

TDK dolgozat

3D nyomtatott műanyag mikrostruktúrák geometriai hűsége

Makány András

Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar

Témavezető: Dr. Geretovszky Zsolt, egyetemi docens,
SZTE TTIK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
SzTE IKIKK 3D Központ

2022

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	3
2	Célkitűzés.....	3
3	Eszközök és módszerek	4
4	Eredmények	5
4.1	Alaplemez nyomtatások és vizsgálatuk.....	5
4.2	Blokkok nyomtatása	8
4.3	Blokkok összehasonlítása a tervezett modellekkel.....	12
4.4	Hibás régiók definiálása	15
4.4.1	Kezdőblokk	15
4.4.2	Rámpa.....	15
4.4.3	Gerincek	15
4.4.4	Fogak.....	16
4.4.5	Medence	16
4.4.6	Ív.....	16
4.5	Hibás régiók viselkedése	16
4.5.1	Pozitív blokkok viselkedése	16
4.5.2	Negatív blokkok viselkedése.....	23
4.6	A lézernyaláb és a műgyanta kölcsönhatásának modellezése	27
4.6.1	Fotopolimerizációs modell	27
4.6.2	Hibás régiók értelmezése a modell alapján	29
4.6.3	Extracure modell	32
5	Nyomtatások értékelése	35
6	Tapasztalatok	35
6.1	Pozitív blokkok.....	35
6.2	Negatív blokkok	36
7	Korrektációs lehetőségek.....	38
8	Köszönetnyilvánítás	38
9	Irodalomjegyzék	39

1 Bevezetés

A 2010-es években a jövő technológiájaként robbant be a közéletbe a 3D nyomtatás, azonban kevesen tudják, hogy a módszer kutatása az 1980-as években kezdődött. Charles W. Hull felfedezte, hogy megfelelő számítógépes vezérlés mellett UV fénnel több ezer műanyag réteg helyezhető egymásra egy adott geometriai struktúra mentén. Ezen lépések eredményeként egy szilárd, térbeli testet kapunk. Hull szabadalmát 1986-ban jegyezte be, s ezzel megszületett a sztereolitografikus 3D nyomtatás¹, amely egy UV fény hatására polimerizálódó műgyanta szolgál a nyomtatás alapanyagaként. Ez a technológia más - itt nem részletezett - módszerek mellett elterjedtségében és részesedésében mindmáig a 3D nyomtatási piac meghatározó szereplője.

Az SLA nyomtatási technológiának több változatát is alkalmazzák aszerint, hogy a polimerizációt hogyan szabályozzák, illetve aszerint, hogy hogyan világítják ki a kívánt területet. Az egyik ilyen lehetőség a „vektor pásztázás”, amikor a lézernyalábot két síktükör segítségével irányítják. A két tükröt egymásra merőleges tengelyek mentén forgatnak léptetőmotorjaik, s ezáltal kétdimenziós pásztázást valósítva meg. Második lehetőség az úgynevezett „maszk projekciós” eljárás, ami során egy DMD chip segítségével egy világítják ki egy teljes réteg – mint egyfajta maszk – képét. Harmadik lehetőség az ún. „kétfotonos” módszer, amely működési elve hasonlít a vektoros pásztázás módszeréhez. Abban különbözik a két módszer, hogy míg az előbbi egy lézernyalábot alkalmaz a polimerizációs reakció elindításához, addig az utóbbi esetén a folyamat megindításához két nyaláb együttes energiája szükséges. Ez azzal jár, hogy a műgyanta megszilárdulása csak a két lézernyaláb metszéspontjában történik meg, így a nyomtatás térbeli feloldása nagyban növelhető.

2 Célkitűzés

Munkám során az SLA nyomtatási technológia segítségével létrehozott 3D-s testeket hasonlítjuk digitális terveikhez. Ehhez létrehozunk egy, az egyik dimenziójában a nyomtató felbontásával összehasonlítható méretű elemet, egy hozzá hasonló méretű alaprétgre építve. Megfigyeljük a jellegzetes geometriai elváltozásokat és ezeket kvalitatívan és kvantitatívan jellemezzük. A nyomtatvány geometriájában megjelenő hibákat a feltételezett okozójuk alapján csoportosítjuk, tulajdonságaikat leírjuk, illetve egy fotopolimerizációs modell segítségével

¹ A technológiát gyakran SLA nyomtatásnak is nevezik.

modellezzük. Végül az eredmények alapján a technológia további alkalmazását segítő tervezési javaslatokat fogalmazunk meg.

3 Eszközök és módszerek

A nyomtatott testeket az Autodesk Fusion 360 CAD szoftverében terveztük meg. A nyomtatások elvégzéséhez a 3D Systems ProJet 6000 HD vektor szkennelési technológiát alkalmazó sztereolitografikus 3D-s nyomtatót használtuk. A nyomtatás alapanyagaként az Accura ClearVue műgyanta szolgált. A nyomtatott testek utókezelése – a műgyanta polimerizációjának teljessé tétele érdekében – a gyártó által előírt standard eljárás szerint történt: négy perc ultrahangos mosás izopropil-alkoholban és kétszer fél óra kezelés egy UV-utókezelő kamrában melynek felső lámpájának fő spektruma 350-400 nm, oldalsó lámpája 400-550 nm hullámhosszú. A stabilizált mintákról egy Olympus DSX 510-MR 3D optikai mikroszkóppal készítettük optikai mikroszkópos képeket és domborzati térképeket. Előbbieket az ImageJ [1] képfeldolgozó szoftverrel értékeltük ki. A testek vastagságát a közepükön mérve egy 5 μm pontosságú mikrométercsavarral mértük.

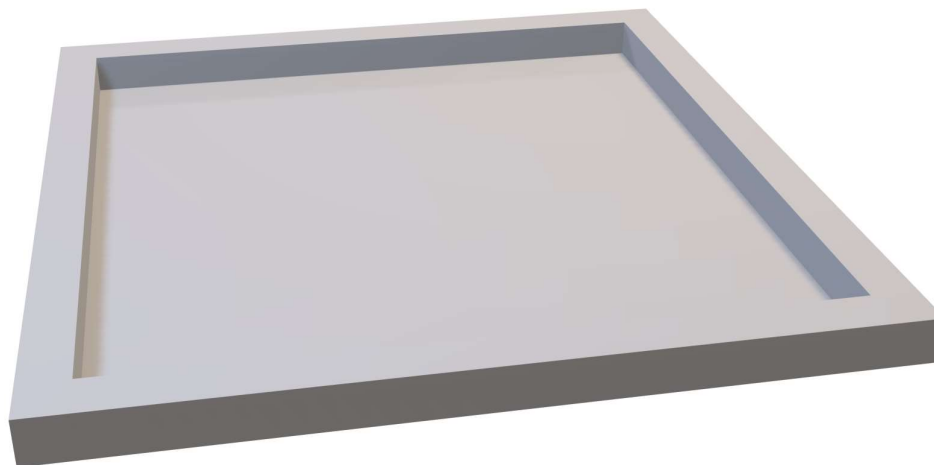
A használt SLA nyomtató a felhasználásra kész műgyantát egy kádban, míg az összes felhasználható gyantát egy cserélhető kazettában tárolja. Ez a két egység kapcsolt, s a vezérlő rendszer biztosítja a kád gyantaszintjének állandósságát. A nyomtatás egy a műgyantába merülő építőtálcára, vagy platformra történik, amelyre a minta nyomtatása – a nyomtató típusától függően – történhet „bottom-up”, illetve „top-down” geometriában. A ProJet 6000 HD nyomtató elrendezése top-down, amely esetben az építőtálca belemerül a gyantakádba, s a rétegek közötti bemerülés, jellemzően 10-100 μm -es nagyságrendbe eső, nagyságával szabályozható a nyomtatási rétegvastagság. Ebből adódik, hogy a tálca a tárgy építése közben lefelé mozog, s egyre mélyebben helyezkedik el a műgyantában. Egyes alapanyagok (különösen az átlátszó, áttetsző gyanták) esetén a nyomtatott tárgy nem látható egészen addig, amíg a nyomtatás befejezése után a tálcát ki nem emelik a gyantatartó kádból. A top-down rendszerek, s így a 3D Systems ProJet 6000 HD nyomtató is, gyakran tartalmaznak egy „recoater”-es simítót, hogy a felszínen esetenként kialakult buborékokat megritkítsák, illetve a viszkózus műgyanta függőleges mozgatása okozta egyenetlenségeket kijavítsák, mivel ez döntően befolyásolja a folyadékfelszín simaságát, s ezáltal a nyomtatott réteg vastagságának és tulajdonságainak egyenletességét. Végül, az SLA nyomtató legfontosabb, a műgyanta megszilárdításáért felelős eleme, a fényforrás, ami esetünkben 200 mW teljesítményű 395 nm

hullámhosszú lézer. Ez az előzőek szerint tárgyaló pásztázó tükörrendszerrel és gyűjtőlencsével van ellátva, névleges rétegvastagsága 50/100/150 μm , laterális felbontása 75-750 μm . [2][3]

4 Eredmények

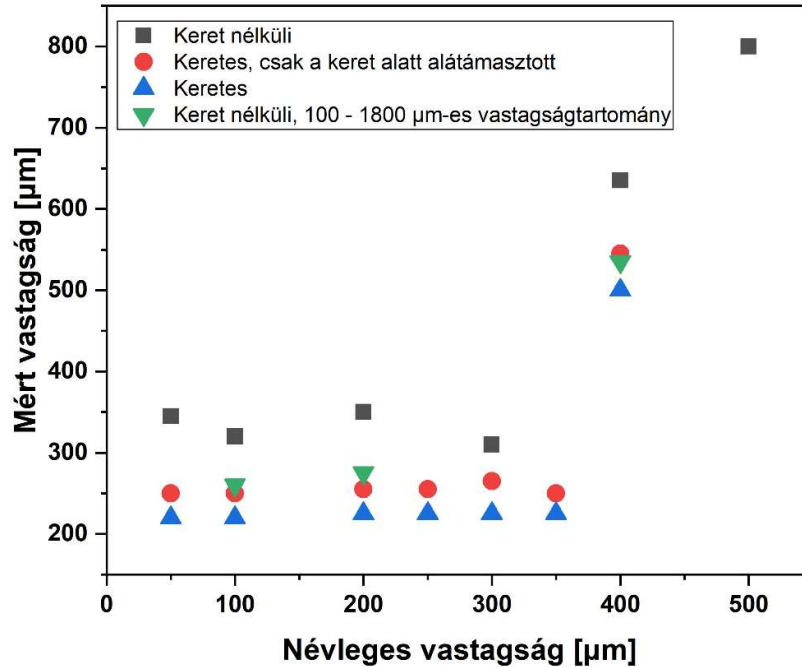
4.1 Alaplemez nyomtatások és vizsgálatuk

Első elemként egy 15x15 mm-es alaplapot nyomtattunk vízszintes és függőleges orientációban. Mindkét esetben ugyanazon modell vastagságát változtattuk, és így nyomtattunk 50, 100, 200, 300, 400, illetve 500 μm vastag változatokat, a 3D Sprint slicer szoftver „General” nyomtatási paraméereivel. A legelső nyomtatásokból arra jutottunk, hogy a lemez egy szilárdabb külső váz nélkül erős deformációt szenved. Ezért a további modelleket elláttuk egy 1x1 mm keresztmetszetű szegéllyel, ahogy azt a 4.1.1-es ábrán láthatjuk. A különböző orientációkkal a nyomtató anizotróp, azaz iránytól függő felbontását² vizsgáltuk a hordozó felület optimális nyomtatási irányának kiválasztása érdekében. Az utókezelést követő mérések eredményei alapján a vízszintes orientációban épített alaplapok mikrométer csavarral mért vastagsága a tervezett értéknek akár többszöröse is lehet a szub-500 μm -es tartományban, s jelentős torzulást is szenvedtek. Ahogy az az 4.1.2 ábrán látszik, a nyomtatási paraméterek és módszerek legoptimálisabb beállítása mellett is az 50 μm névleges vastagságú lemez mért vastagsága 220 ± 5 μm lett.



4.1.1 ábra - Az tervezett alaplap 3D-s modellje, középen a lemez, szélén annak kerete

² A 3D nyomtatási technológiák feloldása a rétegek síkjában és arra merőlegesen általában különböző.



