



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

GYÁRTÁSI PARAMÉTEREK DINAMIKAI HATÁSAINAK VIZSGÁLATA ADDITÍV MÓDON GYÁRTOTT DARABOKON

Készítette:

Seregi Bálint Leon

Budapest, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Additív gyártástechnológia	5
1.2. Additív módon gyártott termékek tulajdonságainak ismerete	7
2. Módszertan	9
2.1. Vizsgált paraméterek	11
2.1.1. Orientáció	15
2.1.2. Falak száma	15
2.1.3. Kitöltés minta	16
2.1.4. Kitöltés sűrűség	18
2.2. Variáció mátrix	19
2.3. Azonosító szám	19
2.4. Teszt darab	20
2.5. Gyártás	25
2.6. Alapanyag	26
2.7. Gyártási hibák ellenőrzése	27
2.8. Mérési konfiguráció	29
2.9. Matlab alkalmazás	32
3. Mérési eredmények	33
3.1. Adat kiértékelés	33
3.1.1. Impulzus függvény	33
3.1.2. Időválasz függvény	33
3.1.3. Frekvencia-válasz függvény	34
3.1.4. Gyors-Fourier transzformáció függvény	35
3.2. Az eredmények ismételhetősége	36
3.3. Falak számának változása	37
3.4. Kitöltési sűrűség változása	39

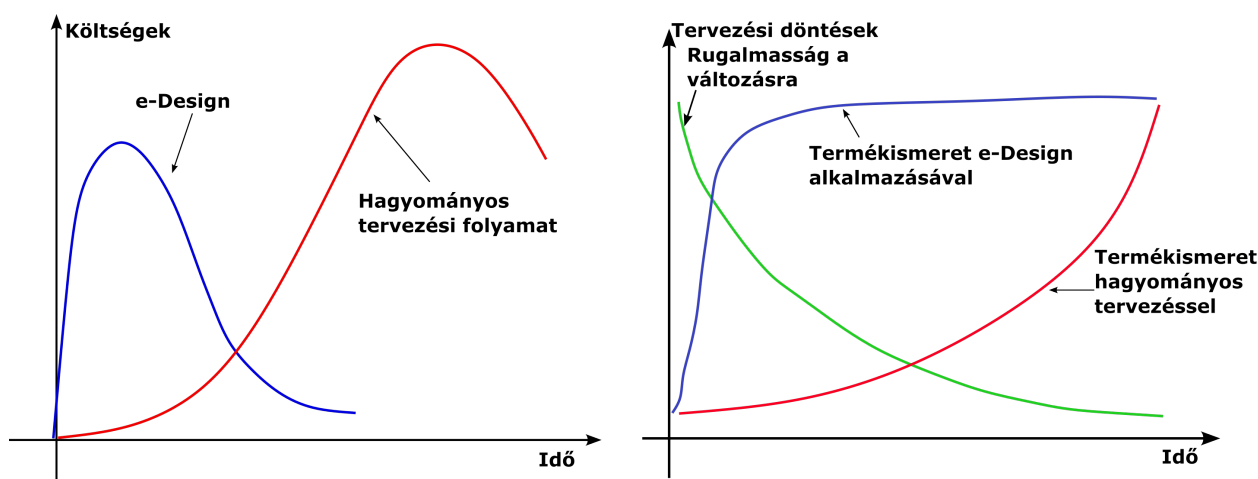
3.5. Kitöltési minta változása	43
3.6. Orientáció változása	44
4. Összegzés	47

1. Bevezetés

Egy konstrukció tervezése összetett feladat, amihez nem csak megfelelő tudásra, de tapasztalatra is szükség van. A számítógéppel támogatott mérnöki munka (angolul: Computer Aided Engineering) a szimulációs szoftverek segítségével nagyban lerövidíti és kiszámíthatóbbá teszi egy új konstrukció megalkotását. A módszer megjelenése előtti időkben a nagy számítási kapacitás hiánya és az akkor még nem elérhető technológiák miatt, a mérnököknek tapasztalatból kellett konklúzióra jutniuk és választ találni egyes problémákra, minél egyszerűbb leíró modellek segítségével. Ezek általában tapasztalati képletek formájában jöttek létre megfelelő "beépített" biztonsággal. A technológia hatásának felismerése számomra egy tervezési feladat során realizálódott. A feladatom egy hajtórúd tervezése volt, melynek első méreteit szakirodalomból vett tapasztalati képletek alapján alkottam meg. Ezt a geometriát egy végeelem szimulációval, egy célszoftverben teszteltem. Az ebből kapott eredmény megmutatta, hogy az alkatrész meglehetősen túl van tervezve. A nagyobb számítási kapacitásnak köszönhetően lehetőségem volt egy komplexebb módszerrel, pontosabban megvizsgálni a hajtórudat, mint ahogy azt tették régen a tapasztalati képletekkel és sok számolással járó több iterációval. Sok esetben ráadásul még a számolás könnyebbé tétele miatt bizonyos elhanyagolások is kerültek bele a képletekbe, de figyeltek arra, hogy az eredményt ne változtassa meg negatív irányba. Természetesen egy számítási modellt sem lehet mindig nagy mértékben leegyszerűsíteni, hiszen ezekkel az elhanyagolásokkal egyre messzebb kerülünk a fizikai valóságtól és hamis eredményt kaphatunk. A bizonytalanságból fakad a biztonsági tényező használata és a statisztikai feltárás is. Például August Wöhler a vasúti járművek tengelyeinek törését vizsgálta, majd ebből az anyagok kifáradásáról alkotott konklúziót. Művének bemutatása a párizsi kiállításon 1867-ben széles nemzetközi közönség elé tárta és fektette le az alapjait a vas és acél állami szabványosításának, tesztelésének és tanúsításának, melynek szószólója volt. Munkája jelenti az S-N görbék (más néven *Wöhler-görbék*) első szisztematikus vizsgálatát az anyagok kifáradási viselkedésének jellemzésére. [1] Ezek a görbék ma már elengedhetetlenek, ha élettartamra való tervezésről van szó. Jól megfigyelhető, hogy egy konstrukció tervezésekor az éppen elérhető tudás és eszközök mellett a tapasztalat is nagy befolyással lehet egy végtermékre. Minél több időt fektetünk be egy probléma megoldására, annál nagyobb tudásunk lehet problémáról az idő előrehaladtával. Ezzel szemben, a végtermékre való befolyás is csökken, mivel a megoldás magja már kialakult. Ezt a jelenséget hívják tervezési paradoxon-nak. Legjobb példa erre egy termék fejlesztésének nyomomonkövetése az idő függvényében. „A mérnöknek egy konstrukció tervezése során nem csak a funkcionális elvárások kielégítésére és a biztonságra kell tervezni, hanem a költségekre, felhasználói igényekre, élettartamra és gyárthatóságra is figyelnie kell.” [2] Ha tervezni szeretnénk egy terméket egy bizonyos probléma megoldására, mely kiszolgálja az összes már előzőleg tárgyalt igényt, akkor a lehető legtöbb információra van szükségünk a piackutatástól kezdve a funkcionális, fizikai igényekig. Ezek alapján elkezdődik egy alapkoncepció megalkotása. Ahogy a tervezés halad előre az időben, megjelennek

a több iterációból álló folyamatok (kialakítás, anyagválasztás, működési elv stb.), melyek elkerülhetetlenek, ha meg szeretnénk találni a legjobban minden igényt kielégítő paramétereket, tehát az optimumot. A paradoxon lényege, hogy a termékkel kapcsolatos legfontosabb és alapjaiban meghatározó tulajdonságokról a tervezés korai fázisaiban úgy döntünk, hogy a termékről való ismeretünk a legkisebb. Emiatt egyes hibás döntéseket az iterációs folyamatok (például anyagválasztás vagy geometriai kialakítás) segítségével lehet orvosolni, viszont egy bizonyos idő után már annyi energia kerül befektetésre a fejlesztéshez, hogy pénzügyileg magas összegekkel járna az "újrakezdés". (1. ábra) A paradoxon feloldására megoldás az e-Design (virtuális tervezés): a termék koncepciója először egy CAD modell formájában valósul meg a tervezőmérnökök által. A kezdeti koncepció a tervező tapasztalata és a korábbi termékcsaládokból szerzett tapasztalatok alapján kerülnek kialakításra. A funkcionális CAD modellek elkészítése után, de még a fizikai termék gyártásának megkezdése előtt különböző szimulációk futtatása szükséges, melyek a termék teljesítményén (végeelem analízis) és megbízhatóságán (kifáradás, élettartam és funkcionális tesztek) túl, a gyártási és előállítási költségeit is vizsgálni kell. A szimulációk eredményeinek pontossága az egyszerűsítések és feltételezések alkalmazásával romlanak, de a számítási kapacitás igényt, valamint az erre fordított időt is csökkenthetik. Ennél a pontnál már jóval több tudással rendelkezhet a tervező a termékről, mint egy hagyományos tervezési folyamat esetén. Ha a virtuális prototípus a szimulációkkal alátámasztva megfelelő lehet, következik a fizikai prototípus gyártása (proof-of-concept). Az e-Design paradigma ennél a pontnál csatlakozik a hagyományos tervezési folyamathoz azzal a különbséggel, hogy több ismerete van a termék várható viselkedéséről, valamint sokkal rugalmasabb, mivel a fizikai tesztelések során kapott visszajelzésekkel a CAD modell és a szimulációs modellek megfelelő hangolásával gyorsabban és hatékonyabban tudnak reagálni. [3] Napjainkban a rapid-prototyping (gyors prototípuskészítés) már egy elterjedt gyakorlat, az ipar különböző szegmenseiben, ahol fejlesztés folyik. A RP egy gyártási folyamatot jelent, ami egy termék gyors és költséghatékony létrehozásával 3D-s CAD modellből egy fizikai darabot kapunk. Ez a darab lehet funkcionális vagy éppen csak egy minta. Kézben tartva egy alkatrészt, azonnali visszajelzés kapható az esetleges tervezési hibákról és jobban átadhatja a felhasználói élményt. Ez a módszer tovább gyorsítja és teszi még olcsóbbá a termékfejlesztési folyamatokat, ezzel utat adva a még hatékonyabb optimalizálásnak és innovációnak.

Összességében tehát elmondható, hogy az új technológiák megjelenése elősegíti a tervezési folyamatokat, viszont ezeknek a technológiáknak az újdonsága és ebből adódó tapasztalatlanság rejtett veszélyeket is hordoz magában, amiket közös együttműködéssel és logikus felépítéssel szabványokba kell foglalni. Ahhoz viszont, hogy egy szabványt jól fel lehessen építeni, minél hamarabb ki kell ismerni az adott újdonságot, ami a kutatás-fejlesztés (K+F) feladata. Az additív gyártástechnológia és annak termékei esetén is ebben a helyzetben találhatjuk magunkat, ezért a technológia kiismerése kulcsfontosságú a jövőre való tekintettel.



1. ábra. Tervezési paradoxon és annak megoldása e-Design segítségével [3]

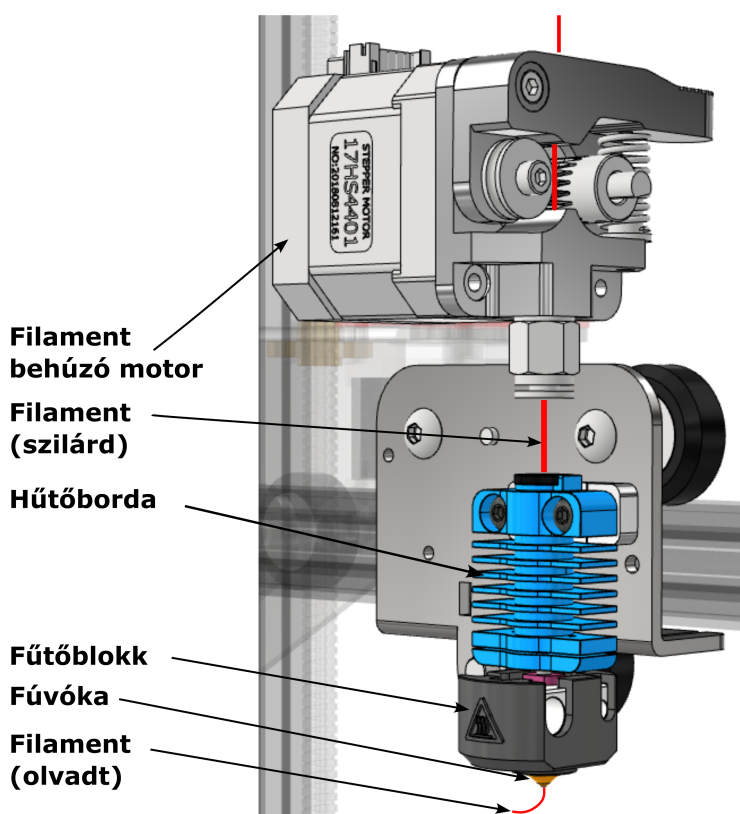
1.1. Additív gyártástechnológia

Az additív gyártástechnológia anyag hozzáadással készíti el a kívánt geometriát, ellenben a szubtraktív technológiákkal, ahol egy már meglévő geometriáról leválasztva az anyagot alakítja ki a munkadarab kész méreteit. A forgácsolás és egyéb alakító gyártástechnológiák nagy hatással vannak a tervezési filozófiákra, hiszen ezen technológiák korlátait ismerve kell megtervezni a termékeket. Az additív gyártástechnológia nem új, ám mégis az utóbbi évtizedben sikerült fejlettségében eljutnia arra a szintre, hogy már gazdaságosan és hatékonyan használható legyen. A 3D nyomtatásra való igény jelentősen megnőtt, ami a piaci faktoroknak köszönhetően ösztönözte a technológia fejlődését, mivel rövidebb termékfejlesztési ciklus érhető el vele. Ezáltal megnövekedett a fenntarthatóbb technológiák iránti kereslet és egyes termékek esetén a gyártási idő is csökkenthető volt. Ez tovább csökkentette az átfutási időket és új üzleti modelleknek adott lehetőséget. [4] A korai additív technológiák a prototípusok készítésére voltak használatosak elsősorban, viszont ez mára kibővült a kész termékek gyártására is. A gyártáshoz nincs szükség készülékezésre, speciális darab befogókra vagy szerszámozásra, így egyszerűsödik a folyamat és nagyobb rugalmasságot ad, ha egymás után két teljesen más jellegű darabra kell átállni.

A következőkben bemutatásra kerülő vizsgálat az FFF (Fused Filament Fabrication) technológiával gyártott darabokon történik, így ennek az additív technológia szegmensnek a bemutatása szükséges a vizsgálat motivációjának és elemeinek a megértéséhez.

Az FFF technológia polimer huzal (filament) megolvasztásával (2. ábra) egymásra épülő rétegek (0.08 mm – 1 mm) létrehozásával hozza létre a kész munkadarabot, ezzel átlépve a hagyományos gyártás korlátait. A felület minősége nagyban függ a rétegek vastagságától, a nyomtatás sebességétől és a munkadarab orientációjától is. Ugyanakkor figyelni kell a darab geometriájából adódó szükséges támasztékok mennyiségére és elhelyezésére is (gazdasági és gyártási okok miatt), mivel egyes geometria alámetszett vagy 45°-nál a függőleges iránnyal nagyobb szöget be-

záró felületei nem tudják megtartani magukat, mert az extrudált anyag még nem keményedett meg. Ez az egyetlen hulladék, ami a technológia elkerülhetetlen része, hasonlóan a forgácshoz, mint a szubtraktív technológiák esetében. A kevesebb gyártási kényszerrel, a 3D nyomtatással lehetőségünk van olyan összetett (akár bennszülött) geometriákat létrehozni, melyet egyik másik technológia sem volt képes. Forgácsolásnál a szerszám geometria és méret a határ, ami limitálja, hogy milyen alakot képes gyártani a gép. Nyomtatás esetén a planáris szeletelés miatt nincs ilyen kényszer, a darab minden pontjához hozzáfér a fűvóka, hiszen minden szelvényén végighalad gyártás közben. Azzal, hogy komplexebb geometriákat vagyunk képesek létrehozni, magával hordozza az ellenőrizhetőségét hiányát is a daraboknak. Mivel a mechanikai tulajdonságok a modell geometriától kezdve, a gyártási paramétereken át, a gép felépítése és működési módjától függ. Az ellenőrizhetőség hiánya miatt nagy a motiváció, hogy olyan számítási és szimulációs modellek készüljenek, melyek minél pontosabban le tudják írni a 3D nyomtatott darabok tulajdonságait és viselkedéseit. Ezek még nagy számítási kapacitást igényelnek bonyolultságuk miatt, mivel egészen a mesostruktúra szintjéig le kell tudni írni a folyamatokat. [5] További problémát jelent az ismételhetősége a gyártott geometriáknak. A hagyományos gyártás során (például CNC marógépek esetén) a berendezéseket beállítják és azonos programkóddal az alkatrészeket tűrésen belüli értékekkel lehet gyártani. Az additív gyártás során a konzisztencia a ciklusok között és a gépek közötti a folyamat paraméterek irányításán múlik, ami több szenzort, ezzel pedig drágább gépet is jelenthet. [6]



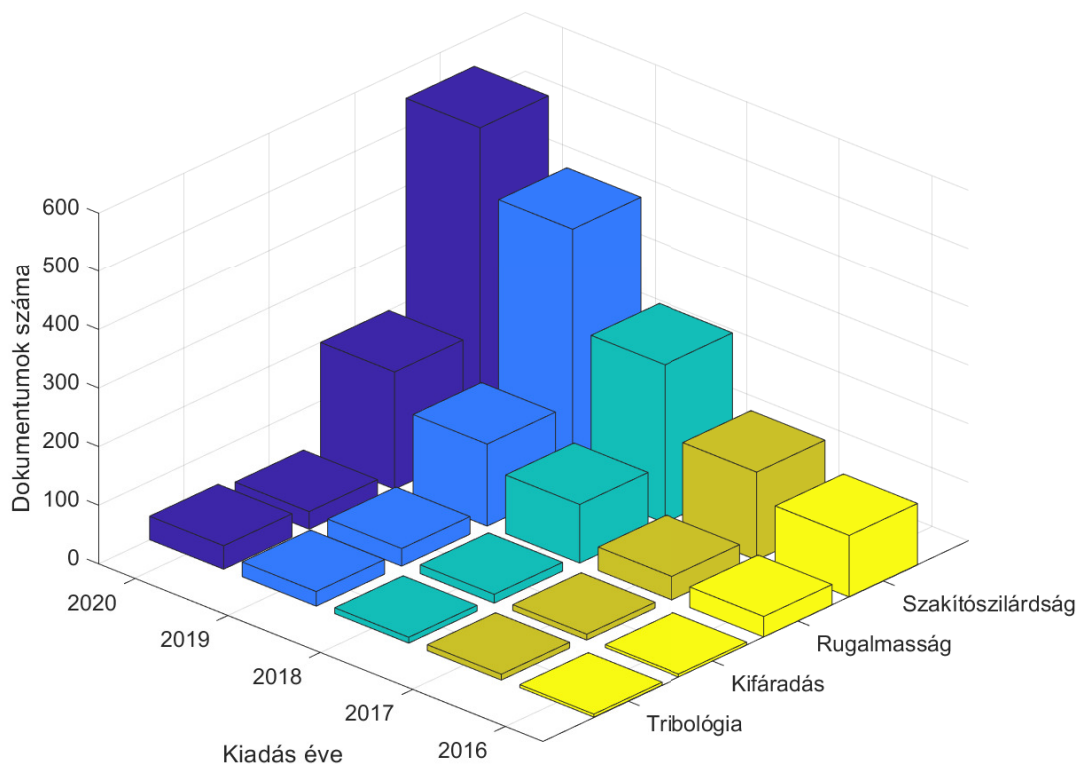
2. ábra. Az FFF nyomtatás mechanizmusa [saját modell]

1.2. Additív módon gyártott termékek tulajdonságainak ismerete

Ahogy az additív gyártástechnológia fejlettebb és elérhetőbb lett, több nagy ipari képviselő is beruházott a technológiába a fröccsöntőipartól a járműiparig. Az AM által használt anyagok jellemzéseivel foglalkozó tudományos munkák száma jelentősen nőtt, de látható a 3. ábrán, hogy a vizsgálati szempontok elsősorban a mechanikai tulajdonságokra fókuszálnak, azokon belül is leginkább a szakítószilárdság és a rugalmassági tulajdonságokra található aránylag több irodalom. [7] Ez érthető, hiszen elsősorban a megengedhető legnagyobb feszültség ismerete adja meg a megfelelő biztonságot, hogy egy darab teljesítménye megfelelő legyen, de hosszú távon, életciklusra való tervezés még mindig oly szinten ismeretlen, hogy a hagyományos módon gyártott alkatrészekkel szemben messze elmarad a túlélési biztonság megfelelő meghatározása. A technológia jellegéből adódóan a darabok minősége nem csak az alapanyag, de gyártási paramétereiktől is nagyban függenek. Ahhoz, hogy mindig a legjobb minőséget tudjuk elérni, szükség van minden ilyen paraméter megfelelő mélységű vizsgálatára, valamint ezek jellemzésére és szabványokba foglalására. Ezek a kihívások limitálják a 3D nyomtatás gyorsabb terjedését és szélesebb körben való használhatóságát. A rétegelt természetből adódóan, a 3D nyomtatott darabok különböző jelenségeinek hátterét átfogó mechanizmusok még mindig nem teljesen körbejártak. Ezek olyan összetett és nem lineáris kapcsolatok, melyek rendkívül nehezítik a mérnökök számára, hogy optimális döntéseket hozzanak és a darabok megfelelő biztonsággal, a lehető legjobban ki legyenek használva. [8]

