

# POROELASZTIKUS ANYAGOK AKUSZTIKAI VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓVAL ÉS MÉRÉssel

## INVESTIGATION OF ACOUSTIC PROPERTIES OF PORO- ELASTIC MATERIALS WITH MEASUREMENT AND SIMULATION

Dr. Jálícs Károly PhD, machijk@uni-miskolc.hu

**ABSTRACT.** Poro-elastic materials are widely used in the vehicle industry. They build primary the surface of the passenger compartment (e.g. dashboard, door panel, seats, etc.), and their main function is to ensure a good personal feeling concerning touch, sight and of course the excellent interior acoustic environment of a car. For that purpose it is essential, that the material properties of poro-elastic materials are well known. This paper provides a short description about the identification of that properties and also about a possible mathematical descriptions in the SEA simulation method. The paper also shows the comparison of results between measurement and simulation.

### 1. BEVEZETÉS

A járműiparban gyakran alkalmazzák a különböző poro-elasztikus anyagból készült elemeket. Ezek fizikai jellemzőinek megfelelő szintű ismerete elengedhetetlen e szerkezet szilárdságtani, élettartam és akusztikai tervezéséhez. A por-elasztikus anyagból készült szerkezetek elsősorban burkolati elemekként használtak (pl. műszerfal, ajtóburkolat, ülések), funkciójukat tekintve a megfelelő tapintásérzet, a kellemes optikai tulajdonságok valamint az gépjármű belső terének megfelelő akusztikai kialakítása a fő feladata. Hátrányuk azonban a jelenleg műszaki szempontból kevésbé ismert anyagjellemzők és jelen cikk megírásának szempontjából fontos akusztikai jellemzők. A cikk a következőkben a poro-elasztikus anyagok akusztikai jellemzők meghatározásával foglalkozik, és példákon keresztül bemutatja az akusztikai jellemzők előrejelezhetőségének problémakörét.

### 2. ANYAGJELLEMZŐK ÉS MÉRÉSÜK

Egy poro-elasztikus anyag összetett, kompozit anyagnak tekinthető, akusztikai jellemzőinek pontos leírásához a BIOT- elmélet

szerinti anyagjellemzők meghatározására van szükség. Ezek az anyagjellemzők a következők:

*Áramlási ellenállás:* egyenletesen áramló közegbe (levegőbe) helyezett porózus anyagon fellépő nyomásvesztéssel és a térfogatárammal arányos mennyiség. A mérést a DIN EN 29053:1993-5 szabvány szerint lehet elvégezni.

$$R = \frac{\Delta p}{q} \quad (1)$$

ahol  $\Delta p$  a nyomásvesztés (nyomáskülönbség az anyag előtt, ill. után) és  $q$  az anyagmintán átáramló térfogatáram.

*Porozitás:* A porozitás vagy relatív hézagterfogat a szemcsék közötti hézagterfogatnak az összes térfogathoz viszonyított értéke. Mérése a dinamikus kompresszibilitás meghatározásán alapul, mely során a levegőre és levegővel „megtöltött” anyagra mért kompresszibilitás összehasonlítás történik. A számítás menete a 2-4. egyenletek segítségével történik:

$$\sigma = \left( 1 - \frac{V_0}{V_m} \left( 1 - \frac{p_0}{p_m} \right) \right) \frac{1}{\bar{\kappa}} \quad (2)$$

ahol

$$\bar{\kappa} = \frac{1 + 1,4X}{1 + X} \quad (3)$$

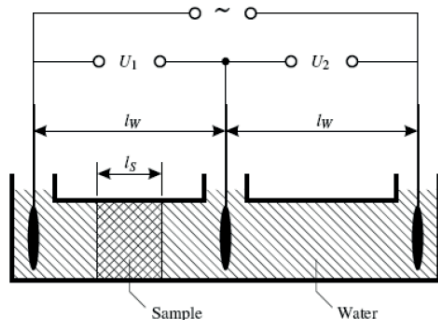
melyben

$$X = \frac{c_m \rho_m}{c_p \rho_0} \quad (4)$$

Az előző összefüggésekben a következő paraméterek szerepelnek:  $V_0$  kitöltetlen levegőterfogat,  $V_m$  az anyag térfogata,  $c_p$  az állandó nyomáson mért és  $c_m$  a moláris hőkapacitás az anyagra és a levegőre vonatkoztatva,  $p_0$  és  $p_m$  az anyaggal és nélküle

mért hangnyomás, valamint  $\rho_0$  a levegő és  $\rho_m$  az anyag sűrűsége.