4.1.2 ábra - A nyomtatott testek mért vastagságainak eloszlása

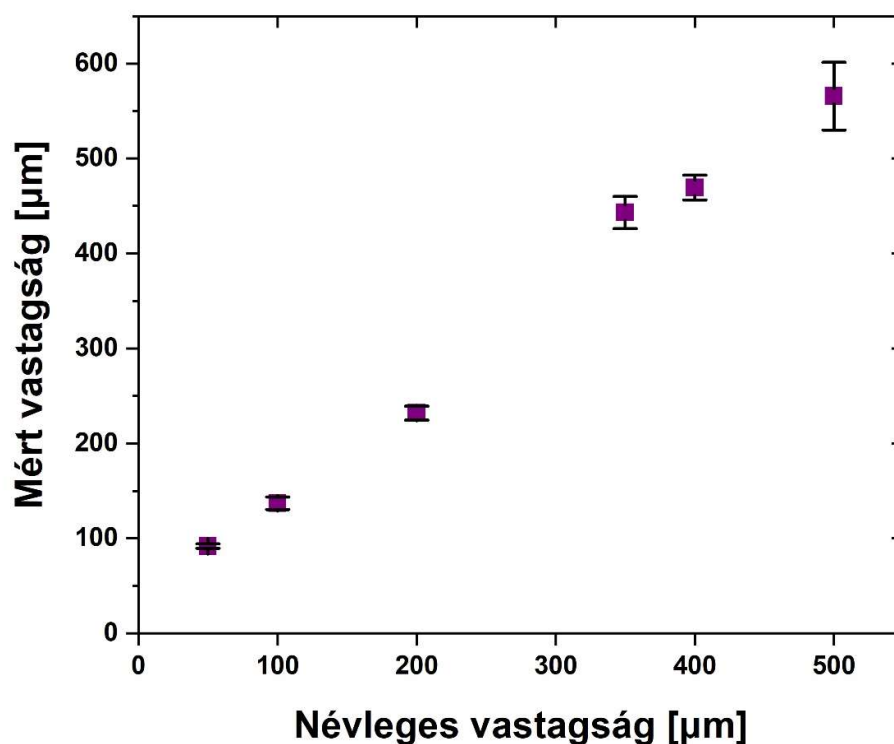
Függőleges alaplapokat háromfajta orientációban nyomtattunk. Az első esetben a nyomtatott modell a recoater penge haladási irányával párhuzamosan, második esetben arra merőlegesen, utolsó esetben pedig azzal 45°-os szöget bezárva helyeztük el, ezekhez az eddigiektől eltérő nyomtatási paraméter a „small linewidth compensation”, aminek értéke a további nyomtatások során 0.019 mm. Ehhez a vizsgálathoz az eddigi modellt egy felülről nyitott kockába építettük úgy, hogy a lemezek kereteit egymásba toltuk (lásd. 4.1.3 ábra). A vastagság méréseink szerint az alaplap lemezek vastagsága függőleges orientációban a vízszintesen nyomtatott alaplapokhoz képest lecsökkent, s jóval közelebb állt a névleges méretekhez (lásd. 4.1.4 ábra és 4.1.5 táblázat). Példaként az 50 μm névleges vastagságú alaplap valós vastagsága átlagosan 92 μm-nek adódott. Méréseink továbbá azt is bizonyították, hogy az alaplap vastagságát a test és a recoater haladási irányának orientációja nem befolyásolja, ezért a továbbiakban ezeket a kockákat a merőleges-párhuzamos elrendezésben³ építettük. Azonban ebben az elrendezésben

³ Azaz a nyomtatott „kockánk” platformra merőleges oldallapjai közül kettő a recoaterrel párhuzamos, kettő pedig a recoaterre merőleges volt a nyomtatás során.

végzett mikroszkópos mérések azt mutatják, hogy az alaplapot felépítő rétegek magassága a névleges 50 μm helyett 48,6 μm .



4.1.3 ábra - A függőleges alaplapp nyomtatására szolgáló kocka, az ún. alapkocka 3D-s modellje



4.1.4 ábra - Az alapkocka mért vastagságai a névleges vastagságok függvényében

Névleges vastagság [μm]	Mért vastagság [μm]
50	92±2,3
100	137±6,6
200	231±7,3
350	443±16,9
400	469±13,1
500	566±35,8

4.1.5 táblázat - Az alapkocka mért átlag vastagságai és szórásai

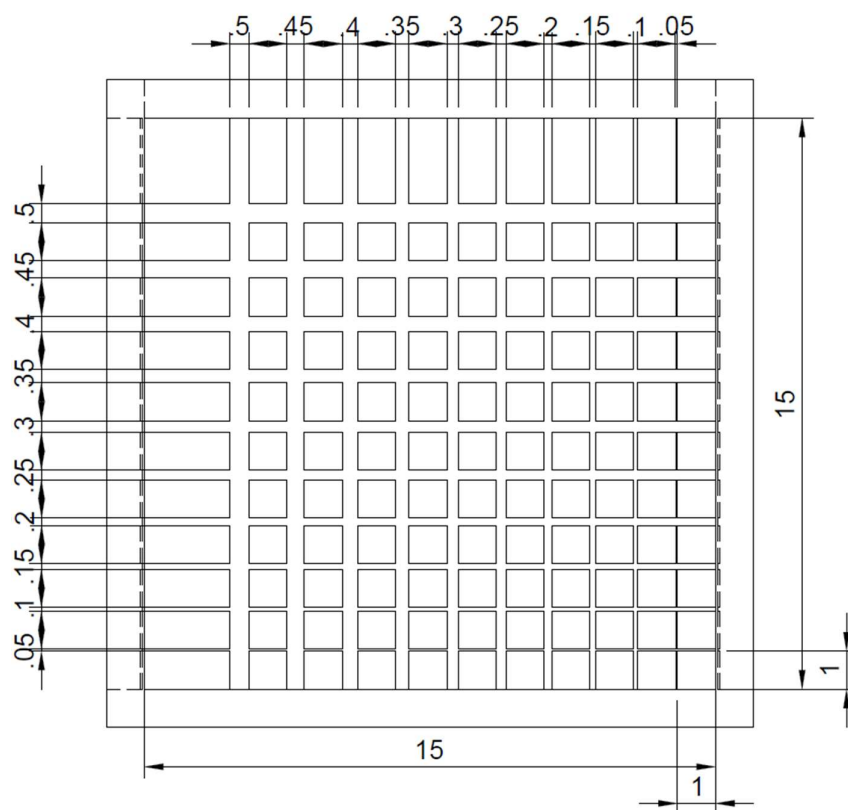
4.2 Blokkok nyomtatása

A legmegfelelőbb – legvékonyabb – alaplemez kiválasztása után erre, mint hordozóra olyan téglatesteket terveztük, amelyek egyik dimenziója összemérhető a nyomtatónk felbontásával. Ezen, *blokkoknak* elnevezett testek kritikus méretét (értsd vastagságát) 50, 100, 150 és 200 μm -nek méretűnek választottuk és aszerint beszélünk pozitív, illetve negatív blokkokról, hogy azok

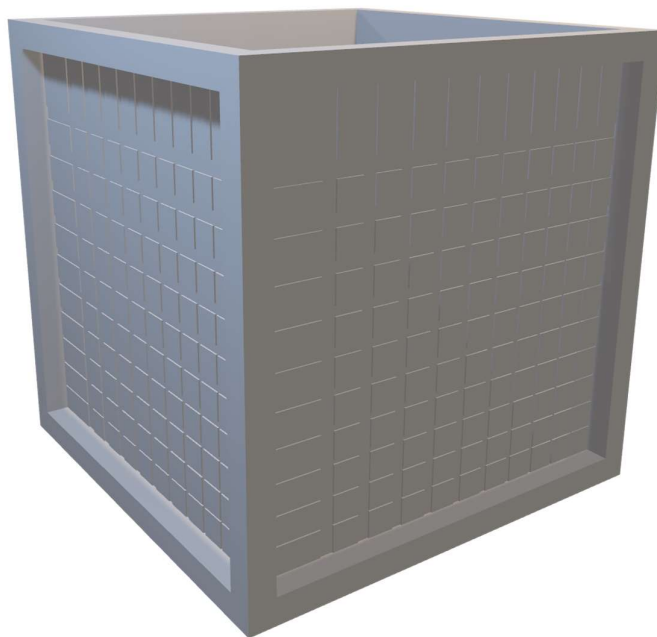
a környezetükből kiemelkednek, vagy besüllyednek. A továbbiakban ezek blokkok vizsgálata során kapott eredményeket mutatom be.

A blokkokat az előzőekben használt alap kockára helyeztük. Pozitív blokkokat névlegesen 50 μm vastagságú alaplemezre helyeztük, így az egyes oldalak névleges vastagsága rendre 100, 150, 200 és 250 μm . Ez a „pozitív kocka”. A negatív blokkokat névlegesen 100, 150, 200 és 250 μm vastagságú alaplemezre helyeztük fel, így ezeknek a névleges mélysége 50 μm . Ez a „negatív kocka”.

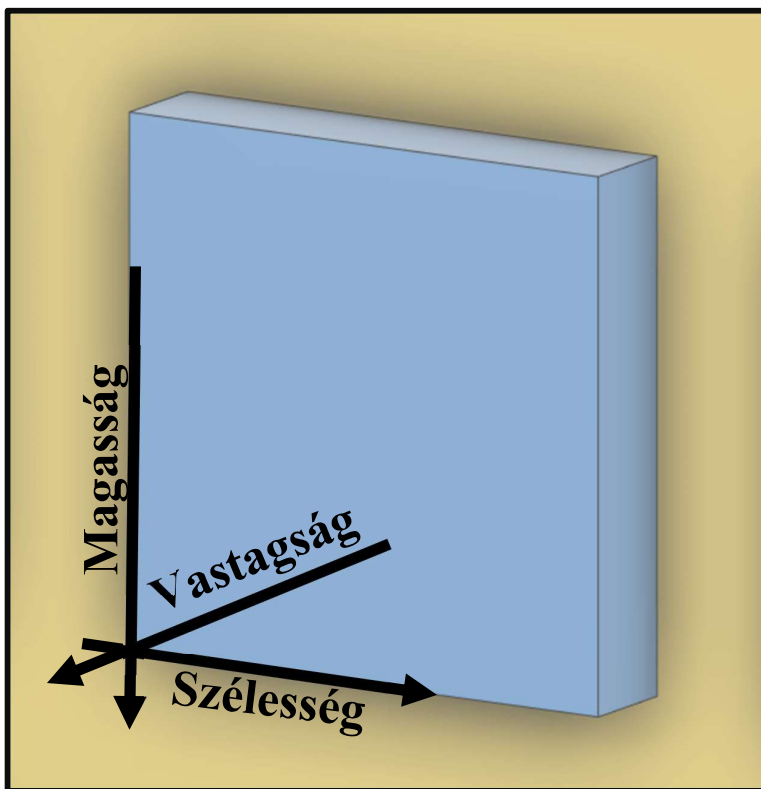
Az első modellen 1x1 mm-es alapterületű pozitív blokkokat választottunk el egy negatív blokk hálózattal, amelyek méreteit mind vízszintes, mind függőleges irányban az 50- 500 μm -es tartományban változtattunk 50 μm -es lépésközzel. A pontos elrendezést az 4.2.1 ábra, a 3D-s modellt a 4.2.2 ábra mutatja be.



4.2.1 ábra - Az alapkocka egyik lapjára helyezett elemek méretei mm-ben

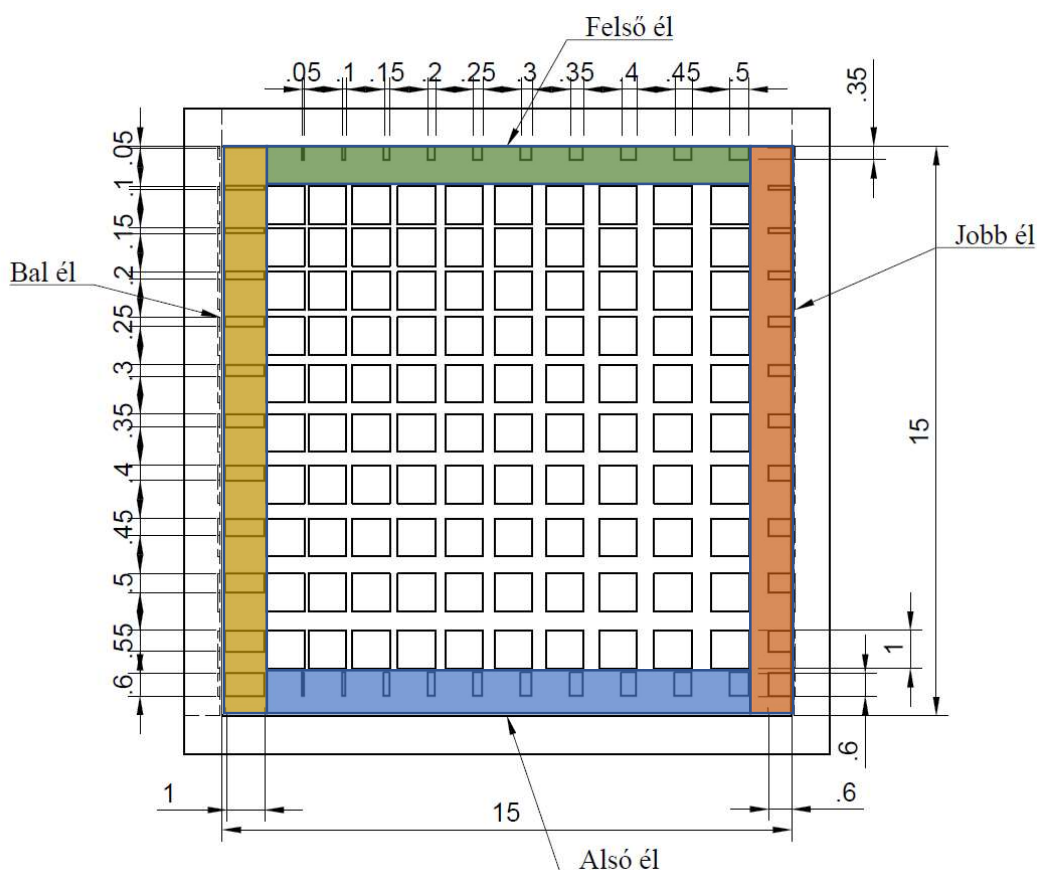


4.2.2 ábra - A negatív kocka 3D-s modellje

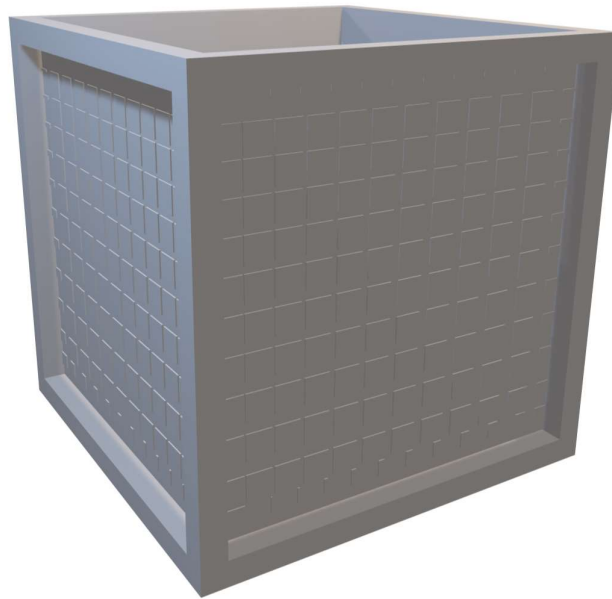


4.2.3 ábra – A pozitív blokk méreteinek elnevezései

A második modell az előző kiegészítéseként készült, közepén az előbb leírt struktúra megmaradt, szélein azonban a pozitív blokkok méretváltozásának megfigyelésére alkalmas elemeket illesztettünk be. Alsó és felső élén a szélességváltozás okozta geometriai eltérés megfigyelésére alkalmas, 350 és 600 μm magas blokkokat készítettünk. Ezen elemek szélessége 50 és 500 μm között 50 μm -es lépésközzel változott. A kocka oldallapjainak bal és jobb széleire pedig a magasságváltozás hatásának vizsgálatára alkalmas 600- illetve 1000 μm széles elemeket helyeztünk, amelyek magassága 50 μm -es lépésközzel 50 és 600 μm között változott. Az előlő oldal felépítését a 4.2.4 ábra, a kocka 3D-s modelljét a 4.2.5 ábra mutatja be. Nyomtatási paraméter eltérés a kontúr vonalak száma, amit 1-re csökkentettünk. A paraméter állításának hatására nem tapasztaltunk változást.