Jelenleg nincs olyan diszkrét folyamat vagy számítási rendszer, amivel lehetőség lenne optimalizálni a darabokat és kimutatni azok biztonságát, valamint várható élettartamát, mint azt már lehet a hagyományos gyártási technológiákkal gyártott darabok esetén. Mivel a technológia folyamatrendszerre nagyrészt digitálisan történik (modellezéstől a g-kód generálásig) a bemutatott e-Design paradigma rendszerébe könnyen integrálható lenne. A két területet a szimulálhatósága köti össze, tehát képesnek kell lenni már szimulációkkal kimutatni a darab egyes tulajdonságait, ha azok additív módon gyártottak. Ennek összekapcsolása kifejezetten fontos, mivel a hagyományos tervezési folyamat már nem érvényes az additív gyártásra, mert mind a geometria, mind az anyagok tervezési változóként kezelhetők, és számos tervezési variáció generálható. Elég, ha a kitöltési mintára gondolunk, hiszen a modell, amit tervezünk, ezt nem tartalmazza, de a szeletelő programban a geometria egy része változtatásra kerül. Alapszintű szimulációk már futtathatóak a *MarkForged* szeletelő szoftverében, de szakirodalom nem foglalkozott ennek hatékonyságával. Bár a szimulációs szoftverek egyre elérhetőbbé és hatékonyabbá válnak, a legtöbb tervezési változó még mindig próba-szerencse módszerekkel vagy alapszabályokkal van meghatározva. Eközben az eddig összegyűjtött 3D nyomtatással kapcsolatos tudás, különösen a tervezési tapasztalatok, nem adódnak át közvetlenül és könnyen a kezdő mérnököknek. [9] Ezt a problémát megoldandó szabvány és tudásbázis kialakítása már megkezdődött. [7] A gyenge mechanikai tulajdonságok vagy nem megfelelő felületi minőség gátolja a technológiát, hogy kritikus komponensek gyártá-

sára használható legyen. Azonban ez az akadály leküzdhető, ha a különböző gyártási paraméterek és a paraméterek egymás közötti hatásai felmérésre kerülnek, melyek befolyással vannak a mechanikai tulajdonságokra, ezzel jobb megértést adva a folyamatokról, amik a gyártás közben zajlanak le. Ennek a tudásnak a birtokában, már hatékonyabb tervezés, gyártás és mechanikai tulajdonságok érhetőek el. [7]

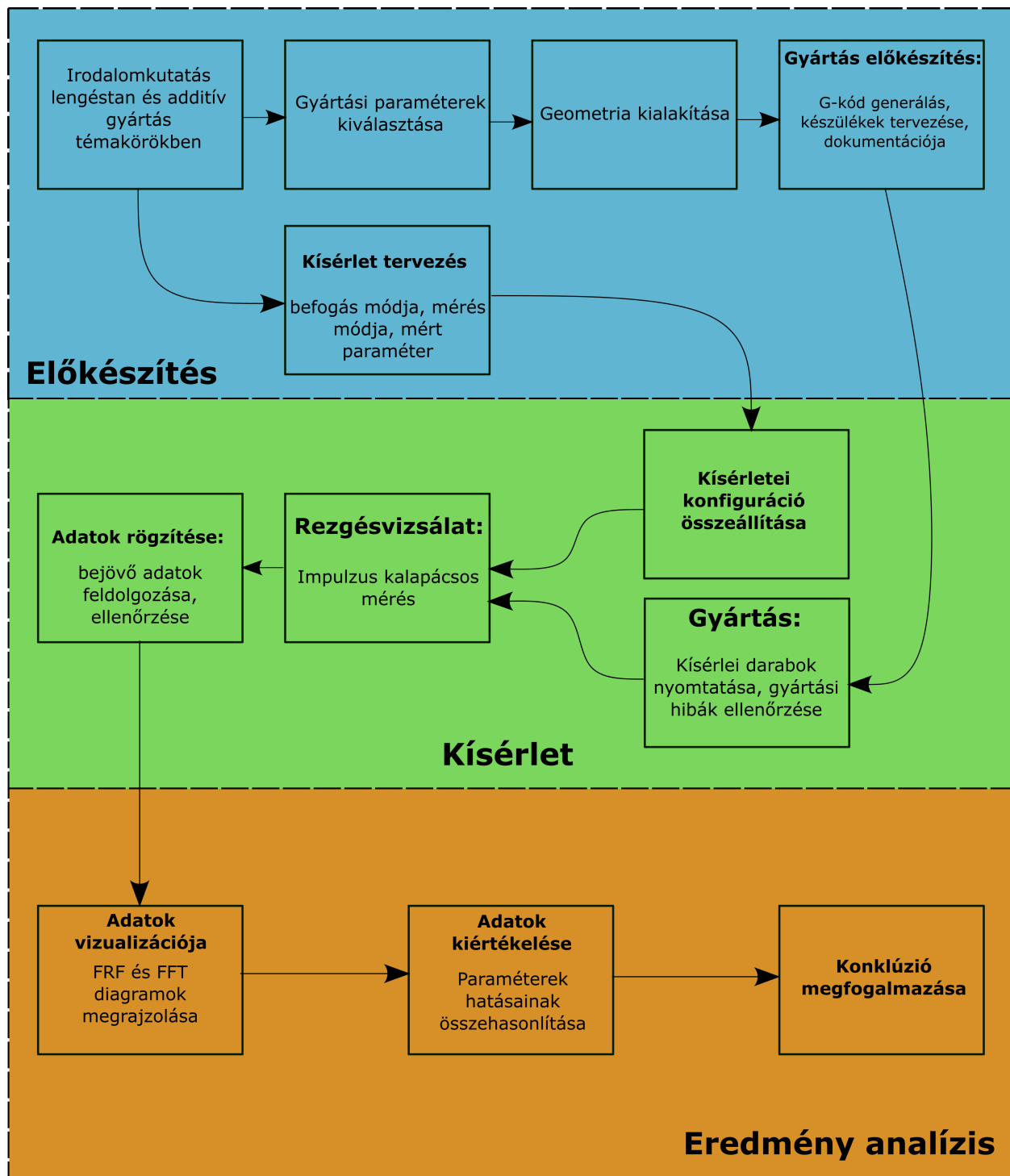


3. ábra. A Scopusban megjelent közlemények száma a mechanikai jellemzéssel kapcsolatban 3D nyomtatott alkatrészekben az utóbbi években [7]

Dolgozatom célja, hogy körbejárjam bizonyos szempontok szerint kiválasztott gyártási paraméterek hatását 3D nyomtatott darabokon, azok dinamikai tulajdonságainak vizsgálatával. Az évek során több aspektusból megközelítve, különböző módokon vizsgálták a nyomtatott darabokat. A vizsgálati módszerek sokrétűsége miatt a mérési adatok összehasonlítása nehézségeket okoz. Először a fémekre vagy fröccsöntött műanyagoknál alkalmazott szabványos mérési módszerekkel vizsgálták az additív darabokat is, de az eredmények változatossága miatt hamar rá kellett jönni, hogy egységes mérési szabvány szükséges. Ezek a szabványok folyamatosan bővülnek és finomodnak. Erre jó példa az ISO/ASTM 52927-es szabvány, ami a 2014-es megjelenése óta az additív gyártás fő jellemzőit és megfelelő tesztelési módszereit írja elő. A nyomtatott darabokba történő könnyű integrálhatósággal lehetőség van további kreatív módszerekkel vizsgálni a darabokat. Például, ahol a darabba helyezett integrált szenzorral mérték a kifáradási határt. [10]

2. Módszertan

A témakörben tett irodalomkutatás után a kísérlettervezés (Design of Experiment) elvét követve egy mérési módszer kidolgozásával kezdtem. A darabok sajátfrekvenciáit szerettem volna mérni, ezzel választ kapva a lengéstani tulajdonságaikra. Még a mérési folyamat konkrét tervezése előtt, a mérni és vizsgálni kívánt paramétereket gyűjtöttem össze. 3D nyomtatás esetén sok gyártási paraméterről beszélhetünk, ami a szeletelő program opcióitól kezdve a gép működésével kapcsolatos változókig terjed. Ezek kiválasztását többszöri megfontolás után pragmatikus módon választottam ki és a variációkból magas darabszámot is korlátozva, négy paramétert vettem a vizsgálatba. Amennyiben egy paraméter esetében lehetséges volt, négy köztes értéket vettem fel. Ezután következett a tesztdarabok geometriájának létrehozása. Itt már időközben a mérés módja körvonalazódott, tehát a geometriával igazodni lehetett az előzetes mérésekhez (a verziók később kerülnek bemutatásra). Amikor egy geometria verziója elkészült, egy darab gyártásra került. Így fizikai valójában is lehetett vizsgálni a darabokat és az ezekből vett tapasztalatok alapján lettek változtatva a következő verziók is. Amikor a kész geometria elkészült, a gyártás előkészítés következett. Mindegyik kiválasztott variációhoz szükséges gyártási fájlt létrehoztam. Mivel a darabok belsejének kialakítása gyártás után már nem voltak láthatóak, a hibák elkerülése és az adatok jobb nyomonkövethetősége és kezelhetősége érdekében saját azonosító rendszert alkalmaztam. Emellett a méréshez szükséges kiegészítő készülékek gyártásának előkészítését is megcsináltam, tehát kész volt a teljes mérési terv. Ezek után a darabok és készülékek gyártása következett. A folyamatosan készülő darabokat kisebb csoportokban mértem. A laboratóriumban gondosan ügyeltem, hogy mindig a lehető legjobban, azonos körülmények között történjen a mérés. A mérések fokozatos elvégzése közben egy célszoftvert készítettem az adatsorok könnyebb feldolgozása érdekében. Az adatfájlok importálása után a megírt program a szükséges számításokat elvégezte, így a vizsgálatához szükséges diagramok könnyen és egy helyen kezelhetők voltak. Az adatok vizualizálásával a görbéket össze tudtam hasonlítani, így kereshetők voltak a paraméterek közötti tendenciák. Az összes mérés elvégzése után mindegyik adatsort gondosan leellenőriztem, kiszűrve ezzel az esetleges rendellenességeket, valamint jobb képet kaptam a darabok viselkedéseiről. A közös diagramok, melyek bemutatásra kerülnek, egyes paraméterek hatásait jól ábrázolják. Minden darabhoz tartozó mérés átlaga az ?? és mellékletben található. Egyes tendenciák az elméleti geometriával kerültek összehasonlításra, melyek megerősítést adnak a mért eredmények helyességére. Az elméleti geometriák CAD modellek, melyek a darab belsejében fizikailag tartalmazzák a különböző kitöltési mintákat különböző sűrűségek esetén.

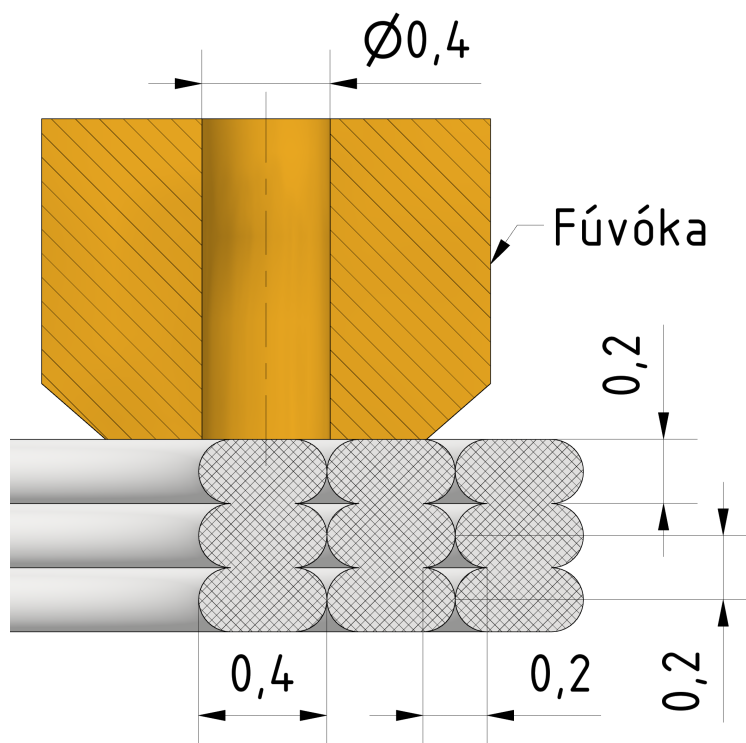


4. ábra. A vizsgálat módszertana

2.1. Vizsgált paraméterek

Az ipari 3D nyomtatók esetén zárt forráskódú szoftvert futtató gépekről beszélhetünk, melynek egyik hátránya, hogy nincs lehetőség bármilyen paramétert kedvünkre változtatni, ellenben a fogyasztói változatokkal, ahol nem csak a gyártási paramétereket, de a gép vezérlésében is van lehetőség paramétereket módosítani, mint például a legnagyobb megengedhető fúvóka hőmérséklet vagy a kinematikai dimenziók felülírása. Ez a korlátoltság a gyártók által szolgáltatott szeletelő programokon is nagyon jól látszik. A *Stratasys* által szolgáltatott szeletelő program, a *GrabCAD*, melynek felhasználói felülete igen könnyen kezelhető, de sok paraméter beállítására nincs lehetőség. Nagyjából 34 opciót van lehetőség állítani. A hobbi és nyílt forráskódú szoftverrel rendelkező nyomtatók körében az *Ultimaker* által forgalmazott *Cura* és a *Prusa Research* által fejlesztett *Prusa Slicer* a két legnépszerűbb szeletelő program jelenleg. További szabadságot nyújt ezeknek a nyílt forráskódja is, mivel ha nem találunk megfelelő beállítást, amire szükségünk lenne, további felhasználók által készített bővítmények telepítésére is van lehetőség, ezzel megnövelve a lehetőségeket a beállítások terén. A tesztadarabok szeletelését a *Cura* szeletelőben végeztem, ahol 523 opciót tudtam állítani. Példa a kitöltésre vonatkozó paraméterek állításának menüjére a *Cura* és a *GrabCAD* környezetekben a 6. ábrán látható. Ahhoz viszont, hogy a vizsgálatom szélesebb körben hasznosítható legyen, az általam kiválasztott paraméterek olyan paraméterek, melyeket az ipari gépekhez való szeletelő programok esetében is állíthatóak, hiszen ezek esetében van leginkább megkötve a kezünk. Ezzel egy nagyobb számú alkalmazási területet van lehetőség lefedni. Ipari gépeknél legtöbbször nincs lehetőségünk változtatni a nyomtatási sebességen, hőmérsékleten vagy az adagolási arányon, mivel a gyártók a beprogramozott értékekkel már megtaláltak egy optimumot, amivel garantálni tudnak egy konstans minőséget.

Adott sebesség mellett egy növelt fúvóka hőmérséklet esetén például a rétegen belüli adhézió növekedhet, mivel a keresztmetszeten jól látható rések jobban eltűnnek és a lefektetett szálak közötti kontakt mértéke megnő, ezzel csökkentve a porozitást. [11] [12] Ennek ellenére ez a paraméter kimarad a vizsgálatból, mivel az ipari gépeken az anyagok nyomtatási hőmérsékletét nincs lehetőség állítani. A lefektetett szálak közötti kapcsolatot még a nyomtató ágyának hőmérséklete is nagyban befolyásolja, mivel a nyomtatás teljes ideje alatt magasabb hőmérsékleten tartja az első néhány réteget, ezzel még erősebb mechanikai tulajdonságokat szerezve a jobb szálak közötti kapcsolatokkal rétegek között és rétegen belül is. [13]



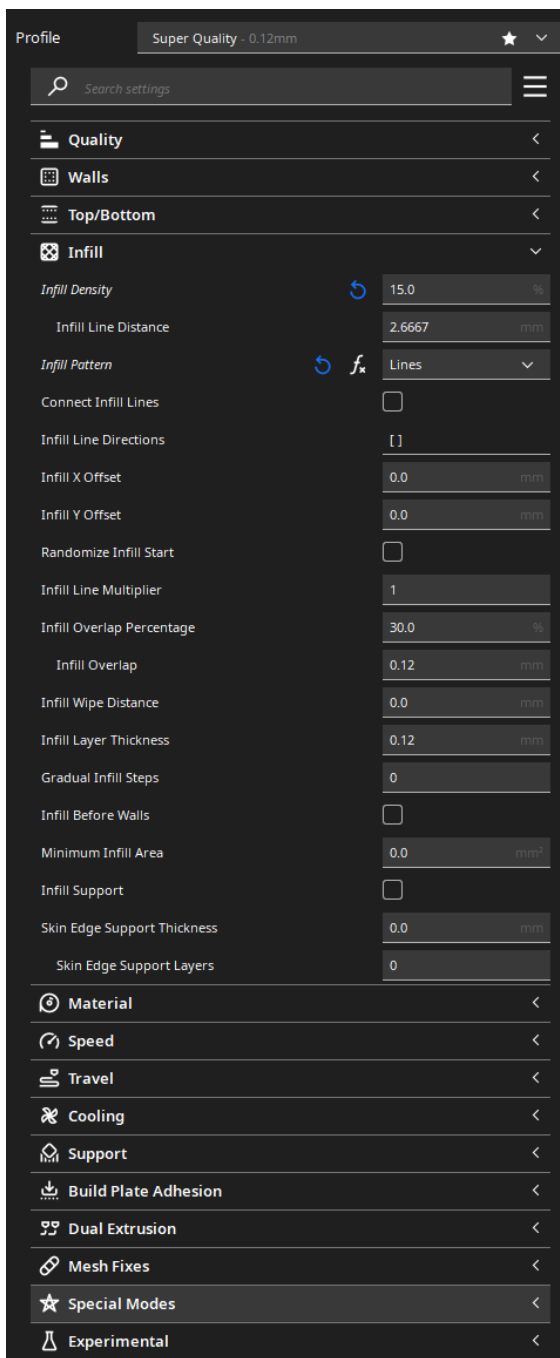
5. ábra. Az elméleti nyomtatási keresztmetszet 3 fal esetén

A rétegmagasság növelésével a szakítószilárdság jelentősen csökken, ami a szálak közötti kis mértékű kontakt hatása és ezáltal gyenge az adhézió a rétegek között. Emellett a fúvóka átmérő és a rétegmagasság aránya is kiemelkedően fontos, ahogy ez a 5. ábrán is látható. [14] [15] A fúvóka furatának keresztmetszete kör alakú, de a lefektetett szálak keresztmetszete inkább egy torzult téglalaphoz közelít, melynek torzulását nagy mértékben befolyásolja a rétegmagasság. Minél közelebb van a fúvóka átmérő és a rétegmagasság aránya egyhez, annál inkább kapunk egy kör alakú keresztmetszetet a lefektetett szálakon, viszont azt sem szabad elhanyagolni, hogy az olvadt műanyag mikor felfekszik a darabra, valamilyen mértékben tovább torzul. Lehetőség van ezt a keresztmetszetet változtatni a filament adagolás mértékével, ugyanis egy fix geometriájú fúvókából, konstans sebesség mellett, a változó adagolási mérték szélesebb vagy éppen keskenyebb keresztmetszetet ad. A szeletelő programok ezzel a módszerrel állítják a lefektetett szálak szélességét. A fúvóka furatánál nagyobb vonalszélesség beállításakor, az adott sebességhez nagyobb adagolás mérték mellett, a többlet anyag oldal irányba tolódik ki, ezért a szélesebb szál. Ökölszabályként, a legnagyobb vonalszélesség, a fúvóka furat melletti legnagyobb vízszintes perem szélessége. Ennél szélesebb szál lefektetésekor, a szál peremes keresztmetszetet adna, ami rontaná a rétegek közötti adhéziót. Ahogyan a 5. ábrán is látható, hogy egy rétegen belül a szomszédos falak közötti kontakt felület vagy a légrés mértéke is egy meghatározó tényező. Minél kisebb a légrés, annál erősebbnek mondható a szálak közötti kapcsolat a nagyobb kontakt felület miatt. A fúvóka átmérőjének hatása a mechanikai tulajdonságokra egy vitatott aspektus, mivel a mérési eredmények megoszlanak és esetenként egymás inverzei. Ezeknél az eseteknél a rétegmagasság

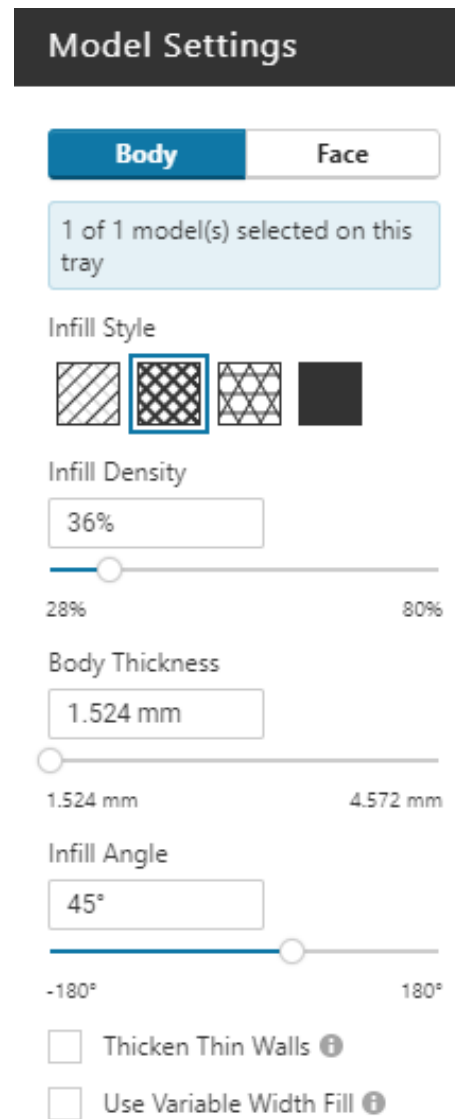
nem mindig lett figyelembe véve és valószínűsíthetően ezért vannak eltérések a mérésekben. További irodalmaknál, ahol az átmérő és rétegmagasság viszonya már specifikusan a vizsgálat célja, az ajánlott fűvóka átmérő a másfélszerese a rétegmagassághoz képest a megfelelő szálak közötti kontakthoz. [16] A falak száma egy további szeletelésbeli megfontolás, ami a darab külső héjának merevségét adja meg, de nyomtatáskor ezeket a falakat lassabban szokás nyomtatni, mivel a darab felületének minőségét és formájának merevségét adja, így a szálak minél erősebb kapcsolata fontos. A kisebb sebesség a külső felület esztétikai minőségét is elősegíti. A darabok merevségének növeléséhez egy további lehetőség a kitöltési minta és annak sűrűségének változtatása. A kitöltési minta a terhelhetőség főbb irányait, a sűrűség a terhebírást segíti elő. Ezeknek hatásai később kerülnek bemutatásra.