**Tortouzitás** (labirintus faktor, tekervényesség): egy porózus anyagban az anyagáramlás tekervényességének fokát jelenti és ezen anyagok egyik fontos anyagjellemzője. Meghatározás méréssel lehetséges, amely az elektromos tortouzitás mérése alapján történik. Méréshez a próbatestet egy elektrolittal (víz) töltött csőben helyezik el. Egy vákuumpumpa biztosítja a pórusok, üregek elektrolittal való teljes feltöltését. A mérési elv a próba és az elektrolit vezetőképességének összehasonlításán alapul.



1. ábra: A tortouzitás mérésének elvi vázlatja

Az 1. ábra szerinti elvi elrendezés alapján elvégezhető a tortouzitás számítása:

$$\tau = \sigma \left[ \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \frac{l_w}{l_s} + 1 \right], \quad (5)$$

ahol  $\sigma$  a porozitás,  $l_w$  a vízzel töltött cső hossza,  $l_s$  a próbaanyag hossza, és  $U_1$  ill.  $U_2$  a mérhető feszültségek.

**Hangelnyelési tényező:** azt mutatja meg, hogy a porózus anyagba beeső hanghullámok energiájának hány százaléka kerül az anyagban elnyelésre, ill. hány százaléka verődik vissza. Mérése nagyméretű anyagpróbák esetén az ISO 354:2003 szabvány szerint az úgynevezett zengőszobában történik, míg kisméretű anyagpróbák esetén az DIN-EN ISO 10534-2:2001 szerint impedancia-csőben (a Kund-féle cső változata) történik. A mért értékek 0 és 1 közötti értékeként a frekvencia függvényében mutatják az elnyelt energiahányadot.

**Rugalmassági modulus és veszteségtényező:** periodikus igénybevételkor az anyagok feszültsége és deformációja nincsen fázisban egymással, ezért terheléssel szembeni viselkedésüket nem tudjuk kizárólag a rugalmassági modulussal ( $E$ ) jellemezni,

szükség van a fáziskésés ( $\delta$  vagy  $tg\delta$ : veszteségtényező) megadására is. A Rugalmassági modulusot tehát felbontjuk egy valós ( $E_{Re}$ ) és egy képzetes részre ( $E_{Im}$ ). A két komponens hányadosa a veszteségi tényező ( $tg\delta$ ), ami az egy ciklusban hővé alakult és a tárolt energia hányadának felel meg. Meghatározása az úgynevezett dinamikai mechanikai vizsgálattal (DMA) végezhető el, pl. az MSZ EN ISO 6721-3:1999 szabvány előírásai szerint. Az anyag mechanikai tulajdonságait öt alapvető tényező befolyásolja: a terhelés időtartama, hőmérséklete, frekvenciája, a feszültség és a deformáció. Egy tipikus DMA vizsgálat során a minta ható feszültséget és annak frekvenciáját konstans értéken tartjuk a vizsgálat időtartama alatt. A minta hőmérsékletét meghatározott módon (általában az időben egyenletesen) változtatjuk, és mérjük a kialakuló deformációt. Ezekből és a minta geometriai adatiból (a készülékállandók ismeretében) az anyagok mechanikai jellemzői számíthatók.

Néhány kiválasztott poro-elasztikus anyagra vonatkozó mérési eredményeket közöl az 1. táblázat.

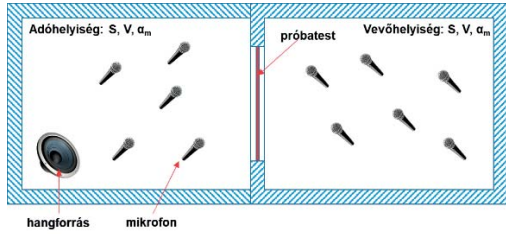
anyag	porozitás	tortouzitás	áramlási veszteség [kPa s/m <sup>2</sup> ]
1.	0,87	2,1	180
2.	0,89	2,3	197
3.	0,94	1,3	85,4

1. táblázat: Mért anyagjellemzők néhány kiválasztott anyagra vonatkozóan

### 3. A HANGGÁTLÁS MÉRÉSE

Alkalmazási példaként egy lemezszerű alkatrész hanggátlásának meghatározásának elvét mutatja be a 2. ábra. Két közel hasonló térfogatú ( $V \approx 65 \text{ m}^3$ ), kis átlagos hangelnyelési tényezőjű terem ( $\alpha < 0,1$ ) közötti, nagy hanggátlású falban elhelyezkedő nyílásba elhelyezett, kb. 10 mm vastagságú poro-elasztikus kompozit anyagból készült lemez hanggátlásának meghatározása történt. A mérési előírásokat az MSZ EN ISO 140 szabványsorozat tartalmazza, mely alapján a méréseket ténylegesen elvégeztem. Ehhez az adó- és vevőhelyiségbe mikrofonokat kell elhelyezni, valamint az adóhelyiségben egy gömbkarakterisztikájú hangszórót, amely biztosítja a hangtér diffúzitását. Méréskor a bekapcsolt hangszóró kikapcsolása után az adó- és a vevőhelyiségben a hang lecsengési idejét

