



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Változó anyagszerkezetű 3D nyomtatott elemek
tribomechanikája

Doktori (PhD) értekezés tézisei
Dobos József

Gödöllő
2023

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE, Műszaki Intézet

Témavezetők: Dr. Keresztes Róbert Zsolt
egyetemi docens, PhD
MATE, Műszaki Intézet

Dr. Oldal István
egyetemi docens, PhD
MATE, Műszaki Intézet

.....
a témavezető jóváhagyása

.....
az iskolavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
1.1. Célkitűzések.....	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	5
1.2. Mechanikai vizsgálatok	5
1.3. Hajlított szendvicsszerkezet virtuális modellvizsgálata	5
1.4. Végeselem modellvizsgálatok gépelemre	7
1.5. Tribológiai vizsgálatok	9
3. EREDMÉNYEK.....	10
1.6. A végeselem módszer eredményei	10
1.7. Tribológiai vizsgálatok eredményei	14
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	15
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	17
6. ÖSSZEFOGLALÁS	18
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	20

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. Célkitűzések

Kutatómunkám célja a 3D nyomtatott műanyag alkatrészek kitöltöttségének (anyagfelhasználásának) optimalizálása. A technológia lehetővé teszi, hogy egy alkatrészen belül különböző kitöltöttségű részek legyenek, továbbá lehetőséget ad arra, hogy a terhelések ismeretében a kitöltöttséget és így a felhasznált anyag mennyiségét bizonyos helyeken csökkentjük. Mindez két előnnyel jár a gyártáskor; egyrészt kevesebb anyagot kell felhasználni, másrészt csökkenti a termelési időt, továbbá mindkettő költségcsökkentő tényező.

Kutatásom főként különböző mintázatú rétegek optimális kialakításáról szól a rétegek sűrűségének és méretének változtatásával. Szimulációk alkalmazásával az eltérő nyomtatási mintázat párosításának optimum keresését kívánom szemléltetni. A várható eredmények szemléltetésére, különböző kitöltöttség és nyomtatási mintázat alkalmazásával kerül sor.

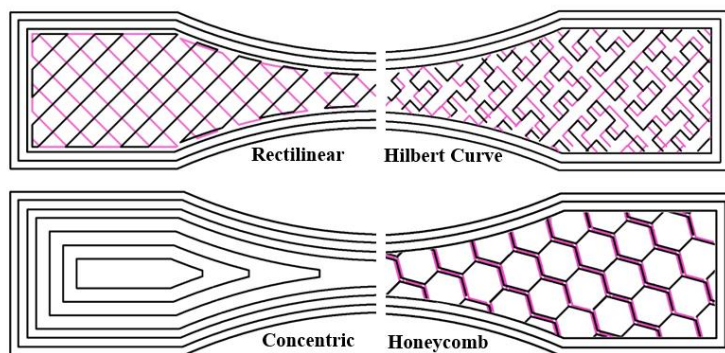
Ezen célok eléréséhez a következő részfeladatokat tűzöm ki:

- Kísérleti vizsgálatok a szakítószilárdság és a rugalmassági modulus meghatározására különböző kitöltési sűrűség- és mintázatpárok alkalmazásával. Az eredmények bemeneti paraméterként szolgálnak a pontos és valósághű anyagtulajdonságokon alapuló működő mechanikai modell megalkotásához.
- Virtuális mechanikai elemzések szendvicsszerkezetű mintákon, végeelem módszerrel. Ezzel meghatározásra kerül az adott töltési mintákhoz és sűrűségekhez a legnagyobb fajlagos teherbírású (szendvicsmag) optimális vastagsága.
- Több rétegű gépelem szimulációja az érintkezési mechanikai jellemzők meghatározására és az optimális rétegrend megkeresése.
- Az elért eredmények gépelemen történő tesztelése, tribológiai vizsgálatokkal, a kapott végeelem eredmények validálása.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

1.2. Mechanikai vizsgálatok

Méréseim során magyarul politejsavként is ismert, PLA (Polylactic acid) került felhasználásra. Ezt a környezettudatos alapanyagot magas keményítőtartalmú növényekből állítják elő (búza, kukorica, rizs). A legyártott munkadarabok utómunkálatok nélkül tökéletesen alkalmasak voltak a befogásra így szakítószilárdság és rugalmassági modulusok vizsgálatára. A ISO 527 szerint készült szabványos 3D nyomtatott próbatetek belső szerkezetét a 2.1.ábrán szemléltetem. A gyártmányok concentric, hilbert curve, honeycomb, rectilinear elnevezésű belső szerkezet/mintázat nyomtatási beállításaival készültek. A beállítások lehetővé teszik, hogy az anyagfelhasználás kitöltési mértékét (százalékát) és mintázatát változtassuk. A négy típusú mintázat, további négy különböző sűrítési fokú csoportba került: 40%, 60%, 80% és 100%, ezáltal létrehozva a 15 féle variáció összehasonlítását.



2.1. ábra Az ISO 527 próbatetek belső szerkezet-mintázatai

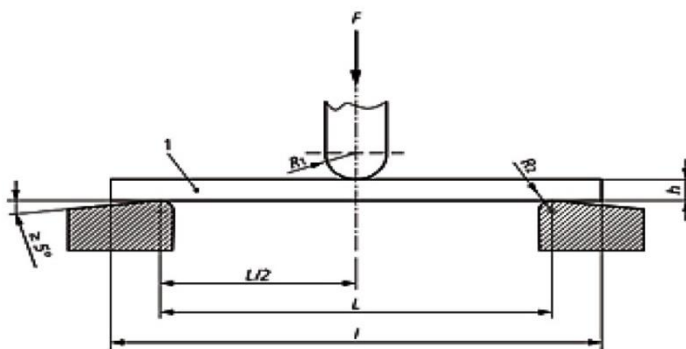
A rugalmassági modulus mérésekhez 1 példányt nyomtattam szintén az előzőekben alkalmazott minden mintázatból és kitöltöttségből. A Young-modulus mérések könnyen reprodukálhatóak ugyanazon a próbatesten, ezáltal nincs szükség a 15 variáció ismételt legyártására.

