

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Јован Н. Бабајић

Метрологија 3Д штампе

завршни рад

Крагујевац, 2021.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Мерење, контрола и квалитет

Број индекса: 15/2015

Јован Н. Бабајић

Метрологија 3Д штампе

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Фатима Живић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да направи 3Д штампач који укључује праћење параметара 3Д штампе ради контроле квалитета одштампаног дела.

Препоручена литература:

[1] Фатима Живић, Богдан Васиљевић, Страхиња Миленковић, Изабрана поглавља из метрологије, Практикум за лабораторијске вежбе, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2020, ISBN-978-86-6335-072-4

Крагујевац, Април 2021.

Ментор:

Фатима Живић, др

Садржај

1 Увод.....	7
2.0 Опште информације о 3Д штампачима	8
2.0 Појам 3Д штампања.....	8
2.2 Историја 3Д штампача	9
2.3 Почети примене 3Д штампача.....	9
3.0 Технологије 3Д штампе.....	11
3.1 Стереолитографија (SLA).....	12
3.2 Селективно ласерско синтеровање (SLS)	14
4.0 Моделирање спајањем нанетих слојева (FDM).....	16
4.1 Основни елементи FDM штампача.....	17
4.2 Филамент	18
4.3 Екструдер, механизам за довођење филамента и бризгачка	20
4.4 Подлога	22
4.5 Конструкција.....	23
5.0 Процес склапања FDM штампача Prusa i3	24
5.1 Оквир	24
5.2 Елементи за покретање система кретања	25
5.3 Електронске компоненте и софтвер	30
6.0 Праћење параметара штампе у реалном времену	32
6.1 Коришћење машинског учења у праћењу настајања грешака штампе.....	33
6.1.1 База слика и означавање	34
6.1.2 Тренирање програма YOLO	35
6.1.3 Резултати тренирања и примена на ново окружење	39
6.2 Детекција stringinga на видео снимку у реалном времену	40
6.3 Детекција stringinga на сликама.....	43
6.4 Поређење са комерцијалним решењем за детекцију грешака штампе "The Spaghetti Detective"	44
7 Закључак.....	47
Литература	48
CV	50

Резиме:

У оквиру рада описане су најпопуларније технологије 3Д штампања као што су SLA, SLS и FDM технологије. Детаљније ће бити описани елементи коришћени у FDM штампачима као и цео процес склапања "Prusa i3" штампача.

Помоћу склопљеног "Prusa i3" штампача, биће одштампани модели који ће се користити у процесу провере квалитета штампе. Провера квалитета штампе обавиће се уз помоћ машинског учења у реалном времену на видео снимку. Грешка формирања вишка нити на предмету, познатија и као "stringing", биће примарна грешка која ће бити праћења у току штампања.

Кључне речи: 3Д штампање, FDM, Prusa i3, машинско учење, квалитет

Summery:

In this paper, the most used technologies applied in 3D printing will be described, like SLA, SLS and FDM technology. Elements used in FDM printers will be described in more details as well as whole process of assembling a "Prusa i3" printer.

Using the assembled "Prusa i3" printer, we will print test models which will be used in proces of testing the quality of the print. Testing the quality of the print will be done using machine learning in real time on video. Error in which strings of material are left on the model, also know as "stringing", will be the primary error which will be observed during the process of printing.

Keywords: 3D printing, FDM, Prusa i3, machine learning, quality

Захвалница

Захвалност дугујем менторки др Фатими Живић на указаној помоћи током израде завршног рада, и подстицању да увек истражујем и учим.

Бескрајну захвалност дугујем својим родитељима на подршци, стрпљењу, саветима и веровању у мене.

1 Увод

Појам 3Д штампања релативно је нов и своју популарност стекао је у последњих 10 година. Највећи утицај на популарност имао је пад цена FDM штампача као и њихова могућност прилагођавања према потребама корисника. Данас, у 21. веку, смо сведоци коришћења производа који корисника не чине другачијим и оригиналним, већ баш супротно. 3Д штампа мења овај тренд и пружа могућност уникатног производа који корисника чини јединственим. Управо ова способност 3Д штампања се показала као један од главних разлога зашто у свакодневици можемо чути израз "3Д штампање".

Прецизност и квалитет предмета добијених 3Д штампањем достигао је веома висок ниво и своју примену нашао у различитим индустријама. Материјал који се користи у процесу 3Д штампања може бити различитих карактеристика, почев од изузетне отпорности на ударе до невероватне еластичности. Избор материјала који се користи у 3Д штампи расте али је посебан акценат данас стављен на развој еколошких и биоразградивих материјала ради заштите животне средине.

Интернет је омогућио приступ информацијама на глобалном нивоу које су се пре свега 30 година могле наћи само у библиотекама. Уз готово неограничен приступ информацијама, све више људи је преузимало са интернета схеме 3Д штампача и прилагодили их својим потребама. Детаљним процесом склапања једног таквог штампача, који је у суштини осмислила заједница људи којима је 3Д штампање хоби, бавићемо се у раду.

Свет се тренутно налази у јеку индустријске револуције 4.0 која, између осталог, подразумева умрежавање више различитих технологија како би се људима, као корисницима, олакшао живот. Поред резултата који произилазе из револуције 4.0 као што су паметни градови или паметне куће, примена ИТ технологије на процес производње посебно је довела до високог степена аутоматизације у производњи. Примером дигитализације и аутоматизације производње бавићемо се у раду, конкретно детекцијом грешке у процесу 3Д штампања применом машинског учења.

Поред дигитализације, праћење параметара штампе помоћу машинског учења може омогућити и примену у "on-line" метрологији. Применом машинског учења у on-line метрологији, процес праћења параметара би довео до детекције грешке у току штампања, за разлику од "off-line" метрологије која се тренутно примењује. On-line метрологија 3Д штампања је нова област која се тренутно доста истражује и у којој још увек не постоје потпуна решења [1].

Посебно је важно нагласити да су сви програми који су коришћени током писања рада отвореног кода и јавно доступни свима.

2.0 Опште информације о 3Д штампачима

2.0 Појам 3Д штампања

3Д штампање је област адитивне технологије у којој се тродимензионални објекат добија наношењем танких слојева материјала један на други. Наношење слојева може се обавити на више начина коришћењем различитих технологија, као што су топлеење и наношење нити, усмерени ултраљубичасти зраци на течни полимер, ласерско синтеровање праха и друге. Основе најпопуларнијих технологија биће обрађене даље у раду, међутим технологија чији ће принцип рада, и функционисање самих штампача, детаљније бити анализирани јесте моделирање спајањем нанетих слојева - FDM. Највећа предност 3Д штампања у процесу производње је брза и прецизна израда предмета чак и када се ради о објектима са комплексном геометријом. Да би се процес 3Д штампања обавио, без обзира на врсту технологије која се користи, потребно је претходно урађени CAD¹ модел, најчешће у ".stl" формату, превести у g-code² како би процес израде предмета могао да почне.



Слика 1 Модел штампача "Prusa i3 MK3S+" [2]

¹ CAD, скраћено од "Computer Aided Drawing", представља вид цртања и моделирања коришћењем рачунара

² G-code, програмски језик који се користи за контролу кретања CNC, Computer Numerical Control, машина

2.2 Историја 3Д штампача

Вековима су истраживачи, а касније и научници, покушавали да направе машину налик на 3Д штампач која би користила адитивну технологију за добијање одређеног производа. Може се рећи да је идеја адитивне технологије настала као потреба за процесом који је супротан традиционалним процесима производње, као што су стругање, глодање и бушење, и у којем би се за разлику од поменутих процеса, материјал "додавао" уместо "одузимао". Модерна технологија 3Д штампе која се данас користи настала је средином 1980их година. Првобитан назив за 3Д штампање био је "rapid prototyping", односно брза израда прототипова. Разлог за овакав назив је управо зато што се овај вид производње користио скоро искључиво у изради прототипова и макета ради скраћивања времена израде прототипа, а самим тим и умањење трошкова производње. Израда прототипа на овај начин била је исплативија посебно приликом тестирања различитих особина модела, као што је на пример аеродинамичност, и једна од основних погодности је управо била могућност брзе измена дизајна модела у зависности од показаних резултата теста. Такође, битна особина модела добијених овом технологијом била је што се цео процес производње обављао на једној машини и није захтевао промену алата, без обзира на сложеност предмета. На овај начин се време израде значајно скратило у односу на друге традиционалне технологије, али и сама цена сваког комада. Након израде и тестирања више прототипова коришћењем ове технологије, и добијених задовољавајућих резултата, процес израде алата којим би се добио модел би могао да почне. Конкретна технологија која се користила при изради прототипова у овом периода се назива стереолитографија и сам принцип функционисања биће описан детаљније даље у раду. Поменути технологију је развио, а касније и патентирао, Џак Хал који је данас познат као оснивач компаније "3D Systems" која се и даље бави развојем 3Д штампача у комерцијалне сврхе [3].

2.3 Почeci примене 3Д штампача

О значају и могућој примени 3Д штампача, већ у првим годинама развоја, довољно говори податак да се њен развој највише истраживао у лабораторијама "NASA" (National Aeronautics and Space Administration), "DARPA" (Defense Advanced Research Projects Agency) као и у другим великим компанијама. 3Д штампа је брзо напредовала али је и даље у том периоду примарно коришћена за израду прототипова или реплика модела и никако није могла да замени традиционалне технологије производње. Због технологија које су користили, али и због економске исплативости, 3Д штампаче је било немогуће користити у масовној производњи. Ова мана 3Д штампача је и данас актуелна али је са падом цена 3Д штампача економска исплативост доведена на прихватљив ниво и користи се у одређеним индустријама за мању серијску производњу.

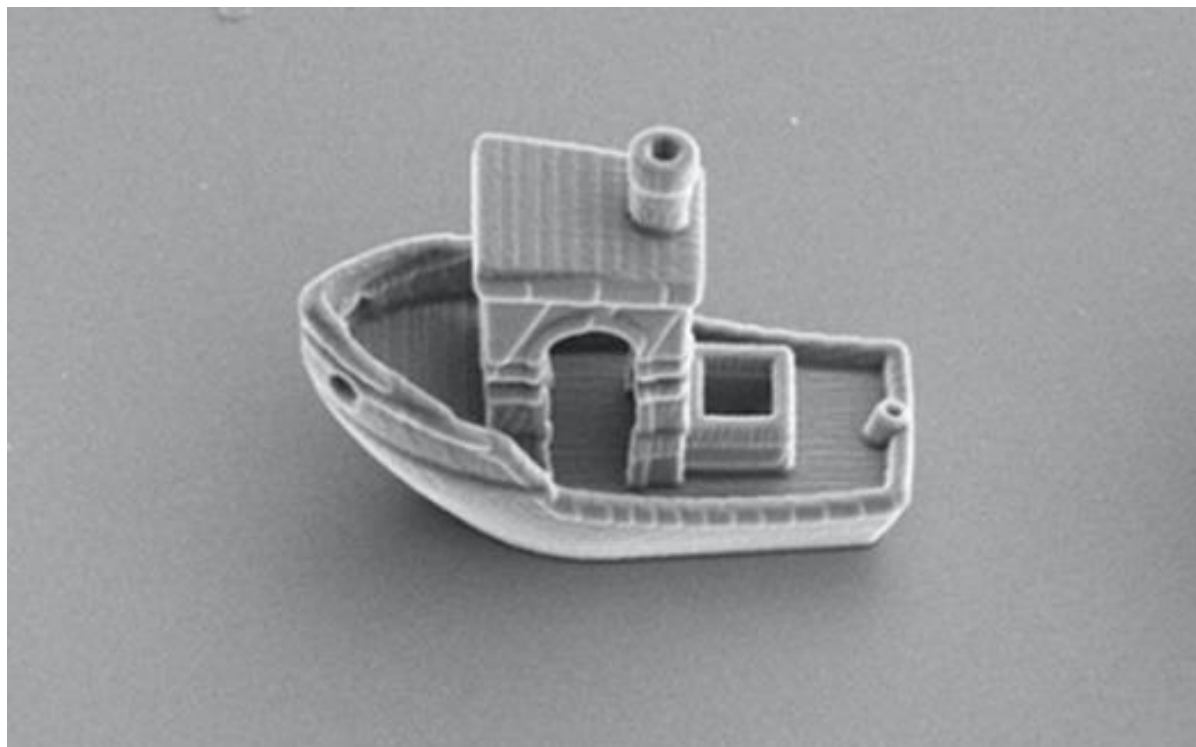
Развој 3Д штампе и CAD програма су уско повезани. Како је примена CAD програма постајала све заступљенија у машинству и индустрији, тако је и измена модела одштампаних на 3Д штампачима била лакша. Софтвери за израду 3Д модела су постајали све напреднији и пружали су могућност брже и лакше израде сложенијих тродимензионалних предмета у краћем временском периоду. Како се технологија развијала, тако је и цена самих штампача опадала, а са тим се све више произвођача одлучило на њихову примену у развоју и истраживању својих производа.

Ауто индустрија, развој робота, чак и област медицине су само од неких области у којој се 3Д штампа користила већ средином 90их година прошлог века.

Развој 3Д штампача је пратио и развој других технологија које су се директно, или индиректно, користиле и при њиховом раду. Развој различитих материјала који су се користили за штампање предмета али и израду самих конструкција штампача, веће могућности модерних рачунара при изради модела предмета, коришћење бежичних мрежа за комуникацију са штампачем само су неки од примера.

Било је потребно само 30 година да 3Д штампа постане синоним за адитивну производњу и да своју примену нађе у различитим областима. 3Д штампање се данас може наћи скоро у свакој области индустрије, и у свим размерама. Као што је већ речено, 3Д штампање није исплативо користити у масовној производњи, међутим када је у питању мали обим производње, посебно индивидуална производња, 3Д штампање представља један од најисплативијих производних процеса. Овакав вид производње је посебно применљив у медицини, где се управо 3Д штампачи користе за израду протеза. Како је сваку протезу потребно прилагодити сваком пацијенту посебно, могућност лаке измене модела протезе а касније и лака производња исте, знатно скраћује цео процес развоја и производње. Поменути пример је само један од многих, и наравно област медицине није једина која користи 3Д штампу.

Величина предмета које је могуће одштампати користећи 3Д штампаче су такође импресивне. Може се видети да је могуће одштампати предмете величине свега 30 μm (Слика 2) који се користе у сврхе истраживања "микропливача" у флуидима. Поменути модел је урађен на Универзитету у Лајдену (Холандија) и само показује могућности 3Д штампе на микро нивоу [4].



Слика 2 "3DBenchy" величине 30 миктометара [4]

Флексибилност и примену 3Д штампе показује и могућност израде зидова кућа за мање од 48 часова (Слика 3). Овакве врсте кућа већ постоје и налазе се у Тексасу [5]. Научници у центру за развој компаније NASA такође разматрају и развијају технологију која ће бити примењена за брзу израду зидова "кућа" на другим планетама нашег соларног система, као што је Марс. Занимљиво је да ровер "Curiosity", који је 2012. године слетео на Марс, управо користи један елеменат који је направљен на 3Д штампачу. У питању је керамички део који је посебно направљен за ову намену и његова функција је заштита и чување узорака тла узетих на Марсу [6].



Слика 3 3Д одштампани зидови куће [5]

3.0 Технологије 3Д штампе

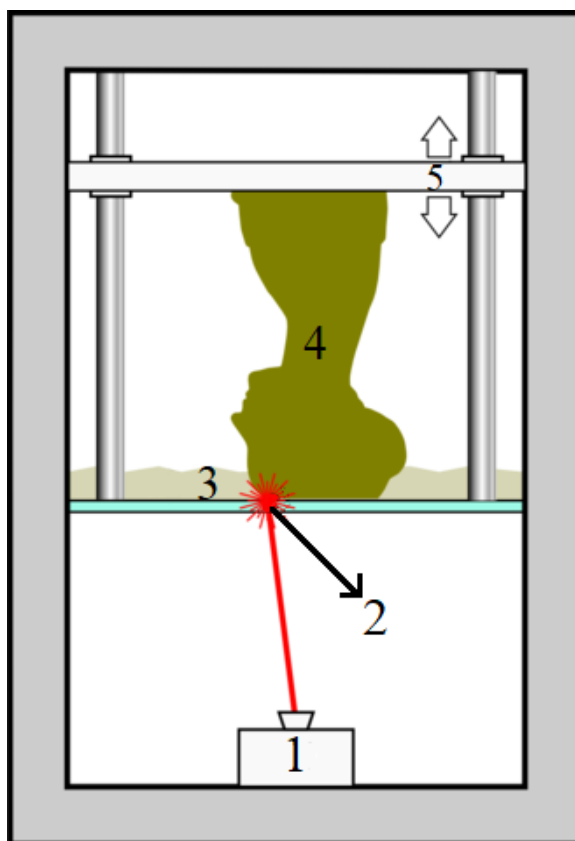
У процесу 3Д штампања користе се различите технологије у зависности од предмета који је потребно добити. Даље у ради неће бити анализирани технологије које се користе за добијање већих предмета, као што су већ поменуте технологије за израду зидова, већ само технологије које се користе за израду мањих модела. Битно је рећи да је цео процес саме израде предмета на 3Д штампачима аутоматизован у свим технологијама које ће бити споменуте. Међутим, процес самог моделирања траженог предмета се најчешће обавља ручно у различитим CAD програмима. Након урађеног 3Д модела предмета, исти се конвертује у g-code коришћењем софтвера. Добијени код се даље шаље самом штампачу чиме почиње процес штампања. Оператер штампача обавља проверу исправности и спремности штампача пре почетка рада, као и проверу самог материјала који ће се користити за штампу. Процес припреме штампача је веома битан јер се прекидање штампача у току рада не препоручује и веома ретко примењује јер може довести у ризик облик одштампаног предмета.

