

Korábbi tanulmányok [7] során már vizsgáltuk a hanghatások gépjárművön belüli észlelhetőségét. Mérések elvégzésekor a vizsgálatba vont gépkocsit és a személyeket a tényleges forgalomtól leválasztottuk. A vizsgálatokat egy SKODA FABIA COMBI járművön végeztük el. Hangforrásként olyan hanggenerátort használtunk, mely tiszta szinuszos hang kibocsátására volt alkalmas széles frekvenciatartományban. A mérések célja a szignifikáns hatást jelentő faktorok kiszűrése volt, faktoriális kísérlettervezés módszerének alkalmazásával. A forgalomtól elzárt, alacsony alapzajszinttel rendelkező helyen elvégzett mérések diagnosztizált halláskárosodással nem rendelkező személyek bevonásával történtek. A 95%-os szinten szignifikáns faktorok meghatározásához Pareto-diagramokat használtunk, melyek eredményei a következők lettek:

- bal első ablak helyzete,
- motor üzemeltetése és
- ventilátor működtetése döntő mértékben befolyásolja a járművön belüli hangérzékelést.

Jelen kutatás a kocsiszekrénybe bejutó zajok objektív vizsgálatát, valamint meghatározását

mutatja be a válaszfelületek módszerének felhasználásával.

## 2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

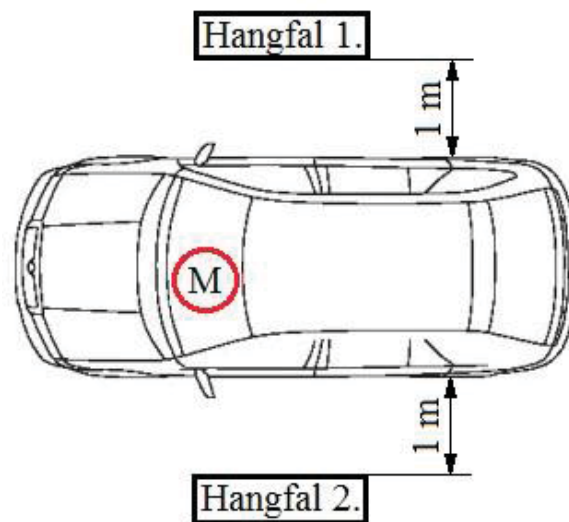
### 2.1. Vizsgálatba vont jármű és eszközök

Az akusztikai vizsgálatokat egy SKODA FABIA COMBI (évjárat: 2004; 1198 cm<sup>3</sup> hengerűrtartalmú, 3 hengeres, 12 szelepes benzinmotorral szerelt –  $P_{max} = 47$  kW) típusú személygépjárművön végeztük el.

A mérések végrehajtása során egy Hohner Stereo 50 kéthangfalas zajgenerátort és Svantek 959 típusú zajszintanalizátort használtunk.

### 2.2. Mérési elrendezés

A vizsgálatba vont személygépjármű tanulmányozása a valós forgalmi környezetből kiemelve, zárt térben, statikus állapotban történt. A mérési elrendezést szemlélteti az 1. ábra. A hangfalak („Hangfal 1.” és „Hangfal 2.”) a jármű két oldalán, attól 1 m távolságra lettek elhelyezve. A beltérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint mérését ISO 5128-1980 [8] előírásainak, valamint Putra és társai [9] ajánlásainak figyelembe vételével valósítottuk meg. A vizsgálatok végrehajtása csukott ajtók és ablakok mellett, a vezetőülés jobb oldalánál, a sofőr fülének magasságában elhelyezett zajszintmérő műszerrel (lásd „M”-mel jelölve a 1. ábrán) történtek.

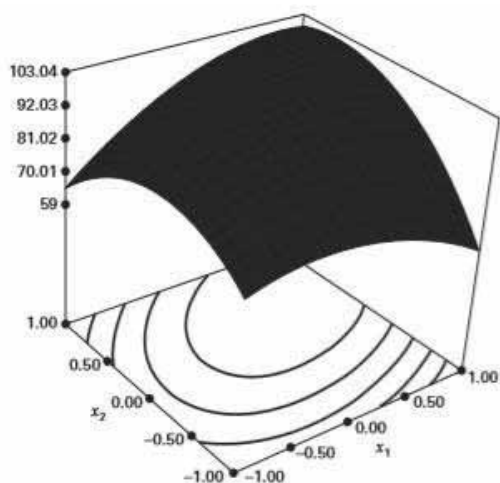


1. ábra. Mérési elrendezés

Az alkalmazott vizsgálójaj rózsazaj (pink zaj) volt, mely alatt akusztikai szempontból olyan véletlen zaj értendő, amelynek hangnyomásszintje az  $f = 20 \dots 20\,000$  Hz-es frekvenciatartományban (hallható hang tartománya) oktávonként 3 dB-lel csökken [10].