4.2.4 ábra - A pozitív kocka egyik lapjára helyezett elemek és méreteik mm-ben



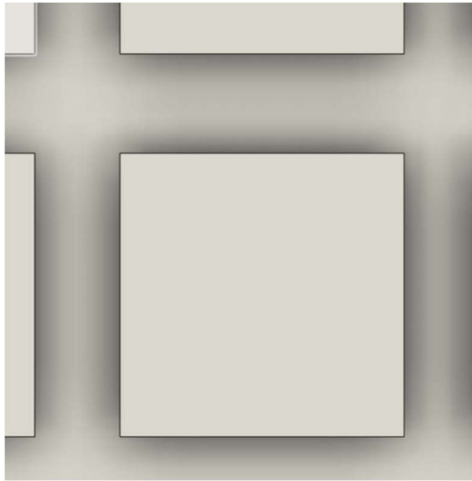
4.2.5 ábra - A pozitív kocka 3D-s modellje

Megjegyzendő, hogy ebben a kialakításban minden, pl. pozitív/negatív kocka használható pozitív, illetve negatív blokkok vizsgálatára is. Lényegi különbség csak az egyes elemek kiterjedéseiben van. A negatív kocka esetén a pozitív blokkok egységesek, a köztük lévő negatív blokkok magassága, valamint szélessége változik, míg a pozitív kocka esetén a pozitív blokkok kezdőpontjai jól meghatározottak, oldalaik paramétere változik, a negatív blokkok pedig lekövetik a változást. Elmondható, hogy a kockán belül minden pozitív blokkot negatívak határolnak – és fordítva –, ezért minden mintán mérhetőek mind a pozitív, mind a negatív blokkok méret-, és alakváltozásai is.

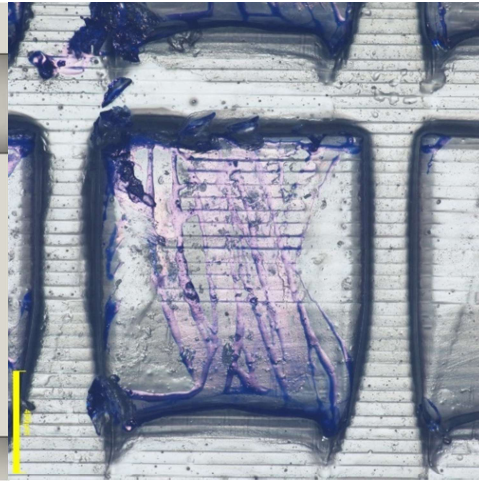
4.3 Blokkok összehasonlítása a tervezett modellekkel

A vizsgálat során az 50 μm -es blokkokat jellemeztük kvantitatívan, mivel ez az elem megegyezik a nyomtató felbontásával, illetve mert ezt egy kontúrvonal meghúzásával építi a nyomtató, míg a 100, 150 és 200 μm kiemelkedésű blokkoknak kvalitatív vizsgálatát végeztük. A kinyomtatott pozitív és negatív blokkok alakja – a vizsgált 10 mikronos mérettartományban – lényegesen eltér a tervezett geometriától. Új elemek, egyediségek jelentek meg a blokkokon, melyek egy része anyagtöbblettel, másik része anyaghiánnyal járó hiba. Ezeknek a régióknak a megállapítására egymásra illesztettük a tervezett modell egyik pozitív blokkját, és a róla felvett 3D-s domborzat képét, majd az eltéréseket szintérikép segítségével ábrázoltuk. Az

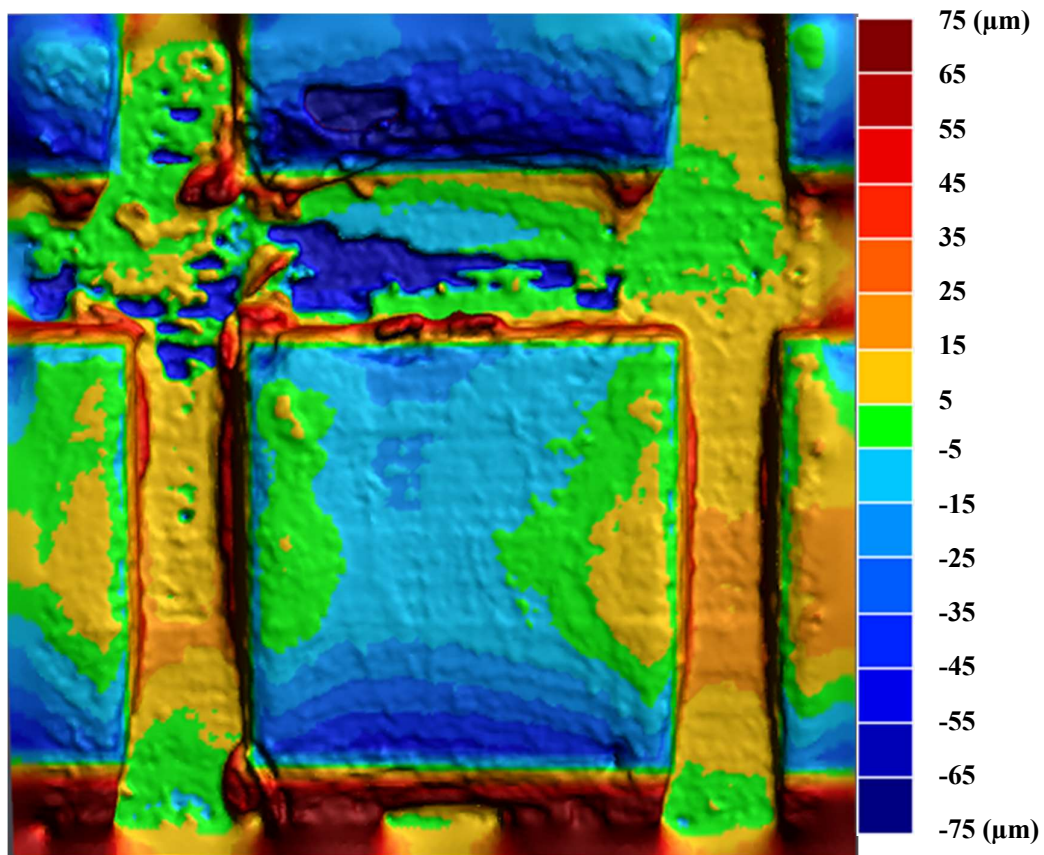
összehasonlításban a kék színű eltérések anyaghiányt, míg a vörösek anyag többletet jelölnek, a zöld színnel jelölt régiók pedig $\pm 5 \mu\text{m}$ -es hibahatáron belül vannak. Ezt a 4.3.1 – 4.3.3 ábrák mutatják be.



4.3.1 ábra - A pozitív blokk tervezett geometriája



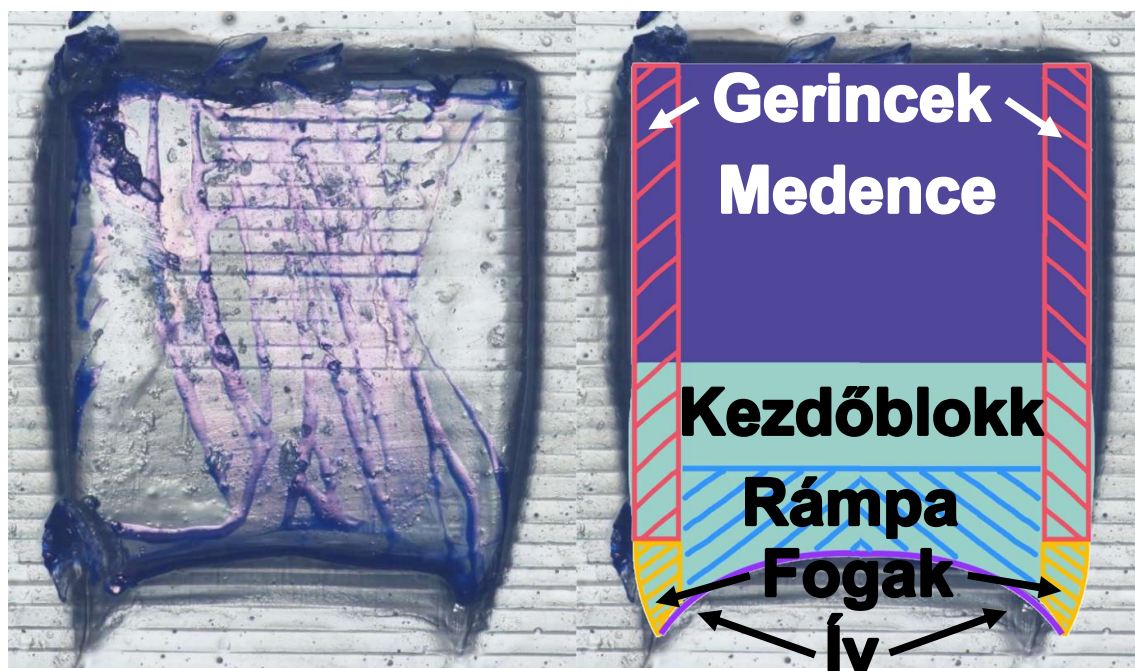
4.3.2 ábra - A nyomtatott pozitív blokk geometriája



4.3.3 ábra - A tervezett és a nyomtatott pozitív blokk geometriai különbségeinek szintértékes megjelenítése

A 4.3.2 ábra szemléletesen bemutatja a pozitív blokkot és az alaplapot. A kép az élességéből adódóan jól megfigyelhetőek a nyomtatott rétegek határai is, alkalmassá teszi a nyomtatott rétegek vastagságának mérésére. A 200 μm -es blokk összehasonlító képén láthatjuk, hogy a blokk bal, jobb éleinek sárgás színe, illetve a felső blokk alsó élének szélein látható vörös régiója anyagtöbbleti, míg az alsó él közepének és felületének kék színe anyagiányi eltérést mutat. A továbbiakban ezeknek az eltéréseknek a kvalitatív és kvantitatív jellemzését fogjuk tárgyalni.

4.4 Hibás régiók definiálása



4.4.1 ábra - Egy pozitív blokk mikroszkópos képe és a hibás régiói.

4.4.1 Kezdőblokk

Míg a blokk felső részén látszanak az egyenként kb. 50 μm vastag rétegek, addig az alsó részen, azaz a nyomtatás elején egy 7 réteg magasságú, egyetlen darabból álló monolit struktúra látható. Ez a „kezdőblokk”.

4.4.2 Rámpa

A kezdőblokk alján egy változó vastagságú területet láthatunk. Ennek mélysége egyenletesen változik: a blokk tetőjétől az alaplapp irányába csökken, azaz a tervezett alakhoz képest ezen a részen anyaghiány lép fel. Mivel ezen területen – bizonyos blokk méretnél – a test vastagsága nullára is lecsökken, aminek az eredményeként a blokk ezen része belesimul az alaplemezbe, ezt a szerkezeti elemet „rámpának” neveztük el.

4.4.3 Gerincek

A blokkok bal, illetve jobb oldalai mentén a nyomtatott test kiemelkedik (vastagabb a régió tervezési méreténél), és egyben a blokk lokális szélességének megnövekedését is eredményezi. A regionális térfogatváltozás pozitív, azaz ez egy anyag többlettel járó hiba. Ez a geometriai torzulás a blokk két oldalán egy-egy oszlopszerű képződményt eredményez, amelyet „gerincnek” neveztünk el.

4.4.4 Fogak

A gerinc folytatásaként, a kezdőblokk alsó területein/sarkainál egy-egy túlexponált régiót találunk, amelyek a tervezett geometrián kívül esnek, azaz megjelenésük anyagtöbbletet jelent. Ezek a régiók az ún. „fogak”.

4.4.5 Medence

Bár a színskála osztásköze miatt a 4.3.3 ábrán nehezen, de a blokkok közepén megfigyelhető egy csökkent vastagságú régió, amelyet két oldalról a blokkok szélein megjelenő gerincek határolnak. Ez a blokk közepén található bemélyedés egy fokozatos vastagsági változás eredményeként jött létre. Ezt a vastagságbeli eltérést, amely anyaghiányt eredményez „medence” névvel illetjük.

