

Felkészülés az új évtizedre
A technológia és a gazdaság új kihívásai

ACTA PERIODICA



**EDUTUS
EGYETEM**

XV. KÖTET

Edutus Egyetem
Tatabánya, Stúdium tér 1.

Főszerkesztő:
Némethné Dr. Gál Andrea

Felelős szerkesztő:
Forrai Márta

Szerkesztette:
Vigh László PhD

MINDEN JOG FENNTARTVA

A mű egészének, vagy bármely részének másolása, sokszorosítása,
valamint információszolgáltató rendszerben történő tárolása
és továbbítása csak a kiadó engedélyével megengedett

Lektorált

ACTA PERIODICA 15. KÖTET

EDUTUS EGYETEM KIADÁSA

www.edutus.hu

ISSN 2063-501X

2018. december

Tartalomjegyzék

ÉVES JELENTÉS A SZOLÁR MOBILITÁSI PROJEKT EREDMÉNYEIRŐL Dőry István PhD	4
GONDOLATOK A SZERKEZETÉPÍTÉSBEN FELHASZNÁLHATÓ ANYAGOK TULAJDONSÁGAINAK MEGHATÁROZÁSÁHOZ Borbás Lajos PhD; Ficzere Péter PhD	13
A „CSODÁLATOS VÁROS” RIO - IDEGENVEZETŐI SZEMMEL Dr. Keszthelyi Csaba.....	28
A MAGYAR NAGYVÁROSOK VERSENYKÉPESSÉGI SORRENDJE Poreisz Veronika	37
AZ INCOTERMS ELMÉLETI HÁTTERÉRŐL ÉS A 2020-BAN BEVEZETÉSRE KERÜLŐ VÁLTOZÁSOKRÓL Vigh László PhD	51
A (MONOKROMATIKUS) FÉNY AZ ALAGÚT VÉGÉN RÉSZEREDMÉNYEK A FÉM-POLIMER HIBRID SZERKEZETEK LÉZERSUGARAS KÖTÉSTECHNOLÓGIÁJÁBAN Dr. Csiszér Tamás, Molnár László Temesi Tamás	75
A MEGÚJÍTOTT EURÓPAI INNOVÁCIÓS RANGSOR (EIS) ÉS AMI MÖGÖTTE VAN Dr. Peredy Zoltán, Laki Balázs	86
KORSZERŰ TECHNOLÓGIÁK FÉM ÉS POLIMER ANYAGOK KÖZÖTTI KÖTÉSEK KIALAKÍTÁSÁRA Temesi Tamás, Dr. Kiss Zoltán, Dr. Csiszér Tamás	115

GONDOLATOK A SZERKEZETÉPÍTÉSBEN FELHASZNÁLHATÓ ANYAGOK TULAJDONSÁGAINAK MEGHATÁROZÁSÁHOZ

BORBÁS LAJOS PhD, Professor Emeritus
EDUTUS Egyetem

FICZERE PÉTER PhD, egyetemi adjunktus
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Absztrakt

Napjainkban az ipari forradalom újabb szakaszában (I 4.0) az új anyagok előállítása napi gyakorlat. Ahhoz, hogy ezeket az anyagokat a szerkezetépítésben is alkalmazni tudjuk, ismernünk kell anyagtulajdonságaikat. Jelen dolgozat ebbe a folyamatba nyújt betekintést.

Kulcsszavak: anyagtulajdonságok, határállapot jellemzők, additív gyártástechnológia

Abstract

Today, in the recent period of the industrial revolution (I 4.0) production of new materials is everyday practice. To be able to use these materials in structure construction we have to know their properties. The current paper provides insight into this process.

Keywords: limit values of material properties, additive manufacturing technologies

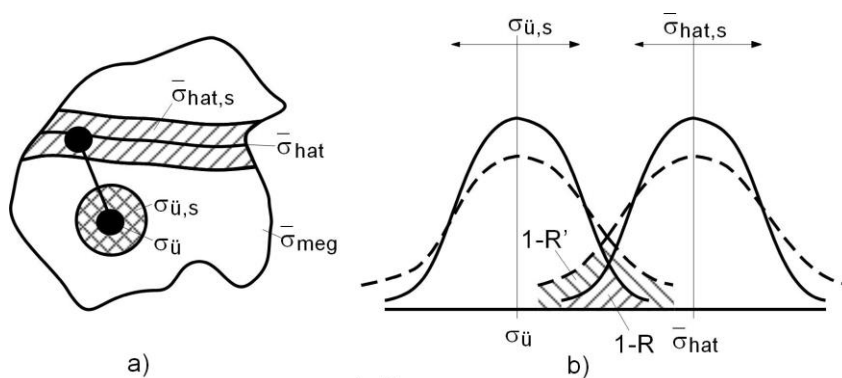
X X X

1 Bevezetés

Napjainkban a géptervezés folyamatának egyik legkomolyabb kihívása az additív gyártástechnológiák feltartóztathatatlan és egyre szélesebb körű térhódításával megjelenő új anyagok szerkezetépítésben történő alkalmazhatósága. A kérdés viszonylag egyszerű: a tervezési fázis III. szakaszában, a konstrukciós kialakítás során [1] a numerikus számítások alkalmából, amikor a tényleges szerkezeti keresztmetszeteket meghatározzuk, milyen anyagtulajdonságokkal kell számolnunk a deformáció/feszültség analízisek során. Erre az egyszerű kérdésre adandó válasz alapján lehet ugyanis meghatározni – eldönteni, értékelni – azt a felvetést, miszerint a külső erők hatására kialakuló deformációs/feszültség állapotok megfelelnek-e annak a feltételezésnek, miszerint a teherbírások halmaza (eloszlása) és az üzemi terhelések halmaza/eloszlása kellően elkülönül-e egymástól a tönkremenetel valószínűségének minimálisra csökkentése érdekében [2], az 1.1. ábrán bemutatott értelmezés alapján. Egyszerűen belátható az a tény, hogy amennyiben a két eloszlás - valamilyen

valószínűséggel, - közös halmazzal rendelkezik, az a halmaz az alkatrész/szerkezet tönkremenetelének létrejöttét (kialakulását) reprezentálja.