1.3. Hajlított szendvicsszerkezet virtuális modellvizsgálata

A virtuális modellvizsgálatok célja az optimális rétegrend megtalálása három rétegű 3D nyomtatott elemek különböző mintázatok és kitöltöttségek esetén. Az előzőekben bemutatott kutatásaim alapot adtak a pontos és valóságghű anyagtulajdonságokon alapuló működő mechanikai modell megalkotásához.

Ezt követően virtuális hajlítási teszt sorozatot indítottam egy ISO-178 szabvány szerinti szendvicsszerkezetű mintán, Ansys Workbench szoftverrel.

A szimulációkhoz ANSYS Workbench R17 típusú szoftvert, azon belül a statics structural modult futtattam. A vizsgálatokkal meghatároztam az adott töltési mintákhoz és sűrűségekhez a legnagyobb fajlagos teherbírású elemhez tartozó szendvicsmag és héj optimális arányát. Statikus, azaz nyugalmi állapotban modellezem, mivel a szakítóvizsgálat sebessége nem teszi szükségessé a dinamikus modellezést. Mivel a keresztmetszet állandó, továbbá a szabványvizsgálat típusa is lehetővé teszi, az anyagot két dimenzióban modellezem, így sokkal gyorsabban juthatok ugyanolyan pontosságú eredményekhez. A 2.2. ábrán látható ISO 178 szabvány figyelembevételével terveztem meg a végelem módszerben alkalmazott hasábot. A kép alapján hoztam létre a maximális feszültség megállapításához szükséges további peremfeltételeket a program lefuttatásához. A szabványhasáb méretei a következő képen látható. Hosszúság 80 mm, szélesség 10 mm és a próbadarab vastagsága 4 mm.



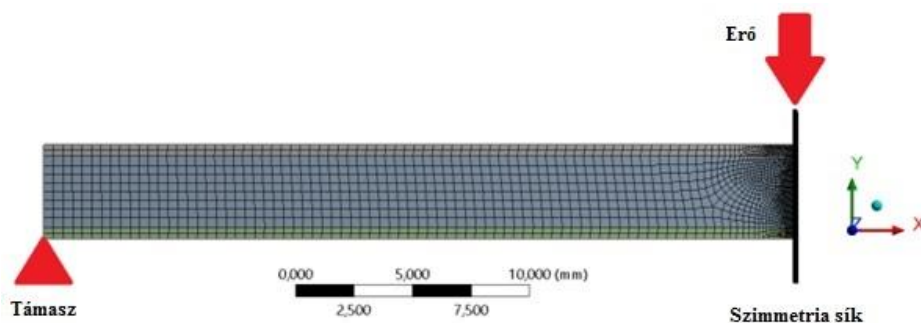
2.2. ábra ISO 178 szabvány szerinti hajlítás ábrázolása

A hasábot mérésenként különböző rétegek, mintázatok és kitöltöttségek variálásával teszteltem teljesen megegyezően az előzőekben alkalmazott beállításokhoz. Azaz a kísérletben a külső réteg minden esetben 100%-os és rectilinear mintázatú, továbbá a belső rétegek az előzőekre alapozva; concentric, rectilinear, honeycomb, hilbert curve valamint 40, 60, 80 és 100%-os kitöltöttség variációkban vizsgáltam. Az ISO 178 szabványnak megfelelően a próbatest magassága állandó 4 mm a teljes vizsgálat során. A modellezés célja, hogy meghatározzam a belső szerkezet kitöltésének (v) variálása milyen hatással van a vizsgált próbatest tulajdonságaira. A vizsgálat során szabvány szerinti két támaszú három pontos hajlítást alkalmaztam, amit a 2.2. ábrán már szemléltettem. A szimmetriát kihasználva a virtuális vizsgálatkor a valódi geometria felét elegendő modellezni. A próbatest egyik fele megtámasztásra került, a másik végét pedig F erővel terheltem, így alakítottam ki a vizsgálat modelljét.

Peremfeltételként tehát görgős támasz a végére, középre pedig – a szimmetria síkon – erő került elhelyezésre.

A szimmetria peremfeltétel pedig úgy valósult meg, hogy közepén – a szimmetriatengelyen – a vízszintes elmozdulás értéke zérus.

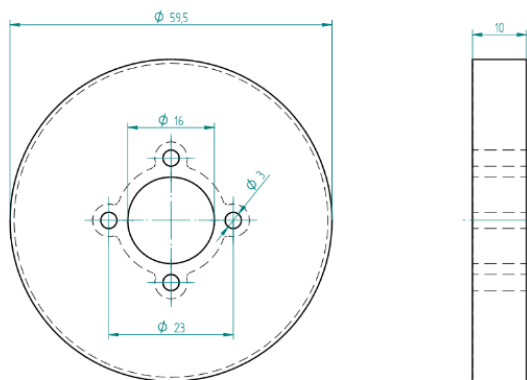
Az ISO 178 hajlítási szabvány vizsgálati módszere és a végeelemes modell hálója a 2.3. ábrán látható. A végeelemes háló 6480 csomópontot és 2069 elemet tartalmaz. A hálóelemek négyszögletesek 0,05 és 0,5 mm között. Méretük a kritikus részen, azaz a maximális feszültség környékén a legkisebb, ettől távolodva növekszik. A támasztást y irányú elmozdulásként modelleztem, a szimmetria miatt az erő felét alkalmaztam. A szimmetriát a síkjában $x = 0$ elmozdulásként modelleztem.



