



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

VÁLTOZÓ ANYAGSZERKEZETŰ
3D NYOMTATOTT ELEMÉK
TRIBOMECHANIKÁJA

Doktori (PhD) értekezés

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

Témavezető(k): Dr. Keresztes Róbert Zsolt
egyetemi docens, PhD
MATE, Műszaki Intézet

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

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
.....
A témavezetők jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	6
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	8
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége	8
1.2. Célkitűzések	9
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	10
2.1. A háromdimenziós nyomtatás	10
2.1.1. 3D nyomtatás történeti áttekintése	10
2.1.2. Prototípus gyártási technológiák	11
2.2. Kis szériás alkatrészgyártás, mint 3D nyomtatás	12
2.2.1. 3D nyomtatás alapanyagok és rétegtékezési eljárások szerint	13
2.3. Additív gyártás, mint 3D nyomtatás technológiái:	14
2.3.1. Gyártás lapokból, tekercsből ívvel;	14
2.3.2. Additív gyártás porral	15
2.3.3. Additív gyártás folyadékkal	15
2.3.4. Anyagolvasztáson alapuló háromdimenziós nyomtatás	16
2.4. A 3D nyomtatás alkalmazása	17
2.5. Keresztmetszeti szerkezetoptimalás	20
Automatikus belső-szerkezetoptimalás	22
2.6. Tribológiai alapok	23
2.6.1. Súrlódás	25
2.6.2. Kopás	28
2.7. Tribológiai modellvizsgálatok	31
2.7.1. Kisméretű próbatest vizsgálatok; ikertárcsás berendezés	32
2.8. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	35
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	39
3.1. Mechanikai vizsgálatok	39
3.1.1. Vizsgálatok alapanyagai	39
3.1.2. Gyártó és Vizsgáló berendezések	42
3.1.3. A szakítószilárdság és rugalmassági modulus vizsgálati módszere	44
3.2. Hajlított szendvicsszerkezet virtuális modellvizsgálata	47
3.2.1. A vizsgálat 3D modellje és 2D megfelelője	47
3.2.2. Anyagjellemzők	48
3.2.3. Szimulációs vizsgálatok módszere	49

3.2.4. Peremfeltételek	50
3.3. Végeelem modellvizsgálatok gépelemre	50
3.3.1. A vizsgálat 3D modellje és 2D megfelelője	51
3.3.2. Anyagjellemzők.....	52
3.3.3. Szimulációs vizsgálatok módszere	52
3.3.4. Peremfeltételek	53
3.4. Tribológiai vizsgálatok.....	55
3.4.1. A vizsgált gépelemek paraméterei.....	55
3.4.2. Tribológiai hajtásvizsgálati berendezés.....	58
3.4.3. Felületi érdesség mérési módszere	59
3.4.4. Mikroszkopikus vizsgálatok.....	61
3.4.5. A vizsgálatok kiértékelése (Tribológiai mérések eredményei)	62
4. EREDMÉNYEK.....	63
4.1. Szakítószilárdsági vizsgálatok eredményei	63
4.2. Rugalmassági modulus vizsgálatok eredményei.....	66
4.3. A végeelem módszer mérési eredményei.....	68
4.3.1. Szimulációs hajlító vizsgálat eredmények kiértékelése	68
4.3.2. Szimulációs gépelem vizsgálat eredményeinek kiértékelése	73
4.4. Tribológiai vizsgálatok eredményei	76
4.4.1. Előzetes mérések	76
4.4.2. Héj vizsgálatok	77
4.5. Mikroszkopikus vizsgálatok eredményei	81
4.6. Felületi érdesség vizsgálatok eredményei.....	83
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	88
6. ÖSSZEFOGLALÁS	89
7. SUMMARY.....	90
8. MELLÉKLETEK	91
M1: Irodalomjegyzék.....	91
M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk.....	98
M3: Rugalmassági modulus vizsgálatok eredményei:	100
M4: Az ISO 527 szerint nyomtatott elemek tömegmérései:	114
M5: Szimulációs hajlítás során keletkezett feszültség és maximális erő értékek:	115
M6: Optimum függvények görbéi, polinomális trendvonalak:.....	119
M7: Szimulációs gépelem vizsgálatok eredményei:	121
M8: Tribológiai vizsgálatok eredményei:	125

M9: Mikroszkopikus vizsgálatok eredményei:	127
M10: Érdességmérési vizsgálatok eredményei:	133
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	140

JELÖLÉSJEGYZÉK

a_1, a_2, \dots, a_i	érintkezési felületek részegységei	[mm ²]
A_l	látszólagos érintkezési felület	[mm ²]
A_v	valós érintkezési felület	[mm ²]
b	érintkezési felület szélessége	[mm]
C	fajhő	[J/kgK]
d, D	kör átmérők	[mm]
E	rugalmassági modulus	[MPa]
E_t	egyenértékű rugalmassági modulus	[MPa]
F	terhelő erő	[N]
F_1	kezdeti vagy próbaterhelés	[N]
F_d	deformációs ellenállások	[N]
F_n	egymáson elcsúszó felületek merőleges erőhatása	[N]
F_{ny}	adhéziós nyírási ellenállások	[N]
F_{max}	maximális erő	[N]
F_s	súrlódási erő	[N]
h	ISO 178 próbatest vastagsága	[mm]
H	Rockwell keménység	[N/mm ²]
i	Térkitöltés/kitöltöttség	[%]
k, k_2	kopástényező	[-]
k_a	anyagoktól függő állandó	[-]
k_t	hővezetési tényező	[W/mK]
l	érintkezési hossz	[mm]
L	alátámasztási hossz	[mm]
l_1	szabványos próbatest szorító elem vastagsága	[mm]
l_2	szabványos próbatest hossza	[mm]
m_a	anyagállandó (értékük az anyagoktól függ)	[-]
n	fordulatszám	[1/perc]
t_1	szabványos próbatest vastagsága	[mm]
t_2	szabványos próbatest szorító elem vastagsága	[mm]
p	felületi nyomás	[N/mm ²]
R	egyenértékű görbületi sugár	[mm]
R_1, R_2	érintkező felületek görbületi sugarai	[mm]
R_a	átlagos felületi érdesség	[μm]
R_z	az egyenletlenség magasság	[μm]
R_q	simasági mérőszám	[μm]
s_g	görgő szélesség	[mm]
t	idő	[s]
v	belső szerkezet vastagsága	[mm]
v_k	külső héj vastagsága	[mm]
μ	súrlódási tényező	[-]
η	maximális kitöltési arány	[-]
ψ	a háromszögelés darabszáma	[-]

Jelölésjegyzék

ν_1, ν_2	anyagfüggő Poisson tényezők	[-]
φ	betöltési arány	[%]
Ω	valós modellezési arány	[%]
σ	számított feszültség	[MPa]
σ_1	számított redukált feszültség	[MPa]
σ'_{\max}	azonos keresztmetszetek szakítószilárdsága	[MPa]
σ_{\max}	maximális feszültség	[MPa]
σ_v	valós keresztmetszetre számított szakítószilárdság	[MPa]
κ	hődiffúziós tényező	[W/mK]
ρ	sűrűség	[kg/m ³]
τ	az érintkező anyagok nyírási ellenállása	[N/mm ²]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem első fejezetében a téma időszerűségét, jelentőségét, valamint a célkitűzéseimet mutatom be.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Az additív gyártás másnéven 3D nyomtatás napjaink egyik legdinamikusabban fejlődő gyártástechnológiája. A hagyományos (szubtraktív) gyártással szembeni előnyei mind a gyártási hatékonyságban mind a környezetterhelésben megmutatkoznak.

A téma aktualitását az adja, hogy a hagyományos értelemben vett tömeggyártást, ahol nagy darabszámú, de azonos termékek előállítása történt, sok területen fokozatosan felváltja az azonos terméktípuson belüli kisebb darabszámú, de eltérő egyedi igényeket kiszolgáló gyártmányok előállítása. Ezt a tendenciát egyértelműen mutatja a termékek használati idejének csökkenésén (típusváltások gyakoriságán) keresztül az FMS (rugalmas gyártó rendszerek) elterjedése és ebből kiindulva a CIM (Computer Integrated Manufacturing) - számítógéppel integrált gyártás térnyerése a közelmúltban. Ezt a fejlődési tendenciát az additív gyártás és közvetlen a 3D nyomtatás látszik leginkább támogatni. Ez az egységes alapanyagellátáson a szerszámfüggetlenségen és a CAxx (Computer Aided xx) számítógéppel támogatott rendszerekbe integrálhatóságon keresztül az intelligens gyártórendszerek irányába mutat. A fentiek alapján elmondható, hogy a nyomtatott termékek széles körű elterjedése rövid időn belül megvalósul. Az egyedi és változatos 3D geometriák kialakítása napjainkban már magas szinten megvalósítható a számos nyomtatási eljárásnak köszönhetően. Fontos megemlíteni, hogy az újdonságnak számító gyártási technológiában szükség van a várható meghibásodások feltárására. A használat közbeni tönkremenetel a terhelések függvényében még nem tisztázott, vagyis az anyag szerkezetében bekövetkezendő meghibásodások és a benne zajló kölcsönhatások nem ismertek. Napjainkban a jelentős számban homogén anyagból gyártott alkatrészekkel szemben, a 3D nyomtatással megvalósítható az anyagstruktúrában belüli inhomogenitás és az egyenszilárdságúra méretezés. Szerkezetileg módosíthatóak az anyag belső tulajdonságai, amely jól szabályozva növelheti a termék fajlagos teherbírását. A termékek igénybevételénél az anyagon belül nem egyenletes a terhelés eloszlás, ezért a kisebb terhelésű területeken lehetővé válik az anyag kitöltésének csökkentése.

1.2. Célkitűzések

Gyártási tapasztalataim alapján a termelési hatékonyság két kulcsfontosságú tényezőn múlik; a felhasznált alapanyag mennyisége és a ciklusidő. Ezen tényezők hatékonyabbá tétele a gyártás optimalizálásán túl, kedvező hatást gyakorol a költségekre és környezetterhelés hatásaira is.

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. A kész alkatrész esetében előny a kisebb tömeg, jobb anyagkihasználás.

Ismereteim alapján nem történt vizsgálat eltérő nyomtatási réteg párosítások alkalmazásával és azok mechanikai jellemzőkre gyakorolt hatására vonatkozólag. A különböző rugalmassági modulusok és réteg párosítások kombinációinak harmóniája vagy összeférhetlensége nincs tudományosan tisztázva. A nem megfelelő rétegek és mintázatok párosításából gyártott alkatrész, idő előtti tönkremenetelhez és egyéb felmerülő problémához vezethet.

Kutatásom főként különböző mintázatú rétegek optimális kialakításáról szól a rétegek kitöltöttségének és méretének változtatásával. Szimulációk alkalmazásával az eltérő nyomtatási mintázatok párosításának harmóniáját és optimum keresését kívánom szemléltetni. A várható eredmények szemléltetését, különböző kitöltöttség és nyomtatási mintázat alkalmazásával érem el.

Ezen célok eléréséhez a következő részfeladatokat tűzöm ki:

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

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az irodalomfeldolgozás célja főként a témát érintő nemzetközi és hazai szaklapok elemzése. Fontos tisztázni a technológia alapjait és további fejlesztési lehetőségeit. Ebben a fejezetben bemutatom a 3D nyomtatás születését és nemzetközi fejlődési pályáját, továbbá a kísérletekhez szükséges hazai tribológiai szakirodalmat. Az irodalom feldolgozást követően kiválasztom a kutatásnak megfelelő nyomtatási technológiát.

2.1. A háromdimenziós nyomtatás

2.1.1. 3D nyomtatás történeti áttekintése

A térbeli ábrázolás, mint domborzati térképek létrehozása már a 19 század előtt lenyűgözte a topográfia tudományát. Blather megoldása alapján a topográfiai szintvonalak vékony viaszlapokból kerültek kivágásra. A magassági szinteknek megfelelően a különböző rétegeket pozícionáltak és összeolvasztották így mind a pozitív mind a negatív oldalt előállították. Az oldalak elkészítését követően nedves papírlapot illesztettek közéjük és elkészült a dombornyomott térkép. Az elkövetkezendő évtizedekben a topográfiában és a fényképezési dombornyomásban már gyakran alkalmaztak kézzel készített háromdimenziós szemléltető tárgyakat. A hosszadalmas kézi procedúrák során merült fel az igény a folyamatok hatékonyságának javítására. A hetvenes években a tintasugaras nyomtató megjelenését követően többekben felmerült az ötlet, hogy az x és y tengelyek mentén kétdimenziós alakzat egy z tengelyirányú mélységgel háromdimenziós testet is ölthetne. 1979-ben Bogart egy kör alakú szobában helyezte el 24 kamerát egymástól egyenlő távolságra. Nagykontrasztú, túlexponált fotókat készített tárgyakról, amelyek sziluettjét irányonként 24 részre osztott hengerekre vetített. A kontúr túlanyag többletet eltávolítva jött létre a fotoszobrászat mint térbeli ábrázolás jelensége. Ezekben az években a rétegelt gyártási elv több kutató számára is a fejlesztés fókuszába került, már a mai sztereolitográfias módszer alapjaival. Munz berendezésében a dugattyú által mozgatott tárgyasztalra, fotoemulzió került betöltésre. A folyamat során a megfelelő keresztmetszetben rétegről rétegre jött létre az expozíció és a szilárdulás. A gyártás végén az átlátszó hengerből oldószeres marással szabadították ki a térbeli modellt. 1979-ben Nakagawa szintén rétegző technikát kezdte el alkalmazni vágó, prés és fröccsöntő szerszámok elkészítésére. Mindeközben a fotoemulziós rétegenkénti felépítéses eljárás folyamatosan fejlődött. Hivatalosan a 3D nyomtatás 1983-ban kezdődött Charles Hull találmányával. Hull az SLA (Stereolithography) magyarul sztereolitográfia technológiát fejlesztette ki, amely 1986-ban került szabadalmazásra. 1989-ben Scott Crump találmányával létrejött az FDM (Fused Deposition Modelling) szálolvasztásos módszer, amely szabadalmat 1992-ben hagytak jóvá. Az európai törekvéseknek köszönhetően Hans Langer nevéhez fűződik az 1989-ben szabadalmaztatott lézeres szintézis. Az 1976-os tintasugaras nyomtató megjelenését követően a korábban említett ötletelgetések és kutatások majdnem 20 évet vettek igénybe, hiszen 1995-ben az MIT-ben (Massachusetts Institute of Technology) látott napvilágot a „3D printing” (3D nyomtatás) kifejezés két PHD hallgató kutatásából. Jim Bredt és Tim

Anderson átalakítottak egy tintasugaras nyomtatót és a készülékkel térbeli alakzatokat hoztak létre, műanyagrétegek egymásra olvasztásával.

A 2000-es évek elejéig számos ipart szolgáló fejlesztés és teljesen új eljárás is megjelent. 2007-ben nyílt forráskódú, önreprodukáló 3D nyomtatók kerültek kivitelezésre, amelyek 2009 januárjára megjelentek a boltok kínálatában. 2012-ben szintén az üzletek polcaira kerültek a DLP technológiával ellátott nyomtatók és a sztereolitográfias eszközök. Az iparban jelenleg a HP Jet Fusion technológiája hódít, szériás gyártáshoz vagy otthoni felhasználásra azonban továbbra is az FDM technológia a legnépszerűbb [E. Matias 2015, Thompson, 2016,]. Minden szakirodalomban fellelt technológia legyen az por, folyadék vagy éppen lap gyártástechnológia a rétegződéses felépítésen alapszik. Tehát az additív gyártás során, háromdimenziós modell adatai alapján készülnek el a gyártmányok az alapanyagok egymásra rétegezésével. Manapság a technológia ott tart, hogy működő emberi szerveket gyártanak porcszövetből, csontszövetből, izomszövetből, továbbá hazánkban már nagy sikerrel alkalmazzák az additív technológiát a fogtechnika világában [Wong 2014, Foster, 2017, napidoktor.hu, 2022].

Ipari körökben az additív gyártás hivatalos szinonimája, a 3D nyomtatás.

2.1.2. Prototípus gyártási technológiák

A piaci szereplők versengése és a felgyorsult világ elvárásai miatt a korábban lineáris gyártmányfejlesztés módosult, lerövidült szimultán termékfejlesztéssé. A régebbi folyamatok összesűritése után a visszacsatolások struktúrája is megváltozott. Az azonnali szimultán tervezéshez szükség volt olyan technológiát találni, amellyel a tervezendő prototípusok és modellek minél gyorsabban gyárthatóvá válnak, akár egy vagy néhány darabos szériában. Ez az igyekvés hozta létre a gyors prototípuskészítést.

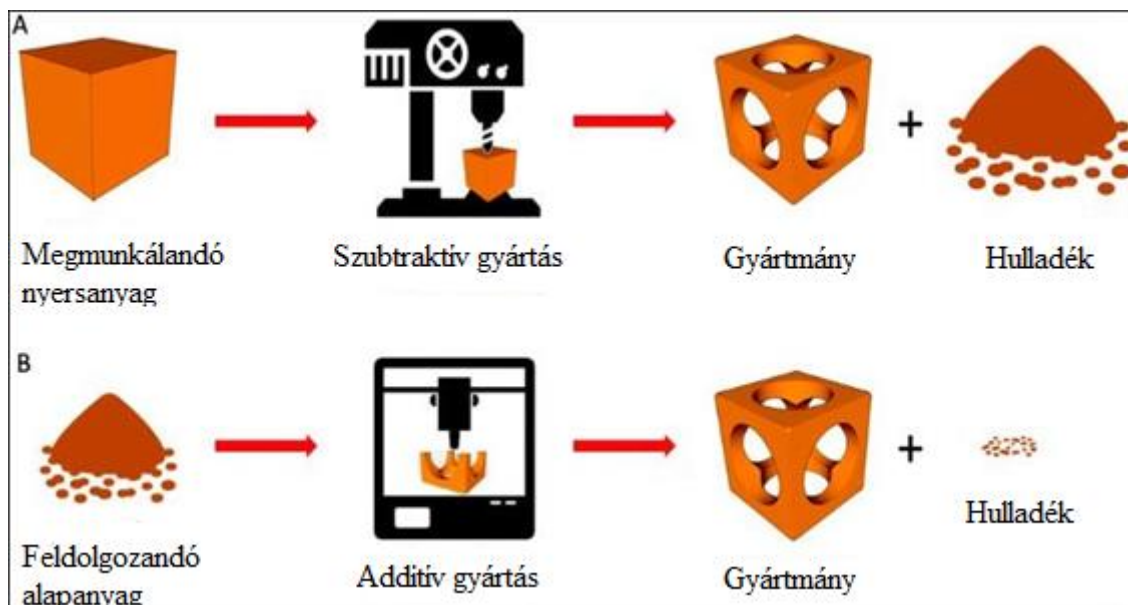
Hazánkban számos műanyaggyártó vállalatnál találunk 3D nyomtató készülékeket. Ezeket az additív (anyagépítésen működő) eszközöket leginkább prototípus készítésére, termékfejlesztésre használják a fröccsöntő üzemekben. Az első 3D nyomtatási technológiák megjelenésével (Rapid Prototyping, rövidítve RPT-nek) rapid prototípusgyártásnak nevezték el az eredetileg prototípusok gyors és költséghatékony előállítására kifejlesztett innovációt. Az RPT technológia rövid idő alatt állít elő alkatrészeket számítógépes adatokból, alkalmazásukkal jelentős szerszámozási költség és termelési idő takarítható meg [Dobos et al., 2022].

1, A szubtraktív technológiák

Főként acélokból forgácsolási eljárással készült alkatrészek, szerszámelemek rövid idő alatt előállíthatók. Korlátozó tényezője, hogy kizárólag olyan felületek alakíthatóak ki, melyek 3,4 vagy 5 tengelyes marással létrehozhatóak. A 2.1. ábrán megfigyelhető, hogy a megmunkált nyersanyagtömbből nagymennyiségű selejt válik le, amely környezetterhelése jelentős

2, Additív megoldások

Az anyagépítő eljárások közös jellemzője, hogy az alkatrészt rétegről rétegre építi föl egy határozatlan geometriájú anyagból (folyadék, olvadék vagy por), vagy egyszerű alakú testekből (huzal, fólia, síklap). Fő tulajdonságuk, hogy pontosan annyi anyagot használnak fel, ami a gyártmány előállításához szükséges. Ide tartozik a 3D nyomtatás, amelynek környezeti terhelése elhanyagolható a szubtraktív technológiákhoz képest. A 2.1. ábrán a szubtraktív és additív megoldások összehasonlítása kerül szemléltetésre.



2.1. ábra (A) Szubtraktív-és (B) additív gyártás összehasonlítása
forrás: [bitfab.io, 2021]

2.2. Kis szériás alkatrészgyártás, mint 3D nyomtatás

Napjainkra a műszaki fejlesztések iránya, módja és eszközei teljes mértékben megváltoztak. A gyártói fejlesztés egyik elengedhetetlen része lett a gyors szerszámkészítés (RPT – Rapid Tooling) és az azonnali prototípusgyártás (Rapid Prototyping). A 3D nyomtatás fejlődésének köszönhetően nem csak terméket állítanak elő egyedi és kis szériában, hanem akár szerszámot is. A prototípus, mint a termék első darabja, az ősminta, amelynek alapján a sorozatgyártás elindul, nagymértékben meghatározza a gyártmány sikerét, továbbá a gyártási eljárás, a technológiai eredményességét és termelékenységét is. [Kreemer et al., 2014]

A fejlesztők az alábbi mintákkal, modellekkel dolgoznak:

- Arányos modell: nem részletes, lényegében a külső forma arányait tükrözi
- Ergonómiai modell: fontos részleteket bemutat a kezelhetőség használhatóság érdekében
- Tervezési modell: külsőleg már teljesen megfelel a sorozatgyártásból kikerülő mintának, a modell célja, a vevő, gyártó beszállító véleménye
- Funkciós modell: lehetővé teszi a legfontosabb funkciók vizsgálatát (használati tulajdonságok, szerelhetőség, szervizmunka)
- Prototípus: a sorozatgyártásból származó első mintával majdnem teljes egészében megegyezik, emellett lehetővé teszi a gyártószerszám előállítását
- Minta: sorozatgyártásból származik: félüzemi- vagy nullszéria az elő- vagy főszorozat tipikus darabja, amely referenciaként szolgál a minőségbiztosításnak és elősegíti a gyártó személyzet képzését és a továbbfejlesztett termék minőségének, konstrukciójának finomítását.

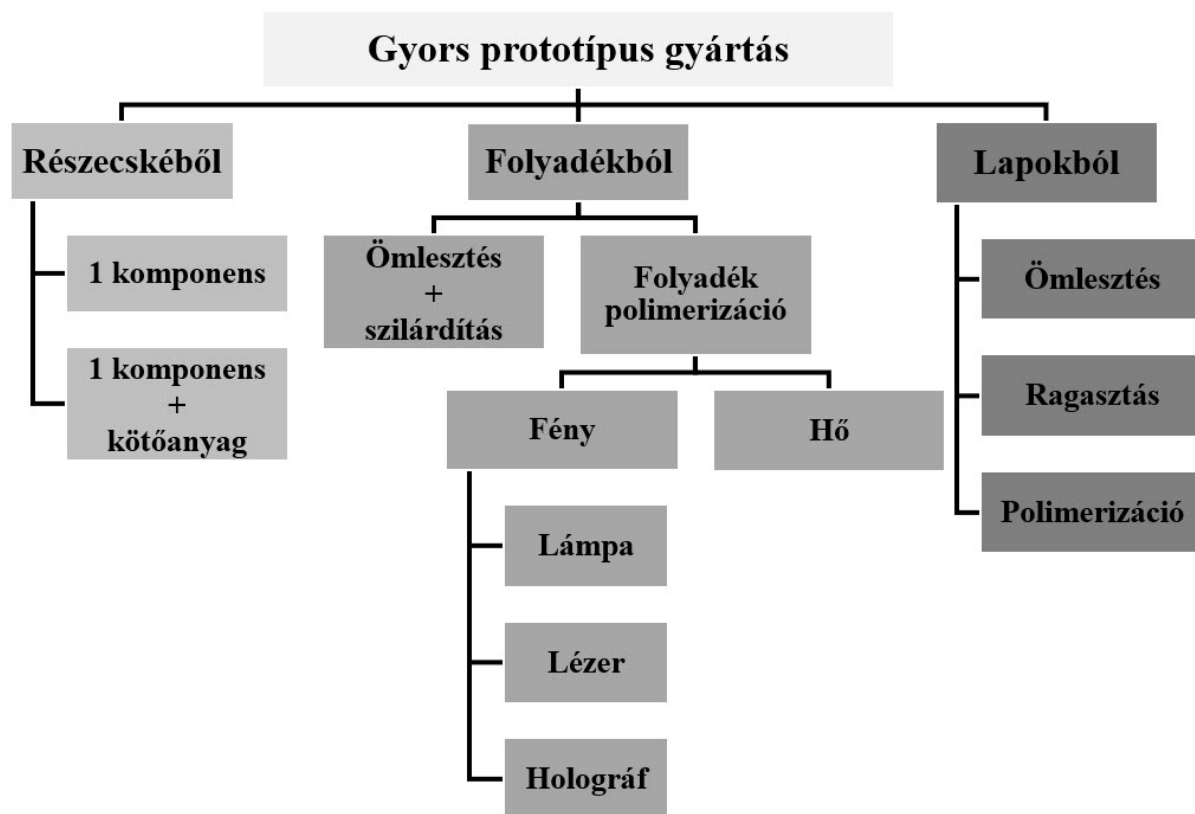
A modellek célja:

- megvalósíthatóság, gyárthatóság felmérése
- az alkatrész műszaki megtervezése, megalkotása
- működőképességének felmérése
- a termék felhasználói, piaci fogadtatásának előzetes értékelése

A felhasználási célnak megfelelően beszélhetünk szemléltető modellről, gyártást támogató modellről és funkcionális modellről [sculpteo.com, 2023].

2.2.1. 3D nyomtatás alapanyagok és rétegtépzési eljárások szerint

A gyors prototípus gyártás (RPT) közös jellemzője, hogy az elkészítendő alkatrészt valamilyen határozatlan geometriájú anyagból (folyadék, olvadék vagy por), vagy egyszerű alakú testekből (huzal, fólia, síklap) építik föl. A gyors prototípus gyártás egyszerűsített bemutatása a 2.2. ábrán látható.



2.2. ábra RPT csoportosítás alapanyagok szempontjából

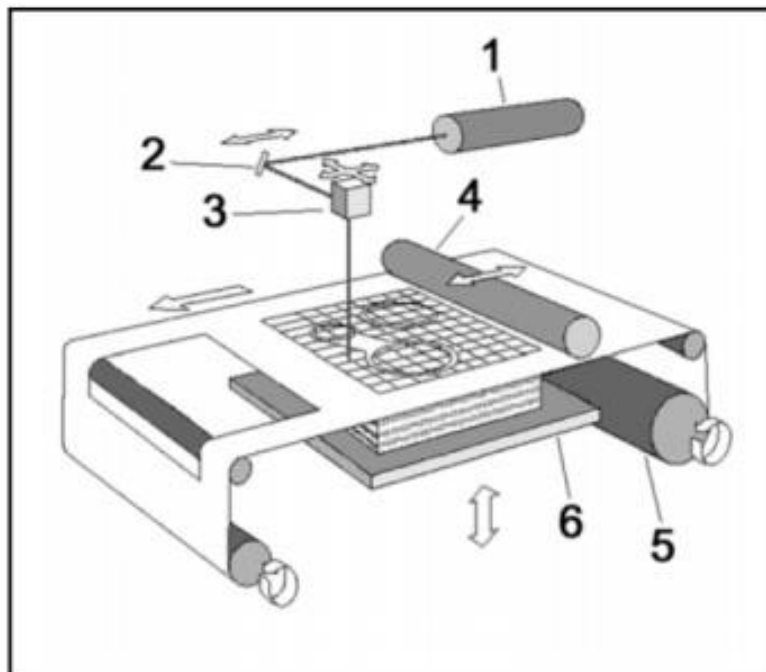
[Forrás: J. Q. Oberhauser, 2016]

A következő fejezetben az additív gyártás 3 fő csoportjából egy-egy példát fogok bemutatni.

2.3. Additív gyártás, mint 3D nyomtatás technológiái:

2.3.1. Gyártás lapokból, tekercsből ívvel;

Réteges kivágás és felépítés LOM (Laminated Object Manufacturing) berendezés fóliaszerű anyagból – ez általában papír, de lehet műanyag film vagy akár fémlemez – vágja ki és erősíti egymáshoz az egyes rétegeket. A modellépítéshez különféle anyagok használhatóak, azzal a feltétellel, hogy CO₂ lézersugárral vágható legyen. A papírnak az a felülete, amely az előtte elkészített rétegre épül, ragasztóval kerül bevonásra, amit egy fűtött henger aktivizál. Ezután az új rétegre a lézersugár belevágja az aktuális külső és belső kontúrt, amit a számítógépes modellt előállító CAD rendszer hozott létre. A fennmaradó anyag eltávolítását az segíti, hogy a papírnak a darab térfogatán kívül eső részét a lézer rács-szerkezetre szeleteli. Miután a lézersugár elvégezte a réteghez tartozó vágási munkákat, a munkaasztal lesüllyed (-“z” irányba), újabb réteg papír vasalódik az előzőre, majd az asztal visszatér az eredeti helyére és kezdetét veszi a következő réteg kialakítása. A lézerrel bekockázott rész könnyen eltávolítható, és így megkapjuk a „papírhasáb” terméket. Az alakadás eljárásnak hátránya, hogy a kapott termék funkcionális prototípusnak vagy inkább csak formatervezést megjelenítő mintának tekinthető [Feygin et al., 1991, Háber 2015]. Régi, manapság ritkán alkalmazott technológia, amelyet csupán szemléltetésképpen mutatok be a 2.3. ábrán. A legnagyobb előnye, hogy gyakorlatilag a cellulóz és ragasztóanyag kombinációjával tulajdonképpen fa alkatrészek születtek melyeket előszeretettel használtak a restaurátorok. Az erős fa struktúrát adó alkatrészek könnyen megmunkálható, festhető tulajdonsággal rendelkeztek melyek alkalmazásával például múzeumok pótolták a sérült vagy hiányzó modell alkatrészeket, kiállítási eszközöket.

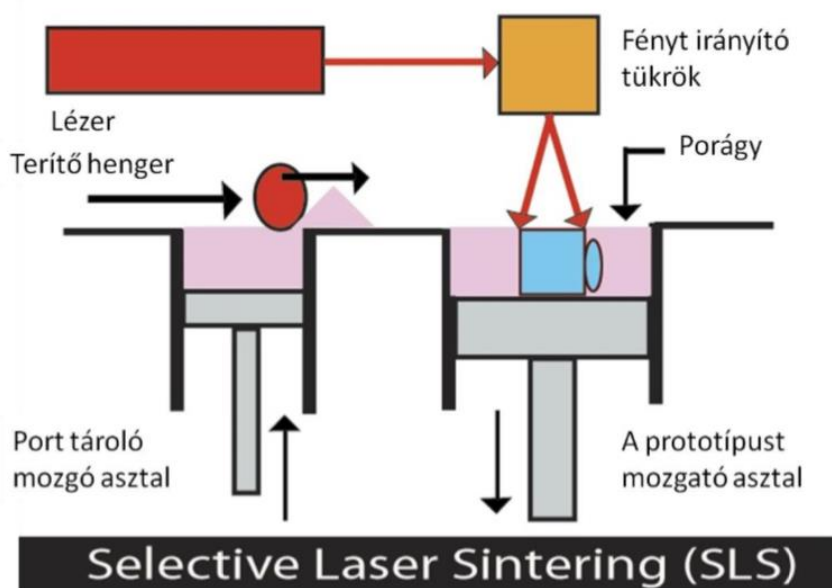


2.3. ábra A LOM berendezés elvi vázlatja; 1-CO₂ lézer, 2-optika, 3-x-y pozícionálás, 4-vasalóhenger, 5- papír, 6- munkaasztal, [Háber, 2015]

2.3.2. *Additív gyártás porral*

A porral történő gyártás porágyban vagy porkijuttatással (lézersugaras fémlerakással) lehetséges. A porágyas gyártás történhet elektronsugaras megkötéssel, ragasztóanyaggal, továbbá lézeres megkötéssel. Utóbbi, mint szelektív lézer szinterezés (továbbiakban SLS) kerül ebben az alfejezetben bemutatásra. Az SLS technológia (2.4. ábra) gyakorlatilag bármilyen por formában lévő anyag felhasználására képes, amely lézer hatására megolvad, majd a fény és hőforrás megszűnése után megszilárdul. A felhasználható anyagok skálája nagyon széles: műanyagok, homok, szilikát, gipsz fémporok és kerámiaszerű anyagok. Az előre elterített porrészecskék lézerefény hatására egymással, és az alattuk lévő réteggel is összeolvadnak.

Egy réteg elkészülését követően a gép felhordja a következő porréteget, melyen egyidejűleg tömöríti is azt, majd a lézer újra átpásztazza azt, ez ismétlődik a darab elkészültéig [Tuan, 2018].



2.4. ábra Az SLS technológia bemutatása

[3dprintingfromscratch.com, 2022]

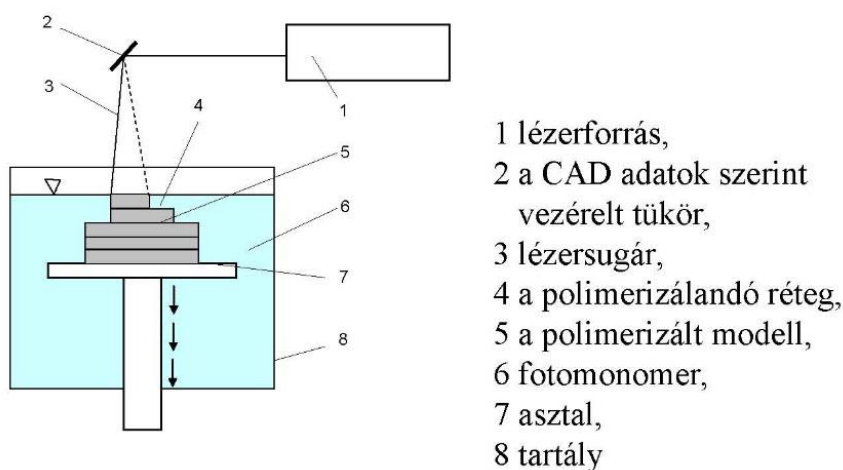
A fel nem használt por a folyamat végén eltávolítandó és újra felhasználható. Az SLS technológia további előnye, hogy a nyomtatás folyamán a munkadarab állandóan porral van körülvéve, amely a támasztóanyag funkcióját is betölti. Minél magasabb olvadáspontú anyag kerül felhasználásra, annál költségesebb az előállított test. Legelterjedtebben felhasznált anyag a poliamid, ami relatív alacsony olvadásponttal, rossz hővezető képességgel és jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. A nyomtatás finomságát nemcsak a lézerefény átmérője, hanem a felhasznált por anyaga is meghatározza. Alacsony olvadáspontú és hővezető képességű anyaggal biztosítható a nagy felbontású nyomtatás. A szomszédos részecskék nagy hőmérsékleten való megolvadásának és összetapadásának nagy előnye, hogy a kész modell a fröccsöntött darabokhoz hasonló mechanikai tulajdonságokkal fog rendelkezni [3dprintingfromscratch.com, 2022].

2.3.3. *Additív gyártás folyadékkal*

Fotopolimeres eljárások leggyakrabban alkalmazott módszere a sztereolitográfia (továbbiakban SLA). A technológia működési elvét a 2.5. ábra szemlélteti, az SLA rövidítés a Stereolithography szóból ered.

Ezzel az eljárással olyan polimer alkatrészek állíthatóak elő, amik közelíthetik a sorozatérett termék anyagának a tulajdonságát. Geometriailag teljesen azonos, továbbá olyan geometria is kialakítható, amely forgácsolással vagy fröccsöntéssel lehetetlen. A fotopolimeres eljárások működési elve azon alapszik, hogy UV- fény, gamma-foton, elektron-nyaláb vagy lézer sugárzás alkalmazásával polimerizálódik az anyag. A használt sugarak ugyanolyan hatású a polimerizációs láncreakciókra képes monomerekre vagy oligomerekre, mint a kémiai iniciátor: a kétfunkciós monomer (oligomer)-rendszereket láncpolimerré alakítani, a legalább háromfunkciós monomereket és oligomereket pedig térhálósítja. Az adott sugárzás csak a kezdő lépéshez szükséges, az iniciáláshoz, a többi lépést a beinduló láncreakció végzi el, így kisebb energiával lehet a polimerizációt elvégezni. [real.mtak.hu, 2022].

Sztereolitgráfia (SLA)



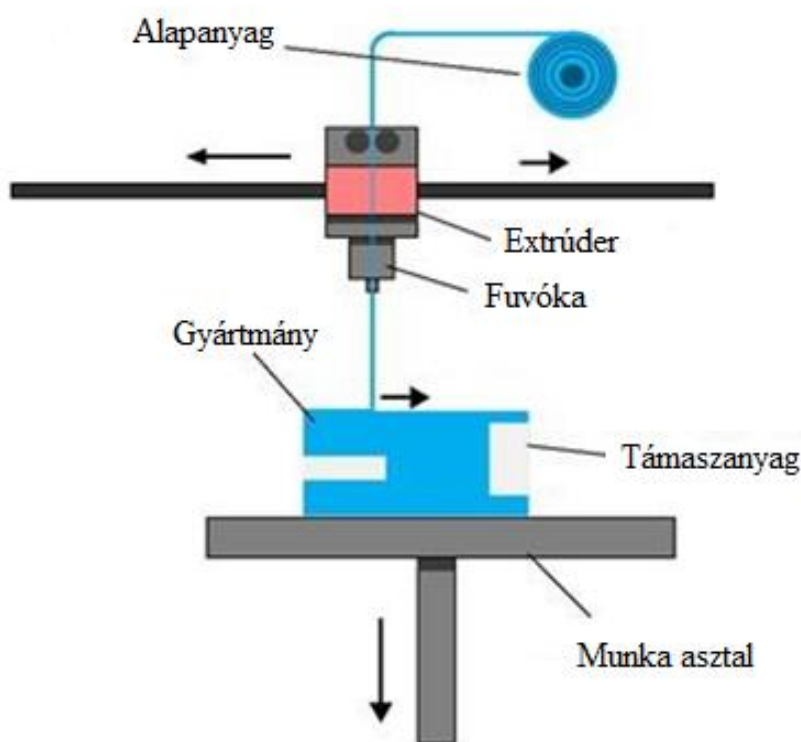
2.5. ábra SLA működési elvi vázlata, forrás; [real.mtak.hu, 2022]

A technológia működésének alapja, hogy adott fotopolimer folyadékot tálcára terítenek egy réteg vastagságban, majd a lézer, elektron nyaláb vagy UV- fény segítségével az adott réteg geometriája kialakul. A sugárzás hatására a folyadék megszilárdul és így készül el az első réteg. Ezek után a tálca egy réteget süllyed, majd a fotopolimer előtti (vagy egy terítő elem elosztatja) a megszilárdult felületet, és a lézer újra megrajzolja a következő réteget. Ez a rétegződéses folyamat addig tart, amíg a számítógépben a feldarabolt modell rétegei el nem fogynak. Az elkészült a darabot követően a tálca kiemelkedik a folyadékból a kész termékkel, amit ezután UV-kemencébe helyeznek, hogy az esetleg meg nem szilárdult elemek is megkössenek. Szárítás után megcsiszolják, hogy a rétegekből adódó durva részek eltűnjenek. Egy réteg akár 0,06 milliméter is lehet. [Szykiedans et al, 2016]

2.3.4. Anyagolvasztáson alapuló háromdimenziós nyomtatás

Az FDM (Fused Deposition Method) ömledékes rétegzés az egyetlen olyan 3D nyomtatási technológia, amely hőre lágyuló műanyag felhasználásával készíti el a kívánt modellt. A nyomtatott anyagok jó mechanikai, kiváló termikus és kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek. A termoplasztikus anyagot egy fogaskerékkal ellátott motor segítségével az extruderfejen vezetik át, amely az anyagot a lágyulási hőmérséklete fölé hevíti, ezáltal az ki tud áramolni egy

fűvókán (2.12. ábra). A fűvóka átmérője határozza meg a rétegek szélességét, amely 0,2-0,8 mm között lehet. Miután a hevített anyag kijut a fűvókából gyorsan lehűl és megszilárdul. A megolvadt anyag magas viszkozitása és gyors kihűlése következtében, támaszanyag használata nem minden esetben indokolt. A szilárdulási idő ventilátorok alkalmazásával csökkenthető. A ventilátorok további előnye, hogy megfelelő hűtés következtében a támaszanyag alkalmazásának szükségessége csökken. A 2.6. ábrán látható technológiánál egyszerre több extruderfej is használható, amellyel különféle színű darab is előállítható, illetve a támaszanyag külön extrudálható. A támaszanyag kétféle lehet, ami felhasznált termoplasztikus anyagból készült és később mechanikus eltávolítást igényel. Készülhet azonban vízdoldható műanyagból is, melyet a nyomtatás elkészültével könnyen eltávolítható. Rétegvastagsága 100-300 mikron közé esik [Kun és mtsai, 2015, 3dmt.com, 2009].



2.6. ábra FDM nyomtatás elvi működése [3dmt.com, 2019]

Kutatásaim, méréseim lebonyolításához ezt a világon legismertebb és legelterjedtebb anyagolvasztásos (FDM) nyomtatási eljárást választottam.

2.4. A 3D nyomtatás alkalmazása

Az additív technológia létjogosultsága egyértelmű mind a környezetterhelés mind a megmunkálást érintő előnyei kapcsán a hagyományos (szubtraktív) forgácsolással szemben [Dobos et al., 2022]. Fontosabb előnyeit kiemelve, elmondható, hogy minimális az anyagvesztés (forgács) és a szerszámzársi költség [Durgun 2014], a gyártógép kialakítása egyszerűsödik (kisebb merevség). [Baz 2020, Tuan et al., 2018] szinte nem léteznek geometriai

korlátok, az egységes (por, huzal, gyanta) alapanyag kezelés egyszerűbb és könnyebben integrálható a korszerű gyártási rendszerekbe [Attaran et al., 2017]. Fő azonban hátránya a technológia újszerűségéből ered, hiszen sok még az ismeretlen terület [Hanon et al., 2021]. Bizonytalanságok főként a 3D nyomtatás anyagszerkezetre gyakorolt hatásában jelentkeznek és mindez megbízhatósági kérdéseket vet fel. [Torres et al., 2015]. Mindez a Taguchi megközelítés szerinti optimalizálásból [Patel et al., 2012, Liu 2017] és a Fuzzy következtetéssel kombinált felszíni módszertanból [Peng et al., 2014] valamint a továbbfejlesztett evolutionary számítási megközelítésből is kiderül [Vijayaraghavan, et al., 2015]. Az FDM technológia legmeghatározóbb paraméterei, amelyek befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat; a nyomtatási szálak közötti távolság [Hanon et al., 2019] szálak közötti légrés [Vijayaraghavan 2015], a nyomtatás orientációja [Dave 2019], továbbá a kitöltöttségi százalék [Baich et al., 2015] és a rétegvastagság [Alaimo et al. 2017]. Mindezek mellett az olvadt anyag lerakódásának iránya is hatást gyakorol a gyártmány tulajdonságaira továbbá a nyomtatott szálak szöge és iránya [Fatimatuzahraa et al., 2011] leginkább az anizotropikus tulajdonságokat befolyásolja a létrehozott alkatrészekben [Zieman 2012]. A varianciaanalízis (ANOVA) vizsgálat célja, hogy mely további paraméterek befolyásolják jelentősen a mechanikai szilárdságot és minőségi jellemzőt [Ebel 2017]. A légrések és a kitöltések befolyásolják a kontakt zóna nagyságát, ezek meghatározzák a kötési szilárdságot és ezáltal a mechanikai tulajdonságot [Alvarez, 2016]. A huzal kötések kontextusában jelentős szerepe van a hőmérsékletnek mind az adagoló fej mind a munkaasztal hőmérsékletét illetően [Fernandez-Vicente et al., 2016]. Az Acrylnitril butadiene styrol (továbbiakban ABS) szakítószilárdság javításához a rétegvastagságot és a raszter szélességet kell növelnünk [Onwubolu et al., 2014]. Megegyező következtetés volt [Li et al., 2018] kutatásaiban is, összpontosítva e két paraméterre, továbbá a termelési költségre gyakorolt hatást is vizsgálva [Szykiedans 2016]. Lubomo és munkatársai azt bizonyították PLA esetében, hogy a rétegvastagság nincs jelentős hatással a gyártmány kifáradására [Lubomo, et al., 2018]. Szintén ezt állítják a következő irodalmakban ABS [Wu et al., 2015] és a PLA [Torres et al., 2018] alapanyagnál majd Polyether ether ketone (továbbiakban PEEK) anyagot vizsgálva [Hernandez et al. 2016, Xiaoyong et al., 2017]. Ezen tanulmányok alapján elmondható, hogy felhasznált alapanyagok típusától, gyártmányától és minőségétől is nagymértékben függ, milyen nyomtatási beállításokat alkalmazhatunk a legjobb teherbírás elérésére [Deng 2018]. A mechanikai tulajdonságok vizsgálatának legfontosabb szegmense az orientációs vizsgálat [Dave 2019]. Ugyanazon eredményeket különböző kutatások igazolják, hogy a 0/90 fokos orientáció hasonló tulajdonságokkal bír, mint a 45/-45 fokos orientációs beállítás az ABS anyag szakítószilárdságának vizsgálata esetén [Fatimatuzahraa 2011] ugyanez a konklúzió 0 fokos raszter-szög esetében, szintén ABS anyagokhoz [Tymrak 2014]. A folyamatparaméterek függetlenségének megértésére (az anyagi és mechanikai viselkedés szempontjából) fontos körültekintően elmélyülni minden megállapításba, hogy a gyártott alkatrészek tudják-e biztosítani a specifikus elvárásokat az alkalmazás során. Különböző polimereket vizsgálva is hasonló kulcsparamétereket találunk, amelyek befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat. Figyelemre méltó azonban raszterek és rétegek elhelyezkedésének hatása a terhelhetőségi tulajdonságokra [Torrado, 2016]. Az anyagoptimalizálás további fontos kérdése a belső töltöttség mintázatának megválasztása. Adam kísérleteiben a concentric minta 100 százalékos kitöltöttségben mutatta a legnagyobb szakítószilárdsági eredményt, kevesebb, mint 3%-os eltéréssel egy normál ABS fröccsöntött alapanyaghoz képest. Ugyanazon az anyag kitöltésen, alapanyag fogyasztás tekintetében a Honeycomb mintázat bizonyult kiemelkedőnek [Adam 2015].

A kitöltési mintázat befolyása a szakítószilárdság és a merevség értékére legfőképpen 20 és 50 százalékos tartományban észlelhető. Az anyag extrudálási pályák sokrétűsége és a különböző mintázatú rétegek közötti kötési zónák keletkezése eredményezi a rugalmassági modulusok szignifikáns eltérését [Auricchio, 2017]. Tekintettel a különböző vizsgálati szabványokra, anyagokra és anyaggyártókra, a gyártó eszközök hatalmas választékára, nem egyszerű a folyamatok optimalizálása [Takács, 2004]. A mechanikai paraméterek komplex befolyását és az együttes hatását nézve fontos figyelembe venni a gyártási feltételeket és alkalmazhatóságokat [Rankouhi, 2016, Lechter, 2015]. Ezeket az eredményeket gondosan és körültekintően kell alkalmazni specifikus tanulmányokra, összehasonlítási kritériumok létrehozására [Srinivasan, 2020]. Professzionális 3D nyomtatók és alacsony költségű nyomtatók egyaránt megtalálhatóak az eddig vizsgált irodalmakban. Mindemellett a különböző polimerek, eltérő szeletelő programok és mechanikai paraméterek adottságából lehetetlen megkísérelni, általánosítani a kritériumokat vagy a szükséges nyomtatási alapbeállításokat [Peng et al., 2014].

A következőkben részletesebben kitérnék a kutatásomhoz legközelebb álló tanulmányok eredményeire.

P. Zur és társai elsősorban egy statikus hajlítási igénybevételt modelleztek végeelem analízissel majd a valós körülmények között hajlítással vizsgálták az analízis hitelességét. A cikk eredményei alapján a statikus hajlítás végeelemes ellenőrzése nagyon hasonló eredményeket mutat a valós hajlítási vizsgálathoz képest (az eredmények különbségének értéke mindössze 1,7%) [P.Zur et al., 2019]. A maximális igénybevétel 125 N terhelésnél 59,37 MPa volt. A kritikus helyen történő alak optimalizálás után azonos terhelésnél az igénybevétel csupán 14,37 MPa volt. Ezt követően Honeycomb 25%-os mintázattal csökkentették az anyagfelhasználást. A feszültségeloszlás kedvező alakulását tapasztalták anyagoptimalás után.

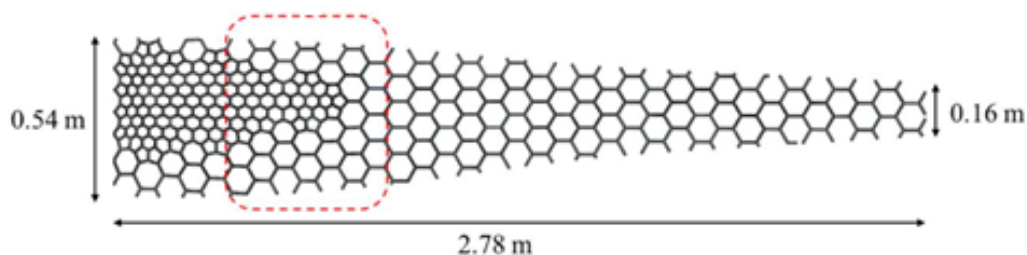
	100% – előtt	100%(45°) – után	Honeycomb (25%) – után
Kitöltöttség	Optimalizálás	Optimalizálás	Optimalizálás
Gyártási idő	68 perc	95 perc	83 perc
Tömeg	22,37 g	36,79 g	18,24 g
Anyagköltség	0,47 €	0,77 €	0,38 €

2.1. táblázat Alak és szerkezet optimalizálás [P.Zur et al., 2019].

Az alak és szerkezet optimalizálása lehetővé tette a vizsgált alkatrész alapanyag-felhasználásának 75,8%-kal való csökkentését. A különböző töltőmintázat és csökkentett kitöltés lehetővé tette a nyomtatott elem tömegének 50%-ra történő redukálását (a teljes kitöltöttséghez képest). A 2.1-es táblázatban látható a felhasznált idő és alapanyag továbbá a költségek kedvező alakulása az anyagoptimalizálásnak köszönhetően [Kolodziej et al., 2019]. Napjainkban már lehetséges 3D nyomtatással műtéti műszereket is előállítani [Wong et al., 2014]. Teherhordó szerkezeteket úgy terveznek, hogy azon a helyen erősebbek legyenek, ahol a legnagyobb igénybevételről beszélünk. A nyomtatási tájolást úgy választják meg például, hogy a kritikus struktúrák nyomtatási rétege ne keresztirányban helyezkedjen el a hajlító igénybevételekhez képest [Rybachuk et al., 2017]. Honeycomb és Grid mintákat vizsgálva szintén azokat a következtetéseket vonták le, hogy a kitöltöttség növelése pozitív hatással van a rugalmassági modulusra és a terhelhetőségre. Az orientációs vizsgálat kimutatta, hogy 45 fokos szálirány erősebb alkatrészt eredményez, mint a 90 fokos orientáció.

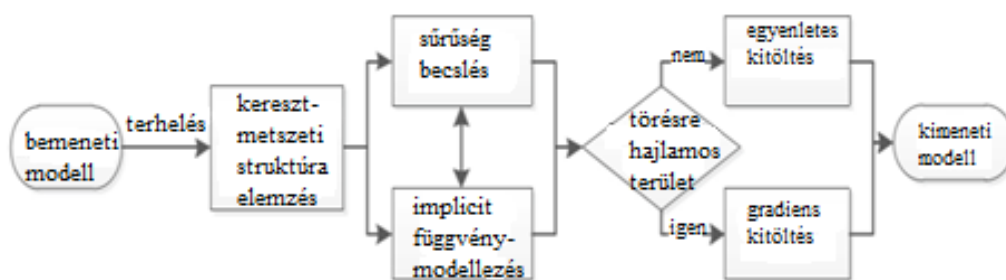
A kitöltési minták szintén befolyásolják a próbadarab erősségét. A 25%-os Honeycomb kitöltés szinte ugyanolyan rugalmassági értékeket és maximális terhelhetőséget adott, mint az 50%-os Grid kitöltés. A kitöltöttség szintén hatással van a lehajlás értékére ezeknél a mintázatoknál is [Górski, 2015].

2.5. Keresztmetszeti szerkezetoptimalás



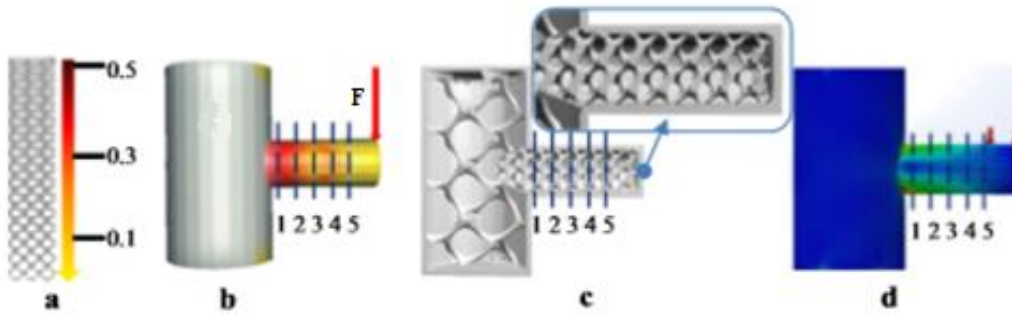
2.7. ábra A kitöltési minta méhsejt struktúrájára [Lindahl et al., 2018]

Lindahl és munkatársai szerint először keresztmetszeti igénybevételi elemzést kell végezni a repedésekre hajlamos területek azonosítására méhsejt szerkezeteken is. Az optimalizálást követően (2.7. ábra) üreges héjszerkezetek létrehozásával a gyártmányt több részre osztják, majd ezt követően kitöltöttség eloszlás szabályozással belső porózus szerkezetet alakítanak ki. [Lindahl et al., 2018]. Folyamatos vizsgálat során az a tapasztalat, hogy a konzolszerkezet minőségének optimalizálása (miközben megőrzi a modell külső morfológiáját és szabályozza a keresztmetszeti kitöltési területet) hatékony módja annak, hogy lényegesen csökkentsük az alapanyag-fogyasztást. A módszer általános sémáját a 2.8. ábra szemlélteti [Dai N. et al., 2015].



