



**РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА  
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“  
ВО СКОПЈЕ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ**



**м-р Калтрине Мисим Јакупи, дипл. инж.**

**ПРИДОНЕС КОН ИСТРАЖУВАЊАТА НА НЕКОИ ПРОЦЕСНИ  
ПАРАМЕТРИ И ПРИМЕНАТА НА АДТИВНАТА ПРОИЗВОДНА  
ТЕХНОЛОГИЈА**

**-докторска дисертација-**

**Скопје, 2023**



**REPUBLIC NORTH MACEDONIA  
UNIVERSITY "SS. CYRIL AND METHODIUS"  
IN SKOPJE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**



**Kaltrine Misim Jakupi, M.Sc.**

**CONTRIBUTION TO INVESTIGATIONS OF SOME PROCESS  
PARAMETERS AND APPLICATION OF ADDITIVE MANUFACTURING  
TECHNOLOGY**

**-Doctoral thesis-**

**Skopje, 2023**

**Ментор:**

Проф. д-р. Владимир Дуковски  
Машински факултет – Скопје  
Универзитет „Св Кирил и Методиј“ во Скопје

**Членови на комисија:**

Проф. д-р. Атанас Кочов, претседател, Машински факултет – Скопје, УКИМ  
Проф. д-р. Владимир Дуковски, член, Машински факултет – Скопје, УКИМ  
Проф. д-р. Глигорче Вртаноски, член, Машински факултет – Скопје, УКИМ  
Проф. д-р. Мите Томов, член, Машински факултет – Скопје, УКИМ  
Проф. д-р. Анка Трајковска Петкоска, надворешен член, Технолошко-технички факултет - Велес, УКЛО

**Научна област:**

Технички науки - Машинство

**Лектор:**

Виолета Јовановска-Никовска

**Датум на одбрана:**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/2023

**Калтрине Мисим Јакупи****ПРИДОНЕС КОН ИСТРАЖУВАЊАТА НА НЕКОИ ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ  
И ПРИМЕНАТА НА АДТИВНАТА ПРОИЗВОДНА ТЕХНОЛОГИЈА****- РЕЗИМЕ -**

Намената на овие истражувања е да се определи ефектот на некои влезни параметри (независни варијабли) кај адитивната технологија, врз рапавоста на површината (зависна варијабла), кај примероците печатени со 3D-печатачи. Рапавоста на површината се анализира преку параметрите Ra, Rz и Rq. Мерењата на рапавоста се реализираат во три правци, 0, 45 и 90 степени, во однос на правецот на печатење. Врз основа на резултатите добиени од експериментите развиени се линеарни и експоненцијални модели на рапавоста на површината во функција на влезните параметри. Во делот за примената на адитивните технологии истражувана е примената во областа на радиотерапијата, преку креирање болус.

Истражувана е рапавоста на површината на примероци изработени од три различни термопластични материјали, со примена на технологијата Fused Deposition Modeling (FDM), како и на примероци изработени од челик со две различни технологии Fused Filament Fabrication (FFF) и Direct Metal Laser Sintering (DMLS).

Со цел да се оптимизираат процесните параметри, користена е методата на Тагучи при планирање на експериментите, позната уште и како Design of Experiments (DoE). Со методата на Тагучи добиени се девет различни комбинации на експерименти со три независни варијабли и три нивоа на големини на варијаблите, а изработени се девет примероци за секој од истражуваните материјали и технологии.

Термопластичните материјали Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA), и Polyethylene Terephthalate Glycol Modified (PETG) се користени во експериментите заради нивните својства и широката примена. Користени се истите независни варијабли со истите нивоа на вредности за сите три материјали, и тоа: височина на слојот (0.1, 0.15 и 0.2 mm), брзина на печатење (70, 80 и 90 mm/s) и пополнување (30, 40 и 50 %). Користена е технологијата DMLS за истражување на примероците изработени од нерѓосувачкиот челик 316L, со следниве независни параметри: моќност на ласерот (180, 200 и 220 W), брзина на скенирање (450, 500 и 600 mm/s) и растојание помеѓу редовите (0.07, 0.08 и 0.09 mm). За технологијата FFF избрани се следниве независни параметри: брзина на печатење (31.5, 35.0 и 38.5 mm/s), пополнетост (45, 50 и 55 %) и височина на слојот (0.18, 0.20 и 0.22 mm).

Влезните параметри на експериментите беа планирани со методата на Тагучи, додека теоретските модели на рапавоста на површината се добиени со користење на регресионата анализа на независните варијабли. Користена е и методата на најмали квадрати за определување на големината на коефициентите. Врз основа на сето тоа креирани се математички модели за три различни правци и три различни мерни големини на профилите на рапавост.

Со цел да се доближи радијационата доза до кожата на пациентот реализирано е печатење на болус, според обликот на лицето на пациентот. Со помош на соодветен софтвер (Treatment Planning System (TPS)) направени се пресметки за дистрибуција и поместување на дозата при радиолошкиот третман.

Постои теоретска поврзаност помеѓу големините  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$ , што е потврдено и со мерењата. Како резултат на тоа, прикажани се само мерењата на  $R_a$ . За измерените вредности на  $R_a-0$ ,  $R_a-45$  и  $R_a-90$ , дефинирана е поврзаноста помеѓу независните параметри и рапавоста на површината. Направени се и тестови на повторливост на резултатите. Само за  $R_a-90$  евидентирано е мало отстапување при повторување на експериментите, додека при повторување на експериментите за  $R_a-0$  и  $R_a-45$  забележани се големи отстапувања.

Врз основа на еден од методите на Тагучи, познат како „помалото е подобро“, анализирани се резултатите на некои математички модели. Пресметани се определени вредности за  $R_a-90$ , за конкретни независни варијабли, и добиени се за: PLA (14.37 и 14.03  $\mu\text{m}$ ), ABS (4.39 и 4.54  $\mu\text{m}$ ), PETG (6.20 и 6.39  $\mu\text{m}$ ) и за 316L со DMDS (2.42 и 3.59  $\mu\text{m}$ ), за линеарните и експоненцијалните модели. Влијанието на синтерувањето и отстранувањето на врзивното средство врз рапавоста на површината кај примероците изработени од челикот 316L со технологијата FFF не смее да се занемарува, но заради нерасполагање со оваа технологија во нашата средина не се направени пошироки истражувања.

Пресметаните вредности кај линеарните и експоненцијалните модели за  $R_a-90$  ги задоволуваат сите статистички критериуми, а тие се споредливи помеѓу себе по однос на разликите. Сепак, може да се забележи мала предност на експоненцијалниот модел во однос на линеарниот. Како резултат на тоа податоците кои се генерирани со експоненцијалните модели статистички подобро се однесуваат во однос на оние добиени со линеарните модели.

Забележани се повеќе предности кај примената на термопластичниот болус во радиотерапијата. Неговата примена предизвикува поместување на апсорбираната доза во ткивото. Изработка на болус со 3D-печатење овозможува променлива дебелина, што помага во при рамномерната распределба на радијацијата. Покрај тоа, прецизно печатениот болус може да се допре до кожата на пациентот, што е многу важно за квалитетот на дистрибуција на дозата.

**Клучни зборови:** адитивно производство; 3D-печатење; рапавост на површината; термопласти (PLA; ABS; PETG); метал (316L); теоретски модел; болус

**Kaltrine Misim Jakupi**

**CONTRIBUTION TO INVESTIGATIONS OF SOME PROCESS  
PARAMETERS AND APPLICATION OF ADDITIVE  
MANUFACTURING TECHNOLOGY**

**- ABSTRACT -**

The purpose of this study was to determine the effect of input printing parameters, as independent variables, on the surface roughness, as a dependent variable, of workpieces printed by three-dimensional (3D) printers. The profiles of the Ra, Rz, and Rq parameters were analyzed to describe surface roughness. Three measurement directions 0, 45, and 90 degrees in relation to the printing direction were used to develop linear and exponential models of the surface roughness of the parts created by the various input parameters. The effect of 3D-printed boluses was also studied.

The surface roughness of three different thermoplastics was studied using the Fused Deposition Modeling (FDM) technology, and two different metal technologies, Fused Filament Fabrication (FFF) and Direct Metal Laser Sintering (DMLS).

To optimize process parameters, Taguchi methods-orthogonal arrays were used in the Design of Experiments (DoE) for thermoplastic and metallic printed workpieces. The Taguchi method produces 9 different combinations when three independent variables with three levels are studied. As a result, nine workpieces were created using a specific combination of independent parameters.

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA), and Polyethylene Terephthalate Glycol Modified (PETG) were used for thermoplastic workpiece testing due to their physical properties and wide application. The same independent variables with the same range values were used for three thermoplastics: layer height (0.1, 0.15, and 0.2 mm), print speed (70, 80, and 90 mm/s), and infilling (30, 40, and 50%). DMLS technology was used for testing workpieces made of 316L stainless steel, with the following parameters chosen as independent parameters: laser power (180, 200, and 220 W), scan speed (450, 500, and 600 mm/s), and hatch spacing (0.07, 0.08, and 0.09 mm). While, for FFF technology as independent parameters were chosen: print speed (31.5, 35.0, and 38.5 mm/s), infill (45, 50, and 55%), and layer height (0.18, 0.20, and 0.22 mm).

The printing input parameters were designed using the Taguchi method, which was used to optimize the process for performance, quality, and cost.

The surface roughness theoretical models were developed using multiple regression analysis of independent variables. The least squares method was also used to estimate the value of the coefficients. Based on this, mathematical models for three different directions and three measurement profiles were created.

The printed boluses were applied to a specific patient in order to deliver the dose close to the patient's skin. The calculation with commercial bolus and printed bolus was done using

Treatment Planning System (TPS) software. The dose distribution and dose shifting were investigated.

A correlation between surface roughness profiles Ra, Rz, and Rq was noticed through the measurements. As a result, only Ra was reported. For the measured values of Ra-0, Ra-45, and Ra-90, the relationship between the independent parameters and surface roughness has been defined. The repeatability test was carried out for measurements of 0, 45, and 90 degrees in relation to the printing direction. Only Ra-90 evidenced a restricted deviation when the same test was repeated, whereas Ra-0 and Ra-45 evidenced a broad range of deviation when the measurements were repeated.

Based on one of the Taguchi methods "smaller is better" were analyzed the results of mathematical models. The following calculated values of surface roughness Ra-90 were found for specific independent parameters and their values under study were found: PLA (14.37 and 14.03  $\mu\text{m}$ ), ABS (4.39 and 4.54  $\mu\text{m}$ ), PETG (6.20 and 6.39  $\mu\text{m}$ ) and 316L by DMLS (2.42 and 3.59  $\mu\text{m}$ ), for linear and exponential models. The impact of Sintering and Debinding on the surface roughness of 316L created by FFF technology is not negligible, and those processes were done abroad and could not be closely investigated.

The calculated results of the exponential and linear models for the Ra-90 file met all of the statistical criteria, and the differences between them were comparable. When compared to linear models, exponential models used to have a slight advantage. As a result, data generated by exponential models fit in better statistically than data generated by exponential models.

Several advantages were discovered when thermoplastics were used as a bolus. Boluses can cause a shift of absorbed dose in the tissue when delivered. Printing boluses with a 3D printer allow for variable thickness, which aids in the uniform distribution of radiation. Furthermore, the printed bolus can be touched on the patient's skin, which is critical for the quality of dose distribution.

**Keywords:** Additive Manufacturin; 3D printing; Surface roughness; Thermoplastics ( PLA; ABS; PETG); Metal (316L); Theoretical modeling; Bolus;

**БЛАГОДАРНОСТ**

*Дозволете ми да им се заблагодарам на сите кои професионално ми помогнаа и ми пружија целосна поддршка при изработката на овој докторат.*

*Ми недостасуваат зборови со кои би сакала да ја изразам мојата благодарност до мојот почитуван ментор Проф. д-р Владимир Дуковски. Исклучително му се заблагодарувам за неговите научни совети, континуирана поддршка и трпение за време на моите докторски студии. Неговото огромно искуство секојдневно беше присутно во процесот на истражување и живот.*

*Исто така, сакам да им се заблагодарам на вработените на Машинскиот факултет при Универзитетот во Приштина, за нивната поддршка при изработката на дисертацијата.*

*Мојата благодарност оди и кон моите соработници и пријатели за нивните инспиративни дискусии и духовна поддршка низ целиот период на моите докторски студии.*

*На крајот, но за мене и најважно е да ја изразам мојата благодарност кон моето семејство, посебно кон моите родители Мисим и Хамиде, сопругот Гезим и децата Дрин и Јон, за нивната несомнена љубов, поддршка и инспирација за време на моето академско патешествие. Нивната верба во мене ги одржуваше на високо ниво мојот дух и мотивација за време на целиот процес.*

*Калтрине Јакупи*



## Содржина

<i>ЛИСТА НА СЛИКИ</i> .....	<i>xi</i>
<i>ЛИСТА НА СИМБОЛИ</i> .....	<i>xv</i>
<b>1. ВОВЕД</b> .....	<b>1</b>
1.1. Мотивација .....	1
1.2. Предмет на истражувањето .....	1
1.3. Методологија на истражување.....	2
1.4. Цели на истражувањето .....	3
1.5. Хипотези .....	4
1.6. Очекувани резултати и ефекти од нивната примена .....	4
<b>2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРАТА РЕЛЕВАНТНА ЗА ИСТРАЖУВАЊАТА</b> .....	<b>5</b>
<b>3. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ</b> .....	<b>8</b>
3.1. Адитивно производство (АП).....	8
3.2. Квалитет на површината .....	22
3.3. Оптимизација на процесните параметри.....	26
3.4. Дизајн-простор на Тагучи.....	27
3.5. Регресиона анализа .....	28
3.6. Користен софтвер во истражувањата.....	29
3.7. Ефектот на болус при третманот во радиотерапијата .....	29
<b>4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА</b> .....	<b>31</b>
4.1. Примена на Моделирање со споени слоеви (FDM) кај печатење на термопластични материјали.....	31
4.2. Примена на термопластичен материјал во радиотерапијата (Bolus).....	36
4.3. Примена на технологијата FFF за печатење на нерѓосувачки челик 316L .....	40
4.4. Примена на технологијата DMLS за печатење на нерѓосувачки челик 316L .....	44
4.5. Мерење на рапавоста на површината .....	49
4.6. Методологија на статистичките пресметки и нивниот 3D-приказ.....	51
<b>5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА</b> .....	<b>55</b>
5.1. Вовед.....	55

5.2. Рапавост на површината на термопластичен материјал PLA печатен со технологијата FDM.....	55
5.3. Рапавост на површината Ra-90 за термопластика ABS печатена со технологијата FDM.....	66
5.4. Рапавост на површината Ra-90 за термопластика PETG печатена со технологија FDM.....	71
5.5. Ефекти од примената на болус врз распоредот на дозата кај пациентите на радиотерапија .....	78
5.6. Рапавост на површината на примерок од нерѓосувачки челик 316L печатен со технологијата DMLS .....	80
5.7. Рапавост на површината на челик 316L печатен со технологијата FFF.....	90
6. <b>ЗАКЛУЧОК</b> .....	95
7. <b>РЕФЕРЕНЦИИ</b> .....	98
8. <b>АНЕКС 1</b> .....	109
9. <b>АНЕКС 2</b> .....	116

**ЛИСТА НА СЛИКИ**

Слика 3.1. Генерална класификација на процесите кај АП.....	9
Слика 3.2. Класификација на АП врз основа на методологијата на оформување на производот .....	9
Слика 3.3. Класификација на процесот АП врз основа на типот на основниот материјал .	10
Слика 3.4. Класификација на АП врз основа на медиумот кој е користен за процесирање .....	11
Слика 3.5. Шематски приказ на процесот ВЈ.....	12
Слика 3.6. Илустрација на методата на вбригување врзивно средство (ВЈ), проследено со отстранување прашина и инфилтрација на додавање бронза.....	12
Слика 3.7. Шематски приказ на процесот DED.....	13
Слика 3.8. Шематски приказ на процесот АП со истиснување материјал (МЕ). .....	14
Слика 3.9. Шема на процесот МЈ .....	15
Слика 3.10. Шема на PBF.....	16
Слика 3.11. Шема на процесот SLS на АП.....	16
Слика 3.12. Шема на процесот SLM .....	17
Слика 3.13. Процес на ламинирање со листови.....	18
Слика 3.14. Шема на фотополимеризација кај стереолитографија (SLA). .....	19
Слика 3.15. Директно процесирање со светлина (DLP).....	19
Слика 3.16. Приказ на профилот на површината. ....	23
Слика 3.17. Графички приказ на $R_z$ .....	24
Слика 3.18. Графички приказ на $R_p$ .....	24
Слика 3.19. Графички приказ на $R_v$ .....	24
Слика 3.20. Графички приказ на $R_a$ .....	25
Слика 3.21. Графички приказ на $R_q$ .....	25
Слика 4.1. Блок-дијаграм на текот на истражувањата .....	31
Слика 4.2. Термопластични материјали користени во истражувањата.....	32
Слика 4.3. Персонален 3D-принтер ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+. .....	33
Слика 4.4. Приказ на печатени примероци од термопластичните материјали PLA, ABS и PETG. ....	34
Слика 4.5. Приказ на примероците добиени со софтверот PrusaSlicer и печатени во рамнина X-Y .....	34
Слика 4.6 Правец на печатење на примероците изработени од термопластичен материјал.....	35
Слика 4.7. Исполнетост на примероците.....	35
Слика 4.8. Височини на слојот кај примероците. ....	35
Слика 4.9. Визуелизација на примена на болусот и ефектот врз поместувањето на $D_{max}$	37
Слика 4.10. Шематски приказ на процесот на дизајнирање и печатење на 3D-болус. ....	37
Слика 4.11. Симулација на СТ-скенер .....	38
Слика 4.12. Изглед на ракот.....	38
Слика 4.13. Главни чекори до креирање датотека STL.....	38
Слика 4.14. Екран од софтверот PrusaSlicer .....	39
Слика 4.15. Приказ на готовите производи а) глава за време на печатење, б) глава со поддршка, с) болус за време на печатење d) болусот поставен на главата како во време на третманот.....	39

Слика 4.16. Калем со материјал Ultrafuse 316L Stainless Steel .....	40
Слика 4.17. Добиени „Зелени примероци“ по печатењето на Ultrafuse 316L Stainless Steel.....	41
Слика 4.18. Приказ на готов примерок на 3D-печатен Ultrafuse 316L Stainless Steel со технологија FFF.....	41
Слика 4.19. Процес на добивање на дел технологија FFF .....	42
Слика 4.20. Димензии на 3D STL-моделот .....	43
Слика 4.21. 3D STL Model со скратувања 16 % за Y и Z; 20 % за X .....	43
Слика 4.22. Нерѓосувачки челик Stainless Steel Powder 316L. ....	45
Слика 4.23. 3D-печатење со технологија DMLS.....	46
Слика 4.24. Отпечатени примероци со технологијата DMSL .....	47
Слика 4.25. Калибрација на инструментот Mitutoyo SJ-310.....	49
Слика 4.26. Мерење на рапавоста на површината а) паралелно со правецот на печатење 0°, б) дијагонално по должината на печатење 45°, с) мално на правецот на печатење 90° (примерок 7, случаен избор).....	50
Слика 4.27. Типичен приказ на регресионата метода за експоненцијалниот модел 45 степени за материјал PLA, генериран од софверот MS Excel. ....	51
Слика 4.28. Типичен приказ на 3D-график, за експоненцијален модел со 45 степени изработен од PLA, креиран во Matlab а) минимална вредност на рапавоста на површината, кога I = 50 % и P <sub>s</sub> = 90 mm/s. б) максимална вредност на рапавоста, кога I = 30 % и P <sub>s</sub> = 70 mm/s. ....	53
Слика 5.1. Измерени Ra-профили а) за девет примероци од PLA на 0 степени, б) за девет примероци од PLA на 45 степени, с) за девет примероци на 90 степени, д) за стандарден рефрентен примерок. PLA .....	56
Слика 5.2. Дистрибуција на соодносот помеѓу експериментални/теоретски резултати за линеарните и теоретските модели во истражуваните правци, PLA.....	59
Слика 5.3. Одбрани вредности на измерени параметри на рапавоста на површината за различни правци на мерење, PLA.....	60
Слика 5.4. Повторливост на рапавоста на површината (Ra, Rz и Rq) за 0,45 и 90 степени на мерење, n = 10, за PLA.....	60
Слика 5.5. Мерење на правецот на рапавоста на површината (црвена линија) во однос на правецот на паечатење (црна линија). а) 90 степени, б) 45 степени (аголот е дефиниран со жолта линија) и с) 0 степени.....	61
Слика 5.6. Минимални вредности на рапавоста на површината Ra за PLA: а) линеарен модел за 45 степени, б) експоненцијален модел за 45 степени, с) линеарен модел за 90 степени, д) експоненцијален модел за 90 степени. ....	65
Слика 5.7. Измерен и пресметан профил на примерок 2 за термопластика ABS.....	67
Слика 5.8. Екстремни вредности на рапавоста на површината Ra -90 за термопластика ABS, а) линеарен модел со минимални вредности, б) експоненцијален модел со минимални вредности, с) линеарен модел со максимални вредности, д) експоненцијален модел со максимални вредности.....	70
Слика 5.9. Измерен и пресметан профил од примерокот број 2 за PETG.....	72
Слика 5.10. Приказ на површината на примерок од PETG добиен со оптички микроскоп	72
Слика 5.11. Скенирана површина со оптички микроскоп од примерок 2 изработен од материјал PETG а) сината линија (2 mm) поминува низ шест печатени линии, а под неа е профилот со шест специфични максимуми б) сината	

линија со 1 mm должина поминува низ три печатени линии, а под неа се покажани профилите .....	73
Слика 5.12. Екстремни вредности на рапавоста на површината Ra-90 за термопластика PETG, а) линеарен модел со минимални вредности, б) експонецијален модел со минимални вредности, с) линеарен модел со максимални вредности, d) експонецијален модел со максимални вредности.....	77
Слика 5.13. Симулација со СТ на печатен болус 3D наполнет со вода.....	78
Слика 5.14. Ориентација на полето на третманот и и дистрибуција на дозата, а) вообичаена процедура, б) процедура со печатен болус 3D. ....	79
Слика 5.15. Измерен R-профил на примерок број 1 изработен од челик 316L со технологија DMLS .....	81
Слика 5.16. Скенирана површина на примерок 1 со различно зголемување (x4 и x10), 316L со DMLS. ....	81
Слика 5.17. Приказ на површината добиена со оптички микроскоп, примерок од 316L....	82
Слика 5.18. Дистрибуција на соодносот на рапавоста Ra, помеѓу експерименталните / теоретски податоци за линеарните и експонецијалните модели за секој од истражуваните правци. ....	84
Слика 5.19. Екстремни вредности на рапавоста на површината Ra добиени од математичките модели со специфична комбинација на независните варијабли за материјалот 316L. ....	85
Слика 5.20. а) Приказ на главни ефекти за средните вредности б) Приказ на главните вредности за сигнал/шум соодносот, (помалото е подобро) .....	86
Слика 5.21. Минимални вредности на рапавоста на површината Ra90, за 316L и технологија DMLS а) линеарен модел со минимални вредности, б) експонецијален модел со минимални вредности, с) линеарен модел со максимални вредности, d) експонецијален модел со максимални вредности. ....	89
Слика 5.22. Шематски приказ на процесот на Material Extrusion Additive Manufacturing .	90
Слика 5.23. Просечни Ra профили а) за девет примероци од FFF на 0 степени, б) за девет примероци од FFF на 45 степени, с) за девет примероци на 90 степени	
Слика 5.24. Корелација на рапавоста на горната површина за а) Ra-0, б) Ra-45 с) Ra-90 ..	92
Слика 5.25. Рапавоста на површината на девет примероци скенирани со оптички микроскоп и зголемување X4. ....	94

**ЛИСТА НА ТАБЕЛИ**

Табела 3.1. Ортогонален дизајн-систем за различни параметри и нивоа на експеримент...	27
Табела 3.2. Ортогонален дизајн-систем за различни параметри и нивоа на експеримент (продолжение) .....	27
Табела 4.1. Технички карактеристики на ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+ .....	33
Табела 4.2. Влезни параметри и нивни нивоа за термопластичните материјали .....	36
Табела 4.3. Приказ на матрицата L9 за термопластичните материјали.....	36
Табела 4.4. Спецификација на материјалот 3D Printing Filament Ultrafuse 316L Stainless Steel.....	40
Табела 4.5. Технички параметри на 3D-печатачот BCN3D Epsilon W50 Metal 3D Printer .....	42
Табела 4.6. Влезни параметри и нивни нивоа за металот 316L Stainless Steel.....	44
Табела 4.7. Дизајн на матрицата L9 за металот 316L Stainless Steel.....	44
Табела 4.8. Хемиски состав и механички својства на метален прав Stainless Steel 316L .....	45
Табела 4.9. Технички податоци за 3D-печатачот TruPrint 2000. ....	46
Табела 4.10. Влезни параметри и нивни нивоа за печатење со технологијата на челик DMSL 316L Stainless Steel. ....	47
Табела 4.11. Дизајн на матрицата L9 за металот 316L Stainless Steel.....	48
Табела 5.1. Независни параметри и нивните нивоа и измерени големини на рапавоста за различни ориентации на примероците PLA. ....	57
Табела 5.2. Линеарни и експоненцијални модели и нивните статистички податоци за 0, 45 и 90 степени на мерење во однос на линијата на печатење, за Ra и примерок изработен од термопластика PLA. ....	58
Табела 5.3. Екстремни вредности на рапавоста на површината добиени од математичките модели генерирани со специфична комбинација на независните варијабли, PLA..	63
Табела 5.4. Независни параметри и измерени резултати за Ra.90, ABS .....	66
Табела 5.5. Линеарен и експоненцијален модел и нивните статистички податоци за Ra-90, за термопластика ABS.....	67
Табела 5.6. Екстремни вредности на рапавоста на површината добиени од математичките модели генерирани со специфична комбинација на независните варијабли, ABS .	68
Табела 5.7. Независни параметри и измерени резултати за рапавоста на површината Ra-90, PETG.....	71
Табела 5.8. Линеарен и експоненцијален модел и нивните статистички податоци за Ra-90, за термопластика PETG.....	74
Табела 5.9. Екстремни вредности на рапавоста на површината добиени од математичките модели генерирани со специфична комбинација на независните варијабли, PETG.....	75
Табела 5.10. Дозиметриска споредба на PTV помеѓу плановите на третирање кога е користен болус и кога не е користен. ....	79
Табела 5.11. Независни параметри со своите нивоа и измерени параметри на рапавоста на површината за различни ориентации на мерење за промероци од челик 316L печатени со технологија DMLS. ....	80
Табела 5.12. Линеарни модели и нивните статистички податоци за сите правци на печатење со технологија DMLS и материјал 316L.....	83

## ЛИСТА НА СИМБОЛИ

<i>Симбол</i>	<i>Значење</i>	<i>Симбол</i>	<i>Значење</i>
<i>ABS</i>	Acrylonitrile butadiene styrene	<i>MJ</i>	Material Jetting
<i>AM</i>	Additive Manufacturing -	<i>dmax</i>	Maximum Depth Dose
<i>PA</i>	Aliphatic Polyamides	<i>Rz</i>	Maximum height
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials	<i>Dmax</i>	Maximum Radiation Dose
<i>ASME</i>	American Society of Mechanical Engineers	<i>MAM</i>	Metal Additive Manufacturing
<i>ANOVA</i>	Analysis of Variance	<i>MC</i>	Monte Carlo Method
<i>Ra</i>	Arithmetic mean deviation	<i>Na</i>	Nozzle Diameter
<i>BJ</i>	Binder Jetting	<i>OA</i>	Orthogonal Array
<i>CAD</i>	Computer Aided Design	<i>PJP</i>	Poly Jet Printing
<i>CT</i>	Computer Tomography	<i>PEEK</i>	Polyether Ether Ketone
$\lambda_c$	Cut-off length/filter	<i>PEI</i>	Polyetherimide
<i>CPS</i>	Cyber-Physical Systems	<i>PE</i>	Polyethylene
<i>DoE</i>	Design of Experiments	<i>PETG</i>	Polyethylene terephthalate glycol
<i>DICOM</i>	Digital Imaging and Communications in Medicine	<i>PLA</i>	Polylactic Acid
<i>DLP</i>	Direct Light Processing	<i>PMMA</i>	Polymethyl Methacrylate
<i>DMLS</i>	Direct Metal Laser Sintering	<i>PP</i>	Polypropylene
<i>DMD</i>	Direct Metal Deposition	<i>PBF</i>	Powder Bed Fusion
<i>DED</i>	Directed Energy Deposition	<i>Ps</i>	Print Speed
<i>EBAM</i>	Electron Beam Additive Manufacturing	<i>RSM</i>	Response Surface Methodology
<i>EBFFF</i>	Electron Beam Free Form Fabrication	<i>Rq</i>	Root mean square deviation
<i>EBM</i>	Electron Beam Melting	<i>Ss</i>	Scan Speed
<i>L</i>	Evaluation length	<i>SLM</i>	Selective Laser Melting
<i>FDM</i>	Fused Deposition Modeling	<i>SLS</i>	Selective Laser Sintering
<i>FFF</i>	Fused Filament Fabrication	<i>SMA</i>	Shape Memory Alloys
<i>HS</i>	Hatch Spacing	<i>SMP</i>	Shape Memory Polymers
<i>HIPS</i>	High Impact Polystyrene	<i>SL</i>	Sheet Lamination
<i>Id</i>	Infill density	<i>SNR</i>	Signal-to-Noise Ratio
<i>ISO</i>	International Organization Standardization	<i>SLA</i>	Stereo lithography
<i>IoT</i>	Internet of Things	<i>STL</i>	Stereolithography
<i>JIS</i>	Japanese Industrial Standards	<i>TPU</i>	Thermoplastic Polyurethane
<i>LOM</i>	Laminated Object Manufacturing	<i>3D</i>	Three Dimensional
<i>LENS</i>	Laser Engineered Net Shaping	<i>TPS</i>	Treatment Planning System
<i>LMD</i>	Laser Metal Deposition	<i>UAM</i>	Ultrasonic Additive Manufacturing
<i>Lp</i>	Laser Power	<i>UV</i>	Ultraviolet
<i>Lh</i>	Layer Height	<i>VP</i>	Vat Photo polymerization
<i>ME</i>	Material Extrusion		

## **1. ВОВЕД**

### **1.1. Мотивација**

Сведоци сме на брзиот технолошки развој кој има силно влијание врз нашиот живот и работа, а секако ќе биде и решавачки за квалитетот на нашето живеење и иднината на човештвото.

Големината, широчината и комплексноста на технолошкиот развој укажува дека трансформацијата која се случува е сосема различна од тоа што досега човештвото го доживеало. Оттука и констатацијата дека ние немаме доволно информации за сето тоа и како резултат ние сè уште не знаеме каква ќе биде иднината, но нашиот одговор треба да биде со голема грижа и соодветен на зачувување на одржливоста на нашата планета.

Првата индустриска револуција ја искористи енергијата на водата за олеснување на работата на човекот. Во втората се појави електричната енергија, а третата ги афирмира електрониката и информатичките технологии. Сега е во тек Четвртата индустриска револуција која ги обединува физичката, биолошката и дигиталните сфери.

Адитивното производство (АП) е дел од Четвртата индустриска револуција, покрај Cloud Computing, the Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS), Blockchain, Big Data analytics, and Horizontal and Vertical System Integration [1, 2]. Машинските инженери ја имаат клучната улога во технологијата на АП од каде и произлегува мотивацијата да се биде дел од овој најсовремен развој со свој придонес во истражувањето и едукацијата со цел за подобра иднина на нашата и пошироката средина. Се разбира дека и мојата желба за напредок во кариерата и изучување нови работи уште повеќе ја засили желбата да се вклучам во истражувањето на оваа современа проблематика.

### **1.2. Предмет на истражувањето**

Предметот на истражувањето на оваа докторска дисертација е истражување на процесните параметри и примената на некои адитивни технологии. Истражувањата се насочени кон анализа на процесните параметри со цел на определување на нивното влијание врз квалитетот на површината што се добива со овие технологии. Кинематиката на овие процеси укажува на суштествената разлика во однос на супстрактните технологии и што е логично да се очекува, и суштествена разлика во добиената површина по обработката. Спецификата на овие технологии сè уште не дава нивна широка примена и оттука нашите истражувања се упатени и кон нивна примена во подобрување на радиотерапијата во медицината.



Оптимизацијата на параметрите на 3D-печатените делови е важен дел во успешноста на примената на оваа технологија. Вообичаено, поставените од страна на производителот процесни параметри најчесто не го гарантираат посакуваниот квалитет на површината на печатениот дел и оттука потребна е оптимизација на повеќе параметри за да се добие површина со посакуван квалитет.

Нашите истражувања опфаќаат користење различни видови термопластичен материјал (PLA, ABS и PETG) во форма на жица, но исто така и метал (316L), во форма на жица и прашок. Материјалите во форма на жица ќе се истражуваат со технологијата FDM Fused Deposition Modeling и FFF Fused Filament Fabricate, додека за материјалот во облик на прашок се користи технологијата Direct Metal Laser Sintering DMLS.

### 1.3. Методологија на истражување

За да се реализираат предвидените истражувања ќе се применат квантитативни методи кои даваат оптимални научни резултати. Квантитативните методи користат систематски пристап при истражување на појави и/или податоци. Најчесто даваат одговор на врската помеѓу измерените вредности и законитоста на феноменот кој се истражува.

За да се постигне поставената цел на истражувањата, методологијата на истражувањата ќе се базира врз:

- **Истражување на литературни извори.** Ќе се истражат најсовремените референтни извори од областа на АП, вклучувајќи публикувани трудови во списанија, монографии, докторски и магистерски дисертации, конференциски трудови и стручна литература. Исто така ќе се земат предвид и академските расправи со водечки експерти од областа на истражувањето.
- **Експериментални истражувања.** За верификација на хипотезите во оваа дисертација, важно е да се оптимизираат процесните параметри со цел да се добие соодветен квалитет на печатениот дел. За таа цел ќе се користи методологијата на дизајн на експериментите (DoE), преку примена на методата на Тагучи која дава скратен број на експерименти и во конкретниот случај за четири независни параметри дава 9 комбинации, во кои секој од параметрите има 3 различни нивоа [3-5]. Со истражувањата се опфатени како термопластичните материјали така и металот, а се користи суровина во облик на жица и прашок.

Истражуваните независно променливи параметри за термопластите се: пречник на млазницата, височината на слојот, брзината на печатење и пополнетост. За металот се користат две различни технологии FFF (за материјали во облик на жица) и DMLS, за прашест материјал. За термопластичните материјали како независно променливи се користат погоре споменатите варијабли, но за металната жица се користат брзината на печатење, исполнетоста и височината

на слојот, додека за технологијата DMLS тоа се моќноста на ласерот, брзината на скенирање и растојанието меѓу линиите.

Квалитетот на површината (рапавоста) ќе се истражува преку  $R_a$ ,  $R_z$ , и  $R_q$ , при што со помош на регресионата анализа ќе се воспостави теоретски модел на зависност помеѓу истражуваните големини.

За истражувањата во областа на радиотерапијата идентификација на геометријата на пациентот се реализира со компјутерска томографија (СТ), со последователна обработка на сликата низ софтверски решенија кои генерираат код за 3D-печатење. За верификацијата на ефектот на користење на болусот во радиотерапијата се користи пакетот за симулација базиран на методата Monte Carlo (MC).

#### 1.4. Цели на истражувањето

Целите на оваа докторска дисертација се да се развие методологија за оптимизација на параметрите на одредени технологии од АП, а посебно во делот за постигнување високо ниво на квалитет на добиената површина. Истражувањата ќе ги опфатат како термопластичните материјали така и челикот, а ќе бидат разгледани и три типа на технологии АП. Една од целите е и примената на АП во радиотерапијата, како специфичен случај на потребата од овие технологии.

Рапавоста на површината се квантифицира со отстапувањето во правецот на нормалниот вектор на реалната површина, во споредба со некоја идеална состојба. Кога тие отстапувања се мали зборуваме за мазна површина, додека кога се големи тогаш станува збор за груба површина. Користејќи ја методологијата на DoE се истражуваат три параметри на квалитетот на површината  $R_a$ ,  $R_z$ , и  $R_q$ , во функција од технолошките параметри на процесот.

Во делот за примената на АП целта е да се истражи неговата примена за одреден специфичен случај, радиотерапијата во медицината. Целта е да се разработи процедура за дизајнирање и изработка на болус кој ќе го подобри квалитетот на третманот на пациентите со рак на кожата [6-12].

За да се постигнат поставените цели ќе биде потребно да се реализираат следниве активности:

- Дизајнирање на експериментите за оптимизација на параметрите на 3D-печатење за пластични и железни материјали
- Реализација на експерименталните и теоретски активности поврзани со печатење на деловите, мерења на одредени карактеристики на површините и разработка на соодветна аналитичка зависност врз база на експерименталните податоци добиени од експериментите
- Дизајнирање и изработка на болус за конкретен пациент
- Верификација на дозиметриските карактеристики и оправданоста на примената на 3D печатениот болус.

### 1.5. Хипотези

Врз основа прелиминарните истражувања и увидот во литературните извори можат да се дефинираат следниве хипотези:

**Хипотеза 1:** Со примената на дизајнирање на експериментите може да се определи кој од влезните параметри има најголемо влијание врз квалитетот на површината на печатените 3D-примероци изработени од термопластика и метал и со примената на различни технологии.

**Хипотеза 2:** Дали е возможно да се креира математички модел со кој ќе се докаже функционалната зависност помеѓу квалитетот на површината и независните параметри на печатените 3D-примероци?

**Хипотеза 3:** Со примена на болус од термопластичен материјал изработен со 3D-печатење спрема обликот на пациентот, може да се подобри ефектот на радиотерапијата кај пациентите болни од тумор на кожата.

### 1.6. Очекувани резултати и ефекти од нивната примена

Врз основа на целите на овие истражувања и докажување на хипотезите, добиените резултати и ефектите од нивната примена би можеле да се сумираат на следниов начин:

- Резултатите од примената на DoE-оптимизацијата на квалитетот на обработената површина и добиените релации овозможуваат на релативно брз и едноставен начин определување на параметрите на печатењето.
- Ќе се стекнат дополнителни сознанија за феноменот на квалитетот на печатените 3D-производи за определени термопластични материјали и метали.
- Разработениот алгоритам за дизајнирање и изработка на болус во радиотерапијата ќе отвори пат за негова примена во медицината и подобрување на ефектите од радиотерапијата.
- Резултатите од истражувањата на ефектот врз радиотерапијата на болусот ќе отворат патишта за понатамошни клинички истражувања на неговата примена во медицината, врз основа на примена на различни материјали и технолошки параметри.

## 2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРАТА РЕЛЕВАНТНА ЗА ИСТРАЖУВАЊАТА

Аддитивното производство (АП) ја зголемува својата важност во последното десетлетие. Тоа го револуционираше прототипското производство и ја најде својата примена скоро во сите области. АП уште се среќава и како тридимензионално печатење (3D). Тоа претставува суштинска движечка сила кај Индустријата 4.0 [13,14]. Овој вид на производство го користи 3D-моделот на објектот за да се креира дел со додавање сукцесивни слоеви на материјали [15], отворајќи можност за креирање делови со комплексна геометрија и разновидни материјали наменети за најразлични примени [16,18]. Ова суштествено се разликува од супстрактното производство кај кое производот се оформува со одвојување на материјал за да се добие посакуваната геометрија [19].

Технологијата на АП има клучна улога во многу области од индустријата и животот и нејзината важност секојдневно се зголемува. Главната примена на технологијата на АП вообичаено е ориентирана кон индустријата, посебно кон аеронаутиката, вселенската индустрија, градежништвото, автомобилската индустрија, медицината, образованието и друго. Заради нејзината популарност оваа технологија е во центарот на интензивни истражувања во многу истражувачки центри и индустрии.

3D-печатењето е процес на производство на тридимензионални објекти од дигитални датотеки. Дигиталната датотека се креира со компјутерски потпомогнатото дизајнирање (CAD) на објектот, а се пренесува понатаму како STL-датотека. Врз основа на специфичностите на објектот се креираат влезните параметри на софтверот со кој се добива G-кодот преку кој се реализира работата на печатачот.

Оваа технологија има широка примена во многу области и заради нејзината ниска цена, разновидност на производството, намалување на вкупното време на производство и едноставноста за користење. Во денешно време на располагање се многу различни материјали кои можат да се користат во АП, како што се металите [16], керамиката, пластиката, композитите, полимерните материјали, карбонските влакна и др. [20]. Најчесто користени метални материјали се нерѓосувачкиот челик, титаниумот, магнезиумот, алуминиумот, легури Cr-Co и други [21-28]. Во последно време оваа технологија го привлече вниманието на повеќе сектори меѓу кои и на биомедицината [29]. Во медицината се користи за моделирање во хирургијата [30], за креирање импланти како замена на коски [31], за болуси [10–12, 32], за креирање ткиво со живи ќелии [33, 34], за дентални импланти [35–37], специјални протези [38, 39] и други важни примени во медицината [11-12, 40]. Како резултат на сето тоа се јавува и поимот

‘3D bio printing’ кој означува дека материјалот кој се печати ‘bioink’ [41, 42], се состои од живи ќелии, биоматеријали или активни биомолекули.

Аналогно на адитивното производство 3D-биопечатењето се реализира со нанесување слоеви биоматеријал за да се креира 3D-објектот, како што се ткивата или органите [43, 44]. Оваа технологија е користена во истражувањата кои имаат за цел да ги заменат болните органи, како бубрезите или срцето. Се очекува да се произведат органи кои ќе ги исполнуваат истите биолошки функции како и природните органи, со што се отвора нова иднина за пациентите [45, 46].

Развојниот тренд на АП е насочен кон суштествена трансформација на светот, онаков каков го познаваме. Многу потрошувачки добра ќе се персонализираат и ќе се произведуваат по нарачка, со радикални промени во дизајнот и функционалноста на производот.

Сепак, вака произведените објекти ќе мора да ги исполнат стандардите за квалитет за одредени параметри, како што е јакоста, токсичноста, трајноста, квалитетот на површината и др. Овие параметри и барања се дефинирани во разните национални и интернационални стандарди. На пример, стандардот ISO 4287 ги дава терминологијата, дефинициите и параметрите за мерење на профилот на обработената површина [47], ISO 25178-2 ги дефинира најчесто прифатените параметри [48], додека ASME B46.1-2009 и JIS B0601:2013 [49, 50] дефинираат аналоген сет од параметри на текстурата на површината. Од многуте параметри на текстурата на површината, најчесто застапен во литературата е параметарот на профилот Ra, аритметичко средно отстапување на истражуваниот профил [51– 57].

Rq е корен од средната вредност на вредностите на ординатите по должината на мерењето, оттука ова е вториот најчесто користен параметар на текстурата [58–60]. Друг параметар на профилот на нерамнините е Rz (максимална височина на профилот) [58], [59], како и Rt (вкупна височина на профилот) [61].

Многу од технологиите на АП се развиени околу многу специфични материјали и тоа наметнува силна врска помеѓу примената, материјалите и технологиите на АП, што исто така треба да се има предвид при планирањето на мерењата на квалитетот на површината, нивната реализација, анализа на податоците и нивното користење [62]. Нерамнините на површината се важна тематика кај технологиите на АП, а за да се зголеми квалитетот на површината треба многу внимателно да се изберат параметрите на процесот, како и начинот на мерење. Кај деловите печатени со термопластични материјали со технологијата FDM, се добива многу груба површина, посебно кога се споредува со некои други процеси [63]. Кај металните делови печатени со технологиите FDM, DED и PBF постои тенденција за добивање погруби површини во

споредба со други процеси. Технологијата на АП на металите има комплексни предизвици поврзани со квалитетот на површината, но значителните потенцијали на новите технологии отвораат пат кон решавање на овие предизвици [62].

Истражувачите користат различни техники за оптимизација на процесните параметри на одредени процеси. Меѓу најзастапените техники и алатки се: Taguchi, S/N, ANOVA, Full Factorial Design, Genetic Algorithm Approach, и DoE (Design of Experiment) [64].

Постојат различни методологии и уреди за квантификација на квалитетот на рапавоста на површината. Површината има значителни предизвици при мерењата заради честите дисконтинуитети, вертикални брани, различни влезови и сл. Природата на овие топографии е подеднаков предизвик за контактните и бесконтактните методи на мерења. Перата можат да се заплеткаат при скалести промени и да изгубат времено контакт со површината. Бесконтактните мерења се соочуваат со проблеми поврзани со косината на светлината, многукратна рефлексција, низок контраст на сликата и сл. [65].

Термопластичните материјали имаат висок отпор на удар, стабилност на температура и хемиска отпорност [66], со релативно висока јакост и модул [67]. Тие се биоразградливи и се користат во современите производи во текстилната индустрија и пакувањето, во биоинжинерството, кај соодветни медицински примени, како што се регенеративната медицина во ортопедијата, стоматологијата, кардиологијата и др. [68]. Кај биомедицинските примени деградацијата на материјалот е често одредена предност заради отсуството на ризик од токсични материјали [69].

Како добар пример на стратегија во регенеративната медицина е да се засили растот на тврдите елементи при трансплантација на коските [70]. При оформување нова коска [71], влошката од PLA може да помогне во тој процес со помош на стакло од калциум фосфат, кое има хемиска композиција способна да го менува степенот на деградација и да го прилагодува кон коската. Кај системи на одредени лекови вообичаено користат биоразградливи полимери наполнети со терапевтски материјал [72].

Нерѓосувачкиот челик 316L е аустенитен Cr-Ni челик со силна јачина и отпорен на корозија и одредени киселини, како сулфурната, хидрохлорната и други. Нивната типична примена е кај изменувачите на топлина, издувните системи кај возилата, резервоарите и многу делови во авионската и индустријата на градење на бродови [73].

### 3. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ

#### 3.1. Адитивно производство (АП)

Од своето појавување во 1980-те АП се карактеризира со извонредно брз развој со значително влијание врз производните технологии, отворајќи нови хоризонти за негова инженерска примена во различни индустриски сектори. Адитивното производство е технологија која го оформува производот нанесувајќи тенки единични слоеви еден врз друг и како таква уште е позната и како 3D-печатење.

Ако ја споредиме со традиционалните производствени технологии, таа има значителни предности, како што се слобода во конструирањето, ниската цена, високата продуктивност [74]. Класичните методи на обработка, како што се супстрактното производство и пластичната обработка се ограничени во креирање на облиците.

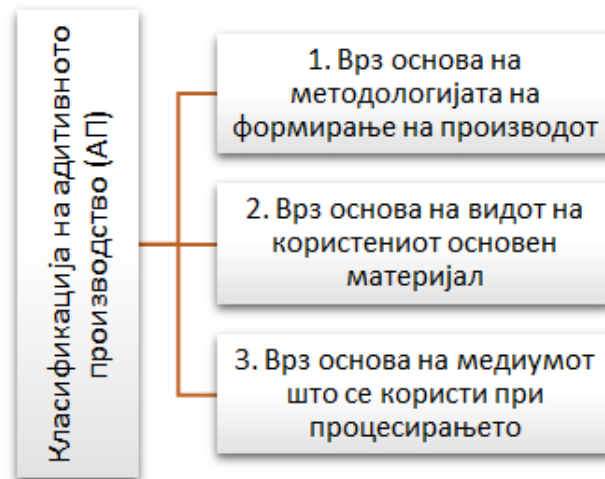
Супстрактните технологии (технологиите на обработка со режење) генерираат и отпаден материјал, што не е случај со адитивните технологии [75, 76]. Со помош на АП може да се креираат делови од најразлични материјали, како што се челик, легури на алуминиум, легури на титаниум, метални композити и керамички композити [77].

Заедничко за технологиите АП е користењето на Computer-Aided Design (CAD), опрема за печатење и материјал за печатење, кој може да биде полимерен, метален, керамика или органски материјал.

Откога цртежот CAD е креиран, контролерот ги чита податоците од датотеката CAD и креира тенки слоеви на материјал кои се редат еден врз друг со што се гради 3D-предметот директно од 3D CAD-моделот, без да се користат разни калапи и алати [78, 79].

Сите АП-техники го користат истиот процес од 5 чекори:

1. креирање цврст модел со софтверот CAD
2. претворање на CAD-моделот во STL-формат
3. сечење на STL-моделот за специфични влезни параметри и креирање датотека G-код
4. печатење на делот слој по слој
5. пост процесирање, доколку е потребно, со чистење и завршна обработка на делот [80].



Слика 3.1. Генерална класификација на процесите кај АП [74].

Историски гледано технологијата АП е воведена во 1980-те и на почетокот била ограничена на прототипови или мали серии. Од 2009 развојот на АП е многу брз и разновиден, во смисла на различните индустриски примени и користените материјали. Сепак, уште и денеска е во развојна фаза и се бори за освојување нови примени и материјали со производства во големи серии и со висок квалитет на производот [74].



Слика 3.2. Класификација на АП врз основа на методологијата на оформување на производот [74]

Најразлични технологии со различни предности, недостатоци и потенцијал се вклучени под чадорот на АП [81]. Согласно American Society for Testing and Materials [82], постојат повеќе од 50 различни технологии АП, врз основа на погоре дефинираните процеси [83].



Сепак, ISO/ASTM 52900:2015 стандардите ги групираат технологиите АП во седум категории (слика 3.2):

1. вбризување врзивно средство, Binder Jetting (BJ),
2. насочено нанесување енергија, Directed Energy Deposition (DED),
3. истиснување материјал, Material Extrusion (ME),
4. вбризување материјал, Material Jetting (MJ),
5. фузија на слој на прашок, Powder Bed Fusion (PBF),
6. ламинирање со листови, Sheet Lamination (SL) и
7. фотополимеризација во када, Vat Photopolymerization (VP) [84].

АП може да биде класифицирано и врз основа на физичката состојба на основниот материјал (цврст, течен, прашест, слика 3.3), медиумот кој се користи за процесирање на основниот материјал (ласерски зрак, ултравиолетова светлина, термички процес, слика 3.4) [85–91].

АП-процесите се оценуваат со користење на многу параметри, како што се: брзината, јакоста на делот, резолуцијата, волуменот, трошокот, димензионалната точност, квалитетот на површината и др. Тие постојано се развиваат со цел да се произведат што поголеми и покомплексни производи на пофлексибилен и поекономичен начин.



Слика 3.3. Класификација на АП-процесот врз основа на типот на основниот материјал [74].