A kiválasztott paraméterek:

- Darab orientációja
- Falak száma
- Térkitöltés minta
- Térkitöltés mintájának sűrűsége %-ban



(a) Állítható paraméterek egy része a Cura-ban, érdemes figyelni, milyen nagy részletességgel állíthatóak csak az alsó és felső burkoló falak

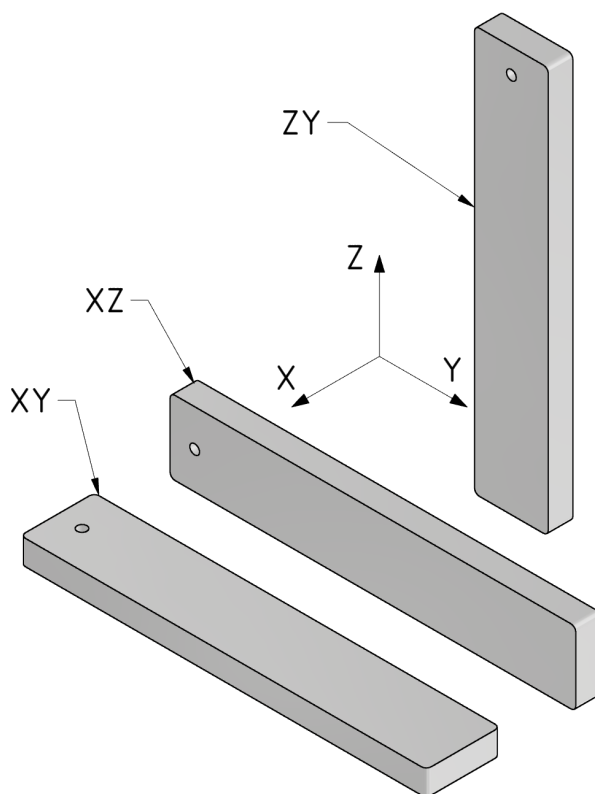


(b) Állítható paraméterek egy része GrabCAD-ben

6. ábra. Szeletelő programokban a kitöltésre vonatkozó paraméterek választéka

2.1.1. Orientáció

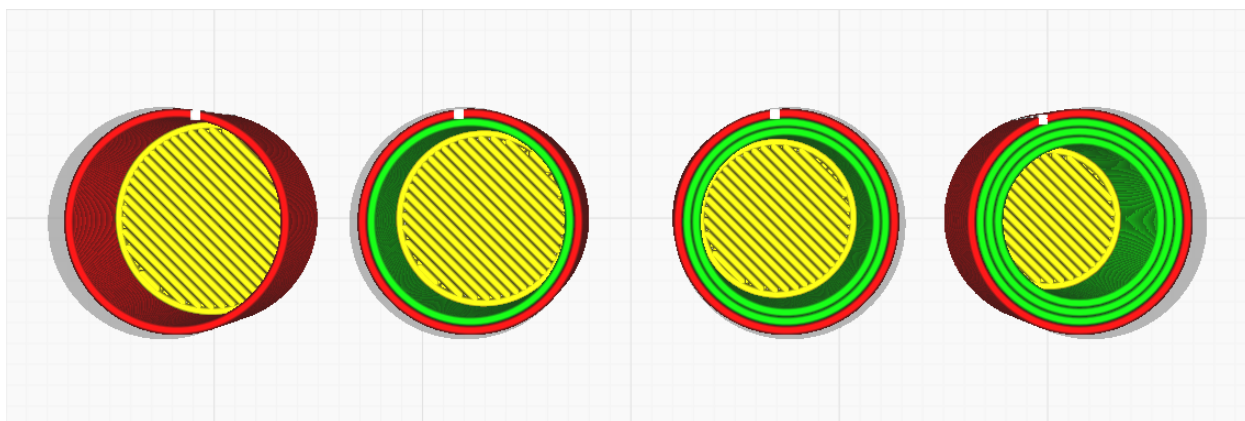
A darab gyártási orientációja elsősorban a rétegek irányultságát határozza meg, melynek nagy hatása van a darab szilárdságára is. [17] A már bemutatott fűvóka átmérő és rétegmagasság viszonyából adódó keresztmetszeti viszonyokat figyelve, a terhelés iránya is fontos elem. A kontakt felületek és azok irányultsága a terhelés irányához képest más-más jellemzőket adhat, ahogy ez megfigyelhető a Young modulus változásában is. [18] A különböző orientációk megnevezése a 7. ábrán láthatóak.



7. ábra. A három építési orientáció

2.1.2. Falak száma

A falak számának növelésével a darab falának merevségét lehet növelni, viszont van, amikor kritikus a pontos burkoló fal méreteinek megtartása, ezért a legtöbb FFF nyomtató a legkülső falon lassabb sebességgel halad, mint a kitöltés vagy a belső falak esetén. A Cura alapbeállításai esetén a megadott nyomtatási sebesség felével extrudálja a burkoló falakat. A nagyobb falszám nagyobb anyagfelhasználást is jelent és a gyártási idő is jelentősen növekszik. Különböző falvastagságok a 8. ábrán láthatóak.



8. ábra. Különböző falak száma

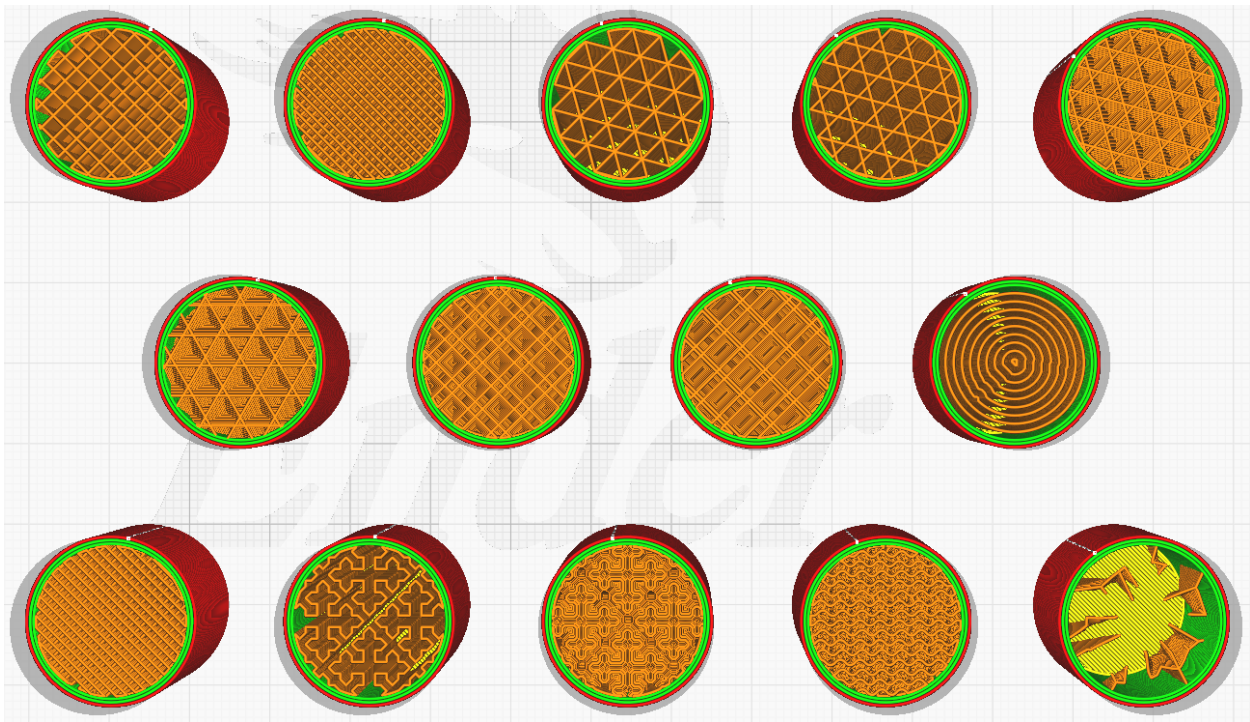
2.1.3. Kitöltés minta

A kitöltési minta a darab belső struktúrája, ami tartja a falakat és merevséget ad a darabnak, miközben csökkenthető az anyagfelhasználás, mivel ezek a minták légrést okoznak a darab belsejében. Vannak minták, melyek egyes tengelyek irányában nem változnak (grid), így egy megfelelő irányból nézve konstans keresztmetszet látható. Állíthatók olyan minták is, melyek keresztmetszete bármely irányból tekintve folyamatosan változik a darabon haladva (gyroid). Ezek a minták használatosak akkor, ha kifejezetten a darab terhelés ellenállását szeretnénk erősíteni. A minta kiválasztása attól függ, hogy az adott darabnak milyen követelményeknek kell megfelelnie, mint a szilárdság, tömeg, hajlékonyság és anyagszükséglet. Továbbá a minta választhatósága erősen függ a szeletelő szoftvertől is, mivel különböző szoftverek, más-más minta csoportot használnak. A minták és azok tulajdonságainak ismerete jobban segíthet optimalizálni a darabokat a követelmények kielégítésére. A Cura által választható minták a következők:

- **Grid:** négyzetrácsos kitöltés, ami az építési irányban nem változik. A rács előnye a nyomtathatósági sebessége, ez a legkevésbé bonyolult minta.
- **Lines:** a Grid-hez hasonló, annyi eltéréssel, hogy egy rétegen csak a párhuzamos vonalakat fekteti le, majd a következő rétegen a 90 fokkal elfordított egymással párhuzamos vonalakat fekteti le.
- **Triangles:** háromszögekből álló 2D háló, ami az építési irányban nem változik. Általában akkor használatos, ha a falra merőleges terhelés hat.
- **Tri-hexagon:** Ez a 2D minta hatszögekből és háromszögekből álló kombinációt eredményez. Az egyik előnye, hogy a hatszögek formájuknak köszönhetően erős kitöltési mintát biztosítanak, miközben az anyagfelhasználást minimalizálják. Emellett a háromszög-hatszög kitöltés rövidebb szakaszokat tartalmaz az oldalak összekötésekor, így kevésbé fordul elő torzulás a nyomtatás során a hűtés hiánya miatt.

- **Cubic:** 3D-s egymásra halmozott és csúcsára állított kockákból álló minta.
- **Subdivision-cubic:** Cubic-kal egyenlő, de kevesebb anyagfelhasználást igényel.
- **Octet:** piramis alakú elemek egymásra halmozása.
- **Quater cubic:** Octet-hez hasonló, csak a piramisok el vannak tolvá egymáshoz képest.
- **Concentric:** 2D-s minta, ami az adott réteg falát követi le koncentrikusan, a sűrűséggel a gyűrűk közötti távolságot lehet megadni.
- **Zig Zag:** 2D-s rács, ami rétegenként egy megszakítatlan vonalként van lefektetve, ha azt a darab keresztmetszetének formája engedi. Ránézésre nagyon hasonlít a Grid-hez.
- **Cross:** 2D-s keresztminta rács. A minta közötti résekkel minimális hajlítást és csavarodást enged.
- **Cross 3D:** azonos minta a sima keresztettséghez, annyi különbséggel, hogy az építési irányban a minta falának dőlése változik. Félig merev tulajdonságokat ad a darabnak.
- **Gyroid:** változó, egymásba fonódó szinusz függvények merőlegesen egymásra. A darab szilárdságát több irányban egyformán biztosítja. Több irányú nagyobb terhelés esetén alkalmazott.
- **Lighting:** a belső falakhoz csatlakozik, a darab teteje felé haladva egyre jobban besűrűsödve. Kevesebb anyagfelhasználást és rövidebb nyomtatási idő érhető el vele, viszont a terhelések ellen nem használatos.

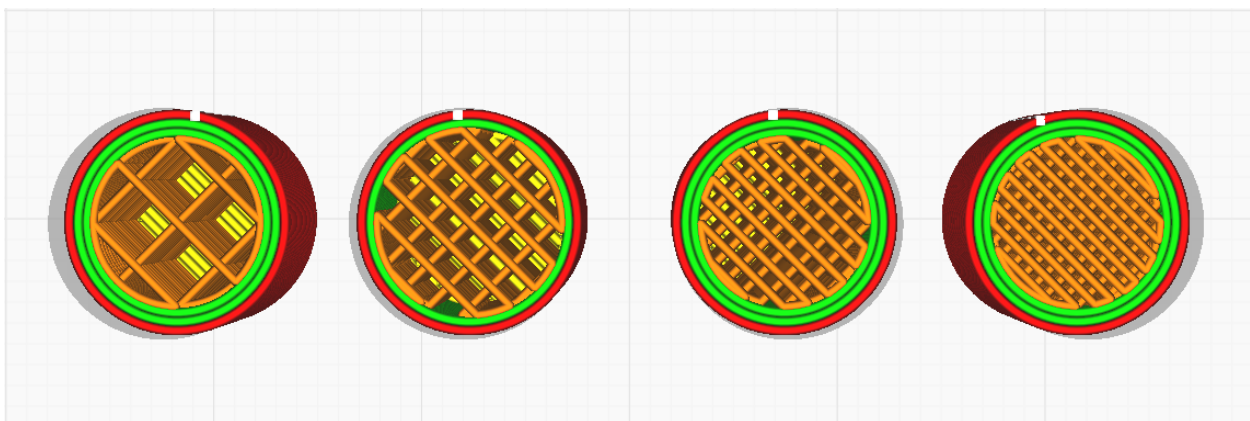
Az adott darabra ható terheléseknek legjobban ellenálló kitöltési minta kiválasztása az egyik legfontosabb beállítás, mivel ennek van legnagyobb hatása a darab kifáradási határára. [10] A különböző kitöltési minták a 9. ábrán láthatóak.



9. ábra. A Cura-ban elérhető kitöltési minták

2.1.4. Kitöltés sűrűség

A kitöltési minta sűrűségét jelenti, a minta szálai közötti távolsággal vagy a keresztmetszet területéhez képest százalékos mértékben (10. ábra). Ezzel a paraméterrel lehetőség van erősíteni a darabot a nagyobb sűrűséggel, de ezzel több anyag is kerül felhasználásra. A darab kevésbé hat üregesnek és a tömege is növekszik. Ha egy darab szilárdságát kell növelni, általában ez az a paraméter, amit először változtatnak a felhasználók (saját eddigi tapasztalatból, én is). A sűrűség növelésének mértéke valószínűleg nem arányos a teherbírás növekedésével, így nem könnyű megtalálni az optimumot.



10. ábra. Különböző kitöltési sűrűségek sorrendben: 15%, 30%, 45% és 60%

2.2. Variáció mátrix

Mikor a paraméterek kiválasztásra kerültek, az összes variáció vizualizáláshoz egy variáció mátrixot hoztam létre. A mátrix segítségével könnyebb volt nyomon követni, hogy mi lett már szelelve, legyártva vagy éppen letesztelve. A 11. ábrán a sárgával jelölt variációk kerültek bele a vizsgálatba.

Minta		Grid				Cubic				Gyroid				Cross 3D			
Sűrűség		15%	30%	45%	60%	15%	30%	45%	60%	15%	30%	45%	60%	15%	30%	45%	60%
1	XY	1111	1112	1113	1114	1121	1122	1123	1124	1131	1132	1133	1134	1141	1142	1143	1144
	XZ	2111	2112	2113	2114	2121	2122	2123	2124	2131	2132	2133	2134	2141	2142	2143	2144
	ZX	3111	3112	3113	3114	3121	3122	3123	3124	3131	3132	3133	3134	3141	3142	3143	3144
2	XY	1211	1212	1213	1214	1221	1222	1223	1224	1231	1232	1233	1234	1241	1242	1243	1244
	XZ	2211	2212	2213	2214	2221	2222	2223	2224	2231	2232	2233	2234	2241	2242	2243	2244
	YZ	3211	3212	3213	3214	3221	3222	3223	3224	3231	3232	3233	3234	3241	3242	3243	3244
3	XY	1311	1312	1313	1314	1321	1322	1323	1324	1331	1332	1333	1334	1341	1342	1343	1344
	XZ	2311	2312	2313	2314	2321	2322	2323	2324	2331	2332	2333	2334	2341	2342	2343	2344
	ZX	3311	3312	3313	3314	3321	3322	3323	3324	3331	3332	3333	3334	3341	3342	3343	3344
4	XY	1411	1412	1413	1414	1421	1422	1423	1424	1431	1432	1433	1434	1441	1442	1443	1444
	XZ	2411	2412	2413	2414	2421	2422	2423	2424	2431	2432	2433	2434	2441	2442	2443	2444
	ZX	3411	3412	3413	3414	3421	3422	3423	3424	3431	3432	3433	3434	3441	3442	3443	3444
Falak száma	Orient																

11. ábra. A variáció mátrix azonosító számokkal kitöltve

2.3. Azonosító szám

Minden próbadarab rendelkezik egy egyedi azonosító számmal, ami a gyártási paramétereit írja le. Ez az adatok könnyebb kezelhetőségét és a mérések közben a darabok összekeverését hivatott meggátolni, hiszen nem minden esetben mondható el a darabról szemrevételezéssel, hogy milyen paraméterekkel lett gyártva. Négy paraméterrel dolgoztam folyamatosan, ami összesen 39 variációt jelentett.

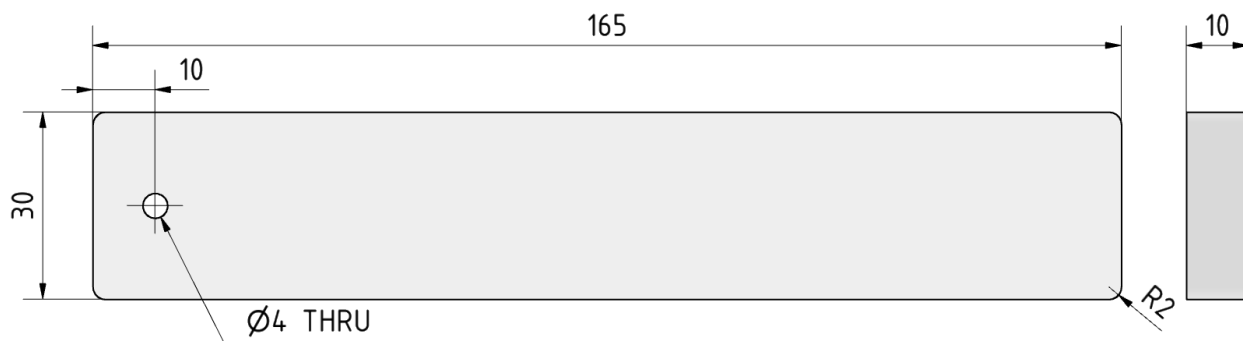
1. táblázat. Az azonosítós szám felépítésének magyarázata

Azonosító szám			
	Orientáció	Falak száma	Kitöltés minta
			Kitöltés %
	X	X	X
1	XY	1	Grid
2	XZ	2	Cubic
3	YZ	3	Gyroid
4	-	4	Cross3D

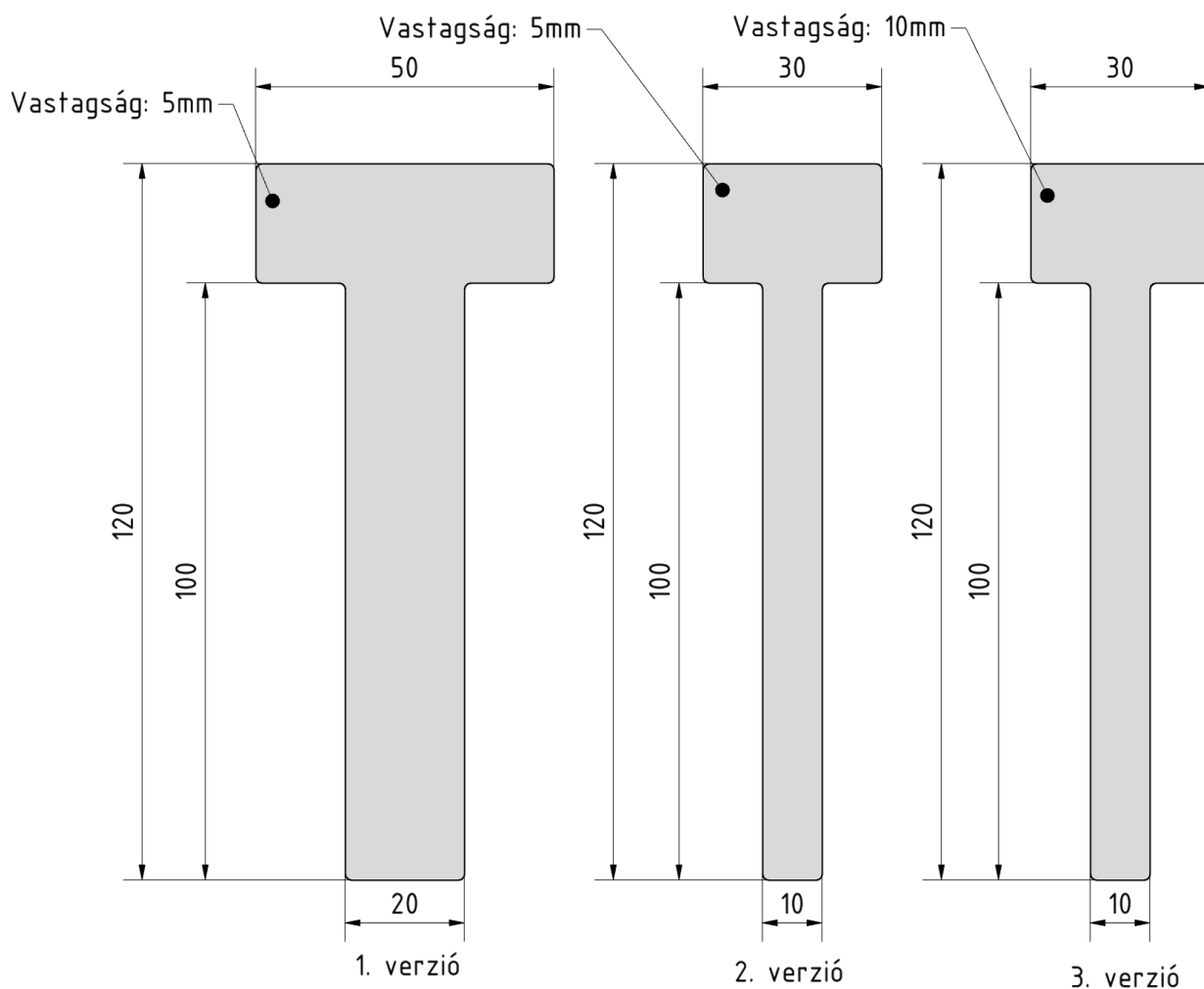
Az 1. táblázat alapján az azonosító számok 1111-től (XY orientáció, 1 fal, Grid kitöltés, 15% sűrűség) 3444-ig terjednek (YZ orientáció, 4 fal, Cross3D kitöltés, 60% sűrűség).