2.8. ábra Keresztmetszeti igénybevételi elemzés [Dai N. et al., 2015]

Erővel terhelt konzolszerkezeti modell tervezésnél, először a feszültségeloszlást szükséges tisztázni (2.9.a, ábra), amely meghatározza a helyi irányított töltéseloszlást. Mindezek után a feltöltött modell végeelem-szimulációja következik a maximális feszültség szempontjából (2.9.b, ábra). A következő ábrán látható a fokozatos kitöltés modellje, a kritikus helyeken a feszültség eloszlása, a belső kitöltés gradiációs struktúrája (2.9.c, ábra), és a végeelem analízissel modellezett struktúra (2.9.d, ábra) eredmények [Kantaros et al., 2015].



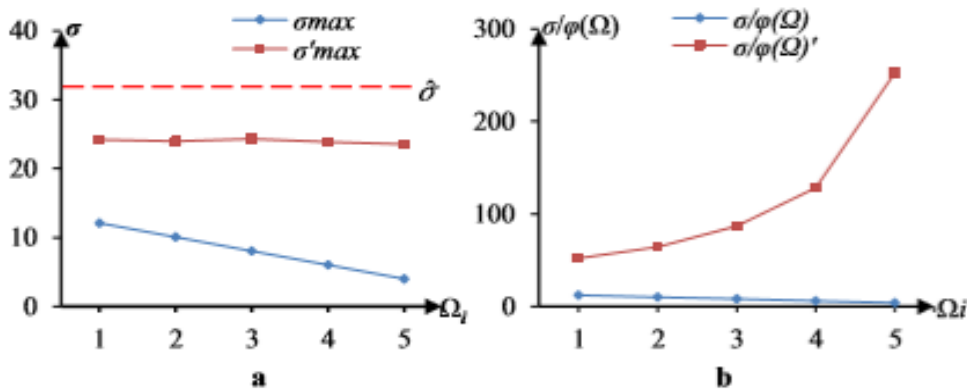
2.9. ábra Alkalmazott kitöltési beállítások és a feszültségek intenzitása [Kantaros et al., 2015]

A végelem analízist követően (2.9.d, ábra) öt egységes szakaszt (1–5) választanak ki. Az öt szakasz elméleti betöltési arányát $\varphi(\Omega)$ és a valós modellezési arányának $\varphi(\Omega)'$ eredményei az 2.2. táblázatban láthatóak. A gyártmány megfelelő keresztmetszeteinek σ'_{max} maximális feszültségét rögzítik. Kiszámítják a szilárd (100% -os töltésű) modell igénybevételét, és rögzítik a táblázatban szereplő azonos keresztmetszetek maximális σ_{max} értékét. A 2.2. táblázat mutatja, hogy az elméleti arány és a tényleges töltési arány közötti különbség kevesebb, mint 1% [Kantaros et al., 2015, Alaimo G., 2017].

Keresztmetszet	1	2	3	4	5
$\varphi(\Omega) \%$	46,60	37,28	27,96	18,64	9,32
$\varphi(\Omega)' \%$	47,04	37,63	27,22	18,18	9,43
σ_{max} [MPa]	12,11	10,08	8,05	6,03	4,01
σ'_{max} [MPa]	24,21	23,96	24,32	23,89	23,54

2.2. táblázat Elméleti és tényleges töltési arány különbözősége [Alaimo G et al., 2015]

Ezt megállapítást [Tianyun et al., 2020] is igazolta, amelyet a 2.10. a, ábrán láthatunk. Az anyagmennyiség jelentősen csökkenthető, ha a biztonságos igénybevételi szint fenntartása mellett meghatározzák a $\eta = \sigma / \varphi(\Omega)$ értéket. A tanulmány szerint a maximális feszültséghez tartozó betöltési aránnyal érhetjük el az optimális anyagfelhasználást (2.10. b, ábra).



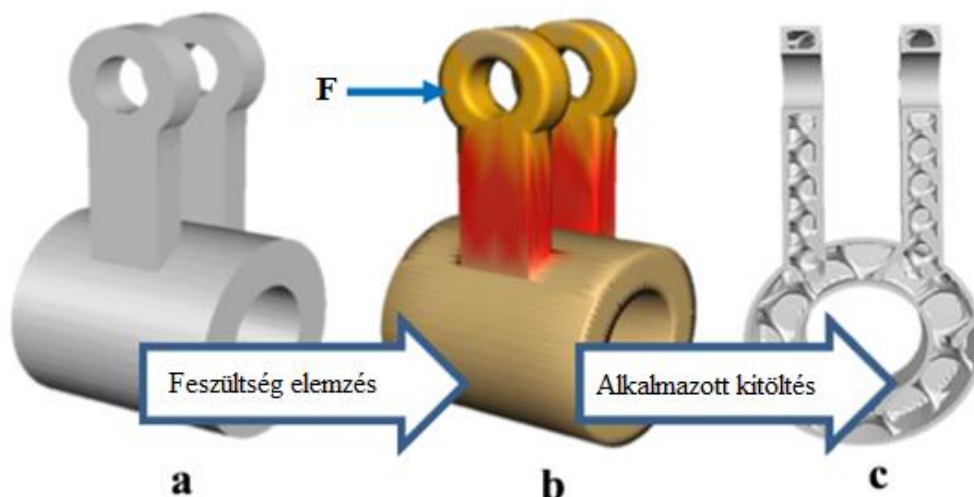
2.10. ábra A különböző szakaszok maximális terhelése és a különböző keresztmetszet maximális terhelési-töltési aránya [Tianyun et al., 2020]

A módszer validálására több eltérő függvényű modellen történt további kísérlet során is ugyanezeket az eredményeket kapták. A fent leírtak alapján elmondható, hogy ezt a modellezési módszertant javasolják a 3D nyomtatott alkatrészek strukturálisan gyenge területeinek javítására. Ezzel optimalizálják a nyomtatás modelljének szerkezetét, minimálisra csökkentve az anyaghasználatot, növelve a teherbírást. Végül további számos eredményt mutatnak be modellezési módszerük hatékonyságára. Munkájuk során más tulajdonságokat is vizsgáltak, például a további igénybevételeket és a tömegközéppontot [Kantaros et al., 2015]. Ryan Schmidt és munkatársai olyan keresztmetszeti szerkezeti elemzési technikát javasolnak, amely hatékonyan ismeri fel a kritikus igénybevételt egy 3D gyártmányon belül. Ellentétben a hagyományos megközelítésekkel, amelyek a végeelem-módszereken (továbbiakban VEM) alapulnak, ez a vizsgálat nem igényel térfogati hálót vagy lineáris egyenletrendszerek megoldását, és lehetővé teszi az interaktív elemzést [Schmidt et al., 2010]. Schmidt kutatásait tovább mélyítve felfedezte, hogy gyakoriak a degenerált és „vékony” háromszögek CAD hálóelemek alkalmazása során, de nem befolyásolják számításokat. Ellentétben a VEM-mel, ezt a módszert a felszíni háló minősége nem befolyásolta [Singh et al., 2013]. További 3D nyomtatással készítették több, az ábrákon bemutatott modellt, és próbaterheléseket alkalmaztak az igénybevételek felderítésére. Megfigyelték azonban, hogy azokat a veszélyes keresztmetszetű helyeket (ahol a gyártmányok törnek) a kísérleti algoritmusok sikeresen azonosították. A keresztmetszeti struktúra analízis, amely valós idejű visszacsatolást nyújt a 3D alkatzat szerkesztéséhez, kiválóan alkalmas modell-optimalizálására. Az algoritmusok egészen részletes hálógig kiterjeszthetők. Továbbá a modell nyomtatási irányának meghatározásával és befolyásolásával növelhetjük a szerkezeti szilárdságot [Dai N. et al., 2016].

Automatikus belső-szerkezetoptimalálás

Stava és munkatársai kifejlesztettek egy automatikus szerkezet-felderítési és javítási rendszert, amely a végeelem módszeren (VEM-en) alapul. A rendszer belső furatokat és helyi megerősítéseket generál. Az említett belső szerkezeti módosításokat úgy alkalmazza, hogy miközben a külső geometrián nem változtat, erősíti a teherbírást [Stava et al., 2012]. Peng és munkatársai létrehoztak egy módszert a legjobb kitöltési feltételek megállapítására és a leggyengébb részek azonosításra [Peng et al., 2014]. Mindazonáltal a VEM időigényes 3D hálós generálást és nagy lineáris rendszerek megoldásait foglalja magában. A korábbi tapasztalatok miatt elkerülték a VEM bonyolultságát és egy keresztmetszeti szerkezet-elemzést terveztek a konzolszerkezetek szilárdságának optimalizálására a gyártmányok nyomtatási orientációjának szabályozásával [Jiang et al., 2016]. Stava módszere is hasonló azonban csak egy bizonyos irányban optimalizálhatja az ilyen struktúrákat, és nem tudja figyelembe venni a modell minden részét. Tovább bonyolítja a megoldás kivitelezését, amikor az egyik alkatrész több konzolszerkezeti elemet tartalmaz [Stava et al., 2012]. Az ideális belső feltöltésű szerkezet javítja a gyártmány erősségét, a kulcs a héjszerkezet kialakításában van [Hossain, 2013]. Azonban, ha honeycomb struktúrát alkalmaznak a nyomtatandó tárgy belsejének fokozatos „faragásával” úgy, hogy a tömörített üreges cellák nem kapcsolódnak egymáshoz különös jelenséghez vezet. Mindez megnehezíti az oldható támaszanyagok eltávolítását olyan esetekben, amikor a sztereolitográfiai módszert vagy por alapú 3D nyomtatást alkalmaznak [Motaparti, 2016]. A modell minden szerkezeti részének szívósságának elérése érdekében, különösen a konzolszerkezetnél, Hossain és munkatársai is javasolják a mechanikai modellezési módszeren alapuló belső szerkezetoptimalálást. Ezzel erősítik a szerkezeti szilárdságot, miközben csökkentik az alapanyag felhasználást.

Az innovációs ötlet az, hogy kiszámítanak egy folyamatos kitöltés-eloszlást, amely felismeri a gyártmányban keletkező feszültségeket és egy üreges héjszerkezetet generál az alkalmas helyeken [Hossain et al., 2020]. A 2.11. ábrán szemléltetett módszer magában foglalja a kitöltés eloszlások átalakítását, fokozatosan változó belső porózus szerkezetekre. A javasolt módszer alkalmazását a konzolos szerkezeti részek másodrendű nyomatékának szabályozásával, majd a belső töltőszerkezet optimalizálásával mutatják be [Hossain et al., 2020, Huang et al., 2020].



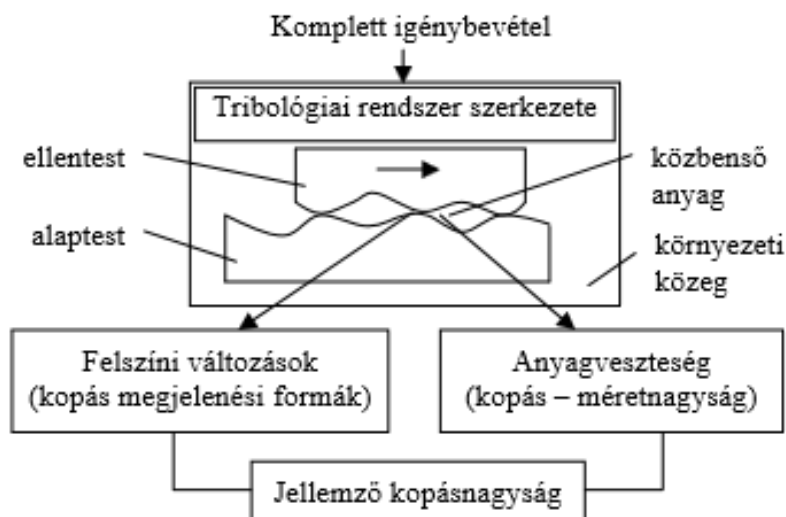
2.11. ábra a) vizsgált alkatrész b) helyi feszültség-eloszlás és c) belső kitöltöttség-eloszlás eredmény [Hossain et al., 2020]

2.6. Tribológiai alapok

A tribológia tudománya a felületek relatív mozgásával foglalkozik, súrlódás, anyagkopás, kaparás vagy dörzsölés. A tribológia a különböző, egymáshoz képest elmozduló és érintkező felületek viselkedését és mozgási viszonyait kutató tudományág [cnc.hu, 2019]. A szabad szemmel simának tűnő felületek mikroszkóp alatt vizsgálva általában érdekesek. Amikor két felületet egymáshoz nyomunk, a tényleges/valós érintkezési felület eltér a látszólagos (geometriai) érintkezési felülettől, mivel a felületek csak az ún. kapcsolódási pontok. Mivel a kopás és a súrlódás legtöbb hatása kedvezőtlen, mint például a teljesítménycsökkenés vagy mechanikai meghibásodás, ezért kritikus gazdasági jelentőségű [Yamaguchi 1990, Briscoe és Sinha, 2002]. A súrlódás számos előnnyel jár, többek között a jármű és az út közötti érintkezés, valamint a gumiabroncs és az út közötti kölcsönhatás. A súrlódás megértése után az első lépés a súrlódás kreatív tervezéssel történő minimalizálása, alacsony súrlódású anyagok összehangolásával, továbbá megfelelő kenőzsírok és olajok használatával. A tribológia tudományának fejlődésével merült fel az igény, hogy a súrlódás és kopás csökkentésén keresztül ériék el a szerkezetek megbízhatóságának és élettartamának növekedését [Briscoe és Sinha, 2013]. A kölcsönhatásban lévő gépelemek az érintkező felületükön erőt adnak át. Amennyiben az erő átadásakor az elemek egymáshoz képest nyugalomban vannak, azonban kialakul az érintkező felületekkel párhuzamos erő összetevő is, az elmozdulást a két test között ébredő nyugalmi súrlódás akadályozza meg. Abban az esetben, ha a terhelt felületek egymáson elmozdulnak mozgó súrlódás ébred, ami melegeledést továbbá energia veszteséget okoz. A súrlódás és kopás rendkívül bonyolult folyamat, amelyekre hatást gyakorol pl. az érintkező testek felületének minősége, szerkezet mozgásvizonyai, terhelése, sebessége, hőleadás

körülményei, a környező közeg tulajdonságai, hőmérséklete, szennyezettsége [Wieleba 2002]. Az elemi tribológiai rendszer szemléltetése a 2.12. ábrán látható.

A súrlódásból eredő igénybevétel koptatja a felületeket, ami hatást gyakorol a szerkezet működőképességére, korlátozza teherbírását és élettartamát. A kopás és a súrlódás nem tekinthető két anyagpár jellemzőjének. Azok minden esetben az adott körülmények között üzemelő súrlódó szerkezethez tartoznak, amelyet az anyagpáron kívül meghatároznak egyéb paraméterek is.



2.12. ábra Elemi tribológiai rendszer [Valasek és mtsai., 2002]

A felületek degradációja eredményeként részecskék válnak le. A részecskeleválás a harmadik-test belső forrását képezi. Szennyező- illetve a súrlódási folyamatot módosító korábban levált részecskék is kerülhetnek a súrlódó felületek közé. A harmadik-testnek nevezett „idegen” részecskék egy része kiléphetnek a felületek közül. A részecskék visszaépülésének eredményeként a kopásnyom részben visszatöltődik, azonban eltér az elméleti geometriájú alaktól. Bizonyos részecskék kopadék formájában végleg elhagyják a környezetet, ez jelenti a súrlódási rendszer kopását. Száraz súrlódásnál kialakul egy állandósult állapot, amely Berthier kutatásai szerint erre az állandósult állapotra jellemző:

- a kopás mechanizmusát a - third-body flow - harmadik-test folyamat,
- a súrlódási tényezőt a harmadik-test viselkedési és képződési mechanizmusa, reológiája határozza meg.

Berthier [2001] a harmadik test belső forrásainak nevezi az első testek azon felületeit, ahonnan a részecskék leválnak. Godet [1984] megnevezése szerint ezek a tápláló zónák. Ezen területek hőtani, feszültségi és más egyéb szempontból is közreműködnek a harmadik test kialakításában. Mindezek mellett a részecskeleválás folyamata többféle lehet, ezért fontos a működési mechanizmusok ismerete. A letöredezett részecskék alakjuk, szerkezetük, méretük továbbá mechanikai jellemzőik szempontjából jelentős változásokon mennek keresztül. Felismerték, hogy a letöredezett részecskék méretük és alakjuk szempontjából, valamint szerkezetük és ezzel összefüggésben mechanikai jellemzőik szempontjából is jelentős változásokon mennek keresztül [Linck, 2003]. A polimerek számos tribológiai előnnyel rendelkeznek, többek között alacsony súrlódási együtthatót, önkenő képességet, lúgokkal és savakkal szembeni kémiai ellenállást és alacsony zajkibocsátást [Matthews és Holmberg, 2009].

A polimereknek másrésztől van néhány hátrányuk, mint például a viszkoelasztikus és kúszó viselkedés, a gyenge kopásállóság. A fémekhez képest alacsonyabb rugalmassági és szilárdsági modulus, az alacsony határhőmérséklet (300°C alatti, ami megkönnyíti a lágyulást, olvadást, oxidációt és termikus romlást), továbbá a nagyon alacsony hővezető képesség (a súrlódási hő elvezetése gyenge). Ennek eredményeként az egykomponensű polimerek gyakran gyengék külső igénybevétel hatására, és nem felelnek meg a tribológiai szabványok többségének. A polimerek azonban kompozit és hibrid formában ma már megfelelnek az egyes alkalmazások teljesítménykövetelményeinek, és tribológiai szempontból gyakran felülmúlják a hagyományos anyagokat, például a fémeket és a kerámiákat. A polimerek különböző kémiai szerkezete, a polimer természetéből adódóan (hőre lágyuló, hőre keményedő vagy elasztomer), befolyásolja a súrlódást és a kopást. A PTFE (politetrafluoretilén) például jól ismert arról, hogy képes olyan átvezető filmet (transzfer filmet, réteget) létrehozni, amely kenőanyagként keni az érintkezést, és jelentősen csökkenti a súrlódást. Más polimerek, pl. az UHDPE (ultra nagy sűrűségű polietilén) anyagok ezzel szemben nem képeznek átadó réteget csúszás közben, és ennek következtében a súrlódás lényegesen nagyobb [Tabor, 1992].

2.6.1. *Súrlódás*

A súrlódás két test közös érintkezési felületén jön létre, amely elmozdulást vagy mozgást gátló hatás.

A súrlódás lehet;

- a mozgásállapot szerint mozgó és nyugvó súrlódás,
- a mozgásforma szerint csúszó és gördülő súrlódás,
- a megjelenés helye szerint belső és külső súrlódás,
- a kenés szerint határ, száraz, vegyes és folyadék súrlódás.

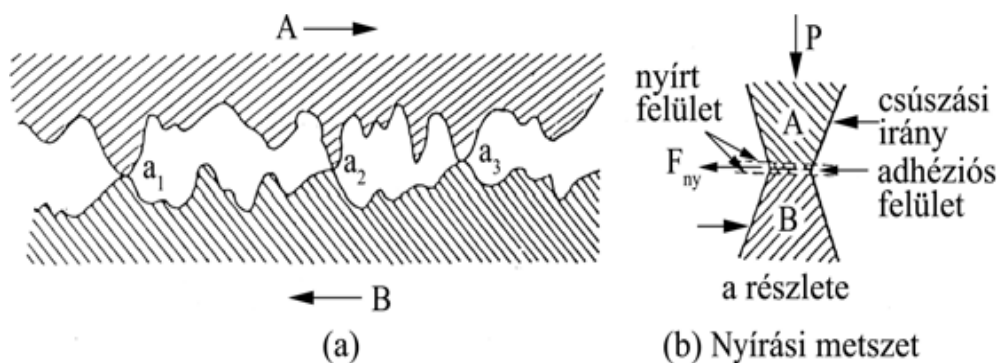
A belső súrlódás hőmérséklet emelkedéssel, hőfejlődéssel jár, továbbá áramló közegben vagy maradó alakváltozást szenvedő szilárd testekben alakul ki. Abban az esetben van jelentősége a belső súrlódásnak, ha a kenőanyag teljesen elválasztja az érintkező testeket egymástól és a súrlódás a két test közötti kenőanyagfilmben folyamatos kenésnél alakul ki.

A külső súrlódás azonban anyagvesztéssel, kopást okoz a felületeken. A mozgó súrlódás elmozdulás közben fejt ki az ellenállást és a kialakuló kölcsönhatások eredményeként jön létre; hőfejlődéssel, energiavesztéssel jár. Azt az ellenállást, amely megakadályozza az egymáson való elmozdulásokat nyugalmi súrlódásnak nevezzük. A kopás és súrlódás nagysága között nincs szigorú összefüggés, egyik nagyságából nem tudunk a másikra következtetni. Az viszont tény, hogy a kopás mindig a súrlódás miatt alakul ki. A műszaki gyakorlatban a külső súrlódás jelentősége a legnagyobb, melynek kialakulását és törvényszerűségeit rendkívül nagymértékben befolyásolja a szilárd testek érintkezésének jellege, az érintkezési felületükön kialakult felszíni rétegek és bevonatok szerkezete, azok geometriai, fizikai és kémiai tulajdonságai [Kozma, 2001]. Az első súrlódással kapcsolatos törvények feltárása Leonardo da Vinci nevéhez köthető, aki felismerte, hogy a terhelőerő és a súrlódási erő között összefüggés van [Bhushan, 2002]. A külső súrlódási ellenállás nagyságát első megfogalmazásban Dowson írta le, amely összefüggés még ma is igen jól használható.

Az ismert Coulomb-féle súrlódási törvény: $F_s = \mu * F_n$ Vagyis a súrlódási erő (F_s) arányos az egymáson elcsúszó felületekre merőleges erőhatással (F_n) és az arányossági együttható a súrlódási tényező (μ) [Dowson 2003].

Száraz csúszó súrlódás

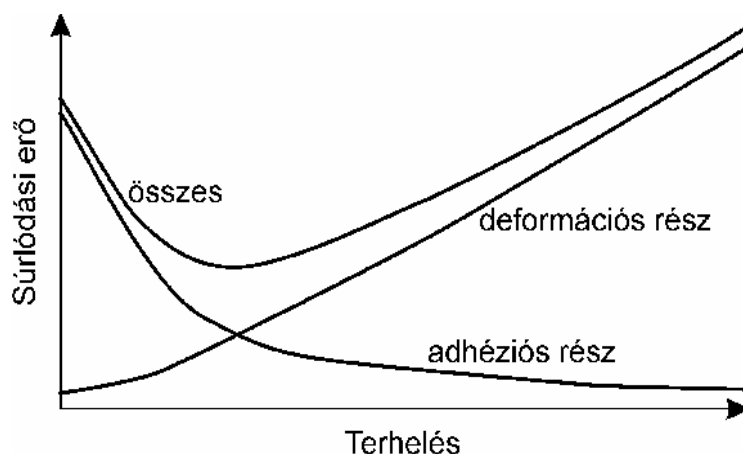
A csúszás utáni mozgásállapot jelensége a csúszó súrlódás. A csúszó súrlódás elméletének magyarázata a következő.



2.13. ábra Makroszkópikus metszet a csúszó érintkező felületekről [Yamaguchi 1990]

A 2.13. ábrán feltűnő, hogy a látszólagos érintkezési felület A_1 lényegesen nagyobb, mint a valós érintkezési felület; $A = \sum a_i$. A normál terhelés hatására alakulnak ki az $(a_1, a_2 \dots a_i)$ apró felületek, és összegükből adódik a valós érintkezési felület. Ezeken az apró érintkezési felületeken kialakult kapcsolatok elnyíródnak így az A és B testek egymáson elmozdulnak. Az adhéziós kapcsolatok nyírószilárdsága mellett a benyomódott érdességsúcsok ellenállását is legyőzi a felülettel párhuzamos erőhatás, azaz a két test egymáson elmozdul. Az elmozdulás során mozgó súrlódás alakul ki, a súrlódási erőt pedig a deformációs hatás és az adhéziós kapcsolatok által kifejtett ellenállás hozza létre. Az érintkezési felületen fellépő mozgási ellenállás, azaz a súrlódási ellenállás (F_s) az adhéziós nyírási ellenállások (F_{ny}) és a deformációs ellenállások (F_d) összegéből tevődik össze [Yamaguchi 1990].

Kis terhelésnél a súrlódást főként adhézió okozza, mivel az érdességi csúcsok alakváltozása rugalmas, benyomódásuk az ellenfelületbe jelentéktelen. A terhelés intenzitásával azonban barázda keresztmetszet és a tényleges érintkezési felület nő így a deformációs összetevő részaránya erősen növekszik. A két összetevő aránya a 2.14. ábrán kerül szemléltetésre.



2.14. ábra A súrlódási erő összetevőinek változása a terhelés függvényében [Kozma, 2007]

Polimerek súrlódása

A tömbi anyagként alkalmazott polimerek reológiai szempontból kompozit anyagoknak tekinthetők, szerkezetük részben vagy egészben molekuláris és legfeljebb csak kis részben lehet kristályos, nincsenek sem csúszósíkjaik, sem diszlokációik, amelyek a fémek alakváltozását lehetővé teszik. A felületük termodinamikai állapota messze nem mondható egyensúlyinak, a felületi energiájuk jóval nagyobb, mint a tömbi anyagé, ugyanakkor még mindig sokkal kisebb, mint a fémeké. A tribológiai igénybevétel hatására a polimerek felülete nagyobb alakváltozást szenved, mint a fémeké. A felületet alkotó makromolekulák alakváltozása, elmozdulása változó jellegű lehet az elfordulástól a szögelhajláson keresztül a teljes molekula áthelyeződéséig, ill. szétválásáig, de ez az alakváltozás idővel reverzibilis is lehet [Garbassi et al., 1997]. A súrlódási energia eltérő módon oszlik el a polimerekben mind az érintkezési tartományban és az anyag tömegében [Briscoe és Tabor, 1978]. Ennek eredményeként az energia két zónában oszlik el: a határfelületi zónában és a felszín alatti úgynevezett kohéziós zónában. Ennek következtében az adhézió által létrejött súrlódási erő megegyezik a határfelületi zóna valós érintkezési területének és a felszín alatti zóna nyírófeszültségének eredőjével [Tromborg et al., 2014]. A külső súrlódásnak van nagyobb szerepe a mérnöki gyakorlatban. Ez a szilárd testek között az érintkező felületeken kialakuló kölcsönhatások eredménye, ami, ha megakadályozza egymáson való elmozdulásukat nyugvó, ha elmozdulás közben ellenállást fejt ki, akkor mozgó súrlódás. Ez energiaveszteséggel jár, továbbá hőfejlődés is kialakul, ezen felül anyagvesztés is megfigyelhető. Az anyagvesztés a kopás. Ez mindig a súrlódás miatt, a súrlódás közben keletkező igénybevételek hatására alakul ki. Ennek ellenére nem hozható szigorú összefüggésbe a súrlódás és a kopás jelensége, nem szabad egyikből a másikra következtetni [Kozma, 2001, Keresztes, 2009].

Gördülő súrlódás

Forgástest alakú gépelemek között fellépő gördülő súrlódás általában nagyságrendekkel kisebb, mint a szilárd testek között kialakuló száraz súrlódás. A felszín alatti anyagrétegekben keletkező belső súrlódási veszteségek, az érintkezés felületeken kialakuló relatív csúszások okozta súrlódás együttesen akadályozzák a gördülő súrlódást [Anton van Beek, 2006]. A gördülő súrlódást végeelem modellezéssel Kráçalík és munkatársai vizsgálták [Kráçalík et al., 2016]. A kerék/sín kísérletet és az ikertárcsás vizsgálatokat kétdimenziós végeelem modellekkel írják le. Mindkét modellben ugyanaz a maximális érintkezési nyomás és csúszás került alkalmazásra. Az érintkezés felülete jelentősen eltér, ezért a feszültségek egy minden korábbinál eltérő skálán alakulnak ki.

Az ikertárcsás vizsgálat 2D-s végeelemes érintkezési modellje (ikertárcsás modell) két egymással érintkező és forgó tárcsát szimulál [Nathan et al., 2021]. Kráçalík kutatásában a repedés három szimulált hossza 0,2, 0,4 és 0,6 mm. A gördülési távolság a tárcsa kezdeti érintkezésétől a repedésig 11,75 mm. A tárcsák átmérője 47 mm, vastagsága 10 mm. A repedésfelületek közötti érintkezésben, valamint a korongok közötti érintkezésben, Abaqus alapértelmezett merevséget és 0,5 Coulomb-súrlódási együtthatót használó érintkezési formulát használtak. A kereket reprezentáló felső tárcsát lineárisan rugalmas anyagviselkedéssel modellezik. Az alsó tárcsa rugalmas-plasztikus anyagparamétereket használ, kinematikus és izotróp keményedési modellel. A rugalmas és a rugalmas-plasztikus anyagmodellhez ugyanazok az anyagtulajdonságok lettek figyelembe véve [Kráçalík et al., 2016].

Gyakorlatilag észszerű, használható repedéshosszúságok jelennek meg az ikertárcsás vizsgálatokban és a teljes méretű kerék/sín kísérletekben plasztikusan deformált zónában [Paul et al., 2021]. A gördülő súrlódást elszenvedő testeken történő érintkezés és súrlódás során a mechanikai energia hőenergiává és alakváltozási energiává alakul, amely hőmérséklet növekedést eredményez. Az energiaátadás helye nehezen azonosítható be, legtöbbször nem határozható meg pontosan [Bhushan et al., 2000]. Egyes kutatók szerint az érintkezési felület néhány felső atomsíkjában atomi méretekben keletkezik [Landman et al., 1993]. Egy másik megállapítás azonban azt jelenti ki, hogy a legtöbb energiaátadás a rugalmas deformációs érintkezési folyamat során keletkezik. [Rigney, 1979]. Kennedy szerint a testek felső 5 μm rétegében történik az energiaátadás minimum 95%-a [Kennedy, 1982].

2.6.2. *Kopás*

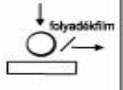




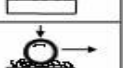



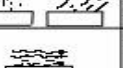
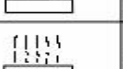
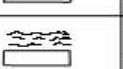
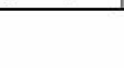
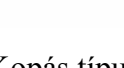
A kopás a test működési felületének fokozatos anyagvesztése, amely a felületen végzett relatív mozgás eredményeként következik be. [Yamaguchi, 1990]. A lassú anyagleválás megengedhető károsodási folyamat, amely csak hosszabb (előre tervezett) idő alatt okoz a felületeken olyan mértékű alakváltozást, amely már működési zavarokat eredményez. A súrlódással ellentétben, amely energiát eredményez, a kopás anyagvesztést eredményez [Cirino és mtsai., 1988]. Mechanikai feszültségeket, kémiai reakciókat és hőmérsékletváltozásokat okoznak a felületi rétegben. A polimerek (különösen a hőre lágyuló műanyagok) azon képessége, hogy csúszás közben transzferfilmeket képeznek acél ellenfelületeken, fontos tribológiai jelenség [Myshkin et al., 2009]. A transzferfilm és a polimer között nyírás lép fel. A PTFE és a HDPE anyagok képesek vékony (transzferfilmek) képzésére, rendkívül alacsony súrlódási együtthatóval. Fontos megemlíteni, hogy a súrlódáshoz hasonlóan a polimer típusa (amorf, félkristályos, elasztomer) befolyásolja a kopás tulajdonságait [Myshkin et al., 2018]. A karcolások, bemaródások, összehegedések, azaz gyorsan kialakuló felületi károsodások olyan mértékű felületi változásokat idéznek elő, amelyek rövid idő alatt működésképtelenséget okoznak. Ezért ezek a károsodások továbbá a felszíni kifáradás nem tekinthetőek normális kopási folyamatnak. Utóbbi szintén azért, mert a rövid idő alatt kialakuló kráterek, kitöredezések azonnali működési zavarokat okoznak. A kopás nagysága nagymértékben befolyásolja a súrlódó szerkezetek működését, ezért annak egyértelmű meghatározása elengedhetetlen. [Váradí 1997]. Az anyagvesztés általában a leváló anyag tömegével vagy térfogatával jellemezhető azonban a súrlódó szerkezet működése szempontjából fontosabb a lineáris kopás, amelyet az elemek méretének megváltozása határoz meg. A kopás anyagvesztés, amelyet rendszerint a leváló anyag tömegével vagy térfogatával jellemeznek, bár a súrlódó szerkezet működése szempontjából fontosabb a lineáris kopás, amelyet az elemek méretének megváltozása határoz meg [Gustafsson 2013].

Gyakran a kopás nagyságát a súrlódó rendszer valamely jellemzőjére: terhelésre, súrlódási útjára, futás idejére, anyag kibocsátására vonatkoztatják. A polimerek kopásának három fő mechanizmusa; tapadás, a kopás és a fáradás [Bahadur, 2000]. A kopási mechanizmus azonban ettől jóval összetettebb; beleértve az eróziós, az átviteli, tribokémiai, a súrlódási, továbbá delaminációs folyamatokat. [Briscoe, 2002]. A probléma abból a tényből ered, hogy ezek a különböző mechanizmusok gyakran összefonódnak, ami megnehezíti a különbségek megállapítását az egyes károsodások között. Ezeknek a kopásformáknak az elkülönítésére több osztályozás is kidolgozásra került az évek során.

A gyakorlat azonban azt diktálta, hogy a kopásformákat a részecske leválást okozó folyamatok alapján különítsék el, ennek megfelelően definiált; [Kalácska, 1997]:

- abráziós kopás,
- adhéziós kopás,
- fáradásos kopás,
- oxidációs kopás,
- súrlódási korrózió (fretting),
- eróziós kopás.

A műanyagok fontos kopás típusait és azok folyamatait a 2.3. táblázat mutatja be.

Rendszer- struktúra	Tribológiai igénybevétel		Kopás	Hatásmechanizmusok (egyszerű vagy összetett)				
		ábra		adhézió	abrázió	kifáradás	tribokémiai reakciók	
szilárd test- folyadékfilm- szilárd test	csúszás gördülés ütközés		—			X	+	
szilárd test- szilárd test (száraz-, határ- és vegyes súrlódás)	csúszás		csúszó- súrlódásból	X	+	+	X	
	gördülés		gördülő súrlódásból	+	+	X	+	
	rezgés		vegyes	X	X	X	X	
	ütközés		eróziós abráziós	+	+	X	+	
szilárd test- szemcsék	csúszás (csúszva gördülve)		abráziós		X		+	
szilárd test- szilárd test és szemcsék	csúszás		vegyes	+	X	X	+	
	gördülés			+	X	X	+	
	ütközés			+	+	X	+	
szilárd test- szemcsék- folyadék	áramlás		hidroabráziós	erózió	+	X	X	+
szilárd test- szemcsék (gáz)	áramlás		részecske- erózió		+	X	X	+
	áramlás ütközés		részecske erózió		+	X	X	+
szilárd test- folyadék	áramlás rezgés		kavitációs erózió				X	+
	ütközés		csepperózió				X	+
	áramlás		folyadék- erózió				+	X
szilárd test- gáz	áramlás		gázerózió					X

X elsődleges hatás
+ további lehetséges hatás

2.3. táblázat Kopás típusai [Beitz - Küttner, 1994]

Az adhéziós kopás a száraz kopás legelterjedtebb formája, akkor következik be, amikor a polimer egy eltérő felületen csúszik, és az érintkezési felületek között tapadó kötések alakulnak ki. Az érintkező felületek súrlódása miatt fizikai-kémiai hatások keletkeznek továbbá feszültségek alakulnak ki az érintkező elemek szilárdságának eltéréséből. Mindezek következtében az érdességcsúcsok érintkezési felületein lévő kémiai kapcsolatok felbomlanak és anyagrészek kerülnek az ellenfelületre. Az ismételt csúzás során a polimer felülete és az ellenfelület között nyomás keletkezik, ami rugalmas deformációt idéz elő, és tapadás jön létre. A mozgás fennmaradásával ezek a kapcsolódási pontok tovább alakulnak és felszakadnak. A csúzófelületek között a súrlódási erő megnő, és a felület anyaga eltávolodhat, így transferrétegek vagy kopórészecskék keletkezhetnek [Myshkin et al., 2005]. Ennek eredményeképpen a kopott anyag egy része átkerül az ellenfelületre, transferfilmet alkotva, míg egy másik része kopási törmelékként eltávolodik a súrlódási zónából. Az adhéziós kopást a keménység és a felületi érdesség is befolyásolja: az alacsony keménységű felületeken nagyobb az adhézió. Továbbá a Van der Waals-erők feltételezhetően fontos hatással vannak a polimerek adhéziós kopására [Stachowiak et al., 2005]. Az elnyíródás vagy szakadás többnyire a kisebb szilárdságú anyag belsejében játszódik le. Az egyszeri anyagátvitel nem jelent kopást, de annak ismétlődése kopási részecskéket hoz magával. A hasonló kristályszerkezetű anyagok párosítását kerülni kell, mert jobban hajlamosak a felületre kiterjedő adhéziós kapcsolatok kialakítására, amely a kopás mellett berágódást és a súrlódó felületek azonnali tönkremenetelét okozza. A felületek adhéziós hajlama jelentősen csökkenthető az anyagszerkezet finomításával gondos összehangolásával. Az adhéziós kopás adott körülmények között egyszerűen számítható, ha gyakorlati tapasztalattól vagy kísérleti eredményektől a k kopástényező megállapítható [Kalácska et al., 1997; Kozma, 1995].

A k kopástényező az anyagpárosítástól, üzemeltetési paraméterektől és a környezeti hatásoktól is függ. A k tényező megmutatja az érintkezési felületen kialakuló adhéziós kapcsolatból, milyen valószínűséggel és mekkora kopási részecske keletkezik. Néhány jellemző kopástényező érték nagyságrendet a 2.4. táblázat mutat be. A megadott értékek tájékoztató jellegűek, függenek a vizsgálati paraméterektől.

Súrlódó pár	Kopástényező, k
Tiszta fémfelületek (szűz felületek súrlódása)	10^{-1}
Nem kent fémfelületek (száraz súrlódás)	$10^{-3} \dots 10^{-5}$
PTFE-edzett, köszörült acél (száraz súrlódás)	10^{-7}
Kent felületek (vegyes súrlódás)	$10^{-6} \dots 10^{-8}$

2.4. táblázat Kopástényező várható értéke adhéziós kopás esetén [Kozma, 1995]

2.7. Tribológiai modellvizsgálatok

A modellvizsgálatok alapvető fontosságú az anyagok vizsgálatában és bármely mechanikai alkatrész megbízhatóságának növelésében. A tribológiai alkalmazásokban a polimer termékek egyre kedvezőbbé válnak olyan egyedi tulajdonságaik miatt, mint a korrózióállóság, rezgéscsillapító képesség és önkenés [Nuruzzaman et al., 2011]. A 3D nyomtatott polimerek mechanikai tulajdonságait korábbi kutatások már széleskörűen tanulmányozták. Sood és munkatársai FDM nyomtatott ABS elemeket vizsgálva határozták meg a folyamatparaméter beállítások és a kopás közötti kapcsolatot. Megállapították, hogy a 3D nyomtatott ABS alkatrészek kopása összetett jelenség, amely a felüli repedéseket hozhat létre a határfelülethez tapadó kötések kialakulása és felszakadása miatt [Sood et al., 2012]. A tribológiai folyamatokat nagyon nehéz elméleti síkon pontosan megfogalmazni. A törvényszerűségek és elméleti összefüggések általában az egyszerűsített modellekre érvényesek és kevés befolyásoló tényezőt vesznek figyelembe. A tribológia kísérletekkel jellemezhető, azaz meghatározható az adott körülmények között működő súrlódó szerkezet teherbírása, kopási jellemzői megbízhatósága és élettartama [Kozma 1995, 1997].

A rendszer elemek kémiai, fizikai-mechanikai tulajdonságai továbbá az elemek közötti kapcsolatok alkotják a tribológiai rendszer szerkezetét. A súrlódó szerkezetek legfontosabb elemei a két kölcsönhatásban lévő test továbbá azok érintkező felületei között lévő felületi réteg, szennyeződés, kopadék, vagy közbenső anyag (pl. kenőanyag) [Persson 2000]. A tribológiai rendszer viselkedésével szemben támasztott követelményeket az erőátadás, mozgásátvitel, anyagleválasztás, mint funkciók határozzák meg. A rendeltetés mellett a vegyi hatások, elmozdulás, hőmérséklet is meghatározzák a testek között kialakuló kölcsönhatásokat [Biron 2013]. Az igénybevételeken túl a rendszer szerkezete, elemei azok kapcsolata és tulajdonságai szintén kölcsönösen egymásra hatnak.

Mindezek következtében létrejöhetnek egyszerű vagy összetett kopásformák, amelyek befolyásolják a rendszer működését, mindaddig, míg dinamikus egyensúly nem áll be vagy károsodás nem jön létre [Nuruzzaman et al., 2011]. Ideális állapotban az üzemeltetés közben olyan súrlódási és kopás állapot alakul ki, amely kielégíti a rendeltetés által meghatározott követelményeket. A súrlódási és kopási tényezők értékének közel állandósulása - egy meghatározott igénybevételi tartományban - optimális üzemeltetési körülményeket eredményez. Ezt az üzemeltetési tartományt az igénybevételek kritikus értékei határolják, amelyet túllépve intenzívebb kopásforma alakul ki.

A vizsgálatok célja a súrlódási és kopás tényező értékeinek továbbá az optimális állapot tribológiai jellemzőinek meghatározása. Kozma a tribológiai vizsgálatok céljait a következőképpen foglalta össze [Kozma 2001]:

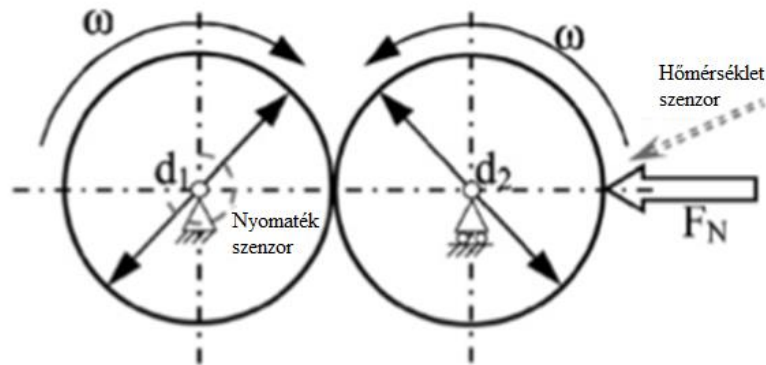
- A hosszú élettartam szempontjából optimális szerkezet kialakítása.
- A működés szempontjából optimális szerkezet kialakítása.
- A karbantartási, felújítási időszakok megállapításához szükséges adatok meghatározása.
- A gép működési állapotának figyelemmel kísérése.
- Az alkatrészek kopásának szimulálása modellvizsgálatokkal.
- A tribológiai rendszer viselkedését befolyásoló tényezők megállapítása.
- Adott súrlódó szerkezet elkészítéséhez és működtetéséhez szükséges anyagpár és kenőanyag kiválasztása.
- Az anyagok és kenőanyagok minőségének ellenőrzése.

A műszaki gyakorlatban különböző szintű vizsgálatokat használnak, melyek rendkívül költségesek és időigényesek lehetnek. Kijelölt gépeken vagy azok egy részegységén végzett vizsgálattal mindez lényegesen leegyszerűsíthető. Fokozottabb igénybevételek kerülnek alkalmazásra a vizsgálatok idejének lerövidítése érdekében. A tribológiai modellvizsgálatokat az eredetivel megegyező kismintán, nagy pontossággal gyártott egyszerű alakú próbatesteken vagy a rendszerben jelentkező igénybevételeket szimuláló elemeken végzik [Czichos elve alapján, Keresztes 2009]. Ezen vizsgálatok bonyolultsága az üzemi vizsgálatoktól az egyszerűsített modellvizsgálatokig fokozatosan csökkenek továbbá a vizsgálatok költségei kedvezőbben alakulnak. Az egyszerűbb vizsgáló eszközök használata is csökkenti az időt és a költségeket. A vizsgálatok egyszerűsítésével azonban a súrlódó pár működési feltételei jelentős mértékben megváltozhatnak, és az ilyen körülmények között végzett mérések eredményeiből nehezebb a valós szerkezet üzemeltetésekor kialakuló tribológiai paraméterekre következtetni. A modellvizsgálatok kiválasztásakor arra kell törekedni, hogy a vizsgálati feltételek minél jobban megközelítsék a valós üzemi körülményeket. A vizsgálóberendezések típusának megválasztása a próbatest méretétől is függ, megkülönböztethetünk nagyméretű és kisméretű próbatestekkel végzett vizsgálatokat [Kozma, 2001].

2.7.1. Kisméretű próbatest vizsgálatok; ikertárcsás berendezés

A szabványos kisméretű próbatest vizsgáló berendezések, mint például a nemzetközi szakirodalomban ismert Plint, Falex, Tribocop, Twin Disc (továbbiakban ikertárcsás mérés) közül a kutatásomhoz legközelebb álló vizsgálati elv ismertetésére kerül sor. A nagyszámú tribométer kialakítások és modellek közül a tanulmányok azt igazolják, hogy görgők modellezésére az ikertárcsás vizsgálat a legmegfelelőbb. A kerék-sín érintkezés kezelése nagy jelentőségű főként a vasutak számára ezért találhatunk több tudományos cikket ezzel a témával kapcsolatban. A használhatóság maximalizálása és a karbantartás csökkentése érdekében elengedhetetlen megérteni a vasúti anyagok tribológiáját [Strey et al., 2021]. Alapvetően a műanyag görgő terhelhetősége jóval kisebb a fém vetélytársaival szemben. Valószínűleg ezért találunk nagyon kevés szakirodalmat, amelyben műanyag görgő tulajdonságait vizsgálják ikertárcsás mérésekkel. Fontos megjegyezni, hogy nem minden alkalmazásban alapvető kritérium a nagy terhelhetőség. Kis terheléseken számos lehetőség nyílik polimerekkel, amelyek kiválóan használhatóak és tribológiai tulajdonságuk is kitűnő.

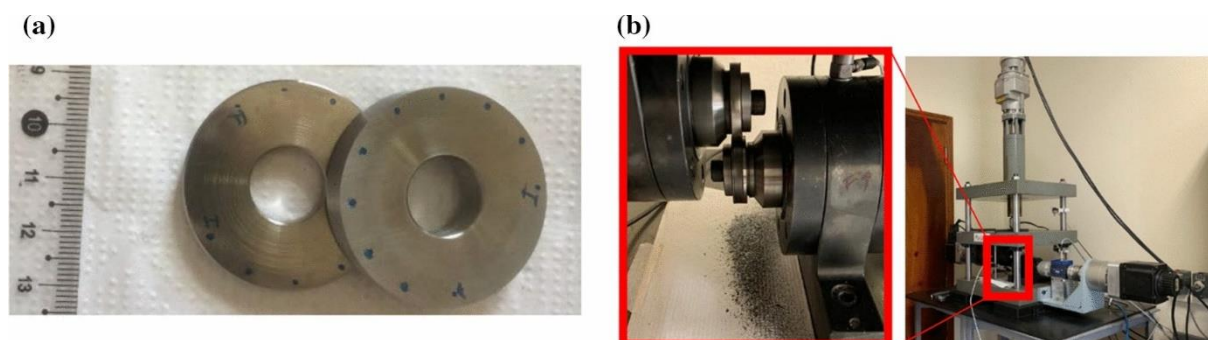
A különböző tanulmányok konkrét szimulációk segítségével értékelik a mechanikai érintkezési jelenségeket. [Sukumaran et al., 2012]. Az ikertárcsás vizsgálat működési elvét a 2.15. ábra mutatja be.



2.15. ábra Az ikertárcsás vizsgálat elvi működésének vázlata [Sukumaran et al., 2012]

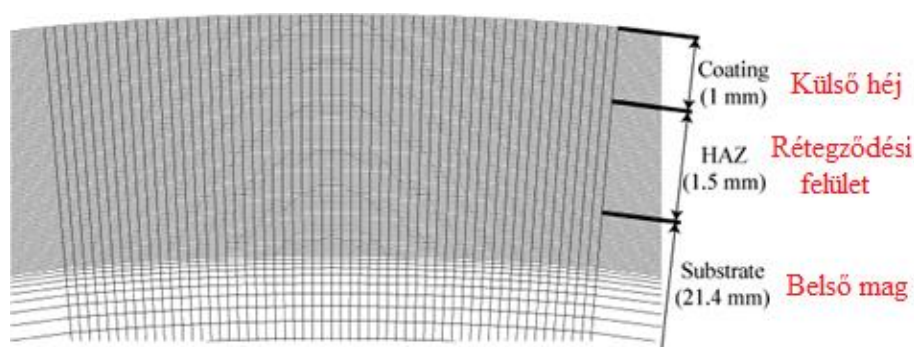
Általában a kerék-sín összefüggésben a vasúti mérnöki alkalmazásoknál a kerék-sín érintkezést és a kapcsolódó jelenségeket vizsgálja az ikertárcsás eljárás. Számos olyan kutatás található a szakirodalomban, ahol az ikertárcsás modellvizsgálatot a sín és kerék tribológiai kapcsolat elemzéséhez használják. Ringsberg és munkatársai a kerék/sín érintkezést vizsgáló ikertárcsás végesselemben szimulációival kísérleteztek, ahol a fáradási repedések beindítási kritériumait elemezték különböző anyagminőségek esetén. A VEM szimulációkban a Chaboche anyagmodell került használatra a nemlineáris izotróp és kinematikus keményedésre. A használt modellben jó egyezés volt az érintkezési felület alatt a repedés keletkezési ciklusok számával és a nyírótorés eloszlásával. Az állandó érintkezési nyomáson és változó súrlódási együtthatóval végzett ratchetting modellel végzett szimulációk eredményei azt a súrlódási együttható aszimptotikus értékeit mutatták, amelyeknél a ratchetting miatti repedés nem fordul elő [Ringsberg et al., 2000]. Paul és munkatársai tanulmánya megbízható információkat és betekintést nyújt olyan jelenségek vizsgálatához, mint a kopás és a gördülő érintkezési felületek kifáradása. Ebben az összefüggésben egy numerikus értékelés kiegészítő megközelítése a megoldás e jelenségek megértéséhez. Mindemellett feszültség és elmozdulás értékek nyerhetők, alapul szolgálva a kutatásokhoz és a fizikai vizsgálatok jobb értelmezéséhez. A tanulmány célja az érintkezési kölcsönhatások vizsgálata az ikertárcsás mérés során számítási szimulációk segítségével, főként végesselemben módszerrel. A vizsgálat összes jellemzőjének numerikus reprodukálása; a korongok relatív csúszási sebessége, a fizikai mérés kulcsfontosságú kinematikai paramétere, a modellezési folyamat döntő jellemzője további kihívást jelent. [Paul et al., 2021].

Nunhez által javasolt megközelítés fő iránya az úgynevezett kúszási görbék reprodukciója, miközben az érintkező felületek feszültség-deformációs jellemzői teljes mértékben fel vannak térképezve. A numerikus eredmények jó alapot jelentenek a kísérletek jobb értelmezéséhez [Nunhez et al., 2021].



2.16. ábra Ikertárcsás mérés súrlódási vizsgálatokhoz [Nunhez, 2021]

A 2.16.(a) ábrán egy jelölésekkel ellátott görgőpár mikrokeménység vizsgálatára kerül sor. A vastag keretes 2.16.(b) ábrán az ikertárcsás vizsgálóberendezés látható. Ebben a kísérletben az ikertárcsás vizsgálatot használják a kenőanyag hatásának a súrlódási felületre történő értékeléséhez. Az ikertárcsák alatt a vizsgálat során keletkezett sötét színű törmelék és kenőanyag keveréke látható. Számottevő kutatást végeztek a kopás és gördülési érintkezési kifáradás -rolling contact fatigue- továbbiakban RCF vizsgálatára, kezdve a terepi és teljes körű kísérletektől a kisméretű vizsgálatokig. Mindazonáltal az ezekben a különböző módszerekben talált eredmények összehasonlítása kevés. Így az RCF károsodását összehasonlították az ikertárcsás minták és a terepi üzemből eltávolított kerekek között. Az RCF egyes aspektusai rendkívül hasonlóak voltak, mint például a deformált rétegvastagság, a mikrokeménység, a repedésszög és az anyag delaminációja [Liu et al., 2021]. A végelemben alkalmazott hálókhoz és rétegződésekhöz Tiwari és munkatársai többtengelyes indítási kritériumot használtak a kifáradás értékelésében. Az eredmények azt mutatták, hogy a felületkezelési folyamatok által okozott maradék feszültségek csökkentették a kifáradás lehetőségét az erre szolgáló meghibásodás elleni biztonsági sáv segítségével (2.17. ábra). Vizsgálataik a külső héj vastagságára vonatkoznak, mindemellett a vastagság optimalizálása volt a cél [Tiwari et al., 2021].



2.17. ábra A végelem-háló zónái [Tiwari et al., 2021]

Az RCF egyes aspektusai rendkívül hasonlóak voltak a vasúti kerekek és az ikertárcsás vizsgálatok között. A rugalmassági zóna és deformációs mezők arányaiban jól reprodukálhatóak a kerekeken és az ikertárcsás próbatestekben [Paul et al., 2021].

Bergseth és munkatársainak mérései, számítógépes szimulációi azt mutatták, hogy a ball-on-disc és az ikertárcsás mérések egyaránt használhatóak a kenőanyag rangsorolására. Bár a hajtóművek hatásfoka jelenleg magas, a felület/kenőanyag hatékonysághoz való jobb

megértése kritikus fontosságú. Az elektromos hajtásláncok például nagyobb sebességet és alternatív terhelést fognak előírni, és várhatóan ezek az új feltételek nagyobb mértékben a felület/kenőanyag jellemzőitől függenek. A fogaskerék-érintkezésben lejátszódó jelenségeket gyakran golyós-tárcsás és ikertárcsás tribométerek segítségével mérik.

Az összehasonlításra azért volt szükség, hogy felmérjék a felületi/kenőanyag kölcsönhatások viselkedése közötti különbségeket [Bergseth et al., 2021]. Számos kutatás eredményei azt mutatták, hogy a golyó a tárcsán és az ikertárcsás kísérletek ugyanazokat a súrlódási tendenciákat tükrözik. Az összehasonlítás segíthet a gépelem-tervezőknek a megfelelő kísérleti rendszer kiválasztásában [Bergseth et al., 2021, Strey et al., 2021].

Az ikertárcsás vizsgálat alkalmas helyettesíteni és reprodukálni a valós hajtómű méréseket. Akár különböző anyagok vizsgálatával (pl: fém és polimer) jelentős időt és költséget takaríthatunk meg. Online monitorozásra is képes a hőmérséklet, súrlódási viselkedés, nyomaték vizsgálatával. A hőmérséklet infravörös érzékelővel a nyomaték pedig a tengelyen elhelyezett külső nyomatékszenzorral mérhető. Amennyiben az átmérők megegyeznek csúszás nélküli dinamikus vizsgálatról beszélhetünk. Különböző átmérőjű tárcsák használatával azonban már a csúszás mértékét (slip) is szükséges figyelembe venni a vizsgálatoknál [Liu et al., 2021].