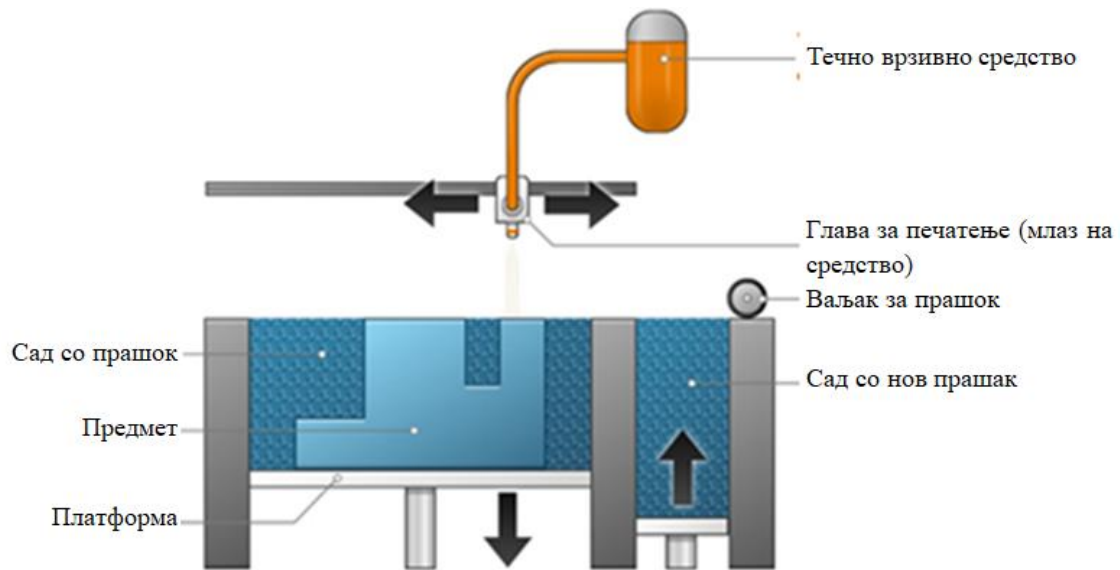
Слика 3.4. Класификација на АП врз основа на медиумот кој е користен за процесирање [74].

### Класификација на процесите на Адитивното производство (АП)

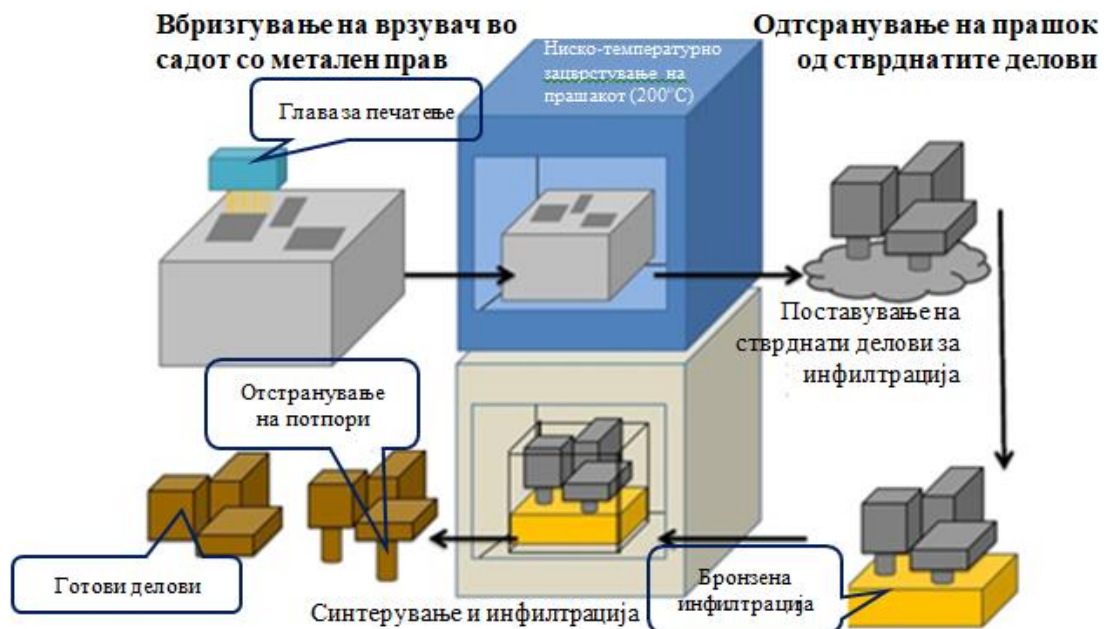
#### *Вбризгување врзивно средство (ВЈ)*

ВЈ е АП-метод кај кој честичките на слој на прашок, нанесени на платформа, се соединуваат со вбризгување течно врзивно средство и притоа се користи геометријата на слојот добиена од софтверот CAD. Откога ќе се изработи еден слој, платформата се симнува надолу со цел да се оформи следниот слој. Кога ќе се испечати делот тој се наоѓа во таканаречена зелена, или незавршена, состојба по која има потреба од дополнително постпроцесирање пред да се употреби делот. Често се додава и дополнителна супстанција со цел да се подобрат механичките особини на делот. Ваква супстанција за металите е бронзата. Друг начин на доработка е да се загрее делот во печка за да се обезбеди негово синтерување. Ако се споредува со PBF, оваа метода има предност бидејќи не користи топлина за време на процесот, со што се избегнуваат заостанатите напони во делот [92].

Главни предности на оваа техника се: реализација на сложена геометрија, нема потреба од структура за поддршка, висока брзина на печатење. Може да користи широк спектар на материјали, меѓу кои и полимери, метали, песок и керамика кои можат да бидат во различни бои. Покрај тоа, методата е способна да печати големи, комплексни компоненти со ниска цена на чинење, во споредба со многу други 3D-процеси на печатење, како и да произведува високо вредни производи со робусна структура [93–95].



Слика 3.5. Шематски приказ на ВЈ-процесот [92]



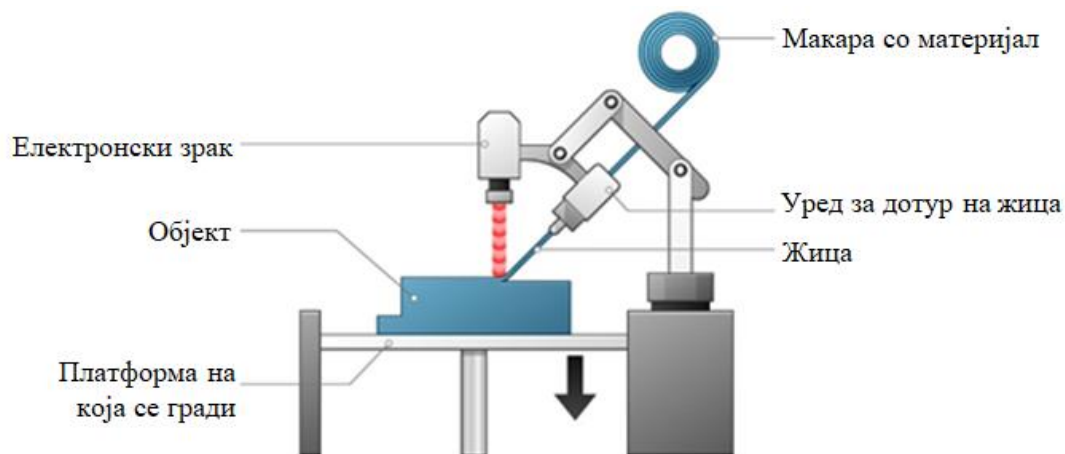
Слика 3.6. Илустрација на методата на вбризување врзивно средство (ВЈ), проследено со отстранување прашина и инфилтрација на додавање бронза [96].

### Насочено нанесување енергија (DED)

DED е релативно сложен процес на 3D-печатење и има сличност со технологијата PBF. Таа користи фокусиран извор на енергија, како што е ласерот или електронскиот сноп за да го стопи материјалот и да го оформи слојот. Материјалот се топи во исто време со неговото нанесување преку млазницата. Материјалите кои се користат вклучуваат прашоци на бакар, нерѓосувачки челици, титаниум, кобалт и др. [97–99].

Оваа технологија често се нарекува и со други имиња, како што е ласерско инженерство за краен облик (laser-engineered net shaping (LENS)), директно нанесување метал (direct metal deposition (DMD)), и адитивно производство со електронски сноп

(electron beam additive manufacturing (ЕВАМ)), во зависност од специфичната примена или метода [100]. Материјалот кој поминува низ млазницата е во облик на прашок или жица, а методата се користи повеќе за метали отколку за полимери. За металите кај кои е вклучен титаниумот и неговите легури, танталот, тунгстамот, ниобиумот, нерѓосувачкиот челик и алуминиумот, коишто можат да се заваруваат, можат да се печатат со методата DED. Доколку се користи жица таа е со пречник 1 – 3 mm, а честичките на прашокот се слични на оние како кај металургијата на прашоци и се со пречник 50 – 150 микрони. Оваа метода може исто да се користи и со полимерни материјали и керамика. Вообичаено DED е значително побрза и поевтина од PBF. Предностите на DED се во користениот материјал како и во времето на ладење и печатење кои се значително помали во однос на PBF. Оваа метода сè повеќе се применува како замена на класичните методи за поправка на деловите, посебно кај комплексните и прецизни делови како кај поправка на оштетени турбински лопатки или пропелери. [101].

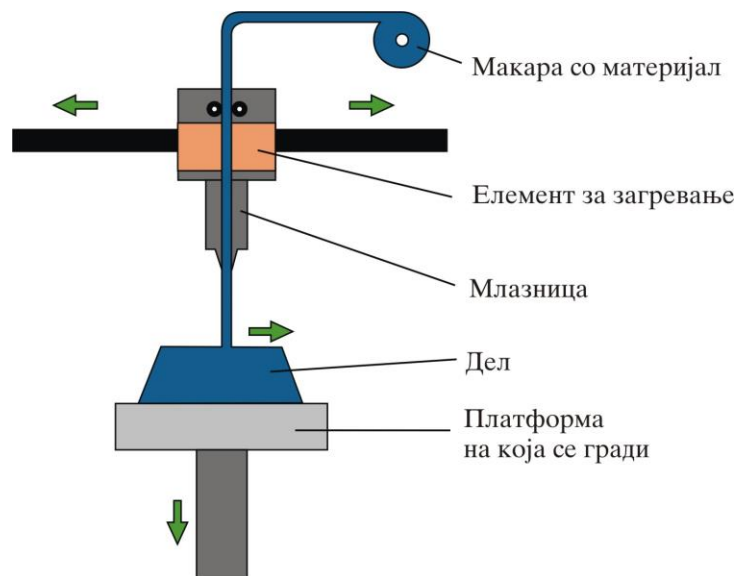


Слика 3.7. Шематски приказ на DED-процесот [19].

### **Истиснување материјал (МЕ)**

МЕ е АП-процес во кој материјал намотан на калем (вообичаено термопластичен полимер) се истиснува низ загреана млазница, со постојан притисок и во континуитет оформувајќи го делот слој по слој (Слика 3.8) Оваа метода уште е позната и како Fused Filament Fabrication (FFF) или изработка на споени конци. Оваа метода е најпопуларна метода во рамките на АП.

Широк спектар на материјал може да се истиснува со помошна FFF. Најчесто користени термопластични материјали се acrylonitrile styrene acrylate (ASA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polycarbonate, polyetherimide, polylactic acid (PLA) high-impact polystyrene (HIPS), thermoplastic polyurethane (TPU), aliphatic polyamides (PA, Nylon), како и пластика со високи перформанси како што е: polyether ether ketone (PEEK), и polyetherimide (PEI) [74, 97, 102].



Слика 3.8. Шематски приказ на АП-процес со истиснување на материјал (ME), Fused Filament Fabricate FFF [74].

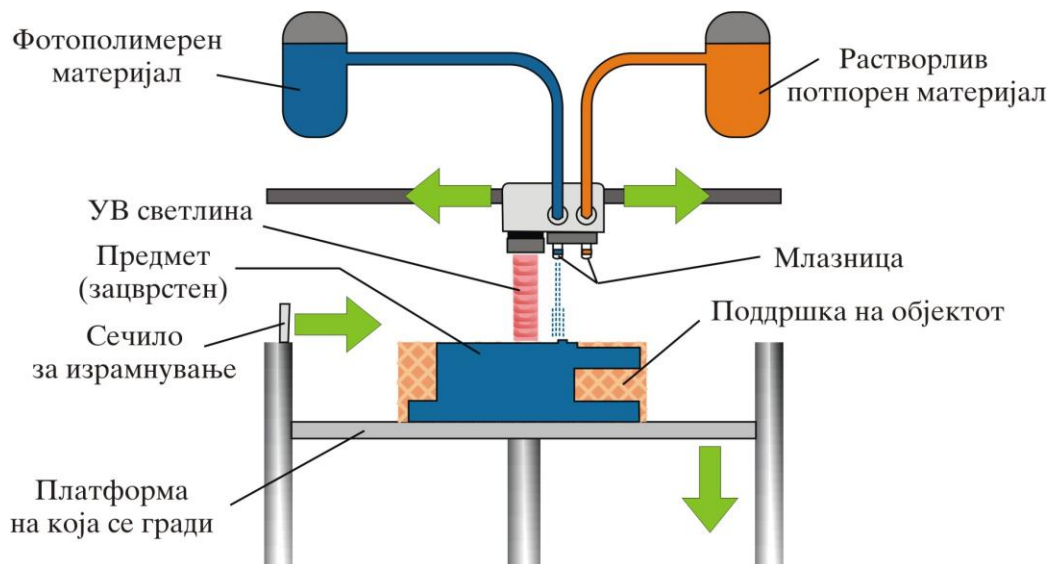
Главните предности на (FDM) се: креирање концептуален модел/функционален прототип со намален трошок и за кусо време, изработка на готови производи без трошоци и потребно време за изработка на алати и обработка, флексибилност на материјалот во однос на манипулирање и обработка, побрз пристап кон пазарот, отсуствува губиток на прашест материјал, нема потреба од отстранување остатоци.

Покрај тоа материјалите како што е керамиката, бетонот или чоколадото исто така можат да се истиснуваат со користење на оваа 3D-техника. Во поново време напредокот на истиснување на материјали од групата на мастила, познато уште и како liquid deposition modeling (LDM) или моделирање со истиснување течност, отвора нови простори на оваа техника [103].

### **Вбризгување материјал (MJ)**

MJ е еден од најбрзите и најточни АП-процеси кај кои течни капки од одредени материјали за градба и поддршка се вбризгуваат врз платформата за градба. Овие капки делумно го омекнуваат претходно положениот слој на материјал, после што тој се загрева со UV-светлина, се зацврстува и се симнува од платформата. Овој процес е аналоген на дводимензионалните печатачи со млаз на мастило.

Материјалите кои се користат во овој процес се генерално термостабилни фотополимери (на пример, acrylics), достапни во течна состојба. Сепак MJ има одредени ограничувања, како што се лоши механички својства, осетливост на светлина, деградирање на механичките својства со текот на време и висока цена на материјалот, што ги чини неприфатливи за одредени намени [92].



Слика 3.9. Шема на MJ-процесот [92].

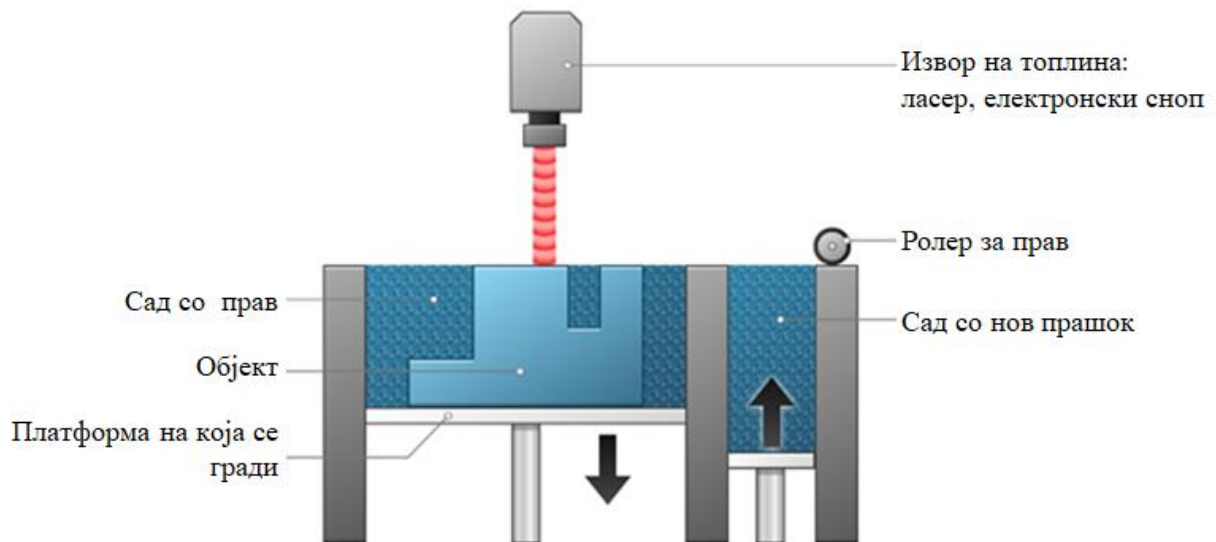
### Фузија на слој на прашок (PBF)

PBF е процес на АП (Слика 3.10) кај кој термичкиот извор, како што е ласерскиот сноп, се користи за фузија на прашестите честички со цел да се реализира предметот развиен во CAD. Со користење нож за израмнување се обезбедува униформност на слојот.

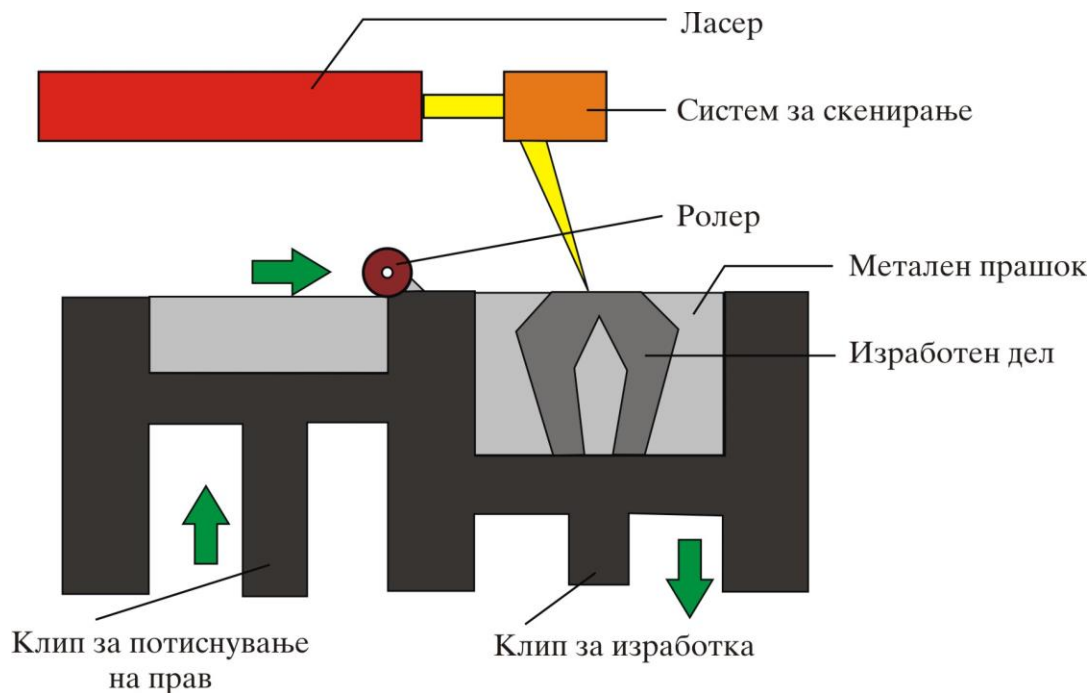
Најдоминантни категории на овој процес се: selective laser melting (SLM), selective laser sintering (SLS), и electron beam melting (EBM). Секоја од овие варијанти има свои предности и мани и затоа е добро да се оценуваат врз основа на нивната примена.

Direct Metal Laser Sintering DMLS припаѓа кон фамилијата на АП-техники познати како Selective Laser Sintering, SLS. Овој процес е прикажан на Слика 3.11.

Кај SLS-процесот полимерните материјали, како што се nylon или polyether ketone (PEKK), се подложуваат на синтерување со што се добива геометријата на слојот, а потоа и целиот 3D-предмет. Оваа метода со микронска резолуција е позната уште и како micro-selective laser sintering ( $\mu$ -SLS) и овозможува добивање облици со резолуција помала од  $5 \mu\text{m}$  [108].



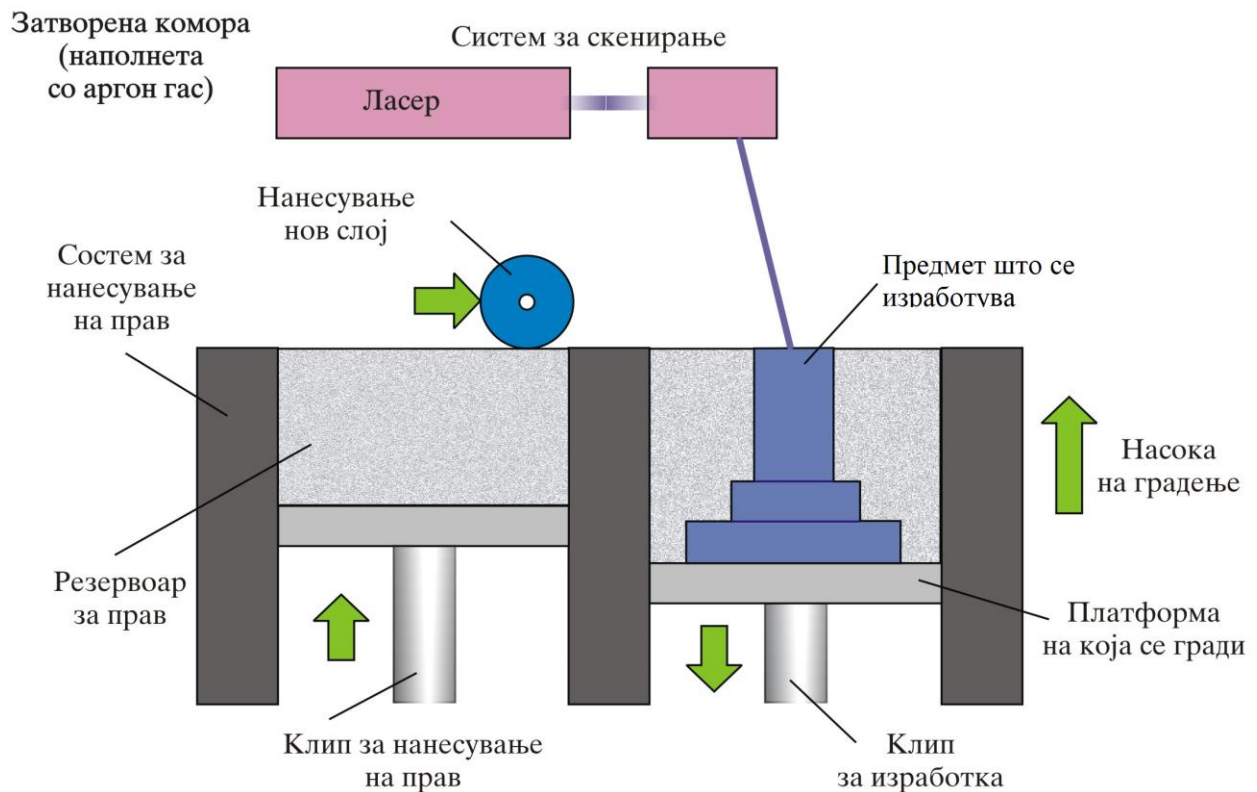
Слика 3.10. Шема на PBF [92].



Слика 3.11. Шема на SLS/DMLS-процес на АП [74].

Кај SLM ласерот се користи за обезбедување топлина за целосно топење на прашокот, а не за негово синтерување, како што е случајот кај SLS. Процесот главно се користи за прашести метали, како што се алуминиумските легури, титаниум и неговите легури и нерѓосувачките челици. Во овој процес се користи инертна атмосфера во комората на процесот (типично аргон) со цел да се заштити од оксидација и/или нитрација на консолидираниот материјал. Кај EBM-процесот во комората се обезбедува вакуум наместо инертна атмосфера.

Другите две помалку распространети PBF-техники се fused with agent and energy и thermal powder bed fusion [109–112].



Слика 3.12. Шема на SLM-процес[113].

Процесот PBF има повеќе предности, меѓу кои: намалена загуба на материјал, намалено време за развој на производот, брзи прототипови и подобро малосериско производство, градба на функционални делови, целосна изработка по потреба и напуштање на концептот на непроменлива конструкција, добра резолуција, ефикасно рециклирање на неискористениот прашок, конструирање со спојување на повеќе материјали, како што се керамика, стакло, пластика, метали, легури, немање потреба од помагала, зголемување на продуктивноста со пополнување на работното подрачје со повеќе делови [106].

Некои од главните недостатоци се: релативно бавно и долго време на печатење, често се бара постпроцесирање за отстранување на потпирањето или подобрување на механичките особини, намалување на преостанатите напони и подобрување на квалитетот на површината, слаби структурни својства/текстура на површина бидејќи делот се добива со спојување на метален прашок, квалитетот на површината е зависен од големината на честиците на прашокот, појава на термички деформации, зголемен трошок заради релативно голема потрошувачка на енергија [114].

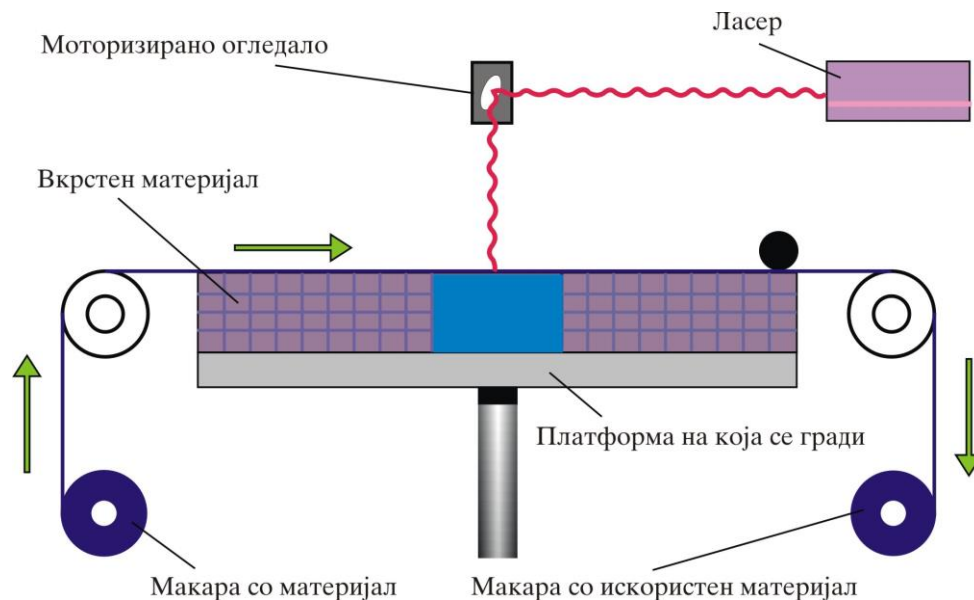


### Ламинирање на листови (SL)

Кај SL 3D-предметот се добива со ламинирање и спојување на листови од материјал. Методот на спојување може да е со лепење, ултрасонично заварување или лемење, а завршниот облик се добива или со сечење со ласер или со CNC-обработка. Завршниот производ може да се добие или со оформување на слоевите, а потоа со нивно спојување или со спојување и последователно оформување во 3D-облик.

Процесот може да се категоризира врз основа на техниката на ламинирање која се користи за спојување на ламинатите помеѓу себе, и тоа на laminated object manufacturing (LOM), ultrasonic additive manufacturing (UAM), или plastic sheet lamination (PSL). UAM користи листови или траки од метал, кои заедно се спојуваат со примена на ултрасоничното заварување. LOM е сличен пристап кој како материјал користи хартија и лепак за нејзино спојување [115].

На слика 3.13 е прикажана шемата на процесот на ламинирање со листови.

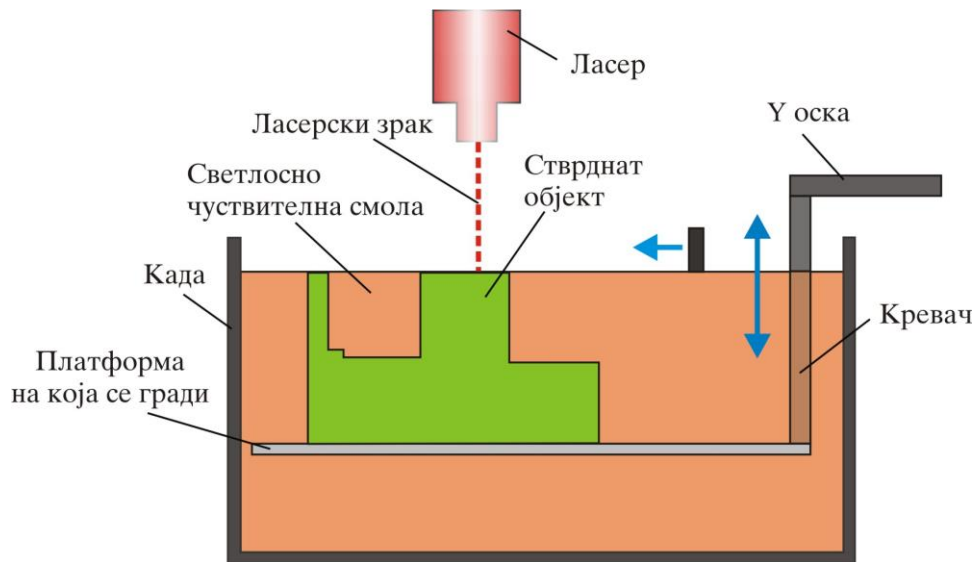


Слика 3.13. Процес на ламинирање со листови [116].

### Фотополимеризација во када

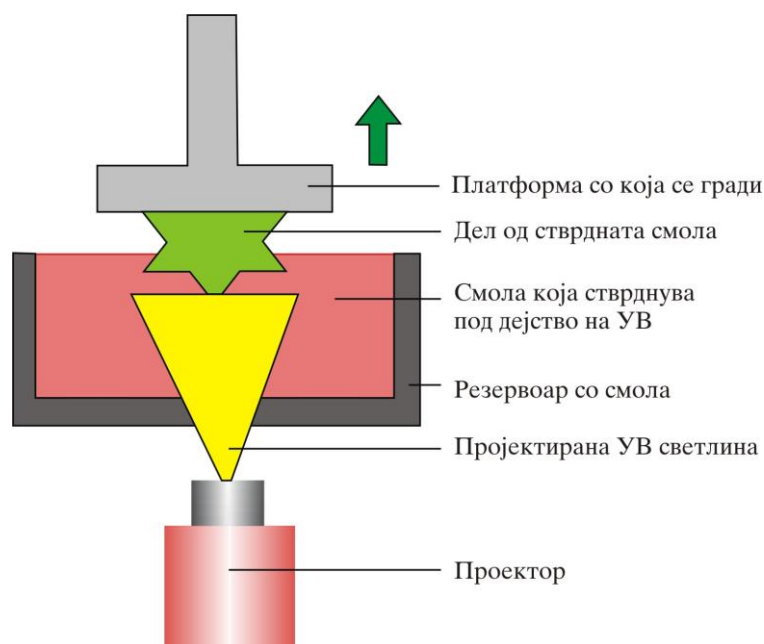
Кај оваа метода се користи када со смола која се вцрствува под дејство на светлина. Предметот се оформува со користење соодветен ласер со кој слој по слој селективно се зацврстуваат поединечни делови од смолата.

Оваа е доста раширена метода за брзи прототипови и производства, при што се добива висока резолуција и одличен квалитет на површината, но сето тоа може да биде доста скапо, а производот со текот на времето да биде кршлив.



Слика 3.14. Шема на фотополимеризација кај стереолитографија (SLA) [117].

Може да се користи за креирање концепциски модели, брзи прототипови и делови со комплексна геометрија. SLA е првиот развиен процес на АП. Кај овој процес делот се добива со изложување на фоточувствителната смола на зрак од ултравиолетов ласер (Слика 3.14).



Слика 3.15. Директно процесирање со светлина (DLP) [1].

Кога фоточувствителната смола ќе дојде во контакт со ултравиолетовата светлина, се вцрствува и така се оформува слојот. Следува поместување надолу на платформата и оформување ново ниво. Со оваа метода можат да се користат различни материјали [118].

Direct light processing (DLP) е сличен процес на стереолитографијата, со тоа што тука се користи DLP-проектор наместо ултравиолетова светлина (Слика 3.15) [119].

## **Материјали кои се користат за 3D-печатење кај АП**

Како и кај другите производствени процеси, 3D-печатењето бара високо квалитетни материјали, кои се добиени согласно одредена спецификација, за да се добие високо квалитетен производ.

АП е способно да произведе целосно функционални делови од различни материјали, како што се керамика, метал, полимери, како и нивна комбинација во форма на хибриди, композити или специфично дефинирани материјали [19].

### ***Адитивно производство со метали***

Заради нивните посакувани механички карактеристики, металите се можеби најчесто користени материјали во инженерството. Како резултат на тоа индустријата на АП бара нови начини за креирање метални делови кои би ги замениле конвенционално произведените делови. Новите развојни напори кај технологиите на АП се упатени токму кон истражувања на полето на Metal Additive Manufacturing (MAM).

Од неодамна многу метални компоненти можат да се изработат со технологијата на АП користејќи нерѓосувачки челик, титаниум, легури на алуминиум, легури базирани на кобалт, легури базирани на никел и др. [120].

Микроструктурата на деловите произведени со АП-процес има големо влијание на механичките карактеристики на делот, како што се напонското и однесувањето на замор. Ова предизвикува зголемен интерес кај оние кои се занимаваат со технологијата АП кон микроструктурата, формирање на фазите и термичката обработка [121, 122]. Може да се констатира дека произведените делови сè уште ги немаат исполнето очекувањата кои пред нив ги има поставено индустријата. Многу важни прашања кои треба да бидат решени се подобрување на квалитетот на површината, продуктивноста на производството, подобрување на напонското однесување и тврдината, како и заморот и хомогеноста на микроструктурата [123].

### ***Паметни материјали кај АП***

Воведувањето на паметните материјали во индустријата на АП дава одредени предности, како што се реконфигурирање на печатената структура и добивање соодветни својства на материјалот со текот на времето. Општо земено легурите со меморија на обликот (shape memory alloys (SMA) и shape memory polymers (SMP)) се веќе применети кај АП како 4D-материјали за да се произведат делови на еластични роботски системи, самоподобрувачки структури и контролирани секвенционално одвиткувани системи [124]. Електричните материјали пиезо претставуваат уште една дополнителна можност за 3D-печатењето. Заедно со генерирање енергија и актуацијата, 3D-нанопроизводството на овие материјали претставува објект на истражување [125]. Со користењето на технологиите на АП може лесно да бидат

произведени сложените облици на полимерите за меморија на облиците. Евалуацијата на квалитетот на овие материјали е поврзана со димензионалната точност, квалитетот на површината и густината на делот [126].

### ***Специјални материјали кај адитивното производство***

Подолу се дадени неколку примери на користење специјални материјали во 3D-печатењето.

Технологија на печатење 3D може да произведе кој било облик со користење прехранбени материјали, како што се чоколадо, месо, бонбони, пица, спагети, сос и др. [127]. Овој процес овозможува креација на здрава храна бидејќи овозможува да се подесуваат составните делови без да се намали нутритивната вредност и вкусот [128].

Оваа технологија може директно да произведе повеќеслојни делови од месечевата прашина, што може да има директна примена за населувањето на Месечината [129].

Со примената на оваа технологија модната индустрија и индустријата на накит ќе имаат посебни предности, како што се покусо време за производство, намален трошок и сл. [130].

Во тек се расправи околу можното користење на овие технологии во градежната индустрија насочени кон истражувањата на бетонот и другите материјали како можни материјали за АП [131].

### ***АП во хидрауликата и електрониката***

MacCurdy et al. [132] ги истражувале иновативните можности кај производи со повеќе материјали. Истражувањата се однесувале на печатени елементи во хидрауликата при што цврстиот и течниот материјал се печатени симултано во текот на процесот. Методата Fused deposition modeling (FDM) со повеќе млазници е користена за производство на структури кои содржат крути, флексибилни и материјали за поддршка, како и да се наполнат истовремено и со флуид. Како резултат на тоа добиен е механизам погонуван со хидраулика со улога на флексибилен роботски фаќач кој е произведен во еден чекор и без дополнителна монтажа. Вклучувањето на спроводливите супстанции во процесот на АП овозможува електронските кола да бидат вградени во објектот што се печати.

### ***АП со полимери***

Со користењето FDM може да се добие 3D-дел со нанесување постапни слоеви на вбрижан термопластичен материјал, како што се polylactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polypropylene (PP) или polyethylene (PE) [133]. Во последно време во употреба се и жици од термопластични материјали со повисока температура на топење како што се PEEK и PMMA [134].

### ***АП на керамички материјали***

Технологијата АП може да произведе керамички производи и производи од бетон без да имаат пукнатини или големи шуплини, со оптимизација на параметрите на процесот. Керамиката е јака, трајна и отпорна на оган. Заради нејзината течна состојба пред да се процесира, таа може да се користи за каков било облик и е соодветна за иднината на градежништвото, но и за стоматологијата и вселенските истражувања [135, 136].

### ***АП на композити***

Композитните материјали со својата разновидност, малата тежина и наменските својства ја револуционализираа индустријата. Како пример на композитни материјали се полимерните композити зацврстени со јагленородни влакна [137], како и оние зацврстени со стаклени влакна [138]. Оние со карбонски влакна широко се користат во авионската индустрија заради нивната висока специфична крутост, јакост, добрата отпорност кон корозијата и добрите карактеристики на замор [137]. Композитите со стаклени влакна широко се користат во разни примени и заради релативно ниската цена во однос на добиените карактеристики [138, 139].

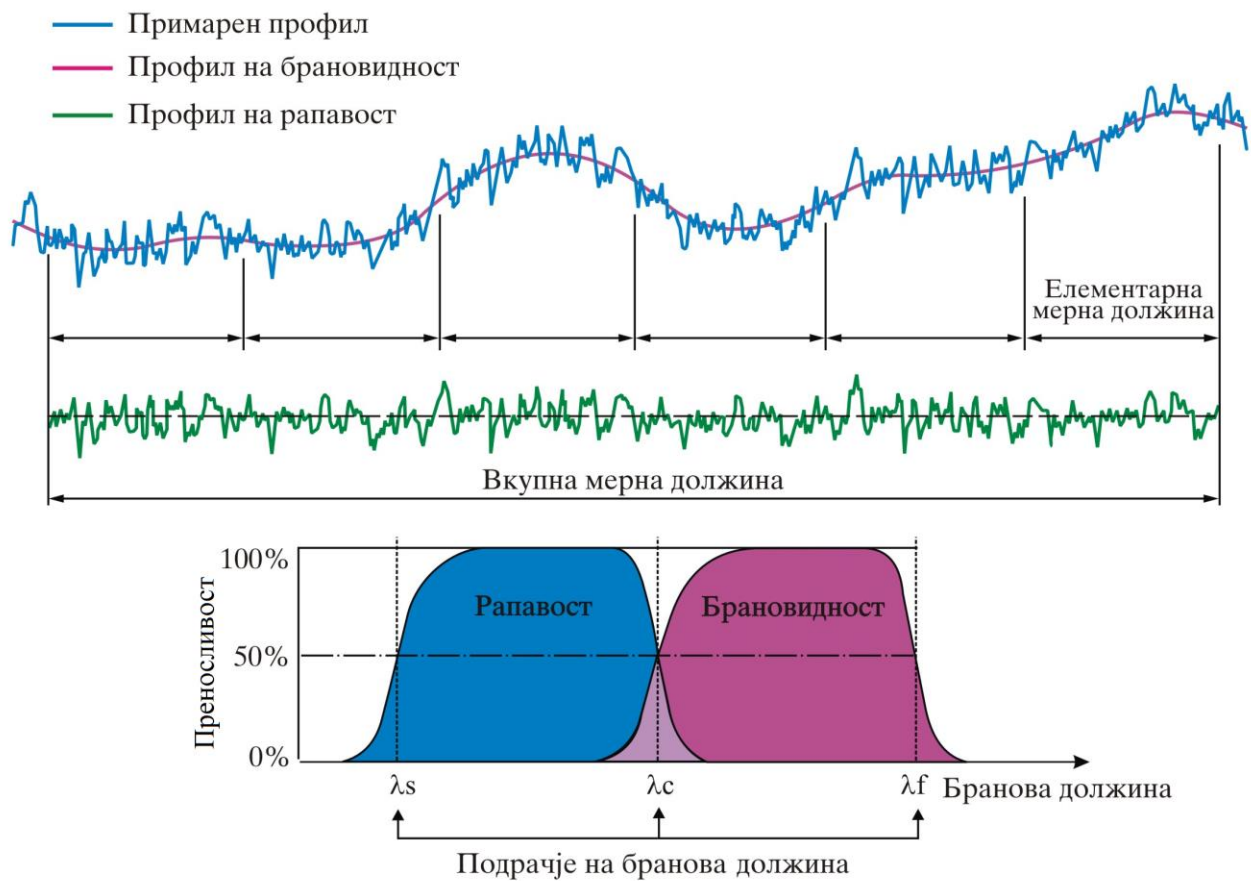
## **3.2. Квалитет на површината**

Квалитетот на површината е компонента на текстурата на површината и се квантифицира со отстапувањата од геометријата на површината. Површината се смета за мазна доколку отстапувањата се мали, а доколку се големи таа се смета за груба. Деловите кои се со груба површина имаат голем коефициент на триење и се трошат побргу од оние кои имаат подобар квалитет на површината. За многу примени во инженерството квалитетот на површината е од голема важност и тој треба да биде што е можно поголем заради перформансите и трајноста на деловите. Текстурата на површината вклучува рапавост и брановидност (слика 3.16) [50, 140–142].

Мерењето и оценката на рапавоста на површината се карактеризира со веќе широко прифатени параметри кои укажуваат на постоење различни критериуми на оценка на рапавоста.

Во ISO 4287 [141] стандардот, профилот на површината е компониран од примарен профил, профил на рапавоста и профил на брановидноста (слика 3.16) [143].

Примарниот профил е вкупниот профил по примената на филтерот за куса бранова должина  $\lambda_s$  [144]. Профилот на рапавост е профилот кој се добива од примарниот со отстранување на долгата бранова должина со користење на високо појасен филтер со широчина  $\lambda_c$ . Профилот на рапавоста на површината намерно се модифицира и претставува основа за оценка на параметрите за квалитетот на површината. Одвојувањето на профилот на рапавоста ни помага да добиеме прецизна информација за рапавоста.



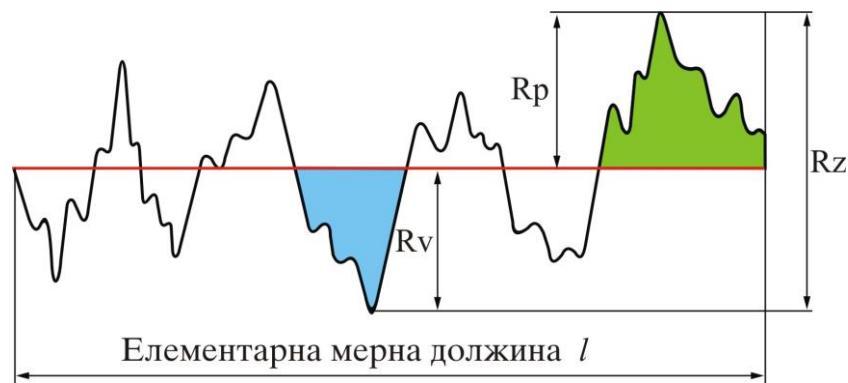
Слика 3.16. Приказ на профилот на површината [142].

Постојат повеќе параметри поврзани со рапавоста на површината. Тоа се: параметри на амплитудата (врвови и долини) ( $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ), параметри на средната вредност на амплитудата ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ), параметри на растојанието ( $RS_m$ ), хибридни параметри ( $R_{dq}$ ), параметри кои се однесуваат на разни соодноси ( $R_{mr}$ ,  $R_{dc}$ ,  $R_{mr}$ ), параметри на површината кои имаат раслоени функционални својства ( $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ ) [142, 145, 146]. Сите овие параметри се во согласност со интернационалните стандарди ISO4287-1997 и ISO13565-1996.

За експерименталните истражувања во оваа дисертација земени се најчесто применуваните параметри на рапавост  $R_z$ ,  $R_a$  и  $R_q$  за кои нивната графичка и математичка претстава се дадени на сликите 3.17, 3.20 и 3.21.

**Максималната височина  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ )** претставува сума од максималните височини  $R_p$  и максималните долини  $R_v$  на профилот на референтната должина. Математички е прикажана на следниов начин:

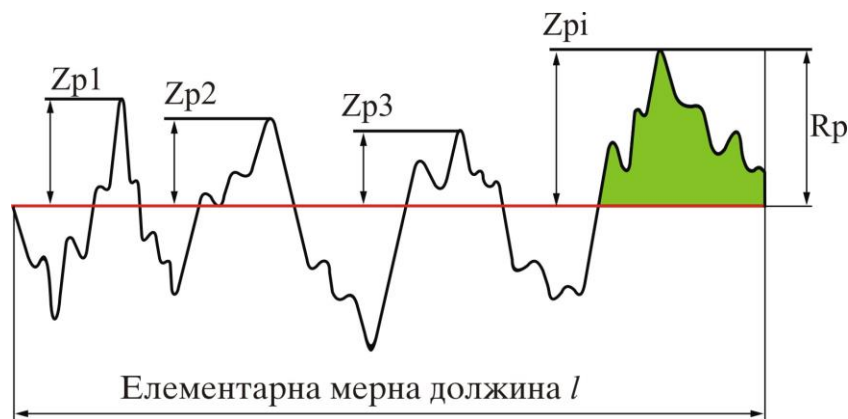
$$R_z = R_p + R_v \tag{3.1}$$



Слика 3.17. Графички приказ на  $R_z$ .

Максималната височина на профилот  $R_p$  ја претставува максималната височина на профилот во рамките на референтната должина. Математички е претставена како:

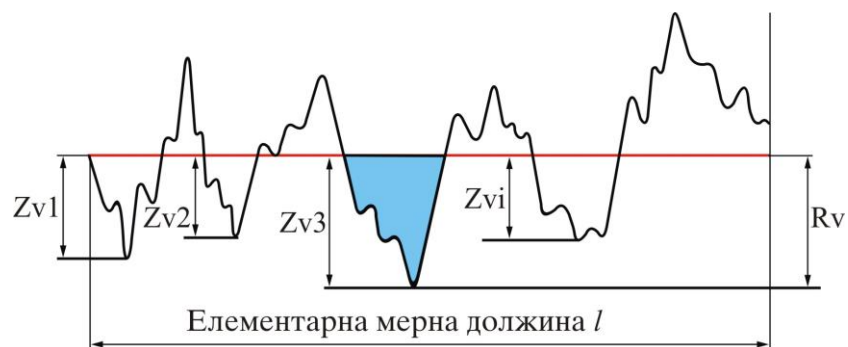
$$R_p = \max(Z(x)) \tag{3.2}$$



Слика 3.18. Графички приказ на  $R_p$ .

Максималната длабочина на профилот  $R_v$  ја претставува максималната длабочина на профилот во рамките на референтната длабочина. Математички е претставена како:

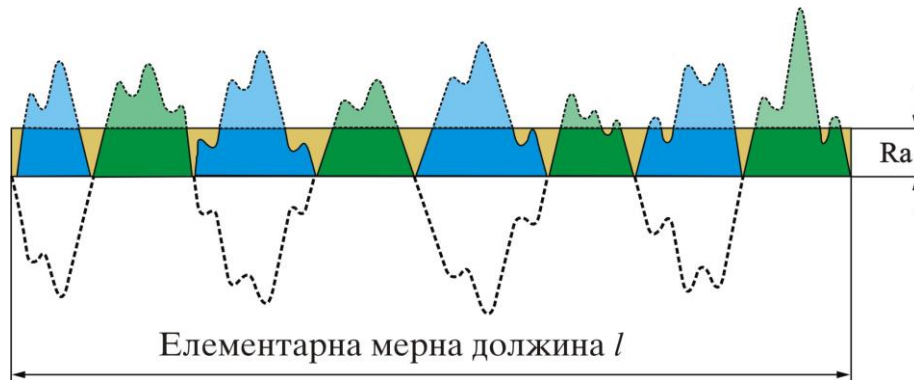
$$R_v = \min(Z(x)) \tag{3.3}$$



Слика 3.19. Графички приказ на  $R_v$ .

Аритметичкото средното квадратно отстапување  $R_a$  претставува средно апсолутно отстапување на профилот од средната линија. Математички е претставено како:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (3.4)$$



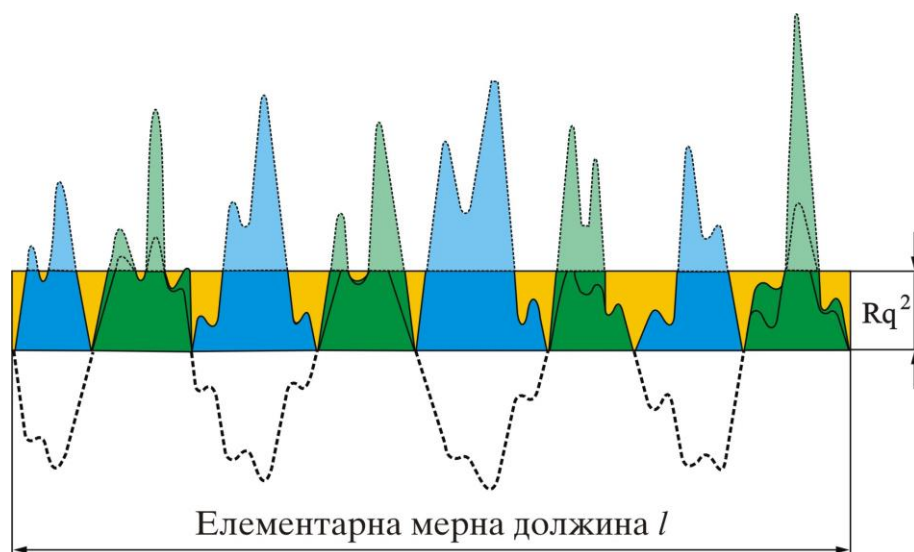
Слика 3.20. Графички приказ на  $R_a$ .

Средното квадратно отстапување  $R_q$  претставува средно квадратно отстапување на скенираниот профил од средната линија. Оваа големина е почувствителна на врвовите и долините во однос на  $R_a$ , бидејќи амплитудите се земаат како квадрати.

- Рапавост на профилот (2D) :  $R_q/R_a = 1.22$
- Рапавост на профилот (3D) :  $R_q/R_a = 1.25$

Математички е прикажана како:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |z^2(x)| dx} \quad (3.5)$$



Слика 3.21. Графички приказ на  $R_q$ .



### ***Методи на мерење на рапавоста на површината***

Мерењето на рапавоста на површината на работното парче може да се реализира на различни начини и со различни техники [147].

Директната метода на мерење користи перо поставено нормално кон мерената површина, а прикажаниот профил се користи за пресметка на параметрите на рапавоста.

Техниката на споредба користи примерок со позната рапавост на површината кој се споредува со тој за кој се бара рапавоста. Примерокот е направен со истиот процес, материјал и параметри на обработка како и тој за кој се бара рапавоста.

Бесконтактната метода користи светлина наместо перо за да се добие профилот на рапавоста.