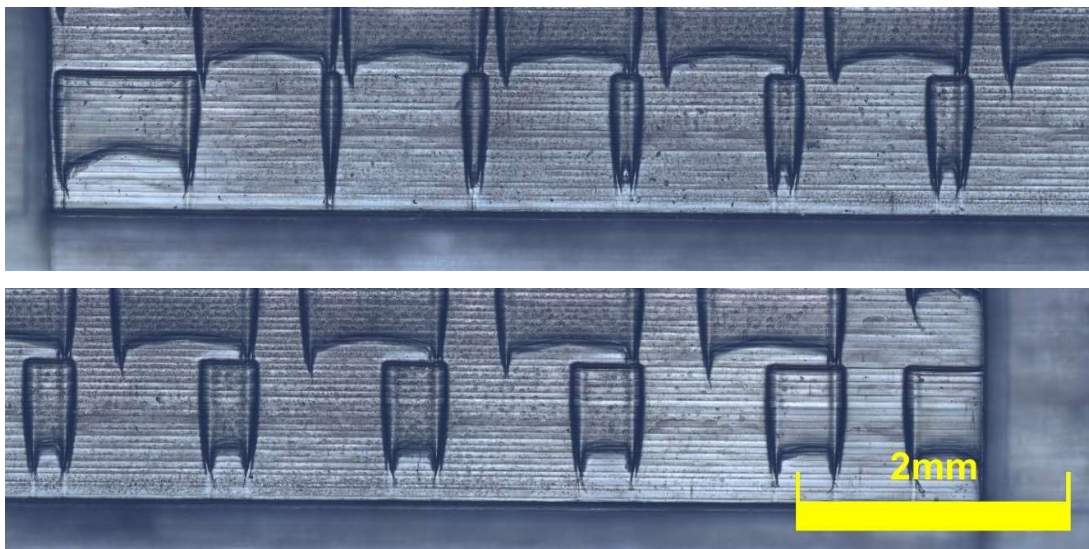
4.4.6 Ív

A kezdőblokkok alján, a két fog közötti részt egy „íves” tartomány köti össze. Ez az alaphiba a fogak kiegészítése, ugyanis a fogak okozta magasságnövekedés és a kezdőblokk közepén látható magasságcsökkenés (ld. medence) együtt egy fokozatosan elváltozást hoz létre, amelyet ez az íves terület köt össze térben. A jelenség a szélső területei anyagtöbbletet, a közepe miatt anyaghiányt jelent.

4.5 Hibás régiók viselkedése

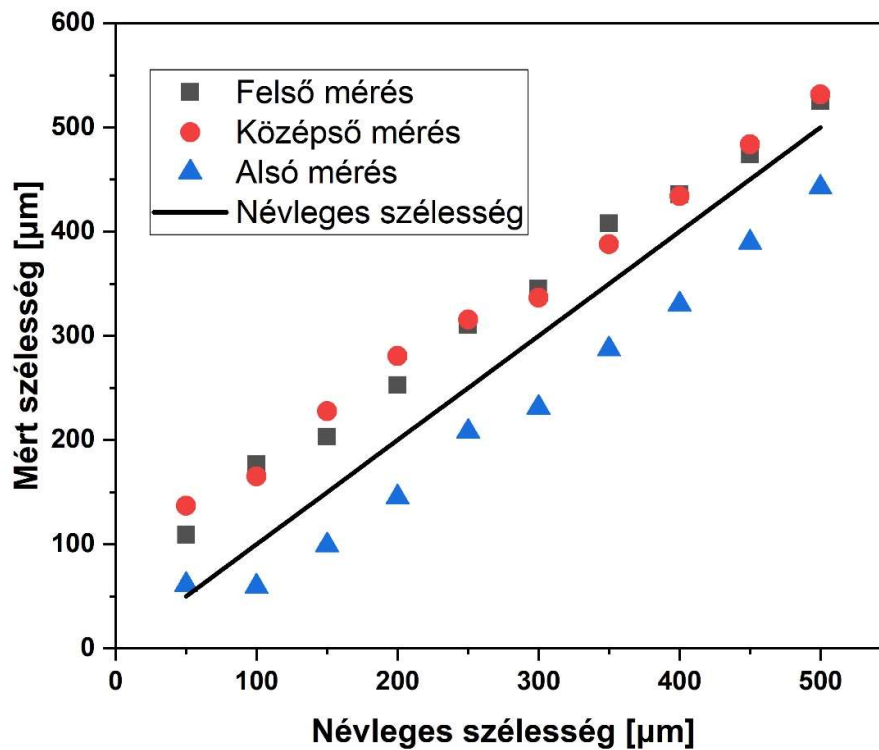
4.5.1 Pozitív blokkok viselkedése

A blokk (rétegeinek) mért szélessége a blokk felső és középső részén a névleges szélesség felett, míg a fogak magasságában az alatt van. Az eltérés mértéke mind pozitív, mind negatív irányba 30 és 80 μm között változott, megközelítőleg 50 μm -es átlagértékkel. A felső és középső mérések eredményei közel azonosak, köztük nincs számottevő méreti különbség. Az alsó mérési pont változásai jól lekövetik a középső mérés eredményeit. Ez a viselkedés a 4.5.2 ábrán látható.



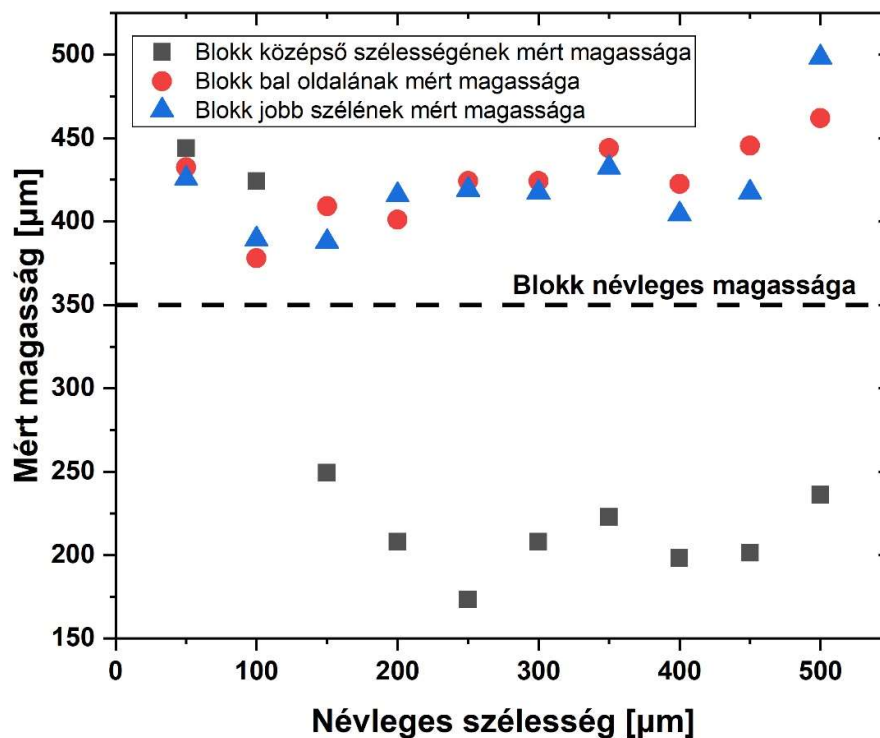
4.5.1 ábra - A 600 μm -es magasságú blokkok szélességváltozása az 50-500 μm -es tartományban

A blokkok szélességének változtatásakor figyeltük meg a gerincek és a fogak szétválását. Mint az a 4.5.1 ábrán is látható, a keskeny blokkok esetén, jellemzően a 50-250 μm -es szélességtartományban, a jobb és bal oldali gerincek, illetve fogak összeérnek, a fogak által okozott magassági és szélességi eltérés megnő. Az utóbbi eltérés jellemzésére bevezetjük $\delta(s)$ -t, mely a mért és a tervezett szélességek különbségét jelöli. A jelenség az 50-250 μm -es szélességi értékek között jelenik meg, és ebben a tartományban található a kitérés maximuma, melynek átlagértéke $\delta(s) = 65 \mu\text{m}$, a felső és középső tartományok mérési pontjainál. Ezután az eltérés állandó, a szélesség megközelítőleg $\delta(s) = 30 \mu\text{m}$ hibával leköveti a névleges értéket. Az alsó mérési ponton az 50 μm szélességű blokk esetén a névleges érték felett van, azonban minden további blokkon a tervezett érték alatt van. A 100-250 μm -es tartományban a különbség minimuma $\delta(s) = -40 \mu\text{m}$ mutat. Az ez után következő névleges szélességi értékek $\delta(s) = -60 \mu\text{m}$ -es hibával lekövetik a beállítottét. Az eredményeket a 4.5.2 ábra szemlélteti.



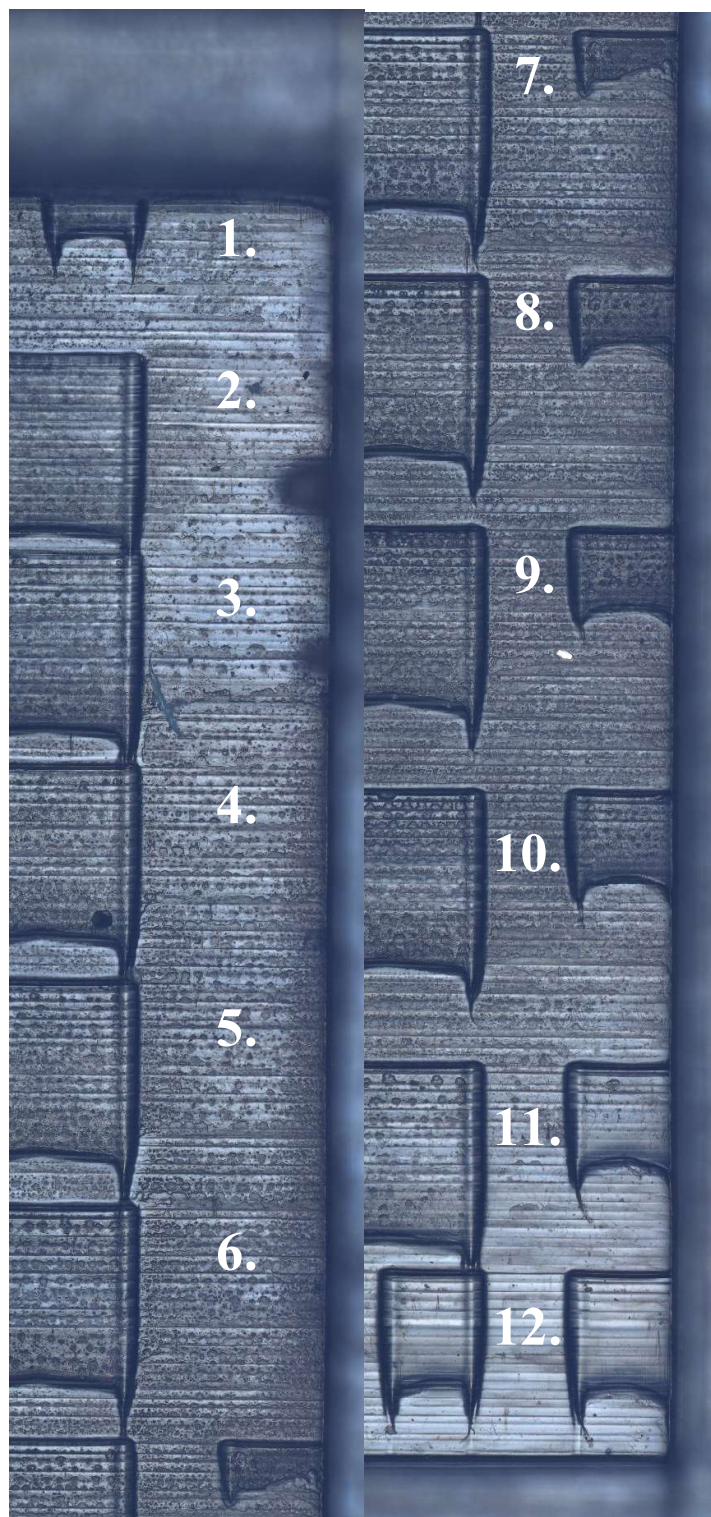
4.5.2 ábra - A 600 μm magasságú pozitív blokkok szélességváltozása az 50-500 μm-es tartományban

A fogak – kisebb szélességű blokkok esetében tapasztal – összenövése a blokk közepének magassági változását is maga után vonja, emiatt a blokkok magassága a névleges érték felett van. Jellemzésére az előzőekhez hasonlóan bevezetjük $\delta(m)$ mennyiséget, a mért és tervezett magasság különbségét. 50 μm-es blokk szélesség esetén $\delta(m) = 100 \mu m$ eltérés tapasztalható. A fogak szétválása a 150 μm-es szélességnél kezdődik meg, azonban a blokk közepének magassága egészen a 250 μm szélességig még nem éri el az állandósult értékét. Ezt követően a magasság telítési görbét mutat 250 μm-es értéke felé, tehát a kezdőblokk 350 μm-es névleges értékéhez képest az eltérés $\delta(m) = -100 \mu m$. Az eltéréseket a 4.5.3 ábra szemlélteti.



4.5.3 ábra - A mért magasság függése a névleges szélességtől, a blokk széleinél és közepénél.

