

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Иван З. Николић

**Обликовање и оријентација делова
израђених технологијом 3D штампе
Мастер рад**

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Методе развоја производа

Број индекса: 439/2018

Иван З. Николић

Обликовање и оријентација делова израђених технологијом 3D штампе

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Ненад Костић, доцент - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да опише различите технологије 3Д штампе као и њихове примене. Такође, у циљу испитивања, дати јасан поступак припреме физичког модела и коришћење окружења за оптимизацију истог. Затим приказати нумеричку анализу као и резултате експерименталног испитивања. На крају рада, треба приказати зависност резултата услова испитивања и оријентације испитиваних елемената.

Препоручена литература:

[1] N. Marjanović, Metode razvoja proizvoda - skripta u elektronskom obliku, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2019.

[2] S. Jovičić, N. Marjanović, Osnovi konstruisanja – II izdanje, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, CAD Laboratorija, Kragujevac, 2018.

[3]<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Inventor-Help/files/GUID-D74F47F3-FE22-44EF-85BE-7C6B1F56DCF9-htm.html>

Крагујевац, 2020.

Ментор:
др Ненад Костић, доцент

РЕЗИМЕ

У овом раду приказане су различите технологије 3Д штампе, њихове примене, као и предности и мане сваке од њих. Приказан је поступак припреме 3Д штампе на моделу за испитивање, као и цео поступак вршеног испитивања чији је главни циљ био да се прикаже зависност деформације од обликовања и оријентације модела.

Кључне речи: 3Д штампа, деформација, оријентација

ABSTRACT

This paper presents different 3D printing technologies, their applications, as well as the advantages and disadvantages of each. The procedure of preparation of 3D printing on the test model is presented, as well as this test procedure, the main goal of which was to show the deformation depending on the design and orientation of the model.

Key words: 3D printing, deformation, orientation

Садржај:

1. Увод	1
2. 3D штампа	4
2.1 SLA (Stereolithography).....	4
2.2 DLP (Digital Light Processing)	5
2.3 LCD (Liquid Crystal Display)	6
2.4 SLS (Selective Laser Sintering)	6
2.5 FDM (Fused Deposition Modeling)	8
3. Обликовање и оријентација	11
4. Припрема физичког модела	14
4.1 Израда CAD модела за квадратни и правоугаони попречни пресек	14
4.2 Припрема епрувета за штампу са 30%, 60%, 100% испуном за квадратни попречни пресек, и 100% испуном за правоугаони попречни пресек	15
5. Оптимизација модела	25
6. Резултати и анализа.....	31
6.1 Нумеричка анализа	31
6.2 Експериментална испитивања	35
7. Закључак	46
Литература.....	47

1. Увод

Проналазак 3Д штампе смањио је време потребно за израду прве верзије производа и доста олакшао производњу комплексних геометријских облика који се раније нису могли тако лако произвести. Са оваквом технологијом могуће је штампати елементе без прављења одређеног алата, или константним мењањем алата за обраду. Такође могуће је штампати разне облике који су међусобно повезани, тако да није потребна монтажа. Могућа је производња малих серија по ниској цени. Оваква технологија помаже при смањењу губитака материјала у производњи [6].

Једна од главних карактеристика 3Д штампе је то што штампачи производе један по један STL фајл, а то се доста разликује од серијских метода производње у којима је циљ произвести што више истих предмета. Самим тим 3Д штампа је савршена за услужну производњу, као и за реверзни инжењеринг нпр. репродукција дела који се више не производи или је поломљен. Постоји велика потреба за 3Д штампом тренутно јер омогућава и појединцу подједнако као и великим индустријама, да производе предмете који су им потребни ,брзо, једноставно и јефтино [6].

Интересовање за 3Д штампу јавило се код јапанског адвоката др Хидео Кодаме (слика 1.) 1980. године. Он је први покушао да патентира технологију израде прототипа. Нажалост комисије су одбиле његову пријаву због прекорачења рока и тако није успео да направи свој патент на време. Четири године након Кодаме, француски тим инжењера покушао је да покрене тај патент. Њихова интересовања су била везана за стереолитографију тј. 3Д штампу, али су брзо обуставили пројекат. Развоју патента није био крај, појавио се неко ко је имао већа интересовања и наставио је тамо где су они стали. Амерички изумитељ Чарлс Хул (слика 2.) је коначно 1986. године открио 3Д штампач. Његов изум је био први уређај икада који је могао да направи физички објекат од дигиталног фајла (слика 4). Први објекат који је Чарлс осмислио била је чашица за испирање ока (слика 3).



Слика 1. Хидео Кодама [13]



Слика 2. Чарлс Хул [10]



Слика 3. Чашица за истрање [11]

3Д штампање је убрзо, након пар година, постало веома популарно, али не за широке народне масе већ унутар различитих индустрија. 3Д штампачи су били брзи и прецизни а такође веома исплативи [4]. У то време цена таквог штампача била је око 300 000 долара.

Стереолитографија користи акрилне материјале, познате као фотополимери (резин), који имају особину да буду течни све док не дођу у контакт са УВ зраком, а затим постају чврста тела од пластике. Према томе за 3Д штампу била је довољна посуда напуњена фотополимером и усмерени ултравиоленти зраци [8].

Оваква нова технологија је била доста занимљива истраживачима који су имали могућност да направе прототип и тестирају њихове идеје без претходно великих инвестиција за производњу. 3Д штампачи у то време нису били перфектни, постојало је одвајање слојева материјала када очврсне али се њихов потенцијал није могао потценити [6].



Слика 4. Први SLA 3Д штампач [12]

Захваљујући брзом развоју у свету данас постоји могућност да свако домаћинство поседује 3Д штампач. Данашњи штампачи крећу са невероватним ценама од 50\$ па до 1000\$ за људе који се тиме баве као хобијем. Цена штампача за професионалну употребу је од 2500\$ па навише, а за индустрију преко 10000\$. У последње време постоји толико унапређења у технологији 3Д штампе, а цена штампача је све нижа, што објашњава чињеницу да је продаја штампача у свету све већа за комерцијалну употребу. Идеја такве комерцијализације је да у будућности свако домаћинство може имати штампач и са њим производити неопходне предмете од биоразградивих пластика.

Тренутно постоје упутства и фајлови за штампу који омогућавају појединцу да сам произведе свој штампач на већ постојећем. Ова технологија производње је област са пуно истраживачког потенцијала. Предност 3Д штампача у односу на остале технологије производње је та што доста олакшава процес, смањује време производње и утрошак материјала. Код 3Д штампача производ је направљен од почетка до краја на штампачу и није потребно примењивати различите процесе производње.

У зависности од елемента који се штампа тј. од његове примене, бира се и одговарајући материјал. Постоји широк спектар примењиваних материјала у 3Д штампи. Годињама уназад врше се испитивања материјала, тако да се не знају баш све њихове карактеристике, из разлога што структура штампаних елемената није иста као и структура елемената од бризане пластике. Самим тим долази и до потребе да се испитује обликовање модела, као и позиционирање штампе и оријентација ређаних слојева штампе. Циљ је утврдити како се понашају такви елементи. Резултати таквих испитивања биће приказани даље у овом раду.

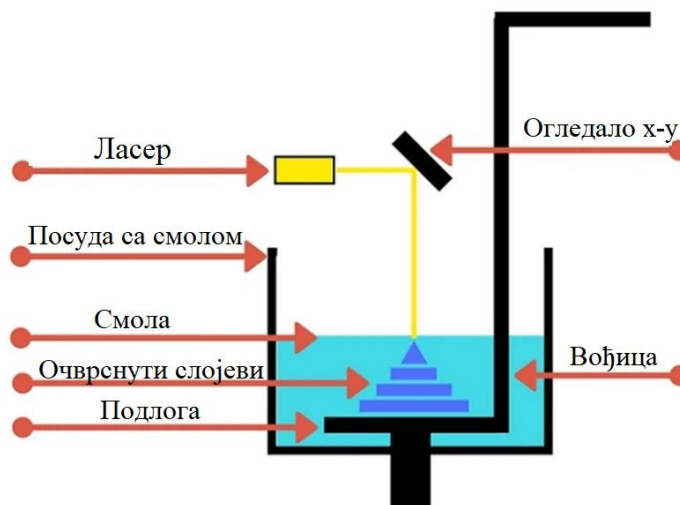
2. 3D штампа

3Д штампање се понекад назива и "Additive Manufacturing" (AM). Када се дизајнирани објекат помоћу софтвера изведе у одговарајућем формату STL, штампач производи тај објекат додавањем материјала слој на слој док се не формира жељени облик. У зависности од технике штампања разликује се више врста штампача. Штампачи високе резолуције постали су приступачнији и све лакши за употребу, самим тим технологија 3Д штампе је тренутно доступна свима, али избор између различитих конкурентских решења за 3Д штампу је веома тежак. До сада је развијено више различитих решења, а то су: SLA, DLP, LCD, FDM (FFF).

2.1 SLA (Stereolithography)

Стереолитографија је тренутно једна од најпопуларнијих технологија на свету. SLA 3Д штампачи користе смолу за очвршћавање течне смоле у пластику у процесу који се назива фотополимеризација. SLA делови имају највећу тачност израде и највећу резолуцију (0.05 mm). Такође имају најјасније детаље и најглаткију површину од свих технологија 3Д штампања. SLA је најбоља опција за прототипове који имају доста детаља и захтевају мале толеранције као што су калупи и функционални делови. SLA штампачи су нашли своју примену и у стоматологији и медицини због велике прецизности [7].

Смола (резин) има доста различитих особина али главна особина је та да је УВ осетљива. Постоје два типа SLA штампача, на основу начина на који ређају слојеве, одозго на доле и одоздо на горе. Тип штампача који ређа одоздо на горе има подлогу на којој се штампа која је потопљена у смолу која се налази у посуди. Између њих постоји танак слој смоле и мембрана на подножју посуде. Ласер прецизно исцртава дату путању по мембрани и самим тим доласком ласера у контакт са смолом, смола постаје чврсто тело. Ређајући слој по слој подлога се удаљава од мембране све док се не формира задато тело (слика 5) [8].



Слика 5. Техника SLA штампе [8]



Слика 6. *Квалитет површине SLA штампе [7]*

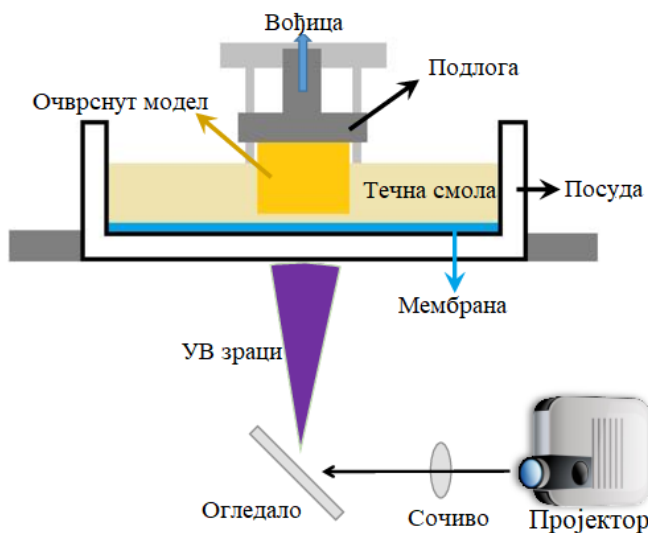


Слика 7. *SLA штампач*

Захваљујући великој резолуцији ових штампача користе се у различитим индустријама, али исто тако тренутно их користе и аматери због садашње ниске цене [8].

2.2 DLP (Digital Light Processing)

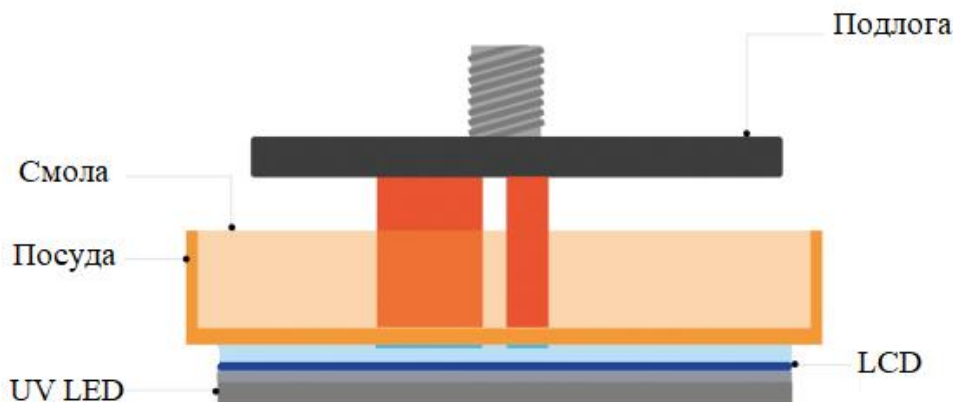
DLP има врло сличан начин рада као SLA, с тим што DLP штампач уместо ласера који исцртава путању има пројектор високе резолуције испод посуде са смолом који директно, без исцртавања, штампа слој по слој (слика 8). Ова карактеристика знатно смањује време штампе [8].



Слика 8. *Техника DLP штампе [8]*

2.3 LCD (Liquid Crystal Display)

LCD штампа је практично иста као и DLP штампа, једина разлика је то што користи LCD екран са позадинским УВ осветљењем и самим тим нема потребе за пројектором (слика 9). Ова карактеристика знатно смањује време штампе и омогућава истовремено очвршћавање читавих слојева [7].



Слика 9. Техника LCD штампе [7]

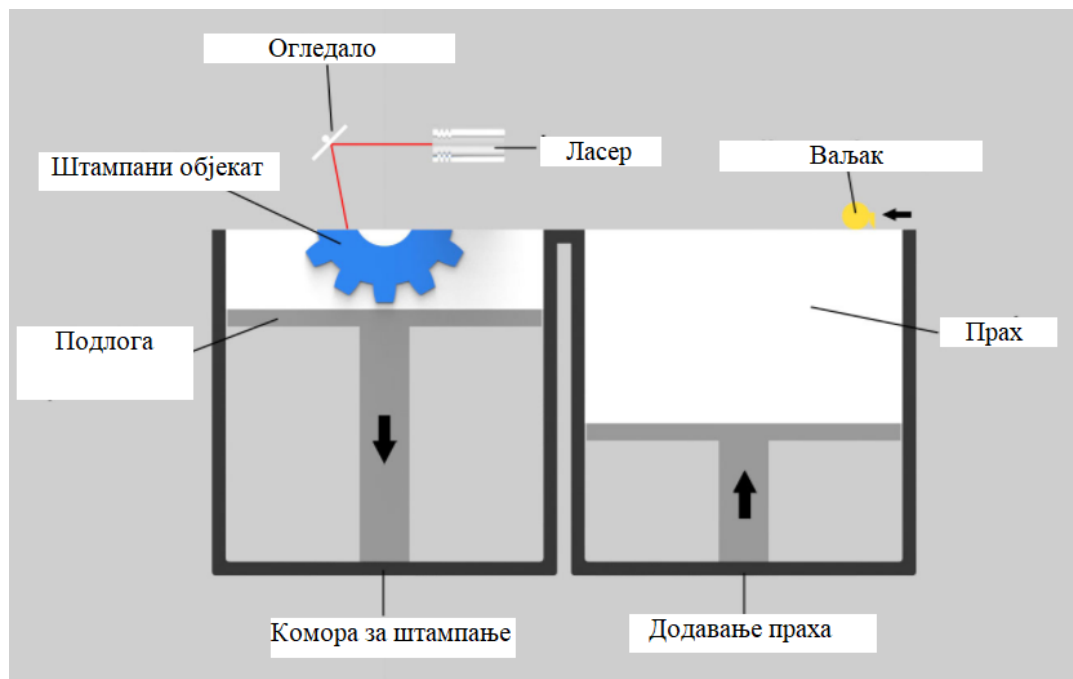
SLA,DLP,LCD штампачи се највише користе у стоматологији, за штампање накита, калупа за накит, за израду прецизних прототипа, у разним пољима медицине, аутоиндустрији, итд.