2.8. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

3D nyomtatás, mint gyártástechnológia

Az additív technológia létjogosultsága egyértelmű mind a környezetterhelés mind a megmunkálást érintő előnyei kapcsán a hagyományos (szubtraktív) forgácsolással szemben [Dobos et al., 2022]. Fontosabb előnyeit kiemelve elmondható, hogy minimális az anyagvesztés és a szerszámzárási költség [Durgun 2014], a gyártógép kialakítása egyszerűsödik (kisebb merevség). [Baz 2020, Tuan et al., 2018] szinte nem léteznek geometriai korlátok, az egységes (por, huzal, gyanta) alapanyag kezelés egyszerűbb és könnyebben integrálható a korszerű gyártási rendszerekbe. Fő hátránya azonban a technológia újszerűségéből ered, hiszen sok még az ismeretlen terület [Attaran et al., 2017].

A kitöltöttség, mint legjelentősebb anyagfelhasználási tényező, kulcsjelentőségű az optimalizálás folyamatában. Az 2.5. táblázat mutatja, hogy a nyomtatási paraméterként beállított elméleti arány és a tényleges töltési arány közötti különbség kevesebb, mint 1% [Kantaros et al., 2015, Alaimo G., 2017]. Ezt az eredményt felhasználom a dolgozatomban, mert ez alapján a beállított kitöltöttséget tekintem a valósnak, ami így 1% hibával megtehető.

Keresztmetszet	1	2	3	4	5
φ (Ω) %	46,60	37,28	27,96	18,64	9,32
φ (Ω)' %	47,04	37,63	27,22	18,18	9,43
σ_{\max} [MPa]	12,11	10,08	8,05	6,03	4,01
σ'_{\max} [MPa]	24,21	23,96	24,32	23,89	23,54

2.5. táblázat Elméleti és tényleges töltési arány különbözősége [Kantaros et al., 2015]

A kitöltöttség vizsgálata

Lubomo és munkatársai azt bizonyították PLA esetében, hogy a rétegvastagság változtatása nincs jelentős hatással a gyártmány kifáradására [Lubomo, et al., 2018]. Szintén ezt állítják a következő irodalmakban akrilnitril-butadién-sztirol [Wu et al., 2015] és a PLA alapanyagánál [Torres et al., 2018] majd Polyether ether ketone (továbbiakban PEEK) anyagot vizsgálva [Hernandez et al. 2016, Xiaoyong et al., 2017]. Ezen tanulmányok alapján elmondható, hogy felhasznált alapanyagok típusától, gyártmányától és minőségétől is nagymértékben függ milyen nyomtatási beállításokat alkalmazhatunk a legjobb teherbírás elérésére [Deng 2018].

Az anyagoptimalizálás további fontos kérdése a belső töltöttség mintázatának megválasztása. Concentric minta 100 százalékos kitöltöttségben mutatta a legnagyobb szakítószilárdsági eredményt, kevesebb mint 3%-os eltéréssel egy normál ABS fröccsöntött alapanyaghoz képest. Ugyanazon az anyag kitöltésen, alapanyag fogyasztás tekintetében a Honeycomb mintázat bizonyult kiemelkedőnek [Adam 2015]. A kitöltési mintázat befolyása a szakítószilárdság és a merevség értékére legfőképpen 20 és 50 százalékos tartományban a legnagyobb. Az anyag extrudálási pályák sokrétűsége és a különböző mintázatú rétegek közötti kötési zónák keletkezése eredményezi a rugalmassági modulusok szignifikáns eltérését [Hanon et al., 2021]. Takezawa és munkatársai megállapították, hogy a különböző töltőmintázat és csökkentett kitöltés lehetővé teszi a nyomtatott elem tömegének 50%-ra redukálását (a teljes kitöltöttséghez képest). A felhasznált idő és alapanyag továbbá a költségek kedvező alakulását az anyagoptimalizálásnak köszönhetően. [Takezawa, 2017]. Teherhordó szerkezeteket úgy terveznek, hogy azon a helyen erősebbek legyenek, ahol a legnagyobb igénybevételről beszélünk. A nyomtatási tájolást úgy választják meg például, hogy a kritikus struktúrák nyomtatási rétege ne keresztirányban helyezkedjen el a hajlító igénybevételekhez képest [Zur et al., 2019]. Ehrmann és munkatársai Honeycomb és Grid mintákat vizsgálva szintén azokat a következtetéseket vonták le, hogy a kitöltöttség növelése pozitív hatással van a rugalmassági modulusra és a terhelhetőségre [Ehrmann et al., 2021]. A kitöltési minták szintén befolyásolják a próbadarab erősségét. A 25%-os Honeycomb térkitöltés szinte ugyanolyan rugalmassági értékeket és maximális terhelhetőséget adott, mint az 50%-os Grid kitöltés. A kitöltöttség szintén hatással van a lehajlás értékére ezeknél a mintázatoknál is [Górski, 2015]. Lindahl és munkatársai szerint először keresztmetszeti igénybevételi elemzést kell végezni a repedésekre hajlamos területek azonosítására méhsejt szerkezeteken is. Az optimalizálást követően üreges héjszerkezetek létrehozásával a gyártmányt több részre osztják, majd ezt követően kitöltés eloszlás szabályozással belső porózus szerkezetet alakítanak ki. [Lindahl et al., 2018]. Folyamatos vizsgálat során az a tapasztalat, hogy a konzolszerkezet minőségének optimalizálása (miközben megőrzi a modell külső morfológiáját és szabályozza a keresztmetszeti kitöltési területet) hatékony módja annak, hogy lényegesen csökkentjük az alapanyagfogyasztást. [Dai N. et al, 2016]. Aw és munkatársai szerint a maximális feszültséghez tartozó betöltési aránnyal érhetjük el az optimális anyagfelhasználást [Aw et al., 2018]. Hossain és munkatársai a modell minden szerkezeti részének szívóosságának elérése érdekében, különösen a konzolszerkezetnél, javasolják a mechanikai modellezési módszeren alapuló belső szerkezeti optimalizálást. Ezzel megerősítik a szerkezeti szilárdságot, miközben csökkentik az alapanyag felhasználást. Az innovációs ötlet az, hogy kiszámítanak egy folyamatos kitöltés-eloszlást, amely felismeri a gyártmányban keletkező feszültségeket és egy üreges héjszerkezetet generál az alkalmas helyeken [Hossain et al., 2020].

Huang és munkatársai szerint szemléltetett módszer magában foglalja a kitöltés eloszlások átalakítását, fokozatosan változó belső porózus szerkezetekre. A javasolt módszer alkalmazását a konzolos szerkezeti részek másodrendű nyomatókának szabályozásával, majd a belső töltőszerkezet optimalizálásával mutatják be. [Huang et al., 2020]. A fenti eredmények alapján biztonsággal kijelenthető, hogy az optimalizálásnak van létjogosultsága és jó eredményekkel megvalósítható. A kérdés az, hogy van-e általánosítható optimum feltétel. Polimerek esetében, eltérő szeletelő programok és mechanikai paraméterek adottságából Peng szerint lehetetlen megkísérelni általánosítani a kritériumokat vagy a szükséges nyomtatási alapbeállításokat. [Peng et al., 2014]. Ennek ellenére a dolgozatomban bizonyos feltételek teljesülése mellett sikerült általánosított optimum feltételeket megállapítanom.

Végelem modellezés alkalmazása 3D nyomtatáshoz

P. Zur és munkatársai elsősorban egy statikus hajlítási igénybevételt modelleztek végelem analízissel majd a valós körülmények között hajlítással vizsgálták az analízis hitelességét. A cikk eredményei alapján a statikus hajlítás végeelemes ellenőrzése nagyon hasonló eredményeket mutat a valós hajlítási vizsgálathoz képest (az eredmények különbségének értéke mindössze 1,7%) [P.Zur et al., 2019]. Dai és kollégái megfigyelték azonban, hogy azokat a veszélyes keresztmetszetű helyeket (ahol a gyártmányok törnek) a kísérleti algoritmusok sikeresen azonosították. A keresztmetszeti struktúra analízis, amely valós idejű visszacsatolást nyújt a 3D alakzat szerkesztéséhez, kiválóan alkalmas modell-optimalizálására. Az algoritmusok egészen részletes hálóig kiterjeszthetők. Továbbá a modell nyomtatási irányának meghatározásával és befolyásolásával növelhetjük a szerkezeti szilárdságot. [Dai N., 2016]. Stava kifejlesztett egy automatikus szerkezet-felderítési és javítási rendszert, amely a véges elem módszeren (VEM-en) alapul. A rendszer belső furatokat és helyi megerősítéseket generál. Az említett belső szerkezeti módosításokat úgy alkalmazza, hogy miközben a külső geometrián nem változtat azonban erősíti a teherbírást [Stava et al.2012]. Peng létrehozott egy módszert a legjobb kitöltési feltételek megállapítására és a leggyengébb részek azonosításra. Mindazonáltal a VEM időigényes 3D hálós generálást és nagy lineáris rendszerek megoldásait foglalja magában [Peng et al., 2014]. Mindez megnehezíti az oldható támaszanyagok eltávolítását olyan esetekben amikor a sztereolitográfiai módszert vagy por alapú 3D nyomtatást alkalmaznak [Motaparti, 2016]. A VEM, mint modellezési eljárás bizonyítottan alkalmas a 3D nyomtatott anyagok tulajdonságának leírására, ezt eszközként fogom felhasználni a munkám során, így a kísérletek számát virtuális kísérletekkel a sokszorosára növelem, így gyorsabban és sokkal kevesebb nyomtatott próbatest alkalmazásával jutok olyan eredményekhez, amihez nagy számú mérés szükséges.

Tribológiai vizsgálatok

Az adhéziós kopás adott körülmények között egyszerűen számítható, ha gyakorlati tapasztalatból vagy kísérleti eredményekből a k kopástényező megállapítható [Kalácska et al., 1997; Kozma, 1995]. Holm és Lee elmélete szerint Yamaguchi definiálta az adhéziós kopás összefüggéseit fém és polimer felületek között. További megoldásokat találunk Jain összefüggésében, ahol már szerepel a kifáradási feszültség, az itt használt kopástényező (k_2) továbbá tartalmazza a súrlódási tényező, a rugalmassági tényező, a Poisson tényező és a felületi kifáradás anyagjellemzők hatását [Keresztes 2009].

A különböző tanulmányok konkrét szimulációk segítségével értékelik a mechanikai érintkezési jelenségeket. [Sukumaran et al., 2012]. A tanulmány célja az érintkezési kölcsönhatások vizsgálata az ikertárcsás mérés során végelemes módszerrel. A vizsgálat összes jellemzőjének numerikus reprodukálása. A numerikus eredmények jó alapot jelentenek a kísérletek jobb értelmezéséhez [Nunhez et al., 2021]. Az RCF egyes aspektusai rendkívül hasonlóak voltak a vasúti kerekek és az ikertárcsás vizsgálatok között. A rugalmassági zóna és deformációs mezők arányaiban jól reprodukálhatóak a kerekeken és az ikertárcsás próbatestekben [Deng, 2021]. A külső héj vizsgálatával és annak optimalizálásával Strey és munkatársai kísérleteztek. A végelemben alkalmazott hálókhoz és rétegződésekhez többtengelyes indítási kritériumot használtak a kifáradás értékelésében.

Az eredmények azt mutatták, hogy a felületkezelési folyamatok által okozott maradék feszültségek csökkentették a kifáradás lehetőségét, az erre szolgáló meghibásodás elleni biztonsági sáv segítségével. Vizsgálataikban a külső héj vastagság optimalizálására rétegződési felületet alkalmaztak [Strey et al., 2021]. A kutatási eredmények azt mutatják, hogy a tribológiai tulajdonságokra jelentős hatása van a külső rétegnek. Kutatásom során azt vizsgálom, hogy ennek van-e optimuma, mert erre vonatkozó eredményeket a szakirodalomban nem találtam. Itt is felhasználom a szakirodalomban megtalálható megállapítást, amely szerint a lokális kapcsolatok mechanikai jellemzői a tribológiai folyamatokra jelentős hatással vannak.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az értekezésem e fejezetében a kutatásom során felhasznált munkadarab alapanyagát és azok anyagtulajdonságait, az alkalmazott kísérleti módszereket és eszközöket vizsgálati berendezéseket, készülékeket, műszereket, mérőszámait, az alkalmazott modellezést, továbbá a kiértékelési módszereket ismertetem.

3.1. Mechanikai vizsgálatok

Ebben az alfejezetben kifejtem a vizsgált polimer próbatestek alapanyag-tulajdonságait, a próbatestek gyártásának és vizsgálatának eszközeit. A mérési módszer bemutatásával együtt ismertetem a beállított paramétereket és a kapott eredményeket.

3.1.1. Vizsgálatok alapanyagai

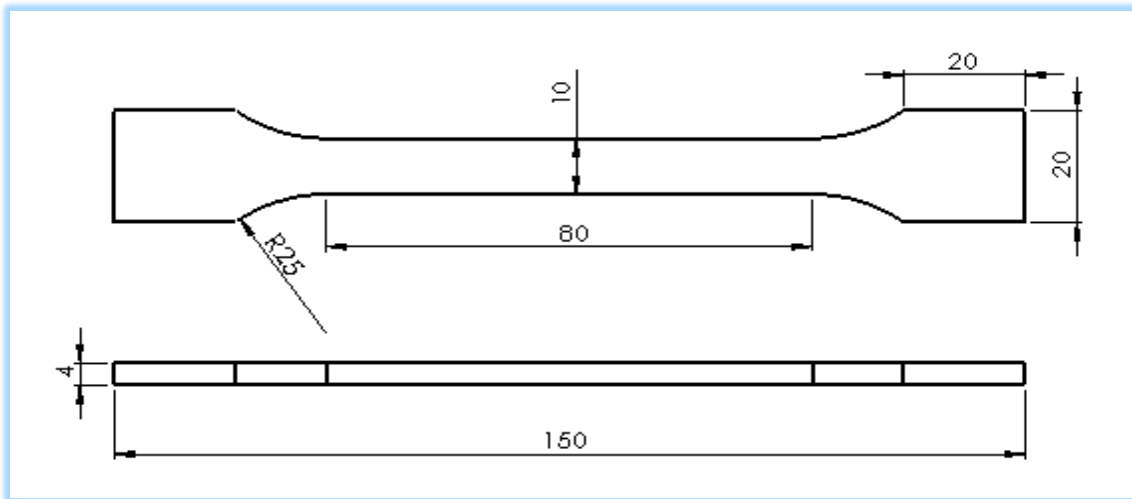
Méréseim során magyarul politejsavként is ismert, PLA (Polylactic acid) alapanyagot használtam. Ezt a környezettudatos alapanyagot, magas keményítőtartalmú (búza, kukorica, rizs) növényekből állítják elő. Biológiai úton lebomló, nagyobb sebességgel nyomtatható alapanyag, továbbá a piacon lévő versenytársait tekintve, az anyag deformáció is csekélynek mondható. Alacsony olvadáspontjának köszönhetően nincs szükség fűthető munkaasztalra. Könnyen elérhető széles körben alkalmazott alapanyag ezért kiváló választás a magas darabszámú mérések elvégzésére [wikipediga.org/wiki/Politejsav, 2022]. A mérésekhez 1,75 mm átmérőjű sárga PLA huzal Filament gyártmányú alapanyagot használtam, amelynek gyártói adatai a 3.1. táblázatban olvashatóak, a fűvóka (noozle) átmérője minden esetben 0,4 mm.

Alapanyag gyártmány: Filament PM 1.75 PLA
Huzal átmérő: 1,75 mm
Sűrűség: 1,24 g/cm ³ (ASTM D792)
Hajlító rugalmassági modulus: 3600 MPa (ISO 178)
Hajlító szilárdság: 108 MPa (ISO 178)
Keményység: 85 Sh D (ASTM D2240)
Szakítószilárdság 52 MPa
Ajánlott nyomtatási hőmérséklet: 200/220°C
Lágyulási hőmérséklet: 56°C (ISO 75/2B)
Olvadási hőmérséklet: 145/160°C (ASTM D3418)
Kikristályosodási hőmérséklet: 56/64°C (ASTM D3418)

3.1. táblázat A felhasznált PLA anyag műszaki adatlapja

Próbatest paraméterek

Az MSZ EN ISO 527-2-1993 (a továbbiakban ISO 527) alapján készült 3D nyomtatott próbatesteket az EBK Hungary Kft üzemében nyomtattam, magyar gyártmányú Craft bot 3-as típusú eszközön. A legyártott munkadarabok utómunkálatok nélkül tökéletesen alkalmasak voltak a befogásra így szakítószilárdság és rugalmassági modulusok vizsgálatára. A szabványos próbatest geometriáját a 3.1 ábra mutatja.



3.1. ábra ISO 527 Szabványos méretű próbatest

Az additív gyártmányok belső szerkezetét a 3.2. ábrán szemléltetem, amelyeket concentric, Hilbert curve, honeycomb, rectilinear elnevezésű mintázat nyomtatási beállításával gyártottam. A beállítások lehetővé teszik, hogy az anyagfelhasználás kitöltésének mértékét és mintázatát változtassam. A térkitöltöttség (i) definiálását az irodalomkutatásom során nyert információk alapján az alábbiak szerint értelmezem: elméleti befoglaló térfogat (a gyártmány körvonalai által befoglalt térfogat) és a valós térfogat (valós anyaggal kitöltött) aránya.

$$\frac{V_{valós}}{V_{elméleti}} \cdot 100 = i \text{ (térkitöltöttség) [\%]} \quad (1)$$

ahol:

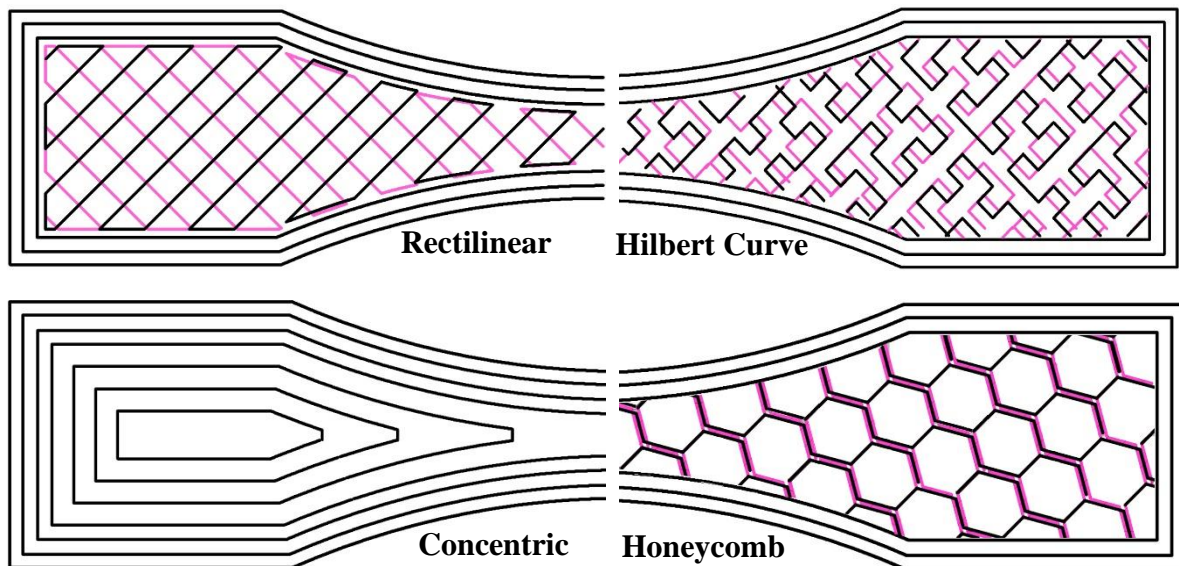
$V_{elméleti}$: a gyártmány külső körvonalai által befoglalt térfogat [mm^3]

$V_{valós}$: a valós anyaggal kitöltött térfogat [mm^3]

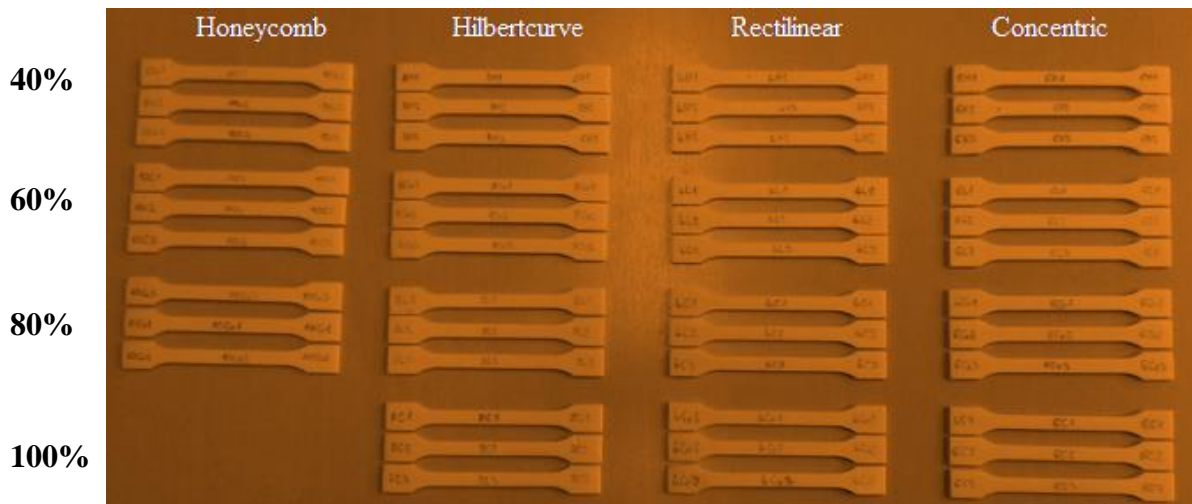
A négy típusú mintázatot, további négy különböző térkitöltési százalék módosításával gyártottam: 40%, 60%, 80% és 100%, ezáltal létrehoztam a 15 féle variáció összehasonlítását. A nyomtatási beállításban található minták jelentése a következő: honeycomb=méhsejt, concentric=szimmetrikus, rectilinear=egyenes vonalakkal határolt, Hilbert curve=Hilbert

görbe. Tekintettel arra, hogy a program csak az angol nyelvű megnevezéseket engedélyezi a továbbiakban is az eredeti név szerint jelölöm a mintázatokat.

A kitöltöttség mértékét a nyomtatási beállítás függvényében a fúvóka által extrudált rétegek közötti távolság adja. Kiseb kitöltöttség esetén nagyobb a távolság (légrés) az épített rétegek között. Elméleti úton a kitöltöttséget nem ellenőriztem, a minták elnevezésében a szoftverben beállított kitöltési értékek szerepelnek.



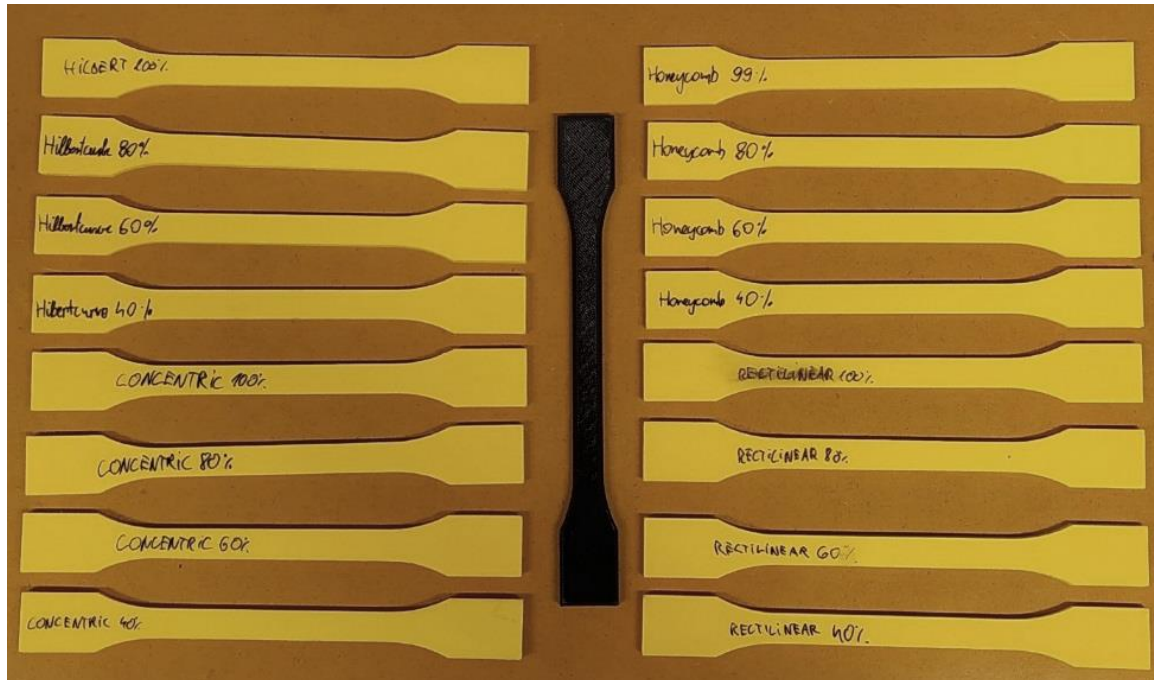
3.2. ábra Szakító próbatetek mintázatai



3.3. ábra A 3D nyomtatott szakítóvizsgálati próbatetek

A Honeycomb mintázatokból csupán 3 db kitöltöttséget tudtam beállítani (3.3.ábra) annak okán, hogy a nyomtató nem képes 100%-os kitöltést elérni ebben az anyagszerkezeti mintázatban. Fontos megjegyezni, hogy a külső héj egy rétegű, a fúvóka egy körbejárásából épül fel és minden esetben 100% Rectilinear beállítással működik.

A 15 db szakítóvizsgálati próbatestet 3 példányban készítettem, előzetesen figyelembe véve az eredmények szórását. (3.3. ábra) Az eredményekből következtethető lesz a nyomtatás reprodukálhatósága és a mérés hitelessége is.



3.4. ábra Rugalmassági modulus próbatestek

A rugalmassági modulus mérésekhez 1 példányt nyomtattam minden mintázattól és kitöltöttségtől (3.4. ábra). A Young-modulus mérések könnyen reprodukálhatóak ugyanazon a próbatesten, ezáltal nincs szükség a 15 variáció ismételt legyártására 3.4. ábra.

Az ábrán látható fekete próbatest és a jobb felső sarokban látható Honeycomb 99 % elnevezésű sárga, csupán próbanyomtatás, nem látható a kutatási eredményekben.

3.1.2. Gyártó és Vizsgáló berendezések

A próbatestek gyártását a szakirodalomban részletesen bemutatott FDM nyomtatóval végeztem. Slic3r szoftvert használtam a 3D modell (STL fájl) szeleteléséhez, a 3D nyomtatási folyamat paramétereinek vezérléséhez és a 3D nyomtatóval kompatibilis G-kód fájl exportálásához. A próbatesteket egy a kereskedelmi forgalomban kapható magyar gyártmányú Craft bot 3-as típusú asztali gépen nyomtattam ki, a korábban részletezett PLA alapanyagból. A nyomtató berendezés mozgó extruder fej egysége a CNC gyártáshoz hasonlóan G-kód vezérlés alapján, az 1,75 mm átmérőjű PLA-szálak megolvasztásával, a mozgó asztalon rétegről rétegre építi fel a gyártmányt. A nyomtató fűvókájának átmérője 0,4 mm. Ezt követően a legyártott próbatestek vizsgálata következett. A szakító- és rugalmassági modulus vizsgálatokat a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Szent István Campus Tudástranszfer Központban található Zwick/Roell Z100 típusú berendezéssel bonyolítottam le (3.5. ábra).



3.5. ábra A szakítások során használt Zwick/Roell Z100-as típusú szakítógép.

A szakítóberendezés számítógépes programja a szakítási vizsgálatok során egyenként, méréspontonként a hozzá tartozó erővel együtt rögzíti, majd ezzel egyidőben létrehoz egy diagramot az adott vizsgálat erő-megnyúlás függvényében. A kapott adatsorokat a hozzájuk tartozó diagrammal exportálni tudtam Excel munkafüzetekbe, így könnyen kiértékelhettem az eredményeket. Az azonos mintázatú és térkitöltöttségű Excel adatsorokat egy munkafüzetbe összesítettem, majd mindhárom adatsort egy diagramon rögzítve szemléltettem a függvények közötti eltéréseket. A második mechanikai vizsgálat sorozathoz, szükség volt egy kiegészítő extenzométer telepítésére (3.7. ábra), amely a rugalmassági modulusok vizsgálatához szükséges.

A rugalmassági vizsgálatokra szánt próbatesteket tömegét nyomtatás után a 3.6. ábrán látható Sartorius MSE10202S-0CE-D0 digitális laboratóriumi mérleggel mértem meg. A század pontosságú mérleg által szolgáltatott adatok a későbbi optimum számításához szükségesek.



3.6. ábra A próbatestek tömegének mérése

3.1.3. A szakítószilárdság és rugalmassági modulus vizsgálati módszere

A legyártott szabványos próbatestek szakítóvizsgálatára azért volt szükség, hogy meghatározzam a mintázat és a kitöltöttség hatását a mechanikai szilárdságra. A szakítási diagramok eredményeiből egy előzetes elemzést végeztem az egyenes meredekségének és a rugalmassági modulusok vizsgálatát illetően.

A szakítószilárdsági mérés automatikusan zajlik, az anyag tönkremeneteléig. A rugalmassági vizsgálat lebonyolításához szükségeszerű a mérési tartomány körültekintőbb beállítása. Egy nem megfelelően beállított húzóerő okozhat olyan szálszakadást, ami szabad szemmel nem látható, azonban súlyos mérési pontatlansághoz vezethet.

A 3.7. ábrán az alkalmazott kiegészítő extenzométer látható, amely kifejezetten a rugalmassági modulus mérésére használatos. Adatkábel segítségével kommunikál a mérőberendezéssel.

A kábel biztonságosan elvezethető a szorítópofák mellett és nem akadályozza a hatékony és gyors mérést.



3.7. ábra Az extenzométerrel felszerelt próbatest

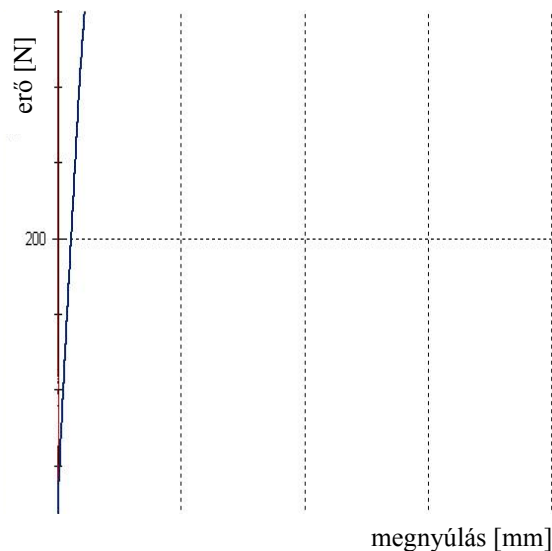
Meghatároztam a rugalmassági modulusok számított értékeit, amely irányt mutat kísérleteim második lépésére. A próbatestek szakítópróbája után második lépésben kifejezetten a rugalmassági zónát vizsgáltam. Az első lépésben elkészült próbatesteket szakítóvizsgálat segítségével ellenőriztem és az alapanyag, valamint a kitöltöttségi mértéknek megfelelően értékeltem ki. A 15 szakítószilárdsági mérést (három szakításos ismétléssel) továbbá a 16 db rugalmassági modulus mérést (10 ismétléssel) a Zwick/Roell Z100 típusú berendezéssel végeztem. A szakítási vizsgálatok és a rugalmassági modulus méréseket az MSZ EN ISO 527-2-1993(E) szabványnak megfelelően 1 mm/perces húzási sebességgel vizsgáltam. A rugalmassági modulusok méréséhez legyártott próbatestekhez az előző kísérlet megegyező nyomtatási paramétereinek alkalmazása valósult meg a Slic3r szeletelő programmal. A rugalmassági tartomány Young modulusainak értékeit kutatva, az előzőekben alkalmazott nyomtatási beállításokkal végeztem. Ezek a vizsgálatok adnak alapot a pontos és valóság-hű anyagtulajdonságokon alapuló működő mechanikai modell megalkotásához. Ezt követően egy sor virtuális hajlítási vizsgálatot végeztem Ansys Workbench szoftverrel, egy szendvicsszerkezetű mintán.

Ezzel meghatároztam az adott töltési mintákhoz és kitöltöttségekhez a legnagyobb fajlagos teherbírású (szendvicsmag) optimális vastagságát. A képernyőfotózással készített 3.2. táblázat a 40%-os concentric (40%CO) számítógép által rögzített mérési eredményeket szemlélteti.

Az első sorban látható egy mérési hiba az extenzométer nem megfelelő felhelyezéséből adódóan. A további 10 mérés jól mutatja az eredmények hitelességét.

Nr	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_M MPa	ϵ_M %	ϵ_{tM} %	σ_B MPa	ϵ_B %	ϵ_{tB} %	b mm	h mm
1	1290000	-	15,0	0,25	1,3	-	-	-	10	4
2	1990	-	8,74	0,43	0,74	-	-	-	10	4
3	1930	-	8,75	0,44	0,72	-	-	-	10	4
4	1930	-	8,75	0,44	0,72	-	-	-	10	4
5	1930	-	8,75	0,44	0,72	-	-	-	10	4
6	1930	-	8,74	0,44	0,71	-	-	-	10	4
7	1920	-	8,75	0,44	0,71	-	-	-	10	4
8	1920	-	8,74	0,44	0,70	-	-	-	10	4
9	1920	-	8,75	0,44	0,70	-	-	-	10	4
10	1920	-	8,75	0,44	0,70	-	-	-	10	4
11	1920	-	8,74	0,44	0,69	-	-	-	10	4

3.2. táblázat Az első oszlopban E_t jelöléssel a 40%CO rugalmassági modulusok értékei



3.8. ábra Rugalmassági vizsgálat zónája

A rugalmassági modulusot a rugalmas tartományon belül vizsgáltam, ahol a feszültség nem okoz maradandó deformációt az anyagban. A számítógép által rajzolt diagram rugalmassági zónájának képernyőfotója a 3.8. ábrán látható. A folyáshatár 80%-a vagy a rugalmas maximális erő 0,8 szorosa mutatja a biztonsági határok mértékét. Ezen értékeket minden mérésnél alaposan figyelembe véve 10 alkalommal ismételt meg a rugalmassági modulusok mérését. Az extenzométer a Zwick/Roell 100-as géphez tartozó speciális kiegészítő egység, amely 0,01 pontossággal továbbá 2,5 mm-es mérési tartományban és 25,4 mm hosszúságban működik. (3.7. ábra)

3.2. Hajlított szendvicsszerkezet virtuális modellvizsgálata

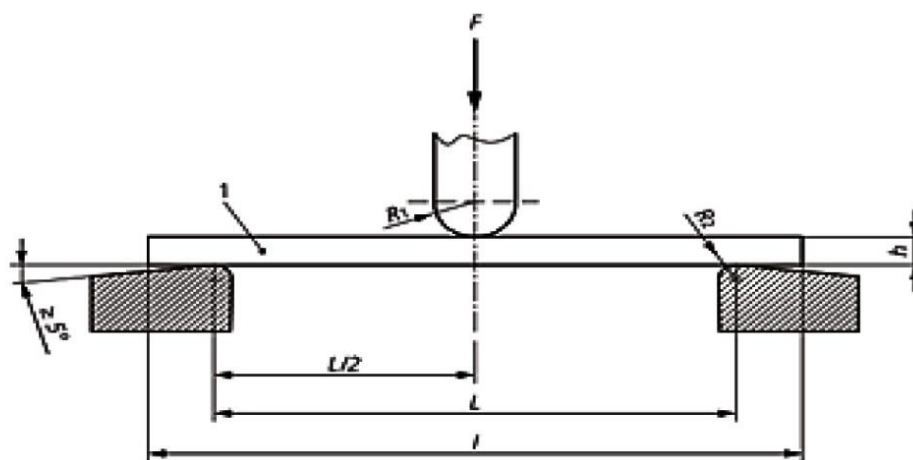
A virtuális modellvizsgálatok célja az optimális rétegrend megkeresése, három rétegű 3D nyomtatott elemek részére, különböző mintázat és kitöltöttség beállítások variálásával. Az előzőekben bemutatott kutatásaim alapot adtak a pontos és valóság-hű anyagtulajdonságokon alapuló működő mechanikai modell megalkotásához. Ezt követően virtuális hajlítási vizsgálatokat 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 kitöltöttségekhez a legnagyobb fajlagos teherbírású elemhez tartozó szendvicsmag és héj optimális arányát.

3.2.1. A vizsgálat 3D modellje és 2D megfelelője

Kvázistatikus azaz nyugalmi állapotban modellezem, mivel a szakítóvizsgálat sebessége nem teszi szükségessé a dinamikus modellezést. Mivel a keresztmetszet állandó és a széleken lévő héj hatásától eltekintünk, továbbá a szabványvizsgálat típusa is lehetővé teszi, az anyagot két dimenzióban modellezem, így sokkal gyorsabban juthatok ugyanolyan pontosságú eredményekhez.

A 3.9. ábrán látható ISO 178 szabvány figyelembevételével terveztem meg a végeelem módszerben alkalmazott hasábot. A kép alapján hoztam létre a maximális feszültség megállapításához szükséges további peremfeltételeket a program lefuttatásához. A szabványhasáb méretei a következő képen láthatóak. Hosszúság 80 mm, szélesség 10 mm és a próbadarab vastagsága 4 mm.



3.9. ábra ISO 178 szabvány szerinti hajlítás ábrázolása

A rugalmassági modulusok pontos kimérése után, az alábbi szendvics hasábot hoztam létre Ansys Workbench programban (3.10. ábra).



3.10. ábra A vizsgált próbatest 3 dimenziós szemléltetése.

A hasábot mérésenként különböző rétegek, mintázatok és kitöltöttségek variálásával vizsgáltam, teljesen megegyezően az előzőekben alkalmazott beállításokhoz. Azaz a kísérletben a külső réteg minden esetben 100%-os és rectilinear mintázatú, továbbá a belső rétegek az előző vizsgálatokra alapozva; concentric, rectilinear, honeycomb, Hilbert curve valamint 40, 60, 80 és 100%-os kitöltöttségűek. A 3.11. ábrán látható szendvicsszerkezet halvány szürke részét elneveztem magának a két sötétebb árnyalatú réteget pedig külső héjnak.



3.11. ábra A szendvicsszerkezet szemléltetése

Az ISO 178 szabványnak megfelelően a próbatest magassága állandó, azaz 4 mm a teljes vizsgálat során. A modellezés célja, hogy meghatározzam a kitöltött belső szerkezet vastagságának (v) variálása milyen hatással van a vizsgált próbatest tulajdonságaira.

3.2.2. Anyagjellemzők

A kísérlet során három anyagjellemzővel dolgoztam. Ezek közül a modell futtatásához szükséges bemeneti paraméterek, az extenzométerrel mért rugalmassági modulus értékek és a Poisson-tényezők. Az eredmények kiértékelésnél pedig a szakítószilárdsági értékeket használtuk fel a 3.3. táblázat szerint.

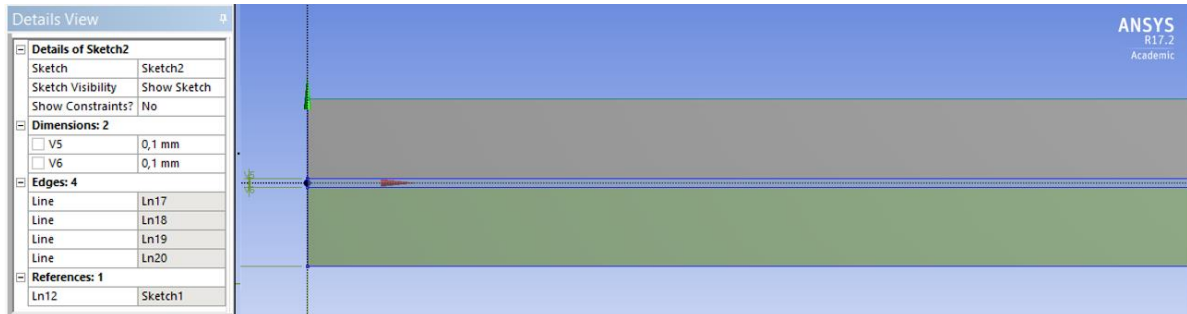
Kitöltöttség/ Mintázat	40%		60%		80%		100%	
	Névleges rugalmassági Modulus érték [MPa]	Szakítószilárdsági érték [MPa]	Névleges rugalmassági Modulus [MPa]	Szakítószilárdsági érték [MPa]	Névleges rugalmassági Modulus [MPa]	Szakítószilárdsági érték [MPa]	Névleges rugalmassági Modulus [MPa]	Szakítószilárdsági érték [MPa]
Concentric	1930	32,41	2560	39,03	2970	43,26	3080	55,37
Hilbert curve	990	16,85	1650	21,06	2280	24,08	3370	50,16
Honeycomb	1660	25,05	1610	30,29	2730	44,84	-	52
Rectilinear	1120	24,28	1580	31,51	2840	38,50	3420	55

3.3. táblázat Szakítószilárdság és rugalmassági modulus értékek

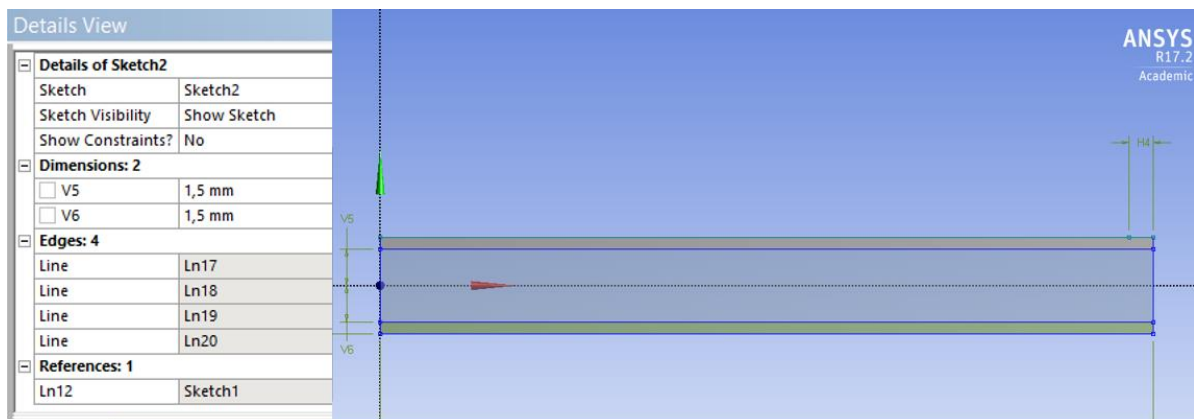
A 100%-os Honeycomb nyomtatása nem lehetséges, a szakítószilárdsági értékek meghatározásához a gyártó által megadott fröccsöntött nyers darab adatait vettem figyelembe. A próbatestek keresztmetszete 40 mm².

3.2.3. Szimulációs vizsgálatok módszere

A kísérleti próbatest teljes vastagsága minden vizsgálatnál konstans, a szabvány szerinti 4 mm. A belső magot 15 lépésben 0,2 mm-ről 3mm-re növeltem. A 15 db belső szerkezeti módosítást 0,1 mm lépéssel változtattam, a 3.12 és 3.13. ábrákon látható módon.



3.12. ábra. A 0,2 mm-es magvastagságú geometriai modell



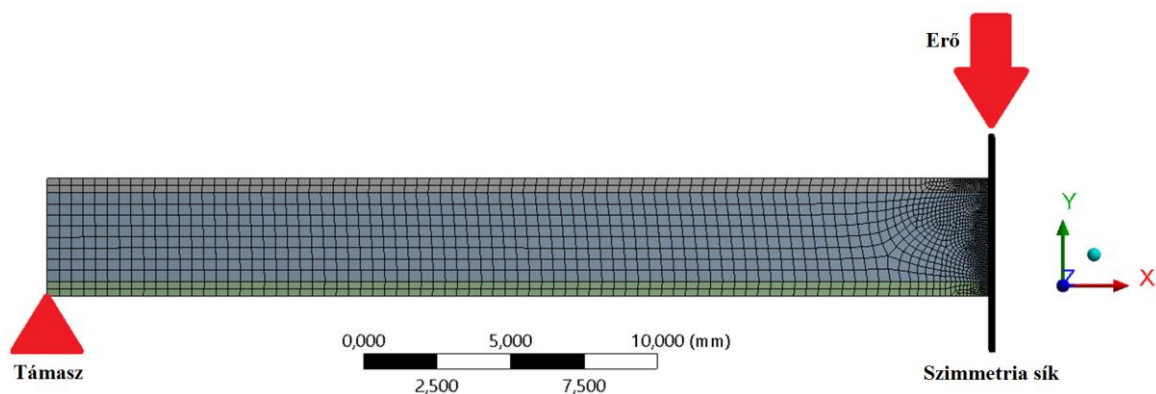
3.13. ábra A 3 mm-es magvastagságú geometriai modell

A négy minta és négy kitöltés kombinációjával 15 magvastagság változtatással vizsgáltam a külső és belső réteg maximális feszültségeit.

A modellezés célja, hogy megtaláljam azokat az optimális paramétereket, amelyek a legnagyobb fajlagos terhelhetőséget biztosítják egy 3D nyomtatott szendvicsszerkezetű hajlított darab számára. A kutatás további célja a magvastagság változtatásának hatása a gyártmány tulajdonságaira. Amennyiben a mag a beállított minimális beállítási értéke 0,2 mm, a héj vastagsága 3,8 mm (1,9 mm mindkét oldalon). Míg a maximális 3 mm-es magvastagságnál beállításnál, a héj 1 mm lesz (0,5 mm mindkét oldalon), és így tovább a többi vastagsági értékek között. A számított 450 db eredmény az M5 mellékletben található.

3.2.4. Peremfeltételek

A vizsgálat során szabvány szerinti két támaszú három pontos hajlítást alkalmaztam, amit a 3.9 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 középen – a szimmetriatengelyen – a vízszintes elmozdulás értéke zérus. Az ISO 178 hajlítási szabvány vizsgálati módszere és a végeelemes modell hálóját a 3.14. ábrán látható. A végeelemes háló 6480 csomópontot és 2069 elemet tartalmaz. A hálóelemek négyszögletesek, méretük 0,05 és 0,5 mm között változik. Nagyságuk 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.



3.14. ábra A szendvicsszerkezet modell hálóját

3.3. Végelemes modellvizsgálatok gépelemre

Szendvicsszerkezetű alkatrész esetében a felületi réteg vesz részt a kopás folyamatában. Viszont a kopás hatását erősen befolyásolja a felületi nyomás és csúszás, amire a mélyebb rétegek is hatással vannak. Ebben a munkaszakaszban azt vizsgálom, hogy milyen hatása van a külső réteg vastagságának az érintkezés környezetében kialakuló mechanikai viszonyokra.

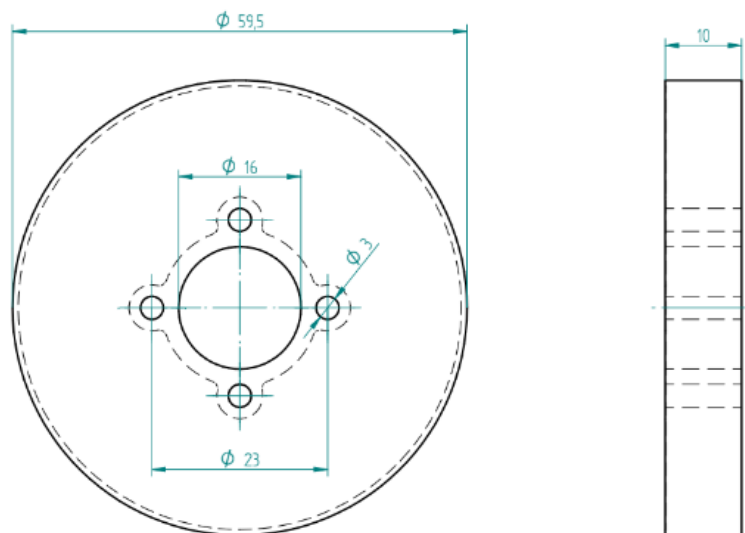
Mivel ezek közvetlen hatással vannak a tribológiai jellemzőkre, így azt feltételezem, hogy a kapott eredmények a valós tribológiai tulajdonságokat is meghatározzák.

Az előzőekben összefoglaltakat kísérletekkel igazolom.

Feltételezem, hogy van egy olyan határértéke a rétegvastagságnak, amely esetében a további növekedés már nem okoz változást a tribológiai tulajdonságokban, ezt minimális rétegvastagságnak nevezem. A virtuális modellvizsgálataim célja a minimális rétegvastagság megtalálása három rétegű 3D nyomtatott elem különböző mintázatok és kitöltöttségek esetén. Ezen modellvizsgálatok lényeges mutatója, hogy a próbaterheléssel kapott feszültségek és deformációk milyen változásokat mutatnak a rétegvastagság függvényében. Az előzőekben alkalmazott ANSYS Workbench R17 típusú szoftvert, azon belül a statics structural modult futtattam a gépelem modellezéshez. A vizsgálatokkal az adott kitöltési mintákhoz és kitöltéshez tartozó normál feszültséget, redukált feszültséget és a deformáció komponens értékét határoztam meg.

3.3.1. A vizsgálat 3D modellje és 2D megfelelője

A gépelem megválasztásánál fontos szempont volt, hogy könnyen alkalmazható legyen az eredményeket validáló tribológiai vizsgálatoknál. A MATE Tribológiai laboratóriumában lévő mérőpad kiválóan alkalmas 60 mm átmérőjű görgők vizsgálatára ezért a 3.15. 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.



3.15. ábra A vizsgált PLA görgő geometriai méretei

Az előző beállításokkal megegyezően a héjszerkezet minden esetben 100% rectilinear mintázatú. A hajlítási vizsgálatok esetében optimális eredményeket produkáló 40%-os belső kitöltöttséget vizsgálom honeycomb mintázattal. A 3D nyomtatás paraméterei megegyeznek az előző fejezetben ismertetett szabványos próbatestek nyomtatási paramétereivel.

A görgő háromdimenziós képét a 3.16. ábrán mutatom be. A 3.17. ábrán látható görgőszerkezet halvány szürke részét elneveztem magának a sötétebb árnyalatú réteget pedig külső héjnak.



3.16. ábra A szendvicsszerkezetű görgő 3D szemléltetése

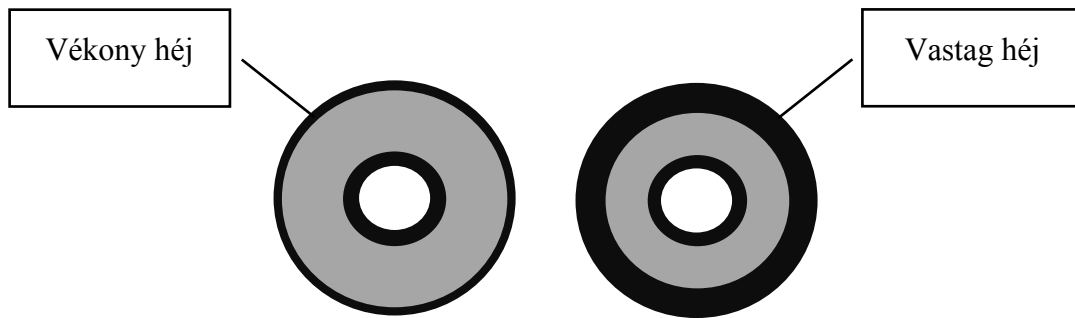
A gépelem befoglaló méretei állandóak a teljes vizsgálat során. A modellezés célja, hogy meghatározzam a külső héj vastagságának (v_k) változtatása milyen hatással van a vizsgált próbatest tulajdonságaira.

3.3.2. *Anyagjellemzők*

A 3.2.2 fejezetben bemutatott anyagjellemzőket alkalmaztam ebben a vizsgálatban is. Mivel ugyanazokról az anyagokról van szó az előzőekben teljesen megegyező beállítással futtattam a modellt. Az anyagjellemzőket az előző fejezet 3.3-as táblázatban bemutatott értékekkel alkalmaztam.

3.3.3. *Szimulációs vizsgálatok módszere*

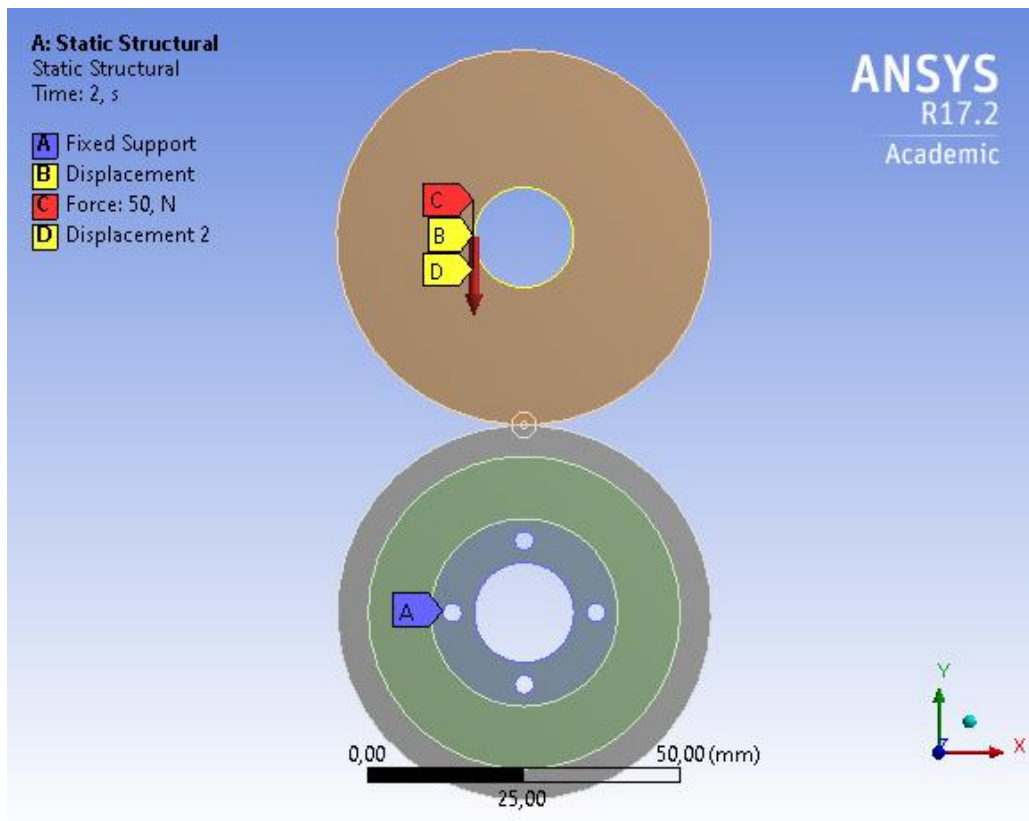
A héjvastagság vizsgálata során a görgők 40 százalékos mag kitöltöttséget és a korábban ismertetett négy féle mintázat variációt kaptak. A beállításokat követően, hét lépéses héjvastagság variálásával vizsgáltam a normál feszültség, redukált feszültség és a deformáció komponens értékeit. A modellezés célja, hogy megtaláljam azt a héjvastagságot, amely fölött már felesleges további anyagot használni az adott gépelem legyártásához és funkciójának betöltéséhez. A vizsgálatok során alkalmazott héjvastagság: 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4 és 5 mm. A héjvastagság szemléltetése a 3.17. ábrán látható, bal oldalon az 1,5 mm míg jobb oldalon az 5 mm héjjal rendelkező próbatest.