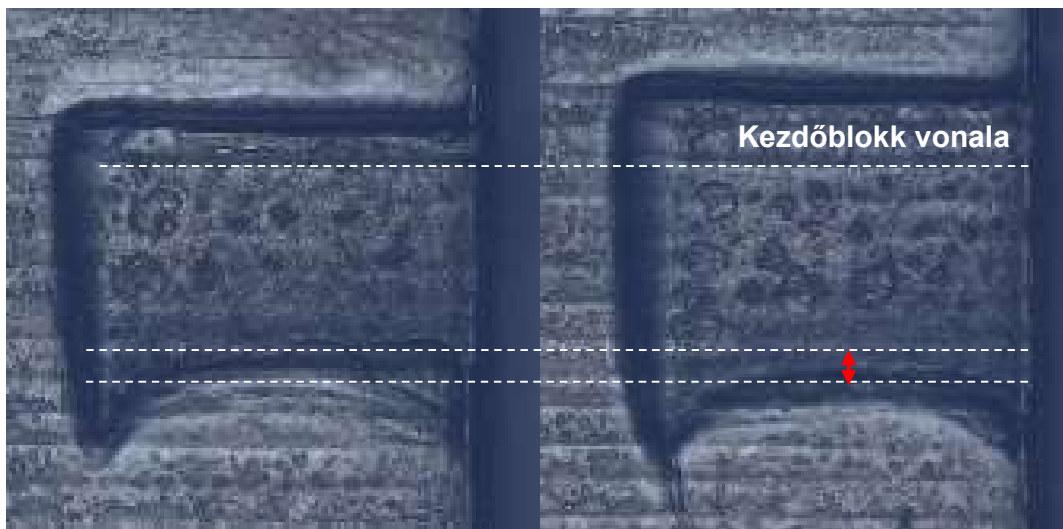
A kocka jobb- és bal oldali elemeinek – azaz mikor a blokkok magasságát változtatjuk – vizsgálata során azt tapasztaljuk (lásd. 4.5.4 ábra), hogy az első hat (50-300 μm névleges magasságú) blokk hiányzik, a nyomtatás során ezek egyszerűen nem készültek el. Ezt követően, azaz azon esetekben, amikor a nyomtatónkat egy 350 μm névleges magasságúnál, azaz 7 db 50 mikronos rétegnél vastagabb blokkok nyomtatására utasítottuk akkor a tervezett test 7. rétegénél egy monolit kezdőblokk épült meg, majd az ezt követő rétegek már „normális” módon, azaz rétegenként épültek rá a kezdőblokkra. Megjegyzendő azonban, hogy a kezdőblokk függőleges mérete a 8., 9. és 10. rétegek építésekor tovább növekedett (lásd. 4.5.5 ábra) és magassága az 500 μm névleges magasságú blokk felett állandósult.



4.5.4 ábra - A 350 μm széles pozitív blokkok magasságváltozása az 50-600 μm -es tartományban

Felmerül a kérdés, hogy a kezdőblokk mérete hogyan változhat akkor, amikor a nyomtató a már korábban megépített elemek „fölé” polimerizál új anyagot. A mérésekből azt találtuk, hogy a kezdőblokk mérete „lefelé” nő, azaz az újabb pásztázások során a nyomtató nem csak a felül

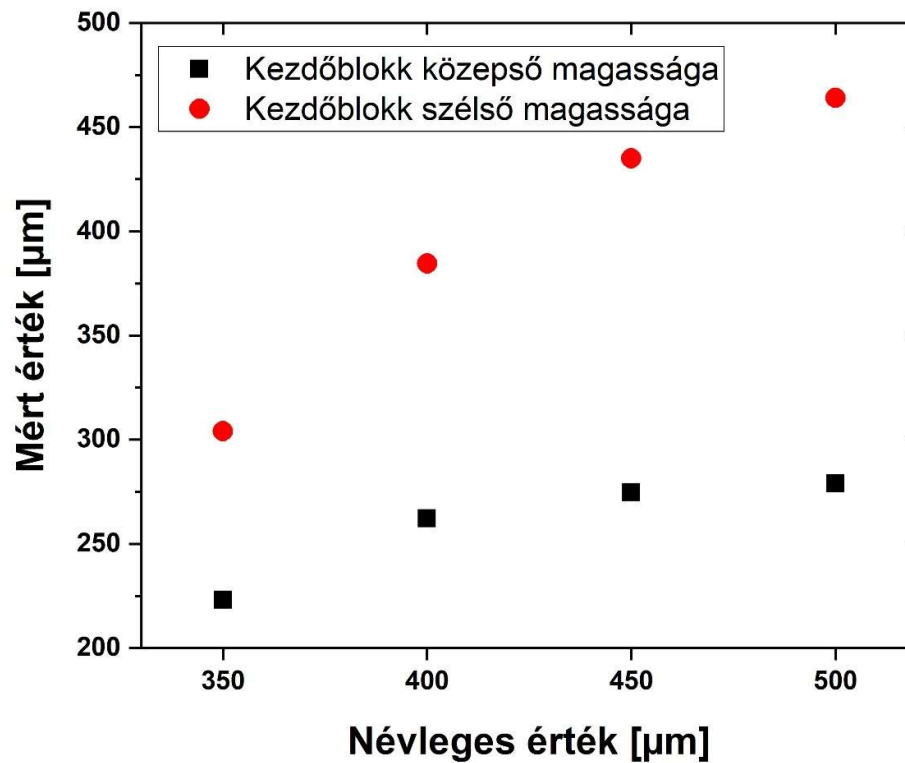
lévő műgyantát szilárdítja meg, hanem a már a korábbi pásztázások alkalmával megszilárdított anyag alatt is polimerizál. Ez eredményezi a kezdőblokk méretének látszólagos növekedését. Ez a méretváltozás a kezdőblokk teljes alsó részét, azaz mind az ívet, mind pedig a fogakat érinti: a kezdőblokk mindkét régió mentén nő. Azonban a méretnövekedés az ív és fog eseteiben, ahogy azt az 4.5.6 táblázat adatai meggyőzően mutatják eltérő mértékű.



4.5.5 ábra - A 300 és 350 μm magasságú blokkok íveinek középső pontjának magasságkülönbsége

Blokk névleges mérete [μm]	Kezdőblokk közepének méretváltozása [μm]	Kezdőblokk szélének méretváltozása [μm]
400	39	80
450	13	51
500	4	29

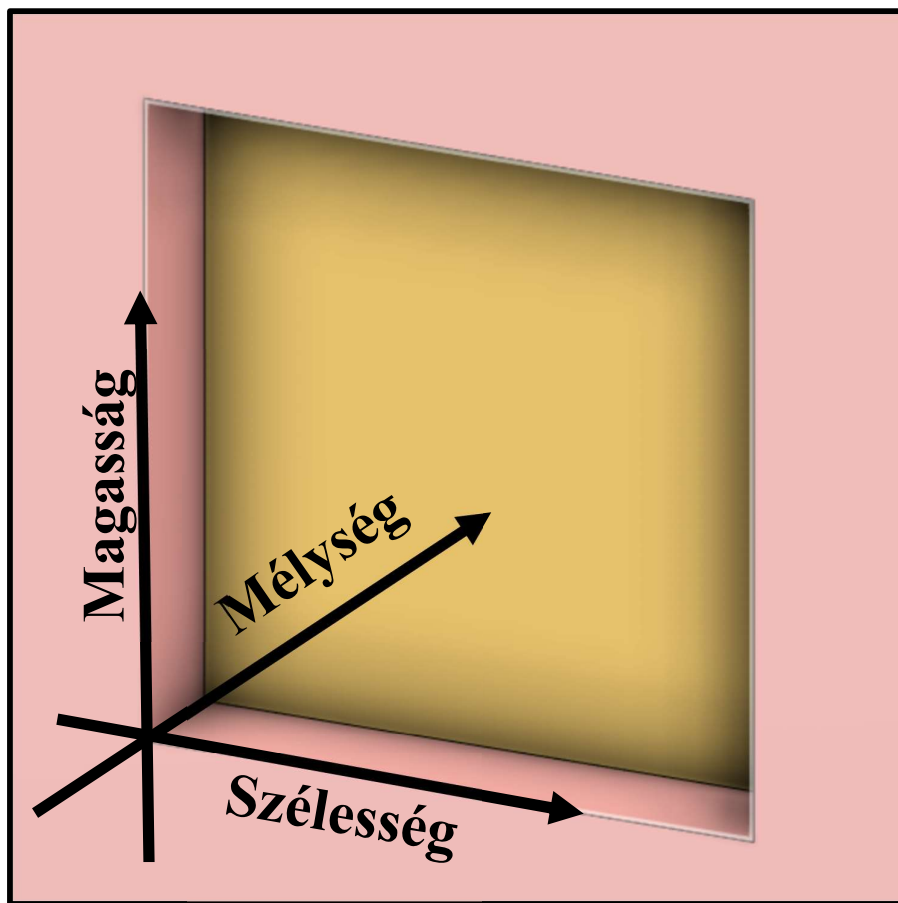
4.5.6 táblázat - A kezdőblokk méretváltozása a névleges blokkmagasság függvényében, az előző blokk magasságához viszonyítva.



4.5.7 ábra - A kezdőblokk magasságának változása a blokk névleges méretének függvényében. A mérési pontok a középső magasságnál jól láthatóan telítési görbét mutat.

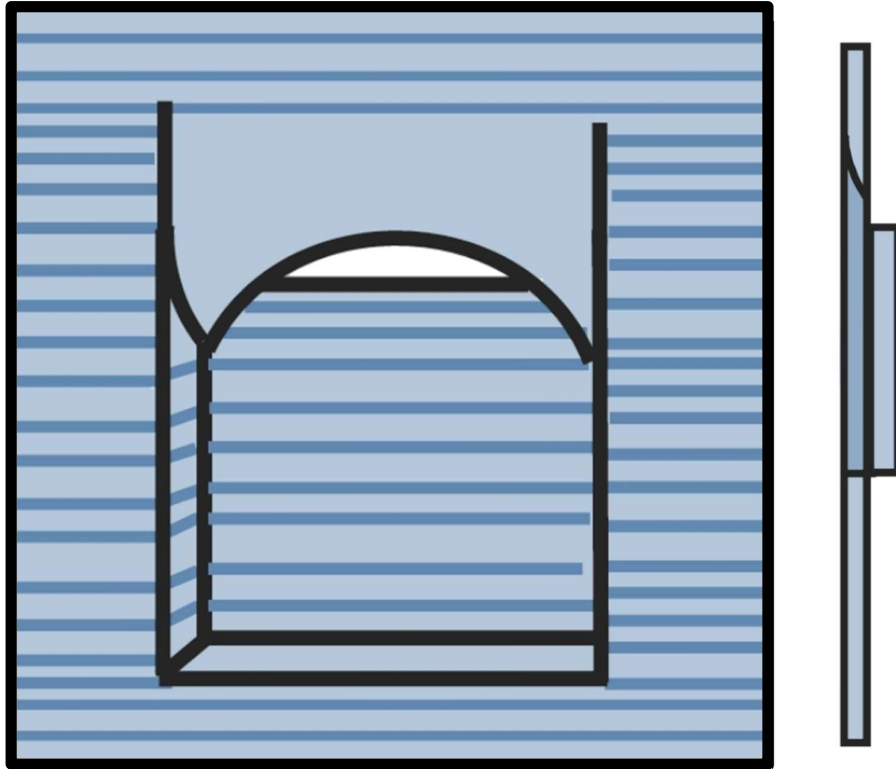
Ezzel leírtuk a pozitív blokkokra jellemző főbb geometriai elváltozásokat. A következőkben a negatív blokkok jellemző eltéréseit tárgyaljuk.

4.5.2 Negatív blokkok viselkedése



4.5.8 ábra - A negatív blokk méreteinek megnevezése

Hasonlóan a pozitív blokkokhoz, a negatív blokkoknál is megjelenik a kezdőblokk jelensége, azonban itt nem a struktúra alján, hanem az őt határoló felső peremen. Az előző vizsgálatok eredményeiből arra következtetünk, hogy abban az esetben, amennyiben a negatív blokkot körülvevő pozitív blokkok – szegély/perem – magassága nem éri el a $350\text{ }\mu\text{m}$ -t, a modell felső szegélye hiányozni fog. Ez, mint az alaplapp vizsgálta során is megemlítettük, a modell erős deformációját fogja okozni. Továbbá, amennyiben a modell nem tartalmaz a kezdőblokk irányába túlnyúló alaplamezt (lásd. 4.5.8 ábra) a negatív blokkok mögött, a kezdőblokkhoz tartozó ív magasságának változása miatt a teljes modell folytonossága sérülhet, lyukak keletkezhetnek a felszínen.



4.5.9 ábra - A negatív blokk folytonossági hibájának sematikus ábrája. Bal oldalon látható a besüllyedő negatív blokk, felső peremén a kezdőblokk és az ív alatt a hiányzó alaplap. Jobb oldalon oldalnézetből az ív közepének metszete, amin látszik az alaplap mérete, azonban a szélességi túlnyúlása nem, ami azt rögzíti a felső lemezhez.

A negatív blokkok valós magassága a felső peremének, azaz a kezdőblokk ívének magasságváltozását követi. Ez azt jelenti, hogy a fog a negatív blokk magasságából 50-100 μm -t elvesz, az ív közepe azonban ahhoz 150-100 μm -t hozzáad. Jól látható, hogy mindkét régió 50 μm -es változáson esett át, a fog ezért a névlegestől több, az ív közepe pedig kevesebb eltérést mutat. Ebből az is következik, hogy a negatív blokkok magassága ismeretében a felső perem ívének magasságváltozása jól követhető.