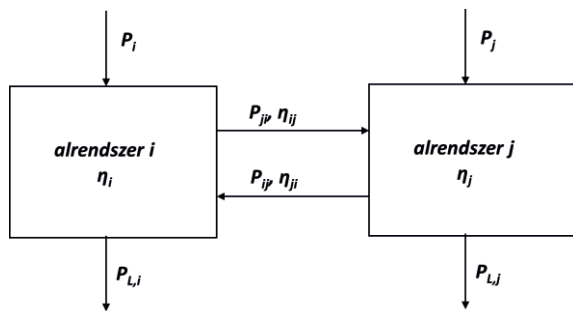
mérjük (míg a hangnyomásszint 60 dB-lel csökken). A hanggátlás végeredményben a két helyiségben mért hangnyomásszintek különbségéből és egy a vevőhelyiségre vonatkozó korrekciós tényezőtől számítható.



2. ábra: A hanggátlás mérésének elvi elrendezése

#### 4. SZIMULÁCIÓ A STATISZTIKUS ENERGIAFOLYAM ANALÍZISSEL (SEA)

A módszer alapját következő teljesítményegyensúlyi egyenletek adják, melyeket a 3. ábra is illusztrál két alrendszerből álló rendszer esetén.



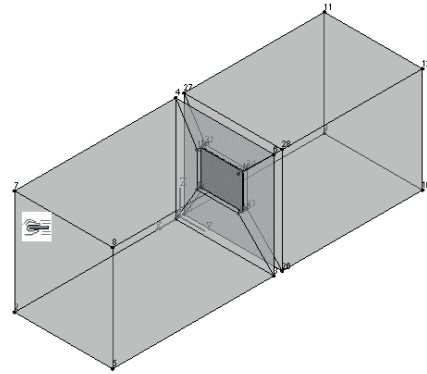
3. ábra: A SEA módszer alapja

Alrendszernek a SEA módszer szempontjából azt a szerkezeti elemet értjük, amely viszonylag függetlenül a többtől rezgéseket végezhet. Persze a kifejezés „független” nem lehet teljesen helytálló, hiszen az egyes elemek egymással fizikai kapcsolatban állnak. Másrészt egy elemen belül többfajta hullám is terjedhet (nyíró, kompressziós, stb.), melyeket külön alrendszerként kezelünk. Ez azt jelenti, hogy egy elem akár 4 alrendszer is generálhat. Egy tetszőleges méretű rendszerre tehát a SEA alapegyenlet-rendszert a következőképpen lehet felírni:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} \eta_i n_i & \cdots & -\eta_{in} n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{in} n & \cdots & \eta_n n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i/n_i \\ \vdots \\ E_n/n_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

ahol  $[P_i]$  a bevezetett teljesítmények vektora,  $[E_i/n_i]$  az egyes alrendszerek modális energiája,

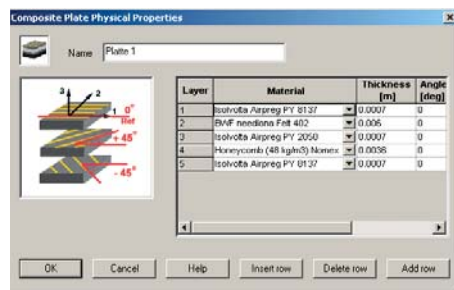
$\eta_i$  a belső veszteségtényező (internal loss factor),  $\eta_{in}$  az átmeneti veszteségtényező (coupling loss factor). Ezek alapján felépíthető egy SEA modell a 3. fejezetben leírt mérés elrendezéséről. Ezt mutatja a 4. ábra.



4. ábra: Egy lemez hanggátlásának számítására alkalmas SEA modell

Az ábrából azonban nem olvasható le a lemezalkatrész SEA modellje. A lemez modellezése háromféleképpen történt:

- mint szendvicslemez: egyforma két lemez, egy könnyű közbenső anyagkitöltéssel, hangnyelési tényező és csillapítás megadásával
- mint kompozit lemez: többrétegű lemezek modellezésére alkalmas eljárás, többirányú anyagjellemzőkkel. A hangnyelési tényező és csillapítás megadása lehetséges. (5. ábra)
- mint általános rétegelt lemez: rétegenkénti anyagjellemzők megadása lehetséges. A hangnyelési tényező megadása lehetséges, a csillapítást már tartalmazza.