Такође, битно је споменути да се даље у раду налази анализа 3Д штампачима, које се најчешће користе за израду модела или прототипова, и ређе у изради одговорних делова. Саме основе технологија које се користе у поменутим штампачима су универзалне и примењују се такође при конструкцијама већих, индустријских, штампача који могу одштампати и одговорније елементе али наравно подразумевају знатно већу цену самог штампача, као и софтвера и одржавања. Број технологија које се користе у 3Д штампању је велики и често се надовезују једна на други, али за потребе рада издвојене су 3 најпопуларније технологије:

- Стереолитографија (SLA)
- Селективно ласерско синтеровање (SLS)
- Моделирање спајањем нанетих слојева (FDM)

3.1 Стереолитографија (SLA)

Стереолитографија је технологија која се прва применила у 3Д штампању, и познатија је под својим скраћеним називом SLA. Као што је већ споменуто, SLA технологију је први применио и патентирао Џак Хал 1984. године након чега је основао компанију "3D Systems" која је једна од првих специјализованих компанија у области 3Д штампе, барем у комерцијалном смислу. Основни принцип рада штампача који користи SLA технологију може се видети на Слици 4.

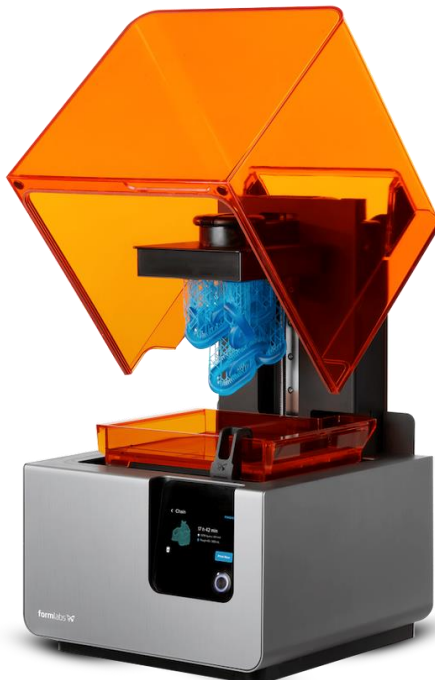


Слика 4 Схема функционисања стереолитографског штампача [7]

Ласер (1) емитује усмерене ултраљубичасте зраке на провидно дно посуде (2) у којој се налази течни фотополимер (3). Под утицајем зрака фотополимер постаје тврд и формира танки слој полимера (4), чиме се формира један слој предмета. Након завршеног слоја, платформа (5) се подиже, односно помера по z оси на горе, како би израда следећег слоја могла да почне. Након одређеног времена, у зависности од величине и комплексности предмета, наношењем слојева један на други добија се готов предмет.

Слојеви тврдог полимера насталог на SLA штампачу крећу се између 0,025 mm и 0,1 mm. Пример једног SLA штампача након процеса штампања може се видети на Слици 5. Фотополимери који се користе у SLA штампачима се такође називају и смолама, и могу бити различитих карактеристика и намена. Предмети који су добијени применом ове технологије у одређеним случајевима могу бити довољно тврди да се могу даље машински обрађивати [7].

Као што је већ поменуто, технологије које се примењују у 3Д штампању се често надовезују једна на другу и један пример управо може се видети у SLA штампи. Развој LCD³ панела нашао је своју примену и у SLA штампи. Коришћење панела који имају способност већег контраста боја може да замени употребу ултраљубичастих зрака у штампачима. Штампачи који користе поменуте LCD панеле су јефтинији и могуће је направити их у кућним условима. Наравно, предмети добијени на SLA штампачу који користе LCD панеле имају лошије механичке карактеристике и генерално су лошијег квалитета у односу на предмете добијене на класичним SLA штампачима [8].



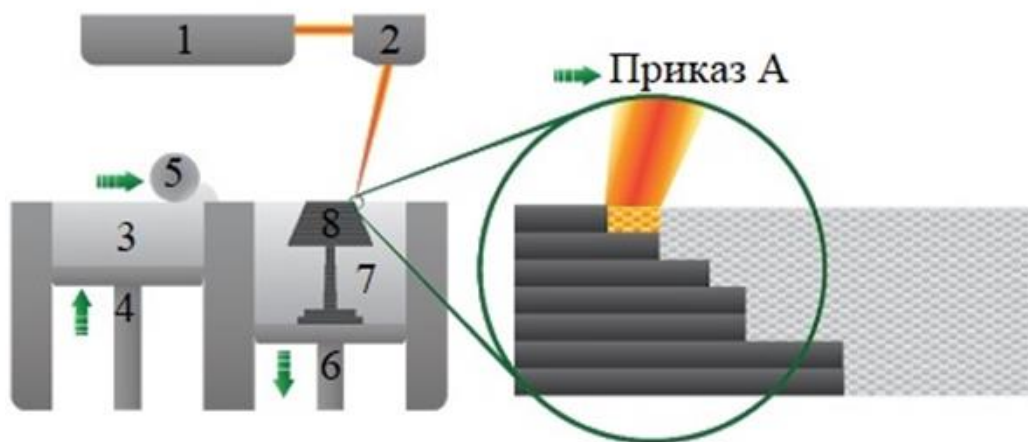
Слика 5 Модел "Form 2" SLA штампача компаније "Formlabs" [9]

³ Liquid-crystal display, екран базиран на технологији течних кристала

Поред улагања у технологију стереолитографије, фирма "3D Systems" је такође заслужна за развој формата ".stl" који се данас користи као стандардни формат за чување датотеке 3Д модела приликом њиховог штампања. Своју прву примену ".stl" формат је нашао управо у SLA технологији. Међутим данас се користи приликом рада на скоро сваком 3Д штампачу, без обзира на технологију коју користи или произвођача. STL формат описује само спољашњу геометрију тела у тродимензионалном координатном систему и не садржи податке као што су боја или текстура предмета [10].

3.2 Селективно ласерско синтеровање (SLS)

Селективно ласерско синтеровање, односно SLS, је релативно нова технологија која се такође највише користи за израду прототипова. SLS штампачи користе усмерен ласерски зрак на прах, приликом чега се исти синтерује у тачкама које су под дејством зрака. Због своје сложености SLS штампач није тако лако направити у кућним условима, за разлику од SLA штампача, тако да се овакви штампачи могу најчешће наћи у индустријским погонима. Такође због коришћења ласера, SLS штампаче није препоручљиво користити у кућним условима из безбедносних разлога. Основну шему функционисања 3Д штампача који је базиран на SLS технологији може се видети на Слици 6.



Слика 6 Схема SLS штампача [11]

Табела 1 Елементи SLS штампача приказаног на Слици 6

1 – Ласер	5 – Ротирајући ваљак
2 – Систем за скенирање	6 – Платформа на којој се врши процес синтеровања праха
3 – Прах који се доводи систему	7 – Прах који се синтерује у процесу производње
4 – Платформа за довођење праха	8 – Предмет штампања

Ласер (1) је усмерен ка систему за скенирање (2) који анализира прах (7) и даље, према аутоматско добијеним командама, усмерава ласер на ху раван праха. Услед дејства ласера на прах, он се синтерује и формира се слој предмет штампања (8). Како би израда следећег слоја почела, платформа (6) се помера по z оси на доле, док се у исто време платформа (4) помера на горе. У тренутку подизања платформе (4), ротирајући ваљак (5) наноси следећи слој праха. На овај начин се симултано врши довођење свежег праха, који ће се даље обрађивати, и почетак рада на следећем слоју. На увећаном приказу А можемо детаљније видети формирање слојева предмета [11].

Прах који се синтерује најчешће је метал, међутим могуће је користити и керамику, разне врсте полимера, као и стакло. Ради бржег процеса штампања прах се загрева мало испод тачке топљења чиме је време деловање ласера, који догрева прах до тачке топљења, знатно смањено. Ласер који се користи приликом синтеровања металног праха је базиран на CO_2 гасу, међутим могу се користити и други гасови.

Предмети добијени на SLS штампачу подложни су појави храпавости на својим завршним слојевима па се често практикује пескарење ради отклањања ових неправилности. Пример оквира за наочаре одштампаних на SLS штампачу може се видети на Слици 7, у питању је предмет који је тек извађен из праха и потребно га је детаљније обрадити.

У односу на SLA штампаче, SLS штампа омогућава знатно лакшу израду предмета сложених геометрија. Посебно битна предности у односу на SLA штампу је та што је могуће радити зидове предмета и под углом од 45° без потребе за коришћењем ослонаца. Израда прототипова јесте примарна намена SLS штампача, међутим своју примену све више налазе у ауто индустрији као и изради стезног алата, највише због знатно мање тежине добијених предмета који и даље имају потребне механичке особине. Новија истраживања су показала сличне карактеристике производа добијених на SLS штампачима и производа добијених бризгањем пластике [13]. Технологија бризгања је знатно старија, па се самим тим и дуже усавршавала у производњи, међутим са даљим напретком SLS технологије могуће је смањити разлику између добијених производа коришћењем ових технологија.



Слика 7 Оквир за наочаре урађен на SLS штампачу [12]

4.0 Моделирање спајањем нанетих слојева (FDM)

Предмети урађени на FDM⁴ штампачу се добијају процесом топљења танких нити, које се у слојевима наносе на подлогу. Из угла индустријске производње FDM штампачи се најмање користе и примарно су намењени за брзу израду модела и прототипова у процесу истраживања и развоја. Међутим, FDM штампачи су свој нагли комерцијални успон стекли последњих 10 година, и представљају штампаче који су према броју продатих модела далеко испред SLA и SLS штампача. Уколико погледамо 5 најпродаванијих модела 3Д штампача на сајту amazon.com [14], можемо видети да су 3 модела базирани на FDM технологији. На број продатих склопљених FDM штампача би требало додати и моделе који долазе у деловима и ручно се склапају.

Популарност FDM штампача проистиче из 3 разлога, који су уско повезани и они су:

- ниска цена делова потребних за конструкцију штампача
- коришћење релативно једноставне технологије 3Д штампе
- огромна заједница људи који ради на развоју

Технологију названу моделирање спајањем нанетих слојева осмислио је и патентирао Стивен Скот Крамп 1988. године који је, као и Џак Хал, касније основао компанију која се бави 3Д штампањем и адитивном технологијом "Stratasys" [15]. Наредних 20 година развој FDM технологије био је под лупом Stratasys-а што је значило да никакве измене и продаја штампача није била могућа без њихове дозволе. Прва назнака слободном развоју FDM технологије појавила се у 2006. години када је на Универзитету у Бату (Енглеска) започет пројекат под називом "Rep Rap" који представља скраћеницу "репликатор брзог прототипа"⁵. Циљ овог пројекта био је "клонирање" односно штампање нових делова штампача на већ постојећем, комерцијалном FDM штампачу, ради конструисања новог потпуно функционалног штампача. Захваљујући својој филозофији отвореног кода, који свако може да промени и прилагоди својим потребама, "Rep Rap" пројекат је и данас актуелан. Следећа битна година у развоју FDM штампача је била 2009., година у којој је патент на FDM технологију компанији "Stratasys" истекао. Након поменуте године друге компаније су могле да мењају, производе, и продају штампаче базиране на FDM технологији без плаћања лиценце компанији "Stratasys". Међутим, законски сам назив "FDM" је и даље био под заштитом па је самим тим било потребно наћи други. Назив који се од тада користи, упоредо са FDM, је "спајање филамента топљењем", скраћено FFF⁶. Са технолошке стране FDM и FFF штампа су исте, али се у литератури чешће може наћи FDM. Након истицања патента, популарност FDM штампе је скочила и све више људи је почело из хобија да се бави 3Д штампом. Наравно и комерцијална продаја је пратила пораст популарности па је доста компанија почело да прави штампаче који користе FDM технологију. Поред тога што су FDM штампачи постајали популарнија међу љубитељима 3Д штампе, индустријска популарност ипак није доживела толики скок из разлога што су предмети одштампани на FDM штампачима лошијих механичких карактеристика у односу на друге 3Д штампаче.

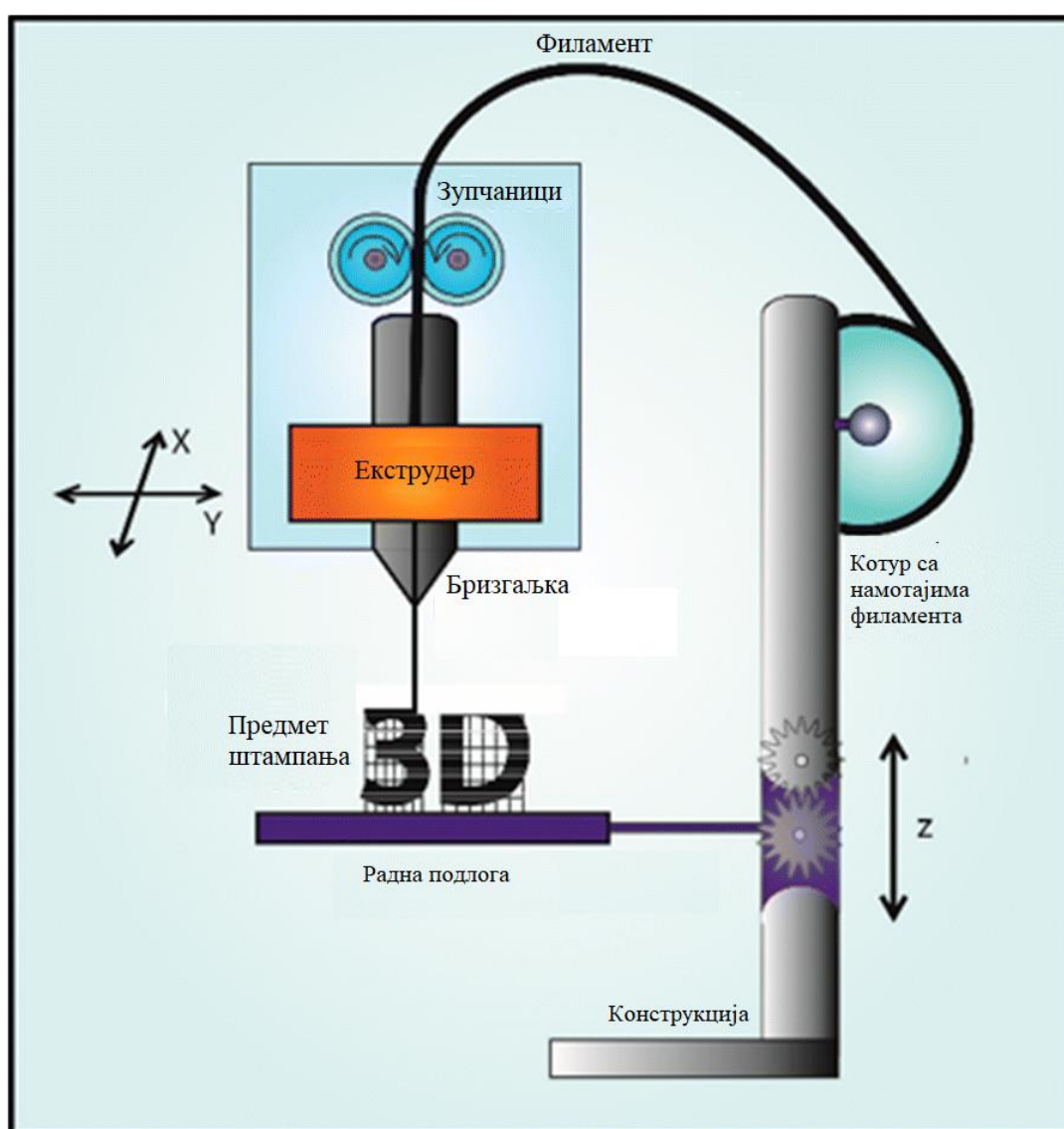
⁴ FDM, енгл. Fused deposition modeling

⁵ Rep Rap, енгл. replicating rapid prototyper

⁶ FFF, енгл. Fused filament fabrication

4.1 Основни елементи FDM штампача

Технологија која се користи у FDM штампачима је доста једноставнији у односу на SLA и SLS штампу. Такође, делови који се користе за израду FDM штампача примењују се и у другим машинама, чиме је њихова доступност знатно већа, али и цена мања. Само један пример оваквог дела, а који је кључан за функционисање 3Д штампача, су степ мотори који се налазе у огромном броју машина, чак и у класичним штампачима за папир. За разлику од претходно обрађених технологија 3Д штампе, FDM штампачи не користе скупе и тешко доступне компоненте као што су ултраљубичасти зраци. Упрошћени приказ FDM штампача можемо видети на Слици 8.



Слика 8 Механизам FDM штампача [16]

4.2 Филамент

Материјал који се користи у FDM штампачима је у облику танких нити и назива се филамент. Филамент је намотан на посебан котур (Слика 9) који се најчешће налази изнад самог штампача, ради лакшег допремања материјала штампачу. Пречници филамената који се користе у FDM штампачима су 1.75mm и 2,85mm, од којих је пречник од 1.75mm заступљенији. Материјали од којег су направљени филаменти могу бити различити али су најпопуларнији Полилактична киселина (PLA)⁷ и Акрилонитрил бутадиеен стирен (ABS)⁸, и обе врсте материјали су полимери. Филаменти се најчешће продају у паковањима од 1kg док дужина самог намотаја варира. У Табели 2 може се видети поређење ABS и PLA филамента, преузетих из каталога компаније "Gembird", који су пречника 1.75mm [18].