Мерењата реализирани во текот на процесот всушност ја користат техниката на препознавање облици, ултразвукот и сл. со кои во текот на процесот се добиваат параметрите на рапавоста.

### **3.3 Оптимизација на процесните параметри**

Статистичкиот дизајн на експериментите се појавува во 1920-те благодареејќи на Ronald Aylmer Fisher [118]. Втората ера на дизајнот на експериментите започнува во 1951 со работите на Box и Wilson [148] кои ја примениле идејата за индустриски дизајн и ја развиле методологијата на одзивната површина.

Системот за дизајн на експериментите креиран од Taguchi (Тагучи) е едно од најголемите инженерски достигнувања во 20-от век.

Работата на Тагучи во 1980-те [78], иако некои ја сметаат за контроверзна, има значително влијание за популаризацијата на статистичкиот дизајн на експериментите што имало сериозно влијание врз подобрувањето на квалитетот во производството и другите сфери [146].

Кај методата на Тагучи зборот „оптимизација“ означува најдобро ниво на управувачките параметри. Дизајнот на експериментите (DOE) е систематска метода со која се определува врска помеѓу факторите кои влијаат врз процесот и излезот од процесот. Оваа информација е потребна за да може да се управува со влезот на процесот со цел оптимизација на излезот. Со неговиот пристап значително се намалува бројот на експериментите кој треба да се реализира при истражувањата [149].

### 3.4. Дизајн-простор на Тагучи

Ефектот на многуте различни параметри врз карактеристиките на процесот може да се истражи со користење на ортогоналниот дизајн-простор предложен од Тагучи. Бројот на проби кои треба да се реализираат согласно овој пристап е даден во Табелите 3.1 и 3.2.

Табела 3.1. Ортогонален дизајн систем за различни параметри и нивоа на експеримент.

		Број на параметри (P)														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Број на нивоа (L)	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16	L32
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27	L36	L36	L36
	4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32						
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50				

Табела 3.2. Ортогонален дизајн систем за различни параметри и нивоа на експеримент (продолжение).

		Број на параметри (P)														
		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Број на нивоа (L)	2	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32
	3	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36								
	4															
	5															

За да се определи ефектот кој секоја од варијаблите го има врз излезот ќе треба да се определи соодносот SN (*the signal-to-noise ratio*). Во равенката којашто следува  $Y_i$  е средна вредност а  $s_i$  е варијанса [150].

$$SN_i = 10 \log \frac{\bar{y}_i}{s_i^2} \tag{3.6}$$

каде

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u} \tag{3.7}$$

и

$$s_i^2 = \frac{1}{N_i-1} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2 \tag{3.8}$$

$i$  – број на експерименти

$u$  – број на проби

$N_i$  – број на проби за експериментот  $i$

Вообичаено постојат три категории на карактеристиките на перформансите во зависност од S/N соодносот:

1 Номиналната вредност е најдобра

$$SN_T = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (3.9)$$

2. По големото е по добро (максимизирај)

$$SN_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.10)$$

3. По малото е подобро (минимизирај)

$$SN_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.11)$$

Каде:

$\bar{y}$  е средна вредност на податоците

$s_y^2$  е варијанса на  $\bar{y}$

$n$  е број на проби

$y$  е податок од пробата

Соодносот S/N е прикажан во децибели [151]. Истражувањата опфатени во оваа дисертација се поврзани со квалитетот на површината, а целта е да се добијат што помали вредности на нерамнините, т. е. важи правилото „по малото е по добро (минимизирај)“.

### 3.5. Регресиона анализа

Во истражувањата е користена регресионата анализа за да се најде зависната варијабла во функција од повеќе независни варијабли.

$$y = \Phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) + \varepsilon_i \quad (3.12)$$

$\Phi$  ја претставува функцијата која треба да се определи, а  $\varepsilon_i$  претставува статистичка грешка на мерење.

Обликот на функцијата може да биде линеарен (3.14) или експоненцијален (3.15) и во тој случај равенките ќе бидат:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (3.13)$$

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} x_3^{\beta_3} x_4^{\beta_4} \quad (3.14)$$

каде  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  и  $\beta_4$  се регресиони коефициенти, а  $x_1, x_2, x_3$  и  $x_4$  се четирите независни варијабли.

За да се идентифицира кој од моделите е посоодветен за нашиот случај направена е корелациона анализа. Најголемиот број на автори кои се занимаваат со квалитетот на обработените површини сугерираат да се користи линеарниот или експоненцијалниот модел [152 – 154].

### 3.6. Користен софтвер во истражувањата

Во рамките на истражувањата во оваа докторска дисертација користени се различни софтвери. SolidWorks е користен за дизајнирање на деловите кои се печатени со АП. За статистичката анализа користен е Minitab, version 21 [155], JMP 17 pro [156] како и MS Excel with Data Analysis Tool [157] за одредени анализи. За приказот на графички модели 3D користен е Matlab 2021 [158]. За оптичко скенирање на површината на примероците користен е софтверот AmScore.

Во делот за сечење на моделот, за конверзија од STL format во G-код користени се слободно достапните PrusaSlicer [159] and Slc3r 1.3.0 [160] За пресеците на болусот користени се 3DSlicer и SlicerRT [161], а за распоредот на радијацијата кај истражувањата во радиотерапијата користен е софтверот Монасо [162].

### 3.7. Ефектот на болус при третманот во радиотерапијата

Бројот и разновидноста на примената на АП сè повеќе се зголемува, посебно во последните години. Оваа технологија започнува да има големо влијание врз разните области на нашето живеење, меѓу кои и врз медицината. Една од можните примени е да се користи термопластична покривка при радиотерапијата кај болните од карцином. Персонализацијата на болусот (покривка околу местото на зрачење) може да го зголеми квалитетот на терапијата кај болните од рак на кожа бидејќи обликот на комерцијалните болуси не можат перфектно да налегнат врз кожата на различните пациенти при радиотерапијата со Medical Linear Accelerator (LINAC).

Болусот треба перфектно да се совпаѓа со контурата на лицето на пациентот, за да оневозможи продирање воздух помеѓу болусот и кожата на пациентот. Доколку не се обезбеди тоа, апсорбираната доза и нејзината хомогеност во подрачјето на интерес кај пациентот нема да се зголеми. Од тука произлегува потребата да се добие посакуваниот облик на зоната во која се врши радиотерапијата. Задачата на радиотерапевтот е да го подготви болусот за определен третман и регион на пациентот. Тоа би требало да има важен ефект врз поместувањето на максималната доза на радијација ( $D_{max}$ ) поблиску до кожата на пациентот [163].

Комерцијалните болуси се направени од листови на одреден материјал кои се деформираат при нивно загревање во топла вода ( $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Дебелината на болусот треба да се прилагодува во зависност од кожата на пациентот, положбата на туморот и енергијата на фотоните.

Максималниот процент на длабочинската доза може да се постигне на одредена длабочина на ткивото на пациентот и таа е позната како максимална длабочинска доза ( $D_{max}$ ), а е резултат на ефектот на натрупување [163].

Во истражувањата реализирани од Shiau et al [164], се препорачува користење болус во случаите кога туморот се раширил во регионот на лицето. И други автори ја потврдуваат таа констатација [11, 165, 166].

Нашите истражувања во оваа докторска дисертација одат во правец на креирање специфичен 3D-болус за пациентите кај кои е дијагностициран карцином на кожата. Датотеката DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), која е генерирана со скенерот за симулација со компјутерска томографија (CT Sim), ќе се процесира со отворено достапниот софтвер '3D Slicer' со цел да се креира стандардната датотека STL, потребна за 3D-печатењето на болусот. Во истражувањето е направена споредба помеѓу вообичаено користениот болус и оној добиен со технологијата на АП. Верификацијата на дозата на одредена длабочина е реализирана со софтверот кој го користи алгоритмот Монте Карло.

#### 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА

Во оваа дисертација се истражуваат три параметри на квалитетот на површината  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$ . Истражувани се термопластичните материјали PLA, ABS, PETG како и нерѓосувачкиот челик 316L. Истражувањата треба да покажат кои од влезните параметри имаат поголемо влијание врз квалитетот на површината при што за термопластичните материјали користена е технологијата FDM, додека за нерѓосувачкиот челик користени се две технологии: технологијата FFF (во облик на жица) и технологијата DMLS (во облик на прав). При мерењето на квалитетот на површината користени се различни правци на мерење.

Согласно некои истражувања [63, 167], мерењата се правени во три правци, 0, 45, 90. Не постои посебно објаснување зошто е тоа направено, но имајќи ги предвид различните правци и технологии на адитивното производство и аспектите на стандардизацијата оправдано е да се истражи квалитетот на површината во различни правци и да се докаже дека 90 е правото решение и за овие технологии.

Блок-дијаграмот на текот на истражувањето е прикажан на слика 4.1.



Слика 4.1. Блок-дијаграм на текот на истражувањата.

#### 4.1 Примена на моделирање со споени слоеви (FDM) кај печатење на термопластични материјали

##### *Карактеристики на материјалите*

Материјалите кои се користени при експериментите се: PLA (Polylactic Acid) влакно со бакарна боја, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) црно влакно и PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol Modified) жолто влакно, и сите со пречник 1,75 mm.

Температурата на печатење на PLA е  $(190 - 230) ^\circ\text{C}$ , за ABS е  $(210 - 240) ^\circ\text{C}$ , а за PETG е  $(220 - 250) ^\circ\text{C}$ , а средните вредности се  $210 ^\circ\text{C}$ ,  $225 ^\circ\text{C}$ , и  $235 ^\circ\text{C}$ . Температурата на површината на која се печати за PLA е  $(20 - 60) ^\circ\text{C}$ , за ABS е  $(80 - 110) ^\circ\text{C}$  и за PETG е  $(80 - 90) ^\circ\text{C}$ , со средни вредности  $60 ^\circ\text{C}$ ,  $95 ^\circ\text{C}$  и  $85 ^\circ\text{C}$ .

Сликата 4.2 ги покажува термопластичните материјали користени во овие експерименти.



Слика 4.2. Термопластични материјали користени во истражувањата.

Подолу се дадени некои основни својства на користените термопластични материјали.

#### *PLA*

- Крут, но кршлив материјал.
- Најчесто се користи за прототипско производство, играчки за на маса, делови со мали оптоварувања.
- Најдобар материјал за почетници заради едноставноста на користењето и затоа е најчесто препорачан материјал кај оваа метода.

#### *ABS*

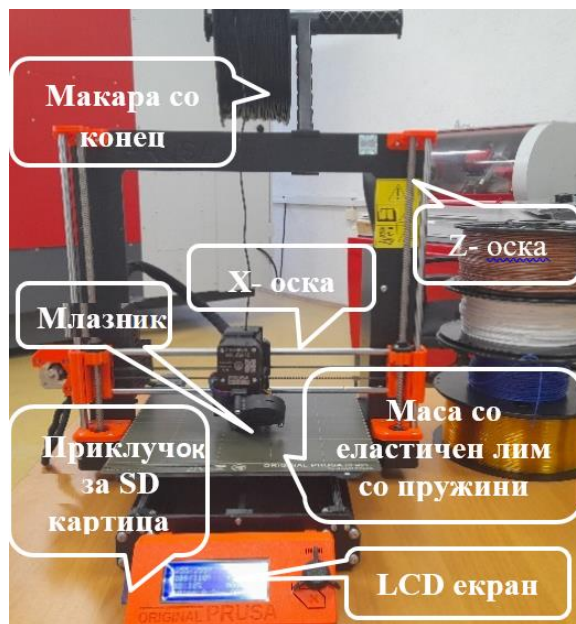
- Јак еластичен материјал, отпорен на трошење и на температура.
- Вообичаено се користи за спрегнати делови, како што се запченици, делови изложени на УВ-зрачење или прототипски делови.

#### *PETG*

- Тоа е траен и еластичен материјал со сјајна површина и е отпорен на удар и температура.
- Најчесто се користи за разни машински делови и кутиести конструкции.
- Одлично се прилепува кон разни ленти.

#### ***Персонален 3Д-печатач***

Печатачот кој е користен за печатење на термопластичните примероци е ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+. Тој користи два различни пречника: 2,85 и 1,75 mm. Помалиот пречник е најчесто користена млазница и нема некое влијание врз квалитетот на печатењето. На сликата 4.3 е прикажан ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+, додека неговите технички карактеристики се дадени во табела 4.1



Слика 4.3. Персонален 3Д-печатач ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+.

Калибрација на **ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+**. Калибрацијата на 3D-печатачите е задолжителна пред да се започне со неговото користење. Покрај елементите поврзани со проверката на печатачот по неговата монтажа се проверува исправноста на нивелирањето на масата.

Табела 4.1 Технички карактеристики на **ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+**.

<b>Build Volume</b>	25×21×21 cm (9,84"×8,3"×8,3")
<b>Layer height</b>	0,05 – 0,35 mm
<b>Nozzle</b>	0.4mm default, a wide range of other diameters/nozzles supported
<b>Filament diameter</b>	1,75 mm
<b>Supported materials</b>	Wide range of thermoplastics, including PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Polycarbonate), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (Polypropylene), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Wood fill, and other filled materials.
<b>Max travel speed</b>	200+ mm/s
<b>Max nozzle temperature</b>	300 °C / 572 °F
<b>Max heat bed temperature</b>	120 °C / 248 °F
<b>Extruder</b>	Direct Drive, Bondtech gears, E3D V6 hotend
<b>Print surface</b>	Removable magnetic steel sheets with different surface finishes, heat bed with cold corners compensation
<b>Printer dimensions (without spool)</b>	7 kg, 50×55×40 cm; 19,6×21,6×15,7 in (X×Y×Z)
<b>Power consumption</b>	PLA settings: 80W / ABS settings: 120W
<b>Print surface</b>	Removable magnetic steel sheets with different surface finishes, heat bed with cold corners compensation
<b>Printer dimensions (without spool)</b>	7 kg, 50×55×40 cm; 19,6×21,6×15,7 in (X×Y×Z)
<b>Max heat bed temperature</b>	120 °C / 248 °F
<b>Power consumption</b>	PLA settings: 80W / ABS settings: 120W

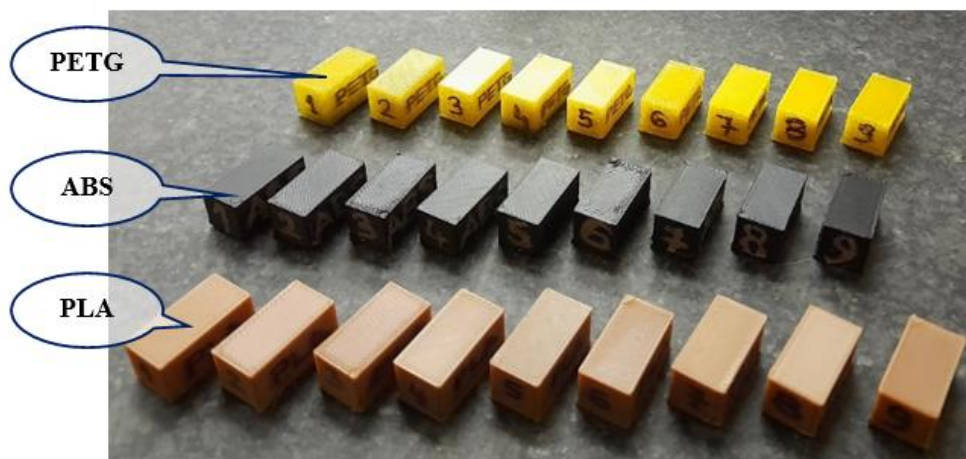
Се калибрираат оските X/Y/Z за да се најдат позициите на 4 точки на калибрација заради исправноста на нивелирањето на масата. Истото се прави и со првото ниво на



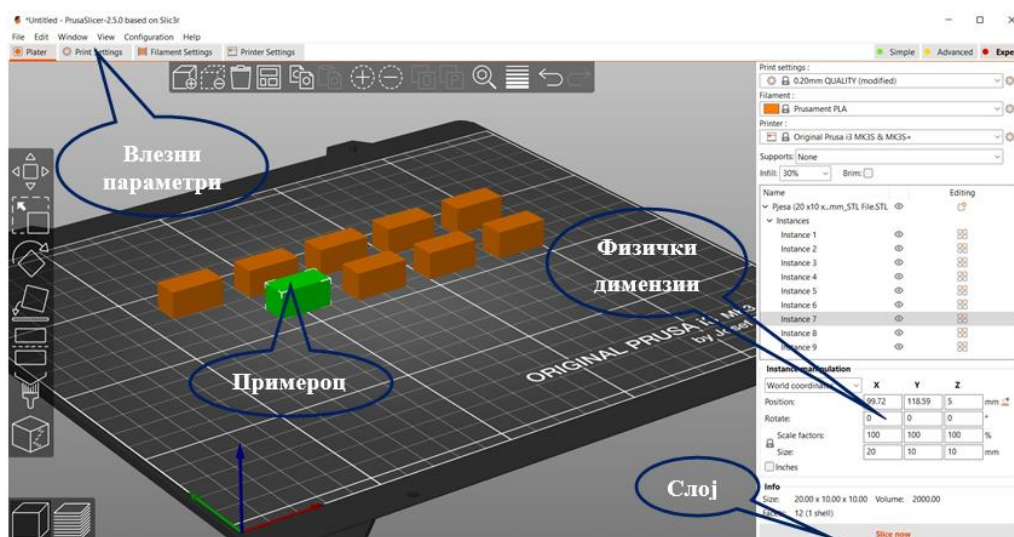
печатење. Доколку се преместува печатачот на некоја друга локација, се повторува калибрацијата. На крајот се проверува растојанието помеѓу млазникот и масата, по што може да се отпочне со работа.

### Дизајнирање на примероците

За трите различни термопластични материјали дизајнот на примероците е реализиран со софтверот SolidWorks. Моделот е сочуван во датотеката STL, а потоа се избрани параметрите определени со методологијата DoE за секој од примероците. Реализирано е сечење на моделот по слоеви и генерирање на G-кодовите за печатење. Димензиите на парчето се 20 x 10 x 10 mm (Слика 4.4). На сликата 4.5 е даден приказ на примероците добиени со софтверот PrusaSlicer.

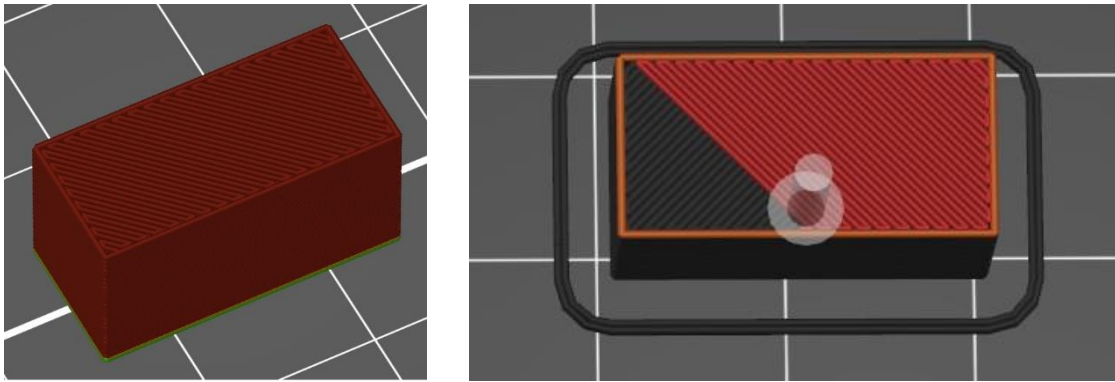


Слика 4.4. Приказ на печатени примероци од термопластичните материјали PLA, ABS и PETG.



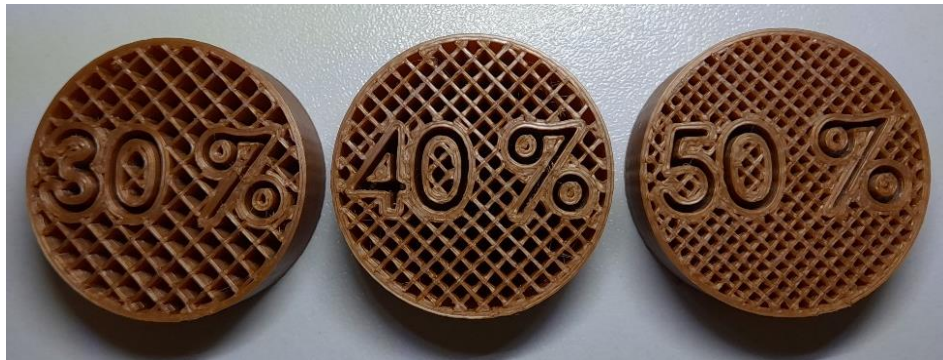
Слика 4.5. Приказ на примероците добиени со софтверот PrusaSlicer и печатени во X-Y рамнина

Правецот на градење на примероците со 3D-печатачот е  $45^{\circ}$  како што е прикажано на слика 4.6.

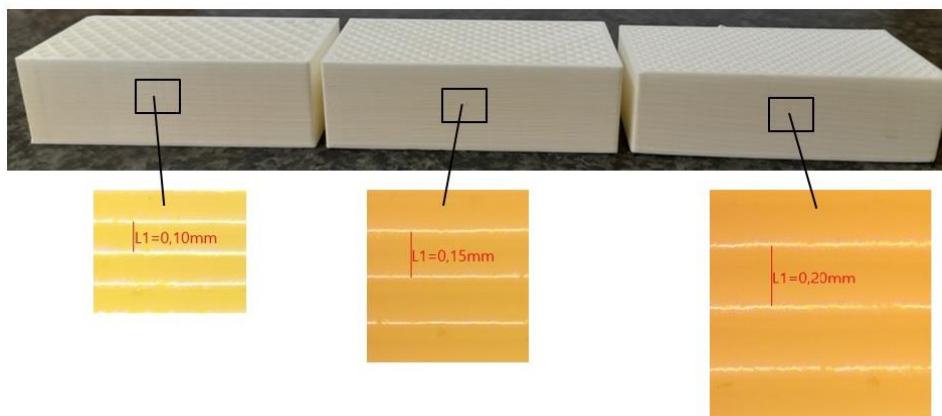


Слика 4.6. Повец на печатење на примероците изработени од термопластичен материјал

Експериментите се реализирани со три различни нивоа на исполнетост на примероците (30 %, 40 % и 50 %) како и со три височини на слојот (0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm), прикажано на слики 4.7 и 4.8.



Слика 4.7. Исполнетост на примероците.



Слика 4.8. Височини на слојот кај примероците.

### Дизајн на експериментите

Бројот на експерименти во ортогоналната област (ОА)  $L_9$  е избран согласно методата на Тагучи (Глава 3, Табела 3.1), а е во функција од бројот на влезните параметри и нивоа како што е прикажано во Табела 4.2. Истите параметри и нивоа се за сите три вида на термопластичен материјал. Како влезни параметри се земени: пречникот на млазницата (ND), височината на слојот (LH), брзината на печатење (PS) и пополнетоста (I).

Табела 4.2. Влезни параметри и нивни нивоа за термопластичните материјали

Бр.	Влезни параметри	Единици	Код на параметарот	Нивоа		
				1	2	3
1	Пречник на млазницата (ND)	mm	X <sub>1</sub>	0,25	0,4	0,6
2	Височина на слојот (LH)	mm	X <sub>2</sub>	0,10	0,15	0,20
3	Брзина на печатење (PS)	mm/s	X <sub>3</sub>	70	80	90
4	Пополнетост (I)	%	X <sub>4</sub>	30	40	50

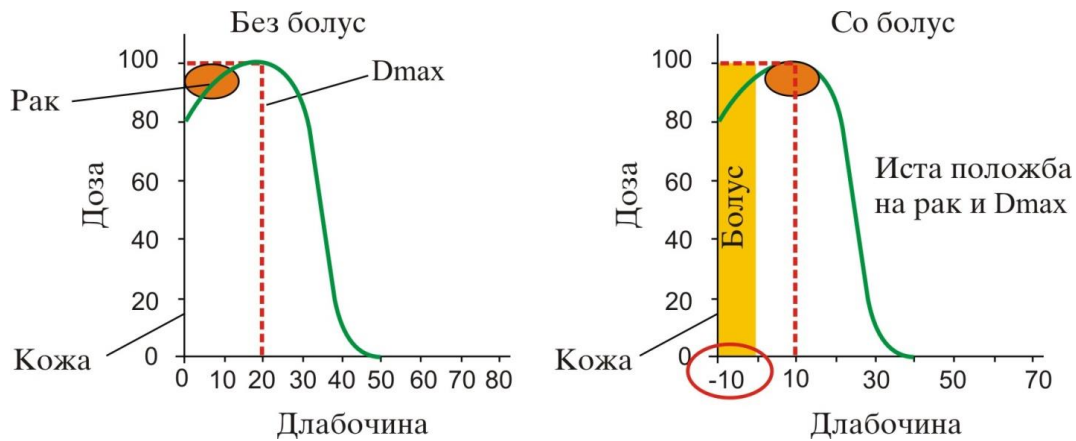
Статистичкиот софтвер Minitab е користен за да се најде комбинацијата на независните параметри и нивните нивоа за секој од експериментите, а сите комбинации се прикажани во Табела 4.3.

Табела 4.3. Приказ на матрицата L9 за термопластичните материјали

Проба	Кодирани параметри				Физички параметри			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	(N <sub>a</sub> ) (mm)	(L <sub>h</sub> ) (mm)	(P <sub>s</sub> ) (mm/s)	(I) (%)
1	1	1	1	1	0,25	0,10	70	30
2	1	2	2	2	0,25	0,15	80	40
3	1	3	3	3	0,25	0,20	90	50
4	2	1	2	3	0,4	0,10	80	50
5	2	2	3	1	0,4	0,15	90	30
6	2	3	1	2	0,4	0,20	70	40
7	3	1	3	2	0,6	0,10	90	40
8	3	2	1	3	0,6	0,15	70	50
9	3	3	2	1	0,6	0,20	80	30

#### 4.2. Примена на термопластичен материјал во радиотерапијата (Bolus)

Со цел да се зголеми дозата на зрачење на карцином на кожата на лицето се предлага користење на специјална покривка (болус) која е во облик на лицето на пациентот. Со тоа ќе се постигне поместување на максималната доза на радијација ( $D_{max}$ ) поблиску до кожата на пациентот. Дебелината на болусот би требало да може да е променлива во зависност од положбата на ракот и енергијата, како што е прикажано на слика 4.9.

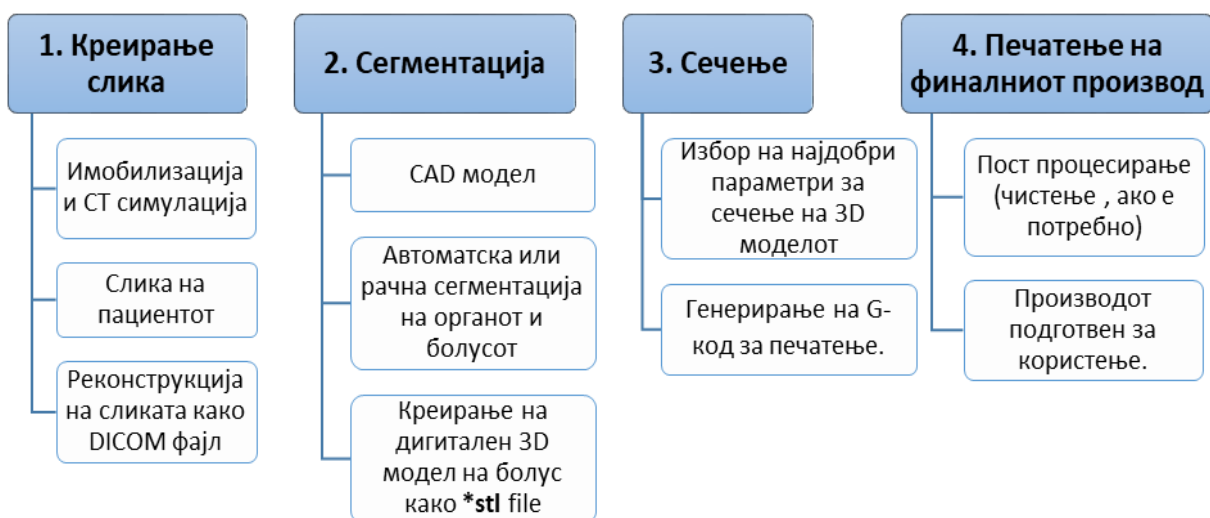


Слика 4.9. Визуелизација на примена на болусот и ефектот врз поместувањето на Dmax.

За да се креира 3D-болус избран е пациент кај кој е дијагностициран карцином на кожата. Материјалот кој е користен за печатење на болусот е PLA.

Општо земено, во клиничката практика, вообичаениот процес на надворешна терапија со зрачење (EBRT) вклучува 5 главни чекори:

1. имобилизација на пациентот,
2. симулација, вообичаено со компјутерска томографија (CT), магнетна резонанса (MRI), или некоја друга техника за креирање слика,
3. креирање контура, сегментација на туморот и органите,
4. планиметрија на радијацијата со помош на компјутеризираниот систем за планирање на третманот (TPS), кој го симулира процесот на радиотерапија и со кој правецот на зракот на дозата и неговиот интензитет се оптимизираат со цел подобар третман на пациентот,
5. третман на пациентот, целосната доза ќе се примени кај пациентот во повеќе мали делови.



Слика 4.10. Шематски приказ на процесот на дизајнирање и печатење на 3D-болус.

Секој болус е уникатен и направен за одреден регион на пациентот, овозможено заради СТ-симулацијата на пациентот. За време на таа процедура се креира дигитална слика на пациентот со интеракција на X-зраците со телото на пациентот. Овие клинички чекори директно се поврзани со дизајнирањето и производството на 3D-болусот. Овој процес е претставен на слика 4.10. На сликата 4.11 е симулација на телото на пациентот со СТ-скенер, а на 4.12 изгледот на ракот на кожата.

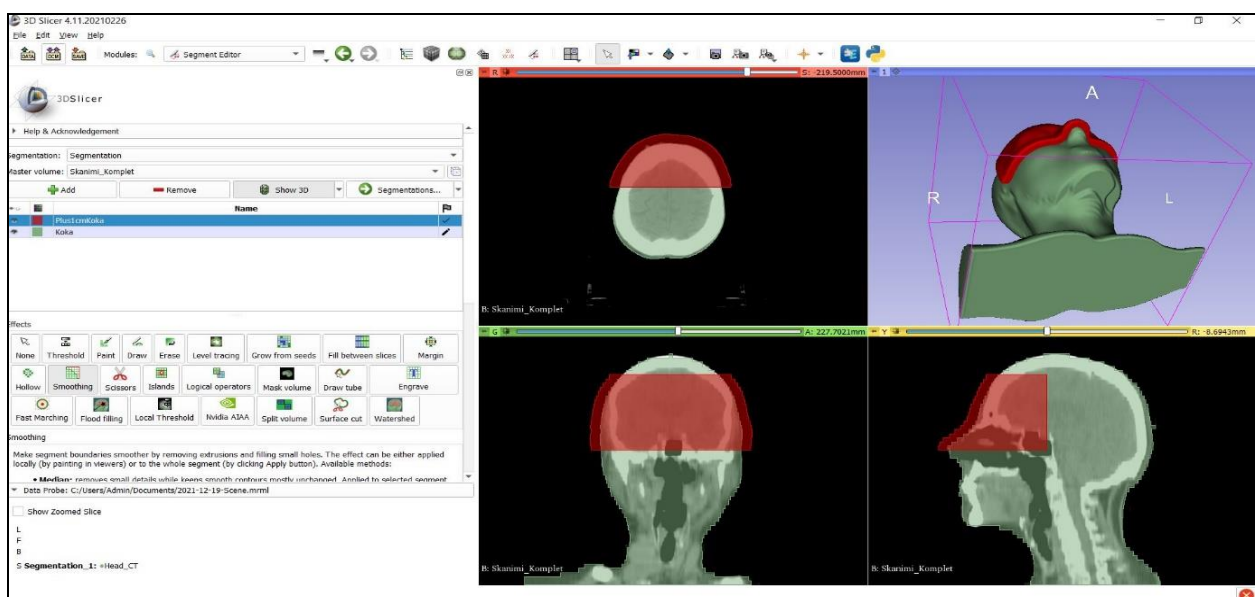


Слика 4.11. Симулација на СТ-скенер.



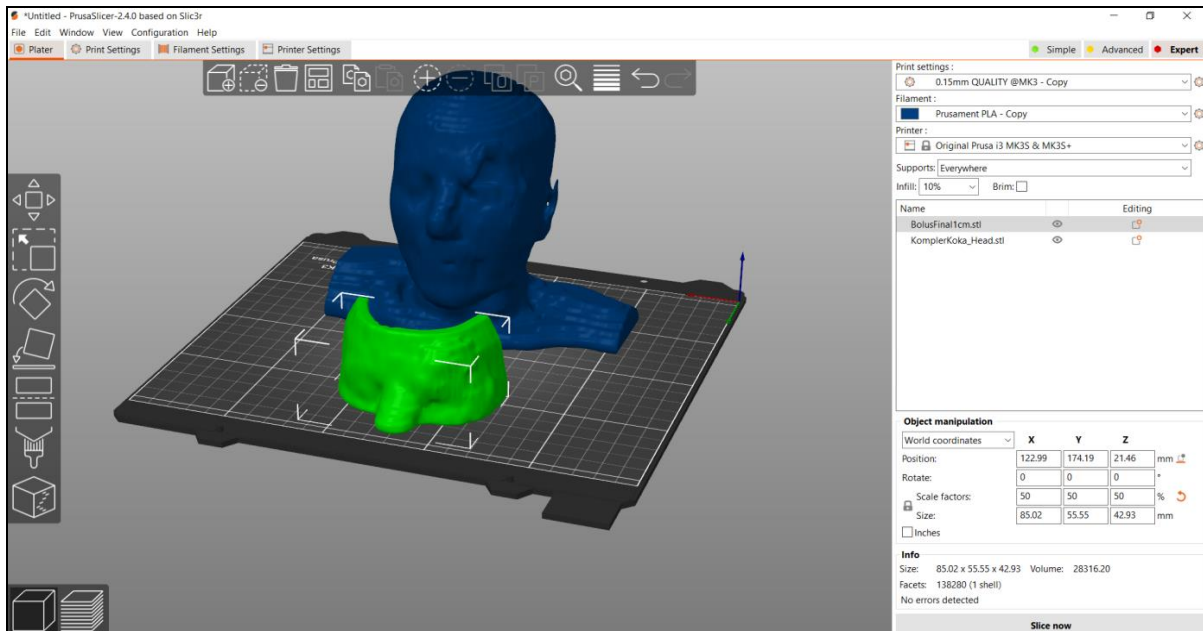
Слика 4.12. Изглед на ракот.

Дизајнирањето на 3D-болусот се реализира со софтверот 3D Slicer. Со црвена боја (Слика 4.13) е прикажан болусот, добиен со скенирање на пациентот.



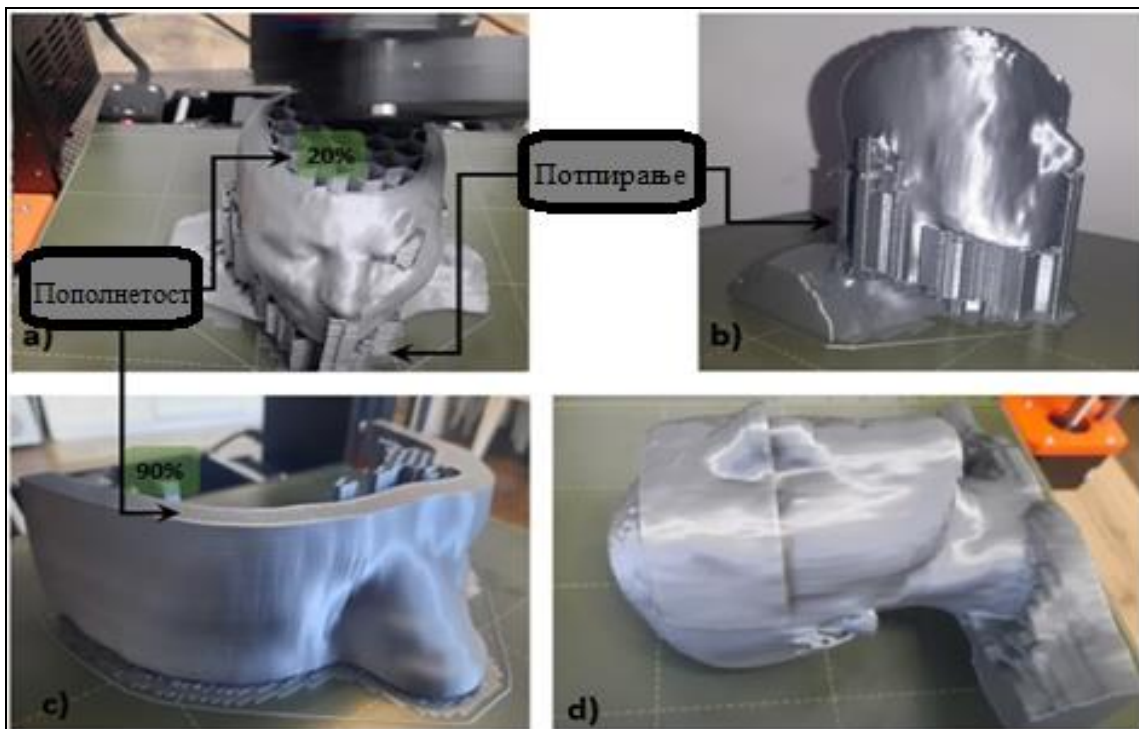
Слика 4.13. Главни чекори до креирање на STL фајл.

Независните влезни параметри се многу важни во креирањето на болусот со цел да се добие висок квалитет (слика 4.14). Тоа се: пополнување 90 %, височина на слој 0.1 mm, пречник на млазница 0.4 mm, температура на млазница (180 - 220) °C, средна 215 °C, температура на масата (20 - 60) °C, време на печатење 1 ден, 15 часа, 37 минути.



Слика 4.14. Екран од софтверот PrusaSlicer.

За да се креира главата на пациентот и болусот (прикажано на слика 4.15), се зададени и параметрите на пополнетост и тоа 20 % за главата и 90 % за болусот. Главата е печатена заради визуализација и споредба со болусот при понатамошни истражувања.



Слика 4.15. Приказ на готовите производи а) глава за време на печатење, б) глава со поддршка, в) болус за време на печатење д) болусот поставен на главата како во време на третманот.

### 4.3 Примена на технологијата FFF за печатење на нерѓосувачки челик 316L

#### *Материјал на примерокот*

Материјалот кој е користен за изработка на примероците со оваа технологија е Ultrafuse 316L Stainless Steel, во облик на жица со 80 % метален прашок, додека преостанатиот дел е врзивна пластика која го држи прашокот како целина. Пречникот на жицата може да е 1.75 mm и 2.85 mm, додека млазницата е 0.4 mm и е отпорна на абразија. Температурата на масата треба да е загреана во подрачјето 90 – 120 °C, додека температурата на млазницата е 230 – 250 °C.

На сликата 4.16 е прикажан калем со материјалот Ultrafuse 316L Stainless Steel со пречник 1.75 mm, додека во табела 4.4 е дадена неговата спецификација.



Слика 4.16. Калем со материјал Ultrafuse 316L Stainless Steel.

Табела 4.4. Спецификација на материјалот 3D Printing Filament Ultrafuse 316L Stainless Steel.

Print bed temperature	90–120 °C
Nozzle temperature	230–250 °C
Recommended bed surface	Glass + bed adhesive (Dimafix / polyimide tape)
Nozzle diameter	≥ 0.4 mm
Filament diameter	1,75 mm and 2,85 mm
Print speed	15–50 mm/s
Sintered part density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength, ISO 6892-1	561 MPa (XY), 521 MPa (ZX)
Elongation at break, ISO 6892-1	53% (XY), 36% (ZX)
Yield strength, ISO 6892-1	251 MPa (XY), 234 MPa (ZX)
Impact strength Charpy (notched), ISO 148-1	111 kJ/m <sup>2</sup> (XY)
Vickers hardness, ISO 6507-1	128 HV10 (XY), 128 HV10 (ZX)
Tolerance	±0,05 mm
Roundness	±0,05 mm
Bending radius	5 ± 1 mm

**Отстранување на врзивното средство и синтерување**

По 3D-печатењето на примероците од металот во облик на жица се добива „Зелен дел“ (слика 4.17). Полимерниот врзувач се отстранува со процесот познат како Catalytic Debinding (термодинамички процес кај кој зелените делови се изложени на азотна атмосфера и се греат), по што се добива така наречениот „Кафеав дел“. Овој дел се карактеризира со ниска јакост во однос на зелениот дел, но е димензионално стабилен. Ваквиот дел е релативно порозен и има потреба од синтерување за да се добие целосно метален дел. Синтерувањето се реализира на температура од 1370 °C, во чиста водородна околина, процес кој овозможува дефинитивно добивање на готовиот примерок.



Слика 4.17. Добиеени „Зелени примероци“ по печатењето на Ultrafuse 316L Stainless Steel.

Приказот на готовиот примерок е даден на слика 4.18, додека текот на процесот е даден на слика 4.19.



Слика 4.18. Приказ на готов примерок на 3D-печатен Ultrafuse 316L Stainless Steel со технологија FFF.





Слика 4.19. Процес на добивање на дел со технологија FFF.

### 3D-печатач за метал во облик на жица

За овие експерименти користен е надградениот BCN3D Epsilon (W50) 3D Printer, кој е моќен професионален 3D-печатач кој испорачува извонредни функционални делови со висок квалитет и прецизност. Во табелата 4.5 се дадени техничките параметри на печатачот.

Табела 4.5. Технички параметри на 3D печатачот BCN3D Epsilon W50 Metal 3D Printer

3D Printing technology	Fused Filament Fabrication (FFF)
Printing volume	420 mm x 300 mm x 400 mm
Number of extruders	2
Printing modes	Single and Dual mode, Support mode, Duplication mode, Mirror mode
Supported files	*.gcode
Certifications	CE/FCC
Filament diameter	2,85 ± 0,05 mm
Layer height	0,05 mm – 0,5 mm (custom profiles)
Positioning resolution (X, Y, Z)	1,25 μm /1,25 μm /1μm
Extruder maximum temperature	300 °C
Heated bed maximum temperature	120 °C
Build chamber maximum temperature	60 °C (depending on operating temperature)
Software	BCN3D Cura

Како и кај секој 3D-печатач и за овој е направена калибрација пред да се отпочне со печатењето. Дизајнот на примероците е реализиран со софтверот Solidworks со кој е генерирана датотеката STL. За секој од примероците се избрани соодветните параметри согласно планот на експериментите со што се овозможи генерирање на G-кодовите и печатење на секој од нивоата на примерокот.

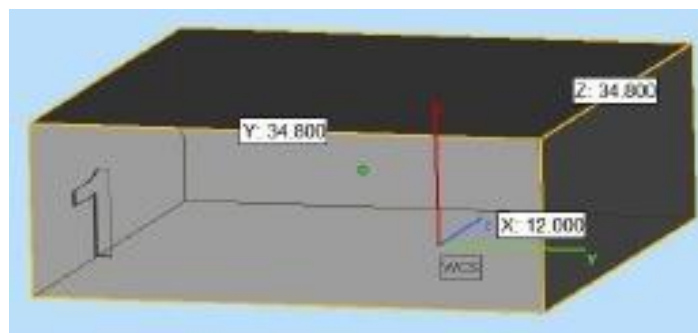
### ***Намалување на димензиите заради намалување на делот***

Заради преминот на делот од кафеав дел во метален дел, се намалуваат димензиите на делот. Ова треба да се земе во обзир при дизајнирање на делот. Намалувањето на димензиите се случува заради оформувањето на монолитен облик на индивидуалните честички за време на синтерувањето. Намалувањето по Z-оската вообичаено е малку поголемо во однос на X и Y-оските заради печатењето слој по слој.



Слика 4.20. Димензии на 3D STL-моделот.

Дигиталниот модел треба да се зголеми за да се добие дел со одредени димензии. Моделот 3D STL и неговите димензии се претставени на сликата 4.20. За процесот на отстранување на врзивното средство и синтерување за оските Y и Z користено е зголемување од 16 %, а за X оската 20 % (слика 4.21)



Слика 4.21. 3D STL Model со скратувања 16 % за Y и Z; 20 % за X.

### ***Дизајнирање на експериментите***

Согласно методата на Тагучи (Глава 3, Табела 3.1) се користи ортогоналниот простор L9 со 3 параметри и 3 нивоа. Ортогоналниот простор L9 е креиран врз основа на бројот на влезните параметри и нивоата, како што е прикажано во Табела 4.6. Користени влезни параметри се Брзина на печатење ( $P_s$ ), Пополнување ( $I_d$ ), Височина на слојот ( $L_h$ ). Табелата 4.7 го прикажува дизајнот на матрицата L9, во која се прикажани сите комбинации на независните параметри и нивните нивоа, за секој од примероците, добиени со Minitab Statistical Software.

Табела 4.6. Влезни параметри и нивни нивоа за металот 316L Stainless Steel.

Бр.	Влезен параметар	единици	Код	Ниво		
				1	2	3
1	Брзина на печатење ( $P_s$ )	mm/s	$X_1$	31,5	35	38,5
2	Пополнување ( $I_d$ )	%	$X_2$	45	50	55
3	Височина на слојот ( $L_h$ )	mm	$X_3$	0,18	0,20	0,22

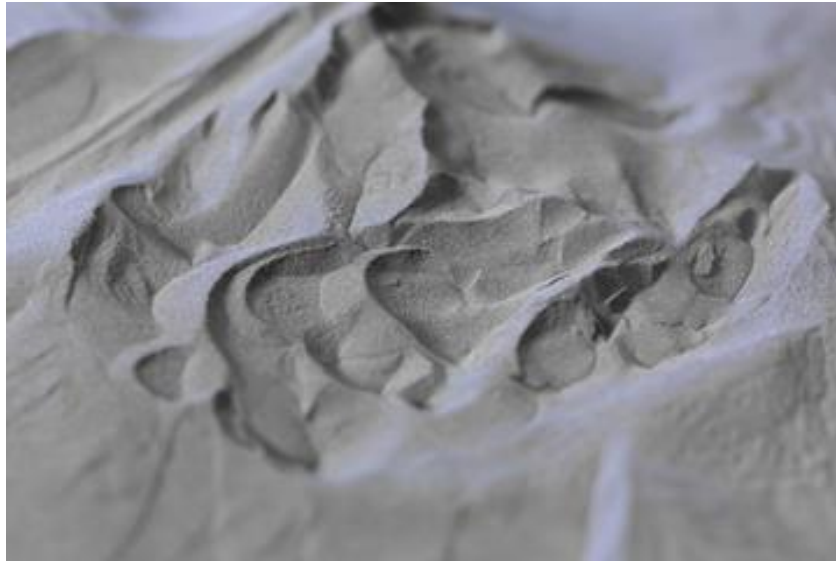
Табела 4.7. Дизајн на матрицата L9 за металот 316L Stainless Steel.

Проба	Кодирани параметри			Физички параметри		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	( $P_s$ ) (mm/s)	( $I_d$ ) (%)	( $L_h$ ) (mm)
1	1	1	1	31,5	45	0,18
2	1	2	2	31,5	50	0,20
3	1	3	3	31,5	55	0,22
4	2	1	2	35,0	45	0,20
5	2	2	3	35,0	50	0,22
6	2	3	1	35,0	55	0,18
7	3	1	3	38,5	45	0,22
8	3	2	1	38,5	50	0,18
9	3	3	2	38,5	55	0,20

#### 4.4 Примена на технологијата DMLS за печатење на нерѓосувачки челик 316L

##### Материјал на примерокот

Со цел за споредба користен е истиот материјал 316L Stainless Steel за печатење на примероците како и кај технологијата FFF. Разликата е во тоа што кај технологијата DMLS користениот материјал не е во облик на жица туку во прав Stainless Steel Powder (1.4404/316L), како што е прикажано на слика 4.22. Во Табелата 4.8 дадени се хемиските карактеристики и механичките својства на користениот материјал.

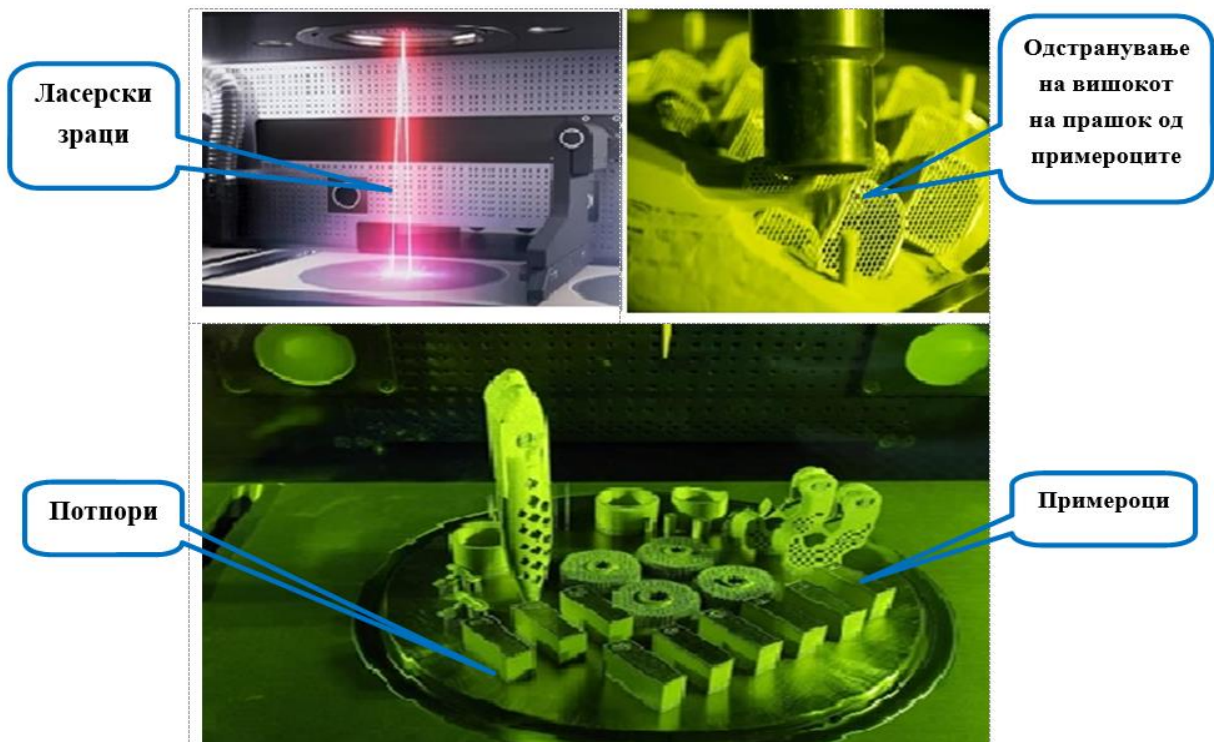
Слика 4.22. Нерѓосувачки челик *Stainless Steel Powder 316L*.Табела 4.8. Хемиски состав и механички својства на метален прав *Stainless Steel 1.4404/316L*

Element	Concentration (wt%) acc.ASTM A276	Physical Properties	
		Properties	Value
Fe	balance	Density (g/cm <sup>3</sup> )	7,9
Ni	10 - 14	Tensile strength UTS (MPa)	>485
Cr	16 - 18	Yield strength (MPa)	>380
Mo	2 - 3	Young's modulus (GPa)	>180
C	Max. 0,03	Elongation (%)	<52
Mn	Max. 2		
Si	Max. 1		
N	Max. 0,1		
P	Max. 0,045		
S	Max. 0,015		

### **3D-печатач за метал TRUMPF TruPrint 2000**

Печатачот е индустриски печатач кој ја користи технологијата DMLS со користење на метален прав за 3D-печатење.

