

## PLA ANYAGBÓL KÉSZÜLT PRÓBADARAB ANYAGTULAJDONSÁGAINAK KÍSÉRLETI DINAMIKAI VIZSGÁLATA

### EXPERIMENTAL DYNAMICAL ANALYSIS OF TEST PIECES MATERIAL PROPERTIES MADE BY ADDITIVE PRODUCTION TECHNOLOGIES

Kovács Bálint Ádám<sup>1</sup>, Ficzer Péter<sup>2</sup>, Török Ádám<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék, Cím: 1111 Magyarország, Budapest, Stoczek utca 2.; Telefon: +36-1-463-1739; Fax: +36-1-463-111/5857; enzo-b@hotmail.com*

<sup>2</sup>*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék, Cím: 1111 Magyarország, Budapest, Stoczek utca 2.; Telefon: +36-1-463-1739; Fax: +36-1-463-111/5857; ficzere@keg.bme.hu*

#### Abstract

The recent years 3D printing became a hot topic, however it's hard to design parts without a deep understanding of the material properties. The aim of this study is to estimate the modal parameters and the damping properties via experimental dynamic analysis of a part made from *PLA*. We will study the effects of the different directions of printing. With the results we can provide data for the *FEM* softwares' input.

**Keywords:** *experimental modal analysis, additive manufacturing, natural frequency, mode shapes, polymers.*

#### Összefoglalás

Az utóbbi időben egyre népszerűbb téma a 3D nyomtatás, azonban az alkatrészek méretezése az anyagtulajdonságok pontos ismerete nélkül nehézkes. A dolgozat célja, hogy kísérleti dinamikai vizsgálatok során becsüljük egy *PLA* anyagból készült test modális paramétereit, majd csillapítási tulajdonságait. Megvizsgáljuk a nyomtatás irányának hatásait. Az eredményeket felhasználva a későbbiekben adatokat szolgáltatathatunk a végelelemes programok inputjának megadásához.

**Kulcsszavak:** *kísérleti modális elemzés, additív gyártástechnológia, sajátfrekvencia, lengéskép, polimerek.*

#### 1. Bevezetés

Viszonylag új technológiáról lévén szó, az additív gyártástechnológiák óriási ütemben fejlődnek. Ennek velejárója, hogy a 3D

nyomtatóval így készített alkatrészek előállítás költségei is fokozatosan csökkennek, egyre több felhasználó számára válik elérhetővé a technológia.

Az additív gyártástechnológiák megjelenésével egy időben megnőtt a biológiaiilag

lebontható műanyagok jelentősége, különös tekintettel a környezetvédelmi szempontokra [6]. Ilyen anyag a politejsav (PLA), amit az alacsony előállítási költségének köszönhetően egyre szélesebb körben alkalmaznak.

A rendkívül rugalmas gyártástechnológia, és a környezetbarát anyag együttese előrevetíti, hogy a jövőben tovább szélesedik az alkalmazási területe a PLA anyagból additív gyártástechnológiával készült alkatrészeknek. A gépészeti alkalmazások tervezéséhez elengedhetetlen az anyagtulajdonságok pontos ismerete. Áttekintettük a vizsgált PLA anyag anyagtulajdonságaival kapcsolatos szakirodalmakat. Azonban a témában kevés olyan publikáció van, ami az anyagtulajdonságok modellezésével is foglalkozik. Ugyanazon anyagjellemző tekintetében az egyes publikációk nagyon szélsőségesen különböző értékeket közölnek [2][3][4][5]. A kutatás célja, hogy jobban megismerjük az így készített alkatrészek csillapítási tulajdonságait, valamint az additív gyártás technológiai paramétereinek az anyagtulajdonságokra gyakorolt hatásait.

## 2. Irodalmi áttekintés

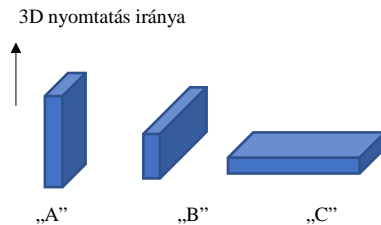
A rendelkezésünkre álló irodalom tanulmányozása során megbizonyosodtunk róla, hogy a test elhelyezése a nyomtatóban jelentős mértékben befolyásolja az anyagjellemzőket: az „álló” próbatetek szakítószilárdsága jelentősen kisebb, mint a másik két esetben [3][4]. A mértéke az egyes tanulmányokban nem egyforma, köszönhetően a különböző nyomtatási paramétereknek. Az eredményekből megállapítható, hogy álló próbatestnél körülbelül 0,4-0,5-szeresére csökken az anyag terhelhetősége [2][3].