2.4 SLS (Selective Laser Sintering)

SLS је најчешћа технологија производње која се користи у индустрији. SLS 3Д штампачи користе снажне ласере који спајају мале честице полимерног праха. Прах који није погођен ласером даје потпору једном делу у току штампе и тако елиминише потребу за наменским потпорним структурама као код FDM штампача. То их чини идеалним за штампање сложене геометрије. Делови произведени SLS штампањем имају одличне механичке карактеристике, као код бризганих делова. Такви делови имају помало грубу површину, али зато немају видљиве слојеве. Најчешће коришћени материјал је nylon, једна од најпопуларнијих инжењерских пластика са одличним механичким карактеристикама. SLS технологију најпопуларнијом чине висока продуктивност, ниске цене израде модела и исплатива алтернатива бризгања пластике [4].

Код SLS штампача постоји разлика у снази ласера, што одређује материјале које тај штампач може да штампа. Код ових штампача ласер не може да направи потпуно чврсту везу у овим материјалима па се модел мора обрађивати у пећи пре него што достигне пуну снагу. Материјал који се обрађује у овим штампачима је прах, а у машини се налази ваљак који ваља нове слојеве праха на већ делимично синтероване (слика 10). Код SLS штампача постоји много већи спектар материјала који се користе, који су штампани са већом

прецизношћу него што је то случај са осталим штампачима, што резултира поузданијим деловима. Ови штампачи се највише примењују у истраживачким центрима и различитим индустријама због прецизности и цене. SLS штампачи су тренутно једни од скупљих на тржишту [7].



Слика 10. *Техника SLS штампе* [8]

SLS штампачи се користе за израду функционалних делова, делова у аутоиндустрији, комплексних и шупљих делова, и у малосеријској производњи.



Слика 11. *Квалитет површине SLS штампне [7]*



Слика 12. *SLS штампач*

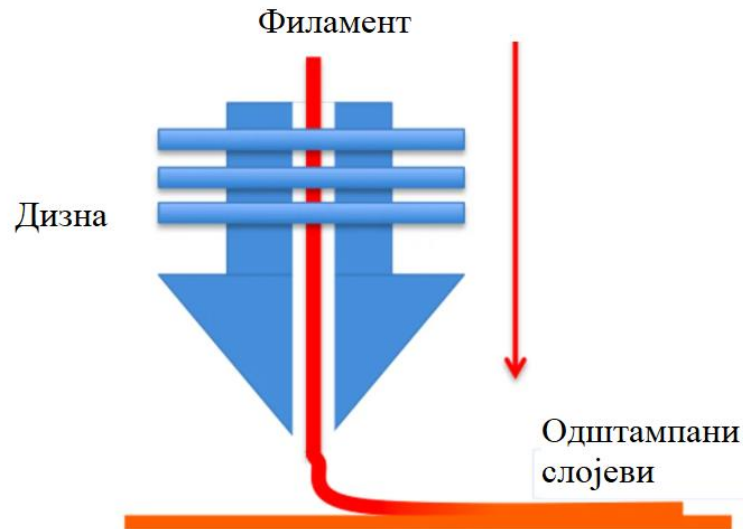
2.5 FDM (Fused Deposition Modeling)

FDM (fused deposition modeling) такође познат и као FFF (fused filament fabrication) је најчешће коришћени облик 3Д штампе међу људима који се баве 3Д штампом из хобија.

FDM 3Д штампачи праве делове додавањем материјала тј. топљењем термопластичне нити коју диза ређа слој по слој (слика 13.). Глава штампача повлачи филамент са котура на коме се налази, увлачи у цев у којој се загрева а затим долази до дизне која топи филамент, температурни опсег 190-250°C. Диза избацује истопљени филамент на подлогу која се загрева до температуре од 100°C ради лакше адхезије. FDM ради са низом материјала као што су: PLA, ABS, NYLON, PETG и њиховим различитим мешавинама. Техника FDM штампе је погодна за брзу и прецизну израду прототипова. Делови израђени на FDM штампачима имају тенденцију да показују видљиве линије слојева и несавршености сложених делова. FDM има најнижу резолуцију (0,1mm-0,3mm) и тачност у поређењу са SLS и SLA штампачима. Такође ови штампачи нису најбоља опција за штампање сложених делова [7].

Предност ових штампача је та што су прилагодљиви свим величинама, што су дуге осе по којима се креће глава штампача то је већа површина штампе и обрнуто.

FDM је јефтина технологија 3Д штампе, а веома ефикасна и због тога ови штампачи доминирају на светском тржишту. Ови штампачи се константно унапређују и постају све већи, а све јефтинији, због ниске цене делова. Једина мана им је то што имају нижи квалитет од осталих технологија 3Д штампе, зато што се материјал слаже слој по слој у различитим висинама што је резултат лошијег квалитета површине [7].



Слика 13. *Техника FDM штампе [8]*

FDM штампачи се користе за израду прототипа, у едукацији, за репродуковање већ постојећих елемената, у медицини за израду ортопедских помагала, итд. FDM штампачи су највише комерцијализовани од свих штампача, а разлог за то је њихова цена.



Слика 14. *Квалитет површине FDM штампе [7]*



Слика 15. *FDM штампач*

Свака од 3Д технологија има своје предности и мане. У табели 1 представљене су упоредне вредности карактеристика појединих технологија.

Табела 1. *Карактеристике 3Д технологија [7]*

	FDM	SLA	SLS
Резолуција	**	*****	****
Прецизност	****	*****	*****
Квалитет површине	**	*****	****
Пропусност	****	****	*****
Комплексност дизајна	***	****	*****
Лакоћа коришћења	*****	*****	****

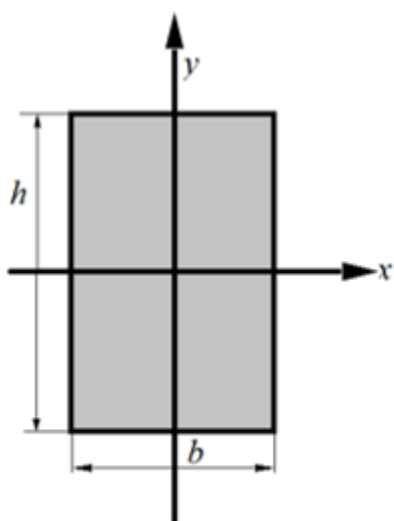
3. Обликовање и оријентација

Основна идеја јесте утврђивање (идентификација) кључних параметара који дефинишу механичке карактеристике 3Д штампаних елемената. Утврђено је да карактеристике доминантно зависе од начина оријентације елемената, као и од њихове саме структуре (облика, положаја, димензија). То је могуће потврдити основним принципима отпорности материјала. Пошто се елементи израђени технологијом 3Д штампе разликују по својој структури у односу на теоријске, неопходно је утврдити разлику и тиме омогућити адекватну експлоатацију ових делова. Како би се утврдиле квантитативне вредности утицајних параметара и формирале препоруке неопходно је извршити испитивања и анализе по различитим критеријумима.

Потребно је утврдити следеће зависности:

- деформације и оријентације (оса савијања)
- испуне и деформације
- облика и деформације

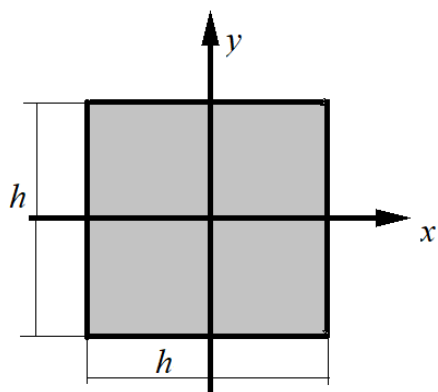
С тим у вези одабран је квадратни попречни пресек који има једнаке вредности момената инерције за сваку осу. Поред тога, пошто је вршено испитивање услед савијања, одабран је и правоугаони пресек за који је могуће постићи мању масу са истим карактеристикама. Геометријске карактеристике поменутих равних површина су дате на слици 16 и табели 2 за правоугаони пресек и на слици 17 и табели 3 за квадратни пресек.



A	I_x	I_y	W_x	W_y	$S_{1/2}$
cm^2	cm^4	cm^4	cm^3	cm^3	cm^3
<u>bh</u>	$\frac{bh^3}{12} =$	$\frac{hb^3}{12} =$	$\frac{bh^2}{6} =$	$\frac{hb^2}{6} =$	$\frac{bh^2}{8} =$
	$\frac{Ah^2}{12}$	$\frac{Ab^2}{12}$	$\frac{Ah}{6}$	$\frac{Ab}{6}$	$\frac{Ah}{8}$

Табела 2. Моменти инерције и отпорни моменти равних пресека

Слика 16. Правоугаони попречни пресек



A	I_x	I_y	W_x	W_y	$S_{1/2}$
cm^2	cm^4	cm^4	cm^3	cm^3	cm^3
h^2	$\frac{h^4}{12} = \frac{A^2}{12}$	$\frac{h^4}{12} = \frac{A^2}{12}$	$\frac{h^2}{6} = \frac{Ah}{6}$	$\frac{h^2}{6} = \frac{Ah}{6}$	$\frac{h^3}{8} = \frac{Ah}{8}$

Слика 17. Квадратни попречни пресек

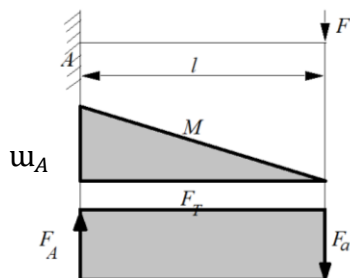
Табела 3. Моменти инерције и отпорни моменти равних пресека

План је формиран тако да су извршена статичка испитивања при савијању. Савијање као напрезање је изабрано због могућности идентификације кључних карактеристика пресека од којих директно зависи сама оријентација елемената.

Формирано је 5 модела од којих је три модела са квадратним попречним пресеком, различитих испуна, један модел са правоугаоним попречним пресеком и оптимизован модел. Одштампано је 5 модела на 3Д штампачима. Такође је урађена структурна анализа за сваку епрувету посебно, где се виде теоријски угиби као и оптимизација модела епрувете правоугаоног попречног пресека. Вршена су експериментална испитивања сваке епрувете, тако што су вршена три мерења и извучена је средња вредност

Теоријски посматрано, аналитичке вредности пуног попречног пресека могуће је утврдити на следећи начин, помоћу геометријских карактеристика равних површина.

Испитивања су вршена на конзолном носачу оптерећеном силом F на слободном крају. Физички модел је могуће свести на механички модел који је представљен на (слика 18).



Слика 18. Статички дијаграм конзолног носача

На (слика 18.) види се конзола оптерећена на једном крају и укљештена на другом, где је трансверзална сила једнака по целој дужини, а момент савијања највећи на месту укљештења. Највећи угиб је на крају представљене конзоле.

Теоријски угиб на растојању 12.6cm у односу на укљештење могуће је израчунати помоћу израза 1

$$y = \frac{F}{6} \cdot \frac{l^3}{B} \left\{ \left(\frac{z}{l} \right)^2 \cdot \left[3 - \left(\frac{z}{l} \right) \right] \right\} \quad (\text{израз 1})$$

На основу претходног израза утврђене су вредности угиба за теоријски – пун поречни пресек епрувете 18x18mm и дужине 200mm, као и епрувете 30x4mm и дужине 200mm дати су у табели 4. Ово су аналитичке вредности, које подразумевају идеалне – теоријске услове, према претпоставкама теорије отпорности материјала, па је очекивано да се ове вредности разликују од стварних. Материјал епрувете је PLA (Polylactic acid).

Табела 4. Вредности аналитичког прорачуна

Величина	Вредност	Јединица
Сила - F	12	N
Дужина - l	200	mm
Димензије квадратног попречног пресека - a	18	mm
Димензије правоугаоног попречног пресека – h; c	30; 4	mm
Растојање на коме се мери угиб - z	126	mm
Модул еластичности - E	3500	MPa
Момен инерције за осу савијања – квадратни попречни пресек - I _y	8,75x10 ⁻⁹	m ⁴
Момен инерције за осу савијања – правоугаони попречни пресек - I _y	9 x10 ⁻⁹	m ⁴
Угиб на траженој позицији - квадратни попречни пресек - у _к	0,49	mm
Угиб на траженој позицији - правоугаони попречни пресек - у _р	0,48	mm
Максимални угиб - квадратни попречни пресек - f _к	1,045	mm
Максимални угиб - квадратни попречни пресек - f _к	1,016	mm

Циљно су дефинисани пресеци да вредности момената инерције, а тиме и угиба буду исте, тачније блиске у овом случају. Циљ тога је постизање могућности поређења добијених резултата. Тачност резултата је дефинисана на две децимале због мерне опреме и вредности које је могуће добити експерименталним испитивањима.

Вредности које су дефинисане у табели, циљно су биране и представљају компромис могућих вредности за аналитичка, нумеричка и експериментална испитивања. Сва даља испитивања су вршена према овим дефинисаним условима како би поређење резултата било могуће, а добијене вредности упоредиве.

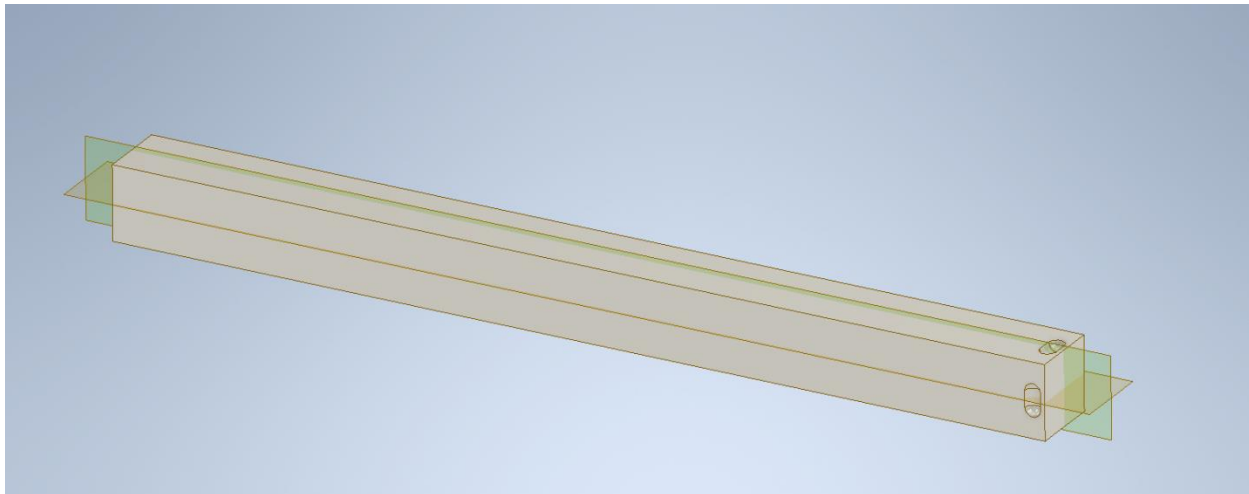
4. Припрема физичког модела

Пре свега потребно је моделирати епрувету за испитивање. Моделирање је извршено у софтверу „Autodesk Inventor”. Готов модел било је потребно извести у одговарајућем формату за 3Д штампу, што је у овом случају STL, OBJ, итд. Затим се увози у слајсер „Cura”, који омогућава подешавање свих параметара штампе тј. генерисање кода (Gcode), по коме ће штампач радити. Припрема за штампу је вршена у једном од софтвера који се назива „Ultimaker Cura”.