Работниот простор му е 200 x 200 x 200 mm. Тој е со мултиласерска изведба и може да печати, симултано, повеќе предмети, како што е прикажано на слика 4.23.



Слика 4.23. 3D-печатење со технологија DMLS.

Два ласера од 300 вати работат синхронизирано со цел да ја зголемат продуктивноста на системот. Пречникот на фокусот на ласерот е 55 микрони со што се обезбедува печатење на компоненти со мазна површина и зголемен квалитет на производот, како и со сложена мрежна структура. Во Табелата 4.9 се дадени техничките карактеристики на печатачот TruPrint 2000.

Табела 4.9. Технички податоци за 3D-печатачот TruPrint 2000.

Model	TruPrint 2000
Brand	TRUMPF
Software	Tru Tops Print
Technology	SLM/DMLS
Processable materials	Metal powders for welding, such as stainless steels, tool steels, and aluminum, nickel-based, cobalt-chrome or titanium alloys, amorphous metals.
Bild volume (Standard)	Diameter 200 mm x 200 mm Height
Preheating (standard)	Up to 200 °C
Maximum Laser Power at the workpiece (Trumpf fiber laser)	300 W
Beam diameter (Standard)	55 μm
Layer thickness	20 – 100 μm
Electrical connection (voltage)	400/460 V
Electrical connection (current intensity)	32 A

Electrical connection (line frequency)	50 Hz / 60 Hz
Shielding gas	Nitrogen, argon
Dimensions (W x H x D)	2180 mm x 20308 mm x 1400 mm
Weight (Including powder)	3200 kg

Како и кај секоја од технологиите за 3D-печатење и овде е реализирана калибрација пред почетокот на печатењето.

### *Дизајнирање на примероците.*

И во овој случај дизајнирањето на примероците е реализирано со софверот Solidworks. Моделот е пренесен преку датотеката STL, а потоа се избрани параметрите согласно дизајнот на експериментите за секој од пресеците. Следува генерирање на G-кодот и печатење. На сликата 4.24 се прикажани отпечатените примероци со примена на технологијата DMLS.



Слика 4.24. Отпечатени примероци со технологијата DMLS.

### *Дизајн на експериментите*

Согласно методата на Тагучи се користи комбинацијата L9 од ортогоналниот простор, со 3 параметри и 3 избрани нивоа. Како влезни параметри се земени моќноста на ласерот ( $L_p$ ), брзината на скенирање ( $S_s$ ) и растојанието помеѓу линиите ( $H_s$ ). Во табелата 4.10 се прикажани параметрите и нивните вредности, а во табелата 4.11 е прикажана матрицата L9, добиена со Minitab Statistical Softwares.

Табела 4.10. Влезни параметри и нивни нивоа за печатење на челикот 316L со технологијата DMLS Stainless Steel.

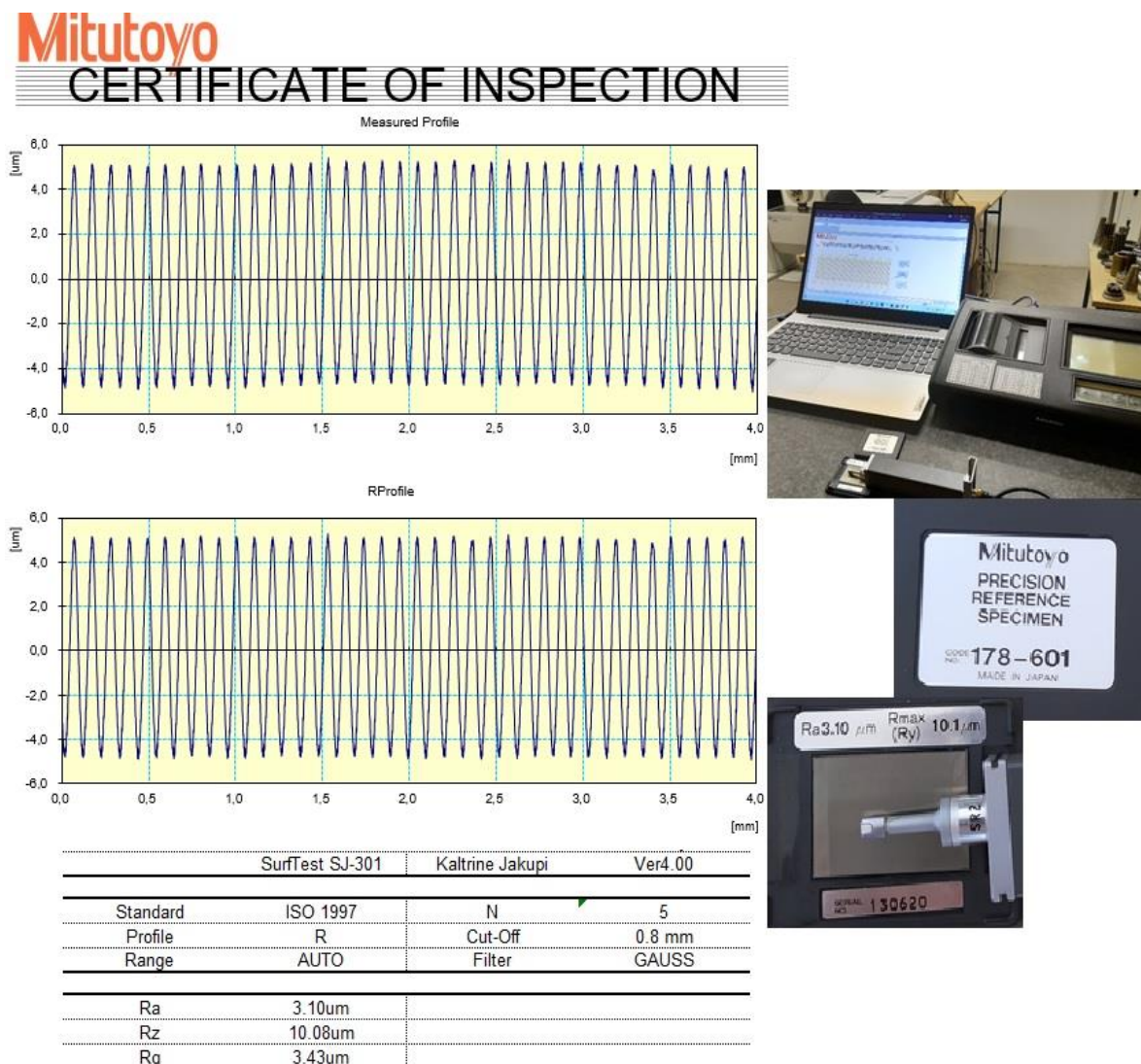
Бр.	Влезни параметри	Единици	Код	Нивоа		
				1	2	3
1	Моќност на ласерот ( $L_p$ )	W	X <sub>1</sub>	180	200	220
2	Брзина на скенирање ( $S_s$ )	mm/s	X <sub>2</sub>	450	500	600
3	Растојание помеѓу линиите ( $H_s$ )	mm	X <sub>3</sub>	0,07	0,08	0,09

Табела 4.11. Дизајн на матрицата L9 за металот 316L Stainless Steel.

Проба	Кодиран параметар			Физички параметар		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	(L <sub>p</sub> ) (W)	(S <sub>s</sub> ) (mm/s)	(H <sub>s</sub> ) /(mm)
<b>1</b>	1	1	1	180	450	0,07
<b>2</b>	1	2	2	180	500	0,08
<b>3</b>	1	3	3	180	600	0,09
<b>4</b>	2	1	2	200	450	0,08
<b>5</b>	2	2	3	200	500	0,09
<b>6</b>	2	3	1	200	600	0,07
<b>7</b>	3	1	3	220	450	0,09
<b>8</b>	3	2	1	220	500	0,07
<b>9</b>	3	3	2	220	600	0,08

#### 4.5 Мерење на рапавоста на површината

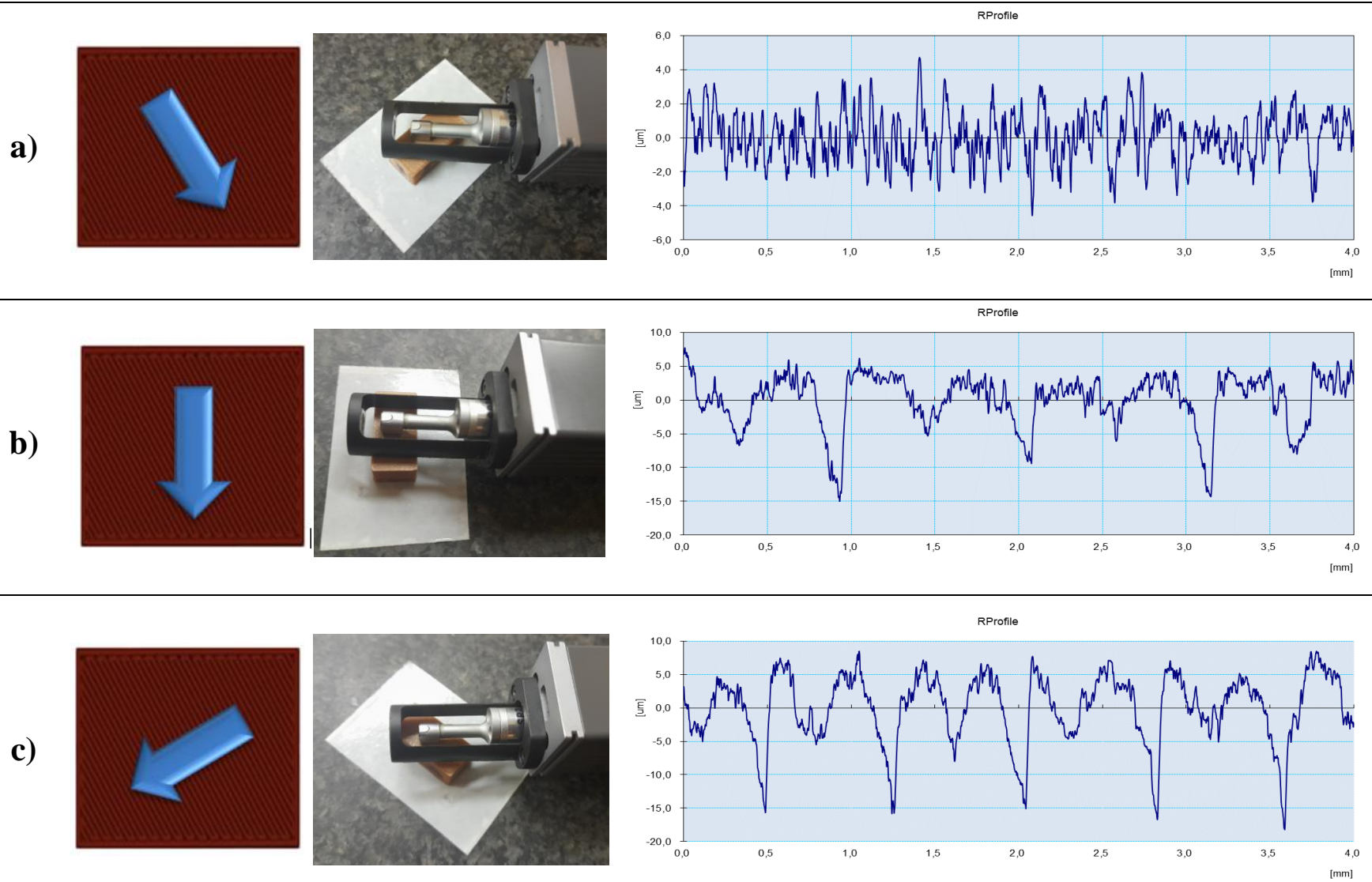
Рапавоста на површината на примероците е мерена со уредот за мерење на рапавоста на Mitutoyo SJ-310. Пред да се започне со мерењата реализирана е калибрациона процедура. Користен е стандарден примерок произведен од Mitutoyo со  $Ra = 3,10 \mu\text{m}$ . На сликата 4.25 прикажани се елементите од калибрацијата на инструментот.



Слика 4.25. Калибрација на инструментот Mitutoyo SJ-310.

Инструментот при мерењето ги покажува параметрите на рапавоста:  $Ra$ ,  $Rz$ , и  $Rq$ . Должината на мерење е поставена на 0,8 mm, брзината  $V_t = 0.5 \text{ mm/s}$ , автоматско мерење со чекор  $0.5 \mu\text{m}$ , со Гаусов профил. За секои измерени 8000 точки уредот ги пресметува истражуваните параметри. Исто така, овие параметри се пренесени во софтверот Excel за понатамошна обработка.





Слика 4.26. Мерење на рапавоста на површината а) паралелно со правецот на печатење ( $0^\circ$ ), б) дијагонално по должината на печатење ( $45^\circ$ ), с) мазно на правецот на печатење ( $90^\circ$ ) (примерок 7, случаен избор).

#### 4.6 Методологија на статистичките пресметки и нивниот 3D-приказ

Објектот на овие истражувања беа пет различни материјали и технологии, кај кои се истражуваа параметрите на рапавост на површината и за секој од параметрите се истражуваше влијанието на правецот на мерењата на рапавоста. За секој од нив се дефинираат по два математички модели - линеарен и експоненцијален. Во целина определени се 90 специфични математички равенки со помош на регресионата анализа, пресметани со софтверот Data Analysis Tool package of MS Excel version 16. Исто така за 2D-приказите користен е MS Excel. За креирање на 3D-приказите користен е Matlab 2021 version. Од сето ова произлегува дека се дефинирани 9 линеарни и 9 експоненцијални модели за секоја од технологиите и материјалите. На сликата 4.27 е прикажана пресметковната табела за регресионата метода добиена со софтверот Data Analysis Tool package of MS Excel.

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
<b>Multiple R</b>	<b>0.9898291</b>							
<b>R Square</b>	<b>0.9797616</b>							
<b>Adjusted R Square</b>	<b>0.9595231</b>							
<b>Standard Error</b>	<b>0.0427893</b>							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	0.3545474	0.0886368	48.4109394	<b>0.0012122</b>			
Residual	4	0.0073237	0.0018309					
Total	8	0.3618711						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
<b>Intercept</b>	8.7222826	0.6658436	13.0995959	<b>0.0001961</b>	6.8736043	10.5709610	6.8736043	10.5709610
<b>Nozzle</b>	-0.2727262	0.0398709	-6.8402305	<b>0.0023900</b>	-0.3834256	-0.1620268	-0.3834256	-0.1620268
<b>Layer</b>	0.2735794	0.0501631	5.4537982	<b>0.0054927</b>	0.1343043	0.4128544	0.1343043	0.4128544
<b>Speed</b>	-1.2309352	0.1389275	-8.8602688	<b>0.0008961</b>	-1.6166599	-0.8452106	-1.6166599	-0.8452106
<b>Infilling</b>	-0.4238345	0.0682126	-6.2134311	<b>0.0034144</b>	-0.6132231	-0.2344458	-0.6132231	-0.2344458

Слика 4.27. Типичен приказ на регресионата метода за експоненцијалниот модел 45 степени за материјал PLA, генериран од софтверот Data Analysis Tools of MS Excel.

Оваа алатка дава многу корисни статистички параметри за истражуваниот процес, од кои најважни се:

- *Multiple R* – Повеќекратен корелационен коефициент помеѓу три или повеќе варијабли
- *R-square* – Со приближна вредност од 0.97 што укажува дека нашиот модел опфаќа 97.9 % од варијациите на варијаблите. Се подразбира дека колку е повисока вредноста на овој показател толку е подобра проценката. Во практиката поголемо значење има оваа големина во однос на претходната бидејќи го покажува степенот на блискост на предвидуваниот математички модел.

- *Adjusted R-squared* – помага да се споредат регресионите модели со различни вредности од независните варијабли. Моделите со повисока вредност на овој показател се подобри.
- *Standard error* – покажува колку е лош регресиониот модел, во просек. Помалите вредности означуваат дека растојанието помеѓу реалните точки и оние од моделот се помали.

Во табелата ANOVA, најважен показател е *Significance F*. Овој тест определува дали моделот со сите негови независни варијабли е подобар во однос на врската со зависната варијабла. Доколку овој тест покажува статистичка значајност тогаш станува збор за добар модел.

Табелата со коефициентите ја покажува проценката на параметрите за независните варијабли во нашиот модел заедно со вредноста интерсепт (константа). Вредноста  $p$  за коефициентите означува дали независната варијабла е статистички значајна. Кога  $p$ -вредноста е помала 0,05 ниво на значајност, тогаш независната варијабла е значајна. Разгледувањето на моделите во овие истражувања е дадено во согласност со овие параметри.

За сите математички модели креирани се 3D-прикази во Matlab. Подрачјата на влезните параметри се во рамките на оние разгледувани во DoE-анализите. Подрачјата на рапавоста на површината се гранични од податоците добиени со дизајн на експериментите, а не со техничките можности на 3D-печатачите.

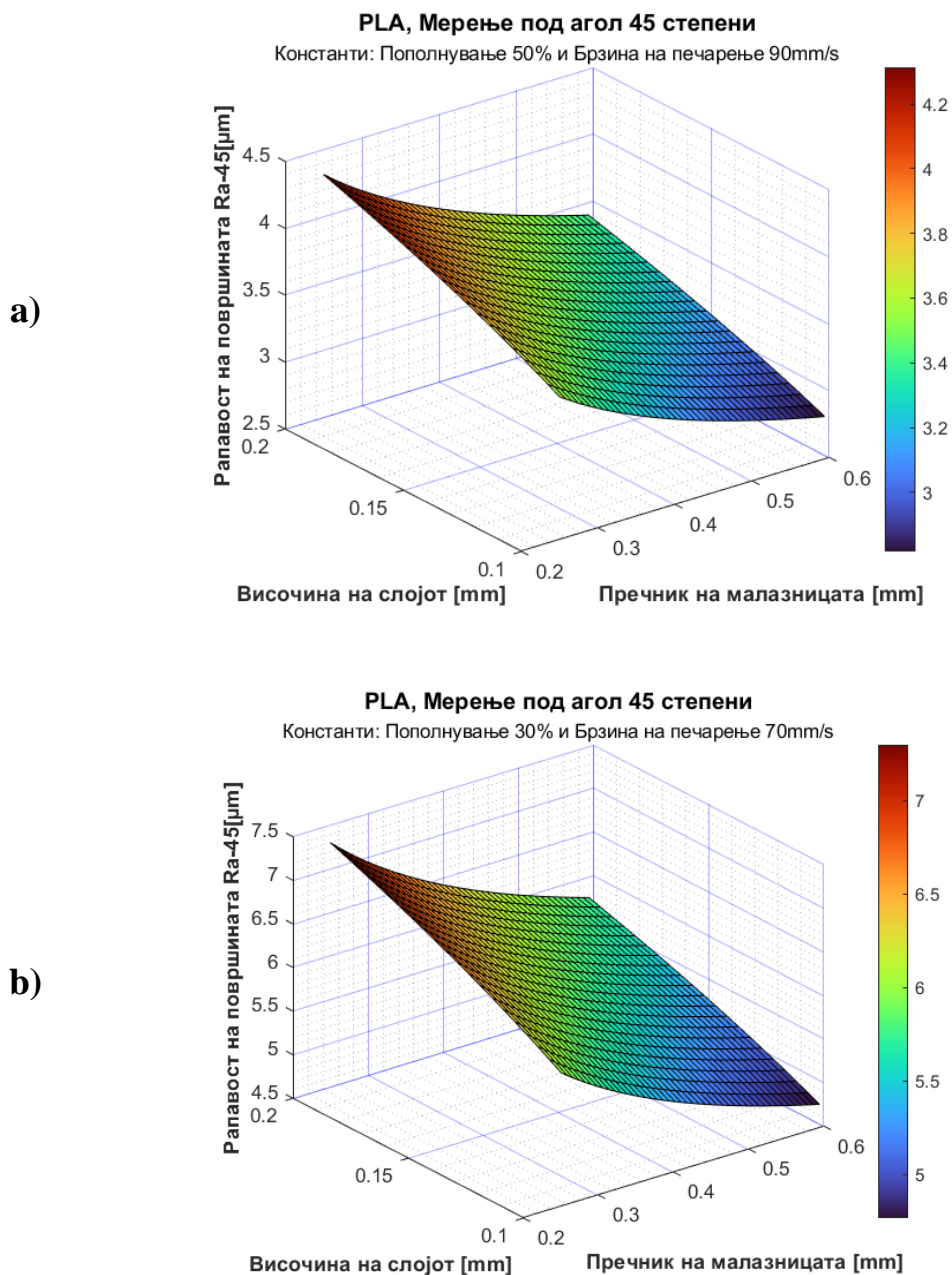
За секој од моделите се креирани два 3D-прикази. Првите ги покажуваат минималните подрачја на рапавоста на површините, кои се креирани врз основа на вредностите на независните параметри кои ги даваат минималните вредности на рапавоста. Вторите графички прикази го покажуваат максималниот распон на рапавоста на површината за истиот модел, врз основа на вредностите на независните параметри кои ги даваат максималните вредности на рапавоста на површината.

На пример, математичкиот модел добиен со регресионата метода, равенка 4.1, е експоненцијалниот модел:

$$Ra_{45}=6138,17*N_d^{-0,273}*L_h^{0,274}*P_s^{-1,231}*I_d^{-0,424} \quad (4.1)$$

За овој случај, избран случајно, во софтверот Matlab креирани се два приказа кои покажуваат каква е зависноста на рапавоста на површината ( $\mu\text{m}$ ) од  $L_h$  - Layer High (mm) и  $N_d$  – Nozzle Diameter (mm), додека  $P_s$  - Printing Speed (mm/s) and  $I_p$  - Infilling (%) се земени како константни. Вредноста на рапавоста на површината, согласно равенката 4.1, може да има минимална и максимална вредност. Тоа е поврзано за вредноста на  $P_s$  и  $I_p$ , кои мора да бидат константни за да се креираат приказите. Во овој случај предзнакот на експоненцијалните вредности е негативен за брзината на печатењето и за пополнетоста. Значи ако тие параметри ги добијат најголемите

вредности ( $P_s = 90 \text{ mm/s}$  и  $I_p = 50 \%$ ) тогаш  $R_a$  ќе ја добие минималната вредност (види Слика 4.28 – а). Истовремено, за најниските вредности ( $P_s = 70 \text{ mm/s}$  и  $I_p = 30 \%$ ) рапавоста ќе ја добие максималната вредност (Слика 4.28-b).



Слика 4.28. Типичен приказ на 3D-график, за експоненцијален модел со 45 степени изработен од PLA, креиран во Matlab а) минимална вредност на рапавоста на површината, кога  $I = 50 \%$  и  $P_s = 90 \text{ mm/s}$ . б) максимална вредност на рапавоста, кога  $I = 30 \%$  и  $P_s = 70 \text{ mm/s}$ .

Истата процедура е применета во сите случаи, само со една разлика кога знакот на експоненцијалот е позитивен за најголемите вредности на параметрите, тогаш се добива најголемата вредност на рапавоста на површината и обратно.

Од равенката 4.1 е генериран 3D-графикот (Слика 4.28-а), за кој подолу е прикажан „m-code“.

```

% m-code for Matlab
n=0.25:0.008:0.6; %Declaration of Nozzle Diameter as vector.
l=0.1:0.005:0.2; %Declaration of Layer Height as vector.
I=50; S=90; %Declaration of constant values for Printing speed
           and Infilling
[N,L]=meshgrid(n,l); %Creation of matrix, based on declared
           vectors
Ra45=6138.17*(N.^-0.273).* (L.^0.274).* (S^-1.231)*(I^-0.424);%
           Equation 4.1
surf(n,l,Ra45); %Creation of 3D surface plot
%Below are all commands to generate the graph
grid on
ax = gca;
c = ax.Color;
ax.GridColor = 'blue';
ax.GridAlpha = 0.3;
grid(gca, 'minor');
colormap('turbo');
colorbar
title('PLA, Мерење под агол 45 степени', 'FontWeight', 'bold',
      'FontSize', 12); %Title of graph
subtitle('Константи: Пополнување 50% и Брзина на печарење
        90mm/s', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 10);
xlabel('Пречник на малазницата [mm]', 'FontWeight', 'bold',
      'FontSize', 11);
ylabel('Височина на слојот [mm]', 'FontWeight', 'bold',
      'FontSize', 11);
zlabel('Рапавост на површината Ra-45[μm]', 'FontWeight', 'bold',
      'FontSize', 11);
clear
clc

```

Текстот со црна боја е самиот код, тој со зелена, после симболот %, е само за објаснување, додека текстот во виолетово се појавува на излезниот фајл/график.

Доколку сакаме да го креираме b) графикот на слика 4.28 ќе остане истиот код, освен вредностите во редот **S = 90; I = 50**; кои ќе се променат во **S = 70; I = 30**, а излезот ќе ја добие максималната вредност за рапавоста на површината.

## 5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

### 5.1 Вовед

Претходните глави го објаснија дизајнот на експериментот базиран на методологијата на Тагучи. Тоа е направено имајќи ги предвид независните параметри и нивните нивоа. Примероците беа отпечатени на 3D-печатачи, а нивната горна површина е оценета со мерење на параметрите  $R_a$ ,  $R_z$ , и  $R_q$ , во три различни правци, под агол 0, 45 и 90 степени (агол помеѓу правецот на печатење и мерење на рапавоста).

Користејќи ја мултирегресионата варијабилна метода, креирани се математички модели за рапавоста на површината, земајќи ги во предвид равенките од глава 3, посебно равенките 3.13 за линеарниот модел и 3.14 за експоненцијалниот модел.

Целта на овие истражувања беше да се дизајнира експеримент, да се отпечатаат примероците на 3D-печатачи, да се моделира и да се евалуира рапавоста на површината на примероците за три термопластични материјали (PLA, ABS и PETG) кои се печатени со технологијата FDM. Исто така користен е и нерѓосувачки челик 316L за да се произведат примероци со две различни технологии, DMLS и FFF.

Микроструктурата на примероците е снимана со дигитален оптички микроскоп, со цел за споредба на различните примероци.

### 5.2 Рапавост на површината на термопластичен материјал PLA печатен со технологијата FDM

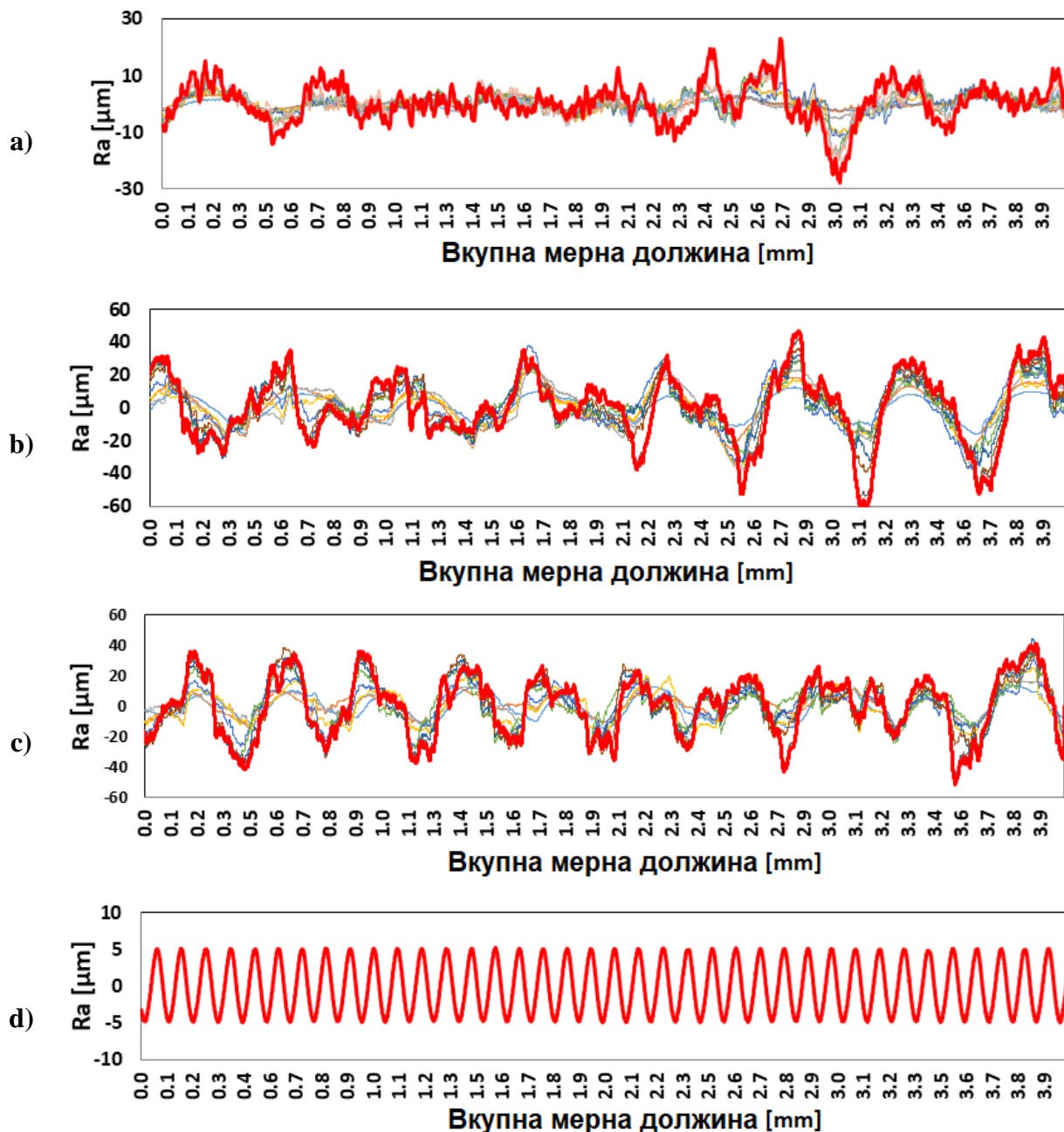
Вкупно беа отпечатени 9 примероци, со влезни параметри кои се дадени во Табела 4.2 од Глава 4. Површините не се дополнително обработувани со некоја од постпроцесните технологии. Правецот на печатење беше поставен да биде 45 степени во однос на ориентацијата на парчето и тој се менува на 90 степени за секој слој.

#### Профили на примероците, PLA

Профилите на сите печатени примероци се измерени и покажани на Слика 5.1. Во секоја од сликите со црвена линија е прикажан просечниот профил на рапавоста. На пример, сликата а) ги прикажува профилите од 9 примероци мерени под агол од 0 степени во однос на правецот на печатење. Распонот на  $R_a$  профилот е во рамките на -20 и 20  $\mu\text{m}$ .

Сликата б) ги покажува профилите мерени под 45 степени во однос на правецот на печатење. Во овој случај распонот на профилот  $R_a$  е во рамките на -60 и 60  $\mu\text{m}$ . Сликата с) ги прикажува профилите мерени под 90 степени во однос на правецот на печатење. Очигледно е дека распонот во овој случај е еднаков со оној од 45 степени.

Просечниот профил на Ra за 0 степени не покажува периодичност. Најгорното ниво на примерокот е печатено во истиот правец, а мерното перо не мерело на второто ниво, кое е под прав агол на најгорното ниво.



Слика 5.1. Измерени профили Ra a) за девет примероци од PLA на 0 степени, b) за девет примероци од PLA на 45 степени, c) за девет примероци на 90 степени, d) за стандарден референтен примерок PLA.

Доколку линијата на печатење на горното ниво не е идеално поставена во однос на правецот на мерење да биде 0 степени, тогаш се јавуваат скокови кога перото ќе ја пресече линијата на печатење, или ќе има минимум кога поминува помеѓу две печатени линии.

Табела 5.1. Независни параметри и нивните нивоа и измерени големини на рапавоста за различни ориентации на примероците PLA.

Бр.	$N_d$ [mm]	$L_h$ [mm]	$P_s$ [mm/s]	$I_d$ [%]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]			$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]			$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]		
					0	45	90	0	45	90	0	45	90
1	0,25	0,10	70	30	1,16	6,12	6,95	5,28	22,40	27,08	1,40	6,94	7,93
2	0,25	0,15	80	40	0,74	4,75	4,63	3,19	21,99	24,07	0,87	5,73	5,62
3	0,25	0,20	90	50	1,02	4,40	3,31	5,49	25,72	20,35	1,25	5,50	4,29
4	0,40	0,10	80	50	1,41	3,72	4,60	6,96	15,61	19,82	1,68	4,31	5,32
5	0,40	0,15	90	30	1,19	4,49	5,09	7,77	21,72	23,23	1,50	5,46	6,03
6	0,40	0,20	70	40	1,96	5,82	6,47	10,25	24,72	26,47	2,37	6,74	7,42
7	0,60	0,10	90	40	1,19	3,04	4,09	7,19	16,49	24,14	1,48	3,89	5,13
8	0,60	0,15	70	50	1,33	4,25	4,51	7,38	22,41	24,91	1,72	5,37	5,58
9	0,60	0,20	80	30	2,29	4,81	4,84	12,96	25,91	29,29	2,93	6,09	6,40

\*Овие параметри се независните варијабли:  $N_d$  – пречник на млазницата  $L_h$  – височина на слојот,  $P_s$  – брзина на печатење и  $I_d$  – густина на пополнување

Просечниот профил на  $R_a$  за 45 степени, покажува многу поголема периодичност од оној на 0 степени, што посебно се појавува во вториот дел на приказот. Најдобра периодичност се добива кај мерењата под агол 90 степени. Ова е и логично бидејќи перото оди под прав агол во однос на печатените линии на последното ниво. Јасно може да се видат 10 максимуми на 4 mm должина, што покажува дека 0.4 mm е растојанието помеѓу соседните линии на тоа ниво.

Резултатите на рапавоста на површината за  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$ , за правците 0, 45 и 90 степени, за секоја од пробите, се дадени во Табела 5.1.

### Теоретски модели за параметарот на рапавост $R_a$ , за PLA

Дефинирани се теоретските модели за линеарна и експоненцијална зависност на  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$  за трите правци (0,45,90).

Врз основа на податоците од Табела 5.1 креиран е моделот за  $R_a$  и прикажан во Табела 5.2. (Анекс 2). Во Додатокот 2 е прикажано како се генерирани теоретските модели за сите правци и материјали. Исто така покажани се пресметките за генерирање на графиконите за статистичка дистрибуција на податоците. Врз основа на статистичките податоци обата теоретски модели се неуспешни за мерењата на 0 степени. Значајноста на  $F$ , од ANOVA, се препорачува да има вредност за алфа коефициентот помала од 0,05. Во овој случај, за линеарниот модел вредноста е 0,24, а за експоненцијалниот 0,29. Очигледно дека резултатите од овој модел не се статистички значајни.



Теоретските модели за 45 и 90 степени покажуваат силна врска помеѓу независните и зависните варијабли. Значајноста F е пониска од алфа вредноста (0,05). Со тоа се докажува дека обата модела се статистички значајни.

Табела 5.2. Линеарни и експоненцијални модели и нивните статистички податоци за 0, 45 и 90 степени на мерење во однос на линијата на печатење, за  $R_a$  и примерок изработен од термопластика PLA.

Степени	Теоретски модел*	Multiple R	R Square	Standard Error	ANOVA significance F
0	$R_{a0} = 1,878 + 1,72N_d + 5,03L_h - 0,02P_s - 0,01I_d$	0,825	0,681	0,381	0,240
	$R_{a0} = 1082,04N_d^{0,551}L_h^{0,357}P_s^{-0,971}I_d^{-0,345}$	0,801	0,642	0,285	0,291
45	$R_{a45} = 12,50 - 3,03N_d + 7,17L_h - 0,07P_s - 0,05I_d$	0,985	0,971	0,226	0,002
	$R_{a45} = 6138,17N_d^{-0,273}L_h^{0,274}P_s^{-1,231}I_d^{-0,424}$	0,989	0,979	0,042	0,001
90	$R_{a90} = 16,33 - 1,55N_d - 3,4L_h - 0,09P_s - 0,07I_d$	0,932	0,870	0,575	0,046
	$R_{a90} = 16955,48N_d^{-0,059}L_h^{-0,116}P_s^{-1,437}I_d^{-0,586}$	0,928	0,862	0,117	0,047

\* Овие параметри се независните варијабли:  $N_d$  – пречник на млазницата  $L_h$  – височина на слојот,  $P_s$  – брзина на печатење и  $I_d$  – густина на пополнување

Апсолутната вредност на коефициентот на корелација R е скоро ист за линеарниот и експоненцијалниот модел за секој од степените на ориентација на мерење и обата модели укажуваат на силна корелациона врска. За 45 степени има мала предност кај експоненцијалниот модел, а спротивно е за моделот за 90 степени. Исто така, обата теоретски модели покажуваат сличност во пресметаните точки на регресионата линија. Овој коефициент е определен со R square од Табела 5.2.

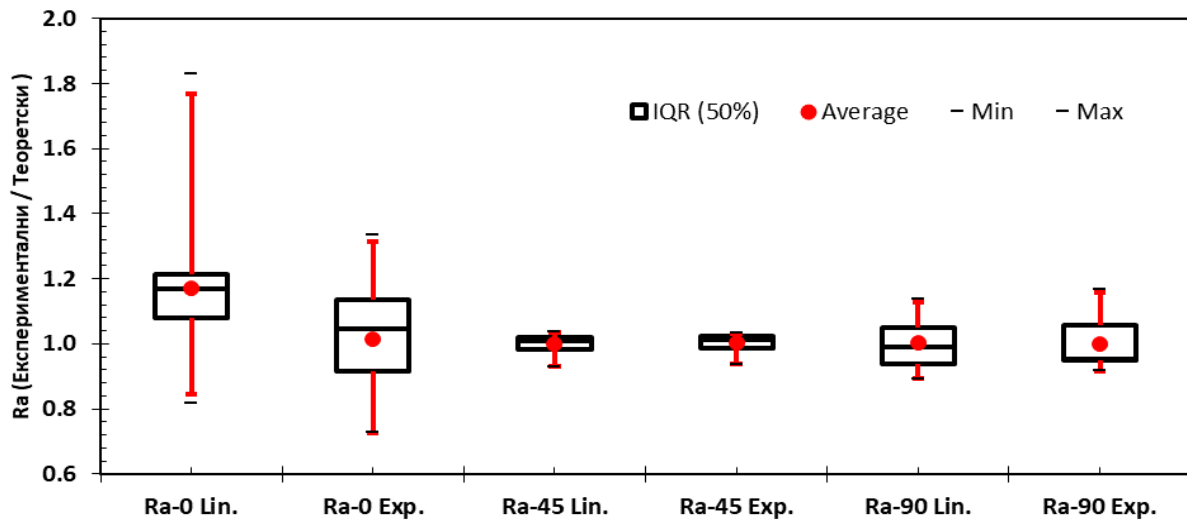
И покрај сличноста на обата теоретски модела за 45 и 90 степени на мерење, сепак постои мала предност на експоненцијалниот модел. Стандардната грешка на експоненцијалниот модел е до пет пати помала од онаа на линеарниот, за секоја од сериите на примероци.

Од тестот ANOVA може да се заклучи дека сите модели го задоволуваат критериумот за квалитет бидејќи значајноста F е помала од алфа вредноста ( $\alpha = 0,05$ ).

Сите независни варијабли на обата модели, за 45 степени, покажуваат значителна зависност во однос на рапавоста на површината бидејќи имаат p-вредност помала од алфа.

За теоретските модели со 90 степени, пречникот на млазницата и височината на слојот имаат повисока  $p$ -вредност од 0,05. Останатите независни варијабли успешно го поминуваат  $p$ -критериумот.

Со цел за споредба и визуализација на теоретските модели, пресметана е вредноста  $R$  за измерените и пресметаните вредности на рапавоста на површината.



Слика 5.2. Дистрибуција на соодносот помеѓу експериментално/теоретски резултати за линеарните и теоретски модели во истражуваните правци, PLA.

За обата модела и трите серии за различни правци на мерења направена е споредбена анализа. Соодносот на добиените вредности за измерените и пресметаните големини на рапавоста на површината е прикажан на сликата 5.2. Значењето на поединечните ознаки е следново: црвен круг = средна вредност, кутија = 50 % од распонот, вертикална црвена линија = 90 % од распонот, хоризонтална црвена линија во кутијата = медијана, црни линии надвор од кутијата = минимална и максимална вредност.

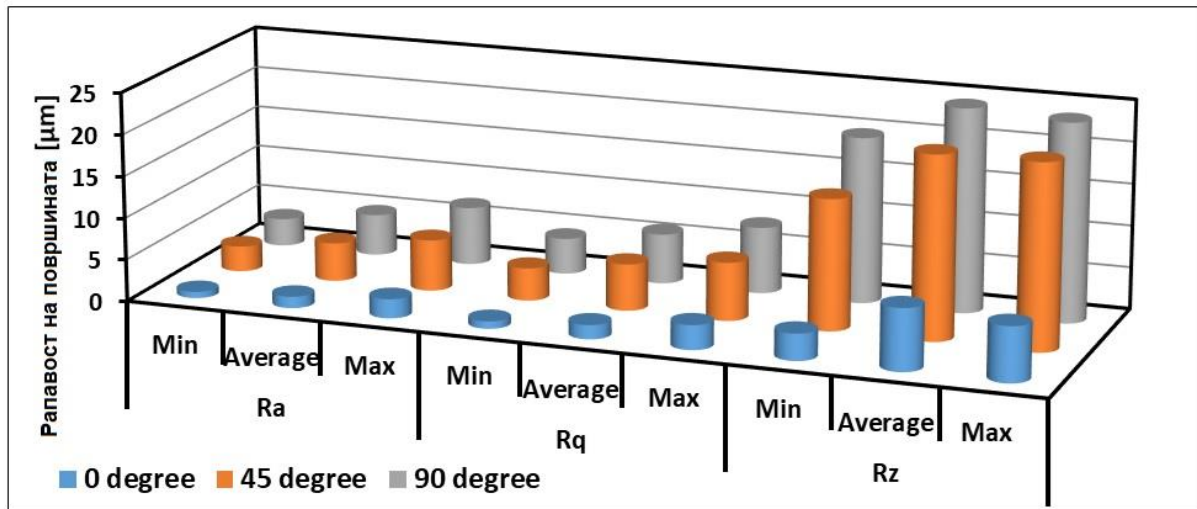
Очигледно е дека дистрибуцијата на соодносот помеѓу теоретските и експерименталните вредности за  $R_a - 0$  е многукратно повисока во однос на резултатите за 45 и 90 степени. Постојат само три исклучоци од сите претставени примери и сите припаѓаат на линеарниот модел со 0 степени. Исто така може и тука да се забележи дека дистрибуциите за  $R_a-45$  и  $R_a-90$  се многу добро дефинирани.

### Споредба помеѓу параметрите за рапавост $R_a$ , $R_z$ и $R_q$ за измерените и пресметаните вредности за термопластиката PLA.

Во оваа секција ќе се дискутира споредбата на параметрите на рапавост  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$ . Сите овие параметри се мерени за ист примерок и резултатите за секоја од сериите се прикажани во табелата 5.1. Логично е да постои разлика меѓу овие вредности која произлегува и од нивната дефиниција.

За истиот примерок параметарот  $R_a$  покажува најмали резултати, потоа малку поголеми  $R_q$  и на крајот најголемите вредности припаѓаат на  $R_z$ . Сите три големини покажуваат идентична зависност на резултатите во зависност од правецот на мерење.

Секогаш 0 правец на мерење покажува најмали резултати, 45 степени е со најмалку четири пати поголеми вредности од 0 правецот, додека правецот од 90 степени е со малку поголеми вредности од правецот од 45 степени.

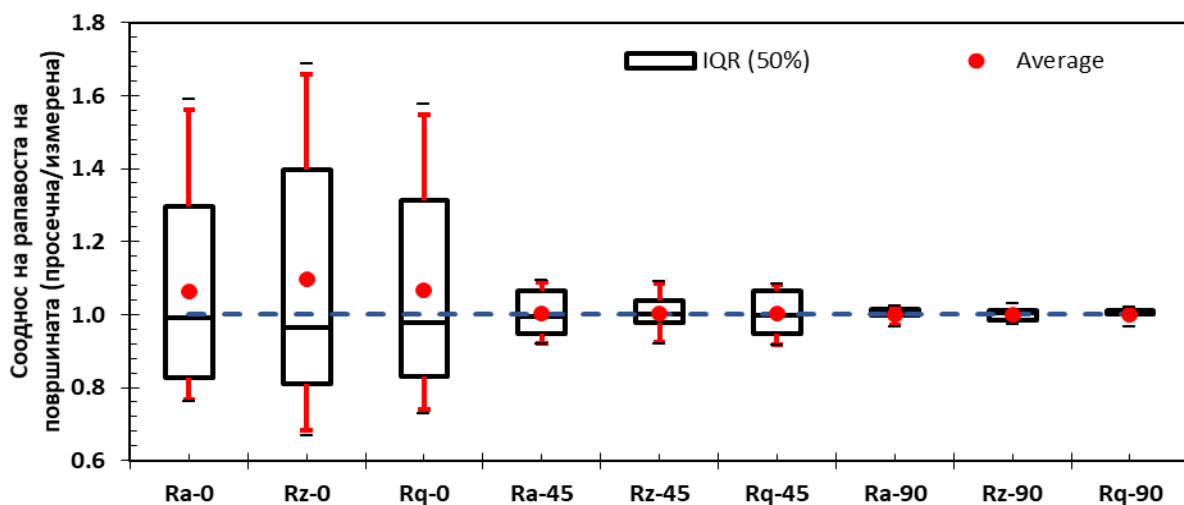


Слика 5.3. Одбрани вредности на измерени параметри на рапавоста на површината за различни правци на мерење, PLA.

### Стабилност на експерименталната повторливост на рапавоста на површината Ra, за PLA

Повторливоста на некој експеримент е мерка на веројатност дека после измерената вредност од некој експеримент истата ќе се повтори при повторувањето на експериментот под истите услови. Ова е направено за да се потврди квалитетот на резултатите добиени со експериментите.

Истите примероци од PLA се мерени десет пати за аглите 0,45 и 90 степени и по случаен избор е избран примерок број 1. За секоја серија од мерења е пресметана средната вредност која е поделена со измерената вредност. Статистичката дистрибуција на рапавоста на површината е прикажана на слика 5.4



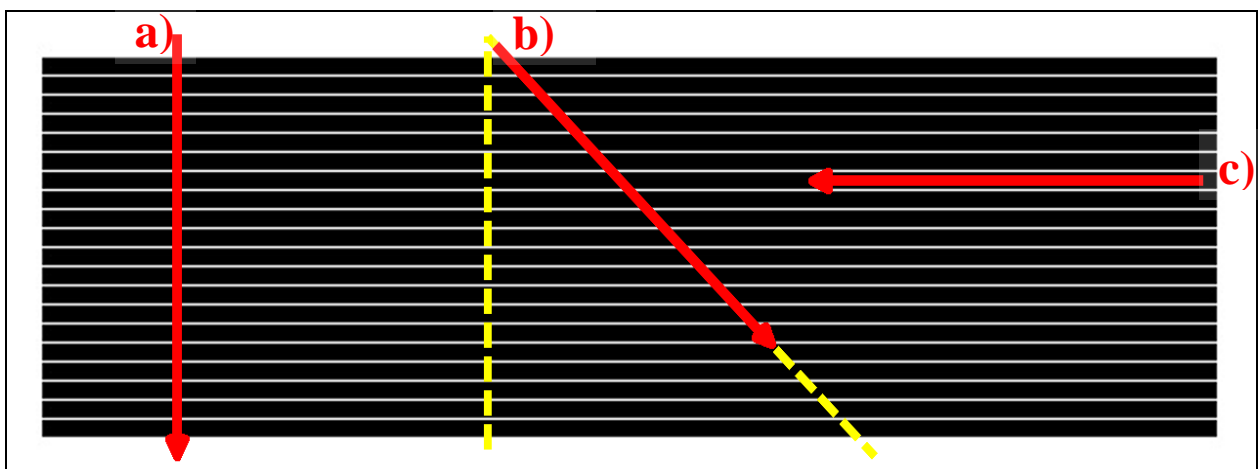
Слика 5.4. Повторливост на рапавоста на површината (Ra, Rz и Rq) за 0,45 и 90 степени на мерење, n = 10, за PLA.

Тестот на повторливост е групиран во зависност од правецот на мерење на примерокот. Широкиот распон е за 0 правец на мерење, потесниот е за 45 степени, а најдобрите резултати се за 90 степени на мерење. Статистичката дистрибуција за 0 правец на мерење покажува широк распон на резултати при мерење на истите примероци. Распоните се од 28 % до 62 %. Може да се заклучи дека при мерења во правец од 0 степени не се добиваат истите резултати при повторување на експериментите. Оттука, може да констатираме дека мерењето со правец од 0 степени не би можело да служи како стандард за квантифицирање на рапавоста на површината.

Статистичката дистрибуција за агол на мерење од 45 степени припаѓа кон распони од 8 % под просекот, па сè до 9 % над просекот. Исто така и овој распон може да се смета за доста широк за да претставува критериум за креирање на математички модели. Третата серија е за правец на мерење од 90 степени. Статистичката дистрибуција на нивниот сооднос е многу тесна, од помалку од 3 % од средната вредност, па сè до 2 % над. Овие мерења покажуваат приближно 95 % ниво на покривање и се познати како точност  $k = 2$ .

Квалитетот на експериментот на повторливост може логички да се објасни со подетална анализа на правецот на мерење. Сликата 5.5 ја покажува горната површина на примерокот. Црните хоризонтални линии го покажуваат правецот на печатените линии, додека црвените линии го покажуваат правецот на мерење. Жолтите линии го покажуваат аголот од 45 степени, помеѓу правецот на мерење и правецот на печатените линии.

Кога се обидуваме да го повториме мерењето со правец од 0 степени (Слика 5.5с) треба да бидеме многу прецизни бидејќи и најмало отстапување во ориентацијата ќе има големо влијание врз измерените резултати. Може да се заклучи дека поставувањето на мерната опрема може да има големо влијание врз резултатите.



Слика 5.5. Мерење на правецот на рапавоста на површината (црвена линија) во однос на правецот на печатење (црна линија). а) 90 степени, б) 45 степени (аголот е дефиниран со жолта линија) и с) 0 степени.

Исто така поставување на аголот на мерење во правец од 45 степени (слика 5.5b) може да креира грешка бидејќи малото отстапување од аголот ќе го зголеми или ќе го намали бројот на врвови. Можеме да заклучиме дека најмала грешка за време на поставувањето на експериментот е онаа при 90 степени на мерење, за мерење на примероците од термопластика PLA. Заради тоа, во понатамошните анализи ќе бидат претставени само резултатите од мерењата при 90 степени.