2.3. ábra A szendvicsszerkezet modell hálója

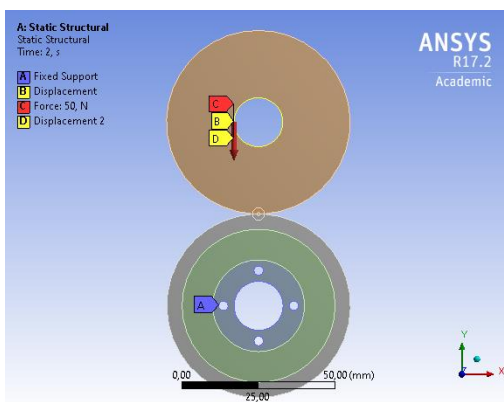
1.4. Végeelem modellvizsgálatok gépelemre

A gépelem megválasztásánál fontos szempont volt, hogy könnyen alkalmazható legyen az eredményeket validáló tribológiai vizsgálatoknál. A MATE Tribológiai laboratóriumában lévő tesztpad kiválóan alkalmas 60 mm átmérőjű görgők tesztelésére ezért a 2.4. ábrán lévő próbatestet terveztem. A görgő Solid Edge programban készült. A keresztmetszet állandósága és a szabványvizsgálat típusa lehetővé teszi a kétdimenziós modellezést. Ezen beállítások alapján sokkal gyorsabban juthatok ugyanolyan pontosságú eredményekhez. Az előzőekhez hasonlóan a héjszerkezet minden esetben 100% rectilinear. A hajlítási vizsgálatok esetében legjobb eredményeket produkáló 40%-os kitöltöttséget vizsgálom concentric, hilbertcurve, honeycomb, rectilienar mintázatokat variálva. A héjvastagság A 40 százalék kitöltöttségű négy féle mintázatot, hét magvastagság variálásával vizsgáltam a normál feszültség, redukált feszültség és a deformáció komponens értékeit. A modellezés célja, hogy megtaláljam azt a héjvastagságot, amely fölött már felesleges további anyaggal növelni az adott gépelemet. A vizsgálatok során alkalmazott héjvastagság: 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4 és 5 mm. A vizsgálat során a 2.4. ábrán szemléltetett görgőt alkalmaztam.



2.4. ábra A vizsgált PLA görgő geometriai méretei

A görgő a 2.5. ábra szerinti megtámasztásra, megvezetésre került. Az előzőekben alkalmazott próbaterhelést alkalmazva alakítottam ki a vizsgálat modelljét A vizsgált görgő a következő ábrán látható támaszokkal és erőkkel terheltem. A fixed support a támasztást, a displacement a megvezetést mutatja a görgők stabilizálására. Első lépésben 0.002 mm mértékben összenyomtam a gépelemeket azért, hogy numerikusan stabilá váljon a modellezés. Második lépésben feloldottam az összenyomást és erővel nyomtam össze a görgőket. A vizsgálatok során 50 N terhelést alkalmaztam.



2.5. ábra. Alkalmazott támaszok és erők

A végeelemes háló 4832 csomópontot és 1464 elemet tartalmaz. A hálóelemek négyszögletesek 0,05 és 0,5 mm között. Méretük a kritikus részen, azaz az érintkezési pont környékén a legkisebb. A kontakt felületek közelében a legnagyobb a feszültség változása, amit a kis elemmérettel lehet követni, a kritikus ponttól távolodva növekszik a háló mérete.

1.5. Tribológiai vizsgálatok

A szakító- és rugalmasság vizsgálatok során elért eredmények adták a virtuális mérésorozat bemeneti paramétereit.

Ezen eredmények ellenőrzésére és validálására, gépelemeken történő tribológiai elemzés tanulmányaim következő lépése. A tesztekhez alkalmazott hajtástásvizsgáló fékpad a MATE-Műszaki intézet fejlesztése. Működési elve szinte teljesen megegyezik a twin disc rendszerrel. A vizsgálóberendezés lehetővé teszi gépelemek kopás vagy akár élettartam vizsgálatát közel állandó terhelés mellett. (2.6. ábra).



2.6. Ikertárcsás elven működő hajtástásvizsgáló fékpad

A tesztáru hasonlón épül fel, mint a Twin-Disc rendszerek. A villanymotor meghajtású zárt hajtáslánc, szabályozható frekvenciaváltóval felel a fordulatszám 0 – 1500 ford./perc biztosításáért. A villanymotor csak a hajtás veszteségeit ellensúlyozza így nagyon gazdaságosan üzemeltethető a rendszer. A vizsgálat során a görgők között a hajtásra rögzített súlyokkal hozható létre a kívánt terhelés. A súly/terhelés mértékét erőmérő cella segítségével határoztam meg, amelyet a Catman programban kalibráltam. Az adatok Catman szoftver segítségével kerülnek feldolgozásra, illetve mentésre. A motor bekapcsolásával két párhuzamos tengely kerül meghajtásra bordásszíjhajtás segítségével. A feszes szíjához tartozó párhuzamos tengelyhez kapcsolódik a hajtó, vizsgált görgő. Ezen tengely közepe nyomatómérő szenzorral van ellátva, a tengely másik vége pedig a hajtóműben helyezkedik el.

A Spider 8 típusú mérőerősítő adatfeldolgozásával és valós idejű monitorozásával szolgálja az információkat a Catman szoftver részére. A szíj forgatja meg a hajtott, görgőket, amely a hajtóművön keresztül kapcsolódik a másik párhuzamos tengelyhez. A vizsgálati paraméterek folyamatos mérésére, Catman szoftver, HBM Spider 8 és a Calex PCCFMT-O-3M infrahőmérő egyidejű mérési adatgyűjtő rendszer segítségével valósul meg. A rögzített paraméterek: fordulatszám, súrlódási nyomaték, idő továbbá a görgő palástfelületi hőmérséklete. A vizsgálat eredményét befolyásoló bemeneti paraméterek; a hajtó és a hajtott görgő mérete, anyaga, szerkezete, kitöltöttsége. A nyomaték méréséhez a korábban említett hajtó tengely közepén elhelyezett nyomatékszenzort alkalmaztam. A mérési frekvencia minden esetben 2 Hz volt. Az adatsorok mentése Catman saját formátumban történik, melyet a Microsoft Excel programban dolgoztam fel.