Cura је један од најкоришћенијих софтвера за припрему 3Д штампе, који је такође и бесплатан за коришћење.

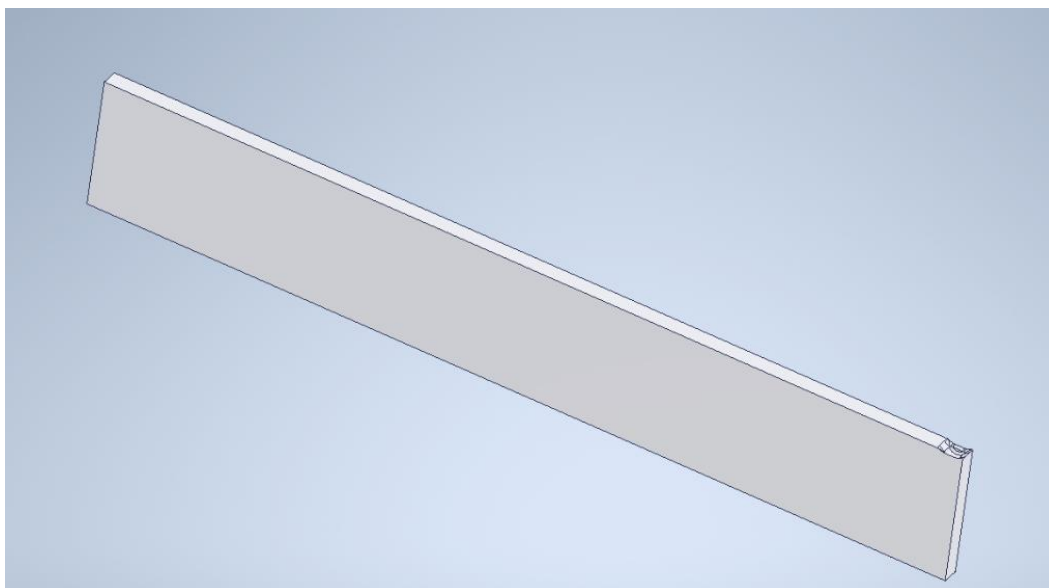
4.1 Израда CAD модела за квадратни и правоугаони попречни пресек

Прва епрувета је квадратног попречног пресека димензија 18x18mm (слика 19.). Дужина епрувете је 200mm, на крају епрувете су остављена удубљења која су предвиђена за ослонац куке тега.



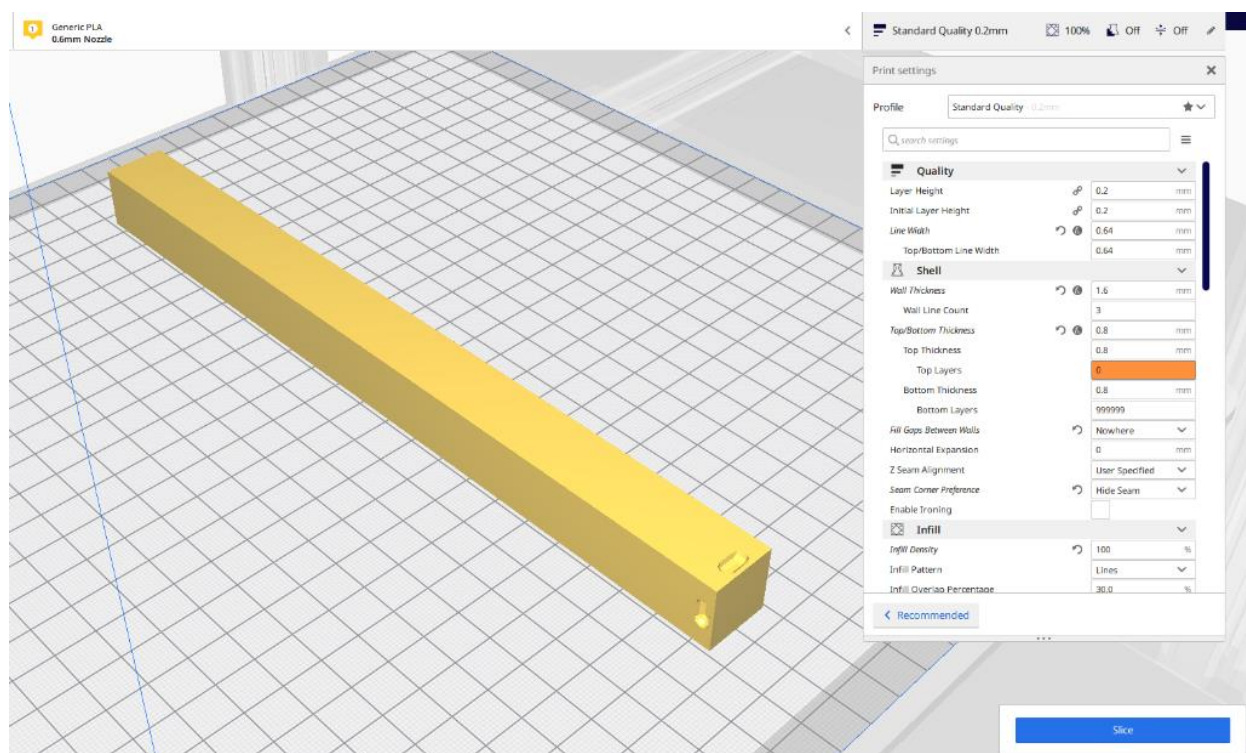
Слика 19. Модел епрувете квадратног попречног пресека

Следећа епрувета која је потребна за испитивање је епрувета правоугаоног попречног пресека димензија 30x4mm и дужине 200mm. Такође су остављена удубљења за ослонац тега (слика 20).



Слика 20. *Модел епрувете правоугаоног попречног пресека*

4.2 Припрема епрувета за штампу са 30%, 60%, 100% испуном за квадратни попречни пресек, и 100% испуном за правоугаони попречни пресек



Слика 21. *Епрувета са испуном 100%*

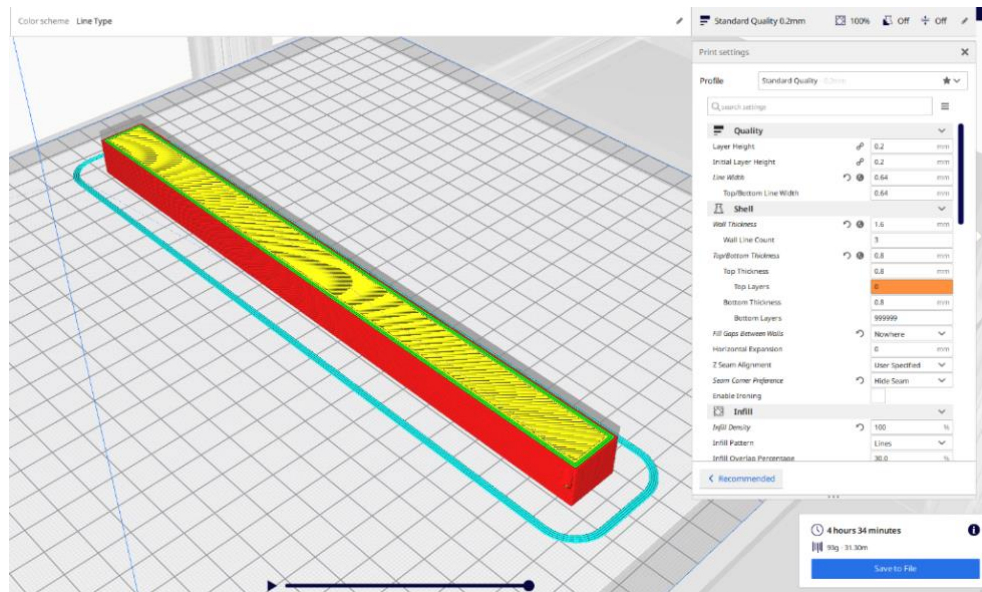
Прва епрувета је са испуном од 100% (слика 21), на прозору са параметрима виде се уношена подешавања за штампу.

У табели 5 представљена су основна подешавања штампе. Односе се на најосновније параметре, а то су висина и ширина слоја, као и зида, такође и број слојева зида. Температура подлоге и дизне је унапред тестирана за филамент који је коришћен у овом експерименту. Нема потребе за штампање са подршком из разлога што епрувета не садржи ниједан мост нити постоји мањи угао од 45° у односу на подлогу. Изабрана је Cubic испуна због претходно показаних добрих резултата и отпорности на деловање силе у различитим правцима.

Табела 5. Подешавања штампе у софтверу „Cura”

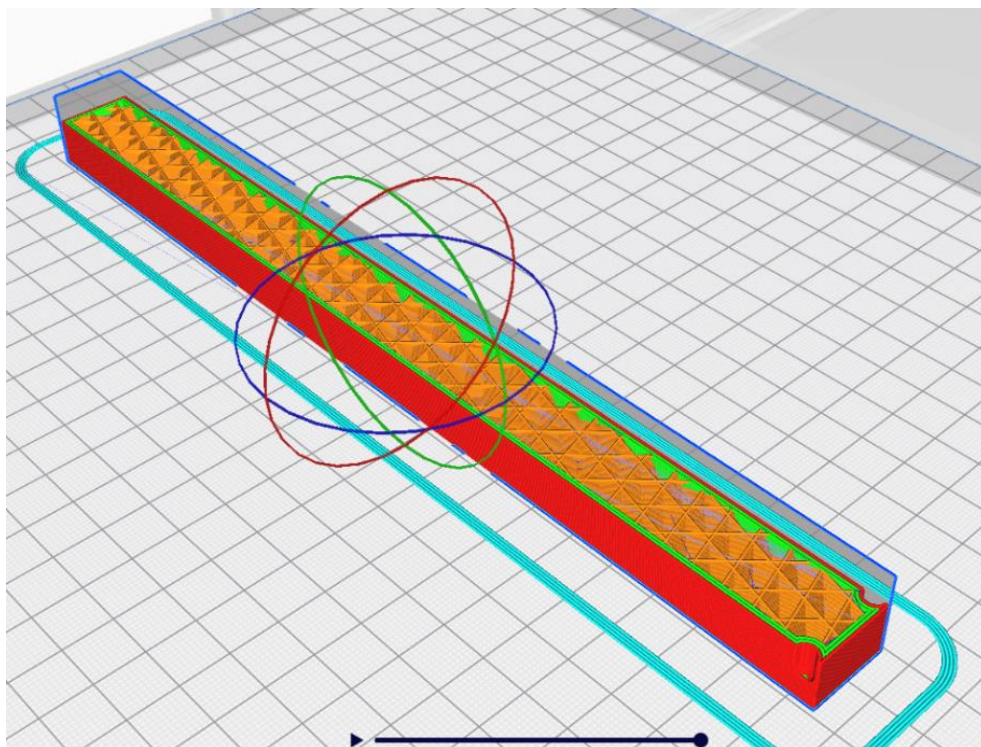
Назив величине	Вредност	Јединица
Висина слоја	0,2	mm
Ширина слоја	0,64	mm
Ширина првог и последњег слоја	0,64	mm
Ширина зида	1,6	mm
Број слојева зида	3	/
Број првих слојева	0	/
Број последњих слојева	0	/
Испуна	100	%
Врста испуне	Cubic	/
Температура подлоге	60	°C
Температура дизне	200	°C
Проток	100	%
Брзина	50	mm/s
Брзина вентилатора	100	%
Подршка	Без подршке	/

Након унетих подешавања притиском на „slice” модел има генерисан код „Gcode”. Маса ове епрувете је 94g, а време потребно за штампу је 4 часа и 34 минута што је приказано на (слика 22.).



Слика 22. Епрувета са испуном 100%

Следећа епрувета је израђена са испуном од 30% (слика 23). Тип испуне која је коришћена у овом случају је „Cubic”. Ова испуна се користи за функционалне делове који би требало да трпе оптерећења у различитим правцима. Оваква испуна је добра јер се може доста смањити ретракција филамента, што смањује ризик од запушења дизне. Изабран је већи пречник дизне због брзине штампе епрувета.



Слика 23. Епрувета са испуном 30%

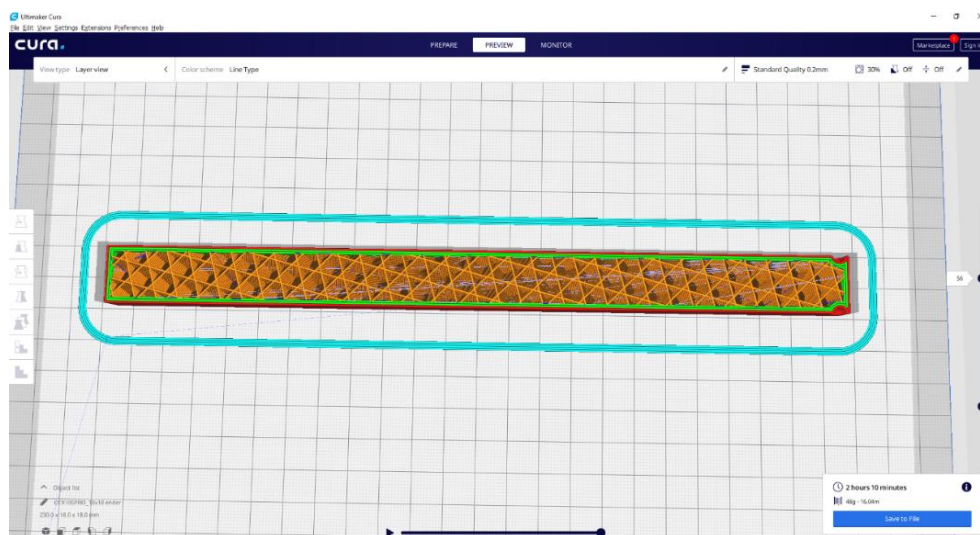
У табели 6 приказани су параметри коришћени за штампу. Као и у претходном случају ту се налазе нека од најосновнијих подешавања, с тим што је у овом случају испуна 30%.