3.17. ábra A héjvastagság beállításának szemléltetése

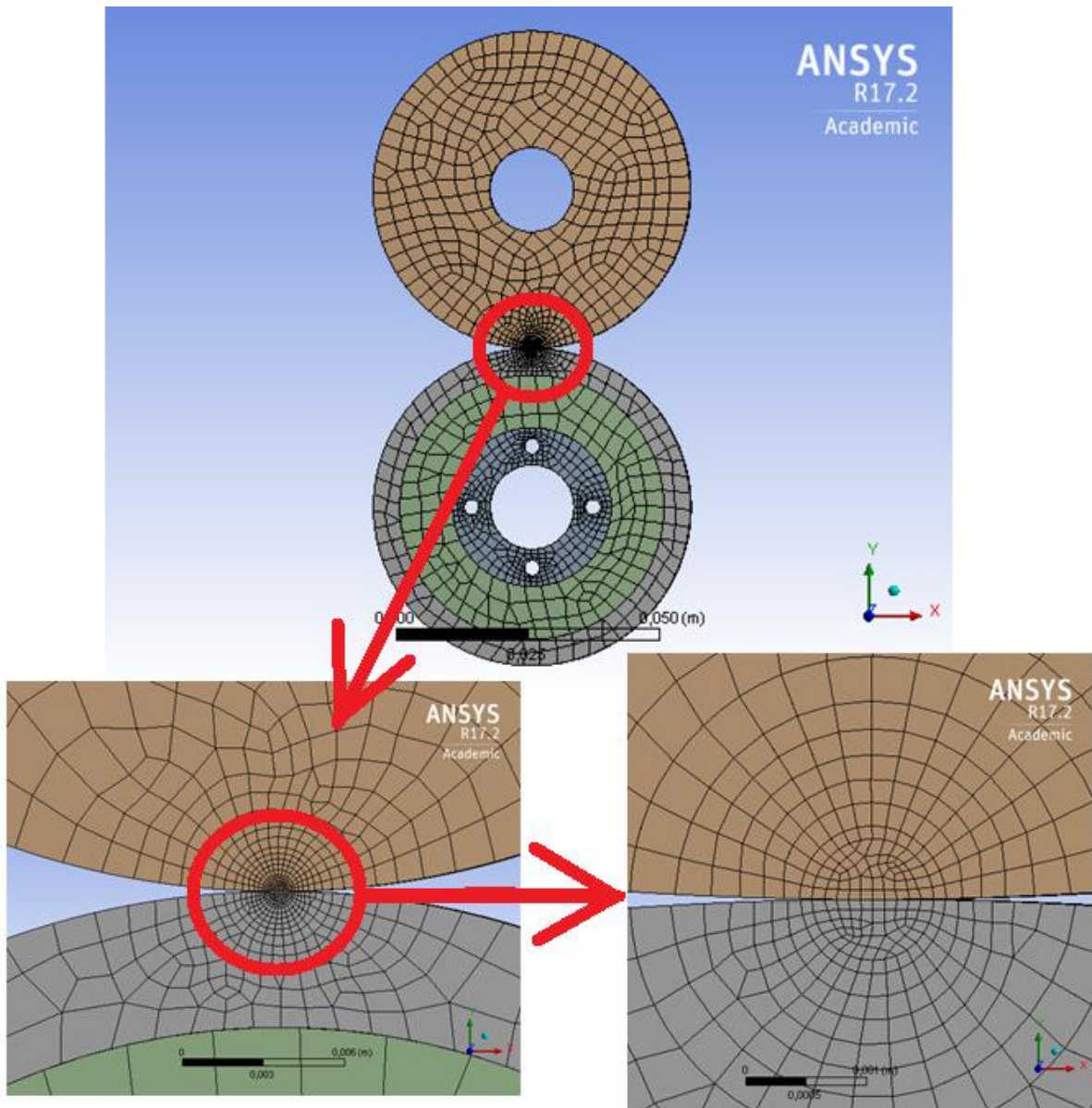
3.3.4. Peremfeltételek

A vizsgálat során a 3.16. ábrán szemléltetett görgőt alkalmaztam. A görgő a 3.18. ábra szerinti megtámasztásra, megvezetésre került. Az előzőekben alkalmazott próbaterhelést alkalmazva alakítottam ki a vizsgálat modelljét. A vizsgált görgőt 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 görgőket 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.



3.18. ábra. Alkalmazott támaszok és erők

A 3.19. ábrán látható az elkészült végelem modell. A végeleemes háló 4832 csomópontot és 1464 elemet tartalmaz. A hálóelemek négyszögletesek és méretük az előzőekben alkalmazottak szerint 0,05 és 0,5 mm között változik. Nagyságuk 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.



3.19. ábra A végelem háló szemléltetése

3.4. 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 vizsgálataim következő lépése. A mérésekhez használt berendezéseket a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem gödöllői Műszaki Intézet, Anyagtudományi és Gépipari folyamatok tanszék biztosította. A 3.20. ábrán látható berendezés az egyetem által továbbfejlesztett ikertárcsás mérőeszköz.



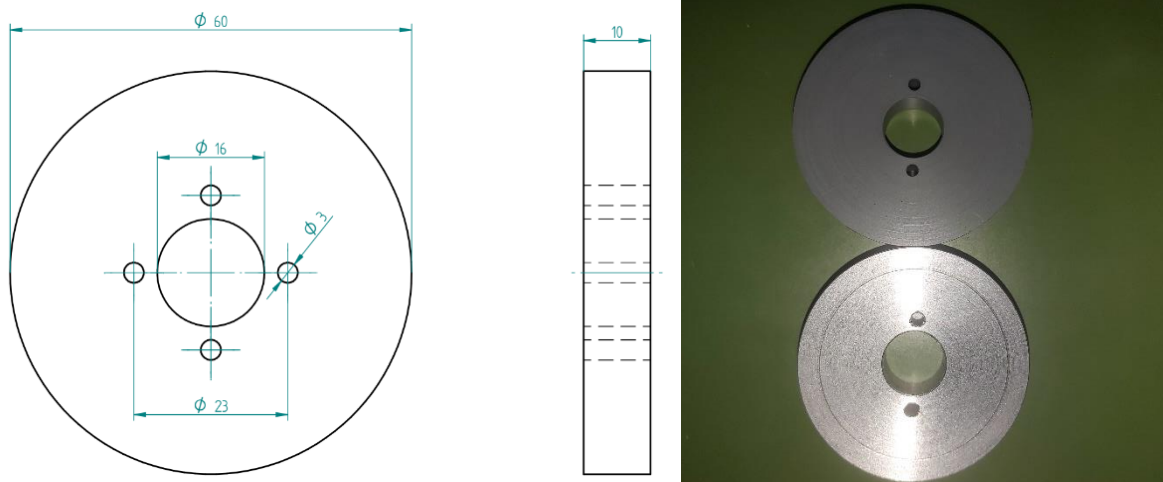
3.20. ábra Az ikertárcsás elven működő hajtásvizsgáló berendezés

3.4.1. A vizsgált gépelemek paramétereit

Acél görgő geometria

A vizsgálatok során az egyik görgő alapanyaga S375 szerkezeti acél. A gépelemeket forgácsolással állítottam elő, amelyet a 3.21. ábrán szemléltetnek. Az illeszkedő felület a központi furat és ehhez képest a külső felület ütésmentes a gyártási pontosságon belül. ($\pm 0,03$ mm).

Acél görgő geometriai méretei $D= 60$ mm, $s_g= 10$ mm



3.21. ábra Műhelyrajz és fénykép az acél görgőről

Polimer görgő geometria

A kapcsolódó polimer görgők felfogatási furatai és osztóköréi teljesen megegyeznek, különbség csak a külső gördülő héjvastagság méreteinél fordul elő. A polimer görgőket 3D nyomtatással készítettem. A kitöltés 40% honeycomb, ami a mechanikai mérésekből adódott.

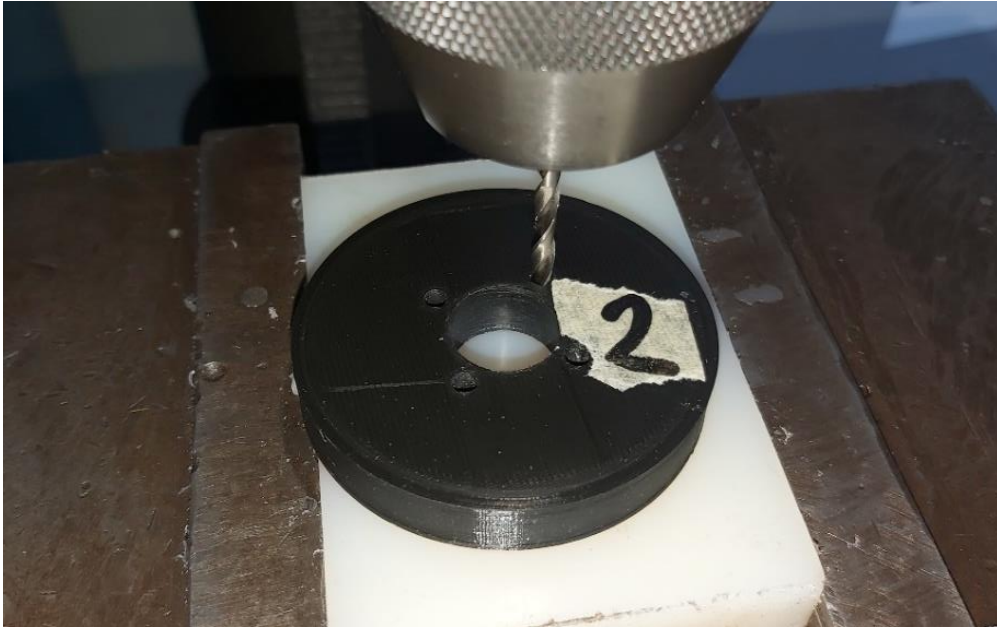
A FDM nyomtatás után a geometriai eltéréseket javítanom kellett. A görgő furatait után kellett munkálni, hogy a tribológiai vizsgáló berendezésre fel tudjam helyezni. A görgő érintkező felületét esztergálással hengeressé javítottam, hogy a gördülés érintkezési állapota megfelelő legyen, valamint így állítottam be a megfelelő héjvastagságot.

1. megmunkálás művelet, központi furat dörzsárazás, amely a 3.22. ábrán látható. Az alakpontosság és méretpontosság miatt volt szükség a furat dörzsárazására. A furatátmérő alpmérete $D=16$ mm.



3.22. ábra Polimer görgő központi furat dörzsárazása

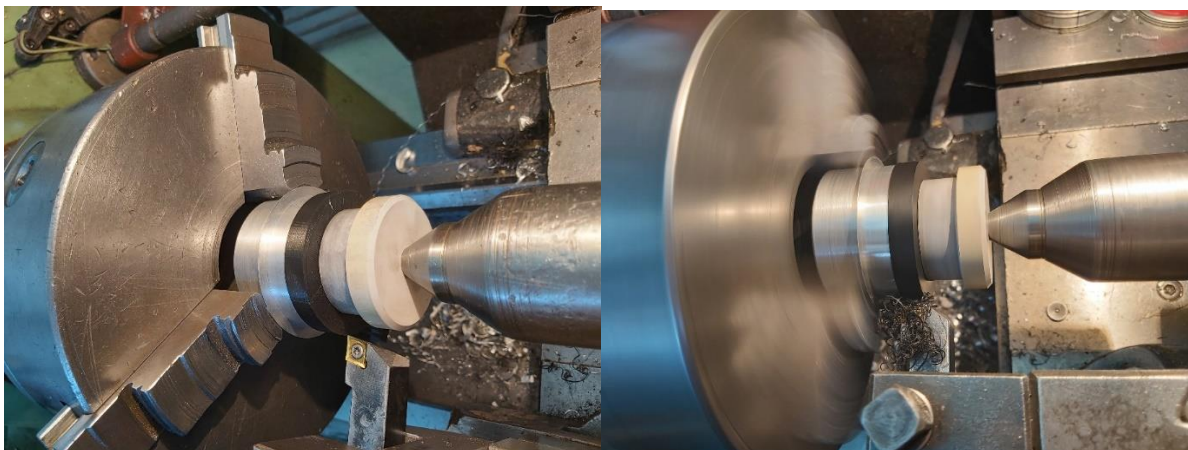
2. megmunkálás művelet, hajtásátviteli furatok fúrása (3.23 ábra). A furatok mérete $D=3,5$ mm



3.23. ábra Polimer görgő hajtásátviteli furatok felfúrása

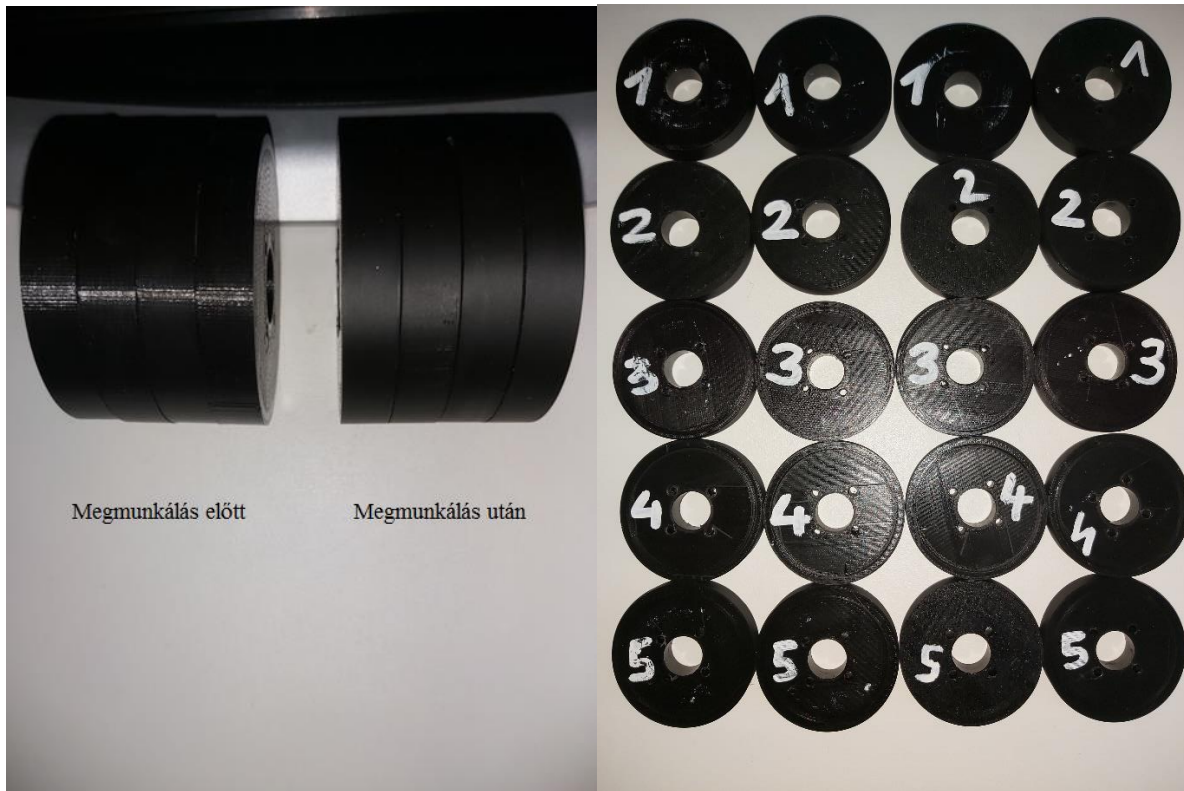
3. Külső gördülési átmérő esztergálása

Az esztergáláshoz E400-as eszterga gépet használtam, és a megfogáshoz egy felfogó készüléket kellett készítenem, anyaga alumínium. Ezzel a központi furaton illesztettem a polimer görgőt, így a furathoz képest munkáltam meg a külső átmérőt. A megmunkálás során figyeltem a forgácsolás paramétereinek megfelelő beállítására azért, hogy a forgácsolt felület jellemzői hasonlóak legyenek a FDM nyomtatással előállított felület jellemzőihez. Ezt az állapotot az előtolás megfelelő beállításával valósítottam meg (3.24. ábra).



3.24. ábra Polimer görgő gördülő átmérőjének esztergálása

A megmunkálás után a 3.25. ábra mutatja az elkészült polimer görgőket. az átmérőjük $D=59,5$ mm, így adta ki a teljes hengeres felületet. Így az acél átmérőjét is ennek megfelelően módosítottam 59,5 mm-re.

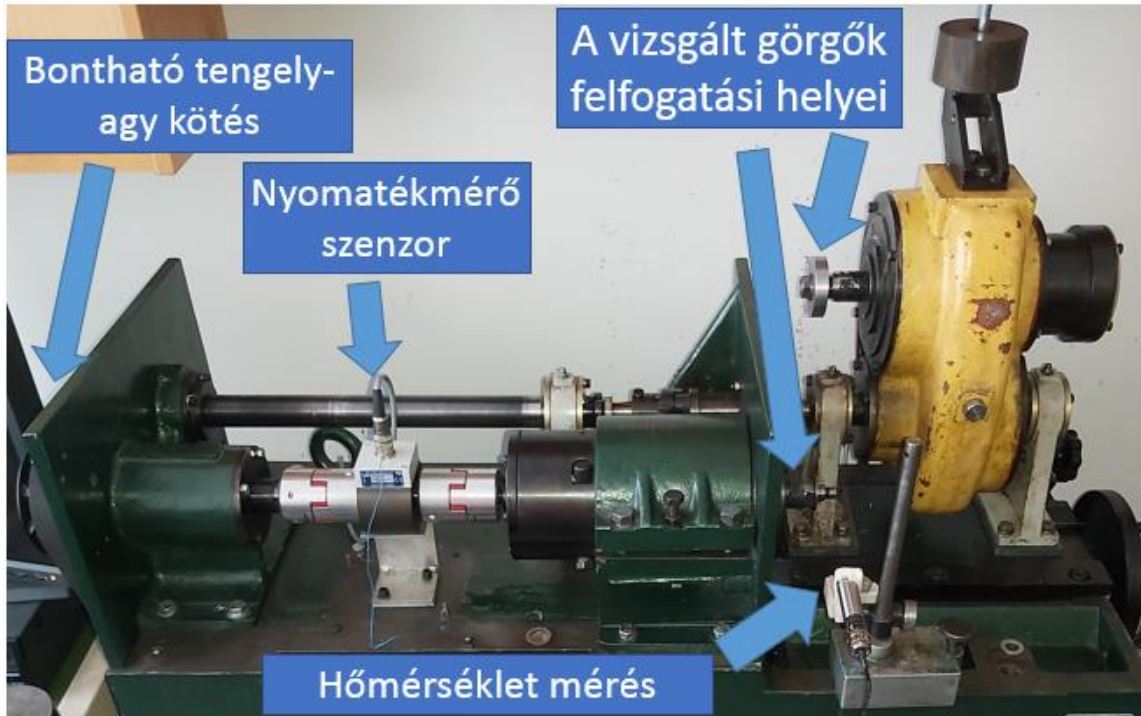


3.25. ábra Fénykép a görgőkről megmunkálás után

3.4.2. Tribológiai hajtásvizsgálati berendezés

A görgők közötti hajtás vizsgálatára általános módszer az ikertárcsás rendszer, amelyet részletesen bemutattam az irodalomfeldolgozás 2.7.1. fejezetében. A mérésekhez alkalmazott hajtásvizsgálati berendezés a MATE-Műszaki Intézet fejlesztése. Működési elve és felépítése szinte teljesen megegyezik az ikertárcsás rendszerrel. A vizsgálóberendezés lehetővé teszi gépelemek kopás vagy akár élettartam vizsgálatát közel állandó terhelés mellett. (3.26. ábra). 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 ezen szoftver segítségével kerülnek feldolgozásra, illetve mentésre. A motor bekapcsolásával a két párhuzamos tengely meghajtásra bordásszíjhajtás segítségével történik. A feszes szíjághoz tartozó párhuzamos tengelyhez kapcsolódik a hajtó, vizsgált görgő.

Ezen tengely közepe nyomaték mérő szenzorral van ellátva, a tengely másik vége pedig a hajtóműben helyezkedik el. A szíj forgatja meg a hajtott görgőket, amely a hajtóművön keresztül kapcsolódik a másik párhuzamos tengelyhez. A Spider 8 típusú mérőerősítő adatfeldolgozásával és valós idejű monitorozásával szolgálja az információkat a Catman szoftver részére. A négy vizsgálati paraméter folyamatos mérése, a Catman szoftver, a HBM Spider 8 és a Calex PCCFMT-O-3M infrahőmérő egyidejű mérési adatgyűjtő rendszer segítségével valósul meg.



3.26. Ikertárcsás elven működő hajtásvizsgáló berendezés felépítése

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.

3.4.3. Felületi érdesség mérési módszere

A felületi érdesség vizsgálatokat a MATE Műszaki intézet tribológiai laboratóriumában található Mitutoyo SurfTest SPJ-201 típusú érdességmérő berendezéssel végeztem, kiegészítésként a Mitutoyo oszlopos mérőállványt használtam (3.27. ábra).



3.27. ábra Érdességmérő berendezés

A Surftest SPJ-201 hordozható mérőműszer, amely lehetővé teszi a felületi érdesség egyszerű és pontos mérését. A készülék különböző nemzetközi szabványoknak (EN ISO, VDA, ANSI, JIS) és egyéni beállításoknak megfelelő érdességelemzéseket végez, továbbá különböző illesztőprogramok bővítik az alkalmazási kört. A számítási eredmények mellett, értékelt profilok, csapágy- és amplitúdó görbék jeleníthetők meg. A méréseket az ISO 4287:1997 szabvány szerint végeztem. A mérési hosszként 5 millimétert állítottam be. 2CR75 szűrési beállítások mellett az R profilt mértem.

Érdességi jellemzők, mint kimeneti paraméterek közül; R_a , R_z és R_q

ahol:

R_a = átlagos felületi érdesség,

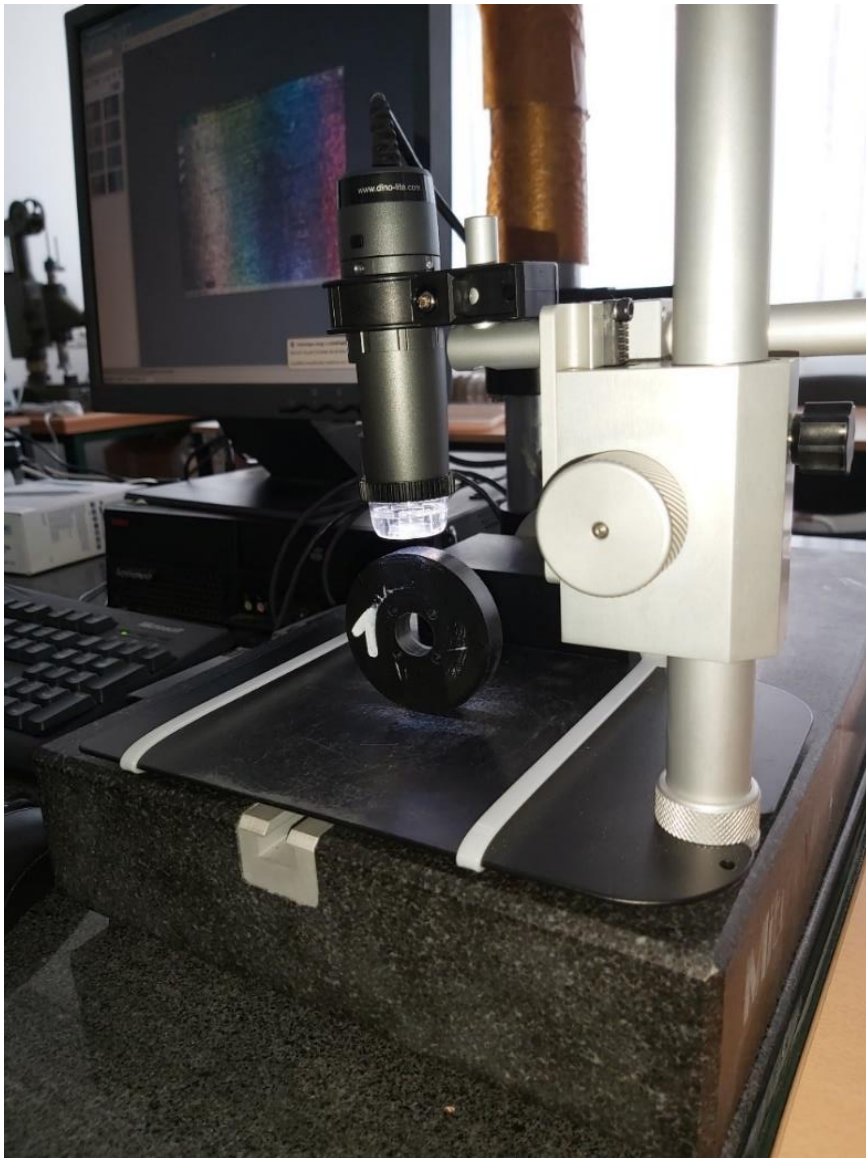
R_z = az egyenetlenség magasság,

R_q = a simasági mérőszám.

Az adatokat a vezérlőn keresztül asztali számítógép segítségével jegyzőkönyv formájában Excel táblázatba gyűjtöttem.

3.4.4. Mikroszkopikus vizsgálatok

A Dino-Lite Edge 1,3MP AF4915ZT, egy adaptálható interfésszel rendelkező all-in-one készülék, amelyet professzionális alkalmazáshoz terveztek 20-220x teljes körű zoom nagyításon belül (3.28. ábra). 1,3MP színes képalkotó érzékelővel, kiterjesztett mélyszelességgel és automatikus nagyítás leolvasással továbbá beépített polarizációs gyűrűvel rendelkezik. A mikroszkóp integrálja az EDOF, EDR, AMR és FLC funkciókat, valamint az éles képminőséget. A WF-20, egy Wi-Fi streamer csatlakoztatásával a berendezés vezeték nélküli mikroszkóppá alakítható, így a terepi alkalmazások igényeit is kielégíti. A Mikroszkópot 50x-es nagyításra kalibráltam és 50x-es nagyítással készítettem el a felületfotókat. A fotók készítése során polár szűrőt nem használtam.



3.28. ábra Dino-Lite Edge mikroszkóp

3.4.5. A vizsgálatok kiértékelése (Tribológiai mérések eredményei)

Beállítási paraméterek: A vizsgálatok során a kerületi sebességet a lassan forgó görgőknek megfelelően 0,1 m/s értékre választottuk. Ebből a sebesség értékből határoztuk meg a tárcsa fordulatszámát a következő összefüggéssel;

$$n = \frac{v_c}{D \cdot \pi} \quad (2)$$

Az előző fejezetben végeselemes modellezésnél alkalmazott terhelés négyszeresét alkalmaztam, melynek értéke így: 200 N. Ezzel a terhelés növeléssel egy gyorsított tribológiai vizsgálatot végeztem el, amely ahhoz szükséges, hogy a modellezés során kapott eredményeket alátámasszam.

A vezérlőn 2 Hz mérési frekvencia beállítást alkalmaztam, a mérést a görgő tönkremenetelig végeztem. A mért értékek nyomaték, hőmérséklet.

Kontakt jellemzők:

	Acél görgő	PLA
Poisson tényező	0,3	0,33
E modulus	210000 MPa	3600 MPa
görgő sugár	30 mm	29,75 mm
görgő szélesség	13 mm	10 mm

3.4. táblázat Görgő anyagok jellemzői

4. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben mutatom be a kutatási területem mechanikai, szimulációs és tribológiai vizsgálatok során elért új tudományos eredményeit.

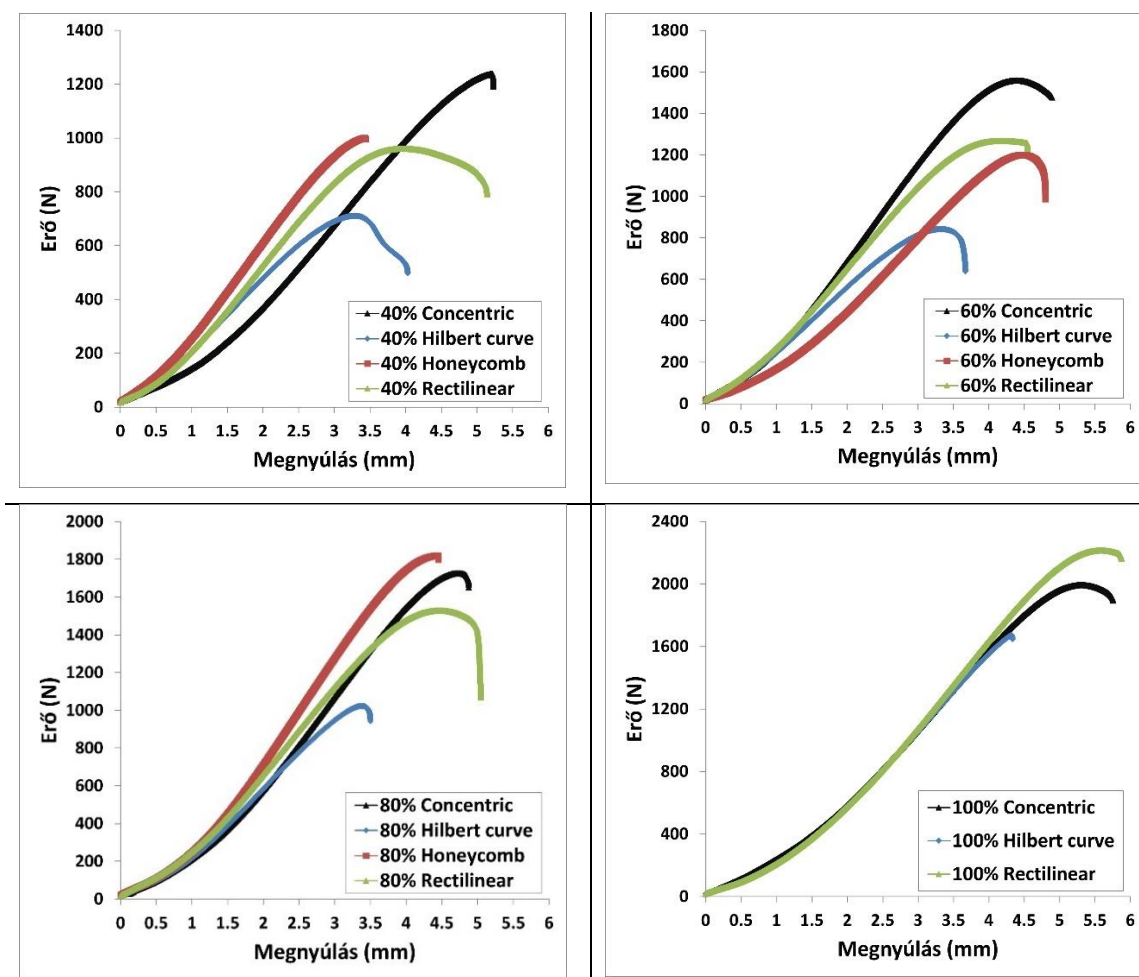
4.1. Szakítószilárdsági vizsgálatok eredményei

A három ismétléses szakítóvizsgálat közel azonos eredményei egyaránt alátámasztják a gyártó berendezés megbízhatóságát és a nyomtatás homogenitását és reprodukálhatóságát. A szakítószilárdsági értékek viszont nagyban eltérnek egymástól a nyomtatási minta és a kitöltés függvényében (4.1. ábra). Az erő megnyúlás vizsgálatokban jól látható, hogy a legnagyobb erőnövekedés 80-100% kitöltés között tapasztalható. A honeycomb minta esetében hiányzik a 100%-os adatsor, itt nincs lehetőség a teljes kitöltés nyomtatói beállításra. Jól látható a mért eredményekből az is, hogy összefüggés van a nyomtatási-szalírányok elhelyezkedésének módja, és a megnyúlások mértéke között. A különböző kitöltöttségű concentric próbatestek esetén a függvények meredeksége nem tér el nagymértékben. Azonban a 40, 60, 80 és 100%-os Hilbert curve kitöltésű próbatestek összehasonlításánál a lineáris trendvonalak egyenletén egyértelműen kiolvasható a meredekségek különbözősége. A Hilbert curve mintázatok esetében bármilyen kitöltést vizsgáltam; feleakkora szakítószilárdságra képes, mint egyéb mintázatoknál. Az eredményekből az is látható, hogy a concentric minta kivételével minden más mintázat nagymértékű különbözőségeket produkál. Az eltérések oka valószínűleg az egymással szöget bezáró anyagszalak csomópontjain kialakuló többletfeszültségek, melyek egyes kitöltéseknél gyengébb eredményt hoznak. A húzási sebesség növelésének vizsgálata során bebizonyosodott, hogy az anyag képes ellenállni dinamikusabb terheléssel szemben. Összességében kijelenthető, hogy a szakító vizsgálatok alapján a concentric és honeycomb mintázat bizonyultak a legjobbnak. A szakítóvizsgálatok értékei közötti legkisebb eltérést, azaz a legegységesebb teherbírást a rectilinear kitöltési minta mutatja. A szakítóvizsgálatok célja nem a konkrét értékek elérése, hanem az eredmények egymáshoz hasonlítása, mely iránymutatást ad a további kutatás előremenetében. Szignifikáns eredményeket jelen esetben a concentric és a honeycomb első csoportjába tartozó 40 százalékos térkitöltöttség mutatja.

A térkitöltés függvényében a teherbírás változása

Az adatsorok bemutatását erő-megnyúlás vonaldiagramok formájában ábrázoltam. A szakítógéppel tárolt mérési pontok (eredmények száma) mintánként és kitöltésenként nagyban különböznek. A mérés pontonkénti eredményeinek száma 1900-3800 között mozognak, tehát a 35-40 ezer kapott érték a 4.1. ábrán szemléltetve sokkal egyszerűbb és átláthatóbb. Az eredmények átlagát minden vizsgált és kitöltés esetében bemutattam az alábbi színekkel jelölve: concentric=fekete, Hilbert curve=kék, honeycomb=piros, rectilinear=zöld. A diagramok alapján kijelenthető, hogy a megnyúlásban a legjelentősebb befolyásoló faktor a térkitöltöttség, továbbá a kitöltés és mintázat hatására nagymértékben változik a teherbírás.

4. Eredmények



4.1. ábra Szakitódiagramok ábrázolása térkitöltésenként (40,60,80,100%)

Mintázat/ Kitöltöttség	40%	60%	80%	100%
Concentric	1296,25 N	1561,14 N	1730,25 N	1660,25 N
Hilbert curve	673,87 N	842,59 N	963,38 N	2006,47 N
Honeycomb	1002,19 N	1211,77 N	1793,72 N	2080 N
Rectilinear	971,15 N	1260,55 N	1539,99 N	2198,91 N

4.1. táblázat A szakításhoz szükséges erő méréseinek átlaga

A diagramokból megfigyelhető, hogy az erő és a megnyúlás közötti értékeket meglehetősen befolyásolják a különböző 3D nyomtatási beállítások. Általánosságban elmondható, hogy a kitöltés mértéke a töltésmintától függetlenül növelte a próbatestek szilárdsági értékeit. Az erő megnyúlás diagramokból látható, a concentric és a rectilinear minták egymástól függetlenül szinte azonos értékeket adtak minden vizsgált kitöltésnél.

4. Eredmények

Megfigyelhető, hogy a Hilbert curve kitöltése eredményei jelentősen elmaradnak a többi mintához képest. A honeycomb próbatestek 60 és 80%-os kitöltési aránynál közel annyira megnyúltak, mint a rectilinear és a concentric minta.

A honeycomb szerkezet 40%-os kitöltési aránynál azonban rideg viselkedést mutatott (sokkal kisebb a nyúlás). Az eredményekből következik, hogy mind a kitöltési minta, mind a kitöltöttség mértéke jelentősen meghatározza az anyag mechanikai tulajdonságait. Mindazonáltal az eredmények azt mutatták, hogy a kitöltési arány paramétere nagyobb hatással van a nyúlási képességre, mint a belső szerkezet mintázata.

A valós szakítószilárdság értékét a következők szerint számoltam:

$$\sigma_v = \sigma_o \cdot i \quad (3)$$

ahol: σ_v - valós keresztmetszetre számított szakítószilárdság,

- σ_o - teljesen kitöltött keresztmetszetre számított szakítószilárdság,
- i - térkitöltés.

A fenti adatok alapján a következő eredmények mutatják a valóságos szakítószilárdság értékét:

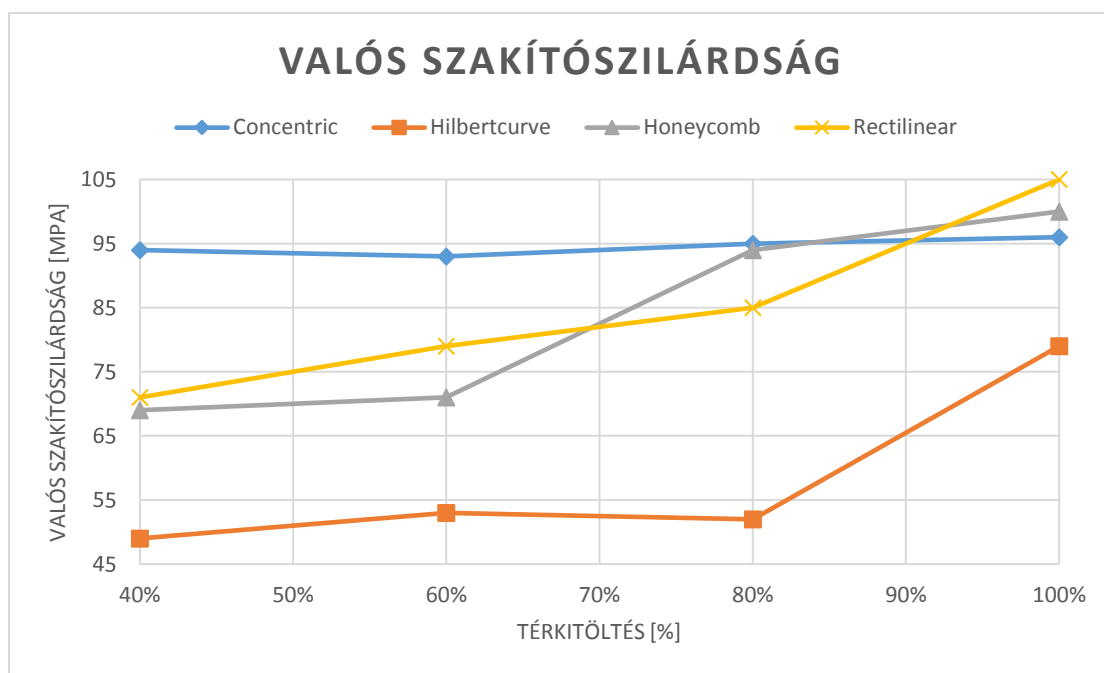
$$\frac{\sigma_M}{\sigma_v} \cdot 100 = [\%] \quad (4)$$

ahol:

- σ_M - maximális szakítószilárdság,
- σ_v - valós keresztmetszetre számított szakítószilárdság.

Kitöltöttség/ Mintázat/	40%	60%	80%	100%
Concentric	1296,25 N	1561,14 N	1730,25 N	1660,25 N
Hilbert curve	673,87 N	842,58 N	963,38 N	2006,47 N
Honeycomb	1002,19 N	1211,77 N	1793,72 N	2080 N
Rectilinear	971,15 N	1260,55 N	1539,99 N	2198,91 N
Kitöltöttség/ Mintázat/	40%	60%	80%	100%
Concentric	32,41 MPa	39,03 MPa	43,26 MPa	55,37 MPa
Hilbert curve	16,85 MPa	21,06 MPa	24,08 MPa	50,16 MPa
Honeycomb	25,05 MPa	30,29 MPa	44,84 MPa	52 MPa
Rectilinear	24,28 MPa	31,51 MPa	38,50 MPa	54,97 MPa

4.2. táblázat Adott keresztmetszetre vonatkoztatott valós szakítószilárdság és a szakító erő



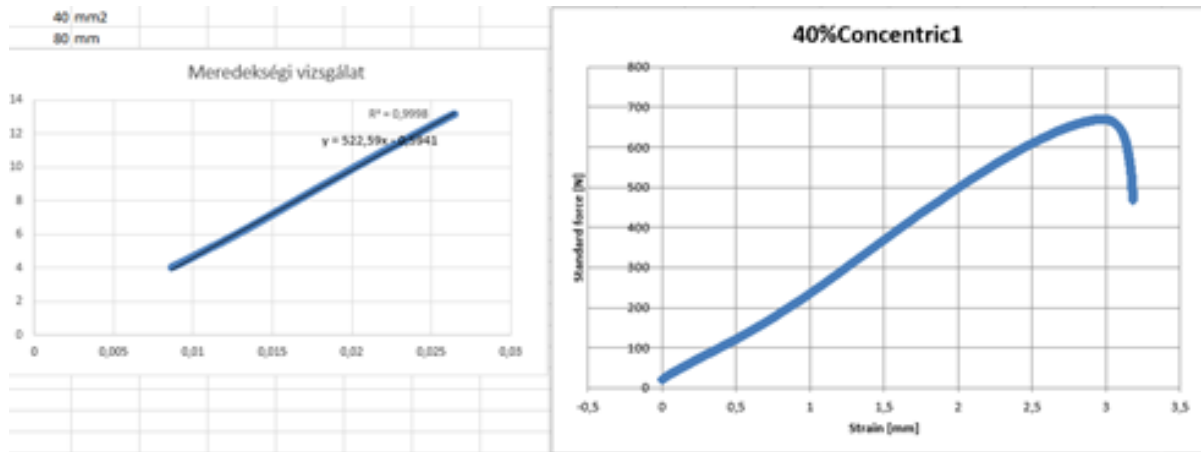
4.2. ábra Valós szakítószilárdság értékek diagramja

A valós szakítószilárdság értékeit (4.2. táblázat) a térkitöltés függvényében ábrázoltam a 4.2. ábrán. A szakítószilárdság a kitöltési arány sűrítésével növekszik. A szürke színű honeycomb nem rendelkezik 100 százalékos kitöltéssel így a továbbiakban a gyártó által megadott fröccsöntött tömör nyers darab adatait vettem figyelembe, amely 52 MPa. A próbatestek keresztmetszete a középső szakaszon 10 mm-4 mm, így a keresztmetszet területe 40 mm^2 tehát a szakításhoz szükséges erő $40 \text{ mm}^2 \cdot 52 \text{ MPa} = 2080 \text{ N}$. Ezen összefüggés alapján határoztam meg a további valós szakítószilárdsági értékeket, amelyek szintén a 4.2. táblázatban olvashatóak. A próbatestek terhelhetőségéből is látszik, hogy a honeycomb és a rectilinear mintázat bizonyulnak a legerősebbeknek. A Hilbert curve minden esetben a leggyengébbnek bizonyult.

4.2. Rugalmassági modulus vizsgálatok eredményei

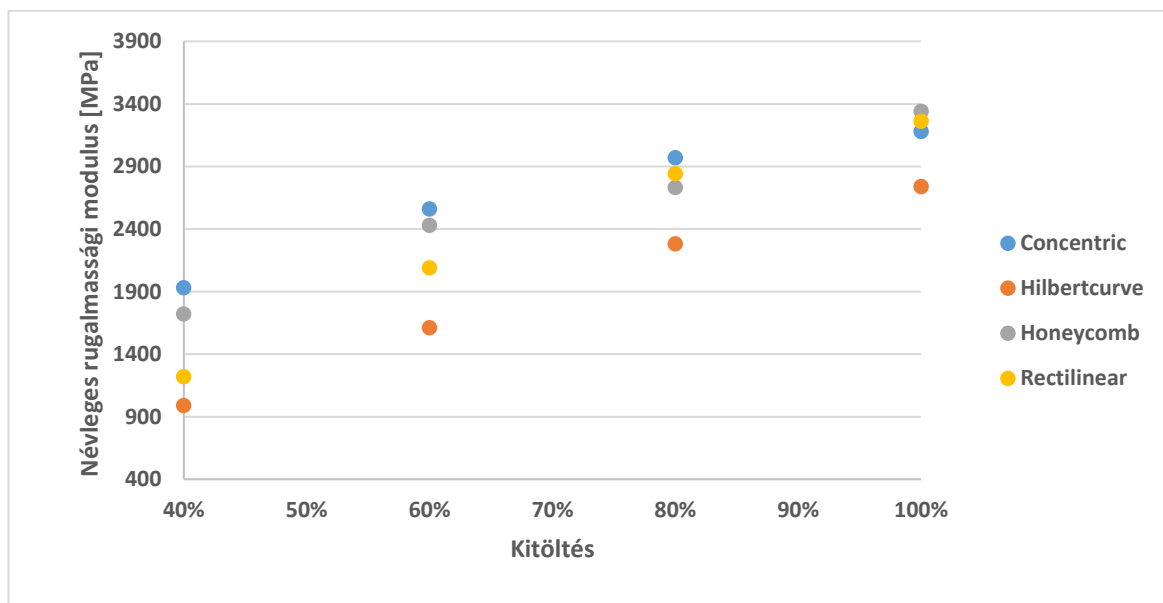
A kitöltöttség optimalizálásával és különböző rétegpárosítás esetén - a rugalmassági modulusok megfelelő alkalmazásával - még hatékonyabbá tehető a 3D nyomtatás. A szakítódiagram egyeneseinek meredekségéből (4.3. ábra) és az eltérő mérési eredményekből (4.2. ábra) pontosan látható a Young-modulusok változékonysága, amelyet számításokkal is igazoltam. Ez ad biztos alapot a rugalmassági modulusok pontos kimérésére. További számításokat végeztem fajlagos nyúlás és névleges feszültség figyelembevételével. A szakítódiagramok rugalmassági zónájában megjelenő egyenes egyenletéből összehasonlíthatóak a rugalmassági modulusok. A szakítódiagramok függvényére illesztett egyenes meredeksége mutatta a mérnöki rugalmassági modulusok értékét, amik megalapozták a következő egyenleteim bemeneti paramétereit.

4. Eredmények



4.3. ábra Egyenes merekségének megállapítása

A 4.3. ábrával szemléltetem az egyenes merekségi vizsgálataim egyik példáját. Az ábrákon a 40% kitöltöttségű és concentric mintázatú próbatest eredmény görbéjének merekségi vizsgálatát mutatom be. A jobb oldali függvény lineáris szakaszára egyenest illesztettem, amely eredményét a bal oldali ábrán szemléltetek. A 4.4. ábrán jól látható a Young-modulusok eltérése különböző mintázatok és kitöltöttségi fokozatok alkalmazásával.



4.4. ábra A mért rugalmassági modulusok ábrázolása

A rugalmassági modulus értékek a kitöltöttség függvényben mutatnak növekvő tendenciát. A kitöltési mintázatok közül a Hilbert curve bizonyult a leggyengébbnek, az eredmények a 4.3. táblázatban láthatóak.

Mintázat/Kitöltöttség	40%	60%	80%	100%
Concentric	1930 MPa	2560 MPa	2970 MPa	3180 MPa
Hilbertcurve	990 MPa	1610 MPa	2280 MPa	2740 MPa
Honeycomb	1720 MPa	2430 MPa	2730 MPa	3340 MPa
Rectilinear	1220 MPa	2090 MPa	2840 MPa	3260 MPa

4.3. táblázat A mért Young-modulusok értékei

A rugalmassági modulus vizsgálatokra gyártott próbatesteken is elvégeztem a szakítóvizsgálatokat. Nagy eltérések továbbra sem tapasztalhatóak a korábbiakhoz képest, tehát az eredmények irányadóak és a mérések hitelesek. Az erő megnyúlás diagramokon feltűnik, hogy a megnyúlások arányaiban nem követték a sűrűbb térkitöltésű test esetében a teherbírás növekedésének arányát, így a függvény meredeksége változott. Különböző rétegek alkalmazásával elérhető a legjobb kitöltöttségi hatás, azonban a tervezési folyamatok elengedhetetlen része a megfelelő rugalmassági modulus párosítás. Minél kevesebbet nyúlik a gyártmány annál kisebb a terhelhetősége. A concentric minta 40 és 60%-os kitöltési százaléknál sokkal erősebbnek bizonyult, mint a többi mintázat próbatestjei. A honeycomb azonban kiválóan teljesített 80%-os kitöltésnél, míg a rectilinear minták 100%-os térkitöltésnél mutatkoztak a legjobbnak. Másrészt a Hilbert curve minta minden esetben a leggyengébb eredményeket mutatta. Ezen minták 40, 60 és 80%-os töltési aránynál csaknem feleannyi húzóerőt voltak képesek elviselni, mint amennyit a concentric mintadarabok. Mindez a szálak lerakódási irányának tulajdonítható, mivel a concentric mintában a szálak többsége hosszirányban orientálódik a gyártás során. Következésképpen több hosszirányú szál a húzóerővel párhuzamosan nagyobb szakítószilárdságot eredményezne. Ezzel szemben más töltésmintáknál a szálak elhelyezkedése nem hosszirányú. Így a szálak irányának eltérése miatt egy adott keresztmetszeten belül nyomtaték alakulhat ki közöttük, és a szálak csatlakozásánál nagyobb feszültség keletkezik. Mindez kisebb erő hatására is nagyobb nyúláshoz, majd töréshez vezetne.

4.3. A végeelem módszer mérési eredményei

4.3.1. Szimulációs hajlító vizsgálat eredmények kiértékelése

A határértékeket a szakítóvizsgálati értékekből határoztam meg. A szakítógépen extenzométerrel mért MSZ_527 próbatest rugalmassági modulus értékeit betápláltam az Ansys peremfeltételei közé. Az ISO 178 hasábnál is ugyanazokat a mintázatokat és kitöltéseket vizsgáltam ezért alkalmazhattam az előző számításokat. Előre nem tudható a szerkezet mekkora erővel terhelhető, ezért a terhelhetőség megállapításához F_1 próbaterhelést alkalmaztam. A próbaterhelés értéke 50 N és ennek következtében alakul ki a σ_1 redukált feszültség. Mivel a rendszer lineáris, ennek függvényében megállapítható, hogy mekkora az a maximális erő, amit elbír a szerkezet. A maximális erő meghatározása pedig:

$$\frac{F_1}{\sigma_1} = \frac{F_{max}}{\sigma_{max}} \quad (5)$$

ebből:

$$F_{max} = F_1 \cdot \frac{\sigma_{max}}{\sigma_1} \quad (6)$$

ahol:

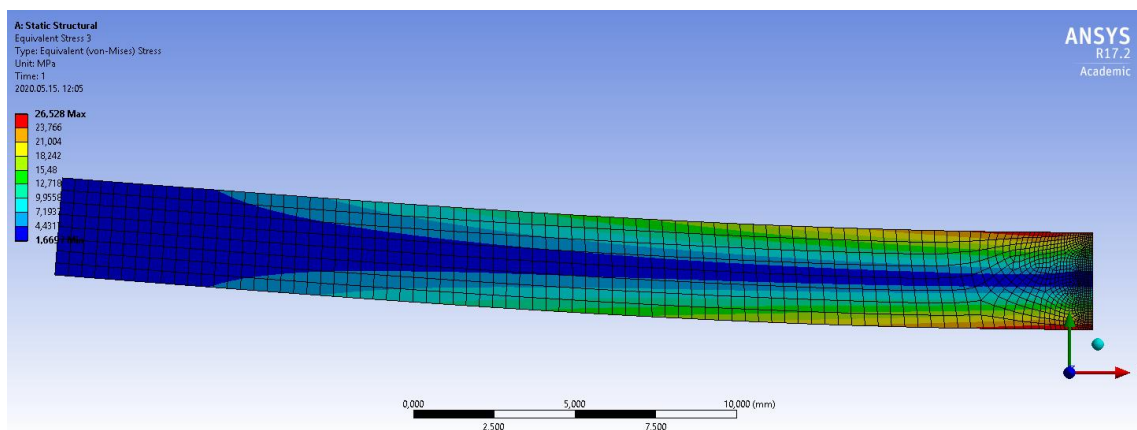
F_1 - kezdeti- vagy próbaterhelés [N],

σ_1 - számított redukált feszültség [MPa],

F_{max} - maximális erő [N],

σ_{max} - szakítószilárdság [MPa],

Az előző mérések során kapott feszültségértékek és a 3D nyomtatási paraméterek (minták és kitöltések) az Ansys beállítási értékei lettek (4.5 ábra). További eredmények az M5 mellékletben található. A belső szerkezeti minta és a térkitöltés paramétereit változtatva mellett, az előző fejezetben ismertetett módon vizsgáltam a szendvicsmintadarab belső (réteg) magjának viselkedését is. Ezt követően a végeelem modellezés eredményei és a mért szakítószilárdságok alapján kiszámítottam a maximális hajlítóerőt minden egyes rétegre.



4.5. ábra Számított redukált feszültség 60% Honeycomb beállítással

A 4.5 ábrán látható végeelem háló egy 60% kitöltöttségű Honeycomb mintázattal és 1,5 mm magvastagsággal rendelkező próbatest modellezése, amelyben a maximálisan keletkező feszültség értéke 26,53 MPa. Az alkalmazott peremfeltételek és a beállítások alapján 225 esetet modelleztem. A feszültség értékeket minden kitöltés és anyagmintázati variáció esetén dokumentáltam. A 8. képlet alapján a 4.6 ábrához tartozó táblázat harmadik oszlopában a héjra számított maximális erő, negyedik oszlopában pedig a magra számított maximális erő értékei olvashatóak. A részletes eredmények az M6 mellékletekben találhatóak. A számított feszültségekből a szakítószilárdság értékek alapján határoztam meg, hogy mekkora erővel

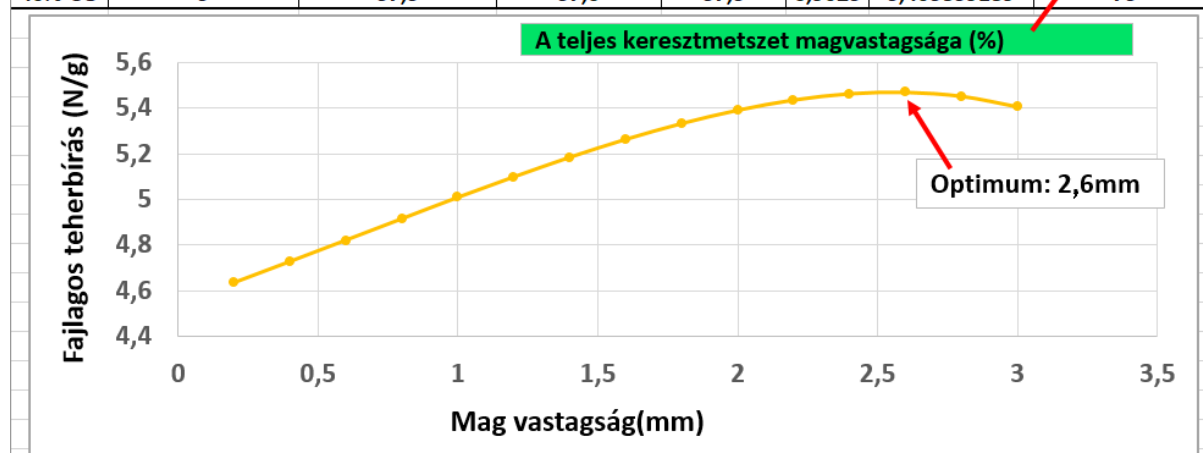
4. Eredmények

terhelhető a próbatest. A táblázat szerinti rétegvastagság (B oszlop) függvényében láthatóak a számított erők értékei (C és D oszlop).