A fogak mérete – a pozitív blokkoknál leírtakhoz hasonlóan – hatással van a blokk magasságára, az azonban külön megemlítendő, hogy amennyiben a blokknak nem kellene oldalsó peremmel rendelkeznie, de a magassága kisebb, mint a fogé, a struktúra mégis megjelenik, ami komoly, akár funkcionális hibát eredményezhet. Nagyobb méretek esetén a blokk átjárható lesz, azonban a rendelkezésre álló távolság a fog magasságával csökken. Erre mutat példát a 4.5.9 ábrán:



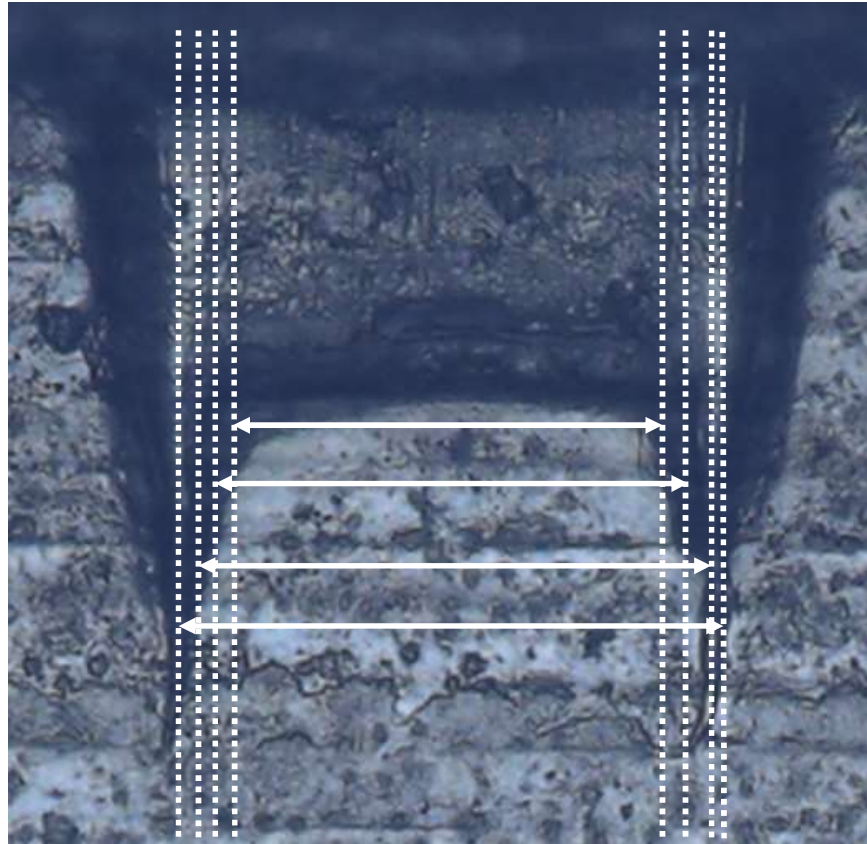
4.5.10 ábra - A negatív blokk elzáródását okozó fogak. Az ábrán látható, hogy a középben lévő pozitív blokk alatti negatív blokk nem rendelkezik oldalsó peremmel, de felső peremének fogai leérnek az alsóig, így azok az oldalakat elzáródását okozza. A felette lévő negatív blokk esetén a fogak nem zárják el az oldalakat, azonban méreteiknek köszönhetően a blokk magassága itt jelentősen lecsökkent.

A fogak szétválása a köztük lévő magasság változását okozza, ugyanis az ebben szerepet játszó ív a blokk nagyobb szélességein jobban megemelkedik, a távolság az alsó és felső perem között eszerint nő meg. A magasság a pozitív blokkok ívének viselkedését leíró részben meghatározottak szerint változik. Ez az eltérés nagyobb szélességek esetén a fogaknál elhanyagolható, a valódi magasságot az ív közepe határozza meg.

A blokkok szélessége azonban az oldalsó peremek hatására is változik, mivel a pozitív blokkoknál említett szélességi megnagyobbodás negatív blokkoknál a szélességcsökkenését okozza, azaz a negatív blokkok szélessége a névleges értékükhöz képest nagyságrendileg $50\text{ }\mu\text{m}$ -rel kisebb lesz. Ez a jelenség minden szélesség esetén megfigyelhető, azonban az $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ -es tartományban az egyes élek gerinceinek összeérését és a blokk feltöltődését okozza, ezzel ellehetetlenítve méréseket is.

A szélességet befolyásolja továbbá a fogak és az ív alakja is. A mérési pont ívtől viszonyított távolságával arányosan változik a mért érték, ívhez közel keskenyebb, míg attól távolodva

egyre szélesebb. A fogak szélét elérve állandó lesz, megegyezik az oldalsó peremek távolságával.



4.5.11 ábra - A negatív blokk szélességváltozása az ív mentén. A negatív blokk szélessége a felső peremtől távolodva szélesedik, a fogak alatt az oldalsó peremek távolságával lesz egyenlő.

A negatív blokkok szélességének változtatása magassági eltérést is okoz. 150 μm -nél keskenyebb blokk esetén a felső perem fogai összeérnek, a túlexponált régió kitölti az alatta rendelkezésre álló területet.

4.6 A lézernyaláb és a műgyanta kölcsönhatásának modellezése

4.6.1 Fotopolimerizációs modell

Az alábbiakban az SLA nyomtatási technológia vektor pásztázásos megvalósítására vonatkozó fotopolimerizációs modellt a Ian Gibson és *mtsai* által írt Additive Manufacturing Technologies című könyv [4] 4.5 fejezetében bemutatott fizikai modellre alapozva mutatom be. A modell segítségével megmondható a polimerizációt kiváltó Gauss-os lézernyaláb intenzitása a folyékony műgyantatartály tetszőleges pontjában, miközben figyelembe veszi a gyanta fényelnyelését és fotopolimerizációjának folyamatait. A modell a lézernyaláb és a nyomtatáshoz felhasznált műgyanta leírására a következő paramétereket használja:

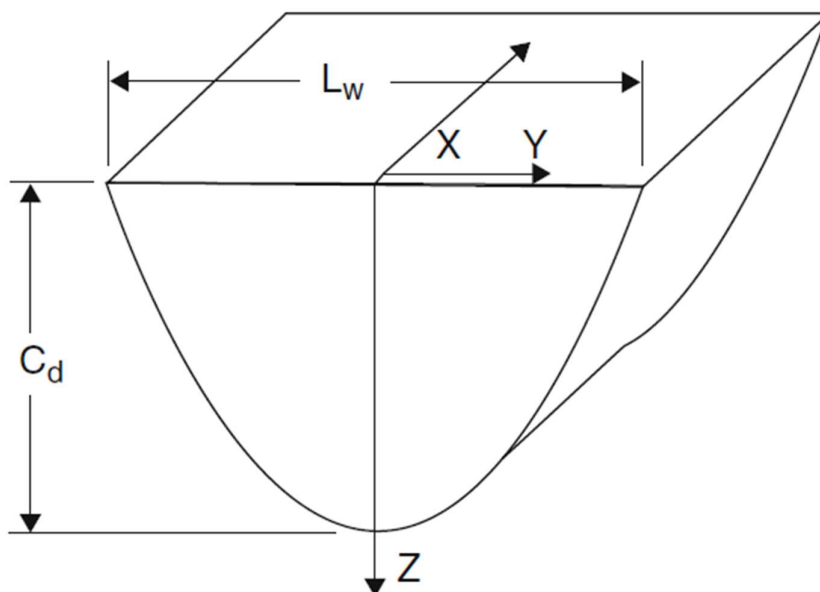
- Lézernyalábra jellemző paraméterek:
 - E – expozíció, a gyantafelszín egységnyi felületébe jutó lézerenergia [mJcm^{-2}]
 - P_L – lézerteljesítmény, ami a lézernyaláb teljes keresztmetszetén időegység alatt áthaladó fényenergia [W]
 - W_0 – gyantafelszínre fókuszált lézernyaláb $1/e^2$ -es átmérője, azaz annak a körnek az átmérője, amelyen belül a lokális energiasűrűség nagyobb, mint a Gauss-eloszlású lézernyaláb központi, maximális energiasűrűségének e^2 -ad része [mm]
 - V_s – pásztázási sebesség, azaz a gyantafelszín és a lézernyaláb relatív sebessége [mm/s]
- Műgyantára jellemző paraméterek:
 - D_p – a műgyantának a lézer hullámhosszán jellemző fényelnyelését leíró behatolási mélység, amely azt a „gyantaréteg” vastagságot jelenti, amelynél a nyaláb belépési intenzitása e -ed részére csökken [mm]
 - C_d – polimerizációs mélység, a gyanta megvilágítása által megszilárdított műgyanta vastagsága [mm]
 - E_c – az a kritikus expozíció, amelynél a műgyanta polimerizációja megkezdődik [mJ/cm^2]

A modell a Gauss-nyaláb intenzitásváltozása és a nyomtató pásztázási sebessége segítségével írja le az intenzitás laterális változását, míg a gyanta axiális fényelnyelését a Lambert-Beer törvénnyel jellemzi. A modell alapján az x tengely irányába végtelen hosszú pásztázás tetszőleges pontjára jutó energia:

$$E(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s(x)} e^{-2y^2/W_0^2} e^{-z/D_p}, \quad (1)$$

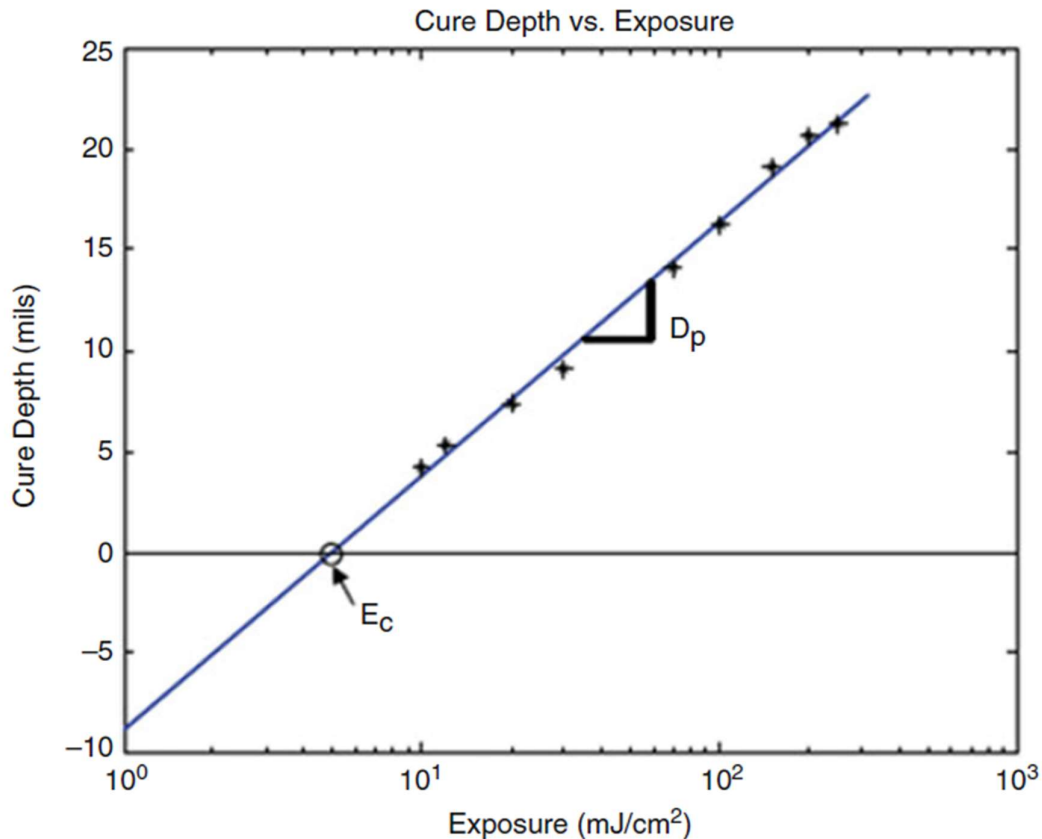
A nyomtatás szempontjából az a határfelület lényeges, aminél a polimerizáció megáll. Erre a felületre jutó energia megegyezik a kritikus expozícióval, azaz az egyenlet bal oldalára ezt az értéket behelyettesítve $y = 0$ értékre és z -re átrendezve megkapjuk a polimerizáció maximális mélységét, C_d -t a megvilágító lézernyaláb középpontjában. Ennek az értéke:

$$C_d = D_p \ln \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s(x) E_c} \right), \quad (2)$$



4.6.1 ábra - A fotopolimerizációs modell műgyanta szilárdítási vonala, az egyes dimenziók és a vonalra jellemző néhány mennyiség. [4]

A (2) egyenlet alapján és egy adott gyantára jellemző paraméterek ismeretében ábrázolható az expozíció– polimerizációs mélység görbe (lásd. 4.6.2 ábra).



4.6.2 ábra - A Cure Depth függése a linearizált expozíciótól. Látható az E_c vonala, ami alatt nincs polimerizáció. [4]

A kritikus expozíció alatt a görbe negatív értékeket vesz fel, aminek azonban valós fizikai tartalma természetesen nincsen. Ha a lokális intenzitás E_c -nél kisebb, akkor nem keletkezik szabad gyök, ami a polimerizációt megindítaná, tehát a műgyanta nem szilárdul meg. Ezért minden ilyen esetben a polimerizációs mélységet zérusnak tekintjük.

Fontos továbbá megállapítanunk, hogy az z vs. $\ln(E)$ síkon kapott egyenes meredeksége D_p -vel, x tengellyel alkotott metszéspontja pedig E_c -vel egyezik meg. Azaz ez a kalibrációs grafikon kizárólag a gyanta paramétereitől függ, a lézernyaláb jellemzőitől független.

4.6.2 Hibás régiók értelmezése a modell alapján

A (2) -es egyenlet alapján látható, hogy a fotopolimerizáció küszöbszerű viselkedése miatt egy adott teljesítményű lézernyaláb segítségével nem hozható létre tetszőleges vékonyságú szilárd réteg: az első pásztázás egy – a nyomtató és a műgyanta paramétereitől által – jól meghatározott magassággal rendelkező réteget hoz létre. A tálca süllyesztése lépésközének szabályozásával csak ezen kezdőblokk létrejötte után tudunk rögzített vastagságú rétegeket fotopolimerizálni. A mintáinkon először a 7. rétegnél megjelenő, meghatározott magassággal rendelkező monolit „réteg” az 4.5.1 alfejezetben bemutatott kezdőblokk. Az a tény, hogy ennek az elemnek a

polimerizációja egyben történik, arra enged következtetni, hogy a gyanta és a lézernyaláb kölcsönhatását pontosan ismerő cég szeletelő programjának gyártási utasításába szoftveres kompenzáció került: azaz a fejlesztők által a gyantafelszínre merőleges irányban korlátozva vagyunk, azaz csak 350 μm -nél nagyobb elemek nyomtatása lehetséges.