Табела 6. Подешавања штампе у софтверу „Cura”

Назив величине	Вредност	Јединица
Висина слоја	0,2	mm
Ширина слоја	0,64	mm
Ширина првог и последњег слоја	0,64	mm
Ширина зида	1,6	mm
Број слојева зида	3	/
Број првих слојева	4	/
Број последњих слојева	4	/

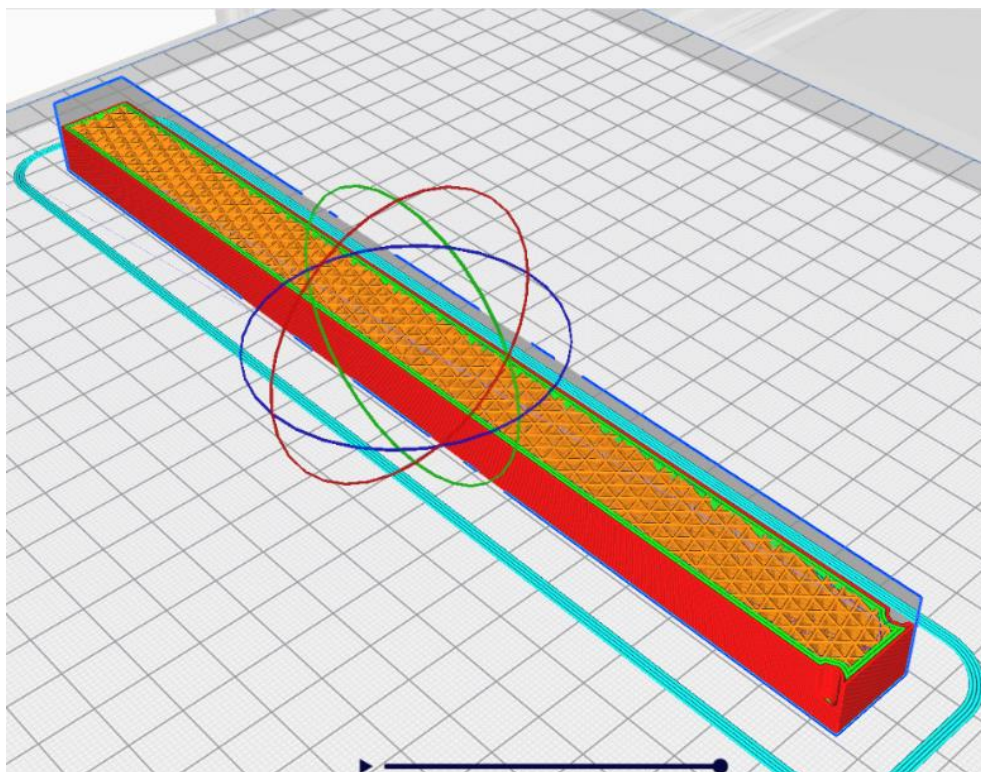
Испуна	30	%
Врста испуне	Cubic	/
Температура подлоге	60	°C
Температура дизне	200	°C
Проток	100	%
Брзина	50	mm/s
Брзина вентилатора	100	%
Подршка	Без подршке	/

Након унетих подешавања притиском на „slice” модел има генерисан код „Gcode”. Маса ове епрувете је 48g, а време предвиђено за штампу износи 2 часа и 10 минута (слика 24).



Слика 24. Епрувета са испуном 30%

Наредна епрувета је израђена са испуном од 60%. Повећањем испуне повећава се и маса, али исто тако и отпорност на савијање. Као и у прошлом случају коришћен је тип испуне „Cubic” (слика 25).



Слика 25. Епрувета са испуном 60%

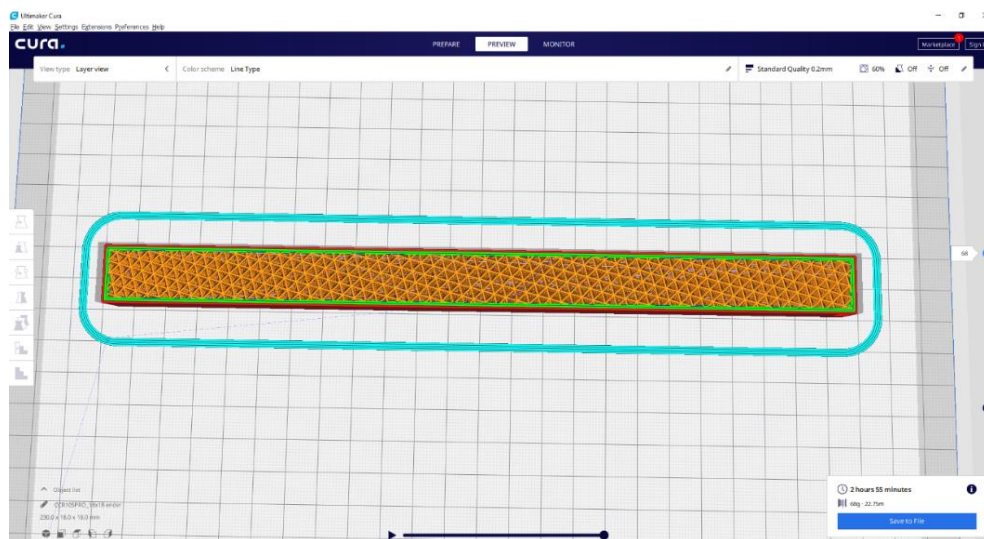
У табели 7 приказани су параметри коришћени за штампу епрувете испуне 60%.

Табела 7. Подешавања штампе у софтверу „Cura”

Назив величине	Вредност	Јединица
Висина слоја	0,2	mm
Ширина слоја	0,64	mm
Ширина првог и последњег слоја	0,64	mm
Ширина зида	1,6	mm
Број слојева зида	3	/
Број првих слојева	4	/
Број последњих слојева	4	/

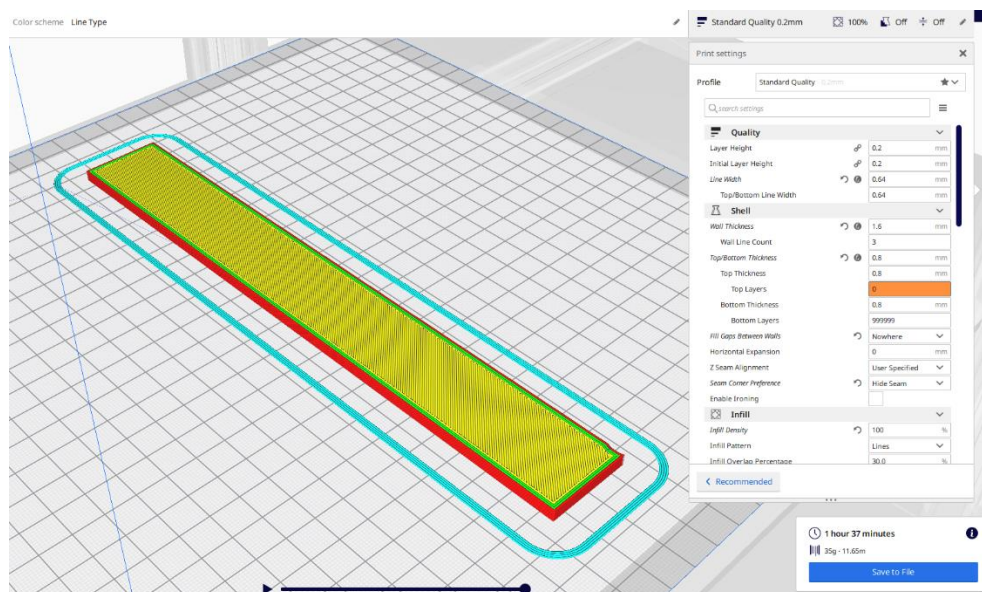
Испуна	60	%
Врста испуне	Cubic	/
Температура подлоге	60	°C
Температура дизне	200	°C
Проток	100	%
Брзина	50	mm/s
Брзина вентилатора	100	%
Подршка	Без подршке	/

Маса ове епрувете износи 68g, а време потребно за штампу износи 2 часа и 55 минута (слика 26).



Слика 26. Епрувета са испуном 60%

Након одштампаних епрувета са квадратним попречним пресеком потребно је одштампати епрувету са правоугаоним попречним пресеком (слика 27). Епрувета је штампана са 100% испуном и има масу 35g. Време потребно за штампу износи 1 час и 37 минута.



Слика 27. Епрувета са испуном 100%

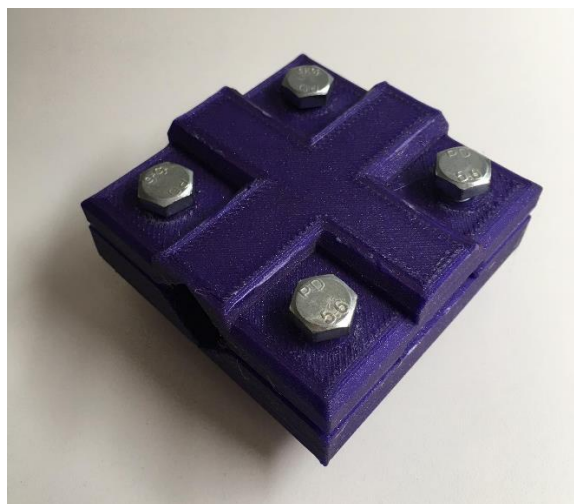
У табели 8 приказани су параметри коришћени за штампу. У овом случају параметри су потпуно исти као и код штампања епрувете са квадратним попречним пресеком.

Табела 8. Подешавања штампе у софтверу „Cura”

Назив величине	Вредност	Јединица
Висина слоја	0,2	mm
Ширина слоја	0,64	mm
Ширина првог и последњег слоја	0,64	mm
Ширина зида	1,6	mm
Број слојева зида	3	/
Број првих слојева	4	/
Број последњих слојева	4	/
Испуна	100	%
Врста испуне	Cubic	/

Температура подлоге	60	°C
Температура дизне	200	°C
Проток	100	%
Брзина	50	mm/s
Брзина вентилатора	100	%
Подршка	Без подршке	/

Како би се обезбедило позиционирање и стезање епрувета било је потребно конструисати конзолу. Да би се олакшало испитивање требало је конструисати тако да се стезање обезбеђује обликом, а заокретањем за 90 вршене су различите операције испитивања. Са једне стране обезбеђено је позиционирање и стезање епрувете квадратног попречног пресека, са друге стране квадратног попречног пресека заокренутог за 45° и са треће стране правоугаоног попречног пресека (слика 28).

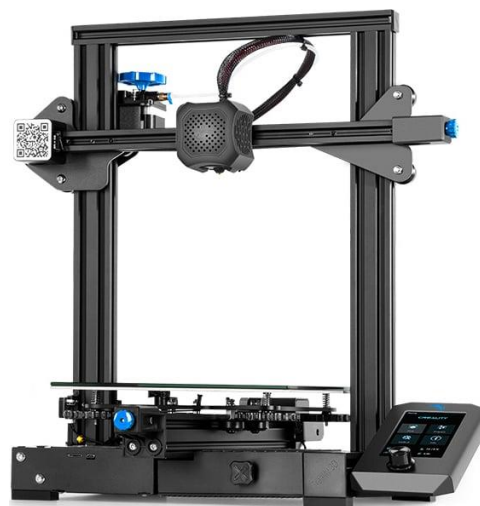


Слика 28. Носач

Штампачи на којима су израђене епрувете :

- Creality CR10S PRO (слика 29.)
- Creality Ender 3 PRO (слика 30.)

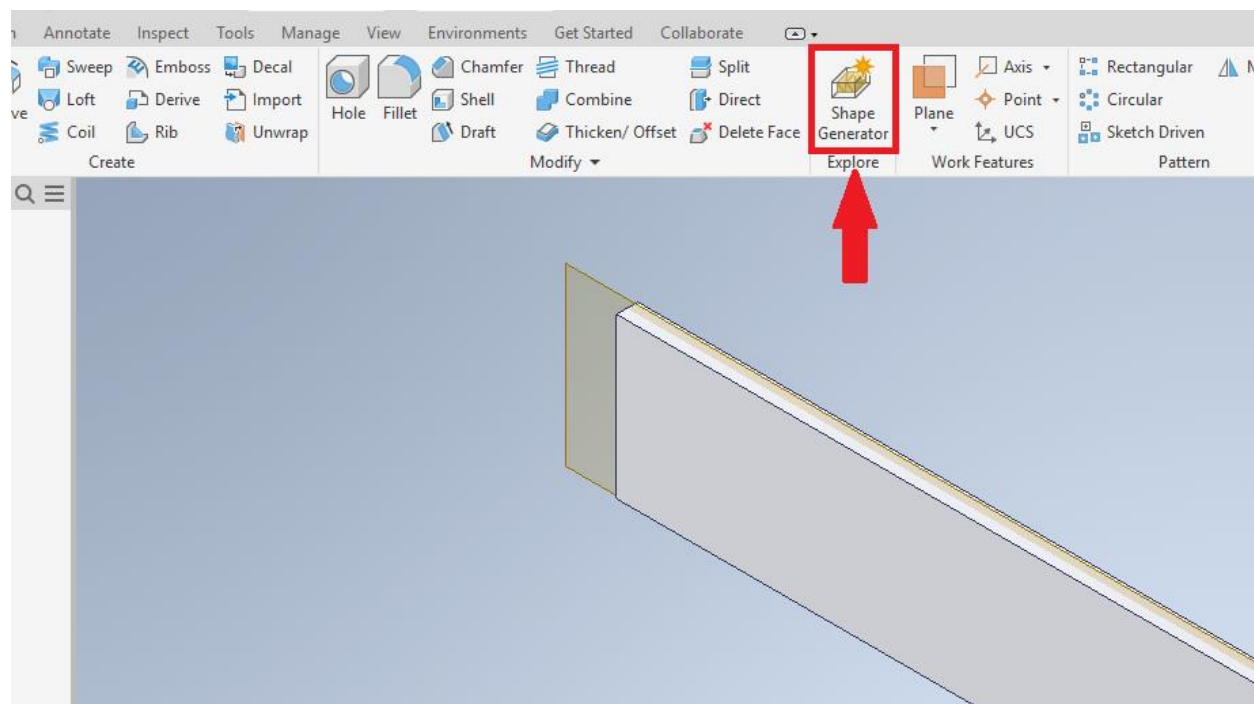
На оба штампача могуће је штампати више врста материјала, неки од њих су: PLA, PETG, ABS, Nylon, Carbon, Wood филамент, итд. ABS је могуће штампати, али није препоручљиво уколико штампач није изолован због отровних испарења које ABS испушта приликом штампања. Површина радног простора за CR10S PRO је 300x300x400mm, а за Ender 3 PRO 220x220x300mm. Оба штампача користе дизне пречника од 0,2-0,8mm. Подлога штампача се загрева на температуру од 0-100°C, а дизне од 0-250°C. Када поредимо ова два штампача највећа разлика је у брзини штампе, чак дупло брже штампа CR10S PRO. Што се тиче квалитета не постоје неке превелике разлике осим што CR10S PRO може да одштампа за нијансу комплексније елементе. Цена CR10S PRO штампача је око 700 евра, а Ender 3 PRO око 250 евра.