3. EREDMÉNYEK

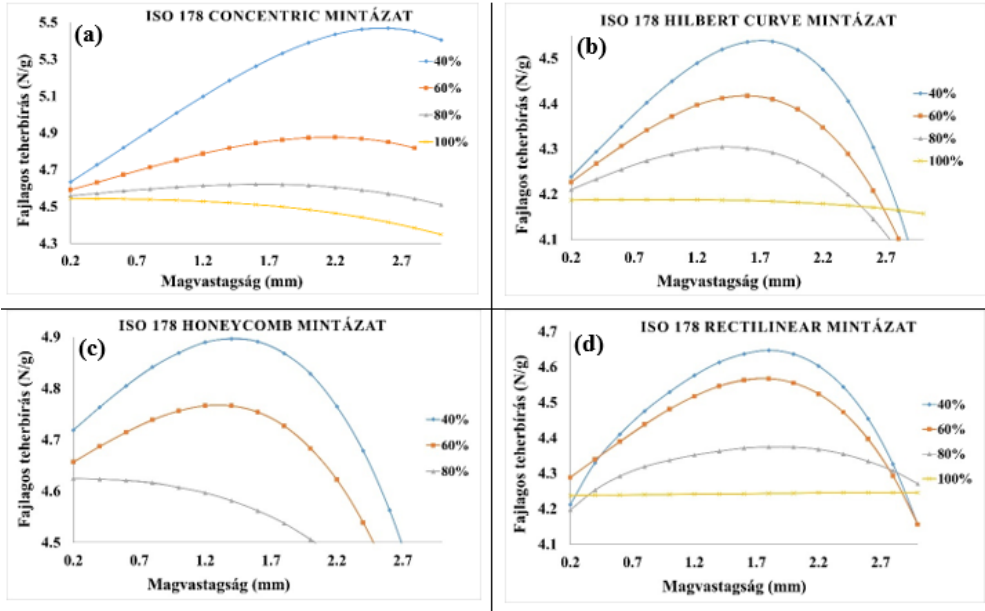
A következőkben kutatómunkám során elért új, tudományos eredményeimet mutatom be. Az eredményül kapott diagramok közül az érthetőség szempontjából elengedhetetlen ábrákat szemléltetem.

1.6. A végeelem módszer eredményei

Szimulációs hajlító vizsgálat eredmények kiértékelése

Az alkalmazott peremfeltételek és a beállítások alapján 225 esetet modelleztem. A feszültség értékeket minden kitöltés és anyagmintázati variáció esetén dokumentáltam. A számított feszültségekből a szakítószilárdság értékek alapján határoztam meg, hogy mekkora erővel terhelhető a próbatest. A rétegvastagság módosításának függvényében jutottam hozzá a számított erők értékeihez. A mag és a héj különböző anyagjellemzői miatt nem egyforma terhelésnél mennek tönkre. Minden réteg esetén meg kell határozni a rétegre vonatkozó maximális terhelést és az értékelés során a kisebbet figyelembe venni, mint a szerkezet teherbírását. Kalkulálva a legkisebb értékekkel - amit az anyag biztosan elbír - és a próbatestek tömegével megkapom a tömeg-erő arányát, amely a kitöltöttség függvényében mutatja a fajlagos teherbírást. Ezen eredményeket diagramban ábrázolva a függvény görbéje szélsőértéket mutat, azaz van optimuma. A fajlagos teherbírás alakulásának függvényeit a magvastagság változtatásával a 2.7. a-d. ábrákon szemléltetem. Az optimális magvastagság vizsgálatát minden korábban alkalmazott beállítással (töltéssűrűség és mintázat variálásával) elvégeztem.

A diagramok függőleges tengelyén az erő/tömeg arányának értékét, a vízszintes tengelyen pedig a belső szerkezet anyagvastagságát jelöltem.



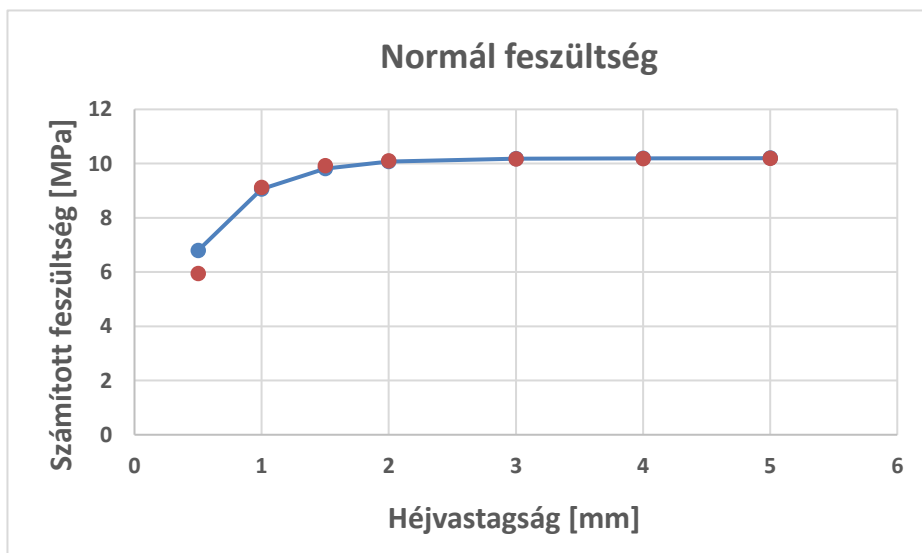
2.7 a-d. ábrák A fajlagos teherbírás változása a belső mag vastagságának függvényében (a) concentric, (b) hilbert curve, (c) honeycomb, and (d) rectilinear mintázat.

A hilbert curve mintázatok esetében is a 40%-os kitöltöttségnek kimagaslóan jók az értékei, az optimum 1,8 mm értéknél látható. A honeycomb mintázatoknál már egyre kisebb a függvények közötti eltérés, továbbá a rectilinear mintáknál már alig vagy éppen észre sem vehető szignifikáns különbség. A legnagyobb fajlagos teherbírás itt is 40% kitöltöttség és 1,8 mm anyagvastagság esetében érhető el. A 100%-os kitöltésű próbatesteket vizsgálva látható, hogy nincs optimum görbékük, a függvény szinte lapos. Ennek fő oka az, hogy a külső szendvicssrétegek is ugyanolyan kitöltéssel rendelkeznek (100%). Ezért az anyagtulajdonságok nem javultak a növekvő magvastagság ellenére sem. Ez jobban megmutatkozott a rectilinear mintánál, ahol a trendvonal viszonylag egyenes volt, mivel a külső és a mag mintázata, valamint a töltési arány azonos volt. Az a tény, hogy a fajlagos terhelhetőségi görbe csúcspontja után mindig jelentős visszaesés következik be, különösen 40 és 60%-os kitöltés esetében egyértelműen mutatja az optimum jelentőségét. Az optimum úgy tűnik, nem minden körülmények között kapcsolódik egy adott vastagsághoz. Összefoglalva, a diagramokból világosan látszik, hogy a töltési sűrűség és mintázatok alkalmazásával létezik egy optimum.