A mag és a héj különböző anyagjellemzői miatt nem egyforma terhelésnél mennek tönkre. Mindkét 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 4.6 ábrából jól látható, hogy például 40% kitöltöttségű concentric mintázat esetén 2,6 mm magvastagságnál van az erő/tömeg optimuma. A további mintázatok optimum görbéi a 4.7 ábrán láthatóak.

Minta Beállítás	Mag vastagság (mm)	Héj maximális erő (N)	Mag maximális erő (N)	Max. erő (N)	Tömeg (g)	Erő/tömeg (N/g)	Keresztmetszet magvastagságai értéke (%)
40% CO	0,2	46,16	313,7	46,16	9,9615	4,633840285	5
40% CO	0,4	46,05	252,76	46,05	9,743	4,726470286	10
40% CO	0,6	45,91	198,44	45,91	9,5245	4,820200535	15
40% CO	0,8	45,73	158,15	45,73	9,306	4,914033957	20
40% CO	1	45,51	130,26	45,51	9,0875	5,007977992	25
40% CO	1,2	45,21	110,1	45,21	8,869	5,097530725	30
40% CO	1,4	44,84	94,86	44,84	8,6505	5,183515404	35
40% CO	1,6	44,37	82,93	44,37	8,432	5,262096774	40
40% CO	1,8	43,79	73,21	43,79	8,2135	5,331466488	45
40% CO	2	43,09	65,13	43,09	7,995	5,389618512	50
40% CO	2,2	42,26	58,18	42,26	7,7765	5,434321353	55
40% CO	2,4	41,28	52,16	41,28	7,558	5,461762371	60
40% CO	2,6	40,13	46,83	40,13	7,3395	5,46767491	65
40% CO	2,8	38,81	42,01	38,81	7,121	5,450077236	70
40% CO	3	37,3	37,6	37,3	6,9025	5,403839189	75



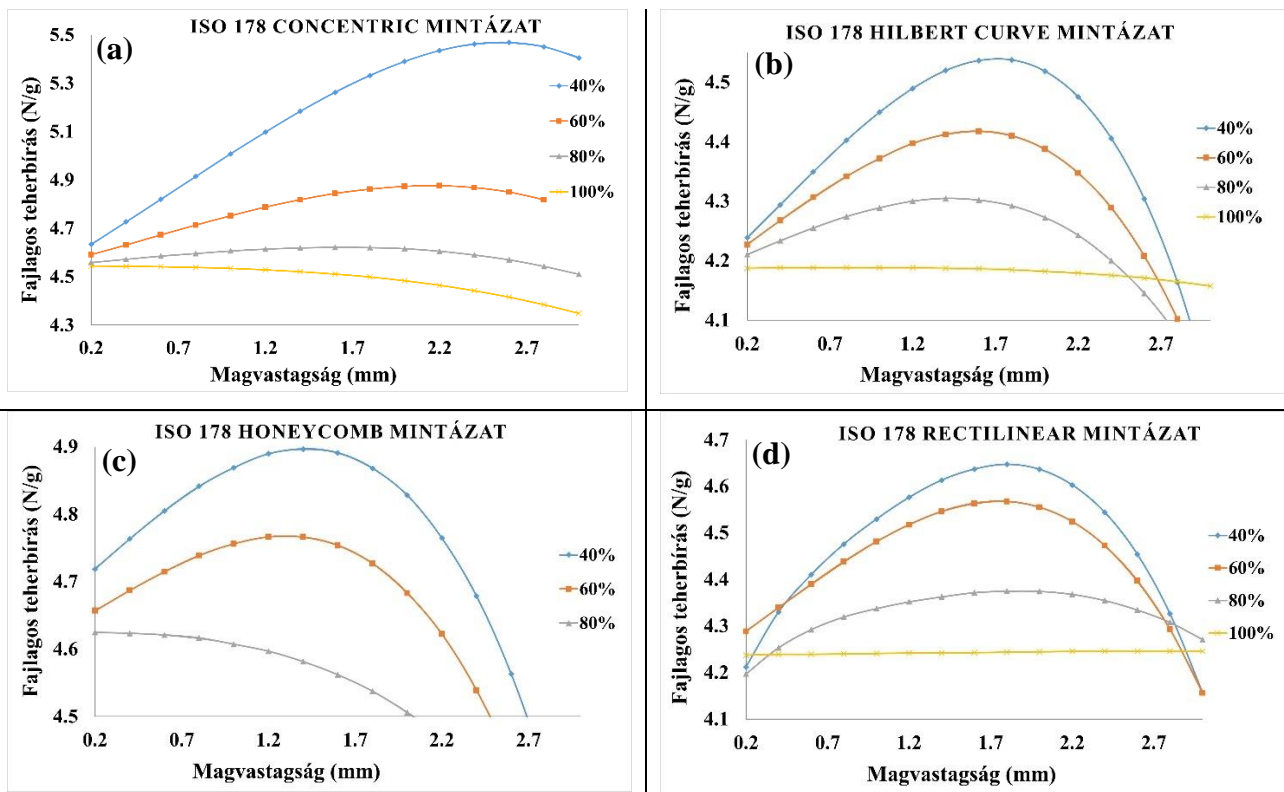
4.6. ábra A 40% kitöltöttség optimum értékének bemutatása

A 4.6. ábrán (alsó rész) a fajlagos teherbírás (erő/tömeg arány) alakulásának görbét rajzoltam fel a magvastagság függvényében. A további mintázatokhoz és kitöltöttségekhez tartozó görbét a 4.7 ábrán szemléltetem. A 4.6. ábrán bemutatott eljárást megismételtem az összes korábban vizsgált beállítással (térkitöltés és mintázat variálásával) a számítások részletes

4. Eredmények

eredményeit az M6 mellékletben mutatom be. A fajlagos teherbírás alakulásának görbéit a magvastagság függvényében a 4.7. a-d. ábrák mutatják be.

A diagramok függőleges tengelyén az erő/tömeg arányának értékét, a vízszintes tengelyen pedig a belső szerkezet anyagvastagságát jelöltem. A fajlagos terhelhetőség optimumát és a hozzá tartozó magvastagságokat a 4.4. táblázat tartalmazza.



4.7 a-d. ábrák A fajlagos teherbírás változása a belső mag vastagságának függvényében (a) concentric, (b) Hilbert curve, (c) honeycomb, és (d) rectilinear mintázat.

Térkitöltés	Belső mag vastagságának optimális értékei							
	concentric		Hilbert curve		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
100 %	-	-	-	-	-	-	-	-

4.4. táblázat A belső magvastagsági optimum értékek

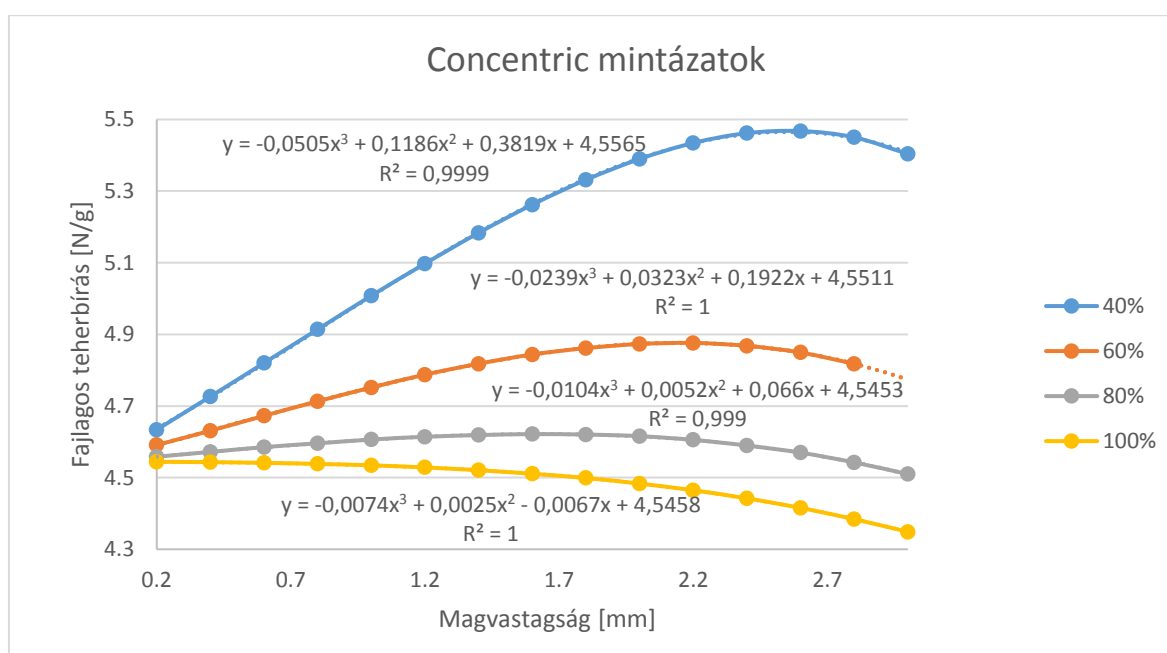
* a "%" érték bemutatja hány százaléka a magvastagság, a teljes próbatest magasságának.

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 szendvicсреtegek 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 térkitöltés 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 feltétele, hogy a külső réteg teherbírása nagyobb legyen, mint a mag teherbírása, viszont a térkitöltöttséget illetően a belső szerkezet töltöttsége legyen kisebb. Nyilvánvalóan látható, hogy a legjobb fajlagos teherbírás minden esetben a 40%-os térkitöltésnél észlelhető, függetlenül a töltésmintától.

Fajlagos teherbírás változása a magvastagság függvényében



4.8 ábra A concentric mintázatok optimum függvényeinek polinomális trendvonalai

4. Eredmények

A fajlagos teherbírás-falvastagság függvény harmadfokú görbével közelíthető. A 4.8. ábrán bemutatom a concentric mintázat esetén a számított pontokra illesztett polinomot (a többi mintázat esetében kapott görbéket az M6 mellékletekben mutatom be). Az R^2 értéke 1 vagy alig rosszabb, így megállapítható, hogy a harmadfokú görbe nemcsak egy jó közelítés, hanem valószínűleg a pontos megoldás minden kitöltöttség mellett.

A teljes kitöltöttségű mintázatnak nincs optimuma legfőképp ennek oka, hogy a külső héj is 100%-os. 2,6-es értéknél láthatjuk a 40%-os kitöltöttség legjobb fajlagos teherbírását a magvastagság függvényében.

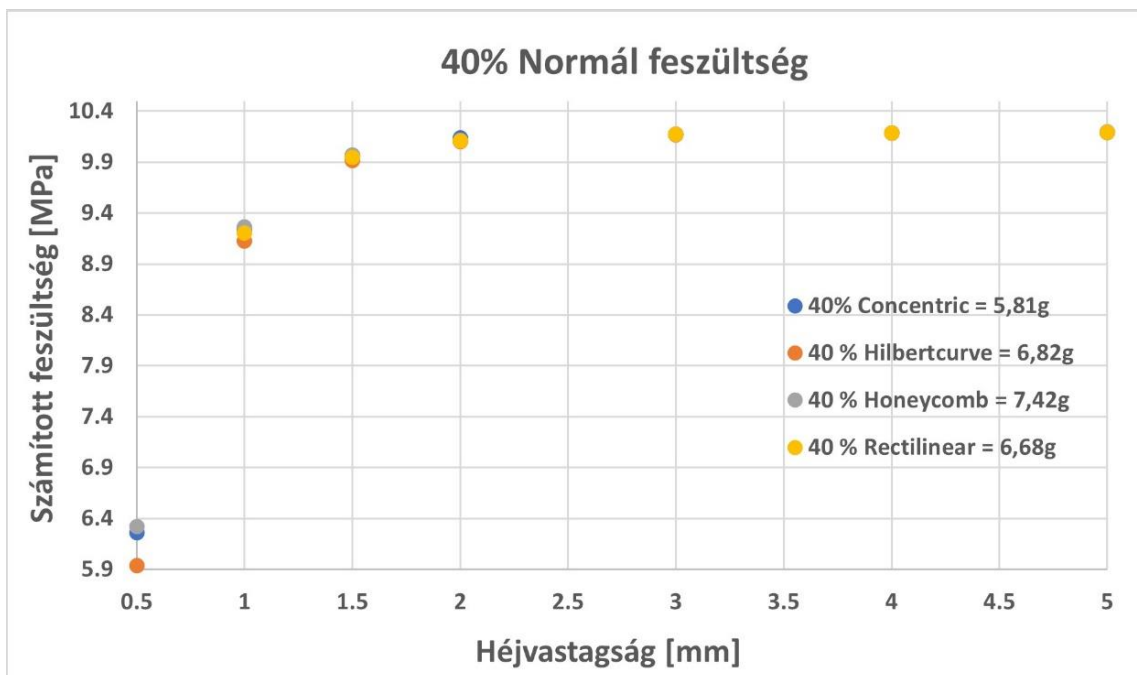
4.3.2. Szimulációs gépelem vizsgálat eredményeinek kiértékelése

Számításaim és a 3D nyomtatási paraméterek (minta és a kitöltöttség változtatása) alapján vizsgáltam a szendvicsszerkezetű görgő külső héj szerkezetén keletkező feszültségeket és deformációkat. A normál feszültség, redukált feszültség, deformáció vízszintes komponens értékeket minden kitöltés és anyagmintázati variáció esetén dokumentáltam. A 4.5. táblázatban látható a hét lépésben változtatott magvastagsághoz tartozó feszültség értékek.

40% Concentric = 5,81g			40 % Hilbertcurve = 6,82g			40 % Honeycomb = 7,42g			40 % Rectilinear = 6,68g		
Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress
3,8423	6,46E-03	6,2612	3,5422	7,08E-03	5,9389	3,8946	6,35E-03	6,3207	3,7499	6,73E-03	6,1
4,1541	5,38E-03	9,2457	3,8228	6,23E-03	9,1226	4,2129	5,25E-03	9,2639	4,0277	5,68E-03	9,2024
4,8797	3,09E-03	9,9637	4,6087	3,49E-03	9,9176	5,0178	2,95E-03	9,9693	4,7564	3,26E-03	9,9486
5,3422	2,22E-03	10,135	4,9854	2,79E-03	10,102	5,3315	2,32E-03	10,116	5,157	2,51E-03	10,106
5,48E+00	2,07E-03	10,173	5,1787	2,36E-03	10,166	5,5379	2,03E-03	10,174	5,3746	2,17E-03	10,171
5,4735	2,02E-03	10,186	5,1981	2,24E-03	10,184	5,5222	1,98E-03	10,187	5,3756	2,09E-03	10,185
5,6109	1,86E-03	10,194	5,3639	2,02E-03	10,193	5,6495	1,84E-03	10,195	5,529	1,91E-03	10,194

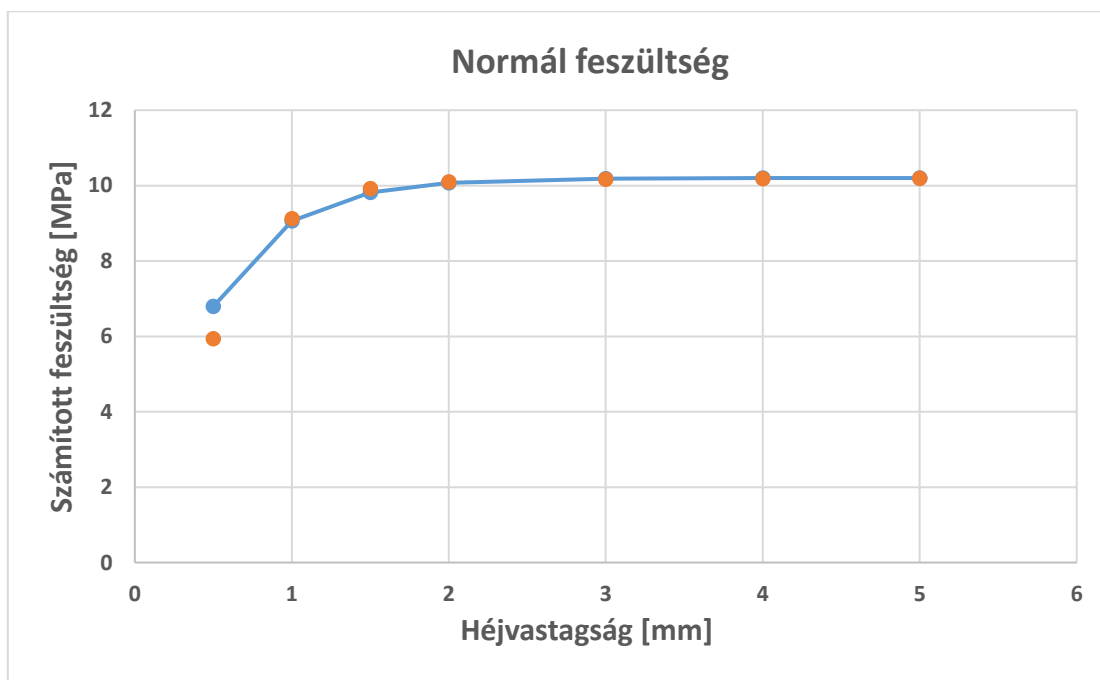
4.5. táblázat 40% kitöltöttségű mintázatok keletkező feszültségei és deformációi

Az alkalmazott peremfeltételek és a beállítások alapján 315 eredményt kaptam. A 40%-os mintázatok normál feszültség szemléltetését a 4.9. ábrán, eredményeit a 4.6. táblázatban mutatom be. További, részletes eredmények az M7 mellékletekben találhatóak. A következő ábrákon a 40% kitöltöttségű négyféle mintázatu próbatestek VEM modellezés eredményeit mutatom be.



4.9. ábra A 40% kitöltöttség normál feszültség értékei

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 4.10. ábrán mutatok be.



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

Az ábrán látható függvény egyenlete:

$$f(x) = c_1 \cdot (1 - e^{-c_2 x}) \quad (7)$$

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

A 3.4. táblázatban bemutatom a számított és illesztett függvény értékeit. 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 fogadok el, akkor ennek 95%-ától tekinthetem állandónak a függvényt, ekkor:

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

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

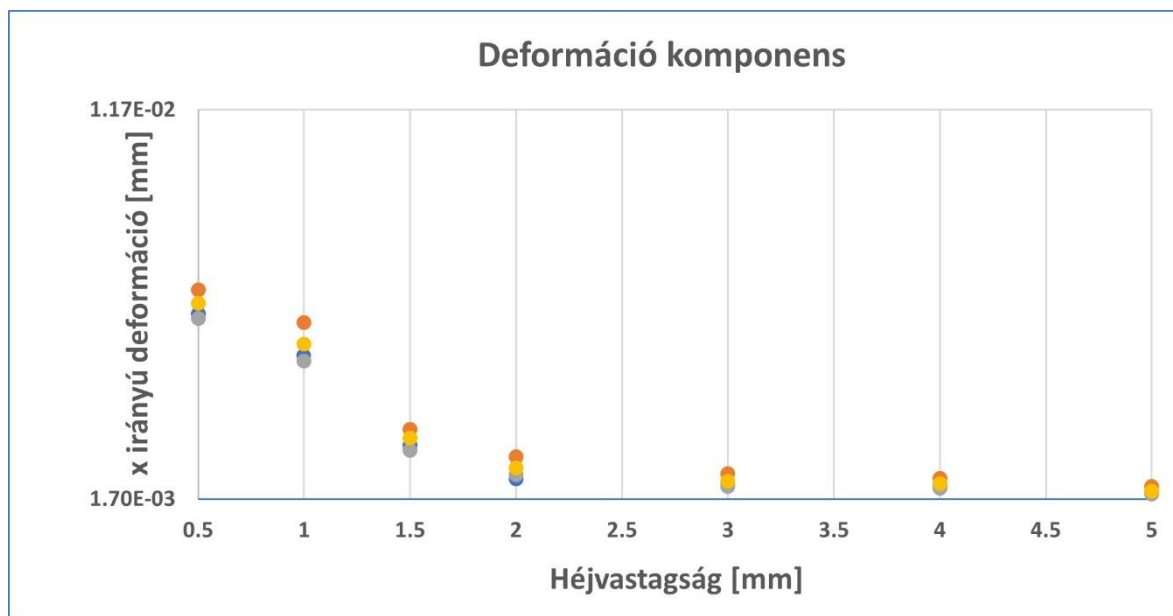
Amennyiben az eltérés mértékénél 1% az elfogadható, abban az esetben 99%-ától tekinthetem állandónak a függvényt, aminek az értéke;

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

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.

Héjvastagság [mm]	Számított normál feszültség [MPa]	Illesztett függvény feszültség értékei [MPa]
0,5	5,94	6,80
1	9,12	9,06
1,5	9,92	9,82
2	10,10	10,07
3	10,17	10,18
4	10,18	10,19
5	10,20	10,20

4.6. táblázat Számított normál feszültség értékei a héjvastagság függvényében



4.11. ábra A 40% kitöltöttség deformáció komponens görbéje

A deformáció komponens értékei az x irányú elmozdulás (csúszás) irányában keletkezett x irányú deformáció mértékét mutatja a 4.11. ábra. A függvény grafikonjának értékei szintén 2 mm héjvastagság mellett állandósulnak.

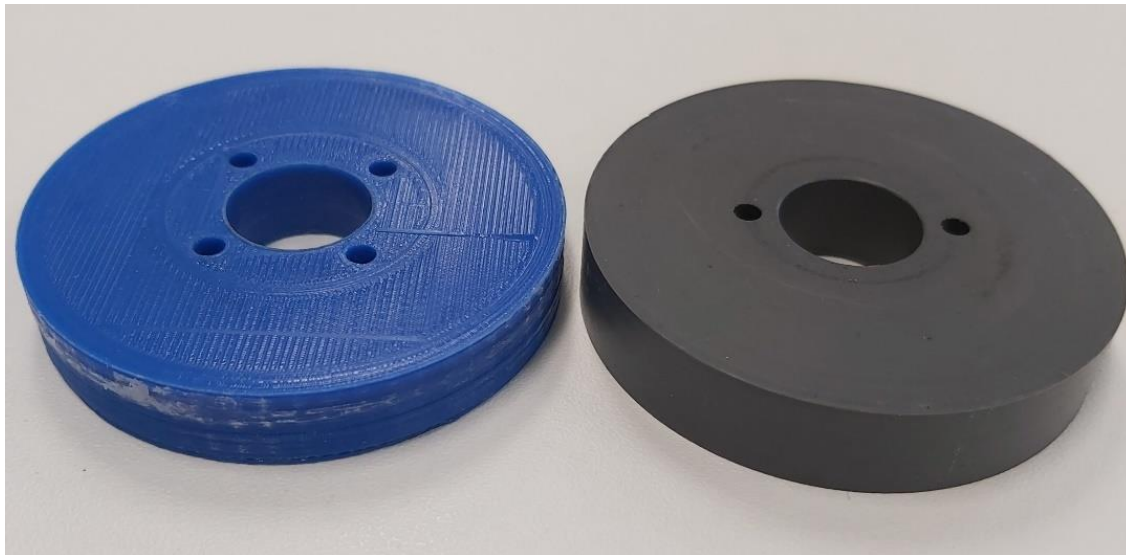
Bármelyik mintázatot vizsgáljuk nincs szignifikáns különbség, a függvények görbéi közel azonos tendenciát mutatnak. A feszültségek állandósulása minden körülmény és mintázat között kapcsolódik egy adott vastagsághoz. Összefoglalva; a diagramok kiértékelésénél megfigyeltem, hogy két részletre osztható 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 határvastagság, ami fölött már nem érdemes növelni a héj vastagságát mert a gyakorlatban nem lesz hatása a tribológiai jellemzőkre. Mindezek következtében tehát a feszültség értékei a héjvastagság függvényében telítődési függvénnyel jól közelíthetőek. Továbbá van egy határ, ami fölött rétegvastagság növelése a tribológiai lokális viszonyokra elhanyagolható hatással van.

4.4. Tribológiai vizsgálatok eredményei

4.4.1. Előzetes mérések

A kutatásom tényleges beállítási paraméterekkel történő mérései előtt számos vizsgálatot végeztem. Ezeket az előméréseket nem 3D nyomtatott PVC anyagú és 3D nyomtatott PLA

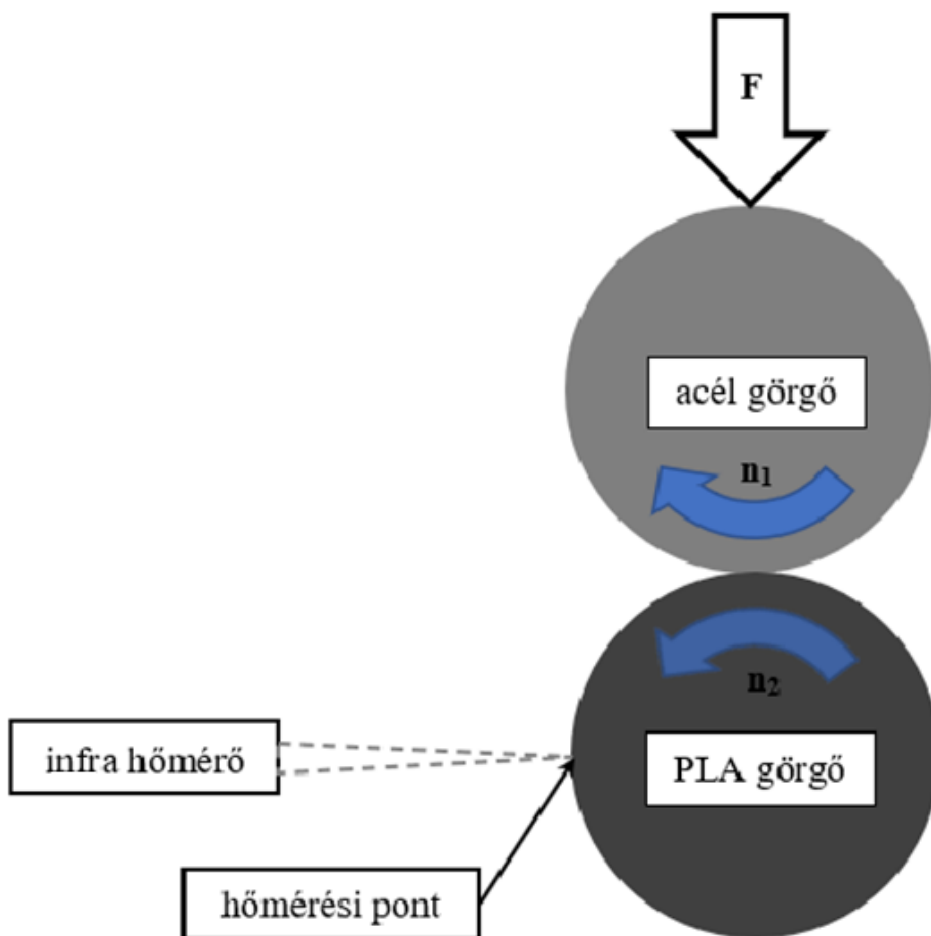
görgőkkel végeztem. A mérések alatt számos információt gyűjtöttem a beállításokkal és a mérési paraméterekkel kapcsolatban. A következő 4.12. ábrán PVC és PLA görgő mérés utáni állapota látható. A PVC görgőn kevésbé láthatóak a tönkremenetel jelei azonban a PLA görgőn a héjszerkezet leválása volt tapasztalható egyes beállítási paraméterek esetén.



4.12. ábra PLA (kék színű) görgő balra, PVC próbatest jobb oldalon látható

4.4.2. Héj vizsgálatok

A következőkben rátérek a végeelem 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 szobahőmérsékleten 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 pontját a 4.13. ábrán szemléltetem.

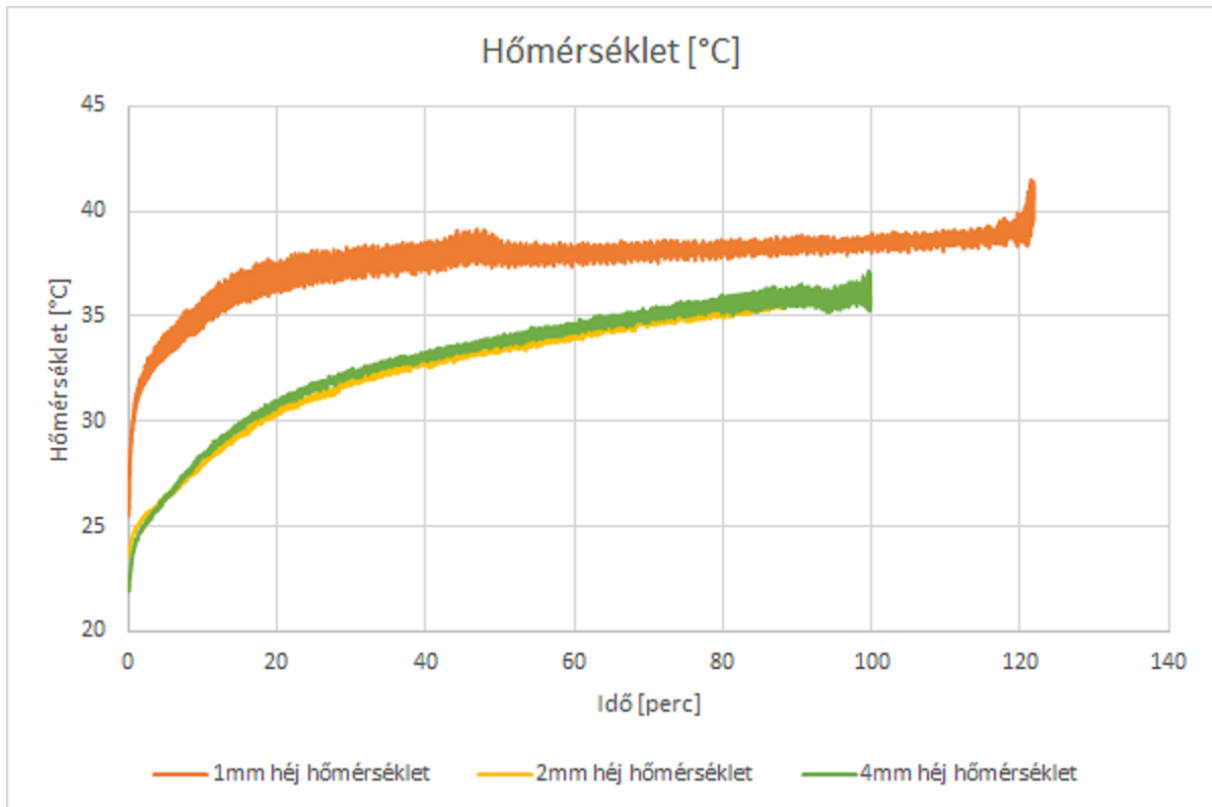


4.13. ábra A hőmérséklet mérés

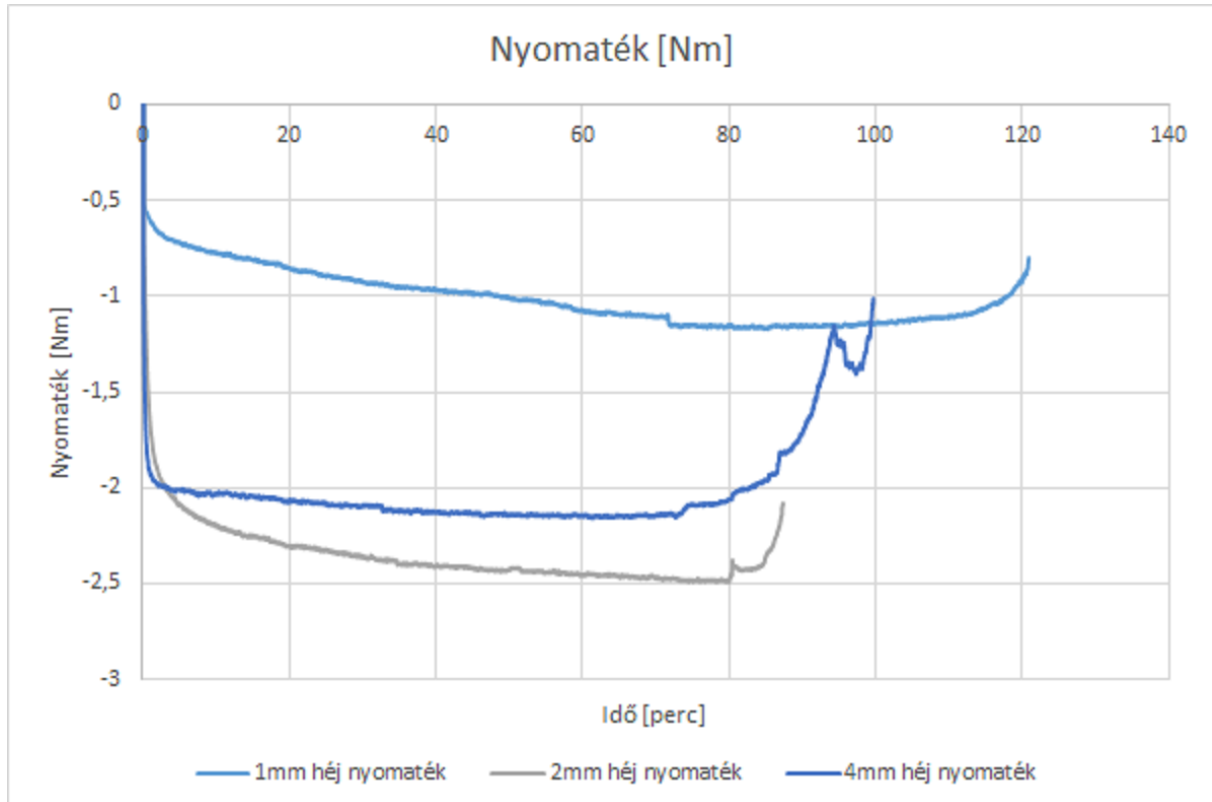
A mérési adatokból diagramokat készítettem, ahol a hőmérséklet és a nyomaték veszteség látható az idő függvényében. Különböző színekkel a különböző héjvastagságokhoz tartozó értékeket jelöltem. A 4.14. ábrán a hőmérséklet emelkedés (T [$^{\circ}\text{C}$]) látható, a 4.15. ábrán pedig a nyomaték veszteség (M [Nm]). A mérési diagramokból szembejövő, 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 végeelem 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 végeelem 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 4.14. ábrán a hőmérséklet, továbbá a 4.15. ábrán a nyomaték változásának diagramját szemléltetem a héjvastagság függvényében.

4. Eredmények









4.14. ábra. Ikertárcsás vizsgálat hőmérséklet diagramja különböző héjvastagságok esetén



4.15. ábra. Ikertárcsás vizsgálat nyomaték diagramja különböző héjvastagságok esetén

4. Eredmények

A diagramon szemléltetett mérési eredményeimmel igazolni tudom a végelem szimulációs módszerrel kapott eredmények hitelességét. A vizsgálatok végén a görgők tönkrementek, amelyeket a 4.7. táblázatban szemléltetek.

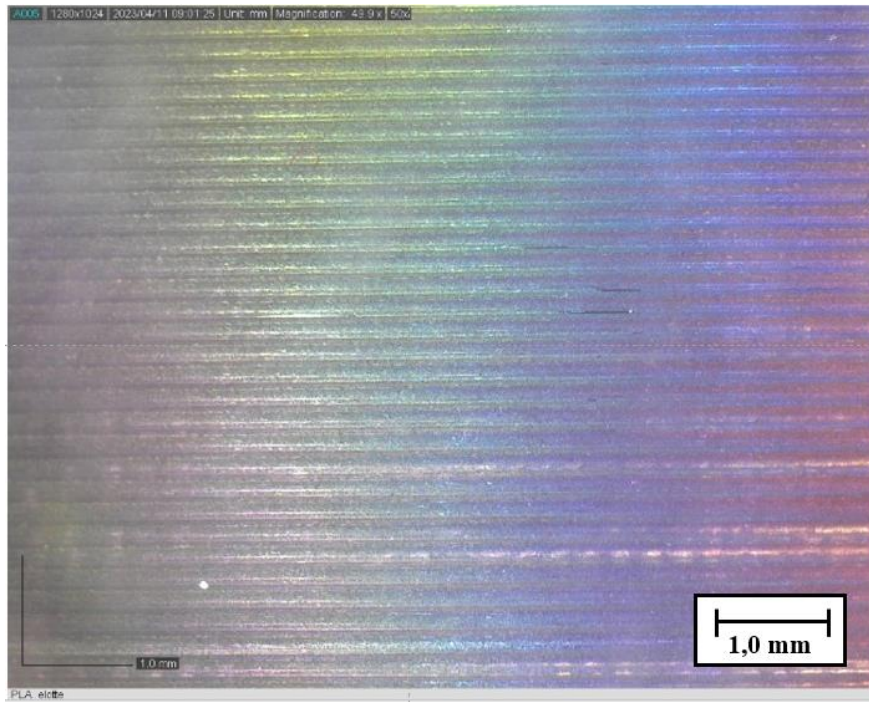
PLA 1 mm héjvastagság	PLA 2 mm héjvastagság	PLA 4 mm héjvastagság
		
Teljes tönkremenetel	Felületi tönkremenetel	Felületi tönkremenetel
Acél görgő 1 mm	Acél görgő 2 mm	Acél görgő 4 mm
		

4.7. táblázat Tribológiai vizsgálatok utáni állapot fényképek

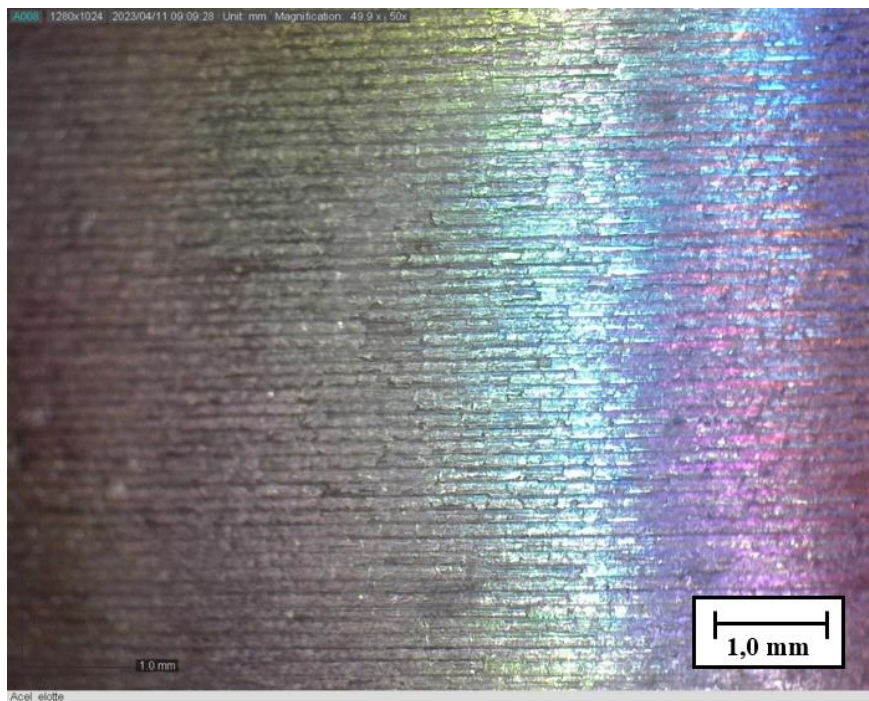
A tribológiai vizsgálatok részletesebb eredményei az M8 mellékletben találhatóak.

4.5. Mikroszkopikus vizsgálatok eredményei

A PLA görgő megmunkált felületét szemléltetem a következő mikroszkopikus képen. A fotón jól láthatóak az esztergálásból adódó megmunkálási nyomok (4.16. ábra). Ez a felület gördült az acél görgő felületen a tribológiai vizsgálatok alatt. Az acél vizsgálat előtti mikroszkopikus fotóját a 4.17. ábrán szemléltetem. Az 1 mm méret skálázás szemléltetése minden mikroszkopikus fotó esetében a kép bal alsó sarkában látható.









4.16. ábra PLA görgő felülete vizsgálat előtt (50x)



4.17. ábra Acél görgőfelület mikroszkopikus képe tribológiai vizsgálat előtt (50x)

4. Eredmények

A következő 4.8. táblázatban bemutatom a PLA és az acél görgő mikroszkopikus képét mutatom be tribológiai validálás után. A kopásból adódó fényesedett felület jól mutatja az eltérést a vizsgálat előtti matt szerű felületekhez képest.

1 mm héjvastagság	2 mm héjvastagság	4 mm héjvastagság
		
Törött görgő maradvány felület eleme	Felületi kigödrösödés hullámosodás	Felületi kigödrösödés hullámosodás
Acél ellengörgő		
		
Felületen PLA letapadások, Megközelítőleg 5%	Felületen PLA letapadások, Megközelítőleg 20%	Felületen PLA letapadások, Megközelítőleg 25%

4.8. táblázat Vizsgálat utáni mikroszkópos felvételek

A mikroszkopikus képeken (4.8. táblázat) jól látszódik, hogy az acél görgő felületen letapadt PLA anyag mennyisége eltérő, a legkevesebb letapadás az 1 mm-es héjvastagság esetén mérhető. Ebben az esetben elmondható, hogy előbb roncsolódott össze a külső héjszerkezet, minthogy nagyobb mértékű letapadások keletkeztek volna az acél görgő felületén. Azonban a héjvastagság növelésével (2-4 mm) a letapadások mértéke jelentősen nőtt. A 2 mm héjvastagságú PLA görgőhöz párosított acél görgő felületén megközelítőleg 20%-os letapadást tapasztaltam. A nagyobb héjvastagságú PLA görgőknél felületi gödrösödés is kialakult a károsodás folyamán. Mindemellett a 2 és 4 mm héjvastagságú vizsgálat letapadásait összehasonlítva nincs szignifikáns eltérés az acél görgő felületén.

4.6. Felületi érdesség vizsgálatok eredményei

A vizsgálatok megkezdése előtt és a vizsgálatok után az acél és PLA görgők felületéről készült érdességvizsgálatok eredményét a következő 4.9 és 4.10. táblázatokban ismertetem.

A jellemző felületi érdesség értékei a teljes vizsgálat után, ahol:

R_a = átlagos felületi érdesség,

R_z = az egyenetlenség magasság,

R_q = a simasági mérőszám;

R_a	4,05
R_y	21,81
R_z	21,81
R_q	4,82

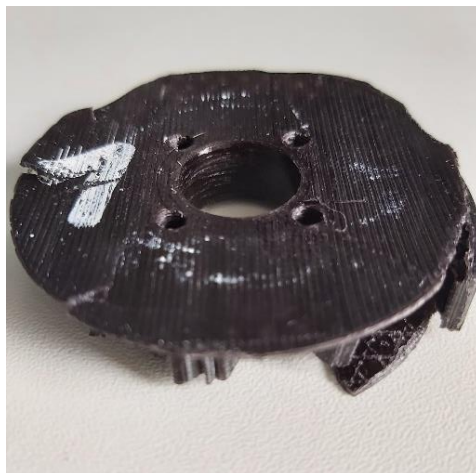
4.9. táblázat PLA felület tribológiai vizsgálat előtt

R_a	3,32
R_y	19,12
R_z	19,12
R_q	4,00

4.10. táblázat Acél felület tribológiai vizsgálat előtt







Törekedtem arra, hogy a görgők felületi jellemzői jó közelítéssel azonosak legyenek. Ez a vizsgálat előtt mért felületi érdesség jellemző adataiból látható.

A továbbiakban a vizsgálat utáni felületi érdességeket személtetem. Az 1 mm-es héjvastagság esetén a PLA görgőnél nem tudtam elvégezni mérést a teljes tönkremenetel miatt (4.18. ábra).



4.18. ábra Az 1 mm-es héjvastagságú tönkrement görgő

4. Eredmények

PLA 1 mm héjvastagság	PLA 2 mm héjvastagság	PLA 4 mm héjvastagság
 <p data-bbox="236 846 555 954">A görgő tönkremenetele miatt nincs értékelhető eredmény.</p>	 <p data-bbox="730 792 890 940"> R_a 4,85 μm R_y 33,02 μm R_z 33,02 μm R_q 6,15 μm </p> <p data-bbox="673 976 951 1048">Felületi kigödrösödés hullámosodás</p>	 <p data-bbox="1129 792 1295 940"> R_a 11,84 μm R_y 75,22 μm R_z 75,22 μm R_q 14,70 μm </p> <p data-bbox="1040 976 1385 1048">Felületi kigödrösödés hullámosodás, hordósodás</p>
<p>Acél felületi érdesség mérések tribológiai vizsgálat után:</p>		
 <p data-bbox="316 1547 481 1695"> R_a 2,50 μm R_y 18,66 μm R_z 18,66 μm R_q 3,17 μm </p> <p data-bbox="204 1727 587 1839">A felületi letapadások miatt a jellemző értékek informatív jellegűek</p>	 <p data-bbox="730 1547 896 1695"> R_a 3,29 μm R_y 38,17 μm R_z 38,17 μm R_q 4,40 μm </p> <p data-bbox="679 1742 948 1778">Felületi letapadások</p>	 <p data-bbox="1129 1547 1295 1695"> R_a 4,74 μm R_y 32,94 μm R_z 32,94 μm R_q 6,08 μm </p> <p data-bbox="1078 1742 1347 1778">Felületi letapadások</p>

4.11. táblázat A vizsgálat részletes dokumentációja az M8 mellékletben található.

A vizsgálat után az acél görgő felületén mért érdességi jellemzők, a felületen lévő PLA letapadások miatt egymás közötti összehasonlításra jól használhatók (4.11. táblázat). A vastagabb héj nagyobb merevséget biztosított és a felület alkalmazkodó képessége lecsökkent, mindezek következtében az áttapadt mennyiség megnövekedett.

A kopási mechanizmus esetében nem történt változás, amit a hőmérséklet és a nyomaték értékei igazolnak. Továbbá az is látható, hogy a héjvastagság növelésével az áttapadások miatt a maximális érdesség megnő, ezáltal a hajtásátvitel zajossága megnövekedett.

A 2 és 4 mm héjvastagságú görgőknél sem az áttapadás jellegében, sem mértékében számottevő változás nem következett be. Összegzésképpen, a felületfotók is alátámasztják az optimum létezését, tehát itt is megfigyelhető, hogy a 2 mm héjvastagságnál a héj teherbírása nagymértékben megváltozik. A 2 mm héjvastagságnál nagyobb értéknél nem következett be szignifikáns változás.

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 feltétele, 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	Hilbert curve	honeycomb	rectilinear
	Optimális magvastagság (a teljes vastagság 4 mm)			
	%	%	%	%
40 %	65	45	40	50
60 %	55	40	35	50
80 %	40	37,5	5	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:

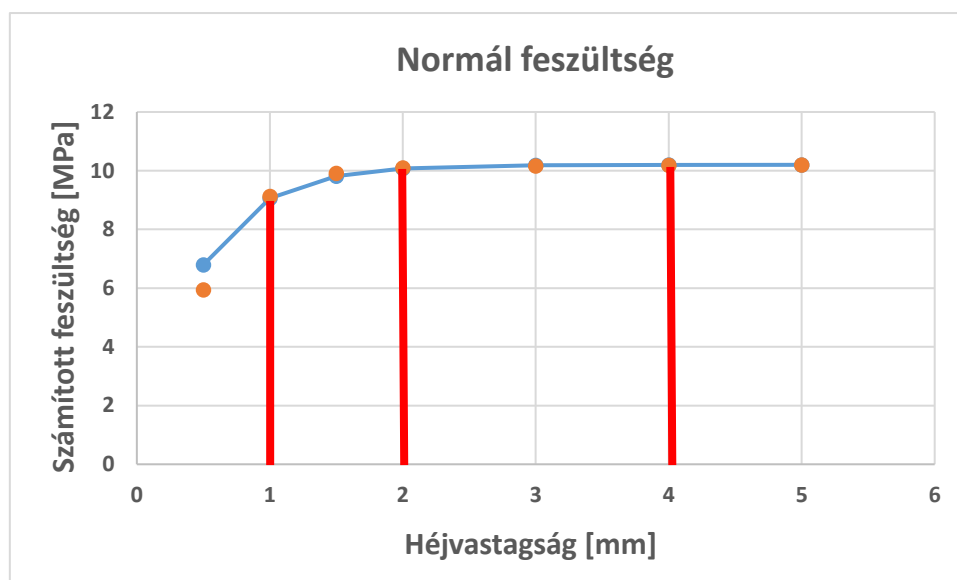
- x : a héj vastagsága,
- c_1 és c_2 konstansok (anyag, geometria és terhelés függvényében).

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. tételben 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 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 mechanika 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 terheléeloszlás, ezért lehetőség van a kisebb terhelésű területen az anyag kitöltöttségének csökkentésére.

Kutatásaim során szimulációs vizsgálataimmal és 3D nyomtatás-kísérleteimmal olyan eredményekre jutottam, amelyek hasznos információval szolgálnak a műszaki gyakorlat számára. 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 beállításnál 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 héj teherbírása nagyobb legyen, mint a mag teherbírása, továbbá a belső szerkezet térkitöltése legyen kisebb mint a külső réteg kitöltöttsége.

Megállapítottam, hogy háromrétegű 3D nyomtatott 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 kiértékeltem a tribológiai viselkedéssel való összefüggésük alapján, amely 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. SUMMARY

Tribomechanics of 3D printed elements with variable material structure.

The applicability and growing use of 3D printed products is now significant in manufacturing applications. In the manufacturing technology that is considered new to the industry, it is important to clarify the possibility of expected anomalies, possible malfunctions, and the possibility of failure in use. The advantages over subtractive manufacturing lie mainly in environmental awareness, production efficiency and the easy modification of the material structure.

The main advantage of inhomogeneity and uniformity of sizing / scaling within the material structure that can be achieved by 3D printing is structural optimisation. The load distribution in the internal structure of the fabrication is not uniform, so it is possible to reduce the material density in the area of lower load.

During my research, with my simulation studies and 3D printing experiments, I reached results that provide useful information for technical practice. In the first part of my thesis, I investigated the mechanical properties of the printed sandwich structure. The filling pattern affects the mechanical strength and specific load capacity. Among the settings, I investigated the influence of shell thickness and core thickness. I used the results obtained during the mechanical tests for the input parameters of the simulation software. Based on this, I was able to perform the simulation process of the bending test with real input material properties.

I found that among the simulation results of the PLA body with a sandwich structure that I set up, the highest specific load capacity can always be detected at a filling density of 40%, regardless of the filling pattern.

It can also be concluded that in the case of a three-layer printed sandwich structure, there is an optimal layer thickness ratio for each filling and pattern in terms of specific load capacity. Half of the existence of the optimum is that the load capacity of the outer layer is greater than the load capacity of the core, but the density of the inner filling is lower.

I have found that for a three-layer 3D printed machine element, there is a limit to the thickness of the shell, which, if increased further, does not significantly change the tribological local conditions. The use of a thicker shell does not improve the tribological properties but increases the weight of the part and the printing time and cost.

I also evaluated the surface roughness and microscopic surface photographs of the rollers in terms of their correlation with tribological behaviour, which supported the applicability of the results of the mechanical simulations in terms of wear.

During my research work, I found that the field of three-dimensional printing and tribology of polymers and composites still contains many untapped potential and unexploited areas.

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

1. additively.com/en/learn-about/material-jetting 2019 (hozzáférés: 2020.05.07)
2. bitfab.io/blog/additive-manufacturing (hozzáférés: 2020.05.07)
3. cnc.hu/2019/01/tribologia-avagy-amit-a-forgacskepzesrol-elratetrol-es-kopasrol-tudni-kell/www.cnc.hu/2016/08/mi-az-a-tribologia-es-mi-a-forgacsolas-soran-betoltott-szerepe (hozzáférés: 2020.05.06)
4. napidoktor.hu/korkep/csont-izom-es-porcdarabokat-nyomtattak-3d-ben (hozzáférés: 2020.05.08)
5. sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/what-is-an-stl-file/(hozzáférés: 2020.05.06)
6. http://real.mtak.hu/111431/1/2020_2_ENG_006_Kun.pdf, /(hozzáférés: 2022.12.16)
7. 3dhubs.com/3d-printing/lom/(hozzáférés: 2020.05.07)
8. 3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3dprinters-or-3d-printing-technologies-overview/. (Hozzáférés: 2022.12.16)
9. A. Kreemer, Z.H. Moe, Rapid Prototyping Using FDM Systems, Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, Springer, 2014, pp. 2471–2483 ISBN 978-1-4471-4669-8.
10. A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, Mater. Des. 31 (2010) 287–295.
11. Alaimo G., Marconi S., Costato L., Auricchio F. Influence of Meso-Structure and Chemical Composition on FDM 3D-Printed Parts. *Compos. Part B Eng.* 2017, 113, 371–380
12. Aw, Y., Yeoh, C., Idris, M., Teh, P., Hamzah, K., and Sazali, S. (2018): Effect of Printing Parameters on Tensile, Dynamic Mechanical, and Thermoelectric Properties of FDM 3D Printed CABS/ZnO Composites, *Materials*, 11(4), 466. <https://doi.org/10.3390/ma11040466>
13. A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, M. Martorelli, The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, *Rapid Prototyp. J.* 21 (2015) 604–617
14. A. Peng, X.M. Xiao, R. Yue, Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73 (1–4) (2014) 87–100.
15. A.R. Torrado, D.A. Roberson, Failure analysis and anisotropy evaluation of 3Dprinted tensile test specimens of different geometries and print raster patterns, *J.Fail. Anal. Prev.* 16 (1) (2016) 154–164.
16. A.W. Fatimatuzahraa, B. Farahaina, W.A.Y. Yusoff, The effect of employing different raster orientations on the mechanical properties and microstructure of Fused Deposition Modeling parts, *Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), IEEE Symposium*, 2011, pp. 22–27.
17. B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher, Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation, *J. Fail. Anal. Prev.* 16 (2016) 467–481.