Табела 2 Карактеристике PLA и ABS филамената [18]

Особина	Мерна јединица	PLA	ABS
Тежина	kg	1	1
Дужина нити на ваљку	m	330	400
Густина материјала на температури од 21.5°C	g/cm ³	1.25	1.01
Температура топљења	°C	195-235	225-240
Температура на којој материјал почиње да се деформише	°C	47	85
Цена	РСД	1978	2211

Поред примене у 3Д штампачима, ABS и PLA се такође користе као материјали и у другим индустријама. PLA се користи за израду пластичних флаша, и због своје способности биоразградивности примењује се у изради одређених протеза које се уграђују у тело пацијента. Неки од производа који користе ABS су кућишта електронских компоненти, LEGO играчке, заштитни шлемови и друге. Важно је напоменути да су обе врсте полимера могу рециклирати и поново користити, што је данас веома битно за заштиту животне средине. Поред устаљених елемената у поменутих полимерима, одређени произвођачи у својој понуди имају и филаменте који у себи садрже додатке различитих других материјала, као што су влакна дрвета или прах метала. Због споменутих додатака ови филаменти имају побољшане одређене механичке карактеристике које произилазе из елемената који су им додати.

⁷ PLA, енгл. Polylactic acid, биоразградивни полимер добијен из шећера кукуруза и шећерне трске [17]

⁸ ABS, енгл. Akrylonitril butadien stiren

Пре избора филамента врши се провера спецификација штампача, који ће се користити, тачније да ли испуњава услове које је произвођач филамента прописао. Као што се може видети из Табеле 2, мора се проверити да ли штампач достиже захтеване температуре које су потребне за топљење нити. Поред спецификација штампача мора се узети у обзир и карактеристике и димензије предмета штампања. Цена филамента на тржишту је мања у односу на материјале који се користе у SLA и SLS штампи. Такође, руковање и одлагање котура филамента је знатно лакше у односу на друге материјале који се примењују у 3Д штампи. Уколико је реч о ABS и PLA филаментима, они се могу чувати на собној температури и без ризика по животну средину.

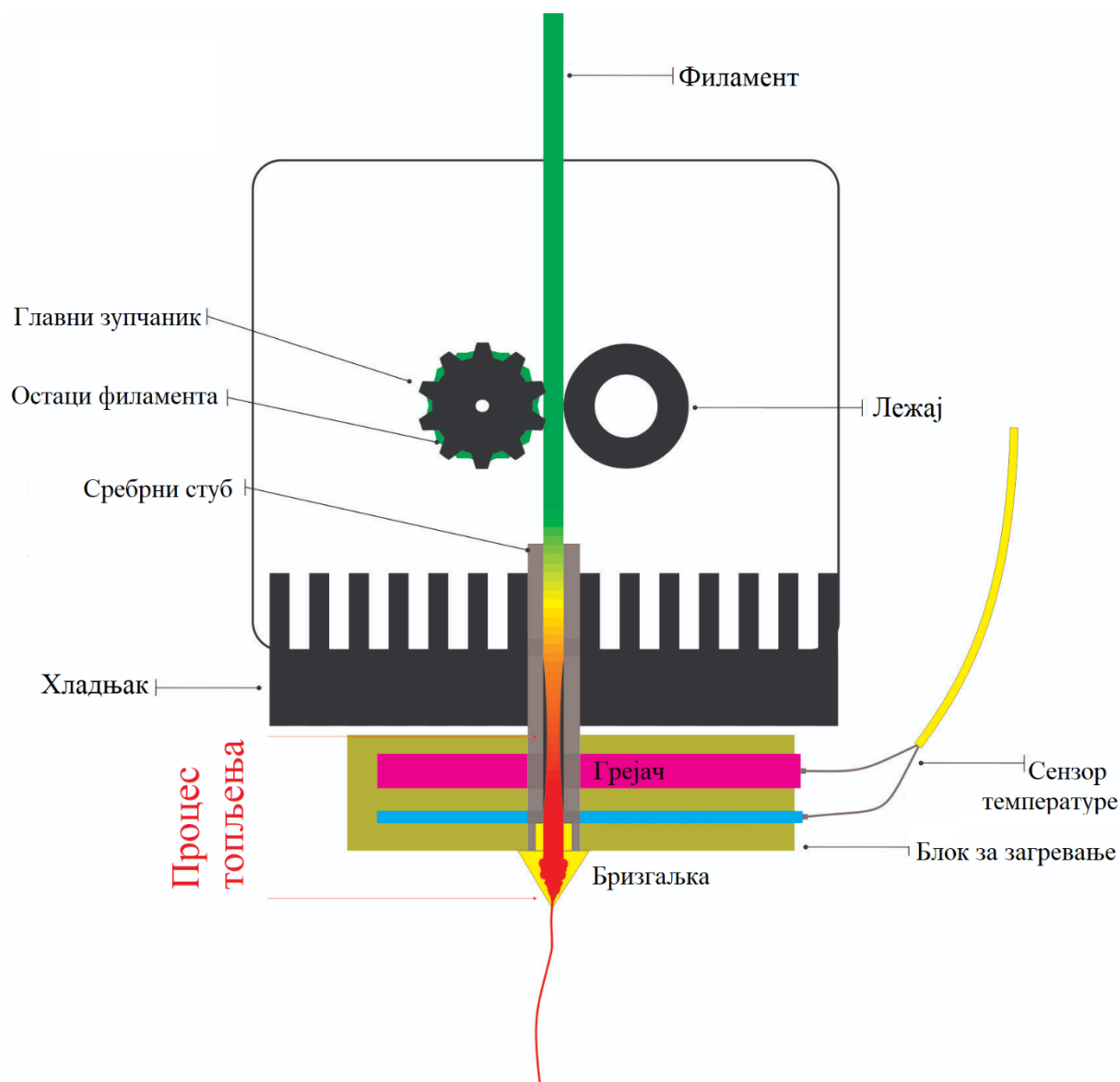


Слика 9 Котур филамента [19]

На Слици 8 могу се видети да намотаји филамента на котуру који се налазе на десној страни штампача. Котур филамента се не мора налазити на самом штампачу. Ради заштите самог филамента и безбедног допремања истог штампачу, у пракси се могу видети посебне тубе кроз које се филамент убацује и допрема до екструдера. Приликом постављања котура посебно се обраћа пажња да се налази на што краћем растојању од екструдера, али тако да не омета рад самог штампача, како би се ризик од прекидања нити филамента свео на минимум.

4.3 Екструдер, механизам за довођење филамента и бризгачка

Следећи елемент 3Д штампача чини систем који увлачи филамент, топи га, а затим наноси на подлогу. Механизам који увлачи материјал је сложен и садржи различите елементе у зависности од комплексности самог штампача, међутим кључан за његово функционисање је степ мотор. Степ мотор, заједно са системом зупчаника и лежајем, увлачи филамент у екструдер који се загрева на потребну температуру а затим у течном стању избацује кроз бризгачку. Као што је већ споменуто у раду, процес 3Д штампања је аутоматизован тако да се регулација температуре у току штампања, као и контрола степ мотора, обавља преко рачунара односно управљачке јединице. Прост приказ екструдера, заједно са осталим елементима, може се видети на Слици 10.



Слика 10 Екструдер [20]

На Слици 11 може се видети главни зупчаник који се покреће помоћу степ мотора, док се са супротне стране налази лежај. Под утицајем назубљеног завртња, који је чврсто везан за зупчаник, и лежаја, филамент се увлачи у екструдер. На назубљеном завртњу после одређеног времена рада могу се видети остаци филамента који су, услед притиска између завртња и лежаја, настали као процес хабања филамента. Поменуте остатке је потребно одстранити како би се довођење филамента обављало неометано. Сребрни стуб и хладњак имају улогу заштите филамента, у неким случајевима чак и зупчаника, од веома високих температура, које се крећу између 200°C и 250°C. Њихова улога је од круцијалног значаја јер филамент не сме почети фазу топљења пре уласка у блок за загревање. Уколико би дошло до топљења филамента у току увлачења у екструдер, настало би блокирање главног зупчаника и лежаја, а самим тим и целог екструдера. Приликом проласка филамента кроз сребрни стуб, односно канал, услед високе температуре која настаје у блоку за загревање, он се топи.

Регулација температуре и контрола грејача се такође врши аутоматски преко управљачке јединице уз помоћ сензора температуре. На самом крају екструдера се налази бризгачка кроз коју се филамент, у течном стању, наноси на подлогу у танким слојевима. Висина слоја филамента који се наноси на подлогу се креће између 0.05mm и 0,4mm. Најчешћи пречник отвора на бризгачци је 0.4mm.

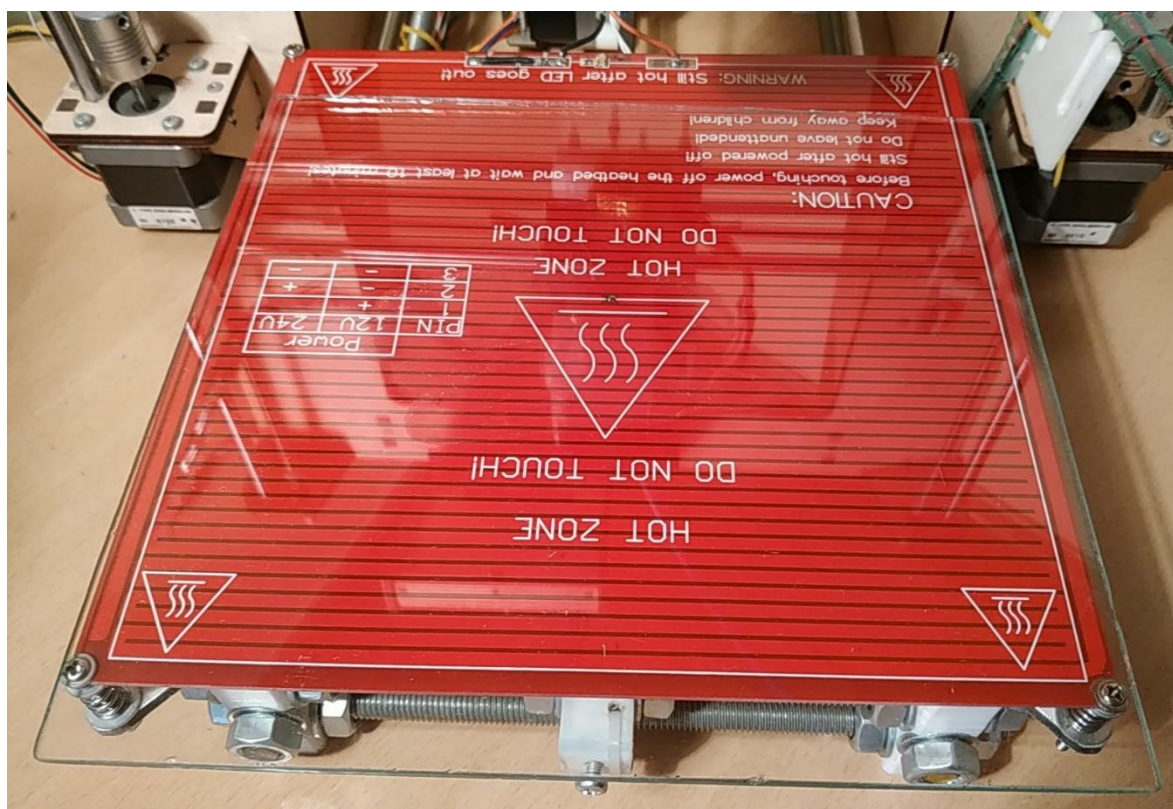


Слика 11 Увећани приказ наношење слоја филамента висине 0.1 mm [21]

4.4 Подлога

У односу на екструдер, подлога је веома прост елемент штампача али подједнако битан. Примарна улога радне подлоге је као површина на коју ће се наносити истопљени филамент. Подлога мора бити потпуно равна, без неправилности на својој површини и пре сваке употребе детаљно пребрисана. Највећи број филамената, ради бољег приањања материјала, захтева да подлога буде равномерно загрејана. Процес загрева се обавља преко грејне подлоге која се налази испод радне подлоге. Регулисање температуре грејне подлоге се обавља преко сензора, који су прикључени на управљачку јединицу, и она се креће од 60 °C за PLA, до 110 °C за ABS. Иако су суштински два различита елемента, радна и грејна подлога се често називају једним заједничким именом, односно само подлога. Разлог за ово је тај што се често радна подлога не одваја од грејне подлоге приликом уклањања предмета штампе, већ само предмет.

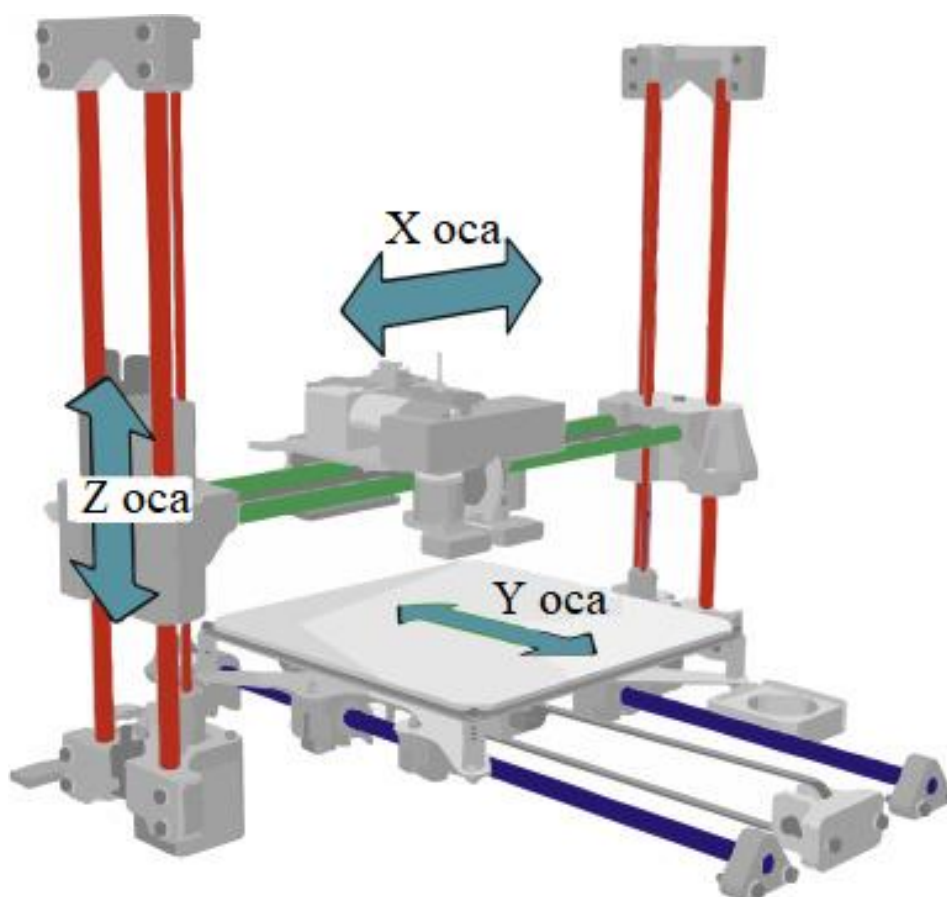
Најчешће коришћени материјали у изради радних подлога су стакло, алуминијум и одређене врсте флексибилних пластика. Ради бољег приањања филамента и лакшег скидања предмета са подлоге одређени произвођачи штампача препоручују да се на подлогу нанесе лепак. На Слици 12 могу се видети стаклена радна подлога и грејна подлога, које су одвојене.



Слика 12 Подлога FDM штампача

4.5 Конструкција

Као што је речено на самом почетку рада, 3Д штампање је процес добијања тродимензионалног предмета наношењем слојева. За разлику од неких других машина, 3Д штампач је троосна машина. Конструкција FDM штампача се састоји од више делова који управо обезбеђују кретања елемената који су већ анализирани – екструдера и радне подлоге. Приликом коришћења FDM штампача најчешће се примењује Декартов координатни систем који се састоји од x , y и z осе.



Слика 13 Кретање елемената штампача [22]

На Слици 13 може се видети да се радна подлога креће само по y оси, док се кретање екструдера обавља по x и z осама. За сва кретања се користе степ мотори као и помоћни елементи као што су вођице, стубови, микропрекидачи. Приликом штампања, један слој филамента се наноси у xy равни затим се платформа, на којој се налази екструдер, помера по z оси, како би штампање следећег слоја почело. Синхронизовано кретања је од кључног значаја за функционисање штампача и калибрација система се обавља пре почетка сваке штампе.

5.0 Процес склапања FDM штампача Prusa i3

Prusa i3 серија штампача настала је 2012. године као пројекат који се директно ослања на већ поменути Rep Rap пројекат и може се рећи да су управо Prusa штампачи данас најзаслужнији за популарност "кућних" FDM штампача. Разлог је тај што је сама идеја компаније "Prusa Research" лака доступност свих потребних делова и омогућен приступ изворном коду свих програма које њихови штампачи користе. На сајту "Prusa Research" свима је дозвољен приступ свим потребним документима, као што су скице, схеме, технички цртежи, модели делова штампача, и дозвољено је преузимање и мењање истих. Данас, непуних 10 година од када је пројекат покренут, Prusa i3 штампачи су од стране корисника прошли кроз безброј измена и прилагођени за различите потребе. Такође је могуће наручити и склопљен Prusa i3 штампач на којем је могуће касније извршити измене уколико корисник то жели [23].