Megállapítható tehát, hogy három rétegű nyomtatott szendvicsszerkezet esetében minden kitöltöttséghez és mintázathoz létezik teherbírás szempontjából optimális rétegvastagság-arány. Az optimum létezésének felétele, hogy a külső réteg teherbírása nagyobb legyen, mint a mag teherbírása, viszont a sűrűsége a belső kitöltésnek legyen kisebb. Nyilvánvalóan látható, hogy a legjobb fajlagos teherbírás minden esetben a 40%-os kitöltési sűrűségnél észlelhető, függetlenül a töltésmintától.

Szimulációs gépelem vizsgálat eredményeinek kiértékelése

Számításaim és a 3D nyomtatási paraméterek (minta és a töltéssűrűség változtatása) alapján vizsgáltam a szendvicsszerkezetű görgő külső héj szerkezetén keletkező feszültségeket és deformációkat. Normál feszültség, redukált feszültség, deformáció vízszintes komponens értékeket minden kitöltés és anyagmintázati variáció esetén dokumentáltam. Az alkalmazott peremfeltételek és a beállítások alapján 315 eredményt kaptam. A 40%-os mintázatok normál feszültség szemléltetését a 2.8.ábrán, eredményeit mutatom be. A normál feszültség kizárólag a felületre merőleges nyomóerő értékeit foglalja magában. A fenti diagram függőleges tengelyén a számított feszültség, a vízszintes tengelyen a héjvastagság értékét olvashatjuk. 2 mm értéknél már közel konstans a normál feszültség értéke. A pontokra jól illeszkedik a jelenséget leíró telítődési görbe (kék színnel jelölve), amelyet a 2.8. ábrán szemléltetek.



2.8. ábra Számított normál feszültség a héjvastagság függvényében és az illesztett görbe

Az ábrán látható függvény egyenlete:

$$f(x) = c_1 \cdot (1 - e^{-c_2 x})$$

ahol a konstansok az illesztés után: $c_1=10,2$, $c_2=2,2$.

Az illesztett függvény alapján meghatározható egy határ, amely fölötti a rétegvastagság növelése a tribológiai lokális viszonyokra elhanyagolható hatással van. A c_1 mutatja meg a függvény határértékét.

Ha 5% eltérést fogadunk el, akkor ennek 95%-ától tekinthetjük állandónak a függvényt, ekkor:

$$0,95=1 - e^{-2,2x}$$

$$\text{ebből: } x = \frac{\ln 0,05}{-2,2} = 1,36 \text{ mm.}$$

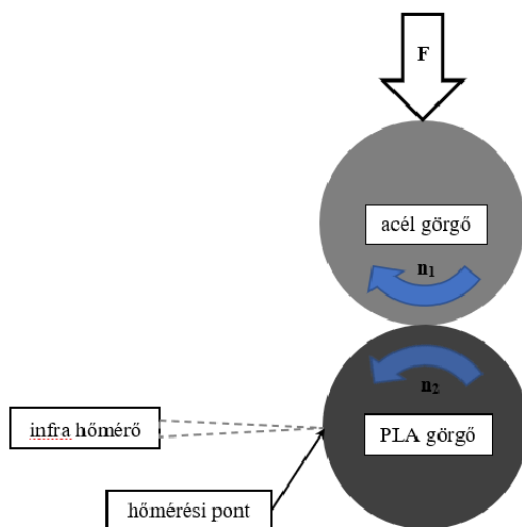
Amennyiben az eltérés mértékénél 1% az elfogadható, abban az esetben 99%-ától tekinthetjük állandónak a függvényt, aminek az értéke;

$$x = \frac{\ln 0,01}{-2,2} = 2,09 \text{ mm.}$$

Tehát 5% közelítés esetén 1,36 mm, 1% esetén 2,09 mm héj vastagság az a határ, amely fölött már nem érdemes tovább növelni a réteget, mert nem okoz javulást a lokális mechanikai jellemzőkben. A deformáció komponens értékei az x irányú elmozdulás (csúszás) irányában keletkezett x irányú deformáció mértéke, azaz a függvény görbéjének értékei szintén 2 mm héjvastagság mellett állandósulnak. Bármelyik mintázatot vizsgáljuk nincs szignifikáns különbség, a függvények görbéi közel azonos tendenciát mutatnak. A feszültségek állandósulása minden körülmény és mintázat között kapcsolódik egy adott vastagsághoz. Összefoglalva; a diagramok kiértékelésénél megfigyeltem, hogy két részletre osztható a függvények eredmény tartománya. A változó értékeknél elmondható, hogy a rétegvastagságnak van hatása a feszültségekre és deformációkra. A tartomány másik felében azonban megfigyelhető, hogy a rétegvastagságnak már elhanyagolhatóan kicsi a hatása a feszültségre és a deformációkra. Mindezek következtében megállapítható, hogy létezik egy határréteg, ami fölött már nem érdemes növelni a héj vastagságát mert a gyakorlatban nem lesz hatása a tribológiai jellemzőkre. Mindezek következtében tehát (tézis) a feszültség értékei a héjvastagság függvényében telítődési függvényekkel jól közelíthetőek. Továbbá (tézis) van egy határ, ami fölött rétegvastagság növelése a tribológiai lokális viszonyokra elhanyagolható hatással van.