Amennyiben tehát egy újonnan létrehozott anyagot (ilyen anyagnak minősül az additív gyártástechnológiák által létrehozott termék, hiszen több irányú nyomtatással készíthető el ugyanaz az alak) szerkezeti anyagként kívánunk alkalmazni, annak terhelhetőségének (határállapot jellemzőinek) meghatározásához az anyagtulajdonságok – ezekből meghatározhatóan az anyagtörvény – pontos ismeretére van szükségünk.



4. ábra

1.1 ábra

Egy alkatrész/szerkezet tönkremeneteli kritériuma:

- a) üzemi terhelések valamint teherbírás halmaza (határállapotai),
- b) üzemi terhelések valamint teherbírás eloszlás függvényei (normál eloszlások feltételezésével) [1]

2 Gyártástechnológiák osztályozása

2.1 Alakító technológiák

Megkülönböztetünk **alakító technológiákat**, melyek fizikai elvük alapján forgácsolással alakítanak és így adják meg a szerkezeti elem végső alakját, valamint forgácsolás nélküli eljárással alakot adó technológiákat (ilyenek a hideg és meleg képlékeny alakítások).

Az egyes gyártási **folyamatok elemeit tekintve** megkülönböztethetünk **előgyártást**, mely folyamat eredménye az elő-gyártmány. Ebben a folyamatban beszélhetünk öntési, sajtolási, vagy akár anyagleválasztással dolgozó eljárásról, mint pl. kivágás és darabolás. Ezt a fázist követi az **alkatrészgyártás (késztermék gyártás)**, amely a hagyományos technológiák esetén a tervezési adatok figyelembevételével valamilyen anyagleválasztási elv alkalmazásával valósul meg.

Az előállított termék darabszáma alapján is osztályozhatjuk az eljárásokat. Ebben a tekintetben beszélhetünk egyedi, sorozat, valamint tömeggyártásról.

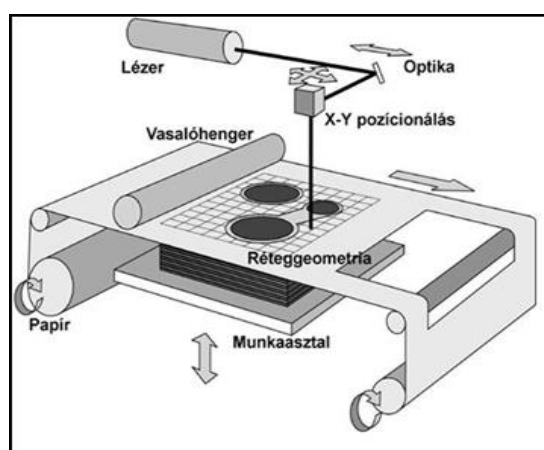
2.2 Anyag hozzáadással terméket készítő technológiák

A termékek gyártástechnológiájának egy másik lehetséges eljárása az **anyag hozzáadásával (additív elven)** dolgozó termék előállítás. Ezen gyártási módok esetén a terméket a kívánt geometriára - különböző technológiai eljárások alkalmazásával – felépítjük, azaz nem keletkezik felesleg, vagy csak olyan minimális mértékben, amit maga az alkalmazott technikai eljárás megkövetel (támaszanyagok).

Modern, anyag hozzáadás elvén működő gyártástechnológiákról (*Additive Manufacturing*,: *AM*) a sztereolitográfia megjelenésétől (1980) beszélhetünk.

Napjainkban életünk valamennyi területén képesek vagyunk akár polimer, akár fém alapú alkatrészek, részegységek gyártására, amely technológia,- és abban rejlő lehetőségek alapvetően megváltoztatták mindennapjainkat.

Az additív gyártástechnológiák működési elvére példát (*LOM: Laminated Object Manufacturing*) a 2.1 ábrán mutatunk be [3]. A munkaasztal minden esetben az egy rétegben gyártott anyagvastagságnak megfelelően lefelé irányban mozog, míg az optika mozgatásával egy fókuszált lézer segítségével a rétegkontúrnak megfelelő helyen vágjuk ki a hengerelt alapanyagot. Az alapanyagra ragasztó réteget (ez köti össze a már meglévő rétegekkel) viszünk fel és amikor a munkaasztalt lefelé mozdítjuk vele együtt mozog a kivágott rész is. Természetesen más elven is megvalósítható az additív gyártás, de minden esetben közös a rétegről-rétegre történő felépítés [3], [4].



2.1 ábra
LOM technológia elvi felépítése és működése [3], [4]

A nyomtatás (additív gyártás) a numerikus szimuláció modelljének (CAD modell) ún. STL file formátumra (háromszög elemekkel megvalósított alakzat) alakításával (STL: *Standard Triangular Language*), majd annak réteges szeletelésével valósul meg [4].

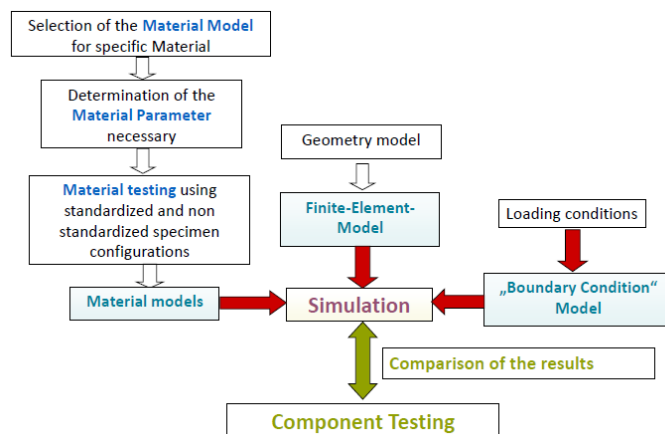
3. Határállapotí jellemzők meghatározása

Határállapotí jellemzőnek nevezzük azokat az egyes szerkezetekre, anyagtulajdonságokra vonatkozó értékeket, amelyek eléréséig azok viselkedése a rugalmas alakváltozás tartományában (lineáris, vagy tetszőleges függvény szerint leírva) marad, azaz a külső terhelés megszűntével a kezdeti, tehermentes állapotra vonatkozó jellemzők visszaállnak.