2.4. Teszt darab

A tesztdarabok geometriájának kialakításakor mintaként az [19] irodalom volt az iránymutató. Az első verziók elkészítésekor a befogás területén kialakított szélesítés került alkalmazásra, amit hivatkozott irodalom is használt a befogás elősegítése érdekében. A befogási terület szélességének mértéke a darab szabad területének szélességéhez lett igazítva arányosan. A második verzió esetében a szabad szakasz szélessége került csökkentésre, a gyártási idő csökkentése érdekében, de a magasság túl alacsonynak bizonyult, mivel a kitöltési minták aránylag kevés részét tették volna ki a darabnak. Ebből a megfontolásból lett megnövelve a magasság a harmadik verzióhoz, de a falak tervezett növelésével, a kitöltési minták egy elemi része a nagy kitöltési sűrűségekkel nem fért volna el. Ezzel a minták közötti különbségeket nem lehet vizsgálni. (13. ábra) Le kellett vonni a következtetést, hogy nagyobb méretek szükségesek a darab kialakításához, mivel a falak és kitöltési minták közötti befolyás a keresztmetszeteken fontos, ha ezek kapcsolatán vagy akár a paramétereken belüli változás hatásait szeretnénk vizsgálni. Az iránymutató irodalom geometria választása a kifáradási tesztekhez megfelelő, mert a befogott szélesebb rész és a szabad, keskenyebb rész határán várhatóak a repedések. A vizsgálatomnak erre nincs szüksége, további irodalomkutatás eredményeképpen [20], [21], [22], a hasáb kialakítás került kiválasztásra (12), melynek méretei a 12. ábrán láthatóak. Ezekkel a méretekkel már a legtöbb fal alkalmazása mellett, a legkisebb kitöltési sűrűséggel rendelkező darab keresztmetszetében is jól érzékelhető volt a kitöltési minta milyensége, tehát legalább egy teljes elemi része megtalálható benne (14. ábra). Egy másik típusú vizsgálati módszerhez is előkészülve egy furat lett elhelyezve a darab végéhez közel, hogy egy rugalmas zsinórra felfüggeszthető legyen a test. A mérési adatok túlságosan zajosnak és megbízhatatlannak bizonyultak, ami az ismételhetőséget is gátolta. Ekkor már egy nagyobb számú darab is legyártásra került, a furat maradt a végleges geometria része, de a megmaradt mérési módszerben nem szabadna változást okoznia, mivel a befogott szakaszon helyezkedik el.

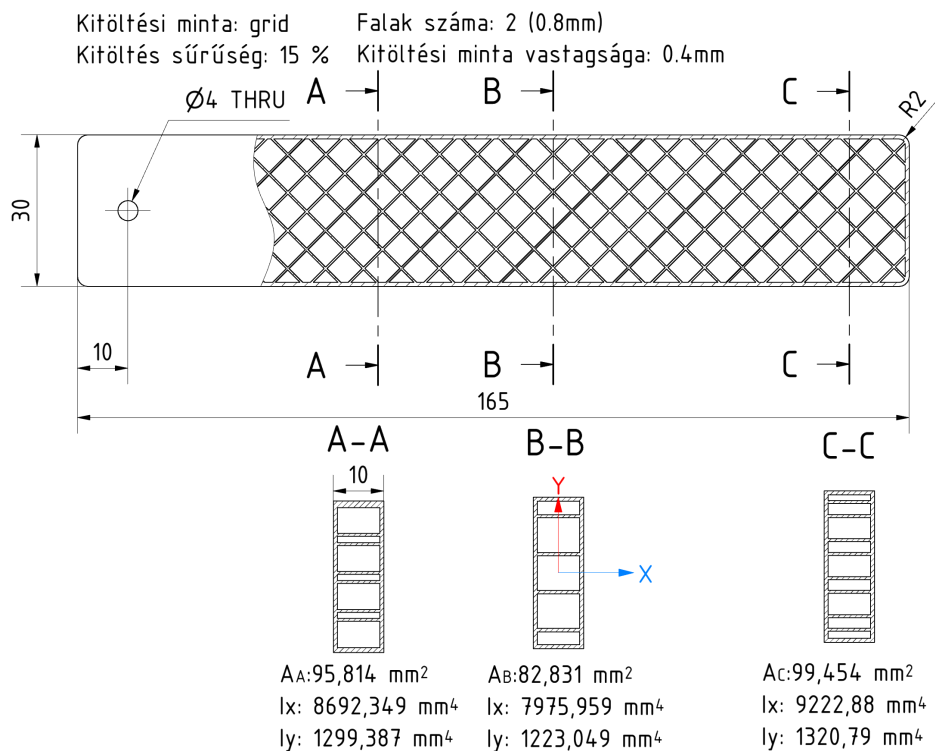


12. ábra. A végső geometria

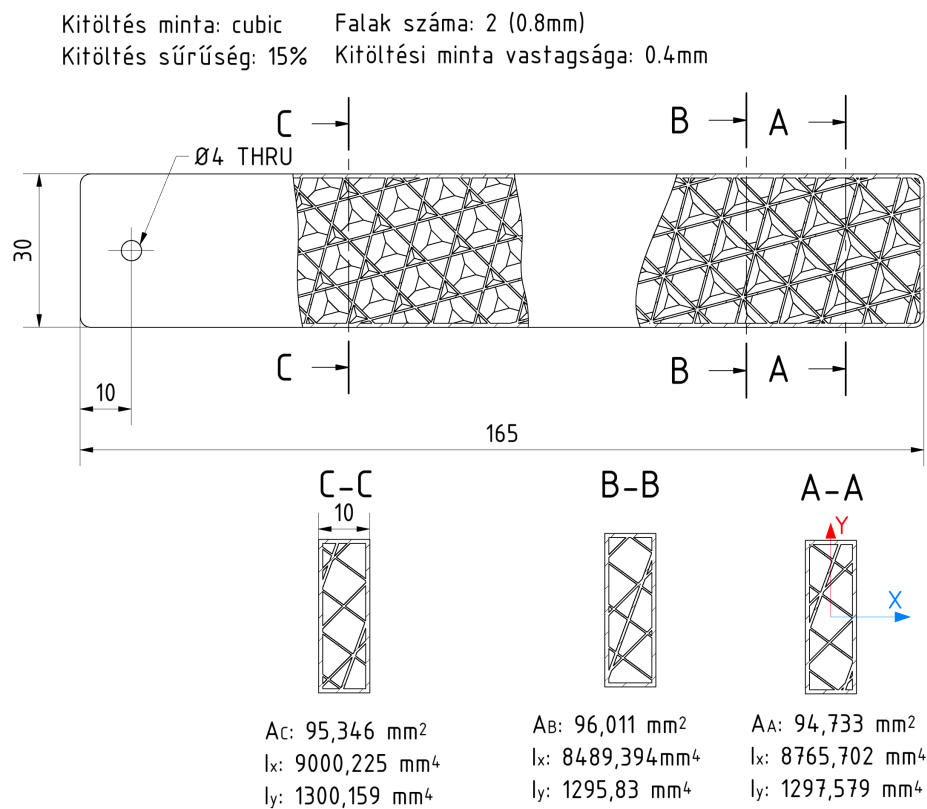


13. ábra. A tesztdarab geometriájának első verziói

A kitöltési minták tárgyalásánál látható volt, hogy egyes minták a főirányokhoz képest csak kettő vagy három tengely mentén változnak. Ezeket a 2D és 3D jelzőkkel különböztettük meg. Most hasonlítsunk össze két ilyen különböző jellegű mintát, azonos kitöltési sűrűséggel és falak számával, valamint vizsgáljuk meg, hogy a kiválasztott geometriában milyen minta periodicitás tapasztalható és, hogy a keresztmetszetek a minta egy teljes elemi részét tartalmazzák. A két összehasonlított minta a *Grid* és a *Cubic* minták. Ezek a kevés anyagigényű és gyorsan nyomtatható minták. A 14. és 15. ábrákon jól kivehető, hogy az általunk vizsgált kitöltési sűrűség tartomány alsó határán (tehát amikor a legnagyobb az elemi minta mérete) az elemi minta teljes mértékben kivehető legalább két periodicitásban. Bár az ábrán nem látható, de a többi főirányban is teljesül ez a tulajdonság. A későbbiekben bemutatandó (3)-as sajátfrekvencia képlet alapján a hosszmenti keresztmetszet is egy befolyásoló tényező, viszont ezt a számítási modell konstansnak veszi. A valós darabok keresztmetszeteinek és ezáltal a különböző inerciák változása a 16 - 18. ábrákon láthatóak 15%-os kitöltés esetén *Grid* és *Cubic* mintákkal. Az értékek változásainak okai a ?? - ?? ábrákon találhatóak a darabok metszeteivel együtt.

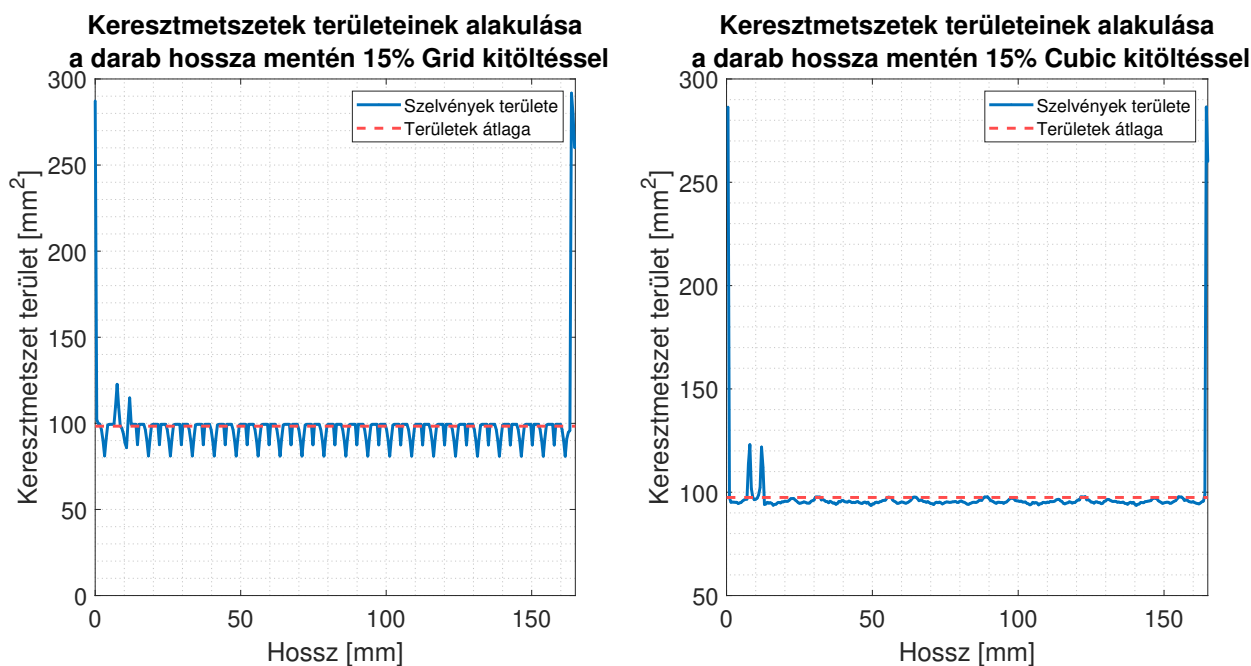


14. ábra. A végleges geometria egy paraméter konfigurációban (1211) különböző kereszt-metszetek értékeivel

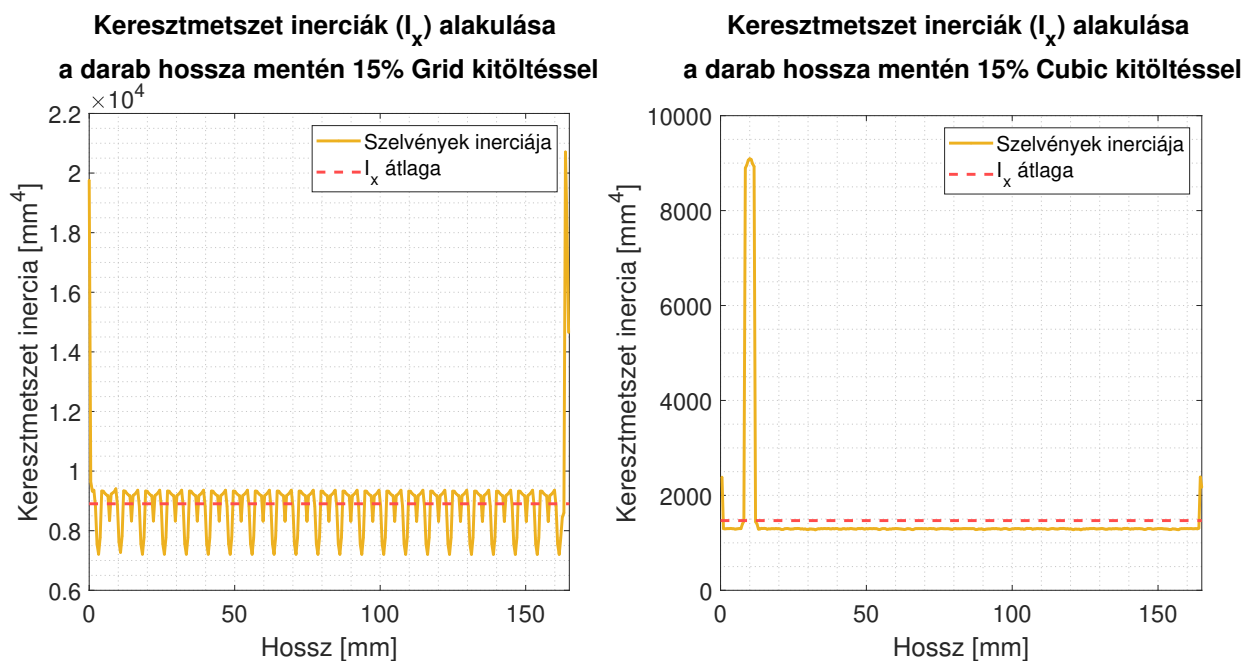


15. ábra. A végleges geometria egy paraméter konfigurációban (1221) különböző kereszt-metszetek értékeivel

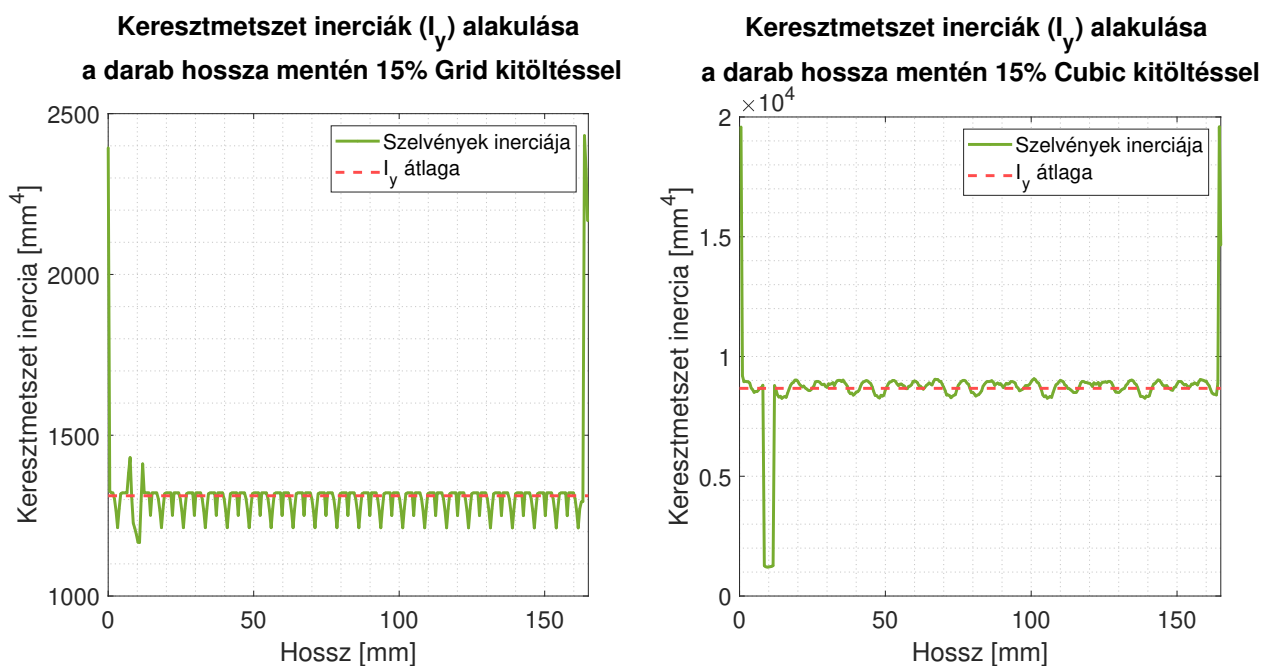
Az összehasonlíthatóság és a számolhatóság érdekében az értékek átlagai is fel vannak tüntetve az ábrákon. Jól kivehető a periodikus változás, amellet, hogy a 3D-s cubic minta értékeinek változása kisebb és átlagban nagyobb értékeket vesz fel mind területben, mind a különböző irányú inercia komponensekben, ezzel az átlagot nagyban magasabbra tolva. Összességében tehát elmondható, hogy az elemi keresztmetszeteket vizsgálva a 3D-s minták nagyobb merevséget adnak a daraboknak. Az ábrákon látható még egy kisebb ugrás az értékekben az elhelyezett furat, valamint a darab két végén a vizsgált síkkal párhuzamos teli keresztmetszetek miatt.



16. ábra. Szervények területei a darab hossza mentén haladva 15% Grid és Cubic kitöltés esetén



17. ábra. Szervények területei a darab hossza mentén haladva 15% Grid és Cubic kitöltés esetén



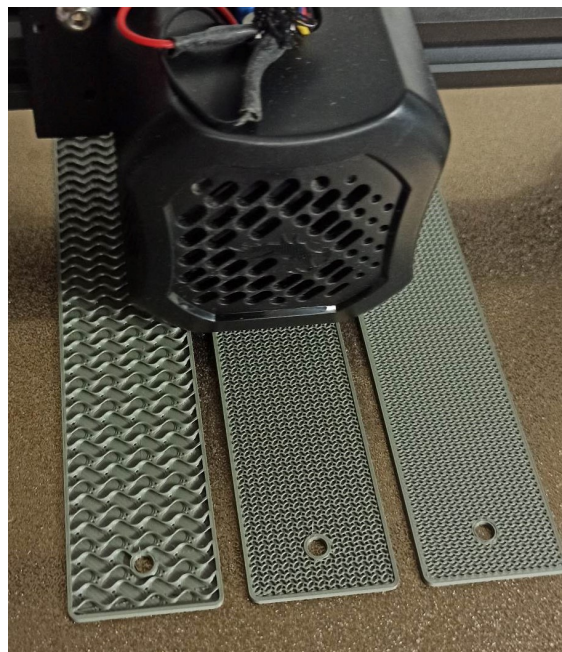
18. ábra. Szervények területei a darab hossza mentén haladva 15% Grid és Cubic kitöltés esetén

2.5. Gyártás

A darabok két *Creality Ender 3 V2*-es gépen lettek gyártva, ami egy kartéziánus felépítésű nyomtató. A gépeket a biztos tapadás érdekében felszereltem PEI (Poliéterimid) lapokkal, mivel az állított orientációs darabok esetén a nagy lengések miatt félő volt, hogy eldőlnék, valamint a darab első rétegének területe aránylag kicsit volt a teljes darab méretéhez képest. Lehetőség volt alkalmazni úgynevezett *brim*-et, ami az első réteget párhuzamosan megnagyítva minden irányban, nagyobb tapadási felületet biztosított volna. Ennek ellenére a PEI lap mellett döntöttem, mivel így a darab geometriája nem torzul, valamint utómunka sem szükséges a darabokon. A gyártás közben ügyeltem a környezeti hőmérséklet hirtelen változásának elkerülésére, mert ez nagyban befolyásolhatja a darabot. Ezt a darab gyártás után szemrevételezésével is tudtam ellenőrizni. A nagy hőmérsékletváltozás esetén (például hirtelen huzat a helységben) az éppen nyomtatott rétegek gyorsabban hűlnek és jobban zömülnek, ez pedig jól látható a darab felszínén, mert az érintett rétegek negatív gyűrűs hatást adnak.

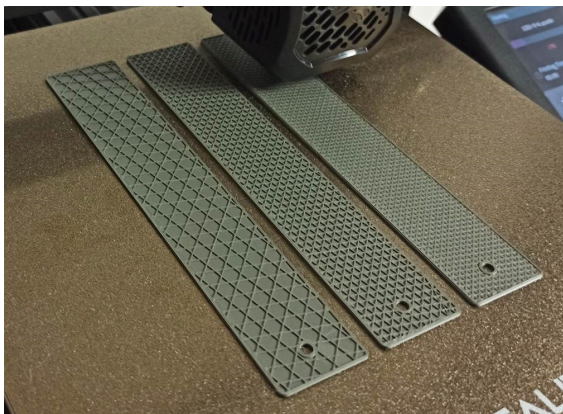


(a) Gyroid, cubic és Cross 3D minták 45%-os kitöltési sűrűséggel



(b) Gyroid minta 15, 45 és 60 %-os sűrűségekkel

19. ábra. Tesztdarabok gyártás alatt



(a) Cubic minta 15, 45 és 60 %-os sűrűségekkel



(b) Álló orientációs darabok

20. ábra. Tesztdarabok gyártás alatt

2.6. Alapanyag

A darabok gyártásához ReForm PLA (politejsav) került felhasználásra. Ajánlott nyomtatási hőmérséklet tartomány: 200-230 °C, építőlapp hőmérséklet: 60°C. A darabok 205 °C-os fúvóka hőmérséklettel és a megadott 60°C-os építőlapp hőmérséklettel lettek gyártva.