1.7. Tribológiai vizsgálatok eredményei

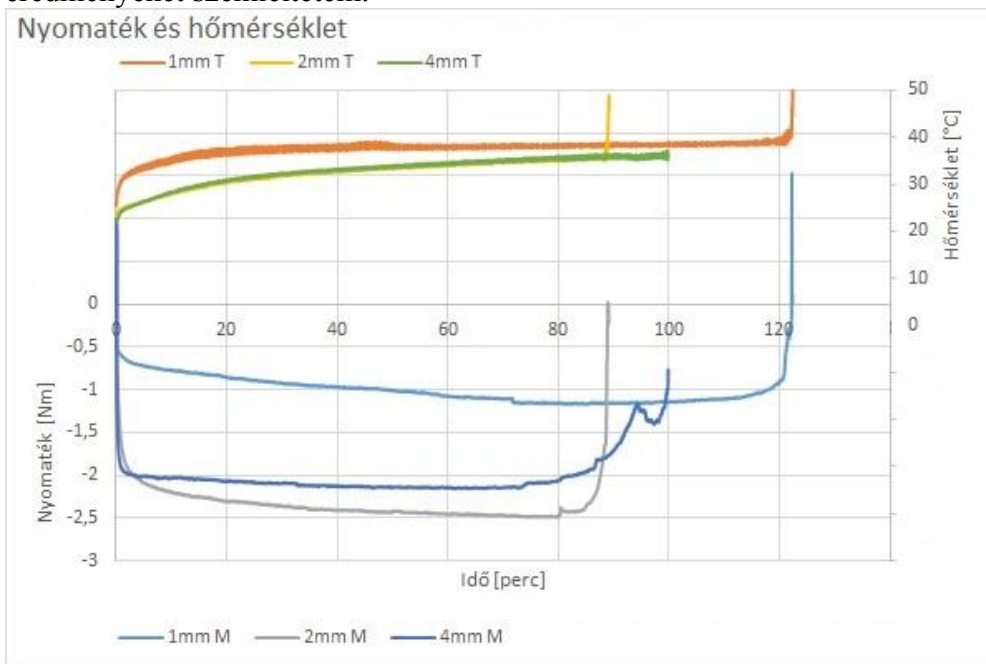
A következőkben rátérek a végelem módszert validáló tribológiai mérési eredmények bemutatására. A görgőn végzett tribológiai modellvizsgálatokat a végelemben kapott szimulációs eredmények validálásához végeztem el. Az eredmények értékelésénél fontos, hogy a vizsgálatokat környezeti hőmérsékleten és normál páratartalom mellett végeztem. A héjvastagság a PLA görgőkön 1 mm, 2 mm, 4 mm, és az ellen görgő minden esetben acél volt. A felhasznált anyagok részletes tulajdonságait ismertettem az anyag és módszer fejezetben. A vizsgálatok alatt folyamatosan mértem a hajtás nyomaték veszteséget és a polimer görgő felületi hőmérsékletét. A hőmérséklet mérés helyét a 2.9. ábrán mutatom be.



A 2.9. ábra a hőmérséklet mérés

A mérési adatokból összetett diagrammot készítettem a diagramon a hőmérséklet és a nyomaték veszteség látható az idő függvényében. Különböző színekkel a különböző héjvastagságokhoz tartozó értékeket jelöltem. A diagram felső részén a hőmérséklet emelkedés (T [°C]) látható az alsó részén pedig a nyomaték veszteség (M [Nm]). A mérési diagramból szembetűnő, hogy a hőmérsékletváltozásban nincs jelentős eltérés a héjvastagságtól függően. Mindez magyarázható a hőmérséklet mérési pont elhelyezésével. Természetesen a hőmérséklet mérést a kontakt zónában kellett volna elvégezni azonban erre nem volt lehetőségem. A nyomaték veszteség görbéken jóval nagyobb eltérések mutatkoztak összhangban a végelem szimulációs eredményekkel. Nagyon jól látható, hogy az 1 mm-es héjvastagságú görgő nagyban eltér a 2 mm-es és a 4 mm héjvastagságú görgőkön mért nyomaték veszteségtől. Azonban ahogyan a végelem vizsgálatok előzetesen igazolták, ami a tribológiai vizsgálatok során is

kiderült, hogy a 2 mm-es és a 4 mm-es héjvastagságú görgők eredményei között már nincs szignifikáns eltérés. A 2.10. ábrán a mérési diagram ezen eredményeket szemléltetem.



2.10. ábra. ikertárcsás vizsgálat mérési diagramja különböző héjvastagságok esetén

A diagramon szemléltetett mérési eredményeimmel igazolni tudom a végelem szimulációs módszerrel kapott eredmények hitelességét.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tézis

Háromrétegű, 3D nyomtatott, hajlított szendvicsszerkezet esetében minden kitöltöttséghez és mintázathoz létezik egy, a fajlagos teherbírás szempontjából optimális rétegvastagság arány. Az optimum létezésének felétele, hogy a külső réteg teherbírása és térkitöltése nagyobb legyen, mint a maganyagé (3D nyomtatáskor a mag kitöltöttségének csökkentésével ez mindig teljesül). Az optimális vastagságtól vékonyabb vagy vastagabb héj is kisebb fajlagos teherbírást eredményez.

2. Tézis

Háromrétegű, 3D nyomtatott, hajlított szendvicsszerkezet esetében a legjobb fajlagos teherbírás minden esetben a mag 40%-os kitöltöttségénél érhető el, függetlenül a töltésmintától:

Térkitöltés	Belső mag vastagságának optimális értékei							
	concentric		Hilbertcurve		honeycomb		rectilinear	
	Optimális magvastagság (a teljes vastagság 4 mm)							
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
40 %	2.6	65	1.8	45	1.6	40	2	50
60 %	2.2	55	1.6	40	1.4	35	2	50
80 %	1.6	40	1.5	37.5	0.2	5	2	50

3. Tézis

Háromrétegű, 3D nyomtatott PLA görgő elméleti szilárdsági vizsgálata alapján megállapítottam, hogy az érintkezés közvetlen környezetében a feszültségek értékei a héjvastagság függvényében egy úgynevezett telítődési függvénnyel jól közelíthetők. A héj minden esetben 100%-os, a belső réteg ennél kisebb kitöltöttségű.