A modell segítségével magyarázni tudjuk a rámpa létrejöttét is. Abban az esetben, ha a (1) -es egyenletet nem $y = 0$ -ra, hanem tetszőleges y értékre értelmezzünk, adott z értékre megállapítható a polimerizációs szélesség:

$$y = \frac{w_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\ln \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 V_s(x) E_c} \right) - \frac{z}{D_p}}, \quad (2)$$

Mivel az y értéke a z négyzetgyökével arányos, a laterális polimerizáció a magasság függvényében parabolikus profilt mutat.

[Kép a blokkról, rajta bejelölve a koordinátatengelyeket]

Ahhoz, hogy modellünkkel további geometriai hibák keletkezése legyen magyarázható írjuk át egyenleteinket változó pásztázási sebességre. Ilyen helyzet a blokk metszetek bal és jobb szélein állhat elő. Amennyiben – a bal szélén – azt feltételezzük, hogy a nyaláb sebessége kezdetben (azaz $x=0$ pontban) nulla majd egy állandó a gyorsulással V_{max} értékre növekszik, akkor a pillanatnyi V_s sebesség az x koordináta függvényében úgy írható fel:

$$V_s = \sqrt{2ax} \quad \left\{ 0 < x \leq \frac{V_{max}^2}{2a} \right\}, \quad (4)$$

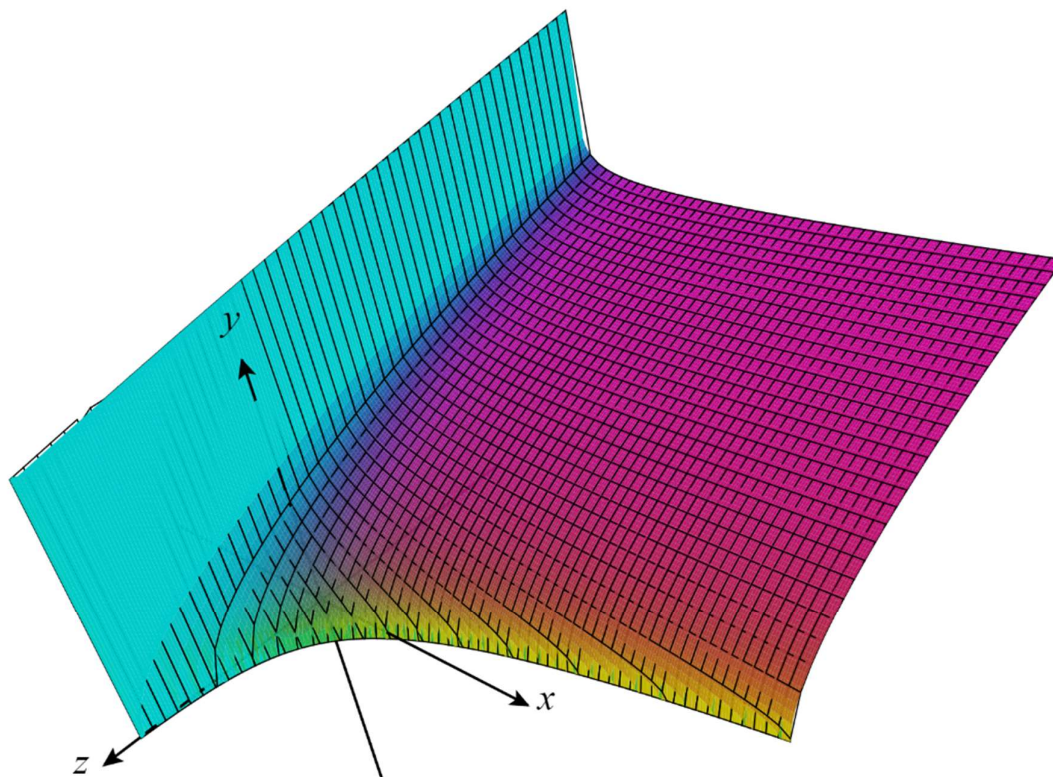
Ezt (2) -be és (3) -ba behelyettesítve, a mélységi polimerizáció és a haladási irányra merőleges laterális polimerizáció képletét kapjuk a gyorsulási szakaszon:

$$z_v = D_p \ln \left(\sqrt{\frac{1}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 \sqrt{ax} E_c} \right) \quad \left\{ 0 < x \leq \frac{V_{max}^2}{2a} \right\}, \quad (5)$$

$$y_v = \frac{w_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\ln \left(\sqrt{\frac{1}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 \sqrt{ax} E_c} \right) - \frac{z}{D_p}} \quad \left\{ 0 < x \leq \frac{V_{max}^2}{2a} \right\}, \quad (6)$$

A réteg pásztázása során azonban nemcsak a nyaláb gyorsulásával, de lassulásával is számolnunk kell, a blokk metszetek jobb széleinél. Feltételezve, hogy a lézer felszínhez viszonyított mozgása azonos abszolút értékű a -val gyorsul és lassul, a fentebb kapott háromdimenziós képet az x =blokkfelező síkra tükrözve kaphatjuk meg a lassulás során polimerizálódott test 3D alakját. Ez okozza ezen alakhibák szimmetriáját. Az (5) és (6)

egyenletek által leírt térbeli felület írja le a modellünk szerint a gerinc, a fog, az ív és a medence jellegzetes alakját. A továbbiakban ezért segítségükkel értelmezzük ezen hibatérképek keletkezését.



4.6.3 ábra – A (6)-os egyenlet 3D-s ábrázolása, az egyes paramétereket úgy megválasztva, hogy az egyenletben a konstansok kiessenek. Z tengely felel meg a magasságnak, y tengely a vastagságnak, míg x tengely a szélességnek, egyben ez a pásztázás iránya.

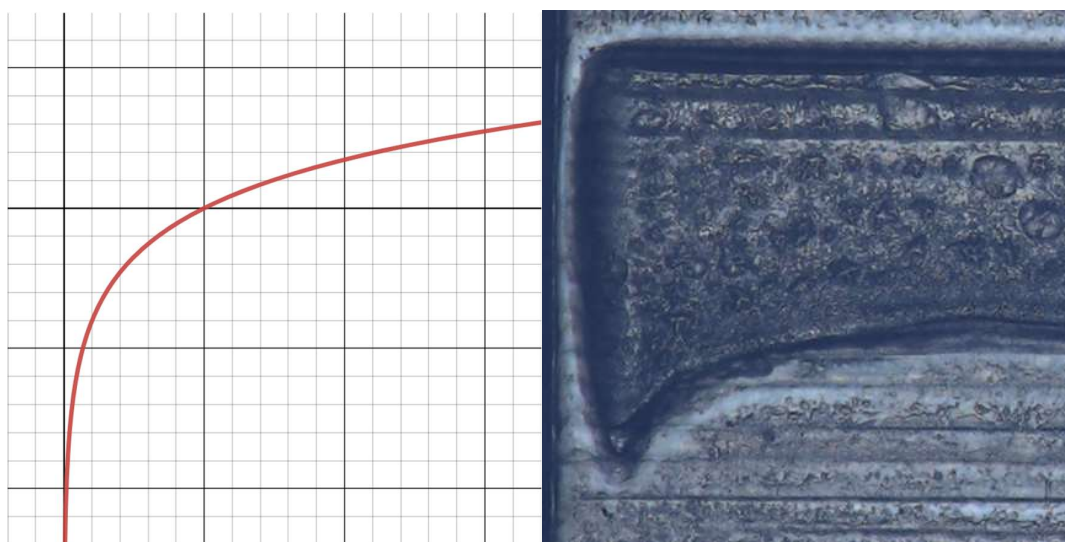
A gerinc megjelenésének oka, hogy a pásztázás kezdi/végső szakaszán gyorsuló/lassuló nyaláb a $V_{\max}$ -nál kisebb sebességek miatt hosszabb ideig tartózkodik ezen területek felett, s így állandó lézerteljesítmény mellett a végsebesség állapotához viszonyítva nagyobb mennyiségű energiát közöl a gyantának, azaz több anyagot polimerizál. Ez végeredményben a „gerincszerű” megnagyobbodást okozza, mind az x, mind az y tengely mentén.

Az eddigiek alapján belátható, hogy az egyes geometriai elemek laterális kiterjedéseinek maximumát az őket felépítő első pásztázás során elérik. Tehát a medence megjelenését egyedül a sebességváltozás indokolja. A sebességprofilt követve, a blokk kezdeti és végső szakasza kiemelkedésként, közepe azonban bemélyedésként fog megjelenni, mivel itt a pásztázás

sebessége az optimálishoz képest – az a sebesség, aminél a pásztázás a tervezett vastagságú műgyantát polimerizálja – nagyobb, így kisebb lesz a polimerizált gyanta vastagsága. Ezen változások összessége eredményezi a medence, mint hibás régió megjelenését.

A fogak geometriáját és megjelenését a gerincek keletkezéséhez hasonlóan magyarázzuk. A gyantába z irányba is a szükségesnél több lézerenergia deponálódik a gyorsítási és lassítási szakaszokon, ami a z tengely menti fogak megjelenésének magyarázata. Megjegyzendő, hogy az x és y irányba is megvastagodott az elem, azonban az (2) -es képlet alapján az axiális változás, a laterális eltérést leíró (6) egyenlethez képest, szignifikánsabb.

Így most már értelmezhető az ív is. A medencéhez hasonlóan itt is a gyorsulásnak, illetve lassulásnak köszönhető a változás és a látványos magasságkülönbség a fogaknál leírtak miatt történik. Az (5) -ös egyenlet alapján az ív alakja a pásztázott távolság $\ln \frac{1}{\sqrt{x}}$ -el arányos. Ezen függvény grafikonja kvalitatíve jól közelíti az ív alakját, azonban a mért és számolt görbék eltérést mutatnak. Az eltérés magyarázata lehet az, hogy az a feltevésünk, miszerint a gyorsulás állandó, nem állja meg a helyét. Ennek a viselkedésnek a feltárására ezért további vizsgálatokat igényel.



4.6.4 ábra - A (5)-ös egyenlet alakja és a valós ív. Az egyenlet paramétereit úgy választottuk meg, hogy az egyenletben a konstansok kiessenek.

4.6.3 Extracure modell

Az eddig tárgyalt esetek számos kísérleti tapasztalatunkat magyarázták, azonban még maradtak megoldatlan problémák. Egyik ezek közül az a jelenség, hogy a kezdőblokk mérete a felette lévő rétegek számától függően változott. Azt találtuk, hogy a kezdőblokk magassága növekedett a 8-10 rétegek kialakítása során. Azt feltételeztük, hogy a nyaláb egy része átjut a

már polimerizálódott mügyantán és abból a gyantába visszalépve tovább polimerizálja azt. A fotopolimerizációs modell kibővítésével alább kísérletet teszünk magyarázni ezt a viselkedést.

Feltételezzük, hogy a polimerizált és polimerizálatlan gyanta bizonyos anyagi tulajdonságai eltérnek. A kritikus expozíció polimerizált gyanta esetén nem értelmezett, ilyen paraméterrel nem rendelkezik, azaz $E_{C_2} = 0$. Számításink során azt is feltételeztük, hogy a gyanta két állapotához tartozó behatolási mélységek is különböznek, és eltérésük a következő arányossággal írható fel:

$$\frac{D_{p_2}}{D_{p_1}} = \alpha, \quad (7)$$

ahol D_{p_1} a polimerizálatlan, D_{p_2} a polimerizált gyanta fényelnyelését jellemző behatolási mélysége.

Az (1)-es egyenlet magassági tényezőjét két részre bontva kifejezhető, hogy a nyaláb a távolság egy részét a polimerizálatlan, míg a fennmaradó utat a polimerizált gyantán keresztül teszi meg. Ezt alkalmazva arra az esetre, amikor az utolsó megszilárdult réteg a kezdőblokk és felette lévő első réteget pásztázza a lézer, az egyenlet könnyen megoldhatóvá válik:

$$E = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s(x)} e^{-z_d/D_{p_1}} e^{-z_k/D_{p_2}}, \quad (8)$$

ahol z_d a polimerizálatlan gyantában megtett út, z_k a kezdőblokk kezdeti magassága.

Ebbe behelyettesítve a (8)-as képletet, és α -ra megoldva a következő összefüggést kapjuk:

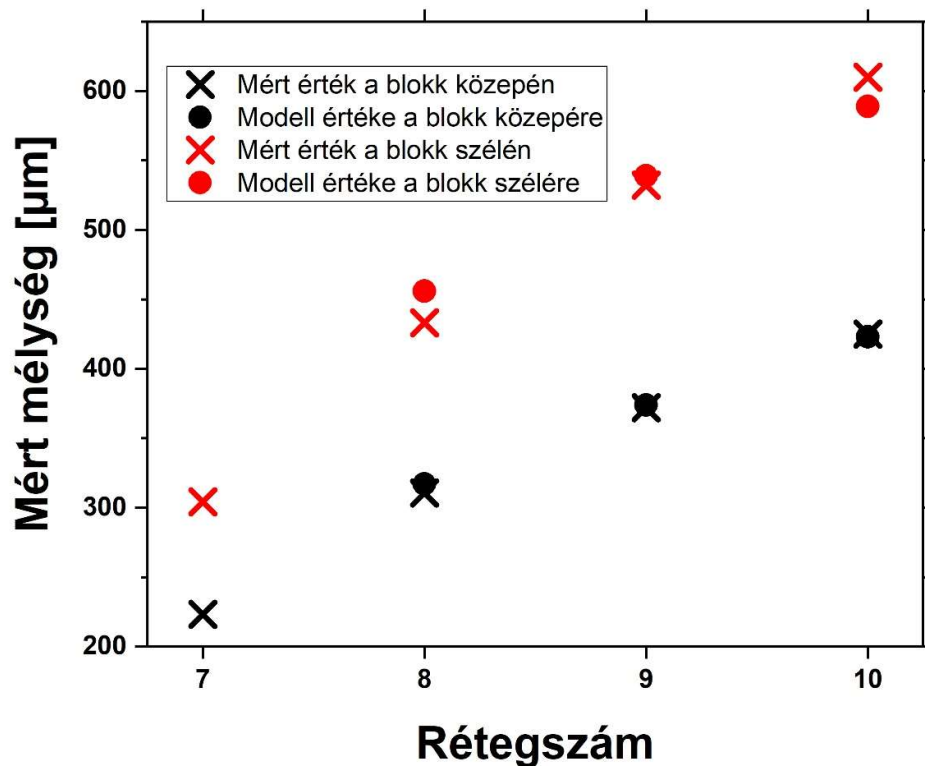
$$\alpha = \frac{z_k}{z_k - z_d}, \quad (9)$$

A mérések alapján α értéke pozitív, 1-nél nagyobb szám. Ez alapján megoldjuk a (8)-as képletet a polimerizálatlan gyantában megtett útra, majd a polimerizált út új értékét visszaírva, kiszámíthatjuk a következő magasságváltozást. Megjegyzendő, hogy negatív értékek esetén a blokkból nem jut ki polimerizációra képes nyaláb (a kilépő energiasűrűség a küszöbnél kisebb), innentől a kezdőblokk mérete nem változik. Ezekkel a felvetésekkel kíséreltük megjósolni a további rétegek hatását a kezdőblokk magasságára (lásd. 4.6.4 ábra).

$$n_e = \frac{\ln \frac{z_L}{z_k}}{\ln \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}, \quad (10)$$

$$z(n) = z_k + (n - 1)z_L + \int_0^{\min(n, n_e)} z_k \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^x - z_L dx, \quad (11)$$

ahol n_e az utolsó extracure réteg száma, n pedig a kezdőblokk utáni rétegek száma



4.6.5 ábra - Az extracure modell összehasonlítása a mért blokkméretekkel.

5 Nyomtatások értékelése

Az alaplemez minősége vízszintes helyzetben a nyomtató képességei által korlátozott, azonban függőleges orientációban nagymértékű felbontásnövekedést tapasztaltunk. A rétegvastagság pontatlansága nagyobb populáció esetén is érzékelhető eltérés, azonban az, hogy a végtermék mérete kisebb eltérést mutat a tervekhez képest, mint a vastagsági hiba arányosítása a teljes magassághoz, a gépi, vagy szoftverei kompenzáció lehetőségét veti fel. Ezt azonban a kutatás során nem vizsgáltuk.

A pozitív blokkok összességében mind a pásztázás irányában, mind a rétegváltozás irányában megnagyobbodott. A változás alul az egyik kivétel a blokkok felső íve, amit a folyékony gyanta felszínét mintául használva őriztük meg a megfelelő szilárdítási magasságot. Második kivétel az ív közepén fellépő csökkent polimerizáció, ami a pásztázási sebesség változásán alapuló változás. A pásztázás irányára merőlegesen azonban lényeges eltéréseket tapasztaltunk, a gerincek mentén anyag többleti, a blokk közepén anyaghiányt, melyek nem okoznak gyökeres változást a közelben lévő struktúrákban. Ezzel szemben a rámpa hatására blokk alsó falának meredeksége lényegesen lecsökkent, hirtelen kiemelkedés helyett egy fokozatosan változó magasságról beszélhetünk. A kezdőblokk magasságfüggését a jelenlegi modell segítségével még nem tudtuk teljesen megmagyarázni, azonban bizonyos mértékben a jelenséget sikerült jellemezni.

Negatív blokkok vizsgálata azt az eredményt hozta, hogy a pozitív blokk rámpájához hasonlóan, a felső perem viselkedése is a rá jellemző egyediségeket követi. Nem látja el feladatát, illetve az ív közepének behúzódása megváltoztatja a valós magasságunkat, valamint a fogak szűkítik a bal-jobb oldaloldalon a blokkot. Az ezen peremekkel nem rendelkező blokkok méretüktől függően átjárhatatlanná válnak, illetve a megfelelő alaplemez nélkül a struktúra folytonossága sérülhet. Mindezek mellett a két szélső perem gerince megvastagodás következtében a blokk szélessége tovább csökkent.

6 Tapasztalatok

6.1 Pozitív blokkok

Az elemzések összességéként a nyomtatás tapasztalatait tudjuk megfogalmazni. Egyik ilyen, hogy a nyomtatási magasság bármilyen eddig szabad felület felett minimum a kezdőblokk magasságával megegyezőnek kell lennie, különben a részlet eltűnik. Ez nem csak a modellen

lévő különböző elemekre vonatkozik, hanem annak legelső rétegére is, ami geometriájától függetlenül a kezdőblokkhoz hasonlóan fog felépülni.

A kiszélesedés hatására a tárgyunk laterális irányban 25 μm -el megvastagszik. Vékony, illetve kis hibahatárú nyomtatások esetén ez problémát jelent, főleg, ha a nyomtatási paraméterekkel, vagy a tervezés során nem tudjuk kompenzálni ezt a hibát úgy, hogy a nyaláb szélesség alá ne kerüljön a geometria, ugyanis ilyenkor a szeletelés közben a szoftver kihagyja ezeket a részleteket.

Az ív alakjából következően a tervezett struktúrák pontos magasságát nem tudjuk egyértelműen leírni, az a mérési helytől függ. Ezért azok a funkciók, amelyek a blokk alsó ívének állandó méretét követelnék meg, kis méretű elemek esetén nem érhetőek el.

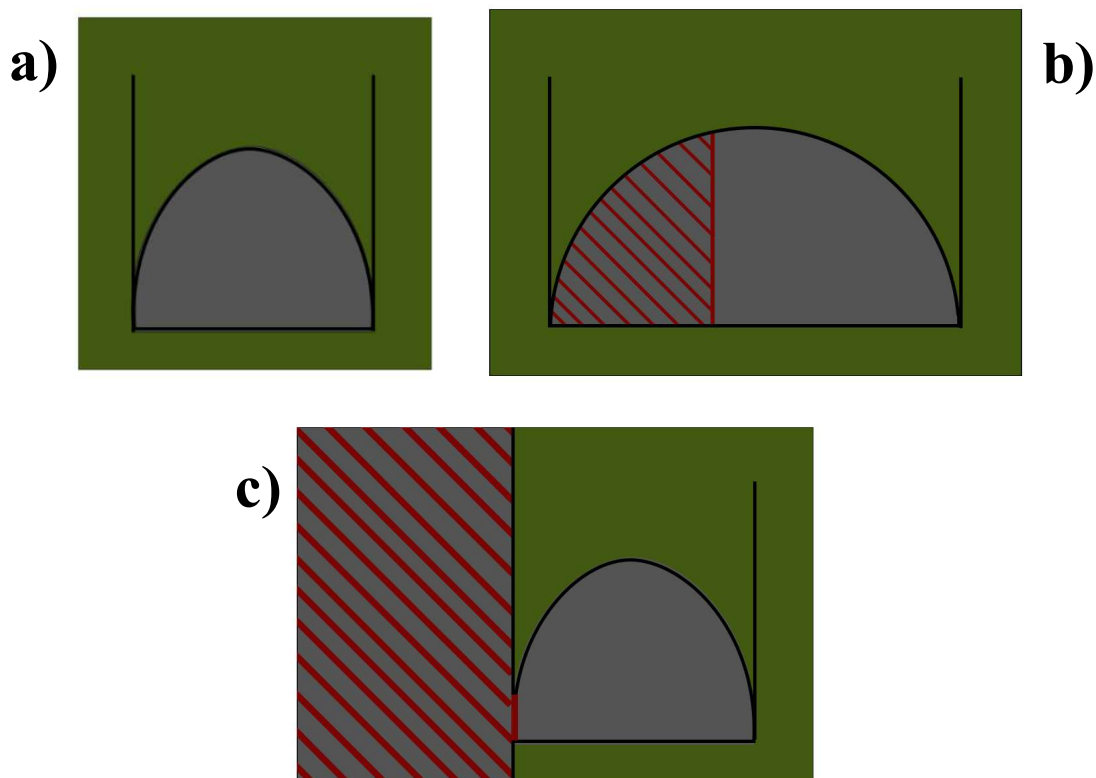
A gerinc, a fog, medence és a rámpa meghatározza a blokk egyes oldalairól látható effektív magasságot. Bal és jobb oldaláról magasabbnak látszik, mint a tervezett. Felső élén a medence görbülete határozza meg ennek az értékét, azonban ez az emelkedés még jó közelítéssel függőleges maradt. Ellenben az alsó oldalát tekintve nemcsak, hogy a rámpa alakja miatt nem egy hirtelen emelkedést tapasztalunk, hanem egy lassabb emelkedést, de a fogak magasságnövelő hatása miatt ennek az emelkedésnek a mértéke a mérés pontjától is függeni fog. Mivel az alsó él nem viselkedik falként, így az erre épülő funkciók (pl. feszes illeszkedés a falak közbezárásával) nem működnének. A medence továbbá a blokkon belüli bemélyedést is okozza. Ennek eredménye, hogy a felület nem lehet sima, gödörként viselkedik.

6.2 Negatív blokkok

Hasonlóan a pozitív blokkokhoz, itt is figyelembe kell vennünk a gerincek okozta megvastagodást, azonban ebben az esetben ez nem, mint kiszélesedés, hanem mint a geometria beszűkülése fog jelentkezni. Ezt szintűgy lehet a tervekben módosítani, de ennek feltétele, hogy a blokkot határoló peremek szélessége ne csökkenjen a minimális érték alá. Ellenkező esetben ez két negatív blokk közti fal megszűnését okozhatja, aminek hatására szeparáló funkciójukat nem tudnák ellátni.

A felső perembe helyezett kezdőblokk késve fog megjelenni az építés során, látható (függőleges) határfelület látszik. Ezen felül a kezdőblokk íve meghatározza, hogy az alaplap mekkora részének kell a negatív blokk körül, vele egy szintben lennie, hogy ne keletkezzen folytonossági hiba a modellben.

Abban az esetben, ha a negatív blokk bal és/vagy jobb oldalát perem mentesíteni szeretnénk, figyelembe kell vennünk a felső perem fogainak kiterjedéseit is (lásd. 6.2.1 ábra). Fontos megjegyezni, hogy amennyiben a blokkot csupán az oldalának magasságában peremtelenítjük, a kezdőblokk kitolódik az új felső ív szélére. Amennyiben a negatív blokkról az oldala mentén vágjuk le a peremét, úgy a kezdőblokk megmarad az eddigi helyén. Nagyobb méretű blokkok esetén a fogak magassága nem számottevő a teljes magassághoz képest, azonban kisebbek esetén akár azt is okozhatja, hogy az oldalsó peremek megszüntetésével, továbbra is zártak lesznek az oldalak. Erre megoldás lehet, ha a felső peremet megemeljük, vagy eltüntetjük, de ekkor az oldalsó perem vágásától függően vagy a létrejött új kezdőblokk szélén jelenik meg fog, vagy a negatív blokkunk méreteit megnöveltük.



6.2.1 ábra - A negatív blokk nyomtatásának alapesete és a bal oldali perem eltávolításának típusai, és azok hatásai. A b) ábra esetén a blokkot annak oldalának magassága mentén peremtelenítettük (vörös terület), a fog kitolódását okozta az új határra. A c) ábrán a blokkot a tőle balra lévő peremtől szabadítottuk meg (vörös terület), így a kezdőblokk foga eredeti helyén maradt.

7 Korrekciós lehetőségek

A felhasználói oldalról a hibák korrekciójának egyik lehetősége a geometriai kompenzáció, melynek lényege, hogy a modell tervezése során figyelembe vesszük az utólagosan kialakuló hibák geometriáját, méreteit. Ezzel azonban a kutatás során nem foglalkoztunk.

A strukturális hibák végleges megoldását a lézerteljesítmény pillanatnyi sebességhez igazított változtatása jelentené. Ehhez azonban hozzá kéne tudnunk férni a nyomtatót irányító szoftverez, amit a mi lehetőségeink a kutatás során nem engedtek meg.

8 Köszönetnyilvánítás

E szakaszban megköszönni az SZTE IKIKK 3D Központ munkatársainak és az engem támogató személyeknek, hogy szaktudásukkal segítették a vizsgálatok kivitelezését.

Külön szeretném megköszönni témavezetőm, Dr. Geretovszky Zsolt odaadó munkáját, útmutatását és építő jellegű kritikáit, amelyek mind segédkeztek a dolgozat megírásában. Továbbá köszönöm Vajda Balázs segítségét a nyomtatások és a mikroszkópos felvételek elkészítésében, illetve segítőkész munkáját a felmerülő problémák megoldásában.

A munkát a TKP2021-NVA-19 számú projekt támogatta, amely az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alap TKP2021-NVA pályázati konstrukciójában valósul meg.

9 Irodalomjegyzék

[1] Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675.

<https://www.doi.org/10.1038/nmeth.2089>

[2] 3D Systems: *ProJet 6000 HD – 3D Systems* <https://www.3dsystems.hu/hu/3d-nyomtatok/p28-projet-6000-sd-hd.html> (Letöltve: 2022. március 30.)

[3] 3D Systems: *Stereolithography Printers* 2021. szeptember 23.

<https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2021-09/3d-systems-sla-brochure-usen-2021-09-23-web.pdf> (Letöltve: 2022. március 30.)

[4] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker: *Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Springer-Verlag New York, 2015