Слика 29. 3Д штампач Creality CR10S PRO Слика 30. 3Д штампач Creality Ender 3 PRO

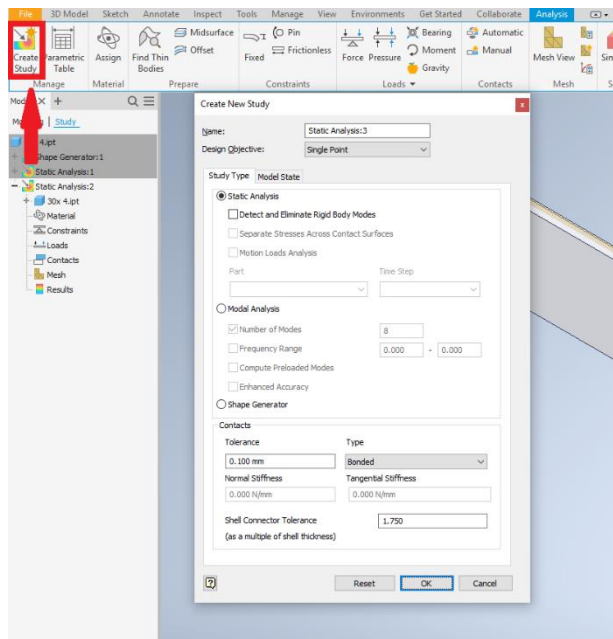
5. Оптимизација модела

Након анализе оптерећења епрувете са правоугаоним попречним пресеком и закључка да ће дати модел издржати задато померање приступа се окружењу „Shape generator” који оптимизује дати модел према задатим оптерећењима. Примена овог окружења омогућава добијање оптималне структуре (облика, положаја и димензија) елемента погодне за израду технологијом 3Д штампе. Ова структура мора бити мање масе у односу на конзолу правоугаоног попречног пресека, а притом морају бити задржане карактеристика носивости и деформабилности. Приступање окружењу Shape Generator врши се кликом на иконицу приказаној на (слика 31).



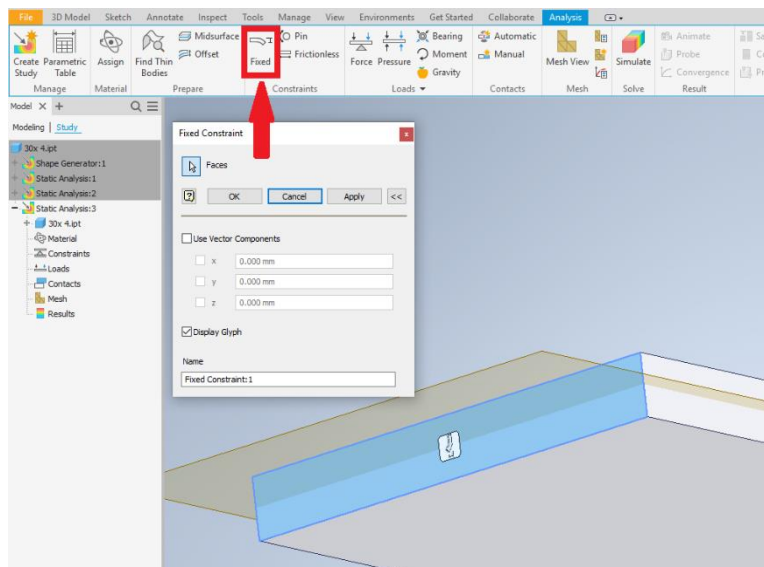
Слика 31. Приступање окружењу *Shape Generator*

Избором ове опције, отвара се ново окружење са алатима које је могуће користити у циљу даље анализе. У окружењу се приступа иконици *Create Study*, након чега се отвара нов прозор који служи за подешавање параметара (слика 32). Када се изврши подешавање одговарајућих параметара, попут типа анализе и других услова модела, потребно је потврдити дефинисана подешавања притиском на ОК.



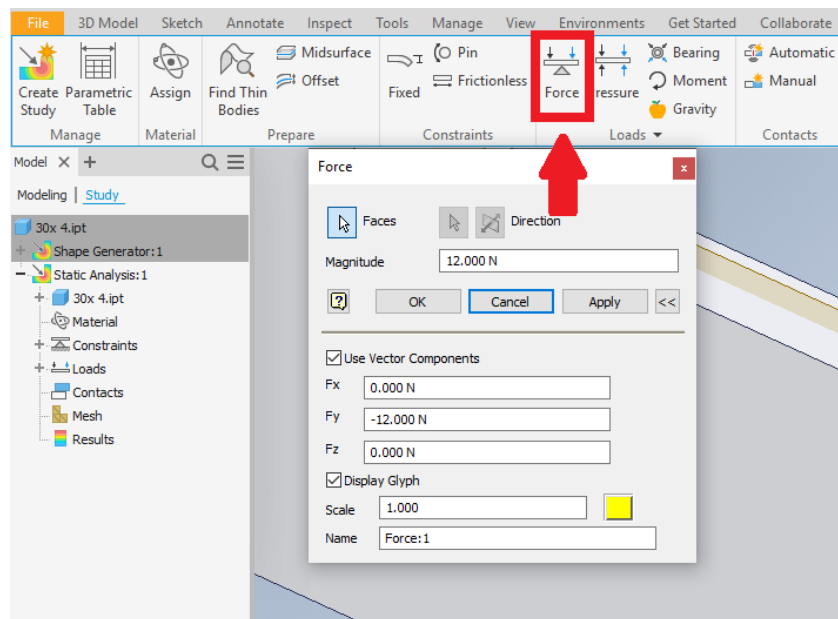
Слика 32. Приступање окружењу Create Study

Притиском на иконицу Fixed отвара се нов прозор и потребно је означити површину на слободној страни епрувете која је укљештена, што је представљено на слици 33. Притиском на ОК затвара се прозор.



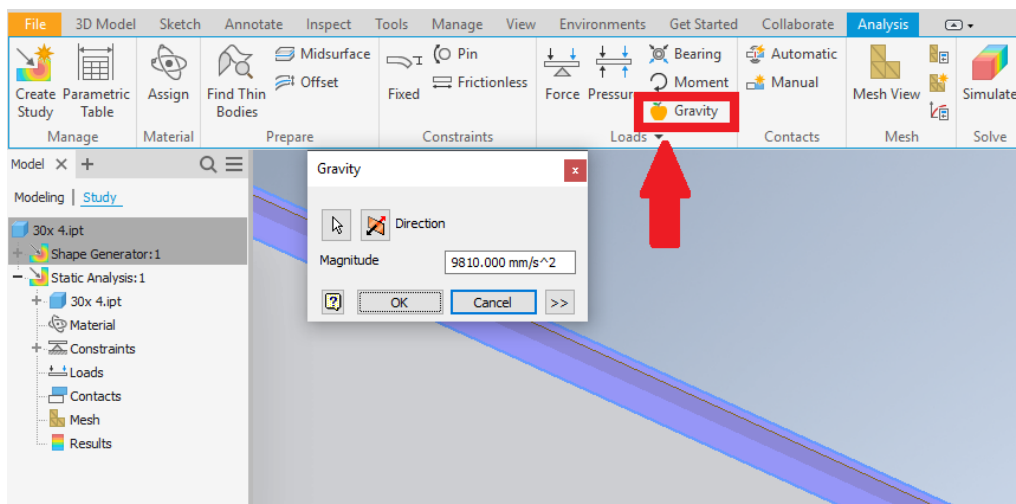
Слика 33. Постављање укљештења

Следеће што је потребно је да се унесе сила на слободном крај епрувете. У овом конкретном случају она има вредност од 12N, како би резултати били упоредиви са другим анализама спроведеним у овом раду. Начин дефинисања вредности силе у овом окружењу представљен је на слици 34.



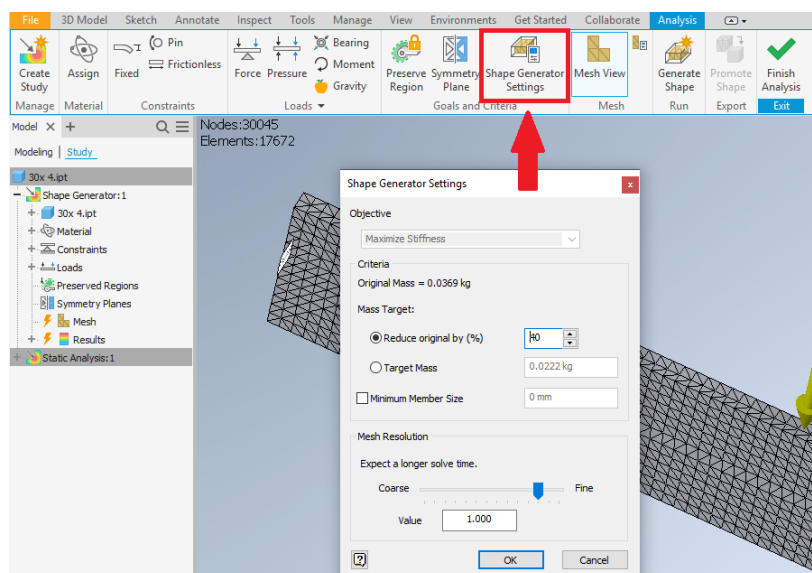
Слика 34. Поступак уношења силе

Због могућности поређења резултата са експерименталим, бира се површина на коју ће деловати сила гравитације притиском на иконицу Gravity (слика 35). У овом конкретном случају, због малог утицаја сопствене масе на укупну деформацију, било је могуће и занемарити гравитациону силу, при чему би резултати били блиски добијеним.



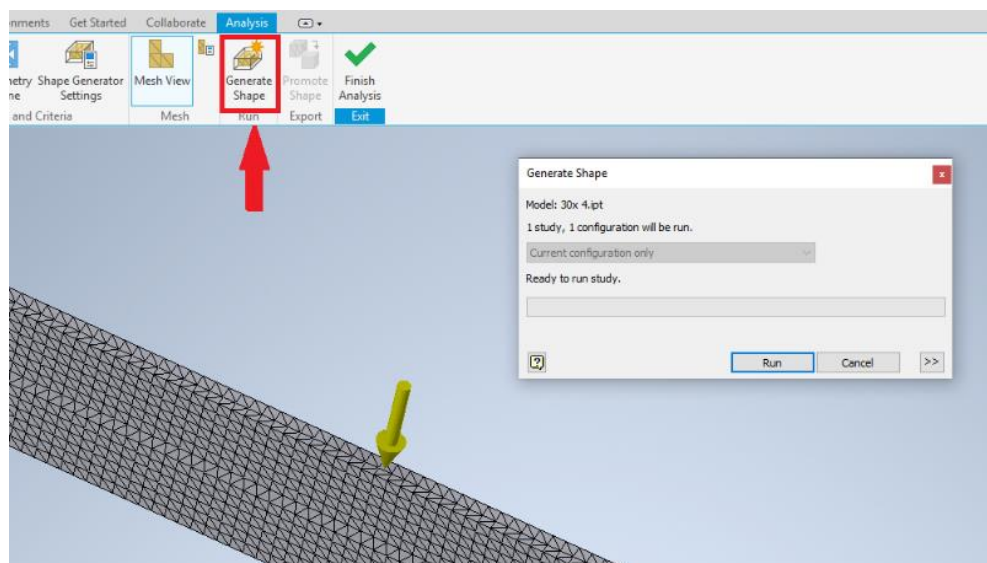
Слика 35. Бирање површине на коју делује сила гравитације

Након уношења сила и укљештења (ослонца) потребно је одабрати опцију Shape Generator Settings након чега се отвара прозор у који треба унети параметре (слика 36). Масу је могуће смањивати процентуално, уношењем жељене масе. Резолуција мреже се подешава превлачењем курсора на скали у зависности од жељене прецизности. Ова подешавања одређују колико ће оптимизација бити комплексна и у којој мери ће редукција масе бити извршена. У овом случају дефинисан је циљ редукције масе за 40%.



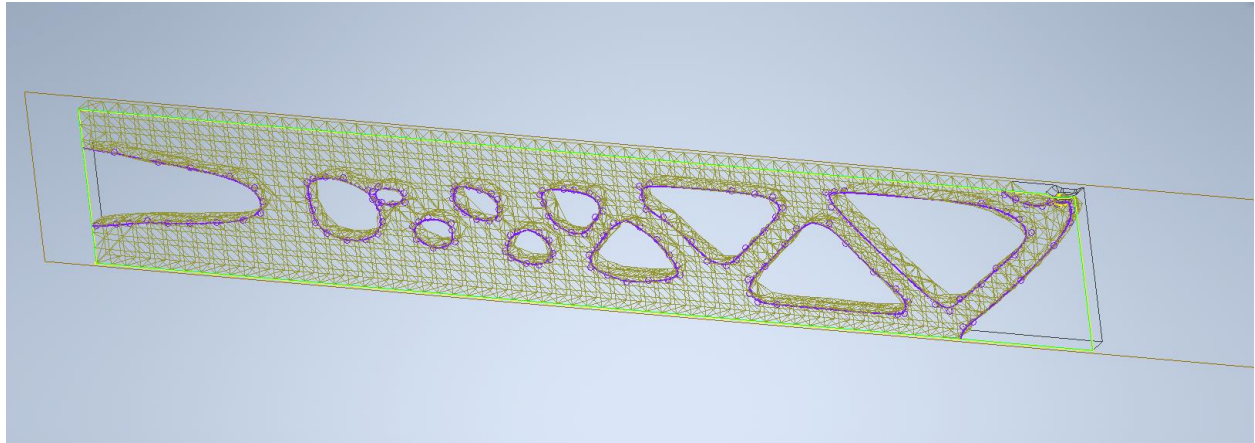
Слика 36. Уношење параметара

Притиском на Generate Shape покреће се анализа, као на слици 37. По извршењу анализе (оптимизације) приказани су резултати, тачније оптимизован модел (слика 38).



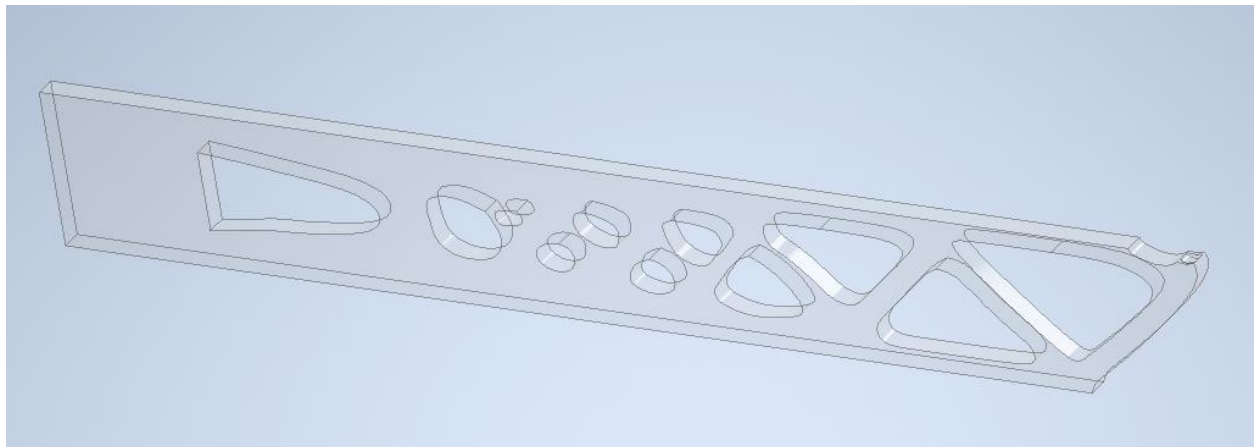
Слика 37. Покретање анализе

Након избора команде Promote Shape приказаће се модел. Оптимизован модел задат је у полигонима тако да може да се директно проследи у STL фајл потребан за 3Д штампу или да се даље уређује као што је приказано.