2. táblázat. Használt PLA főbb fizikai tulajdonságai [23] alapján

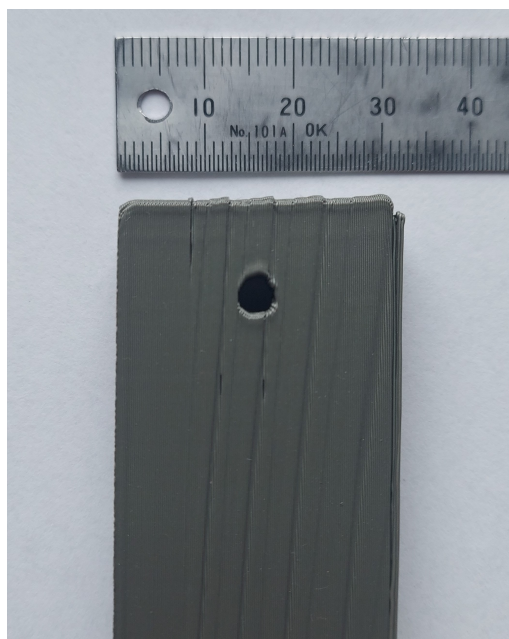
Tulajdonság	Érték	Vizsgálati módszer
Sűrűség	1.24 g/cm ³	ASTM D1505
Szakítószilárdság	110 MPa	ASTM D882
Young modulus	3310 MPa	ASTM D882
Kontrakció	160%	ASTM D882
Üvegesedési hőmérséklet	60 °C	ISO 306

2.7. Gyártási hibák ellenőrzése

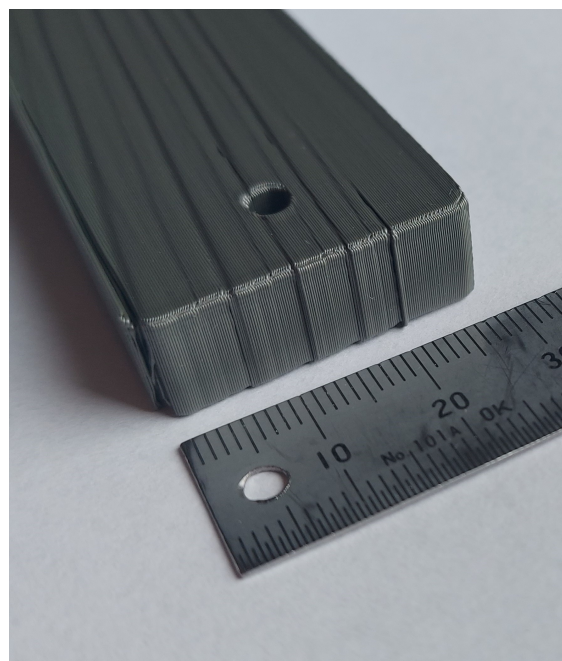
A gyártás után minden darabot szemrevételezéssel ellenőriztem először, majd kihűlt állapotban megmértem a méreteiket. Ezután részletesebb inspekcióval kisebb felületi hibákat, eltéréseket kerestem. Összesen csak 5 selejt került ki a gyártásból, viszont ezeknek a hibái már messziről észrevehetőek. A 21. ábrán látható darab esetében a nyomtató fejbe csatlakozó kábeleket összefogó ragasztószalag engedett el és gyűrődött fel a fej görgőire. Minden alkalommal, amikor a görgő átugrott ezen a kicsit vastagabb szalagon, a nyomtatott darabon, eltolt lefektetett vonalként jelent meg. A képen látható, hogy a fal hullámossága és gyűrűs alak miatt, nem használható mérési célokra.

A 23. ábrán látható 3 darab esetében az állított (ZY) orientációban való nyomtatásnál eldőlték a darabok. A képen jól látható, hogy a belső térkitöltési mintát már elkezdte elfedni a nyomtató, ami azt jelenti, hogy az utolsó kettő réteg nem került fel a darabra, ami így nem volt megfelelő mérési célokra.

A 22. ábrán látható darab esetében egy-két rétegen keresztül egy részleges dugulás történt, ami alulextrudálást okozott és légrést hozott létre a darabon. Látható, hogy a dugulás később megszűnt és a darab további részén nem történt ilyen hiba. Természetesen ez a hiba is kizáró ok volt a mérésre.

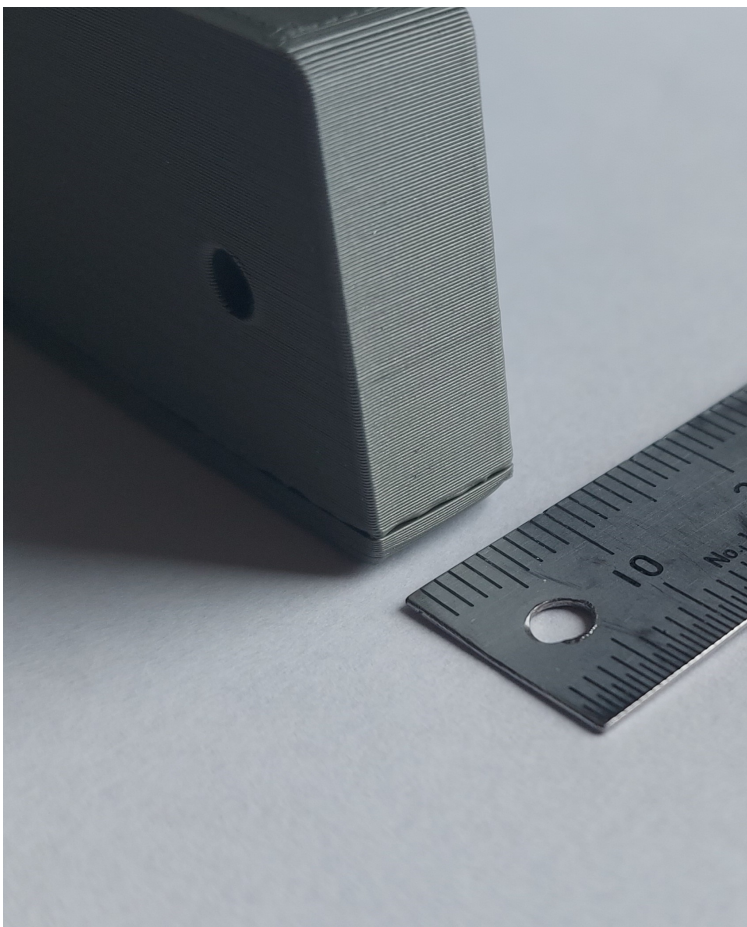


(a) Gyűrűzés és réteg eltolódás

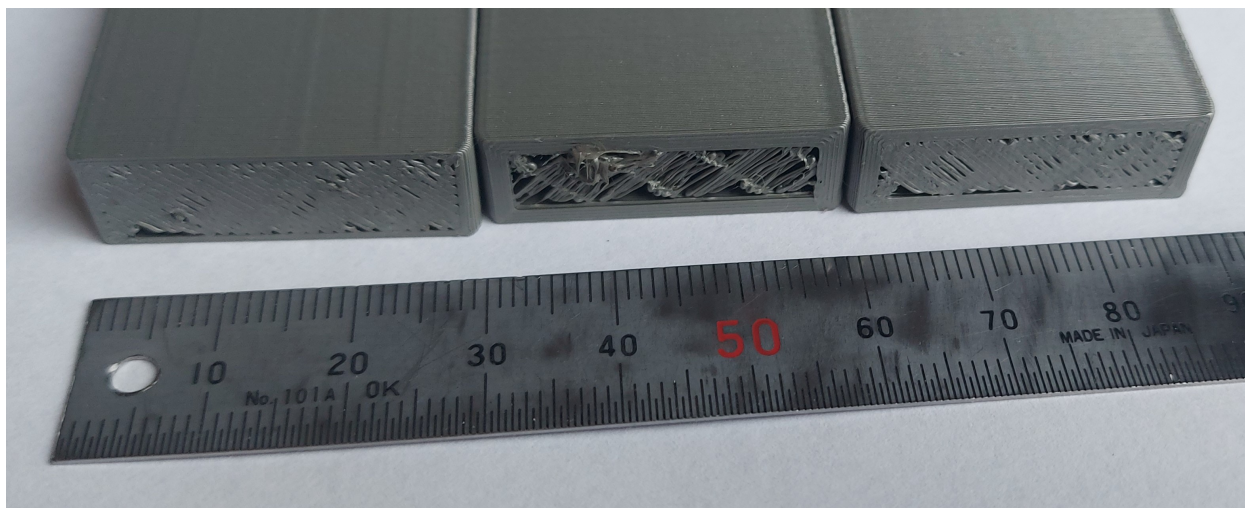


(b) A gyenge adhézió miatt az alsó réteg leválása tapasztalható

21. ábra. Tesztdarab gyártási hibák



22. ábra. Részleges fúvóka dugulás miatt, két rétegen alulextrudált anyag miatt légrések alakultak ki



23. ábra. Álló orientációban nyomtatva túlságosan belengtek a darabok, így azok 3 réteggel a program vége előtt eldőltek

2.8. Mérési konfiguráció

A méréseket a BME Műszaki Mechanika Tanszék laboratóriumában végeztem el, ahol rendelkezésemre bocsátották a műszereket az impulzuskalapácsos mérésekhez. A méréshez használt eszközök:

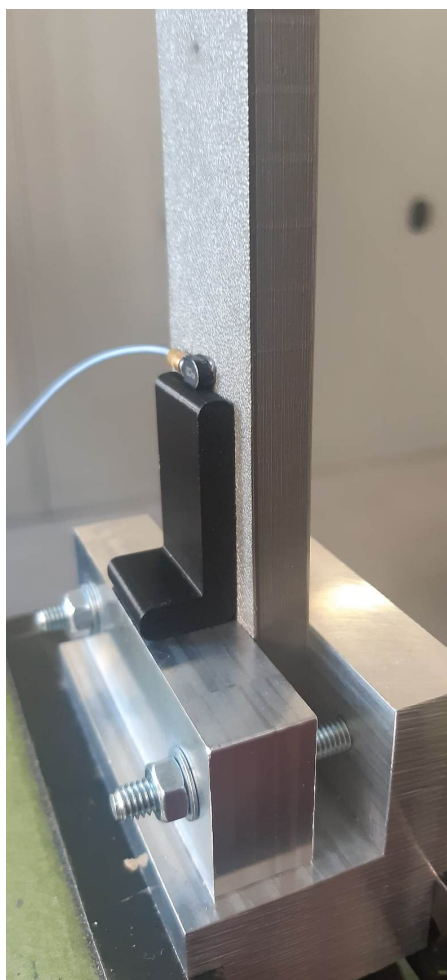
- Alumínium befogó pofák
- Satu
- PCB 086C03 impulzuskalapács [24]
- PCB 352C23 gyorsulásmérő [25]
- National Instruments CompactDaQ-9178 Chassis [26]
- National Instruments 9234 C Series Sound and Vibration Input Module NI 9234 [27]
- Számítógép Matlab környezet futtatásához
- Wiha 0.1-0.6 Nm nyomatékhátroló csavarhúzó

A mérés terve a darabok befogása volt és azok mérése, mint egy egyik végén befogott, másik végén szabadon lévő rúd. A mérés felépítését és módját az [28] és [13] irodalomból átvett megoldáshoz hasonlóan próbáltam elkészíteni. A kezdeti mérések során egy satuba fogtam be a darabokat azonos befogási hosszokkal, melyre egy 3D nyomtatott sablon segítségével mindig azonos magasságban helyeztem el a gyorsulásszenzort. A mérés során felmerült, hogy nem ismertek a befogási erők a satu pofái által. Mivel a mérések közötti tendencia a cél, az azonos körülmények megteremtése minden mérésnél kritikus.

Az eredményekre nagy hatással van a befogás típusa. [29] A bizonytalanság kiküszöbölésére először egy kisebb alumínium satut terveztem (lásd 25. ábra), amin a pofákat két M5-ös csavar és anya kombinációjával fogattam össze, remélve ezzel a biztosabb megfogásokat. A darabok effektív hossza (szabadon lengő szakasz) 140 mm volt. A mérések során az ismételhetőség javult és a zavar is csökkent, viszont egyes darabok esetén észrevettem, hogy nem fekszenek fel tökéletesen az alumínium befogóra, amit a pofák közötti távolság mérésével meg is tudtam erősíteni.



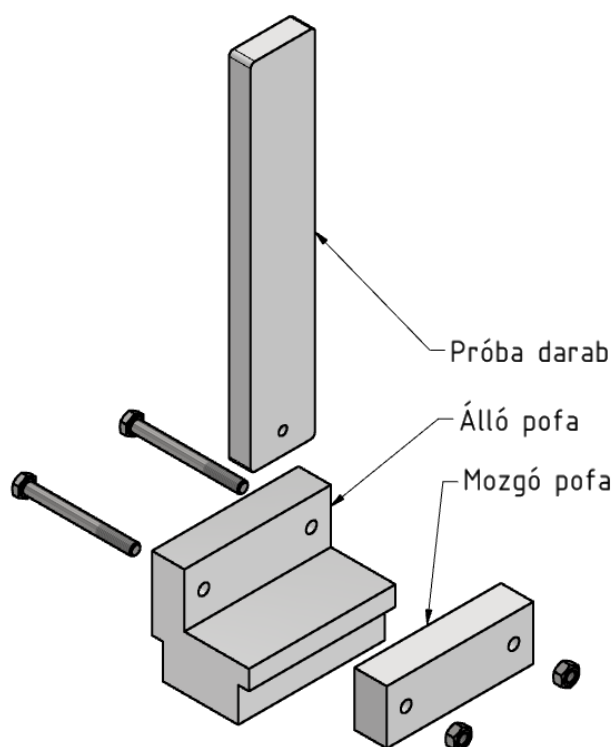
(a) Teszt darab befogása az első mérési konfigurációban



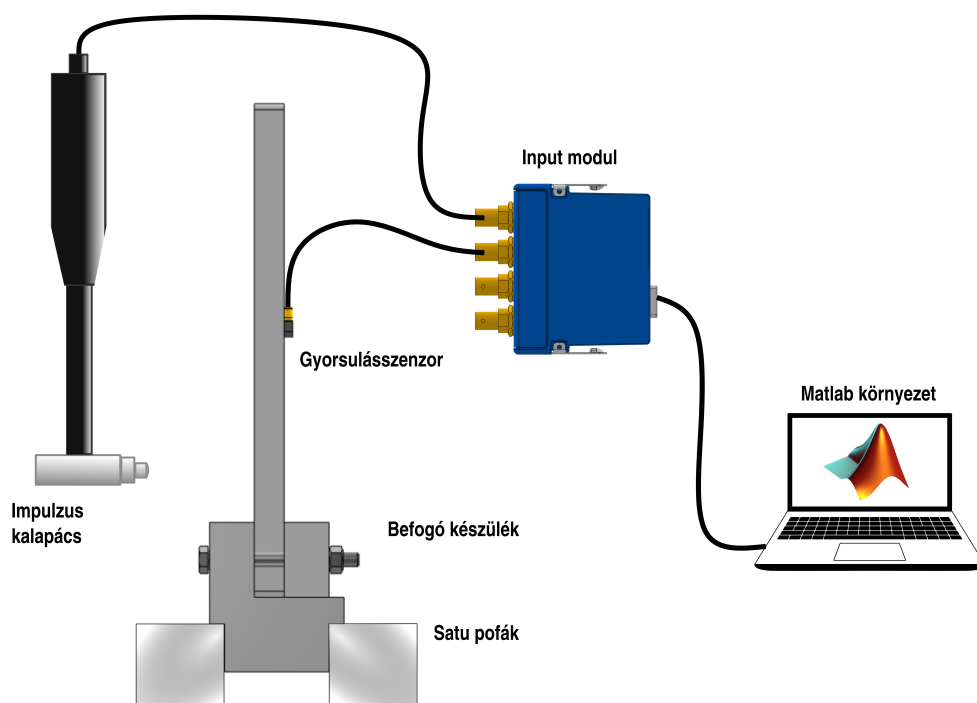
(b) Teszt darab befogása a végső mérési konfigurációban

24. ábra. Mérési konfigurációk

Ezt követően beszereztem egy Wiha nyomatékhatároló csavarhúzó, melynek segítségével meghúztam a pofákat összefogó csavarokat, ezzel biztosítva a mérések közötti azonos befogás erejét. A csavarhúzó a gyártó által 10%-os hibahatárra volt validálva. A 24b. ábrán látható gyorsulásszenzorral ellentétes oldalon ütöttem meg a darabot az impulzus kalapáccsal, majd az ütés hatására egy Matlab környezetben futtatott, Dr. Hajdú Dávid által készített adatfeldolgozó kód segítségével rögzítésre kerültek az adatok. A program az impulzus kalapács 7 Newton feletti jele esetén a 2 másodpercig rögzítette a gyorsulási adatokat. A kalapács erőmérő bélyege által mért értékeket megjelenítve, ellenőrizni tudtam azonnal, hogy az impulzus megfelelő volt-e. Túl lassú ütés esetén a kalapács feje többször is felütközött a darabon, ami a diagramon is jól látszott, ekkor megismételtem a mérést. Továbbá a lengésképet adó frekvencia válaszfüggvényt is megjelenítette helyben a program átfedésben az előző méréssel, így ellenőrizhető volt, ha a lengésképen előjelváltás történt, ami azt jelentette, hogy egy adott módus lengésképeinek pont a statikus pontján mértem. A megfelelő ütések háromszor megismételve, egy a Matlab natív kiterjesztésébe, *.mat* fájlokba mentette az adatokat.



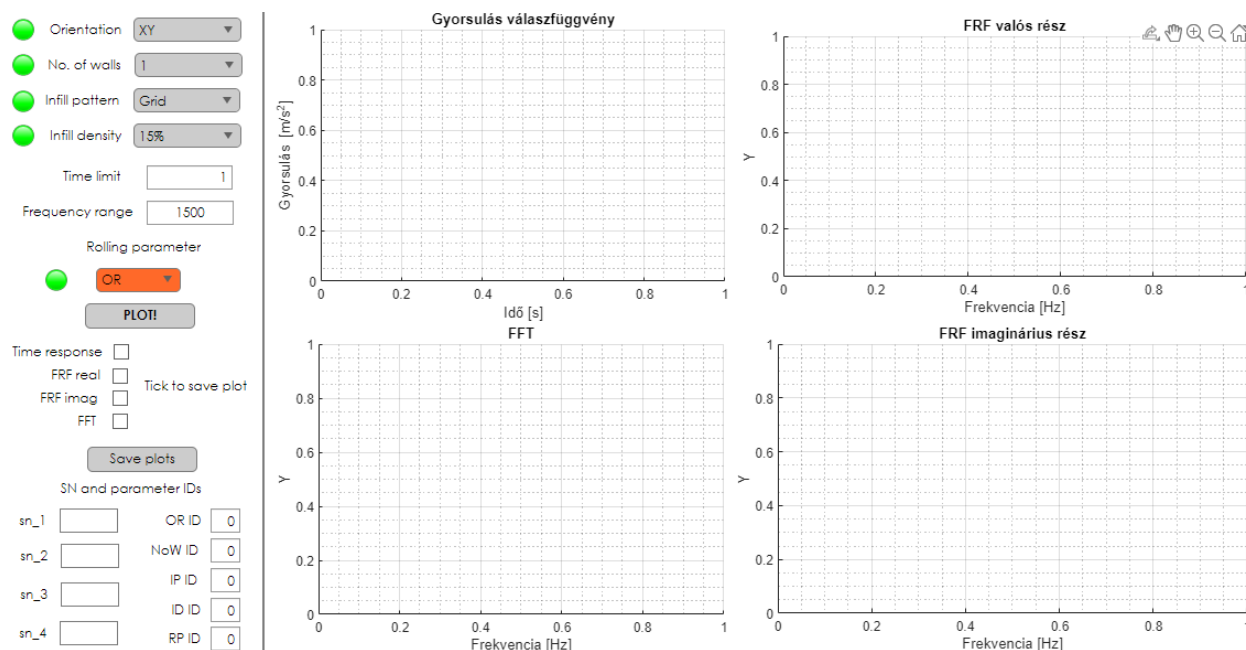
25. ábra. Az alumínium befogó szerkezet robbantott rajza



26. ábra. A mérés vázlatja

2.9. Matlab alkalmazás

A mért adatok kiértékeléséhez egy Matlab alkalmazást hoztam létre a *Matlab App Designer* moduljának felhasználásával, hogy az adatfeldolgozás gyorsabb legyen. A háttérben lefutó kód a gyorsulásszenzor adataiból (a már említett .mat fájlok) számolva elkészíti az időbeli és a frekvenciatartománybeli válaszfüggvényeket, valamint a gyors Fourier-transzformációt (Fast Fourier Transformation). A felhasználói felületen lehetőség van kiválasztani, hogy mely paraméterekkel rendelkező darabok mérési adatait szeretnénk megjeleníteni, valamint ki kell választani egy paramétert, ami a változtatott paraméter, így ennek hatása könnyebben vizsgálható, ha ezek az adatsorok közös diagramon vannak megjelenítve. Továbbá lehetőség van a diagramok skáláját limitálni, az idő függvényeknél a megjelenítendő időablak végét, a frekvenciatartománybeli diagramokon pedig a legnagyobb megjelenítendő frekvenciát van lehetőség egyedileg beállítani. Minden paraméter állító mező mellett található egy lámpa, ami zöld, ha az adatsorok beolvasása megfelelően történt. Ha a megjelenítéskor bármelyik ellenőrző lámpa pirosra vált, akkor a kimutatott diagramok nem elfogadhatók, az adatfeldolgozásnál hiba történt. A szoftverből a megfelelő mezők bejelölésével lehetőség van a diagramok mentésére a megfelelő gomb megnyomásával. Az adatok beolvasása és kimutatása után a felület bal alsó részén található egy szöveges visszajelzés, ami a megjelenített adatokhoz tartozó darabok azonosító számát és a paraméterek számait jelölik.