A függvény általános egyenlete:

$$f(x) = c_1 \cdot (1 - e^{-c_2 x})$$

ahol:

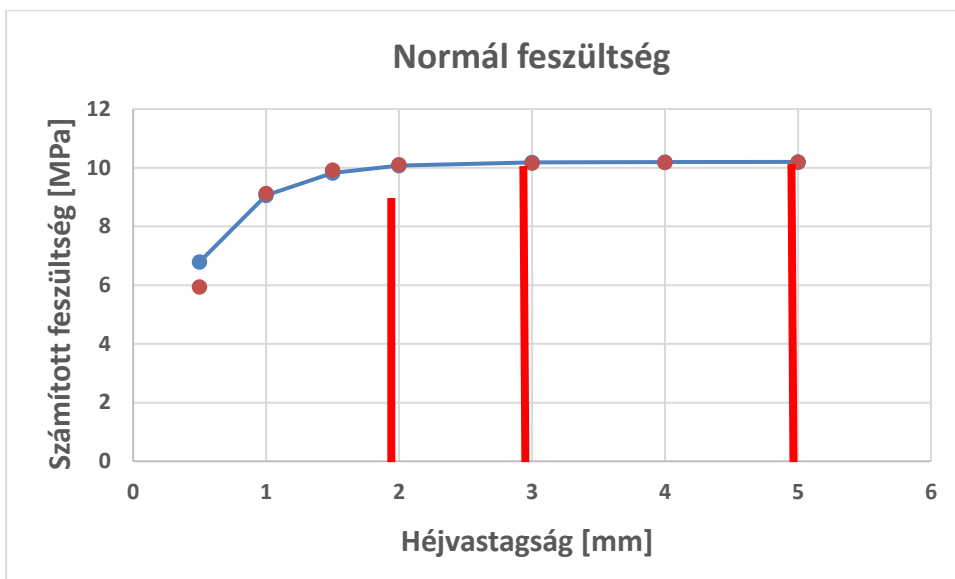
- x : a héj vastagsága,
- c_1 és c_2 konstansok (anyag, geometria és terhelés függő).

4. Tézis

Háromrétegű, 3D nyomtatott PLA görgő esetében létezik a héj vastagságának egy határa, amelyet növelve a lokális tribológiai viszonyok tovább számottevően nem változnak. Az elméleti határt a 3. tézisben leírt függvény alkalmazásával, 60 mm átmérőjű, 50 N terhelésű acél-PLA görgőpáros esetében állapítottam meg.

Ekkor a függvény konstansai: $c_1=10,2$, $c_2=2,2$. 5% hibahatár esetén 1,36 mm, 1% hibahatár esetén 2,09 mm héj vastagság az a határ, amely fölött már nem érdemes növelni a héj vastagságát, mert nem okoz további javulást lokális mechanikai jellemzőkben.

Ezt 1 mm, 2 mm és 4 mm héjvastagságú PLA görgők tribológiai vizsgálatával, méréssel igazoltam. Az 1 mm héj a határ alatt van, a 2 mm és 4 mm héj az állandó szakaszon.



A mérési eredményekből egyértelműen látható volt, hogy a 2 mm és a 4 mm héjvastagságú görgők mért jellemzői közel egyezők, míg az 1 mm héj esetében ezektől eltérnek. Így az elméleti telítődési görbe alapján megállapított állandósult szakasz létezését gyakorlati vizsgálatokkal is igazoltam.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A szakirodalomban a 3D nyomtatás kitöltöttségének változtatásával számos jó eredmény található a szerkezet teherbírásának javítására. Ezek azonban jellemzően egyedi megoldások, esetleg eljárások, amelyek adott szerkezet esetén alkalmazhatóak. Sőt van olyan kutató, aki az általános eredményeket nem tartja megvalósíthatónak. Ezzel ellentétben a dolgozatomban sikerült néhány olyan általánosítható eredményt elérnem, amely bizonyos (és a gyakorlatban legtöbbször fennálló) körülmények között érvényes.

Két eltérő területen végeztem kutatásokat és értem el eredményeket, a két terület a felhasznált technológiában, anyagban és módszerében hasonló. Első terület a nyomtatott polimer szendvicsszerkezetek hajlítása, a második a többrétegű nyomtatott polimer görgők tribológiája. Mindkét területen az volt a felvetésem, hogy a rétegeknek léteznek optimális vastagsága, azonban teljesen eltérő peremfeltételek mellett kellett az optimum létezését bizonyítanom. Következtéseimet a kutatási munkám alapján négy tézisben foglaltam össze, amelyet az előző fejezetben részletesen kifejtettem. Ezen kívül a munka során néhány következtetést levontam:

- Ha megfelelő területet keresünk, akkor a 3D nyomtatott testek esetében is lehet általánosított eredményeket elérni. Ez esetemben a háromrétegű szendvicsszerkezet és háromrétegű görgő volt, annyi feltételt kellett teljesíteni, hogy a belső szerkezet kitöltése és szilárdsága is legyen kisebb, mint a külső rétegé, ami a gyakorlatban szinte minden esetben teljesül.

- Tribológiai tulajdonságok és viselkedés akkor is korrelációban van a kontakt mechanikai tulajdonságokkal, ha egyébként nem alkalmazunk azonos tribológiai peremfeltételeket, viszont a terhelések és mechanikai jellemzők pontosak.

- A jövőben vizsgálati paraméterek közé bevéve a csúszást, csúszási sebességeket, kopást, további egyezéseket vagy éppen az alkalmazhatóság határát lehetne megállapítani a statikus kontakt modellel.

- Érdekes a további vizsgálatokat kiterjeszteni a nemlineáris anyagmodellek alkalmazására a VEM szimulációkban. Az eredményeim alapján elegendő pontosságú volt a lineáris modell, azonban annak vizsgálata, hogy milyen javulást hoz egy nemlineáris modell, érdekes jövőbeli feladat.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A háromdimenziós nyomtatással előállított termékek alkalmazhatósága és egyre szélesebb körben való használata számottevő már a gyártási applikációkban is. Az iparban újdonságnak számító gyártási technológiában fontos tisztázni a várható rendellenességek, esetleges meghibásodások, használati tönkremenetel bekövetkezhetőségének lehetőségét.

A szubtraktív gyártással szembeni előnyei főként a környezettudatosságban, gyártási hatékonyságban továbbá a könnyű anyagszerkezeti módosításban rejlik.

A 3D nyomtatással megvalósítható anyagstruktúrán belüli inhomogenitás és egyenszilárdságú méretezés fő előnye a szerkezeti optimalizálhatóság. A gyártmányok belső szerkezetében nem egyenletes a terheléseloszlás, ezért lehetőség van a kisebb terhelésű területen az anyag sűrűségének csökkentésére. Kutatásaim során szimulációs vizsgálataimmal és 3D nyomtatás-kísérleteimmal olyan eredményekhez jutottam, amelyek hozzájárulnak az additív gyártás fejlődéséhez.

A dolgozatom első részében a nyomtatott szendvicsszerkezet mechanikai tulajdonságainak vizsgálatával foglalkoztam. A kitöltöttségi mintázat hatással van a mechanikai szilárdságra és a fajlagos terhelhetőségre. A beállítások között vizsgáltam a héjvastagság és a magvastagság befolyását. A mechanikai vizsgálatok során kapott eredményeket használtam fel a szimulációs szoftver bemeneti paramétereire. Ez alapján valós bemeneti anyagtulajdonságokkal tudtam a hajlító vizsgálat szimulációs folyamatát elvégezni.

Megállapítottam, hogy az általam beállított szendvicsszerkezetű PLA test szimulációs eredményei közül a legnagyobb fajlagos teherbírás minden esetben a 40%-os kitöltési sűrűségnél észlelhető, függetlenül a töltésmintától. Megállapítható továbbá, hogy három rétegű nyomtatott szendvicsszerkezet esetében minden kitöltöttséghez és mintázathoz létezik fajlagos teherbírás szempontjából optimális rétegvastagság-arány. Az optimum létezésének felétele, hogy a külső réteg teherbírása nagyobb legyen, mint a mag teherbírása, viszont a belső kitöltés sűrűsége legyen kisebb.

Megállapítottam, hogy háromrétegű gépelem esetében létezik a héj vastagságának egy határa, amelyet tovább növelve a tribológiai lokális viszonyok tovább számottevően nem változnak. Ennél vastagabb héj alkalmazása nem okoz javulást a tribológiai jellemzőkben, azonban növeli a darab tömegét és a nyomtatási időt, költséget.

A görgők felületi érdességét és mikroszkópos felületfotóit is értékeltem a tribológiai viselkedéssel való összefüggésük szempontjából, amely a kopás szempontjából alátámasztotta a mechanikai szimulációk eredményeinek alkalmazhatóságát.

A kutatási munkám során tapasztaltam, hogy a polimerek és kompozitok háromdimenziós nyomtatása, illetve tribológiájának területe még számos újdonságot és kiaknázatlan területet rejt magában.

7. PUBLIKÁCIÓK

1. **Dobos, J.**; Keresztes, R. Oldal, I.; 3D nyomtatott szendvicsszerkezetű görgők tribológiai hajtásvizsgálata, Mezőgazdasági Technika (megjelenés alatt, 2023)
2. Kári-Horváth, A. ; Pataki, T. I. ; **Dobos, J.** ; Szilágyi, N., Ultrahangos fémhegesztés bemutatása, Mezőgazdasági Technika 63 : 7 pp. 18-20., 3 p. (2022)
3. **Dobos J.**, Hanon M. M., Oldal I. (2021): Effect of infill density and pattern on the specific load capacity of FDM 3D-printed PLA multilayer sandwich. Journal of Polymer Engineering, De Gruyter. ISSN: 0334-6447, <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0223>, (2021)
4. H., Muammel M. ; **Dobos, J.** ; Zsidai, L., The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness, Procedia Manufacturing 54 pp. 244-249., 6 p. (2021)
5. Hanon M. M., **Dobos J.**, Zsidai L. (2021): The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness. 10th CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technologies (DET 2020), Budapest, Hungary, October 11–13, 2021. Published in: Procedia Manufacturing, Elsevier. 54, 244249. ISSN: 2351-9789
6. **Dobos J.**, Keresztes R.; Abrasive wear of filled polymer composites: A brief review. In: Magó, László; Kurják, Zoltán (szerk.) SYNERGY - Engineering, Agriculture and Green Industry Innovation : PAPERS of the VI. International Conference of CIGR Hungarian National Committee and the Szent István University, Faculty of Mechanical Engineering and the XXXIX. R&D Conference of Hungarian Academy of Sciences, Committee of Agricultural and Biosystems Engineering Gödöllő, Hungary, 4 – 6. November 2019 (Electronical issue). Gödöllő, Magyarország: Szent István University Faculty of Mechanical Engineering (2019) Paper: N6-4-212, 6 p.
7. Kiss, P ; Hajdú, J ; Máthé, L ; Dobos, J. ; Magó, L Vontatott mezőgazdasági járművek, munkagépek európai gyártóinak és piacának felmérése. Mezőgazdasági Technika, 59: 3 pp. 1-5., 5 p. (2018)
8. Pillinger, Gy. ; Máthé, L. ; **Dobos, J.** ; Kiss, P., Pressure regulation in pneumatic tractor tyres. Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development 17 pp. 91-97., 7 p. (2018)

9. Kiss, P. ; Hajdú, J. ; Máthé, L. ; **Dobos, J.** ; Magó, L.; Analysis of the towed agricultural machinery manufacturers in Europe, Hungarian Agricultural Engineering: 33 pp. 1-7., 7 p. (2018)
10. Kiss, P. ; Hajdú, J. ; Máthé, L. ; **Dobos, J.** ; Magó, L. Analysis of the towed agricultural machinery manufacturers in Europe, Hungarian Agricultural Engineering: 33 pp. 5-10., 6 p. (2018)