### **Значајност на независните параметри врз рапавоста на површината врз основа на теоретскиот модел, PLA**

Главната намера во овие истражувања е да се најде соодветна комбинација на независни варијабли и прецизно да се определи големината и распонот на рапавоста на површината Ra. Екстремните вредности на рапавоста, генерирани врз основа на специфични комбинации на независните варијабли, се прикажани во Табелата 5.3.

Како по правило, линеарните модели даваат малку помали резултати во однос на експоненцијалните модели. За 90 степени минималните и максималните вредности за линеарниот и експоненцијалниот модел се соодветно на вредностите 2.83 и 7.01  $\mu\text{m}$  и 3.31 и 7.31  $\mu\text{m}$ .

Сите истражувани независни фактори имаат своја значајност за рапавоста на површината, но нивната важност е различна за различен модел. На пример, ако се поредат врз основа на влијание, од најголемото до најмалото, за линеарниот модел, ќе добиеме: височина на слојот, пречник на млазницата, брзина на печатење и процент на пополнетост. Кај експоненцијалниот модел редоследот е: брзина на печатење, процент на пополнетост, височина на слојот и пречник на млазницата.

Од равенките на теоретските модели е разбирливо дека кога пред коефициентот на варијаблата е негативен предзнак тогаш со зголемувањето на вредноста на варијаблата ќе се намалува големината на рапавоста и обратно. Најмали резултати се добиени кога се мерело под агол од 0 степени, но заради ниската неодреденост генерирана со тестот на повторливост, тие не можат да имаат научна ниту практична примена.

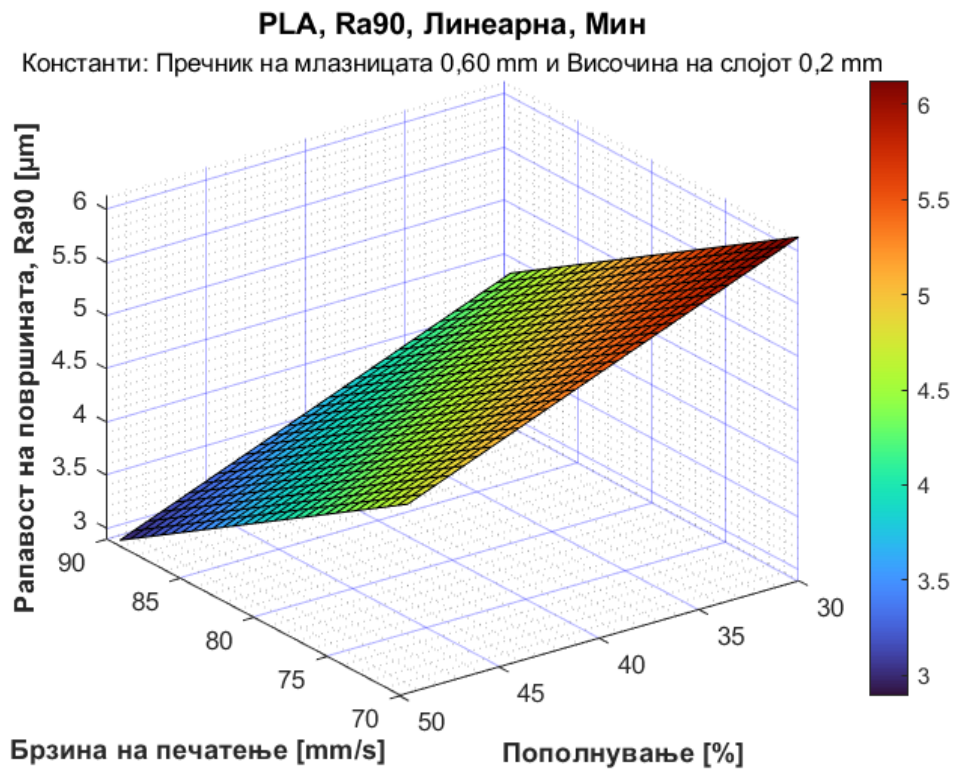
Табела 5.3. Екстремни вредности на рапавоста на површината добиени од математичките модели генерирани со специфична комбинација на независните варијабли, PLA.

Правец	Екстремни вредности	Независни варијабли				Теоретски модел	
		$N_d$ [mm]	$L_h$ [mm]	$P_s$ [mm/s]	$I_d$ [%]	Линеарен [ $\mu\text{m}$ ]	Експоненцијален [ $\mu\text{m}$ ]
0	Min	0,25	0,1	90	50	0,31	0,73
	Max	0,60	0,2	70	30	2,10	2,30
45	Min	0,60	0,1	90	50	2,47	2,81
	Max	0,25	0,2	70	30	6,68	7,30
90	Min	0,60	0,2	90	50	2,83	3,31
	Max	0,25	0,1	70	30	7,01	7,31

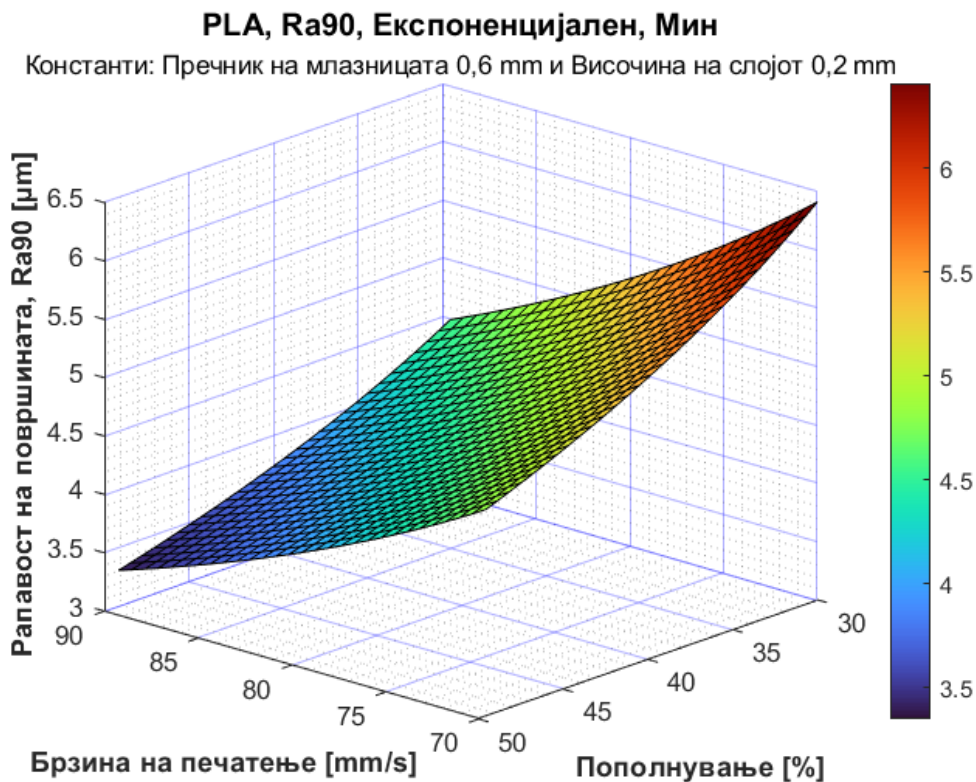
За да се има подобра претстава за значајноста на поединечните варијабли врз рапавоста на површината дефинирана со Ra, генерирани се 3D-прикази.

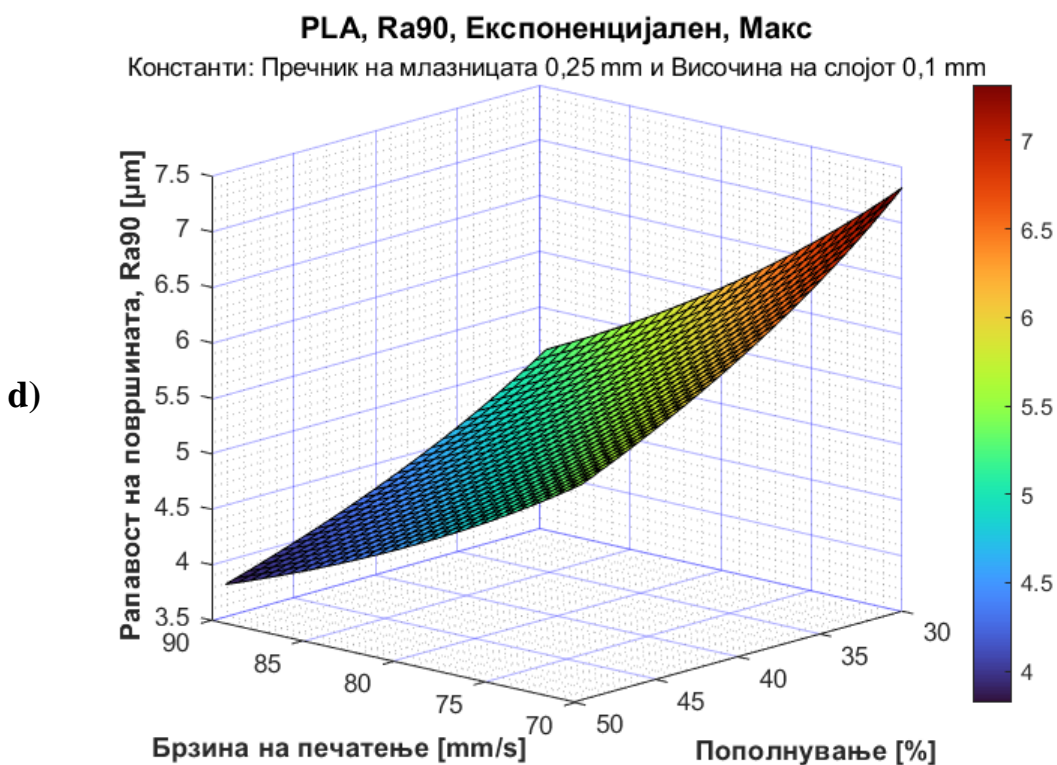
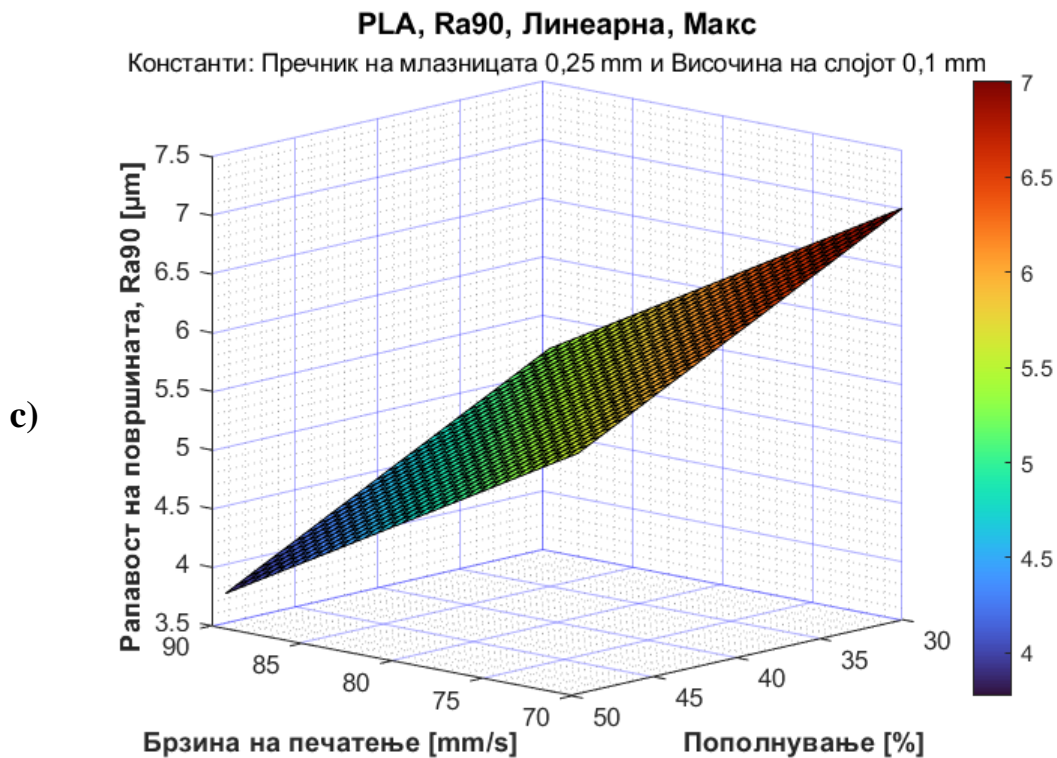
Избрани се одредени 3D-прикази (Слика 5.6) со екстремни вредности за линеарниот и експоненцијалниот модели на рапавоста на површината, за 90 степени агол на мерење. На овие прикази x и y го претставуваат распонот на независните варијабли, додека двете останати се константни. На z-оската е прикажана рапавоста на површината која се истражува. Дополнителни прикази од истражувањата се дадени во Анекс 1. Во овој додаток ги имаме дијаграмите за Ra-0 и Ra-45 степени, линеарен и експоненцијален модел, за материјалите PLA, ABS, PETG и 316L.

a)



b)





Слика 5.6. Вредности на рапавоста на површината Ra за PLA: а) Линеарен модел за 90 степени, минимални, б) Експоненцијален модел за 90 степени, минимални, с) Линеарен модел за 90 степени, максимални, д) Експоненцијален модел за 90 степени, максимални.



### 5.3 Рапавост на површината Ra-90 за термопластика ABS печатена со технологија FDM

Се покажа низ експериментите со пластиката PLA дека пречникот на млазницата има најмало влијание врз теоретскиот модел. Затоа, пречникот на млазницата е исклучен од независните варијабли за експериментите со материјалот ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene). Тоа е затоа што истражуваната површина е рамна, но доколку таа е извиткана, тогаш влијанието на овој параметар би било поголемо.

Во Табела 5.4 е прикажан дизајнот на експериментот со три независни варијабли (височина на слојот, брзина на печатење и процент на пополнување) и три нивоа на вредности, согласно методот на Тагучи.

Табела 5.4. Независни параметри и измерени резултати за Ra-90, ABS.

Бр.	L <sub>h</sub> - височина на слојот [mm]	P <sub>s</sub> - брзина на печатење [mm/s]	I <sub>p</sub> - густина на пополнување [%]	R <sub>a</sub> - 90 [μm]
1	0,1	70	30	4,59
2	0,1	80	40	4,96
3	0,1	90	50	5,02
4	0,15	70	40	5,32
5	0,15	80	50	5,46
6	0,15	90	30	5,73
7	0,2	70	50	5,41
8	0,2	80	30	6,12
9	0,2	90	40	6,48

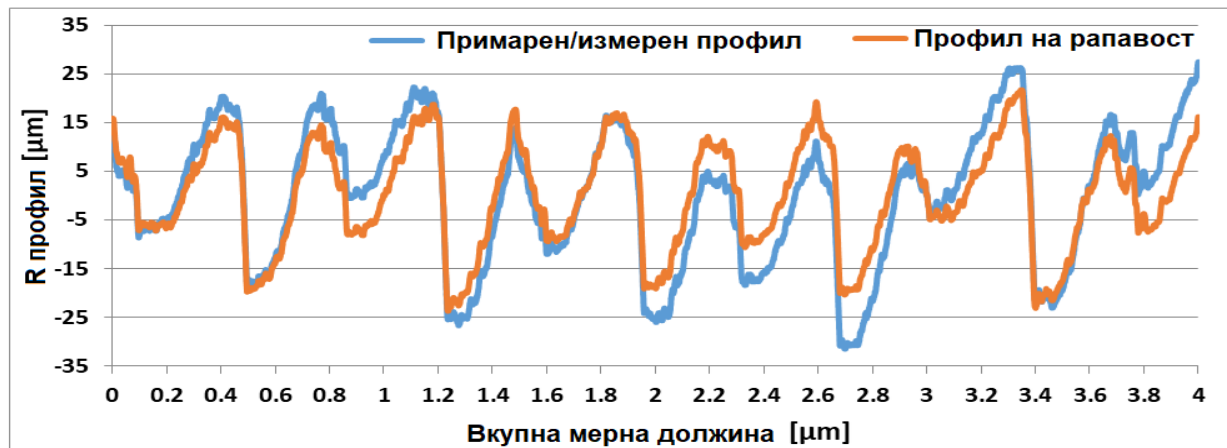
Како што беше и порано спомената ќе се разгледува само рапавоста Ra-90 за термопластиката ABS. Мерењата и анализата за Rz и Rq за 0,45 и 90 степени се исто така направени и анализирани, но тука ќе го примениме заклучокот од глава 5.2 за термопластиката PLA, а се однесуваат на овие параметри.

За овие експерименти распонот и вредностите на независните варијабли се исти како и за термопластиката PLA и PETG, кои се разгледуваат во ова поглавје.

### Профили на рапавоста на површината на примероците ABS

Горниот слој на истопениот материјал е скениран со микроскоп на вообичаената светлина. Пречникот на пластичниот конец е 1.75, а пречникот на млазницата е 0.4 mm.

За да се постигне добар квалитет на површината, височината на слојот треба да е од 15 % до 75 % од пречникот на млазницата. Во нашиот случај тој распон е од 0,1 до 0,2 mm.



Слика 5.7. Измерен и пресметан профил на примерок 2 за термопластика ABS.

Резултатите на рапавоста на површината за истиот примерок се еднакви во смисла на големина (Слика 5.7). Можат да постојат разлики во фазите на синусоидите, кои понекогаш може да започнат во почетната точка на системот и да завршат во максимумот, во зависност од тоа каде е започнато мерењето.

### Теоретски модели на параметарот Ra-90 за ABS

Врз основа на независните варијабли од Табела 5.5 пресметани се теоретските модели за Ra на примероците изработени од полимерот ABS. Обата модели ги задоволуваат сите критериуми ANOVA за алфа коефициентот да е помал од 0.05 и R square да е поголем од 90 %, за сите податоци на истражуваната рапавост.

Табела 5.5. Линеарен и експоненцијален модел и нивните статистички податоци за Ra-90, за термопластика ABS.

Правец	Теоретски модел *	Multiple R	R Square	Standard Error	ANOVA significance F
90	$R_{\alpha 90} = 1.554 + 11.166L_h + 0,031P_s - 0,009I_d$	0,974	0,949	0,167	0,012
	$R_{\alpha 90} = 1.559 * L_h^{0.303} P_s^{0.459} I_d^{-0.047}$	0,979	0,959	0,027	0,002

\* Овие параметри се независните варијабли:  $L_h$  – височина на слојот,  $P_s$  – брзина на печатење и  $I_d$  – густина на пополнување

Рапавоста на површината Ra практично е иста во смисла на multiple R корелациониот коефициент за линеарниот и експоненцијалниот модел. Обата модели покажуваат значајна позитивна поврзаност. Дополнително, обата теоретски модели имаат

споредливи проценети вредности на регресионата линија. Заокружените вредности на  $R^2$  се 0.95 и 0.96.

Предзнаците на независните варијабли исто така покажуваат сличност помеѓу обата модела. Височината на слојот и брзината на печатење покажуваат позитивни трендови, додека густината на пополнување покажува негативен тренд.

Забележана е разлика помеѓу стандардните грешки на моделите за Ra-90. Линеарниот модел има за шест пати поголема стандардна грешка во однос на експоненцијалниот.

### Значајност на независните параметри за рапавоста на површината врз основа на теоретските модели, ABS

За обата теоретски модели забележано е дека независните варијабли, височина на слојот и брзина на печатење, имаат значајна поврзаност со рапавоста на површината Ra-90. Нивните  $p$ -вредности се помали од 0.05. Вредноста за варијаблата густина на пополнување за линеарниот, 0.23 и експоненцијалниот 0.32 не ги задоволуваат бараните граници.

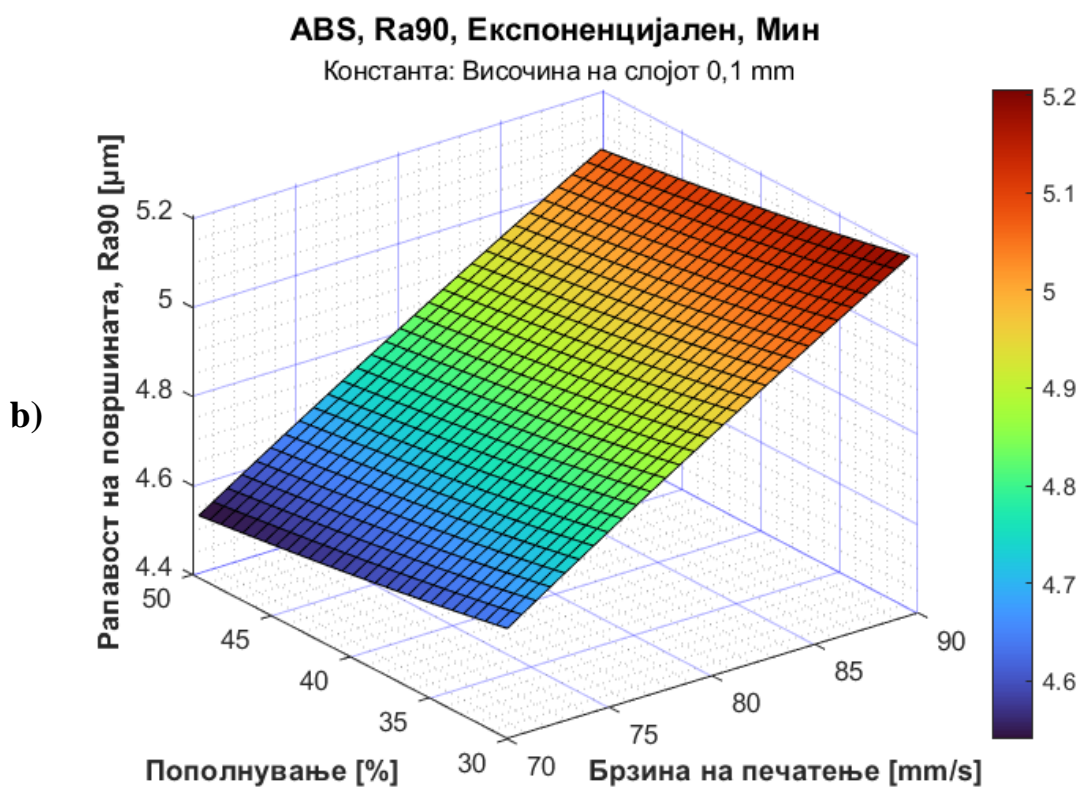
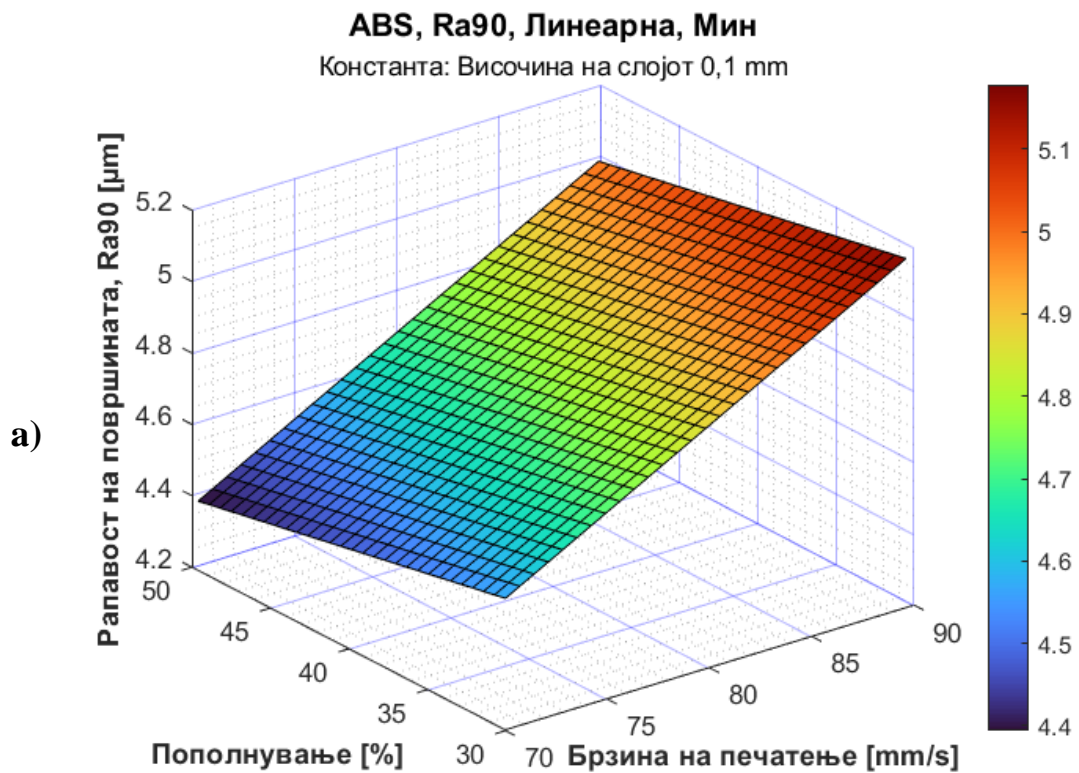
Табела 5.6. Екстремни вредности на рапавоста на површината добиени од математичките модели генерирани со специфична комбинација на независните варијабли, ABS.

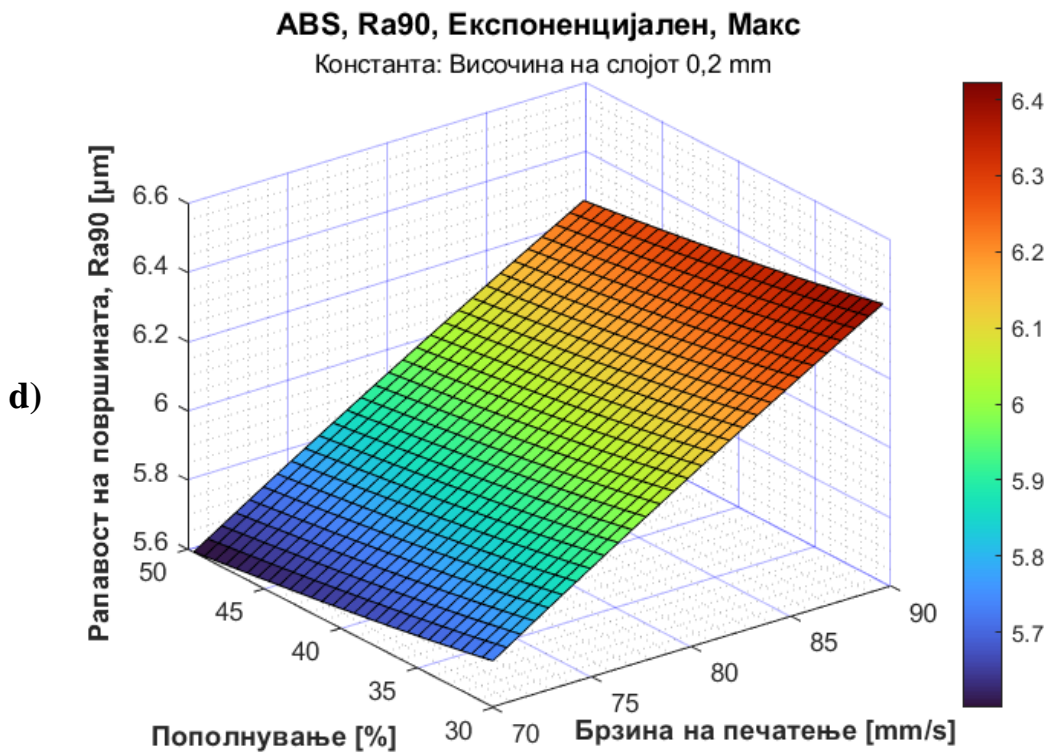
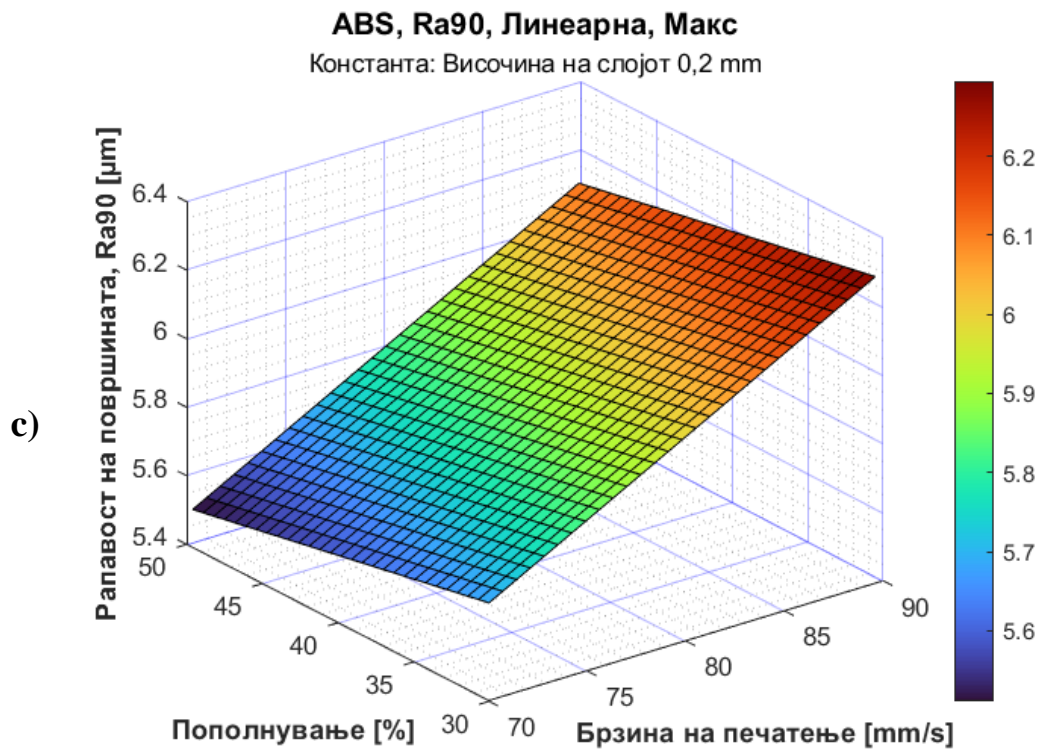
Правец	Екстремни вредности	Независни варијабли			Теоретски модел	
		$L_h$ [mm]	$P_s$ [mm/s]	$I_d$ [%]	линеарна [ $\mu\text{m}$ ]	експоненција лен [ $\mu\text{m}$ ]
90	Min	0,1	70	50	4,391	4,538
	Max	0,2	90	30	6,307	6,436

Во Табела 5.8 дадени се екстремни вредности на рапавоста, за одредена комбинација на независните варијабли. Може да се забележи големата сличност на обата теоретски модели, за екстремните вредности на Ra.

Во Matlab се генерирани најпретставителни прикази со екстремни вредности, од кои може да се види влијанието на независните варијабли врз рапавоста за Ra-90. Прикажани се четири 3D-прикази на слика 5.6.

Пополнетоста и брзината се прикажани на  $x$  и  $y$  оските, додека височината на слојот е константна големина (0.1 и 0.2 mm за минимална и максимална вредност). Рапавоста на површината Ra-90 е прикажана по должината на  $z$ -оската. Во Анекс 2 се дадени и други значајни прикази од анализата.





Слика 5.8. Екстремни вредности на рапавоста на површината Ra -90 за ABS-термопластика, a) Линеарен модел со минимални вредности, b) Експоненцијален модел со минимални вредности, c) Линеарен модел со максимални вредности, d) Експоненцијален модел со максимални вредности.

#### 5.4 Рапавост на површината Ra-90 за термопластика PETG печатена со технологија FDM

Пречникот на млазницата го има најмалото влијание во теоретскиот модел, согласно експериментите реализирани со термопластиката PLA. Користејќи ја методата на Тагучи во Табела 5.7 прикажан е дизајнот на експериментот со три независни варијабли и три нивоа на варијаблите, за термопластиката PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol). Како и во претходниот случај независни варијабли се:  $L_h$  – височина на слојот (mm),  $P_s$  – Брзина на печатење (mm/s) и  $I_p$  – Процент на пополнетост (%)

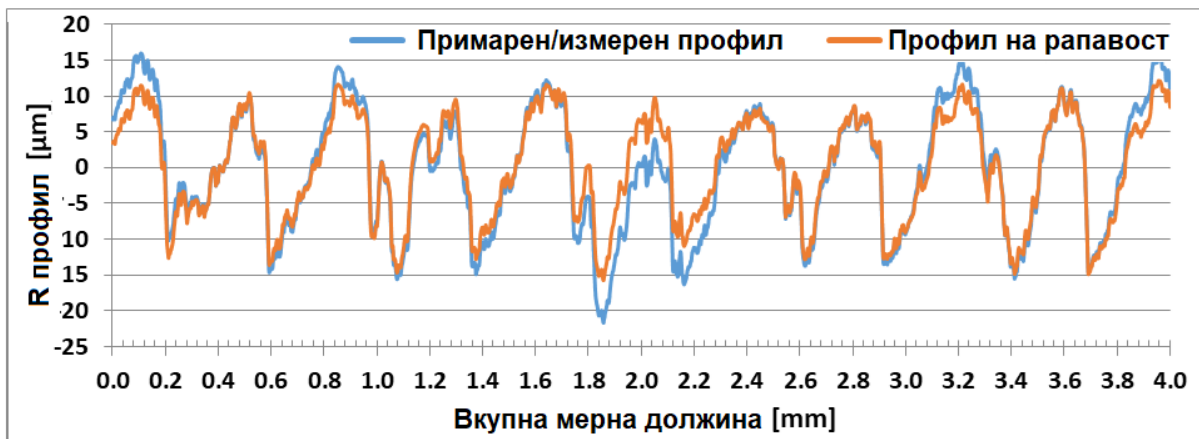
Табела 5.7. Независни параметри и измерени резултати за рапавоста на површината Ra-90, PETG

Бр.	$L_h$ - височина на слојот [mm]	$P_s$ - брзина на печатење [mm/s]	$I_p$ - густина на пополнување [%]	$R_a - 90$ [ $\mu$ m]
1	0,1	70	30	6,45
2	0,1	80	40	7,18
3	0,1	90	50	7,44
4	0,15	70	40	7,95
5	0,15	80	50	8,18
6	0,15	90	30	8,56
7	0,2	70	50	7,39
8	0,2	80	30	9,34
9	0,2	90	40	9,94

Само рапавоста на површината Ra-90 ќе се анализира согласно објаснувањата дадени во поглавјето 5.2. И во овие експерименти распоните и вредностите на независните варијабли се еднакви со оние за термопластиката PLA и ABS, обработени во претходните поглавја.

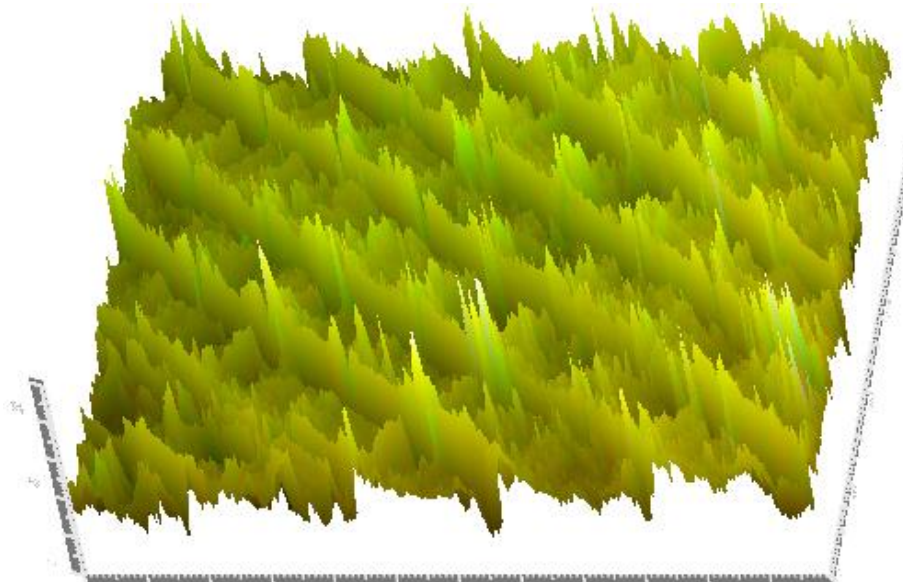
#### Профили на рапавоста на површината на примероците PETG

Секој од примероците е мерен со инструментот за мерење на рапавост, како и сликана е горната површина со оптички микроскоп дополнет со дигитална камера. Реализирани се девет експериментални проби за секој од примероците. Секоја од пробите го даде примерниот профил, а пресметките ги дадоа R-профилите. На сликата 5.9 - се дадени профилите добиени од примерокот 2. Очигледна е големата сличност помеѓу двата приказа.



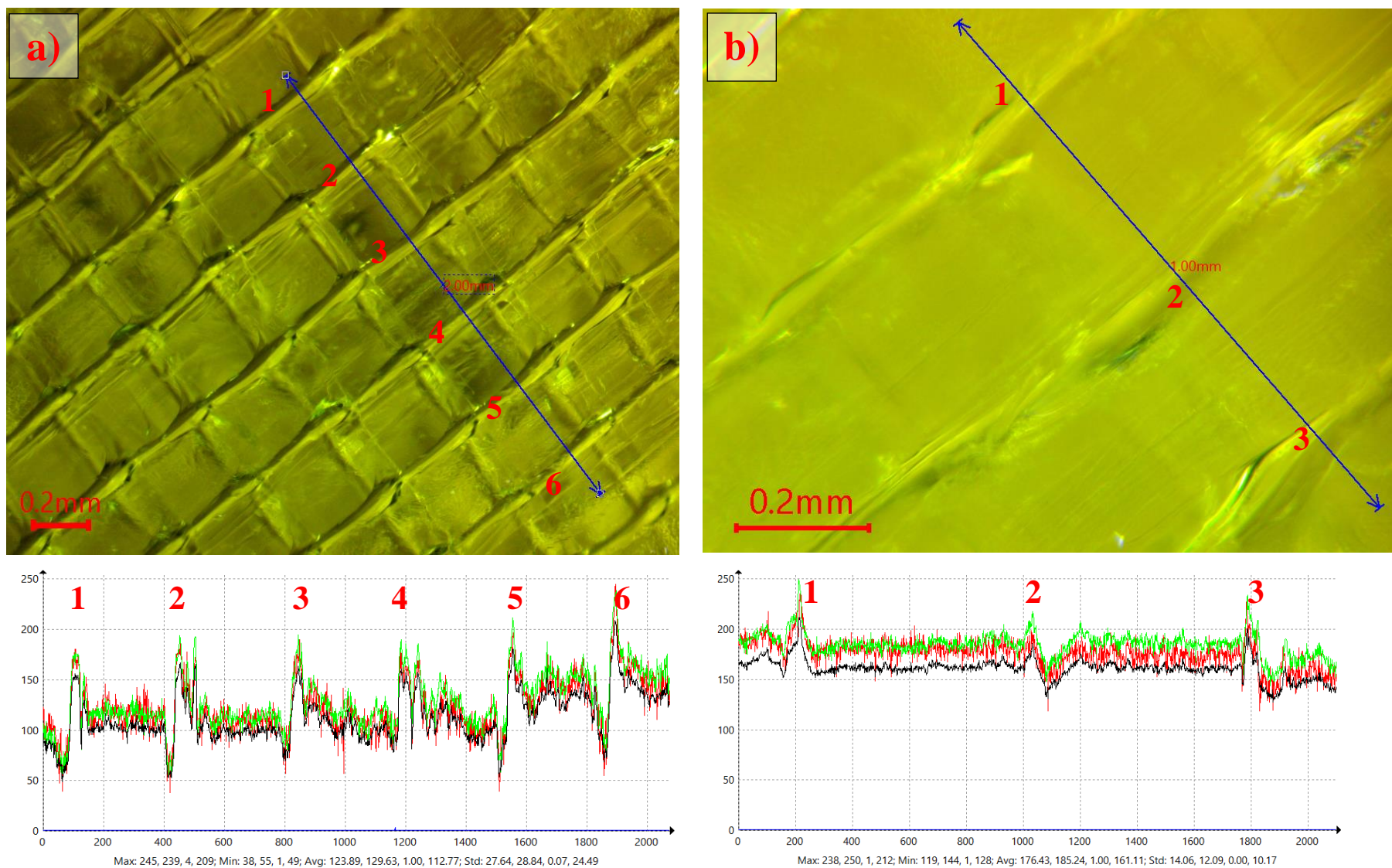
Слика 5.9. Измерен и пресметан профил од примерокот број 2 за PETG.

Амплитудите на профилот на рапавоста на површината, во најголемиот број на случаи, се секогаш помали од измерените вредности. Површините на примероците се брановидни, со најсилна рефлексивност од страниците и сенка во коритото (слика 5.10).



Слика 5.10. Приказ на површината на примерок од PETG добиен со оптички микроскоп.

Сликите добиени со оптичкиот микроскоп користеа зум X4 и X10. Површината е осветлувана со ЛЕД-светлина (Light Emitting Diode). На сликата 5.11-а е прикажана сина линија која поминува низ шест печатени линии, соодветно означени со броеви. Приказот под сликата го покажува интензитетот на светлината одбоен од површината на примерокот. Бојата на профилните линии се менува во зависност на својствата на рефлексивност на материјалот, што го има и најголемо влијание врз процентот на рефлексивноста.



Слика 5.11. Скенирана со оптички микроскоп површина од примерок 2 изработен од материјал PETG, а) сината линија (2 mm) поминува низ шест печатени линии, а под неа е профилот со шест специфични максимуми, б) сината линија со 1mm должина поминува низ три печатени линии, а под неа се покажани профилите.



### Теоретски модели за параметарот за рапавост Ra, PETG

И во овој приказ се дадени анализи само за измерените примероци под агол од 90 степени. И за преостанатите агли се направени мерења и пресметки, но заклучоците од анализата на термопластиката PLA важат и за овој материјал, во однос на аголот на мерење.

Табела 5.8. Линеарен и експоненцијален модел и нивните статистички податоци за Ra-90, за термопластика PETG

Правец	Теоретски модел *	Multiple R	R Square	Standard Error	ANOVA significance F
90	$R_{a90} = 0,608 + 18,666L_h + 0,069P_s - 0,022I_d$	0,933	0,871	0,501	0,012
	$R_{a90} = 1,017 * L_h^{0,335} P_s^{0,686} I_d^{-0,078}$	0,941	0,885	0,058	0,0088

\* Овие параметри се независните варијабли:  $L_h$  – височина на слојот,  $P_s$  – брзина на печатење и  $I_d$  – густина на пополнување

Направени се пресметки за овој специфичен случај, а резултатите се прикажани во табела 5.8.

Обата модели генерално се статистички прифатливи врз основа на значајноста F на ANOVA која е помала од 0.05, додека рапавоста Ra-90 на измерените примероци соодветствува 93 % во однос на моделите на површината.

### Значајност на независните параметри за рапавоста на површината врз основа на теоретските модели, PETG

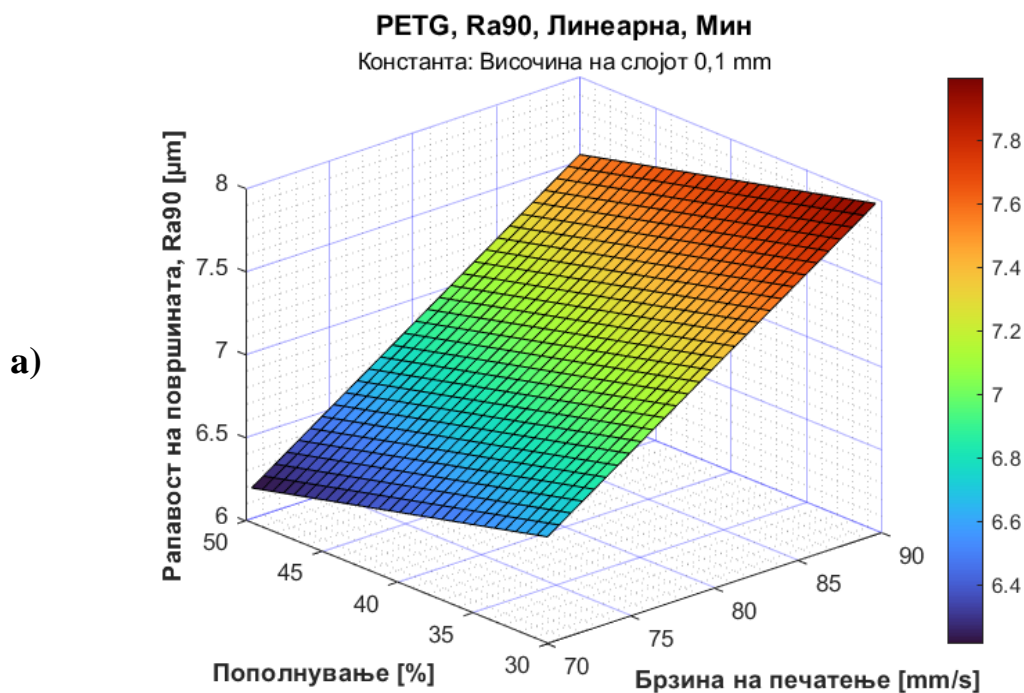
Табелата 5.9 ги покажува екстремните вредности на рапавоста на површината Ra-90 добиени со одредена комбинација на независните варијабли.

Линеарниот модел дава малку пониски резултати во однос на експоненцијалниот. Минималните и максималните вредности за Ra-90 за линеарниот модел се 6.20 и 9.81, а за експоненцијалниот 6.39 и 9.96. Сите истражувани независни варијабли имаат свое влијание врз рапавоста на површината. За обата модела, ако ги наредиме од оној со највисоко влијание до оној со најмало, ќе добиеме: височина на слојот, брзина на печатење, процент на пополнетост.

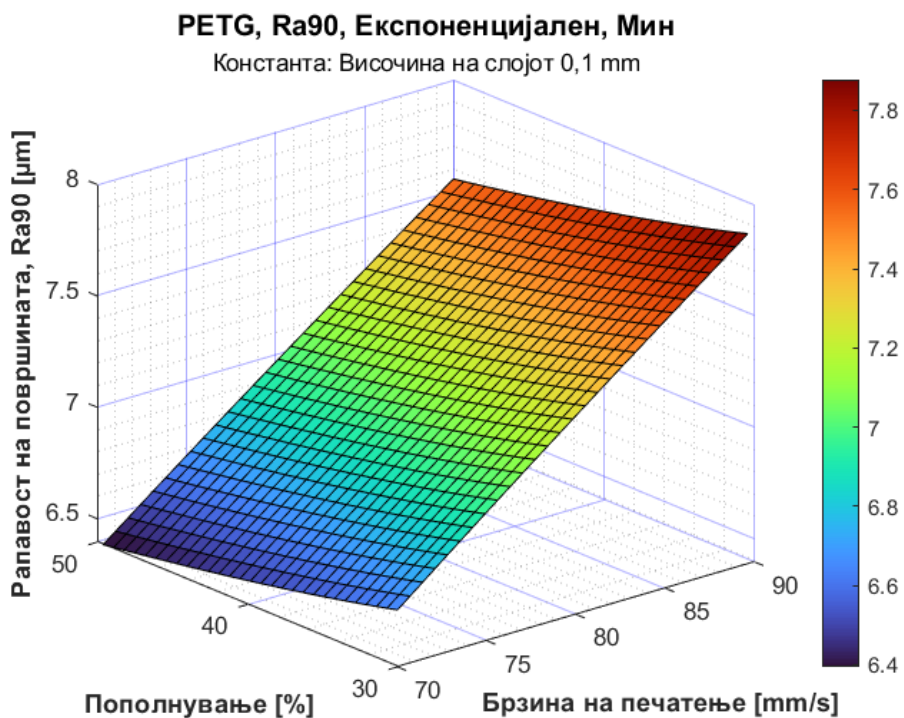
Табела 5.9. Екстремни вредности на рапавоста на површината добиени од математичките модели генерирани со специфична комбинација на независните варијабли, PETG

Правец	Екстремна вредност	Независни варијабли			Теоретски модел	
		$L_h$	$P_s$	$I_d$	линеарна	експоненција
		[mm]	[mm/s]	[%]	[ $\mu\text{m}$ ]	лен [ $\mu\text{m}$ ]
90	Min	0,1	70	50	6,204	6,391
	Max	0,2	90	30	9,891	9,967

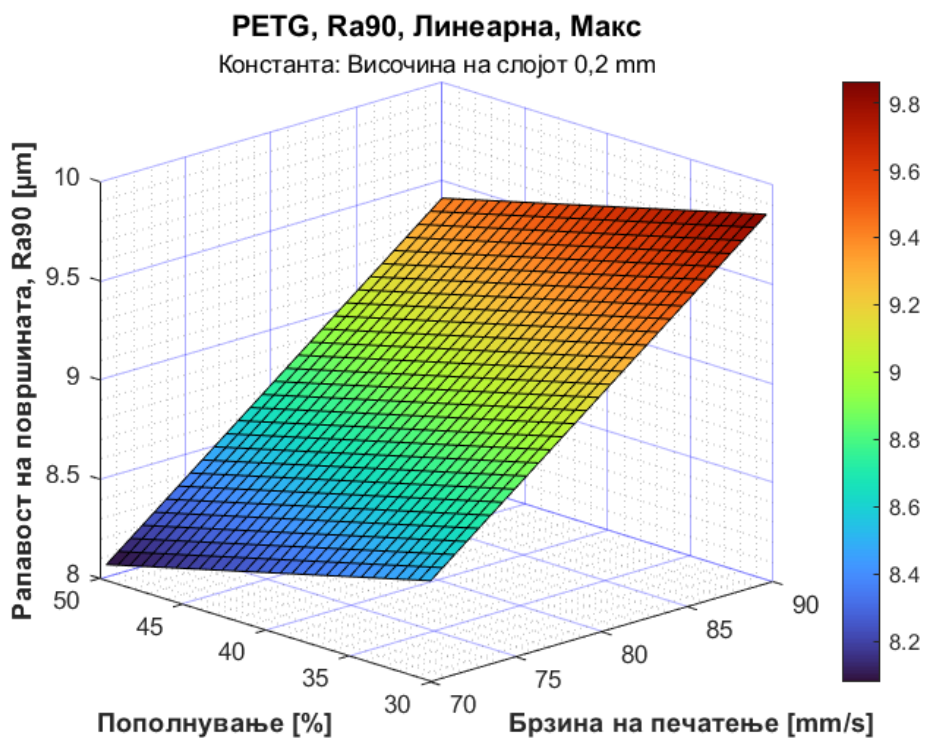
Креирани се 3D-прикази со цел за визуализација на влијанието на независните варијабли врз рапавоста на површината Ra. На сликата 5.12 се прикажани четири прикази со соодветно објаснување за содржината. На приказите x и y ги прикажуваат распоните на независните варијабли, додека височината на слојот е задржана константна. На z-оската е прикажана рапавоста Ra-90.