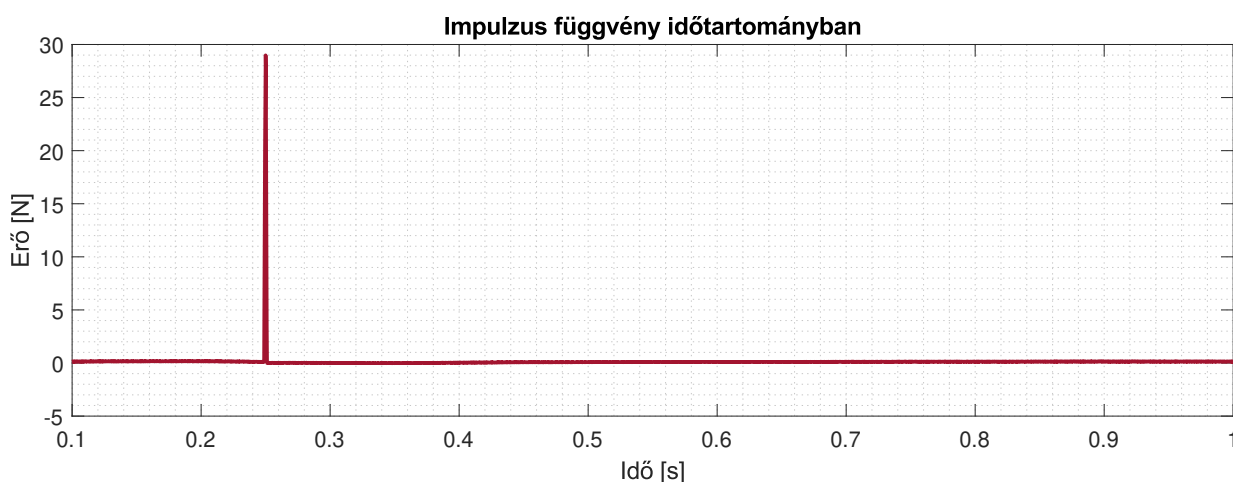
27. ábra. A saját fejlesztésű adatfeldolgozó alkalmazás grafikus felülete

3. Mérési eredmények

3.1. Adat kiértékelés

3.1.1. Impulzus függvény

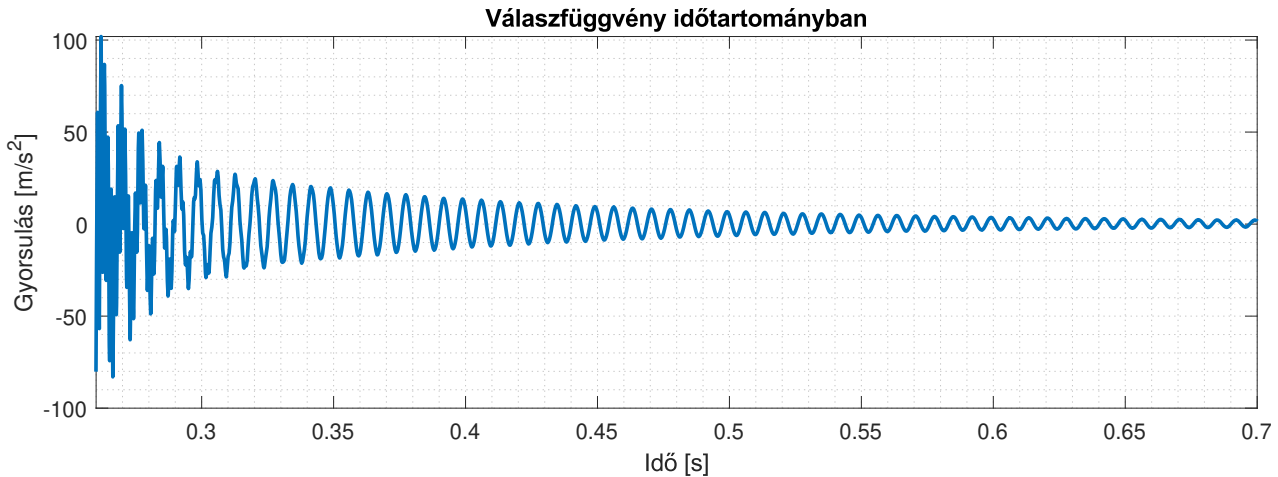
Az impulzus kalapács feje egy erőmérő bélyeg, ami egy bizonyos erő fölötti érték olvasásakor elkezdte rögzíteni a gyorsulásszenzor adatait a kijelölt időhosszig. Az impulzus előtti 0,25 másodperc is rögzítésre került, hogy az adatok feldolgozásakor a felfutó éleket jól fel lehessen venni. (28. ábra)



28. ábra. A kalapácson mért impulzus függvénye

3.1.2. Időválasz függvény

Az alkalmazásból kinyert adatok alapján az első és a második módusok frekvenciái lettek összehasonlítva, mivel magasabb frekvenciáknál a jel túlságosan zajos volt. A beolvasott adatfájlok az időbeni válaszfüggvényt, valamint a frekvencia válaszfüggvényt tartalmazzák. Az impulzus kalapáccsal adott kis idejű gerjesztéssel a frekvencia tartományon egyenlő erősségű, de a teljes sávzélességre ható gerjesztés érhető el. Tehát egy nagyon rövid impulzus gerjesztéssel egyszerre van lehetőség gerjeszteni egy széles frekvencia tartományban, amivel a rezonancia frekvenciák megmutatkoznak. Az időbeni válaszfüggvény a rezgés lecsengését és erősségét adja meg. (29. ábra)



29. ábra. Időtartománybeli válaszfüggvény

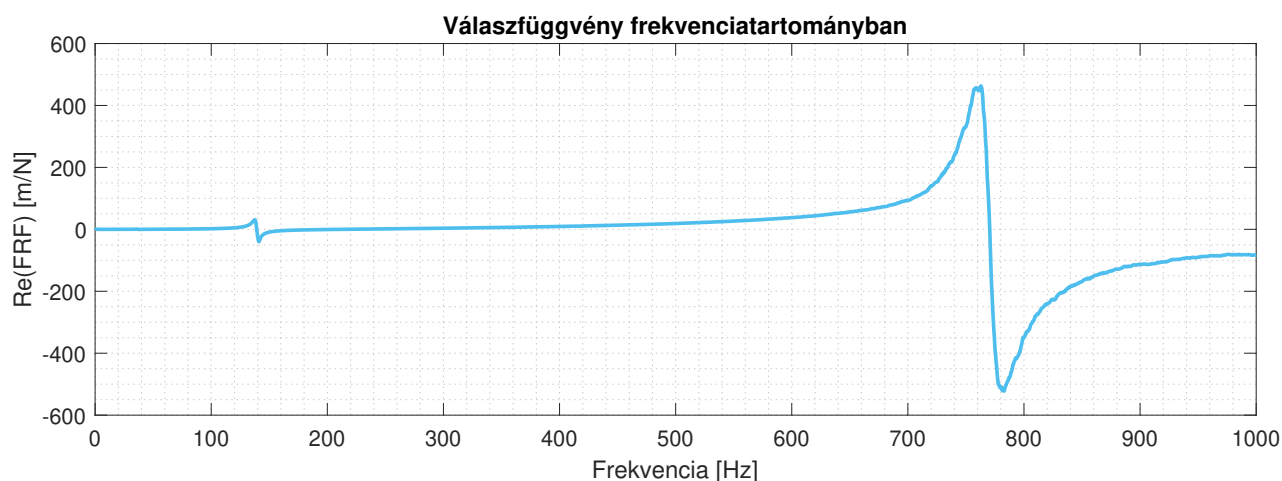
3.1.3. Frekvencia-válasz függvény

A frekvencia-válasz függvény (Frequency Response Function, röviden FRF) egy rendszer reakciója az időben változó bemenetre, kifejezve a rendszer válaszát a különböző frekvenciákon. Ez a függvény a rendszer jellemzőiről és viselkedéséről ad információt különböző frekvenciákon. A függvény kifejezi a rendszer amplitúdó- és fázisváltozását különböző bemenő frekvenciákon. Az amplitúdó érték a valós értékből, a fáziseltolódást pedig a komplex érték adja meg.

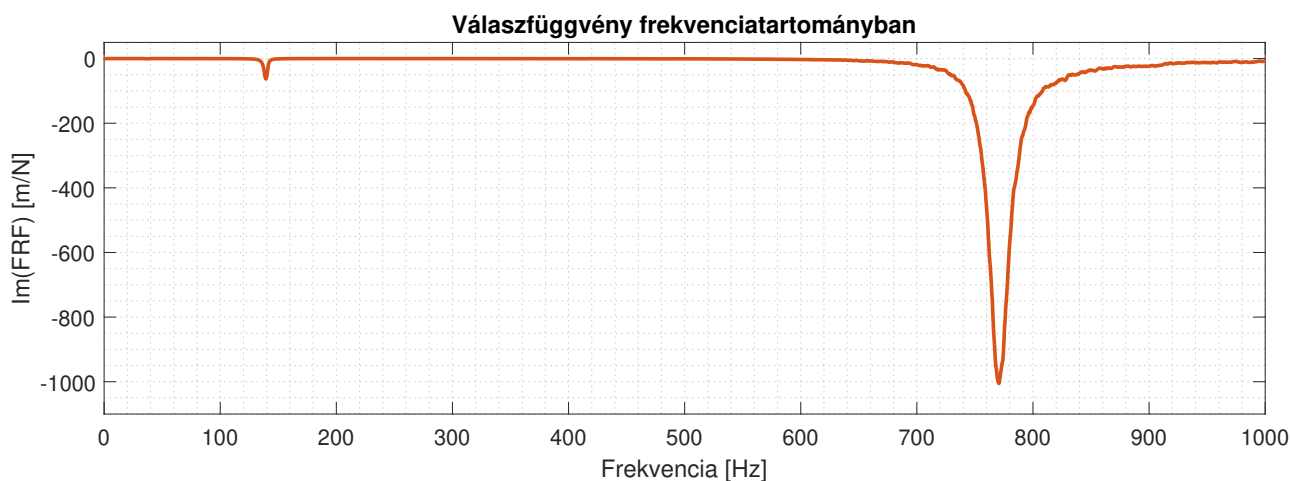
$$H(s) = H(j\omega) = \frac{|X(\omega)|}{|F(\omega)|} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-r)^2 + (\zeta r)^2}} \quad (1)$$

ahol: $r = \frac{f}{f_n} = \frac{\omega}{\omega_n}$, $X(\omega)$ az amplitúdó függvénye, $F(\omega)$ a terhelés függvénye, k a merevségi tényező és r a gerjesztés frekvenciájának és a csillapítás nélküli egytömegű lengőrendszer saját-frekvenciájának hányadosa. ζ pedig a csillapítási viszony.

Az FRF függvények képzetes és imaginárius részeit külön diagramokon ábrázoljuk. A valós részt ábrázoló diagram a 30. ábrán, a képzetes részt tartalmazó pedig a 31. ábrán látható. A két görbét összehasonlítva az azonos frekvencia skálán, észrevehető, hogy amikor a valós rész nulla értéket vesz fel, akkor a képzetes rész egy lokális maximumot alkot, hiszen ilyenkor az FRF értéke tisztán képzetes. Ezek a pontok a rezonancia frekvenciát jelölik, amikre, ha alkalmazzuk a 3 decibeles módszert, a módus csillapítási tulajdonságait is feltérképezhetjük. Több FRF függvény egymáshoz képesti összehasonlításával (ehhez szükséges több ponton is mérni a darabon) az egymáshoz képesti fáziseltolódásokkal kivehető a lengéskép is.



30. ábra. Frekvenciatartománybeli válaszfüggvény valós része



31. ábra. Frekvenciatartománybeli válaszfüggvény imaginárius része

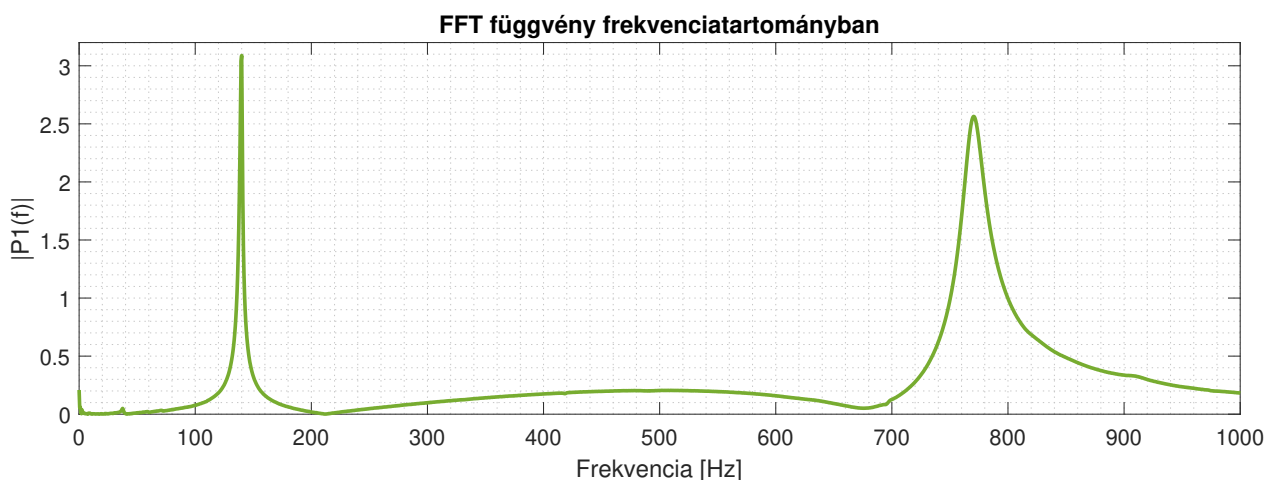
3.1.4. Gyors-Fourier transzformáció függvény

A Fourier-sor kiterjesztése lehetővé teszi, hogy bármelyik frekvencia vagy időtartománybeli függvényt leírjunk frekvenciatartományon. A Fourier integrál segítségével a nem periodikus függvények is jellemezhetők frekvencia tartományban. Az FFT ábrákról pedig a sajátfrekvenciák értékei olvashatóak le, melyek a lokális maximum értékek. (32. ábra) Ezek az értékek kerültek összehasonlításra a későbbi vizsgálatoknál. Jól ismert tény, hogy ha a gerjesztés frekvenciája megegyezik a rendszer sajátfrekvenciájával, rezonancia következik be. A rezonancia következménye a nagy elmozdulás a darabon. Ezek a nagy elmozdulások a legtöbb mechanikai és szerkezeti rendszerben nem kívánatosan nagy feszültségeket okoznak, amelyek a darab meghibásodásához, töréséhez vagy korai kifáradásához vezetnek. Ezért bármilyen rendszer esetén a rezonancia feltételeket kerülni kell. Sok esetben nem lehet kontrollálni, mert a rendszer vagy gép funkcionális követelményei írják elő, ekkor minél hamarabb át kell haladni a rezonancia tartományon. Azon-

ban a rendszer sajátfrekvenciáinak ismerete szükséges ehhez. [30] A frekvenciák elhangolására van lehetőség a geometria, anyag vagy éppen a rögzítés módjának megváltoztatásával. A szeleto-lő programban adott geometria változtatás lehetőségei és azok hatása lett vizsgálva a bemutatott mérésekkel.

$$F(M) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cdot e^{(-2j\pi Mn/N)} \quad (2)$$

ahol: $M=0,1 \dots, N-1$ az $f(n)$ időtartalmú jel M frekvencia komponense, N a diszkrét jel hossza (mintavételezési pontok száma), f az n időpillanatban felvett jel értéke.



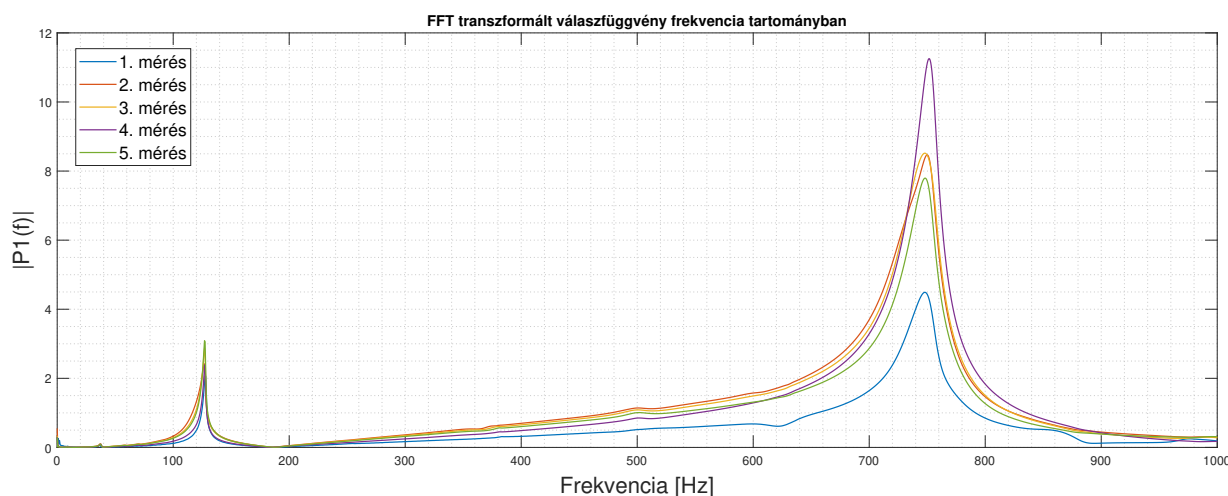
32. ábra. Frekvenciatartománybeli FFT függvény

3.2. Az eredmények ismételhetősége

Minden próbadarabot többször ismételt ütéssel és megfogással mértem. Minden befogáshoz 3 kapács ütés, darabonként pedig ötször vettem ki és fogtam be a darabot és húztam nyomatékra a csavarokat. A kapott frekvencia értékek ezen ismételt mérések átlaga, melyet az 3. táblázat tartalmaz. A 33. ábrán egy darabon készült mérésekből kapott FFT görbék láthatóak a közös diagramon. Látható, hogy a szórás elfogadhatóan kicsi.

3. táblázat. Egy darabon (1212) vett többszöri mérés eredményei

1212	Első sajátfrekvencia	Második sajátfrekvencia
1.mérés	127 Hz	751.5 Hz
2. mérés	127 Hz	748 Hz
3. mérés	127.5 Hz	750 Hz
4. mérés	127 Hz	748 Hz
5. mérés	127.5 Hz	748 Hz
Szórás (σ)	0.2449	1.4282



33. ábra. Frekvenciatartománybeli FFT függvény

Az értékek szórása nem jelentős, így joggal állítható, hogy a mérési konfigurációból sikerült a nagy mérési hibákat eliminálni. A kapott értékek így összehasonlíthatóak az elméleti számolással. Az elméleti számoláshoz a következő sajátkörfrekvencia képlet használható:

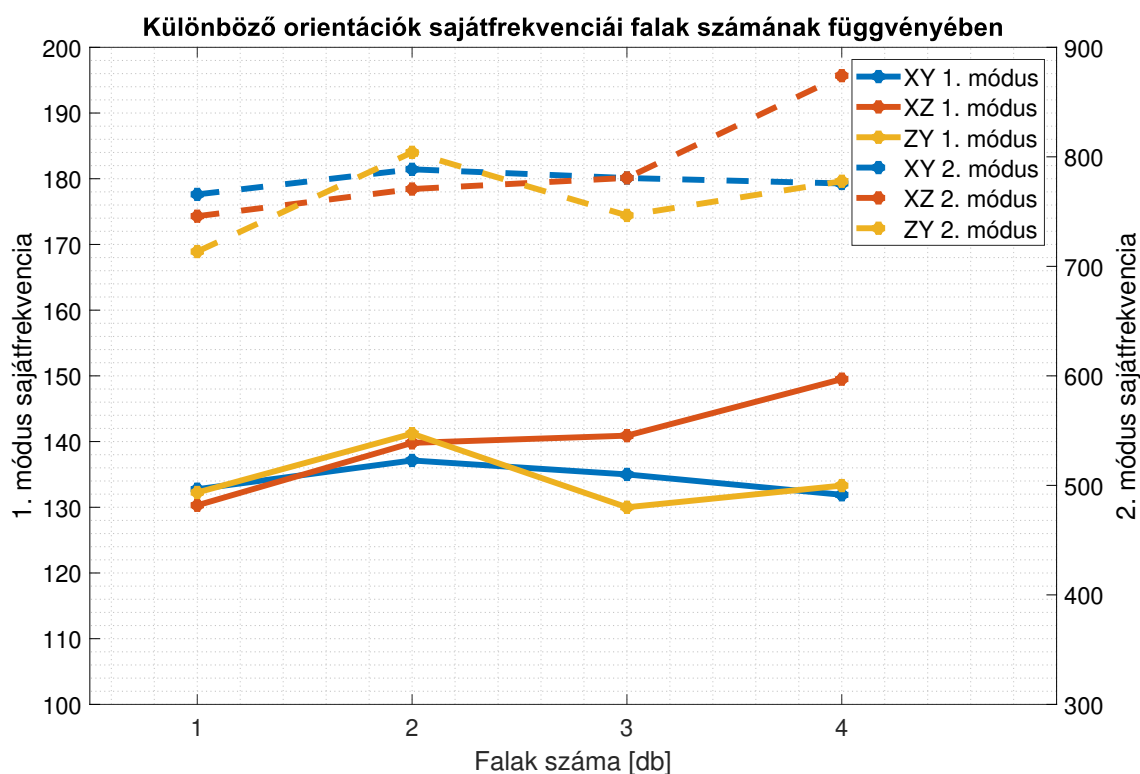
$$\omega_n = A_n \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{IE}{A\rho}} \quad (3)$$

ahol: E a Young modulus, I a tengely keresztmetszetének másodrendű nyomatéka, l a tengely hossza, ρ a sűrűség. Az A_n paraméter a befogatás függvénye, A pedig a keresztmetszet területe. [31] Az elméleti számolás esetében az inerciát és a területet a már bemutatott átlag értékekkel van lehetőség számolni, mivel a képlet állandó keresztmetszetű rúdhoz használható. A mért és elméleti úton számolt eredmények között nagy eltérések tapasztalhatóak, ami azt jelenti, hogy a próba darabok bonyolult geometriáját nem tudja lekövetni (a keresztmetszetek értékeinek átlagolása nem elég), valamint a mérési eredmények még tartalmazhatnak valamilyen hibát, amit nem vettünk számításba. Tehát az analitikus módszerek csak a hatásokat, de nem a pontos értékeket adják eredményül, mert a komplex geometriákat már nem tudják kezelni. [29]

3.3. Falak számának változása

A falak számának változásával változik a keresztmetszet területe és az inercia értéke is. Mivel a külső faltól kezdve az újonnan hozzáadott falak kisebb kerületűek, a keresztmetszetek területének növekedése fokozatosan csökken, így a nagyobb falszámnál nem várható el azonos mértékű változás. Mivel a kiválasztott és legyártott darabokkal csak a különböző orientációkkal lehet összehasonlítani, az adatsor nagyobb szórást mutat azok erősebb hatása miatt, ahogy növeljük a falak számát. A növekedés területben és így tömegben is minimális a teljes keresztmetszet mé-

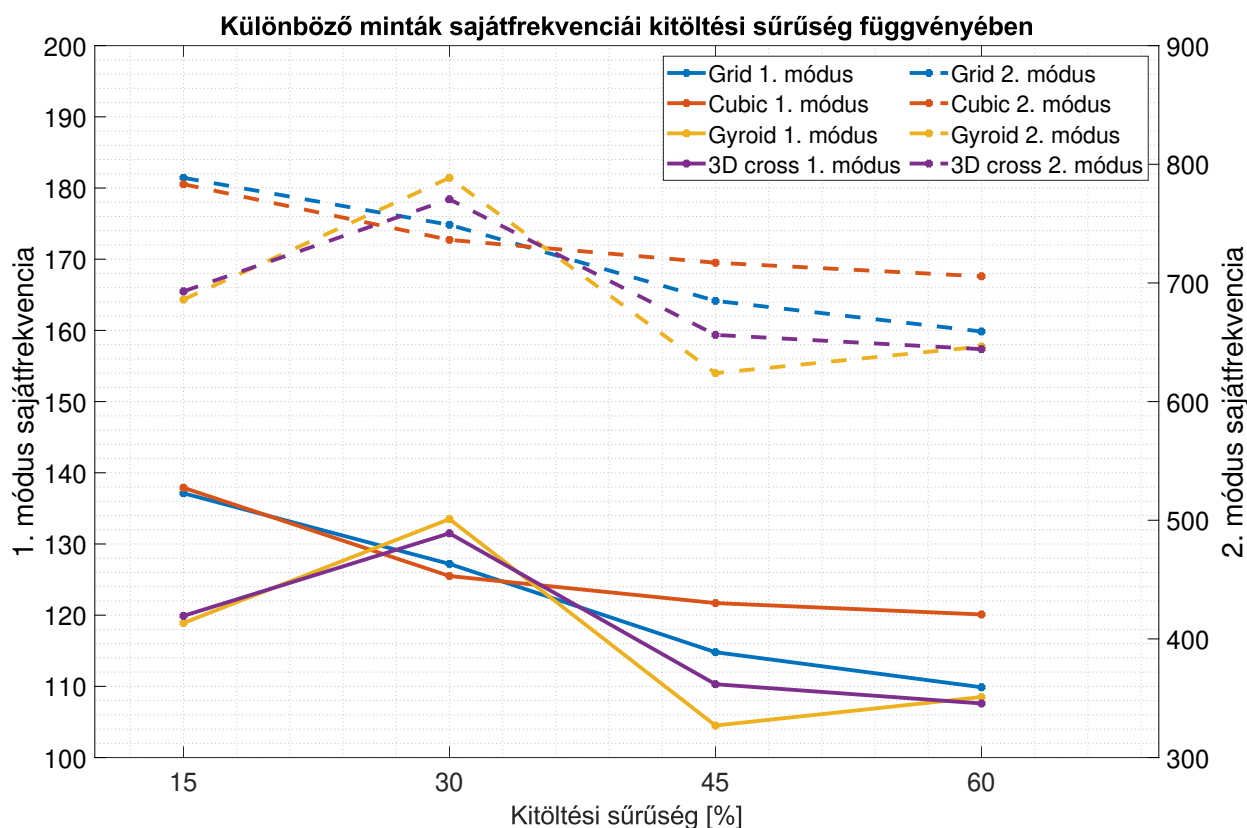
retéhez képest, ezért ennek a paraméternek a dinamikai hatásait más paraméter csoporttal kell vizsgálni. Ideális lenne teljesen üreges darabokat nyomtatni, amikkel az elméleti számítás is egyszerűsödne, de figyelembe kell vennünk a paraméterek egymásra való hatásait is. Az üreges darabok tekintetében a gyártás is problémát jelent, mivel a darab geometriájának felső vízszintes rétegei alátámasztást igényelnének. Ha a nincs belső kitöltés vagy támasz a rétegek alatt, akkor az első néhány felső burkoló réteg szála hasasodna, belógna. Ez a keresztmetszetet is változtatja, valamint a rétegek közötti és rétegen belüli adhéziót is rontja.