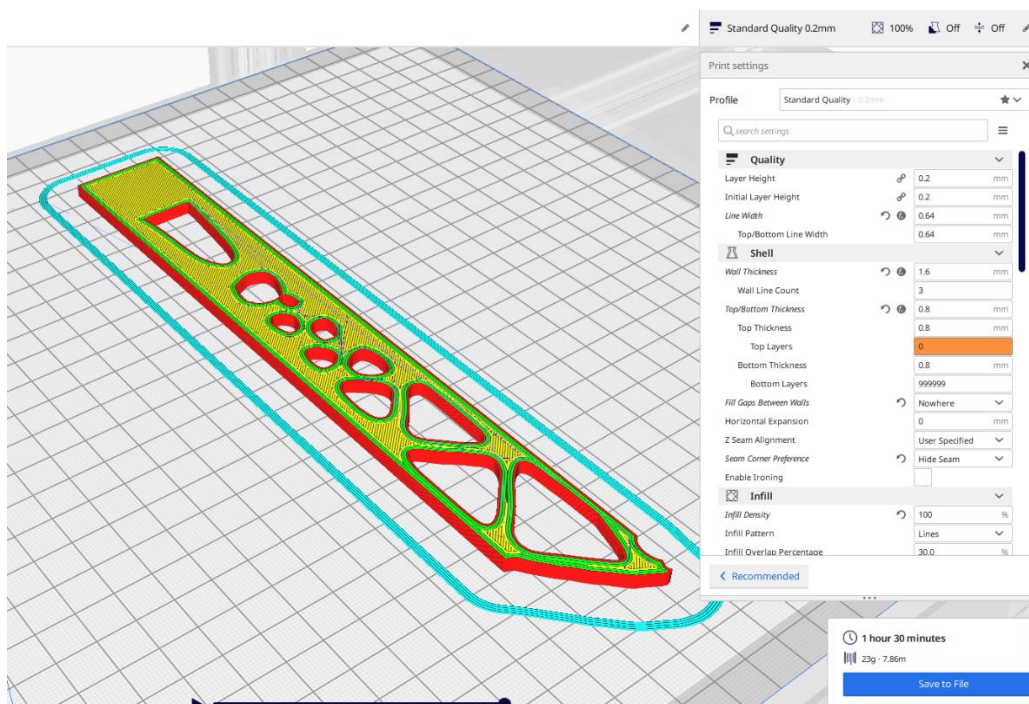
Слика 38. Оптимизација у окружењу „Shape generator”

Уређен модел са додатим одговарајућим материјалом израде PLA са додатих 30mm на већ постојећи модел ради учвршћивања у конзолу представљен је на слици 39.



Слика 39. Оптимизован модел

Оптимизован модел штампан је са истим параметрима као и епрувета са правоугаоним попречним пресеком (слика 40). Маса оптимизоване епрувете је 23g, а време потребно за штампање епрувете је 1 час и 30 минута.



Слика 40. Оптимизована епрувета испуне 100%

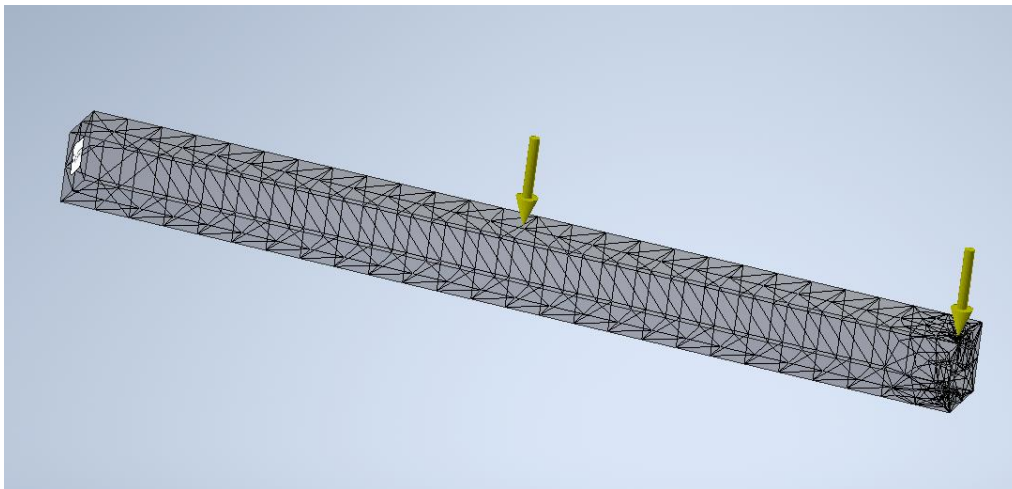
Добијени оптимални модел је такође испитиван ради добијања и поређења вредности са осталим испитивани моделима.

6. Резултати и анализа

6.1 Нумеричка анализа

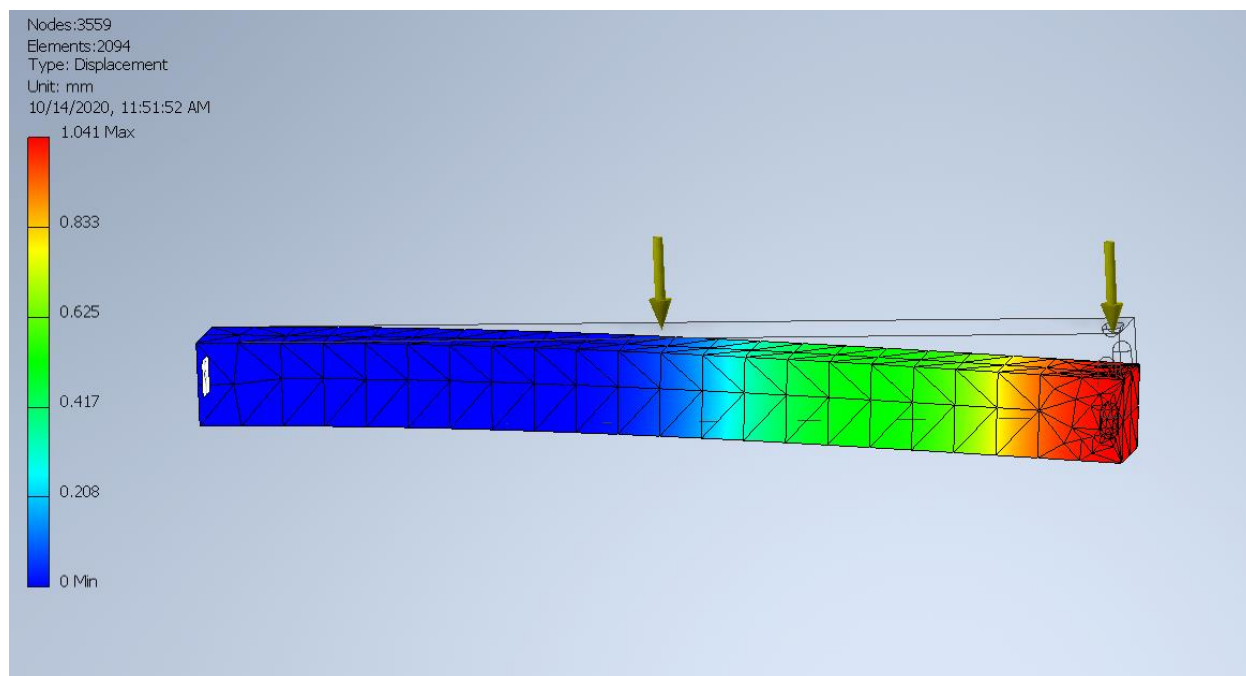
У циљу добијања нумеричких резултата и процене деформације извршена је анализа применом МКЕ (метода коначних елемената) у софтверу AD Inventor.

На креираним CAD моделима извршена је анализа деформација, тако што је један крај конзоле укљештен. На други део епрувете (на слободном крају) у удубљење је постављена сила од 12N и такође је постављена сила гравитације (слика 41).



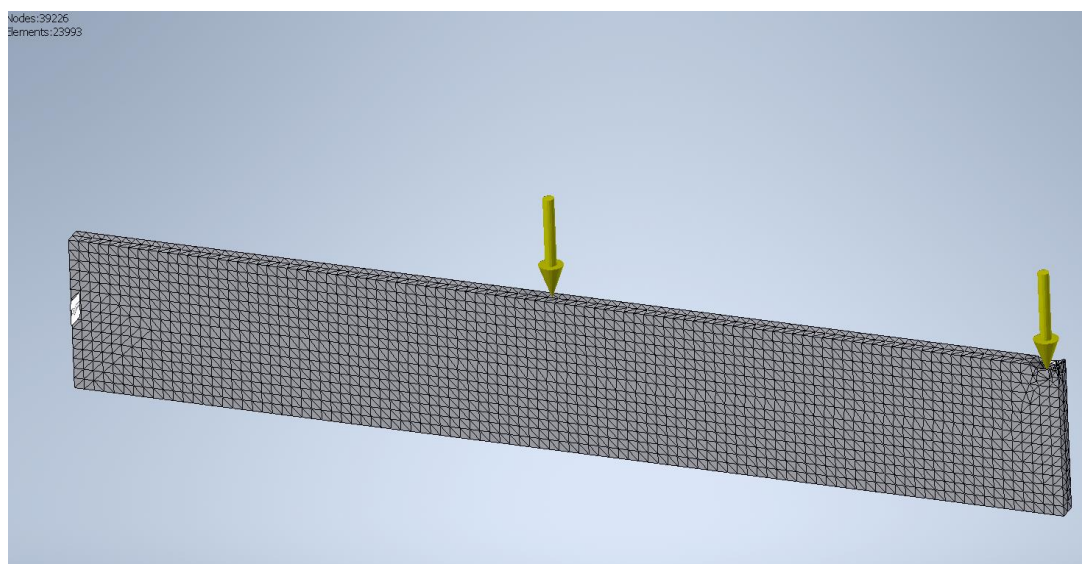
Слика 41. *Епрувета са мрежом и постављеним силама*

После покретања анализе оптерећења добијена је слика померања епрувете тј. угиба, са јасно приказаним деловима епрувете који су под највећим оптерећењем. На слици 42 приказан је угиб епрувете.



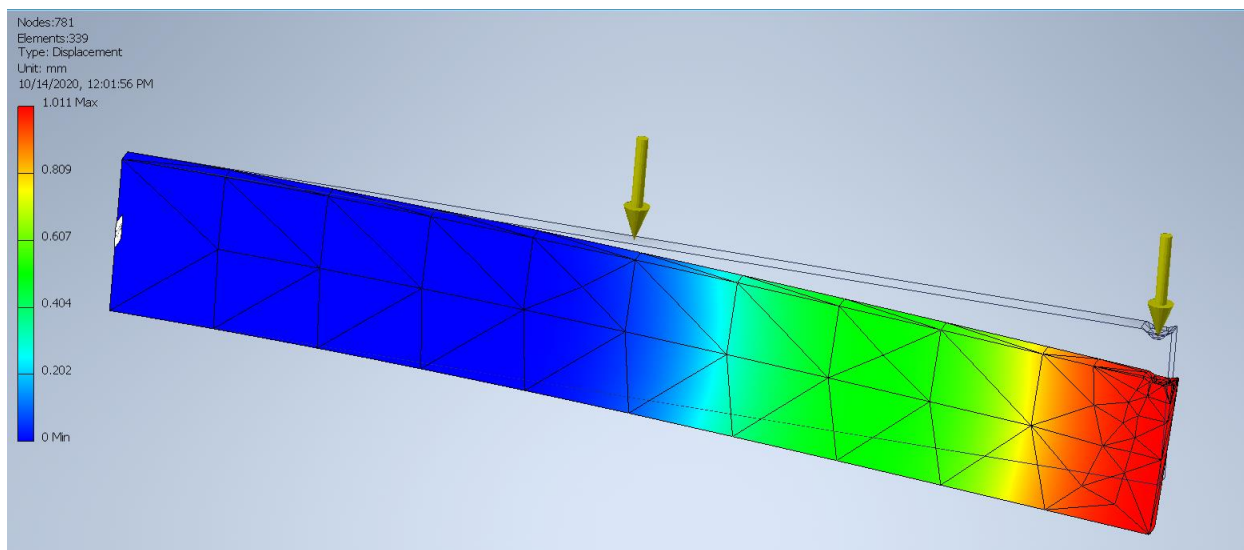
Слика 42. Угиб епрувете

Као и код квадратног попречног пресека, постављене су гравитациона сила и сила од 12N. На месту постављене силе од 12N такође је постављено удубљење намењено за куку тега потребног за експериментално испитивање (слика 43).



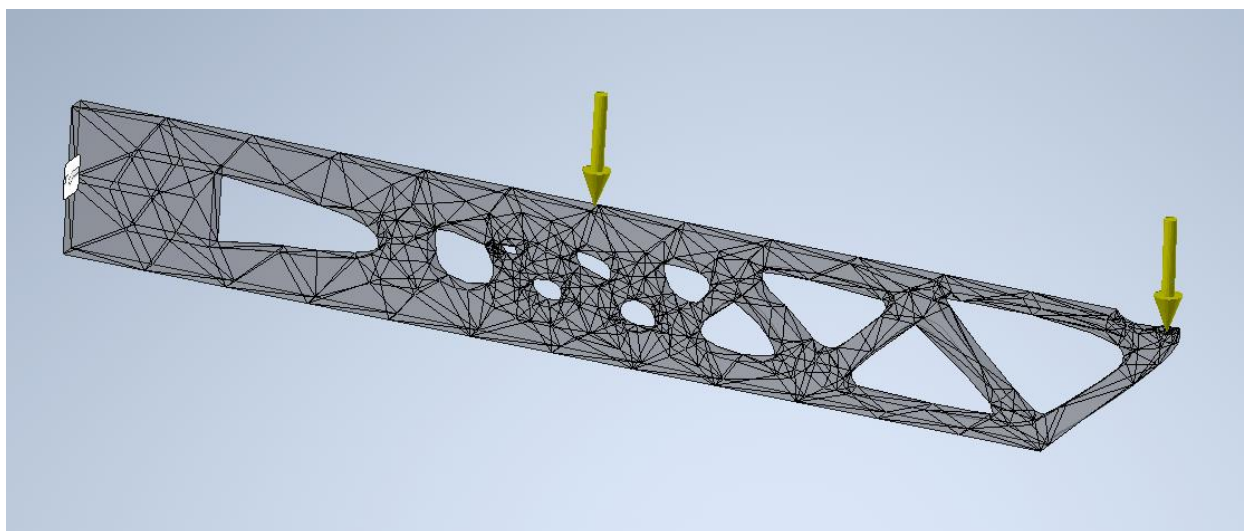
Слика 43. Епрувета са мрежом и постављеним силама

Анализа показује деформацију датог модела за правоугаони попречни пресек (слика 44).