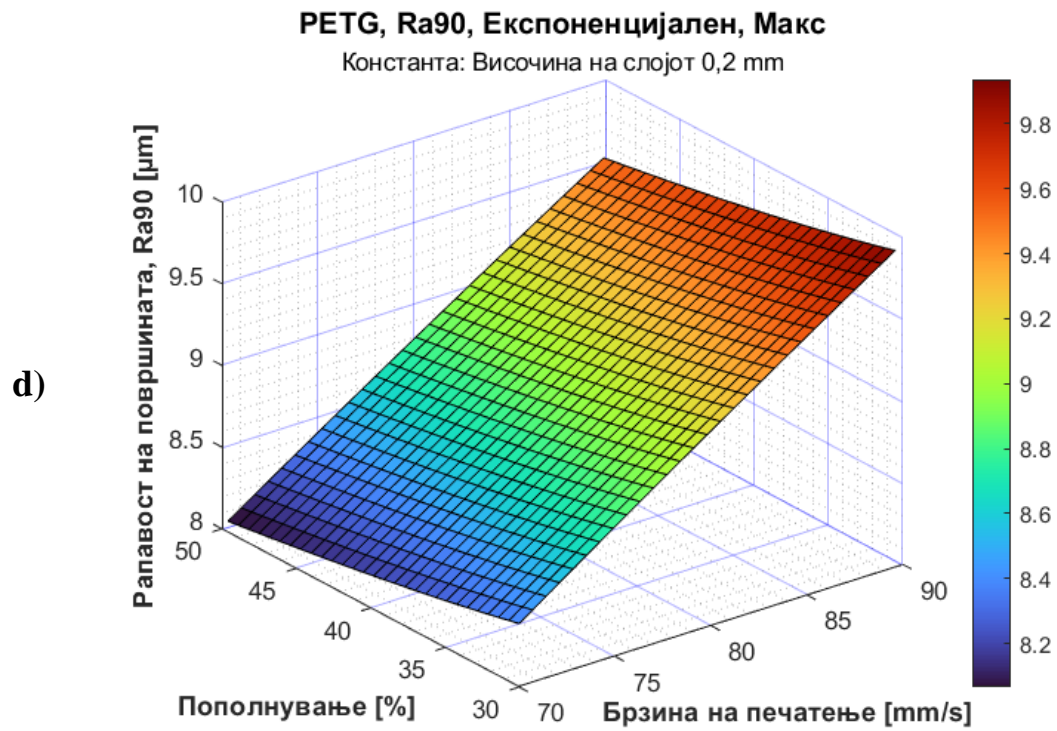


b)



c)

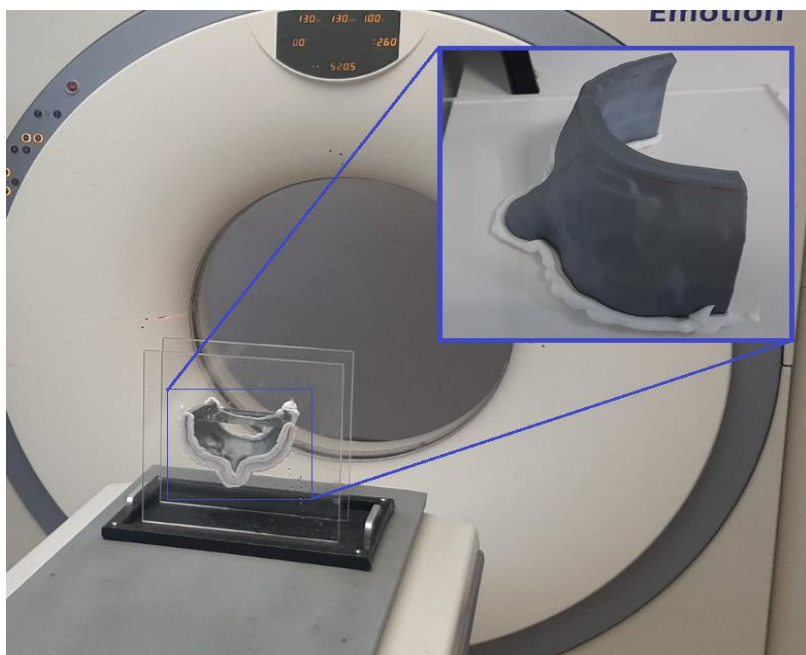




Слика 5.12. Екстремни вредности на раповоста на површината Ra -90 за PETG термопластика, а) Линеарен модел со минимални вредности, б) Експоненцијален модел со минимални вредности, с) Линеарен модел со максимални вредности, д) Експоненцијален модел со максимални вредности.

### 5.5 Ефекти од примената на болус врз распоредот на дозата кај пациентите на радиотерапија

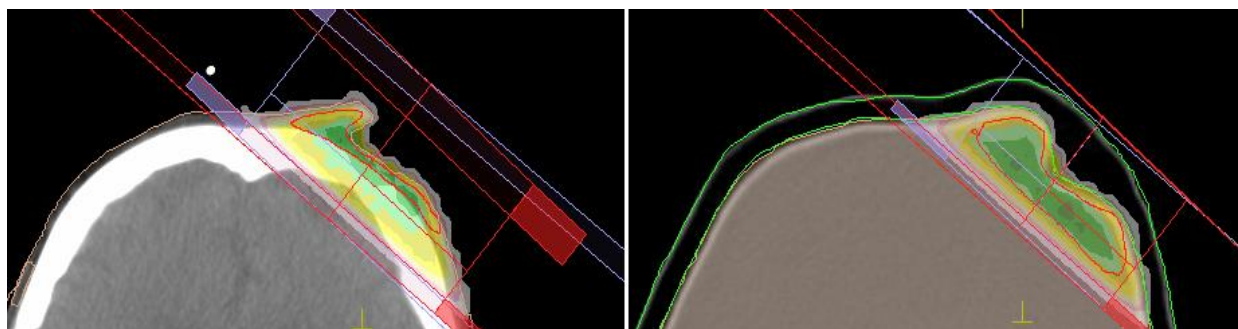
Симулацијата (скенирање) на печатениот болус со примена на СТ е реализирана со цел да се определи влијанието на 3D печатениот болус врз квалитетот на третманот на пациентот кој е подложен на радиотерапија. Болусот е поставен помеѓу две пластични плочи кои формираат кутија која е наполнета со вода (Слика 5.13). Водата е избрана како медиум заради тоа што нејзината густина е слична на онаа од човековото ткиво. За печатењето на болусот е користен термопластичниот материјал PLA.



Слика 5.13. Симулација со СТ на 3D печатен болус наполнет со вода.

Планот за третирање на пациентот со болус е еднаков на оној како кај третманот на пациентите без болус. Сите параметри на зрачење се подеднакви како и во реалниот случај на третман. Користен е софтверот Монасо, базиран врз алгоритмот на пресметките Monte Carlo, за пресметка на дистрибуцијата на апсорбираната доза во таргетираниот волумен. Планираниот таргетиран волумен (Planning Target Volume, PTV) е лоциран блиску до кожата на пациентот и треба да добие вкупно 40 Gy (Gy е единица на апсорбирана доза именувана спрема Louis Harold Gray). Планот за третман е развиен за користење на бМV на енергија.

На сликата 5.14 е прикажана дистрибуцијата на дозата за обата случаи на радијација, без и со болус.



Слика 5.14. Ориентација на полето на третманот и дистрибуција на дозата, а) вообичаена процедура, б) процедура со 3D печатен болус.

Евалуацијата на дозиметријата е реализирана со методата Report 50 на International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), наменета за техниката на модалитет 3DCRT, која објаснува дека варијацијата на таргетираниот волумен треба да е во границите од +7 % до -5 % од вредноста предвидена во референтната точка во волуменот на туморот, со определена вредност на апсорпција [163].

Табела 5.10. Дозиметриска споредба на PTV помеѓу плановите на третирање кога е користен болус и кога не е користен.

Доза на третман [Gy]	Максимална		Средна	
	PTV	< 107% од целта	PTV	> 95% од целта
1. PTV стандард	42,78	42,8	38,23	38
2. PTV со 3D болус	42,75	42,8	39,64	38

Таргетирана доза за обата случаи е 40 Gy. Максималната граница на применетата доза е 107 %, што за целната доза од 40 Gy претставува 42.8 Gy. Истовремено средната применета доза треба да е поголема од 95 % од таргетираната доза, што одговара на 38 Gy. Максималните планирани дози за обата случаи, по пресметките, покажуваат сличност кај обете методи. Средната доза кај случајот со 3D-болус покажува 4 % поголема доза отколку во случајот при традиционалниот третман. Можеме да заклучиме дека примената на болусот има позитивно влијание со поместувањето на дозата поблиску до кожата на пациентот, што дава подобра хомогеност на дистрибуцијата на дозата во PTV. Истовремено болусот ќе ја намали температурата на жешката точка на кожата на пациентот.

## 5.6 Рапавост на површината на примерок од нерѓосувачки челик 316L печатен со технологијата DMLS

Рапавоста на површината на овој материјал е истражуван со истата постапка како и кај останатите материјали опфатени со ова истражување. Врз основа на методата на Тагучи за дизајн на експеримент креирана е табела со независни влезни параметри: моќност на ласерот (180, 200 и 220), брзина на скенирање (450, 500 и 600 mm/s) и растојание помеѓу линиите (0.07, 0.08 и 0.09 mm). Во Табелата 5.11 прикажани се независните параметри, измерените вредности за рапавоста на површината  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$ , за различни агли на мерење во однос на правецот на печатење и тоа за 0, 45 и 90 степени.

Табела 5.11. Независни параметри со своите нивоа и измерени параметри на рапавоста на површината за различни ориентации на мерење за примероци од челик 316L печатени со технологија DMLS.

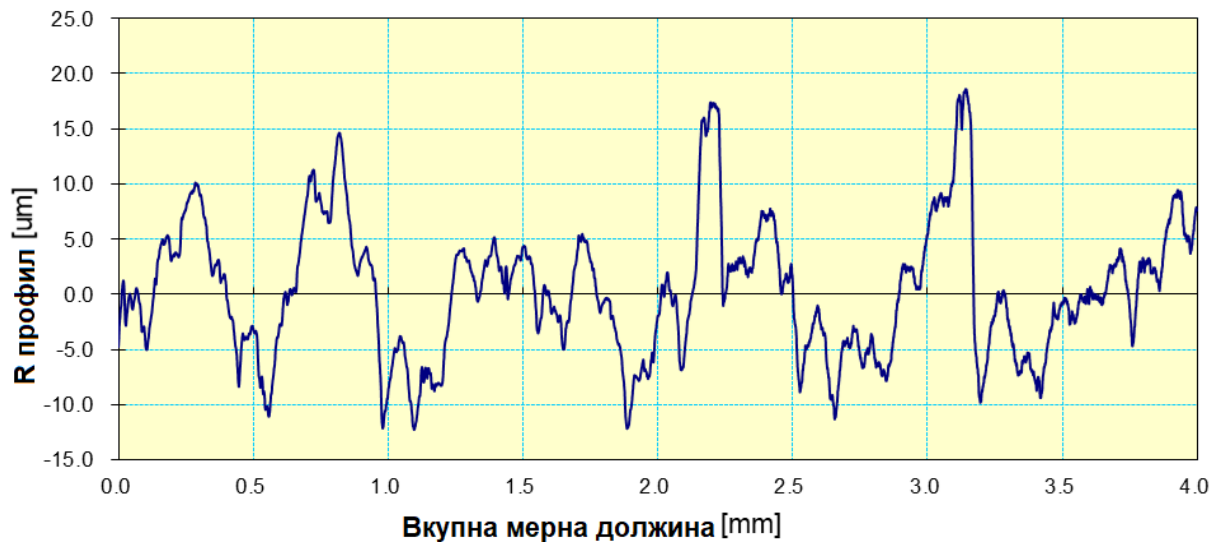
Бр.	$L_p$ (W)	$S_s$ (mm/s)	$H_s$ (mm)	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]			$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]			$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]		
				0	45	90	0	45	90	0	45	90
1	180	450	0,07	2,04	4,79	5,61	13,84	24,62	26,56	2,86	6,03	6,69
2	180	500	0,08	2,03	4,03	5,30	9,53	13,84	24,27	2,81	5,03	6,52
3	180	600	0,09	1,75	2,48	4,56	12,92	22,79	26,38	2,18	3,20	6,27
4	200	450	0,08	2,28	5,34	6,32	12,87	19,00	24,72	3,05	6,26	7,41
5	200	500	0,09	2,17	5,08	5,75	13,86	25,58	28,43	3,00	6,18	6,90
6	200	600	0,07	1,43	2,38	4,27	9,40	13,46	20,05	2,15	3,04	5,14
7	220	450	0,09	4,79	10,34	15,29	25,58	40,37	58,10	6,03	11,87	17,50
8	220	500	0,07	2,70	7,53	12,19	16,12	30,74	48,72	3,66	8,82	15,14
9	220	600	0,08	2,38	6,69	11,04	15,97	27,47	44,06	3,20	7,89	12,86

\* Овие параметри се независни варијабли:  $L_p$  – Моќност на ласерот,  $S_s$  – Брзина на скенирање и  $H_s$  – растојание помеѓу линиите

Сите теоретски модели статистички покажаа високо ниво на значајност. Највисока значајност од истражуваните варијабли врз рапавоста на површината покажа моќноста на ласерот, потоа брзината на скенирање, а најмала значајност растојанието помеѓу линиите. Моќноста на ласерот и растојанието помеѓу линиите покажуваат позитивна значајност, додека брзината на скенирање покажува негативна значајност врз рапавоста на горната површина на примероците. Измерените вредности претставуваат средна вредност од две мерења во истата позиција на истиот примерок.

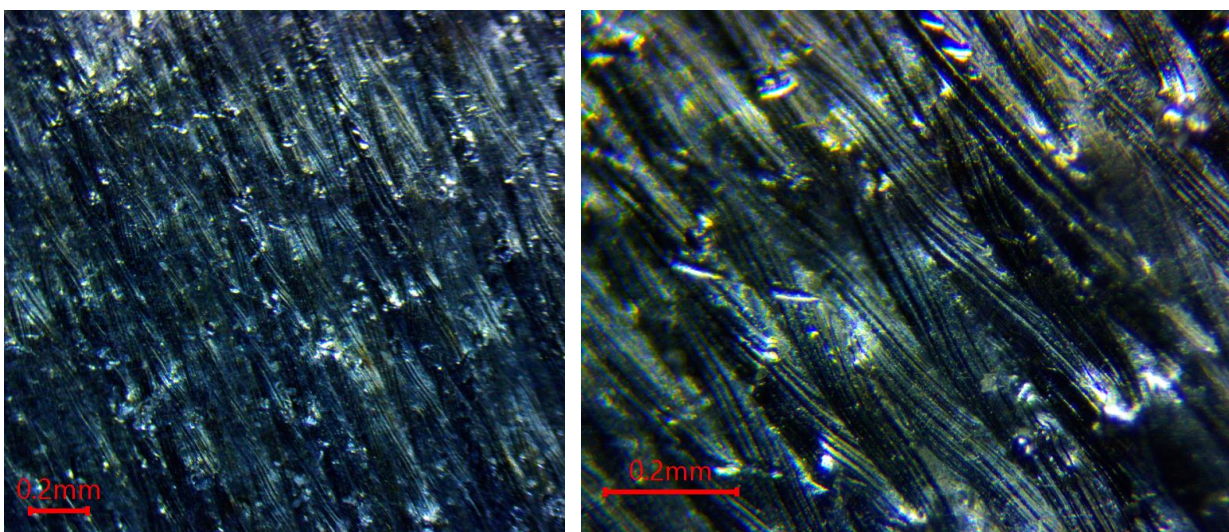
### Профили на површината на примероците

Горната површина на примероците е скенирана со оптички микроскоп надграден со дигитална камера. За секое од мерењата мерен е примарниот профил и е пресметувана рапавоста на површината позната како R-профил. На сликата 5.15 е прикажан профилот добиен од примерокот 1.



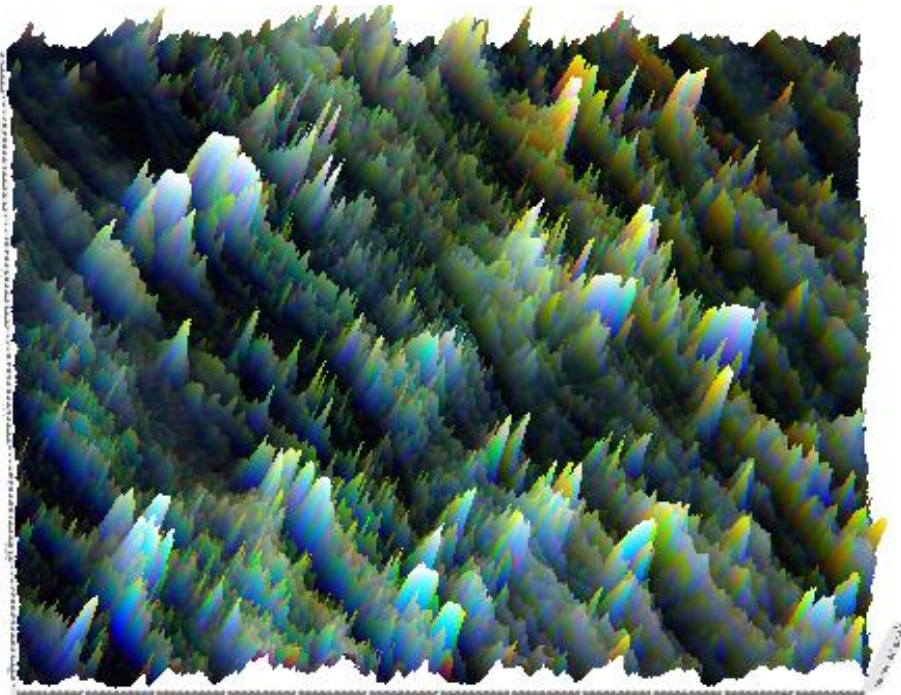
Слика 5.15. Измерен R-профил на примерок број 1 изработен од челик 316L со технологија DMLS.

Горната површина на примерокот број 1 е скенирана со оптички микроскоп снабден со дигитална камера која овозможи дигитално процесирање на сликата. Се забележува брановитост на површината со различна рефлексија на длабините и страниците. Површинскиот приказ на рапавоста може да се види на слика 5.16 на која максимумите ги покажуваат линиите на печатење. Оптичките особини на печатениот материјал имаат големо влијание врз визуализацијата на скенираната површина.



Слика 5.16 Скенирана површина на примерок 1 со различно зголемување (x4 и x10), 316L со DMLS.





Слика 5.17. Приказ на површината добиена со оптички микроскоп, примерок од 316L.

3D-површината на истиот примерок (бр.1) е прикажана на Слика 5.17. Максимумите на сликата ја покажуваат најсилната рефлексija од примерокот, додека минимумите се во темно подрачје.

### **Теоретски модели за рапавоста на површината $R_a$ , за 316L и технологијата DMLS**

Линеарните модели и нивните статистички податоци се генерирани од резултатите добиени со експериментите на материјалот 316L печатен со технологијата DMLS. Тие модели се прикажани во Табела 5.12.

Подготвени се девет линеарни модели за три правци (0, 45 и 90 степени) и за три различни параметри на површината  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$ .

Врз основа на ANOVA значајноста  $F$ , рапавоста на површината  $R_a$  и  $R_q$  за сите степени на мерење ги исполнуваат сите поставени критериуми на моделите со значајност  $F$  помала од 0.05 (Табела 5.12).

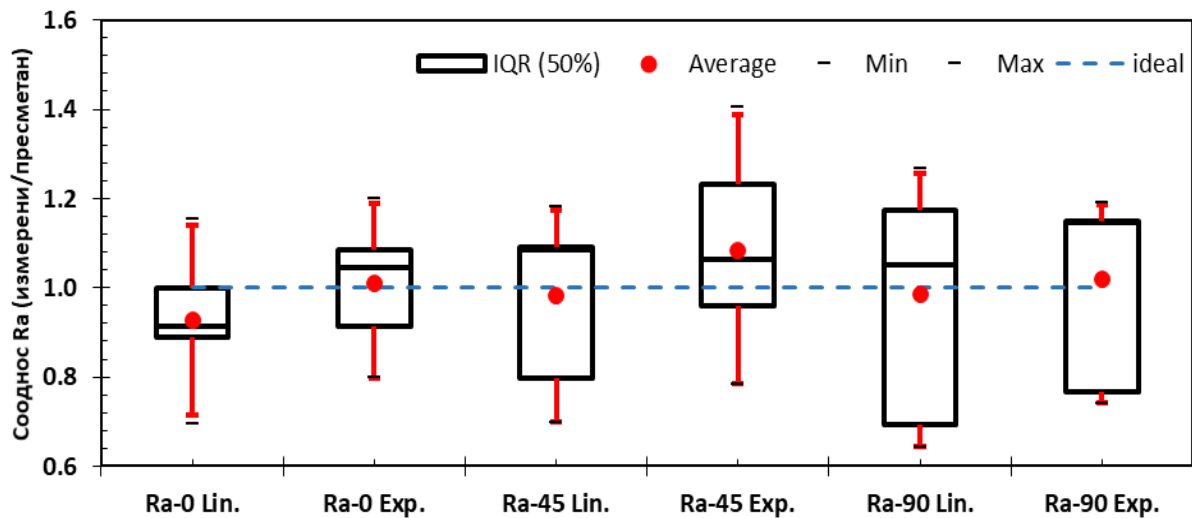
Предзнаците за сите независни варијабли се исти за сите линеарни и експоненцијални модели.

Табела 5.12. Линеарни модели и нивните статистички податоци за сите правци на печатење со технологија DMLS и материјал 316L.

Правец	Теоретски модел *	Multiple R	R Square	Standard Error	ANOVA significance F
	$R_a = -3,92 + 0,0337L_p - 0,007S_s + 42,3H_s$	0,87	0,76	0,59	0,05
0	$R_z = -24,43 + 0,178L_p - 0,027S_s + 216,6H_s$	0,84	0,71	3,28	0,08
	$R_q = -3,754 + 0,042L_p - 0,009S_s + 12,33H_s$	0,88	0,78	0,68	0,04
	$R_a = -10,93 + 0,111L_p - 0,019S_s + 53,333H_s$	0,93	0,87	1,01	0,01
45	$R_z = -43,04 + 0,311L_p - 0,047S_s + 332H_s$	0,79	0,63	6,47	0,14
	$R_q = -10,54 + 0,119L_p - 0,021S_s + 56H_s$	0,92	0,86	1,31	0,01
	$R_a = -27,25 + 0,192L_p - 0,015S_s + 58,79H_s$	0,88	0,75	2,32	0,04
90	$R_z = -91,4 + 0,613L_p - 0,041S_s + 293,1H_s$	0,84	0,71	8,95	0,07
	$R_q = -30,62 + 0,216L_p - 0,016S_s + 61,496H_s$	0,86	0,75	2,83	0,05

\* Овие параметри се независни варијабли:  $L_p$  – Моќност на ласерот,  $S_s$  – Брзина на скенирање и  $H_s$  – растојание помеѓу линиите

Ги добивме истите резултати и за експоненцијалниот модел креиран врз основа на експерименталните резултати. Имено, само параметарот  $R_z$  не ги задоволи барањата на ANOVA. За секој од правците на мерење не беа задоволени барањата за овој параметар. Од друга страна, за секој од разгледуваните правци на мерење 0, 45, 90 степени, сите експоненцијални модели за параметрите на рапавост  $R_a$  и  $R_q$  го задоволуваа нивото на доверба од 95 %.



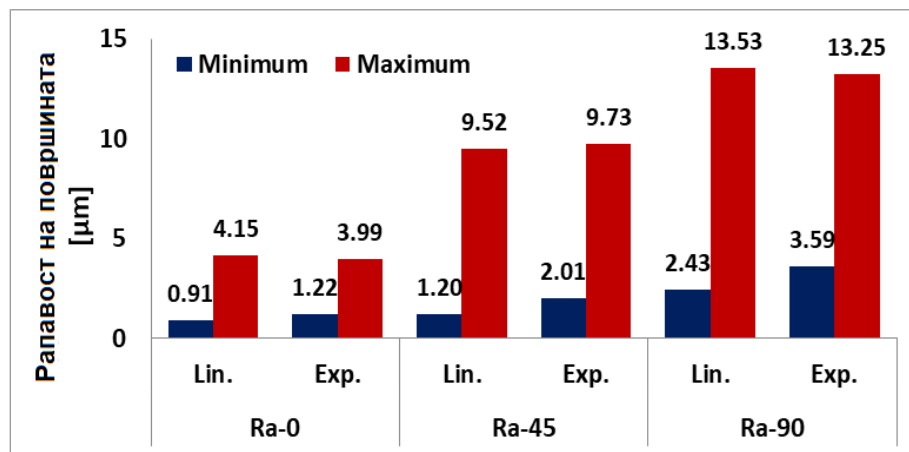
Слика 5.18. Дистрибуција на соодносот на рапавоста Ra, помеѓу експерименталните / теоретски податоци за линеарните и експоненцијалните модели за секој од истражуваните правци.

Соодносите на рапавоста на површината на измерените и моделирани податоци (линеарни и експоненцијални модели) се прикажани на Слика 5.18. Средната вредност е покажана со црвен круг, 50 % од распонот е покажан со правоаголник, 90 % од распонот е покажан со вертикална црвена линија, хоризонталната линија во правоаголникот ја покажува медијаната, екстремните црни линии надвор од правоаголникот ги покажуваат минималните и максималните вредности.

Произлегува дека дистрибуцијата на соодносот помеѓу експерименталните и теоретските податоци за Ra е околу  $\pm 30\%$ , што претставува најголема вредност доколку се споредува со резултатите на термопластичните материјали, кои се истражувани во рамките на оваа дисертација. Нема причина за мерење на дисперзијата за кој било правец на мерење на материјалот 316L. Овој феномен е резултат на фактот дека не постои дефинирана печатена линија во технологијата DMLS како што е случајот со технологијата FFF. Ова може да се забележи на сликата 5.19 на која истопените метални линии, генерирани од ласерот, го топат прашокот и последователно се појавуваат и се губат низ целиот материјал на примерокот. Мерењата во правец на 45 и 90 степени се повеќе под влијание на овој процес на креирање и исчезнување на линии, во споредба со мерењата со 0 степени, заради губењето на периодичноста на максимумите. Како резултат на тоа распонот на податоците за 45 и 90 степени е зголемен. Тој се проширил скоро за истите вредности како и дисперзијата на соодносите кај мерењата при 0 степени.

### Значајност на независните параметри за рапавоста на површината врз основа на теоретските модели

Екстремни нивоа на рапавоста на површината, кои се поголеми од оние забележени кај печатените примероци, можат да се добијат кога независните параметри се соодветно комбинирани. Теоретските модели укажуваат дека најмала вредност може да се добие за моќноста на ласерот од 180 W, брзина на скенирање 600 mm/s и растојание меѓу линиите од 0.07 mm. Најголемата рапавост на површината би можела да се добие со моќност на ласерот од 220 W, брзина на скенирање 450 mm/s и растојание помеѓу линиите 0.07 mm.



Слика 5.19. Екстремни вредности на рапавоста на површината Ra добиени од математичките модели со специфична комбинација на независните варијабли за материјалот 316L.

Секоја од истражуваните варијабли покажува сличен тренд за сите пресметковни модели и параметри.

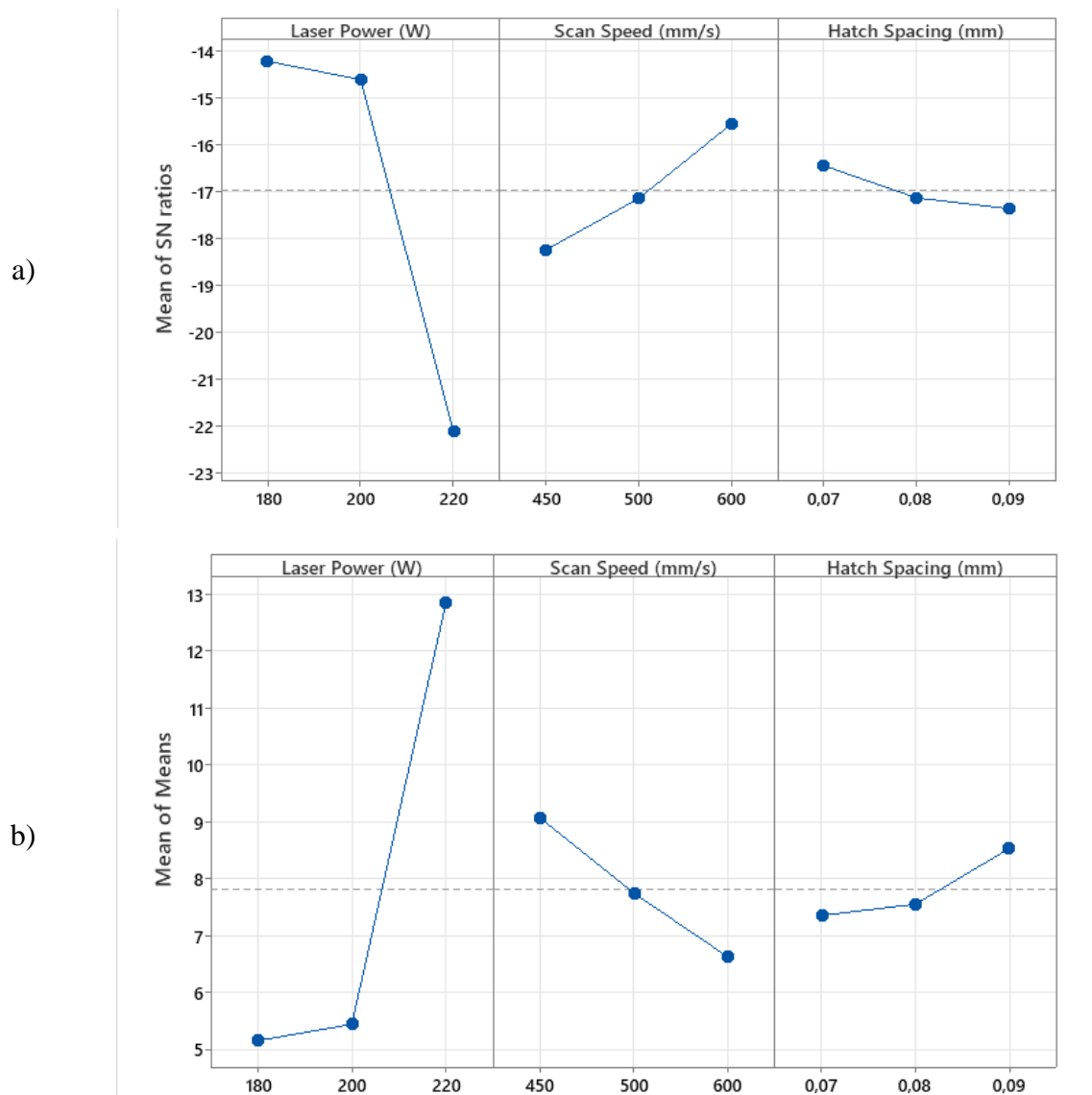
Релативните големини на независните параметри за експоненцијалниот модел Ra-90 се прикажани со косините на сликата 5.20-а. Врз основа на средните вредности на средните вредности моќноста на ласерот покажува најголемо позитивно влијание врз Ra-90 со распон од 5.16 до 12.84 микрони, за 180 и 220 вати, соодветно. Сличен тренд со најмало влијание врз Ra има растојанието на линиите.

Единствен параметар со негативен тренд е брзината на скенирање, која е втора по големина со своето влијание врз Ra-90. Врз основа на фактот дека „помалото е подобро“, оптимумот се добива за моќност на ласерот 180 w, брзина на скенирање 600 mm/s и растојание на линиите 0.07 mm.

Општо земено распонот на екстремните вредности за линеарните и експоненцијалните модели покажува дека сите линеарни модели за ист правец на мерење добиваат поекстремни вредности во споредба со екстремните вредности генерирани се експоненцијалниот модел.

Експоненцијалните модели покажуваат по мал распон на екстремни вредности во однос на линейните, што се гледа и на сликата 5.19.

Сите истражувани независни варијабли имаат некакво влијание врз рапавоста на површината. Ако се наредат во однос на влијанието тогаш највлијателна е моќноста на ласерот, потоа брзината на скенирање и на крајот растојанието помеѓу линиите. Релативната големина помеѓу независните параметри е прикажана со косината на графиконите, прикажани на слика 5.20-а.



Слика 5.20. а) Приказ на главни ефекти за средните вредности б) Приказ на главните вредности за сигнал/шум соодносот, (помалото е подобро).

Методата на Тагучи користи уникатна техника сигнал/шум (Signal-to-Noise, S/N) сооднос при оптимизацијата на процесот. Процесот ќе се смета за робустен доколку неговите перформанси не можат да се пореметат со неконтролирани фактори, познати

како фактори на шум. Согласно таа техника генерирани се S/N-графиконите прикажани на слика 5.19b. Од овие резултати се гледа дека моќноста на ласерот го има најголемиот ефект врз S/N, додека растојанието помеѓу линиите има мал или скоро никаков ефект врз овој сооднос.

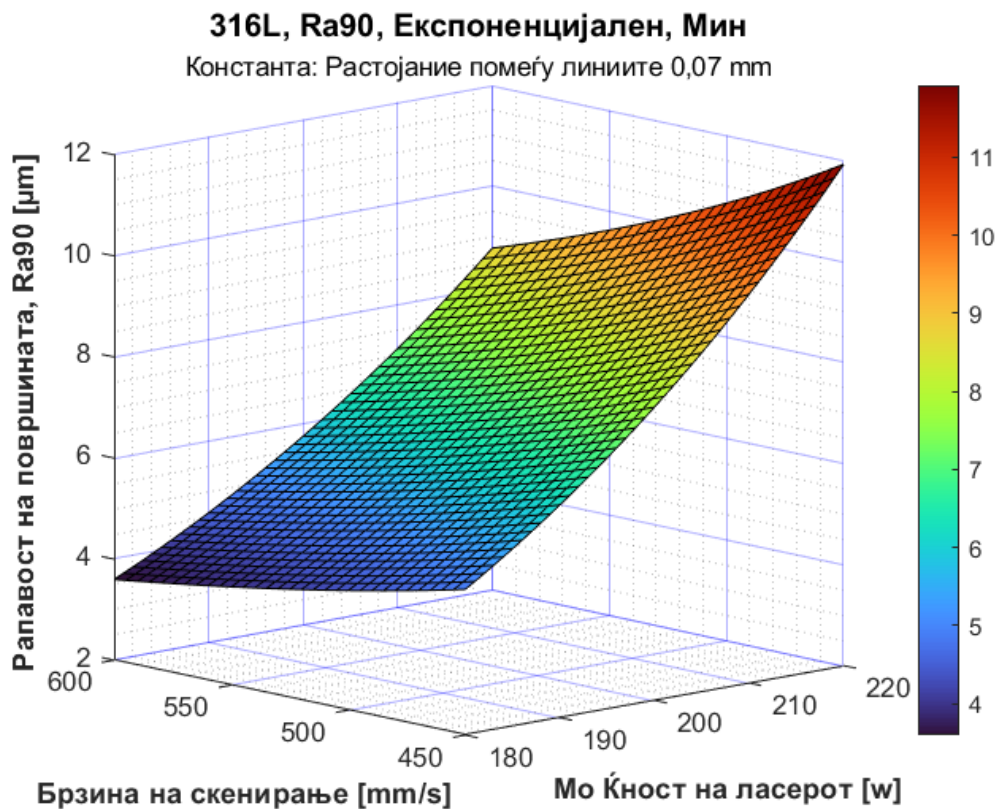
Во овие резултати приказот на главните ефекти за S/N-соодносот покажува дека моќноста на ласерот го има најголемиот ефект, што се гледа и од сликата 5.20-b.

За да се визуализира рапавоста на површината Ra, креирани се 3D-прикази на кои се гледа влијанието на независните варијабли врз Ra. Некои екстремни 3D-вредности за линеарните и експоненцијалните модели на рапавоста на површината за мерења под 90 степени се прикажани на слика 5.21.

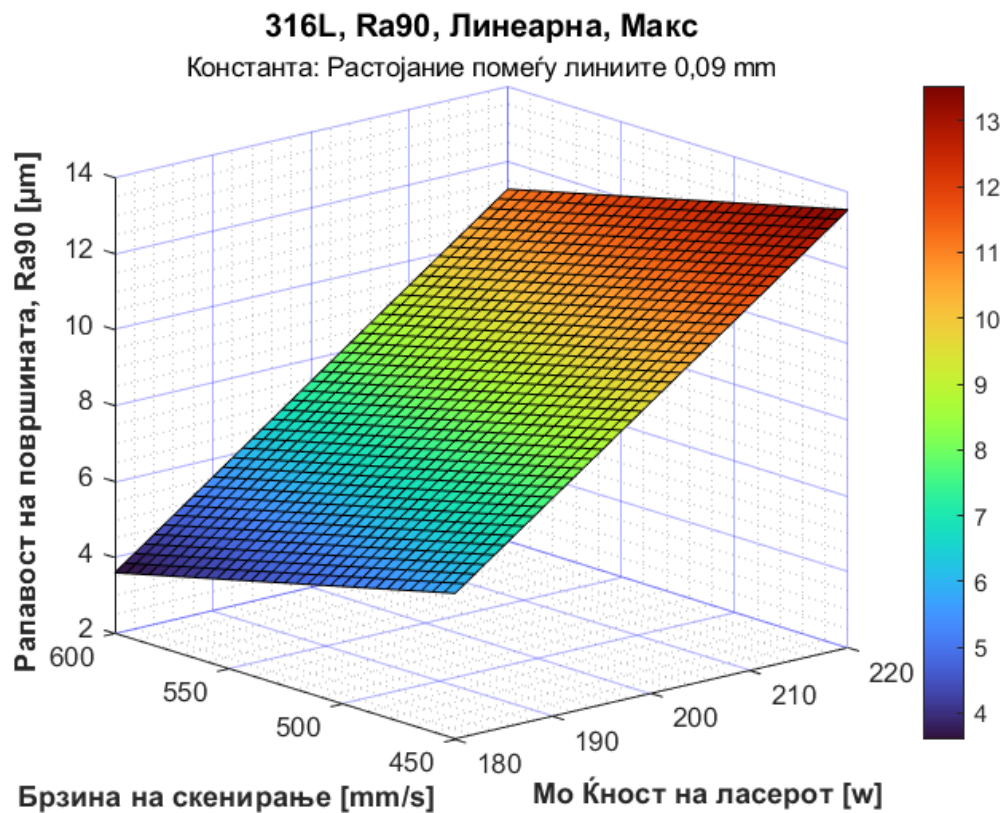
На приказите x и y оските ги прикажуваат распоните на две независни варијабли, додека растојанието меѓу линиите е задржано константно, со вредности дадени во сликата (0.07 и 0.09 mm за минималните и максималните вредности. На z оската е прикажана вредноста за Ra90.

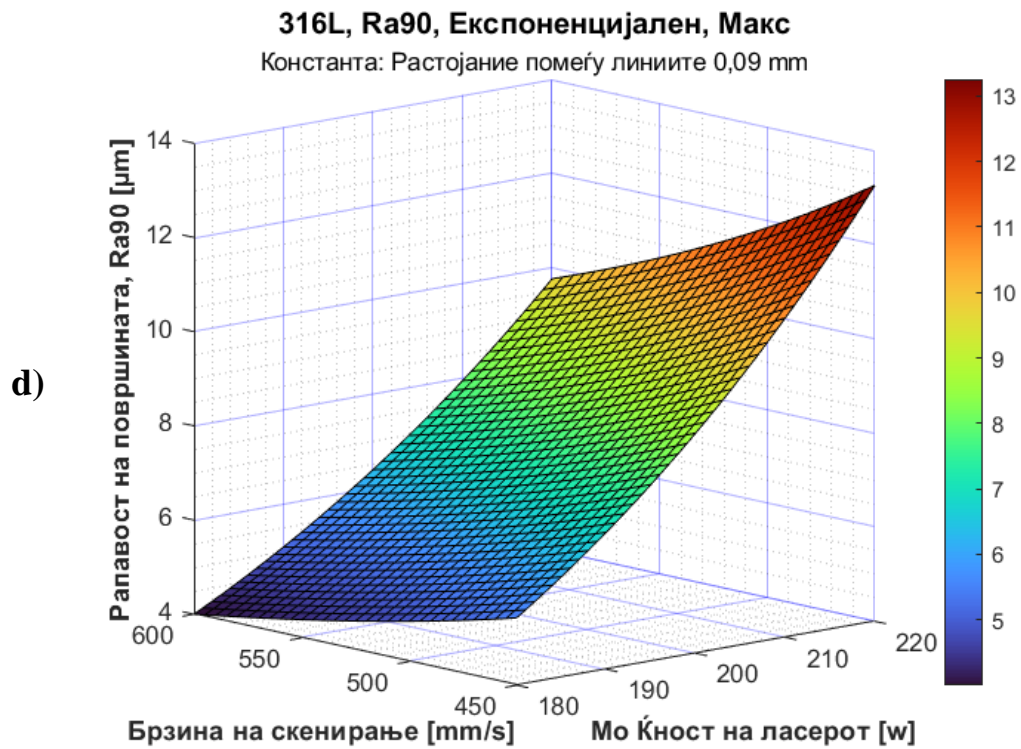


b)



c)





Слика 5.21. Минимални вредности на рапавоста на површината Ra90, за 316L и технологија DMLS a) Линеарен модел со минимални вредности, b) Експоненцијален модел со минимални вредности, c) Линеарен модел со максимални вредности, d) Експоненцијален модел со максимални вредности.



### 5.7. Рапавост на површината на челик 316L печатен со технологијата FFF

Технологијата на АП Fused Filament Fabrication (FFF) исто така се среќава и како Material Extrusion Additive Manufacturing (MEAM), а претставува повеќефазна техника прикажана на слика 5.22. Тоа значи дека оваа технологија има три главни фази и секоја на свој начин влијае врз квалитетот на површината на печатениот дел.



Слика 5.22. Шематски приказ на процесот на Material Extrusion Additive Manufacturing [168]

Заради недостаток на технички и лабораториски ресурси овие примероци се печатени во странство и затоа немаше прилика за мерење на рапавоста на површината по зелениот дел, како и по отстранувањето на врзивното средство, по кое е добиен крајниот примерок со синтерување.

Се разбира дека намерата да се добие валиден теоретски модел на рапавоста на површината на готовиот производ само со земање во обзир на променливите параметри од првата фаза, без земање во обзир на параметрите од останатите фази, не може да се очекува да даде успешни резултати. Сепак, направени се мерења и статистичка анализа и се добија резултати кои не ги задоволуваат барањата за адекватност на моделот со резултатите од експериментите.

#### Профили на површината на примероците

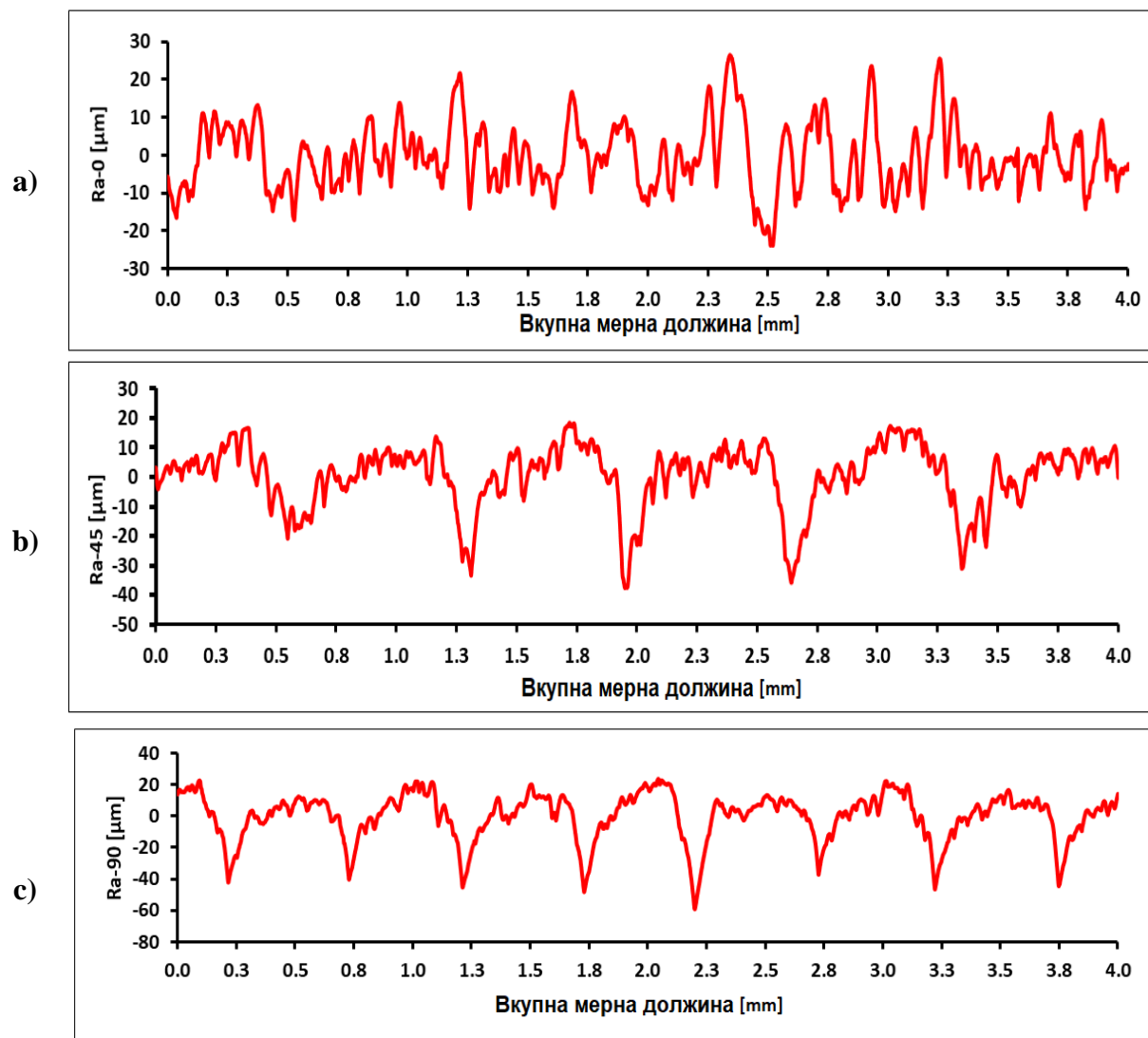
Филтрираните профили на рапавоста на површината  $R_a$  на примерокот број еден, се претставени на слика 5.23. Секој од графиконите е добиен со мерење на 8000 податоци на должина од 4 mm. Сликата 5.22a го покажува квалитетот на површината  $R_a$  добиен со мерења под 0 степени во однос на правецот на печатење. Распонот на податоците е помеѓу -24 и 27 микрони. Сликата 5.22b ги покажува мерењата под агол од 45 степени во однос на правецот на печатење. Распонот на податоците е помеѓу -38 и 19 микрони,

што е поголема вредност во однос на претходниот случај. Поспецифичен е случајот прикажан на сликата 5.23-с кој ги покажува вредностите за Ra добиени со мерење под 90 степени во однос на правецот на печатење. Распонот е помеѓу -60 и 24 микрони, што е поголема вредност од обата претходни случаи, Ra-0 и Ra-45.

Максималните вредности се скоро исти со останатите и се околу 24 микрони. Разликите се забележуваат кај минималните вредности, каде Ra-90 има скоро двојно поголема вредност во однос на Ra-45 и скоро трипати по голема во однос на Ra-0.

Профилот Ra-0 не покажува воопшто периодичност. Перото на инструментот не го има достигнато второто ниво, кое е нормално на првото ниво. Затоа не е детектирана периодичност бидејќи правецот на мерење и печатената линија се паралелни.

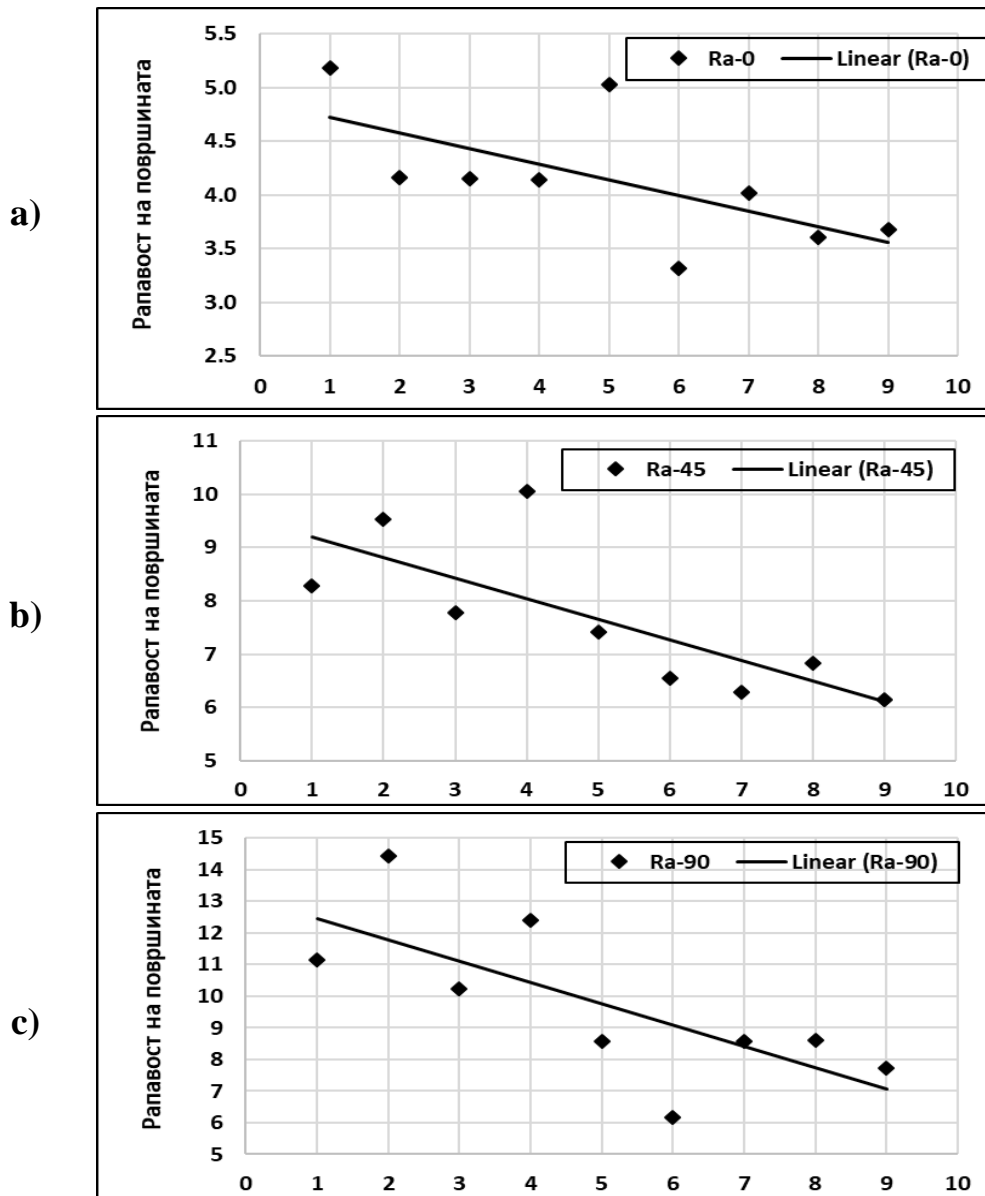
Периодичност е присутна за профилот на сликата 5.23-b, а периодичност со длабоки и тесни минимуми е забележана во случајот на Ra-90.