Természetesen más-más határállapotí jellemzők vonatkoznak a statikus (kvázi-staikus) terhelései körülmények közötti viselkedésre, mások a dinamikus terhelésekre adott válaszoknál, és ismét mások az ismétlődő terhelések (kifáradási határ kérdésköre) eseteire.

3.1 Anyagtulajdonságok, anyagtörvény: statikus határállapotí jellemzők vizsgálata

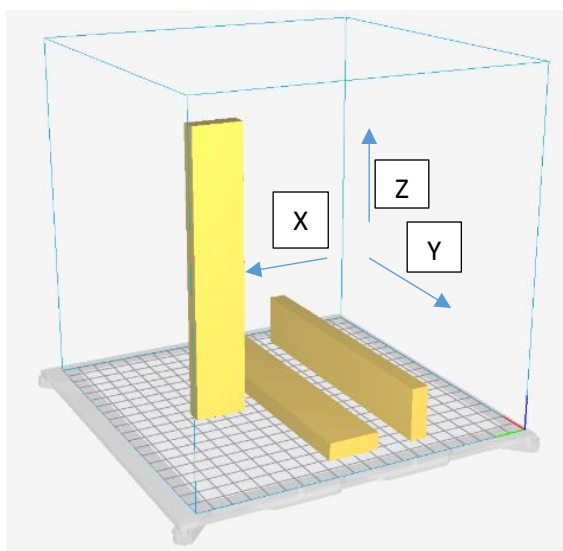
A szerkezetépítésben használni kívánt anyag alakadási fázisában (geometria meghatározása), annak számításí (numerikus szimuláció) szakaszában az anyagtulajdonságok ismerete elengedhetetlen a terhelések hatására kialakuló deformáció/feszültségállapot meghatározásához. Az anyagtulajdonságok, ebből adódóan az anyagtörvény ismeretén túl a számítások elvégzéséhez a geometria modellt, valamint a terhelési körülményeket – beleértve a számításokhoz szükséges határfeltételeket - egyaránt ismernünk kell. A numerikus szimuláció elvégzéséhez szükséges ismereteket a 3.1 ábrán mutatjuk be [5]. Az egyes tulajdonságok (anyagjellemzők) meghatározása próbatestek segítségével, terhelő berendezésekben lehetséges.



3.1 ábra

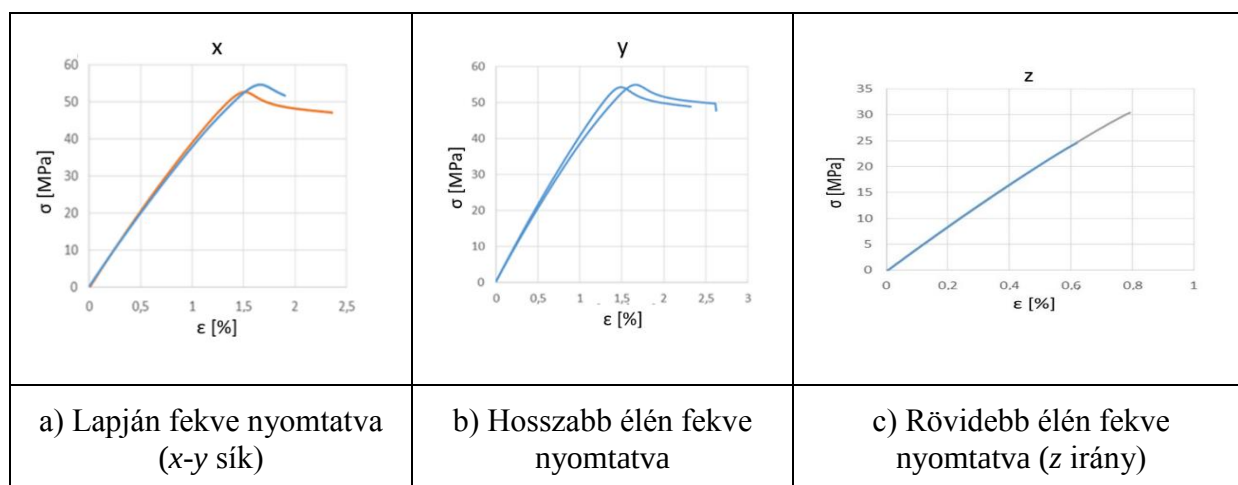
A numerikus szimulációhoz szükséges ismeretek [5]

Az általunk vizsgált gyártási technológia a „*Fused Deposition Modeling*” (FDM) volt, amely eljárásnál a nyomtatott anyag „*Polylactic Acid*” (PLA) volt. Miután vizsgálódásunk célja az anyagi jellemzők meghatározása, a vizsgálatokat a szabványos, lapos próbatesteken végeztük el. A nyomtatási irányfüggés meghatározása érdekében a próbatesteket a lehetséges három irányban kinyomtattuk [9], és szakítóvizsgálatnak vetettük alá. Ezen szakítóvizsgálatok eredményei alapján készítettük el a három irányban nyomtatott dinamikai vizsgálathoz a próbatesteket, amit a 3.2. ábrán mutatunk be [6].



3.2 ábra
Dinamikai vizsgálathoz nyomtatott próbatestek [6]

A szakítóvizsgálatok során kapott diagramokat (feszültség – fajlagos nyúlás) a 3.3 ábrán adjuk közre.



3.3 ábra
Próbatestek anyagi jellemzők meghatározására, különböző irányú nyomtatással [9]

A nyomtatási iránytól függően meghatározott anyagtulajdonságokat a 3.I. Táblázatban mutatjuk be.