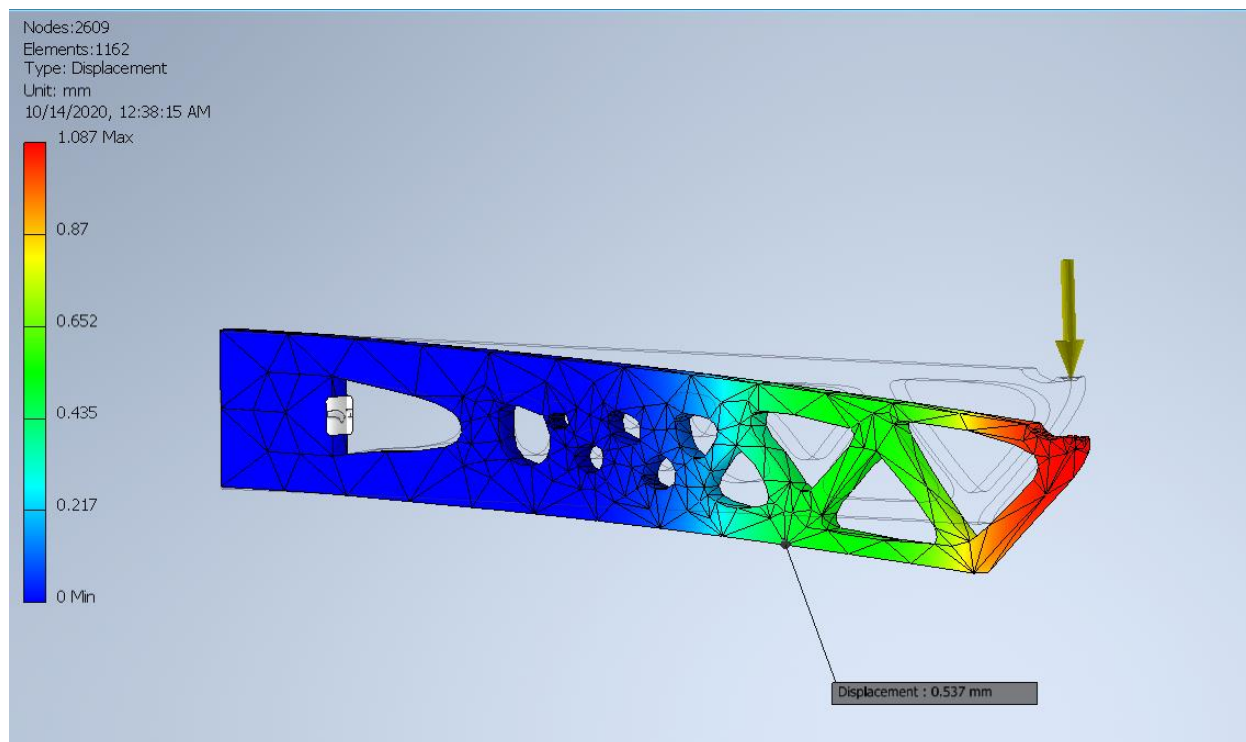
Слика 44. Угиб епрувете

Убацивањем мреже (mesh) за оптимизовани модел добија се следећи изглед (слика 45) и исто као код претходних, уносе се гравитациона сила и сила од 12N на крај епрувете.



Слика 45. Епрувета са мрежом и постављеним силама

На слици 46 се виде деформација епрувете након покретања анализе. Очигледно је да је деформација највећа на слободном крају конзоле.



Слика 46. Угиб епрувете

Добијене нумеричке вредности показују да је деформација квантитативно блиска аналитичким вредностима деформације. Постоји незнатна разлика због спецификације материјала и појединих апроксимација које су извршене током прорачуна. Детаљнијом анализом могуће је постићи апсолутно поклапање вредности, што у овом случају није неопходно као показатељ.

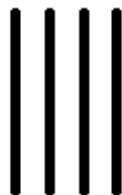
6.2 Експериментална испитивања

Када су завршене све припреме експеримента и извршене нумеричке анализе у циљу добијања оријентационих вредности деформација, било је потребно физички испитати израђене епрувете. Експериментална испитивања вршена су на универзалној машини за испитивање из отпорности материјала приказаној на слици 47.



Слика 47. Универзална машина за испитивање

Прво испитивање односило се на епрувете са квадратним попречним пресеком. Испитивање је вршено на собној температури. Конзола је причвршћена за мерни сто, а компаратор је било потребно поставити испод епрувете. Компаратор је постављен на 12,6cm, што је била најудаљенија тачка од укљештења на којој је испитивање могло бити извршено. Дефинисан је начин оријентације, како би се утврдио њен утицај.



Вертикална оријентација



Хоризонтална оријентација

Прва испитивана епрувета је била са испутном 30% и хоризонталном оријентацијом слојева (слика 48.). Испитивање је вршено из 3 мерења, након чега је извучена средња вредност угиба. Вредности показују да долази до малих одступања за поновљена мерења због услова испитивања, као и тачности мерне опреме.

Табела 9. Добијене вредности угиба прве епрувете

Добијене вредности угиба прве епрувете	Средња вредност
2,41mm	2,423mm
2,43mm	
2,43mm	

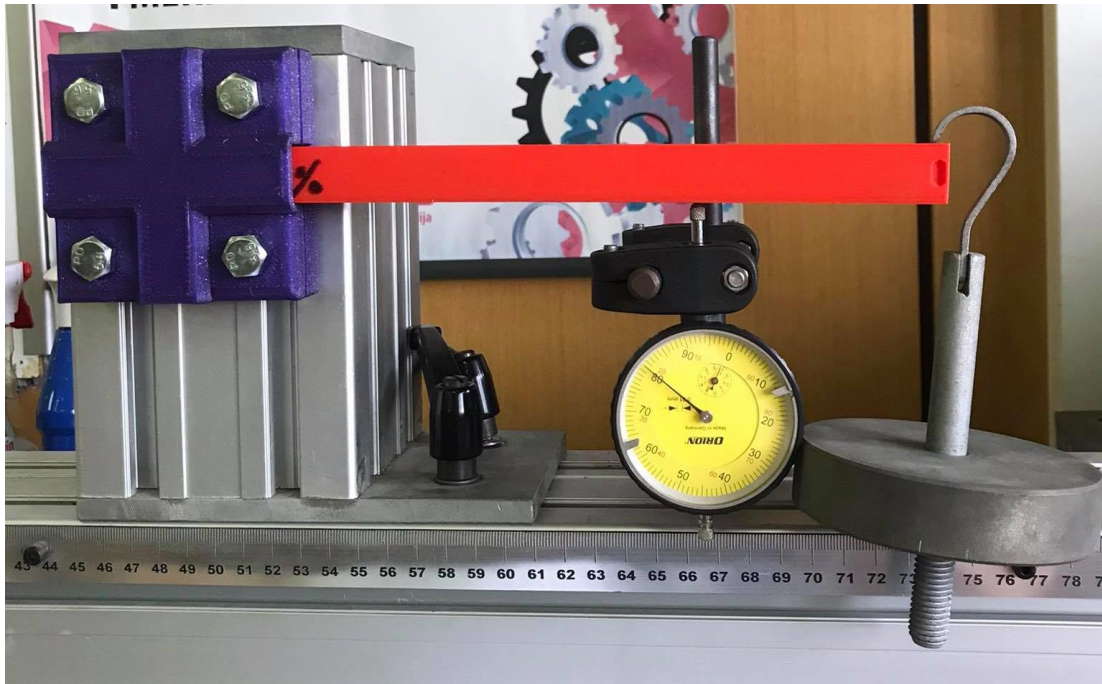


Слика 48. Епрувета са испутом 30% и хоризонталном оријентацијом слојева

Друга испитивана епрувета је била са испутном 60% и хоризонталном оријентацијом слојева (слика 49). Испитивање је такође вршено из 3 мерења, након чега је извучена средња вредност угиба. Добијене вредности су у интервалу од 1,66 mm до 1,82 mm. Постоје извесна одступања која у спроведеним експерименталним испитивањима није било могуће елиминисати. Циљ ових експеримената је да се утврде оријентационе вредности на основу којих је могуће извући закључке о потенцијалним начинима оријентације елемената или о начину израде штампаних модела.

Табела 10. *Добијене вредности угиба друге епрувете*

Добијене вредности угиба друге епрувете	Средња вредност
1,66mm	1,76mm
1,80mm	
1,82mm	

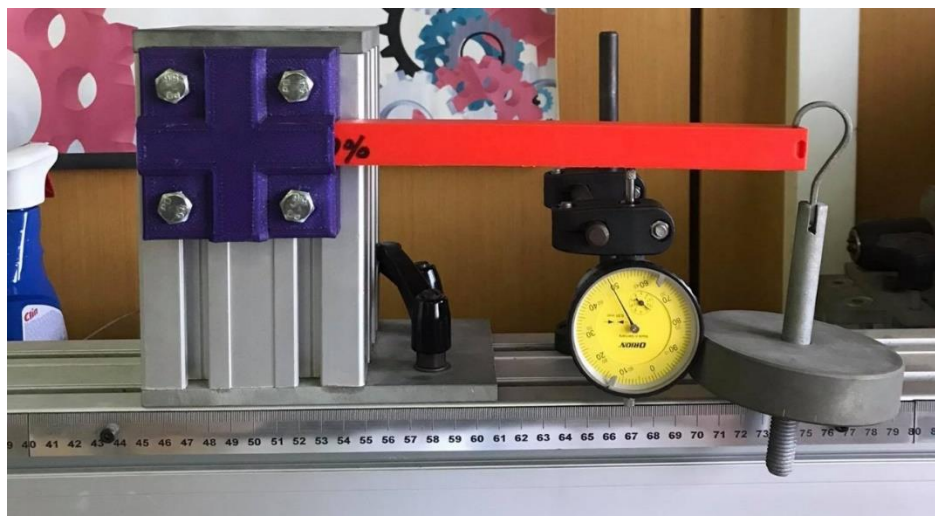


Слика 49. *Епрувета са испуном 60% и хоризонталном оријентацијом слојева*

Следећа испитивана епрувета је била са испуном 100% и хоризонталном оријентацијом слојева (слика 50). Испитивање је такође вршено из 3 мерења, након чега је извучена средња вредност угиба.

Табела 11. *Добијене вредности угиба треће епрувете*

Добијене вредности угиба треће епрувете	Средња вредност
1,15mm	1,18mm
1,22mm	
1,17mm	

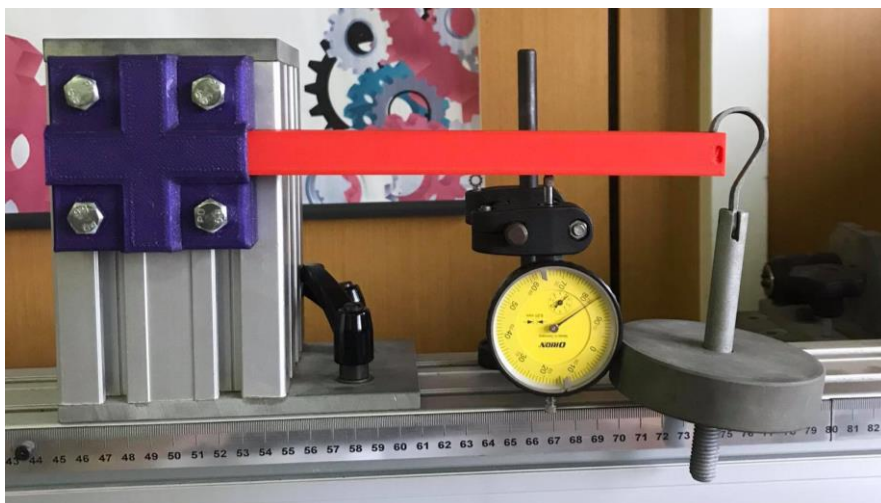


Слика 50. Епрувета са испуном 100% и хоризонталном оријентацијом слојева

После испитивања епрувета са хоризонталном оријентацијом слојева врши се испитивање исте епрувете заокренуте за 90° (слика 51). Самим тим што су слојеви вертикално оријентисани очекивано је да угиб буде мањи, што је и приказано резултатима. . У овом случају за сва испитивања резултати се разликују за 0,06mm, што условљавају услови експеримента. Није било могуће постићи већу тачност, па је из тог разлога узета средња вредност као релевантна за поређење са нумеричком анализом, као и за међусобно поређење експерименталних резултата.

Табела 12. Добијене вредности угиба епрувете вертикалне оријентације слојева

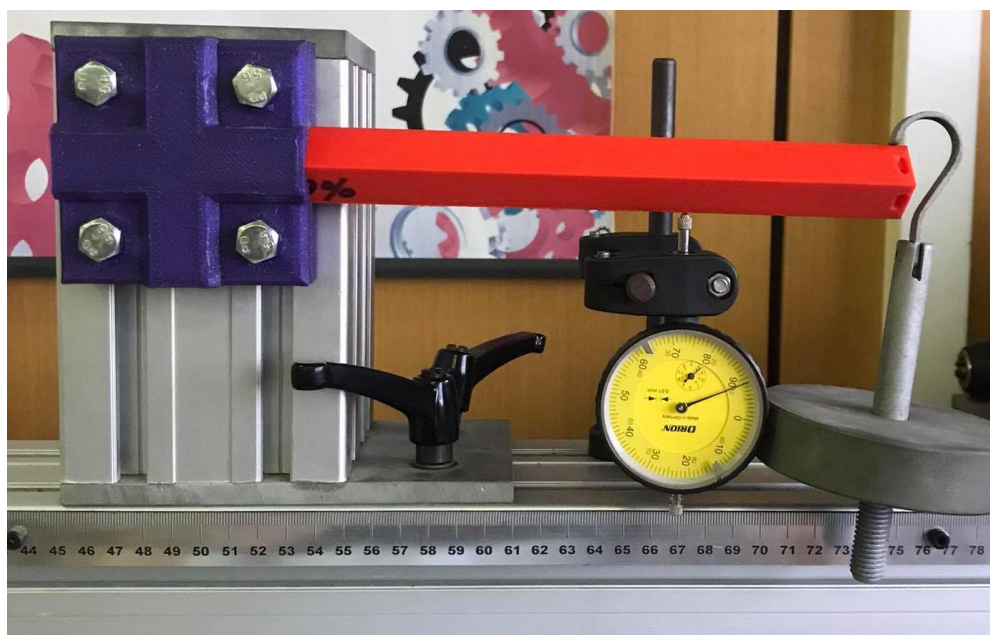
Добијене вредности угиба епрувете вертикалне оријентације слојева	Средња вредност
0,82mm	0,79mm
0,81mm	
0,74mm	



Слика 51. Епрувета са испуном 100% и вертикалном оријентацијом слојева

Табела 13. Добијене вредности угиба заокренуте епрувете за 45°

Добијене вредности угиба заокренуте епрувете за 45°	Средња вредност
0,92mm	0,886mm
0,86mm	
0,88mm	



Слика 52. Епрувета са испуном 100% заокренута за 45°

Испитивање епрувете, као и резултати, за квадратни попречни пресек заокренут за угао од 45° представљени су на слици 52. Теоријски за пун, хомогени пресек, моменти инерције за било коју осу (квадратни пресек) су једнаки. Према том приступу и деформација код свих заокренутих конзола са испуном од 100% треба да буде једнака. Због саме технологије израде делова то није случај, па се ове вредности међусобно разликују.