Слика 5. 23. Просечна Ra профили а) за девет примероци од FFF на 0 степени, б) за девет примероци од FFF на 45 степени, с) за девет примероци на 90 степени.

**Корелација помеѓу измерените вредности и теоретскиот модел на рапавоста на површината.**

Обата теоретски модели, линеарниот и експоненцијалниот, на мултирегресионата анализа не беа успешни во однос на факторот ANOVA F. Корелацијата на рапавоста на горната површина за сите три правци на мерење е прикажана на сликата 5.24. Најдобро опишување на експерименталните податоци е со полином од втор ред. Пресметани се R-square и се добиени вредностите 0.74, 078 и 0.62, за Ra-0, Ra-45 и Ra-90.



Слика 5.23. Корелација на рапавоста на горната површина за a) Ra-0 , b) Ra-45 и c) Ra-90.

Постои сличност за предзнаците во равенката кај сите три случаи. За квадратниот и слободниот член предзнаците се негативни, додека за линеарниот предзнаците се позитивни.

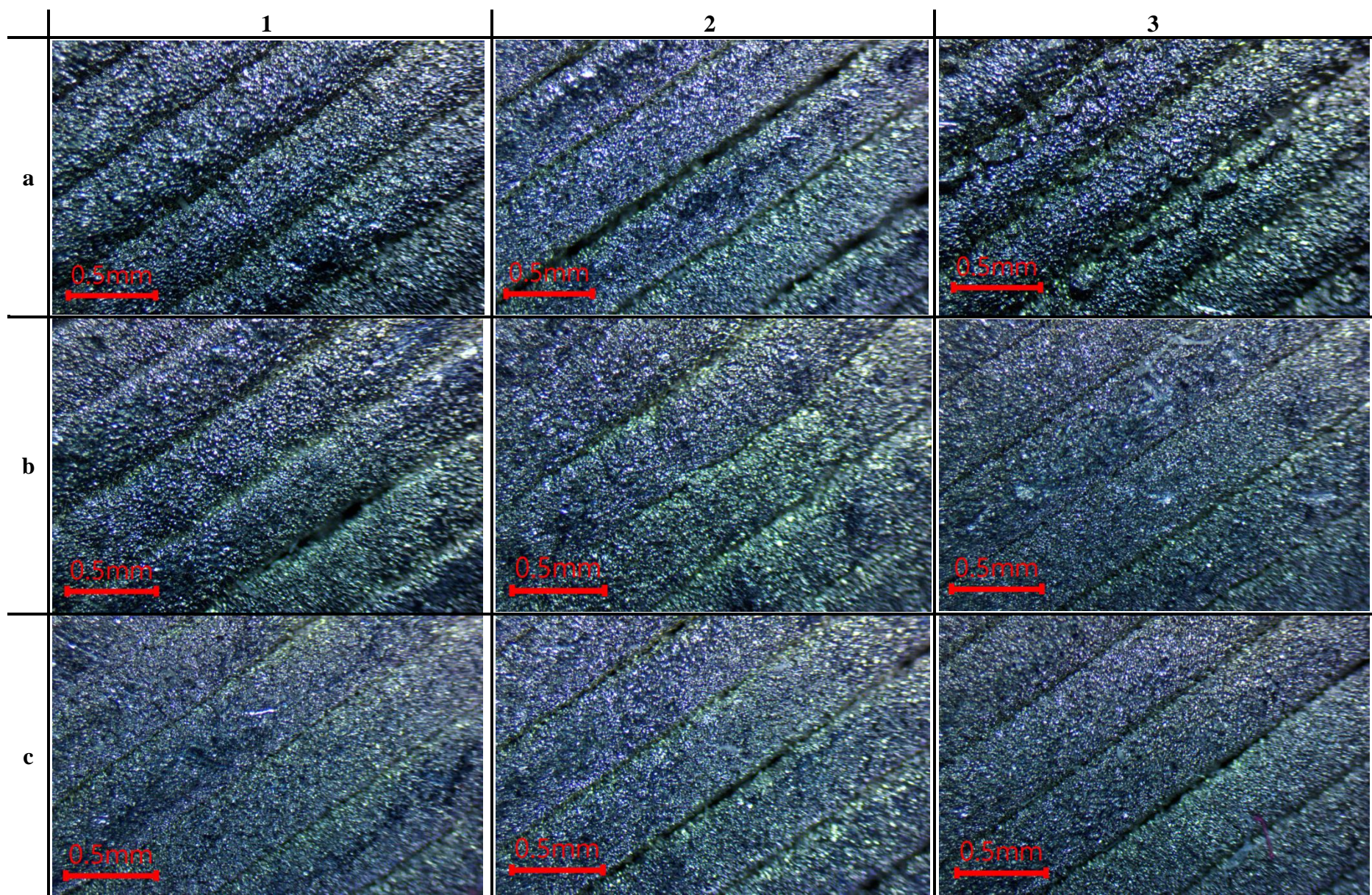
### **Анализа на рапавоста на површината со оптичка микроскопија**

Површините на девет примероци се скенирани со оптички микроскоп и видлива светлина. Од рефлексивноста на светлината се генерирани 3D-слики на скенираната површина. Сликите се со зголемување од X4 и X10. Површината е осветлена со LED-светлина (Light Emitting Diode). Сликите го покажуваат интензитетот на светлината која се рефлектира од површината на примерокот кон камерата. Рефлексивноста варира во зависност од својствата на рефлексивност на материјалот. Темните линии на слика 5.24 ги претставуваат минимумите на површините на примероците кои се мерени за Ra-90, претставени и на слика 5.22с.

Приказите во истиот ред на сликата 5.24 претставуваат иста вредност на печатената брзина, со која се печатени примероците. Значи, во редовите а, б и с се прикажани примероци со брзини на печатење 31.5, 35.0 и 38.5 mm/s. Колоните 1, 2 и 3 се со различна пополнетост 45,50 и 55 %. На позициите (1а, 3б и 2с), (2а, 1б и 3с) и (3а, 2б, 1с) се прикажани примероци со височина на слојот од 0.18, 0.2 и 0.22 mm.

Општо земено печатените линии можат лесно да се распознаат и се со соодветна ориентација. Очигледно е дека врз рапавоста на површината на челикот 316L, печатен со технологијата FFF, влијаат независните параметри: брзина на печатење, пополнување и височина на слојот.

Структурните дефекти на рапавоста на горната површина можат лесно да се забележат. Посебно е од корист големината на брзината на печатење, што се гледа од редот с на сликата 5.24, кој е добиен со печатење со најголема брзина.



Слика 5.24. Рапавоста на површината на девет примероци скенирани со оптички микроскоп и зголемување X4.

## 6. ЗАКЛУЧОК

Врз основа на резултатите од експериментите и теоретските согледувања, претставени во претходните глави, можат да се извлечат значајни заклучоци во однос на рапавоста на површината на примероците печатени со адитивните технологии и изработени од термопластични материјали (PLA, ABS и PETG) и нерѓосувачкиот челик 316L и печатени со технологиите DMLS и FFF.

Што се однесува до хипотезите поставени на почетокот на овие истражувања, може да се заклучи:

**1. Во однос на првата хипотеза:** *Кој од влезните параметри има најголемо влијание врз квалитетот на површината кај печатените 3D-примероци изработени од термопластични материјали (PLA, ABS и PETG) и нерѓосувачки челик 316L, изработени со различни технологии?*

- техниката FDM е користена за печатење на термопластичните примероци, изработени од материјалите PLA, ABS и PETG. Избрани се истите независни варијабли, со следниве вредности: височина на слојот (0.1, 0.15, 0.2 mm), брзина на печатење (70, 80 и 90 mm/s) и пополнетост (30, 40 и 50 %). Влијанието на овие параметри врз зависната варијабла, рапавоста на површината, покажува дека височината на слојот го има најголемото влијание, а потоа брзината на печатење. Обете имаат позитивна корелација со рапавоста на површината.

Пополнетоста е параметар кој има најмало влијание врз рапавоста на површината. Тој има негативна врска со рапавоста на површината, т.е. кога пополнетоста се зголемува, се намалува рапавоста и обратно.

- Во случајот на челикот 316L, како независни параметри на технологијата DMLS беа избрани: моќноста на ласерот (180, 200 и 220 W), брзина на скенирање (450, 500 и 600 mm/s) и растојание меѓу редовите (0.07, 0.08 и 0.09 mm). Моќноста на ласерот го има најголемиот ефект, проследена со брзината на скенирање, а растојанието го има најмалиот ефект. Рапавоста на површината има позитивна корелација со моќноста на ласерот и растојанието помеѓу линиите, додека брзината на скенирање има негативна корелација со рапавоста.

Кај технологијата FFF применета за печатење на примероците од челик 316L користени се следниве параметри на печатење: брзина на печатење (31.5, 35.0 и 38.5 mm/s), пополнетост (45, 50 и 55%) и височина на слојот (0.18, 0.20 и 0.22 mm). Покрај печатењето на делот, технологијата FFF користи уште два дополнителни чекора со кои се завршува печатењето на делот. Тие дополнителни чекори влијаат врз крајниот резултат и тоа го наметнува заклучокот дека воспоставување функционална зависност помеѓу параметрите, без земање во обзир на преостанатите два чекора е невозможно.

**2. Во однос на втората хипотеза:** *Дали е возможно да се креираат математички модели кои покажуваат валидна врска помеѓу квалитетот на површината и независните варијабли на печатениот 3D-процес?*

- Користени се три правци на мерења (0,45 и 90 степени) во однос на правецот на печатење со цел да се креираат теоретските модели на рапавоста на површината на примероците врз основа на влезните параметри. Истражувани се три различни параметри на рапавоста на површината  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$  за сите три правци на мерење.
- Како што е покажано во теоретскиот дел постои зависност помеѓу параметрите  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_q$  и затоа во истражувањата е користен само параметарот  $R_a$ . Зависноста на независните параметри и рапавоста на површината е идентифицирана врз основа на експерименталните податоци за  $R_a-0$ ,  $R_a-45$  и  $R_a-90$ . Може да се забележи дека квалитетот на исполнувањето на критериумите е променлив во разните случаи. Во тестовите за повторливост се покажа дека мерењата реализирани под агол од 90 степени се најстабилни во однос на другите. Тоа го наметнува заклучокот дека само мерења под агол од 90 степени би требало да се земат во обзир при евалуација на рапавоста на површината бидејќи мерењата под агол 0 и 45 се зависни од начинот на поставување на инструментот и треба да се избегнуваат.
- Во овие истражувања креирани се линеарни и експоненцијални теоретски модели. Заклучивме дека постои мала разлика во квалитетот на моделите врз основа на статистичката анализа на теоретските модели и споредбата на експерименталните резултати со теоретските. Општо земено, експоненцијалните модели се покомпатибилни со експерименталните

резултати и статистички подобро ги исполнуваат условите за квалитет на моделот.

**3. Во однос на третата хипотеза: *Кое е влијанието во третманот на туморите на пациентите кога се применува термопластичен 3D печатен болус наместо комерцијалните стандардни болуси?***

- Овие истражувања го покажаа користењето на термопластичниот болус во третманот на пациентот со јонизирачко зрачење кај површинските тумори. Користењето на болусот овозможува поместување и зголемување на дозата која се апсорбира од ткивото на иста длабочина. Како резултат на тоа дозата која се апсорбира од ткивото блиску до кожата на пациентот ќе биде поголема во однос на третманот кога не се користи болус. Таков ефект може да се постигне и со користење на комерцијалните болуси, но разликата е во тоа што болусот кој е печатен со технологијата 3D може да се изработи со произволна дебелина, па дури со променлива дебелина, што ја подобрува хомогеноста на распределбата на радијацијата. Тоа е особина која ја немаат комерцијалните болуси. Можноста да се допре болусот до лицето на пациентот е втората предност. Болусот може да се оформи со 3D-печатење во зависност од обликот на лицето, а предноста е уште поголема кога туморот ги оштетил нерамномерно кожата на пациентот и ткивото. Третата предност на ваквите болуси е во тоа што тие овозможуваат конзистентност во распоредот на дозата низ сите третмани на пациентот. Бројот на третманите варира и тој може да е од 5 до 50 повторувања на истиот третман. Болусите немаат ефект при третманот на пациенти чија целна област за зрачење е подлабока од 3 cm под кожата на пациентот. Тие можат да се користат само кај површинските тумори.

Истражувањата реализирани во оваа докторска дисертација овозможуваат да се дадат препораки и за идни истражувања во областа на квалитетот на површината кај адитивните технологии. Некои од правците се однесуваат на понатамошни истражувања сврзани за материјалот на печатените делови (пластика, метал и други материјали). Тука се и можностите за истражувања со зголемен број на независни варијабли и различни адитивни технологии, меѓу кои се и понатамошните истражувања на технологијата FFF во делот на отстранување на врзивното средство и синтерувањето и нивното влијание врз квалитетот на површината. Секако дека и истражувањата врзани со користење на различни материјали за болуси во медицината ќе придонесат за овој многу важен сегмент од човековото живеење.



## 7. РЕФЕРЕНЦИИ

- [1] “An Introduction to Industry 4.0.” <https://www.emnify.com/blog/industry-4-0> (accessed Apr. 23, 2022).
- [2] U. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [3] “A Different Approach of Experimental Design: Taguchi Method,” *Science Alert*. <https://scialert.net/fulltext/?doi=pjbs.2000.1538.1540> (accessed May 03, 2022).
- [4] J. Antony and F. Jiju Antony, “Teaching the Taguchi method to industrial engineers,” *Work Study*, vol. 50, no. 4, pp. 141–149, Jul. 2001, doi: 10.1108/00438020110391873.
- [5] R. Davis and P. John, “Application of Taguchi-Based Design of Experiments for Industrial Chemical Processes,” in *Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*, V. Silva, Ed. InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.69501.
- [6] A. Asfia, J. I. Novak, M. I. Mohammed, B. Rolfe, and T. Kron, “A review of 3D printed patient specific immobilisation devices in radiotherapy,” *Phys. Imaging Radiat. Oncol.*, vol. 13, pp. 30–35, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.phro.2020.03.003.
- [7] S. G. Ju *et al.*, “Development of a Tongue Immobilization Device Using a 3D Printer for Intensity Modulated Radiation Therapy of Nasopharyngeal Cancer Patients,” *Cancer Res. Treat.*, vol. 53, no. 1, pp. 45–54, Jan. 2021, doi: 10.4143/crt.2020.572.
- [8] A. Steinmetz *et al.*, “Design of a 3D Printed Immobilization Device for Radiation Therapy of Experimental Tumors in Mice,” *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, vol. 99, no. 2, p. E618, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijrobp.2017.06.2090.
- [9] G. Dipasquale, A. Poirier, Y. Sprunger, J. W. E. Uiterwijk, and R. Miralbell, “Improving 3D-printing of megavoltage X-rays radiotherapy bolus with surface-scanner,” *Radiat. Oncol.*, vol. 13, no. 1, p. 203, Dec. 2018, doi: 10.1186/s13014-018-1148-1.
- [10] Y. Lu, J. Song, X. Yao, M. An, Q. Shi, and X. Huang, “3D Printing Polymer-based Bolus Used for Radiotherapy,” *Int. J. Bioprinting*, vol. 7, no. 4, p. 16, 2021.
- [11] K. Okuhata, M. Tamura, H. Monzen, and Y. Nishimura, “Dosimetric characteristics of a thin bolus made of variable shape tungsten rubber for photon radiotherapy,” *Phys. Eng. Sci. Med.*, Sep. 2021, doi: 10.1007/s13246-021-01059-2.
- [12] R. Ricotti *et al.*, “Dosimetric characterization of 3D printed bolus at different infill percentage for external photon beam radiotherapy,” *Phys. Medica PM Int. J. Devoted Appl. Phys. Med. Biol. Off. J. Ital. Assoc. Biomed. Phys. AIFB*, vol. 39, pp. 25–32, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ejmp.2017.06.004.
- [13] L. S. Dalenogare, G. B. Benitez, N. F. Ayala, and A. G. Frank, “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 204, pp. 383–394, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019.
- [14] “The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond | World Economic Forum.” <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond> (accessed Apr. 23, 2022).
- [15] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. Boston, MA: Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.
- [16] T. Duda and L. V. Raghavan, “3D Metal Printing Technology,” *IFAC-Pap.*, vol. 49, no. 29, pp. 103–110, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111.

- [17] N. Guo and M. C. Leu, “Additive manufacturing: technology, applications and research needs,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, Sep. 2013, doi: 10.1007/s11465-013-0248-8.
- [18] P. Tack, J. Victor, P. Gemmel, and L. Annemans, “3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review,” *Biomed. Eng. OnLine*, vol. 15, no. 1, p. 115, Dec. 2016, doi: 10.1186/s12938-016-0236-4.
- [19] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O’Donoghue, and C. Charitidis, “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities,” *Mater. Today*, vol. 21, no. 1, pp. 22–37, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001.
- [20] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, “Development of Additive Manufacturing Technology,” in *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Eds. Boston, MA: Springer US, 2010, pp. 36–58. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9\_2.
- [21] D. Kong *et al.*, “Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting,” *Mater. Des.*, vol. 152, pp. 88–101, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.04.058.
- [22] S.-W. Baek, E. J. Song, J. H. Kim, M. Jung, U. B. Baek, and S. H. Nahm, “Hydrogen embrittlement of 3-D printing manufactured austenitic stainless steel part for hydrogen service,” *Scr. Mater.*, vol. 130, pp. 87–90, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.scriptamat.2016.11.020.
- [23] S. Tunchel, A. Blay, R. Kolerman, E. Mijiritsky, and J. A. Shibli, “3D Printing/Additive Manufacturing Single Titanium Dental Implants: A Prospective Multicenter Study with 3 Years of Follow-Up,” *Int. J. Dent.*, vol. 2016, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1155/2016/8590971.
- [24] X. Pei *et al.*, “Bionic mechanical design of titanium bone tissue implants and 3D printing manufacture,” *Mater. Lett.*, vol. 208, pp. 133–137, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.matlet.2017.04.128.
- [25] N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, “3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 106, p. 100578, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
- [26] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, “3D printing of high-strength aluminium alloys,” *Nature*, vol. 549, no. 7672, pp. 365–369, Sep. 2017, doi: 10.1038/nature23894.
- [27] B. Ganbold, S.-J. Heo, J.-Y. Koak, S.-K. Kim, and J. Cho, “Human Stem Cell Responses and Surface Characteristics of 3D Printing Co-Cr Dental Material,” *Materials*, vol. 12, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12203419.
- [28] N. V. Kazantseva, I. V. Ezhov, D. I. Davydov, and A. G. Merkushev, “Analysis of Structure and Mechanical Properties of Co–Cr–Mo Alloy Obtained by 3D Printing,” *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 120, no. 12, pp. 1172–1179, Dec. 2019, doi: 10.1134/S0031918X19120081.
- [29] Y. Bozkurt and E. Karayel, “3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 14, pp. 1430–1450, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.050.
- [30] P. S. D’Urso, “Stereolithographic biomodelling in surgery,” PhD Thesis, The University of Queensland, 1998. doi: 10.14264/uql.2018.730.

- [31] P. H. de Moraes *et al.*, “Anatomical Reproducibility through 3D Printing in Cranio-Maxillo-Facial Defects,” *Int. J. Morphol.*, vol. 33, no. 3, pp. 826–830, Sep. 2015, doi: 10.4067/S0717-95022015000300003.
- [32] G. Dipasquale, A. Poirier, Y. Sprunger, J. W. E. Uiterwijk, and R. Miralbell, “Improving 3D-printing of megavoltage X-rays radiotherapy bolus with surface-scanner,” *Radiat. Oncol.*, vol. 13, no. 1, p. 203, Dec. 2018, doi: 10.1186/s13014-018-1148-1.
- [33] U. Jammalamadaka and K. Tappa, “Recent Advances in Biomaterials for 3D Printing and Tissue Engineering,” *J. Funct. Biomater.*, vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2018, doi: 10.3390/jfb9010022.
- [34] S. Patra and V. Young, “A Review of 3D Printing Techniques and the Future in Biofabrication of Bioprinted Tissue,” *Cell Biochem. Biophys.*, vol. 74, no. 2, pp. 93–98, Jun. 2016, doi: 10.1007/s12013-016-0730-0.
- [35] T. T. Oliveira and A. C. Reis, “Fabrication of dental implants by the additive manufacturing method: A systematic review,” *J. Prosthet. Dent.*, vol. 122, no. 3, pp. 270–274, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.prosdent.2019.01.018.
- [36] S. Esmaili *et al.*, “An artificial blood vessel fabricated by 3D printing for pharmaceutical application,” *Nanomedicine J.*, vol. 6, no. 3, Jul. 2019, doi: 10.22038/nmj.2019.06.00005.
- [37] J. Chen, Z. Zhang, X. Chen, C. Zhang, G. Zhang, and Z. Xu, “Design and manufacture of customized dental implants by using reverse engineering and selective laser melting technology,” *J. Prosthet. Dent.*, vol. 112, no. 5, pp. 1088-1095.e1, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.prosdent.2014.04.026.
- [38] C. Gao *et al.*, “Additive manufacturing technique-designed metallic porous implants for clinical application in orthopedics,” *RSC Adv.*, vol. 8, no. 44, pp. 25210–25227, Jul. 2018, doi: 10.1039/C8RA04815K.
- [39] Y. Jin, J. Plott, R. Chen, J. Wensman, and A. Shih, “Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses – A Review,” *Procedia CIRP*, vol. 36, pp. 199–204, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.125.
- [40] R. Tino, M. Leary, A. Yeo, E. Kyriakou, T. Kron, and M. Brandt, “Additive manufacturing in radiation oncology: a review of clinical practice, emerging trends and research opportunities,” *Int. J. Extreme Manuf.*, vol. 2, no. 1, p. 012003, Mar. 2020, doi: 10.1088/2631-7990/ab70af.
- [41] M. Dey and I. T. Ozbolat, “3D bioprinting of cells, tissues and organs,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 14023, s41598-020-70086-y, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-70086-y.
- [42] M. Hospodiuk, M. Dey, D. Sosnoski, and I. T. Ozbolat, “The bioink: A comprehensive review on bioprintable materials,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 35, no. 2, pp. 217–239, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.biotechadv.2016.12.006.
- [43] S. Agarwal, S. Saha, V. K. Balla, A. Pal, A. Barui, and S. Bodhak, “Current Developments in 3D Bioprinting for Tissue and Organ Regeneration—A Review,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 6, 2020, Accessed: Apr. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmech.2020.589171>
- [44] I. T. Ozbolat, *3D Bioprinting: Fundamentals, Principles and Applications*. Elsevier Inc., 2016. Accessed: Apr. 23, 2022. [Online]. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85014448877&partnerID=8YFLogxK>
- [45] S. Miao *et al.*, “4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration,” *Mater. Today*, vol. 20, no. 10, pp. 577–591, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.mattod.2017.06.005.

- [46] B. R. Ringeisen, B. J. Spargo, and P. K. Wu, *Cell and Organ Printing*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [47] “BS EN ISO 4287: 2000 GEOMETRICAL PRODUCT SPECIFICATIONS (GPS) -.” [https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/bs-en-iso-4287-2000-195497\\_saig\\_bsi\\_bsi\\_466602/](https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/bs-en-iso-4287-2000-195497_saig_bsi_bsi_466602/) (accessed Dec. 26, 2022).
- [48] 14:00-17:00, “ISO 25178-2:2012,” *ISO*. <https://www.iso.org/standard/42785.html> (accessed Dec. 26, 2022).
- [49] “JIS B 0601-2013.pdf,” *toaz.info*. <https://toaz.info/doc-view> (accessed Dec. 26, 2022).
- [50] ASME, *Surface Texture: Surface Roughness, Waviness, and Lay; ASME B46.1-2009*. New York, 2010.
- [51] A. Safdar, H. Z. He, L. Wei, A. Snis, and L. E. Chavez de Paz, “Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 5, pp. 401–408, Jan. 2012, doi: 10.1108/13552541211250391.
- [52] K. Mumtaz and N. Hopkinson, “Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 96–103, Mar. 2009, doi: 10.1108/13552540910943397.
- [53] M. Król, L. A. Dobrzański, Ł. Reimann, and I. Czaja, “Surface quality in selective laser melting of metal powders,” *Arch. Mater. Sci. Eng.*, vol. 60, no. 2, 2013.
- [54] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, and P. Fino, “Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2743–2751, Aug. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4688-9.
- [55] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, and K. E. Evans, “Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 4, pp. 589–597, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011.
- [56] D. Ahn, J.-H. Kweon, S. Kwon, J. Song, and S. Lee, “Representation of surface roughness in fused deposition modeling,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 15–16, pp. 5593–5600, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016.
- [57] R. I. Campbell, M. Martorelli, and H. S. Lee, “Surface roughness visualisation for rapid prototyping models,” *Comput.-Aided Des.*, vol. 34, no. 10, pp. 717–725, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00201-9.
- [58] G. Pyka, G. Kerckhofs, I. Papantoniou, M. Speirs, J. Schrooten, and M. Wevers, “Surface Roughness and Morphology Customization of Additive Manufactured Open Porous Ti6Al4V Structures,” *Materials*, vol. 6, no. 10, pp. 4737–4757, Oct. 2013, doi: 10.3390/ma6104737.
- [59] G. Pyka *et al.*, “Surface Modification of Ti6Al4V Open Porous Structures Produced by Additive Manufacturing,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 14, no. 6, pp. 363–370, Jun. 2012, doi: 10.1002/adem.201100344.
- [60] B. N. Turner and S. A. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 3, pp. 250–261, Apr. 2015, doi: 10.1108/RPJ-02-2013-0017.
- [61] M. Rombouts, G. Maes, W. Hendrix, E. Delarbre, and F. Motmans, “Surface Finish after Laser Metal Deposition,” *Phys. Procedia*, vol. 41, pp. 810–814, 2013, doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.152.

- [62] A. Townsend, N. Senin, L. Blunt, R. K. Leach, and J. S. Taylor, “Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review,” *Precis. Eng.*, vol. 46, pp. 34–47, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.06.001.
- [63] M. S. Alsoufi and A. E. Elsayed, “How Surface Roughness Performance of Printed Parts Manufactured by Desktop FDM 3D Printer with PLA+ is Influenced by Measuring Direction,” *Am. J. Mech. Eng.*, p. 12.
- [64] “Investigating the process parameters of 3D printer extruder of Fused Deposition Modeling- A review.” <https://www.jetir.org/view?paper=JETIR1710001> (accessed Dec. 16, 2022).
- [65] G. T. Smith, *Industrial Metrology: Surfaces and Roundness*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [66] A. W. Fatimatuzahraa, B. Farahaina, and W. A. Y. Yusoff, “The effect of employing different raster orientations on the mechanical properties and microstructure of Fused Deposition Modeling parts,” in *2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)*, Langkawi, Malaysia, Sep. 2011, pp. 22–27. doi: 10.1109/ISBEIA.2011.6088811.
- [67] A. Södergård and M. Stolt, “Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 1123–1163, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0079-6700(02)00012-6.
- [68] V. DeStefano, S. Khan, and A. Tabada, “Applications of PLA in modern medicine,” *Eng. Regen.*, vol. 1, pp. 76–87, 2020, doi: 10.1016/j.engreg.2020.08.002.
- [69] A. Ruellan, V. Ducruet, and S. Domenek, “CHAPTER 5. Plasticization of Poly(lactide),” in *Polymer Chemistry Series*, A. Jiménez, M. Peltzer, and R. Ruseckaite, Eds. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2014, pp. 124–170. doi: 10.1039/9781782624806-00124.
- [70] J. Wang *et al.*, “Nano-Hydroxyapatite Coating Promotes Porous Calcium Phosphate Ceramic-Induced Osteogenesis Via BMP/Smad Signaling Pathway,” *Int. J. Nanomedicine*, vol. Volume 14, pp. 7987–8000, Oct. 2019, doi: 10.2147/IJN.S216182.
- [71] M. Navarro, M. P. Ginebra, J. A. Planell, S. Zepetelli, and L. Ambrosio, “Development and cell response of a new biodegradable composite scaffold for guided bone regeneration,” *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 15, no. 4, pp. 419–422, Apr. 2004, doi: 10.1023/b:jmsm.0000021113.88702.9d.
- [72] X. Zhao, C. Hu, G. Pan, and W. Cui, “Pomegranate-Structured Electrospayed Microspheres for Long-Term Controlled Drug Release,” *Part. Part. Syst. Charact.*, vol. 32, no. 5, pp. 529–535, May 2015, doi: 10.1002/ppsc.201400199.
- [73] “AK STEEL 316/316L STAINLESS STEEL DATA SHEET by Boca Bearings :: Ceramic Bearing Specialists.” <https://www.bocabearings.com/general/ak-steel-316/316l-stainless-steel-data-sheet> (accessed Dec. 21, 2022).
- [74] S. Saleh Alghamdi, S. John, N. Roy Choudhury, and N. K. Dutta, “Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges,” *Polymers*, vol. 13, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2021, doi: 10.3390/polym13050753.
- [75] L. Murr *et al.*, “Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 1, pp. 42–54, Apr. 2012, doi: 10.1016/S2238-7854(12)70009-1.
- [76] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, Mar. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.

- [77] “Design for Additive Manufacturing - 1st Edition.” <https://www.elsevier.com/books/design-for-additive-manufacturing/leary/978-0-12-816721-2> (accessed Oct. 30, 2022).
- [78] A. Rosochowski and A. Matuszak, “Rapid tooling: the state of the art,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 106, no. 1–3, pp. 191–198, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0924-0136(00)00613-0.
- [79] C. E. Majewski, B. S. Hobbs, and N. Hopkinson, “Effect of bed temperature and infra-red lamp power on the mechanical properties of parts produced using high-speed sintering,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 2, no. 2, pp. 103–110, Jun. 2007, doi: 10.1080/17452750701520915.
- [80] D. V. Mahindru and P. Mahendru, “Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future,” p. 13, 2013.
- [81] A. Albarnawi and M. Bashir, “Additive Manufacturing: A New Industrial Revolution-A review,” *J. Sci. Achiev.*, vol. 2, pp. 19–31, Mar. 2017.
- [82] “ASTM F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.” <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmf279212a> (accessed Nov. 23, 2022).
- [83] A. Zhakeyev, P. Wang, L. Zhang, W. Shu, H. Wang, and J. Xuan, “Additive Manufacturing: Unlocking the Evolution of Energy Materials,” *Adv. Sci.*, vol. 4, no. 10, p. 1700187, 2017, doi: 10.1002/advs.201700187.
- [84] “ISO - ISO/ASTM 52900:2021 - Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary.” <https://www.iso.org/standard/74514.html> (accessed Jan. 31, 2022).
- [85] I. Chiulan, A. Frone, C. Brandabur, and D. Panaitescu, “Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters,” *Bioengineering*, vol. 5, no. 1, p. 2, Dec. 2017, doi: 10.3390/bioengineering5010002.
- [86] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications,” *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [87] I. Karabegović, *New Technologies, Development and Application III*. Springer Nature, 2020.
- [88] S. Kumar, *Additive Manufacturing Processes*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-45089-2.
- [89] “Lasers in 3d Printing and Manufacturing (World Scientific Series in 3d Printing) by Chua, Chee Kai/ Vadakke Matham, Murukeshan/ Kim, Young-jin.” <https://singapore.kinokuniya.com/bw/9789814656429> (accessed Nov. 02, 2022).
- [90] “3D Printing and Additive Manufacturing.” <https://www.worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/10200> (accessed Nov. 02, 2022).
- [91] C. K. Chua and K. F. Leong, *3D Printing And Additive Manufacturing: Principles And Applications - Fifth Edition Of Rapid Prototyping*, 5th edition. Singapore ; New Jersey: WSPC, 2016.
- [92] “Binder jetting - BJ | Make.” <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/binder-jetting> (accessed Nov. 04, 2022).
- [93] eBooks.com, “Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications,” *eBooks.com*. <https://www.ebooks.com/en-ad/book/96194709/additive-manufacturing-materials-processes-quantifications-and-applications/jing-zhang/> (accessed Nov. 04, 2022).

- [94] A. Lores, N. Azurmendi, I. Agote, and E. Zuza, “A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics,” *Powder Metall.*, vol. 62, no. 5, pp. 267–296, Oct. 2019, doi: 10.1080/00325899.2019.1669299.
- [95] S. Mirzababaei and S. Pasebani, “A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 3, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2019, doi: 10.3390/jmmp3030082.
- [96] A. Mostafaei *et al.*, “Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 119, p. 100707, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100707.
- [97] I. Chiulan, A. N. Frone, C. Brandabur, and D. M. Panaitescu, “Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters,” *Bioengineering*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2018, doi: 10.3390/bioengineering5010002.
- [98] S.-C. Park, H.-S. Bang, and W.-J. Seong, “Effects of Material Properties on Angular Distortion in Wire Arc Additive Manufacturing: Experimental and Computational Analyses,” *Materials*, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13061399.
- [99] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Directed Energy Deposition Processes,” in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Eds. New York, NY: Springer, 2015, pp. 245–268. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3\_10.
- [100] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, and P. Fino, “Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9163316.
- [101] “What is Directed Energy Deposition (DED)?” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition.aspx> (accessed Nov. 04, 2022).
- [102] J. Gonzalez-Gutierrez, S. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, and C. Holzer, “Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives,” *Materials*, vol. 11, no. 5, p. 840, May 2018, doi: 10.3390/ma11050840.
- [103] A. Maurel *et al.*, “Overview on Lithium-Ion Battery 3D-Printing By Means of Material Extrusion,” *ECS Trans.*, vol. 98, no. 13, p. 3, Sep. 2020, doi: 10.1149/09813.0003ecst.
- [104] J. Dilag, T. Chen, S. Li, and S. A. Bateman, “Design and direct additive manufacturing of three-dimensional surface micro-structures using material jetting technologies,” *Addit. Manuf.*, vol. 27, pp. 167–174, May 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.01.009.
- [105] X. Shen and H. E. Naguib, “A robust ink deposition system for binder jetting and material jetting,” *Addit. Manuf.*, vol. 29, p. 100820, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100820.
- [106] “What is Powder Bed Fusion? Process Definition and Advantages.” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-powder-bed-fusion.aspx> (accessed Nov. 05, 2022).
- [107] A. Zocca, C. M. Gomes, T. Mühler, and J. Günster, “Powder-Bed Stabilization for Powder-Based Additive Manufacturing,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 6, p. 491581, Jan. 2014, doi: 10.1155/2014/491581.
- [108] N. K. Roy, D. Behera, O. G. Dibia, C. S. Foong, and M. A. Cullinan, “A novel microscale selective laser sintering ( $\mu$ -SLS) process for the fabrication of microelectronic parts,” *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41378-019-0116-8.

- [109] A. T. Sutton, C. S. Kriewall, M. C. Leu, and J. W. Newkirk, “Powder characterisation techniques and effects of powder characteristics on part properties in powder-bed fusion processes,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 12, no. 1, pp. 3–29, Jan. 2017, doi: 10.1080/17452759.2016.1250605.
- [110] W. King, A. Anderson, R. Ferencz, N. Hodge, C. Kamath, and S. Khairallah, “Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 31, pp. 957–968, May 2015, doi: 10.1179/1743284714Y.0000000728.
- [111] M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. M. Rubenchik, P. J. Depond, and W. E. King, “Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes,” *Acta Mater.*, vol. 114, pp. 33–42, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.05.017.
- [112] S. Sun, M. Brandt, and M. Easton, “2 - Powder bed fusion processes: An overview,” in *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Ed. Woodhead Publishing, 2017, pp. 55–77. doi: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6.
- [113] L. Jiao, Z. Chua, S. Moon, J. Song, G. Bi, and H. Y. Zheng, “Femtosecond Laser Produced Hydrophobic Hierarchical Structures on Additive Manufacturing Parts,” *Nanomaterials*, vol. 8, p. 601, Aug. 2018, doi: 10.3390/nano8080601.
- [114] “How Powder Bed Fusion Works,” *Engineering Product Design*. <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/powder-bed-fusion/> (accessed Nov. 05, 2022).
- [115] D. X. Luong *et al.*, “Laminated Object Manufacturing of 3D-Printed Laser-Induced Graphene Foams,” *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 28, p. 1707416, Jul. 2018, doi: 10.1002/adma.201707416.
- [116] “Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (accessed Nov. 05, 2022).
- [117] R. Islam and P. Sadhukhan, “AN INSIGHT OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN PHARMACEUTICAL DEVELOPMENT AND APPLICATION: AN UPDATED REVIEW,” vol. 7, pp. 55–80, Jan. 2021.
- [118] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [119] J. Zhang, Q. Hu, S. Wang, J. Tao, and M. Gou, “Digital Light Processing Based Three-dimensional Printing for Medical Applications,” *Int. J. Bioprinting*, vol. 6, no. 1, p. 242, Nov. 2019, doi: 10.18063/ijb.v6i1.242.
- [120] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, “Additive manufacturing of metals,” *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [121] A. Grigoriev, I. Polozov, V. Sufiiarov, and A. Popovich, “In-situ synthesis of Ti<sub>2</sub>AlNb-based intermetallic alloy by selective laser melting,” *J. Alloys Compd.*, vol. 704, pp. 434–442, May 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.02.086.
- [122] M. Tang and P. C. Pistorius, “Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting,” *Int. J. Fatigue*, vol. 94, pp. 192–201, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.06.002.



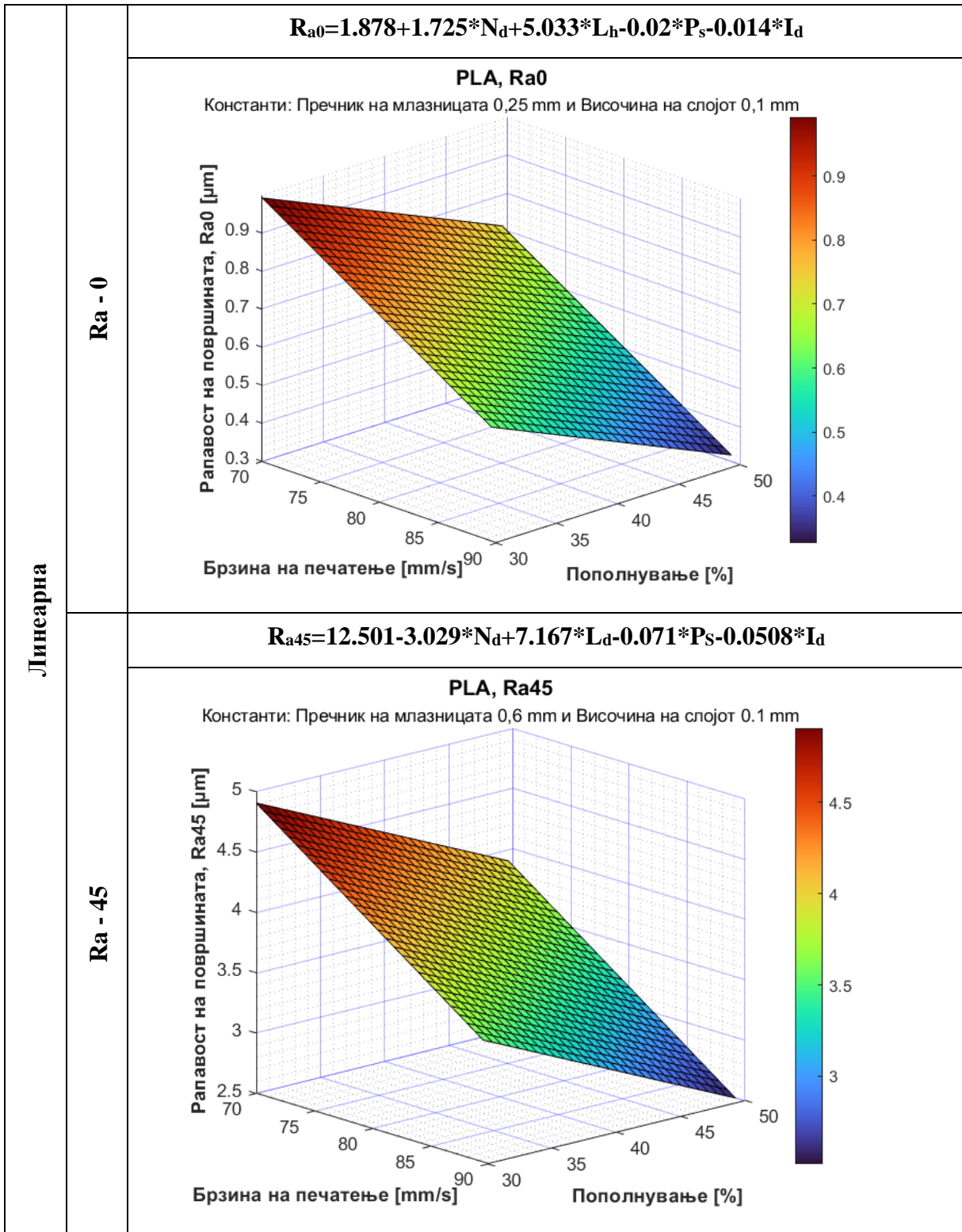
- [123] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 5, pp. 315–360, Jul. 2016, doi: 10.1080/09506608.2015.1116649.
- [124] Z. X. Khoo *et al.*, “3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 10, no. 3, pp. 103–122, Jul. 2015, doi: 10.1080/17452759.2015.1097054.
- [125] K. Kim *et al.*, “3D optical printing of piezoelectric nanoparticle-polymer composite materials,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 10, pp. 9799–9806, Oct. 2014, doi: 10.1021/nn503268f.
- [126] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, and Y. Li, “3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 84, no. 9, pp. 2079–2095, Jun. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7843-2.
- [127] L. Liu, Y. Meng, X. Dai, K. Chen, and Y. Zhu, “3D Printing Complex Egg White Protein Objects: Properties and Optimization,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 267–279, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11947-018-2209-z.
- [128] P. Singh and A. Raghav, “3D Food Printing: A Revolution in Food Technology,” p. 2.
- [129] A. Goulas and R. Friel, “3D printing with moon dust,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, pp. 864–870, Feb. 2016, doi: 10.1108/RPJ-02-2015-0022.
- [130] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [131] N. Labonnote, A. Rønquist, B. Manum, and P. Rüter, “Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities,” *Autom. Constr.*, vol. 72, pp. 347–366, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
- [132] R. MacCurdy, R. Katschmann, Youbin Kim, and D. Rus, “Printable hydraulics: A method for fabricating robots by 3D co-printing solids and liquids,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, May 2016, pp. 3878–3885. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487576.
- [133] M. A. Caminero, J. M. Chacón, I. García-Moreno, and G. P. Rodríguez, “Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 148, pp. 93–103, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.054.
- [134] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, “Mechanical characterization of 3D-printed polymers,” *Addit. Manuf.*, vol. 20, pp. 44–67, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- [135] “Journal of Emerging Trends in Marketing and Management,” no. 1, p. 272.
- [136] D. Owen *et al.*, “3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer,” *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 3, pp. 1–7, Jun. 2018, doi: 10.1007/s40964-018-0037-3.
- [137] W. Hao, Y. Liu, H. Zhou, H. Chen, and D. Fang, “Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites,” *Polym. Test.*, vol. 65, pp. 29–34, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.11.004.
- [138] T. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, Jul. 2014, doi: 10.1177/0731684414530790.
- [139] Z. Liu *et al.*, “Modification of Glass Fiber Surface and Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Challenges and Opportunities: From Organic Chemistry Perspective,” *Curr. Org. Chem.*, vol. 19, no. 11, pp. 991–1010, Jun. 2015.

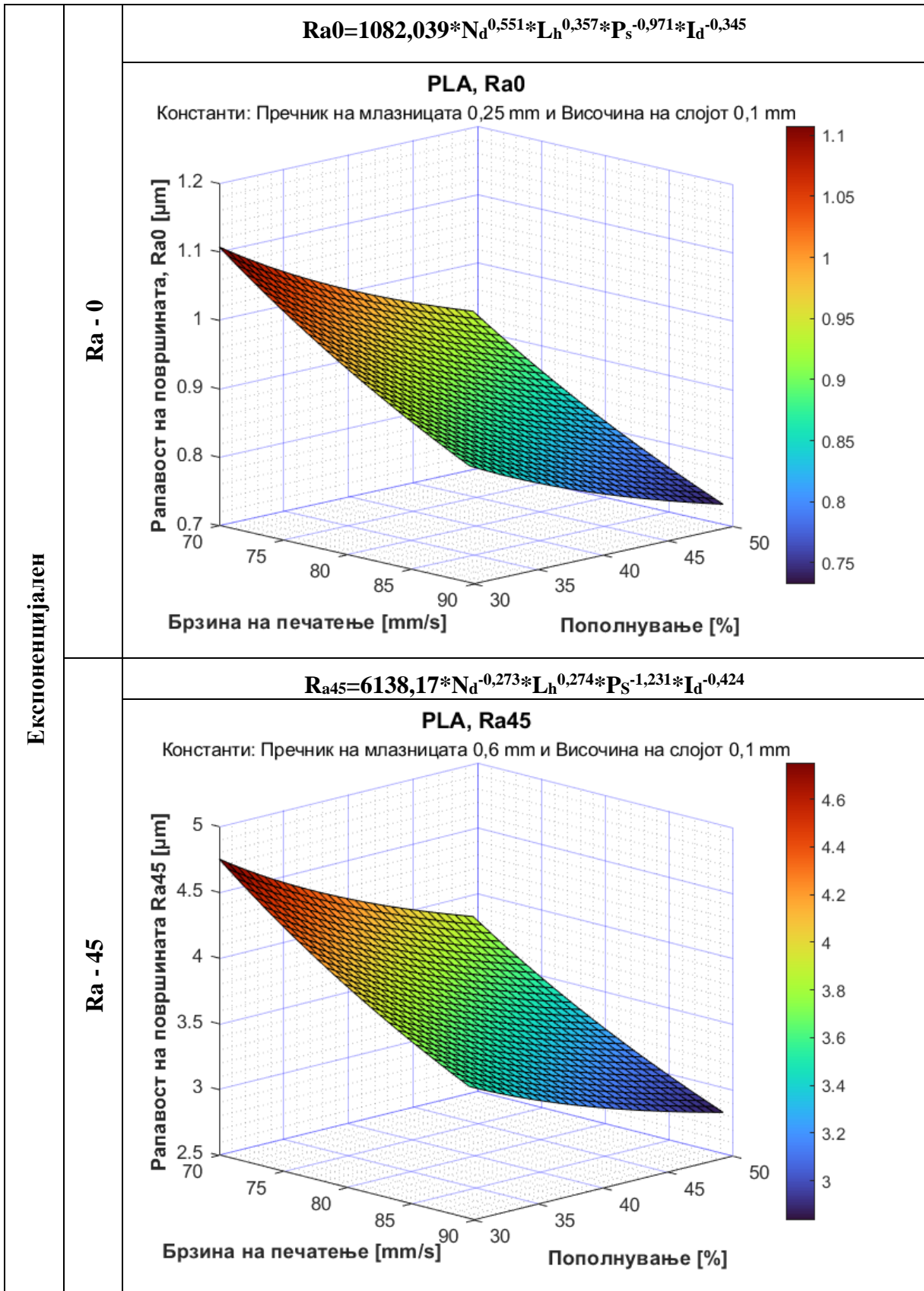
- [140] “Why is Surface Finish Important in Engineering Applications?,” *AZoM.com*, Feb. 13, 2019. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17627> (accessed Nov. 23, 2022).
- [141] <https://www.chinesestandard.net>, *GB/T 1.1-2009: Translated English of Chinese Standard. (GBT 1.1-2009, GB/T1.1-2009, GBT1.1-2009): Directives for standardization - Part 1: Structure and drafting of standards.* <https://www.chinesestandard.net>, 2020.
- [142] C. K. Chua, K. F. Leong, and J. An, “Introduction to rapid prototyping of biomaterials,” in *Rapid Prototyping of Biomaterials*, Elsevier, 2020, pp. 1–15. doi: 10.1016/B978-0-08-102663-2.00001-0.
- [143] “GB/T 3505-2009 - Geometrical Product Specifications (GPS)--Surface texture:Profile method--Terms,definitions and surface texture parameters (TEXT OF DOCUMENT IS IN CHINESE).” <https://webstore.ansi.org/Standards/SPC/gb35052009> (accessed Oct. 22, 2022).
- [144] “GB/T 6062-2009\_English: PDF (GB/T6062-2009).” <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT6062-2009> (accessed Oct. 22, 2022).
- [145] M. S. Alsoufi and A. E. Elsayed, “Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer,” *Mater. Sci. Appl.*, vol. 09, no. 01, pp. 11–40, 2018, doi: 10.4236/msa.2018.91002.
- [146] K. Sun, N. Liu, and X. Cai, “Design of Surface Roughness Evaluation System Based on UWP,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1732, no. 1, p. 012062, Jan. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1732/1/012062.
- [147] “Metrology for Manufacturing: surface measurement.” <https://zeus.plmssc.psu.edu/~manias/MatSc597/roughness/introduction.html> (accessed Nov. 23, 2022).
- [148] S. Paul, A. Nath, and S. S. Roy, “Additive manufacturing of multi-functional biomaterials for bioimplants: a review,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1136, no. 1, p. 012016, Jun. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1136/1/012016.
- [149] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*, 2nd ed. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [150] Peter Woolf et al., *University of Michigan, Chemical Process Dynamics and Controls*. California State University Affordable Learning Solutions Program, 2022.
- [151] M. Nalbant, H. Gökkaya, and G. Sur, “Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 4, pp. 1379–1385, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.01.008.
- [152] N. Qehaja, K. Jakupi, A. Bunjaku, M. Bruçi, and H. Osmani, “Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process,” *Procedia Eng.*, vol. 100, pp. 135–140, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.351.
- [153] N. Vidakis, M. Petousis, N. Vaxevanidis, and J. Kechagias, “Surface Roughness Investigation of Poly-Jet 3D Printing,” *Mathematics*, vol. 8, no. 10, p. 1758, Oct. 2020, doi: 10.3390/math8101758.
- [154] P. Sammaiah, K. Rushmamanisha, N. Praveenadevi, and I. Rajasri Reddy, “The Influence Of Process Parameters On The Surface Roughness Of The 3d Printed Part In FDM Process,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 981, no. 4, p. 042021, Dec. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/981/4/042021.