5.1 Оквир

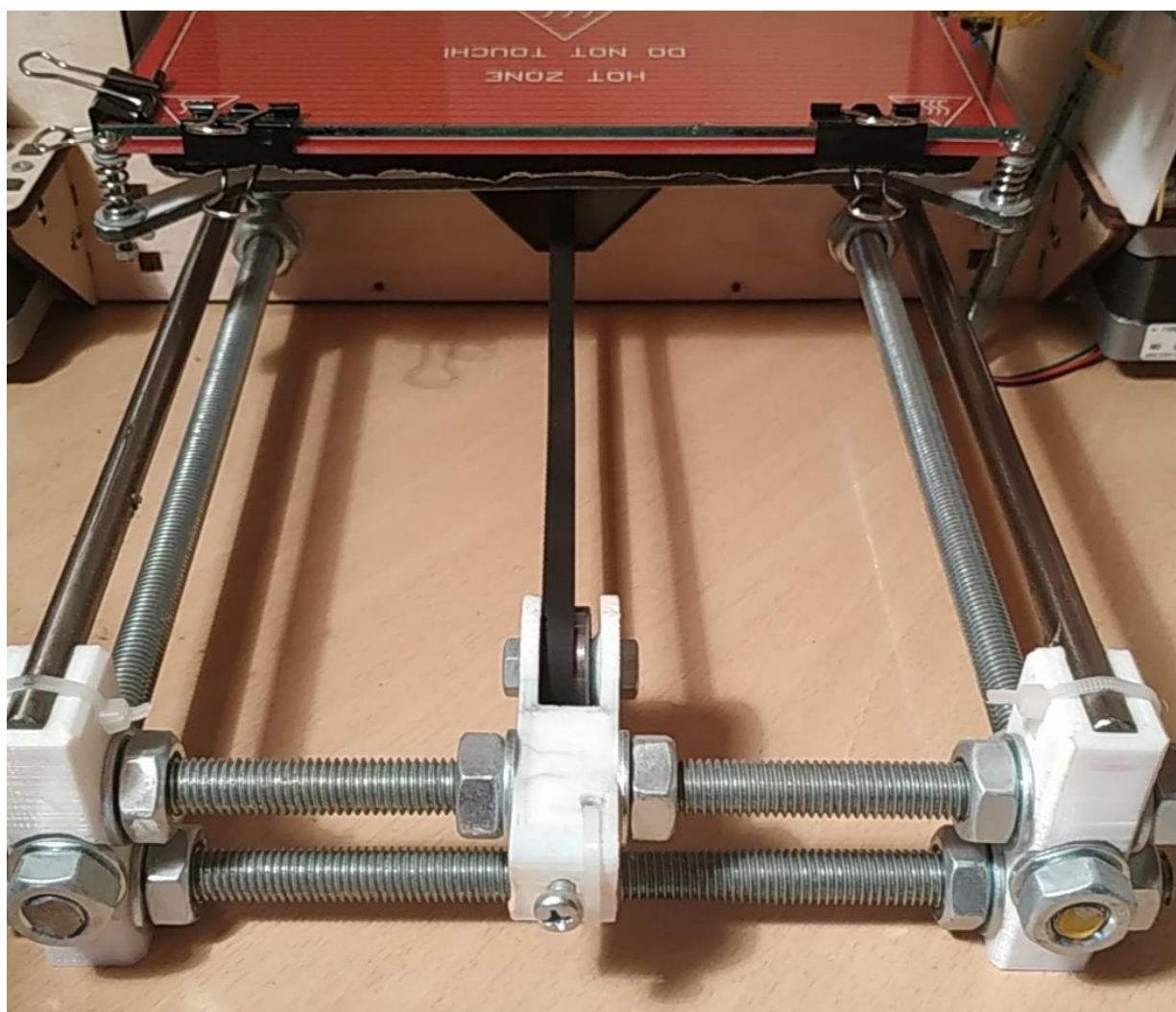
Склапање Prusa i3 штампача почиње самом основом штампача, односно оквиром штампача. У изради штампача коришћеног у раду, биће искоришћена шпер плоча као материјал за оквир. Шпер плоча је често коришћен материјал у другим индустријама, као што је на пример индустрија намештаја, па самим тим и лако доступан. Како сам оквир трпи веома мале притиске и служи само као ослонац осталим елементима конструкције, шпер плоча представља идеално решење када се погледају однос цене и траженог квалитета. Поред шпер плоче, алуминијум и плексиглас су материјали који се користе за израду оквира, међутим они представљају скупља решења. На Слици 14 може се видети састављени оквир направљен од шпер плоче.



Слика 14 Оквир штампача "Prusa i3" [25]

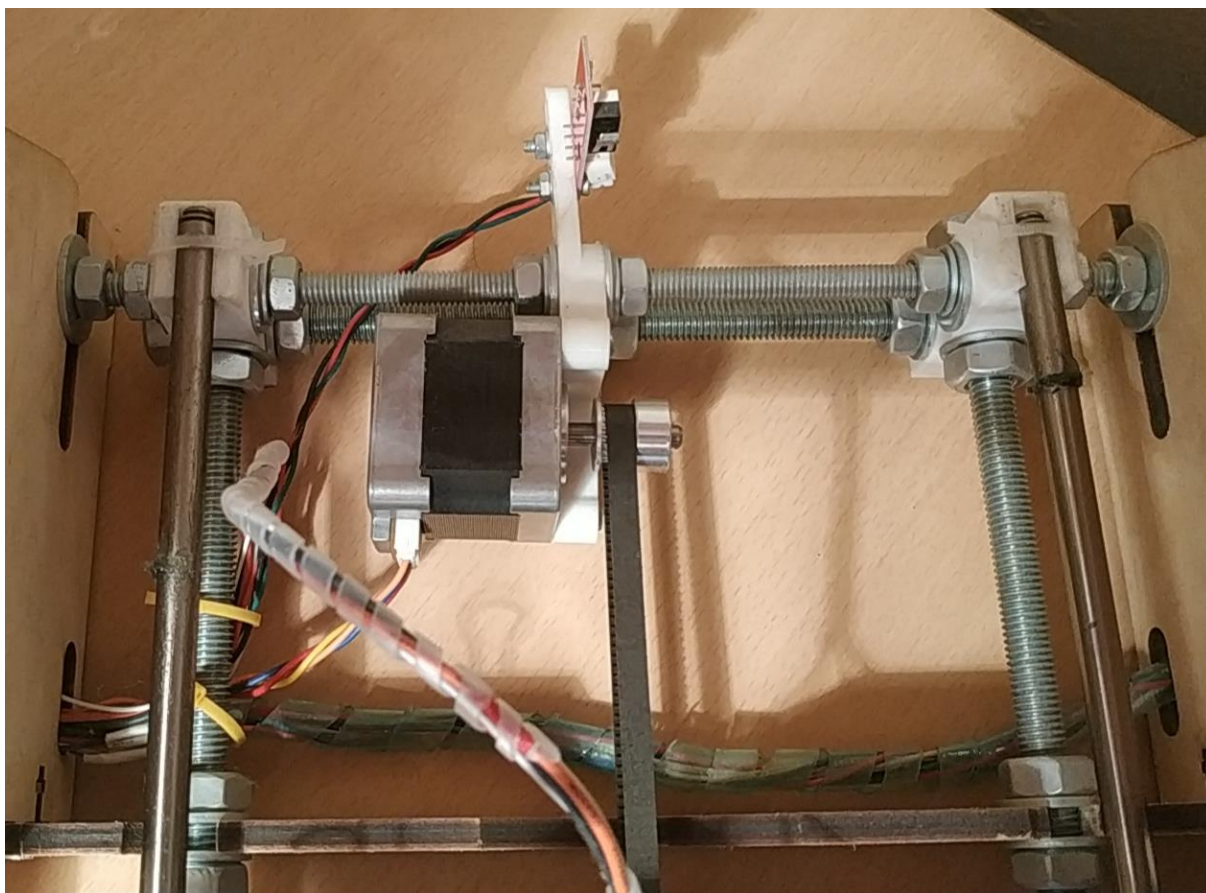
5.2 Елементи за покретање система кретања

Процес склапања и калибрисања елемената који служе за кретање подлоге и екструдера је један од кључних за прецизно штампање предмета. Као што се види на Слици 13, радна подлога врши кретање по у оси. Грејна подлога, заједно са радном подлогом, се налази на носачу који се помоћу 2 линеарна лежаја креће по у оси, уз посредство вођица. Кретање се обезбеђује преко каиша који се покреће помоћу степ мотора који се налази у задњем делу самог штампача. На Слици 15 може се видети изглед предњег дела носача подлоге, заједно са зупчастим каишем који се налази на средини конструкције.



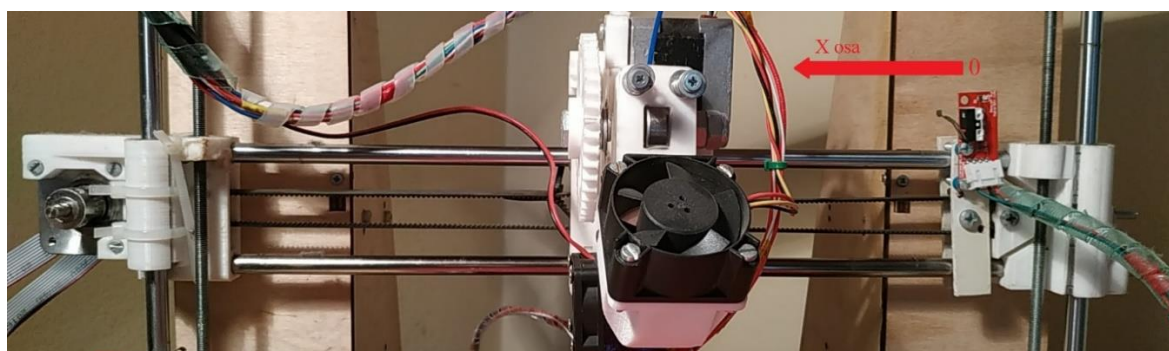
Слика 15 Изглед предњег дела носача подлоге

Како би се кретање подлоге ограничило и зауставило, у задњем делу носача подлоге се налази микропрекидач. На Слици 16 може се видети изгледа задњег дела носача подлоге, укључујући и степ мотор и микропрекидач.

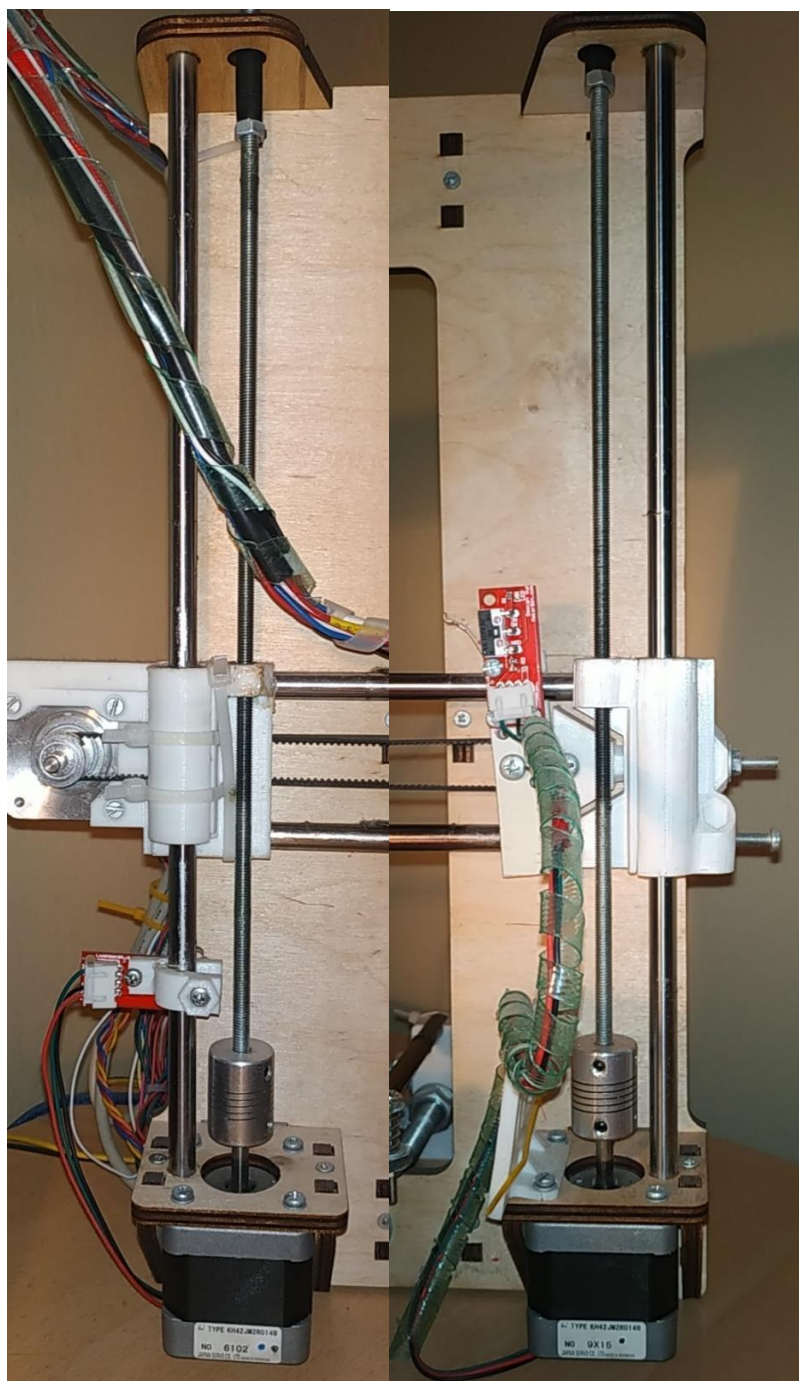


Слика 16 Изглед задњег дела носача подлоге

Кретање екструдера представља један од најкомплекснијих елемената штампача. Наиме, као што се види на Слици 13, потребно је обезбедити кретање екструдера у 2 осе, осе x и z . Кретање екструдера по x оси садржи сличне елементе као и кретање елемената тела по y оси. Померања екструдера по x оси обезбеђује се помоћу зупчастог каиша који потребно кретање добија преко степ мотора. Такође, у нултој тачки осе x налази се микропрекидач који ограничава кретање екструдера.



Слика 17 Кретање екструдера по x оси

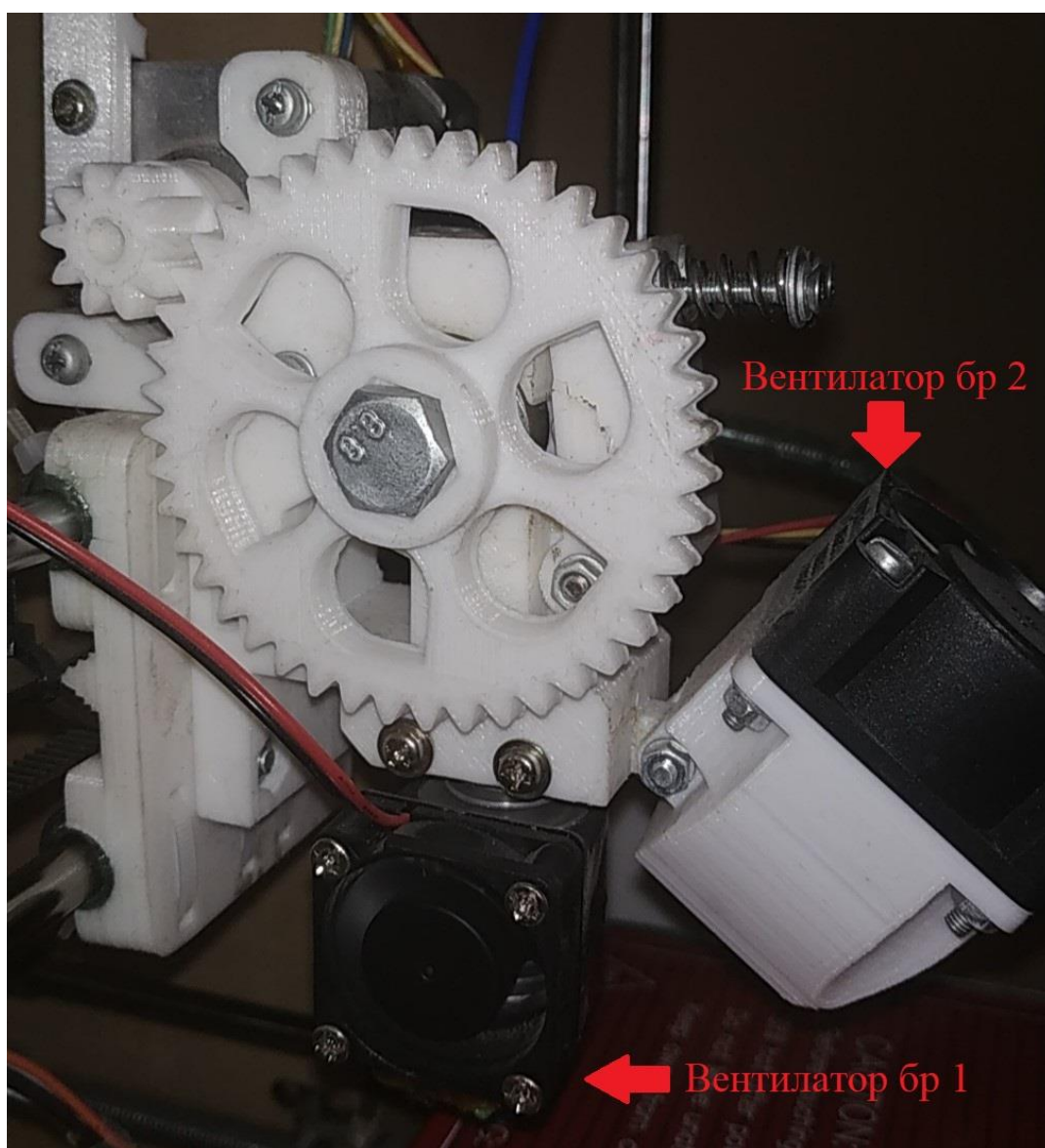


Слика 18 Изглед леве и десне стране носача екструдера

Приликом састављања елемената који имају улога померања екструдера по z оси потребно је обратити посебну пажњу. Кретање екструдера по z оси се дешава у малим корацима, чије су висине померања најчешће 0.1mm , чиме процес склапања и постављања поменутих елемената има веома важну улогу. На Слици 18 се могу видети лева и десна страна носача екструдера. Кретање се врши преко завојних вретена који су помоћу еластичне спојнице спојени са 2 степ мотора, тако да се и лева и десна страна носача подижу синхронизовано. Поред 2 завојна вретена, на слици се могу видети и стубови вођице, као и микропрекидач који се налази на левој страни штампача.