34. ábra. Sajátfrekvenciák változása különböző falszámoknál, orientációnként

3.4. Kitöltési sűrűség változása

Ha mintánként figyeljük meg a sűrűség változásának hatásait a sajátfrekvenciákon, akkor mintánként különböző jellegeket kapunk. Fontos megjegyezni, hogy semmilyen más paraméter nem változik az összehasonlításban, csak a kitöltés sűrűsége. A Grid kitöltés esetén a sűrűség növelésével az első és második sajátfrekvencia is monoton csökken. Ez éppen szembe megy azzal a felfogással, hogy a nyomtatott darab kitöltésének sűrítésével a merevség növekedik. Nagyobb merevség esetén nagyobb sajátfrekvenciákat kellene kapni, viszont a mérések nem ezt igazolják. A Cubic kitöltés esetén is hasonló jelleg fedezhető fel, csak más erősségű változással. Csökkennek a sajátfrekvenciák, de kisebb mértékben, mint a Grid esetében. Tovább vizsgálva a diagramot, a Gyroid kitöltés viselkedése merőben eltér az eddigi kettő mintától. 30%-os sűrűségnél növekedik, majd további sűrítés hatására ezek a frekvenciák erősen visszaesnek. Még további sűrítés hatására pedig minimális növekedés tapasztalható. Ez a fluktuáló jelleg további figyelmet érdemel, de előtte nézzük a 3D cross viselkedését. Itt is látható a növekedés, majd az erős visszaesés a frekvenciák értékeinél, viszont itt kisebb mértékben csökken a görbe, mint a Gyroid esetében. A legnagyobb mért sűrűségnél pedig hasonló értéket vesz fel, mint a Grid és Gyroid minták.

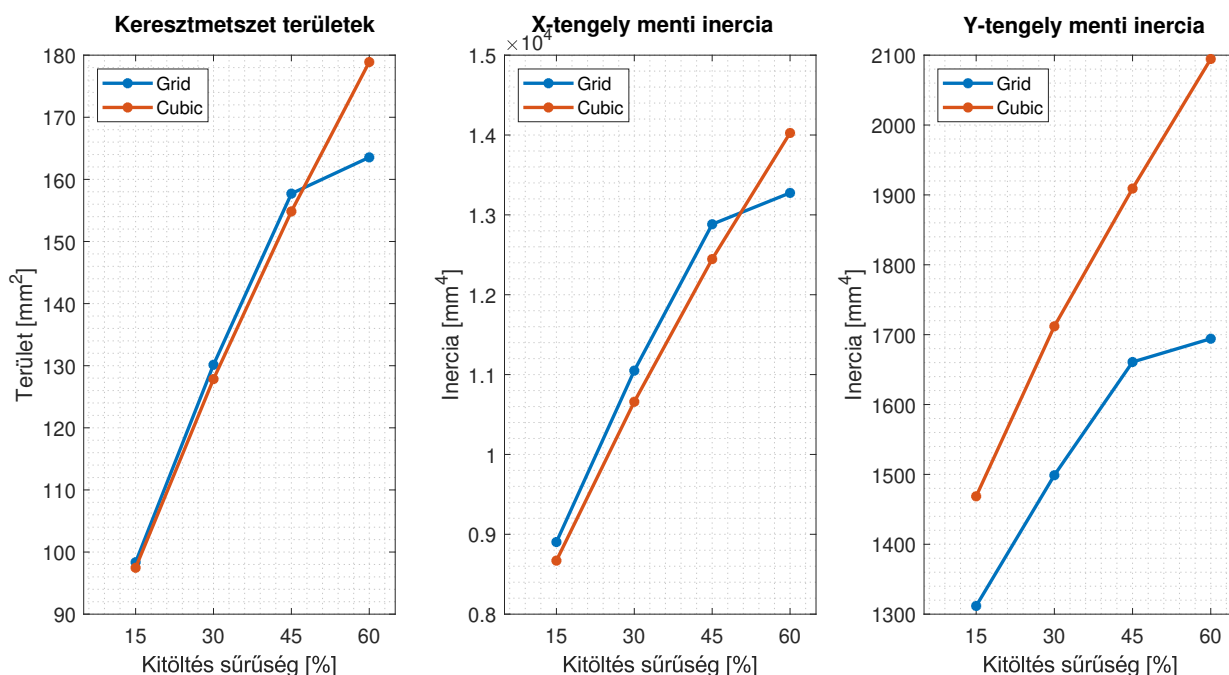


35. ábra. Sajátfrekvenciák változása különböző kitöltési sűrűségeknél, mintánként

A viselkedéshez való magyarázat megtalálásához először végig kell gondolni, hogy a sűrűség változásával pontosan milyen értékek változnak a darabokon. Ahogyan a 36. ábrán látható, a sűrűség növelésével a keresztmetszetek területeinek méretei és inerciái növekednek eleinte nagy mértékben, majd a magasabb százaléku kitöltések felé haladva ez a mérték lecsökken.

4. táblázat. Vizsgált keresztmetszeti paraméterek 3D modellről vett értékei különböző kitöltési minták és sűrűségek esetén

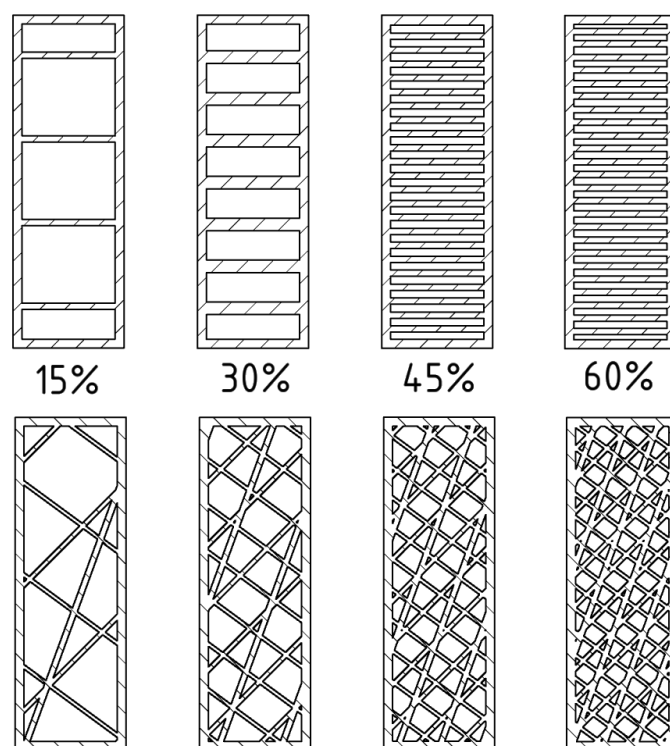
Minta [-]	Kitöltési sűrűség [%]	A [mm ²]	I_X [mm ⁴]	I_Y [mm ⁴]
Grid	15	98.35	8903.16	1311.74
Grid	30	130.15	11049.4	1498.82
Grid	45	157.70	12882.78	1660.87
Grid	60	163.54	13275.01	1694.17
Cubic	15	97.468	8670.46	1468.68
Cubic	30	127.84	10659.59	1711.94
Cubic	45	154.84	12446.50	1909.08
Cubic	60	178.89	14025.66	2094.50



36. ábra. A keresztmetszeteken vizsgált paraméterek változása a sűrűség függvényében a 4. táblázat adatai alapján

A (3)-as összefüggést megfigyelve látható, hogy a sajátfrekvenciára nagy hatással van a gyök alatti tört számlálója és nevezője. A számláló a keresztmetszeti merevség tulajdonságot adja, míg a nevező a keresztmetszet tömeg tényezőjét adja meg. A 35. ábrán tapasztalt frekvencia csökkenés egyik oka, a sűrűséggel járó tömegnövekedés lehet. Bár azzal a céllal sűrítjük a mintát, hogy nagyobb merevséget tudjunk elérni, az ebből adódó tömegnövekedés miatt a lengések is nagyobbak

lesznek, ezért nem merevebb, hanem pont ellentétes irányba változott a darab egyes esetekben. Ez belátható, ha a 36. ábrán megfigyeljük, hogy azonos mértékű sűrűség növeléssel a terület és az inerciák milyen mértékben növekednek. Jól látszik, hogy grid kitöltésnél a pontok közti mereedség csökken, tehát egységnyi sűrűség növeléssel, kisebb mértékben nőnek a keresztmetszeti paraméterek (hasonlóan ami a falak számának növekedésénél tapasztalható). Számszerűen összehasonlítva, a grid minta 15%-os kitöltésétől kezdve, 15%-os lépcsőkben az előző keresztmetszethez képest a terület 32%, 21,17% és végül 3,7% növekedés mutat. Ugyanezekben a lépcsőkben az inerciák (I_y) növekedése az előző keresztmetszetek értékeihez képest 14,26%, 10,81% és 2%. Visszatérve a 3-as képlet törtjéhez, már belátható, hogy egységnyi sűrűség növelésével a gyök alatti rész csökkenő értéket ad, így a frekvencia is kisebb lesz. A cubic kitöltés esetén más tendencia mutatkozik. A kitöltési sűrűség növelése közel lineáris módon növeli a keresztmetszetek területeit és az inerciáit. Az y-tengely menti inerciáknál jóval magasabb értéket vesz fel a cubic, mint a grid esetén. A két összehasonlított görbe 45 és 60%-nál már erősen távolodik egymástól. Visszatérve a 35. ábrán látottakra, 45 és 60%-os kitöltésnél a grid és a cubic mért frekvencia értékei is a 36. ábrán szereplő görbékhez hasonló eltérést mutatnak. A cubic minta a magasabb inercia értékei miatt, a tömegnövekedés is kisebb pusztán a minta geometriájából adódóan, hiszen a 3-as egyenlet tört értéke nem csökken olyan drasztikusan. Tehát a mérési adatok tendenciája megegyezik az elméleti keresztmetszetek alapján vett értékek tendenciájával.

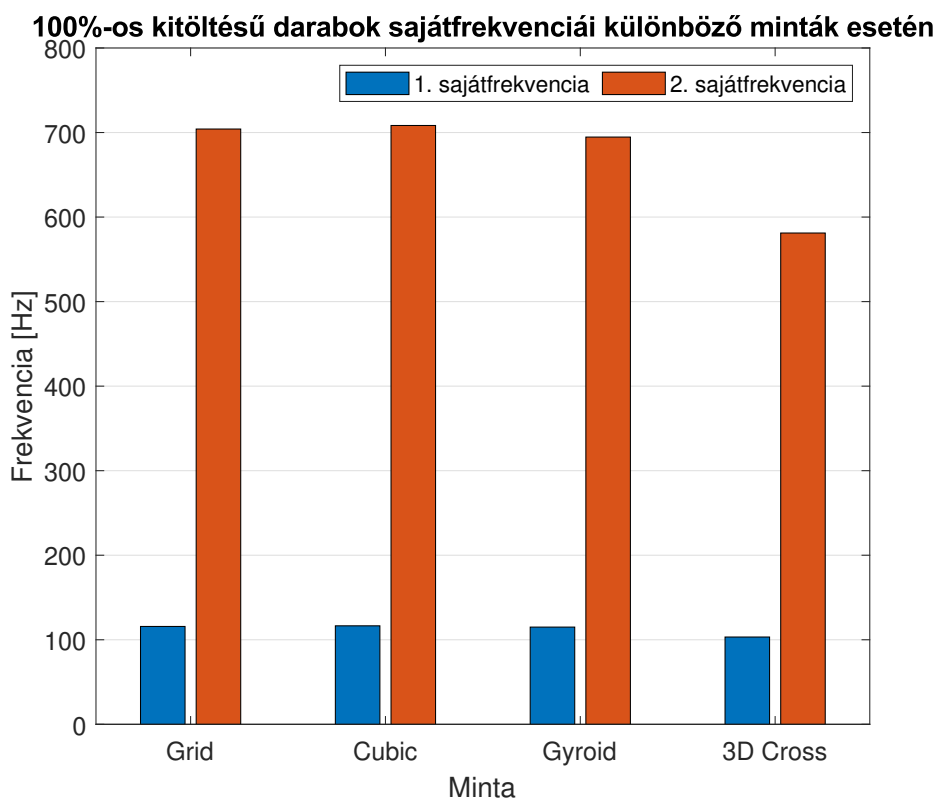


37. ábra. Elméleti keresztmetszetek alakulás sűrűség függvényében

A 35. ábrát megfigyelve felmerült az a sejtés, hogy 100%-os kitöltés esetén a légrések annyira kicsik, hogy szinte tömör keresztmetszeteket kapunk. Ha feltételezzük, hogy minden minta esetén tömör a keresztmetszet, akkor a kapott sajátfrekvenciáknak is közel azonosnak kell lenniük. Mivel a minta még mindig jelen van a darabban, így egyes daraboknál a gerjesztésre adott válasz más lehet a hullámterjedés miatt. Ezt megvizsgálva további négy próbadarabot gyártottam, amik a vizsgált mintákat tartalmazták 100%-os sűrűséggel. A mérések eredményei igazolták a felvetést, a frekvenciák értékei minimális értékben tértek el, természetesen a második módus frekvenciái jobban szórtak (5. táblázat). A 3D Cross minta esetén nagyobb eltérések észlelhetők, jóval kisebb értékeket mutatott a minta. Ennek oka lehet a minta és a gerjesztés iránya közötti orientáció, de ennek megerősítése további méréseket igényel.

5. táblázat. 100%-os sűrűségű darabok mérési eredményei

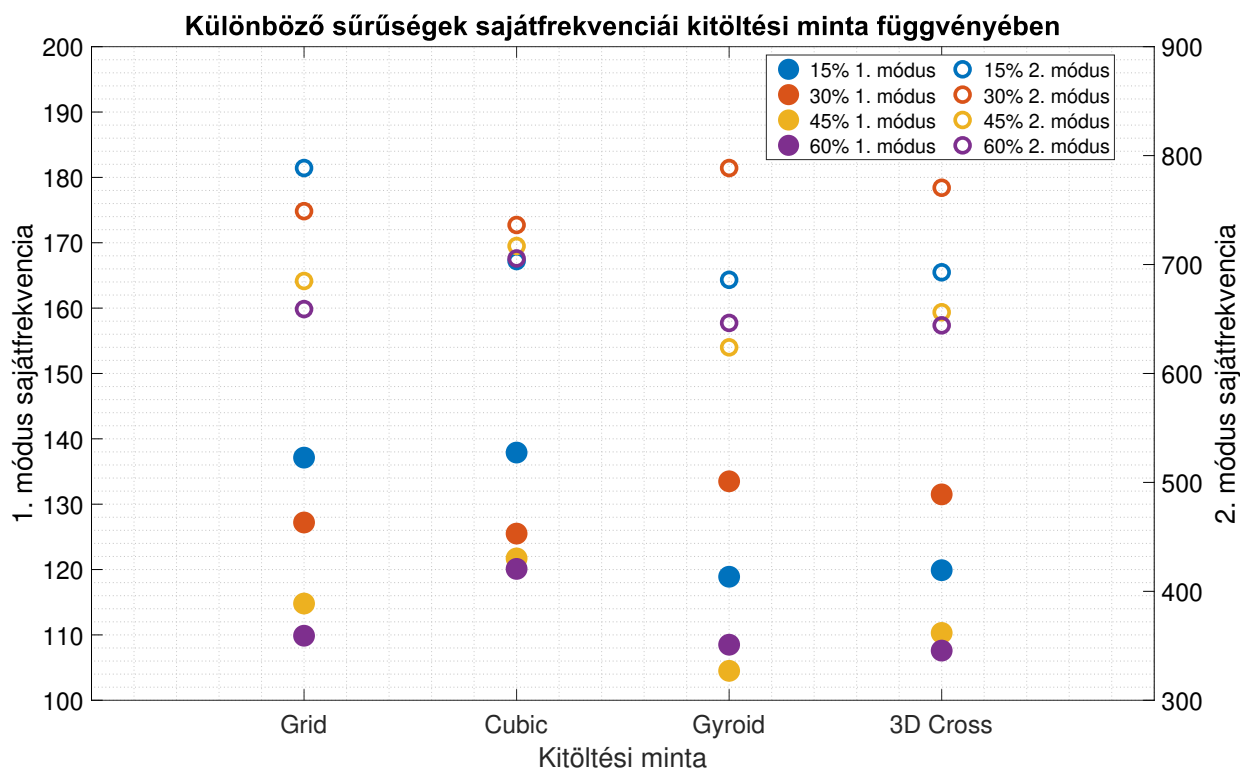
Minta Módus	Grid		Cubic		Gyroid		3D Cross	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Frekvencia [Hz]	115.75	704.13	116.50	708.33	115.00	694.63	103.25	581.13
Szórás (σ)	0.29	2.21	0.00	0.76	0.00	0.75	0.29	7.13



38. ábra. Teljes kitöltési sűrűség esetén mért sajátfrekvenciák kitöltési minták függvényében

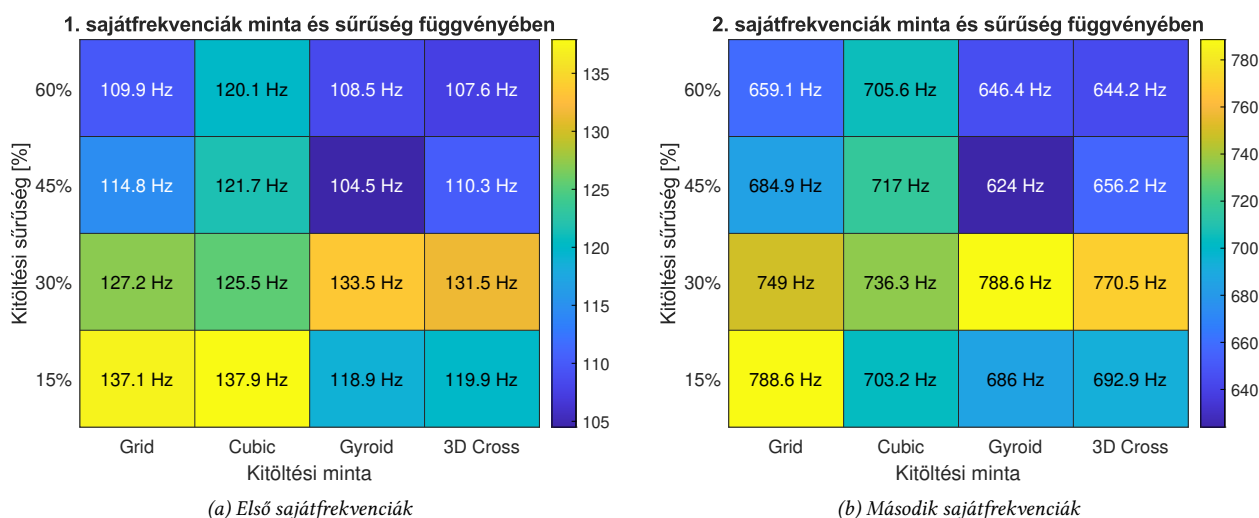
3.5. Kitöltési minta változása

A minták közötti különbségeket úgy lehet legjobban összehasonlítani, ha minden más paramétere azonos a daraboknak. Ahhoz, hogy teljesebb képet kapjunk, több kitöltési sűrűségű, de azonos darabokat hasonlítunk össze. Látható, hogy a 35. ábrához hasonló jelleget kapunk, ami a kitöltési sűrűség hatását is jelentheti erre a paraméterre. Ahogyan a sűrűség hatással van a frekvenciákra, ezen az ábrán az egy mintán belüli értékek szórásában jelenik meg. Tehát amelyik minta esetében a sűrűség a legnagyobb értékben változtatott akármelyik irányban a sajátfrekvenciákon, annak a 39. ábrán nagyobb szórás tapasztalható mintánként, vagyis adott minta esetén az adatpontok távolabb helyezkednek el egymástól y-tengely mentén. A 35. ábrán látottakat adja vissza a 39. ábra is, viszont az utóbbinál jobban leolvasható, hogy mintánként milyen kitöltési sűrűségek, ezzel pedig milyen tömeg viszonyok mellett tud a minta nagyobb merevséget adni a darabnak.