- [155] “Minitab, LLC. Data Analysis, Statistical & Process Improvement Tools,” 2021. <https://www.minitab.com/content/www/websites/en-us.html> (accessed Nov. 25, 2022).
- [156] “JMP, Version 17 Pro, SAS Institute Inc.” Cary, NC, 2021 1989. Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.jmp.com/support/notes/35/282.html>
- [157] “Analyze Data in Excel - Microsoft Support.” <https://support.microsoft.com/en-us/office/analyze-data-in-excel-3223aab8-f543-4fda-85ed-76bb0295ffc4> (accessed Nov. 25, 2022).
- [158] “MATLAB - MathWorks.” 2021. Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [159] “PrusaSlicer Software | Original Prusa 3D.” [https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer\\_424/](https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/) (accessed Mar. 03, 2022).
- [160] “Slic3r - Open source 3D printing toolbox.” <https://slic3r.org/> (accessed Nov. 25, 2022).
- [161] “SlicerRT.” <http://slicerrt.github.io/> (accessed Nov. 25, 2022).
- [162] “Monaco | Software | Radiation Therapy | Elekta,” Mar. 22, 2022. <https://www.elekta.com/products/radiation-therapy/monaco/> (accessed Dec. 28, 2022).
- [163] K. Jakupi, G. VRTANOSKI, V. DUKOVSKI, and G. HODOLLI, “Design and manufacturing of 3D printed parts for Radiotherapy application,” *Mech. Eng. – Sci. Journal MESJ*, vol. On publication process, 2022.
- [164] A.-C. Shiau, P.-L. Lai, J.-A. Liang, P.-W. Shueng, W.-L. Chen, and W.-P. Kuan, “Dosimetric verification of surface and superficial doses for head and neck IMRT with different PTV shrinkage margins,” *Med. Phys.*, vol. 38, no. 3, pp. 1435–1443, Mar. 2011, doi: 10.1118/1.3553406.
- [165] L. Apipunyasopon, C. Chaloeiparp, T. Wiriyatharakij, and N. Phaisangittisakul, “Characterization of natural rubber as a bolus material for electron beam radiotherapy,” *Rep. Pract. Oncol. Radiother. J. Gt. Cancer Cent. Poznan Pol. Soc. Radiat. Oncol.*, vol. 25, no. 5, pp. 725–729, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.rpor.2020.06.006.
- [166] K. Wakabayashi *et al.*, “A novel real-time shapeable soft rubber bolus for clinical use in electron radiotherapy,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 66, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.1088/1361-6560/ac215b.
- [167] Barrios and Romero, “Decision Tree Methods for Predicting Surface Roughness in Fused Deposition Modeling Parts,” *Materials*, vol. 12, no. 16, p. 2574, Aug. 2019, doi: 10.3390/ma12162574.
- [168] S. Spiller, S. O. Kolstad, and S. M. J. Razavi, “Fabrication and characterization of 316L stainless steel components printed with material extrusion additive manufacturing,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 42, pp. 1239–1248, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.12.158.

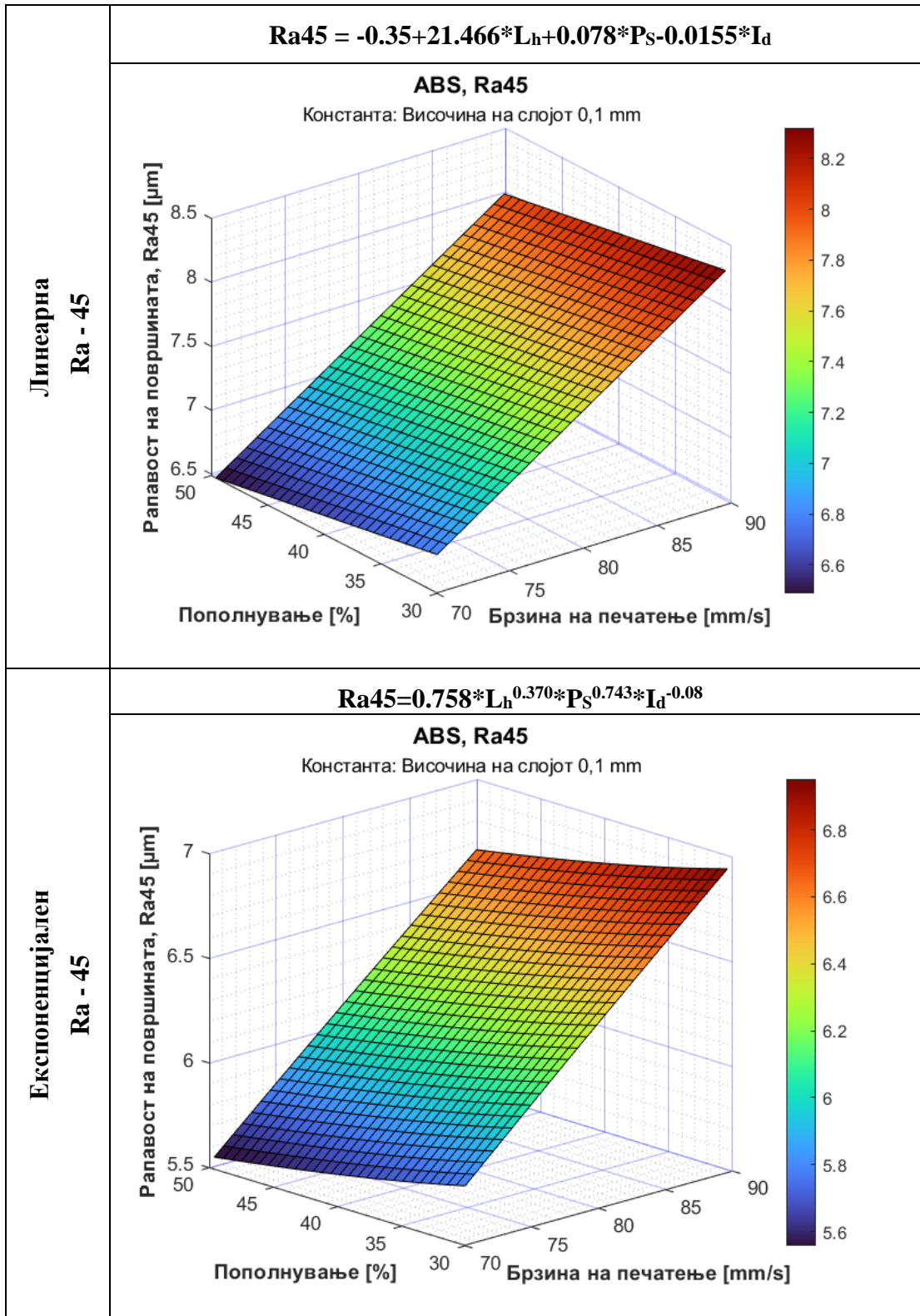
8. АНЕКС 1

а) PLA 3D графикони за минимални вредности на рапавоста на површината Ra.

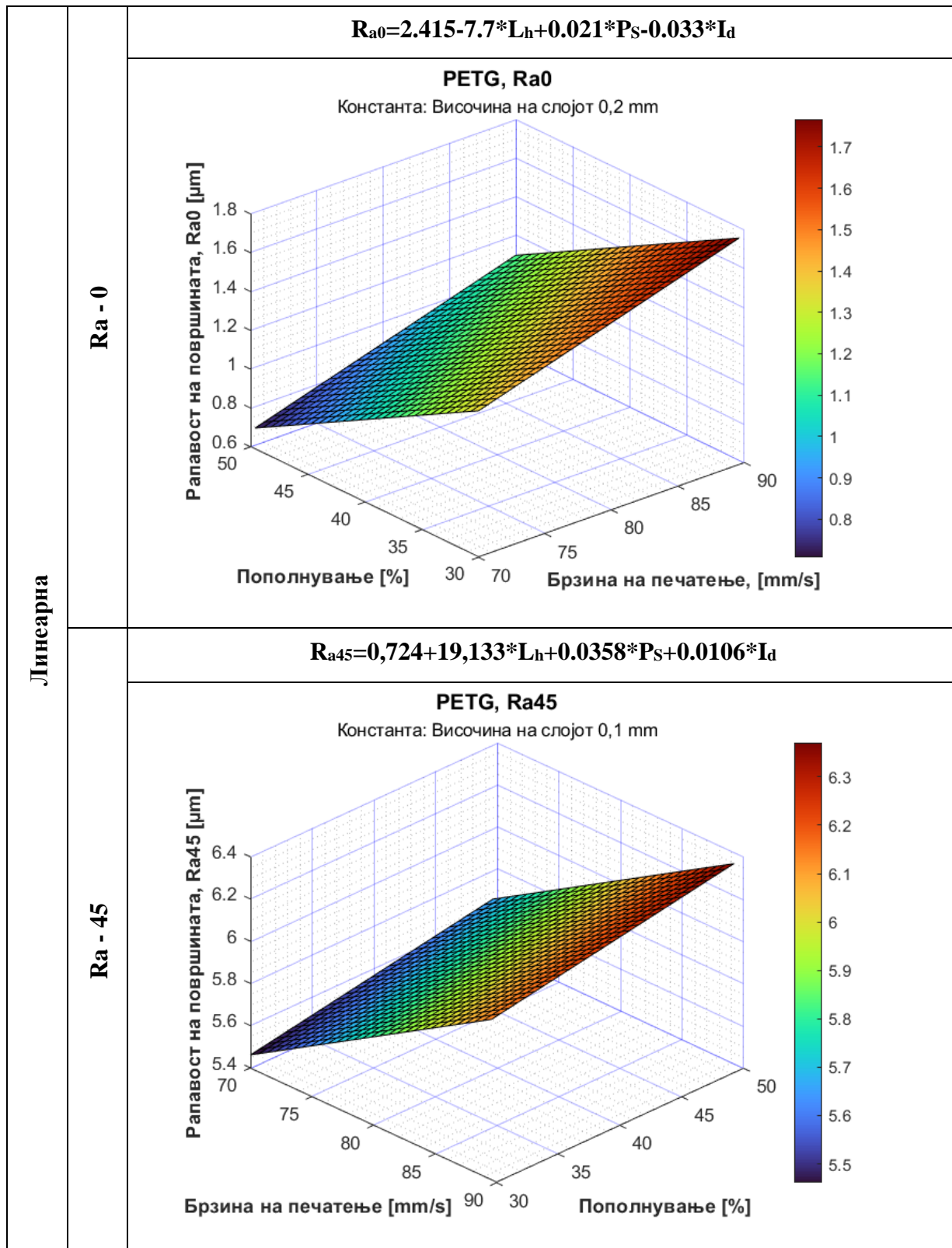


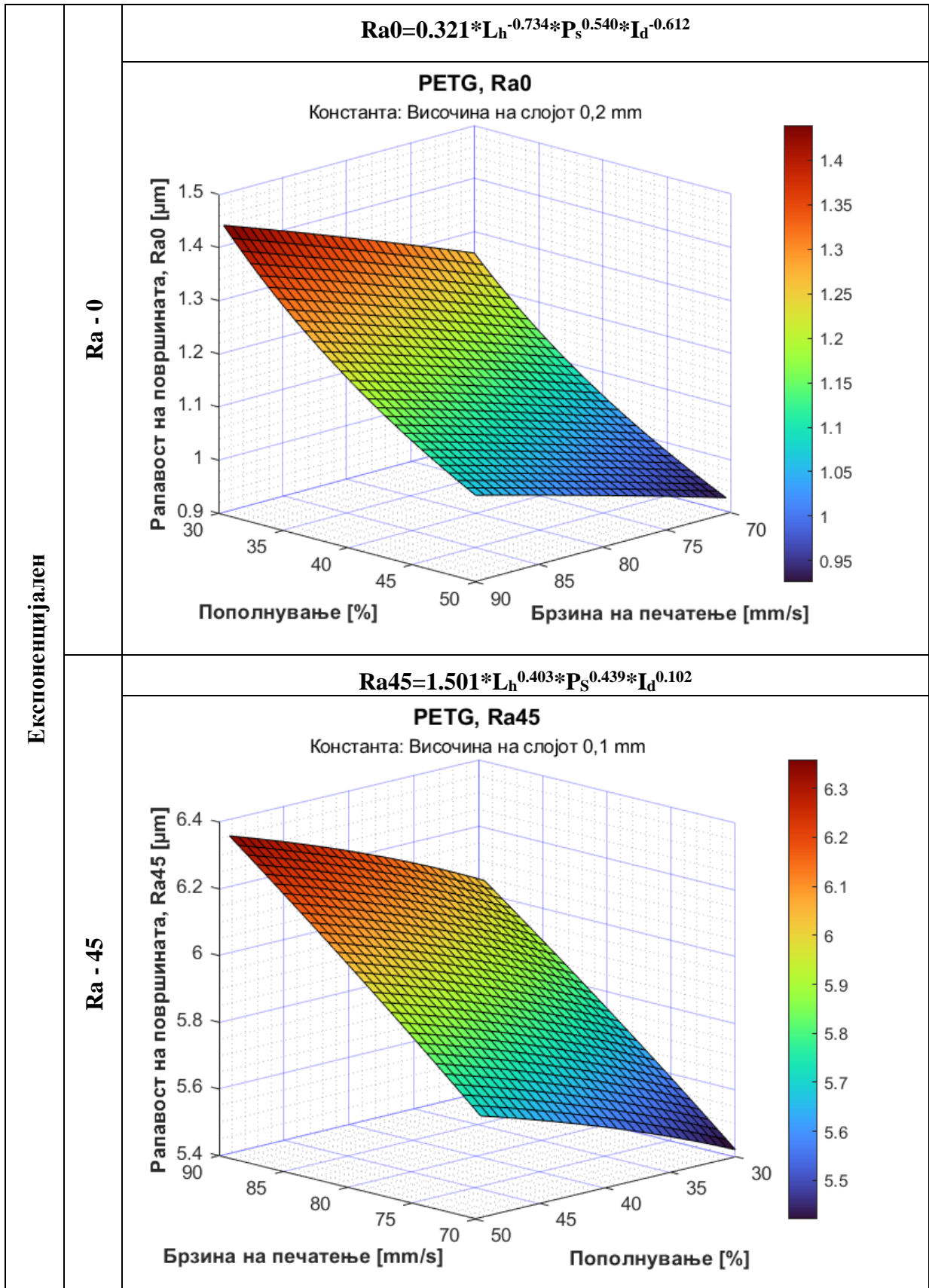


а) ABS 3D-графикони за минимални вредности на рапавоста на површината Ra.



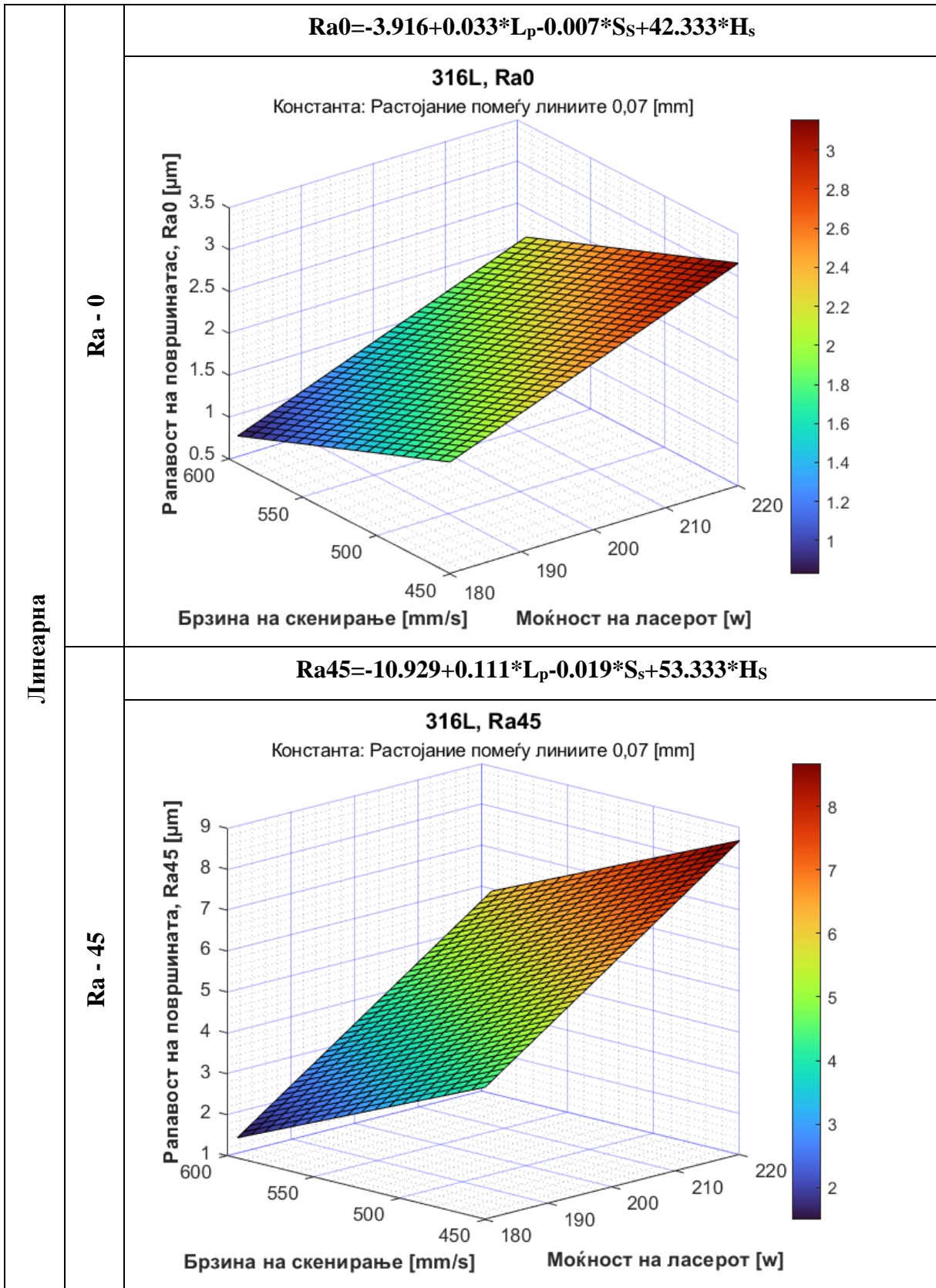
б) PETG 3D-графикони за минимални вредности на рапавоста на површината Ra

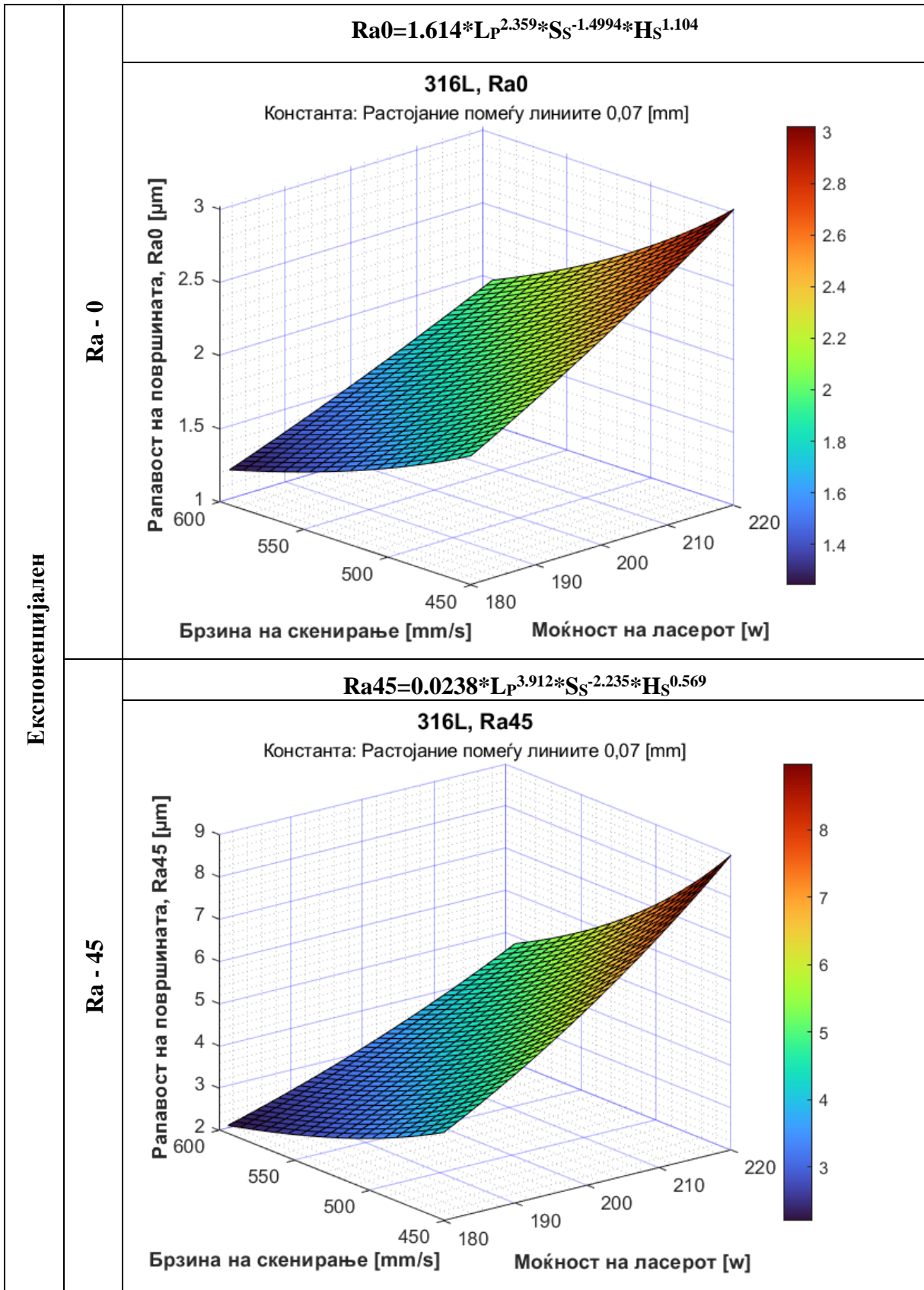






с) DMLS 3D-графикони за минимални вредности на рапавоста на површината Ra





9. АНЕКС 2

Табела 1, Регресиони пресметки за генерирање на теоретските модели за PLA – Рапавост на површината Ra, прикажана во Табела 2, во Глава 5. Моделите се генерирани врз основа на податоците од Табела 1, Глава 5.

а) За 0 степени, линеарен модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.82525471							
R Square	0.68104534							
Adjusted R Square	0.36209068							
Standard Error	0.38156078							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	1.243467718	0.310867	2.135242	0.24030039			
Residual	4	0.582354505	0.145589					
Total	8	1.825822222						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	1.87837838	1.520646934	1.23525	0.284331	-2.34361436	6.1003711	-2.34361436	6.100371115
Nozzle	1.72522523	0.887110786	1.944769	0.123698	-0.73778917	4.1882396	-0.73778917	4.188239625
Layer	5.03333333	3.115430694	1.615614	0.181481	-3.61648897	13.683156	-3.61648897	13.68315563
Speed	-0.0175	0.015577153	-1.12344	0.324116	-0.06074911	0.0257491	-0.06074911	0.025749112
Infilling	-0.0146667	0.015577153	-0.94155	0.399734	-0.05791578	0.0285824	-0.05791578	0.028582445
<b><math>R_{a0}=1.878+1.725*N+5.033*L-0.02*S-0.014*I</math></b>								

б) За 0 степени, експоненцијален модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.801729495							
R Square	0.642770184							
Adjusted R Square	0.285540368							
Standard Error	0.283694332							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	0.579254387	0.144813597	1.799318408	0.291664986			
Residual	4	0.321929895	0.080482474					
Total	8	0.901184282						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	6.98660258	4.414560988	1.582626811	0.188672426	-5.27018367	19.24338883	-5.27018367	19.24338883
Nozzle	0.551351895	0.264345172	2.085727123	0.10533832	-0.18258796	1.285291754	-0.18258796	1.285291754
Layer	0.356924672	0.332582624	1.073190981	0.34361613	-0.56647273	1.280322071	-0.56647273	1.280322071
Speed	-0.97126862	0.921093172	-1.0544738	0.351146105	-3.52863325	1.586096009	-3.52863325	1.586096009
Infilling	-0.34542133	0.45225152	-0.76378146	0.487562859	-1.60107285	0.910230194	-1.60107285	0.910230194
<b><math>1082.039083</math></b>								
<b><math>R_{a0}=1082,039*N^{0,551}*L^{0,357}*S^{-0,971}*I^{-0,345}</math></b>								

а) За 45 степени, линеарен модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.9857985							
R Square	0.9717987							
Adjusted R Square	0.9435974							
Standard Error	0.2260548							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	7.04359685	1.7609	34.4593	0.00234109			
Residual	4	0.20440315	0.0511					
Total	8	7.248						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	12.500721	0.9009039	13.8758	0.00016	9.9994105	15.002031	9.9994105	15.00203094
Nozzle	-3.0297297	0.52556682	-5.76469	0.00449	-4.4889371	-1.570522	-4.4889371	-1.570522318
Layer	7.1666667	1.84573	3.88284	0.0178	2.04209865	12.291235	2.04209865	12.29123468
Speed	-0.071	0.00922865	-7.69343	0.00154	-0.0966228	-0.045377	-0.0966228	-0.04537716
Infilling	-0.0508333	0.00922865	-5.50821	0.0053	-0.0764562	-0.02521	-0.0764562	-0.025210493
<b><math>R_{a45}=12.501-3.029*N+7.167*L-0.071*S-0.0508*I</math></b>								

с) За 45 степени, експоненцијален модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.9898291							
R Square	0.9797616							
Adjusted R Square	0.9595231							
Standard Error	0.0427893							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	0.3545474	0.0886368	48.4109394	0.0012122			
Residual	4	0.0073237	0.0018309					
Total	8	0.3618711						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	8.7222826	0.6658436	13.0995959	0.0001961	6.8736043	10.5709610	6.8736043	10.5709610
Nozzle	-0.2727262	0.0398709	-6.8402305	0.0023900	-0.3834256	-0.1620268	-0.3834256	-0.1620268
Layer	0.2735794	0.0501631	5.4537982	0.0054927	0.1343043	0.4128544	0.1343043	0.4128544
Speed	-1.2309352	0.1389275	-8.8602688	0.0008961	-1.6166599	-0.8452106	-1.6166599	-0.8452106
Infilling	-0.4238345	0.0682126	-6.2134311	0.0034144	-0.6132231	-0.2344458	-0.6132231	-0.2344458
6138.174369								
<b><math>R_{a45}=6138,17*N^{-0,273}*L^{0,274}*S^{-1,231}*I^{-0,424}</math></b>								

d) За 90 степени, линеарен модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.9328112							
R Square	0.8701367							
Adjusted R Square	0.7402735							
Standard Error	0.5751584							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	8.866171171	2.21654	6.70041	0.04621326			
Residual	4	1.323228829	0.33081					
Total	8	10.1894						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	16.326396	2.2921981	7.12259	0.00205	9.9622342	22.690559	9.9622342	22.69055859
Nozzle	-1.5513514	1.337216163	-1.16014	0.31052	-5.2640586	2.1613559	-5.2640586	2.161355918
Layer	-3.4	4.696148828	-0.724	0.50914	-16.438599	9.6385994	-16.438599	9.638599427
Speed	-0.0906667	0.023480744	-3.86132	0.01813	-0.1558597	-0.025474	-0.1558597	-0.02547367
Infilling	-0.0743333	0.023480744	-3.16571	0.034	-0.1395263	-0.00914	-0.1395263	-0.009140336
<b><math>R_{90} = 16.326 - 1.551 * N - 3.4 * L - 0.091 * S - 0.074 * I</math></b>								

e) За 90 степени, експоненцијален модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.928758336							
R Square	0.862592047							
Adjusted R Square	0.725184095							
Standard Error	0.117214628							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	4	0.344998492	0.086249623	6.277599162	0.048454052			
Residual	4	0.054957076	0.013739269					
Total	8	0.399955568						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	9.738346107	1.823974131	5.339081264	0.005928947	4.67418206	14.80251015	4.67418206	14.80251015
Nozzle	-0.05884875	0.109220092	-0.5388088	0.618606481	-0.36209233	0.244394843	-0.36209233	0.244394843
Layer	-0.11556299	0.137413914	-0.84098465	0.447692064	-0.49708518	0.265959196	-0.49708518	0.265959196
Speed	-1.43743868	0.380570145	-3.77706631	0.019485106	-2.49407079	-0.38080656	-2.49407079	-0.38080656
Infilling	-0.5863464	0.186857782	-3.13792871	0.034917333	-1.10514677	-0.06754603	-1.10514677	-0.06754603
<b><math>16955.47564</math></b>								
<b><math>R_{90} = 16955.48 * N^{-0.059} * L^{-0.116} * S^{-1.437} * I^{-0.586}</math></b>								

Табела 2. Пресметка за Ra соодносот експериментални/теоретски, која се однесува на Сликата 2, Глава 5.

Бр	N <sub>d</sub> [mm]	L <sub>h</sub> [mm]	P <sub>s</sub> [mm/s]	I <sub>d</sub> [%]	Surface roughnes Ra [ μm ]								
					Measured			Calculated from equations					
								Linear			Exponential		
					0	45	90	0	45	90	0	45	90
1	0,25	0,10	70	30	1,16	6,12	6,95	0,99	5,97	7,01	1,11	6,04	7,31
2	0,25	0,15	80	40	0,74	4,75	4,63	0,90	5,11	5,19	1,02	5,07	4,86
3	0,25	0,20	90	50	1,02	4,40	3,31	0,82	4,25	3,37	0,93	4,31	3,48
4	0,40	0,10	80	50	1,41	3,72	4,60	0,77	3,79	4,39	1,06	3,63	4,35
5	0,40	0,15	90	30	1,19	4,49	5,09	1,10	4,45	4,79	1,30	4,35	4,73
6	0,40	0,20	70	40	1,96	5,82	6,47	1,61	5,72	5,70	1,66	5,68	5,54
7	0,60	0,10	90	40	1,19	3,04	4,09	1,06	2,98	3,91	1,27	3,09	4,09
8	0,60	0,15	70	50	1,33	4,25	4,51	1,57	4,25	4,82	1,74	4,28	4,91
9	0,60	0,20	80	30	2,29	4,81	4,84	1,90	4,91	5,22	2,02	4,88	5,29

Пресметки за креирање на Слика 5.2

R - response (measured/calculated)						
	Ra-0 Lin,	Ra-0 Exp,	Ra-45 Lin,	Ra-45 Exp,	Ra-90 Lin,	Ra-90 Exp,
1	1,17	1,05	1,03	1,01	0,99	0,95
2	0,82	0,73	0,93	0,94	0,89	0,95
3	1,25	1,09	1,04	1,02	0,98	0,95
4	1,83	1,33	0,98	1,03	1,05	1,06
5	1,08	0,92	1,01	1,03	1,06	1,08
6	1,21	1,18	1,02	1,02	1,14	1,17
7	1,13	0,94	1,02	0,98	1,05	1,00
8	0,85	0,77	1,00	0,99	0,94	0,92
9	1,21	1,13	0,98	0,99	0,93	0,92
<b>Average</b>	1,171	1,015	1,000	1,002	1,003	0,999
<b>Min</b>	0,818	0,727	0,930	0,938	0,892	0,916
<b>Q1</b>	1,079	0,916	0,983	0,986	0,937	0,950
<b>8Median</b>	1,169	1,047	1,009	1,014	0,992	0,952
<b>Q3</b>	1,214	1,135	1,021	1,024	1,049	1,058
<b>Max</b>	1,828	1,334	1,036	1,031	1,136	1,167
<b>Box 1</b>	1,079	0,916	0,983	0,986	0,937	0,950
<b>IQR (50%)</b>	0,090	0,132	0,026	0,027	0,055	0,002
<b>Box 3</b>	0,045	0,087	0,012	0,010	0,057	0,105
<b>Whisper U 90%</b>	0,553	0,180	0,014	0,006	0,078	0,099
<b>Whisper D 90%</b>	0,234	0,189	0,052	0,049	0,044	0,034
<b>Lower Bound</b>	0,944	0,719	0,943	0,945	0,854	0,947
<b>Upper Bound</b>	1,349	1,332	1,060	1,065	1,132	1,061

Табела 3. Податоци за генерирање на Слика 4, Глава 5. Примерокот 1 е мерен 10 пати.

Measurement	Ra0	Rz0	Rq0	Ra45	Rz45	Rq45	Ra90	Rz90	Rq90
1	0,77	3,41	0,92	6,31	22,63	7,11	7,16	27,6	8,09
2	1,28	6,24	1,55	6,02	21,15	6,73	7,01	28,01	8,07
3	1,38	7,28	1,73	5,35	21,81	6,11	7,12	27,7	8,13
4	0,96	3,73	1,10	6,34	24,02	7,22	7,34	28,55	8,42
5	0,66	2,88	0,80	5,33	21,00	6,19	7,37	28,55	8,42
6	1,01	5,01	1,23	5,97	22,36	6,79	7,07	27,07	8,02
7	1,23	5,09	1,43	5,76	22,14	6,53	7,15	27,67	8,06
8	1,35	6,4	1,58	5,45	21,35	6,12	6,98	28,37	8,07
9	0,75	3,19	0,91	6,20	23,72	7,05	7,01	27,44	7,96
10	1,11	5,39	1,35	5,52	20,21	6,26	7,11	27,00	8,01
Min	<b>0,660</b>	<b>2,880</b>	<b>0,800</b>	<b>5,330</b>	<b>20,210</b>	<b>6,110</b>	<b>6,980</b>	<b>27,000</b>	<b>7,960</b>
Average	<b>1,050</b>	<b>4,862</b>	<b>1,260</b>	<b>5,825</b>	<b>22,039</b>	<b>6,611</b>	<b>7,132</b>	<b>27,796</b>	<b>8,125</b>
Max	<b>1,380</b>	<b>7,280</b>	<b>1,730</b>	<b>6,340</b>	<b>24,020</b>	<b>7,220</b>	<b>7,370</b>	<b>28,550</b>	<b>8,420</b>
Stand. Deviat.	<b>0,262</b>	<b>1,512</b>	<b>0,320</b>	<b>0,396</b>	<b>1,200</b>	<b>0,429</b>	<b>0,133</b>	<b>0,564</b>	<b>0,162</b>

Сооднос на средната вредност на серијата, поделен со соодветна измерена вредност

Nr	Ra-0	Rz-0	Rq-0	Ra-45	Rz-45	Rq-45	Ra-90	Rz-90	Rq-90
1	1,36	1,43	1,37	0,92	0,97	0,93	1,00	1,01	1,00
2	0,82	0,78	0,81	0,97	1,04	0,98	1,02	0,99	1,01
3	0,76	0,67	0,73	1,09	1,01	1,08	1,00	1,00	1,00
4	1,09	1,30	1,15	0,92	0,92	0,92	0,97	0,97	0,96
5	1,59	1,69	1,58	1,09	1,05	1,07	0,97	0,97	0,96
6	1,04	0,97	1,02	0,98	0,99	0,97	1,01	1,03	1,01
7	0,85	0,96	0,88	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	1,01
8	0,78	0,76	0,80	1,07	1,03	1,08	1,02	0,98	1,01
9	1,40	1,52	1,38	0,94	0,93	0,94	1,02	1,01	1,02
10	0,95	0,90	0,93	1,06	1,09	1,06	1,00	1,03	1,01
Average	1,065	1,098	1,065	1,004	1,003	1,004	1,000	1,000	1,000
Min	0,761	0,668	0,728	0,919	0,918	0,916	0,968	0,974	0,965
Q1	0,829	0,810	0,830	0,947	0,977	0,947	0,996	0,983	1,001
Median	0,993	0,963	0,979	0,993	1,003	0,997	1,002	1,004	1,007
Q3	1,296	1,395	1,314	1,065	1,040	1,065	1,015	1,012	1,012
Max	1,591	1,688	1,575	1,093	1,090	1,082	1,022	1,029	1,021
Box 1	0,829	0,810	0,830	0,947	0,977	0,947	0,996	0,983	1,001
IQR (50%)	0,164	0,153	0,149	0,047	0,026	0,051	0,006	0,021	0,006
Box 3	0,303	0,432	0,335	0,072	0,037	0,068	0,013	0,007	0,005
Whisper D 90%	0,265	0,264	0,235	0,025	0,046	0,015	0,006	0,016	0,008
WhisperU 90%	0,061	0,128	0,091	0,025	0,053	0,028	0,026	0,008	0,032
Lower Bound	0,582	0,580	0,607	0,876	0,938	0,871	0,988	0,951	0,991
Upper Bound	1,542	1,625	1,537	1,136	1,079	1,141	1,024	1,043	1,021
Ideal	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Табела 4, Регресиони пресметки за генерирање на теоретските модели за ABS – Рапавост на површината Ra, прикажана во Табела 5, во Глава 5. Моделите се генерирани врз основа на податоците од Табела 4, Глава 5.

f) За 90 степени, линеарен модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.97431634							
R Square	0.94929233							
Adjusted R Square	0.91886773							
Standard Error	0.1676438							
Observations	9							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	2.6307	0.8769	31.2015	0.001158			
Residual	5	0.14052222	0.0281					
Total	8	2.77122222						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	1.55444444	0.64807817	2.39854	0.06173	-0.1114935	3.220382	-0.111493516	3.2203824
LH (mm)	11.4666667	1.36880591	8.37713	0.0004	7.948039	14.98529	7.948039048	14.9852943
PS (mm/s)	0.03183333	0.00684403	4.65126	0.00558	0.0142402	0.049426	0.014240195	0.04942647
I (%)	-0.00916667	0.00684403	-1.3394	0.23811	-0.0267598	0.008426	-0.026759805	0.00842647
<b><math>R_{a90}=1.554+11.166*L+0.031*P-0.009*I</math></b>								

g) За 90 степени, експоненцијален модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.97954736							
R Square	0.95951304							
Adjusted R Square	0.93522086							
Standard Error	0.02722213							
Observations	9							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	0.08781122	0.02927041	39.4988509	0.00066213			
Residual	5	0.003705223	0.00074104					
Total	8	0.091516443						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	0.44437138	0.422934542	1.05068596	0.34150909	-0.64281647	1.53155924	-0.64281647	1.53155924
LH (mm)	0.30328233	0.031913251	9.50333567	0.00021814	0.22124671	0.38531796	0.22124671	0.38531796
PS (mm/s)	0.4590464	0.088384285	5.19375595	0.00348511	0.23184737	0.68624544	0.23184737	0.68624544
I (%)	-0.04769758	0.043396182	-1.09911924	0.32180001	-0.15925102	0.06385586	-0.15925102	0.06385586
<b><math>R_{a90}=1.559*L^{0.303}*P^{0.459}*I^{-0.047}</math></b>								



Табела 5, Регресиони пресметки за генерирање на теоретските модели за РЕТГ – Рапавост на површината Ra, прикажана во Табела 8, во Глава 5. Моделите се генерирани врз основа на податоците од Табела 7, Глава 5.

h) За 90 степени, линеарен модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.93289362							
R Square	0.8702905							
Adjusted R Square	0.7924648							
Standard Error	0.50028103							
Observations	9							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	8.39635	2.798783	11.18256	0.011757021			
Residual	5	1.251405556	0.250281					
Total	8	9.647755556						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	0.60777778	1.933988666	0.314261	0.766012	-4.36369836	5.5792539	-4.3636984	5.579253913
LH (mm)	18.6666667	4.084777522	4.569812	0.006003	8.166411765	29.166922	8.16641177	29.16692157
PS (mm/s)	0.06916667	0.020423888	3.386557	0.019534	0.016665392	0.1216679	0.01666539	0.121667941
I (%)	-0.0223333	0.020423888	-1.09349	0.324039	-0.07483461	0.0301679	-0.0748346	0.030167941
<b><math>R_{90}=0.6077+18.666L+0.069*P-0.022*I</math></b>								

i) За 90 степени, експоненцијален модел

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.940482624							
R Square	0.884507565							
Adjusted R Square	0.815212104							
Standard Error	0.058037915							
Observations	9							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	0.128985717	0.042995239	12.76429299	0.008844629			
Residual	5	0.016841998	0.0033684					
Total	8	0.145827715						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	0.016867415	0.90170154	0.018706207	0.985798992	-2.301030183	2.334765014	-2.301030183	2.334765014
LH (mm)	0.335364166	0.068039435	4.928967523	0.004363497	0.16046323	0.510265102	0.16046323	0.510265102
PS (mm/s)	0.686014612	0.18843636	3.640563909	0.01489468	0.201623527	1.170405696	0.201623527	1.170405696
I (%)	-0.079828816	0.092521183	-0.862816632	0.427675132	-0.317662089	0.158004458	-0.317662089	0.158004458
<b><math>1.017010473</math></b>								
<b><math>R_{90}=1.017*L^{0.335}*P^{0.686}*I^{-0.078}</math></b>								

Табела 6, Регресиони пресметки за генерирање на теоретските модели за 316L – Рапавост на површината Ra, прикажана во Табела 12, во Глава 5. Моделите се генерирани врз основа на податоците од Табела 11, Глава 5.

ј) За 0 степени, Ra

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.873759849							
R Square	0.763456273							
Adjusted R Square	0.621530037							
Standard Error	0.595648106							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	5.725616667	1.908538889	5.37925	0.050515427			
Residual	5	1.773983333	0.354796667					
Total	8	7.4996						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-3.916666667	3.527495706	-1.110324999	0.31738	-12.9843831	5.1510497	-12.9843831	5.15104972
power	0.03375	0.012158616	2.775809339	0.0391	0.002495282	0.0650047	0.002495282	0.06500472
Scan speed	-0.0074	0.003183873	-2.32421327	0.0677	-0.01558441	0.0007844	-0.01558441	0.00078441
Hatch	42.33333333	24.31723212	1.740877956	0.14218	-20.1761018	104.84277	-20.1761018	104.842769

а) За 0 степени, Rz

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.841079748							
R Square	0.707415142							
Adjusted R Square	0.531864228							
Standard Error	3.283490303							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	130.3358794	43.44529312	4.02969	0.083834353			
Residual	5	53.90654286	10.78130857					
Total	8	184.2424222						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-24.43428571	19.44520233	-1.256571431	0.26442	-74.4197696	25.551198	-74.4197696	25.5511982
power	0.178166667	0.067023965	2.658253153	0.04498	0.005876079	0.3504573	0.005876079	0.35045725
Scan speed	-0.027247619	0.017550994	-1.552482963	0.18125	-0.07236389	0.0178686	-0.07236389	0.01786865
Hatch	216.6666667	134.0479303	1.616337277	0.16694	-127.914508	561.24784	-127.914508	561.247841

б) За 0 степени, Rq

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.88382331							
R Square	0.781143643							
Adjusted R Square	0.649829829							
Standard Error	0.684088549							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	8.351536508	2.783845503	5.94868	0.041913371			
Residual	5	2.339885714	0.467977143					
Total	8	10.69142222						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-3.753809524	4.051250046	-0.926580557	0.39667	-14.1678793	6.6602603	-14.1678793	6.66026026
power	0.042	0.013963899	3.007755921	0.02983	0.006104655	0.0778953	0.006104655	0.07789535
Scan speed	-0.00932381	0.003656607	-2.549852708	0.05128	-0.01872342	7.58E-05	-0.01872342	7.5798E-05
Hatch	42.33333333	27.92779807	1.5158135	0.19	-29.4573571	114.12402	-29.4573571	114.124024

с) За 45 степени, Ra

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.9346009							
R Square	0.8734789							
Adjusted R Square	0.7975663							
Standard Error	1.1316118							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	44.20327381	14.7344	11.5064	0.011061706			
Residual	5	6.40272619	1.28055					
Total	8	50.606						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-10.929286	6.70153347	-1.6309	0.16385	-28.15612592	6.29755449	-28.1561259	6.29755449
power	0.1105	0.023098929	4.78377	0.00495	0.051122313	0.16987769	0.05112231	0.16987769
Scan speed	-0.0194143	0.006048719	-3.2097	0.02374	-0.034963014	-0.0038656	-0.03496301	-0.0038656
Hatch	53.3333333	46.19785778	1.15445	0.30049	-65.42204072	172.088707	-65.4220407	172.088707

d) За 45 степени, Rz

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.7947083							
R Square	0.6315613							
Adjusted R Square	0.4104981							
Standard Error	6.473609							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	359.1808865	119.727	2.85693	0.143889565			
Residual	5	209.538069	41.9076					
Total	8	568.7189556						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-43.03619	38.33744755	-1.1226	0.31262	-141.5857368	55.5133558	-141.585737	55.5133558
power	0.3110833	0.132141991	2.35416	0.06522	-0.028598468	0.65076513	-0.02859847	0.65076513
Scan speed	-0.0416762	0.034602896	-1.2044	0.28233	-0.130625766	0.04727338	-0.13062577	0.04727338
Hatch	332	264.2839818	1.25622	0.26453	-347.363603	1011.3636	-347.363603	1011.3636

e) За 45 степени, Rq

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.9267738							
R Square	0.8589097							
Adjusted R Square	0.7742555							
Standard Error	1.317898							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	52.86692381	17.6223	10.1461	0.014442627			
Residual	5	8.68427619	1.73686					
Total	8	61.5512						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-10.544286	7.804741791	-1.351	0.23461	-30.60701319	9.51844177	-30.6070132	9.51844177
power	0.1193333	0.026901481	4.43594	0.00679	0.050180875	0.18848579	0.05018087	0.18848579
Scan speed	-0.0219143	0.007044461	-3.1109	0.02653	-0.04002265	-0.0038059	-0.04002265	-0.0038059
Hatch	56	53.80296209	1.04083	0.34564	-82.30491706	194.304917	-82.3049171	194.304917

f) За 90 степени, Ra

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.88613685							
R Square	0.78523851							
Adjusted R Square	0.65638162							
Standard Error	2.32843758							
Observations	9							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	99.11614292	33.0387	6.09388	0.040050161			
Residual	5	27.10810789	5.42162					
Total	8	126.2242508						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-27.249087	13.7892717	-1.9761	0.1051	-62.6955387	8.197364	-62.695539	8.19736405
power	0.19206852	0.047529033	4.04108	0.00991	0.069891249	0.3142458	0.06989125	0.314245788
Scan speed	-0.0155886	0.012446022	-1.2525	0.26578	-0.04758214	0.0164049	-0.0475821	0.016404895
Hatch	58.7962963	95.05806628	0.61853	0.56331	-185.558242	303.15083	-185.55824	303.1508348

g) За 90 степени, Rz

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.84675586							
R Square	0.71699548							
Adjusted R Square	0.54719277							
Standard Error	8.9533012							
Observations	9							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	1015.452091	338.484	4.22252	0.07747695			
Residual	5	400.8080116	80.1616					
Total	8	1416.260103						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-91.479516	53.02246609	-1.7253	0.14507	-227.778104	44.819072	-227.7781	44.81907233
power	0.61391296	0.182758495	3.35915	0.02013	0.144117294	1.0837086	0.14411729	1.083708631
Scan speed	-0.0411823	0.047857408	-0.8605	0.42883	-0.16420366	0.0818391	-0.1642037	0.081839108
Hatch	293.140741	365.5169908	0.80199	0.45896	-646.450596	1232.7321	-646.4506	1232.732078

h) За 90 степени, Rq

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.86898476							
R Square	0.75513451							
Adjusted R Square	0.60821521							
Standard Error	2.83651567							
Observations	9							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	124.0615233	41.3538	5.13979	0.054876797			
Residual	5	40.2291058	8.04582					
Total	8	164.2906291						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-30.622397	16.79816782	-1.823	0.12792	-73.8034619	12.558668	-73.803462	12.55866824
power	0.21680185	0.057900134	3.74441	0.01337	0.06796482	0.3656389	0.06796482	0.365638884
Scan speed	-0.0160224	0.015161814	-1.0568	0.33898	-0.05499712	0.0229522	-0.0549971	0.02295225
Hatch	61.4962963	115.8002674	0.53105	0.61811	-236.177768	359.17036	-236.17777	359.1703603

Табела 7. Пресметки за соодносот на Ra, експериментални/теоретски, кои се однесуваат на сликата 18, Глава 5,

Бр	L <sub>p</sub> (W)	S <sub>s</sub> (mm/s)	H <sub>s</sub> (mm)	Surface roughnes Ra [ μm ]								
				Measured			Calculated from equations					
							Linear			Exponential		
				0	45	90	0	45	90	0	45	90
1	180	450	0,07	2,04	4,79	5,61	1,96	4,05	4,68	1,88	3,82	4,88
2	180	500	0,08	2,03	4,03	5,30	2,03	3,64	4,51	1,86	3,27	4,62
3	180	600	0,09	1,75	2,48	4,56	1,75	2,27	3,60	1,61	2,33	4,00
4	200	450	0,08	2,28	5,34	6,32	3,05	6,79	9,10	2,80	6,25	8,25
5	200	500	0,09	2,17	5,08	5,75	3,13	6,37	8,94	2,72	5,29	7,75
6	200	600	0,07	1,43	2,38	4,27	1,58	3,40	6,27	1,57	3,03	5,74
7	220	450	0,09	4,79	10,34	15,29	4,15	9,52	13,53	3,99	9,73	13,25
8	220	500	0,07	2,70	7,53	12,19	2,96	7,50	11,61	2,58	6,62	10,65
9	220	600	0,08	2,38	6,69	11,04	2,68	6,14	10,69	2,27	4,77	9,28

Пресметки за креирање на Слика 5.18

R - response (measured/calculated)						
	Ra-0 Lin.	Ra-0 Exp.	Ra-45 Lin.	Ra-45 Exp.	Ra-90 Lin.	Ra-90 Exp.
1	1,04	1,08	1,18	1,25	1,20	1,15
2	1,00	1,09	1,11	1,23	1,17	1,15
3	1,00	1,08	1,09	1,06	1,27	1,14
4	0,75	0,82	0,79	0,86	0,69	0,77
5	0,69	0,80	0,80	0,96	0,64	0,74
6	0,90	0,91	0,70	0,78	0,68	0,74
7	1,15	1,20	1,09	1,06	1,13	1,15
8	0,91	1,05	1,00	1,14	1,05	1,14
9	0,89	1,05	1,09	1,40	1,03	1,19
<b>Average</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Min</b>	0,927	1,009	0,983	1,084	0,986	1,020
<b>Q1</b>	0,694	0,798	0,699	0,785	0,643	0,742
<b>Median</b>	0,889	0,912	0,797	0,960	0,694	0,766
<b>Q3</b>	0,914	1,046	1,086	1,063	1,050	1,145
<b>Max</b>	1,000	1,084	1,093	1,233	1,174	1,150
<b>Box 1</b>	0,889	0,912	0,797	0,960	0,694	0,766
<b>IQR (50%)</b>	0,025	0,134	0,289	0,104	0,356	0,379
<b>Box 3</b>	0,086	0,038	0,006	0,170	0,124	0,005
<b>Whisper U 90%</b>	0,139	0,105	0,080	0,153	0,083	0,036
<b>Whisper D 90%</b>	0,175	0,114	0,098	0,175	0,051	0,024
<b>Lower Bound</b>	0,851	0,711	0,365	0,804	0,160	0,198
<b>Upper Bound</b>	1,037	1,286	1,525	1,389	1,709	1,718

Табела 8. Пресметки за слика 20, Глава 5, согласно „помалото е подобро“ за Ra-90. Врз основа на независните и зависните вредности од Табела 11, Глава 5.

	Мокност на ласерот [w], значајност 1.		Брзина на скенирање [mm/s], значајност 2.		Растојание помеѓу линиите [mm], значајност 3.	
Средна вредност од средните вредности	Ниво	Средно од средните	Ниво	Средно од средните	Ниво	Средно од средните
	180	5,16	450	9,07	0,07	7,36
	200	5,45	500	7,75	0,08	7,55
	220	12,84	600	6,62	0,09	8,53
	Разлика = 7,68		Разлика = 2,45		Разлика = 1,18	
Средна вредност од соодносот SN	Ниво	Средно од средните	Ниво	Средно од средните	Ниво	Средно од средните
	180	-14,22	450	-18,23	0,07	-16,44
	200	-14,61	500	-17,13	0,08	-17,12
	220	22,09	600	-15,55	0,09	-17,35
	Разлика = 7,87		Разлика = 2,68		Разлика = 0,92	