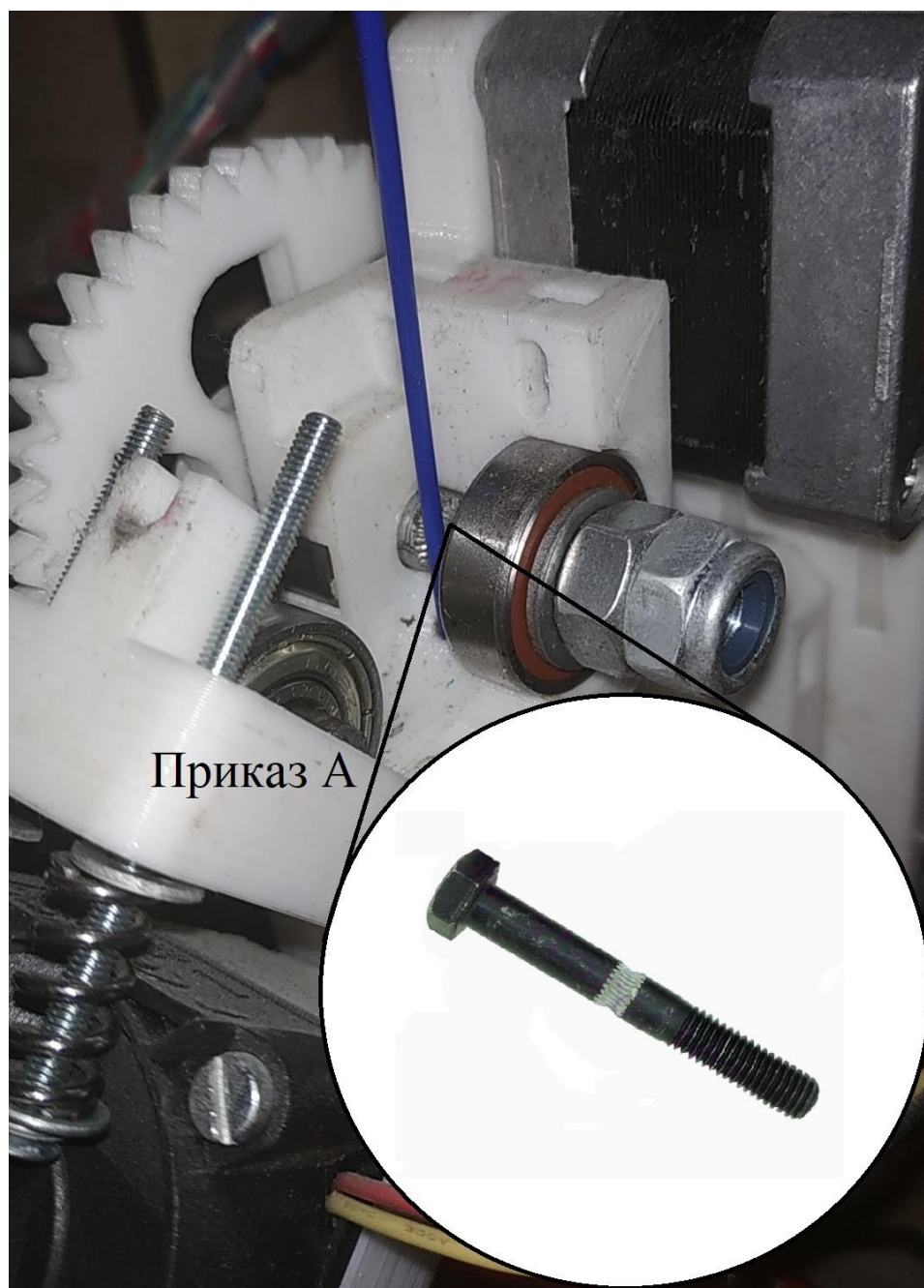
5.3 Екструдер

Екструдер представља алат којим се слојеви филамента наносе на подлогу. Данас постоји више модела екструдера за Prusa i3, и сви они имају минималне разлике док су најбитнији елементи исти, елементи који су обрађени у делу рада 4.3 Екструдер, механизам за довођење филамента и бризгачка. Најчешће разлике су естетске природе, и односе се на спољашњи изглед екструдера, односно кућиште. При склапању штампача који је коришћен у раду, користи се "отворени" модел екструдера. Разлог за избор овог модела је тај што се на поменутом моделу могу лако пратити процеси у самом екструдеру и , уколико је потребно, извршити одређене измене.



Слика 19 Изглед леве бочне стране екструдера

На Слици 19 може се видети систем од 2 зупчаника, од којих је мањи погонски и директно је спојен крутом везом на осовину степ мотора. Гоњени, односно већи, зупчаник је спојен са назубљеним завртњем, који заједно са лежајем увлачи филамент. На слици се такође могу видети и 2 вентилатора, од којих вентилатор бр 1 има улогу хлађења сребрног стуба и хладњака, док је улога вентилатора бр 2 хлађење тек нанетог филамента на радну подлогу. На Слици 20 могу се видети елементи отвореног екструдера, лежај и назубљени завртањ који је такође приказан на увећаном приказу А.



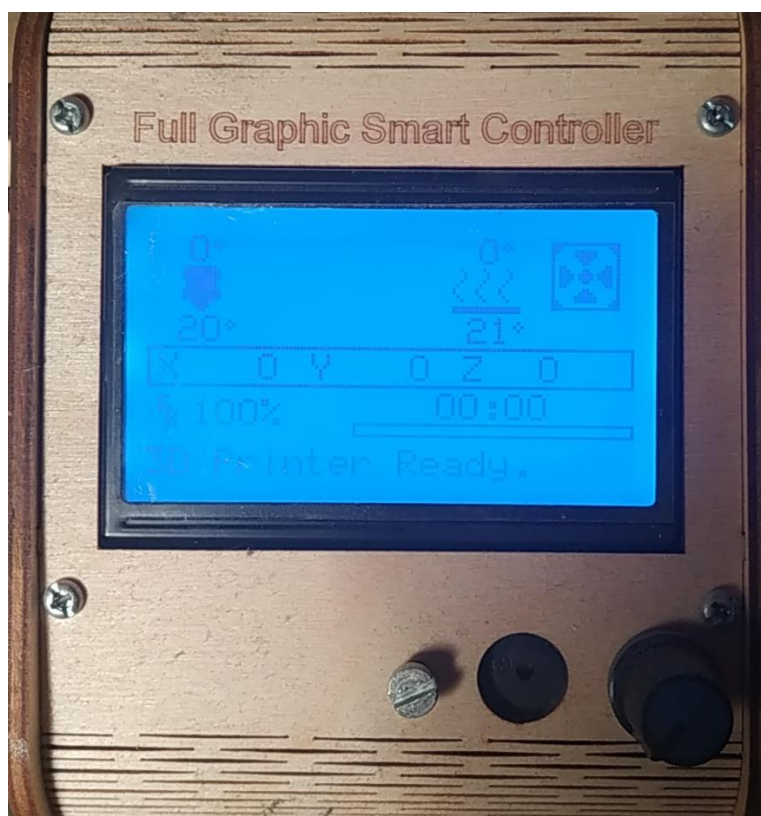
Слика 20 Унутрашњост екструдера

5.3 Електронске компоненте и софтвер

Све електронске компоненте штампача Prusa i3 су лако доступне и чак се могу употребити делови од других машина. При склапању Prusa i3 штампача препоручује се уградња напајања снаге 500W и 12V. Разлог за овако високу снагу су грејна тела, односно грејна плоча и брызгалка. Приликом загревања грејне плоче потребно је обезбедити, у просеку, 90W снаге. Површина грејне плоче износи 400cm² и захтева више времена да се загреје на потребну температуру. Потребне за загревање екструдера нешто су мање и износе 40W, пошто се ради о знатно мањој површини грејања.

При склапању штампача користи се пет степ мотора. За потребе кретања по x и y оси по један мотор, два мотора се користе за кретање по z оси, док екструдер користи један мотор за увлачење филамента. Мотори који су коришћени у склапању штампача су мотори NEMA 17 који користе 1.33A, корака 1.8°.

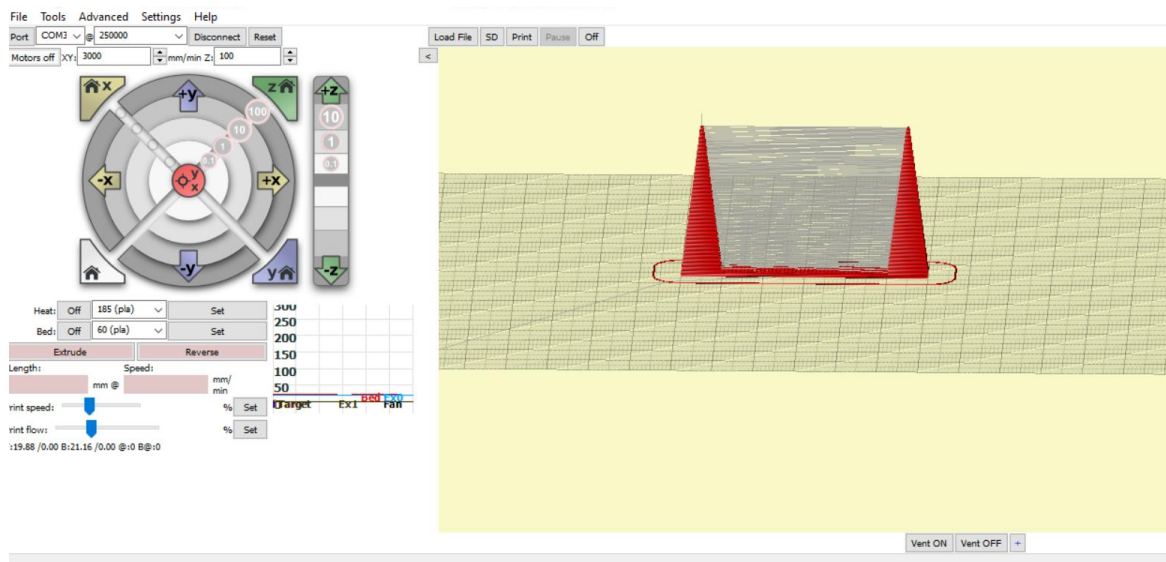
Управљачка јединица се састоји из електронског дела који има функцију управљања степ моторима, као и регулације грејања тела. За потребе рада коришћен је RAMPS 1.4 који је базиран на Rep Rap пројекту. Поред електронског дела, управљачка јединица садржи и микрoкoнтрoлер Arduino Mega 2560 на којем се налази програм "Merlin", такође базиран на Rep Rap пројекту. Поменути микрoкoнтрoлер садржи и улаз за microSD картицу, чиме је омогућено покретање штампања, односно g-code, директно са штампача. Програм Merlin користи једноставно корисничко окружење које је приказано на једнобојном екрану, чији изглед се може видети на Слици 21.



Слика 21 Корисничко окружење програма "Merlin"

Поред програма Merlin, Prusa i3 штампач могуће је у потпуности контролисати и пратити све параметре штампе преко софтвера рачунара, који је преко USB конекције спојен са штампачем. Као што је већ речено, Prusa i3 је штампач чији је развој омогућен свима, па је тако и софтвер за коришћење истог потпуно бесплатан и могу се наћи различита решења. Једно од најпопуларних је "Pronterface" који је интегрисан са програмом "Slic3r", чија примарна улога је претварање 3Д модела у g-code. Из овог разлога Pronterface представља најлакше решење уколико корисник жели у потпуности да користи штампач преко рачунара.

Такође, Pronterface корисничко окружење је веома једноставно и пружа довољно информација и параметара у току штампања. На Слици 22 са леве стране се могу видети команде, као што су померања по x,y и z осима, температура подлоге и екструдера, док се са десне стране, у црвеној боји, налази предмет штампања.

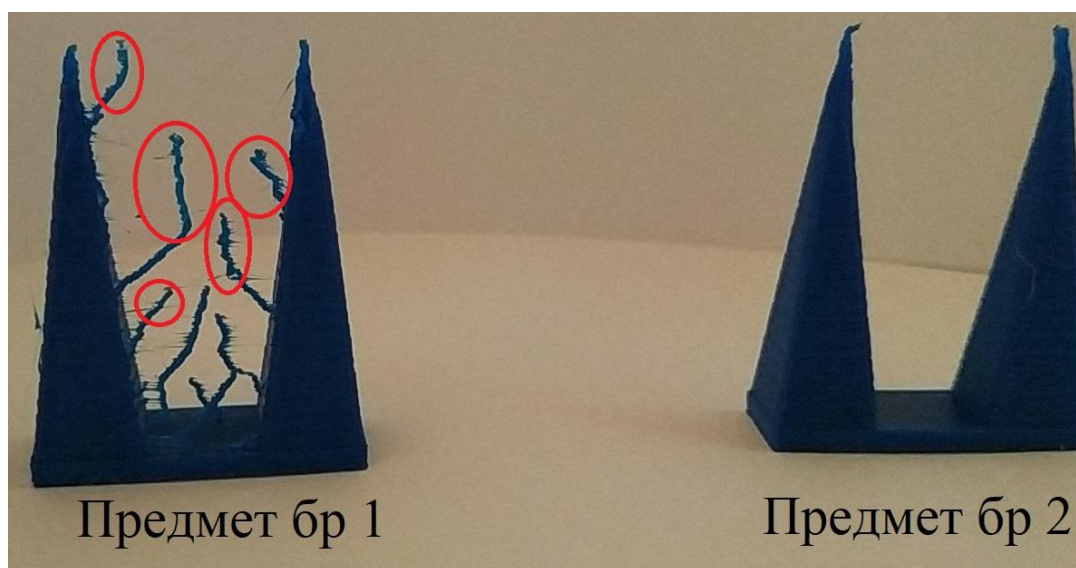


Слика 22 Корисничко окружење програма Pronterface

6.0 Праћење параметара штампе у реалном времену

Грешке приликом штампања FDM методом могу бити бројне и често њихов узрок могу бити ситни детаљи које је тешко приметити. Почев од лошег квалитета филамента који може да садржи "цепове" ваздуха у себи, преко стварања наслага прашине на назубљеном завртњу, па до лоше регулације температуре топљења услед квара на сензору екструдера. Свака ситна грешка може утицати на крајњи изглед предмета штампања, често доводећи до катастрофалних резултата. Као што је већ речено, процес 3Д штампања није препоручљиво прекидати и мењање параметара у току штампања је способност коју тренутно поседују само одређени индустријски штампачи и која и даље није усавршена [1]. Процес штампања, у зависности од величине и сложености предмета, може трајати и више од 20 часова па је самим тим и праћење процеса штампања од великог значаја, посебно у раној фази штампања.

Једна од честих грешака која се дешава приликом рада штампача је појава вишка нити у току празног хода екструдера. Кретање екструдера се обавља у зависности од команди које се налазе у g-code-у и често садрже празан ход. Празан ход се најчешће дешава приликом израде врхова предмета штампања, када екструдер прелази са једног врха на други. Приликом преласка са једног врха на други, температура у бризгальци се не мења па се самим тим и топљење филамента не зауставља што доводи до цурења вишка филамента кроз бризгальку. Након одређеног времена, као последица цурења филамента, на одређеним деловима предмета долази до таложења вишка нити. Овај вид грешке може довести само до потребе да се предмет штампања детаљније обради после процеса штампања, али у одређеним случајевима може довести и до потпуне деформисаности предмета. Уколико бризгалька, приликом кретања, удари у ове вишкове нити може доћи до померања предмета из почетног положаја и штампање мора бити прекинуто. Стварање вишка нити се често назива "stringing" и пример ове грешке може се видети на Слици 23. На предмету бр 1 могу се видети поменуте грешке које су означене црвеном бојом, док је предмет бр 2 исти почетни модел али без грешки.



Слика 23 Вишак нити приликом штампања - stringing

Приликом појаве првих нити које су настале током празног хода, потребно је зауставити штампање и проверити параметар враћања филамента. Како би се смањио доток филамента у брызгалку током празног хода, потребно је исти вратити назад. Овај процес је идентичан процесу увлачења филамента и такође се обавља између лежаја и назубљеног завртка, али у супротном смеру.

6.1 Коришћење машинског учења у праћењу настајања грешака штампе

За потребе детекције грешке стварања вишка нити применићемо софтвер под називом YOLO (You Only Look Once) који користи "Darknet" и примењује машинско учење. Darknet спада у конволуцијске неуронске мреже која су базиране на сличном процесу препознавања и закључивања који користе људи. Сам назив софтвера "YOLO" проистиче из начина на који се слика обрађује, прецизније зато што добијену слику програм "погледа", односно анализира, само једном. Користећи ову методу анализирања, резултати се добијају готово моментално и лако се могу применити на препознавање траженог објекта на слици, или чак видео снимку, у реалном времену.

Коришћење софтвера YOLO се састоји из три корака:

- 1) Прављење базе слика које је потребно означити
- 2) Тренирање софтвера помоћу исте базе слике
- 3) Примена програма на ново окружење

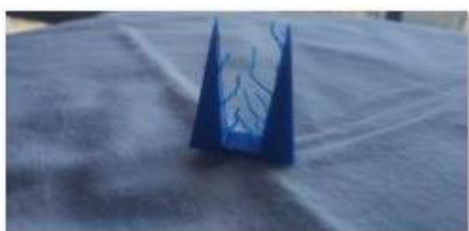
Модел који ћемо користити приликом испитивања настајања stringinga састоји се од три елемента, танке плочице на којој се налазе две пирамиде (Слика 23). Димензије предмета су: 30mm x 10mm x 40mm. Време штампање једног модела је 18 минута и потребно је 2g филамента и за потребе рада је коришћен PLA филамент. Најбитнији параметри који су коришћени приликом штампања модела могу се видети у Табели 3. Битно је напоменути да је приликом штампања поменутог модела искључен параметар враћања филамента ради лакше детекције настајања нити на сликама које ће бити коришћене при тренирању YOLO програма.

Табела 3 Параметри штампања

Параметар	Мерна јединица	Вредност
Температура екструдера	°C	200
Температура подлоге	°C	60
Висина слоја филамента	mm	0,2
Попуњеност предмета штампања	/	10%
Врста попуњености	/	Мрежа
Брзина штампања	mm/s	60
Брзина кретања приликом празног хода	mm/s	120
Хлађење предмета штампе	/	Укључено

6.1.1 База слика и означавање

Први корак приликом коришћења програма YOLO је прављење базе слика на којима се налази одштампани предмет који садржи stringing. Ради постизања најбољих резултата препоручује се да се предмет фотографише из што више углова, под различитим осветљењем и из различитих удаљености од предмета. За потребе тренирања YOLO програма у детекцији stringinga коришћена је база од 300 слика, на Слици 24 могу се видети неки од коришћених примера. Сlike које су коришћене у раду су резолуција 4000x3000 пиксела и величине 3МВ.



Пример 1.jpg



Пример 2.jpg



Пример 3.jpg

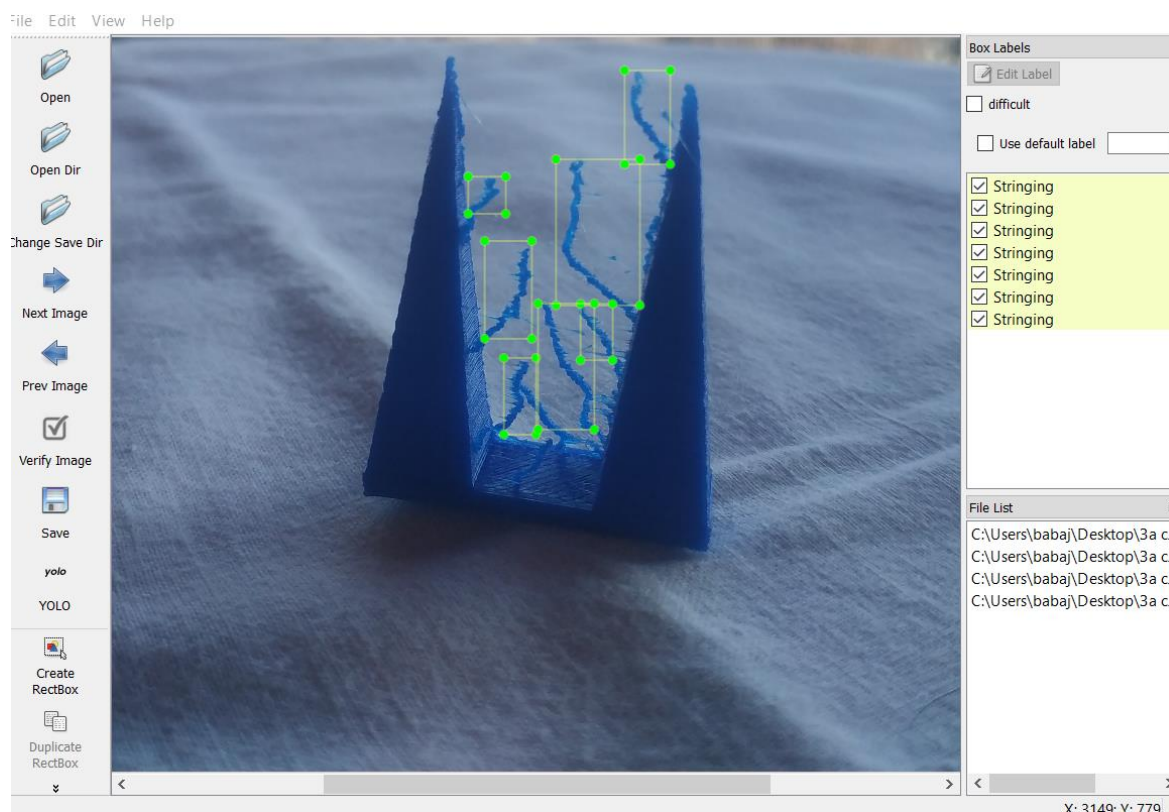


Пример 4.jpg

Слика 24 Примери коришћени у тренирању програма YOLO

Након што је направљена база слика, потребно је на свакој слици означити подручје на којем се налази тражена грешка. Пре самог означавања потребно је направити нову класу која се у овом случају назива "stringing". Означавањем подручја уз сваку слику се аутоматски креира ".txt" датотека, са истим именом као слика, која садржи координате означеног подручја на слици као и назив класе. Програм који је коришћен приликом овог поступка је "lebellmg". Поступак означавања свих подручја који садрже stringing може се видети на Слици 25.

Након означавања свих слика, и чувања пратећих ".txt" датотека, потребно је исте упаковати у ".zip" формат како би заузеле мање простора, и касније биле лакше за отпремање. Броју од 300 слика могуће је касније додати још примера, уколико је потребно, које је такође потребно означити на исти начин.



Слика 25 Корисничко окружење "labelimg" програма

6.1.2 Тренирање програма YOLO

Процес тренирања програма YOLO захтева највише времена, али и ресурса самог рачунара. Приликом тренирања, програм користи претходно обрађене слике како би покушао да "научи" и "схвати" шта се налази на сликама, користећи координате из ".txt" датотека. Као што је познато, приликом обраде и приказивања слике на рачунару, компонента рачунара која се највише користи је графичка картица. Процес тренирања програма YOLO управо захтева изузетно јаке графичке картице, које поред доста графичке меморије захтевају и посебна CUDA (Compute Unified Device Architecture) језгра. Поменута језгра омогућавају већи приступ ресурсима графичке картице и могу се наћи само у картицама компаније "nVidia". Управо ова снага коју поседују поменуте картице чини их веома скупим, почев од 400 еура за најслабије моделе које чак није препоручљиво користити у сврхе машинског учења, све до цена од пар хиљада еура. Приликом тренирања YOLO програма, ресурси графичке картице се користе максимално, често у трајању од по 10 часова без прекида. Из овог разлога коришћење слабијих графичких картица није препоручљиво јер може доћи до прегревања саме картице које би довело до прекидања процеса тренирања. Могуће је коришћење процесора, уместо графичке картице, у сврхе тренирања програма YOLO, али сам процес траје дуже и може дати горе резултате.

Поред потребне за јаким графичким картицама, YOLO програм често није компатибилан са другим елементима рачунара. Приликом коришћења Windows оперативних система може доћи до проблема приликом приступа свим ресурсима рачунарима, као што су поменута CUDA језгра. Из овог разлога се препоручује коришћење Linux оперативних система.

Из горе наведених разлога, процес покретања самог YOLO програма захтева доста времена и знања, посебно уколико се корисник први пут сусреће са Linux оперативним системима. Како би се овај процес олакшао и убрзао, коришћен је "Google Colaboratory", познатији као Google Colab. Google Colab је cloud платформа базирана на "Jupyter"⁹ пројекту која нуди потпуно бесплатан приступ ресурсима које обезбеђује компанија Google. Приликом коришћења Colab-а корисник приступа виртуалној машини која је базирана на Linux оперативном систему, тачније Ubuntu-у, која по самом покретању система прилагоди спецификације за потребе сваког корисника [24]. На овај начин поменути проблеми компатибилности елемената рачунара више не представљају проблем за корисника. Google Colab платформа кориснику пружа приступ изузетно јаким, и скупим, графичким картицама. Приликом писања рада коришћена је графичка картица "nVidia Tesla T100" која је посебно намењена обради података. Поменута картица има уграђену меморију од 16GB и 3584 CUDA језгара, и чија је цена у току писања рада износила 2400 еура [26].

Google Colab у својим условима коришћења садржи само једну ману која директно утичу на самог корисника, и то је:

- Приступ ресурсима у једној сесији је ограничен на 12 сати након чега се сав код и резултати, укључујући и све датотеке, бришу са сервера

Разлог за овакав услов је етичке природе, односно, како би сви корисници имали једнак приступ ресурсима у истом временском интервалу [24]. Како би се донекле превазишао овај проблем, Google Colab виртуална машина подржава синхронизацију са Google Drive-ом. На овај начин се сви резултати чувају аутоматски на Drive-у и неће бити избрисани након поменутих 12 сати.

Након покретања виртуалне машине и синхронизовања са Drive-ом, потребно је претходно обрађене слике у ".zip" формату отпремити на исти. Након овог корака, процес тренирања YOLO програма може почети.

Процес тренирања се састоји из 5 корака који се могу видети на сликама 25,26 и 27.

⁹ Пројекат "Jupyter" представља платформу која је базирана на отвореном коду и чији је циљ бесплатан приступ ресурсима и примена истих у истраживачке сврхе као што су машинско учење [27]

```
+ Code + Text Connect Editing ^

1) Kloniranje 'Darknet' mreže na virtualnoj mašini

[ ] !git clone https://github.com/AlexeyAB/darknet

2) Kompiliranje 'Darknet' mreže uz pomoć CUDA jezgara

[ ] # Prelazak sa obrade slike preko procesora na obradu slike pomoću grafičke kartice
$cd darknet
!sed -i 's/OPENCV=0/OPENCV=1/' Makefile
!sed -i 's/GPU=0/GPU=1/' Makefile
!sed -i 's/CUDNN=0/CUDNN=1/' Makefile
!make

3) Menjanje '.cfg' datoteke, prelaskom u režim treniranja i nameštanja serije od po 64 slike

[ ] !cp cfg/yolov3.cfg cfg/yolov3_training.cfg

[ ] !sed -i 's/batch=1/batch=64/' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i 's/subdivisions=1/subdivisions=16/' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i 's/max_batches = 500200/max_batches = 4000/' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i '610 s@classes=80@classes=10' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i '696 s@classes=80@classes=10' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i '783 s@classes=80@classes=10' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i '603 s@filters=255@filters=10' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i '689 s@filters=255@filters=10' cfg/yolov3_training.cfg
!sed -i '776 s@filters=255@filters=10' cfg/yolov3_training.cfg
```

Слика 26 Прва три корака приликом процеса тренирања

```
4) Otvaranje obrađenih slika koje se nalaze na Google Drive-u u '.zip' formatu

[ ] !unzip /mydrive/yolov3/images.zip -d data/obj

[ ] # Konvertovanje klasa iz '.txt' datoteka koje se nalaze uz svaku sliku. Brojanje klasa počinje od 0

import glob
import os
import re

txt_file_paths = glob.glob(r"data/obj/*.txt")
for i, file_path in enumerate(txt_file_paths):
    # Preuzeti veličinu slike
    with open(file_path, "r") as f_o:
        lines = f_o.readlines()

    text_converted = []
    for line in lines:
        print(line)
        numbers = re.findall("[0-9.]+", line)
        print(numbers)
        if numbers:

            # Definirati koordinatu
            text = "{} {} {} {}".format(0, numbers[1], numbers[2], numbers[3], numbers[4])
            text_converted.append(text)
            print(i, file_path)
            print(text)

    # Izlazna datoteka
    with open(file_path, 'w') as fp:
        for item in text_converted:
            fp.writelines("%s\n" % item)
```

Слика 27 Корак број 4 приликом процеса тренирања

5) Početak procesa treniranja

```
[ ] # Početi trening
!./darknet detector train data/obj.data cfg/yolov3_training.cfg darknet53.conv.74 -dont_show
```

Слика 28 Почетак самог тренирања

Након покретања корака под бројем 5, виртуална машина креће сам процес "учења" који се састоји из анализирања једне серије слика која садржи 64 слике. Након сваке серије слика програм штампа излазну информацију у облику који можемо видети на Слици 29.

```
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.000000), count: 1, class_loss = 309.942261, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.296171), count: 14, class_loss = 1209.891968, io
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.330679), count: 5, class_loss = 5430.114258, io
total_bbox = 649, rewritten_bbox = 0.000000 %
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.000000), count: 1, class_loss = 311.018921, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.346560), count: 8, class_loss = 1209.853394, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.213100), count: 8, class_loss = 5428.733398, io
total_bbox = 665, rewritten_bbox = 0.000000 %
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.385532), count: 2, class_loss = 309.977386, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.205821), count: 7, class_loss = 1211.092285, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.212504), count: 5, class_loss = 5425.561035, io
total_bbox = 679, rewritten_bbox = 0.000000 %
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.000000), count: 1, class_loss = 310.252014, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.319962), count: 14, class_loss = 1212.255249, io
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.253010), count: 4, class_loss = 5456.058105, io
total_bbox = 697, rewritten_bbox = 0.000000 %
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.000000), count: 1, class_loss = 309.867706, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.342614), count: 11, class_loss = 1211.913818, io
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.232485), count: 2, class_loss = 5450.211426, io
total_bbox = 710, rewritten_bbox = 0.000000 %
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.283196), count: 1, class_loss = 310.501862, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.278055), count: 14, class_loss = 1212.229126, io
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.297919), count: 3, class_loss = 5438.857910, io
total_bbox = 728, rewritten_bbox = 0.000000 %
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 82 Avg (IOU: 0.000000), count: 1, class_loss = 310.143158, iou_
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 94 Avg (IOU: 0.262576), count: 10, class_loss = 1214.414185, io
v3 (mse loss, Normalizer: (iou: 0.75, obj: 1.00, cls: 1.00) Region 106 Avg (IOU: 0.376328), count: 4, class_loss = 5433.365234, io
total_bbox = 742, rewritten_bbox = 0.000000 %

3: 2325.987549, 2325.285400 avg loss, 0.000000 rate, 9.688530 seconds, 192 images, 11.202283 hours left
Loaded: 0.000047 seconds
```

Слика 29 Излазни подаци током процеса тренирања YOLO програма

Две компоненте су кључне за процес тренирања и оне су "Darknet" неуронска мрежа и датотека ".weights" која у буквалном преводу значи "тегови". Може се рећи да сам назив "тегови" проистиче из "тежине" коју програм користи приликом тренирања. Приликом преузимања тегова могуће је користити различите моделе у зависности од "јачине" рачунара, па је тако могуће користити и тегове који су намењени за рачунаре који су слабијих спецификација, као што је Raspberry Pi микро рачунар. Употребом лакших тегова резултати тренирања се добијају знатно брже али су мање прецизни у односу на теже тегове.

Ради сигурности, програм YOLO аутоматски чува на Google Drive-у резултате након сваке обраде 100 и 1000 серија слика.

Приликом писања рада, за 12 часова програм YOLO је обрадио укупно 2567 серија слика након чега је процес тренирања прекинут, а резултати у облику ".weights" сачувани на Google Drive-у.

6.1.3 Резултати тренирања и примена на ново окружење

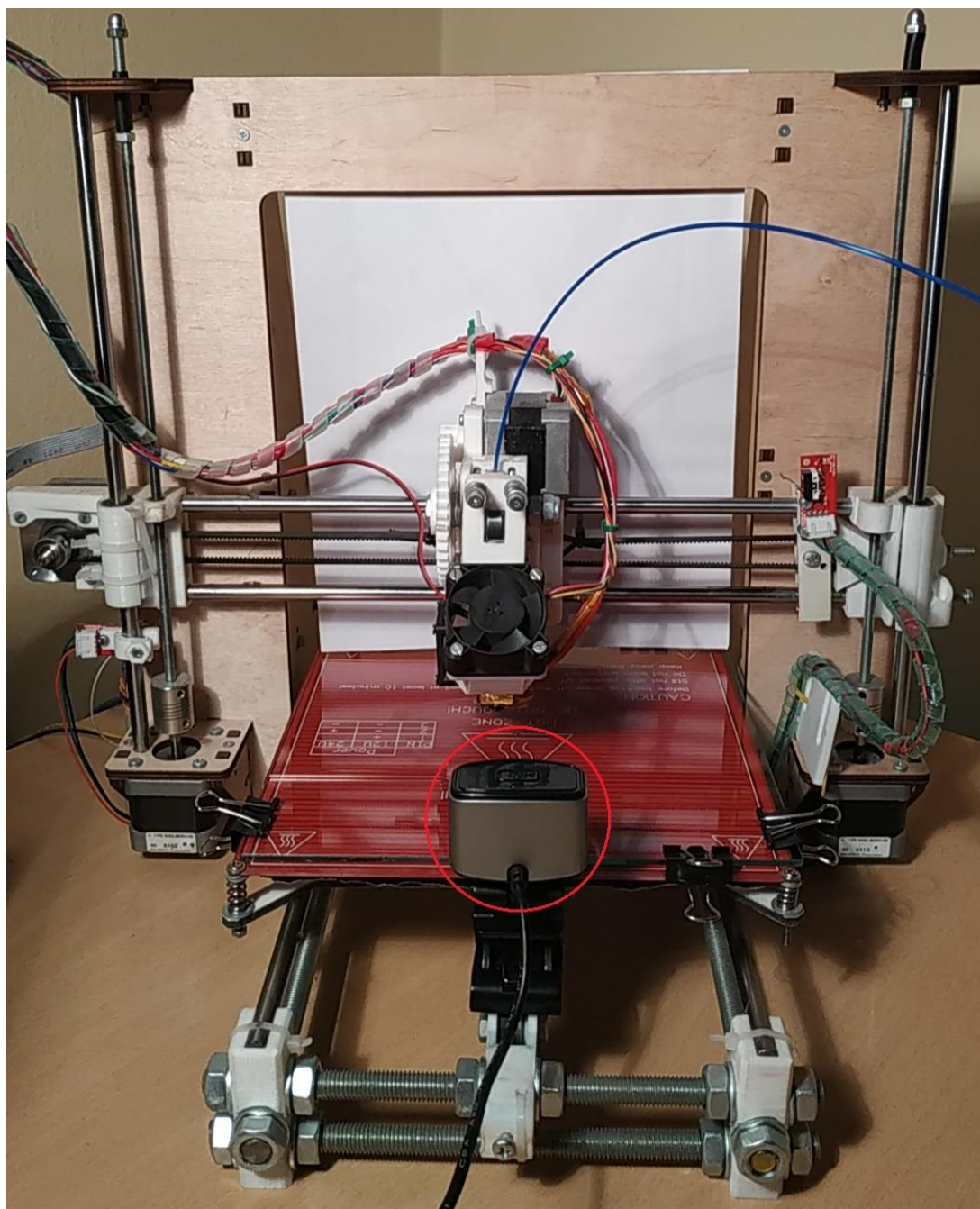
Примена резултата добијених на ново окружење врши се на локалном рачунару и приступ Google Colab-у више није потребан. За процес тестирања резултата потребно је преузети са Google Drive-а ".weights" који представљају резултате тренирања као и измена датотеке ".cfg". Поменута датотека је идентична .cfg датотеци коришћеној у кораку број 3 током процеса тренирања програма, међутим сада ће бити коришћена у режиму "тестирања".

Примена добијених резултата је могућа на новој бази слика и видео снимку у реалном времену. У оба случаја, све потребно информације за анализирање слике, или видео снимка, као и податке о траженој класи, односно објекту, налазе се у .weights и .cfg датотекама. Потребно је написати једноставну скрипту у Python програмском језику која ће коришћењем поменутих датотека резултате приказивати на екрану. Екстензија која је коришћена за приказивање слике назива се "ореп cv" и интегрисана је у саму скрипту.

Битно је напоменути још једну погодност коришћења Google Colab-а приликом целокупног процеса тренирања YOLO програма, која долази до изражаја у примени добијених резултата. Коришћењем Colab-а за тренирање програма, уместо локалног рачунара, омогућена је примена добијених резултата на било ком рачунару. Потребно је само преузети, или пребацити, добијене резултате на рачунар и исте применити на већ написану скрипту.

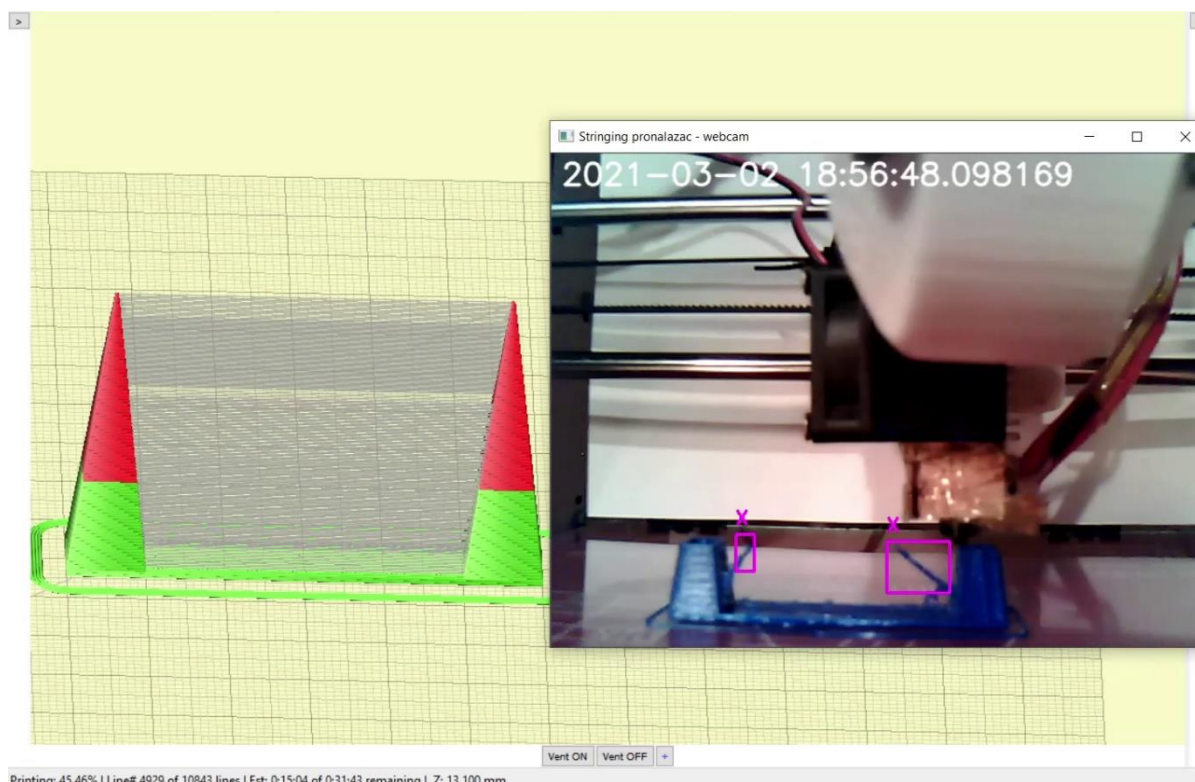
6.2 Детекција stringinga на видео снимку у реалном времену

За потребе детекције stringinga, на подлогу је монтирана камера која је преко USB конекције спојена са рачунаром. На Слици 30 можемо видети означену камеру која је усмерена ка средини подлоге, односно ка подручју на коме ће модел бити штампан. Такође, у задњем делу штампача је постављена бела подлога ради детаљнијег прегледа саме штампе. Након покретања скрипте потребно је унети улаз на којем се налази камера.



Слика 30 Изглед штампача приликом тестирања

Приликом детекција коришћен је идентичан модел као и током тренирања самог програма, приказан на Слици 23. Једина димензија која је промењена је растојање између пирамида, и износи 60mm. Разлог за промену је естетске природе, односно како не би дошло до преклапања квадрата детекције на снимку. Резултате детекције мерени су у два различита случаја, под различитим осветљењем. Резултат у првом случају можемо видети на следећој слици:

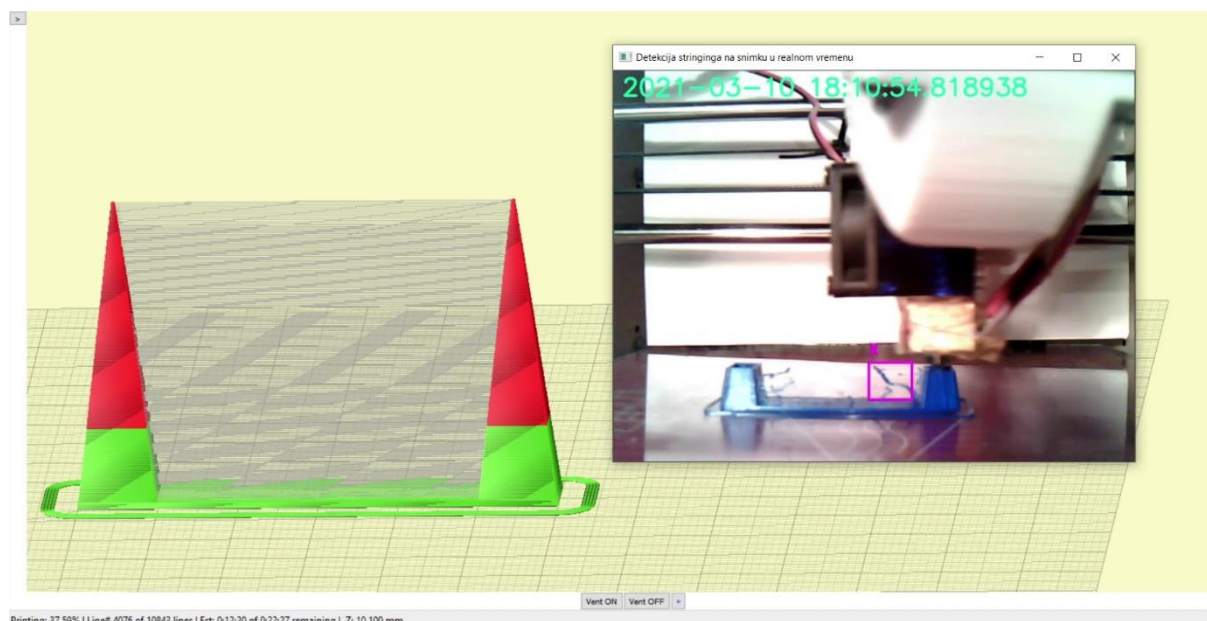


Слика 31 Први пример детекције

На Слици 31 можемо видети успешну детекцију stringinga која је на снимку детектована и означена љубичастим квадратима у чијем се углу налази "x". Упоредо са детекцијом stringinga укључен је и програм Pronterface који нам омогућава да пратимо процес штампања у виртуалној симулацији. Pronterface нам такође омогућава да видимо информацију на којој висини се појављује stringing, коју можемо видети у доњем левој углу под "Z:13.100 mm". У првом примеру детекција stringinga се први пут појавила на висини од 13,1mm након чега је ручно прекинут процес штампања.

У горњем левом углу програма за детекцију stringinga налази се датум и тачно време ради лакшег праћења процеса штампања.

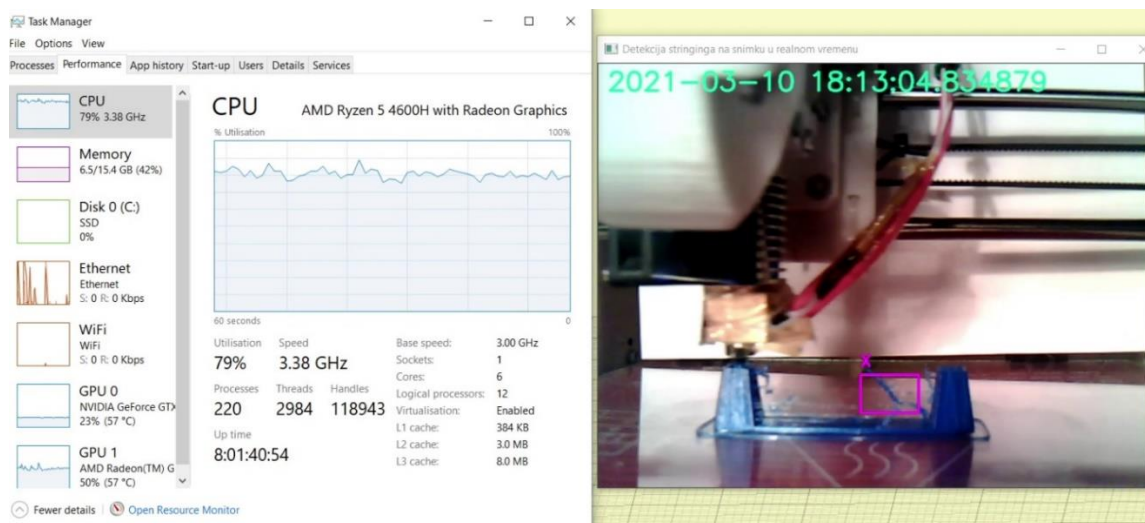
Могућу уштеду на самом филаменту, али и новцу, можемо видети већ на првом примеру. Штампање је прекинуто, услед пријаве појаве stringinga, након 45,46% урађеног предмета и тиме спречена евентуална појава већих грешака чиме би предмет могао бити потпуно деформисан. На овај начин је уштеђено 54,54% филамента, која у овом конкретном случају износе 1.0908g. Наравно, уштеда на филаменту би била много већа уколико би предмет штампања имао веће димензије.



Слика 32 Други пример детекције

На Слици 32 можемо видети други пример успешне детекције stringinga на снимку у реалном времену. Резултати детекцију у овом случају су још бољи, што можемо видети на подацима у доњем левом иглу. Детекција се десила на висини од 10,1mm односно након што је урађено 37,59% предмета. У другом случају би уштеда, у поређењу са првим случајем, била већа за 16.95%.

Битно је рећи да је програм YOLO, током целом процеса тестирања, користио само процесор, што се одразило на квалитет обрађеног снимка. Снимак који је коришћен при детектовању је резолуције 640x480 пиксела и свака друга слика у секунду је обрађена. Као што је већ споменуто, YOLO програм захтева изузетно способне рачунаре, што можемо видети и на Слици 33.



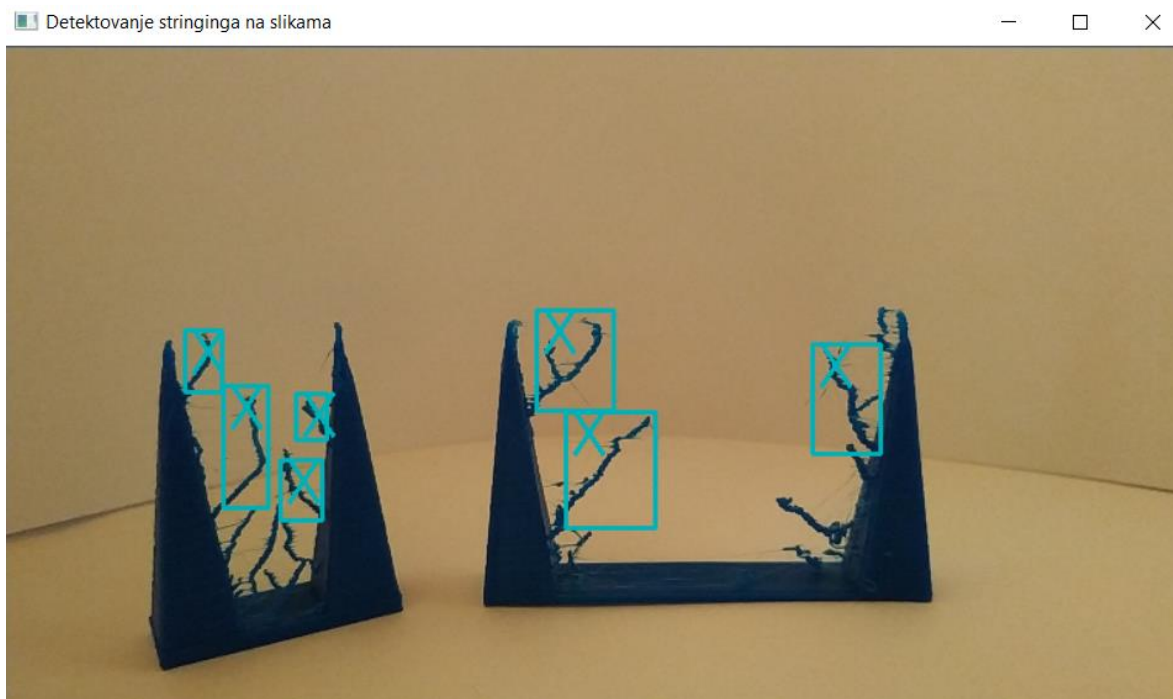
Слика 33 Проценат искоришћености процесора током детекције

Иако је програм YOLO успешно детектовао појаву stringinga на приказаним примерима, његови резултати нису увек били потпуно тачни. Како изглед нити, које називамо stringing, личи на мале каблове у одређеним ситуацијама је програм пријављивао каблове које су спојени са екструдером као грешку. Ова појава се није често дешавала и врло лако може да се исправи, одабиром другачијег модела екструдера који би у свом кућишту садржао и поменуте каблове.

Такође, облик stringinga често може изгледати другачије на истом моделу. Дебљина, дужина као и висина нити, само су неки од параметара који могу другачије изгледати од горе приказаних примера. Из поменутог разлога програм YOLO није могао сваку нит да препозна као грешку. Овај проблем је могуће решити повратком на први корак тренирања програма, 6.1.1 База слика и означавање, где би се база већ постојећих слика проширила новим примерима. На овај начин, би програм могао да "научи" различите облике stringinga који могу настати, и применити их са већом прецизношћу у процесу детектовања.

6.3 Детекција stringinga на сликама

Поред детекције stringinga на снимку у реалном времену, могућа је примена YOLO програма и на нову базу слику. Пример успешног детектовања можемо видети на Слици 34.



Слика 34 Детектовање stringinga на слици

6.4 Поређење са комерцијалним решењем за детекцију грешака штампе "The Spaghetti Detective"

"The Spaghetti Detective" је програм чија сврха је праћење настајања грешака штампе у реалном времену и обавештавање корисника уколико се исте појаве. The Spaghetti Detective такође користи машинско учење при детекцији грешака, међутим програм није отвореног кода већ је комерцијални производ. Програм је могуће користити у бесплатној верзији, која врши само анализу слике, и плаћеној верзији која кошта 6 долара на месечном нивоу и анализира видео снимак у реалном времену. Како је тестирање програма YOLO рађено на видео снимку у реалном времену, упоредићемо верзију програма The Spaghetti Detective која се наплаћује, односно "Pro" верзију.

Анализа снимка помоћу The Spaghetti Detective програма се, у теорији, врши максимално у 25 слика у секунди и ограничење на месечном нивоу је 50 сати праћења штампе. Уколико корисник жели да повећа број сати праћења штампе у току једног месеца, цена би износила 10 долара за још 200 сати [29].

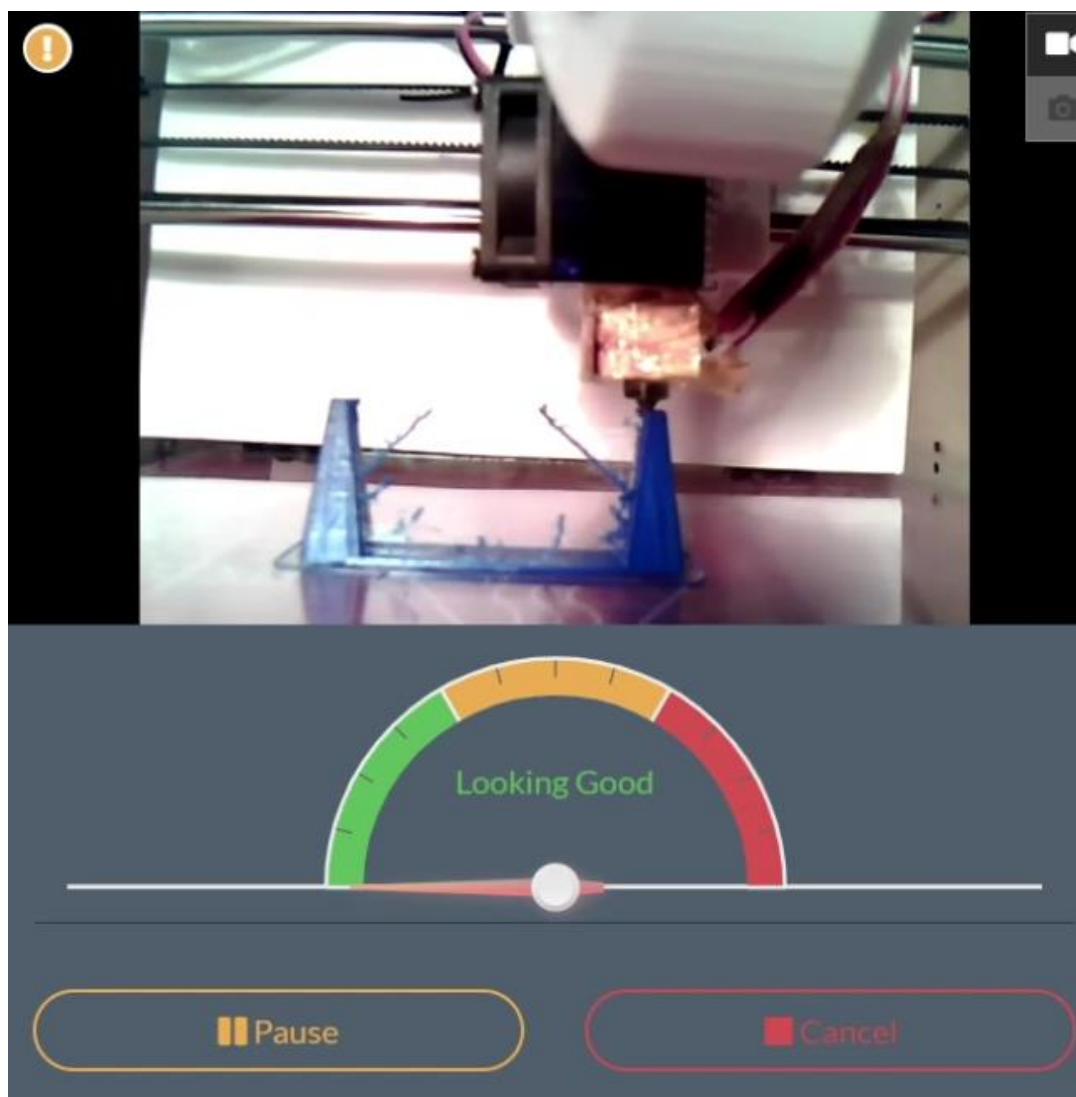
The Spaghetti Detective се у потпуности користи преко интернета и интегрисан је у популарно cloud решење за праћење, контролисање и снимање 3Д штампања, које се назива "OctoPrint". Приликом поређења програма The Spaghetti Detective са YOLO-ом, OctoPrint је инсталиран на Raspberry Pi 4 микро рачунару. Такође, услови тестирања су били идентични. Тачније, коришћен је исти модел приликом штампања као и исти g-code, положај камере је исти као и резолуција снимања, такође је осветљење предмета урађено на исти начин.

Програм The Spaghetti Detective квалитет штампе мери на скали која се дели на:

- Зелену зону – предмет нема грешке
- Жуту зону – постоје сумње да се на предмету налазе грешке
- Црвене зоне – програм обавештава корисника да постоје грешке и препоручује прекидање процеса штампања

Програм је вршио анализу целог процеса штампања, у трајању од 21 минут.

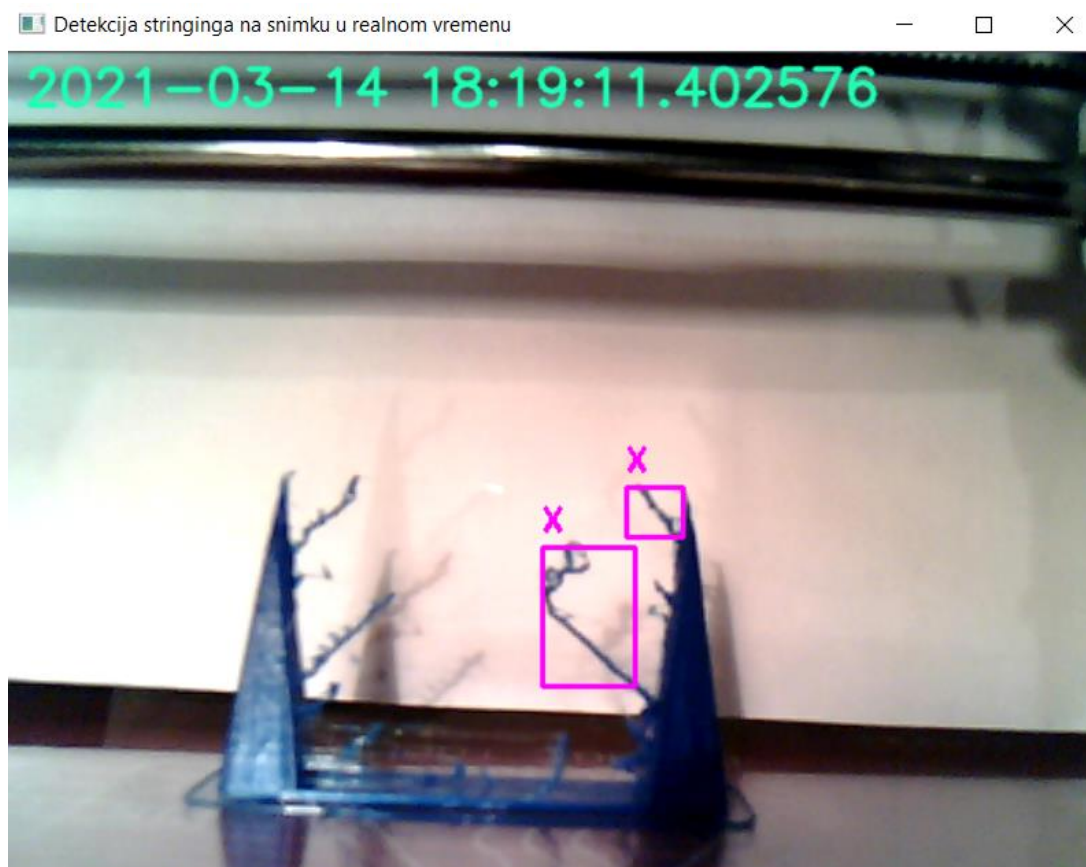
Током целог тога штампања, програм The Spaghetti Detective ниједном није пријавио да постоји грешка на предмету који се штампа. На Слици 35. може се видети резултат који је сликан пред крај процеса штампања, када се количина stringinga налазила на више места.



Слика 35 Резултати тестирања програма *The Spaghetti Detective*

На Слици 35 може се видети да је детекција грешке у зеленој зони, односно да предмет нема грешака, иако на слици можемо јасно видети stringing.

Након што је програм *The Spaghetti Detective* завршио процес праћења штампања, и није уочио грешке, такође је преко видео камере извршена анализа предмета помоћу YOLO програма, како би извршили поређење. За разлику од претходног коришћења, које смо применили у наслову 6.2 Детекција stringinga на видео снимку у реалном времену, процес детектовања смо сада применила на већ одштампани предмет и резултати се могу видети на слици 36.



Слика 36 YOLO детекција stringinga

Упоређивањем резултата добијених уз помоћ програма The Spaghetti Detective и YOLO, можемо видети да, иако потпуно бесплатно решење, YOLO показује боље резултате. Посебно је важно нагласити да би даљем усавршавањем и увећањем базе слика током процеса тренирања YOLO програма, резултати могли бити још бољи.

Када упоредимо са аспекта купца, односно корисника, The Spaghetti Detective програм је лакше користити и корисник не обавља цео процес тренирања који захтева одређено време и знање. Међутим, коришћење једноставнијег корисничком окружења и процеса намештања програма кошта корисника. Са друге стране, уколико се корисник одлучи да примени YOLO као решење у процесу праћења stringinga, границе су само упорност и умеће корисника да прилагоди детекцију својим потребама.

7 Закључак

На основи датих резултата може се видети да је могућа успешна примена машинског учења на детекцију настајања грешке приликом процеса 3Д штампања. Резултати су задовољавајући, али је потребно даље усавршавање целог процеса како би се ниво детекције подигао на виши ниво. Даљи развој би захтевао детекцију коришћењем графичке картице као и примену више камера које би снимале процес штампање у високој резолуцији. Уколико се узме у обзир да су резултати који су добијени у раду добијени коришћењем ограничених ресурса, може се рећи да би могућности примене машинског учења на штампаче који се налазе у индустријским постројењима готово неограничене.

Примена машинског учења у целокупном процесу 3Д штампања довела би до веће аутоматизације процеса, али и веће уштеда времена и новца. Резултати који су добијени могу довести до уштеде више од 50% материјала уколико се грешка детектује на време и штампање прекине.

Поред појаве *stringing*, даљим усавршавањем процеса могуће је праћење и појава ситних грешака које људско око не може приметити у току штампања, већ тек анализом предмета након штампања.

Крајња употреба машинског учења у процесу 3Д штампања би захтевала имплементацију програма за праћење параметара штампе у сам софтвер који се користи приликом штампања. На овај начин би се омогућило да софтвер аутоматски, из добијених резултата, током штампања врши корекције одређених параметара уколико је то потребно.

Литература

- [1] Фатима Живић, Богдан Васиљевић, Страхиња Миленковић, Изабрана поглавља из метрологије, Практикум за лабораторијске вежбе, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2020, ISBN-978-86-6335-072-4
- [2] <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3/>, 10.02.2021.
- [3] <https://www.3dsystems.com/our-story>, 11.02.2021.
- [4] <https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2020/10/3d-printed-microboat>, 10.02.2021.
- [5] <https://khn.org/news/3d-printed-housing-designed-for-the-homeless-and-needy-seniors/>, 15.02.2021.
- [6] [https://mars.nasa.gov/news/8778/nasas-perseverance-rover-bringing-3d-printed-metal-parts-tomars/#:~:text=Curiosity%2C%20Perseverance's%20predecessor%2C%20was%20the,at%20Mars%20\(SAM\)%20instrument](https://mars.nasa.gov/news/8778/nasas-perseverance-rover-bringing-3d-printed-metal-parts-tomars/#:~:text=Curiosity%2C%20Perseverance's%20predecessor%2C%20was%20the,at%20Mars%20(SAM)%20instrument), 16.02.2021.
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>, 17.02.2021.
- [8] <https://proto3000.com/service/3d-printing-services/technologies/sla-3d-printing-services/>, 10.02.2021.
- [9] <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>, 25.02.2021.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)), 11.02.2021.
- [11] <http://rapidprototypingservicescanada.com/selective-laser-sintering-sls.php>, 24.02.2021.
<https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>, 19.02.2021.
- [12] <https://www.sinterit.com/the-story-behind-glassesusa-com-and-janne-kyttanen-3d-printed-glasses/>, 19.02.2021.
- [13] <https://www.sculpteo.com/blog/2014/05/14/right-plastic-production-method-part-3/>, 19.02.2021.
- [14] <https://www.amazon.com/Best-Sellers-Industrial-Scientific-3D-Printers/zgbs/industrial/6066127011>, 10.03.2021.
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#cite_note-26, 10.03.2021.
- [16] <https://pubs.rsc.org/en/content/chapterhtml/2019/bk9781788014403-00001?isbn=978-1-78801-440-3&sercode=bk>, 22.02.2021.
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid, 18.02.2021.
- [18] <https://gembird.com/products.aspx>, 05.03.2021.
- [19] <https://www.zoro.com/ninjabflex-filament-spool-175mm-tpe-lava-3dnf0517505/i/G8819124/>, 06.02.2021.
- [20] <https://3dprintingsystems.freshdesk.com/support/solutions/articles/4000003132-how-does-the-up-3d-printer-s-print-head-extruder-work->, 09.03.2021.

-
- [21] https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/at1t6g/in_love_with_1mm_layer_height_on_a_desktop_3d/ , 10.03.2021.
- [22] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323581189000166> , 09.03.2021.
- [23] https://blog.prusaprinters.org/prusa-i3_3543/ , 08.03.2021.
- [24] <https://colab.research.google.com/drive/16pBJQePbqkz3QFV54L4NikOn1kwpuRrj> , 10.03.2021.
- [25] <https://grabcad.com/library/prusa-i3-plywood-frame-6mm-1> 11.03.2021.
- [26] <https://www.amazon.com/NVIDIA-Tesla-P100-computing-processor/dp/B06WV7HFWV> , 10.03.2021.
- [27] <https://jupyter.org/about> , 10.03.2021.
- [28] <https://pjreddie.com/darknet/> , 11.03.2021.
- [29] <https://app.thespaghettidetector.com/ent/pricing/> , 14.03.2021.



**Jovan
Babajić**

DATUM ROĐENJA:
07/05/1996

KONTAKT

Državljanstvo: Srbije

Pol: Muški



Solinska 8,
34000 Kragujevac, Srbija



babajic.jovan@gmail.com



(+381) 621996057

O MENI

Student završne godine mašinskog inženjerstva sa velikom željom da uči nove veštine i dalje proširuje svoje znanje. Uvek spreman za rad u novim uslovima i pronalaženje rešenja za probleme u timskom okruženju.

OBRAZOVANJE I OSPOSOBLJAVANJE

01/10/2015 – TRENUTNO – Sestre Janjić 6, Kragujevac, Srbija

Inženjer mašinstva

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Završni rad se sastoji iz projektovanja i izrade FDM štampača koji uključuje praćenje parametara 3D štampe radi kontrole kvaliteta odštampanog dela, pomoću machine learning programa

Studijska(e) oblast(i)

- Proizvodno mašinstvo

Metrologija 3D štampe | <http://www.fink.rs/sr/>

20/01/2019 – 16/06/2019 – Ehitajate tee 5, Talin, Estonija

Erasmus+ KA1 razmena studenata

Tehnološki Univerzitet u Talinu

U okviru kurseva koja sam pohađao imao sam priliku da se upoznam i praktično primenim znanje u procesu digitalizacije proizvodnje

Primena CAM softvera u procesu proizvodnje, 3D modeliranje objekata sa tehničkog crteža, odabir alata i pisanje g-koda za primenu na odgovarajućim mašinama

Korišćenje Unity programa u simulaciji procesa proizvodnje u virtualnom okruženju (VR)

Korišćenje programa Visual Components u procesu planiranja i analiziranja proizvodnih sistema

Primena machine learning programa (YOLO) u procesu prepoznavanja objekata na slici

Posete pogonima kompanija Ericsson i Norcar gde sam imao prilike da se upoznam sa najnovijim tehnologijama kao što su razvoj 5G mreže i primena machine learninga u sortiranju proizvoda

<https://www.taltech.ee/en>

01/09/2011 – 01/06/2015 – Daničićeva 1, Kragujevac, Srbija

Gimnazija

Prva kragujevačka gimnazija

Studijska(e) oblast(i)

- Prirodno matematički smer

RADNO

ISKUSTVO

01/04/2021 – TRENUTNO – Kragujevac, Srbija

Kontrolor dimenzione kontrole

MIND – Milanović Industries Group

Kontrola usaglašenosti kvaliteta proizvoda sa tehničkim specifikacijama i standardima koji se primenjuju u organizaciji

Dimenziona kontrola proizvoda uz pomoć 3D skenera

26/10/2018 – 18/01/2019 – Gruža, Srbija

Stručna praksa - tehnolog u procesu proizvodnje

Rapp Zastava d.o.o.

Poslovi pripreme i lansiranja konstruktivno-tehnološke dokumentacije za lansiranje u proizvodnju

01/01/2017 – 01/01/2018

Freelancer

Upwork

Analiza i 3D modeliranje tehničkih crteža Obrada i unos podataka

01/07/2015 – 15/09/2015 – Kragujevac, Srbija

Radnik u proizvodnji stiropora

Čar d.o.o.

Poslovi pripreme, obrade i plasiranja proizvoda od stiropora

JEZIČKE VEŠTINE

MATERNJI JEZIK ILI JEZICI: Srpski

DRUGI JEZIK/JEZICI: Engleski

Slušanje

B2

Čitanje

B2

**Govorna
produkcija**

B2

**Govorna
interakcija**

B2

Pisanje

B2

DIGITALNE VEŠTINE

Napredno poznavanje programskog paketa Catia V5 / Napredno poznavanje u Autodesk AutoCAD programu / Napredno poznavanje Microsoft Office paketa programa (Word, Excel, PowerPoint) / Osnovno poznavanje Maya i Blender programa za 3D modeliranje / Napredno poznavanje machine learning programa YOLO i The Spaghetti Detective / Osnovno poznavanje Unity programa / Osnovno poznavanje Visual Components programa / Osnovno poznavanje Siemens NX programa

Tehničke veštine

Koordinatne merne mašine / Praktično poznavanje automatske kontrole procesa (programiranje softvera za upravljanje sistemom) / Programiranje sa Arduino i Raspberry Pi sistemima (više praktičnih projekata) / 3D i lasersko skeniranje kod dimenzione kontrole delova / Napredno poznavanje aditivnih tehnologija FDM, SLA, SLS / Projektovanje i izrada 3D štampača, kao i softvera za upravljanje 3D štampom