Након испитаних епрувета квадратног попречног пресека прелази се на испитивање епрувете са правоугаоним попречним пресеком испуне 100% (слика 53.). Мерење је вршено исто као и код претходних епрувета, на раздаљини 12,6cm.

Табела 14. *Добијене вредности угиба епрувете правоугаоног попречног пресека*

Добијене вредности угиба епрувете правоугаоног попречног пресека	Средња вредност
0,85mm	0,836mm
0,82mm	
0,84mm	



Слика 53. *Епрувета са испуном 100% и вертикалном оријентацијом слојева*

Такође, експериментално испитивање је извршено и за оптималну структуру. Експеримент и експериментални резултати представљени су на слици 54.

Табела 15. Добијене вредности угиба оптимизоване епрувете

Добијене вредности угиба оптимизоване епрувете	Средња вредност
0,88mm	0,87mm
0,86mm	
0,87mm	

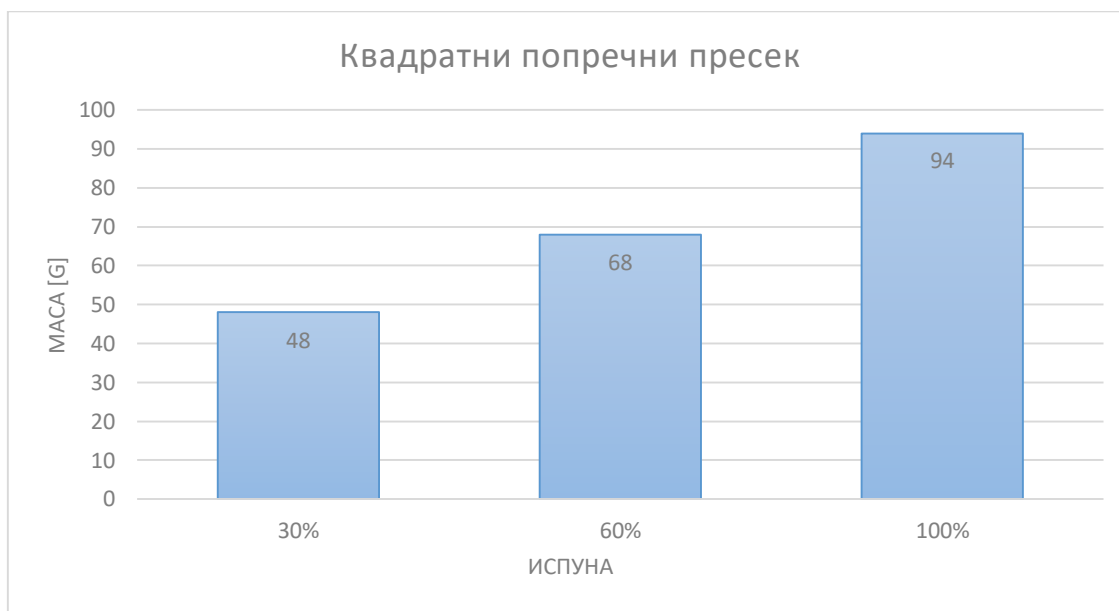


Слика 54. Оптимизована епрувета са испуном 100%

Добијени резултати за све претходно поменуте експерименте су довољне тачности као показатељи утицаја облика и оријентације на деформацију конструкције, у овом случају конзолног носача.

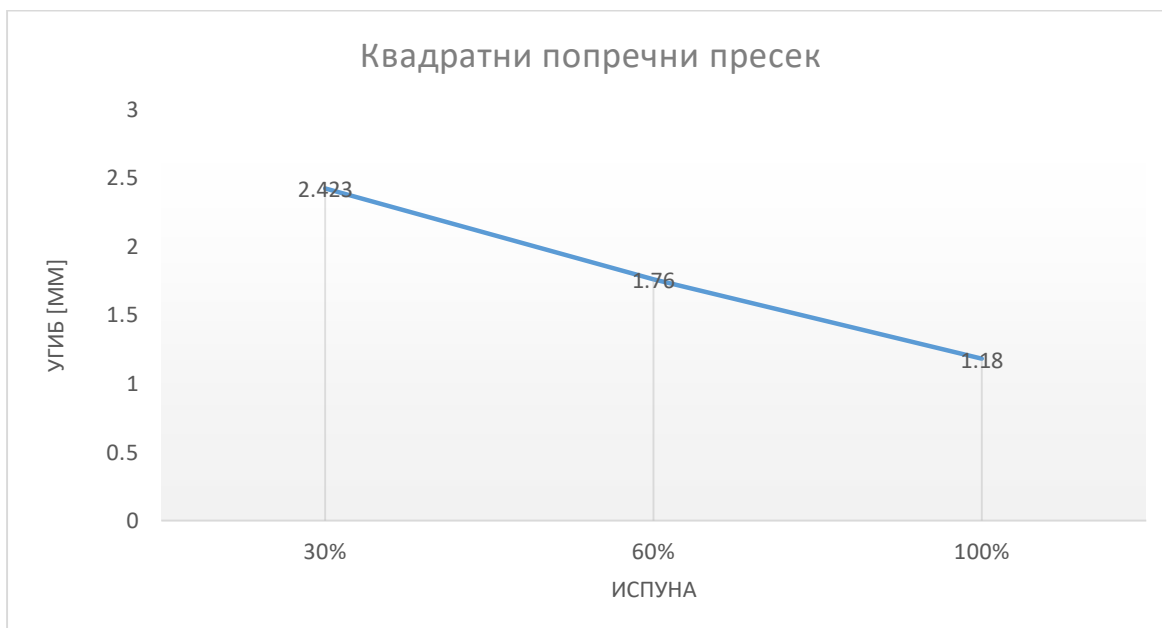
На основу добијених резултата могуће је извршити анализу и донети одговарајуће закључке у циљу одређивања препорука о начину оријентације, као и начину обликовања делова израђених технологијом 3Д штампе.

Када се говори о испуни у одређеном проценту, неопходно је имати у виду да то не подразумева нужно смањење масе дела за тај проценат. Зависност испуне и масе дела представљен је на слици 55.



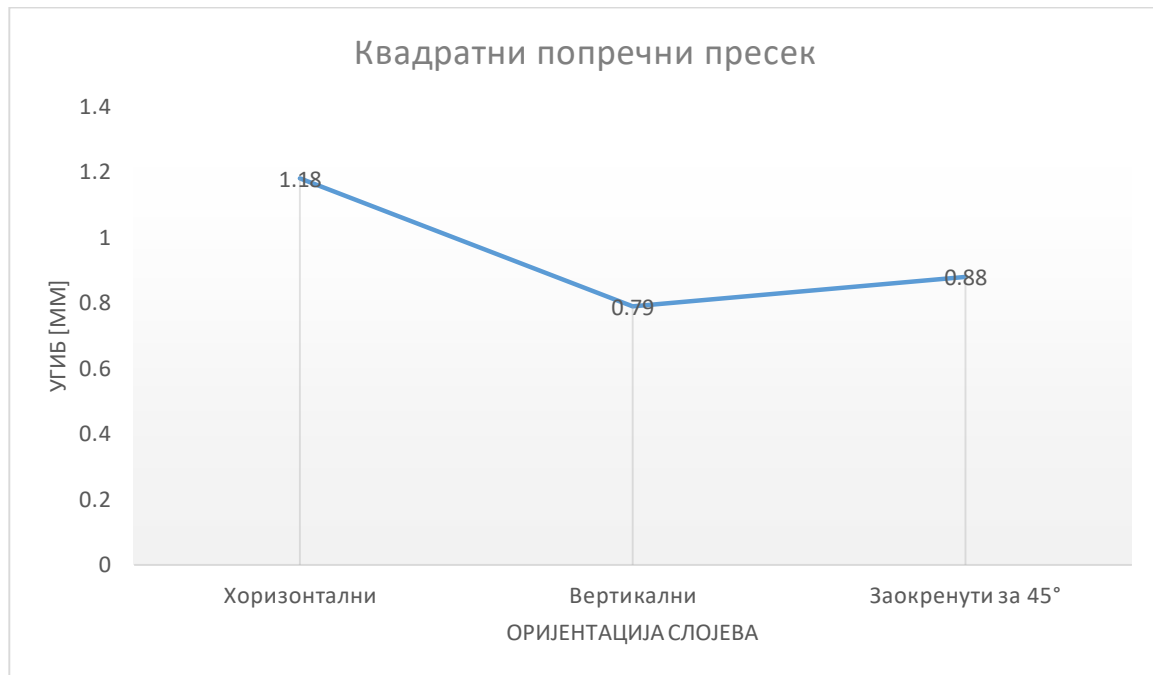
Слика 55. Зависност испуне и масе

Можемо закључити да се у зависности од процента испуне мења и деформација епрувете што је приказано на слици 56. Епрувета са највећим процентом испуне има duplo мањи угиб од епрувете са испуном 30%. Епрувете са квадратним попречним пресеком имају знатно већу масу од осталих епрувета, што значи да је за израду потребно знатно више материјала као и времена потребног за штампу.



Слика 56. Зависност деформације од испуне

Зависност деформације од оријентације слојева приказана је на слици 57. На овакве резултате сигурно је утицало то што су хоризонтално оријентисани слојеви много подложнији деформацијама под утицајем вертикалне силе, из разлога што је много лакше одлепити слој од слоја. За разлику од вертикално оријентисаних слојева епрувете, код којих су слојеви паралелни са деловањем силе.



Слика 57. Зависност деформације од оријентације слојева

На слици 58 приказан је график зависности масе од испуне. Можемо закључити да је маса квадратног попречног пресека 94g, и знатно је већа у односу на правоугаони попречни пресек и оптимизован модел. За израду оптимизованог модела потребан је 1 час и 30 минута, док је за квадратни попречни пресек потребно 4 часа и 34 минута. Можемо закључити да је за оптимизован модел потребно знатно мање материјала и времена за израду.



Слика 58. Зависност масе од врсте попречног пресека

Вредности које је могуће међусобно поредити за различите структуре представљене су на слици 59. Теоријски ове вредности би требало да буду једнаке, међутим, приликом мерења је установљено да постоји извесна разлика. Претпоставка је да се разлика јавља због одступања од стварних структура у технолошком поступку израде елемената. Такође је могуће да извесна одступања постоје и због тачности мерења.



Слика 59. Зависност деформације од структуре



Слика 60. *Зависност деформације од врсте попречног пресека*

Резултати нумеричке анализе разликују се од експерименталног испитивања из разлога што структура PLA пластике није иста као и структура PLA штампане пластике, али су довољно тачни за анализу. Нумерички резултати су блиски вредностима аналитичкиг прорачуна. Разлика између ових вредности настаје услед мале разлике у спецификацији материјала, што је могуће кориговати детаљнијом анализом.

7. Закључак

На основу прегледа области, 3Д технологија је веома распрострањена по свету, али није довољно заживела на нашим просторима. Постоји доста простора за истраживање у самој 3Д технологији, али без обзира на то она је нашла своју примену у разним индустријама и сферама живота. Један од циљева рада био је приказивање предности 3Д штампе у односу на друге производне технологије које су се у овом случају могле применити, тј. значајно смањење времена производње и са најмањим утрошком материјала. Поред тога, као основна предност, представљена је израда сложених структура, а које би било нерационално израђивати другим технолошким поступцима. Изабрана је FDM технологија штампе због приступачности и због велике површине штампаних епрувета.

С обзиром да структура штампаних епрувета није иста као нпр. структура бризганих елемената од истог материјала, утврђено је да карактеристике зависе од оријентације епрувете. Вршено је испитивање услед савијања и реализована су аналитичка, нумеричка и експериментална испитивања. Због зависности оријентације и деформације одабран је квадратни попречни пресек који има једнаке моменате за сваку осу, како би било могуће закључити која оријентација 3Д штампаних елемената је најпогоднија. Такође одабран је правоугаони попречни пресек за који је постигнута мања маса, а исте карактеристике. Избор правоугаоног пресека заснован је на могућности обликовања структуре у циљу добијања оптималних карактеристика.

Применом окружења „Shape Generator” омогућено је добијање оптималне структуре епрувете која је погодна за израду 3Д штампом. Постигнуто је да оптимална епрувета има мању масу и од квадратног и од правоугаоног попречног пресека, а такође је задржала карактеристике носивости и деформабилности.

На основу резултата могуће је закључити да оријентацију и обликовање треба бирати на основу практичног проблема, а да добијени резултати могу бити препоруке за побољшање карактеристика (носивости и деформабилности) за 3Д штампане елементе. Инжењери морају за конкретан проблем балансирати између масе, брзине штампе и утрошеног материјала са једне стране и механичких карактеристика са друге стране. Такође, препоруке оријентације, које омогућавају боље карактеристике, није увек могуће поштовати, а разлози су најчешће засновани на ограничењима ове производне технологије. Ограничења се заснивају на максималним димензијама 3Д штампе, као и проблема постављања елемената код комплекснијих облика током штампе.

По свему судећи, ово је веома перспективна област о којој се веома мало зна и информације још увек нису доступне на нивоу који би омогућио комерцијализацију технологије 3Д штампе. Очигледно је да се стварно понашање елемената израђених овом технологијом не поклапа са теоријским предпоставкама, што је заправо и очекивано. Потребно је установити даљу зависност и понашање ових структура у реалној експлоатацији, а посебно када је реч о комплекснијим структурама које чине и основну предност ове технологије.

Литература

- [1] N. Marjanović, Metode razvoja proizvoda, skripta u elektronskom obliku, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu
- [2]<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Inventor-Help/files/GUID-D74F47F3-FE22-44EF-85BE-7C6B1F56DCF9-htm.html>
- [3] S. Jovičić, N. Marjanović, Osnovi konstruisanja – II izdanje, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, CAD Laboratorija, Kragujevac 2018.
- [4] <https://3dinsider.com/3d-printing-history/>
- [5] <https://3dprintingindustry.com/news/evolution-3d-printing-past-present-future-90605/>
- [6] <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>
- [7] <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>
- [8] <https://all3dp.com/>
- [9] <https://www.sculpteo.com/en/3d-printing/introduction-3d-printing/>
- [10] <https://leadersaward.com/25-days-inventors-3d-printing-cake-omaker/>
- [11] <https://blog.findmysupplies.co.uk/first-3d-printed-object-created/>
- [12] <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [13] <https://www.hobbydb.com/marketplaces/hobbydb/subjects/hideo-kodama-designer>
- [14] David Bak, Rapid prototyping or rapid production, Presse Professionnelle SARL, Massachusetts
- [15] David Ponka, Unlocking the Power of the Shape Generator & Modelling with Meshes, IMAGINiT Technologies Inc. Autodesk University
- [16] T. Campbell, C. Williams, O. Ivanova, B. Garrett, Could 3D Printing Change the World?, October 2011
- [17] Autodesk Inventor Guide, Trial projects, shape generator

[18] C. Schubert, Mark C van Langeveld, Larry A Donoso, Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs, Department of Ophthalmology, Philadelphia, Pennsylvania, USA

[19] D. Rašković, Tablice iz otpornosti materijala, Građevinska knjiga, Beograd 1985.