A rétegek síkjára merőleges síkokban az anyag hasonlóan viselkedik [3]. Kijelenthető tehát, hogy az additív gyártástechnológiával gyártott tárgyak ortotróp anyagjellemzőket mutatnak.

## 3. Módszer

A szakirodalom tanulmányozása, a kísérleti, gyártási, alkalmazási tapasztalatok azt mutatják, hogy az additív technológiával gyártott alkatrészek nem mutatnak izotróp anyagtulajdonságokat. Az anyagtulajdonságok ortotróp jellege a 3D-s nyomtatás irányfüggésével magyarázható [2][3]. Polimer anyagból készült alkatrészek kísérleti vizsgálatai a dinamikai modellezéssel kapcsolatos problémákat is felvetnek.

A cikk egy prizmatikus hasáb kísérleti vizsgálati eredményeit mutatja be. Három darab, különböző irányban nyomtatott próbatest kísérleti dinamikai vizsgálatát végeztük el.



1. ábra. A próbatetek nyomtatási irányai

Egyik végén befogott tartóként vizsgálva meghatároztuk a próbatest  $f=0-850$  Hz frekvencia tartományba eső hajlító és torziós sajátfrekvenciáit, csillapítási hányadosait és lengésképeit. Minden egyes módusra ellenőriztük, hogy a lengéskép klasszikus normál módusú-e, vagy sem. Mint ismeretes klasszikus normál módusok esetén a lengésképek állóhullám jellegűek, meg egyeznek a csillapítatlan rendszer lengésképeivel és ezért matematikai modelljük kezelése lényegesen egyszerűbb. A méréssel meghatározott módusokat szétválasztottuk 2 csoportra: hajlító, ill. torziós módusok csoportjára. A csillapítási mechanizmus azonosítás céljából regressziós függvényeket határoztunk meg, melyek kifejezik a sajátfrekvenciákhoz tartozó csillapítási

tényező frekvencia-függését [1]. Ezek a függvények közvetlenül kapcsolatban vannak a reológiaiól ismert veszteségi tényező függvényével. A veszteségi tényező a veszteségi modulusz és a tárolási modulusz hányadosa [1]. Általános esetben a veszteségi modulusz és a tárolási modulusz is a frekvencia függvénye, ezért ezek hányadosa a veszteségi tényező is a frekvencia függvénye.

Iterációs módszerrel meg fogjuk határozni azokat az anyagjellemzőket, amelyek mellett a végeselemes modell validnak tekinthető, amelyre legkisebb az EMA modell és a FEM modell sajátjellemzői (sajátfrekvencia, csillapítási tényező, lengésképek) közötti különbség.

A lengésképek összevetését a kísérleti munka következő fázisában kvalitatív módon fogjuk végezni. A további kutatási projekt keretében a végeselemes modell megfelelő redukcióját is el fogjuk végezni. Megvizsgáljuk, hogy a végeselemes modellezés választott környezetében milyen lehetőségek vannak a csillapítási adatok megadására és szisztematikus változtatására.

### 3.1 Paraméterbecslés

A mért frekvenciaválasz függvény (továbbiakban *FRF* függvény) analitikus közelítő függvényét részlettört (parciális tört) alakban írtuk fel:

$$H(j\omega) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{P_i}{j\omega - \lambda_i} + \frac{\overline{P_i}}{j\omega - \overline{\lambda_i}} \right] \quad (1)$$

ahol:

$P_i$  –  $i$ -edik módus reziduuma  $\left[ \frac{m/sec}{N} \right]$

$\lambda_i$  –  $i$ -edik módushoz tartozó komplex sajátérték  $[rad/sec]$

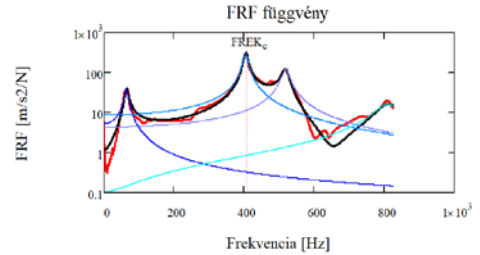
$$\lambda_i = -\sigma_i + j\omega_{d,i} \quad (2)$$

$\sigma_i$  –  $i$ -edik modális csillapítás (modal damping)

$\omega_{d,i}$  –  $i$ -edik módus csillapított saját-körfrekvenciája.

$j$  – képzetes egység

Ezeket a modális paramétereket a mért *FRF* függvény alapján becsüljük. Az egyes módusok azonban hatással vannak a többire (2. ábra), így ezek a becslések nem pontosak, szükség van egy optimáló függvényre.