18. B.M. Tymrak, M. Kreiger, L.M. Pearce, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Mater. Des.* 58 (2014) 242–246.
19. Bahadur, S. (2000): The development of transfer layers and their role in polymer tribology, *Wear*, 245(1–2), 92–99. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00469-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00469-5)
20. Bergseth, E., Zhu, Y. & Söderberg, A. Study of Surface Roughness on Friction in Rolling/Sliding Contacts: Ball-on-Disc Versus Twin-Disc. *Tribol Lett* 68, 69 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01310-z>
21. Berthier, Y.: Background on friction and wear, in *Lemaitre Handbook of Materials Behavior Models*, Academic press 2001, pp. 676-699.
22. Bharat Bhushan: *Modern tribology handbook*, Volume One, Volume Two CRC Press LLC, 2000
23. Biron, M. (2013): *Plastics Solutions for Practical Problems*, in *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. Elsevier, 831–984. <https://doi.org/10.1016/B978-1-45577898-0.00007-X>
24. Briscoe, B. J., and Sinha, S. K. (2002): Wear of polymers, in *Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol.*, 401–413 33.
25. Briscoe, B. J., and Sinha, S. K. (2013): Tribological applications of polymers and their composites – past, present and future prospects, *Tribology of Polymeric Nanocomposites*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59455-6.00001-5>
26. Briscoe, B. J., and Tabor, D. (1978): Friction and wear of polymers: The role of mechanical properties, *British Polymer Journal*, 10(1), 74–78. <https://doi.org/10.1002/pi.4980100114>
27. Bharat Bhushan: *Modern tribology handbook*, Volume One, Volume Two CRC Press LLC, 2000
28. Cirino, M., Friedrich, K., and Pipes, R. B. (1988): Evaluation of polymer composites for sliding and abrasive wear applications, *Composites*, 19(5), 383–392. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(88\)90126-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(88)90126-7)
29. Dai N., Li D., Jiang, X. et al. Interior structural optimization based on the density-variable shape modeling of 3D printed objects. *Int J Adv Manuf Technol* 83, 1627–1635 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7704-z>
30. Dave H. K., Patadiya N. H., Prajapati A. R., Rajpurohit S. R. Effect of Infill Pattern and Infill Density at Varying Part Orientation on Tensile Properties of Fused Deposition Modeling-Printed Poly-Lactic Acid Part. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 2019, 095440621985638.
31. D. Dowson, *Tribological Research and Design for Engineering Systems*, Elsevier, 2003, pp. 123-132.
32. Durgun I., Ertan R. Experimental Investigation of FDM Process for Improvement of Mechanical Properties and Production Cost. *Rapid Prototyp. J.* 2014, 20, 228–235.
33. Ehrmann, G., and Ehrmann, A. (2021): Investigation of the Shape-Memory Properties of 3D Printed PLA Structures with Different Infills, *Polymers*, 13(1), 164. <https://doi.org/10.3390/polym13010164>
34. Elizabeth Matias, Bharat Rao: *3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business* (2015)
35. E. Ebel, T. Sinnemann, Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties, *RTEjournal* (2014) (accessed Sept
36. E. Santner and H. Czichos: *Tribology of polymers*. *Tribology International*, Volume 22, 1989, Pages 103 – 109

37. Feygin, M., and Hsieh, B. (1991): Laminated object manufacturing: A simpler process, in Proceedings of the 2nd Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF). Austin: TX, 123– 130. Available at: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1991/1991-16Feygin.pdf>
<http://sffsymposium.engr.utexas.edu/1991TOC>
38. F. Górski, R. Wichniarek, W. Kuczko, J. Andrzejewski, Experimental determination of critical orientation of ABS parts manufactured using fused deposition modelling technology, *J. Mach. Eng.* 15 (2015) 121–132.
39. Foster, A.M.; Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability, NISTIR 8059, available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf> (accessed Oct 1, 2017). [3DPrintingofMedicalDevices/](#) (accessed Jan 12, 2017).
40. Godet, M.: The third-body approach: a mechanical view of wear, Elsevier Sequoia, *Wear* 1984, Vol. 100, pp. 437-452.
41. Gustafsson, E. (2013): Investigation of friction between plastic parts, Master's thesis in Polymer tribology, Chalmers university of technology
42. Garbassi, F., Morra, M., Occhiello, E., & Garbassi, F. (1998). Polymer surfaces: from physics to technology.
43. G.A.O. Adam, D. Zimmer, On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations, *Rapid Prototyp. J.* 21 (6) (2015) 662–670.
44. G. Alaimo, S. Marconi, L. Costato, F. Auricchio, Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts, Elsevier, *Composite part B*, Volume 113, 371-380 (2017)
45. Háber István Ervin 3D adatfeldolgozás és gyártás II. (2015)
46. Hanon M. M., Marczis R., Zsidai L. Impact of 3D-Printing Structure on the Tribological Properties of Polymers. *Ind. Lubr. Tribol.* 2020, 72, 811–818.
47. Hossain, M.A.; Zhumabekova, A.; Paul, S.C.; Kim, J.R. A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market. *Sustainability* 2020, 12, 8492. <https://doi.org/10.3390/su12208492>
48. Huang, J.; Qin, Q.; Wang, J. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes* 2020, 8, 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>
49. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2017, pp. 13–16.
50. Joe Micallef: Beginning Design for 3D Printing (2015)
51. J.F. Rodriguez, J.P. Thomas, J.E. Renaud, Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. *Experimental Investigation, Rapid Prototyp. J.* 7 (3) (2001) 148–158.
52. J.A. Williams: *Engineering Tribology*, 1994
53. J.P. Patel, C.P. Patel, U.J. Patel, A review on various approaches for process parameter
54. J. Sukumaran, M. Ando, P. De Baets, V. Rodriguez, L. Szabadi, G. Kalacska, V. Paepegem, Modelling gear contact with twin-disc setup, *Tribology International*, Volume 49, 2012, Pages 1-7, ISSN 0301-679X
55. J. Takács (2004), *Korszerű technológiák a felületi tulajdonságok alakításában*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, ISBN 963-420-789-8.
56. J. Torres, J. Cotelo, J. Karl, A.P. Gordon, Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives, *JOM* 67 (5) (2015) 1183–1193.
57. J.Y. Wong, A.C. Pfahnl, 3D printing of surgical instruments for long-duration space missions, *Aviat Space Environ. Med.* 85 (7) (2014) 758–763.

58. J.W Ringsberg, M Loo-Morrey, B.L Josefson, A Kapoor, J.H Beynon, Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue, *International Journal of Fatigue*, Volume 22, Issue 3, 2000, Pages 205-215, ISSN 0142-1123, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00125-5).
59. Kalácska Gábor, Kozma Mihály, Zsidai László, Keresztes Róbert: *Műszaki Polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban*. Gödöllő, 2007
60. Kalácska szerk.: Antal – Fledrich – Kalácska – Kozma: *Műszaki műanyagok gépészeti alapjai*, Minerva-Sop Bt. Sopron, 1997
61. Kantaros A, Chatzidai N, Karalekas D (2015) 3D printing-assisted design of scaffold structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–13
62. Kennedy F.E. and Karpe S.A. (1982): Thermocracking of a mechanical face seal, *Wear*, 79, 21-36 p.
63. Keresztes Róbert, Zsidai László, Kalácska Gábor, Andó Mátyás, Lefánti Rajmund Department of Maintenance of Machinery, Institute for Mechanical Engineering Technology Friction of Polymer/Steel Gear Pairs 2009
64. Kozma Mihály: *Műanyag felületek súrlódása*. *Gép*, 30/10, 1978
65. Kun Krisztián, Miskolczi István, Fodor Antal, 3D nyomtató építése és fejlesztése, *Gradus Vol 2, No 2 (2015) 152-159 ISSN 2064-8014*
66. K.L. Alvarez, R.F. Lagos, M. Aizpun, Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts, *Ing. Invest.*36(3) (2016) 110–116.
67. K. Szykiedans, W. Credo, Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints, *Procedia Eng.* 136 (2016) 257–262.
68. K.P. Motaparti, Effect of Build Parameters on Mechanical Properties of Ultem 9085 Parts by Fused Deposition Modeling, *Masters Theses (2016)*, p. 7513 http://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7513.
69. Landman U., Luedtke W.D., and Ringer E.M. (1993): Molecular dynamics simulations of adhesive contact formation and friction. *Fundamentals of Frictions: Macroscopic and Microscopic Processes*, Singer, I.L. and Pollock, H.M., Kluwer academic Publishers, Dordrecht, 463 p.
70. Li H., Wang T., Sun J., Yu Z. The Effect of Process Parameters in Fused Deposition Modelling on Bonding Degree and Mechanical Properties. *Rapid Prototyp. J.* 2018, 24, 80–92.
71. Linck, V. – Baillet, L. – Berthier, Y.: Modelling the consequences of local kinematics of the first body on friction and on third body sources in wear, *Wear* 2003, august – September, pp. 299-308.
72. Lindahl, J., Hassen, A. Arabi, Romberg S., Hedger B. Hedger, P. Walch, M., Deluca T., Morrison W., Kim S., Roschli A. Nuttal D., Czachowski, J., Post B., Love L., Kunc V., Large Scale Additive Manufacturing with reactive polymers, 2018/10/17.
73. Liu, F., Deng, R., Gu, F., Shackleton, P., Ball, A. (2021). Investigating the Effects of Lubrication on Wheel-Track Dynamic Interaction via Experiments on a Twin Disc Test Rig. In, et al. *Proceedings of IncoME-V & CEPE Net-2020. IncoME-V 2020. Mechanisms and Machine Science*, vol 105. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75793-9_6
74. Lubombo C., Huneault M. A. Effect of Infill Patterns on the Mechanical Performance of Lightweight 3D-Printed Cellular PLA Parts. *Mater. Today Commun.* 2018, 17, 214–228.

75. L. Baich, G. Manogharan, Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts, *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2015, pp. 209–218.
76. Matthews, A., and Holmberg, K. (2009): *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering*. 2nd edn. Edited by B. J. Briscoe. Oxford, UK: Elsevier B.V.
77. Muammal M.H., Alshammas Y., Zsidai L. Effect of Print Orientation and Bronze Existence on Tribological and Mechanical Properties of 3D-Printed Bronze/PLA Composite. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 108, 553–570.
78. Muhammad Nuruzzaman, D., Asaduzzaman Chowdhury, M., and Lutfar Rahaman, M. (2011): Effect of duration of rubbing and normal load on friction coefficient for polymer and composite materials, *Industrial Lubrication and Tribology*, 63(5), 320–326. <https://doi.org/10.1108/00368791111154931>
79. M. Domingo-Espin, J.M. Puigoriol-Forcada, A.A. Garcia-Granada, J.L.S. Borros, G. Reyes, Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts, *Mater. Des.* 83 (2015) 670–677.
80. M. Kráčalík, G. Trummer, W. Daves, Application of 2D finite element analysis to compare cracking behaviour in twin-disc tests and full scale wheel/rail experiments, *Wear*, Volumes 346–347, 2016, Pages 140-147, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.013>
81. Myshkin, N., and Kovalev, A. (2018): Adhesion and surface forces in polymer tribology A review, *Friction*, 6(2), 143–155. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0203-0>
82. Myshkin, N. K., and Kovalev, A. V. (2009): ADHESION AND FRICTION OF POLYMERS, in *Polymer Tribology*. IMPERIAL COLLEGE PRESS, 3–37. https://doi.org/10.1142/9781848162044_0001
83. Myshkin, N. K., Petrokovets, M. I., and Kovalev, A. V. (2005): Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer, *Tribology International*, 38(11-12 SPEC. ISS.), 910–921. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.016>
84. M. Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *ScienceDirect, Business Horizons* (2017) 60, 677-688
85. M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, A. Conejero, Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing, *3D Print. Addit.Manuf.* 3 (3) (2016) 183–192.
86. M.S. Hossain, J. Ramos, D. Espalin, M. Perez, R. Wicker Improving tensile mechanical properties of FDM-manufactured specimens via modifying build parameters, *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2013, pp. 380–392.
87. M.K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. Ian Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65 (2) (2016) 737–760 <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
88. Nathan Fantecelle Strey, Andrei Bavaresco Rezende, Rodrigo da Silva Miranda, Solange Tamara da Fonseca, Paulo Roberto Mei, Cherlio Scandian, Comparison of rolling contact fatigue damage between railway wheels and twin-disc test specimens, *Tribology International*, Volume 160, 2021, 107037, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107037>

89. Nunhez, R.d., Gay Neto, A. Numerical investigation for creep curve evaluation on a twin-disc test scenario using finite elements. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 43, 339 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03042-0>
90. Onwubolu G. C., Rayegani F. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. *Int. J. Manuf. Eng.* 2014, 2014, 1–13.
91. Paul, Surajit & Tiwari, Mayank & Xiao, Z. (2021). Effect of slip to roll ratio on cyclic plastic deformation response at subsurface during rolling contact fatigue. *Forces in Mechanics.* 6. 100058. [10.1016/j.finmec.2021.100058](https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100058).
92. Peng A., Xiao X., Yue R. Process Parameter Optimization for Fused Deposition Modeling Using Response Surface Methodology Combined with Fuzzy Inference System. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, 73, 87–100.
93. Persson, B. N. J. (2000): *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. 2nd edn. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (NanoScience and Technology). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04283-0>
94. Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu, Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, *Rapid Prototyp. J.* 14 (2) (2008) 72–80.
95. Rigney D.A. and Hirth J.P. (1979): Plastic deformation and sliding friction of metals, *Wear*, 53, 345-370 p.
96. Rybachuk, M., Alice Mauger, C., Fiedler, T., and Öchsner, A. (2017): Anisotropic mechanical properties of fused deposition modeled parts fabricated by using acrylonitrile butadiene styrene polymer, *Journal of Polymer Engineering*, 37(7). <https://doi.org/10.1515/polyeng-2016-0263>
97. R. Hernandez, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, B. Asiabanpour, Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling, *Solid Freeform Fabrication 2016, Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016, pp. 939–950.
98. Sood, Anoop Kumar, Equbal, A., Toppo, V., Ohdar, R. K., and Mahapatra, S. S. (2012): An investigation on sliding wear of FDM built parts, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(1), 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.08.003>
99. Sood, Anoop K., Ohdar, R. K., and Mahapatra, S. S. (2012): Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, *Journal of Advanced Research*, 3(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>
100. Srinivasan R., Ruban W., Deepanraj A., Bhuvanesh R., Bhuvanesh T. Effect on Infill Density on Mechanical Properties of PETG Part Fabricated by Fused Deposition Modelling. *Mater. Today Proc.* 2020, 27, 1838–1842.
101. Stachowiak, G. W., and Batchelor, A. W. (2005): *Engineering Tribology*. 3rd edn. Burlington, USA: Elsevier Butterworth-Heinemann
102. Stava O., Vanek J., Benes B., Carr N., Mech R., (2012), Stress Relief: Improving Structural Strength of 3D Printable Objects, DOI; [10.1145/2185520.2185544](https://doi.org/10.1145/2185520.2185544)
103. S. Xiaoyong, C. Liangcheng, M. Honglin, G. Peng, B. Zhanwei, L. Cheng, Experimental analysis of high temperature PEEK materials on 3D printing test, 9th
104. Takezawa, A., and Kobashi, M. (2017): Design methodology for porous composites with tunable thermal expansion produced by multi-material topology optimization and additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 131, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.054>

105. Tianyun Yao, Juan Ye, Zichen Deng, Kai Zhang, Yongbin Ma, Huajiang Ouyang, Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses, *Composites Part B: Engineering*, Volume 188, 2020.
106. Torres J., Coteló J., Karl J., Gordon A. P. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. *JOM* 2015, 67, 1183–1193.
107. Tromborg, J. K., Sveinsson, H. A., Scheibert, J., Thogersen, K., Amundsen, D. S., and Malthe-Sorensen, A. (2014): Slow slip and the transition from fast to slow fronts in the rupture of frictional interfaces, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(24), 8764–8769. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321752111>
108. Tuan Ngo., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018, 143, 172–196.
109. T. Lechter, B. Rankouhi, S. Javadpour, Experimental study of mechanical properties of additively Manufactured abs plastic as a function of layer parameters, ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2A: Advanced Manufacturing, Houston, Texas, USA, 2015.
110. Valasek István szerk.: Tribológiai kézikönyv, Tribotechnik Kft. Budapest 1996
111. Vijayaraghavan V., Garg A., Lam J. S. L., Panda B., Mahapatra S. S. Process Characterisation of 3D-Printed FDM Components Using Improved Evolutionary Computational Approach. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015, 78, 781–793.
112. Wieleba, W. (2002): The statistical correlation of the coefficient of friction and wear rate of PTFE composites with steel counterface roughness and hardness, *Wear*, 252(9–10), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00029-7)
113. W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao, Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3d-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS, *Materials* 8 (2015) 5834–5846.
114. X. Deng, Z. Zeng, B. Peng, S. Yan, W. Ke, Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling, *Materials* 11 216 (2018) 1–11.
115. Yamaguchi Yukisaburo: Tribology of plastic materials. Amsterdam: Tribology series 16, Elsevier, 1990
116. X. Liu, M. Zhang, S. Li, J. Peng, Y. Hu, Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 89 (5–8) (2017) 2387–2397. optimization of fused deposition modeling (FDM) process and Taguchi approach for optimization, *Int. J. Eng. Res. Afr.* 2 (2) (2012) 361–365.
117. Yao T., Deng Z., Zhang K., Li S. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations (2019) *Composites Part B: Engineering*, 163, pp. 393-402.
118. Ziemian C., Sharma M., Ziemi S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. In *Mechanical Engineering*; InTech, 2012.

M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Lektorált cikk világnyelven

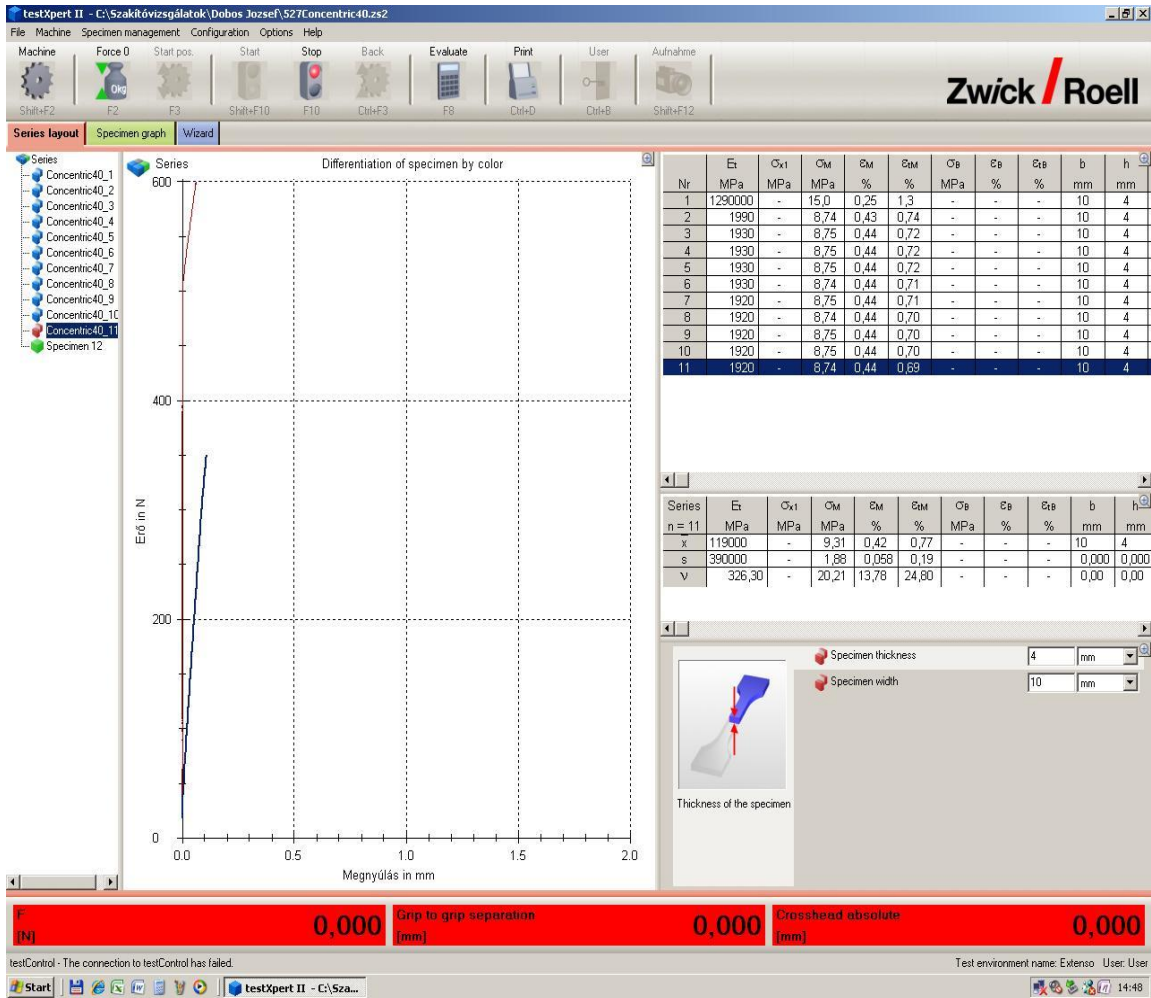
1. **Dobos J.**, Hanon M. M., Oldal I. (2021): Effect of infill density and pattern on the specific load capacity of FDM 3D-printed PLA multilayer sandwich. *Journal of Polymer Engineering, De Gruyter*. ISSN: 0334-6447, <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0223>, (IF: 1.367*).
2. H., Muammel M. ; **Dobos, 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)
3. 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)
4. Kiss, P. ; Hajdú, J.; Máthé, L. ; **Dobos, J.** ; Magó, L. *Analysis of the towed agricultural machinery manufacturers in Europe, Hungarian Agricultura Engineering*: 33 pp. 5-10., 6 p. (2018)
5. Kiss, P. ; Hajdú, J.; Máthé, L. ; **Dobos, J.** ; Magó, L. *Analysis of the towed agricultural machinery manufacturers in Europe, Hungarian Agricultura Engineering*: 33 pp. 1-7., 7 p. (2018)

Lektorált cikk magyar nyelven

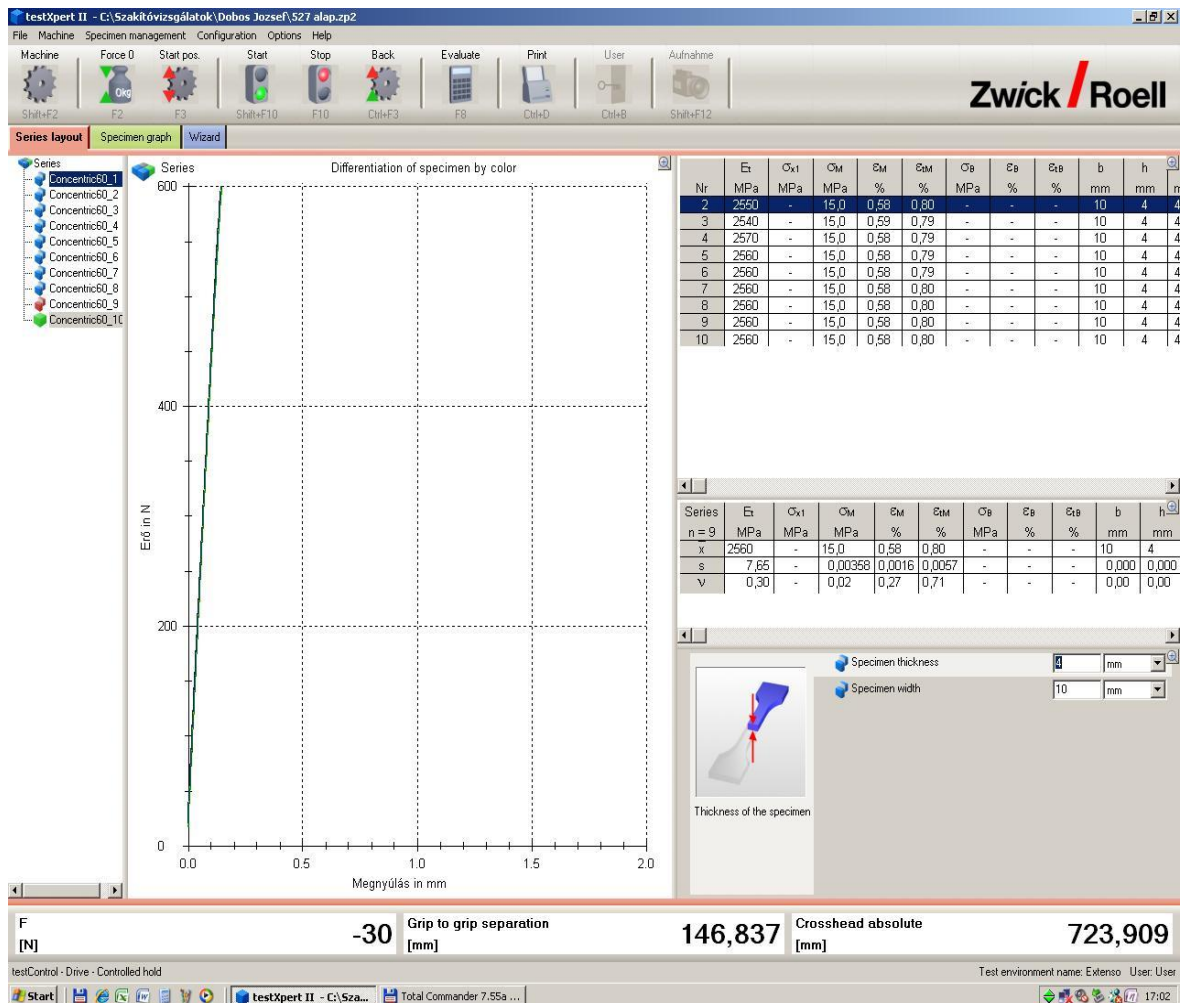
1. **Dobos, J.**; Keresztes, R. Oldal, I.; 3D nyomtatott szendvicsszerkezetű görgők tribológiai hajtásvizsgálata, *Mezőgazdasági Technika (megjelenés alatt)*
2. Kári-Horváth, A. ; Pataki, T. I. ; **Dobos, J.** ; Szilágyi, N., Ultrahangos fémhegesztés bemutatása, *Mezőgazdasági Technika* 63 : 7 pp. 18-20., 3 p. (2022)
3. 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)

1. 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.038>.
2. **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.

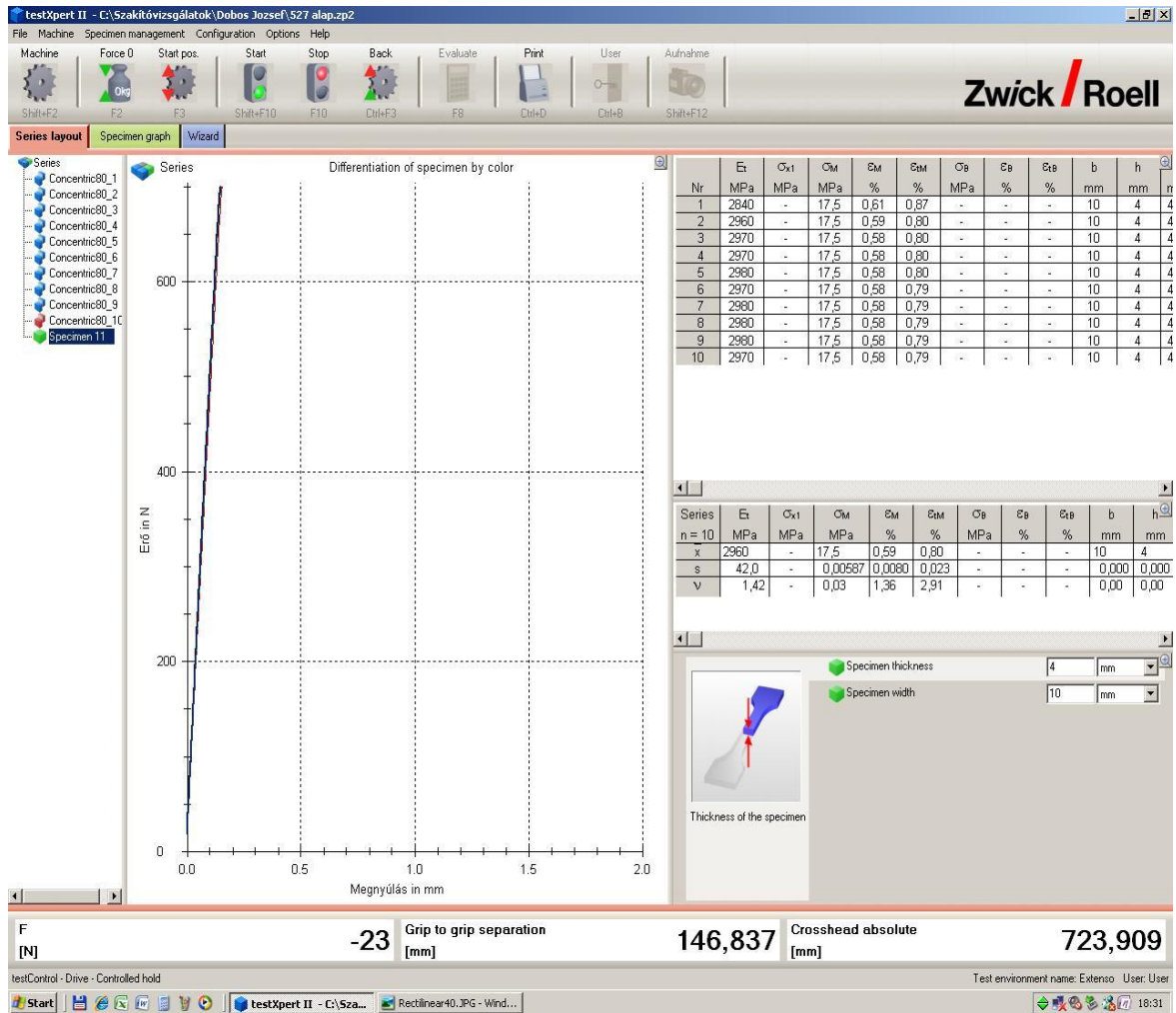
M3: Rugalmassági modulus vizsgálatok eredményei:



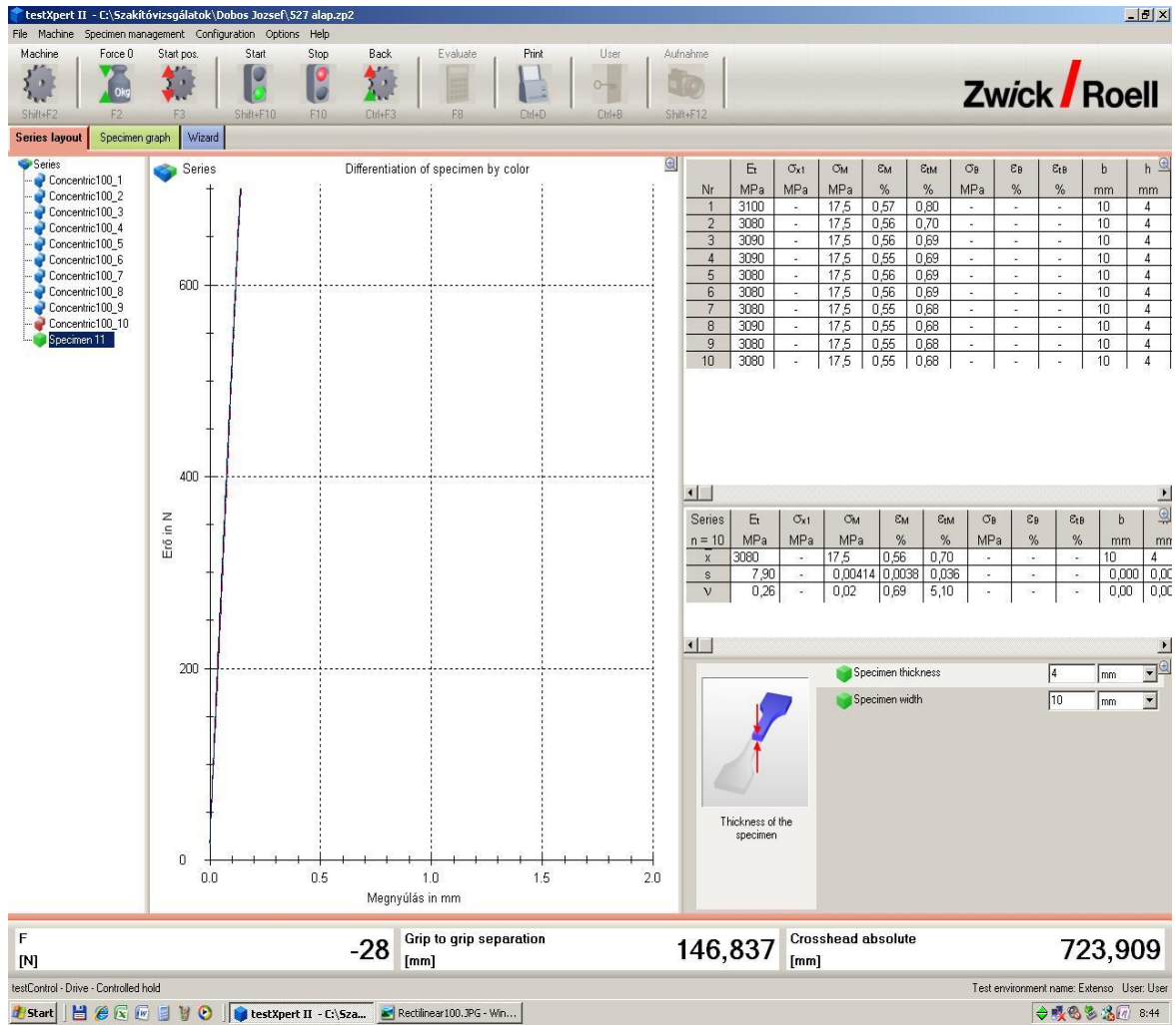
Concentric mintázatú, 40% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



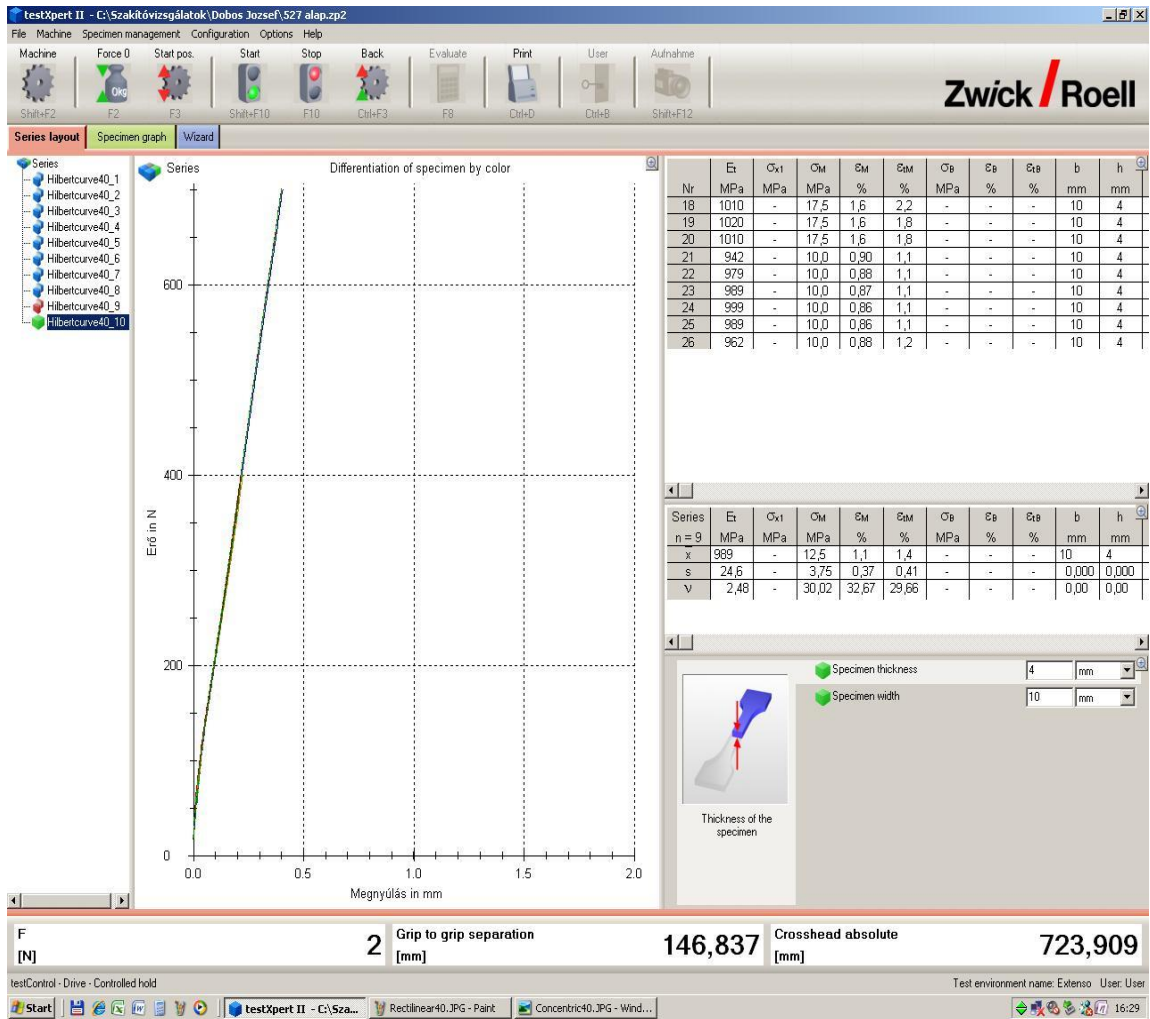
Concentric mintázatú, 60% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



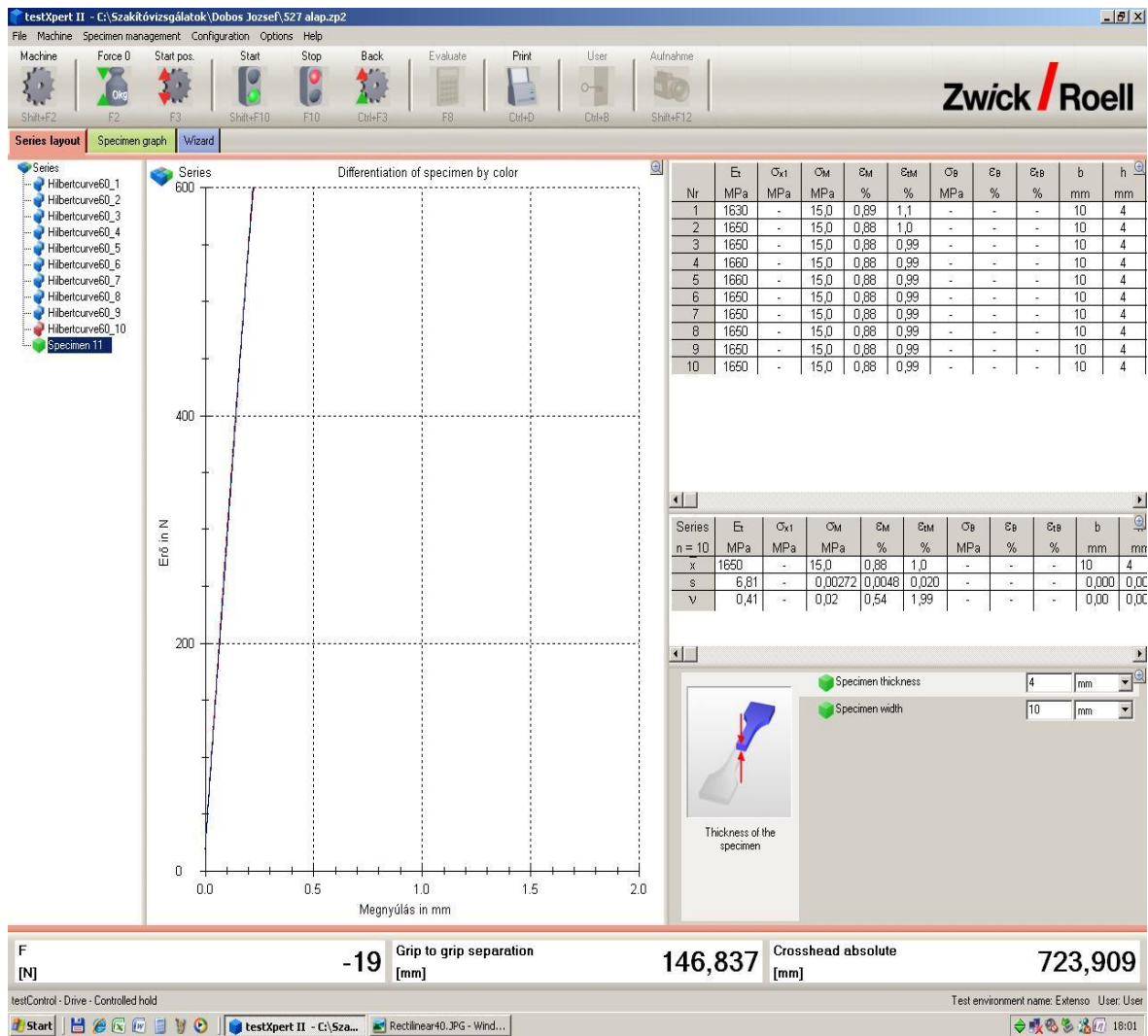
Concentric mintázatú, 80% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



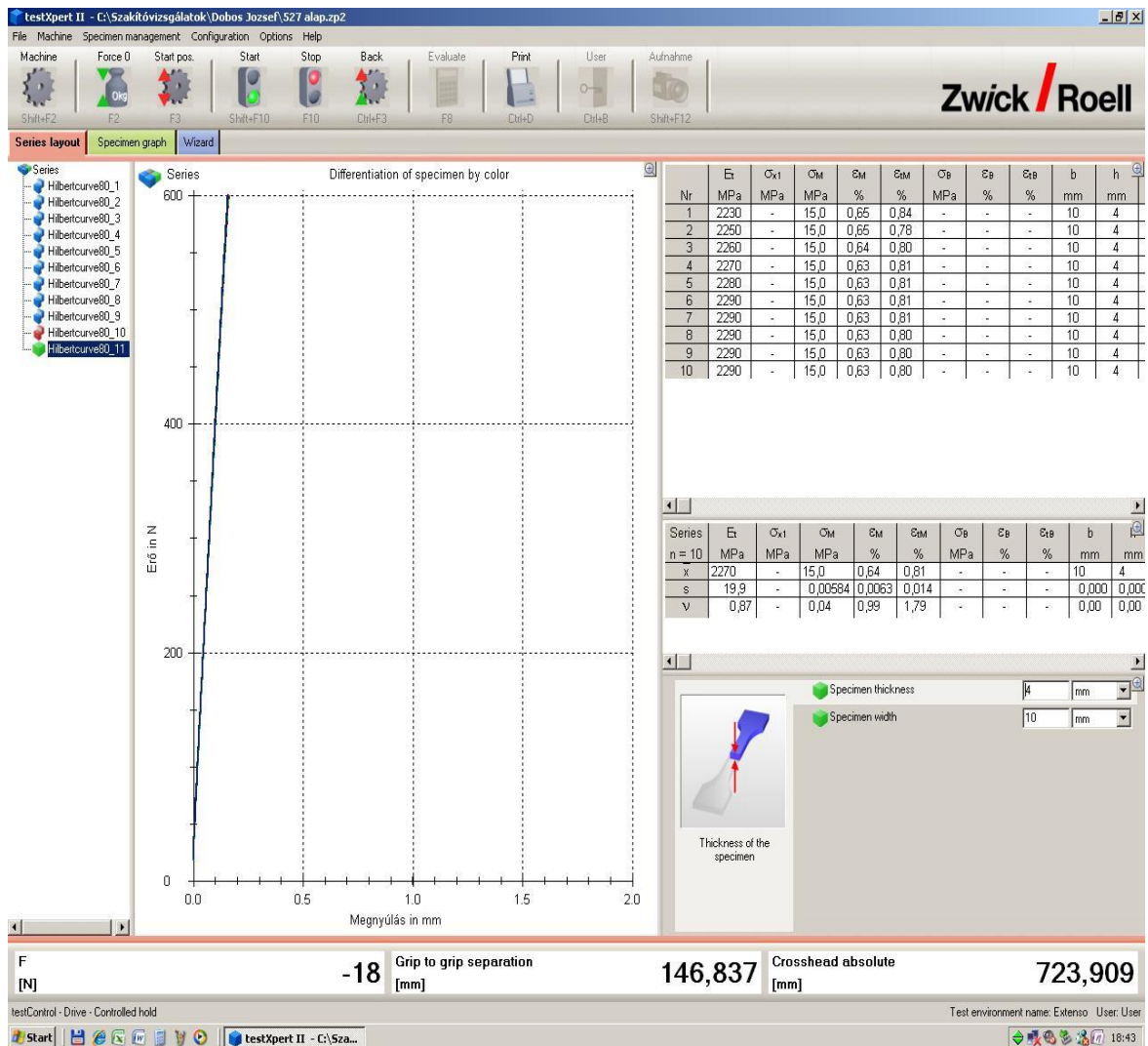
Concentric mintázatú, 100% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



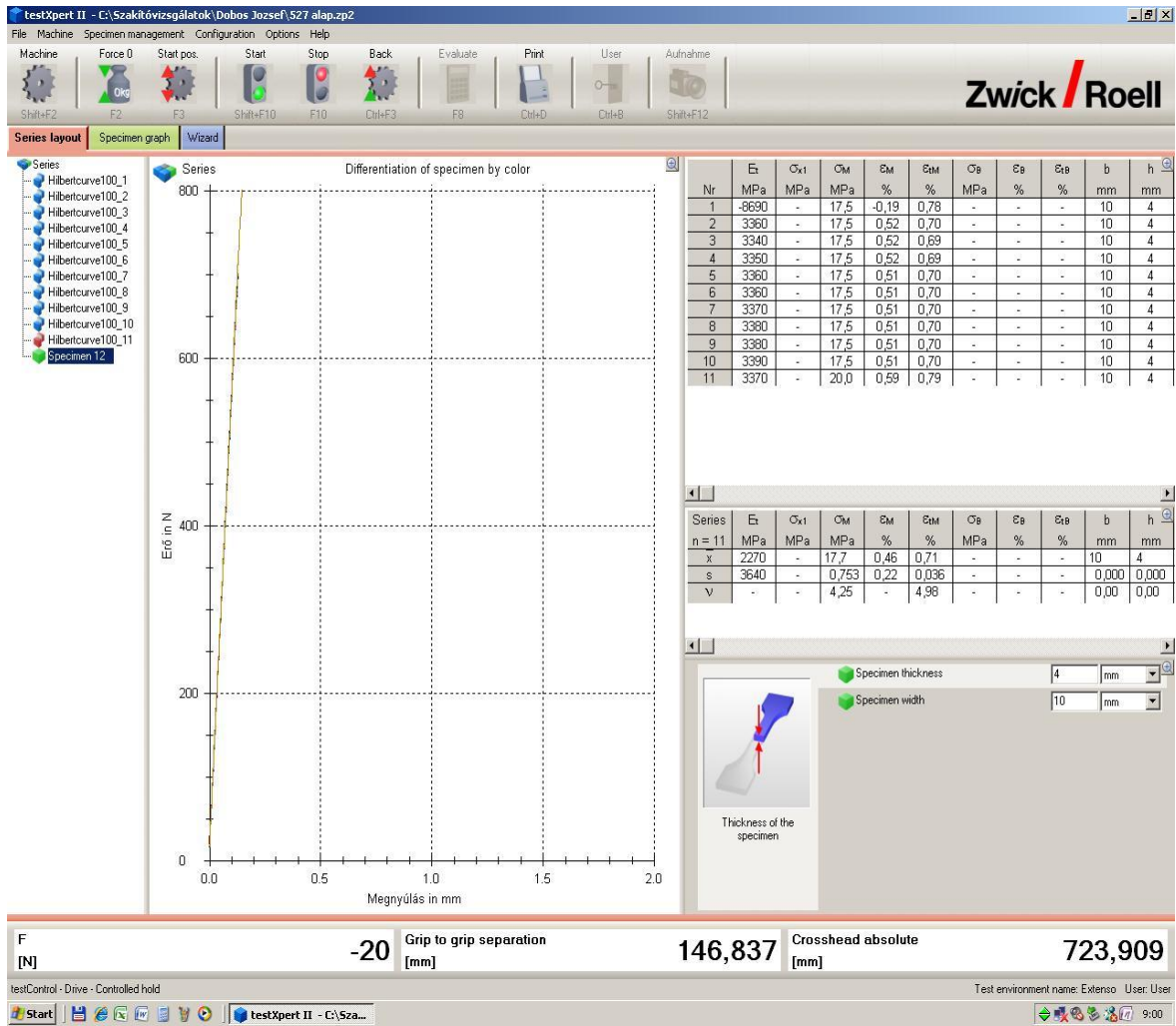
Hilbert curve mintázatú, 40% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



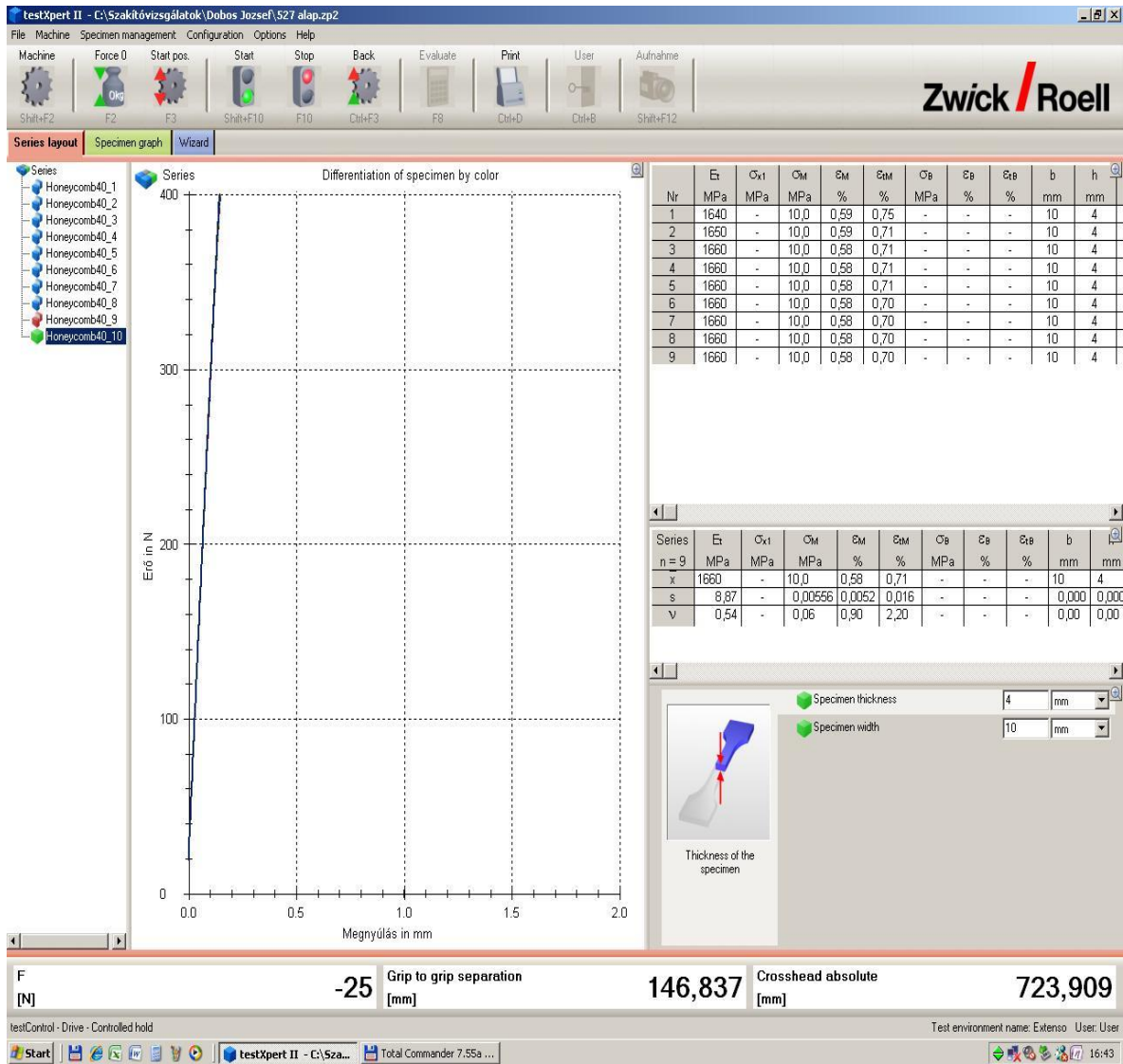
Hilbert curve mintázatú, 60% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



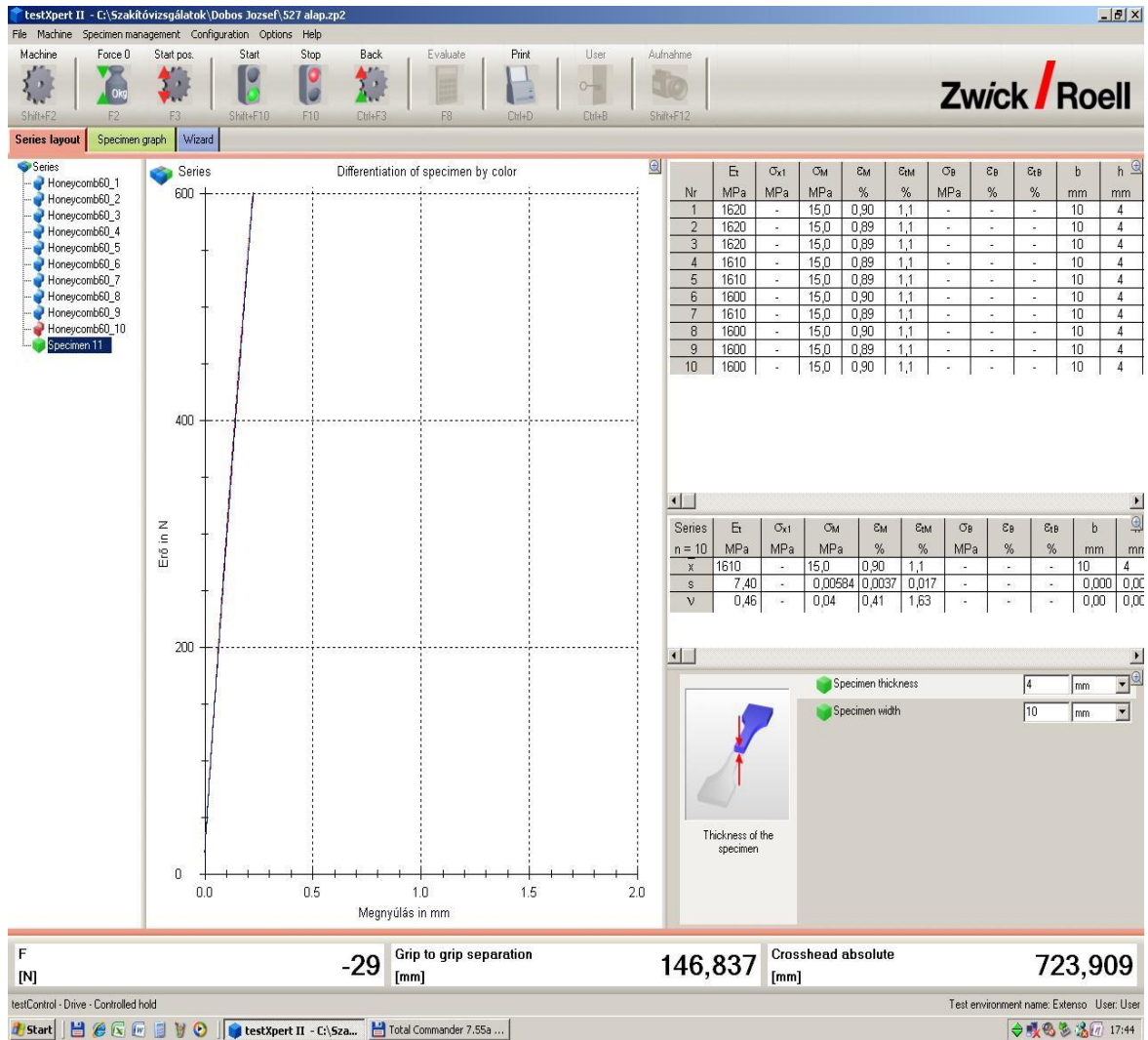
Hilbert curve mintázatú, 80% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