	Szakító szilárdság R_m [MPa]	Young modulus E [MPa]
Fekve nyomtatva (x-y)	54.619±0.33	3019.817±67.909
Állva nyomtatva (z)	27.464±2.928	2891.227±6.695

3.I. Táblázat
Nyomtatási iránytól függő anyagtulajdonságok [9]

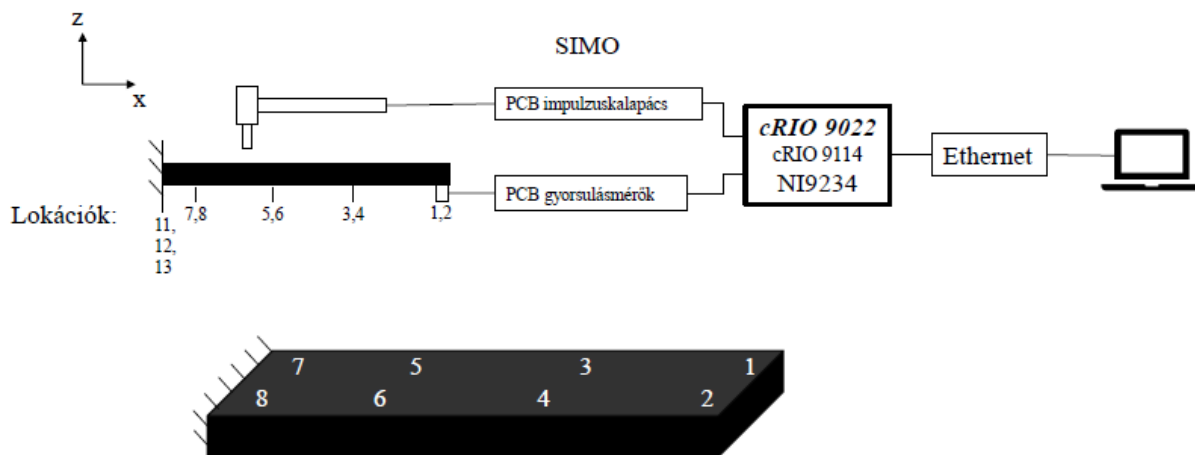
A 3.I. Táblázat áttekintésekor láthatjuk, hogy a rövidebb élén álló, állva nyomtatott próbatest szakítószilárdsága az x-y síkban fekvő helyzetűnek a mintegy 50%-t éri csak el, ami igen erős nyomtatási irány függőséget mutat.

Az anyagtulajdonságok nyomtatási irányfüggésének részletes kísérleti meghatározásából megállapítható (ennek részleteinek bemutatásától jelen dolgozatban eltekintünk, az megtalálható a [4], valamint [7] irodalmakban), miszerint a 3D nyomtatott (*FDM Technológia*) polimer (*PLA*) anyag viselkedése *ortotróp* anyagtörvény alkalmazásával írható le [9].

3.2 Anyagtulajdonságok dinamikus terhelések esetén

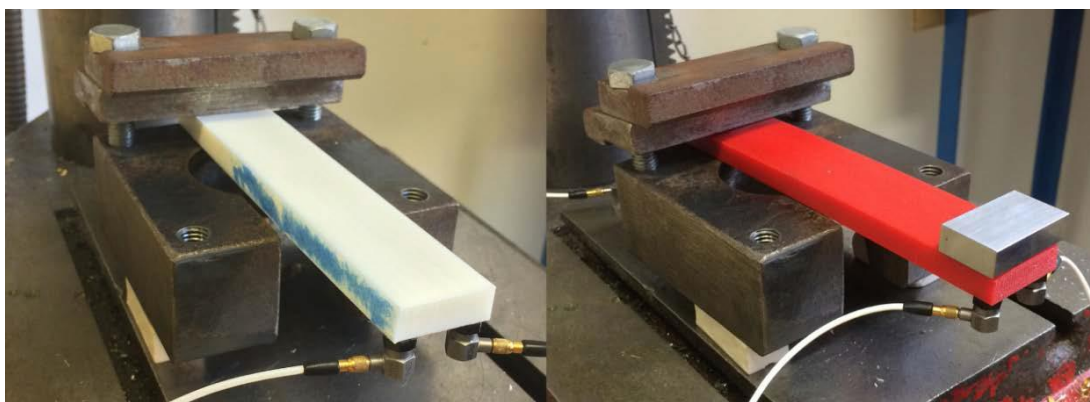
A dinamikus terhelésekre adott válaszfüggvények meghatározása különösen fontos azon szerkezeti anyagok esetén, amelyek változó terhelési körülmények között üzemelnek. A gerjesztések hatására kialakuló esetleges rezonanciák járulékos, nem tervezett igénybevételeket okozhatnak a szerkezetben, amelyek annak idő előtti meghibásodásához vezethetnek. Mindezek alapján belátható, hogy amennyiben egy anyagot a szerkezetépítésben alkalmazni kívánunk, annak csillapítási tulajdonságainak megismerése elengedhetetlen a tervező mérnökök számára.

A csillapítási jellemzők vizsgálatát befogott tartón végeztük, amelyen mérőpontokat jelöltünk ki gyorsulásmérésekre, a gerjesztést impulzus kalapáccsal végeztük [8]. A mérés-összeállítás modellje a 3.4 ábrán látható.



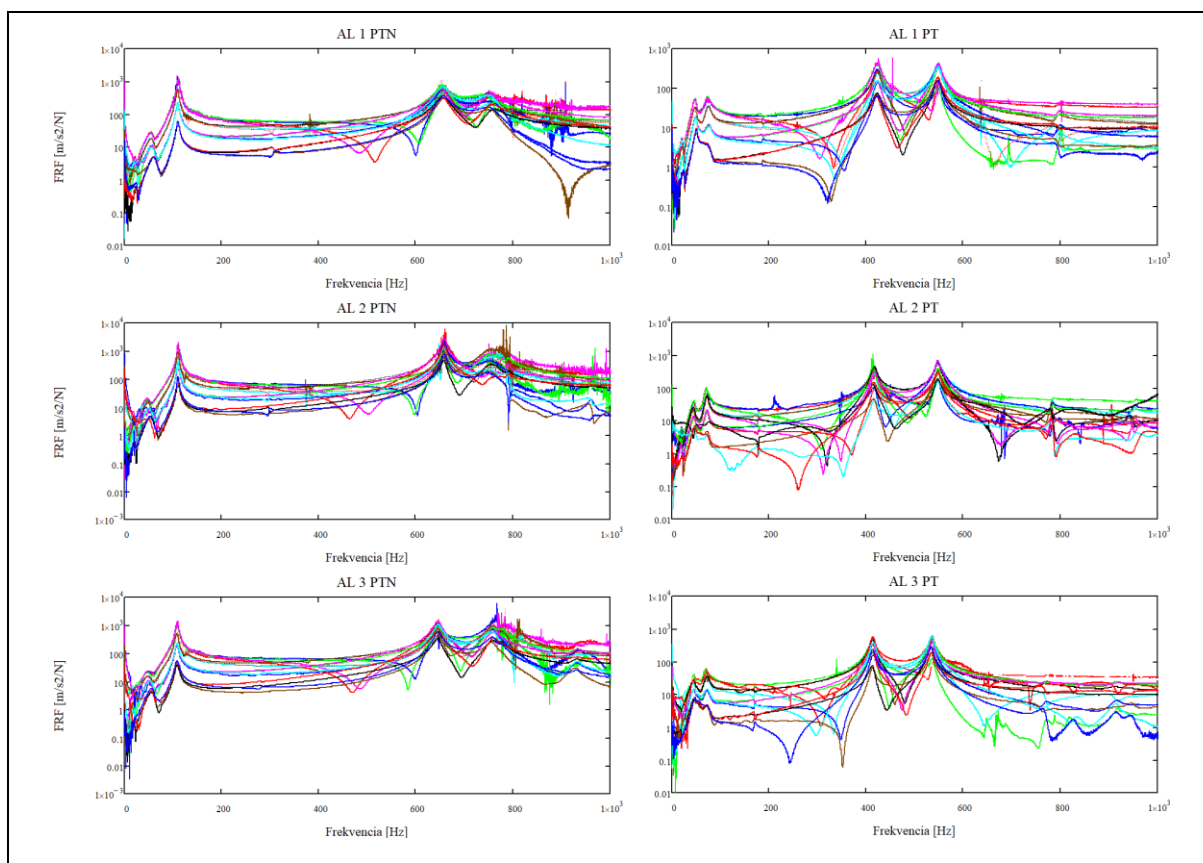
3.4 ábra
Csillapítási jellemzők vizsgálatának impulzus kalapács használatán alapuló modellje [8]

A mérési modell tényleges megvalósított elrendezését a 3.5. ábrán mutatjuk be [8].

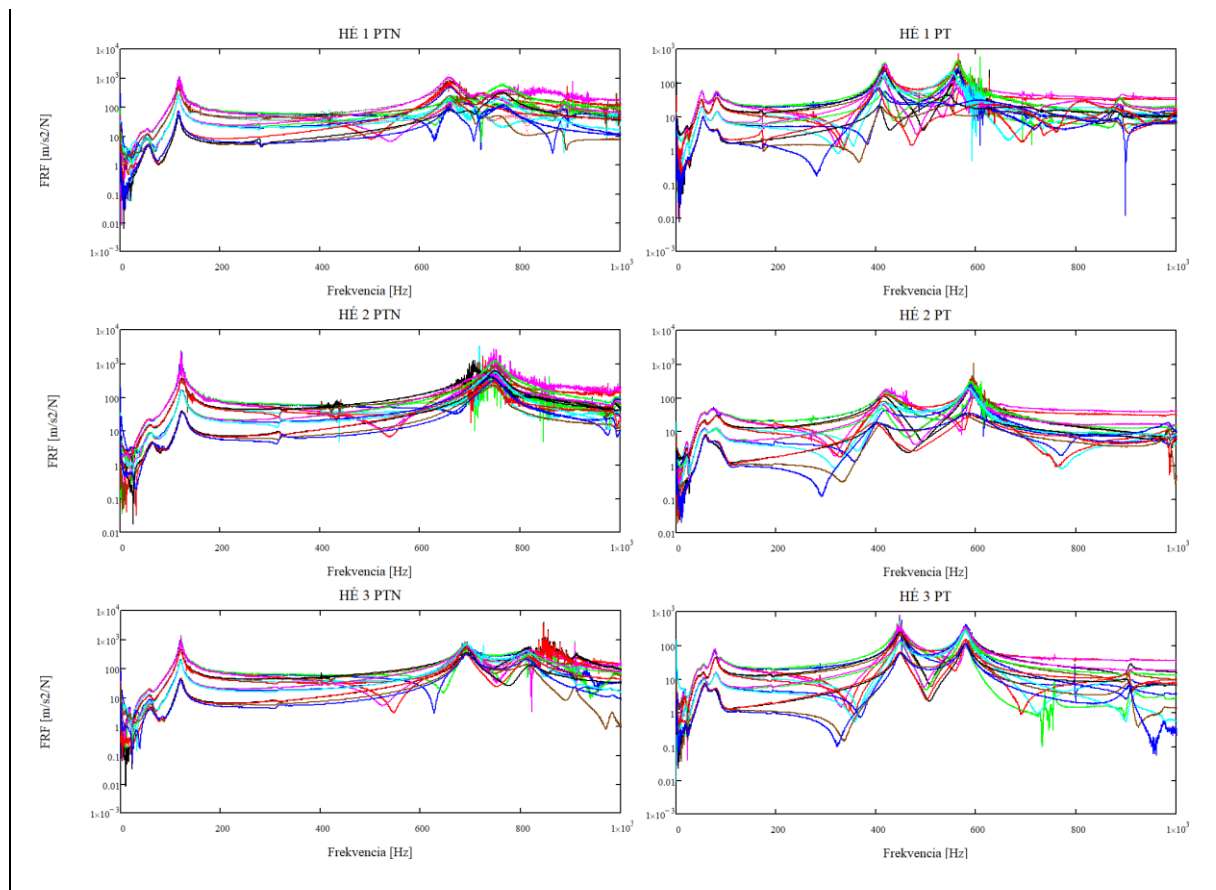


3.5 ábra
Csillapítási jellemzők vizsgálatát megvalósító mérés elrendezés [8]

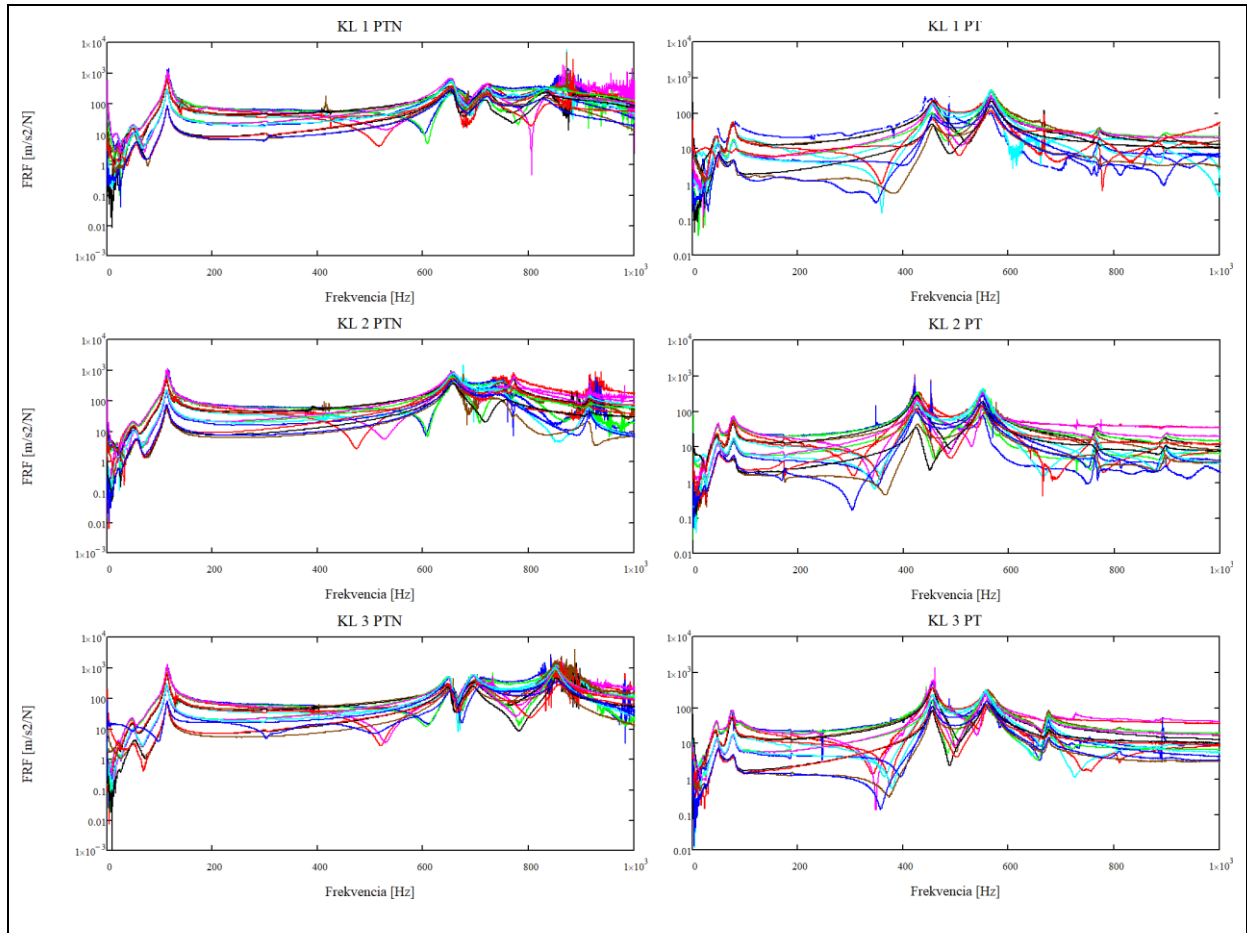
A vizsgálatokat a 3.2. ábrán bemutatott elrendezésben nyomtatott próbatesteken végeztük. A méréseink alkalmából rögzítettük a szerkezet (befogott tartó) gerjesztésekre adott válaszfüggvényeit, amelyekből az $x - y$ síkban (fekve) nyomtatott próbatesteken végzett vizsgálatok eredményeit a 3.6 ábra, a hosszabbik élén nyomtatott próbatesteken végzett vizsgálatok eredményeit a 3.7 ábra, míg a z irányban (álló helyzetben) nyomtatott próbatesteken végzett vizsgálatok eredményeit a 3.8. ábrán mutatjuk be [6].



3.6 ábra
 $x-y$ síkban (fekve) nyomtatott próbatest gerjesztési válaszfüggvénye [6]



3.7 ábra
Hosszabbik élén nyomtatott próbatest gerjesztési válaszfüggvénye [6]



3.8 ábra
Z irányban (állva) nyomtatott próbatest gerjesztési válaszfüggvénye [6]

A méréseink alapján meghatároztuk a vizsgált tartó frekvencia válaszfüggvényét (*Frequency Response Function's: FRF*), amelyet az (1) összefüggésben mutatunk be:

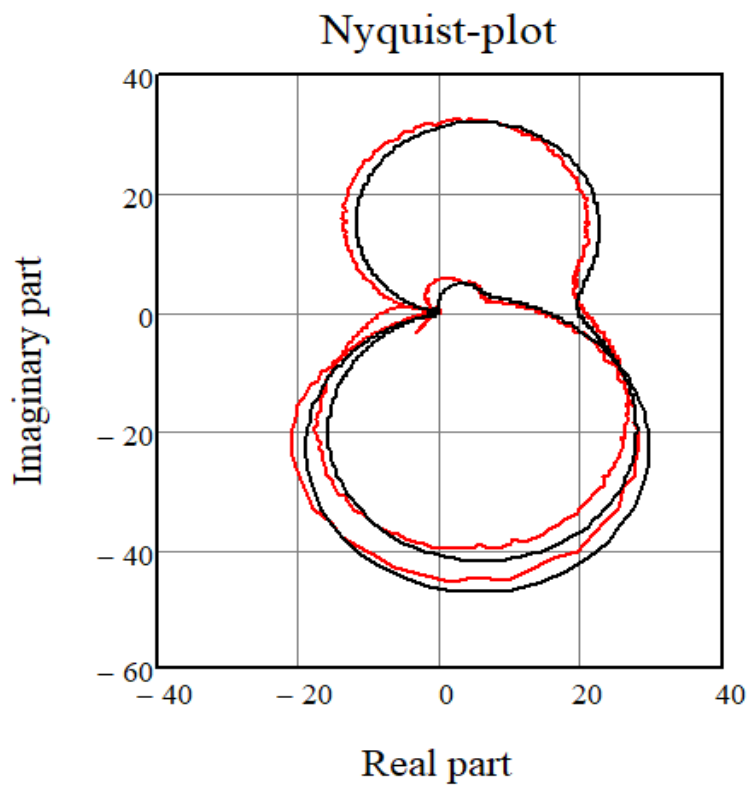
$$H(j\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_i}{j\omega - \lambda_i} + \frac{\overline{P_i}}{j\omega - \overline{\lambda_i}} \right] \quad (1)$$

$$\lambda_i = -\sigma_i + j\omega_{d,i}$$

ahol:

P_i a modus residiuma i [m/sec/N],
 λ_i a modus komplex sajátértéke i [rad/s],
 σ_i a modus modális csillapítása i ,
 $\omega_{d,i}$ a modus csillapított sajátfrekvenciája i , valamint
 j az imaginárius rész.

A mérési eredmények alapján felrajzoltuk a *Nyquist* diagramokat, amelyekből a hosszabbik élen nyomtatottat a 3.9. ábrán mutatjuk be [6].



3.9 ábra
Hosszabbik élen nyomtatott próbatest *Nyquist* diagramja [6]

A mérési eredmények értékelésekor láthatjuk, hogy a rendszer négy saját frekvenciával rendelkezik, és a részletes vizsgálatok azt mutatták, hogy ezek az értékek a terhelési módnak (hajlító, illetve csavaró: annak függvényében, hogy a vizsgált pont és a gerjesztés egy tengelyben (hajlító), vagy egymás melletti tengelyen (csavaró) helyezkedik-e el (lásd 3.4 ábra mérőpontok ill. gerjesztési lehetőségek elhelyezkedése)).

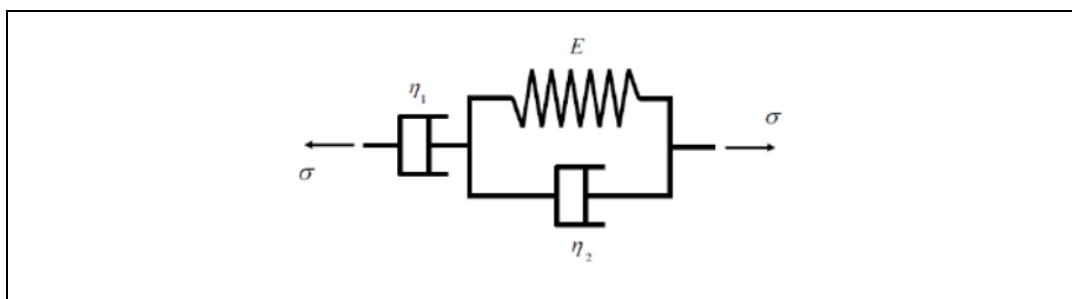
A számszerűsített adatokat a 3.II. Táblázatban adjuk közre.

Modus i	1	2	3	4
f_i [Hz]	116.87	304.58	692.03	762.96
ξ_i [%]	2.61	9.14	1.49	0.93
Terhelés jellege	H	Cs	Cs	H

3.II. Táblázat
Befogott tartó dinamikus vizsgálatának sajátfrekvencia adatai [6]

A dinamikus terhelések eredményeiből az alábbi következtetések vonhatók le *PLA* nyomtatott (*FDM Technológia*) polimer anyag viselkedésére:

- Az FDM technológiával nyomtatott PLA polimer *viszkoelasztikus* viselkedést mutat
- A viselkedése a "Jeffrey-test" elemeinek ismeretében, (amely egy Kelvin-Voight és egy Newton test összekapcsolásával állítható elő), írható le, amely az ún. *Fluid II. Modell*.
- Ezzel a modellel az arányos csillapítási viselkedés (*Rayleigh-shape*), leírható, melynek elvi összeállítását a 3.10. ábrán adjuk közre [6]



3.10 ábra
A 3D nyomtatott *PLA* csillapítási tulajdonságait (*FDM* eljárással) leíró *viszkoelasztikus* modell [6]

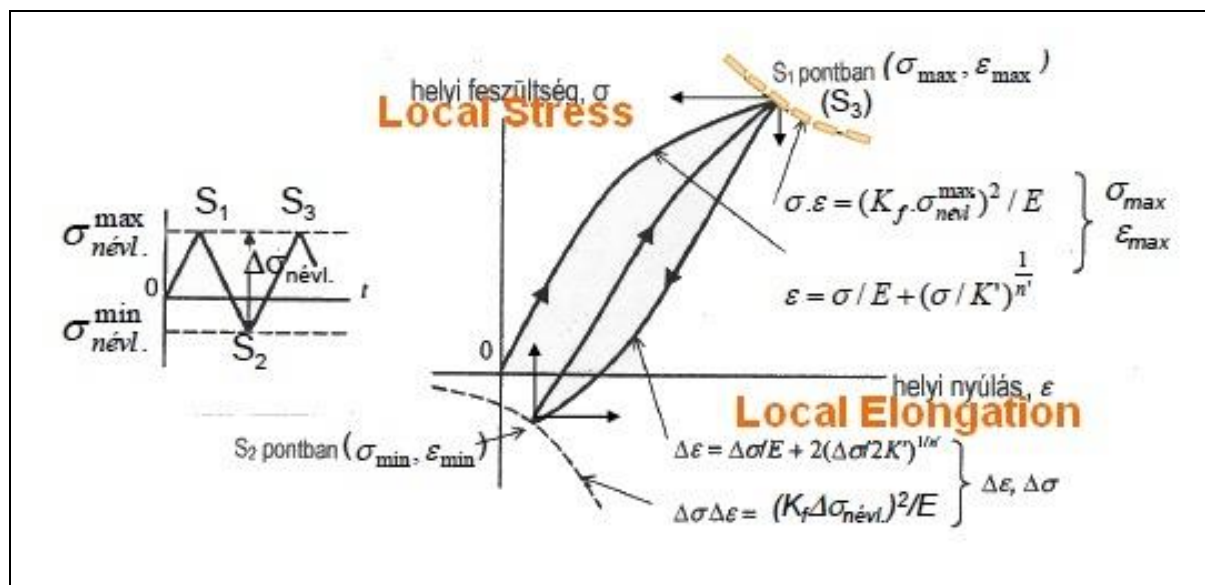
Fentiekben bemutatottak alapján megállapítható, hogy a statikus terhelési körülmények között megállapított nyomtatási iránytól függő anyagi jellemzők a 3D nyomtatással (*FDM* eljárás) készült próbatestek esetén dinamikus terhelésekre is irányfüggő jellemzőket mutatnak, amely csillapítási jellemzők *viszkoelasztikus* anyagmodell alkalmazásával írhatók le.

3.3 Viselkedés ismétlődő terhelések hatására: kifáradási tulajdonságok

Polimerek esetén a kifáradási jellemzők meghatározása – különös tekintettel a viszkoelasztikus viselkedésükre, a terhelésre adott válaszfüggvényként megjelenő kúszási – relaxációs tulajdonságaikra igen összetett, ennek megfelelően különös körütekintést igénylő feladat.

Különösen igaz a fenti megállapítás az additív gyártástechnológiával készített anyagokra. Miután ez a gyártási technológia napjainkban nem több, mint 15...20 esztendőre tekint vissza, a kifáradási jellemzők vizsgálati eredményei az irodalomban még nem állnak általánosan elérhető szinten rendelkezésre.

Mindazonáltal számos kutatóhely foglalkozik a kérdéssel, publikus eredményeket azonban elérhető módon még nem találunk. Kutatásink során a közeljövőben tervezzük a nyomtatott polimerek kifáradási jellemzőinek meghatározását, amelyre vonatkozó kisciklusú fárasztóvizsgálati elképzelésünk elvi elgondolását a 3. 11 ábrán mutatjuk be [6].



3.11 ábra

Kisciklusú fárasztó vizsgálat elméleti lefolyása kifáradási jellemzők meghatározására [6]

A 3.11 ábrán bemutatottak alapján alkalmasan megválasztott húzó-nyomó próbatest ciklikus terhelésével, valamint az időben változó fajlagos nyúlási jellemzők mérésével megkíséreljük a nyomtatott PLA anyag kifáradási tulajdonságait meghatározni.

Köszönetnyilvánítás

- *A vizsgálatok az alábbi projektek támogatásával valósultak meg:* Lézertechnológiai és energetikai alapkutatás megvalósítása az Edutus Főiskolán, tudástranszfer, továbbá a vállalati kapcsolatok és a társadalmi szerepvállalás erősítését célzó tevékenységekkel kiegészítve. Projekt azonosító: **EFOP-3.6.1-16-2016-000**, valamint
- Egyénre szabott orvos-biológiai implantátumok és segédeszközök új generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra. Projekt azonosító: **NVKP-16-1-2016-0022**

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Jármű- és hajtáselemek I. E-Tanköny. A II. Nemzeti Fejlesztési Terv Társadalmi Megújulás Operatív Program TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 azonosító számú programja keretében készült jegyzet. www.tankonyvtar.hu
- [2] Szendrő Péter (szerkesztette): Gépelemek (B.Sc. alapkönyv) Mezőgazda kiadó, (2007). ISBN 978-963-286-37-1-9
- [3] Ficzer Péter: Gyors prototípus numerikus és kísérleti szilárdsági analízise. Ph.D. disszertáció. BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar (2012.04.03. prezentáció).
- [4] Borbás Lajos: Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben. Magyar Mérnöki Kamara kiadványa, továbbképzési segédlet. Kamarai Tudástár, 2017. <https://www.mmk.hu/tagjainknak/tudastar>
- [5] Zoltán MAJOR (PCCL, Leoben): Determination of Material Parameters for Micromechanics Modeling and Simulation of Particle Filled Polymeric Materials (Előadás: YSESM 8, 2008, Győr, Hungary)
- [6] BÁLINT ÁDÁM KOVÁCS, PETER FICZERE, LAJOS BORBÁS
EXPERIMENTAL DYNAMICAL ANALYSIS OF SPECIMENS' MATERIAL PROPERTIES MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES
35TH DANUBIA ADRIA SYMPOSIUM ON ADVANCES IN EXPERIMENTAL MECHANICS. Sinai, Romania, 2018. szeptember 25...28. pp.: 49-50
https://www.dropbox.com/s/gnjlwnidm95uecg/Proceedings%20DAS35_final.pdf?dl=1
ISBN 978-606-23-0874-2
- [7] Peter Ficzer, Lajos Borbas, Gyorgy Falk, Gabor Szebenyi
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MATERIAL MODEL OF MACHINE PARTS PRODUCED BY SLS TECHNOLOGY
34th Danubia-Adria Symposium in Experimental Mechanics, 2017. September, 19...22, Trieste, Italy.
Proceedings, <https://www.openstarts.units.it/handle/10077/14834> (név szerinti kereséssel)
- [8] Kovács Bálint Ádám: PLA anyagból additív gyártástechnológiával gyártott alkatrész dinamikai tulajdonságainak kísérleti modális vizsgálata. Záróvizsga előadás, Budapesti műszaki és gazdaságtudományi egyetem, *Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék*. 2018.
- [9] Ficzer, Péter, Orthotrop anyagmodell alkalmazása additív gyártástechnológiával előállított alkatrész méretezése során [Usage of orthotrop material law for additive manufacturing in part design], GÉP LXVII : 5-6 pp. 78-81. (2016)