39. ábra. Sajátfrekvenciák változása különböző kitöltési mintáknál, sűrűségként

A minta és sűrűség közvetlen összehasonlítása a 40. ábrán látható. Az ábra jól visszaadja, hogy mely minták esetén változnak a frekvenciák monoton módon a sűrűség növelésével és melyek viselkednek ettől eltérő módon valamilyen fluktuációval. A mért esetek között a Gyroid minta 45%-os kitöltéssel adja a legkisebb frekvenciákat mindkét vizsgált módusban. Legnagyobb értéket módusonként a Grid minta adott a legkisebb vizsgált kitöltési sűrűségnél, mert itt nincsenek nagy tömegek, de a keresztmetszetek formájából adódan az inerciák aránylag magasak.

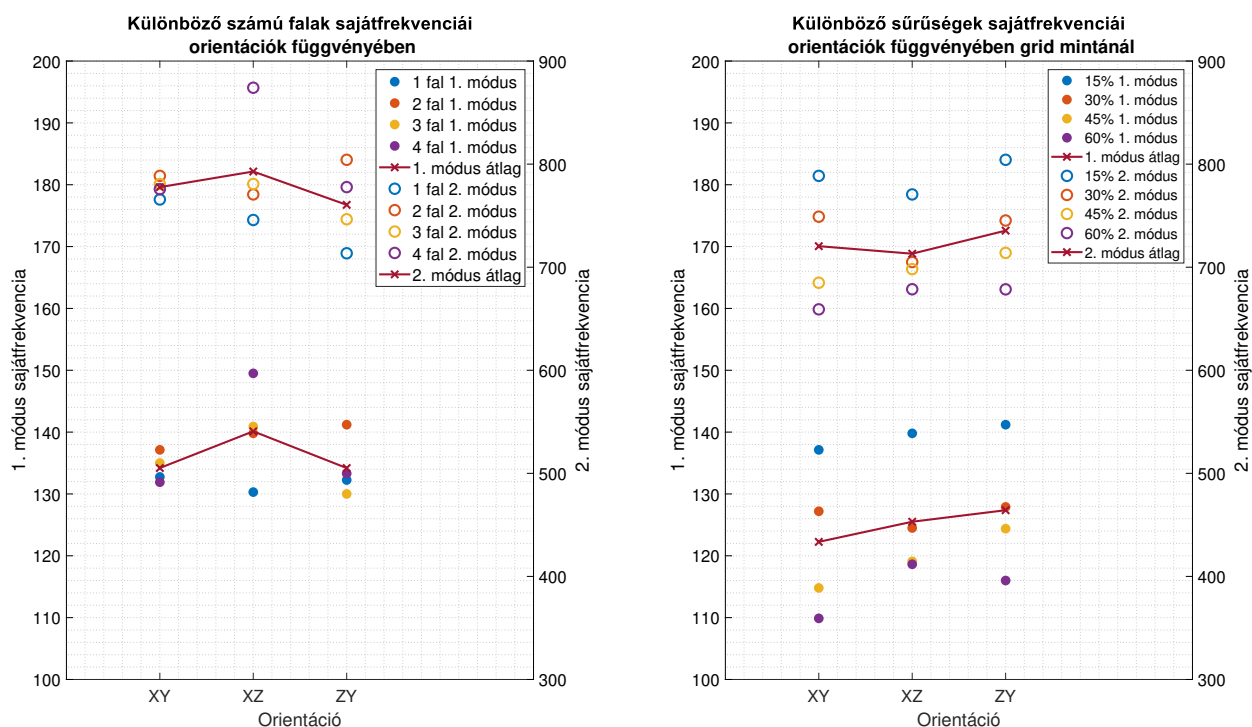


40. ábra. A kitöltési minta és sűrűség közötti tendenciák

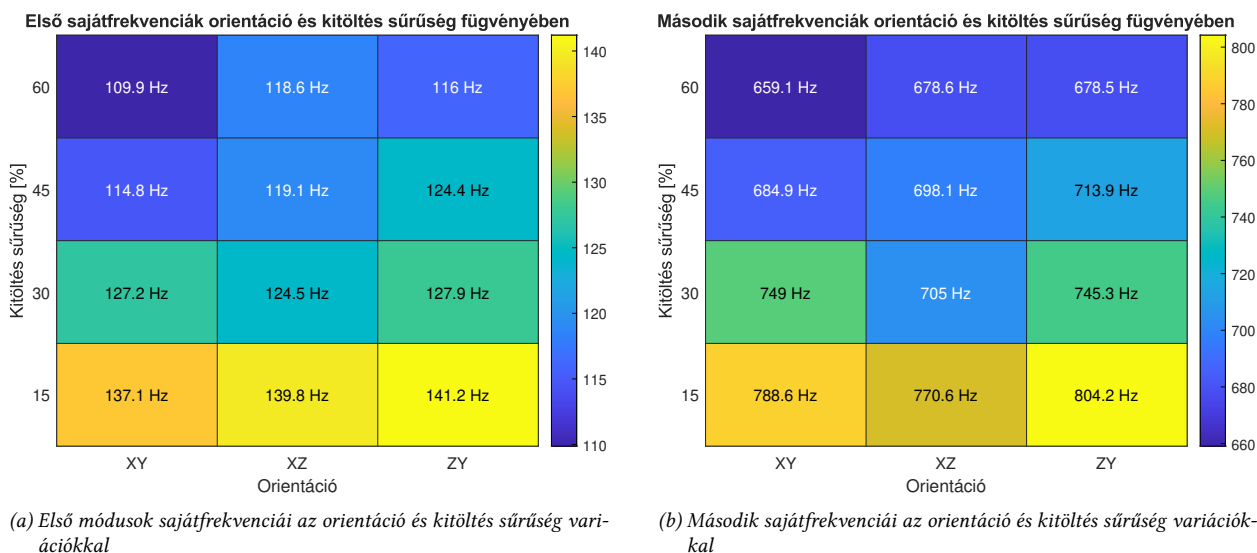
3.6. Orientáció változása

Az orientáció első sorban a rétegek elhelyezkedésével a szilárdságra hat, de a hullámterjedésre is hatással van. A 41. bal ábrán jól látható, hogy a egy orientáción belül a falak számának növekedésével magasabb frekvenciák érhetőek el, ami a merevség növekedését jelenti. Az orientációk között viszont ezek az értékek nagy tartományokban helyezkednek el. A fektetett orientációnál (XY) a frekvencia értékek szórása a legkisebb és átlagban a felállított (ZY) orientációhoz hasonló értéket vesz fel (134,19 Hz és 134,18 Hz) első módusban. Második módusnál már nagyobb a különbség az említett két orientáció átlagai között (777,6 Hz és 760,47 Hz). Kiugró értéket az élére állított orientáció mutatott, melynek átlaga 140,1 Hz az első és 792,8 Hz második módusban.

A 41. jobb ábrán a kitöltés sűrűség növekedése orientációnként kisebb frekvenciákat eredményez, ahogy ez a 35. ábrán is látható volt. Ismételten az átlagokat véve orientációkon belül, első módusban a fektetett (XY) orientáció adja a legkisebb merevséget, majd utána az élére fektetett (XZ) és az állított (ZY) orientációk adnak egyre nagyobb frekvenciákat. Mivel az itt feltüntetett értékekhez tartozó darabok között nem változik a kitöltési minta és a falak száma, csak a sűrűség hathat a tendenciára, de látszik, hogy csak kis mértékben. Tulajdonképpen ez az ábra a Grid kitöltés különböző irányú merevségeit adja meg különböző kitöltéseknél. Sajnos idő hiányában már nincs lehetőség kibővíteni a variáció mátrixot további darabok gyártásával, de jó irányt ad a további vizsgálatok irányához. Ilyen tekintetben további vizsgálatot igényel a kitöltési minta hatása a különböző orientációk esetében, mivel így a 36. és 39. ábrákon látottakhoz adhatna kiegészítést.

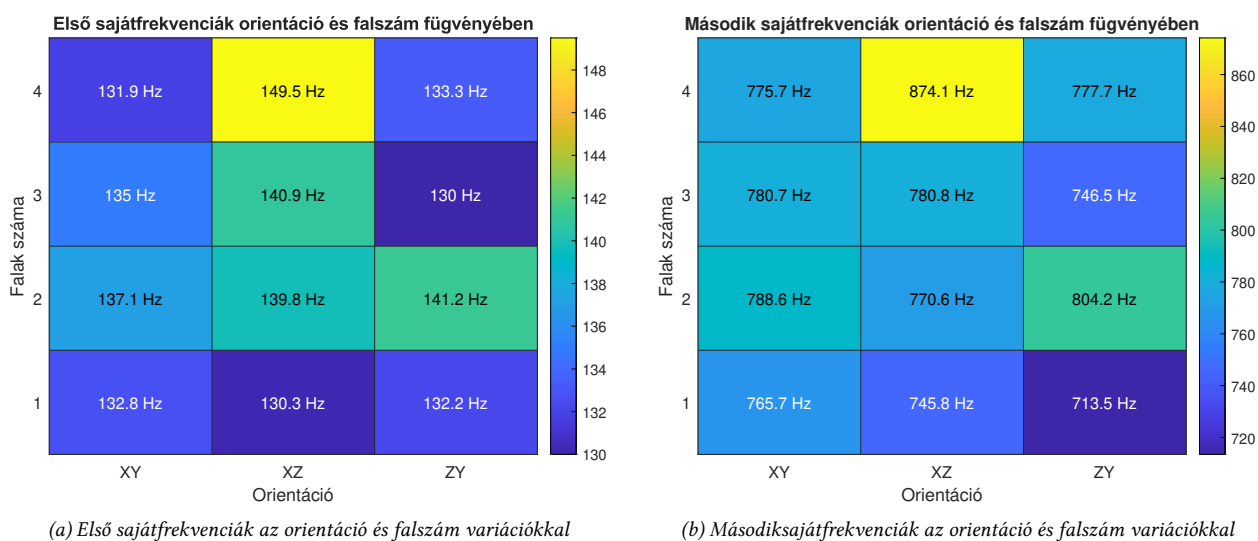


41. ábra. Sajátfrekvenciák változása különböző orientációknál



42. ábra. Az orientáció és kitöltési sűrűség közötti tendenciák

A 42. ábrán az orientáció és kitöltési sűrűség került közvetlen összehasonlításra. Jól látható, hogy orientációnként a sűrűség növekedése monoton csökken, mivel a minta minden esetben grid (lásd.: 11. ábra).



43. ábra. Az orientáció és falszám közötti tendenciák

A 43. ábrán a mért variációknak köszönhetően az orientáció és a falak száma is összehasonlítható. Ez esetben leolvasható a variáció mátrixról is, hogy fix kitöltési sűrűség (15%) és minta (grid) van jelen mindegyik darabnál amit a 43. ábra tartalmaz. Észrevehető, hogy a falak számának hatása nagyban függ az orientációtól is, hiszen a szálak kontakt felületének mértékét jelentősen befolyásolja az orientáció. Állított (ZY) orientáció esetén arányosan nagyobb a rétegek közötti kontakt, mint a rétegen belüli, így felmerül, hogy bizonyos geometriák esetén, hogy a rétegek közötti adhéziót elősegítő beállításokra érdemes beállítani a nyomtatást. Ha erre nincs lehetőség, akkor az orientáció változtatása a járható út.

4. Összegzés

A 3D nyomtatott darabok paramétereinek egy kis szegmensét vizsgálva tettem próbálkozást azok hatásainak feltárására. A kiválasztás megfontolt módon, a gyakorlatban legtöbbször változtatott paraméterekre esett. Az így létrejött összes variáció gyártása és mérése túl sok időt vett volna igénybe, így ezeknek csak egy része került be a dolgozatba. Az eredmények bizakodásra adnak okot és a további variációk vizsgálatával jobb képet kaphatunk a paraméterek viselkedéseiről és összefüggéseiről. Ezek feltárása rendkívül fontos az ipari gyártás és fejlesztés számára, mivel egyértelműen nem áll elegendő adat rendelkezésre. A megtervezett kísérleti módszerrel sikerült elérni, hogy a mérések ismételtetősége megfelelő legyen és a mérési hibák is megfelelően kiküszöbölésre kerültek. A vizsgálatból sok konklúzió levonható. Legfontosabb konklúzió, hogy minden egyes variáció mérése szükséges, ha a különböző jellegeket fel szeretnénk ismerni. Ez érthető, hiszen több mérési adat több információt hordoz és segíthet a már eddig is összegyűjtött adatokat megmagyarázni vagy alátámasztani. Második legfontosabb konklúzió a sűrűség növelésének hatása, ami szembe megy az eddigi elképzeléseknek, miszerint vékony testek merevségének növelése nem feltétlen a sűrűség növelésével érhető el, mert a mintákból adódó tömeg és merevségi tulajdonságok változása mintánként más. Az eredményekből jól látszanak a vizsgált paraméterek egymásra gyakorolt hatásai, hol jobban, hol kevésbé. Ez is azt vetíti előre, hogy nem csak a paraméterek önálló viselkedése, hanem azok közötti kapcsolat feltérképezése is létfontosságú, ha a lehető legjobban szeretnénk megismerni az additív darabok jellemzőit. Az adatok megerősítéséhez a méréseket egy másik geometrián is érdemes lenne elvégezni a vizsgálatokat, valamint figyelembe venni az eredeti CAD modellből adódó geometria hatását is. Az additív darabok lengéstani tulajdonságaira vonatkozóan nem találtam hivatalos szabványt, így egyértelművé válik, hogy egy jól kidolgozott mérési metódus kialakítása is fontos. A hiányzó szabvánnyal azonos külső tényezők mellett lenne lehetőség az additív darabokat vizsgálni, hasonlóan a már kifejlesztett additív anyagok szakítószilárdsági vizsgálataihoz.

Természetesen nem úgy kerülnek használatba additív darabok végtermékként, hogy a tervezőknek nincs ismeretük a termék viselkedéséről, mert a minőségbiztosítási és minőségellenőrzési szabványokkal ez nem tehető meg. A technológia és azzal járó termék tulajdonságok ismerete és ezekkel szerzett tapasztalat jobb technológiai és anyabeli kihasználtságot tesz lehetővé. Ezzel bővíti felhasználhatósági tartományát az additív gyártástechnológiának.

Hivatkozások

- [1] A. Wöhler. *Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl*. Ernst & Korn, 1870. URL <https://books.google.hu/books?id=FlVvGwAACAAJ>.
- [2] Bálint Leon Seregi and Péter Ficzer. Weight reduction of a drone using generative design. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 49(2):19–22, Feb. 2022. DOI: 10.33927/hjic-2021-16. URL <https://hjic.mk.uni-pannon.hu/index.php/hjic/article/view/1137>.
- [3] Kuang-Hua Chang. *Design Theory and Methods using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series*. Academic Press (10/13/2014), 2015.
- [4] Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhrihu Ahuja, and Filomeno Martina. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2):737–760, 2016. ISSN 0007-8506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616301913>.
- [5] Madhukar Somireddy and Aleksander Czekanski. Mechanical characterization of additively manufactured parts by fe modeling of mesostructure. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(2), 2017. ISSN 2504-4494. DOI: 10.3390/jmmp1020018. URL <https://www.mdpi.com/2504-4494/1/2/18>.
- [6] Diana Popescu, Cătălin Gheorghe Amza, Rodica Marinescu, Mariana Cristiana Iacob, and Nicoleta Luminița Căruțașu. Investigations on factors affecting 3d-printed holes dimensional accuracy and repeatability. *Applied Sciences*, 13(1), 2023. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app13010041. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/41>.
- [7] Saquib Rouf, Ankush Raina, Mir Irfan Ul Haq, Nida Naveed, Sudhanraj Jegannmohan, and Aysha Farzana Kichloo. 3d printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(3):143–158, 2022. ISSN 2542-5048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.02.001>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254250482200001X>.
- [8] Yi Xiong, Yunlong Tang, Qi Zhou, Yongsheng Ma, and David W. Rosen. Intelligent additive manufacturing and design: state of the art and future perspectives. *Additive Manufacturing*, 59:103139, 2022. ISSN 2214-8604.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103139>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422005280>.
- [9] Timothy W. Simpson, Christopher B. Williams, and Michael Hripko. Preparing industry for additive manufacturing and its applications: Summary & recommendations from a national science foundation workshop. *Additive Manufacturing*, 13:166–178, 2017. ISSN 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.08.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416302019>.
- [10] M. Palmieri, J. Slavič, and F. Cianetti. Single-process 3d-printed structures with vibration durability self-awareness. *Additive Manufacturing*, 47:102303, 2021. ISSN 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102303>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860421004619>.
- [11] et. al. Guangxin Liao, Zhixiang Li. Additive manufacturing of polyamide 66: Effect of process parameters on crystallinity and mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31:191–200, 2022. ISSN 2542-5048. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06149-6>.
- [12] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K.-Y. Lee, and V.L. Tagarielli. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3d-printed pla. *Materials & Design*, 123:154–164, 2017. ISSN 0264-1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517302976>.
- [13] Hieu Tri Nguyen, Kelly Crittenden, Leland Weiss, and Hamzeh Bardaweel. Experimental modal analysis and characterization of additively manufactured polymers. *Polymers*, 14 (10), 2022. ISSN 2073-4360. DOI: 10.3390/polym14102071. URL <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/10/2071>.
- [14] Jagdish Khatwani and Vineet Srivastava. *Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Solidified PLA Parts Fabricated by 3D Printing Process*, pages 95–104. Springer Singapore, Singapore, 2019. ISBN 978-981-13-0305-0. DOI: 10.1007/978-981-13-0305-0_9. URL https://doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_9.
- [15] Chya-Yan Liaw, John W. Tolbert, Lesley W. Chow, and Murat Guvendiren. Inter-layer bonding strength of 3d printed peek specimens. *Soft Matter*, 17:4775–4789, 2021. DOI: 10.1039/D1SM00417D. URL <http://dx.doi.org/10.1039/D1SM00417D>.

- [16] Hamed Bakhtiari, Muhammad Aamir, and Majid Tolouei-Rad. Effect of 3d printing parameters on the fatigue properties of parts manufactured by fused filament fabrication: A review. *Applied Sciences*, 13(2), 2023. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app13020904. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/904>.
- [17] Adrián Rodríguez-Panes, Juan Claver, and Ana María Camacho. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of pla and abs pieces manufactured by fdm: A comparative analysis. *Materials*, 11(8), 2018. ISSN 1996-1944. DOI: 10.3390/ma11081333. URL <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1333>.
- [18] Chamil Abeykoon, Pimpisut Sri-Amphorn, and Anura Fernando. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved pla and abs 3d printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3):284–297, 2020. ISSN 2588-8404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840420300196>.
- [19] Feiyang He, Yousef Lafi A Alshammari, and Muhammad Khan. The effect of printing parameters on crack growth rate of fdm abs cantilever beam under thermo-mechanical loads. *Procedia Structural Integrity*, 34:59–64, 2021. ISSN 2452-3216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245232162100250X>. The second European Conference on the Structural Integrity of Additively Manufactured Materials.
- [20] Francisco Medel, Javier Abad, and Victor Esteban. Stiffness and damping behavior of 3d printed specimens. *Polymer Testing*, 109:107529, 2022. ISSN 0142-9418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107529>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941822000551>.
- [21] Philippe Lesage, Lucas Dembinski, Remy Lachat, and Sébastien Roth. Mechanical characterization of 3d printed samples under vibration: Effect of printing orientation and comparison with subtractive manufacturing. *Results in Engineering*, 13:100372, 2022. ISSN 2590-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100372>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022000421>.
- [22] Boudaoud H. et al. Xue F., Robin G. General methodology to investigate the effect of process parameters on the vibration properties of structures produced by

- additive manufacturing using fused filament fabrication. *JOM*, 74, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05051-9>. URL <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05051-9>.
- [23] Formfutura Bv. Reform - rpla technical data sheet, 2022. [https://c-3d.niceshops.com/upload/file/TDS_-_ReForm_-_rPLA\[1\].pdf](https://c-3d.niceshops.com/upload/file/TDS_-_ReForm_-_rPLA[1].pdf) Hozzáférve: 2023.05.04.
- [24] PCB Piezoelectronics Inc. Pcb impact hammer datasheet, 2017. https://www.pcb.com/contentStore/docs/pcb_corporate/vibration/products/manuals/086c03.pdf Hozzáférve: 2023.04.24.
- [25] PCB Piezoelectronics Inc. Pcb piezotronic accelerometer datasheet, 2017. https://www.pcb.com/contentStore/docs/pcb_corporate/vibration/products/manuals/352c23.pdf Hozzáférve: 2023.04.24.
- [26] National Instruments Corp. Compactdaq 9178 chassis datasheet, 2023. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/cdaq-9178-specs/page/specs.html> Hozzáférve: 2023.05.12.
- [27] National Instruments Corp. Vibration input module datasheet, 2023. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9234-specs/page/overview.html> Hozzáférve: 2023.05.12.
- [28] Sridharan Kannan and Manoharan Ramamoorthy. Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3d printed abs, pc and pc-abs materials. *Materials Research Express*, 7(1):015341, jan 2020. DOI: 10.1088/2053-1591/ab6a48. URL <https://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab6a48>.
- [29] Daniel Bachrathy, Adam K. Kiss, Attila Kossa, Szabolcs Berezvai, David Hajdu, and Gabor Stepan. In-process monitoring of changing dynamics of a thin-walled component during milling operation by ball shooter excitation. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 2020. ISSN 2504-4494. DOI: 10.3390/jmmp4030078. URL <https://www.mdpi.com/2504-4494/4/3/78>.
- [30] Singiresu S. Rao. *Mechanical Vibrations Fifth edition*. Pearson Education, Inc., 2011. ISBN 978-0-13-212819-3.
- [31] Dr. Dömötör Ferenc et. al. *Rezgésdiagnosztika I-II*. Dunaújvárosi Főiskola Kiadói Hivatala, 2008. ISBN 978-963-87780-0-0.