2. ábra. Az egyes részlettörtek egymásra való hatása

Az optimáló módszer a

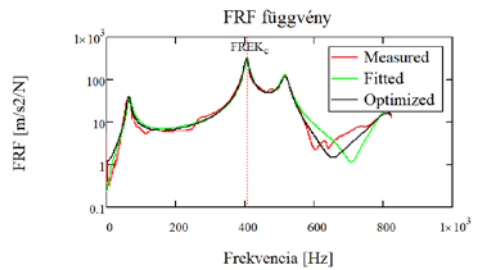
$$\varepsilon(P_i, \lambda_i) = \sum_{r=1}^{N_r} (H(j\omega_r) - \hat{H}_r)^2 \quad (3)$$

legkisebb négyzetes funkcionált minimálja.

$\hat{H}_r$  a mért és átlagolt *FRF* függvény értéke az  $\omega_r$  körfrekvencián.

### 4. Részeredmények

A „C” módszerrel jelölt nyomtatott próbatest *FRF* függvénye látható a 3. ábrán.



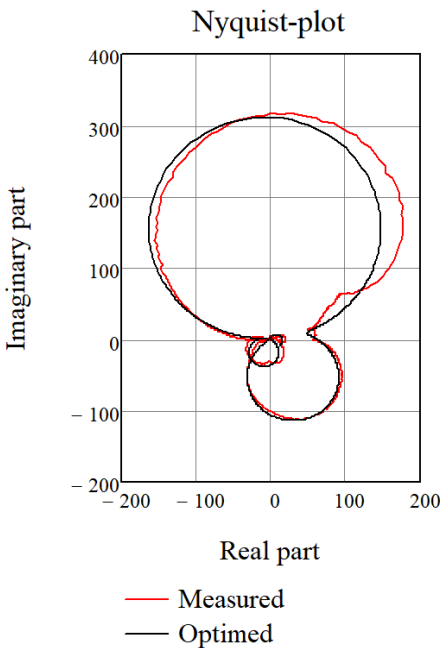
3. ábra. A „C” próbatest Frekvencia-válasz Függvénye, közelítő függvénye, és optimált közelítő függvénye.

Ezzel a módszerrel 3 sajátfrekvenciát sikerült detektálnunk. A lengésképek osztályozását az *FRF* függvények *Nyquist*-diagramjainak segítségével végeztük el.

**1. táblázat.** A detektált lengésképek osztályozása

Mode <i>i</i>	1	2	3
$f_i$ [Hz]	65,3	406,7	520,3
$\xi_i$ [%]	5,01	1,294	1,098
Típus	H	H	T

A **4. ábrán** három domináns módus modal köre figyelhető meg. További elemzéseket kell végezni a kisebb amplitúdójú (origó közelében lévő) módusok paraméterbecslése érdekében.



**4. ábra.** „C” próbadarab 7Z 1Z lokációhoz tartozó Nyquist-diagramja

## 5. A kutatás további fázisai

A fentebb említett regressziós függvényeket meghatározzuk, melyek kifejezik a sajátfrekvenciákhoz tartozó csillapítási tényező frekvenciafüggését. A vizsgált frekvenciatartományon mindössze 3 darab sajátfrekvenciát sikerült észlelni, amiket szétválasztva kettő hajlító, illetve egy torziós lengést kaptunk; ilyen kevés pontra regressziós függvényt nem tudunk felírni (az interpolációs függvények alkalmazását kerülni kell). A továbbiakban a méréstartomány szélesítésével már elegendő sajátlengést detektálhatunk, amik alapján már felírhatók lesznek a regressziós függvények. Az értékelést mindhárom próbatestre elvégezzük.

A várakozás szerint az anyagtulajdonságok modellezése nehézséget fog okozni a végeselemes modell inputjának megadásánál.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Pápai F.: *Klasszikus normál módusú lengőrendszerek csillapítási modellezésének vizsgálata*. XI. Magyar Mechanikai Konferencia, MaMeK, 2011, Miskolc, 2011. augusztus 29-31, 1–11.
- [2] Ficzere P.: *Orthotrop anyagmodell alkalmazása additív gyártástechnológiával előállított alkatrész méretezése során*, GÉP 67:(5-6) 78-81 (2016)
- [3] Tisza M., Kovács P. Z., Tóth D.: *3D nyomtatás a járműiparban*, XXIX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 9–10 April, 2015. ISBN 978-963-358-061-5
- [4] Kis K.: *Additív gyártástechnológiával előállítható rugalmas műanyagok vizsgálata*, TDK dolgozat, 2017.10.26. 10–50.
- [5] Pauleczki P.: *FDM nyomtatási eljárás vizsgálata PLA alapanyag esetében*, Szakdolgozat, Budapest 2016, 4–34.
- [6] Bodnár I.: *Potenciálisan biodegradábilis, politejsav bázisú polimerek szintézise és vizsgálata*, Doktori értekezés 2002. 1–26.