### 2.3. Alkalmazott módszerek

A válaszfelületek módszere (Response Surface Methodology, RSM) számos matematikai és statisztikai eljárás kombinációja. Alkalmas a több tényezőtől függő problémák elemzésére, modellezésére és optimális beállítás meghatározására. A kimenetet függő változónak, az azt befolyásoló bemenő paramétereket független változóknak nevezzük. A módszer elnevezése onnan ered, hogy ha két bemenő paramétert vizsgálunk, a kimenet ezek függvényében háromdimenziós felületként ábrázolható (erre mutat egy lehetséges példát a 2. ábra).



2. ábra. A válaszfelület ábrázolása 2 független változó ( $x_1, x_2$ ) esetén [11]

Több bemenő paraméter esetén is alkalmazható a válaszfelületek módszere, viszont ilyenkor a 3D grafikus megjelenítéshez egyszerre két tényező változtatható, a többi értéket rögzíteni kell [11-12].

A független változók és a kimenet közötti kapcsolat modellel írható le. Jelen tanulmány keretén belül egy másodrendű összefüggést alkalmaztunk, melyben az (1) egyenlet szerint (2 bemenő paraméter esetén) a bemenetek első és második hatványa, valamint a keresztszorzatuk szerepel:

$$y = A + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 + D \cdot x_1^2 + E \cdot x_2^2 + F \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (1)$$

ahol  $x_1$  és  $x_2$  a független (bemeneti),  $y$  a függő (kimeneti) változó,  $A, B, C, D, E$  és  $F$  pedig empirikus úton meghatározott konstansok.

### 3. VIZSGÁLATOK

Az akusztikai mérések során bemenő paraméter a személygépjármű üzemállapota ( $x_1$ ,

mértékegység nélküli, minőségi változó), valamint a külső térből érkező gerjesztő hanghatás ( $x_2$ , dB) – mely adott esetben megfeleltethető az ütközést kísérő hangjelenségnek –, a függő változó a kocsiszekrényben mért egyenértékű hangnyomásszint ( $L_{Aeq}$ , dB) volt.

A mérések során a független változók három szinten kerültek beállításra, melyek kiválasztását egy megelőző tanulmány indokolta [7]. Értékeiket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A beállítási paraméterek és szintjeik

Szint	Üzemállapot	Gerjesztés
	$x_1$ , -	$x_2$ , dB
0	(álló motor, segédberendezések üzemeltetése nélkül)	71,2
1	alpjárat	80,5
2	alpjárat + ventilátor II. fokozatban üzemeltetve	95,6

A vizsgálati pontokat a meghatározott beállítási paraméterek szintjeinek összes lehetséges kombinációja adta (9 eset).

#### 3.1. Eredmények

A kiértékelés alapját a járműben utazó személyekre ható zajterhelést jellemző egyenértékű hangnyomásszint értékek adták, a mérések végrehajtása kétszer történt, véletlenszerű sorrendben. A kiértékeléskor a rögzített értékek átlagával dolgoztunk.

2. táblázat. Beállítási pontok és mérési eredmények

M. p.	$x_1$ , -	$x_2$ , dB	$L_{Aeq1}$ , dB	$L_{Aeq2}$ , dB	$L_{Aeqm}$ , dB
1	0	0	47,1	47,3	47,20
2	0	1	57,5	57,4	57,45
3	0	2	72,7	72,8	72,75
4	1	0	49,2	49,5	49,35
5	1	1	60,1	60,3	60,20
6	1	2	72,6	72,7	72,65
7	2	0	55,3	55,4	55,35
8	2	1	60,5	60,3	60,40
9	2	2	72,3	72,0	72,15

A vizsgálati pontok független változóinak szintjét, valamint a mért egyenértékű hangnyomásszint értékeket ( $L_{Aeq1}$ , dB és  $L_{Aeq2}$ , dB) és átlagaikat ( $L_{Aeqm}$ , dB) a 2. táblázat tartalmazza.

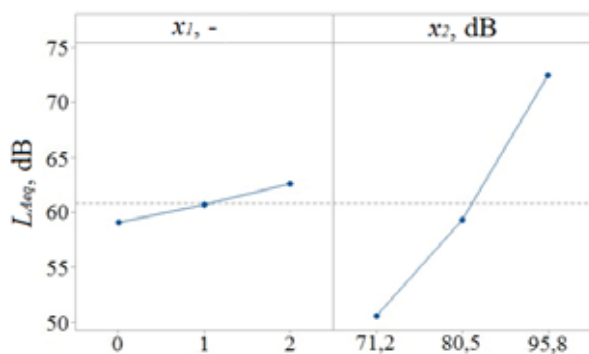
3. táblázat. Szignifikanciátáblázat

Modell eleme	Szignifikancia
konstans	✓
$x_1$	✓
$x_2$	✓
$x_1^2$	✗
$x_2^2$	✗
$x_1 \cdot x_2$	✓

### 3.2. Kiértékelés

A mérések kiértékelése a Minitab 17 szoftver segítségével történt.

Első lépésben a vizsgált paraméterek, a faktorok az utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszintre való befolyását vizsgáltuk. Ezt szemléltetik a 3. ábrán látható főhatások; a szaggatott vonal az összes mért érték átlagát jelöli. Megállapítható, hogy mind a gépjármű üzemállapota, mind pedig a külső gerjesztés növeli a kocsiszekrényben mérhető egyenértékű hangnyomásszintet. Az effektusok mértékére az egyenesek meredekségéből lehet következtetni. Például közel vízszintes főhatás esetén megállapítható lenne, hogy az adott faktor befolyása elhanyagolható; illetve 90°-nál nagyobb dőlésszög esetén (negatív meredekség) az adott paraméter szintjének növelése csökkentené a kimenet értékét. A mérések során mindkét vizsgált faktor főhatása pozitív meredekségű lett, ami azt jelenti, hogy a szintjük növelése a beltér zajszintjében emelkedést eredményez. Azonban megállapítható az is, hogy a gerjesztés dőlésszöge nagyobb, ennek következtében jelentősebb mértékű hatása van a kimenetre. Viszont az üzemállapot sem elhanyagolható.



3. ábra. Főhatásábrák

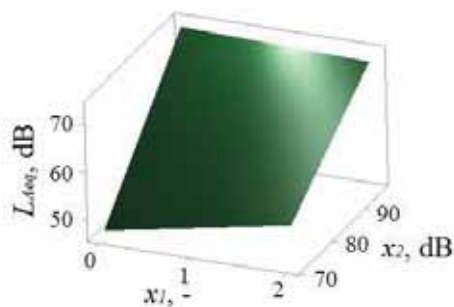
A fentiek figyelembevételével a mért értékekre az (1) egyenletnek megfelelő másodrendű empirikus modellt illesztettünk. A függő változó (az (1) egyenletben  $y$ ) pedig az utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint ( $L_{Aeq}$ , dB) lett.

Az ilyen módon konstruált tapasztalati összefüggés tartalmazhat azonban olyan tagokat is, melyek kimenetre gyakorolt hatása kis mértékű. Ezen elemek kiválasztására alkalmas módszer a szignifikanciavizsgálat, melynek eredményét a 3. táblázat ismerteti.

A személygépjármű utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint meghatározására alkalmas, a (2) egyenletben szereplő redukált modell, már a szignifikanciavizsgálat eredményei alapján került meghatározásra:

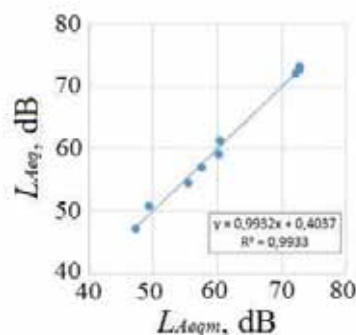
$$L_{Aeq} = -28,24 + 15,92 \cdot x_1 + 1,0584 \cdot x_2 - 0,1717 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (2)$$

A (2) egyenlet grafikus ábrázolása látványosan mutatja a bemenő paraméterek kimenetre gyakorolt hatását (lásd 4. ábra).



4. ábra. Az (2) egyenlet 3D grafikus ábrázolása

A (2) egyenletben szereplő tapasztalati összefüggés pontosságát grafikus úton szemlélteti az 5. ábra.



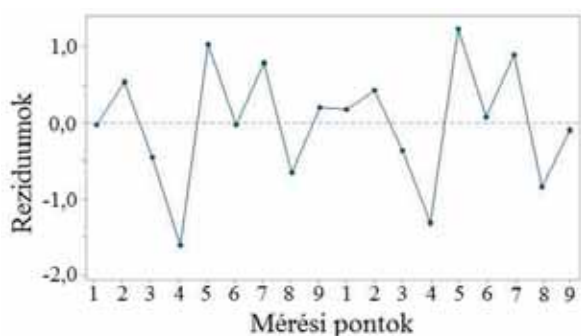
5. ábra. Az empirikus modell pontosságának grafikus szemléltetése

Ha derékszögű koordinátarendszerben ábrázoljuk a számított értékeket (függőleges tengely) a mért értékek átlagának (vízszintes tengely) a függvényében, ideális esetben (tökéletes illeszkedéskor, amikor a mért és a számított értékek megegyeznek) egy 45°-os dőlésszögű (meredekség:  $m=1$ ) egyenes illeszkedne a pontokra. Ennek egyenlete a (3) szerint alakulna:

$$y = x \quad (3)$$

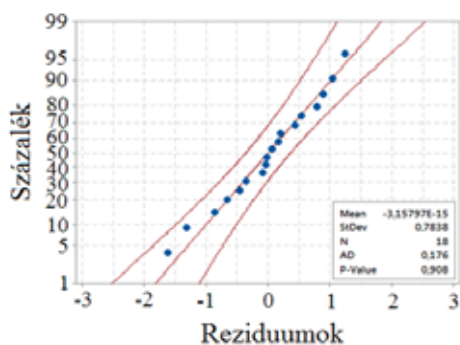
Az 5. ábra alapján megállapítható, hogy a pontokra illesztett egyenes jól közelíti a (3) egyenletben leírtat, így a felállított empirikus modell alkalmas a beltérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint megfelelő pontossággal történő számítására.

Egy tapasztalati összefüggés jósága a reziduumok mértékével és eloszlásával is jellemezhető. Reziduumok alatt a mért és számított értékek közötti különbséget értjük.



6. ábra. Reziduumok nagyságrendi alakulása

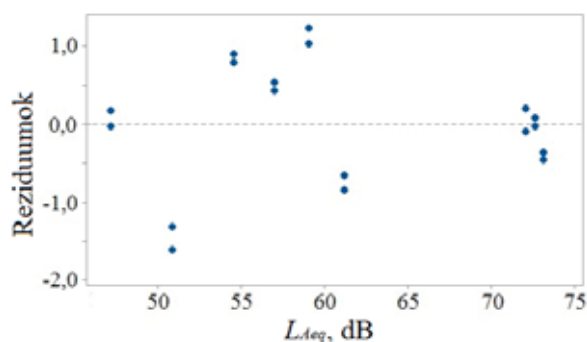
A 6. ábra az eltérések nagyságrendi alakulását szemlélteti a mérési pontokban. Értékük  $-1,7 \dots 1,2$  dB ( $\pm 3\%$ -on belüli pontosság) között alakul, ami megfelelően kis mértékű pontatlanságnak tekinthető.



7. ábra. Reziduumok ábrázolása normalitáshálón

Normalitáshálón (lásd 7. ábra) a reziduumok eloszlása vizsgálható. Megfelelőnek minősíthető a modell, ha az eltérések normál eloszlást követnek ( $P\text{-Value}=0,908 > 0,05$ ), várható értékük 0 ( $Mean = -3,15797 \cdot 10^{-15}$ ) és szórásuk kicsi (jelen esetben  $StDev = 0,7838$ ).

Végül vizsgálandó a reziduumok nagyságának változása a mérési tartományban. A 8. ábrán látható, hogy a reziduumok nagyságrendje nem változik a vizsgált paramétertartományban, így a (2) egyenletben bemutatott empirikus modell megfelelőnek tekinthető.



8. ábra. Reziduumok nagyságának változása

A reziduum-vizsgálatok tehát alátámasztották, hogy a (2) egyenletben szereplő tapasztalati összefüggéssel jó közelítéssel számolható az utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint a beállítási paraméterek vizsgált tartományában.

### 3.3. Konfirmáló mérések

A beltérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint számítására meghatározott empirikus modell (lásd (2) egyenlet) megadott paramétertartományon való alkalmazhatóságának igazolására konfirmáló méréseket is végrehajtottunk.

4. táblázat. A konfirmáló méréssorozat beállítási paraméterei, eredményei és a (2) modellel történő összehasonlítása

Mérés	$x_1$ , -	$x_2$ , dB	$L_{Aeqm}$ , dB	$L_{Aeq}$ , dB	$\Delta L$ , %
1	0	83,1	59,9	59,71	0,32
2	1	74,8	53,6	54,01	-0,76
3	2	91,7	69,7	69,16	0,77

Ebben a sorozatban olyan értékeket választottunk, melyek a vizsgált paramétertartományon belül található értékek, viszont az eredeti kísérletek során nem lettek beállítva, így az egyenlet építéskor nem lettek

figyelembe véve. Mivel a gépjármű üzemállapota csak diszkrét értékeket vehet fel, mindhárom esetet vizsgáltuk. A konfirmáló mérések beállítási paramétereit a 4. táblázat tartalmazza.

Megállapítható, hogy a konfirmáló mérések során kapott eredményeket jól közelíti a (2) egyenlet, tehát a modell pontossága megfelelő a vizsgált paramétertartományon.

#### 4. ÖSSZEGZÉS

Jelen tanulmány célja a személygépjármű utasterében tapasztalható, a zajterhelés objektív megítélésére alkalmas empirikus egyenlet megalkotása volt.

A vizsgálatok során a kiválasztott független, bemenő paraméterek (a gépjármű üzemállapota és a kültérből érkező gerjesztő zaj) 3 szinten kerültek beállításra. A beltérben rögzítésre került az egyenértékű hangnyomásszint ezek minden lehetséges kombinációja esetén.

A mérés során kapott eredményekre a válaszfelületek módszerének felhasználásával másodrendű tapasztalati összefüggést alkottunk meg (lásd (2) egyenlet). Az alkalmazhatóság vizsgálata során az alábbi megállapításokat tettük:

- a (2) egyenlet alkalmas az utasterben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint megfelelő pontosságú számítására ( $\pm 3\%$ ),
- reziduum-vizsgálatok igazolták a felírt empirikus modell jóságát, amelyek alapján kijelenthető, hogy a reziduumok értéke kicsi ( $-1,7 \dots 1,2$  dB), nagyságrendjük a teljes vizsgált paramétertartományban közel azonos,
- a reziduumok normál eloszlást követnek 0-hoz közeli várható értékkel és kis szórással,
- az alkalmazhatóságot további konfirmáló mérésekkel támasztottuk alá, melyek során szintén kis mértékű eltérést tapasztaltunk a mért és a számított értékek között.

Összességében tehát megállapítható, hogy a (2) egyenletben bemutatott modell alkalmas az utasterben kialakuló zajterhelés megfelelő pontosságú számítására a vizsgált paramétertartományban.

#### 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők szeretnék megköszönni Szabó Dániel, a Zajkontroll Kft. munkatársának segítő együttműködését.

#### 6. IRODALOM

- [1] Schmedding K: Leichtkollisionen. Wahrnehmbarkeit und Nachweis von Pkw-Kollisionen, Vieweg+Teubner Verlag (2012) ISBN: 978-3-8348-2006-8 DOI 10.1007/973-3-8348-2007-5
- [2] Schneider S.: „Unfallflucht” – oder war der Anstoß für den Fahrer nicht wahrnehmbar?, Verkehrsband Ruhr-Rhein 6/2005 (2005)
- [3] Orsi C. et al.: Car crashes: The effect of passenger presence and other factors on driver outcome, Safety Science 57 35–43. (2013) DOI 10.1016/j.ssci.2013.01.017
- [4] Chung E. K. et al.: Effects of an adult passenger on young adult drivers' driving speed: Roles of an adult passenger's presence and driving tips from the passenger, Accident Analysis and Prevention 67 14–20. (2014) DOI 10.1016/j.aap.2014.01.024
- [5] Bose D. et al.: Increased risk of driver fatality due to unrestrained rear-seat passengers in severe frontal crashes, Accident Analysis and Prevention 53 100–104. (2013) DOI 10.1016/j.aap.2012.11.031
- [6] Lee C., Abdel-Aty M.: Presence of passengers: Does it increase or reduce driver's crash potential?, Accident Analysis and Prevention 40 1703–1712. (2008) DOI 10.1016/j.aap.2008.06.006
- [7] Lukács J., Melegh G.: Sound perception inside a stationary vehicle in case of frontal audio source, ÓBUDA UNIVERSITY E-BULLETIN 7: (1): pp. 57-61. (2017)
- [8] ISO 5128-1980 Measurement of Noise inside Motor Vehicles (1980)
- [9] Putra A. et al.: On a simple technique to measure the airborne noise in a car interior using substitution source, International Journal of Vehicle Sound and Vibration 8 (3) 275-287. (2012)
- [10] Kyon, D. H. et al.: Hi-pass Pink Noise: Its Acoustic Features and Standard Volume. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 8(6), 229-236. (2013)
- [11] Montgomery D. C.: Design and Analysis of Experiments, John Wiley and Sons, Inc. (2012) ISBN 978-1-118-14692-7
- [12] Myers R. H. et al: Response surface methodology- Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley and Sons, Inc. (2016) ISBN 978-0-470-17446-3