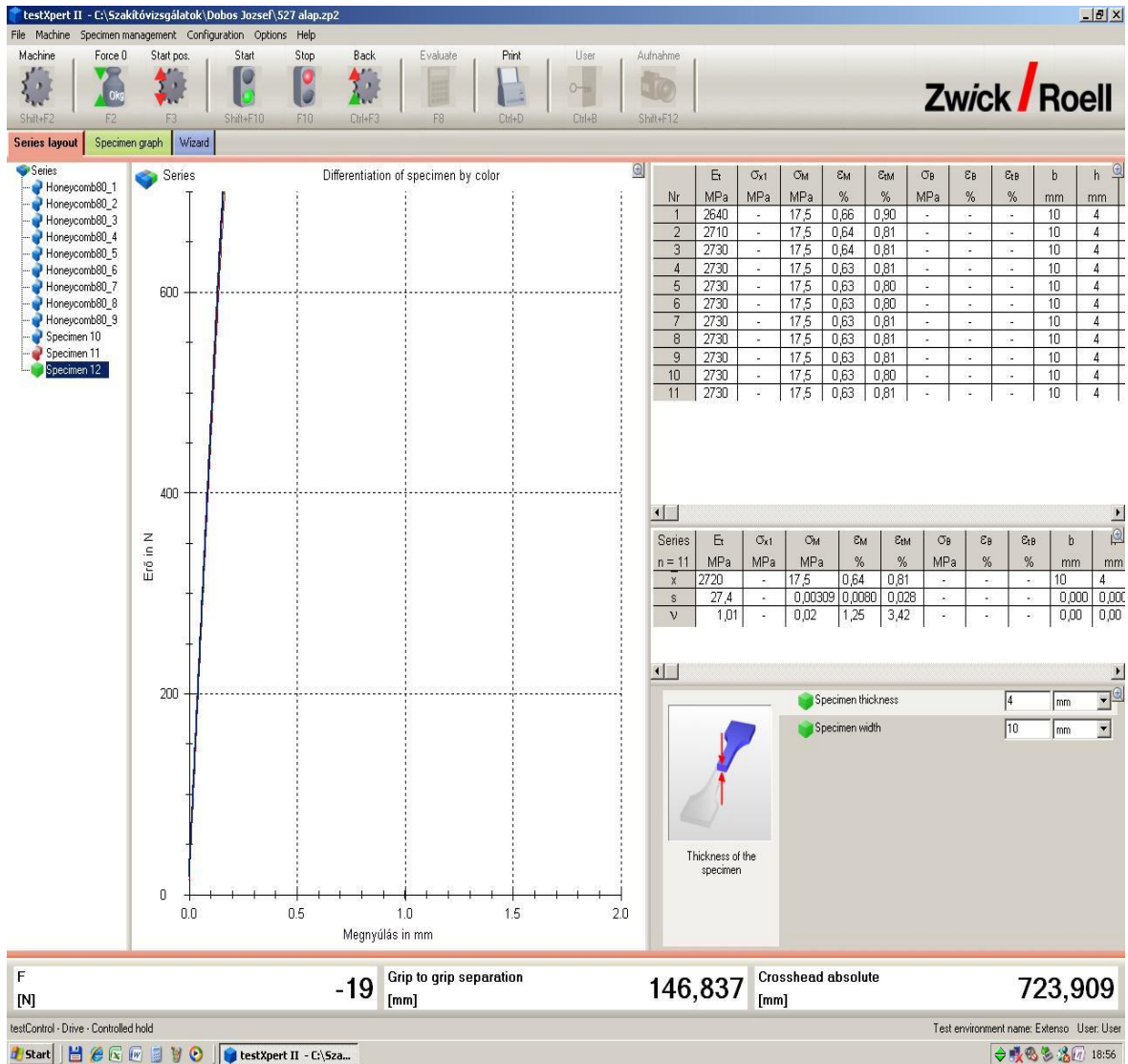
Hilbert curve mintázatú, 100% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



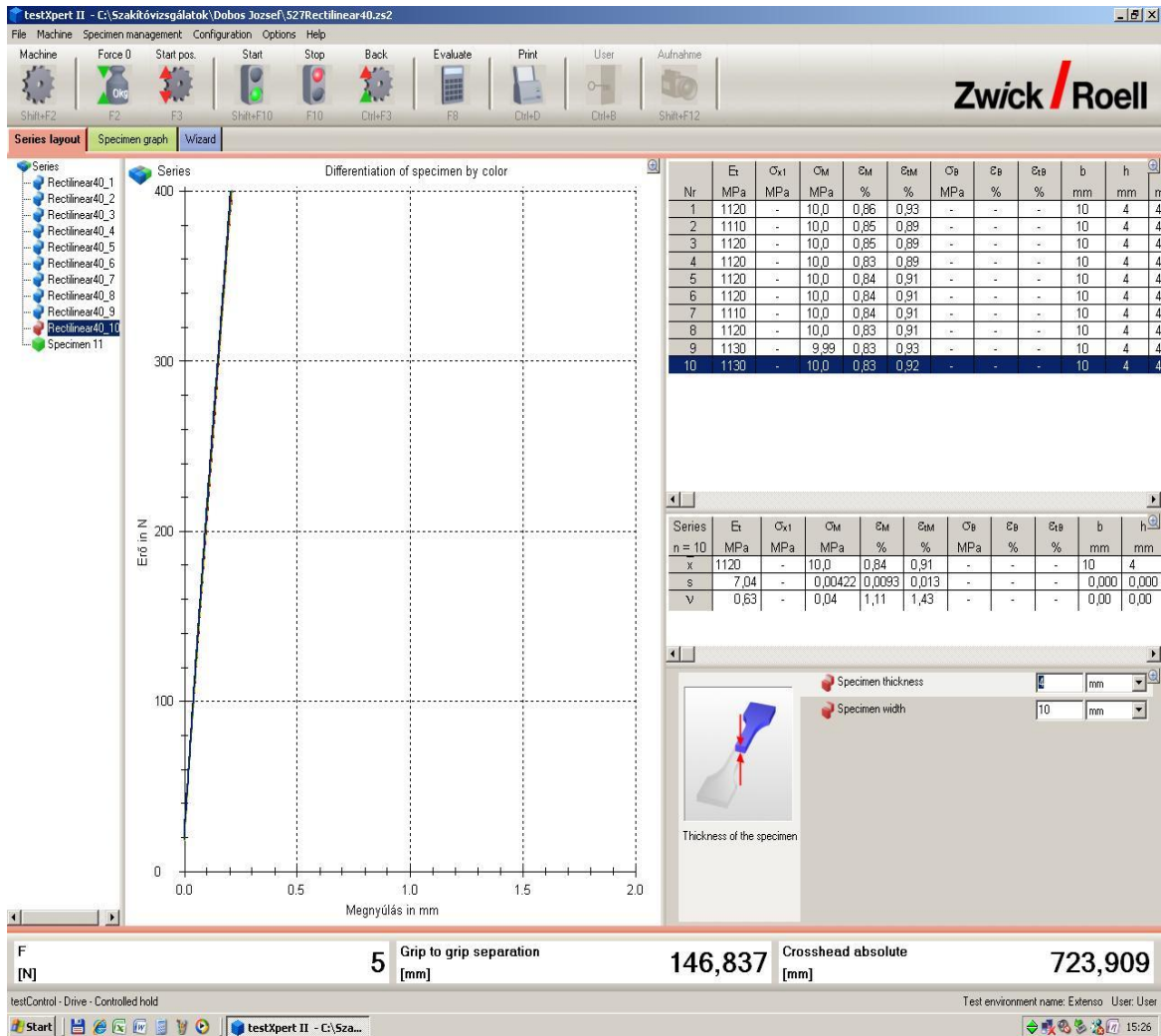
Honeycomb mintázatú, 40% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



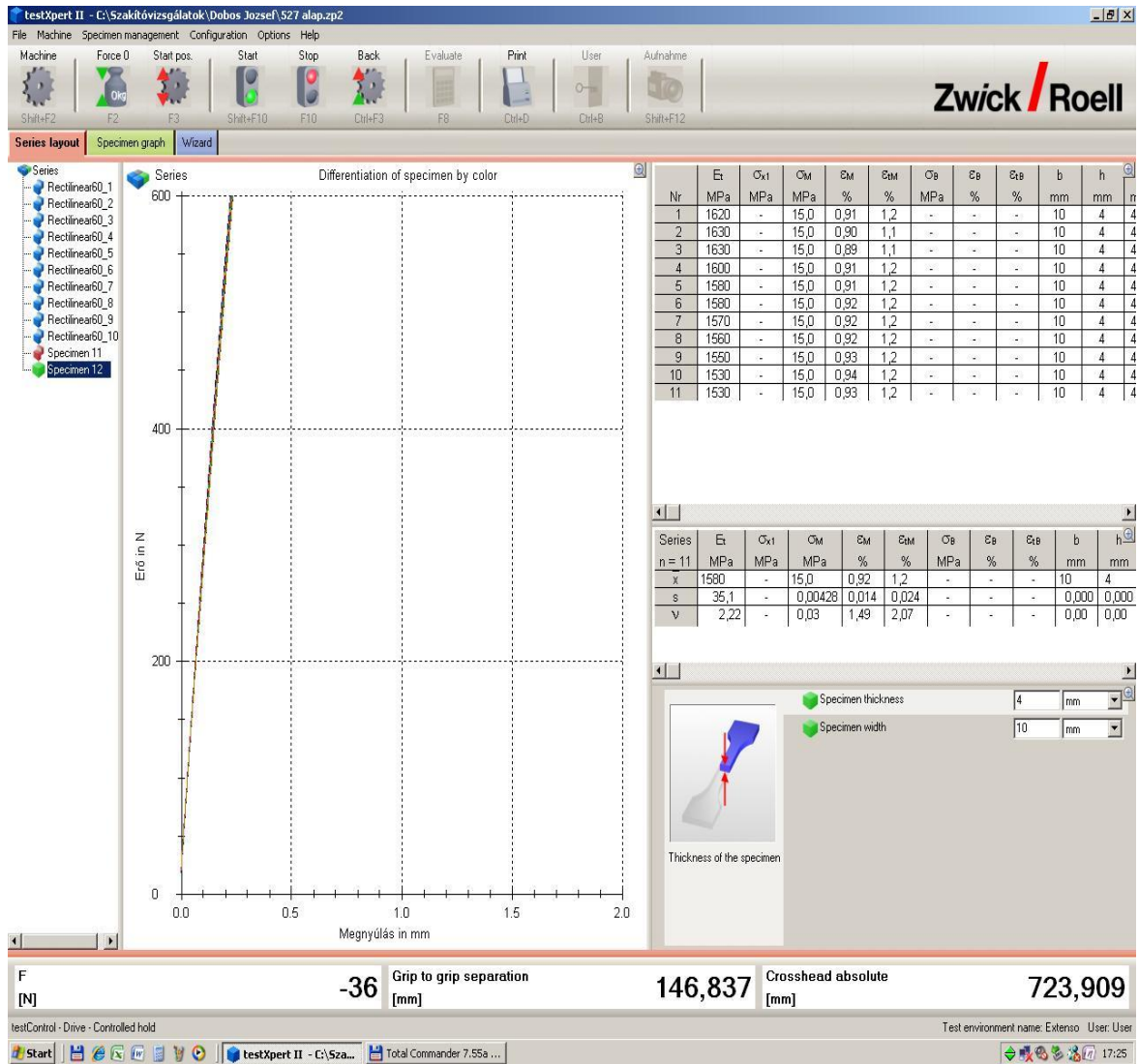
Honeycomb mintázatú, 60% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



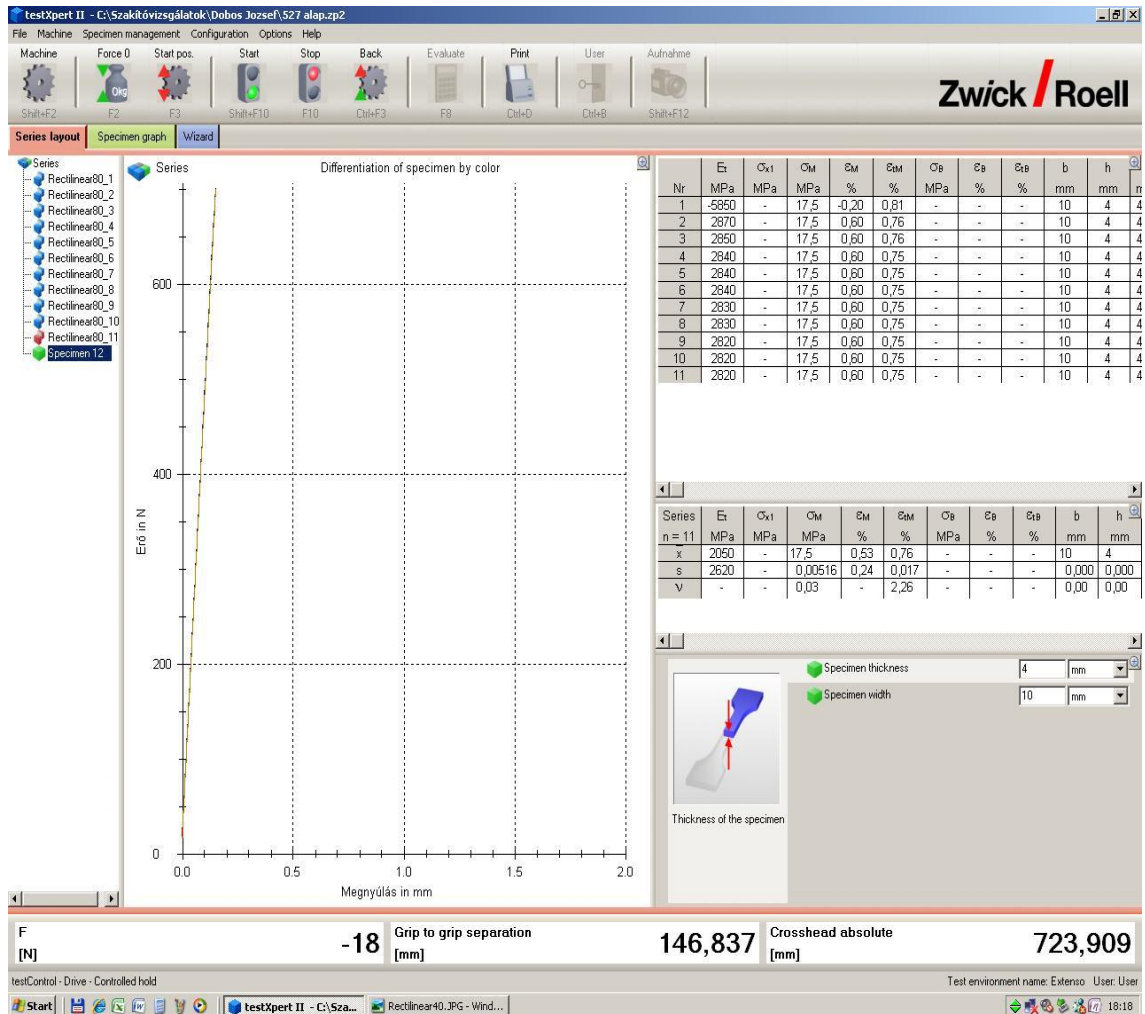
Honeycomb mintázatú, 80% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



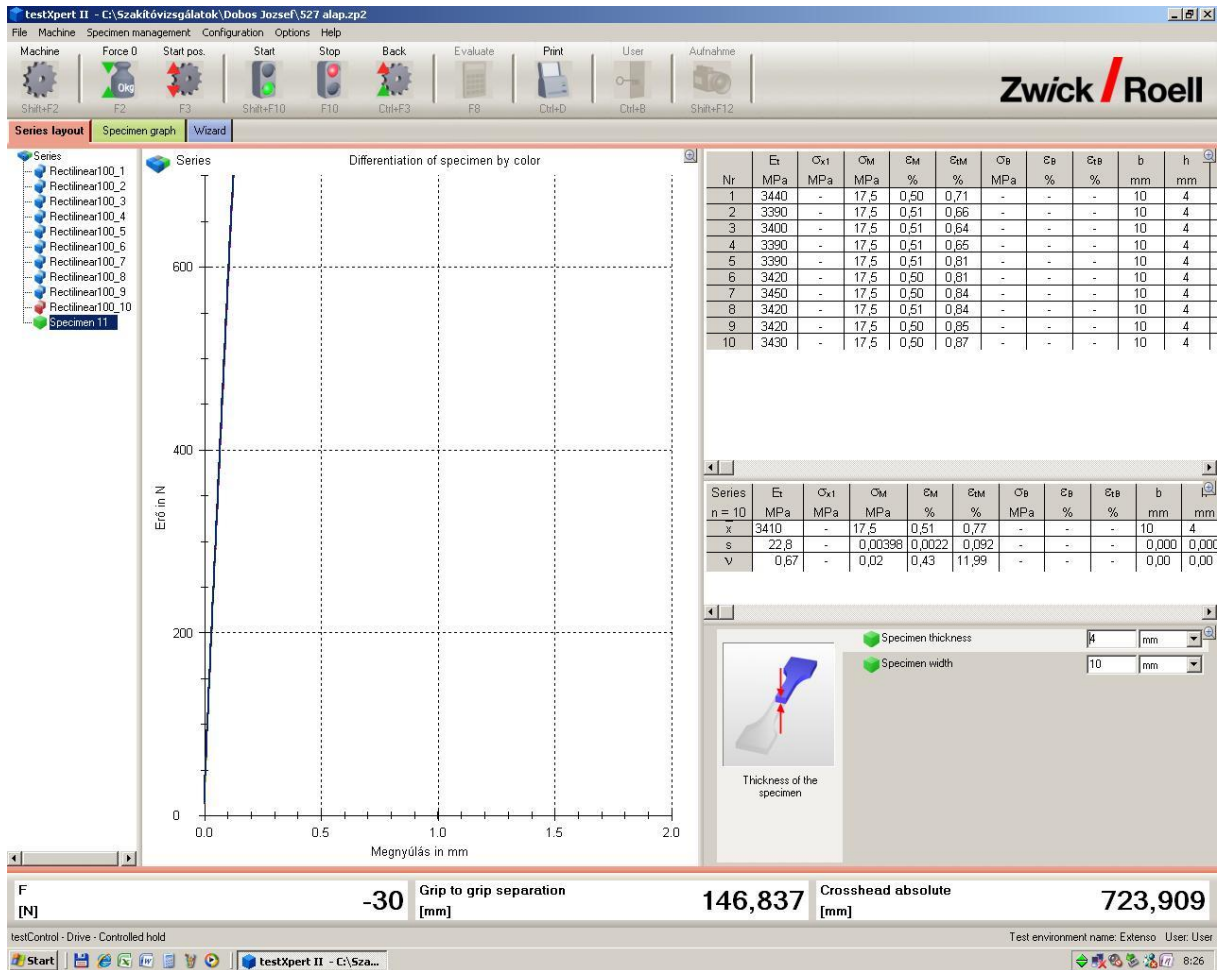
Rectilinear mintázatú, 40% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



Rectilinear mintázatú, 60% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



Rectilinear mintázatú, 80% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)



Rectilinear mintázatú, 100% kitöltöttségű próbatest (rugalmassági modulus vizsgálata)

M4: Az ISO 527 szerint nyomtatott elemek tömegmérési:

40 % Concentric 5.81 g	40 % Hilbertcurve 6.82 g	40 % Honeycomb 7.42 g	40% Rectilinear 6.68 g
60 % Concentric 8.10 g	60 % Hilbertcurve 8.27 g	60 % Honeycomb 8.04 g	60% Rectilinear 7.57 g
80 % Concentric 9.50 g	80 % Hilbertcurve 9.52 g	80 % Honeycomb 9.93 g	80% Rectilinear 9.93 g
100 % Concentric 10.18 g	100 % Hilbertcurve 11.05 g	100 % Honeycomb	100 % Rectilinear 10.92 g

M5: Szimulációs hajlítás során keletkezett feszültség és maximális erő értékek:

	40 % Concentric 5.81 g		40 % Hilbertcurve 6.82 g		40 % Honeycomb 7.42 g		40 % Rectilinear 6.68 g	
0.1	22.9	46.16	19.4	45.94	59.62	43.61	59.79	45.1
	3.65	313.7	3.33	291.3	3.54	340.39	3.37	259.64
0.2	59.72	46.05	60.26	45.63	59.82	45.97	60.15	45.72
	4.53	252.76	3.57	271.71	4.21	286.22	3.67	238.42
0.3	59.9	45.91	60.71	45.3	60.05	45.97	60.54	45.42
	5.77	198.44	3.95	245.57	5.17	233.07	4.14	211.35
0.4	60.13	45.73	61.22	44.92	60.35	45.57	61	45.08
	7.24	158.15	4.44	218.47	6.3	191.27	4.75	184.21
0.5	60.43	45.51	61.85	44.46	60.72	45.29	61.58	44.66
	8.79	130.26	5.05	192.08	7.56	159.39	5.47	159.96
0.6	60.82	45.21	62.62	43.91	61.21	44.92	62.286	44.15
	10.4	110.1	5.72	169.58	8.94	134.79	6.26	139.77
0.7	61.33	44.84	63.58	43.25	61.83	44.48	63.17	45.53
	12.07	94.86	6.5	149.23	10.38	116.09	7.16	122.21
0.8	61.981	44.37	64.781	42.45	62.62	43.91	64.29	42.77
	13.806	82.93	7.37	131.61	11.9	101.26	8.14	107.49
0.9	62.8	43.79	66.271	41.5	63.61	43.23	65.67	41.88
	15.64	73.21	8.33	116.45	13.51	89.19	9.22	94.9
1	63.82	43.09	68.126	40.37	64.85	42.4	67.4	40.8
	17.58	65.13	9.41	103.08	15.24	79.07	10.42	83.97
1.1	65.08	42.26	70.44	39.04	66.38	41.43	69.56	39.53
	19.68	58.18	10.64	91.16	17.12	70.38	11.79	74.21
1.2	66.62	41.28	73.33	37.5	68.279	40.27	72.25	38.06
	21.95	52.16	12.05	80.46	19.2	62.76	13.37	65.44
1.3	68.52	40.13	76.99	35.72	70.63	38.94	75.64	36.36
	24.45	46.83	13.72	70.7	21.53	55.97	15.21	57.52
1.4	70.85	38.81	81.64	33.68	73.54	37.39	79.94	34.4
	27.25	42.01	15.75	61.59	24.18	49.83	17.39	50.32
1.5	73.72	37.3	87.69	31.36	77.17	35.64	85.48	32.17
	30.44	37.61	18.26	53.12	27.27	44.19	20.05	43.64

40 % kitöltöttséggel rendelkező mintázatok eredményei

	60 % Concentric 8.10 g		60 % Hilbertcurve 8.27 g		60 % Honeycomb 8.04 g		60 % Rectilinear 7.57 g	
0.1	59.45	46.26	59.63	46.12	59.63	46.11	59.64	46.11
	3.52	423.3	3.54	331.92	3.52	29.55	3.5	334.28
0.2	59.55	46	49.82	45.97	59.85	45.95	59.87	45.93
	5.56	267.99	4.2	279.76	4.15	279.52	4.09	286.06
0.3	59.63	46.11	60.06	45.79	60.01	45.76	60.13	45.73
	7.55	197.35	5.14	228.6	5.04	230.16	4.95	236.36
0.4	59.75	46.02	60.36	45.56	60.4	45.53	60.45	45.49
	9.59	155.37	6.26	187.7	6.11	189.85	5.96	196.31
0.5	59.91	45.9	60.74	45.27	60.8	45.23	60.86	45.18
	11.67	127.68	7.52	156.25	7.3	158.9	7.08	165.25
0.6	60.11	45.75	61.22	44.92	61.3	44.86	61.39	44.79
	13.79	108.05	8.88	132.32	8.61	134.73	8.34	140.29
0.7	60.39	45.54	61.85	44.46	61.95	44.39	62.06	44.31
	15.96	93.36	10.32	113.86	10	116	9.69	120.74
0.8	60.74	45.28	62.64	43.9	62.77	43.81	62.91	43.71
	18.19	81.91	11.82	99.41	11.47	101.13	11.11	105.31
0.9	61.19	44.94	63.64	43.21	63.81	43.1	63.97	43.99
	20.48	72.75	13.43	87.5	13.03	89.02	12.63	92.64
1	61.74	44.54	64.88	42.38	65.1	42.24	65.3	42.11
	22.86	65.18	15.15	75.8	14.71	78.86	14.27	81.99
1.1	62.422	44.06	66.43	41.39	66.69	41.24	66.95	41.07
	25.35	58.77	17.03	68.99	16.54	70.13	16.06	72.85
1.2	63.25	43.48	68.34	40.24	68.67	40.05	69	39.85
	27.98	53.25	19.1	61.52	18.57	62.47	18.05	64.82
1.3	64.238	42.81	70.71	38.89	71.12	38.67	71.54	38.44
	30.74	48.47	21.42	54.86	20.86	55.61	20.29	57.66
1.4	65.43	42.03	73.64	37.34	74.17	37.08	74.72	36.81
	33.71	44.2	24.06	48.84	23.47	49.42	22.87	51.16
1.5	66.85	41.14	77.31	35.57	77.99	35.26	78.7	34.94
	36.91	40.37	27.15	43.81	26.53	43.72	25.9	45.17

60 % kitöltöttséggel rendelkező mintázatok eredményei

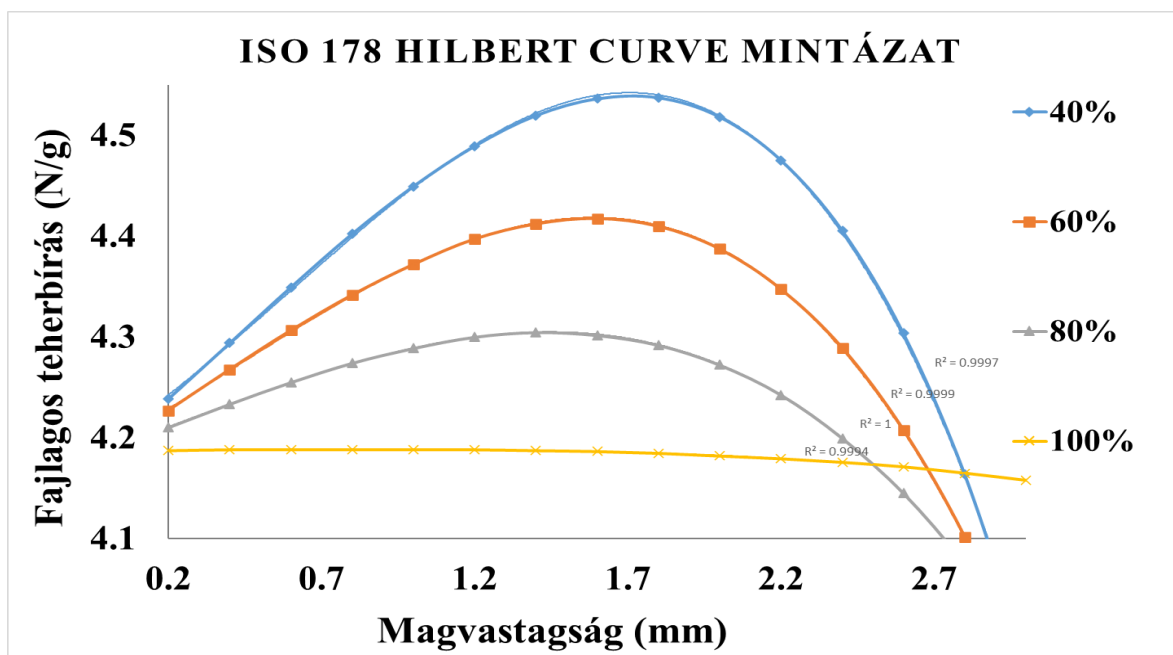
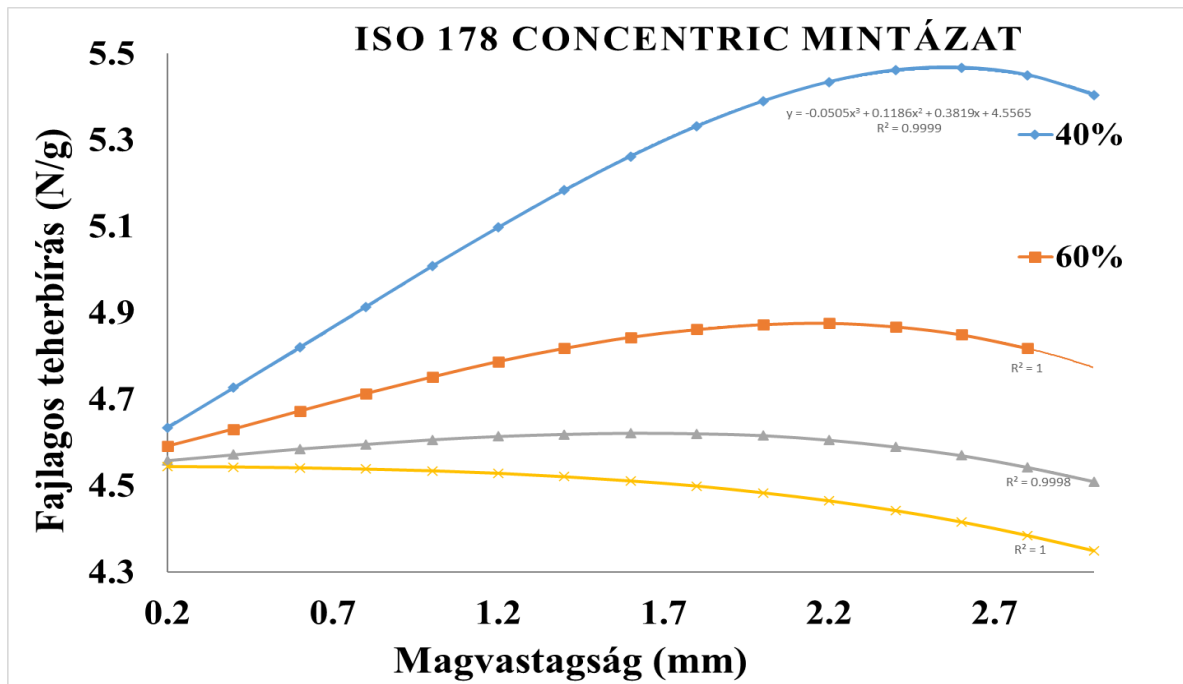
	80 % Concentric 9.50 g		80 % Hilbertcurve 9.52 g		80 % Honeycomb 9.93 g		80 % Rectilinear 9.93 g	
0.1	59.46	46.25	59.52	46.2	59.48	46.23	59.47	42.24
	4.17	566.95	3.8	386.84	4	452.5	4.07	527.03
0.2	59.48	46.23	59.61	46.13	59.52	46.2	59.5	46.21
	6.37	370.49	5.05	291.09	5.89	307.3	6.1	351.64
0.3	59.51	46.21	59.73	46.04	59.58	46.16	59.55	46.18
	8.72	270.64	6.77	217.13	8.03	225.4	8.32	257.81
0.4	59.57	46.16	59.89	45.92	59.66	46.1	59.62	46.12
	11.11	212.42	8.58	171.33	10.22	177.1	10.59	202.55
0.5	59.64	46.11	60.11	45.75	59.79	45.99	59.72	46.05
	13.53	174.43	10.44	140.8	12.44	145.49	12.9	166.28
0.6	59.74	46.03	60.39	45.54	59.95	45.87	59.86	45.94
	15.98	147.68	12.34	119.12	14.7	123.13	15.24	140.75
0.7	59.88	45.92	60.76	45.26	60.17	45.7	60.05	45.79
	18.46	127.85	14.3	102.79	17	106.47	17.61	121.8
0.8	60.05	45.79	61.24	44.9	60.45	45.49	60.28	45.62
	20.98	112.49	16.32	90.07	19.35	93.54	20.03	107.09
0.9	60.28	45.62	61.84	44.47	60.8	45.23	60.58	45.39
	23.55	100.21	18.43	79.76	21.76	83.18	22.51	95.29
1	60.55	45.42	62.59	43.94	61.24	44.9	60.95	45.12
	26.18	90.14	20.63	71.25	24.25	74.64	25.05	85.63
1.1	60.9	45.16	63.5	43.31	61.77	44.52	61.4	44.79
	28.85	81.8	22.96	64.02	26.82	67.49	27.67	77.52
1.2	61.31	44.85	64.62	42.55	62.42	44.06	61.95	44.39
	31.62	74.64	25.45	57.76	29.5	61.35	30.39	70.58
1.3	61.79	44.5	65.98	41.68	63.12	43.57	62.61	43.92
	34.47	68.46	28.13	52.26	32.32	56	33.23	64.55
1.4	62.38	44.08	67.63	40.66	64.12	42.89	63.38	43.39
	37.44	63.03	31.05	47.34	35.3	51.27	36.2	59.25
1.5	63.06	43.61	69.61	39.5	65.22	42.16	64.3	42.76
	40.55	58.2	34.28	42.88	38.47	47.05	39.35	54.51

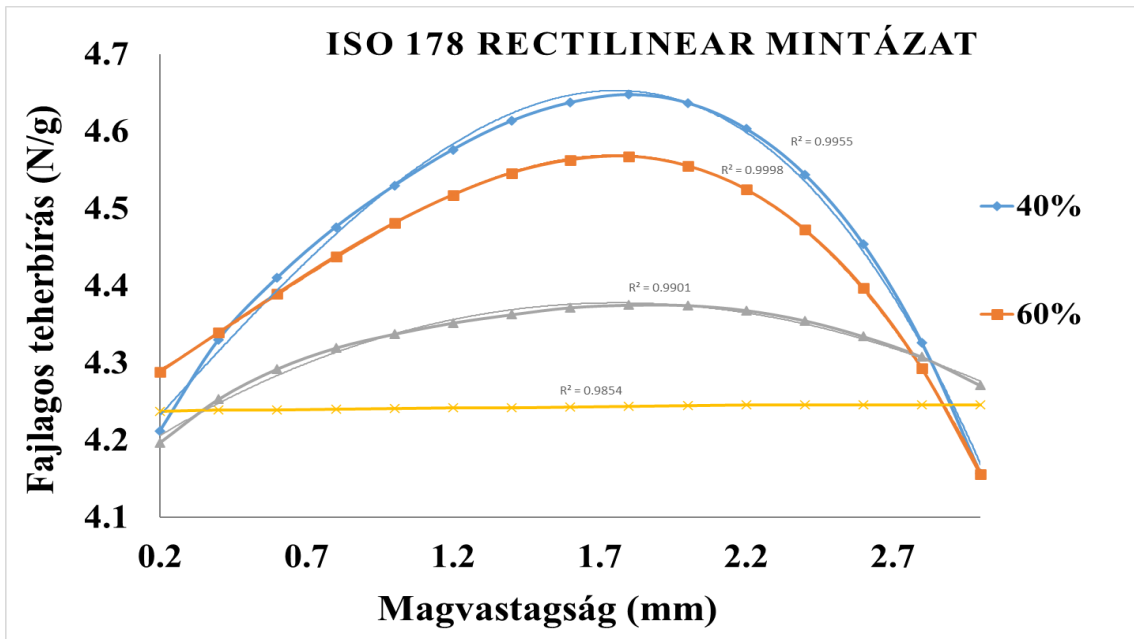
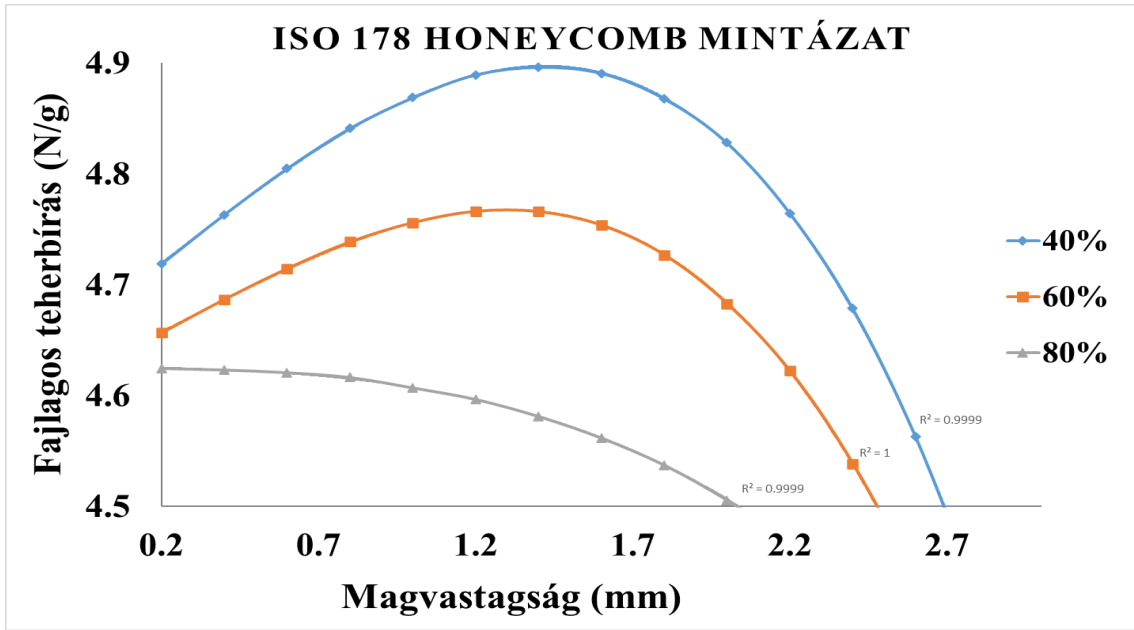
80 % kitöltöttséggel rendelkező mintázatok eredményei

	100 % Hilbertcurve 11.05 g		100 % Concentric 10.18 g		100 % Rectilinear 10.92 g	
0.1	59.43	46.27	59.45	46.26	59.43	46.27
	4.54	605.73	4.26	645.54	4.61	596.53
0.2	59.42	46.28	59.46	46.25	59.41	46.29
	7.15	384.61	6.59	417.29	7.29	377.23
0.3	59.42	46.28	59.49	46.23	59.4	46.29
	9.84	279.47	9.04	304.2	10.01	274.72
0.4	59.42	46.28	59.52	46.2	59.39	46.3
	12.56	218.95	11.52	238.71	12.82	214.51
0.5	59.42	46.28	59.57	46.16	59.38	46.31
	15.3	179.74	14.03	195.96	15.61	176.17
0.6	59.42	46.28	59.65	46.1	59.37	46.32
	18.05	152.35	16.57	165.96	18.42	149.29
0.7	53.43	46.27	59.75	46.02	59.36	46.32
	20.82	132.08	19.13	143.75	21.24	129.47
0.8	59.45	46.26	59.88	45.92	59.36	46.33
	23.6	116.52	21.73	126.55	24.01	114.53
0.9	59.47	46.24	60.04	45.8	59.34	46.34
	26.4	104.17	24.36	112.89	26.9	102.23
1	59.51	46.21	60.25	45.64	59.33	46.35
	29.21	94.14	27.03	101.74	29.75	92.44
1.1	59.55	46.18	60.51	45.45	59.32	46.36
	32.05	85.8	29.78	92.34	32.61	84.33
1.2	59.6	46.14	60.81	45.22	59.31	46.36
	34.91	78.77	32.56	84.45	35.48	77.51
1.3	59.67	46.09	61.18	44.95	59.31	46.36
	37.8	72.75	35.43	77.62	38.37	71.67
1.4	59.76	46.02	61.61	44.63	59.31	46.36
	40.71	67.55	38.39	71.63	41.27	66.63
1.5	59.86	45.94	62.12	44.27	59.32	46.36
	43.66	62.99	41.46	66.33	44.19	62.23

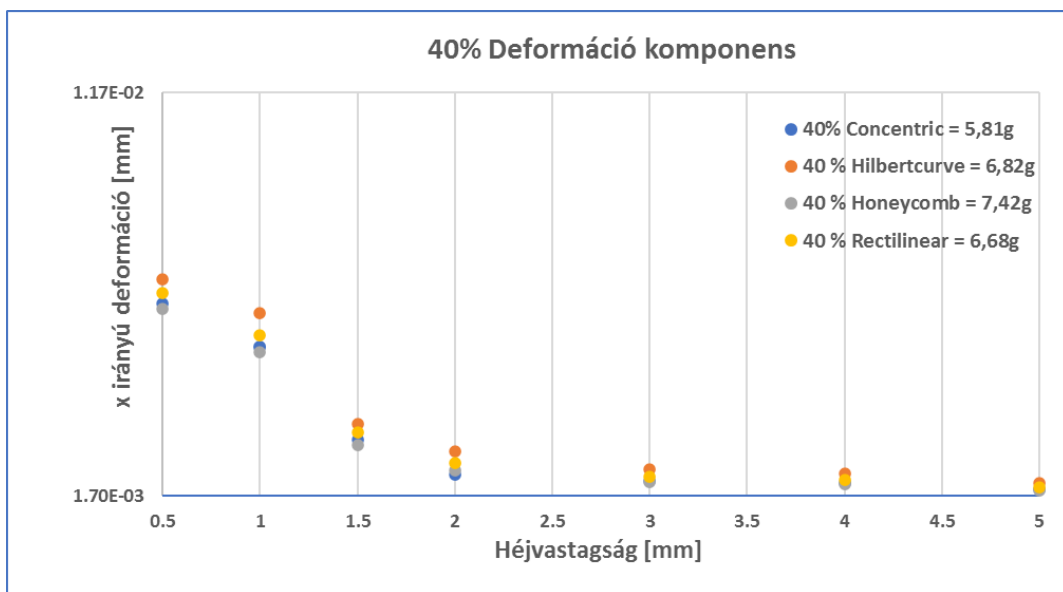
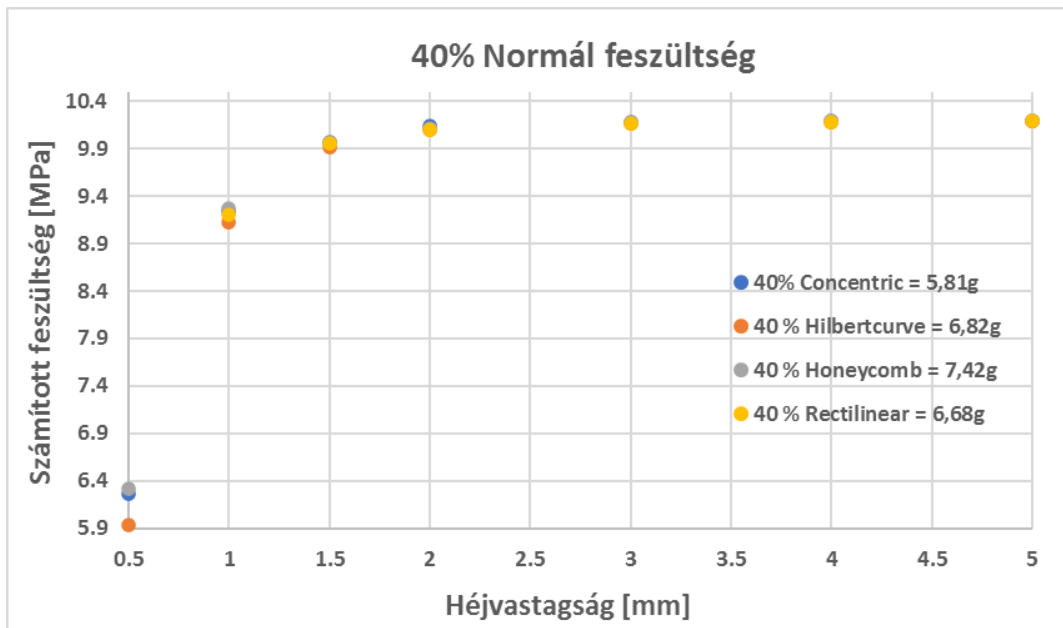
100 % kitöltöttséggel rendelkező mintázatok eredményei

M6: Optimum függvények görbéi, polinomális trendvonalak:

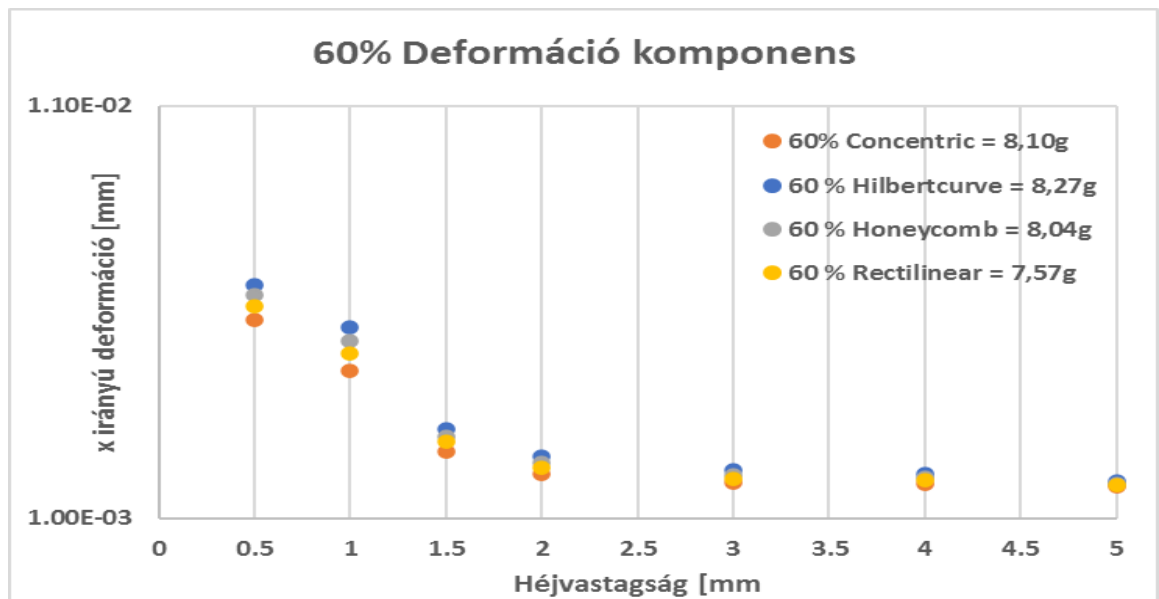
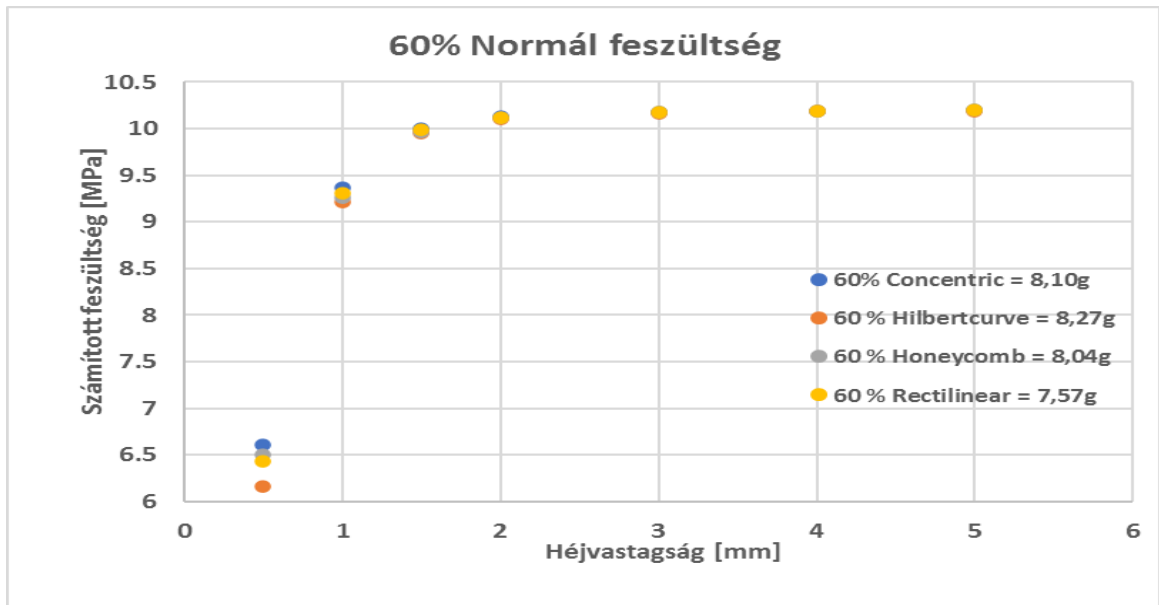




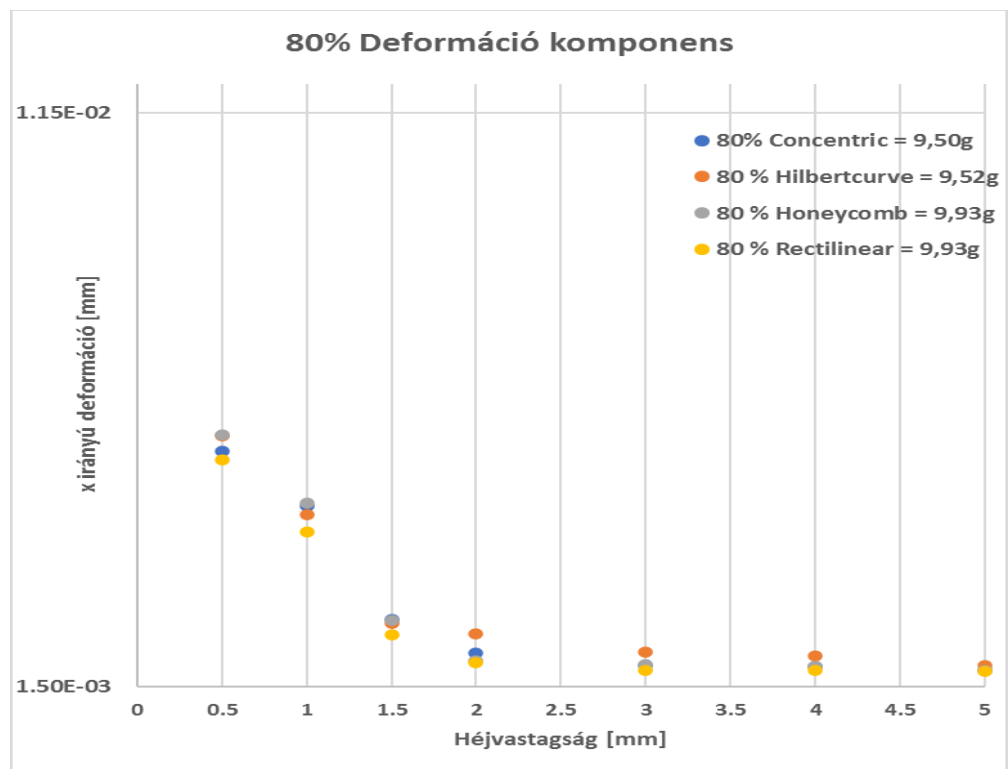
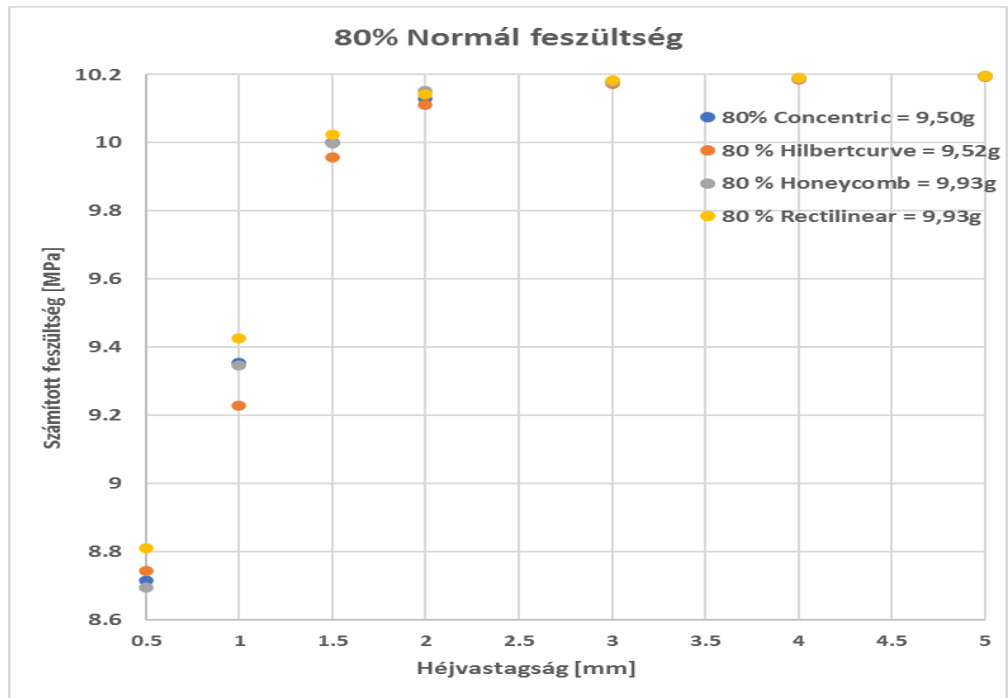
M7: Szimulációs gépelem vizsgálatok eredményei:



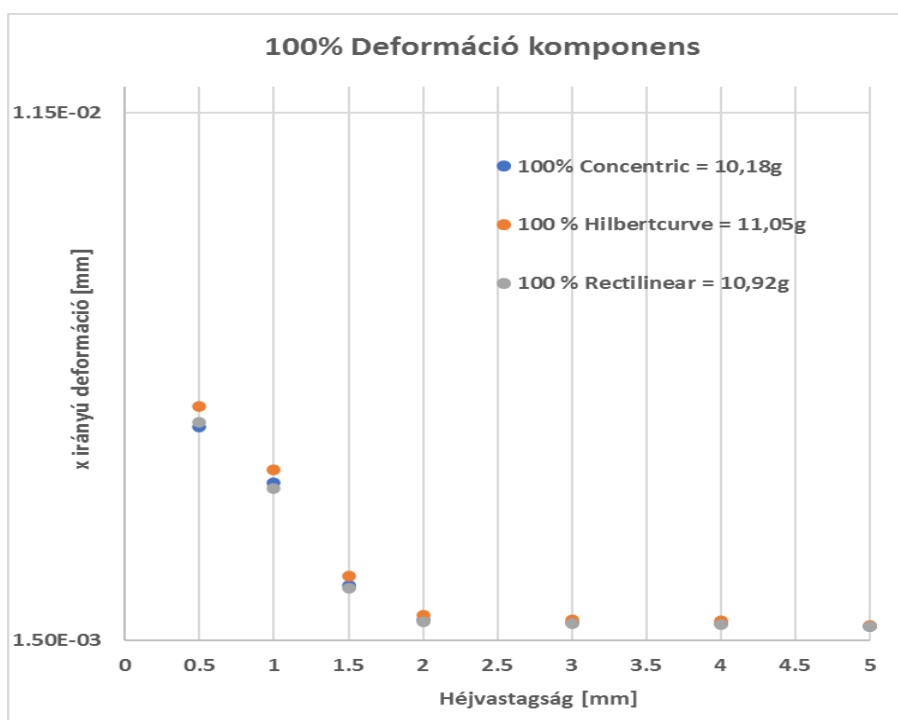
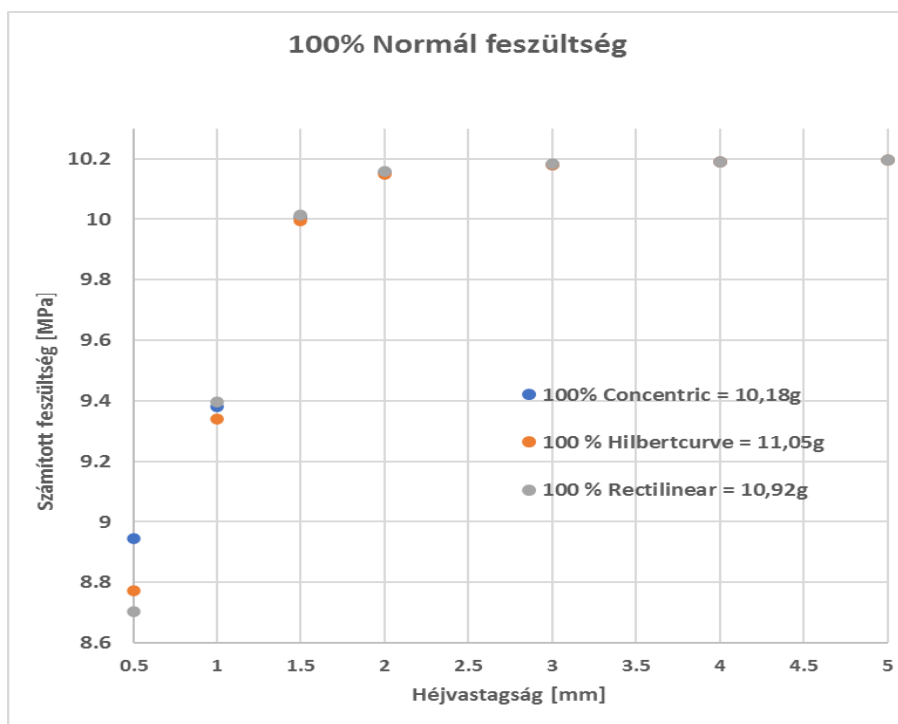
mm	40% Concentric = 5,81g			40% Hilbertcurve = 6,82g			40% Honeycomb = 7,42g			40% Rectilinear = 6,68g		
	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress
0.5	3.8423	6.46E-03	6.2612	3.5422	7.08E-03	5.9389	3.8946	6.35E-03	6.3207	3.7499	6.73E-03	6,1
1	4.1541	5.38E-03	9.2457	3.8228	6.23E-03	9.1226	4.2129	5.25E-03	9.2639	4.0277	5.68E-03	9.2024
1.5	4.8797	3.09E-03	9.9637	4.6087	3.49E-03	9.9176	5.0178	2.95E-03	9.9693	4.7564	3.26E-03	9.9486
2	5.3422	2.22E-03	10.135	4.9854	2.79E-03	10.102	5.3315	2.32E-03	10.116	5.157	2.51E-03	10.106
3	5.48E+00	2.07E-03	10.173	5.1787	2.36E-03	10.166	5.5379	2.03E-03	10.174	5.3746	2.17E-03	10.171
4	5.4735	2.02E-03	10.186	5.1981	2.24E-03	10.184	5.5222	1.98E-03	10.187	5.3756	2.09E-03	10.185
5	5.6109	1.86E-03	10.194	5.3639	2.02E-03	10.193	5.6495	1.84E-03	10.195	5.529	1.91E-03	10.194



mm	60% Concentric = 8,10g			60% Hilbertcurve = 8,27g			60% Honeycomb = 8,04g			60% Rectilinear = 7,57g		
	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress
0.5	4.1739	5.82E-03	6.6057	3.7567	6.65E-03	6.16E+00	3.9	6.41E-03	6.5	4.0019	6.13E-03	6.4359
1	4.4683	4.59E-03	9.362	4.05E+00	5.64E-03	9.211	4.1861	5.30E-03	9.2556	4.3088	4.98E-03	9.3034
1.5	5.3105	2.60E-03	10.002	4.85E+00	3.15E-03	9.9488	4.9914	2.98E-03	9.9665	5.0632	2.86E-03	9.9844
2	5.6252	2.07E-03	10.132	5.18E+00	2.49E-03	10.107	5.3071	2.35E-03	10.115	5.4492	2.21E-03	10.123
3	5.7794	1.86E-03	10.18	5.39E+00	2.15E-03	10.171	5.5153	2.05E-03	10.174	5.6361	1.95E-03	10.177
4	5.7385	1.84E-03	1.02E+01	5.39E+00	2.08E-03	10.186	5.502	1.99E-03	10.187	5.6118	1.91E-03	10.188
5	5.8388	1.78E-03	10.196	5.5435	1.90E-03	10.194	5.6336	1.84E-03	10.195	5.7253	1.81E-03	10.195

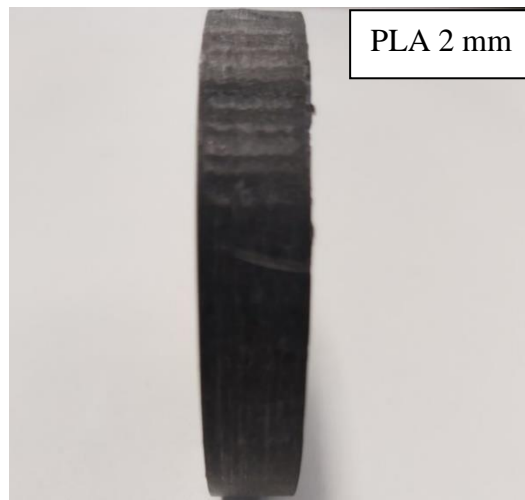


mm	80% Concentric = 9,50g			80% Hilbertcurve = 9,52g			80% Honeycomb = 9,93g			80% Rectilinear = 9,93g		
	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress
0.5	4.3845	5.60E-03	8.7159	4.0289	5.87E-03	8.7434	4.609	5.45E-03	8.8117	4.1307	5.89E-03	8.6957
1	4.445	4.65E-03	9.3542	4.11E+00	4.49E-03	9.2299	4.6666	4.19E-03	9.427	4.4286	4.69E-03	9.348
1.5	5.2092	2.67E-03	10.001	4.91E+00	2.61E-03	9.9566	5.4482	2.40E-03	10.025	5.2665	2.65E-03	9.9992
2	5.5987	2.09E-03	10.13	5.23E+00	2.42E-03	10.111	5.8086	1.93E-03	10.143	5.6547	1.95E-03	10.152
3	5.7554	1.87E-03	10.18	5.45E+00	2.10E-03	10.172	5.9415	1.79E-03	10.184	5.7445	1.88E-03	10.179
4	5.7174	1.85E-03	1.02E+01	5.44E+00	2.04E-03	10.186	5.8811	1.79E-03	10.191	5.7077	1.85E-03	10.189
5	5.82	1.78E-03	10.196	5.5852	1.87E-03	10.194	5.9642	1.76E-03	10.197	5.8114	1.79E-03	10.196

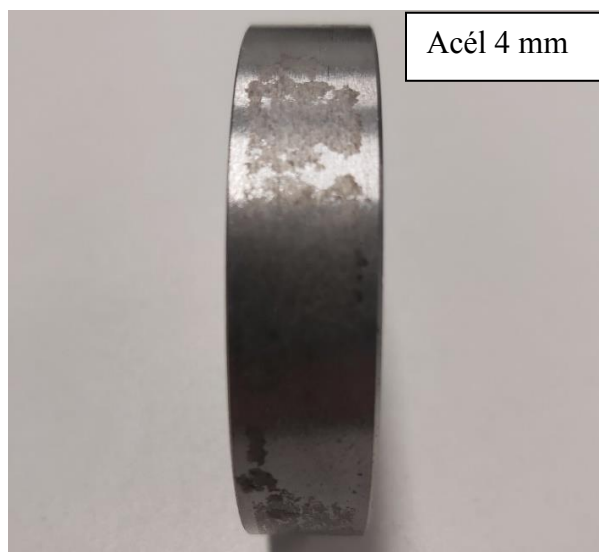
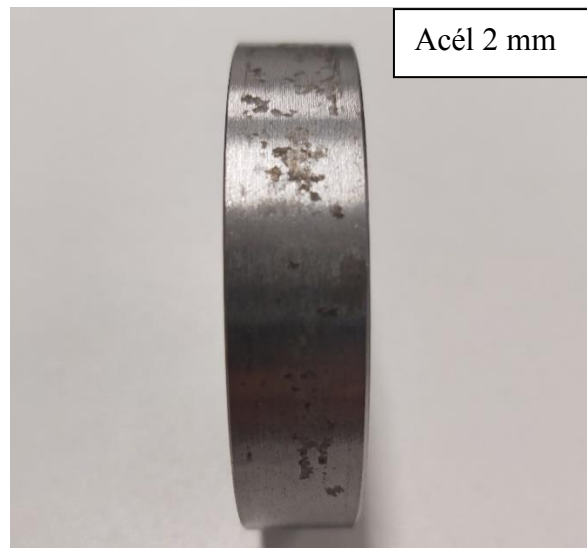
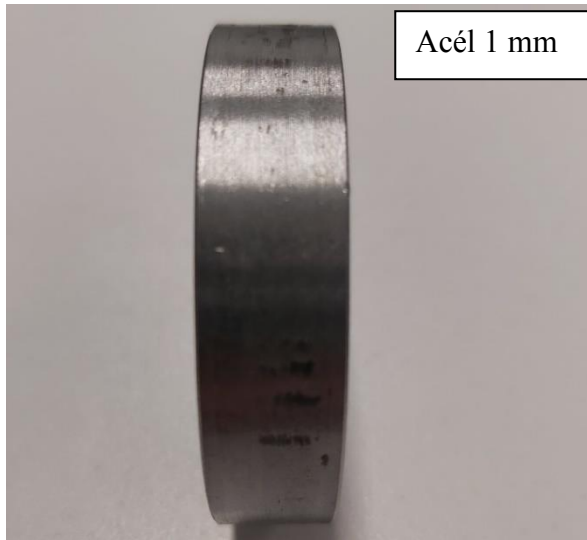


mm	100% Concentric = 10,18g			100% Hilbertcurve = 11,05g			100% Honeycomb			100% Rectilinear = 10,92g		
	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress	Equivalent stress	Directional deformation	Normal stress
0.5	4.457	5.55E-03	8.9465	4.1008	5.94E-03	8.77362				4.2833	5.63E-03	8.7046
1	4.5166	4.49E-03	9.3793	4.40E+00	4.74E-03	9.3397				4.5689	4.38E-03	9.3965
1.5	5.3595	2.55E-03	10.007	5.17E+00	2.73E-03	9.9957				5.4208	2.49E-03	10.014
2	5.739	1.89E-03	10.156	5.63E+00	1.97E-03	10.15				5.7946	1.86E-03	10.159
3	5.8175	1.84E-03	10.181	5.72E+00	1.89E-03	10.179				5.8651	1.82E-03	10.182
4	5.7722	1.82E-03	1.02E+01	5.69E+00	1.87E-03	10.189				5.8139	1.81E-03	10.19
5	5.8686	1.78E-03	10.196	5.792	1.79E-03	10.195				5.9053	1.77E-03	10.196

M8: Tribológiai vizsgálatok eredményei:

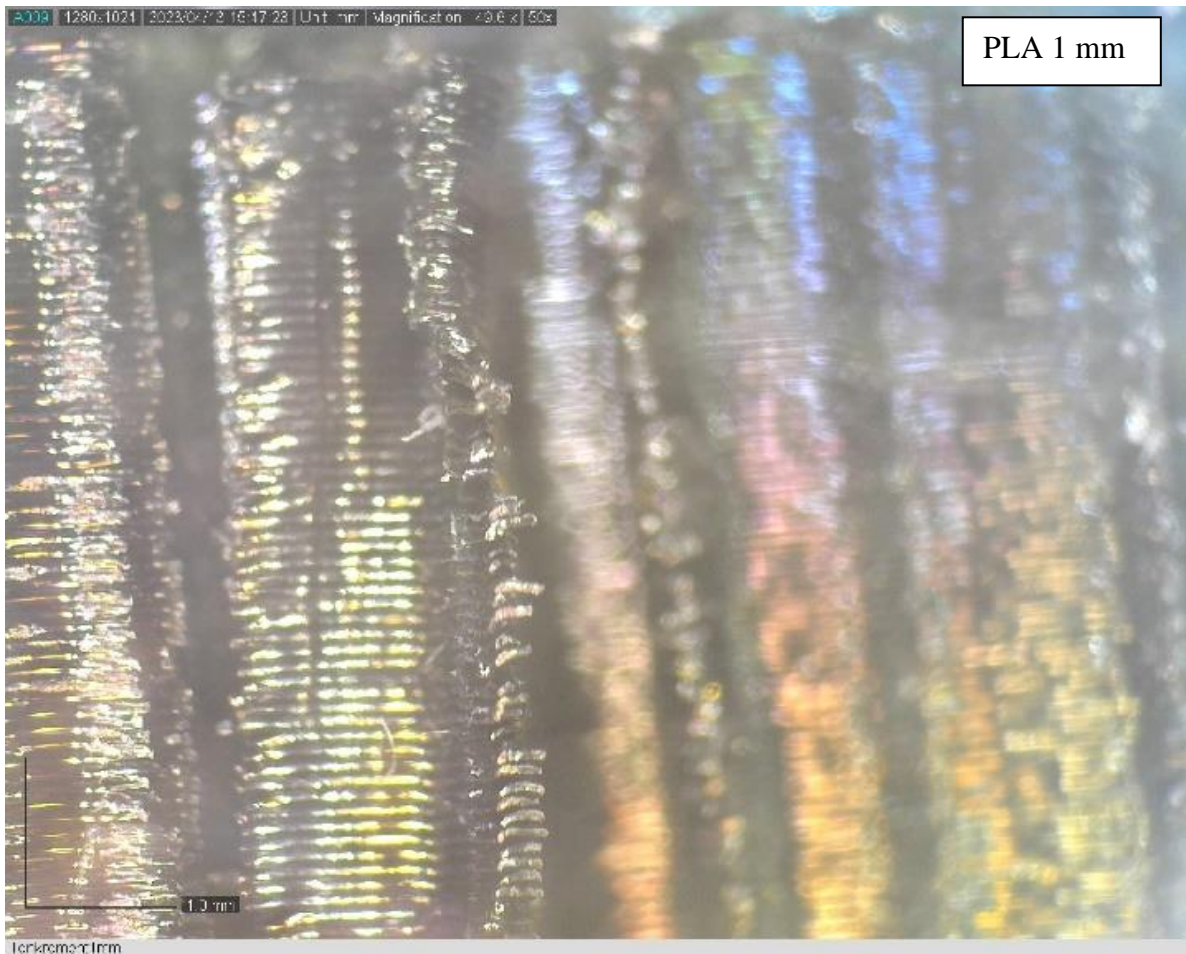


PLA görgők felületfotói

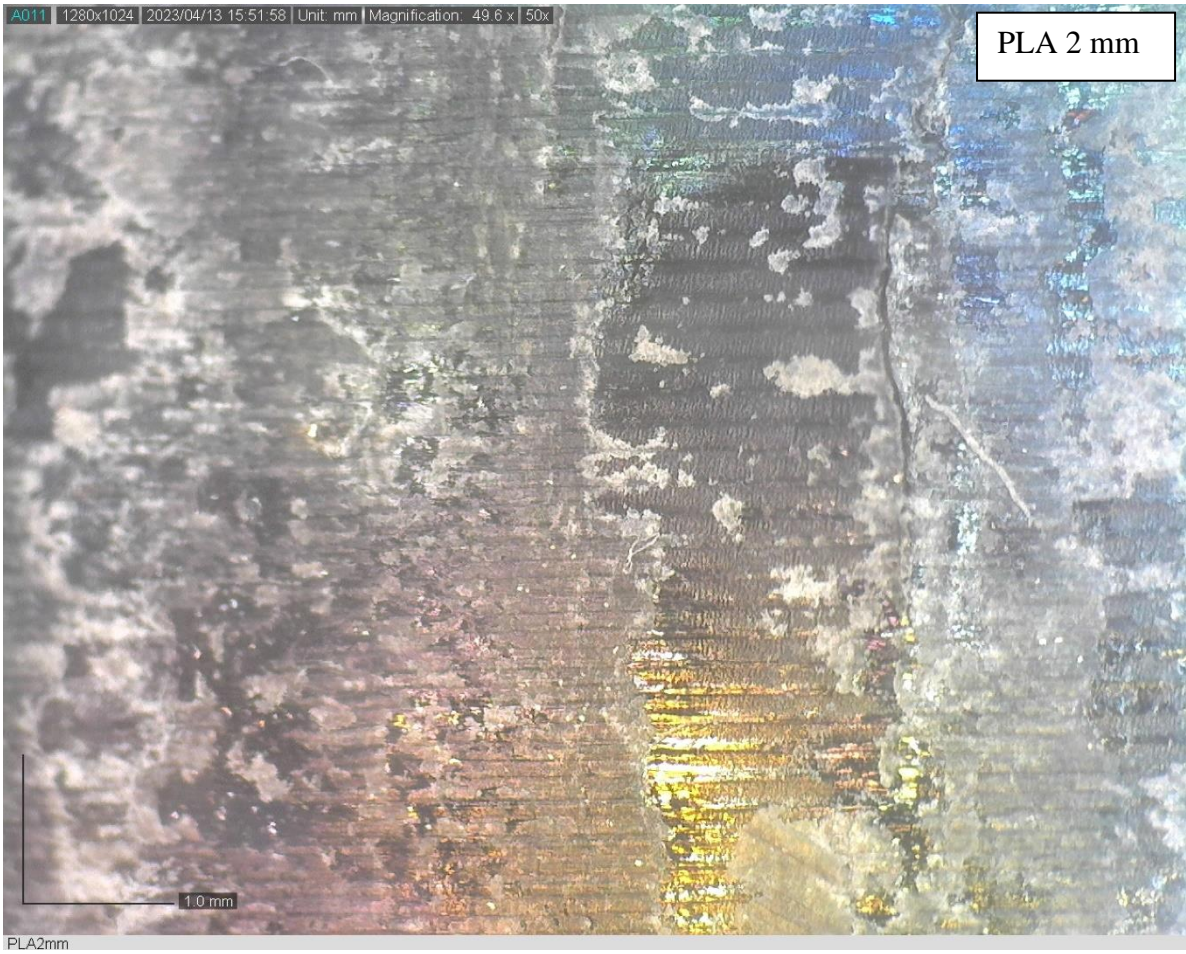


Acél görgők felületfotói

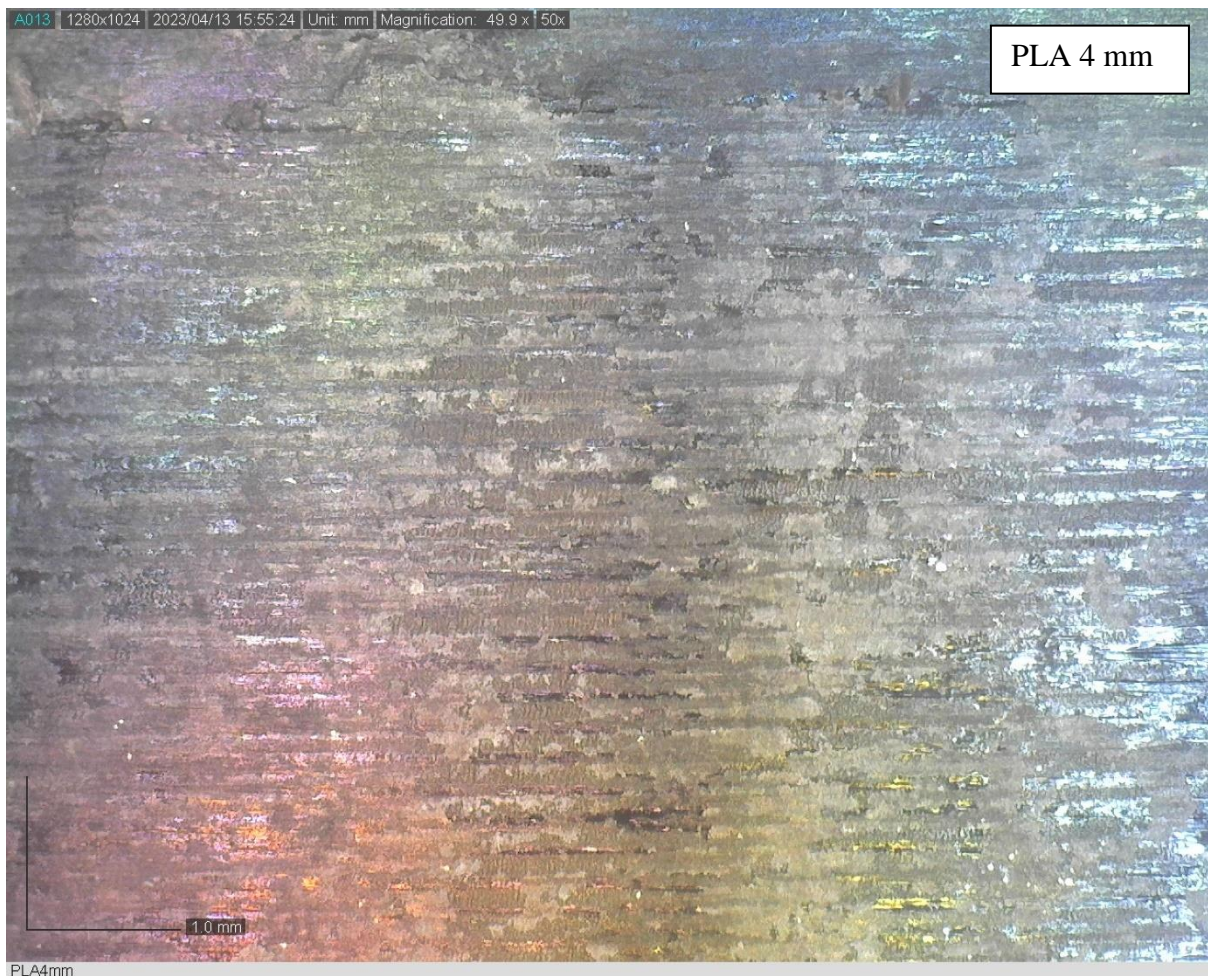
M9: Mikroszkopikus vizsgálatok eredményei:



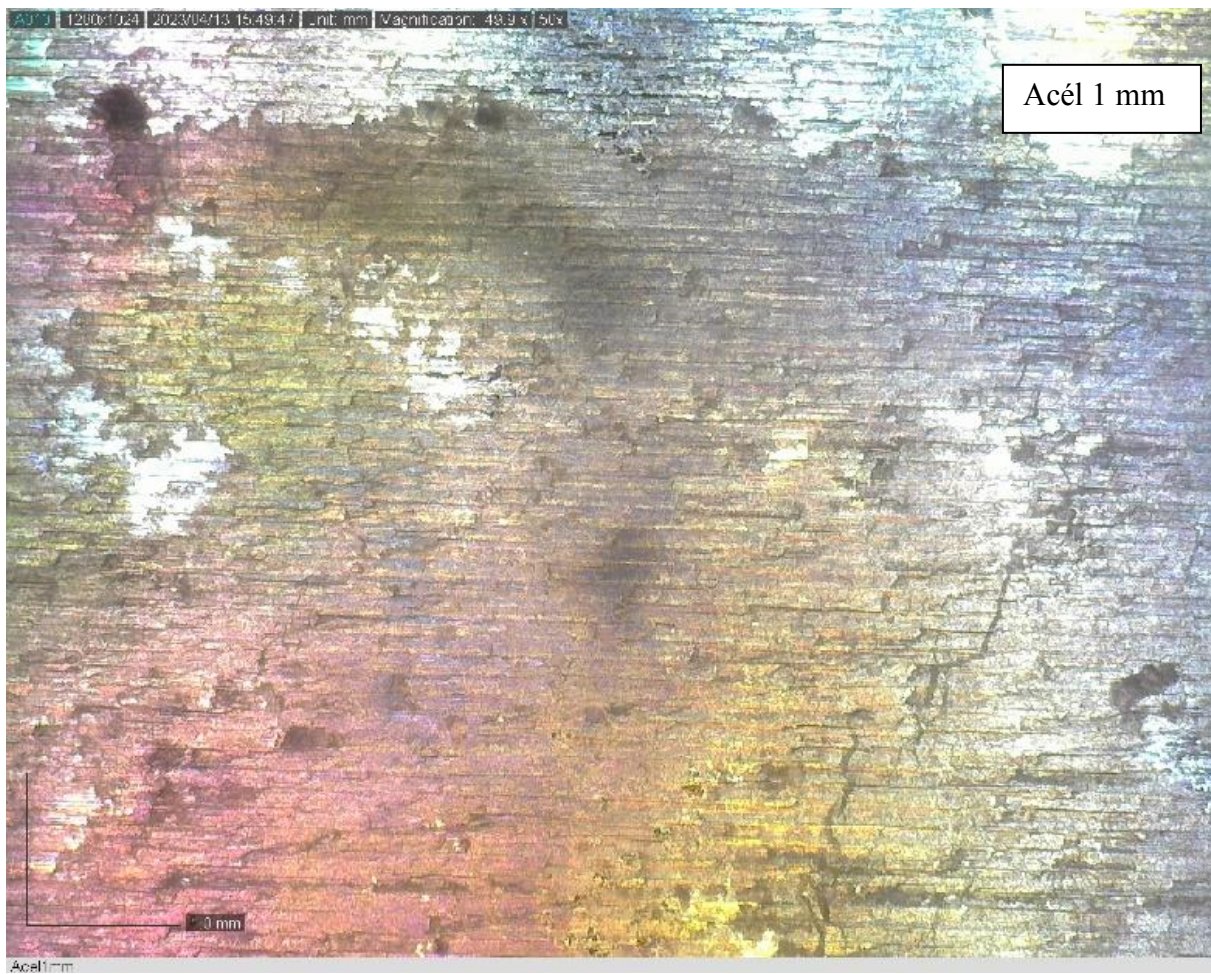
1 mm héjvastagsággal rendelkező PLA görgő felületének mikroszkopikus képe



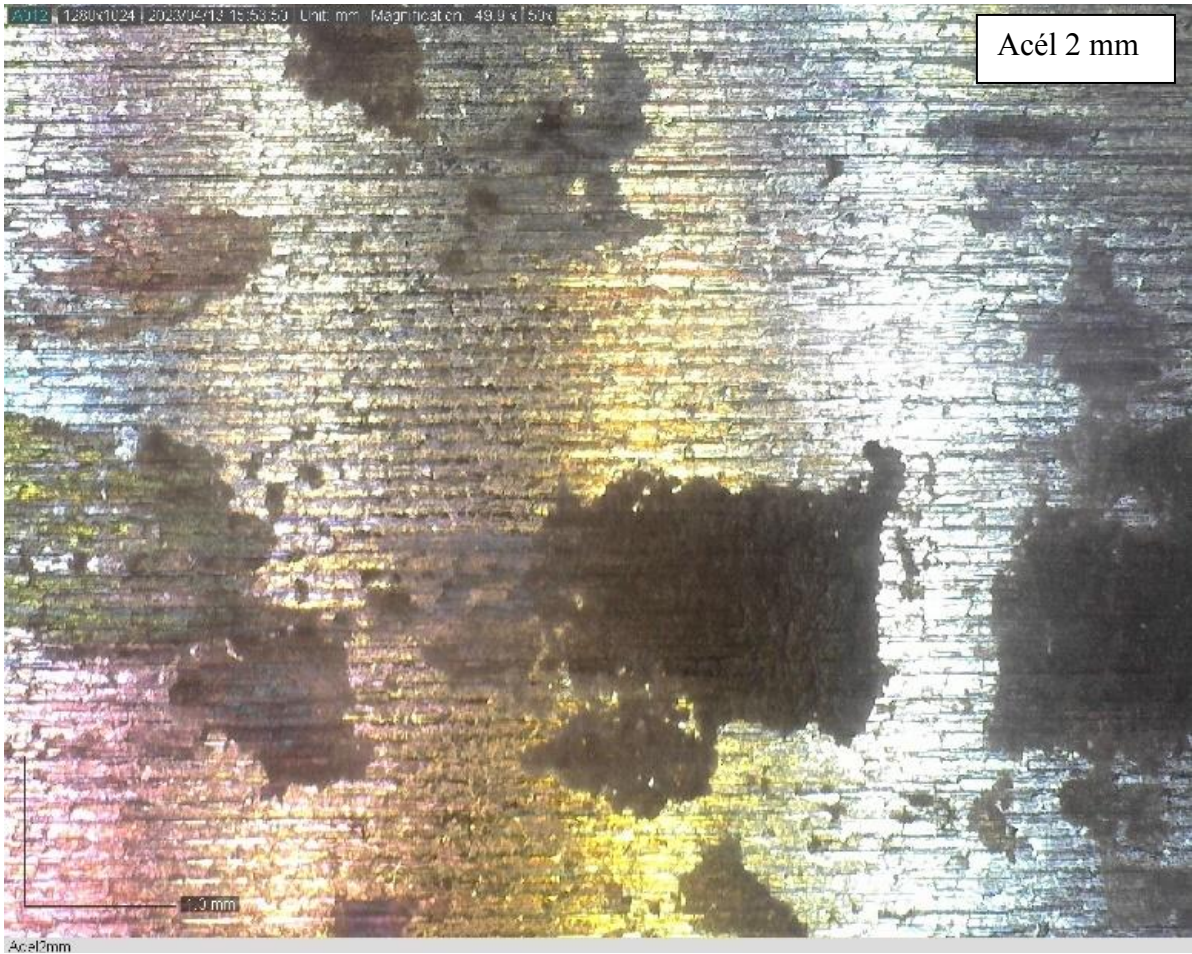
2 mm héjvastagsággal rendelkező PLA görgő felületének mikroszkopikus képe



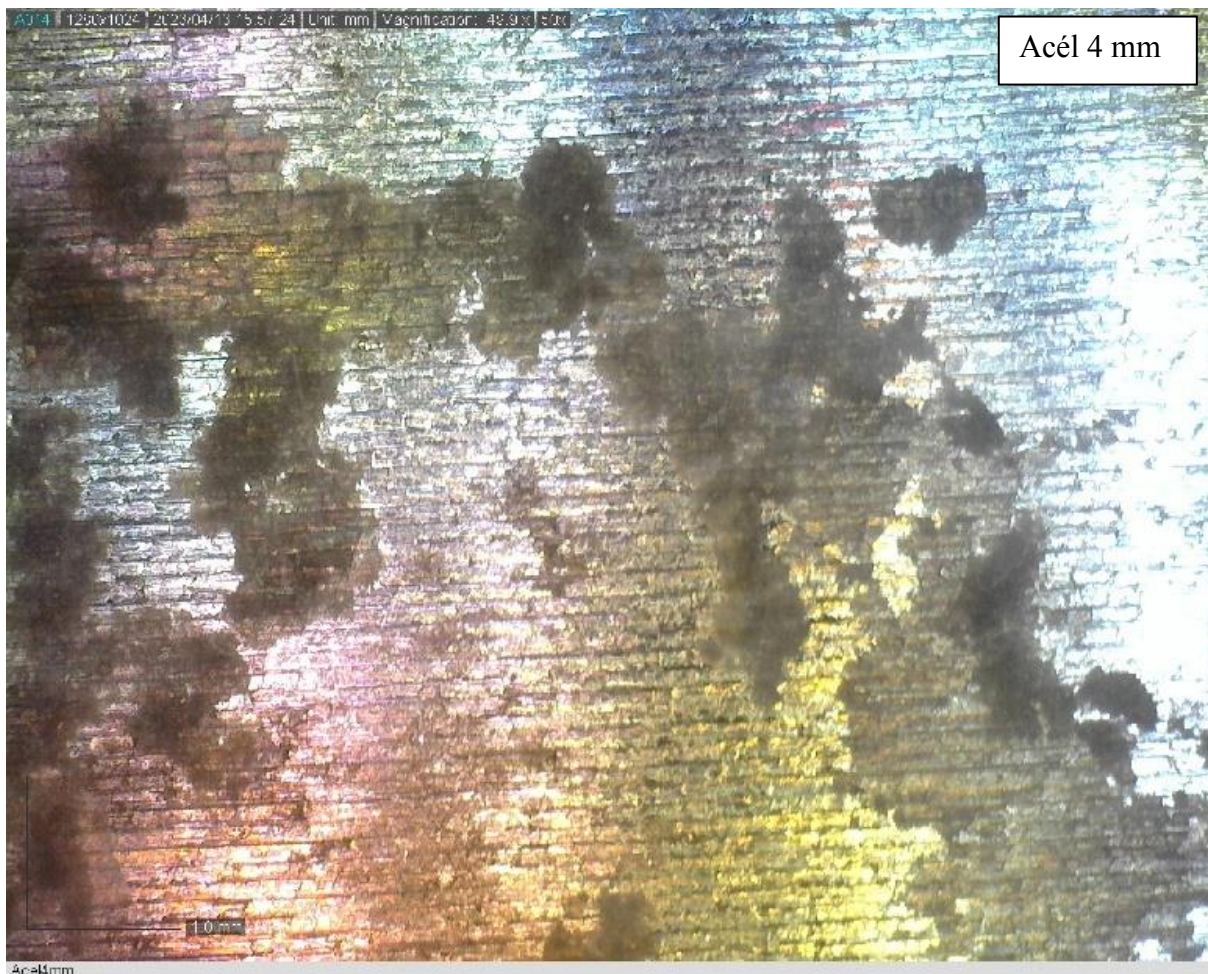
4 mm héjvastagsággal rendelkező PLA görgő felületének mikroszkopikus képe



Az acél görgő felületén látható polimer letapadások mikroszkopikus képe; 1 mm
héjvastagságú PLA – acél görgőpáros alkalmazása esetén



Az acél görgő felületén látható polimer letapadások mikroszkopikus képe; 2 mm
héjvastagságú PLA – acél görgőpáros alkalmazása esetén



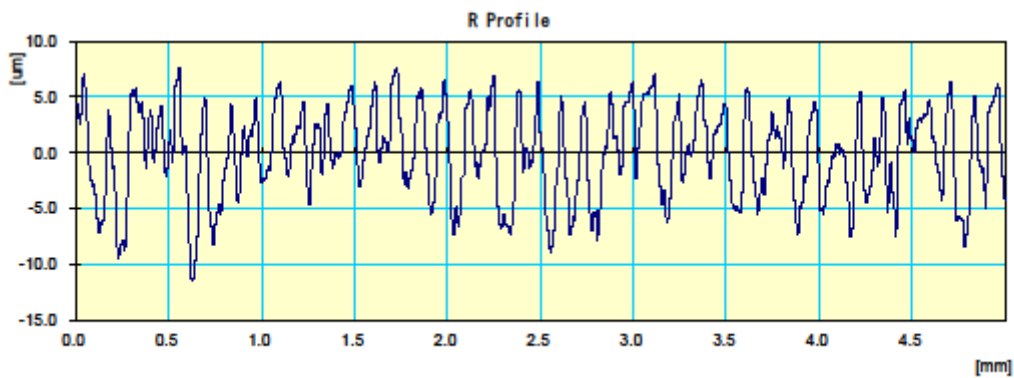
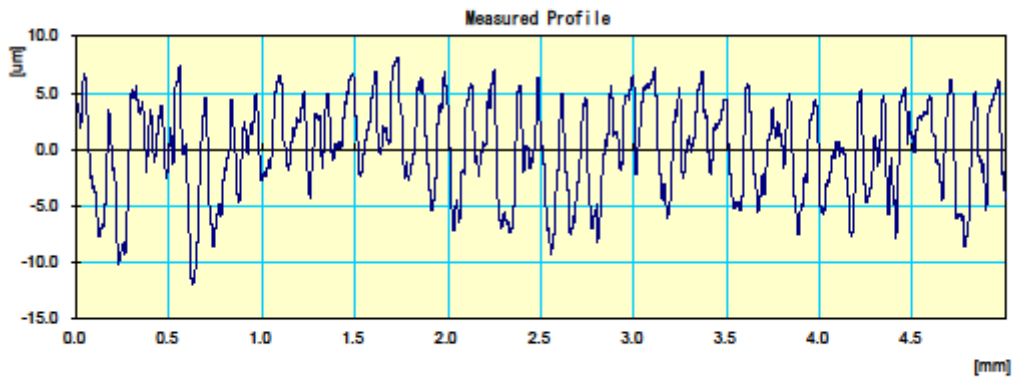
Az acél görgő felületén látható polimer letapadások mikroszkopikus képe; 4 mm
héjvastagságú PLA – acél görgőpáros alkalmazása esetén

M10: Érdességmérési vizsgálatok eredményei:



11-Apr-2023

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

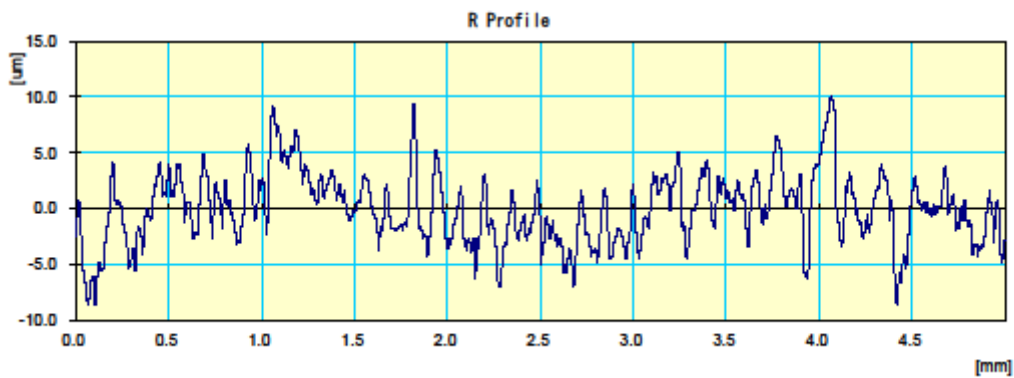
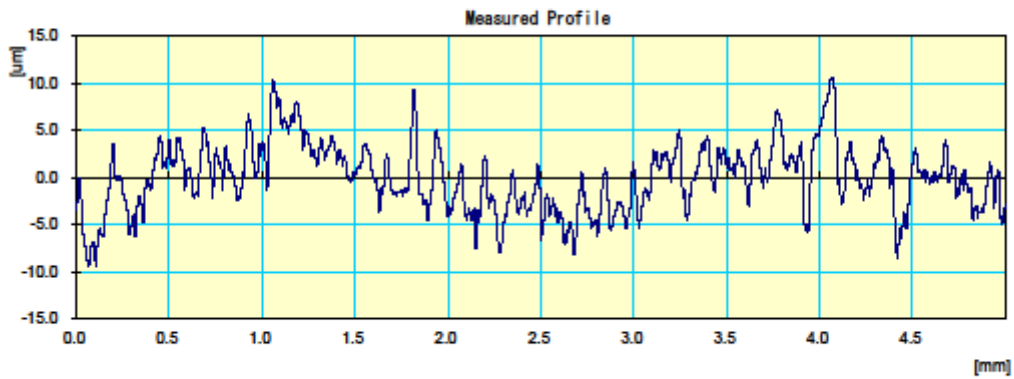
Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	3.32 µm	
Ry	19.12 µm	
Rz	19.12 µm	
Rq	4.00 µm	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

Acél görgő tribológiai vizsgálat előtt

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

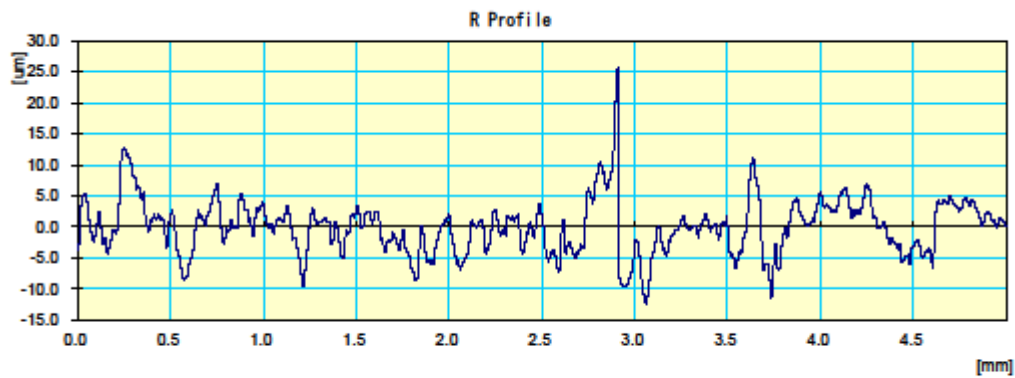
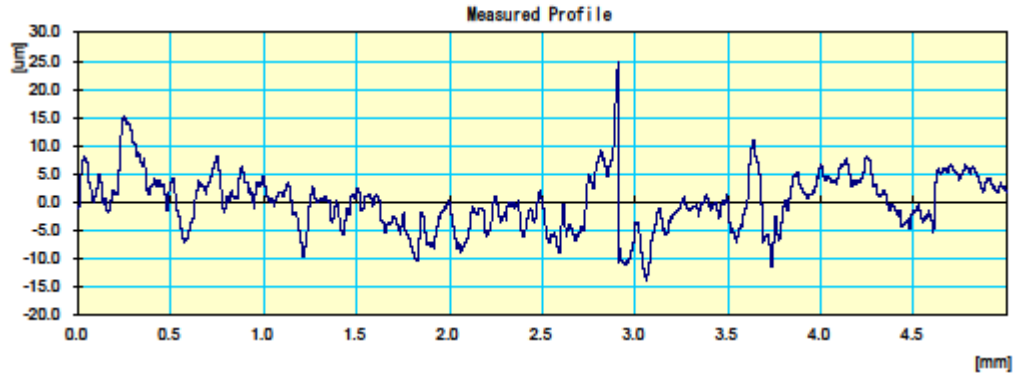
Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	2.50 um	
Ry	18.66 um	
Rz	18.66 um	
Rq	3.17 um	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

1 mm héjvastagsággal párosított acél görgő tribológiai vizsgálat után

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

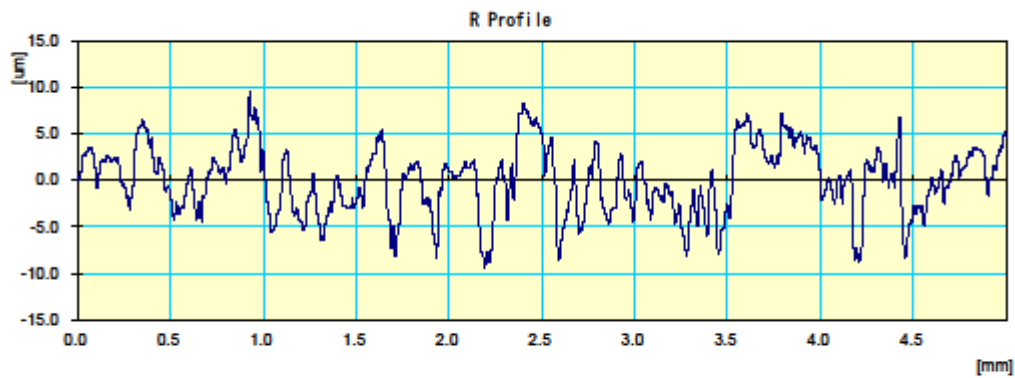
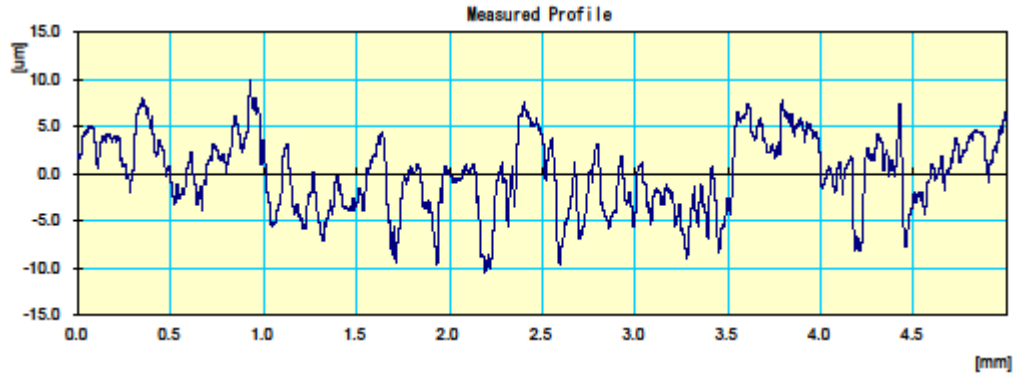
Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	3.29 um	
Ry	38.17 um	
Rz	38.17 um	
Rq	4.40 um	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

2 mm héjvastagsággal párosított acél görgő tribológiai vizsgálat után

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

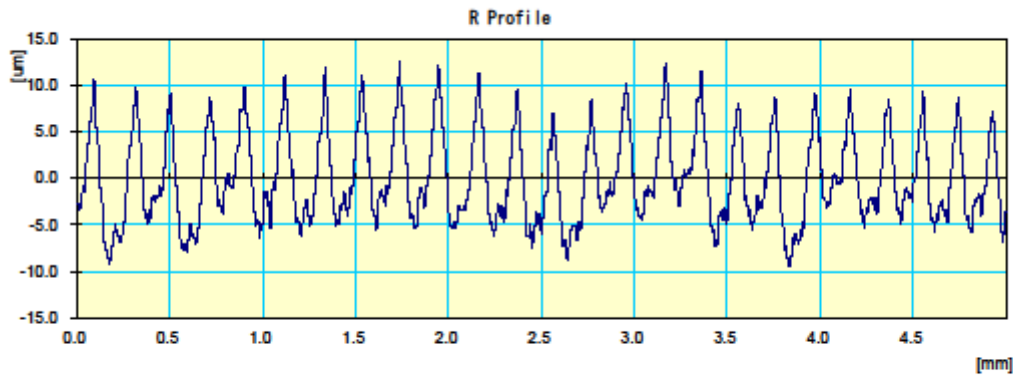
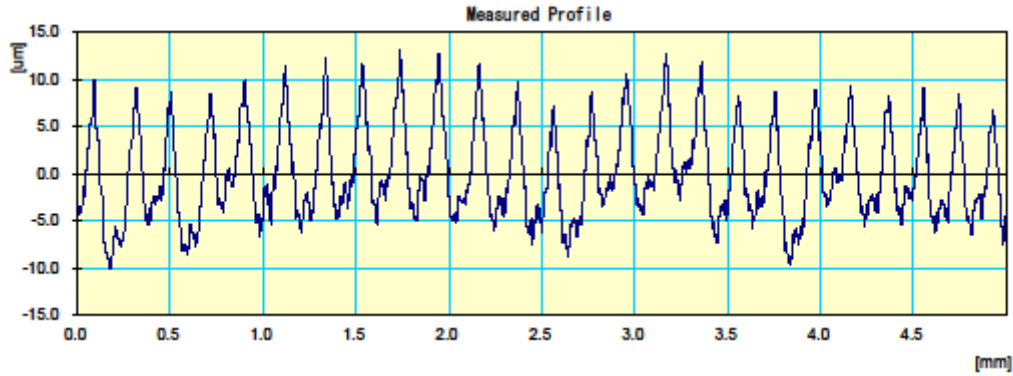
Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	2.95 µm	
Ry	18.84 µm	
Rz	18.84 µm	
Rq	3.62 µm	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

4 mm héjvastagsággal párosított acél görgő tribológiai vizsgálat után

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

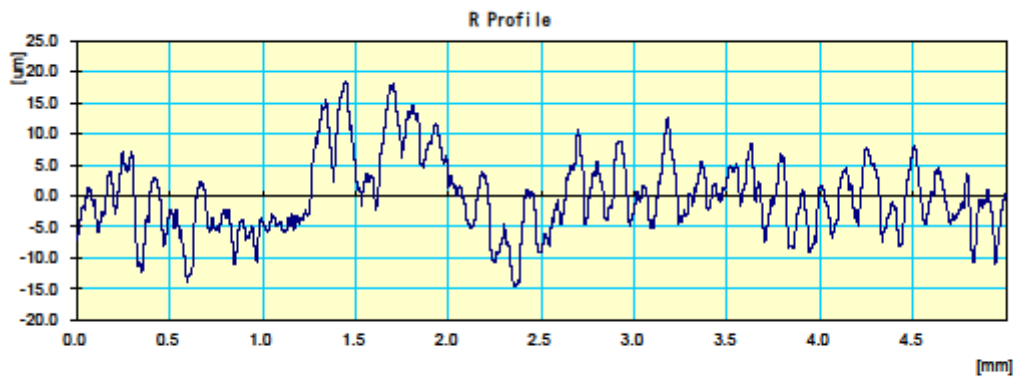
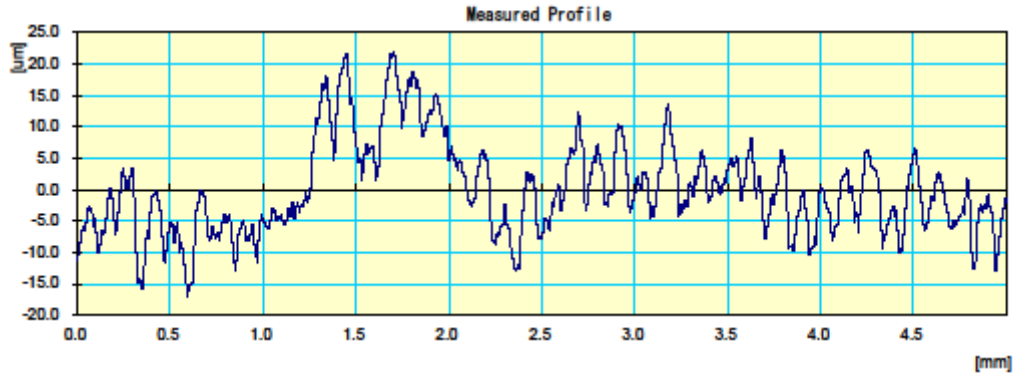
Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	4.05 um	
Ry	21.81 um	
Rz	21.81 um	
Rq	4.82 um	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

Polimer görgő tribológiai vizsgálat előtt

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

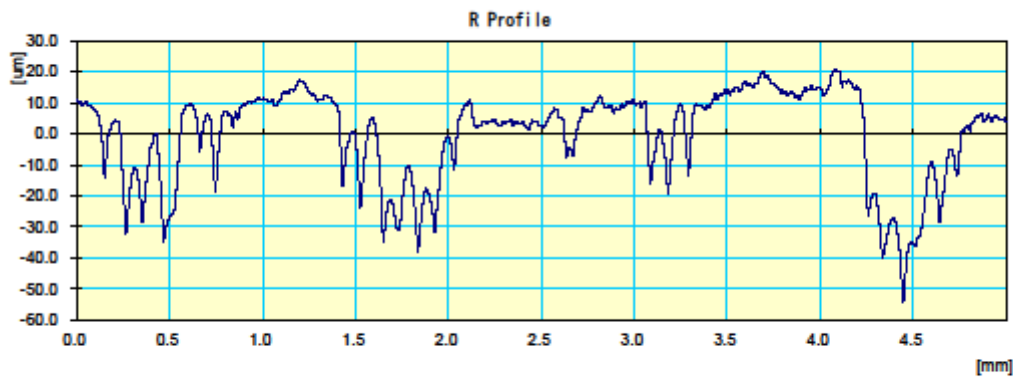
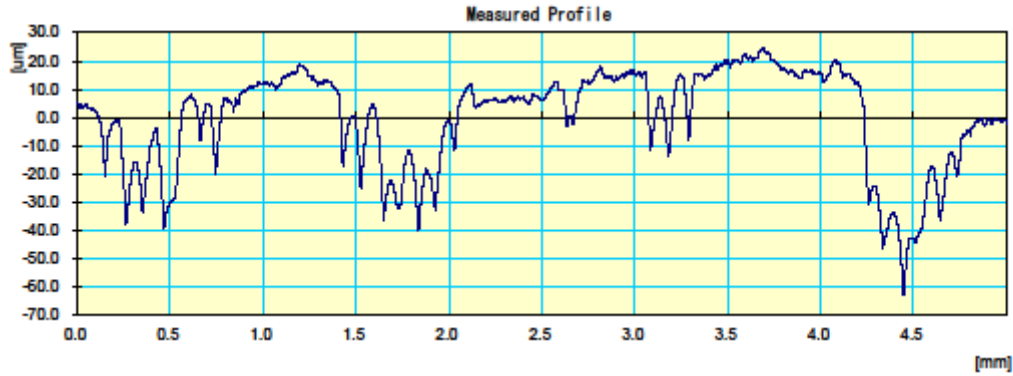
Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	4.85 um	
Ry	33.02 um	
Rz	33.02 um	
Rq	6.15 um	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

2 mm héjvastagságú polimer görgő tribológiai vizsgálat után

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	5.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	PC75

Ra	11.84 µm	
Ry	75.22 µm	
Rz	75.22 µm	
Rq	14.70 µm	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

3 mm héjvastagságú polimer görgő tribológiai vizsgálat után

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Hálás vagyok Istennek, hogy kaptam türelmet, kitartást és lelkesedést a kutatás során felmerülő problémák megoldására. Hálás vagyok, hogy ilyen körülmények között élhetek és volt lehetőségem fejlődni a PhD tanulmányaim alatt. Kiváltságnak érzem, hogy békében és szabadon lebonyolíthattam kísérleteimet és megírhattam a disszertációm. Hálás vagyok a két nagyszerű témavezetőmért, akik erőn felül segítettek minden időben és helyzetben. Dr. Keresztes Róbert Zsolt és Dr. Oldal István docens urak nélkül ez a disszertáció nem valósul meg. Család, barátok, kollégák, igazán köszönöm mindenkinek, aki bármilyen formában is hozzájárult ehhez a munkához.

Gödöllő, 2023. 05. 29.