5. ábra: Példa egy kompozit lemez megadása az SEA modellben

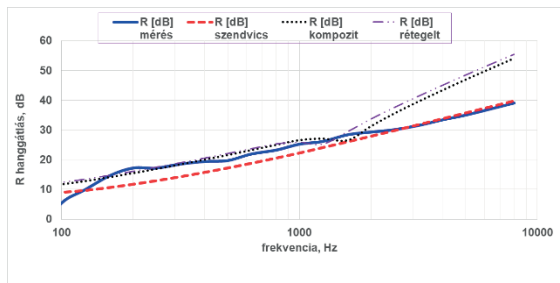
Az  $R$  hanggátlás végeredményben a következő összefüggés segítségével számítható:

$$R = 10 \lg \left[ \frac{A_2 \omega}{8\pi^2 n_1 c_1^2 \eta_3} \left( \frac{E_1}{E_3} - \frac{n_1}{n_3} \right) \right] \quad (7)$$

ahol  $A_2$  az effektív lemezfelület,  $c$  a hangterjedési sebessége,  $\omega$  a terc középfrekvencia,  $E$  az alrendszerek közepes energiája,  $n$  az alrendszerek modális sűrűsége. Az összefüggésben az 1. index az adóhelyiségre, a 2. index a lemezre, a 3. index a vevőhelyiségre, mint SEA alrendszerekre utal.

## 5. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS A SZIMULÁCIÓ ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A mérések és a számítások elvégzése után összehasonlíthatjuk az eredményeket, majd esetlegesen változtathatunk a modelleken, vagy akár más modell-leírást is alkalmazhatunk. Az eredmények összehasonlítását a 6. ábra mutatja. Ebben egy kiválasztott poro-elasztikus lemezre vonatkozóan mutatom be a lemez hanggátlását méréssel, és 3 különböző módszerrel modellezve az SEA rendszeren belül. A görbéket összehasonlítva láthatjuk, hogy a kompozit lemezes és a rétegelt lemezes modellek 200 Hz és 2000 Hz között igen jó egyezést mutatnak a mérési eredménnyel. 2000 Hz fölött azonban jelentős eltérés mutatkozik ezzel a két modellel. Ebben a tartományban a szendvicslemezes modell mutat igen jó egyezést a méréssel.



6. ábra: Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása egy kiválasztott lemeztípus esetén

Ennek okát elsősorban abban kereshetjük, hogy az anyagcsillapítási értékek (2. fejezet) nem ismertek pontosan ilyen magas frekvenciatartományban ( $f > 2000$  Hz), egy állandó értéket feltételeztünk, amely itt már túlságosan magasnak bizonyult, és végeredményben túlbecsülték az  $R$  hanggátlás értékét. Ezért első közelítésben javasolt a szimulációt frekvenciatartományokra osztva, külön-külön a megfelelő modell-leírással elvégezni. A későbbiekben szükség lehet a csillapítási tényező méréssel történő

meghatározására a magas frekvenciatartományra ( $f > 2000$  Hz) vonatkozóan is, erre azonban jelenleg nem ismert gyakorlatban jól alkalmazható módszer.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A poro-elasztikus anyagokból készült lemezszerű alkatrészek modellezési lehetőségeit mutattam be az SEA módszer keretein belül. Három féle modell-leírás szerinti, hanggátlásra vonatkozó számítási eredményeket hasonlítottam össze a konkrét méréssel. A modell leírásához szükséges anyagjellemzőket is külön méréssel határoztam meg. Végeredményként elmondható, hogy a jelenlegi mért anyagjellemzőkkel nem fedhető le a teljes vizsgálni kívánt frekvenciatartomány, ezt a megfelelő szimulációs eredmények eléréséhez legalább két részre kell bontani, és részenként más modell-leírást kell alkalmazni. A frekvenciatartomány összevonására akkor van lehetőség, ha egy gyakorlatban is jól alkalmazható mérési eljárást dolgozunk ki a nagyfrekvenciás csillapítási tényező meghatározására poro-elasztikus anyagokhoz.

## IRODALOM

- [1] Jalics, K: Az akusztikai szimuláció statisztikai módszerei, GÉP 2016/5-6, 2016.
- [2] Fahy, F.J.: Foundations of Engineering Acoustics, 1st ed., San Diego, Calif. □; London, Academic Press, 2000.
- [3] Lyon, R.H.: Theory and application of statistical energy analysis, 2nd ed. Boston, Butterworth-Heinemann, 1995.
- [4] Lyon, R.H., Dejong, R. G.: Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 2. ed., Butterworth-Heinemann, 1995
- [5] Kováts A., Zaj- és rezgésvédelem, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1995

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg