



Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Машински факултет - Скопје



м-р Јелена Џокиќ, дипл.инж. по индустриски дизајн

# ДИЗАЈНИРАЊЕ НА ФОРМАТА ЗА АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО

докторска дисертација

СКОПЈЕ, 2020



Ss Cyril and Methodius University in Skopje

Faculty of Mechanical Engineering - Skopje



**Jelena Djokikj**, MSc in Industrial Design and Marketing

# **FORM DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING**

**Doctoral dissertation**

SKOPJE, 2020

**Ментор**

**Проф. д-р Татјана Кандиќјан**

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Машински факултет – Скопје

**Членови на комисијата**

**Проф. д-р. Софија Сидоренко,**

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Машински факултет – Скопје

**Проф. д-р. Атанас Кочов,**

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Машински факултет – Скопје

**Проф. д-р. Ристо Ташевски,**

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Машински факултет – Скопје

**Проф. д-р. Александар Маричковиќ,**

Универзитет во Белград, машински факултет

Датум на одбрана: 21.2.2020 година

## АПСТРАКТ

Технологиите на адитивното производство од нивна појава во доцните 90десети, бележат голем раст и развој. Со зголемениот развој се отвораат нови можности нивна примена во различни области. Тоа допринесува за зголемен интерес од страна на индустријата и академската средина. Една од најголемите предности на технологиите на адитивното производство е можноста за изработка на форми со извонредна сложеност во геометријата. Тоа ги прави особени интересни за индустриските дизајнери, кои се постојано ограничувани во однос на формата од класичните технологии. Технологиите за адитивно производство имаат целосно спротивен начин на работа во однос на класичните технологии, а тоа е со додавање на материјал, што создава низа предности и предизвици во нивното користење кои треба да се совладаат и надминат од страна на корисниците. Зголемениот интерес на индустриските дизајнери за овие технологии создава потреба за дополнителни истражувања во насока на приближување на адитивното производство до нив. Изработката на модели со АП, условува тие да бидат CAD модели, така што развојот на овие технологии треба да биде следен од софтверските пакети. Софтверските пакети за параметарски дизајн во голема мерка можат да одговорат на барањата за дизајнирање на модели со сложена и органска форма.

Со оваа докторска дисертација е развиена алатка која треба да им помогне на дизајнерите во процесот на дизајн за АП. Алатката е збир на правила кои треба да ги насочат индустриските дизајнери уште во концептната фаза на „соодветно“ дизајнирање за овие технологии. Дополнително на правилата, дизајниран е и референтен модел кој треба побрзо да го воведат корисникот во процесот на изработка на делови, но и да му помогне во евалуација и оптимизација на машината која ја користи. Како би биле поспецифични, правилата и референтниот модел се развиени за еден конкретен процес, а тоа е процесот на екструдирање на материјал. Процесот на екструзија на материјал и машините за ЕМ со отворен пристап се предмет на анализа во оваа докторска дисертација бидејќи овозможуваат простор за истражување, а воедно и се доста користени од страна на индустриските дизајнери.

**клучни зборови:** дизајн за адитивно производство, технологии на адитивно производство (АП), процес на екструдирање на материјал (ЕМ), параметарско дизајнирање, индустриски дизајн.

## ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) technologies emerge in the late 90ties and since then, they experienced rapid growth and development. The development of these technologies creates new opportunities for their application in different areas. This raises interest in the industry and so in academic circles. One of the most important advantages of the AM is fabrication of forms with complex geometry. This particular aspect made them very popular among the industrial designers which are being limited from the traditional technologies. AM technologies work in opposite manner that the traditional technologies, and that is by adding material, which creates numerous advantages but also challenges that has to be overcome by the user. The interest of the industrial designers for these technologies creates need for additional research in way of familiarizing AM to them. In order to produce parts with AM they should be CAD models, which mean that the development of the technologies should be followed by the software packages. The software packages for parametric modeling can withstand the need for complex geometry creation.

In this doctoral dissertation, tool that will help industrial designers in the process of design for AM is developed. The tool is a collection of rules which should point industrial designers towards for “appropriate” design for AM. In addition, benchmark model is designed, which is intended to guide the user in the process of fabrication but also help in the evaluation and optimization of the machine. In order for them to be more specific, the rules and the benchmark model are developed for one particular process and that is material extrusion (fused filament fabrication - FFF). Material extrusion and open source machines working on that principle are analyzed in this doctoral dissertation because they offer more research opportunities and are widely used among the industrial designers.

**Key words:** Design for Additive Manufacturing (DfAM), Additive Manufacturing Technologies, Material Extrusion, Fused Filament Fabrication (FFF), Parametric Design, Industrial Design.

# Содржина

---

<b>1. Вовед.....</b>	<b>15</b>
1.1. Цели на истражувањето .....	17
1.2. Методологија на истражувањето .....	18
1.3. Значење на истражувањето .....	21
<b>2. Претходни теоретски истражувања .....</b>	<b>22</b>
2.1. Дизајн за АП .....	29
2.1.1. Алатки за дизајнирање за АП.....	31
2.2. Алатки со правила .....	35
<b>3. Квантитативно истражување .....</b>	<b>37</b>
3.1. Истражување за моменталната состојба.....	38
3.1.1. Истражување на моменталната состојба во технологијата.....	38
3.1.2. Истражување на моменталната состојба во дизајнот за ЕМ.....	45
3.2. Потреба за алатка за дизајн за ЕМ.....	51
3.3. Дизајн на испитните моделите .....	53
3.3.1. Дизајн на основните модели .....	54
3.3.2. Дизајн на сложените модели .....	56
3.3.3. Конверзија на делот во STL датотека.....	61
3.4. Технолошки параметри за изработка .....	64
<b>4. Квалитативно истражување .....</b>	<b>70</b>
4.1. Геометричка анализа на изработените модели .....	71
4.2. Визуелна анализа на изработените модели.....	96
<b>5. Преглед на развиените препораки и правила за дизајнирање за ЕМ.....</b>	<b>112</b>
5.1. Генерални препораки.....	112
5.2. Специфични правила.....	114
<b>6. Дизајн на референтен модел .....</b>	<b>119</b>
6.1. Примарна група на елементи .....	123
6.2. Секундарна група на елементи .....	125
6.3. Валидација на референтниот модел.....	125

<b>7. Дизајн за екструдирање на материјал - примена на реални примери .....</b>	<b>128</b>
7.1. Дизајн и изработка на модел без користење на структури за потпора.....	128
7.2. Дизајн и изработка на модел со органска форма.....	134
7.3. Дизајн и изработка на финален производ со органска форма .....	139
7.4. Дизајн и изработка на финален производ со геометриски форми ..	142
<b>8. Заклучок .....</b>	<b>144</b>
8.1 Препораки за идни истражувања .....	148
Прилог 1.....	149
Користена литература .....	151

Машински факултет - Скопје

## Листа на графици

---

График 4-1. Ойсьайувања во висинаџа на изработеноџо џарче 1-3в .....	80
График 4-2. Вредносџи за висинаџа на цилиндричниџе елеменџи .....	90
График 4-3. Разлика во висиниџе на цилиндричниџе елеменџи.....	90
График 4-4. Вредносџи за висинаџа на конусниџе елеменџи .....	92
График 4-5 Разлика во висиниџе на конусниџе елеменџи.....	92
График 7-1. Сџоредба на чеџириџе ойџи сџоред шестџи критериуми.....	132
График 7-2. Сџоредба на чеџириџе ойџи сџоред чеџири критериуми (соџсџивено истџражување) .....	137

Машински факултет - Скопје



## Листа на слики

---

Слика 1-1. Конвенционален начин на реализација на активносѝи .....	15
Слика 1-2. Процес на дизајнирање со примена на АП и САИД.....	16
Слика 1-3. Блок дијаграм на методологија за испражувањеѝо.....	19
Слика 2-1. Генеративни модели, дизајнирани параметарски .....	25
Слика 2-2 а-б. Holy Ghost, пример за генеративен дизајн .....	26
Слика 2-3. Колекцијата на Auto MAKE .....	26
Слика 2-4 (а-ѝ). Примери на дизајнерски производи изработени со АП .....	27
Слика 2-5 а-в. Дизајни на студиоѝо Nervous Systems изработени со АП .....	28
Слика 3-1. Прва фаза од методологијата за испражувањеѝо .....	37
Слика 3-2. Тркало на технологија на АП .....	38
Слика 3-3. Оѝиѝ модел за принципѝи на изработка на делови со АП .....	40
Слика 3-4. Шемаѝки приказ на машина за ЕМ со две експудирачки глави .....	42
Слика 3-5. Приказ на изгледѝи на вториот слој на модел за изработка, Cura .....	43
Слика 3-6. Влијаниеѝо на дебелината на слојѝи на квалитетѝо на изработената површина .....	43
Слика 3-7. Резултатѝи од сироведената анкеѝа.....	47
Слика 3-8. Алгоритам за дизајн на моделѝи 2-1.....	59
Слика 3-9. Алгоритам за дизајн на моделѝи 2-2.....	59
Слика 3-10. Алгоритам за дизајн на моделѝи 2-3.....	60
Слика 3-11. Алгоритам за дизајн на моделѝи 2-4.....	60
Слика 3-12. Разлика во изгледѝи на моделѝи при избор .....	61
Слика 3-13. Начини на коригирање на неискравносѝи .....	62
Слика 4-1. Втора фаза од методологијата на испражувањеѝо.....	70
Слика 4-2. Изглед на моделѝи 1-1.....	71
Слика 4-3 (а,б). Оѝсѝаѝување во профилоѝи на парчеѝо 1-1, Datinf Measurment .....	72
Слика 4-4. Мерење на заблувањеѝо на рабовиѝе кај парчеѝо 1-1,.....	73
Слика 4-5. Изглед на моделѝи 1-2 .....	73
Слика 4-6. Оѝсѝаѝување од профилоѝи кај изработеноѝо парче 1-2, .....	74
Слика 4-7. Оѝсѝаѝување од профилоѝи кај изработеноѝо парче 1-2,.....	75
Слика 4-8. Оѝсѝаѝување во обликоѝи на изработеноѝо парче 1-2 .....	76
Слика 4-9 а,б. Изглед на моделиѝе 1-3б и 1-3в.....	77
Слика 4-10. Оѝсѝаѝување во обликоѝи на изработеноѝо парче 1-3а.....	79
Слика 4-11. Оѝсѝаѝување во обликоѝи на изработеноѝо парче 1-3б .....	79
Слика 4-12. Изглед на моделѝи 1-4.....	81
Слика 4-13. Проверка на димензииѝе на зјајѝи со Datinf Measurment .....	81
Слика 4-14. Оѝсѝаѝување во обликоѝи на изработеноѝо парче 1-4.....	82
Слика 4-15. Изглед на моделѝи 1-5.....	82
Слика 4-16. Оѝсѝаѝување на кружниѝи профилоѝи, на изработеноѝо парче .....	83

Слика 4-17. Описување во обликот на изработеното парче 1-5 .....	83
Слика 4-18 (а,б). Изглед на моделот 1-6 .....	84
Слика 4-19. (а,б) Описување во димензиите и профилот .....	85
Слика 4-20. Описување во обликот на изработеното парче 1-6 .....	86
Слика 4-21. Изглед на моделот 1-7 .....	86
Слика 4-22. Описување во обликот на изработеното парче 1-7.....	87
Слика 4-23. Изглед на моделот 1-8 .....	88
Слика 4-24. Описување во обликот на изработеното парче 1-8 .....	88
Слика 4-25. Изглед на моделите 2-1 .....	89
Слика 4-26. Приказ на елемент од изработеното парче 2-1а.....	91
Слика 4-27. Приказ на елемент од изработеното парче 2-1а .....	91
Слика 4-28. Разликите во димензиите прикажани .....	93
Слика 4-29. Изработен дел 2-2 .....	93
Слика 4-30. Споредба на описувањата во дијаметрот на отворот .....	94
Слика 4-31. Споредба на изработени модели кои се различно моделирани.....	97
Слика 4-32. Пример за не изработени елементи поради мала димензија .....	97
Слика 4-33. Изглед на делот подготвен за генерирање на СКОДОТ и изработка .....	98
Слика 4-34 а,б. Приказ на делови со задоволителен .....	100
Слика 4-35. Приказ на добар површински изглед .....	101
Слика 4-36. Приказ на лош површински изглед на елементи со мали димензии .....	102
Слика 4-37. Приказ на делумно добро изработени делови .....	103
Слика 4-38. Пример за добар изглед на искосена површина изработена со ЕМ .....	105
Слика 4-39. Приказ на скалеситиот ефект кај тенките искосени елементи (сојсвено истражување) .....	106
Слика 4-40. Приказ на скалеситиот ефект .....	106
Слика 4-41. Приказ на ефектите на појава на конци.....	107
Слика 4-42. Приказ на ефектите на раслојување.....	108
Слика 4-43. Резултатите по описувањето на структурите за појора .....	109
Слика 4-44. Споредба на дојдрната површина со структурите за појора .....	110
Слика 6-1. Приказ на различни РМ кои се среќуваат во литературата .....	119
Слика 6-2. Дизајн на предложениот РМ .....	121
Слика 6-3. Споредба на дејали на РМ изработени .....	126
Слика 7-1. Изглед на дизајнираниот дел, Цветковски 2019.....	128
Слика 7-2 (а-б). Опиција 1 - начини за изработка на цел дел од еднаш .....	129
Слика 7-3 (а-в). Опиција 2 - начини за изработка делот .....	130
Слика 7-4. Поделба на моделот за изработка со ЕМ .....	131
Слика 7-5 (а-б). Опиција 3.1 – начин за изработка на два дела .....	131
Слика 7-6 (а-б). Опиција 3.2 – начин за изработка на два дела .....	132
Слика 7-7. Дејали на изработените делови .....	133
Слика 7-8. Изглед на изработениот дел .....	134

Слика 7-9. Изглед на дизајнираниот дел .....	135
Слика 7-10. Примери на различна ориентација при изработка .....	135
Слика 7-11. Примери на различна ориентација при изработка .....	136
Слика 7-12. Изглед на изработениот дел .....	137
Слика 7-13. Изработено исцртано парче со структури за појтор .....	138
Слика 7-14. Споредба на различни структури за појтор .....	139
Слика 7-15. Изглед на финалниот производ, Димов 2019 .....	141
Слика 7-16. Изглед на CAD моделот, Бијаноска Накева 2017 .....	142
Слика 7-17. Изглед на финалниот производ .....	143

Машински факултет - Скопје

## Листа на табели

---

Табела 2-1. Преглед на системите за селекција и избор на АП .....	33
Табела 3-1. Дейтален приказ на проблеми кои се јавуваат при работење со ЕМ.....	47
Табела 3-2. Барања кои треба да ги задоволат правилата за дизајн за ЕМ.....	52
Табела 3-3. Методологијата за развивање на правила за дизајн за ЕМ.....	52
Табела 3-4. Преиспитување на основните модели користени за експерименталните испитувања .....	55
Табела 3-5. Преиспитување на сложениите модели користени за експерименталните испитувања .....	57
Табела 3-6. Работни параметри на машините при сироведување .....	64
Табела 4-1. Можности за изработка на минимална дебелина на интегриран $\text{sig}$ .....	72
Табела 4-2. Можности за изработка на минимална дебелина на самостоен $\text{sig}$ .....	74
Табела 4-3. Можности за изработка на минимална дебелина .....	77
Табела 4-4. Можности за изработка на минимален дијаметар на кружен отвор .....	82
Табела 4-5. Можности за изработка на исуси без поинтерни структури .....	85
Табела 4-6. Можности за изработка на елементи под агол .....	87
Табела 4-7. Можности за изработка на премостување .....	88
Табела 4-8. Минимална димензија која може да се изработи на самостоен елемент поставен под агол од $90^\circ$ во однос на работната површина.....	98
Табела 4-9. Минимална дебелина која може да се изработи на $\text{sig}$ поставен под агол од $90^\circ$ во однос на работната површина .....	99
Табела 4-10. Минимален дијаметар на отвор која може да се изработи со остата под агол од $90^\circ$ со работната површина .....	99
Табела 4-11. Можности за изработка при користење .....	104
Табела 6-1. Споредба на геометриски карактеристики на референтните модели за процесот на ЕМ кои се среќнуваат во литературата .....	120
Табела 6-2. Карактеристики на предложениот РМ .....	121

## Користена терминологија

македонска терминологија	англиска терминологија	крат.	крат.
Адитивно производство	Additive manufacturing	АП	AM
Брза изработка на алати	Rapid Tooling	БИА	RT
Брзо производство	Rapid Manufacturing	БП	RM
Бризгалка	Nozzle		
Дебелина на работен слој	Layer height		
Дизајн за адитивно производство	Design for Additive Manufacturing	ДМ	DTAM
Изработка на брзи прототипови	Rapid prototyping	ИБП	RP
Компјутерски потпомогнато индустриско дизајнирање	Computer Aided Industrial Design		CAID
Ласерско синтерување	Laser Sintering	ЛС	LS
Ласерско топење	Laser Melting	ЛТ	LM
Прототип	Prototype		
Процес на нанесување на слоеви со екструдирање на материјал, Екструдирање на материјал	Material Extrusion Based Filament Fabrication	ЕМ	FFF
Референтен модел	Benchmark model	РМ	ВМ
Селективно ласерско синтерување	Selective Laser Sintering	СЛС	SLS
Селективно ласерско топење	Selective Laser Melting	СЛТ	SLM
Стереолитографија	Stereolithography		SLA
Топење со електричен сноп	Electron Beam Melting		EBM

Машински факултет - Скопје

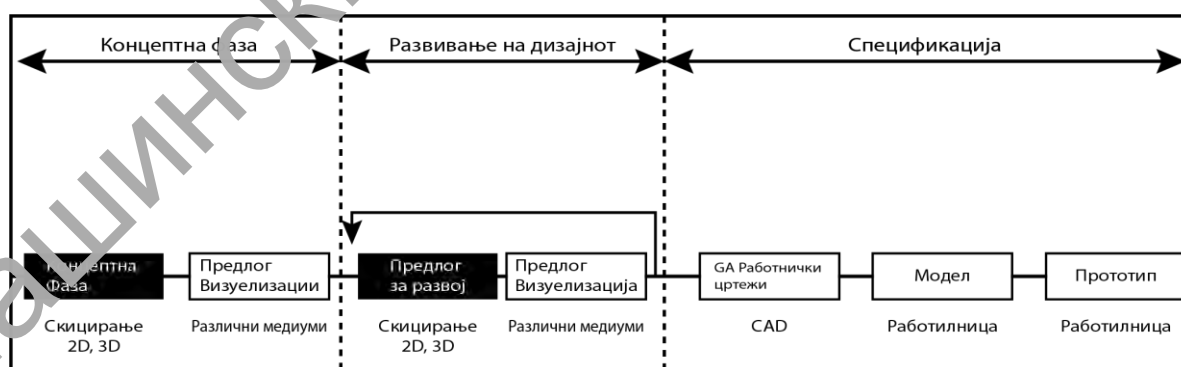
Посветено на Марко

# 1. Вовед

Порастот на перформансите на адитивното производство (АП), заедно со развојот на програмските пакети за моделирање на слободни форми, отвора нови можности за изработка на комплексни облици добиени како резултат на дизајнерската креативност, бионичките принципи и современите трендови за приближувања на производите до корисникот. Материјализацијата, односно изработката на ваквите модели не би била можна без примената на АП.

Најважно од сè, со примена на АП станува економски оправдано производството на уникатни производи (Gibson et al., 2015). Ова вклопува духот на пост-индустријализмот, каде со појавата на нови културни и социјални движења, пред индустриските дизајнери се поставуваат барања за адекватно следење на актуелните трендови. Тие трендови подразбираат персонализација на производите, производство на производи по мерка на корисникот, како и производи дизајнирани директно од потрошувачите (Micevska and Kandikjan, 2016). Тоа самото по себе значи дека поголем акцент се става на корисниците и на дизајнирањето за нивните потреби. Сè почесто се воведуваат веб-базирани платформи кои овозможуваат поединечно и директно креирање на производи преку Интернет.

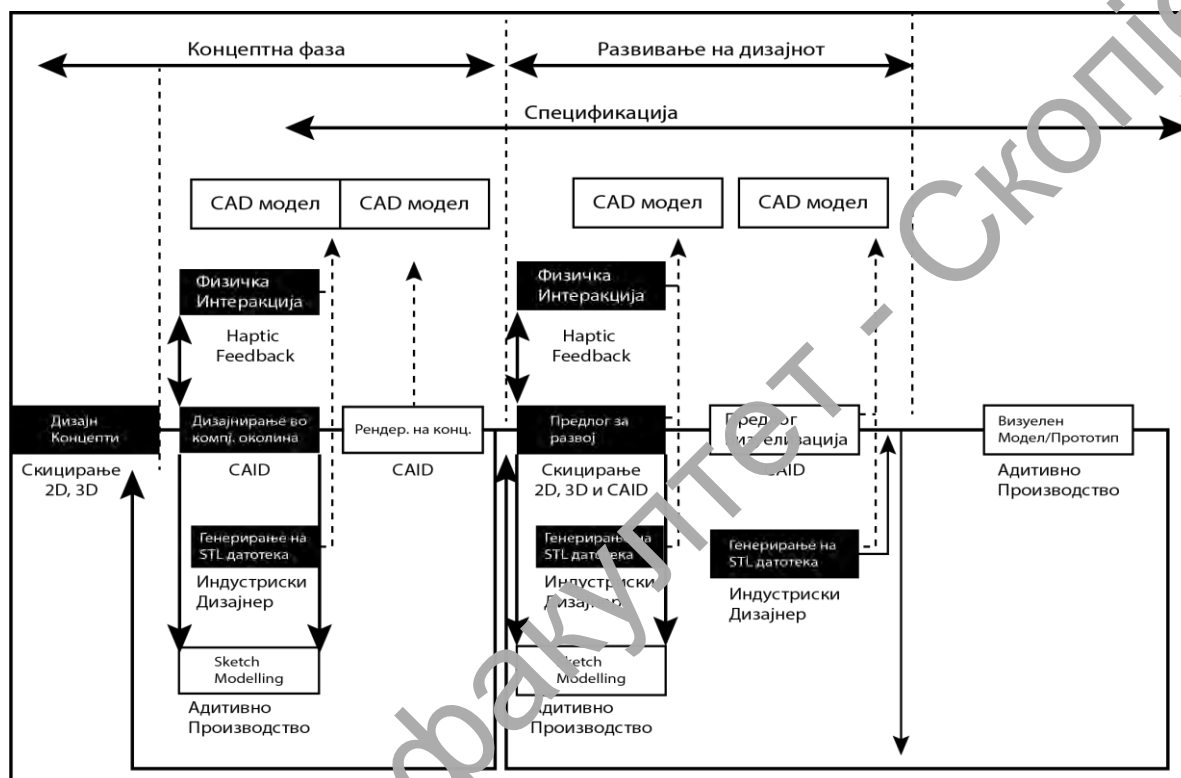
Процесот на дизајнирање опфаќа голем број на активности, како што е прикажано на слика 1-1. Започува со идеја и завршува со прототип, за што е потребно доста време особено поради фактот што можно е навраќање на одредени фази.



Слика 1-1. Конвенционален начин на реализација на активности во процесот на дизајнирање (Адаптирано од (Evans, 2002))

Скратувањето на времето потребно за комплетирање на процесот на дизајнирање е можно со примена на современи техники како софтверски програмски пакети и производни технологии (слика 1-2). Со примена на АП

уште во концептната фаза, се скратува времето на дизајнирање, а со тоа и времето за пласирање на производот на пазарот. Дополнително, со користење на АП можно е креирање на функционални прототипови уште во концептната фаза, преку кои на се проверува изгледот и функционалноста на дизајнот и дали тој ги задоволува сите барања. На овој начин покрај побрзото време за пласирање на производот, се обезбедува и поквалитетен производ.



\*црните полиња означуваат фаза каде нема презентација

Слика 1-2. Процес на дизајнирање со примена на АП и CAID (Адаптирано од (Evans, 2002))

Флексибилноста што ја овозможуваат во работењето технологиите на АП се должи на нивниот начин на работа. Со АП, деловите се изработуваат со додавање на материјал во слоеви, за разлика од класичните технологии каде изработката на делот е со одземање на материјал.

*Адитивно производство е генерален термин кој се користи за групи на процеси кои врз база на геометриски репрезентатив креираат физички објект со sukcesивно додавање на материјал (ISO/TC 261 и ASTM F42).*

Можноста за изработка на модели со сложена геометрија е овозможена преку технологиите на АП, но за дизајнирањето се задолжени софтверските пакети за параметарско дизајнирање.



*Параметарското дизајнирање е начин на дизајнирање каде се дефинираат параметриите на моделот, а не неговото облик (Kolarevic, 2003).*

Во параметарското дизајнирање дизајнерот дефинира „сет на принципи кодирани како секвенца на параметарски равенки според кои одредени делови од дизајнот може да се генерираат и варираат во текот на времето по потреба“ (Kolarevic, 2003). Ова е корисно во сите сфери на дизајнирањето, нудејќи можност за едноставно креирање на низа варијации на одреден производ (Fischer, 2008; Maher, 2011) или пак цела серија на производи.

Предмет на ова истражување е **поставување на нов методолошки пристап** со кој ќе се анализираат карактеристиките на АП кои мора да се земат предвид од страна на индустриските дизајнери при параметарско дизајнирање на деловите.

### **1.1. Цели на истражувањето**

Главна цел на докторската дисертација е **развој на алатка која ќе им помогне на индустриските дизајнери при дизајнирањето за АП**. Со оваа алатката треба да се воведат, организираат и обединат повеќе правила и препораки, кои би им помогнале на индустриските дизајнери во процесот на подготовка за прототипирање и производство со АП, а се однесуваат на материјалните, геометриските и визуелните својства на деловите и склоповите.

Дополнителни цели се:

- Детална анализа на претходните истражувања во полето на индустрискиот дизајн на производи за АП, што ги опфаќа првенствено методите за креирање на параметарски моделирани производи и методите за изработка на делови со АП, со цел да се разјаснат влезните податоци за ова истражување.
- Избор и евалуација на карактеристиките на конкретен процес од АП со цел да се дефинираат неговите можности и ограничувања.

- Дизајн на експериментални примероци, кои треба да дадат одговор на клучните проблеми со кои се соочуваат индустриските дизајнери при примената на АП.
- Спроведување на анализа и синтеза на експерименталните резултати.
- Развој на детална листа со препораки и правила за дизајнирање за АП кои би се користеле во концептуалната фаза на процесот на дизајнирање.
- Класификација на правилата за дизајн за АП на генерални и специфични.
- Дизајн на референтен модел кој обединува најголем дел од правилата за дизајнирање со АП.
- Валидација на правилата за дизајнирање со АП, преку конкретни примери.

### **Главна хипотеза**

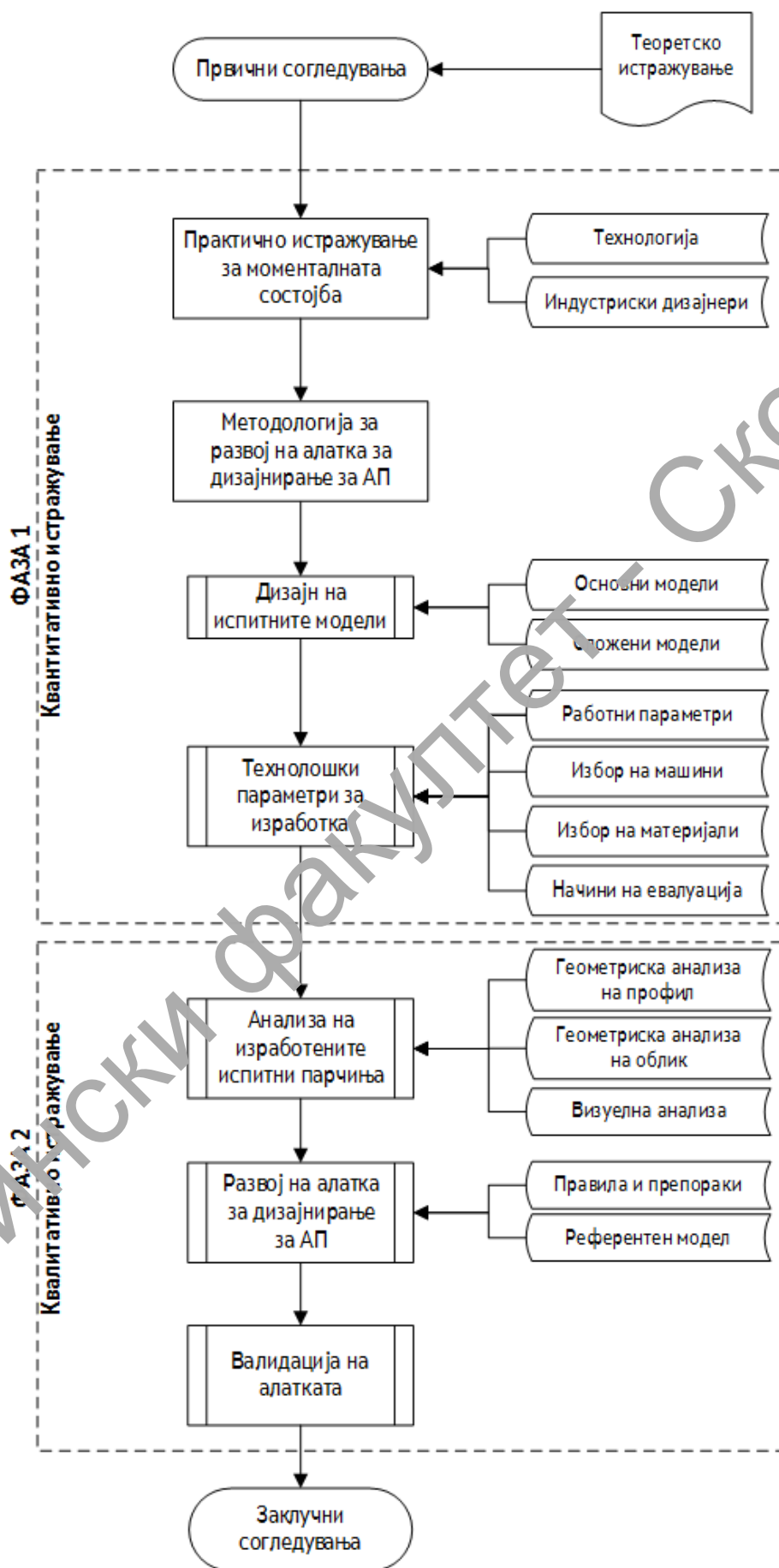
Технологиите на АП се во постојан развој, што создава можност за нивна примена при изработката на делови со сложена геометрија и ги прави ги особено интересни за индустриските дизајнери. Зголемениот интерес на индустриските дизајнери за технологиите на АП, резултира со потреба за воспоставување на нови алатки кои би им помогнале во подготовката на моделите за да се изработат со овие технологии.

За реализација на главната цел, потребно е да се развијат методи и алатки кои ќе бидат доволно прецизни, разбирливи и прифатливи за индустриските дизајнери, така што ќе овозможат изработка на моделите со АП технологиите без нивно детално познавање и без непотребни грешки - поправања.

## **1.2. Методологија на истражувањето**

---

Во продолжение на блок-дијаграмот на слика 1-3 е презентирана структурата и методологијата на истражувањето. Прво се сумирани појдовните согледувања, кои произлегуваат од анализата на литературата. Процесот понатаму е поделен на две фази: фаза 1 - квантитативно и фаза 2 - квалитативно истражување. На крајот се формирани заклучните согледувања.



Слика 1-3. Блок дијаграм на методологија за истражување (соодветно истражување)

Во подготвителната фаза на истражувањето се прави пресек на сегашната состојба и достигнувања во областите од интерес (индустриски дизајн, параметарско моделирање и технологии за АП). Сознанијата добиени во оваа фаза се основа за дефинирање на потребата и насоката на понатамошно истражување.

Фаза 1 на истражувањето ја сочинуваат квантитативните методи. Тие опфаќаат детално истражување на моменталната состојба во однос на технологијата и корисниците – индустриските дизајнери. Тоа подразбира досегашни достигнувања во технологијата, начина на работа предности, недостатоци и проблеми со кои се соочуваат корисниците. Проблемите кои се произлезени од анкетата на корисниците се групирани и категоризирани на проблемите од технологијата и дизајнирањето, како би можело да се локализираат причините за овие проблеми и со тоа да се олесни нивното решавање. Врз основа на добиените сознанија, дефинирана е методологијата за развивање на алатка за дизајнирање за АП. За проблемите настанати при моделирањето, дизајнирани се модели со кои би се проверил секој од проблемите во точно контролирани работни услови. Моделите треба да се креирани на начини на кој ќе обезбедат добивање на релевантни податоци кои ќе можат понатаму да се користат при креирањето на правилата. Дизајнирањето на испитните модели е параметарско, како би се овозможила нивна едноставна манипулација во случај на потреба од измени. Во оваа фаза се поставени и основите на технолошките параметри за спроведување на експерименталното истражување.

Втората фаза го претставува јадрото на истражувањето и неа ја сочинуваат квалитативните методи. Како дел од оваа фаза спроведено е експериментално истражување, со изработка на испитните парчиња на конкретен процес од АП. Изработените парчиња се анализирани во однос на отстапувањето на профилот и отстапување на облик каде е направена споредба во 3D околина на CAD моделот и скениран изработениот дел. Спроведена е и визуелна проверка на изработените делови како би се увиделе дополнителните отстапувања. Тука спаѓаат: неизработени елементи, делови кај кои се јавиле различни проблеми поради одредени геометриски и технолошки параметри, квалитетот на површината и друго. Резултатите од секоја од овие експерименти се преточени во листа на правила и препораки за дизајнирање со АП, односно конкретен процес од АП.

Во заклучните согледувања се изнесени заклучоци од целото истражување како и препораки за идните истражувања.

### **1.3. Значење на истражувањето**

---

Значењето на истражувањето се разгледува преку неговиот очекуван научен, но и апликативен придонес.

Основниот научен придонес на ова истражување е во креирањето на формализирани знаења за избран процес на АП, кои може да се применат на ефективен начини од страна на индустриските дизајнерите, во концептуалната фаза и при дизајнирање на моделот, но и понатаму во процесот на изработка.

Со алатките креирани како резултат на ова истражување треба да се намали бариерата помеѓу развојниот и производствениот сектор и да се олесни развојот на новите можности во индустрискиот дизајн кои се јавуваат поради воведувањето на АП.

Примената на алатки кои го помагаат процесот на дизајнирање го скратуваат времето за пласирање на производ на пазарот односно ја зголемува конкурентноста на пазарот. Примената на алатките за дизајнирање за АП, во чекор со развојот на параметарското моделирање и помасовната примена на АП, имаат потенцијал да придонесат и за зголемено учество на купувачот во процесот на дизајнирањето на производи „за себе“ и производството „во домашни услови“.

## **2. Претходни теоретски истражувања**

Со цел подобро разбирање на проблематиката и потемелен пристап кон истата, анализирани се бројни претходни истражувања. Истражувањата опфаќаат докторати, трудови од конференции и списанија, стандарди, нови патенти како и актуелни достигнувања во технологијата. Во продолжение е направен избор и презентирани се сознанијата кои на одреден начин се поврзани со конкретното истражување.

Автори го анализираат влијанието на работните параметри во однос на механичките карактеристики. Работни параметри кои се земени во предвид се поставеност и ориентацијата на делот при изработката, дебелината на работниот слој, аголот и растојанието помеѓу растерот. Заклучоците се дека ориентацијата на делот при изработката во голема мерка влијае на механичките карактеристики (Bellini and Güçeri, 2003; Bertoldi et al., 1998; Es-Said et al., 2000; Hossain et al., 2014, 2013; Lee et al., 2007; Raut et al., 2014). Дебелината на слојот исто така има влијание на механичките карактеристики (Shubham et al., 2016; Sun et al., 2008), имено помала дебелина на слој резултира со подобри карактеристики на делот. Одредени автори (Onwubolu and Rayegani, 2014; Panda et al., 2009; Sood et al., 2012, 2010, 2009) се фокусираат на анализирање на процесот на екструзија на материјал (EM) и согледувањата се совпаѓаат со останатите, а тоа е дека најголемо влијание врз механичките карактеристики имаат ориентацијата на делот при изработка и дебелината на слојот.

Ориентацијата на делот има значително влијание и на квалитетот на површината (Alexander et al., 1998; Campbell et al., 2002; Frank and Fadel, 1995; Kattethon and Henderson, 1998; Vasudevarao et al., 2000). Паралелно со ориентацијата големо е влијанието и на дебелината на слојот врз површинскиот изглед односно појавата на скалестиот ефект (Anitha et al., 2001; Campbell et al., 2002; Luis Perez et al., 2001; Pandey et al., 2003; Vasudevarao et al., 2000). Истите сознанија важат и за EM (Armillotta, 2006; Boschetto and Bottini, 2015; Byun and Lee, 2006; Ruiz-Huerta et al., 2014; Taufik and Jain, 2016; Thrimurthulu et al., 2004; Ziemian and Crown III, 2001).

Отстапувањето во димензиите односно димензионалната прецизност е од интерес за истражувачите (Boschetto and Bottini, 2016; El-Katatny et al., 2010; Gibson et al., 2010a; Kantaros and Karalekas, 2013; Knoop and Schoeppner, 2015;

Mahmood et al., 2016; Mohamed et al., 2015; Wang et al., 2007), бидејќи принципот на работа на АП е таков што може да резултира со значајни отстапувања во димензиите доколку не е правилно воден. Според група автори (Chua et al., 2010) во однос на делови со мали димензии, отстапувањата во димензиите се поголеми, распоредувајќи се низ четири ИТ класи според EN ISO 286-1 (Singh, 2013). Според истражувањата деловите изработени со ЕМ (Lieneke et al., 2016, 2015) се позиционираат во повеќе ИТ класи според, ИТ09 и ИТ14 односно ИТ11 до ИТ16, соодветно.

Од најголем интерес за индустриските дизајнери, а со тоа и за ова истражување е слободата во дизајнирање што ја овозможуваат технологиите на АП, која може да се разгледува на неколку нивоа (Thompson et al., 2016).

- **Дизајн слободи на ниво на дел со комплексност на макро размер** - земајќи ги во предвид слободите кои ги нудат материјалите и геометријата на АП на микро размер кај деловите може да резултира со естетски, функционални, економски, емоционални и ергономски предности (материјал, боја, слободна геометрија за уметнички и естетски потреби, внатрешна слободна геометрија за функционални потреби, изработка на макро-структури, тополошки оптимизирани делови за намалување на користениот материјал и користењето на енергија, исплатливо производство на производи по мерка и прилагодливи производи за широки маси).
- **Дизајн слободи на ниво на материјал со макро размер** - АП овозможуваат модифицирање и комбинирање на материјали, микро и мезо структури со цел креирање на нови и подобрени карактеристики, форми и функционалност (металургија по мерка, микроструктура и состав на материјалите, површини по мерка, текстури и порозност за подобрување на функционалноста, решеткасти и ќелијни структури за материјали по мерка и биофункционалност, делови изработени со повеќе материјали, функционално подобрени материјали и делови, метаматеријали).
- **Дизајн слободи и можности на ниво на производ** - АП овозможува дополнителни слободи во дизајнирањето и можности кои подразбираат интеграција на делови, вградени делови и директна изработка на цели склопови (интеграција на делови, вградени делови и електроника, директно производство на склопови).

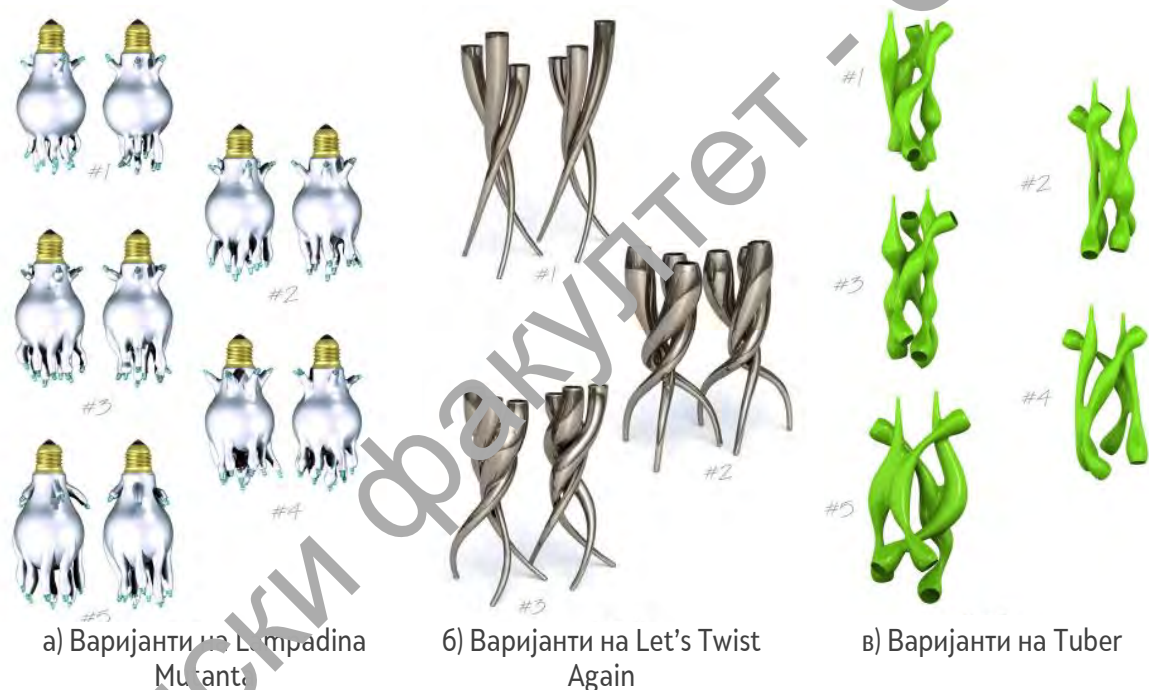
Од интерес за ова истражување е групата на дизајн слободи на макро размер и тие се презентирани во продолжение. Можноста на АП за изработка на делови со сложена геометрија и изработката на уникатни парчиња без зголемување на трошокот за изработка е интересна за повеќе автори (Ariadi et al., 2012a; Ariadi and Rennie, 2008; Atkinson et al., 2004). Системот „evoShape“ (Case et al., 2004) претставува алатка за интерактивен дизајн кој еволуира преку генерички алгоритам. EvoShape работи преку CAD систем, генерирајќи и еволуирајќи облици на 3Д цврсти тела. Користи специјализирани генерички алгоритми за комбинирање на геометриските примитиви користејќи Болеански интеракции и напредни операции на превиткување. Оваа идеја може да се забележи и во работењето на Рубио и Мартин Лагуна (Rubio and Martin-Laguna, 2010), кои ја искористуваат можноста на АП за флексибилното производство и изработка на дизајни инспирирани од природата, односно мимикрии на природата. Истражувањето го заокружуваат со креирање на параметарски модел, кој корисникот само може да го модифицира. Ванг (Wang, 2012) во своето истражување се задржува на анализирање на NURBS површините и нивно користење за креирање на комплексни површини.

Софтверските програмски пакети за CAD моделирање сè уште не се дојдени на ниво да можат да одговараат на можностите кои се поставени од АП. Нивното прилагодување во насока на барањата кои се поставуваат со АП е неминовно. Махер (Maheer, 2011) прави обид со примена на софтверски пакет за параметарско моделирање, да постави гранични услови за дизајнирањето. Пена де Леон (Pena de Leon, 2014) истражува и споредува стратегии за надминување на нефлексибилноста на параметарските системи за моделирање. Основната цел на неговото истражување е подлабоко разбирање за тоа како технологиите за параметарски дизајн може да се применат во дизајн на комплексни проекти од шематски дизајн. Развива стратегија за стандарден софтверски пакет за параметарско дизајнирање.

Истражувањата на Ариади и Рени (Ariadi and Rennie, 2008) се во насока на искористување на можностите на АП за изработка на уникатни и персонализирани производи. За таа цел предлагаат методологија со која би се креирал нов софтверски програмски пакет, каде корисникот би го имал последниот збор во дизајнот (Ariadi et al., 2012b). Новиот програмски пакет кои тие го предлагаат би се нарекувал CaCODE (Computer Aided Consumer Design). Овој пристап го користат други автори (Micevska and Kandikjan, 2016)



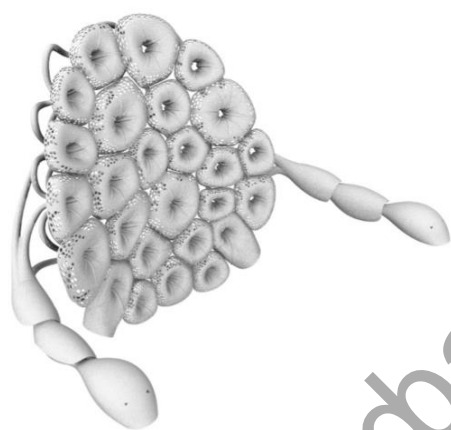
креирајќи алатка за дизајн на персонализиран производ од страна на корисникот. Корисникот има можност да прилагодува одредени параметри, но има ограничување во вредностите, како би се задржала можноста за изработка на делот. Алатката е креирана за еден производ, но методологијата на креирање може едноставно да се примени на други производи. На сличен начин Ли (Lee, 2013) креираа дигитална платформа за дизајнирање на персонализиран производ. Оптимизацијата е преку секвенцијално програмирање и повеќеделно објективно симулирано процесирање). Платформата има пријатен графички кориснички интерфејс (GUI), што овозможува лесно менување на параметрите, соодветно менувајќи го и виртуелниот модел.



Слика 2-1. Генеративни модели, дизајнирани параметарски  
(Превземено од: (Dean, 2009))

Флексибилноста во производството и можноста за изработка на уникатни парчиња со АП е голем предизвик за дизајнерите, поради тоа и голем дел од нив работат на истражувања во таа насока. Дин (Dean et al., 2005) со примена на генеративниот дизајн и параметарското моделирање менува дизајнира цела колекција на производи, кои се изработуваат со АП (слика 2-1). Во предложениот систем корисникот нема улога на дизајнер, но може да направи избор помеѓу големата колекција на производи сите со меѓусебно различни (Atkinson and Dean, 2003). Бидејќи дизајнирањето е генеративно,

дизајнот на примероците е „автоматски“, а итерациите се рангираат според дефинирани критериуми и најуспешниот примерок е избран. Тој примерок понатаму ја предводи следната генерација (Dean, 2009). По овој проект, Дин продолжува во иста насока, со дизајнирање на производи кои се уникатни (слика 2-2) и кои во целост ги искористуваат можностите на АП во насока на комплексна форма. Уште еден пример за тоа е и Holy Ghost столицата која претставува интервенција на иконскиот дизајн на Филип Старк (Philippe Starck) на Louis Ghost столицата. За дизајнот на Holy Ghost столицата Дин има добиено бројни награди и признанија. Дополнителен пример за параметарско моделирање е примерот на AutoMAKE, претставен на слика 2-3. Елементите се со модуларен, релативно едноставен дизајн кои кога се поврзуваат се добива целина со интересен изглед (Unver et al., 2008).

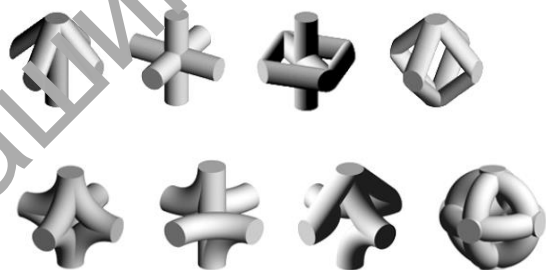


а) Holy Ghost



б) Holy Ghost поставена на Louis Ghost столицата

Слика 2-2 а-б. Holy Ghost, пример за генеративен дизајн интегриран на постоен производ (Превземено од: (Dean, 2009))



а) поединечни елементи



б) композиција од елементите

Слика 2-3. Колекцијата на Auto MAKE (Превземено од: (Unver et al., 2008))

### **Комерцијална примена на АП во насока на дизајнон на производи**

Дизајнерите на производи како и компаниите ги искористуваат предностите на АП на неколку начини. Еден начин е примена на АП за изработка на ексклузивни парчиња дизајнирани од врвни дизајнерски имиња.



а) Ламба Bloom дизајнирана од Патрик Џуин (Patrick Jouin)



б) One Shot дизајнирана од Патрик Џуин (Patrick Jouin)



в) Гауди столица дизајнирана од Брам Гинен (Bram Geenen)



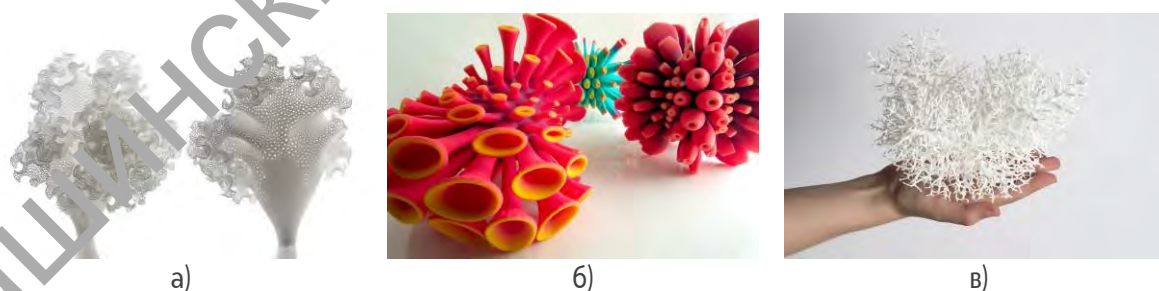
г) Ламба дизајниран од Карим Рашид (Karim Rashid)

Слика 2-4 (а-г). Примери на дизајнерски производи изработени со АП (Превземено од: [www.materialise.com/en/mgx](http://www.materialise.com/en/mgx); [www.3dsystems.com/blog/foc](http://www.3dsystems.com/blog/foc))

Овие производи ги искористуваат предностите на АП на различни начини: комплексна геометрија, интегрирана изработка и флексибилност во работењето. Пример за компании кои нудат исклучителни дизајнерски

парчиња изработени со АП е MGX на компанијата Materialise (слика 2-4). Производите дизајнирани од современи дизајнери се достапни за продажба преку нивната интернет страница. Нивниот пример го следат и Freedom of Creation (FOC) на 3D Systems (слика 2-4). Примероците кои се нудат на продажба на овие интернет страници имаат добиено престижни награди за својот дизајн, пред сè поради пробивањето на бариерите кои до тогаш важеле во дизајнот и отворање на нови можности. Од таа причина овие дизајни се дел и од поставките на бројни музеи ширум светот, меѓу кои Музејот на современа уметност МоМА (Museum of Modern Art), Музејот FIT (Fashion Institute of Technology - FIT) и Музејот за уметност и дизајн (Museum of Art and Design – MAD) во Њујорк, Музејот на уметност од Монтегал, Centre Pompidou во Париз, Дизајн музејот во Холон, Израел и Витра дизајн музеј во Германија.

Дизајнерското студио Nervous Systems има поинаков принцип на работа. Тие креираат подостапни дизајнерски парчиња кои се базираат на инспирација од природата, а се дизајнирани параметарски (слика 2-5). Моделите се дизајнирани на тој начин што овозможуваат одредени параметри да ги менува самиот корисник со што би добил персонализиран производ. Во одредени апликации како Кинематикс (Kinematics@Home) ја нудат опцијата и за целосно преглемање на персонализираната .stl датотека и нејзина изработка од страна на самиот корисник. Постојат повеќе интернет страни кои нудат можност за преземање на дизајни во форма на .stl датотека (Thingiverse, Ponoco, Sculpteo) и нивна самостојна изработка.



Слика 2-5 а-в. Дизајни на студиото Nervous Systems изработени со АП  
(Превземено од: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/>)

Главна причина на зголемениот број на интернет страници кои нудат вакви услуги е пред сè поради зголемената популарност и достапност на технологијата на АП. Машините за АП со отворен пристап се доста

распространети, но не се сите нивни корисници вешти во дизајнирањето во CAD систем, што е еден од предусловите за креирање на датотека која може да се изработи со АП. Но, за ова истражување од интерес се индустриски дизајнери кои беспрекорно ги користат софтверските пакети, но имаат потреба за насока во однос на дизајнирањето за АП, што е предмет на разработка на следното поглавје.

## **2.1. Дизајн за АП**

Во традиционалното машинство постојат области наречени дизајн за производство и монтажа (анг. DFMA – Design for manufacturing and assembly) и Дизајн за производство (анг. DFM – Design for manufacturing) кои ги третираат проблемите околу дизајнирањето за традиционалните производни технологии (стругање, глодање, CNC производство). Но дизајнирањето за АП (анг. DfAM – Design for Additive Manufacturing) според овие правила не е соодветно, поради комплетно различниот начин на работа. Се јавува реална потреба за креирање на нови правила според кој би се воделе дизајнерите кога би сакале да дизајнираат дел кој би се изработувал со некој од процесите на АП. На оваа проблематика работат и институтите за стандардизација ширум светот и бројни истражувачи.

Терминот дизајн за АП се користи многу во литературата (Thompson et al., 2016), но мал е бројот на оние кои се обидуваат да го дефинираат (Gibson et al., 2010b; Rosen, 2007). Развојот на теорија, алатки, правила, процеси и методологии за дизајнирање за АП се смета за еден од клучните предизвици на АП (Thompson et al., 2016). Недоволното познавање и примена на дизајнирањето за АП го ограничува користењето на овие технологии и нивното навлегување во индустријата (Gausemeier, 2011), го забавува процесот за изработка на финални производи со АП (Adam and Zimmer, 2014; Gausemeier, 2011), ги спречува дизајнерите од целосно искористување на предностите на овие технологии (Geraedts et al., 2012) и генерално ги попречува АП да го достигнат на нивните можности (Azman et al., 2014).

Поради обемноста на истражувањата, истражувањата во областа на дизајнирањето за АП може да се групираат според потесниот нивен интерес, на следниов начин:

- **Креирање на нова методологија за дизајн на производи за изработка со АП** (Ponche et al., 2014, 2012; Vayre et al., 2012),
- **Креирање на комплетно нов пристап во дизајнирањето** (тополошка оптимизација, решеткасти структури) (Chu et al., 2008),
- **Креирање на правила за дизајн на производи за изработка со АП** (Adam, 2015; Adam and Zimmer, 2015; Thomas, 2009).

Во продолжение е даден преглед на позначајните истражувања од областа на дизајнирањето на АП. Дел од авторите се посветуваат на креирање алатки кои би го потпомогнале дизајнирањето за овие технологии (алатки за селекција, бази на податоци итн.). Според нив, најголемиот дел од корисниците на АП имаат проблем со изнаоѓање на најсоодветниот процес. Овие алатки се замислени да го насочат корисникот да го избере процесот од АП што најдобро одговара на нивните потреби. Друг дел од авторите преку карактеристични примери креираат специфични правила. Преостанатиот дел од авторите се обидуваат да креираат генерални правила за дизајн за АП (дефинирање на гранични вредности за дебелина на ѕид, димензии на отвори, радиуси, толеранции итн.).

Уште меѓу првите истражувања се забележува потенцирањето на авторите за неможноста актуелните софтверски програмски пакети да одговорат на барањата кои се поставуваат од АП. Поради тоа, голем дел од истражувањата се во насока на креирање на нова методологија како би се намалило влијанието на програмските пакети или пак креирање на нов или прилагоден постоечки програмски пакет. Меѓу првите истражувања во оваа област е Кембел (Campbell, 1998) кој ја потенцира корисноста на моделирање со примитиви, креирајќи систем за поддршка на процесот на дизајнирање за ИБП. Системот кој тој го развива се базира на методологија за моделирање преку примитиви. Според Кембел моделирањето со примитиви е она што е потребно за целосна интеграција на ИБП во процесот на дизајнирање. Системот не е целосно функционален, но дава слика како ваквиот модел може да биде од корист за дизајнерите. Бинард (Binnard, 1999) во своето истражување специфичностите на АП. Авторот предлага нов метод на дизајнирање на производите, дизајн со компонирање (додавање и спојување) што би соодветствувало со начинот на кој се изработуваат

деловите со АП. Тој идејата за овој пристап ја влече од дизајнирање за класичните технологии каде изработката на делот се реализира со одземање на материјал и аналогно на тоа принципот на дизајнирање е исто односно со метод на декомпозиција. Еванс (Evans, 2002) претставува методолошки пристап за интеграција на технологиите за брзи прототипови и индустрискиот дизајн кој би се нарекувал CAID/RP (computer-aided industrial design/rapid prototyping). Тој предлага инволвирање на ИБП во сите фази на процесот на дизајнирање. Хаг и колегите (Hague et al., 2003) ја потенцираат можноста на новите технологии (АП) за креирање на комплексна геометрија или како што тие велат „Geometry for free”. Авторите го нагласуваат проблемот со неможноста актуелните CAD програмски пакети да одговорат на барањата на современите дизајнери. Како дополнителна пречка во користењето на АП од поголема популација, ја наведуваат сложеноста на актуелно достапните CAD програмски пакети. Поради тоа тие сугерираат дека овие технологии (АП) ќе условат целосно менување на дизајн процесот. Новите CAD системи би требало да бидат пофлексибилни, со интерфејс кој би бил соодветен за корисници-почетници, а како дополнителна опција би било инволвирање на корисниците во дизајн процесот.

Понатаму група истражувачи (Ronche et al., 2012) работат на развивање на глобален пристап за дизајнирање за АП. Предложената методологија започнува со функционалните карактеристики на производот и карактеристиките на соодветниот процес од АП. Дополнително креирани се евалуациски системи за процесите од АП во однос на процесното планирање (Zhang et al., 2014). Авторите (Rias et al., 2016) имаат малку поинаков пристап. Тие креираат методологија за дизајнирање за АП која би ја поддржала или поттикнала креативноста на дизајнерите. Додека авторите (Djokicj and Jovanova, 2019) предлагаат методологија за дизајнирање на нелинеарни флексибилни структури.

### 2.1.1. Алатки за дизајнирање за АП

---

Алатките за дизајнирање за АП може да се групираат на неколку начини. Групирани според информацијата која ја даваат постојат: **алатки за селекција на процеси** и **алатки за прибирање на податоци** (базите на податоци) кои се јавуваат по зголемениот развој на АП, доцните 90ти. Во тој период нема мали домашни уреди за АП, во главно се индустриски машини.

Тоа значи дека и бројот на луѓе кој е запознаен и работи со овие технологии е доста ограничен. Со самото тоа јасно е дека има потреба од алатки кои ќе обезбедат информација, но и дополнително знаење околу АП. На тој начин се креирани и овие алатки, со фотографии, препораки, примери како би можеле корисниците полесно да се информираат.

Со развивањето на се повеќе процеси како дел од АП, стана вистински предизвик не само изборот на соодветен процес, туку и изборот на соодветен материјал. Оваа актуелна проблематика е доста интересна и за голем број на истражувачи, кои прво се концентрирале само на изработка на брзи прототипови (ИБП), а со развојот на процесите и технологијата воопшто, започнале да ги земаат во предвид и брза изработка на алати (БА) и брзо производство (БП). Различни автори прават различни групирања и класификации на алатките. Гази (Ghazy, 2012) ги групира алатките според областа која ја опфаќаат на:

- генерални селектори,
- селектори за ИБП,
- селектори за ИБА,
- селектори за ИБП.

Втората поделба е според начинот на кој се прави елекцијата во рамки на алатката (Munguía Valenzuela, 2009):

- Системи за избор,
- Системи за советување,
- Бази на податоци,
- Системи со правила.

Овие два начини на групирање се искомбинирани и претставени во табела 2.1 каде дополнително е прикажано што се опфаќа со секоја алатка (процесот, материјалот или машините).



Табела 2-1. Преглед на системите за селекција и избор на АП  
(Адаптирано од: (Ghazy, 2012; Munguía Valenzuela, 2009))

	Процес	Материјал	Машина
<b>Генерални аларки</b>			
<b>Алатки за селекција</b>			
ACPIR (Bernard, 1999)	X		X
Bernard et al., 2003			
IVF (Sweedon), 2005	X	X	X
AMDSS (Ghazy, 2012)			
<b>Алатки за советување - NA</b>			
<b>Бази на податоци - NA</b>			
<b>Алатки со правила - NA</b>			
<b>Алатки за ИБП и ИБА</b>			
<b>Алатки за селекција</b>			
ASERM, 2006			
<b>Алатки за советување</b>			
Bibb et al., 1999	X		
<b>Бази на податоци - NA</b>			
<b>Алатки со правила - NA</b>			
<b>Алатки за ИБП и ИБА</b>			
<b>Алатки за селекција</b>			
Georgia Institute of Technology, 2005	X		X
IRPDMS (Mahesh et al., 2005)	X		X
Smith and Rennie, 2008		X	X
RMADS (Munguía Valenzuela, 2009)	X	X	X
KARMA, 2010	X	X	X
<b>Алатки за советување - NA</b>			
<b>Алатки на податоци - NA</b>			
<b>Алатки со правила - NA</b>			
<b>Алатки за ИБП</b>			
<b>Алатки за селекција</b>			
Muller et al., 1996		X	X
RAPTEC (Muller et al., 1999)	NA	NA	NA
Masood and Al Alawi, 2002	NA	NA	NA
Lan et al., 2005	X		X
<b>Алатки за советување</b>			
Hornberger, 1993	X		
Philipsen, 1997			X
<b>Бази на податоци</b>			
Campbell and Bernie, 1996		X	X
Mahesh, 2003 (само DMLS)	NA	NA	NA
Bin Maidin et al., 2012 (само LS)	NA	NA	NA
<b>Алатки со правила</b>			
IRIS (Masood and Soo, 2002)			X
<b>Алатки за ИБА</b>			
<b>Алатки за селекција</b>			
Herman & Allen, 1999	X	X	
Kascha & Auerbach, 2000	X	X	X

Hanumaiah et al., 2007	X		
<b>Алатки за советување - NA</b>			
<b>Бази на податоци</b>			
Pal & Ravi, 2007	X		
<b>Алатки со правила - NA</b>			
<b>Алатки за БП</b>			
<b>Алатки за селекција</b>			
Munguía Valenzuela, 2009	NA	NA	NA
<b>Алатки за советување</b>			
Burton, 2005	NA	NA	NA
<b>Бази на податоци - NA</b>			
<b>Алатки со правила - NA</b>			

Алатките за селекција се креирани во насока да му помогнат на корисникот да го избере најсоодветниот процес од АП. Најголем дел од креираните алатки за селекција се веб базирани (ASERM, 2006; Ivf Sweeden, 2005), но не се активни. Махеш (Mahesh, 2005) претставува интегриран систем за селекција (IRPDMS) на соодветен процес од ИБП и БП базиран на фази одлучување и рангирање. Недостатокот на овој систем е тоа што не овозможува генерички пристап и можност за проширување, што го прави овој систем не погоден за генерално користење (Munguía Valenzuela, 2009). Смит и Рени (Smith and Rennie, 2010) предлагаат генерален систем кој треба да е едноставен за користење, но е интегриран во конкретен CAD програмски пакет што го ограничува неговото користење. Во рамки на проектот Карма (KARMA, 2010) креирана е алатка кој би се користела за планирање на производството со АП. проблемот со предложената алатка е тоа што не овозможува генерално користење, бидејќи опфаќа само дел од процесите кои спаѓаат под АП: стереолитографија, селективно ласерско синтерување и топење со електричен сноп. Гази (Ghazy, 2012) развива генеричка самостојна апликација за избор на соодветен процес од АП со примена на правила за одлучување креирани според систем базиран на знаења. Мунгуја (Munguía Valenzuela, 2009) најмногу се доближува до идејата за дизајн за АП, развивајќи систем кој би им помогнал на дизајнерите во раните фази на дизајнирање при избор на соодветен процес за производство на своите дизајни. Системот претставува интеграција на неколку елементи: систем со експертиза, фази пребарувач и две бази за материјали и можности на процесите. Главните критериуми за донесување на одлуки се поделени во

4 главни групи: геометрија, изглед, механички барања и функционални барања.

Бартон (Burton, 2005) развива **алатка за советување** која би им помогнала на индустриските дизајнери при избор на соодветен ИБП процес. Алатката е работена по примерот на веќе познатите алатките за производство и склопување (DFM, DFAM). Алатката во суштина е прашалник кој нуди препораки според дадените одговори или селекцијата на понудени одговори. Прашалникот кој се спроведува како дел од оваа алатка содржи прашања кои се однесуваат на: волумен, облик, функција, градба на производот, логистика. Системот нуди помош во процесот на дизајнирање но, не нуди предлог за соодветен процес од АП за изработка на делот.

Бин Маидин со група автори (Bin Maidin et al., 2012) го продолжува и продлабочува истражувањето на Кембел (Campbell, 1998) развивајќи **база на примитиви** во која дизајнерите преку неколку критериуми се насочуваат кон изборот на соодветната технологија. Резултатот е листа на процеси на АП кои може да се земат во предвид за изработка на конкретниот дизајн. Покрај ова, постои и база на досега изработени производи со овие технологии, кои обезбедуваат визуелната информација која може да биде од помош за корисникот. Но базата е лимитирана само на еден процес со АП, ласерско синтерување.

## 2.2. Алатки со правила

Од особен интерес за оваа докторска дисертација е третата група истражувања кои се насочени кон развивање на правила за дизајн на производ за изработка со АП. Развивањето на генерални правила кои ќе важат за сите процеси од АП е многу тешко, поради обемноста на целата технологија и влијанието на повеќе фактори врз производните параметри. Поради тоа најголемиот дел од истражувањата се концентрираат на одреден процеси или група процеси со точно дефинирани работни параметри.

Првите трудови на оваа тема се околу креирање на препораки за изработка на делови со различни процеси од АП (Filippi and Cristofolini, 2007), или пак специфични процеси (Teitelbaum et al., 2009). Урбанич и Хендрик (Urbanic and Hedrick, 2016) креираат дизајн правила за дизајнирање за процесот на ЕМ. Нивните правила се во голема мерка препораки околу тоа

што треба или не треба да се користи при дизајнирање за процесот на ЕМ. Покрај препораките за делови тие имаат изработени препораки за склопови односно за делови со големи димензии кои треба да се изработуваат на делови.

Томас (Thomas, 2009) спроведува детална експериментална анализа на карактеристиките на процесот селективно ласерско топење. За потребите на истражувањето дизајнирана е серија на примероци со едноставни геометриски облици, кои ги тестира за можности на изработка. Врз основа на добиените резултати и одговори од спроведена анкета, креира низа правила и препораки за користење на овој процес.

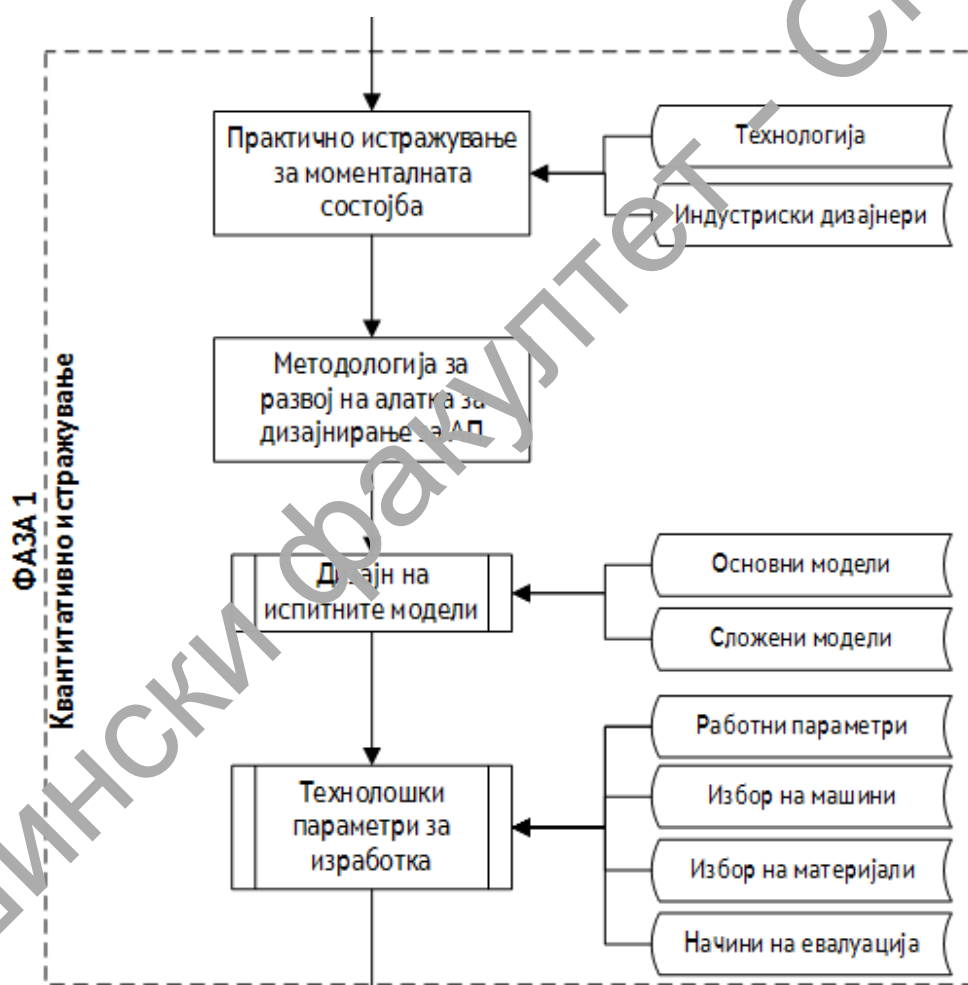
Група истражувачи (Gibson et al., 2010a) прават обид за креирање на правила за производство со АП. Спроведуваат експериментални анализи за механичките карактеристики на материјалите, а потоа резултатите се споредуваат со анализи на метод на конечни елементи. Преку таа анализа тие сакаат да извлечат заклучоци за деловите кои се изработуваат со АП.

Тителбаул и колегите (Teitelbaum et al., 2009) имаат изработено листа на дизајн правила, која се базира на искуство. Правилата се однесуваат со цел поквалитетна изработка на делот, туку се во однос на на скратување на времето на изработка и потрошениот материјал при изработка на дел со ЕМ. Правилата се тестирани на низа различни примери, покажувајќи позитивни резултати.

Во трудот од 2015 година Адам и Зимер (Adam and Zimmer, 2015) прикажуваат дел од своето истражување чија цел е усвојување на правила за неколку процеси со АП (ласерско топење, селективно ласерско синтерување и ЕМ). Слично како и Томас и тој користи делови со едноставна геометрија кои експериментално ги испитува. Врз основа на тие испитувања донесува заклучоци и правила. Од неговото излагање може да се заклучи дека најголемиот дел од правилата важат за сите три процеси, кои се земени во предвид, со мали отстапувања во вредностите. Во својата докторска дисертација дава детален приказ на креираните 55 правила (Adam, 2015). Резултатите кои што се добиени со овие две истражувања се валидни само за соодветните машини и со режимите на работа според кои се спроведени. Тоа остава голем број можности за понатамошни истражувања.

### 3. Квантитативно истражување

Влезни информации во првата фаза на истражувањето (слика 3-1) се истражувањата на досегашните достигнувања во литературата. Во фазата на квантитативното истражување продлабочено се анализира потребата за алатка за дизајнирање за АП, наменета за индустриските дизајнери како помош во процесот на дизајнирање. За таа цел спроведено е детално истражување на моменталната состојба кое е искористено како основа за креирање на методологија за развој на алатката за дизајнирање со АП. Понатамошните чекори се во насока на развивање на алатката.



Слика 3-1. Прва фаза од методологијата за истражување (соодветно истражување)

### 3.1. Истражување за моменталната состојба

Истражувањето на моменталната состојба ги обединува истражувањата на моменталната состојба во областа на технологијата и искуствата на корисниците.

#### 3.1.1. Истражување на моменталната состојба во технологијата

Од своите почетоци во 1987 година, технологиите на АП се развиваат со голема брзина, развивајќи нови методи, материјали и примени. Интересот за примена во различни области постојано расте поради карактеристиката на процесот да го изработи она што е дизајнирано (WSIWYP – what you see is what you build) независно од комплексноста на модел. Тркалото на технологиите за АП кое го претставува системот на елементи кои се дел од процесот е прикажано на слика 3-2. Сите елементи кои влегуваат во системот се меѓусебно тесно поврзани и се подеднакво важни за успешно изработен физички модел.



Слика 3-2. Тркало на технологија на АП (Дизајнирано од: (Kamrani and Nasr, 2006)

Влезот во системот е секогаш модел во компјутерска средина, кој треба да се сведе на .stl датотека. Изборот на метод односно на процес на АП во најголема мерка зависи од крајната примена на моделот. Зависно од изборот на методот се бира и материјалот кој ќе се користи бидејќи материјалите се ограничени само на одредени процеси. Примената на моделите изработени со АП може да биде различна започнувајќи како прототипи, па сè до крајни модели кои се користат во индустрии кои имаат високи барања за квалитет како автомобилска или авионска.

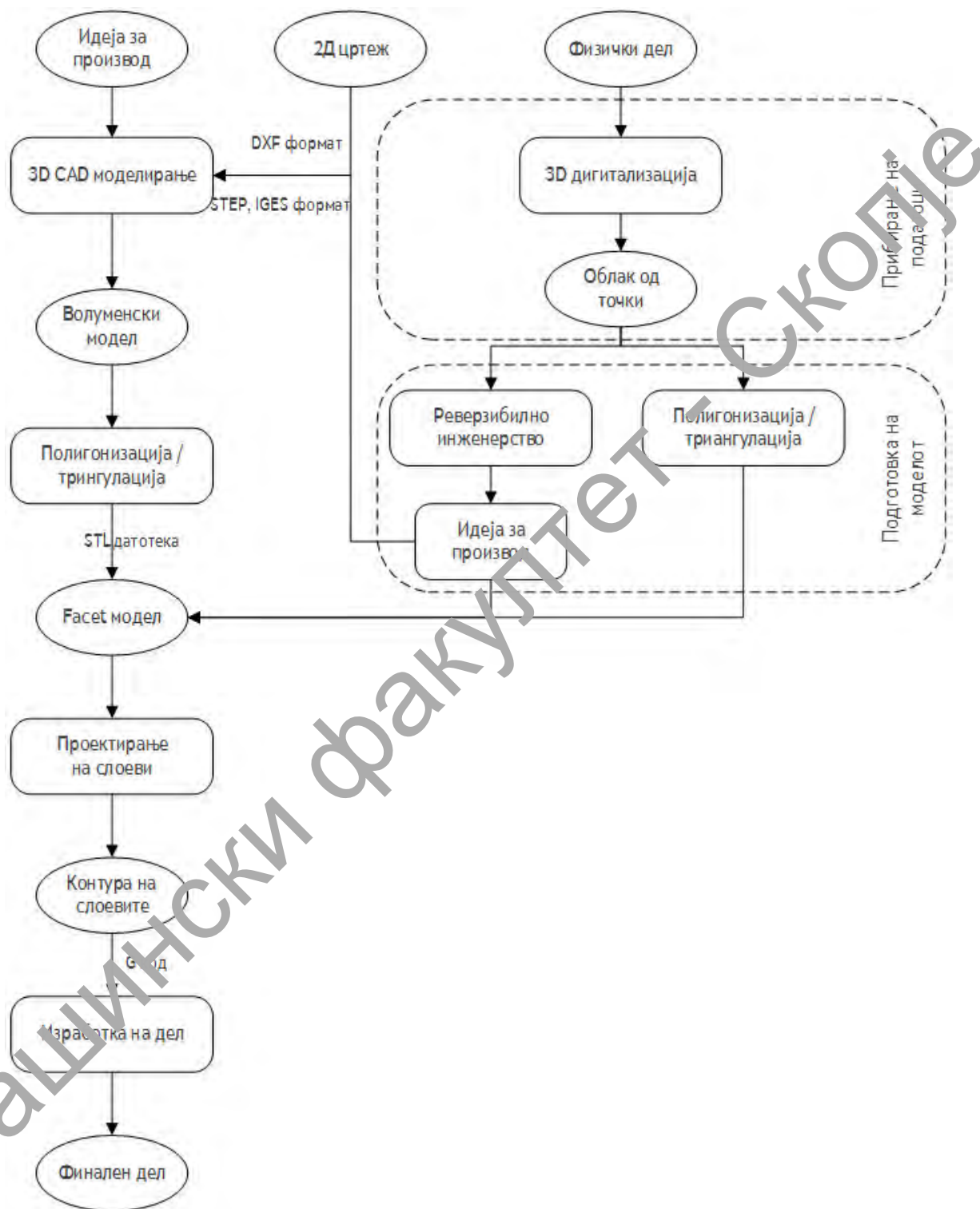
### **Начин на работа**

Начинот на работа на АП односно процесот од идеја до реализација се одвива во неколку чекори. Чекори на процес на изработка на модел со АП (Gibson et al., 2015):

1. Дизајн на CAD модел
2. Конверзија на CAD моделот како .stl датотека
3. Подготовка на .stl датотеката за изработка.
4. Подготовка на машината.
5. Изработка на физички модел.
6. Отстранување на моделот од машината
7. Пост-процесирање на физичкиот модел (отстранување на структурите за потпора, брусее, полирање).
8. Примена

Првиот чекор е дизајнирање на CAD модел. Во случај на не познавање на техниките за дизајнирање на CAD модел, постојат неколку алтернативи. Готови модели, подготвени за преземање достапни се на голем број на портали. Друг начин е реверзибилното инженерство, преку кое со 3D скенирање, физичкиот модел се претвора во CAD модел. Следен чекор е конверзија на CAD моделот во .stl датотека, која е неопходна за префрлање на моделот во соодветен софтверскиот програм каде се подготвува за изработка со генерирање на G код. Подготовката на моделот за изработка подразбира проверка на геометријата (дали е целата затворена), генерирање на структури на потпора, поделба на моделот на слоеви и експортирање како G код. G кодот ги содржи информациите за патеките на движење на екструдерот за изработка на физичкиот модел но, и работните параметри како

информациите за температурите на работа, дебелината на спој и како таков се предава на машината.



Слика 3-3. Овшћи модел за принципот на изработка на делови со АП (Адаптирано од ISO 17296-4)

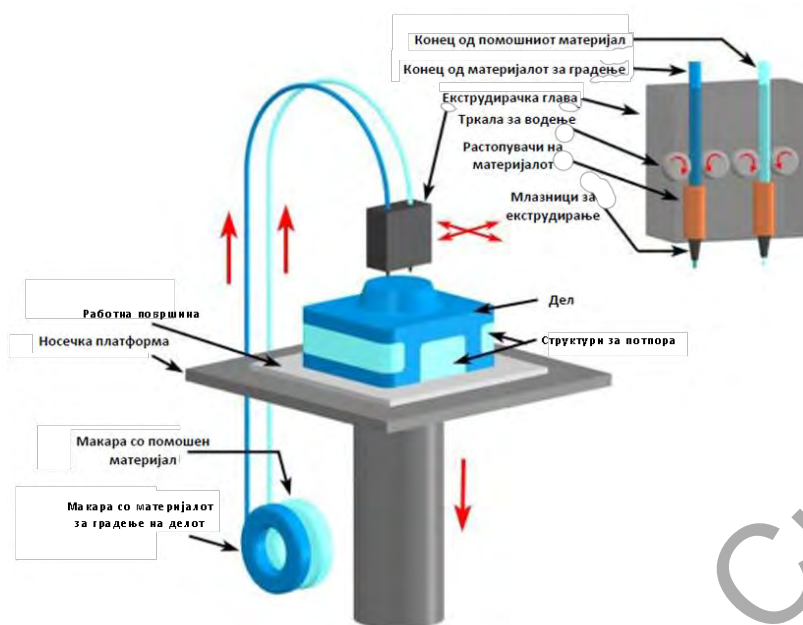


Пред започнување на изработката се проверува машината, за правилно работење (нивелирање на работната површина, адхезија на работната површина, екструдирање на материјал). Изработката на моделот се одвива реално брзо иако зависи од волуменот на делот и избраните технолошки параметри. По изработката, физичкиот модел треба да се исчисти од структурите за потпора. Зависно од намената можно е да има потреба од дополнителни доработки на моделот како брусење, полирање или боене.

***Тврдење 01:** Пред изработка и воопшто пред дизајнирање на делот треба точно да се знае намената и целта на делот, врз основа на која ќе се избере соодветен АП процес и соодветни параметри за изработка.*

### **Процес на екструзија на материјал (ЕМ)**

За почеток на процесот на ЕМ се смета 1991 година, кога е првпат комерцијално претставена технологијата од страна на компанијата Стратасис. Тие први го употребуваат терминот за екструдирање на материјал (анг. fused deposition modeling). ЕМ претставува процес на екструдирање на термопластика низ загреаната глава на екструдерот, директно на работната површина. Принципот на работа на ЕМ машина е претставен на слика 3-4. Моделот на машината (слика 3-4) е составен една глава со два екструдера, од кои едната е за материјалот кој се гради делот, а другата е за материјалот за структурите за потпора. Материјалот е намотан на макари и е воден до главата на екструдерот каде се загрева до точка на топење и излегува во со значително намален попречен пресек. Работната температура во комората во која се гради моделот е доста пониска од температурата на топење на материјалот, така што по таложењето, материјалот веднаш се зацврстува (Pham and Dimov, 2003). Бидејќи ладењето и зацврстувањето на материјалот не се одвива многу брзо, при градењето на моделот треба да се користат структури за потпора. Екструдирачките глави остваруваат движење по X и Y оските, додека работната површина остварува движење по Z оската, за моделот прикажан на слика 3-4. Кај други модели на ЕМ машини движењето е исто така со 3 оски на помест, но различни делови на машината реализираат различни движења. Постојат и машини со повеќе оски на помест, што се реализира со ротација на работната површина или нејзино искосување.



Слика 3-4. Шемајски приказ на машина за ЕМ со две екструдирачки глави  
(Превземено од: (Кочов, 2015))

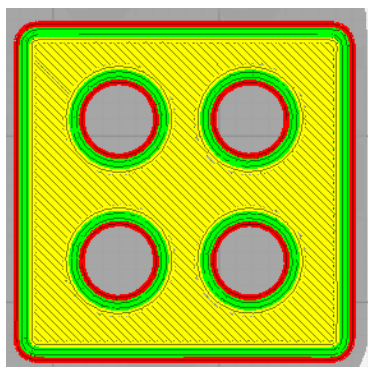
Градењето на делот е во слоеви, на тој начин што се нанесува еден слој од растопениот материјал за градење на делот, а веднаш потоа слој од растопениот материјал за структурата за потпора. Со завршувањето на слојот, работната површина се спушта надолу за дебелината на слојот, овозможувајќи да започне градењето на следниот слој (Evans, 2002). Во случај на кога работната површина не остварува движење по Z оската, главата на екструдерот се подига нагоре за дебелината на слојот, како би започнало градењето на следниот слој.

### **Начин на работа**

Начинот на работа на машината за ЕМ има голем број на предности во однос на класичните технологии. Но има и одредени негативни страни, кои се претставени во продолжение.

Работењето во слоеви, подразбира дека CAD моделот во подготовката за изработка треба да се подели на n-број на слоеви кои во суштина се 2D профили (слика 3-5).

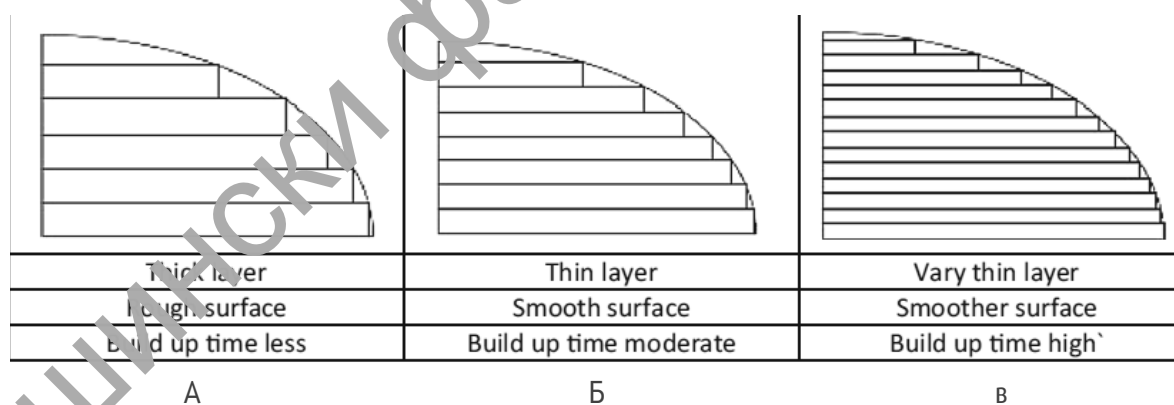
**Тврдење 02:** При дизајнирањето треба да се избегнува корисање на нагли преоди од многу дебели кон многу тенки ѕидови, што резултира со појава на заостанати напони.



Црвена боја – обвивка  
 Зелена боја – внатрешен ѕид  
 Жолта боја – исполнување со материјал

Слика 3-5. Приказ на изгледот на виор слој на модел за изработка, сурд (сојсџвено исџражувања)

Поради изработката во слоеви, изработените делови резултираат со површина која има скалеста структура (слика 3-6). Со намалување на дебелината на слојот, се подобрува квалитетот на изработената површина (слика 3-6,в), правејќи го ефектот потешко воочлив со голо око, но тоа не значи дека тој не постои. Но, поголемиот број на слоеви значи значително продолжување на времето на изработка, така што треба да се изберат приоритетите при изработката. Преку адитивното раслојување (Livesu et al., 2017), можно е во различни региони на моделот да се избере различно раслојување, со што може да се оптимизира времето за изработка и квалитетот на изработените површини.



Слика 3-6. Влијанието на дебелината на слојот на квалитетот на изработената површина (Превземено од: (Nadiyaraga and Pande, 2017))

**Тврдење 03:** При дизајнирањето треба да се избегнува користење на тенки ѕидови со мали агли на наклон во однос на работната површина, што резултира со изразен скалест ефект на изработена површина.

Друга негативна страна на работењето со процесот на ЕМ е потребата од користење на структури за потпора. Структурите за потпора го зголемуваат времето потребно за изработка на моделот, го зголемуваат количеството на потрошен материјал, тешко се отстрануваат, а многу често оставаат и видливи траги на делот (Jiang et al., 2018). Така што се повеќе се оди кон изнаоѓање на решенија како би се елиминирала нивната употреба. Одредени автори работат на креирање на методологии за оптимизација на ориентацијата на моделот во процесот на изработка, како би требало да се користат најмалку структури за потпора (Hu et al., 2015). Рејнер и Лефевре предлагаат на мал софтверски пакет кој со неколку операции овозможува дизајнирање на модели кои би се изработиле без користење на структури за потпора (Reiner and Lefebvre, 2016).

**Тврдeње 04:** При дизајнирањето треба да се направи најори за креирање на модел кој нема потреба од структури за потпора при изработката.

**Тврдeње 05:** При дизајнирање на големи надвисувања (испуси и премостувања) треба да се земе во предвид користење структури за потпора.

### **Машини за ЕМ со отворен пристап**

Со истекувањето на дел од патентите на Стратасис во 2009 година, започнуваат проекти за развој на машини кои работат на многу сличен принцип. Истото се случува и со другите процеси на АП, меѓутоа најголем замав земаат машините за ЕМ, поради релативно едноставниот начин на работење и достапни материјали и ресурси. Овие „нови“ машини работат на истиот принцип (слика 3-4), но имаат отворен пристап. Отворениот пристап овозможува корисникот директно да го контролира процесот преку целосен увид во технолошките параметри (температура на работење, дебелина на слој, дебелина на лушпа, начин на нанесување на материјалот и движење на екстурдерот, процент на исполнување со материјал), што ги прави особено интересни за ентузијастите.

Недостаток на овие машини со отворен пристап во однос на онаа прикажана на слика 3-4 е тоа што најголемиот дел од нив имаат отворена

работна комора и само една екструдирачка глава. Отворената работна комора значи дека моделот кој се изработува се лади многу побрзо и нерамномерно. Додека едната екструдирачка глава, условува употреба на само еден материјал, што значи дека и моделот и структурите на потпора се изградени од истиот материјал.

***Тврдење Об:** При дизајнирањето треба да се избегнуваат големи рамки и површини, бидејќи се ладаат нерамномерно, што доведува до деформација на делото (вишкање или собирање).*

Во ова истражување користени се машини за ЕМ со отворен пристап поради тоа што бројот на корисници на овие машини е во постојан пораст. Дополнително, структурата на корисници на овие машини одговара во целост на потребите за ова истражување, а тоа се индустриски дизајнери и останати креативци. Машините за ЕМ поради отворениот пристап овозможуваат голема флексибилност во процесот на изработка на делови и нови можности за истражување.

### **3.1.2. Истражување на моменталната состојба во дизајнот за ЕМ**

Целта на анкетниот прашалник е да се добие директен инпут од искуството на индустриски дизајнери кои работеле со АП односно со ЕМ како најдостепен процес. Во најголема мерка треба да се добие одговор на прашањата околу техниките на дизајнерите кои тие ги користат и проблемите на кои наидуваат при изработката на моделите со ЕМ. Како би се добила комплетна слика на целокупниот процес на дизајнирање и изработка, анкетниот прашалник започнува со поопшти, основни прашања и оди кон специфични. На почетокот, испитаникот се воведува во целата проблематика со основни прашања околу тоа кои процеси од АП ги користат, како и методите и софтвери за моделирање кои ги користат. Со овие прашања треба да се добие слика за основните начини на работа на испитаникот и да се види дали тој ја познава областа и треба да се продолжи со испрашувањето или да се прекине. Дел од одговорите на овие прашања се очекувани, но на овој начин треба да се потврдат, со цел да се зацврстат знаењата.

Специфичните прашања се однесуваат на поедини специфики во процесот на дизајнирање на испитаникот. Преку овие прашања треба да се добие

одговор на тоа кој е начинот на дизајнирање на испитаникот и кои софтверски пакети ги користи. Со овие прашања треба да се донесат генерални заклучоци околу навиките на индустриските дизајнерите но, и техниките кои треба да се користат при дизајн за процесот на ЕМ. Прашањата за проблемите со кои се соочуваат испитаниците при работењето со ЕМ, треба да дадат јасна слика за причината поради која настанува проблемот. Причините кои се извор на проблеми можат да бидат поради не соодветно дизајниран дел, недоволно познавање на процесот или ограничувањето на технологијата.

### ***Структура на анкетниот прашалник***

Анкетниот прашалник се состои од 11 прашања. Осум од нив се од затворен тип, со понудени одговори. Тоа се основните прашања. Додека прашањата каде се бара претставување на проблемите на испитаниците, разбирливо се од отворен тип. Такви прашања има вкупно три.

### ***Примерок***

Главна таргет група на анкетниот прашалник се индустриски дизајнери кои ги користат АП за изработка на своите дизајни, најчесто во концептуалната фаза. Бројот на испитаници на кој е спроведен анкетниот прашалник е дваесет и три. Сите прашалници се уредно пополнети и вратени навремено.

### ***Евалуација на резултатите од прашалникот***

По спроведената анкета заклучокот е дека помеѓу испитаниците не постои доволно познавање на одделните процесите на АП, поради тоа и мешањето на процесите е честа појава. Терминот 3Д печатење го користат за сите процеси од АП, кој е колоквијален термин и се користи во неформални окружувања. Терминот ЕМ како таков го знаат само некои од испитаниците. При дизајнирањето, како што е очекувано размислуваат на изгледот и функционалноста на моделот, но не и на начинот на изработка. Во процесот на дизајнирање не следат никакви правила или ограничувања кои произлегуваат од процесот или машината која се користи за изработка на моделот. Единствено ограничување кое го почитуваат и тоа само дел од испитаниците, е димензионалното ограничување условено од работниот


простор на машината. Дизајнирањето на моделите најголем дел од испитаниците го прават во софтверскиот програмски пакет Solidworks, бидејќи него го изучуваат за време на студиите и најдобро го познаваат. Но, за изработка на делови со комплексна геометрија користат други програмски пакети каде моделирањето е со површини и тоа понатаму претставува извор на бројни проблеми. Модел дизајниран со површини, не претставува проблем за изработка доколку е „соодветно“ дизајниран (површините се убаво споеци и затворени во една целина), но честа е појавата на несоодветно дизајнирани модели. Поради несоодветното дизајнирање, моделите при изработката ќе имаат несоодветности во геометријата и отстапувања во изгледот во однос на замислата на дизајнерот. Одговорите на сите прашања на кои се понудени одговори се претставени на слика 3-7, а детално претставување на проблемите е дадено во табела 3-1.




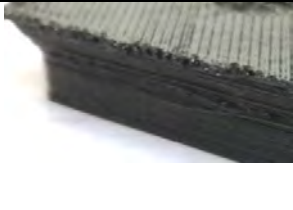
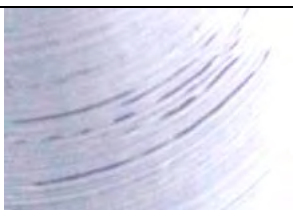
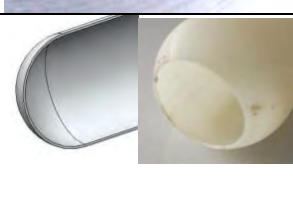
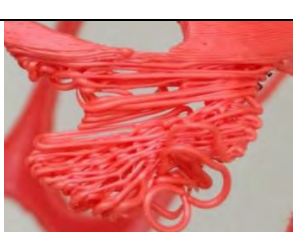


Слика 3-7. Резултати од сироведената анкета (сојсвено исцражување)

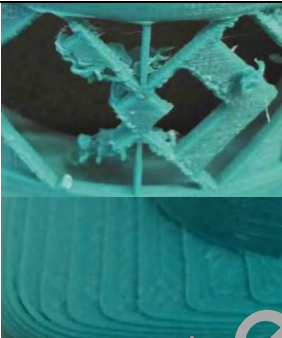





Како најголем проблем при работењето со процесот на ЕМ, испитаниците го издвојуваат проблемот со нецелосно изработените работи и рапавоста на површината. Веднаш по тоа е проблемот со скршени делови. Проблемот со толеранцијата иако очекувано да биде меѓу најчестите проблеми не е наведен, бидејќи испитаниците во најголема мерка изработуваат самостојни делови или интегрирани делови.

Табела 3-1. Детален приказ на проблеми кои се јавуваат при работење со ЕМ (сојсвено исцражување)

<p><b>Пример 1</b> – деформација на моделот</p>	<p>Деформацијата на пластиката е очекувана, но кај ЕМ машини со отворен работен простор е многу честа појава. Особено кога делот е со голема површина, а има мала дебелина. Причина за деформацијата е</p>	
---	--	---

	нерамномерното ладење на моделот.	
<b>Пример 2</b> – рапава површина	Проблемот прикажан на сликата е предизвикан од многу висока температура при изработката на делот. Во случај на ниска работна температура може да дојде до тоа соседните слоеви да не се спојат меѓусебно. Како резултат на ниската температура може да дојде и до затнување на екструдерот.	
<b>Пример 3</b> – не спојување на слоевите	Не спојување на слоевите, како што е прикажано на сликата настанува поради недоволното екструдирање на материјал. Причината за тоа може да биде предизвикано од: затегнувње на самиот материјал, проблем со работната брзина или пак механички проблем.	
<b>Пример 4</b> – не лепење на работната површина	Проблемот со одлепување на делот од работната површина може да се случи во секој момент од процесот на изработка на делот. Доколку се случи на почетокот од процесот на изработка, како на сликата, делот нема да се изработи, а материјалот ќе се екструдира, резултирајќи со куп насобиран материјал. Причината за оваа појава може да биде предизвикана од: голема брзина на работење, не нивелирана работна површина, не исчистена работна површина, ниска температура на работната површина, недоволно лепливо средство.	
<b>Пример 5</b> – изместување на слоевите	Проблемот со изместување на слоевите резултира со дел кои во значителна мерка отстапува во геометријата од CAD моделот. Оваа појава може да се јави како последица на голема брзина на движење на екструдерот, но и поради механички или електрични проблеми.	
<b>Пример 6</b> – пукнатини на површината	Проблемот со пукнатини низ делот се случува најчесто со повисоки делови. Со зголемувањето на висината, загревањето од работната површина го губи влијанието и парчето почнува да се лади, а со тоа и да се намалува адхезијата, што резултира со пукање во одредени делови.	
<b>Пример 7</b> – не изработени елементи	Проблем на не изработени елементи поради начинот на дизајнирање. Кај дел со мала константна дебелина на ѕидовите, прикажан на сликата, не можат да се изработат заоблувањата. Причина за тоа е начинот на работењето на АП во слоеви и при големи заоблувања соседните слоеви не се преклопуваат.	
<b>Пример 8</b> – раслојување	Раслојување на материјалот, како што е прикажано на сликите се јавува во случаи кога има поврзување на две точки на одредена висина, без притоа да се користи потпорен материјал. Друг случај е доколку елементот надвисува без никаква потпора. Оваа појава е резултат на недоволна или неправилна потпора на делот.	



<p><b>Пример 9</b> – елементи под агол</p>	<p>Елементите под агол при изработката со ЕМ може да имаат потреба од потпорен материјал, прва слика, или да резултираат со лош изглед на површината, втора слика. Причина за лошиот изглед на површината е малиот агол на закосување. Со зголемување на аголот на закосување ќе се намали скалестиот ефект или со промена на ориентацијата при изработка може и целосно да се изгуби.</p>	
<p><b>Пример 10</b> – испакнувања на површината</p>	<p>Појавата на испакнувања или зјаеви на површина која треба да биде рамна се предизвикани од вибрации кои се јавуваат во текот на работењето или пак од насобран материјал.</p>	
<p><b>Пример 11</b> – не можност за отстранување на потпората</p>	<p>Проблем со не можност за отстранување на потпорниот материјал е прикажан на сликата. Моделот е составен со долги и тенки хоризонтални елементи, кои имаат потреба од потпорен материјал. При изработка на потпори со ист материјал речиси е невозможно нивно отстранување.</p>	
<p><b>Пример 12</b> – оштетување на допирната површина</p>	<p>Површината на моделот која е допирна со потпората има значителни оштетувања по отстранувањето на потпорниот материјал. проблемот е предизвикан поради не доволно оставениот простор помеѓу делот и потпорниот материјал</p>	
<p><b>Пример 13</b> – лош изглед на долната површина</p>	<p>Долната површина на моделот најчесто кога има потпорен материјал е со лош изглед, како што е прикажано на сликата. Причина за тоа може да биде големото растојание помеѓу делот и потпората, но и немањето воопшто на потпора.</p>	
<p><b>Пример 14</b> – проблем со толеранции</p>	<p>Два дела од еден склоп дизајнирани „правилно“ не можат да се склопат. Причина за тоа е дека толеранциите кои важат за класичните технологии не важат кај АП.</p>	

За спроведување на подетална анализа, проблемите со кои се соочуваат дизајнерите при работа со ЕМ, групирани се во две групи:

Проблеми настанати поради технологијата (начин на работа и ограничувања)

- Не соодветна температура на работната површина.
- Не соодветна температура на загревање на материјалот.
- Не соодветно нивелирана работна површина.
- Не доволна адхезија на работната површина.
- Не соодветна брзина на истиснување на материјалот.
- Механички проблеми на системот.

- Проблеми настанати поради несоодветно моделирање
  - Дизајнирање на тенки вертикални сидови.
  - Дизајнирање на долги хоризонтални елементи.
  - Дизајнирање на несоодветни закосувања (мали или големи).
  - Не изработени елементи.
  - Лошо димензионирање на склоп.
  - Користење на потпорен материја, кога може да се избегне.
  - Не користење на потпори кога е соодветно.

### **Проблеми настанати од технологијата**

Технологијата на АП односно процесот на ЕМ има комплетно различен начин на работа од класичните технологии, како што е детално објаснето во претходните поглавја. Тоа со себе носи низа на предности во однос на можностите за изработка, но има и одредени ограничувања. Ограничувањата кои се резултат на начинот на работење на процесите не може да се елиминираат но, може да се намали нивното влијание. За намалување на влијанието на ефектите од работењето, потребно е добро познавање на технологијата како би се избрале соодветните работни параметри за изработка. Дополнително, „правилниот“ начин на дизајнирање на деловите може да допринесе кон намалување на дел од негативни ефекти кои може да се јават при изработката.

**Тврдење 07:** При дизајнирањето треба да се применат заоблување или закосување на рабовите кои лежат на работната површина, со што се олеснува процесот на отстранување (одлејување) од работната површина.

**Тврдење 08:** При дизајнирање на високи и тенки самостојни елементи треба да се има во предвид дека може да дојде до појава на заоблувања во основата на елементот (elephant foot), бидејќи нанесените слоеви под тежина се силескуваат, што поа доведува до зголемен напречен пресек.

### **Проблеми настанати поради несоодветно моделирање**

Дизајнерите кои не работат во производна индустрија немаат искуство со дизајн на производи за производство. Тие работат на 3Д модели, виртуелни рендери, главно во доменот на концептната фаза од дизајнирањето. Со АП, уште во концептната фаза можна е изработка на прототипни решенија. Но за нивна правила изработка потребно е правилно дизајнирање на делот во CAD програмскиот пакет. Проблемите кои се претставени погоре во текстот не се резултат на неправилно дизајниран делови, туку на делови несоодветно дизајнирани за изработка со ЕМ.

**Тврдење 09:** При дизајнирањето пожелно е да се користат полигонална мрежа бидејќи за изработка делови се претвора во полигонализиран модел (.stl датумотека), па можноста за грешки се намалува.

**Тврдење 10:** Димензиите на делови треба да соодветствуваат со можностите на машината со која ќе се изработува делови. Подоцнежното пропорционално намалување на димензиите на делови може да резултира со елементи со димензии кои се надвор од можностите на машината и поради тоа не се прерачува.

## **3.2. Потребата за алатка за дизајн за ЕМ**

Генерално согледување на изложеното во претходното поглавје е дека најголемиот дел од проблеми можат да се решат или избегнат преку „правилно“ дизајнирање. Правилното дизајнирање значи дизајнирање за соодветните технологии, а тоа подразбира доволно познавање на технологијата. Од ова е јасно дека постои реална потреба за развивање на алатка за дизајн за АП, односно во конкретниот случај ЕМ, која ќе им помогне на индустриските дизајнери во процесот на дизајнирање.

Во текот на спроведување на ова истражување сè уште не постојат стандардизирани правила околу многу аспекти поврзани со АП и дизајнот за АП, што дополнително укажува на потребата од вакво истражување. Интернационалниот институтот за стандардизација (ISO) и Асоцијацијата за тестирање и материјали (ASTM) работат на креирање на стандарди кои би требало да постават основи за понатамошни истражувања.

Табела 3-2. Барања кои треба да ги задоволат правилата за дизајн за ЕМ  
(Адаптирано од: (Adam, 2015))

Барања кои треба да ги задоволат правилата	Барања за методологијата
Правилата за дизајнирање треба да се сеопфатни.	Со методологијата мора да се идентификуваат сите аспекти во индустрискиот дизајнот за кои може да важат правилата за дизајнирање.
Правилата за дизајнирање треба да важат за сите процедури.	Методологијата мора да биде независно применлива и да овозможи комбинација на процедурални анализи.
Правилата за дизајнирање треба лесно да се трансферираат на други елементи.	Методологијата мора да биде независна од функциите.
Правилата за дизајнирање треба да се развијат преку експериментално истражување.	Со методологијата мора да се дефинира погледот на испитните модели и работните параметрите.

Целта на оваа докторска дисертација е развивање на алатка за дизајн за ЕМ. Алатката претставува колекција на правила за дизајн за ЕМ. За реализација на тоа креирана е листа на барања (табела 3-2) кои треба да се задоволат како правилата би биле општо прифатени и функционални.

Табела 3-3. Методологијата за развивање на правила за дизајн за ЕМ  
(сојсвоено истражување)

<b>Чекор 1</b> - Дизајнирање на испитните модели	Според досегашните истражувања дефинирани се проблемите кои настануваат при изработката на деловите. Врз основа на тоа креирана е листа на проблеми за кои треба да се најде решение. Согласно на тоа дизајнирани се параметарски моделите кои треба да дадат одговор на проблемите.
<b>Чекор 2</b> - Дефинирање на технолошките параметри	Дефинирани се основните работни параметри користени при спроведување на експерименталните истражувања.
<b>Чекор 3</b> - Изработка на испитните модели	За изработката на моделите дефинирани се работни услови. Внимавано е да нема големи отстапувања од базични вредности, бидејќи целта е испитување на можностите на процесот, а не оптимирање на машините.
<b>Чекор 4</b> - Евалуација на испитните модели	Евалуацијата на изработените модели е направена врз основа на отстапувањата во профилот и димензиите но и визуелниот аспект.
<b>Чекор 5</b> - Развивање на алатка за дизајн за АП	Резултатите од евалуацијата се искористени во насока на развивање на правилата за дизајн за ЕМ.
<b>Чекор 6</b> - Валидација на алатката	Валидацијата на алатката е спроведена преку четири примери.

Листата на барања претставува основа во дефинирањето на методологијата за развивање на алатката за дизајн за ЕМ. Од тука произлегува дека методологијата мора да ги идентификува аспектите во

индустрискиот дизајн кои се инволвирани со алатката, мора да биде независно применлива и независна од функциите. Со методологијата треба точно да се дефинираат изгледот на моделите користени во експерименталното истражување, како и работните услови.

За развивање на правилата за дизајн за ЕМ, користена е следната методологија, дизајнирај – изработи – евалуирај – реализирај – валидирај (табела 3-3).

### **3.3. Дизајн на испитните моделите**

Моделите кои се користени во експерименталното истражување се дизајнирани параметарски. При дизајнирањето внимава се моделите да се дизајнирани на начин на кој добиените резултати од анализата ќе може да се толкуваат еднозначно. Односно во процесот на дизајнирање запазени се првата и втора аксиома на Сух.

#### ***Проблеми кои се земени во предвид за анализа***

Еден од најголемите проблеми при дизајнирање на делови со ЕМ е дефинирањето на **минималната дебелина на сидот**. Поради тоа, ова е анализирано на повеќе начини преку интегриран сид, самостоен сид. При дефинирањето на минималната дебелина на сидот треба да се внимава покрај можноста за изработка и на јаконите карактеристики. Јаконите пресметки не се предмет на ова истражување но, треба да се имаат во предвид. На можноста за изработка на минимална димензии на сид влијаат и висина и должина на елементот. Во ова истражување се спроведува проверка на минималната дебелина на интегриран но, и самостоен сид.

Паралелно со проверката за минимална дебелина на сид, треба да се спроведе и проверка за **минимална дебелина на зјај** кој се изработува без припојување на соседните страни.

**Минималните димензии на самостоен елемент** се нешто што треба да се истражи. На квалитетот на изработениот самостоен елемент има влијание и неговата висина, но и работните параметри. Во ова истражување се прави проверка кои се минималните димензии на самостоен елемент кој се изработува со ЕМ.

Изработката на **цилиндрични елементи и кружни отвори** е исто така предизвик со кој се соочуваат оние кои ги користат процесот на ЕМ. Поради начинот на работа на технологиите на АП, а со тоа и ЕМ, ориентацијата на моделот при изработката има клучно влијание врз изгледот на изработените кружни елементи.

Изработката на **елементи под агол** претставува предизвик од повеќе аспекти. Поставувањето на елемент под мал агол во однос на работната површина, резултира со силно изразен скалест ефект. Дополнително, доколку елементот има мала дебелина може да се случи и воопшто да се изработи бидејќи слоевите меѓусебно не можат да се спојат. Елементот под агол условува и потреба од користење на структури за потпора. Треба да се истражи која е максималната должина на елементот и агол кој го зафаќа со работната површина за да се изработи без користење на структури за потпора и задоволителен квалитет на површина.

**Испустите и премостувањата** претставуваат предизвик за изработка без користење на структури за потпора. Во ова истражување се испитува која е максималната должина која може да се изработи без користење на структури за потпора, а притоа да нема деформација односно раскончување на елементот.

Изработката на **модели со сферички облик** не е проблем за реализација со ЕМ, но проблемот е во квалитетот на површината поради појавата на скалестиот ефект.

**Структурите за потпора** се составен елемент од начинот на работа на ЕМ. Но користењето на структури за потпора иако доста корисно во процесот на изработка, предизвикува доста проблеми во пост процесирањето на моделите. Поради тоа во ова истражување фокусот е во изработката на модели без присуство на структури за потпора.

**Повторливоста** во квалитетот на изработката е уште еден предизвик за процесот на ЕМ. Честа е појавата, истиот дел изработен во неколку наврати да резултира со различен изглед при исти работни услови.

### **3.3.1. Дизајн на основните модели**

---

Основните модели се дизајнирани да дадат одговор на проблемите кои настануваат при користење на процесот на ЕМ, изнесени во претходното поглавје. Во оваа фаза креирани се 10 модели, прикажани во табела 3-4, кои

служат за проверка на основните гранични вредности. Со овие модели треба да се добијат информации за: минималната дебелина на сид и зјај, минималниот дијаметар на отвор, максималните надвисувања, премостувања и елементи под агол без потпорен материјал кои може да се изработат на машината која ќе се користи при испитувањата. Главниот фокус во овој дел на истражувањето е дефинирање на граничните вредности на изработка без користење на потпорен материјал.

Табела 3-4. Прејскажување на основните модели користени во експерименталните испитувања (сојсвено испитување)

Група	Форма	Што се испитува	Слика
Модел 1-1	Призматични форми	Минимална дебелина на сид	
Модел 1-2	Призматични форми	Минимална дебелина на самостоечки сид	
Модел 1-3а	Призматични форми	Минимална дебелина на самостоечки елемент, квалитет на површинска изработка	
Модел 1-3б	Цилиндрични форми	Минимална дебелина на самостоечки елемент, цилиндричност, квалитет на површинска изработка	
Модел 1-3в	Конусни форми	Минимална дебелина на самостоечки елемент, конусност, квалитет на површинска изработка	
Модел 1-4	Призматични форми	Минимален зјај помеѓу сидови	
Модел 1-5	Цилиндрични форми	Минимален дијаметар на цилиндричен продор, отстапување во димензии, цилиндричност	
Модел 1-6	Призматични форми	Должина на слободен хоризонтален елемент, квалитет на површинска изработка, свлекување	
Модел 1-7	Призматични форми	Агол на закосување во однос на работната површина, квалитет на површинска изработка, свлекување	
Модел 1-8	Призматични форми	Должина на хоризонтален елемент без потпорен материјал, квалитет на површинска изработка, свлекување	

### ***Начин на моделирање***

Основните модели се дизајнирани параметарски користејќи го програмскиот пакет DS Solidworks. При дизајнирањето направен е обид за стандардизација на моделите, поставувајќи ги сите на правоаголни основи со дебелина од 1 mm. Текстот кој укажува на димензиите на испитуваните елементи е поставен од десната страна, со големина од 3 mm и дебелина/висина од 2,5 mm.

### **3.3.2. Дизајн на сложените модели**

Моделите со сложена геометрија се дизајнирани така што би обезбедиле дополнителни информации околу граничните вредности за проблеми со кои најчесто се соочуваат корисниците на ЕМ. Основните модели се добри за поставување на базични податоци, меѓутоа таквите форми многу ретко се користат во реалноста, така што резултатите имаат повеќе индикативна вредност. Во дизајнот и архитектурата, како што е прикажано во поглавје 2 сè почесто се користат сложени органски облици наспроти основните геометриски облици или пак комбинација од двете.

Во оваа фаза се креирани 8 модели за проверка на граничните вредности кај сложените геометрии. При дизајнот и димензионирањето на моделите користени се сознанијата добиени од изработката на основните модели. Во табела 3-5 е даден преглед на деловите и што секој од нив испитува. Кај овие делови не може секаде да се испочитува не користењето на потпорен материјал. Главна карактеристика која се испитува во оваа фаза е повторливоста во изработката и скалестиот ефект, но и квалитетот на површината кај сложените органски форми. Повторливоста е многу значајна карактеристика за обезбедување на постојан квалитет, но е и критична за сите процеси на АП, а особено ЕМ.

### ***Начин на моделирање***

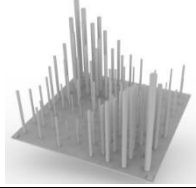
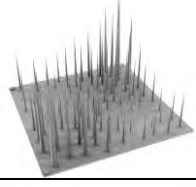






Сложените модели се дизајнирани параметарски, користејќи го програмскиот пакет Rhinoceros или Rhino. Во Rhino со додатокот Grasshopper дизајнирањето на моделите е пофлексибилно што овозможува создавање на комплексни геометрии.

Rhino е програмски програм за 3Д моделирање кои наоѓа примена во повеќе области, меѓу кои индустриски дизајн, дизајн на накит, графички



дизајн, поморски дизајн, архитектура, CAD/CAM, реверзибилно инженерство, изработка на брзи прототипови и многу други. Се базира на NURBS (nonuniform rational B-spline) површини, што овозможува креирање на слободни органски форми. Во исто време овој програмски пакет поседува и сет на алатки за полигонално вмрежување. Поточно со Rhino, може да се креираат три типа на геометриски објекти: NURBS криви, NURBS површини и полигонални мрежи.

Табела 3-5. Прејдставување на сложеније модели користени за експерименталније исцражувања (сојсвено исцражување)

Група	Форми	Што се испитува	Слика
Модел 2-1а	Цилиндрични форми	Минимален дијаметар и максимална висина на самостоен елемент, цилиндричност, повторливост, појава на конци, скалест ефект	
Модел 2-1б	Конусни форми	Минимален дијаметар и максимална висина на самостоен елемент (конус), повторливост, појава на конци, скалест ефект	
Модел 2-2	Призматични форми	Минимална дебелина на ѕид, не користење на потпорен материјал при креирање на отвори	
Модел 2-3а	Призматични форми	Квалитет на површинска изработка, скалест ефект, повторливост	
Модел 2-3б	Призматични форми	Минимални дебелини на ѕид, квалитет на површинска изработка, скалест ефект, повторливост	
Модел 2-4а	Органски форми	Заоблени страни, минимални дебелина на ѕид, премостувања, скалест ефект, квалитет на површинска изработка	
Модел 2-4б	Органски форми	Заоблени страни, минимални дебелина на ѕид, премостувања, скалест ефект, квалитет на површинска изработка	
Модел 2-4в	Органски форми	Заоблени страни, минимални дебелина на ѕид, премостувања, скалест ефект, квалитет на површинска изработка	

**Полигонална мрежа** е метод на приближно претставување на површина. Ја претвора мазната површина во сет од планарни полигонални сегменти. Прецизноста на моделот е обратно пропорционална со бројот и големината на полигонални сегменти. Мрежа со помали полигони претставува помазна површина, додека во случај на поголеми полигони, површината е погруба. Главен недостаток на полигоните е тоа што колку и да се мали, никогаш нема да ја претстават површината прецизно бидејќи се составени од мали рами и површини.

**Површински модел** е математички генерирана површина без дебелина. Површински модел претставува сет од површини кои формираат 3D тело. Кои се користат во компјутеризирани производни системи и за генерирање на фотореалистични рендери и анимации. Доколку површинскиот модел е целосно споен (затворен) може да се користи и за изработка на делови.

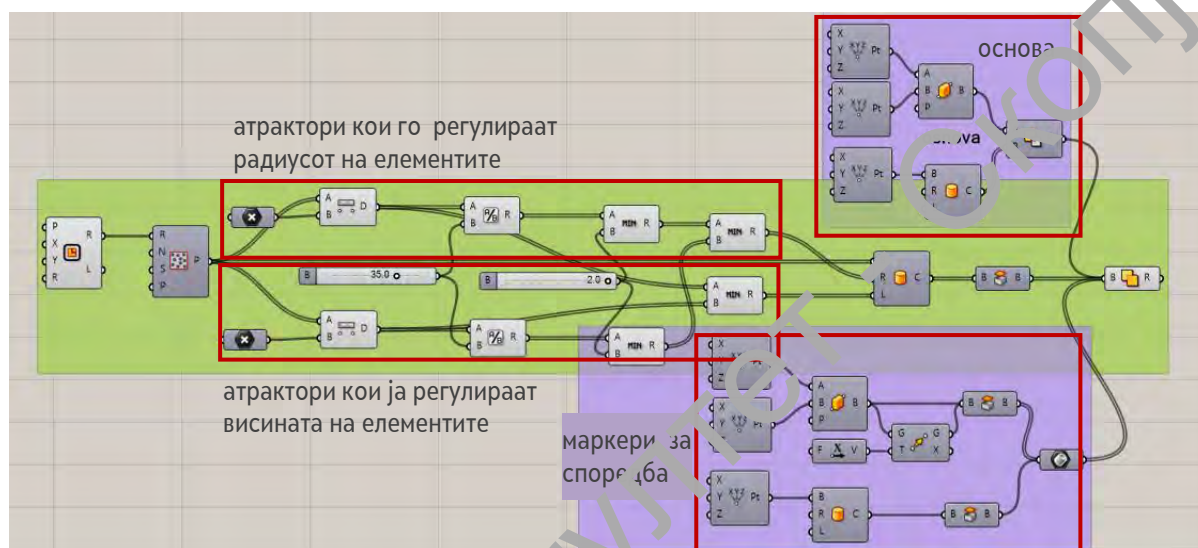
**NURBS (Nonuniform Rational B-Spline) површини** се површини од повисок степен на криви кои се користат за прецизно претставување слободорачни мазни површини кои може да се користат за дизајн на 3D модели и компјутеризирано производство. Поради големата прецизност на NURBS површините во претставувањето на слободорачните површини во компјутерска околина, овој начин е најоодветен за примена онаму каде е значајна прецизноста или изгледот.

Со спојување на две или повеќе NURBS површини се формира полиповршина. Во случај кога една NURBS површина или полиповршина ќе се затвори, креирајќи еден волумен, се создава солид тело (Cheng, 2014). Салид телото во Rhino е површина или полиповршина која е затворена без никаков зјај или преклопувања.

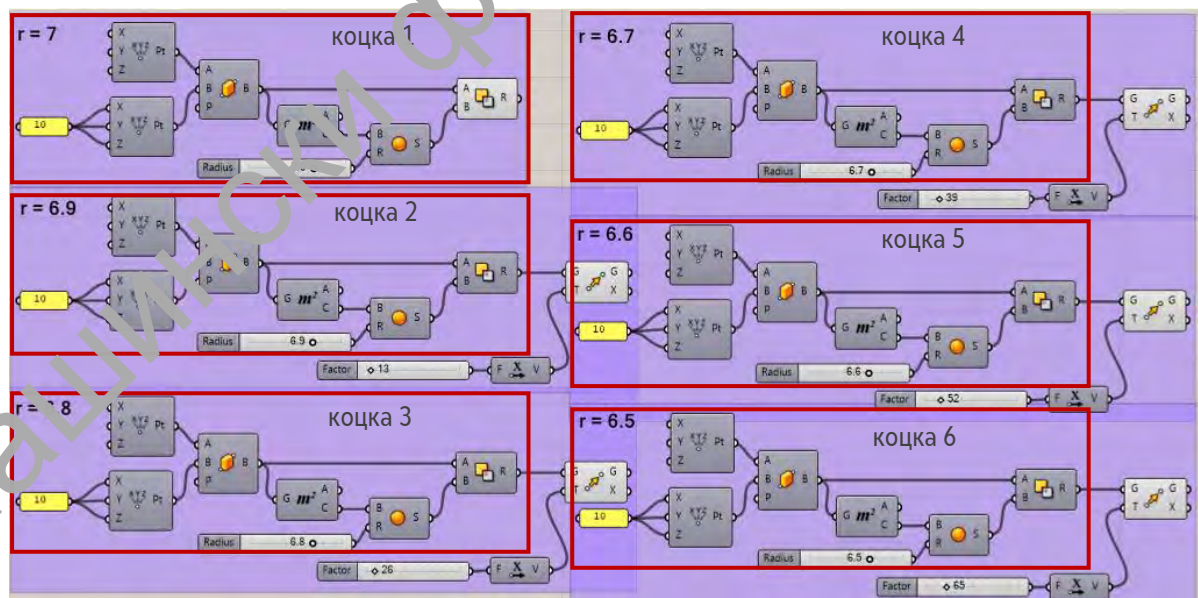
Дополнителна предност на програмскиот пакет Rhino е визуелен едитор за програмирање кои го поседува, наречен Grasshopper. Визуелното програмирање му овозможува на корисникот поврзување на функционални блокови во секвенци, каде единствената синтакса е внесот на вредностите во блоковите. За разлика од класичното програмирање, со визуелното програмирање корисникот манипулира со елементите графички, а не текстуално. Преку визуелното програмирање, предностите од програмирањето се достапно за сите (Khabazi, 2012).

Моделите 2-1a и 2-1b се дизајнирани како мрежа од точки кои се центри на основата на секој елементите со кружен профил. Алгоритамот користен за

дизајнирањето на моделите е прикажан на слика 3-8. Промените во димензиите на елементите се контролираат преку атрактори. Атракторите се точно избрани точки кои преку формула влијаат на промената на димензиите на елементите. Во конкретниот случај промената е брановидно, со постепено зголемување на димензиите (дијаметарот и висините) како се оди подалеку од атракторот. Основата на која се поставени елементите е со димензии 70x70 mm, додека димензиите на елементите варираат.



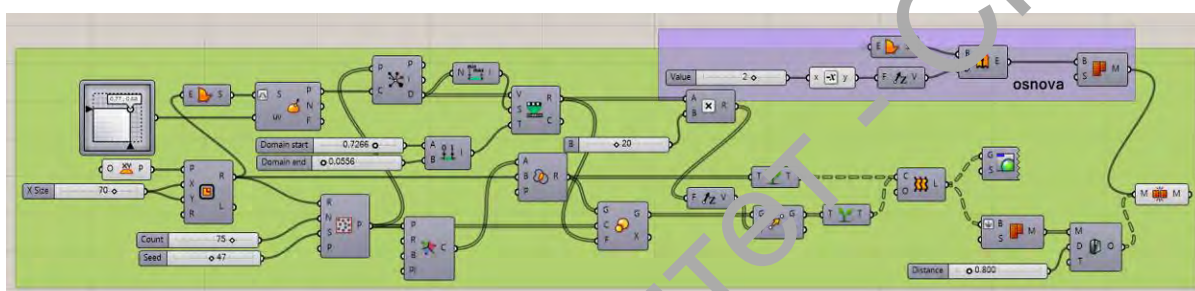
Слика 3-8. Алгоритам за дизајн на моделот 2-1 (сојствено исцржување)



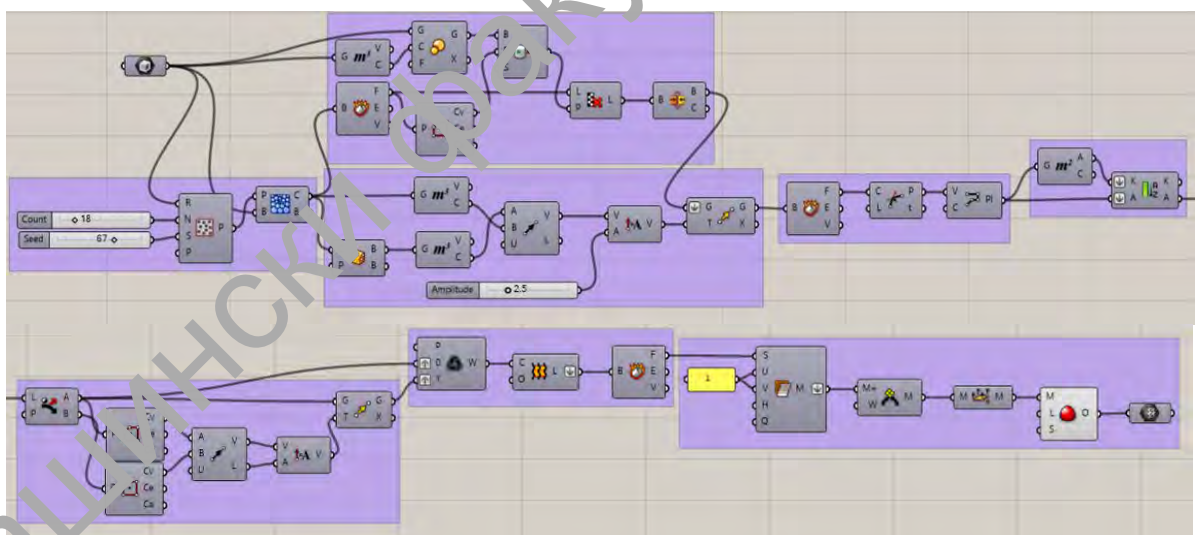
Слика 3-9. Алгоритам за дизајн на моделот 2-2 (сојствено исцржување)

Моделот 2-2 претставува спој на квадрати со различен сферен продор поставени на основа со димензии 15x80x1 mm. Алгоритмот за креирање на моделот е претставен на слика 3-9. Секоја од коцките е со фиксни димензии 10x10x10 mm, а се менува радиусот на сферниот продор.

Моделите 2-3а и 2-3б се дизајнирани според алгоритмот прикажан на слика 3-10. Моделите во основа се воронои шара која е екструдирани со закосување на страните. Висината на екструдираниите елементи, варира 2 mm и се регулира преку атракторни точки распоредени на неколку места низ основата. Разликата помеѓу моделите е тоа што кај моделот 2-3а елементите се целосно затворени, додека елементите на моделот 2-3б се со тенки ѕидови.



Слика 3-10. Алгоритам за дизајн на моделот 2-3 (сојствено истражување)



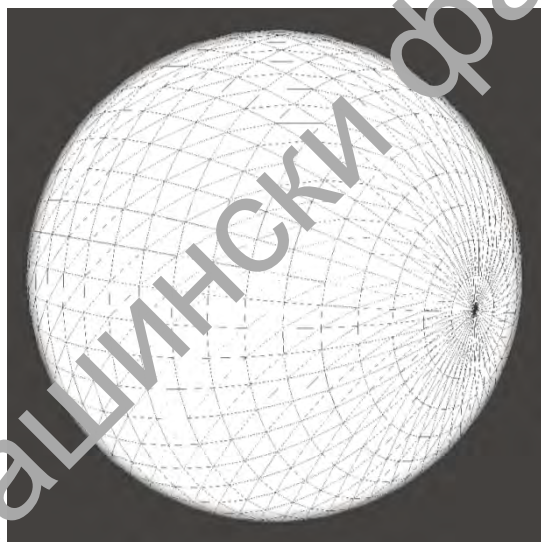
Слика 3-11. Алгоритам за дизајн на моделот 2-4 (сојствено истражување)

Моделите 2-4 се дизајнирани како органски форми Главната разлика помеѓу моделите е во бројот на ќелии. Типот на мрежата исто така се разликува кај моделите 2-4а и 2-4б е воронои мрежа, додека кај моделот 2-4б

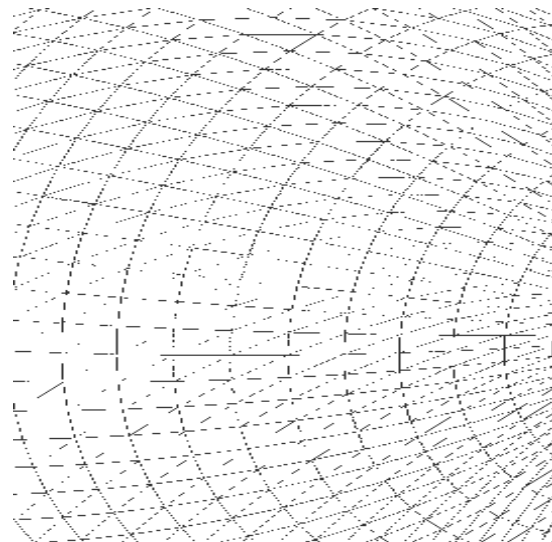
е делунои мрежа. Органската заоблена форма е постигната со Weverbird додатокот на Grasshopper. Дизајнирањето на моделите е прикажано на (слика 3-11).

### 3.3.3. Конверзија на делот во STL датотека

Изработката на моделите со процесот на ЕМ условува нивна конверзија како .stl датотеката. При креирањето на .stl датотеката моделот се полигонизира, така што треба да се внимава на толеранцијата на девијацијата, бидејќи помала толеранција резултира со подобар изглед на површината. Сепак, големи и комплексни делови претворени во .stl со голема прецизност може да бидат многу големи како датотеки и непотребно да го оптоваруваат системот. Затоа, потребно е да се направи компромис на степенот на финост на полигонозацијата и големината на датотеката. е прикажана Разликата помеѓу изборот на вредности за толеранцијата на девијација и агол е прикажана на слика 3-12. Од слика 3-12 јасно се уочува како степенот на полигонизација влијае на визуелната претстава на делот. Лошо креирана .stl датотека може да е одговорна за изработка на делови со слаб квалитет, во однос на резолуцијата, дури и недостатоци на некои детали. Поради тоа е важно да се запази тврдењето 11.



Толеранција на девијацијата - 0,3 mm  
Толеранција на аголот - 30°



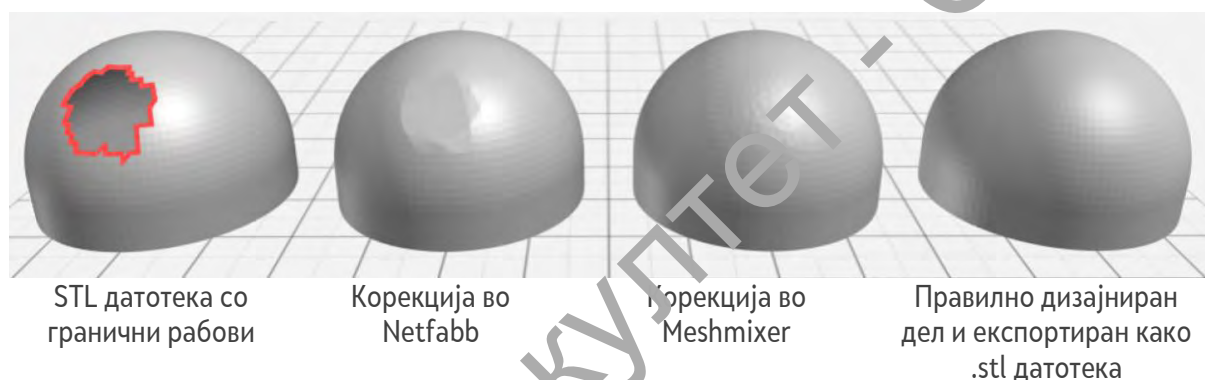
Толеранција на девијацијата - 0,1 mm  
Толеранција на аголот - 10°

Слика 3-12. Разлика во изгледот на моделот при избор на различни параметри во креирање на .stl датотеката (со сивено истражување)

**Тврдење 11:** При креирање на .stl датотека треба да се користи толеранција на девијација од 0,001 mm и толеранција на аголот од 15°.

### Проблеми кои може да се јават со .stl датотека

При креирањето на .stl датотеката може да се јават проблеми предизвикани начесто од лошото дизајнираните модели. Проблемите со датотеката потоа се префрлаат и на изработениот дел, па затоа е најдобро да се отстранат пред изработката на делот. Постојат специјални софтверски програмски програми во кои може да се доработуваат .stl датотеките, но, како што е објаснето подолу во тестот, секогаш е најдобро тоа да се прави во софтверскиот пакет во кои е дизајниран моделот (слика 3-13).



Слика 3-13. Начини на коригирање на неискривности во геометријата на .stl датотека (Датум: (Redwood et al., 2017))

**Тврдење 12:** При подготовка за изработка, задолжително треба да се провери дали моделот има неправилности во геометријата, како што се завршени површини или отворени површини.

**Тврдење 13:** Еквивалентна корекција на моделот секогаш треба да се прави во изворниот софтверски пакет. Ако не постои така можност, делот може да се доработи во софтверски пакет за наменети за доработка (Meshmixer, Geomagic и др.).

Во продолжение се дискутирани најчестите проблеми кои се јавуваат и како тие да се отстранат.

Недостасуваат сѝрани или елементи од делот

При префрлањето на .stl датотеката во софтверскиот пакет за раслојување се забележува дека недостасуваат елементи од површината на делот. Некогаш тоа се забележува дури по изработката (површини свртени наопаку). Тоа се случува бидејќи моделирањето на деловите со сложени облици се прави во софтверски пакети кои работат со NURBS површини. При креирањето на .stl моделот, се прави полигонизација на целиот модел. Таа конверзија може да направи проблем во моментот кога некој од површините нема да може да ги префрли во бараната состојба.

Гранични рабови

Граничните рабови се појавуваат доколку моделот е креиран со површини, како резултат на не споени површини. Доколку делот има ваков проблем, а тој не се отстрани, изработениот дел ќе има дупки или отвори на површината. Можно е софтверскиот пакет за раслојување да ги препознае тие отвори како дел од геометријата па да ги исполни со материјал и на тој начин целосно да ја смени геометријата на делот. При ваков проблем мора да се интервенира во иницијалниот софтвер во кој е работен моделот.

Површини кои се пресекуваат

Површини кои се пресекуваат се јавува како резултат на два дела кои се преклопуваат. Ова може да предизвика проблем кај софтверскиот пакет за раслојување бидејќи нема да може да одреди кои се надворешни а кои внатрешни површини. Најдобро е во овој случај да се коригира CAD моделот. Корекцијата може да значи спојување на двете тела во едно или пак едноставно отсекување на делот што се преклопува.

Non manifold рабови

Ако се појави проблем кој упатува на двосмислени рабови кои не може да се класифицираат на кое тело припаѓаат тоа мора да се провери. Доколку се работи за намерно поставени делови кои се допираат, тоа може да се остави како такво. Сепак, многу често ова е индикација за трета несакана површина, која останала во внатрешноста на некое од телата. Доколку станува збор за вториот случај, таа површина треба да се отстрани пред подготовката за изработка на делот.

Прерафинирана мрежа

Некои софтверски пакети може да информираат за премногу рафинирана мрежа на моделот. Тоа не претставува проблем кој влијае на геометријата на делот, единствен проблем е што датотеката е непотребно голема. Секогаш при експортирање во .stl датотека треба да се провери квалитетот со кој се експортира делот. Не секогаш е потребен максимум квалитет. Тоа може понекогаш само да е дополнително и непотребно оптоварување на системот.

**Тврдење 14:** Во процесот на раслојување, треба да се проверат дали моделот целосно се изработува, итн како опција постои во сите софтверски пакети за раслојување.

### 3.4. Технолошки параметри за изработка

Моделите се изработени на две машини, Prusa Mk3, во понатамошниот текст M1 и Creality Ender 3, во понатамошниот текст M2. Машината M1, со работен волумен од 210x210x210 mm, а материјал кој е користен за изработка е PLA. Работниот волумен на машината M2 е 220x220x250 mm, а материјалот кој е користен за изработка е исто PLA. Во табела 3-6 е даден детален преглед на работните параметри, а во Прилог 1 е дадена детална спецификација на машините и материјалите кои се користени.

Табела 3-6. Работни параметри на машините при сироведување на експерименталните испиражувања (сопствено испиражување)

Машина	M1	M2
Материјал	мат1 / мат2 / мат3	мат2 / мат3
Софтверски пакет	Slic3r	Ultimaker Cura
Работен слој	0,1 mm / 0,2 mm	
Дијаметар на бризгалка	0,4 mm	
Работна температура	210° C (215° C прв слој Prusa)	
Температура на работната површина	60° C (65° C прв слој Prusa)	
Густина на исполнување	20 % (100% само во одредени случаи)	
Шема на исполнување	Мрежа	
Агол на исполнување	45°	
Потпорен материјал	Не (освен во одредени случаи)	



Температурата на работење е условена од материјалот кој е избран за работа. Дебелината на работниот слој при изработката на првите серии е 0,1 mm. Но бидејќи во дизајнот на моделите нема ситни детали по вертикалните површини, во понатамошните изработки дебелината на работниот слој е променета во 0,2 mm.

**Тврдење 15:** При подготвоцкаа за изработка на модел, изборот на дебелина за работен слој од 0,2 mm е соодветна за најголем број од моделиите.

Моделите се изработувани репетитивно, со цел да се осигури повторливоста на резултатите. Повторливоста на резултатите кај делови изработени на машини за ЕМ со отворен пристап е еден од главните проблеми. Притоа внимавано е параметрите да се задржат исти во рамки на можностите. Дијаметарот на бризгалката и дебелината на работниот слојот се исти во двата случаи на испитување. Но поради различните машини и различниот начин на работење, брзините на работење се разликуваат. Користен е и различен софтверски пакет за проектирање на слоеви, бидејќи во тие софтвери соодветните машини имаат дефинирани профили кои можат да се користат.

**Тврдење 16:** За време на изработкаа на моделот треба да се обезбеди константна измерајтура во работната просторијаа (доколку се работи за машини со отворен работен простор).

**Тврдење 17:** За време на изработка на тенки и високи елементи треба да се контролира работната брзина на машината и доколку е потребно да се намали.

#### **Поставеност на моделиите**

При изработката на моделите поставеноста на работната површина, (Adam, 2015; Adam and Zimmer, 2015), не влијае на квалитетот на површината и изработката. Испитуваните модели се поставувани централно на работната површина.

### Ориентација на моделиите

За разлика од поставеноста, ориентацијата на работната површина има големо влијание на квалитетот на површината и изработката, како што е детално објаснето во поглавје 2. Особено забележливо е влијанието на ориентацијата кај моделите со цилиндрични елементи. Цилиндричните елементи, поставени со оската нормално на работната површина имаат помали димензионални и геометриски отстапувања во однос на паралелно поставеност на оската. Согласно на тоа и кај призматичните модели, површините поставени нормално на работната површина при изработката имаат најдобар квалитет на површината и најмали отстапувања од основниот профилот. Поради тоа внимавано е сите испитни модели да се поставени хоризонтално на работната површина, односно испитните елементи да се поставени нормално во однос на работната површина. Ваквиот начин на поставување претставува проблем за изработка на тенките делови, бидејќи во овој случај димензијата на бризгалката има големо значење.

**Тврдење 18:** При подготвката за изработка на модел, треба да се внимава на неговата ориентација во работната околина, бидејќи има големи разлики во механичките карактеристики, квалитетот на изработениите површини, но и на времето потребно за изработка.

**Тврдење 19:** При подготвката за изработка на модел со кружни и цилиндрични елементи треба да се внимава на нивната ориентација, бидејќи може да има значајни отстапувања во профилот.

### Дебелина на работен слој

Дебелината на работниот слој има големо влијание на квалитетот на површината на изработениот дел, но и на степенот на отстапување во обликот и димензиите, како што е детално објаснето во поглавје 3.1.1.

**Тврдење 20:** При подготвката за изработка на модел, треба да се внимава на изборот на дебелината на работниот слој, бидејќи дебелината на работниот слој влијае на квалитетот на изработената површина, но и на времето потребно за изработка.

**Тврдење 21:** При подготвоката за изработка на модел, треба да се знае дека на можноста за изработка на детали поставени на  $90^\circ$  во однос на работната површина најголемо влијание има дебелината на работниот слој.

За најголемиот делови сосема доволно е да се користи дебелината од 0,2 mm. Кај делови со големи димензии, со релативно вертикални ѕидови и без многу детали, може да се користат и дебелини за работниот слој од 0,3 mm и поголеми, што многу влијае во скратувањето на времето за изработка.

Кај делови со детали поставени по вертикалните ѕидови на моделот потребно е да се избере помала дебелина за работниот слој. Истото се однесува и кога се изработуваат модели со органски површини, кои имаат големи радиуси на заоблувања, помалата дебелина за работниот слој, гарантира подобар квалитет на површината.

Во случај кога на шарите и деталите се поставени на паралелно на работната површина, најголемо влијание ќе можност за нивна изработка има дијаметарот на бризгалката. Поради тоа во вакви случаи треба да се избере бризгалка со помал дијаметар од стандардниот 0,4 mm.

**Тврдење 22:** При подготвоката за изработка на модел, треба да се знае дека на можноста за изработка на детали поставени паралелно во однос на работната површина најголемо влијание има димензијата на бризгалката.

### **Густината на исполнување со материјал**

Густината на исполнување на моделот со материјал значително влијае на времето потребно за изработка, искористениот материјал и неговите јакосните карактеристики.

Кај моделите кои треба да извршуваат одговорни операции се препорачува користење на 100% исполнување со материјал. Исто така целосно исполнување треба да се применува во случаи кога моделот треба машински да се доработува, на пр. да се формираат отвори. Кај најголемиот број модели кои се користат како прототипови, надгледни средства или сувенири сосема е доволно да се користи исполнување од 20 проценти. Постои можност за изработка на деловите со различно процентуално

исполнување во рамките на еден модел. Ова е особено практично за повеќето модели каде што нема потреба од хомогено исполнување, а заштедува на време за изработка и на искористениот материјал.

**Тврдење 23:** При подготвока за изработка на модел, треба да се внимава на начинот и густина на исполнување со материјал, бидејќи тоа влијае во најголема мерка влијае на механичките карактеристики на изработениот дел, но и на времето потребно за изработка и количеството на искористен материјал.

### **Користење на структури за потпора**

Користењето на структури за потпора треба да се одбегнува секогаш кога постои можност за тоа (Redwood et al., 2017), бидејќи предизвикува низа на проблеми. Користењето на структури за потпора покрај лошиот квалитет на површината по неговото отстранување, негативно влијае и на други параметри, како: продолжување на времето потребно за изработка, зголемување на количината на искористен материјал и дополнително време за пост-процесирање (отстранување на потпорниот материјал и евентуална доработка на моделот).

**Тврдење 24:** При подготвока за изработка на модел, треба да се избегнува користење на структури за потпора секогаш кога има можност за тоа.

Кај моделите со сложен, органски облик не постои можноста за избегнување на структурите на потпора, но треба да се направат обиди за минимизирање на неговото влијание. Тоа се прави со оптимизирање на геометријата, поставеноста на делот и начинот на генерирањето на потпорниот материјал. Изборот на соодветен начин на генерирање на потпорниот материјал може да влијае на времето потребно за изработка на моделот, а и пост-процесирањето односно отстранувањето на потпорите. Генерирањето на потпорниот материјал може да биде според различни шеми, со што се менува степенот на потпора на моделот, но и искористениот материјал и времето потребно за изработка. Во последно време се повеќе се користи дрвовидното креирање на структури за потпора, што претставува целосно различен пристап, во однос на стандардното креирање и е особено

погоден за модели со комплексна геометрија. Дрвовидниот тип на потпора обезбедува полесно отстранување на потпорниот материјал и подобар квалитет на допирната површина, но, и времето потребно за изработка на како и искористениот материјал се значително помали.

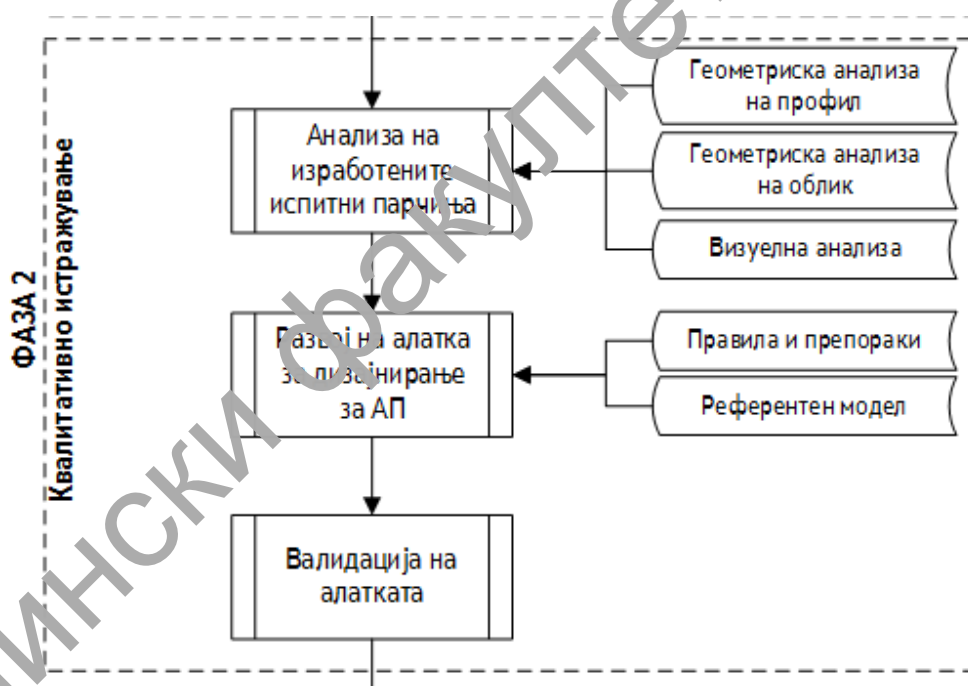
**Тврдење 25:** При користење на структури за подпора во изработката на модели треба да се избере најсоодветниот начин на креирање на подпорите, зависно од дизајнот и намената на моделот.

Кај машините за ЕМ кои имаат можност за работа со повеќе материјали истовремено, можно е користење на потпорен материјал кој е растворлив во вода. На овој начин, времето на изработка е поголемо, но нема негативно влијание на квалитетот на површината. Во тие случаи, нема потреба за елиминира користењето на потпорен материјал, дури и се препорачува користење бидејќи тие машини се прилагодени за такво работење.

**Тврдење 26:** За делови кај кој надворешниот изглед е од особено значење и треба да има мазна површина, треба изработениите парчиња дојдовно механички или хемиски да се доработат.

## 4. Квалитативно истражување

Во втората фаза на квалитативното истражување е анализа на изработените испитни парчиња. Во рамки на анализата спроведени се три различни типа на анализи: геометриска анализа на профил, геометриска анализа на облик и визуелна анализа. Спроведените анализи се основа за развој на алатката за дизајнирање за АП. Развиената алатка се состои од правила и препораки кои им даваат насоки на индустриските дизајнери во фазата на дизајнирање односно во концептуалната фаза. Дополнително, развиен е и референтен модел кој ги интегрира најголем дел од правилата и им помага на индустриските дизајнерите во насока на детерминирање на граничните вредности на машината за ЕМ на која работат. Валидацијата на алатката за дизајнирање за АП е направена преку два реални примери на дизајнерски производи.



Слика 4-1. Втора фаза од методологијата на истражувањето

Експерименталното истражување е спроведено според работните услови дефинирани во претходното поглавје. Во продолжение е даден преглед на резултатите од експерименталните истражувања односно анализа на изработените испитни парчиња. Во поглавјето 4.1 се претставени геометриските анализи за отстапување на профил и облик. За анализа се

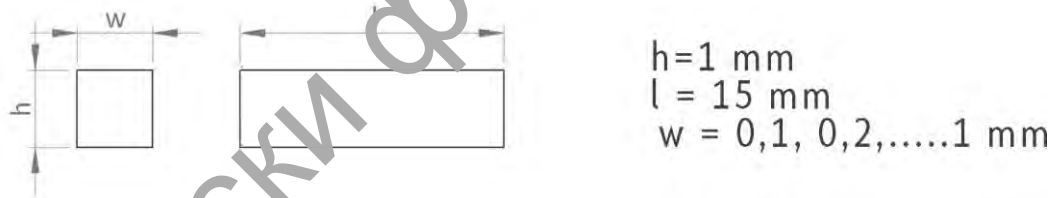
земени само парчиња изработени на машина M1 со материјал mat1 бидејќи тие имаа значително подобар квалитет на изработка во однос на другите парчиња. Во поглавјето 4.2 е даден преглед на визуелната анализа на изработените испитни парчиња. Во визуелната анализа земени се во предвид сите изработени парчиња, бидејќи во одредени делови има и споредба на квалитетот со различни машини или материјали.

#### **4.1. Геометриска анализа на изработените модели**

Геометриската анализа на изработените модели опфаќа анализи за отстапување на профил и анализи за отстапување на облик. Поглавјето е организирано според изработените испитни парчиња. За секој од испитните парчиња се спроведени различни анализи со цел да се утврдат соодветните отстапувања.

##### ***Модел 1-1***

Со моделот 1-1 се проверува минимална дебелина на интегриран сид, сид нормално поставен помеѓу други два суда. Дизајниран е така што димензијата на елементите се менува од 0,1 до 1 mm.



$h$  – висина на елемент;  $l$  – должина на елемент;  $w$  – ширина на елемент

Слика 4-2. Изглед на моделот 1-1  
(сојсвоено исцржување)

При изработката, моделот е поставен паралелно на работната површина односно со испитните елементи поставени нормално во однос на работната површина. По спроведените експерименти заклучено е дека елементите со дебелина на сид помала од 0,5 mm не може да се изработат со дефинираните работни параметри и ваквата поставеност на моделот (табела 4-1).

Табела 4-1. Можности за изработка на минимална дебелина на интегриран *sig* (соодветно истражување)

дизајниран елемент	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
изработен елемент	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

**Тврдење 27:** При дизајнирање на интегриран *sig*, минималната дебелина на *sig* која може да се изработи е 0,5 mm.

**Тврдење 28:** При дизајнирање на интегриран *sig* кој е составен елемент од поголем модел, минималната дебелина на *sig* треба да е  $\geq 1$  mm.

**Тврдење 29:** При изработка на интегриран *sig* со соодветна ориентација на моделот и прилагодување на работните параметри може да се изработи *sig* со дебелина  $\leq 0,5$  mm.

Кај изработените парчиња се забележува заоблување на надворешните и внатрешните рабовите, што е прикажано на слика 4-3. Од прикажаното на слика 4-3 може да се забележи дека при изработката на отвори (внатрешни рабови) се додава материјал, додека кај надворешните рабови, недостасува материјал.



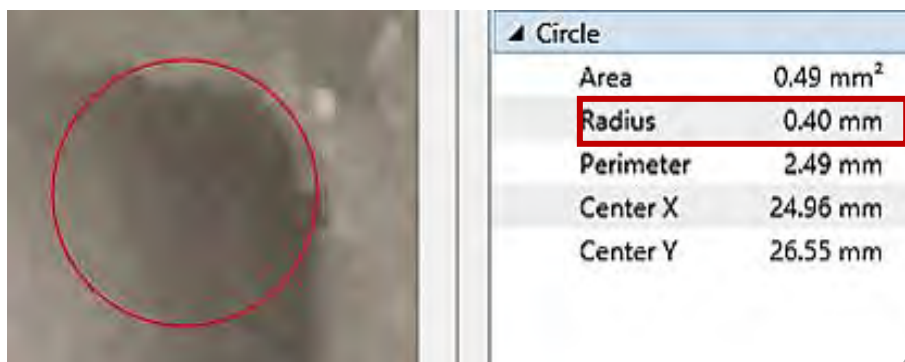
Слика 4-3 (а,б). Описување во профилот на парчењо 1-1, Datinf Measurment (соодветно истражувања)

Во софтверскиот пакет Datinf Measurment, измерен е радиусот на заоблувањето кој изнесува 0,4 mm што е исто колку и дијаметарот на бризгалката.

Заоблувањето на рабовите е предизвикано од начинот на работа на ЕМ, како што е детално објаснето во поглавје 3 и не може да се отстрани. Затоа



треба да се земе во предвид при дизајнирањето. Со промена на дијаметарот на бризгалката или со промена на ориентацијата на делот во работниот простор може да се намали влијанието на заоблувањето.



Слика 4-4. Мерење на заоблувањето на рабовите кај делот 1-1, Datinf Measurment (сојствено исцражување)

**Тврдење 30:** При дизајнирање на инјекторангид, може да се јави заоблување на рабовите, зависно од ориентацијата на елементите.

### Модел 1-2

Со моделот 1-2 се анализира минималната дебелина на самостоен ѕид, не поврзан со други ѕидови. Дебелината на ѕидовите се менува од 0,1 до 1 mm, како што е прикажано на слика 4-5. Растојанието помеѓу елементите е оставено константно и доволно големо, како би можеле да се увидат евентуални отстапувања во изработката и квалитетот на површината.



h - висина на елемент; l - должина на елемент; w - ширина на елемент

Слика 4-5. Изглед на моделот 1-2 (сојствено исцражување)

При изработката, моделот е поставен паралелно на работната површина со елементите поставени под агол од 90° во однос на работната површина.

При ваквата поставеност на моделот и со работните параметри дефинирани претходно (поглавје 3) не можат да се изработат елементи со дебелина на ѕид помала од 0,5 mm (табела 4-2).

Табела 4-2. Моќноси за изработка на минимална дебелина на самостоен ѕид (сојсвоено испражување)

дизајниран елемент	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
изработен елемент	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

**Тврдење 31:** При дизајнирање на самостоен ѕид, минимална дебелина на ѕид која може да се изработи е 0,5 mm.

**Тврдење 32:** При дизајнирање на самостоен ѕид, минималната дебелина на ѕид која треба да се користи е  $\geq 1$  mm.

**Тврдење 33:** При подготвока за изработка на самостоен ѕид со соодветна ориентација на моделот и прилагодување на работните параметри може да се изработи ѕид со дебелина  $\leq 0,5$  mm.



а) издвоен елемент

б) зголемена слика на издвоениот елемент

Слика 4-6. Оспражување од профилој кај изработеној парче 1-2, поглед од страна, Datinf Measurment (сојсвоено испражување)

Начинот на работа со нанесување на материјал во слоеви доведува до изгледот на елемент прикажан на слика 4-6, а е последица на начинот на работење на процесот на ЕМ, а тоа е нанесување на материјал во слоеви. Тој

ефект не може да се анулира, но може да се намали со користење на бризгалка со помал дијаметар. Проблемот со ваквиот начин на работа е што кај елементи со мали димензии се забележува значително отстапување во профилот на страните поставени на  $90^\circ$  во однос на работната површина (слика 4-6, б).

При анализа на отстапувањето во однос на профилот на ѕидот поставен паралелно во однос на работната површина, се забележува истото заоблување на рабовите како кај делот 1-1 (слика 4-7, а). Со ова само се потврдува дека тоа е предизвикано од начинот на работење и не постои можност за негово елиминирање. За уште една потврда, заоблувањето на рабовите е измерено во софтверскиот пакет Datinf Measurment. Според резултатите добиени од мерењето заоблувањето на рабовите е со радиус 0,4 mm, што се поклопува со дијаметарот на бризгалката (слика 4-7, б).

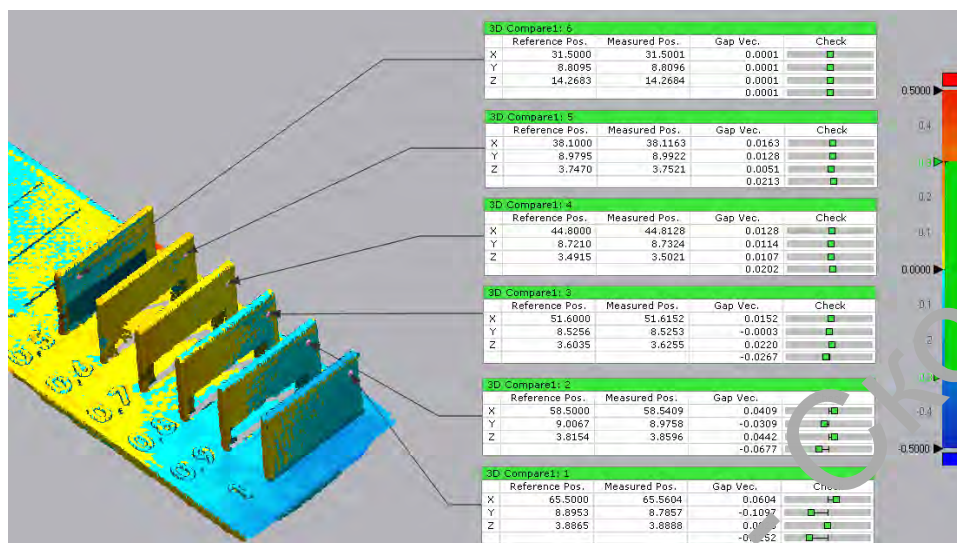


Слика 4-7. Отстапување од профилот кај изработениот парче 1-2, поглед од горе, Datinf Measurment (сојствено исцражување)

**Термин 34:** При дизајнирање на самостоен ѕид, може да се јави заоблување во основата на ѕидот, зависно од ориентацијата на елементот.

Анализата за отстапувањето на обликот е направена во 3D околина, со споредба на CAD моделот и облак од точки добиен со 3D скенирање на изработено парче (слика 4-8). Според боите на сликата може да се забележи дека целиот дел е во рамки на толерантното поле  $\pm 0,5$  mm. Во горниот дел на елементите се избрани точки за мерење на отстапувањата помеѓу CAD моделот и изработениот дел. Точките се избрани во горниот дел, бидејќи

квалитетот на скенираниот модел е најдобар во тој дел. Според вредностите во избраните точки се гледа дека отстапувањата се помали од 0,1 mm.

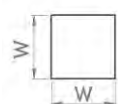


Слика 4-8. Овсјайвање во обликој на изработенојо парче 1-2 во 3D околина (сојсјвено исјражување)

### Модел 1-3

Со моделот 1-3 се анализира минималната дебелина на самостоен елемент, тенок и висок елемент. Моделот 1-3 е изработен како спој на три подмодел, со разлики во напречниот пресек. Модел 1-3а со самостојни елементи со квадратен напречен пресек (слика 4-9, а), модел 1-3б со самостојни елементи цилиндри и модел 1-3в (слика 4-9, б) со самостојни елементи конуси. Во првата фаза сите елементи се изработени со вредности за страната/дијаметарот кои варираат од 0,1 mm до 1 mm. Но, поради подетална анализа на отстапувањето во профилот додадени се елементи со димензии од 1,1 mm до 2 mm, за кои се очекува да имаат помали отстапувања.

а) модел 1-3а

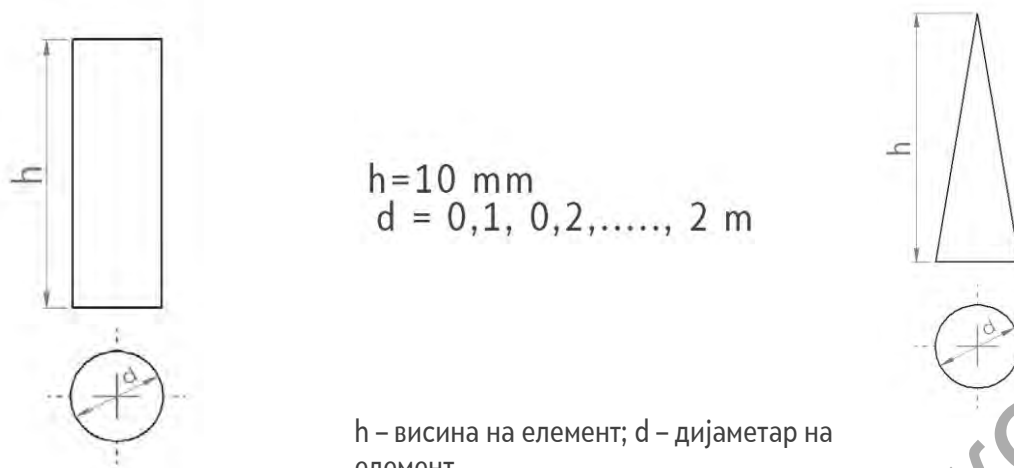


$$h = 10 \text{ mm}$$

$$w = 0,1, 0,2, \dots, 2 \text{ mm}$$

h – висина на елемент; w – ширина на елемент

б) модел 1-3б и 1-3в



$h = 10 \text{ mm}$   
 $d = 0,1, 0,2, \dots, 2 \text{ m}$

$h$  – висина на елемент;  $d$  – дијаметар на елемент

Слика 4-9 а,б. Изглед на моделиите 1-3б и 1-3в (сојсџвено исџражување)

Во процесот на изработка кај сите три подмоделџ забележано е дека елементите со димензија на страна/дијаметар помал од 0,5 mm не се изработени (табела 4-3). Така што се заклучува дека при претходно дефинираните работните параметри (глава 3), не можат да се изработи самостоен елемент димензии на страна/дијаметар помали од 0,5 mm. Интересно е тоа што во овој случај, промена на ориентацијата на делот при изработката не влијае на можноста за изработка, туку само на квалитетот на површината.

Табела 4-3. Можноси за изработка на минимална дебелџна на самостоен елемент (сојсџвено исџражување)

дизајниран елемент	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
изработен елемент (квадратен на пречен пресек)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
изработен елемент (кружен на пречен пресек)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

За сите модели 1-3 (1-3а, 1-3б, 1-3в), елементите со страна/дијаметар поголем од 0,5 mm се изработуваат, меѓутоа постои голема шанса да се оштетат во процесот на изработка. Исто така постои ризик доколку елементот има поголема висина да се скрши или се искриви сам од себе. Елементите со страна/дијаметар над 1 mm се изработуваат без проблем.

**Тврдење 35:** При дизајнирање на самостоен елемент со квадрантен напречен пресек, минималната дебелина која може да се изработи, независно од ориентацијата на елементот е 0,5 mm.

**Тврдење 36:** При дизајнирање на самостоен елемент со квадрантен напречен пресек, минималната дебелина која се препорачува за користење  $\geq 1$  mm.

**Тврдење 37:** При дизајнирање на самостоен елемент со кружен напречен пресек, минималниот дијаметар кој може да се изработи независно од ориентацијата на елементот е 0,5 mm.

**Тврдење 38:** При дизајнирање на самостоен елемент со кружен напречен пресек, минималниот дијаметар кој се препорачува за користење  $\geq 1$  mm.

**Тврдење 39:** Во случај кога цилиндриот има функција за спојување, минималниот дијаметар кој се препорачува  $\geq 5$  mm.

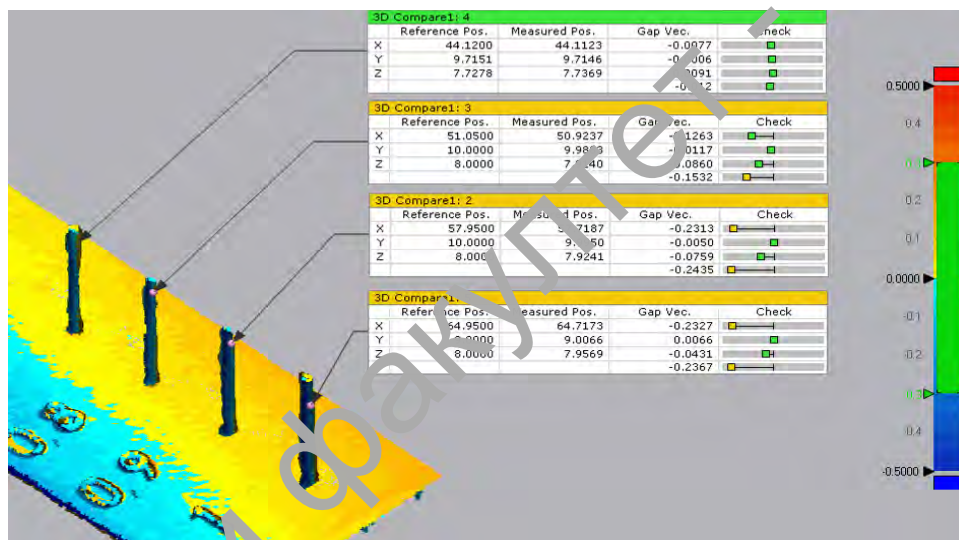
При дизајнирањето на самостојни елементи со мал напречен пресек треба да се внимава бидејќи кај елементи со мали димензии очекувано е да имаат отстапување во профилот. Дополнително, за помали отстапувања во профилот кај цилиндричните елементи големо значење има ориентацијата на моделот при изработката.

**Тврдење 40:** При подготвока за изработката на модели со цилиндрични елементи и цилиндрични отвори, оската на цилиндриот треба да се постави под агол од  $90^\circ$  во однос на работната површина, како би се избегнало оштетување од профилот.

Споредбената анализа за отстапувањето во обликот е спроведена во 3D околина каде се споредуваат CAD моделот и облакот од точки на скенираното изработено парче. Отстапувањата кај елементи на изработеното парче 1-3а се под 0,1 mm (слика 4-10), што е сосема прифатливо.



Слика 4-10. Описување во обликот на изработеното парче 1-3а во 3D околина (сојствено исцражување)



Слика 4-11. Описување во обликот на изработеното парче 1-3б во 3D околина (сојствено исцражување)

Отстапувањето во обликот кај елементите на изработеното парче 1-3б се малку поголеми, достигнувајќи 0,25 mm (слика 4-11), но сепак се во рамките на толерантното поле од 0,5 mm. Вредноста за отстапувањето во овој случај е доста висока поради раскончувањата на моделот кои при скенирањето се земаат како составен дел од моделот. Раскончувањето е резултат на начинот на работење на процесот на ЕМ и се карактеристични кај елементи со мали димензии, поставени на мало меѓусебно растојание. Подетално за раскончувањето е дадено во поглавје 4.2.

Доколку се споредат резултатите на отстапувањето во обликот кај досега изработените парчиња, забележливо е дека најголеми отстапувања има кај елементите со мали димензии односно мал напречен пресек.

**Тврдење 41:** При дизајнирањето на самостојни елементи со голема висина и димензии на сираниа/ дијаметар  $\leq 2$  mm, можна е појава на големи отстапувања во обликот.



График 4-1. Отстапувања во висината на изработеното парче 1-3в (со исто време испражување)

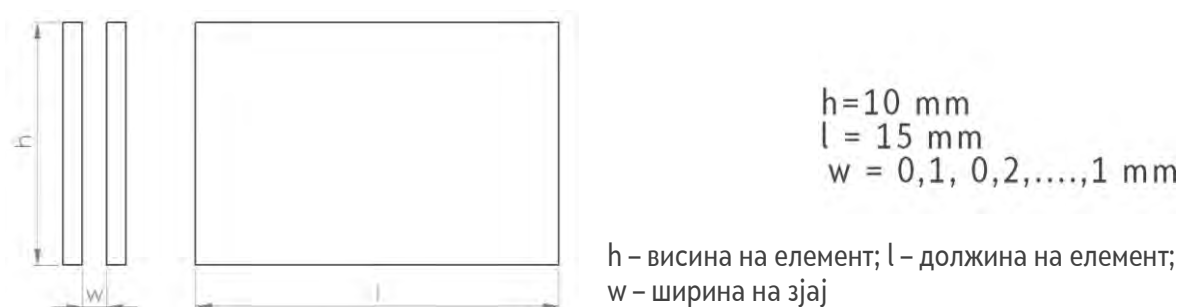
За изработеното парче 1-3в не е спроведена анализа за отстапување во обликот во 3D околина, бидејќи отстапувањето е очигледно. Поради тоа спроведени се мерења со кои е увидено отстапувањето во димензиите (график 4-1). Прикажаното отстапување во димензии не е поради начинот на дизајнирање, туку делумно поради начинот на работа на процесот на ЕМ. Имено горните делови од конусите со дијаметар помал од 0,5 mm не можат да се изработат соодветно.

**Тврдење 42:** При дизајнирање на самостојни конусни елементи треба да се избегнуваат елементи со дијаметар  $\leq 2$  mm.

#### Модел 1-4

Елементите од моделот 1-4 се дизајнирани со исти димензии, со променлива вредност само за меѓусебното растојание. Таа вредност варира од 0,1 mm до 1 mm (слика 4-12).



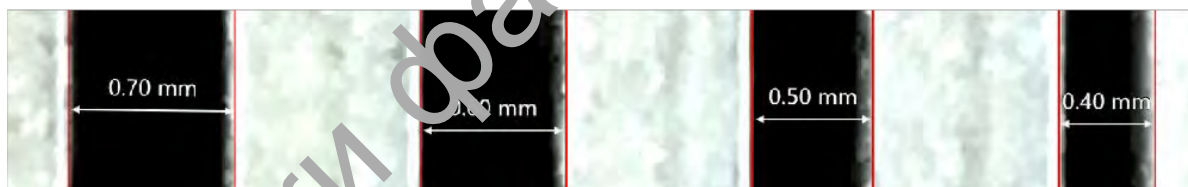


Слика 4-12. Изглед на моделот 1-4  
(сојсџвено исџражување)

Делумно припојување на страните е забележано кај зјајот со должинија од 0,1 mm, додека сите останати елементи зјајот е коректно изработен. Според спроведеното мерење на растојанијата кај изработеното парче 1-4, увидено е дека не постои отстапување во димензиите (слика 4-13).

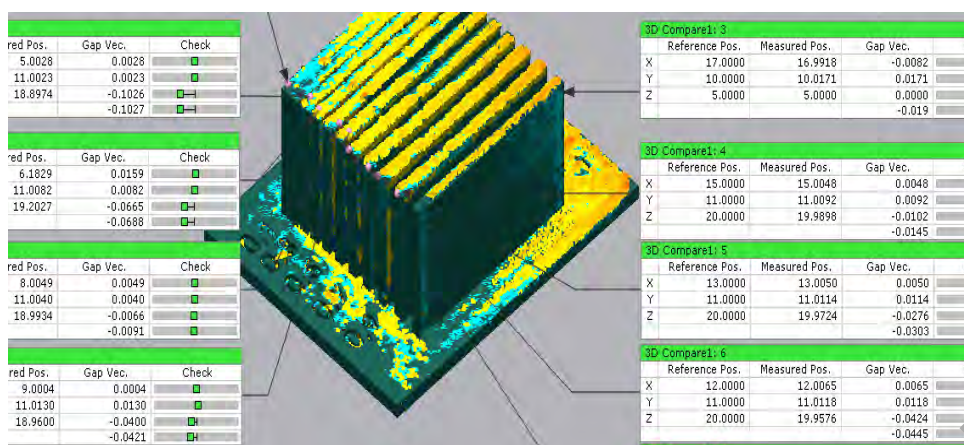
**Тврдење 43:** При дизајнирање на зјај помеѓу вертикално поставени сидови, минимална дебелина на зјај која може да се изработи е 0,1 mm.

**Тврдење 44:** При дизајнирање на зјај помеѓу вертикално поставени сидови, минимална дебелина на зјај која се препорачува  $\geq 0,2 \text{ mm}$ .



Слика 4-13. Проверка на димензиите на зјајот со Datinf Measurment  
(сојсџвено исџражување)

Отстапувањата во обликот за изработеното парче се изработени во 3D околина и прикажани се на слика 4-14. Отстапувањето е направено врз основа на споредба на CAD моделот и скенирана датотека од изработеното парче. Отстапувањата во геометријата се детално измерени во внатрешната страна на елементите и сите точки во рамки на толерантното поле односно под 0,1 mm (слика 4-14).



Слика 4-14. Овсџајување во обликој на изработенојо парче 1-4 во 3D околина (сојсџвено исџражување)

### Модел 1-5

Моделот 1-5 е составен од цилиндрични продорџ на основата со кои треба да се провери минималниот дијаметар кој може да се изработи. Вредноста на дијаметарот е променлива, варирајќи од 0,1 mm до 2 mm (слика 4-15).



Слика 4-15. Изџлед на моделот 1-5 (сојсџвено исџражување)

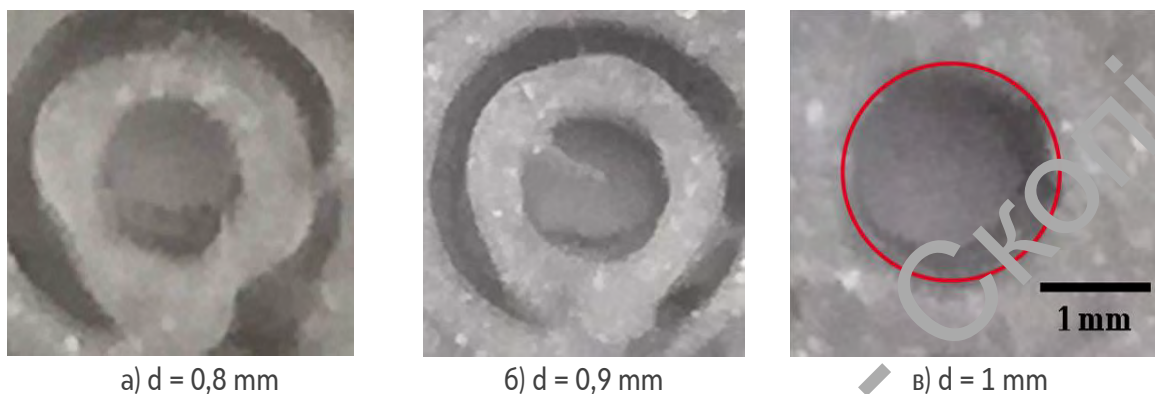
Минимална димензија на кружен отвор која може да се изработи при поставеност на оска на отворот на 90° во однос на работната површина и работни параметри дефинирани претходно (глава 3) е прикажана во табела 4-4.

Табела 4-4. Можности за изработќка на минимален дијаметар на кружен оџвор (сојсџвено исџражување)

дизајниран елемент	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
изработен елемент	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+

**Тврдење 45:** При дизајнирање на кружен отвор, минимален дијаметар кој може да се изработи е 0,2 mm.

**Тврдење 46:** При дизајнирање на кружен отвор, минимален дијаметар кој треба да се користи е  $\geq 0,8$  mm.



Слика 4-16. Описување на кружниот профил на изработеното ѓарче (сојствено исјражување)

Отстапувањето на кружниот профил на цилиндричните продори со дијаметар од 0,8 mm до 1 mm е прикажано на слика 4-16. Кај сите елементи се забележува отстапување во кружниот профил, освен во последниот случај при дијаметар од 1 mm. Овде се применува претходно споменатото тврдење 40, според кое при дизајнот на цилиндрични елементи или отвори оската треба отворот треба да се постави под агол од 90° во однос на работната површина, како би се избегнало отстапување од профилот.



Слика 4-17. Описување во обликој на изработеното ѓарче 1-5 во 3D околина (сојствено исјражување)

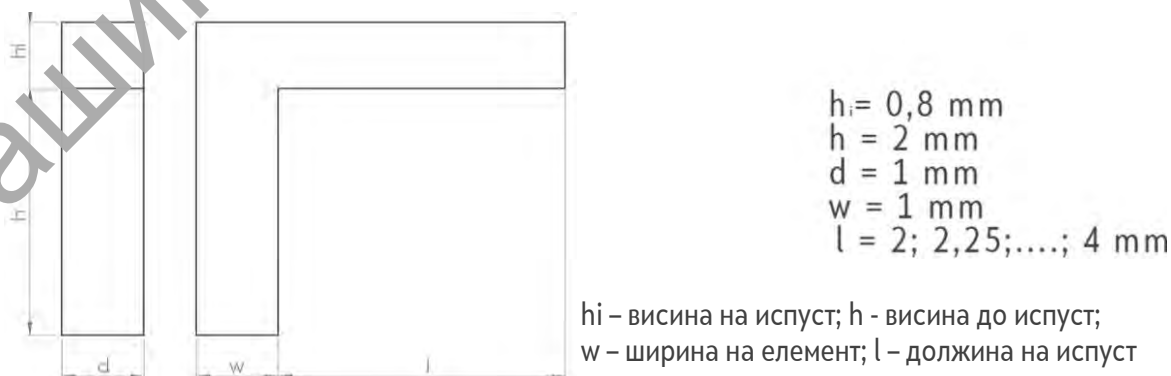
Анализата за отстапување во обликот на изработеното парче 1-5 е прикажана на слика 4-17. Анализата е остварена како споредба на CAD моделот и скенираната датотека на изработеното парче 1-5. Од прикажаното (слика 4-17) може да се увиди дека изработените отвори се со максимални отстапувања од 0,1 mm, што е во рамките на дозволеното отстапување од  $\pm 0,5$  mm.

**Тврдење 47:** При дизајнирање на кружен отвор треба да се земе во предвид дека изработениот кружен отвор има помал дијаметар во однос на оној на CAD моделот.

**Тврдење 48:** При дизајнирање на кружен отвор кој има значајна функција и не смее да има отстапување во профилот и димензиите, треба да се изработи доволнишело на друг начин.

### Модел 1-6

Моделот 1-6 е дизајниран со цел проверка на максималниот испуст кој може да се изработи на машина за ЕМ без користење на потпорни структури. Елементот кој се испитува е во облик на буквата „Г“, а најмалата вредност за испуст е 0,25 mm, а секој нареден се зголемува за 0,25 mm, така што последната вредност е 4 mm (слика 4-18). Сите елементи на моделот 1-6 се изработени. Елементите со испустот со вредност до 2 mm се изработува без користење на потпорни структури кај најголемиот дел машини за ЕМ без проблем (табела 4-5). Кај елементите со должини на испустот поголеми од 2 mm се забележува отстапување во геометријата поради растекување на материјалот, кое е подетално анализирано во поглавје 4.2



Слика 4-18 (а,б). Изглед на моделот 1-6 (сојствено исцржување)

Табела 4-5. Можности за изработка на испуси без појторни структури (сојсвено исјражување)

дизајниран елемент	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
изработен елемент	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

**Тврдење 49:** При дизајнирање на елементи со испуси, должинаа на испусиот треба да биде  $\leq 2$  mm, како би се изработил правилно без користење на структури за појтора.

Кај елементите на изработеното парче се забележува и извивање на елементите поради малите димензии и нерамномерното ладење (слика 4-19).



Слика 4-19. (а, б) Ојсјаување во димензиите и профилои на изработеното парче 1-6, Datinf Measurment (сојсвено исјражување)

При анализата на отстапувањето во обликот, земена е во предвид долната површина, бидејќи таму се очекува одвојување на материјалот. Споредбата е направена помеѓу CAD моделот и скенираната датотека на изработеното парче. При анализата, прикажана на слика 4-20, земени се во предвид подолгите испуси, каде е очекувано да има поголеми отстапувања во димензиите. Максималното забележано отстапување е 0,19 mm.



Слика 4-20. Овистајување во обликој на изработенојо парче 1-6 во 3D околина (сојствено исцражување)

### Модел 1-7

Моделот 1-7 е составен од 18 елементи со кои треба да се анализира минималниот агол на наклон кој може да се изработи без користење на структури за потпора. Првиот елемент зема агол од 5° со работната површина, а секој нареден се зголемува за 5° (слика 4-21). На овој начин опфатени се аглите од 5° до 90° во однос на работната површина.



Слика 4-21. Изглед на моделот 1-7 (сојствено исцражување)

**Тврдење 50:** При дизајнирање на елементи под агол, елементите кои зафаќаат агол од 45° до 135° со работната површина можат да се изработат без користење на појорен материјал.

Елементите на моделот 1-7 се изработени сите без исклучок. Кај елементите со агол помал од 30° во однос на работната површина се

забележува лош квалитет на површината, но за тоа подетално во поглавјето 4.2.

Табела 4-6. Можности за изработка на елементи под агол без користење на структурни зајакнувања (сојсвивено испитување)

дизајниран елемент	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
изработен елемент	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

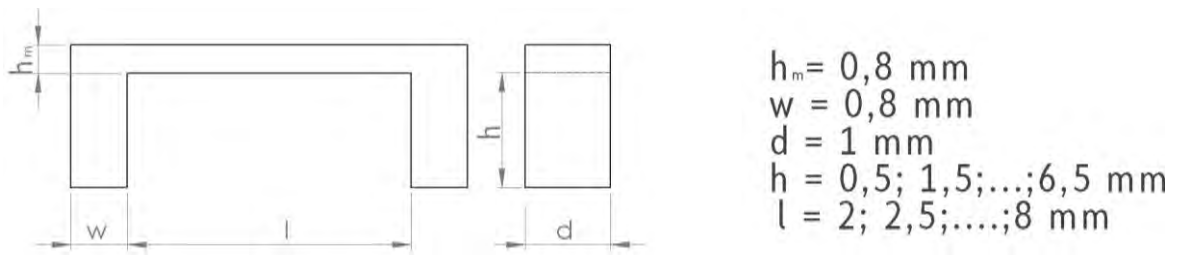
Отстапувањето во обликот е анализирано преку споредба на CAD моделот и скенираната датотека на изработеното парче, прикажано на слика 4-22. Отстапувањата кај овие елементи се во рамки на толерантното поле поточно се под 0,1 mm.



Слика 4-22. Испитување во обликот на изработеното парче 1-7 во 3D околина (сојсвивено испитување)

### Модел 1-8

Моделот 1-8 е дизајниран како би се испитала максималната должина на премостување која може да се изработи без користење на потпорни структури. Елементот кој е предмет на испитување е во форма на буквата „П“. Најмалиот мост е со димензија од 2 mm, а најголемиот мост е со димензија од 8 mm (слика 4-23). Мерено е растојанието кое надвиснува надвор од потпорите, а не димензијата на целиот елемент.



w – ширина на елемент; l<sub>b</sub> – должина на премостување; h – висина на елемент

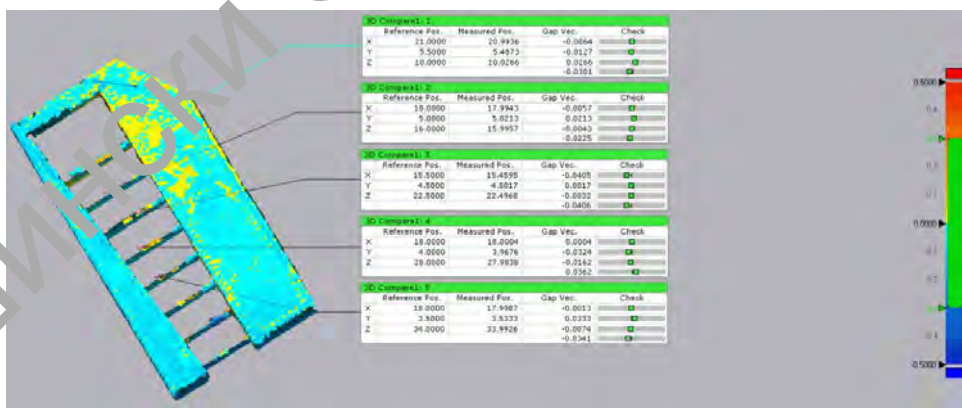
Слика 4-23. Изглед на моделот 1-8 (сојсвено исцражување)

**Тврдење 51:** При дизајнирање на елемент со премостување, максималната должина на премостувањето треба да биде ≤ 4 mm, како би се изработил правилно без користење на структурата за поддршка.

Сите елементи на делот се изработени (табела 4-7), но кај елементите со должините над 2,5 mm се забележува свектање на материјалот за што подетално се зборува во поглавје 4.2.

Табела 4-7. Можности за изработка на премостување без користење на структурата за поддршка (сојсвено исцражување)

дизајниран елемент	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
изработен елемент	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+



Слика 4-24. Осветлување во обликот на изработеното парче 1-8 во 3D околина (сојсвено исцражување)

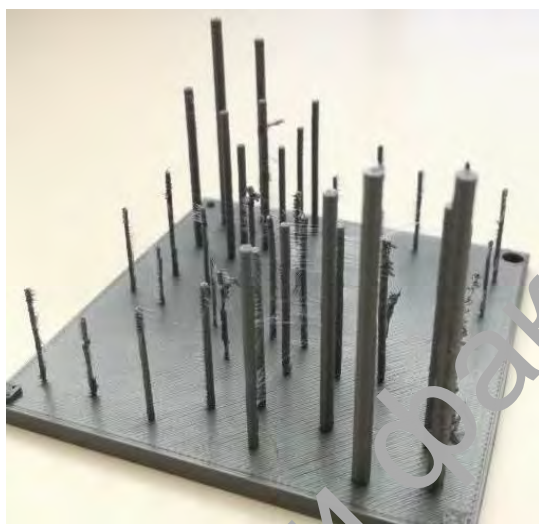
Кај премостувањата исто како и кај испустите се очекува раслојување на делот, кое би се појавило во долниот дел на елементите. Поради тоа



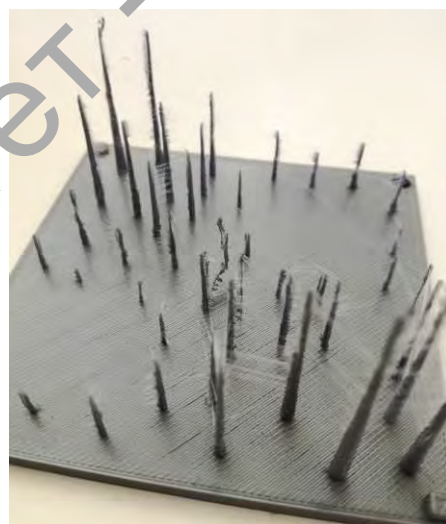
анализата на отстапување во обликот третирана е само долната страна на елементите. Од анализата, прикажана на слика 4-24 може да се забележи дека најголемото отстапување е 0,04 mm, што е сосема задоволително.

### **Модел 2-1**

Моделот 2-1 имаат примарна задача да ја проверат повторливоста при изработката. Покрај тоа се користи за испитување на минималниот дијаметар и максималната висина на самостоен елемент кои можат да се изработат. Моделот е составен од два подмодел, првиот 2-1а каде самостојниот елемент е цилиндер и вториот 2-1б со самостоен елемент конус. Висините на елементите варираат од 3 до 42 mm, додека дијаметрот на кружниот напречен пресек се движи од 0,2 до 2,4 mm, прикажано на слика 4-25.



а) модел 2-1а



б) модел 2-1б

$h = 3 - 42 \text{ mm}$ ;  $d = 0,1 - 1,2 \text{ mm}$ ;  $n = 60$

$h$  – висина на цилиндрите;  $d$  – дијаметар на цилиндрите;  $n$  – број на елементи

Слика 4-25. Изглед на моделиите 2-1  
(сојсџвено исџражување)

**Гврдење 52:** Повторливоста во изработката може да се зајати, доколку се задржани истиите работни услови и параметри.

Во однос на можностите за изработка, забележливо е дека елементите (цилиндри и конуси) со дијаметар помал од 0,5 mm воопшто не се изработени, исто како и кај моделот 1-3. Останатите елементи се изработени, но кај оние со дијаметар помал од 1 mm се случува да бидат оштетени во процесот на

изработка. Дополнително, кај конусите е забележано отстапување во висината на изработените делови, но тоа е подетално дискутирано во пасусот за евалуација на делот.



График 4-2. Вредности за висината на цилиндричните елементи на CAD моделот и изработениот парче (сојсвивено исцражување)

Споредбата на висините на цилиндрите помеѓу CAD моделите и изработените делови е прикажана на график 4-2. При споредбата се изоставени вредностите на цилиндрите кои не се изработени. Кај изработените цилиндри има отстапување во вредностите од 0,04 до 0,3 mm.

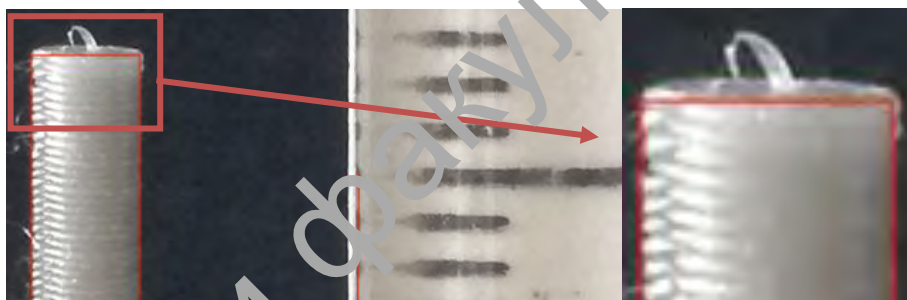


График 4-3. Разлика во висините на цилиндричните елементи помеѓу CAD моделот и изработениот парче (сојсвивено исцражување)

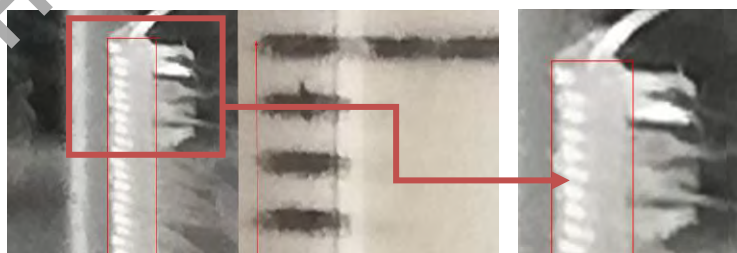
Отстапувањата во висините на елементите не се лесно воочливи на график 4-2, па поради тоа е изработен посебен график (график 4-3) на кој се прикажани само разликите во отстапувањата. Просечната вредност на

разликата е 0,2 mm. Најголемиот дел од отстапувањата се со негативни вредности, што укажува на тоа дека елементите на изработеното парче имаат поголема висина од онаа на CAD моделот.

Отстапувањата од основниот профил се анализирани на елементите фронтално позиционирани. Од прикажаното на слика 4-26 и слика 4-27 јасно се видливи слоевите од кои се изградени деловите. Кај цилиндрите со поголеми димензии (дијаметар и висина) отстапувањата во обликот се незначителни, на врвот на елементот е јасно забележлив остатокот на материјалот, но тоа лесно се отстранува (слика 4-26). Цилиндриите со помали димензии (дијаметар и висина) имаат значителни отстапувања во обликот (слика 4-27). Отстапувањата во одредени случаи се поради изместување на слоевите од оската, додека во други случаи се поради расквнчување. Кај цилиндричниот елемент со дијаметар од 0,6 mm (слика 4-27) има големи отстапувања во профилот поради тоа што напречниот пресек е многу мал, така што мало изместување на главата на екструдерот има големо влијание врз изгледот.



Слика 4-26. Приказ на елемент од изработено парче 2-1а  
( $h=41,89$  mm;  $d = 1,2$  mm)  
(сојсйвено исйражување)



Слика 4-27. Приказ на елемент од изработено парче 2-1а  
( $h=17,89$  mm;  $d = 0,6$  mm)  
(сојсйвено исйражување)

**Тврдење 53:** При дизајнирање на модел со тенки и високи елементи, да се избегнува нивно групирање како би се намалил ефектот на раскончување.



График 4-4. Вредности за висината на конусните елементи на CAD моделот и изработениот дел (сојствено истражување)

На график 4-4 е прикажана споредбата во висините на CAD моделот и изработените делови 2-16. Од прикажаното може да се забележи дека разликите во висината се многу поголеми отколку оние кај цилиндрите. Причина за тоа е тоа што конусите се зголемување на висината и намалување на дијаметарот под 0,5 mm, не може да се изработат.

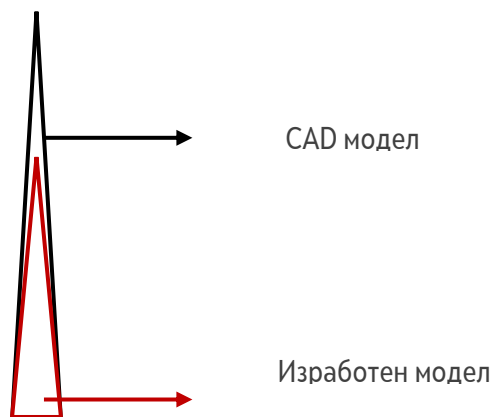


График 4-5 Разлика во висините на конусните елементи помеѓу CAD моделот и изработениот дел (сојствено истражување)

За појасно претставување на отстапувањето во висината, креиран е график 4-5 на кој е прикажана само разликата во висините на конусните елементи. Средната вредност на отстапувањата во висината е 8 mm. Забележливо е дека

сите вредности се позитивни, за разлика од оние кај цилиндричните елементи.

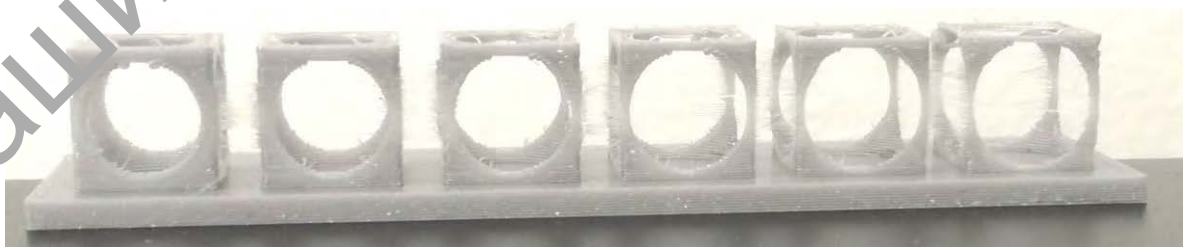
Отстапувањата во профилот кај конусните елементи се очекувани, а на слика 4-28 е даден графички приказ на отстапувањата.



Слика 4-28. Разликиите во димензиите прикажани на еден елемент од дел 2-16 (сојсџвено исџражуење)

### Модел 2-2

Целта на моделот 2-2 е проверка за изработка на сферни отвори без потпорен материјал, но и одредување на минималната дебелина на интегриран ѕид. Во исто време со овој модел се анализира изработката на кружни отвори во различни рамнини. Моделот е првично дизајниран со 11 коцки со димензии 10x10x10 mm со продори со дијаметар од 12 до 14 mm. Но бидејќи во ниту еден случај (различни машини, различни материјали), елементите со дијаметар на сферата од 13,2 до 14 mm не се изработени соодветно, тие се исклучени од понатамошните анализи и земени се во предвид само отворите со дијаметар од 12 до 13 mm (слика 4-29).



Коцка 10x10x10 mm; сфера  $d = 12 - 13$  mm;  $d$  – дијаметар на сферите

Слика 4-29. Изработен дел 2-2 (сојсџвено исџражување)

Од слика 4-29 може да се забележи дека елементите со помал дијаметар се изработуваат без проблем. Меѓутоа коцките со сферите со дијаметар поголем од 12 mm не се изработени соодветно бидејќи се забележува проблем при изработка на тенките вертикални ѕидови.



Слика 4-30. Споредба на отсјаивувањата во дијаметарот на отворите (соодветно исцржување)

Кај кружните отвори, кои се јавуваат од продорот на сферата со надворешните страници на коцката може да се забележи дека најмало отстапувања во димензијата има доколку отворот е паралелен на работната површина (слика 4-30), што се надоврзува на тврдењето 40.

**Тврдење 40:** При изработката на модели со цилиндрични елементи и цилиндрични отвори, оската на цилиндерот треба да се постави под агол од  $90^\circ$  во однос на работната површина, како би се избегнало отсјаивување од профилот.

#### Заоблените рабови

Заоблените рабови при изработката на делови со ЕМ не се неопходни, но некогаш се неминовни, поради дијаметарот на бризгалката. Во случај на работно поголемо заоблување поставено паралелно на работната површина при изработката, резултира со изразен скалест ефект.

**Тврдење 54:** При дизајнирање на модел, заоблувањето на рабовите не е потребно за правилна изработка со ЕМ.

**Тврдење 55:** При дизајнирање на модел, заоблувањето на рабовите кои се паралелни на работната површина, треба да се користи доколку за изработка се користи минимална дебелина на слој.

**Тврдење 56:** При дизајнирање на модел треба да се практикува заоблување во основа на ѓенки и високи елементи, заради зголемување на доирната површина

### **Закосени (соборени) рабови**

Закосувањето на рабови со голема должина може да резултира со изразен скалест ефект на самиот раб. Во тој случај треба да се внимава на процесните параметри, да се избере помала дебелина на слој.

**Тврдење 57:** При дизајнирање на модел, закосувањето на рабовите не е потребно за правилна изработка со ЕМ.

**Тврдење 58:** При дизајнирање на модел пожелно е да се користи закосувањето на рабовите кои се паралелни на работната површина, при минимална дебелина на слој.

### **Текст**

Изработката на текст со ЕМ зависи од повеќе елементи од кои примарни се тип на типографија, поради дебелината на буквите и избраната димензија. Најдобар квалитет има испакнат текст поставен паралелно на работната површина. Во таков случај влијанието на дијаметарот на бризгалката е одлучувачко за изработката. Во случај на текст поставен на 90° во однос на работната површина, влијание во изработката има дебелината на работниот слој, во тој случај треба да се избере работен слој со помала дебелина.

**Тврдење 59:** При дизајнирање на текст треба да се внимава при избор на типографија. Типографијата да е со широки букви и со задебелување (bold).

**Тврдење 60:** При дизајнирање на ѓекси независно дали на хоризонтална или вертикална рамнина ѓреба да се ѓреферира користиње на исиакнаѓ ѓекси насѓроѓи вдлабнаѓ ѓекси.

**Тврдење 61:** При дизајнирање на вдлабнаѓ ѓекси, ѓреба да се ѓосѓави на хоризонтална рамнина и да се изработѓи со бризѓалка со најмал дијаметар и слој со најмала дебелина.

## 4.2. Визуелна анализа на изработените модели

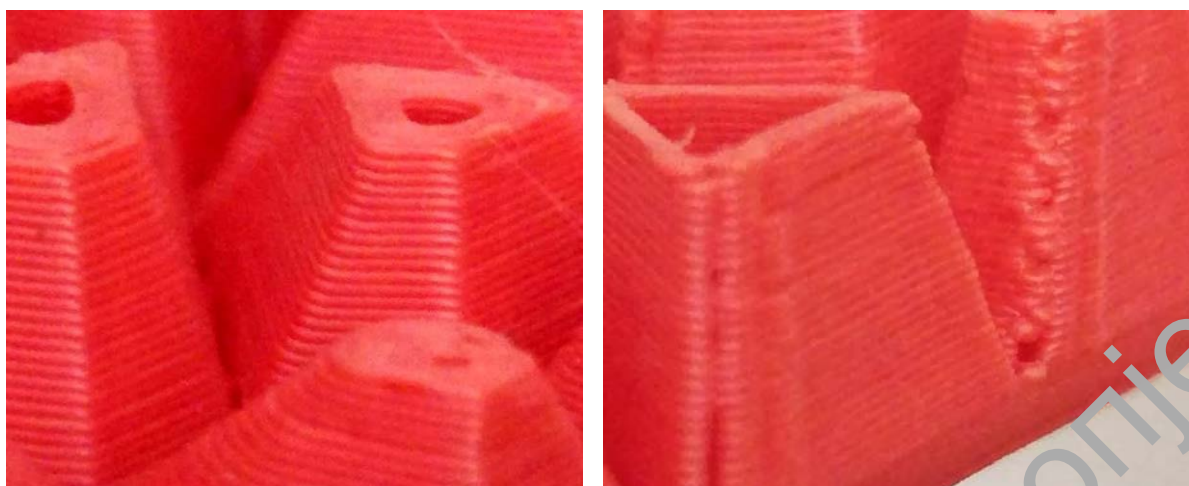
За разлика од проверката со мерење, проверката на визуелен впечаток е многу посубјективна бидејќи е под влијание на чувствата, перцепцијата и искуствата на поединецот. Сепак, визуелниот впечаток е од големо значење за дизајнерите и во голем број на случаи е одлучувачки. Поради тоа, во оваа дисертација е посветено големо внимание на ваквата проверка. При визуелната проверка, анализиран е типот на површината (рамна - нерамна, мат - сјајна), чувството при допир, не изработени елементи, грешки при изработка на елементите.

При визуелната проверка на деловите може да се забележи дека квалитетот на изработката и површинскиот квалитет се доста добри. Најголемиот дел од елементите се изработени со мали недостатоци кои се прикажани во продолжение. Скалестиот ефект е присутен, но е значајно изразен само во одредени случаи. Во продолжение се претставени најчестите отстапувања во обликот и насоки како тие да се надминат.

### **Неизработени елементи**

Сѓ дизајнираниот CAD модел до негова изработка не би требало да има визуелни отстапувања во геометријата. Сепак се случува во одредени случаи некои елементи да не се изработат. Причините за тоа може да бидат различни. Првата причина, која е најчеста кај дизајните е несоодветно моделиран дел (слика 4-31). Проблемот настанува при конверзија во STL и полигонизација на модел дизајниран како површински модел. На овој начин, на места каде што површините не се добро споени се јавуваат отвори.





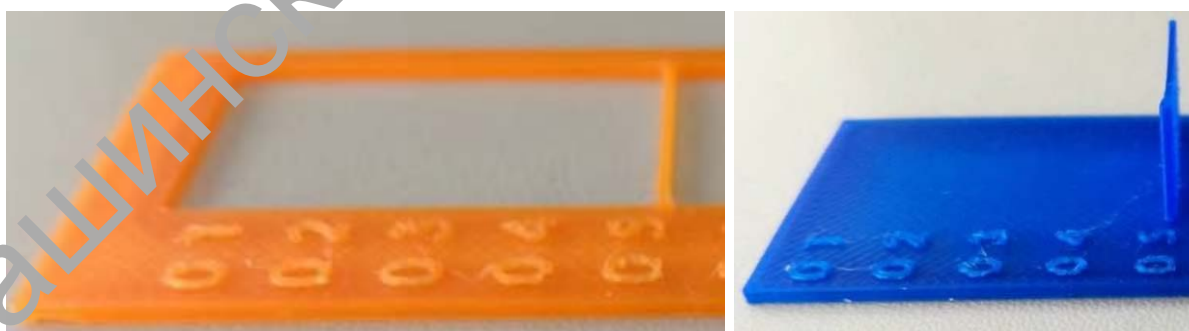
а) правилно моделиран дел

б) неправилно моделиран дел

Слика 4-31. Споредба на изработени модели кои се различно моделирани (сојсџвено исџражување)

**Тврдење 62:** При подгојовка за изработка на модел со големи димензии, иџреба да се избере голема дебелина на работен слој и бризгалка со голем дијаметар, како би се зашџедило на време за изработка.

Втора причина за не изработка на одредени елементи може да биде надминување на можностите на машината (слика 4-32). Доколку димензијата на елементот е помала од тоа што може да се изработи, елементот едноставно нема да се изработи. На слика 4-32 може да се види дека елементите потенки од 0,4 mm не можат да се изработат. Важно е да се наспомне дека параметрите користени при изработка на деловите прикажани на слика 4-32 се дефинирани во поглавје 3.



Слика 4-32. Пример за не изработени елементи иџради мала димензија (сојсџвено исџражување)

Во ваквите случаи, олеснителна околност е што софтверските пакети за раслојување на делот ги детектираат елементите кои се надвор од можноста на машината (слика 4-33). Ова е од голема корист, бидејќи овозможува рана

детекција на евентуални проблеми или не изработени делови. На овој начин не може да се провери дали делот ќе се скрши при изработка или ќе се случи поинаков проблем. Но, сепак е добра појдовна основа за подготовка на моделите за изработка.



Слика 4-33. Изглед на делот подготвен за генерирање на G-кодот за изработка (сојсџвено исџражување)

Во табела 4-8 се прикажани минималните димензии на профил на елемент кои можат или не можат да се изработат. Во истражувањето е земен елемент со не променлива вредност за димензија на страната /дијаметар по висина (за квадратниот и цилиндричниот напречен пресек). Во случај на конус, вредноста прикажана во табелата, се однесува на дијаметарот во основата. Од прикажаното во табелата може да се види дека минималната димензија која може да се изработи со претходно дефинираните параметри (поглавје 3) е 0,5 mm и не зависи од избраната дебелина на слој. Во случај на самостоен елемент со мал напречен пресек (< 1 mm) промената на ориентацијата на елементот во работниот простор, нема влијание во можностите за изработка.

Табела 4-8. Минимална димензија која може да се изработи<sup>1</sup> на самостоен елемент подготвен под агол од 90° во однос на работната површина (сојсџвено исџражување)

	дебелина на слој	димензија на страна / дијаметар									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
елемент со квадратен напречен пресек	0,1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
	0,2	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
елемент - цилиндер	0,1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
	0,2	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
елемент - конус	0,1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
	0,2	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

Кога станува збор за сид, вредностите кои може да се изработат се разликуваат значително со менувањето на ориентацијата на делот. Тоа е така

<sup>1</sup> Изработени на M1, со мат1, дијаметар на бризгалка 0,4 mm.

бидејќи при вертикално поставен елемент дебелината е одредена од дијаметарот на бризгалката. Кај хоризонтално поставен елемент, дебелината ја одредува дебелината на слојот (табела 4-9).

Табела 4-9. Минимална дебелина која може да се изработи на ѕид поставен под агол од 90° во однос на работната површина (соистовено исцражување)

дебелина на слој	дебелина на ѕид									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
0,2	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+

Минималниот дијаметар на отвор поставен со оската нормално на работната површина кој може да се изработи со промена на дебелината на слој е 0,5 mm е прикажан во табела 4-10.

Табела 4-10. Минимален дијаметар на отвор која може да се изработи со оската под агол од 90° со работната површина (соистовено исцражување)

дебелина на слој	поставени со оската под агол од 90° со работната површина									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
0,2	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

Од прикажаното во табелите погоре (табела 4-8, табела 4-9, табела 4-10) може да се забележи дека вклучението на дебелината на слојот нема улога во можноста за изработка на ситни детали, во случај кога нивниот профил е поставен паралелно на работната површина. При ваква поставеност на елементите зголемување на можностите во изработка на ситни детални е можна со промена на дијаметарот на бризгалката, но тоа не е предмет на анализа во оваа докторска дисертација.

**Тврдење 63:** При подготвка за изработка на модел со тенки ѕидови и ситни елементи, треба да се избере работен слој со мала дебелина и бризгалка со помал дијаметар, како би се изработиле правилно сите елементи.

**Тврдење 64:** При подготвка за изработка на модел со шари и ситни детали поставени на 90° во однос на работната површина, треба да

се избере најмала дебелина за работниот слој, како сите елементи би се изработиле соодветно.

**Тврдење 65:** При подготовка за изработка на модел со сфери и цилиндрични делови поставени паралелно на работната површина, треба да се избере помал дијаметар на бризгалка, од стандардниот 0,4 mm, како сите елементи би се изработиле соодветно.

**Тврдење 66:** При подготовка за изработка на модел со шексии, површината со шексии треба да се постави паралелно на работната површина, како шексиите би се изработиле целосно и валидно.

### Површински изглед (Недостатоци во обликот на деловите)

Изгледот на изработените парчиња е генерално задоволителен, особено кај елементите со поголеми димензии. Под добар изглед на изработените делови се подразбира облик на геометрија која соодветствува на таа од CAD моделот, односно да нема поголеми отстапувања од номиналната геометрија како: свиткување, извивање и усуквање. Друг аспект на добар облик на деловите е да нема раскончување или распојување на материјалот.



а) геометриски форми



б) органски форми

Слика 4-34 а,б. Приказ на делови со задоволителен површински квалитет и соодветна геометрија (соодветно истражување)

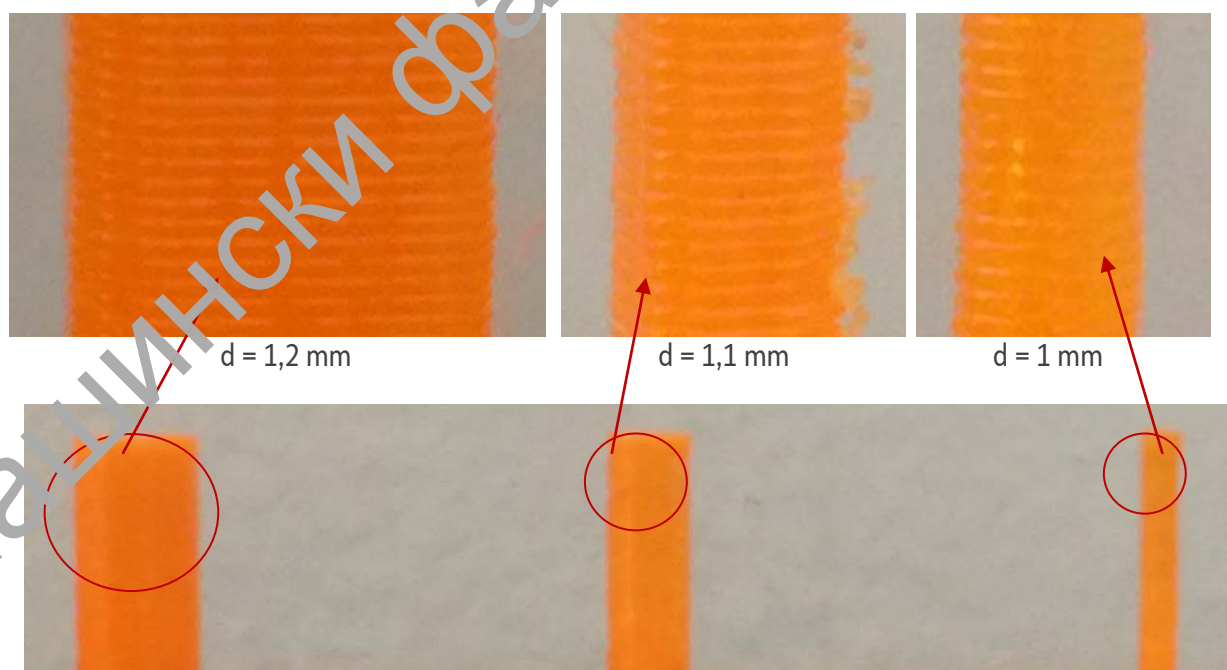
**Тврдење 67:** При подготовка за изработка на модел кај кој изгледот е од примарно значење, треба да се поставен под агол од 90° во однос на

работната површина, со што се обезбедува најдобар квалитет на површината.

**Тврдење 68:** При подготовка за изработка на модел кај кој е значајно да нема отстапување од профилот, треба да се поставен под агол од  $90^\circ$  во однос на работната површина.

**Тврдење 69:** При подготовка за изработка на модел кај кој јакоста е од примарно значење, тој треба да се постави паралелно на работната површина, со што нанесениот слој има најголема површина.

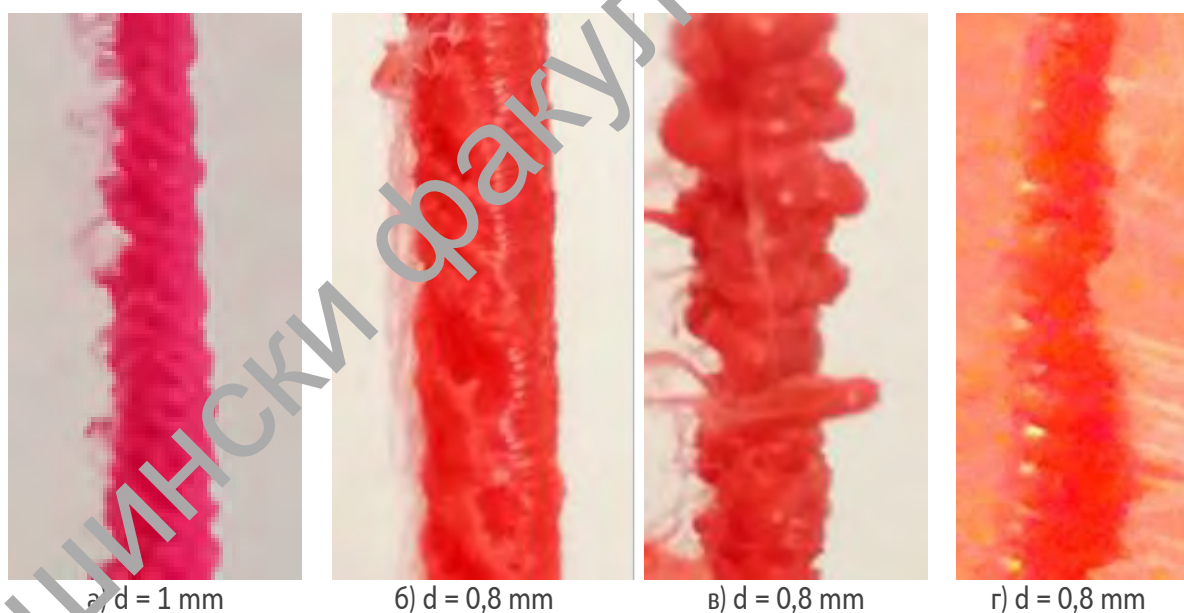
Во продолжение се разгледани добри и лоши примери за обликот на парчиња изработени со ЕМ. При изработка на делови со поголеми димензии (слика 4-34), особено со целосно исполнување, обликот на деловите е речиси секогаш со добар квалитет. Отстапувања може да се јават кај делови со сложена органска геометрија. Пример за добар облик на делови со елементи со мали димензии е прикажан на слика 4-35. Нема никакви видливи отстапувања во обликот од основната цилиндрична форма. Скалестиот ефект е јасно видлив, но е постојан и со иста дебелина.



Слика 4-35. Приказ на добар површински изглед на елементи со мали димензии (сопствено истражување)

Наспроти добриот облик прикажан на слика 4-35, на слика 4-36 се прикажани примери за лош изглед на кај делови со елементи со мали димензии. За лошиот квалитет на изработените елементи (слика 4-36) постојат повеќе причинители.

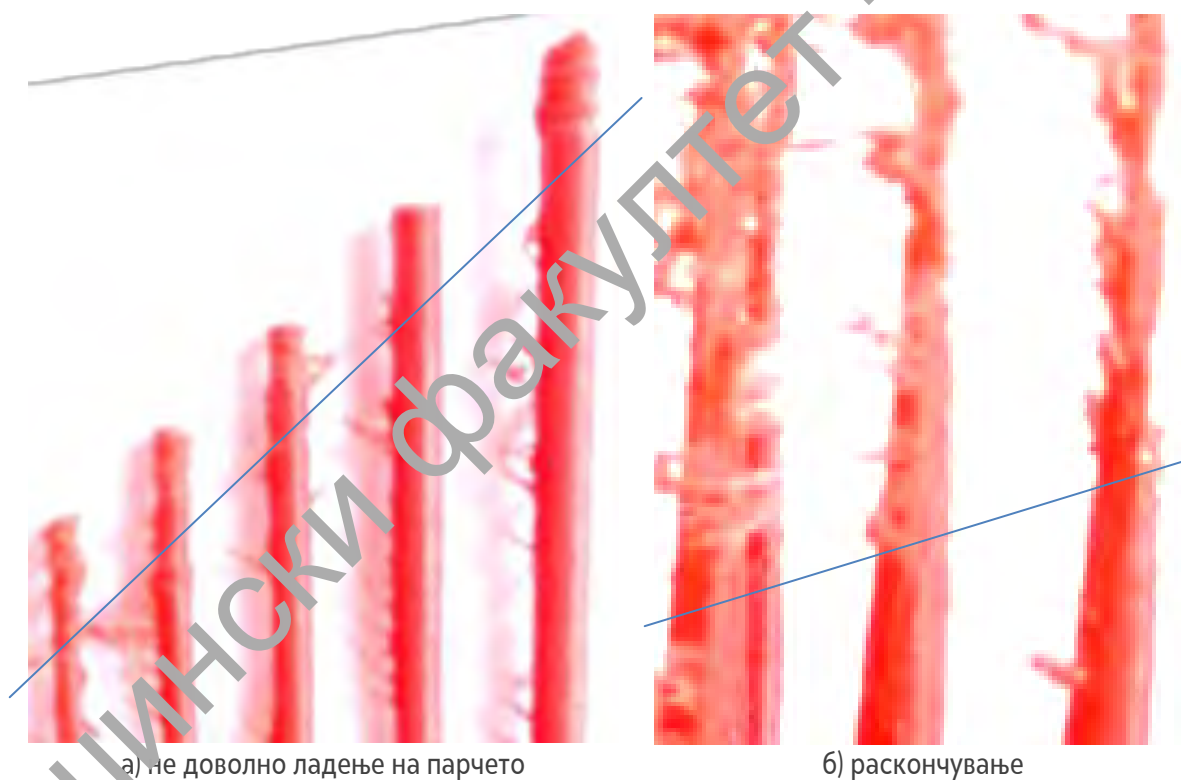
Првиот и најзначајниот причинител е машината, имено деловите прикажани на слика 4-36 се изработени на послаба машина, која нема капацитет за изработка на толку фини детали. Дополнително на тоа проблемите со поставувањето на параметрите може да ја влошат работата. Кај првите две слики (слика 4-36 а,б) забележливо е помало екструзирање на материјал, што доведува до појава на зјаеви низ елементот. На третата фотографија (слика 4-36, в), забележлив е проблемот со превисока температурата, што предизвикува преголемо топење на материјалот. На четвртата фотографија (слика 4-36, г), претставен е пример на користење на поголема брзина при изработката, што доведува до изместување на слоевите. Малото изместување кај елементите со мали димензии предизвикува релативно големи промени на геометријата.



Слика 4-36. Приказ на лош површински изглед на елементи со мали димензии (соистивно исцржување)

**Тврдење 70:** За време на изработка на тенки и високи елементи треба да се контролира работната брзина на машината и доколку е потребно да се намали.

Деловите прикажани на слика 4-37 се пример за делови кои се изработени добро само делумно. Тоа подразбира дека делот на почетокот се изработува соодветно на геометријата која треба да се постигне, но во еден период започнува деформирање. Деформацијата може да биде предизвикана од различни фактори. Елементите прикажани на десната фотографија (слика 4-37 а) се резултат висока работна температура, но и не можност нанесениот слој да се излади пред нанесување на следниот. Ова се случува кај модели кои имаат релативно мали контури за секој од слоевите, така што времето помеѓу две нанесувања на слој не е доволно за да се излади и стврдне нанесениот материјал. Елементите прикажани на левата фотографија (слика 4-37 б) се примери кај кои деформитетите се јавуваат како резултат на раскочувањето, за што подетално се зборува понатаму во текстот.



Слика 4-37. Приказ на делумно добро изработени делови  
(сојсџвено исџражување)

Во табелите (табела 4-8; табела 4-9; табела 4-10) погоре во текстот се дадени информации за можноста да се изработат или да не се изработат одредени елементи. Она што не е земено во предвид е дали изработката на тие елементи е задоволителна, дали елементот може да ја изврши функцијата за која е дизајниран. Во табела 4-11 е даден преглед на можностите за

изработка на одреден елементи, но и квалитетот на изработка, спореден на различни машини, со користење на различен материјал.

Табела 4-11. Можности за изработка при користење на различни машини и материјали (соодветно исцрпување)

	M2		M1		
	Mat2	Mat3	Mat2	Mat3	Mat1
<b>изработка на самостојни елементи</b>					
сид со дебелина < од 0,5 mm					
сид со дебелина од 0,6 – 0,8 mm					
сид со дебелина < од 0,8 mm					
цилиндер со дијаметар < од 0,6 mm					
цилиндер со дијаметар од 0,6 до 1,2 mm					
цилиндер со дијаметар > од 1,2 mm					
столб со страна < од 0,6 mm					
столб со страна од 0,6 до 1,2 mm					
столб со страна > од 1,2 mm					
конус со дијаметар < од 0,6 mm					
конус со дијаметар од 0,6 до 1,2 mm					
конус со дијаметар > од 1,2 mm					
<b>отвор</b>					
отвор со дијаметар < од 0,2 mm					
отвор со дијаметар од 0,2 до 0,6 mm					
отвор со дијаметар од 0,6 до 1 mm					
отвор со дијаметар > од 1 mm					
<b>надвисувања</b>					
испуст < од 2 mm					
испуст од 2 до 4 mm					
испуст > 4 mm					
премостување < од 4 mm					
премостување од 4 до 8 mm					
премостување > од 8 mm					
<b>агол во однос на работната површина</b>					
агол од 0° до 15°					
агол од 15° до 45°					
агол од 45° до 90°					

Легенда:

	не се изработува воопшто
	се изработува со отстапување од основната форма
	се изработуваат со незадоволителен површински квалитет
	се изработува соодветно



### ***Ефект на скалила***

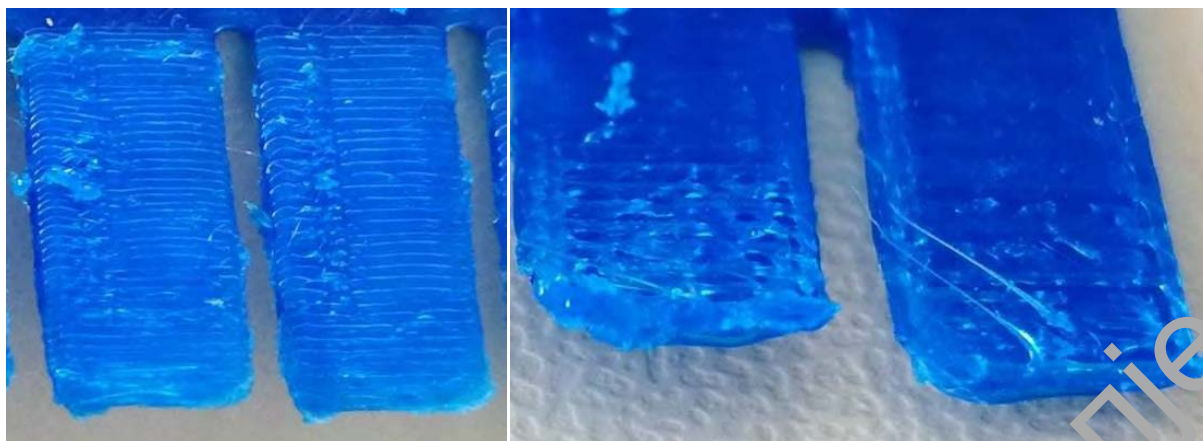
Принципот на работа на процесот на ЕМ и воопшто на сите процеси од АП резултира со појава на скалила по целата површина на делот. Отстранувањето на скалестиот ефект во целост не е можно<sup>2</sup>, може само да се размислува околу негово намалување. Скалестиот ефект е поизразен кај искосени површини, додека најмалку е воочлив на површините кои се паралелни на работната површина. На слика 4-38 е прикажан дел со елементи со искосени страни, секоја под различен агол, но генералниот впечаток е добар површински изглед. Скалестиот ефект е рамномерен и постојан и забележлив при зголемено фотографирање.



Слика 4-38. Пример за добар изглед на искосена површина изработена со ЕМ (соистивно исцражување)

За разлика од примерот прикажан на слика 4-38, на слика 4-39 е прикажан дел со особено изразен скалест ефект. Елементите прикажани на слика 4-39 зафаќаат агол од 5° до 20° со работната површина, а во таков случај ефектот на скалила е најизразен. Тоа настанува поради тоа што преклопувањето на слоевите е на големо меѓусебно растојание и е особено нагласено ако станува збор за елементи со тенки ѕидови.

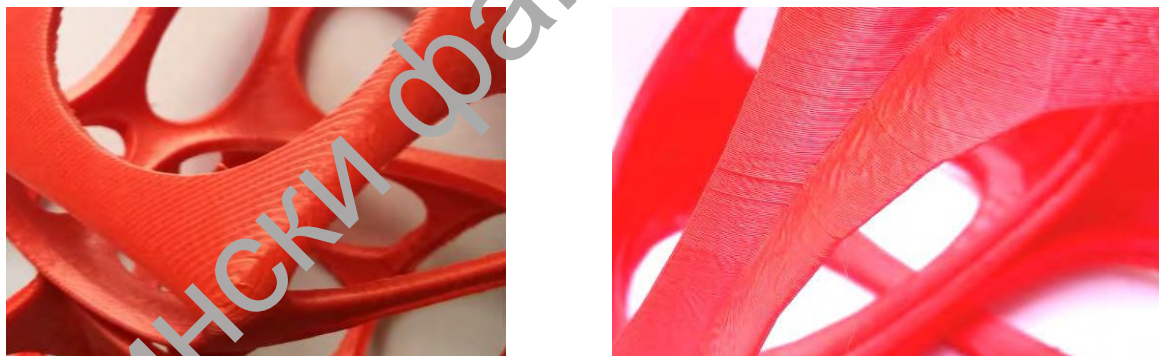
<sup>2</sup> Не е можно со менување на работните параметри или моделирањето. Секако дека е можно целосно отстранување на скалестиот ефект со механичка или хемиска доработка на делот.



Слика 4-39. Приказ на скалесџиој ефекџ кај џенкијџ искосени елемџџи (сојсџвено исџражување)

**Тврдење 71:** При џодџојовка за израбојка на модел кај кој џреба да се намали скалесџиој ефекџ џреба да се внимава да не зафаќа аџол  $\leq 30^\circ$  во однос на рабојнајџа џовршина.

Кај деловите со сложена органска површина, особено е изразен скалестиот ефект (слика 4-40). Степенот на изразеност зависи од степенот на искосеност и заобленост на површината во однос на работната површина и неговата дебелина.



Слика 4-40. Приказ на скалесџиој ефекџ (сојсџвено исџражување)

**Тврдење 72:** При џодџојовка за израбојка на модел со органски џовршини и џолеми радиуси на заоблувања, џреба да се избере најмала дебелина за рабојниој слој, како би се намалил ефекџојџ на скалила.

**Тврдење 73:** За делови кај кој надворешниот изглед е од особено значење и треба да има мазна површина, треба изработениите парчиња доволно механички или хемиски да се доработат.

### Ефект на појава на конци

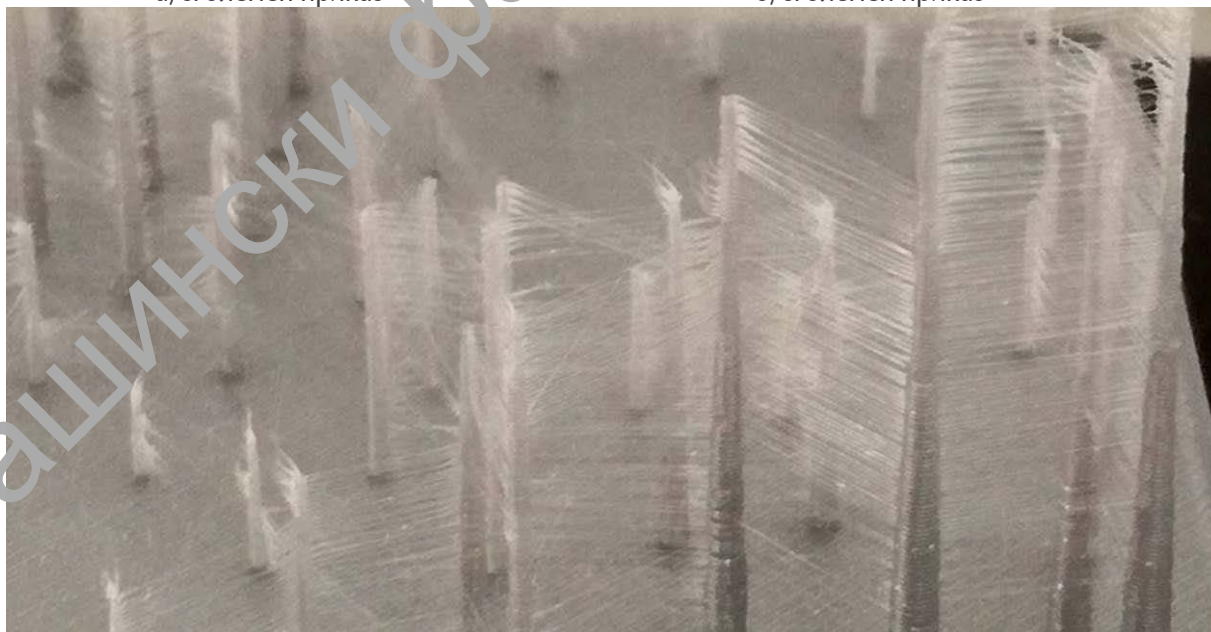
Појавата на конци е честа појава при изработката на делови со ЕМ. Особено е изразена кога станува збор за елементи со мали димензии. На слика 4-41, а,б се прикажани елементи со напречен пресек помал од 1 mm. Доколку дизајнот е таков што постојат повеќе елементи со мал напречен пресек на мало меѓусебно растојание, ефектот на појава на конци е уште поизразен (слика 4-41, в).



а) зголемен приказ



б) зголемен приказ



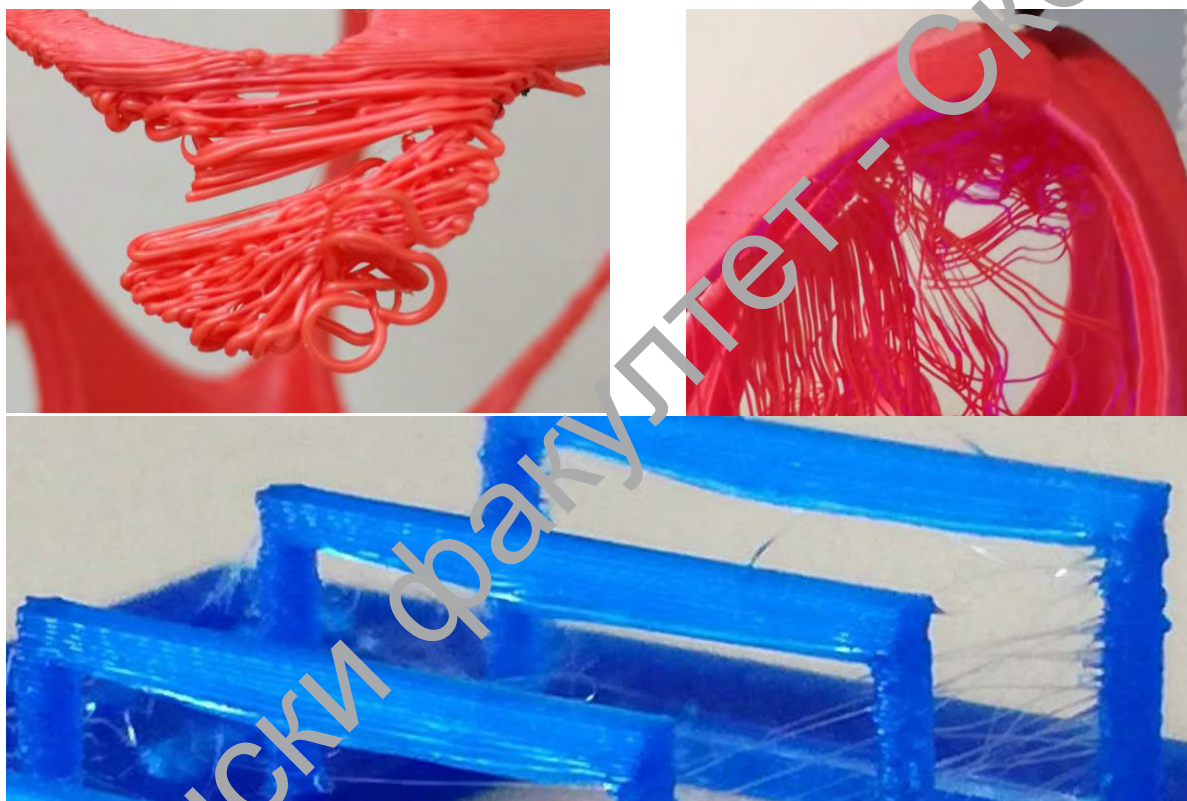
в) групирани елементи со мал напречен пресек

Слика 4-41. Приказ на ефектот на појава на конци (сопствено истражување)

**Тврдење 74:** При дизајнирање на модел со тенки и високи елементи, да се избегнува нивно групирање како би се намалил ефектот на раскончување.

### Ефект на раслојување

Принципот на работа на ЕМ, а и на останатите процеси од АП се сведува на нанесување на материјал во слоеви, еден врз друг. Во случаи кога треба да се нанесе материјал на одреден слој, а под него нема материјал или структура за потпора, настанува течење на материјалот (слика 4-42).



Слика 4-42. Приказ на ефектот на раслојување (соодветно истражување)

**Тврдење 75:** При дизајнирање на елемент со премостување, максималната должина на премостувањето треба да биде  $\leq 4$  mm, како би се изработил правилно без користење на структури за поддршка.

**Тврдење 76:** При подготвка за изработка на модел со големи испусти и премостувања, не треба да се избегнува користење на структури за поддршка.

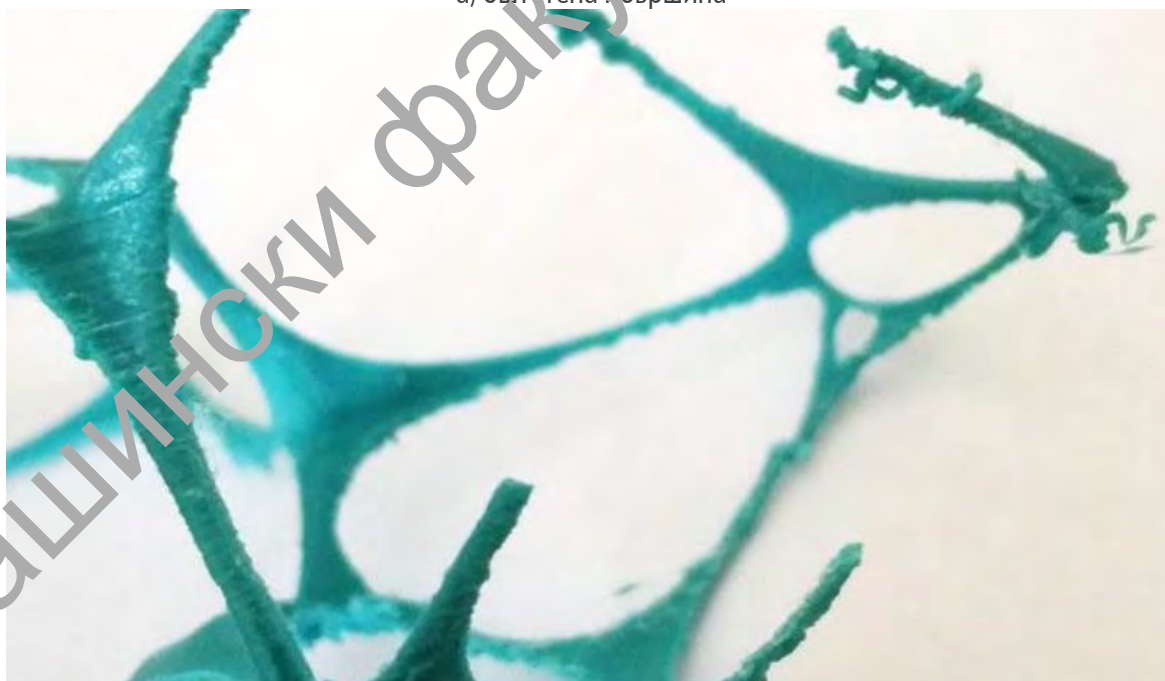
### Последици од користење на структури за поддршка

Структурите за поддршка помага при изработката на делови со сложена геометрија. Најчесто материјалот со кој се изработуваат структурите за поддршка е ист со оној од кој се изработува делот, така што идентификацијата на едниот од другиот е тешка. Физичкото отстранување на потпорниот материјал може да предизвика оштетување или кршење на делот (слика 4-43).

**Тврдење 77:** При подготвка за изработка на модел со сложена геометрија, треба да се користат дрвовидни структури за поддршка наместо стандардниите.



а) оштетена површина



б) скршени делови

Слика 4-43. Резултати по отстранувањето на структурите за поддршка (соодветно исцражување)

**Тврдење 78:** Случаи кога може да се изостави користењето на структури за подпора: делот е оставен хоризонтално на работната површина; нема исцупсти поголеми од 1 mm; нема премоскувања подолги од 4 mm; закосение делови зафаќаат агол од 35° до 145° со работната површина; делот може да се раздвои на два дела.

Дополнително, по отстранувањето на структурите за потпора остануваат видливи траги на самиот дел (слика 4-44). Трагите можат да бидат во вид на оштетување поради применетата сила за отстранување на структурите за потпора или пак поради големата контактна површина помеѓу делот и потпората. Доколку растојанието помеѓу изработеното праче и структурите за потпора не е соодветно тоа може да резултира со допирна површина со многу лош квалитет (слика 4-44, а). При користење на структури за потпора растворливи во вода, допирната површина нема никакви видливи отпечатоци.

**Тврдење 79:** При подготовка за изработка на модел со структури за подпора, допирната површина помеѓу подпората и моделот треба да биде најмногу колку дебелината на работниот слој.



а) допирна површина со стандардна структура за потпора



б) допирна површина со структура за потпора растворлива во вода

Слика 4-44. Споредба на допирната површина со структуриите за подпора (соодветно исцрпување)

**Тврдење 80:** При подготовка за изработка на модел на машина која е проектирана за работа со структури за подпора тие не треба да се

избегнуваат, бидејќи во сировинно изработената површина има лоша површински квалитет.

**Тврдење 81:** При подготовка за изработка на модел на машина со два или повеќе материјали, користењето на структури за поддршка кои се растворливи не треба да се избегнува.

Машински факултет - Скопје

## 5.Преглед на развиените препораки и правила за дизајнирање за ЕМ

Развивањето на општи правила за дизајнирање со АП е доста тешка и обемна задача и може да се спроведе само во одредени сегменти. Предмет на оваа докторска дисертација е развивањето на препораки и правила за дизајнирање за процесот на ЕМ.

Препораките и правилата за дизајнирање за ЕМ, кои се резултат на ова истражување и се претставени во претходните поглавја како тврдења, во продолжение се класифицирани. Генералните препораки се тврдења кои се поопшти и кои треба да се знаат пред започнување со процесот на дизајнирање. Правилата се специфични тврдења кои се генерирани врз основа на експерименталните истражувања спроведени според технолошките параметри дефинирани во поглавје 3.

### 5.1. Генерални препораки

Генералните препораки даваат основни и генерални напатствија при подготовка за дизајнирање и изработка на модели со АП односно ЕМ. Развиени се врз основа на сознанијата од анализата на литература, спроведените анкетни прашалници и сопствени искуства, а подоцна потврдени и со сознанијата од спроведените експериментални истражувања. Според проблематиката која ја третираат препораките се поделени во две групи:

- Генерални препораки за дизајнирање (ГПД) и
- Генерални препораки за подготовка за изработка (ГППИ).

Генерални препораки за дизајнирање (ГПД)	
ГПД01	Пред изработка и воопшто пред дизајнирање на делот треба точно да се знае намената и целта на делот, врз основа на тоа ќе се избере соодветен АП процес и соодветни параметри за изработка.
ГПД02	При дизајнирањето треба да се избегнува користење на нагли преоди од многу дебели кон многу тенки сидови, што резултира со појава на заостанати напони.



<b>ГПД03</b>	При дизајнирањето треба да се избегнува користење на тенки ѕидови со мали агли на наклон во однос на работната површина, што резултира со изразен скалест ефект на изработена површина.
<b>ГПД04</b>	При дизајнирањето треба да се направат напори за креирање на модел кој нема потреба од структури за потпора при изработката.
<b>ГПД05</b>	При дизајнирање на големи надвисувања (испусти и премостувања) треба да се земе во предвид користење структури за потпора.
<b>ГПД06</b>	При дизајнирањето треба да се избегнуваат големи рамни површини, бидејќи се ладат нерамномерно, што доведува до деформација на делот (виткање или собирање).
<b>ГПД07</b>	При дизајнирањето треба да се применат заоблување или закосување на рабовите кои лежат на работната површина, со што се олеснува подоцнежното отстранување (одлепување) од работната површина.
<b>ГПД08</b>	При дизајнирање на високи и тенки самостојни елементи треба да се има во предвид дека може да дојде до појава на заоблувања во основата на елементот (elephant foot), бидејќи нанесените слоеви под тежина се сплескуваат, што тоа доведува до зголемен напречен пресек.
<b>ГПД09</b>	При дизајнирањето пожелно е да се користи полигонална мрежа бидејќи за изработка делот се претвора во полигонизиран модел (.stl датотека), па можноста за грешки се намалува.
<b>ГПД10</b>	Димензиите на делот треба да соодветствуваат со можностите на машината со која ќе се изработува делот. Подоцнежното пропорционално намалување на димензиите на делот може да резултира со елементи со димензии кои се надвор од можностите на машината и поради тоа не се препорачува.

<b>Генерални препораки за подготовка за изработка (ГППИ)</b>	
<b>ГППИ01</b>	При подготовката за изработка, задолжително треба да се провери дали моделот има неправилности во геометријата, како што се завртени површини или отворени површини.
<b>ГППИ02</b>	Евентуалната корекција на моделот секогаш треба да се прави во изворниот софтверски пакет. Ако не постои таа можност, делот може да се доработи во софтверски пакети за наменети за доработка (Meshmixer, Geomagic и др.).
<b>ГППИ03</b>	Во процесот на раслојување, треба да се провери дали моделот целосно се изработува, што како опција постои во сите софтверски пакети за раслојување.
<b>ГППИ04</b>	За време на изработката на моделот треба да се обезбеди константна температура во работната просторијата (доколку се работи за машина со отворен работен простор).
<b>ГППИ05</b>	За време на изработка на тенки и високи елементи треба да се контролира работната брзина на машината и доколку е потребно да се намали.

ГППИ06	При подготовката за изработка на модел, треба да се внимава на неговата ориентацијата во работната околина, бидејќи има големи разлики во механичките карактеристики, квалитетот на изработените површини, но и на времето потребно за изработка.
ГППИ07	При подготовка за изработка на модел со кружни и цилиндрични елементи треба да се внимава на нивната ориентацијата, бидејќи може да има значителни отстапувања во профилот.
ГППИ08	При подготовка за изработка на модел, треба да се внимава на изборот на дебелината на работниот слој, бидејќи дебелината на работниот слој влијае на квалитетот на изработената површина, но и на времето потребно за изработка.
ГППИ09	При подготовката за изработка на модел, треба да се знае дека на можноста за изработка на детали поставени на 90° во однос на работната површина најголемо влијание има дебелината на работниот слој.
ГППИ10	При подготовката за изработка на модел, треба да се знае дека на можноста за изработка на детали поставени паралелно во однос на работната површина најголемо влијание има димензијата на бризгалката.
ГППИ11	При подготовка за изработка на модел, треба да се внимава на начинот и густина на исполнување со материјал, бидејќи тоа влијае во најголема мерка влијае на механичките карактеристики на изработениот модел, но и на времето потребно за изработка и количеството на искористен материјал.
ГППИ12	При подготовка за изработка на модел, треба да се избегнува користење на структури за потпора секогаш кога има можност за тоа.
ГППИ13	При користење на структури за потпора во изработката на моделот треба да се избере најсоодветниот начин на креирање на потпорите, зависно од дизајнот и намената на моделот.
ГППИ14	За делови кај кои надворешниот изглед е од особено значење и треба да има мазна површина, треба изработените парчиња дополнително механички или хемиски да се доработат.

## 5.2. Специфични правила

Специфичните правила се развиени врз основа на конкретните експериментални истражувања кои се дел од истражувањето за оваа докторска дисертација. Со овие правила се дефинираат точните минимални вредности кои треба да се запазат во процесот на дизајнирање на одредени елементи, како и работните услови кои треба да се задоволат за успешна изработка. Поделени се во две подгрупи според проблематиката:

- Правила за дизајнирање (ПД) и
- Правила за подготовка за изработка (ППИ).

Правила за дизајнирање (ПД)	
ПД01	При креирање на .stl датотека треба да се користи толеранција на девијација од 0,001 mm и толеранција на аголот од 15°.
ПД02	При дизајнирање на интегриран сид, минимална дебелина на сид која може да се изработи е 0,5 mm.
ПД03	При дизајнирање на интегриран сид кој е составен елемент од поголем модел, минималната дебелина на сид треба да е $\geq 1$ mm.
ПД04	При дизајнирање на интегриран сид, може да се јави заоблување на рабовите, зависно од ориентацијата на елементот.
ПД05	При дизајнирање на самостоен сид, минималната дебелина на сид која може да се изработи е 0,5 mm.
ПД06	При дизајнирање на самостоен сид, минималната дебелина на сид која треба да се користи за изработка на цел модел е $\geq 1$ mm.
ПД07	При дизајнирање на самостоен сид, може да се јави заоблување во основата на сидот, зависно од ориентацијата на елементот.
ПД08	При дизајнирањето на самостоен елемент со квадратен напречен пресек, минималната дебелина која може да се изработи, независно од ориентацијата на елементот е 0,5 mm.
ПД09	При дизајнирање на самостоен елемент со квадратен напречен пресек, минималната дебелина која се препорачува за користење $\geq 1$ mm.
ПД10	При дизајнирање на самостоен елемент со кружен напречен пресек, минималниот дијаметар кој може да се изработи, независно од ориентацијата на елементот е 0,5 mm.
ПД11	При дизајнирање на самостоен елемент со кружен напречен пресек, минималниот дијаметар кој се препорачува за користење $\geq 1$ mm.
ПД12	Во случај кога цилиндарот има функција за спојување, минималниот дијаметар кој се препорачува $\geq 5$ mm.
ПД13	При дизајнирањето на самостојни елементи со голема висина и димензии на страна/дијаметар $\leq 2$ mm, можна е појава на големи отстапувања во обликот.
ПД14	При дизајнирање на самостојни конусни елементи треба да се избегнуваат елементи со дијаметар $\leq 2$ mm.
ПД15	При дизајнирање на зјај помеѓу вертикално поставени сидови, минимална дебелина на зјај која може да се изработи е 0,1 mm.
ПД16	При дизајнирање на зјај помеѓу вертикално поставени сидови, минимална дебелина на зјај која се препорачува $\geq 0,2$ mm.
ПД17	При дизајнирање на кружен отвор, минимален дијаметар кој може да се изработи е 0,2 mm.

ПД18	При дизајнирање на кружен отвор, минимален дијаметар кој треба да се користи е $\geq 0,8$ mm.
ПД19	При дизајнирање на кружен отвор треба да се земе во предвид дека изработениот кружен отвор има помал дијаметар во однос на оној на CAD моделот.
ПД20	При дизајнирање на кружен отвор кој има значајна функција и не смее да има отстапување во профилот и димензиите, треба да се изработи дополнително на друг начин.
ПД21	При дизајнирање на елемент со испуст, должината на испустот треба да биде $\leq 2$ mm, како би се изработил правилно без користење на структури за потпора.
ПД22	При дизајнирање на елемент под агол, елементите кои зафаќаат агол од $45^\circ$ до $135^\circ$ со работната површина можат да се изработат без користење на потпорен материјал.
ПД23	При дизајнирање на елемент со премостување, максималната должина на премостувањето треба да биде $\leq 4$ mm, како би се изработил правилно без користење на структури за потпора.
ПД24	При дизајнирање на модел со тенки и високи елементи, да се избегнува нивно групирањето како би се намалил ефектот на раскочување.
ПД25	При дизајнирање на модел, заоблувањето на рабовите не е потребно за правилна изработка со EM.
ПД26	При дизајнирање на модел, пожелно е да се користи заоблувањето на рабовите кои се паралелни на работната површина, при минимална дебелина на слој.
ПД27	При дизајнирање на модел треба да се практикува заоблување во основата на тенки и високи елементи, заради потпирање на допирната површина.
ПД28	При дизајнирање на модел, закосувањето на рабовите не е потребно за правилна изработка со EM.
ПД29	При дизајнирање на модел пожелно е да се користи закосувањето на рабовите кои се паралелни на работната површина, при минимална дебелина на слој.
ПД30	При дизајнирање на текст треба да се внимава при избор на типографија. Типографијата да е со широки букви и со задебелување (bold).
ПД31	При дизајнирање на текст независно дали на хоризонтална или вертикална рамнина треба да се преферира користење на испакнат текст наспроти вдлабнат текст.
ПД32	При дизајнирање на вдлабнат текст, треба да се постави на хоризонтална рамнина и да се изработи со бризгалка со најмал дијаметар и слој со најмала дебелина.

Правила за подготовка за изработка (ППИ)	
ППИ01	При подготовката за изработка на модел, изборот на дебелина за работен слој од 0,2 mm е соодветна за најголем број од моделите.

<b>ППИ02</b>	При подготовка за изработка на интегриран сид со соодветна ориентација на моделот и прилагодување на работните параметри може да се изработи сид со дебелина $\leq 0,5$ mm.
<b>ППИ03</b>	При подготовка за изработка на самостоен сид со соодветна ориентација на моделот и прилагодување на работните параметри може да се изработи сид со дебелина $\leq 0,5$ mm.
<b>ППИ04</b>	При подготовка за изработка на модел со големи димензии, треба да се избере голема дебелина на работен слој и бризгалка со голем дијаметар, како би се заштедило на време за изработка.
<b>ППИ05</b>	При подготовка за изработка на модел со тенки сидови и ситни елементи, треба да се избере работен слој со мала дебелина и бризгалка до помал дијаметар, како би се изработиле правилно сите елементи.
<b>ППИ06</b>	При подготовка за изработка на модел со сфери и ситни детали поставени на $90^\circ$ во однос на работната површина, треба да се избере најмала дебелина за работниот слој, како сите елементи би се изработиле соодветно.
<b>ППИ07</b>	При подготовка за изработка на модел со сфери и ситни детали поставени паралелно на работната површина, треба да се избере помал дијаметар на бризгалка, од стандардниот 0,4 mm, како сите елементи би се изработиле соодветно.
<b>ППИ08</b>	При подготовка за изработка на модел со текст, површината со текст треба да се постави паралелно на работната површина, како текстот би се изработил целосно и квалитетно.
<b>ППИ09</b>	При подготовка за изработка на модел кај кој изгледот е од примарно значење, треба да се поставен под агол од $70^\circ$ во однос на работната површина, со што се обезбедува најдобар квалитет на површината.
<b>ППИ10</b>	При подготовка за изработката на модели со цилиндрични елементи и цилиндрични отвори, оската на цилиндерот треба да се постави под агол од $90^\circ$ во однос на работната површина, како би се избегнало отстапување од профилот.
<b>ППИ11</b>	При подготовка за изработка на модел кај кој е значајно да нема отстапување од профилот, треба да се поставен под агол од $90^\circ$ во однос на работната површина.
<b>ППИ12</b>	При подготовка за изработка на модел кај кој јакоста е од примарно значење, тој треба да се постави паралелно на работната површина, со што нанесениот слој има најголема површина.
<b>ППИ13</b>	При подготовка за изработка на модел кај кој треба да се намали скалестиот ефект треба да се внимава да не зафаќа агол $\leq 30^\circ$ во однос на работната површина.
<b>ППИ14</b>	При подготовка за изработка на модел со органски површини и големи радиуси на заоблувања, треба да се избере најмала дебелина за работниот слој, како би се намалил ефектот на скалила.
<b>ППИ15</b>	При подготовка за изработка на модел со големи испусти и премостувања, не треба да се избегнува користење на структури за потпора.

<b>ППИ16</b>	При подготовка за изработка на модел со сложена геометрија, треба да се користи дрвовидни структури за потпора наспроти стандардните.
<b>ППИ17</b>	Случаи кога може да се изостави користењето на структури за потпора: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Делот е поставен хоризонтално на работната површина,</li> <li>- Нема испусти поголеми од 1 mm,</li> <li>- Нема премостувања подолги од 4 mm,</li> <li>- Закосените делови зафаќаат агол од 35° до 145° со работната површина,</li> <li>- Делот може да се раздвои на два дела.</li> </ul>
<b>ППИ18</b>	При подготовка за изработка на модел со структури за потпора, допирната површина помеѓу потпората и моделот треба да биде најмногу колку дебелината на работниот слој.
<b>ППИ19</b>	При подготовка за изработка на модел на машина која е проектирана за работа со структури за потпора тие не треба да се избегнуваат, бидејќи со спротивно изработената површина има лош површински квалитет.
<b>ППИ20</b>	При подготовка за изработка на модел на машина со два или повеќе материјали, користењето на структури за потпора кои се растворливи не треба да се избегнува.
<b>ППИ21</b>	Повторливоста во изработката може да се запзи, доколку се задржани истите работни услови и параметри.
<b>ППИ22</b>	При подготовка за изработка на модел кај кои јакосните карактеристики се од големо значење треба да се користи 100 процентно исполнување.
<b>ППИ23</b>	При подготовка за изработка на модел кај кои јакосните карактеристики немаат значење треба да се избере стандардно 20 процентно исполнување.
<b>ППИ24</b>	При подготовка за изработка на модел кој треба да имаат одредена еластичност, се препорачува користење на начинот на исполнување: gyroid и 5 процентно исполнување.
<b>ППИ25</b>	При подготовка за изработка на модел со големи димензии и различни јакосни барања, треба да се користи различен начин и процент на исполнување во поедини региони на моделот.

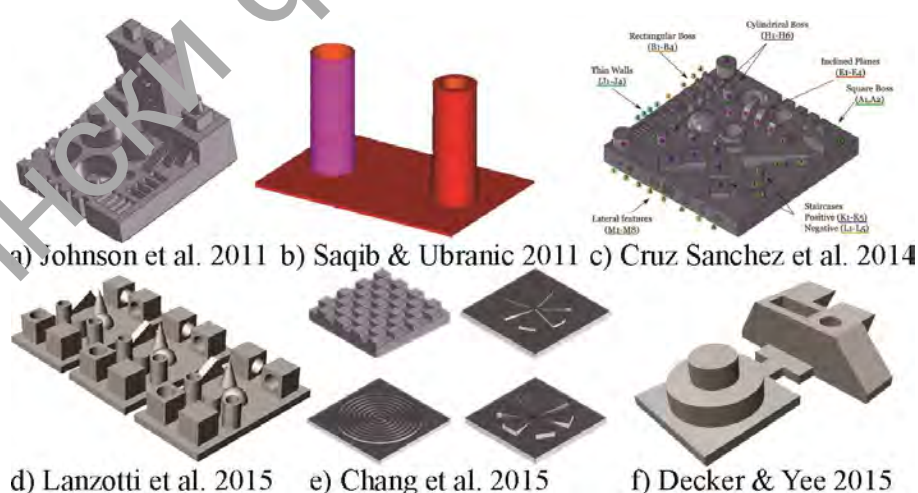
Во ова истражување развиени се 24 генерални препораки и 57 правила за дизајнирање со процесот на ЕМ. Препораките и правилата се донесени врз основа на спроведените експериментални истражување, претставени во додатоци 4. Препораките се генерални и тие важат за сите процеси на екструзија на материја, додека специфичните правила можат да имаат отстапување во вредностите зависно од опремата која се користи како и работните услови.

## 6. Дизајн на референтен модел

Во насока на основната цел на оваа докторска дисертација, развојот на алатка за дизајнирање за АП, дизајниран е референтен модел (во понатамошниот текст, РМ). РМ треба да биде од помош за индустриските дизајнери во фазата на сетирање но, и евалуирање на машината за ЕМ која ја користат.

Целта на предложениот РМ е одредување на граничните вредности за конкретна машина за ЕМ. Моделот е дизајниран на начин на кој тој го испитува критичните моменти во изработката на еден дел со ЕМ. Критичните моменти се превземени од поглавјето 3.1, од каде произлегува дека тоа се: минимални дебелини на ѕид, групирање на тенки и тиски елементи, елементи под агол, премостувања и проблеми во отстранувањето на структурите на потпора. Предложениот РМ треба да ги опфати сите горе споменати елементи. Со тоа што најголем акцент е ставен на испитувањето на минималните димензии за ѕид и самостојните елементи.

Во претходните истражувања се сретнуваат различни видови на РМ кои се наменети за различни процеси од АП. Во продолжение детално се анализирани само РМ кои се наменети за процесот на ЕМ (Chang et al., 2015; Cruz Sanchez et al., 2014; Decker and Yee, 2015; Johnson et al., 2011; Lanzotti et al., 2015; Saqib and Urbanic, 2011), прикажани на слика 6-1.



Слика 6-1. Приказ на различни РМ кои се среќнуваат во литературата

Како би се направилa подетална споредба на геометриските карактеристики на анализираниите примери од литературата, претставени се

во табела 6-1 наспроти предложениот РМ. Од прикажаното (табела 6-1), јасно се уочува дека досега користените РМ не се фокусираат на изработка на детали и елементи со мали димензии, а токму тоа е предмет на анализа на предложениот РМ.

Табела 6-1. Сѝоредба на геомеѝриски карактеристики на референѝниѝе модели за ѝроцесоѝ на ЕМ кои се среѝнувааѝ во лиѝераѝураѝа (соѝсѝвено исѝражување)

карактеристики	Johnson et al. 2011	Saqib & Urbanic 2011	Cruz Sanchez et al. 2014	Lanzotti et al. 2015	Chang et al. 2015	Gecker & Ye 2015	Предложен РМ
Вертикални ѕидови (< 1 mm)	-	-	-	-	-	-	+
Вертикални отвори (< 3 mm)	-	-	-	-	-	-	+
Мали верт. засеци (< 1 mm)	-	-	-	-	-	-	+
Заоблени рабови	-	-	-	-	-	-	+
Остри рабови	-	+	+	+	+	+	+
Искусени ѕидови	+	-	+	+	+	+	+
Премостувања	-	-	-	-	-	-	+
Ситни детали (< 1 mm)	-	-	+	-	-	-	+
Време за изработка [min]	150	NA	NA	NA	NA	NA	120
Искористен материјал [mm <sup>3</sup> ]	36,4	NA	NA	NA	NA	NA	5046
Симетрија	-	-	-	-	-	-	+
Секундарна функција	-	-	-	-	-	-	+
Евалуиран процес	ЕМ (отвор.)	ЕМ	ЕМ (отвор.)	ЕМ (отвор.)	ЕМ	ЕМ	ЕМ (отвор.)

Дополнително, предложениот РМ треба да има овозможи **визуелен приказ на геометриските отстапувања** и граничните вредности на соодветната машина (Chang et al., 2015) без употреба на комплексни мерни машини.

Предложениот РМ е дизајниран како спој на повеќе групи на елементи кои испитуваат различни аспекти од процесот на изработка, но поставени на начин на кој креираат допадлива композиција (слика 6-2). На развиената форма на РМ јасно се гледаат различните групи на елементи со кои се испитуваат граничните вредности на машината. Дополнително со симетричното поставување на елементите во однос на вертикалната и хоризонталната рамнина се испитува и повторливоста во изработката.





а) изглед на моделот



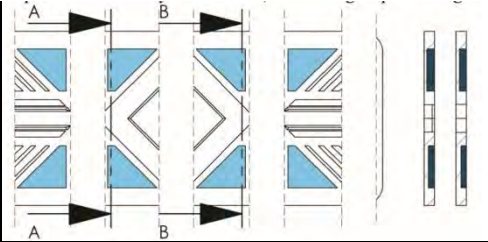
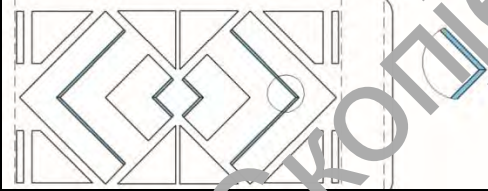
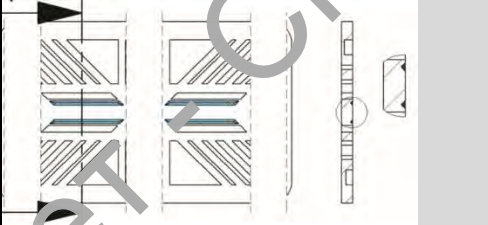
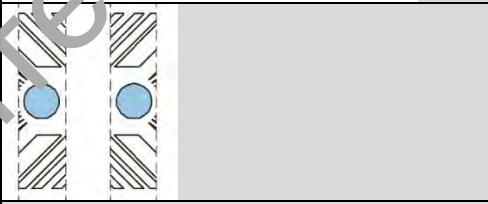


б) развиена форма

Слика 6-2. Дизајн на предложениот РМ (сојсѝвено исѝражување)

Детален преглед на карактеристиките кои ги поседува предложениот РМ и кои се користат за евалуација можностите на машината за ЕМ е прикажан во табела 6-2.

Табела 6-2. Карактеристики на предложениот РМ (сојсѝвено исѝражување)

	карак.	димензии	евалуација	слика
ОПШТИ	отворена цилиндрична форма	$\varnothing 60 \text{ mm}$	цилиндричност, подвивање	
	тенки ѕидови	1,5 mm	подвивање	
	симетрија		конзистентност, прецизност, повторливост	
прегарна група на елементи	Гр 1а - тенки вертикални елементи и зјаеви	0,4 mm 0,5 mm 0,8 mm 1mm	линеарна прецизност, паралелност	
	Гр 1б - тенки искосени елементи и зјаеви	0,4 mm 0,5 mm 0,8 mm 1mm	линеарна прецизност, паралелност, скалест ефект	
	Гр 2 - искосени елементи	$\pm 7,5^\circ$ $\pm 15^\circ$ $\pm 22,5^\circ$ $\pm 30^\circ$ $\pm 37,5^\circ$ $\pm 45^\circ$	можност за изработка на елементите без структури за потпора, скалест ефект	
	Гр 3 - премостувања	12,7 mm 8,76 mm 6,84 mm	можност за изработка на елементите без структури за потпора	

	Гр 4 - тенки вертикални сидови	0,4 mm 0,5 mm 0,6 mm 0,7 mm	рамност и мазност	
секундарна група на елементи	остри рабови		собирање на материјал во кошевите	
	заоблени рабови	0,3 mm	скалест ефект, прецизност	
	Закосени рабови	45°	скалест ефект, прецизност	
	кружни отвори	φ 4 mm	цилиндричност, скалест ефект	
	детал (испакнат и вдлабнат текст)	вис. 3 mm длаб. 0,2 mm	ситни детали на вертикална рамнина	
	големи „рамни“ површини		подвивање	
	фини детали, тенки сидови, мали отвори, текст		можност за изработка на елементите	

Димензионирањето на елементите е направено според анализата на експерименталните истражувања од глава 4 и развиените препораки правила од глава 5. Избрани се вредности кои навистина ги испитуваат границите на можностите на машината. Елементите се групирани во две големи групи примарни и секундарни. Примарната група на елементи е составена од елементи кои детално ги испитуваат минималните дебелини на елемент, искосени елементи, отвори и премостувања. Секундарната група на елементи е составена од елементи кои ги испитуваат можностите и квалитетот на

изработка на делови со заоблени и закосени рабови, ситни детали и кружни отвори.

## 6.1. Примарна група на елементи

Примарната група на елементи е составена од елементи кои се клучни за функционалноста на РМ и исполнување на зададените цели. Елементите графички се прикажани во табела 6-2 и вклучуваат: минимална дебелина и зјај, премостувања и елементи под агол. Секој од испитуваните елементи е претставен со спектар на вредности, формирајќи група на елементи. Секоја група е подетално објаснета во продолжение.

### *Група 1 – Елементи со минимална дебелина и зјај*

Групата 1 е дизајнирана на начин на кој ќе се користи за проверка на минималните димензии на елементи кои може да се изработат, но и минималните отвори кои се изработуваат без припојување на материјалот. Предложениот РМ е дизајниран така што содржи хоризонтални, вертикални и искосени елементи и зјаеви со променлива дебелина (табела 6-2). Димензионирањето на елементите е правено со спектар на вредности, карактеристични за различни типови на машини за ЕМ. Вредностите се варирано од минимални, кои можат да се изработат само во одредени услови на некои машини, до вредности кои со сигурност се изработуваат на сите машини. При дизајнот е внимавано минималните елементи и минималните отвори да бидат на спротивни страни, со што би било јасно кои елемент не се изработува соодветно.

#### - Група 1а – Вертикални елементи

Елементите кои се користат за одредување на минималната дебелина се вертикалните самостојни елементи со квадратен напречен пресек со должини на страна 0,4 mm, 0,5 mm и 0,8 mm, одејќи од центарот на групата кон краевите. Зјаевите, прикажани со сина боја со ширина од 0,8 mm, 0,5 mm и 0,4 mm, одејќи од центарот на групата кон краевите (табела 6-2).

#### - Група 1б – Искосени елементи (45°)

Елементите кои се користат за одредување на минималната дебелина на искосени елементи се исто со квадратен напречен пресек и должина од 10 mm. Дебелините на елементите се 1 mm, 0,8 mm, 0,5 mm и 0,4 mm, одејќи од

центарот на моделот кон краевите. Зјаевите, прикажани со сина боја се со слични димензии, но поинаков распоред: 0,4 mm, 0,5 mm, 0,8 mm, 1 mm и 2 mm, одејќи од центарот на моделот кон краевите (табела 6-2).

### ***Група 2 – Искоени елементи***

Групата 2 е наменета за проверка на можностите за изработка на елементи под агол во однос на хоризонталната рамнина. Дополнително со овие елементи се проверува можноста и квалитетот за изработката на елементи без користење на структури за потпора и степенот на појава на скалестиот ефект. Спојувањето на сите елементи во една точка, може да резултира со нарушен квалитет на површината, собирање на материјал. Елементите започнуваат со агол од  $\pm 7,5^\circ$ , во однос на средината хоризонтална рамнина на моделот и потоа како лепеза се шират нагоре и надолу за  $7,5^\circ$ , се до достигнување на агол од  $\pm 45^\circ$  (табела 6-2).

### ***Група 3 – Премослужувања***

Целта на третата група на елементи е проверка на максималната должина на хоризонтални елементи без потпорен материјал. Со овие елементи дополнително се анализира и моментот на појава на ефектот на раслојување на елементот во отсуство на структури за потпора. Главниот елемент од оваа група е со должина од 1,7 mm (табела 6-2). Други елементи кои не се карактеристични премослужувања, но ги имаат истите карактеристики на самостоен елемент без структури за потпора, а се на различни позиции низ моделот.

### ***Група 4 – Минимални дебелени на *sur****

Со елементите од четвртата група се проверува минималната дебелина на ѕид која може да се изработи и да резултира со квалитетна површина. Анализираните елементи се со полигонален облик, поставени нормално на работната површина, но сепак го следат цилиндричниот облик на РМ. Од напречните пресеци (табела 6-2) означени со А и В, се гледа дека дебелината на напречниот пресек се менува кај елементите. Првиот пресек е со дебелина 0,4 mm, зголемувајќи ги наредните за 0,1 mm, во насока на стрелките на часовникот.

## **6.2. Секундарна група на елементи**

---

Секундарната група на елементи се состои од елементи кои се исто така значајни при изработката на делови со ЕМ, но со овој РМ не постои можност сите да бидат анализирани детално.

### ***Група 1 - Заоблени и закосени рабови***

Заоблените и закосените рабови имаат изразен скалест ефект. Во предложениот РМ, застапеноста на овие елементи е мала како не би имале големо влијание на целокупниот изглед на моделот. Применетите заоблувања на средишниот елемент се со радиус од 0,3 mm, додека закосувањата применети на хоризонталните елементи се со агол од 45° (табела 6-2).

### ***Група 2 - Кружни отвори***

Кружните отвори треба да ја проверат можноста за изработка на кружни елементи и степенот на скалест ефект. Кружните елементи се поставени со оската поставена паралелно на работната површина, што е спротивно на препораките, но направено со цел да се анализира степенот на отстапување од профилот. Применетите кружни отвори се со дијаметар од 4 mm и длабочина од 0,8 mm.

### ***Група 3 - Текст***

Текстот е применет со цел да се провери можноста за изработка на ситни детали. Користена е типографија “Century Gothic”, со големина на буквите од 2,5 mm. Еден дел од текстот е испакнат, а другиот дел е вдлабнат за 0,2 mm.

### ***Група 4 - Рамна површина***

Големи, рамни и тенки површини се предизвик за изработка со ЕМ, поради можноста за извивање и деформација, поради тоа се применети во РМ (табела 6-2).

## **6.3. Валидација на референтниот модел**

---

Како би се проверил и валидирал РМ тој е изработени според претходно дефинираните работни параметри на различни машини. Споредбата на изработени парчиња на различни машини е направена со како би се увидело

дали групите на примарни модели ја извршуваат својата улога, а тоа е различен степен на изработка (слика 6-3).



Слика 6-3. Сјоредба на гејтали на РМ израбојени на различни машини со исиј работни йарамејри (соијсивено исијражувања)

Предложениот РМ е дизајниран како геометриски РМ, со примарна цел да се занимава резултатите од обликот и димензиите на моделот. Во продолжение се прикажани и дискутирани резултатите од изработката. Дискусијата е структурирана така што првата препорака се однесува на

прилагодување на процесните параметри, како би се постигнале подобри крајни резултати. Доколку прилагодувањето на процесните параметри не резултира со целосно изработен дел, тоа укажува дека е достигнат лимитот на машината. Во таков случај може да се направат измени во геометријата на моделот, па на тој начин да може да се изработи целосно.

Делот на РМ генерално е изработен квалитетно, отстапувања во обликот на моделот нема, цилиндричноста е целосно запазена. Квалитетот на површината е солиден и ефектот на скалила е речиси не забележлив.

Од прикажаното на слика 6-3, забележливо е дека последниот пример M1-мат1 има најдобри резултати, изработени се речиси сите елементи. Не се изработени ситните детали, како елементи потенки од 0,5 mm и испакнат текст, но за тоа е потребно да се користи бризгалка со дијаметар помал од 0,4 mm.

Елементите под агол од 45° се изработени без проблем во последниот пример, додека во првиот пример (M2 – мат2) јасно е дека недостасуваат структури за потпора, за правилна изработка на елементите.

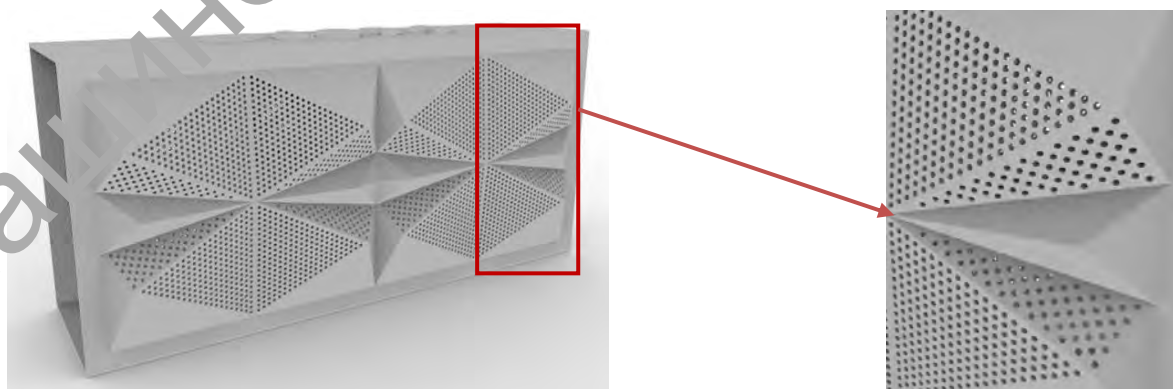
Од дискусијата евидентно е дека со предложениот РМ може да се направи евалуација на одредена машина за РМ. Со самото тоа што моделот е параметарски, можно е самиот корисник да прави измени на моделот и со тоа дополнително да го оптимира процесот но и машината.

## 7. Дизајн за екструдирање на материјал - примена на реални примери

Главна цел на развиените препораки и правила за дизајнирање со АП е да им помогнат на дизајнерите во процесот дизајнирање. Сознанијата изложени погоре во текстот, особено препораките правилата за дизајнирање, се применети на реални проблеми со кои се соочуваат дизајнерите. Реалните проблеми се презентирани преку две студии на работа.

### 7.1. Дизајн и изработка на модел без користење на структури за потпора

Првиот претставен пример е модел кој треба се изработи со ЕМ како прототип во концептуалната фаза на дизајнот (ГДЦ01). За таа цел не се разгледува функционалноста на делот, туку само неговиот изглед. Бидејќи квалитетот на изработената површина и правилно изработените елементи од дизајнот имаат големо значење од визуелен аспект, детално е размислувано околу начинот на поставување на делот при изработката. На слика 7-1 е прикажан изгледот на делот кој треба да се користи како преносен bluetooth звучник. Дизајниран е така што перфорираниот дел поставен на прекршени површини е од двете страни (напред и позади), а на горната страна се поставени командните копчиња. Внатрешноста е шуплива како би се поставиле функционалните елементите, но тоа и не е задолжително да се запази кај концептното решение, иако прозрачност треба да биде запазена.



Слика 7-1. Изглед на дизајнираниот дел, Цвејковски 2019



### Начин на дизајнирање

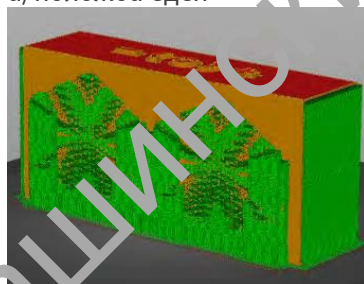
Предност за изработката со ЕМ е тоа што при дизајнирањето на овој моделот (слика 7-1) внимавано е на правилата за дизајн за ЕМ (глава 5). Максималните димензии одговараат на можностите на работната околина (ГПД10). Дебелината на ѕидот е 1 mm (ПД06), закосувањата се поставени под максимален агол од 45° (ГПД03, ПД22) и отворите со дијаметар 0,8 mm (ПД18, ПД19).

Предизвикот со овој модел е тоа што прекршените површини се под различен меѓусебен агол, а со тоа и под различен агол во однос на работната површина (ГПД03, ПД22). Отворите се поставени на прекршените површини, така што и нивниот квалитет на изработка зависи од аголот кој го зафаќаат површините на делот со работната површина.

### Можни начини за изработка

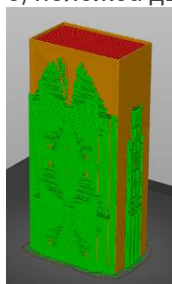
Разгледани се различни начини за изработка врз основа на неколку критериуми. Најзначајните критериуми се квалитетот на изработените детали и квалитетот на површината (ГППИ04-10, ГППИ05-06, ППИ10, ППИ13). Значаен критериум е и можноста за изработка без користење на структури за потпора (ГППИ12 - 13, ГПД14, ППИ17), што влијае на квалитетот на површината. Притоа, не треба да се занемарат останатите критериуми како: времето потрошено за изработка (ГППИ06, ГППИ08), количината на искористен материјал (ГППИ11) и времето потрошено на доработка (ГППИ14, ППИ04).

а) положба еден



Материјал 46,45 m / 139 g  
Време на изработка 29 h  
Потпора да, целосна

б) положба два



Материјал 45,5 m / 136 g  
Време на изработка 30 h  
Потпора да, целосна

+

Целиот дел се изработува од еднаш.

-

Структурите за потпора во внатреш. не може да се отстранат.

Структурите за потпора на надворешните површини тешко се отстрануваат.

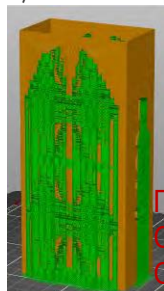
Отстранувањето на структурите за потпора остава видливи траги на делот.

Се троши многу материјал и времето за изработка е долго.

Слика 7-2 (а-б). Ојција 1 - начини за изработка на цел дел од еднаш (сојсџвено исџражување)

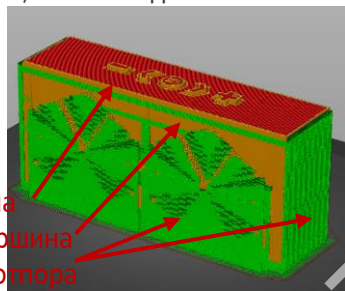
**Опција 1** – претставува изработка на моделот како што е моделиран во еден дел (слика 7-2) (ГППИ10, ППИ10). Предноста со изработката на овој начин е тоа што нема потреба од составување на елементите, делот е готов по изработката. Проблемот што се јавува е потребата од користење на структури за потпора (ГПД05, ГППИ13). Со користење на структури за потпора се зголемува времето за изработка (ГППИ09), се троши повеќе материјал и најважно, структурите за потпора од внатрешноста на делот не може никако да се отстранат. Освен тоа, се губи ефектот на делумна транспарентност што го создаваат отворите (ГППИ0), а е важен елемент во дизајнот.

а) положба еден



Материјал 21,5 m / 64 g  
Време на изработка 25 h  
Потпора да, целосна

б) положба два



Материјал 29,7 m / 89 g  
Време на изработка 23h  
Потпора да, целосна

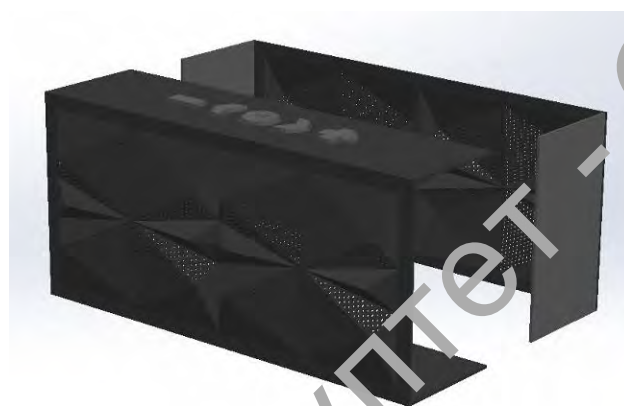
Горна површина  
Странична површина  
Структури за потпора

+
Помало искористување на материјал.
-
Структурите за потпора во внатрешноста тешко се отстранува.
Отстранувањето на структурите за потпора остава видливи траги на делот.
Се троши доста материјал и времето за изработка е долго.
Дополнително време за склопување.

Слика 7-3 (а-в) Опција 2 - начини за изработка делови (со живо исцрпување)

**Опција 2** – подразбира отстранување на страните, за посебна изработка. Најголемата предност кај оваа опција е можноста за поставување на делот вертикално (ППИ06), така што нема да има потреба од користење на структури за потпора во внатрешноста (слика 7-3, а) (ГПД04, ГППИ12). Од приказаното на слика 7-3 интересно е да се забележи дека во првиот случај потрошено е значително помалку материјал, бидејќи во внатрешноста нема потпора, но за сметка на тоа времето на изработка е подолго (поголем број на слоеви). Разликата на оваа опција во однос на опцијата 1 е тоа што отстранувањето на структурите за потпора од внатрешноста е возможно. Со отстранување на структурите за потпора од надворешните површини е тешко и остануваат видливи траги на површината. Со изработката на делот на овој начин, дополнително треба да се размислува и за начинот на спојување, бидејќи страничните делови треба да упаднат во правоаголната рамка.

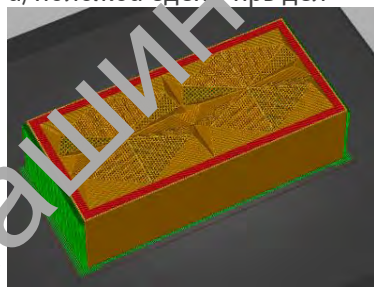
**Опција 3** – подразбира раздвојување на моделот на два дела (слика 7-4). Ваквото раздвојување овозможува изработка на деловите без користење на структури за потпора (ГПД04, ГППИ12, ППИ17), а потоа и лесно склопување (големи површини за нанесување врзивно средство). Поделбата на моделот е направена само за поедноставна изработка со ЕМ, крајниот модели би се изработувал од метал, така што оваа поделба не игра улога. Оваа поделба може да се искористи и за изработка на делот поставен под агол од 90° во однос на работната површина, со што површинскиот квалитет треба да е со најдобар квалитет (ППИ09, ППИ11).



Слика 7-4. Поделба на моделот за изработка со ЕМ

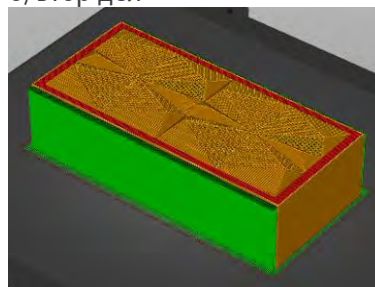
**Опција 3.1** – поставување на делот паралелно на работната површина, со што се обезбедува најдобар квалитет во изработката на кружните отвори (ППИ10). Негативна страна на ова поставување е тоа што имаа потреба од структури за потпора (ГПД05).

а) положба еден – прв дел



Материјал 38 m / 112 gr  
Време за изработка 16,5 h

б) втор дел

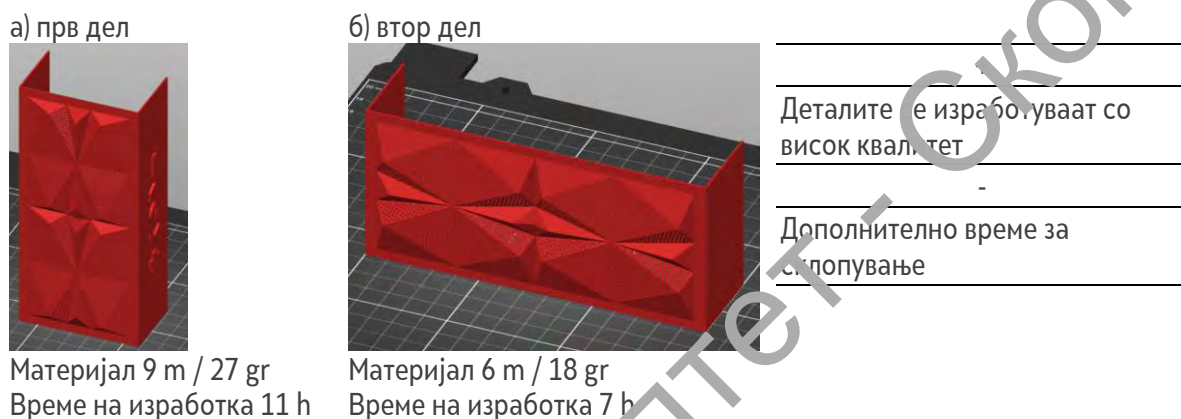


Материјал 33 m / 98 gr  
Време за изработка 13 h

+
Деталите се изработуваат со висок квалитет.
-
Структури за потпора во внатрешноста тешко се отстранува и оставаат видливи траги на делот.
Се троши доста материјал и времето за изработка е долго.

Слика 7-5 (а-б). Опција 3.1 – начин за изработка на два дела со структури за потпора (со сивоено исцржување)

**Опција 3.2** – двата дела се поставуваат различно, така што би се избегнало користење на структури за потпора (слика 7-6) (ГППИ12, ППИ17). Дополнително, со различна поставеност на елементите може да се направи споредба во однос на квалитетот на изработка со цел донесување на генерален заклучок. Од прикажаното на слика 7-6 може да се забележи дека вкупното време за изработка на двата дела е 18 часа, што е значително помалку од 30-те часа, кои се потребни за изработката на целиот дел од еднаш (слика 7-2) и двата дела со потпорен материјал (слика 7-5).



Слика 7-6 (а-б). Опција 3.2 – начин за изработка на двајца дела без структури за потпора (со сличен исцражување)

На график 7-1 е даден графички преглед на можните опции за изработка на деловите кои се прикажани погоре во текстот. Секој од критериумите е рангиран врз основа на 5-степен скала, каде 1 значи најлошо, а 5 најдобро.

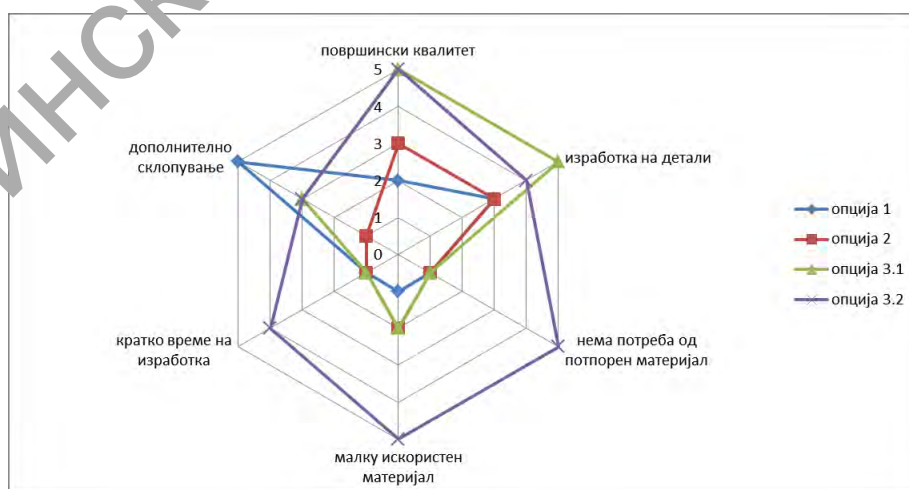
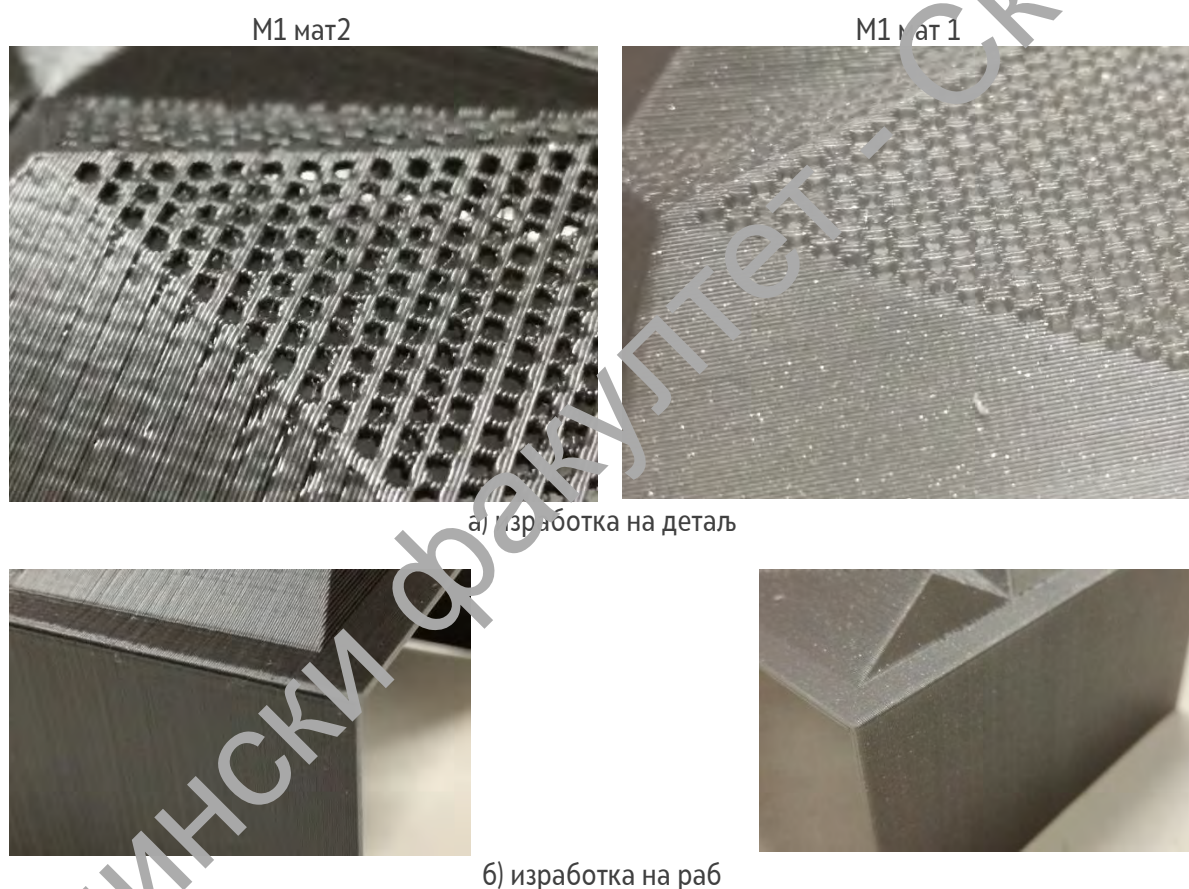


График 7-1. Споредба на четири опции според шест критериуми (со сличен исцражување)

Од прикажаното јасно е дека опцијата 3.2 се издвојува од сите три пред се бидејќи не користи потпорен материјал, но и квалитетот на површината и изработката на деталите се со добар квалитет.

### ***Приказ на изработениите делови***

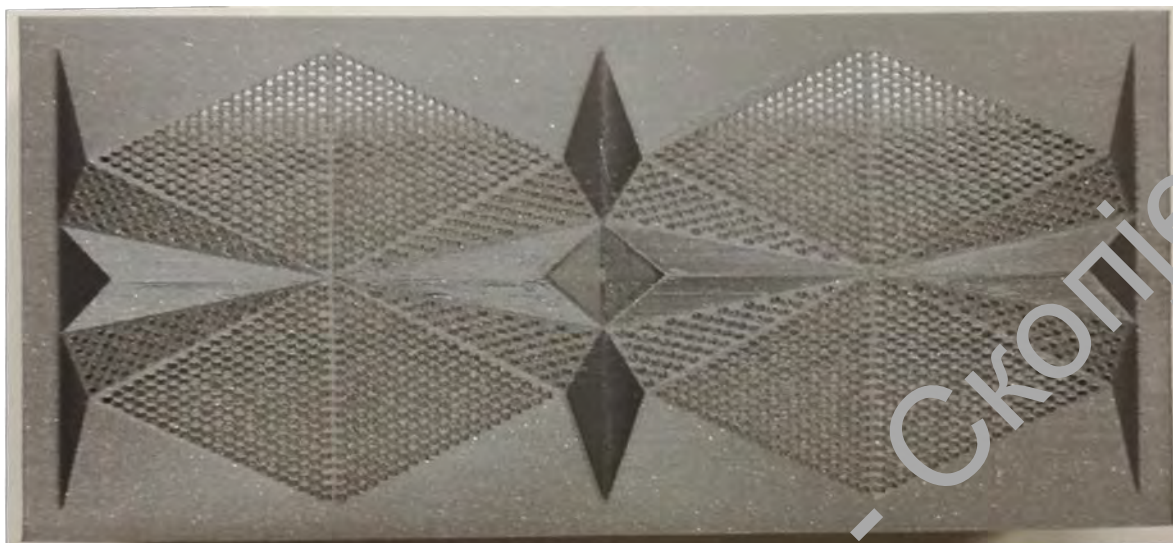
За изработка на делот е избрана опцијата 3.2, прикажана на слика 7-6, бидејќи според дефинираните критериум е оптимално решение (график 7-1). Делот е изработен на машина M1 со материјал мат 1 и мат2, според работните параметри дефинирани во поглавје 3, а резултатите се прикажани на слика 7-7.



*Слика 7-7. Детали на изработениите делови  
(сојсџвено исџражување)*

Од прикажаното на слика 7-7, евидентно е дека квалитетот на изработените детали е значително подобар кај делот на изработен со мат1. Исто така и квалитетот на изработената површина е многу подобар, слоевите се речиси незабележителни иако дебелината на работниот слој е 0,2 mm (ППИ01, ППИ06). На слика 7-8 е прикажана слика од предната страна на делот

изработен со мат1. Може да се забележи дека нема никакво отстапување во однос на симетријата на делот.



Слика 7-8. Изглед на изработениот дел  
(сојсвоено исцражување)

## **7.2. Дизајн и изработка на модел со органска форма**

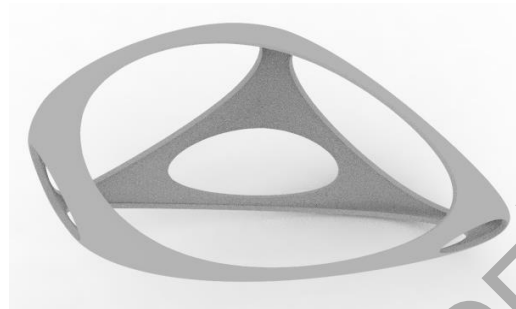
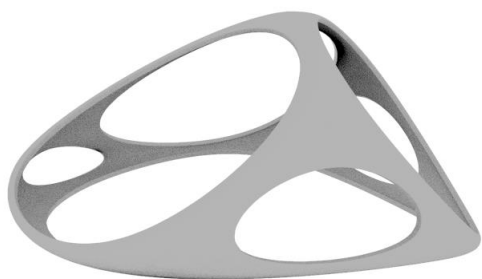
Вториот пример е на модел со органска форма во концептуална фаза на дизајнирање (ГПД01) кој има за цел испитување на можноста за изработка на дел со органска форма со ЕМ. Најголемо значење за овој дел е квалитетот на површината (ГППИ06, ГППИ08), и можноста за изработка без користење на структури за подпора (ГПД04, ГППИ12).

### ***Начин на дизајнирање***

При дизајнирањето на делот (слика 7-9) внимавано е на препораките и правилата за дизајнирање за процесот на ЕМ (глава 5). Делот е дизајниран како полигонална мрежа (ГПД09). Максималните димензии се во рамки на можностите на работната околина (ГПД01, ГПД10), а дебелината на ѕидот е 1,5 mm (ПД03-04). Дебелината на ѕидот оставена е намерно поголема од минималната вредност поради јакоста, бидејќи делот е дизајниран со многу и големи отвори.

Предизвикот со овој модел е органската форма за која треба да се најде решение како би се изработила без видлив скалест ефект (ППИ14). Дополнително, големите отвори со неправилен облик, се користат за

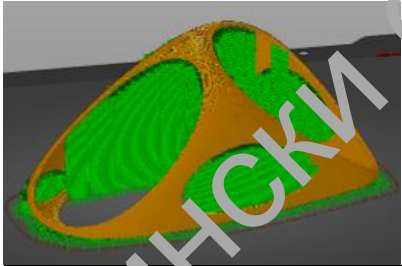
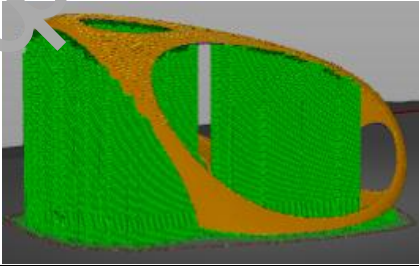
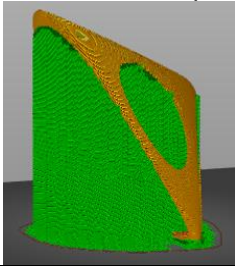
проверка на можностите за изработка на делот без користење на потпорен материјал (ГПД04).



Слика 7-9. Изглед на дизајнираниот дел (самостојно исцражување)

### Можни начини за изработка

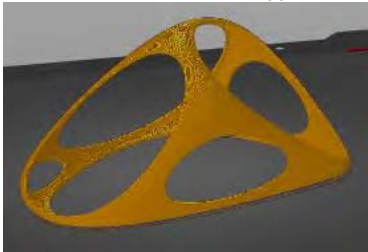

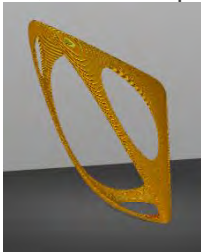
Разгледани се различни начини на изработка врз основа на неколку критериуми. Најзначајните критериуми се квалитетот на изработените детали и квалитетот на површината (ГПД03, ППИ09, ППИ14). Исто така значаен критериум е можноста за изработка без користење на структури за потпора. Притоа не треба да се занемари останатите критериуми како: времето потрошено за изработка (ГППИ06, ГППИ08, ППИ04), количината на искористен материјал (ГППИ11) и времето потрошено на доработка (ГППИ14).

а) положба еден	б) положба два	в) положба три
		
Материјал 9 m / 27 gr Време на изработка 5 h	Материјал 10 m / 29 gr Време на изработка 5,5 h	Материјал 12 m / 34,5 gr Време на изработка 6,5 h
+	+	+
Релативно кусо време на изработка.	Скалестиот ефект е помалку изразен.	Скалестиот ефект е помалку изразен.

Тешко отстранување на потпорниот материјал.  
Видливи траги по отстранување на потпорниот материјал.  
Се троши многу материјал и долго време на изработка.

Слика 7-10. Примери на различна ориентација при изработка со користење на делумна подпора (соистовено исцражување)

**Опција 1** – претставува изработка на деловите со користење на структури за потпора. Поради начинот на кој е дизајниран делот можно е делумно користење на структури за потпора (ППИ16). На овој начин отстранувањето е поедноставно (во однос на целосна потпора), се троши помалку материјал и времето за изработка на делот е пократко. Со трите различни ориентации на делот прикажани на слика 7-10, правени се обиди за изнаоѓање на оптимално решение за изработка на дел со задоволителен квалитет на површината. Од слика 7-10 може да се види дека ориентацијата влијае и на времето за изработка и потрошениот материјал (ГППИ06, ГППИ08). Примерот прикажан на третата слика (слика 7-10, в) за изработка искористува најголемо количество на материјал и најдолго време на изработка (поради поголемиот број на слоеви).

а) положба еден	б) положба два	в) положба три
		
Материјал 4 m / 11 gr Време на изработка 3,5 h	Материјал 4 m / 11 gr Време на изработка 4 h	Материјал 4 m / 11 gr Време на изработка 4 h
+	+	
Стабилноста при изработка е загарантирана. Времето на изработка е мало.	Скалестиот ефект е помалку изразен	-
-	Стабилноста на делот во процесот на изработка е доведена во прашање.	
Скалестиот ефект е изразен. Појава на раслојување, поради отсуството на потпори.	Појава на раслојување, поради отсуството на потпори Подолго време на изработка поради поголемиот број на слоеви.	

Слика 7-11. Примери на различна ориентација при изработка без користење на пошторен материјал (сојсйвено исйражување)

**Опција 2** – претставува изработка на моделот без користење на потпорен материјал (слика 7-11). На втората и третата слика (слика 7-11, б,в) поради ориентацијата на моделот се претпоставува дека ќе има добар квалитет на површината. Но, начинот на кој е дизајниран делот, доведува до проблем со стабилноста. Така што, во двата случаи ќе треба да се примени делумна стандардна или дрвовидна потпора, за да се изработи делот. Поради тоа



првиот пример (слика 7-11, а), кој се изработува без потпорен материјал изгледа како најоптимално решение за изработка на делот.

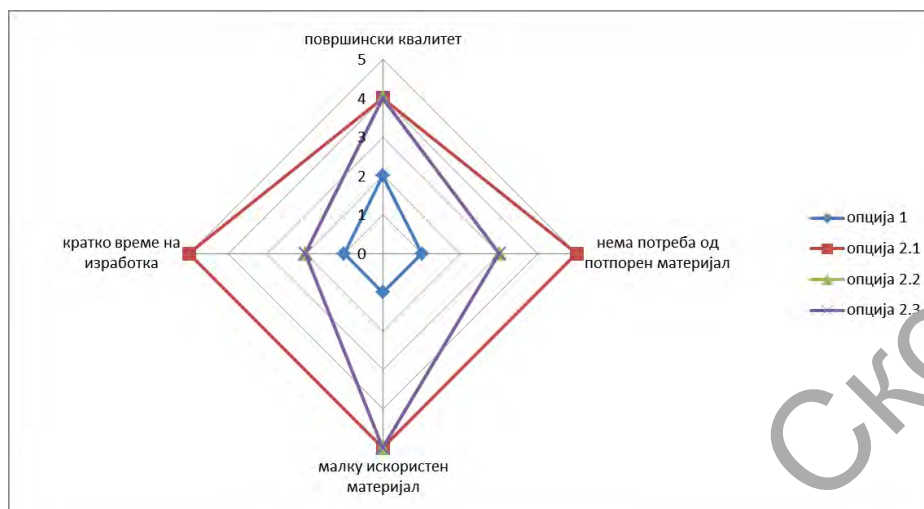


График 7-2. Спореда на четири опции според четири критериуми (сојствено истражување)

На график 7-2 е даден графички преглед на можните опции за изработка на деловите кои се прикажани погоре во текстот. Секој од критериумите е рангиран врз основа на 5 степена скала, каде 1 значи најлошо, а 5 најдобро. Од прикажаното јасно е дека опцијата 2.1 се издвојува од сите три пред сè бидејќи не користи потпорен материјал, но и квалитетот на површината и изработката на детали се со добар квалитет.



Слика 7-12. Изглед на изработениот дел (сојствено истражување)

### **Приказ на изработените делови**

Делот е изработен според положба еден на слика 7-11, на машина М1 со материјал mat2 со работните параметри од поглавје 3. Оваа положба е избрана за изработка бидејќи е најдобро оценета на график 7-2 и задоволува најмногу од правилата од поглавје 5 (ПИ1, ПИ8, ПИ9).



а) надворешни површини



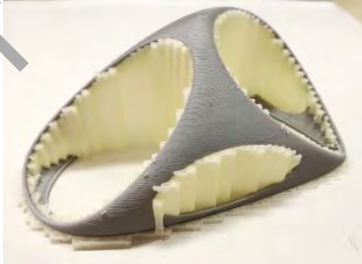
б) внатрешни површини

Слика 7-13. Изработено исцрпно парче со структури за појора од растворлив материјал (сојсвено исцражување)

Од прикажаното на слика 7-12 може да се види дека делот е изработен со сосема задоволителен квалитет на површината. Не се забележува раслојување на материјалот, кое може да се очекува кај последните слоеви.

Скалестиот ефект е воочлив на горната површина на делот, но на допир незабележлив. Скалестиот ефект во горниот дел, може да се намали со избор на помала дебелина за работниот слој во тој реон.

Делот изработен дополнително со структури за потпора на M1 меѓутоа со додаток за повеќе материјали. Така што за изработката на делот е користен материјал mat1, а за структурите за потпора растворлив материјал. Од прикажаното на слика 7-13, забележливо е дека нема разлика во квалитетот на изработените надворешни и внатрешни површини. Но за споредба на слика 7-14 е даден приказ на времето потребно за изработка и количеството на искористен материјал помеѓу модел без структури за потпора и со користени структури за потпора.

а) без структури за потпора	б) структури за потпора – дрвовидни Cura	в) со структури за потпора – растворливи во вода
		
Материјал 4 m / 11 gr Време за изработка 2 h	Материјал 3 m / 23 gr Време за изработка 4,5 h	Материјал 32 m (15 m - објект, 17m - кула) / 96,3 gr Време за изработка 12 h

Слика 7-14. Споредба на различни структури за потпора (сојсвоени испиражување)

Од изложено то може да се заклучи дека пред изработката треба да се направи навистина добра проценка дали за конкретниот модел е поважен квалитетот на површинската изработка или краткото време.

### 7.3. Дизајн и изработка на финален производ со органска форма

Третиот пример е дизајн на светилка инспирирана од дизајните на Antonio Gaudí. Органскиот дизајн на моделот целосно соодветствува со намената на технологиите на АП, поради што е и избрана технологијата на ЕМ за изработка на финалниот модел (ГПД01).

### ***Начин на дизајнирање***

При дизајнирањето на моделот внимавано е на правилата за дизајнирање за ЕМ (глава 5). Делот е дизајниран како полигонална мрежа (ГПД09) во софтверскиот пакет Маџа. Максималните димензии се во рамки на можностите на работната околина (ГПД10), а дебелината на ѕидот е 1,5 mm (ПД06). Дебелината на ѕидот оставена е намерно поголема од минималната вредност поради јакоста, бидејќи моделот е составен од два тенки зида, а во внатрешноста е шуплив. При дизајнирањето на моделот внимавано е да тоа да нема мали агли на закосување кои би го нагласиле скалестиот ефект (ГПД03, ППИ13).

Предизвикот со овој модел е да се изработи без користење на структури за потпора (ГПД04, ГППИ12), со што би се намалило времето на изработка и искористениот материјал. Дополнително, кај овој модел во одредени места би било и невозможно отстранувањето на структурите за потпора, поради недостапност. Така што вдлабнувањата со неправилен облик, се користат за проверка на можностите за изработка на делот без користење на структури за потпора (ГПД05, ПД21-23).

### ***Начин на изработка***

Моделот е коректно дизајниран (ГП10) и соодветно експортиран во stl датотека (ПД01). Моделот е пример за тоа како со дизајнот може да се анулира влијанието на скалестиот ефект. Целиот модел е во главно вертикален со мали конкавни и конвексни површини по вертикалата, што овозможува изработка без користење на структури за потпора (ГПД04, ГППИ12), а виедно овозможува добар квалитет на површината (ГППИ06). Горната површина е искосена но, искосувањето е 45° поради што скалестиот ефект е слабо изразен (ППИ13). Изоставањето на структурите за потпора (ГПД04, ГППИ12) кај овој модел е неопходно поради тоа што моделот е во внатрешноста шуплив, но и целосно затворен, така што структурите за потпора не би можеле да се извадат и би пречеле на визуелниот впечаток бидејќи би биле видливи преку релативно тенките надворешни ѕидови.

Изработката на делот е според работните параметри дефинирани во поглавје 3, при строго контролирани услови (ППИ21).

### ***Приказ на изработениот дел***

Делот е изработен на машина M1 со материјал mat2. Од прикажаното (слика 7-15) може да се види дека квалитетот на изработените површини е на високо ниво. Нема позначајни отстапувања во обликот или во геометријата.



Слика 7-15. Изглед на финалниот производ, Димов 2019

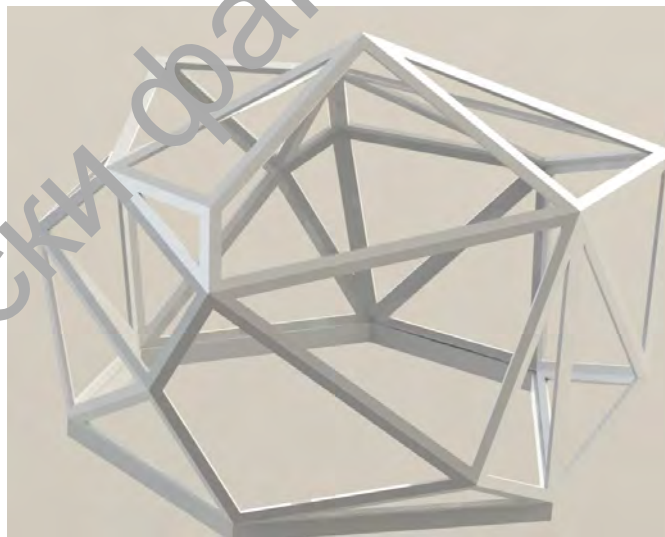
## 7.4. Дизајн и изработка на финален производ со геометриски форми

Четвртиот пример на е пример за финален производ изработен со ЕМ е еден вид на решеткаста структура, но добиена со полигонизација на волуменски модел (слика 7-16). Не е класична решеткатста структура, каде има повторување на ќелиите, туку дизајн кој потсетува.

### **Начин на дизајнирање**

При дизајнирањето на моделот внимавано е на правилата за дизајнирање за ЕМ (глава 5). Максималните димензии се во рамки на можностите на работната околина (ГПД10), а дебелината самостојните елементи со правоаголен напречен пресек со димензии 1,5x3 mm (ПД03, ПД09). Дебелината на сидот оставена е намерно поголема од минималната вредност поради јакоста, бидејќи елементите ја градат структурата на моделот (слика 7-16). Дел од елементите се со агол од 45° во однос на работната површина (ППИ13), што овозможува изработка без користење на структури за потпора.

Предизвикот со овој модел е да се изработи во еден дел, затоа е и избран да се изработува со АП односно ЕМ.



Слика 7-16. Изглед на САД моделот, Бијаноска Наќева 2017

### **Начин на изработка**

Моделот прикажан на слика 7-16 се изработува со ЕМ. Бидејќи станува збор за финален производ квалитетот на површината треба да биде добар

(ППИ09), меѓутоа поважно е јакоста целата структура (ГППИ11, ППИ12, ППИ22). Изработката на делот е направена со користење на структури за потпора (ППИ15, ППИ18), како не би дошло до раслојување на одредени елементи и со тоа, нивно ослабнување. Бидејќи станува збор за дел со тенки елементи кои може да се оштетат во процесот на отстранување на структурите за потпора, одлучено е да се користат растворливи структури за потпора (ППИ20).

### ***Приказ на изработениот дел***

Изработениот модел е прикажан на слика 7-17,а од што се забележува дека делот е сосем коректно изработен без отстапувања во формата.



а) изработен дел



б) финален изглед на делот

Слика 7-17. Изглед на финалниот производ

## 8. Заклучок

Развојот на алатка која ќе им помогне на индустриските дизајнери при дизајнирањето за АП е главна цел на оваа докторска дисертација, што е прикажано во изложувањето дадено во претходните поглавја. Претставената алатка ги организира и обединува правилата и препораките, кои би им помогнале на индустриските дизајнерите во процесот на подготовка за прототипирање и производство со АП, а се однесуваат на материјалните, геометриските и визуелните својства на деловите и склоповите. Дополнително, развиен е и референтен модел, кој во себе ги содржи клучните правила во однос на гранични вредности на машините за ЕМ и може значително да го скрати времето за сетирање и евентуално оптимирање на машината.

Во продолжение се претставени начините на реализација на поставените дополнителни цели.

### *Детална анализа на преходните истражувања во полејто на индустрискиот дизајн на производство за АП*

АП нудат низа предности во можностите за изработка на делови со сложена геометрија. Во колкава мерка се искористуваат тие можности зависи од индустриските дизајнери и нивните познавања на технологијата на АП, како и можностите за дизајнирање кои ги нудат актуелните софтверски програми. Од спроведените истражувања може да се заклучи дека примената на АП во процесот на дизајнирање е се почеста и тоа не само за изработка на прототипови туку и за изработка на крајни производи. Одредени автори одат во насока на подобрување на тековните софтверски програми или креирање на нови во насока на промена на традиционалниот начин на дизајнирање што е можно поради предностите кои ги нудат АП. Со ваквиот пристап се менува начинот на дизајнирање, но и начинот на пласирање на производот на пазарот и неговата дистрибуција до корисникот.

Сепак најбројни се истражувањата во насока креирање помош за индустриските дизајнери со што би го скратиле и забрзале процесот на дизајнирање. Тие предлагаат промена во самиот процес на дизајнирање со воведување на АП уште во концептуалната фаза и развивање на нов пристап



наречен дизајнирање за АП, по примерот на дизајн за производство (DFM) и дизајн за производство и монтажа (DFMA).

***Избор и евалуација на карактеристиките на конкретен процес од АП со цел да се дефинираат неговите можности и ограничувања.***

ЕМ е избран како најдостапен и најшироко распространет процес, особено помеѓу таргетираните корисници - индустриските дизајнери и затоа е детално анализиран и разработен. Фокусот е ставен на машините за ЕМ со отворен пристап, бидејќи се доста користени, а до сега нема спроведено истражување од овој тип за нив. Најголемото ограничување, а воедно и најголемата предност кај овој тип на машини е тоа што корисникот треба сам да ги прилагоди сите работни параметри. Тоа за корисниците-почетници може да биде проблем и да создава одбивност. Со алатката (препораките, правилата и референтниот модел) која се предлага со оваа докторска дисертација таа бариера треба лесно да се надмине. Со залагавање на принципот на работење на процесот на ЕМ и користената машина за ЕМ, може да се изработат делови со сосема солиден квалитет.

***Дизајн на експериментални примероци***

Преку современи софтверски пакети за параметарско моделирање, дизајнирани се 16 испитни модели, кои треба да дадат одговор на клучните проблеми со кои се соочуваат индустриските дизајнери при примената на АП. При дизајнот е внимавано на еднозначноста на проблемите кои се третираат со секој испитен модел, како резултатите би биле валидни и општокорисни.

***Спроведување на анализа и синџеза на експерименталните резултати***

Параметарски дизајнираните испитни модели се изработени според точно дефинирани работни параметри на две машини со различни материјали. Добиените резултати се анализирани и споредувани врз основа на геометриските отстапувања на профил и облик и од визуелен аспект. Според анализата на резултатите, утврдено е дека машините за ЕМ со отворен пристап не заостануваат во квалитетот на изработката во однос на поскапите машини за ЕМ.

### ***Развој на детална листа со препораки и правила за дизајнирање за АП***

Врз основа на спроведената анализа, развиена е детална листа на препораки и правила за дизајнирање за АП, односно ЕМ. Правилата воглавно се однесуваат на конкретни индикатори кои треба да се следат во процесот на дизајнирање со цел да се дизајнира модел кој успешно ќе се изработи со користење на машина за ЕМ. Дополнително се дадени и поопшти препораки и правила кои не се директно поврзани со процесот на дизајнирање, а имаат влијание врз квалитетот на изработената површина. Тука спаѓаат поставеноста и ориентацијата на делот, избор на работни параметри на машината, како: дебелина на работен слој, дијаметар на бризгалка, процент и начин на исполнување со материјал и работни брзини.

### ***Класификација на правилата за изработка со АП***

За правилата да бидат покорисни за корисникот-индустриски дизајнер, тие се групирани во категории, за полесно да се дава до нив. Во првата група се генералните препораки, кои во суштина се општи правила и кои се препорачува да се почитуваат за повеќето форми на делови. Втората група се специфични правила кои влијаат како ограничувања на параметрите при дизајнирањето на формата. Во оваа група се сместени правила кои се однесуваат на специфични геометриски елементи и нивните дозволени вредности, како: минимална дебелина на ѕид, максимална должина на испуст и премостување. Во групата на специфични правила е и подгрупата на правила за изработка. Во оваа група не се сместени сите правила за изработка, туку само оние кои влијаат на квалитетот на изработеното парче, особено на квалитетот на површините.

### ***Дизајн на референтен модел***

Референтниот модел треба да им помогне на индустриските дизајнери во брзо тестирање на машината и започнување со работа. Дизајниран е така што ги опфаќа главните елементи кои се проблематични за изработка со ЕМ, како: групирани тенки елементи со различни димензии и агли, премостувања, елементи под агол. Дополнително, при изработката не се користат структури за потпора. Дизајнот на референтниот модел е уникатен, забавен и нагледен, а може да се користи и како нажит.

### **Валидација на препораките и правилата за дизајнирање за АП**

Процесот на валидација служи за проверка на функционалноста на правилата за дизајнирање за АП во реално опкружување односно на реални примери. Два примера кои се користени во процесот на валидација се дизајнирани со следење на правилата, а изработени на машина за ЕМ со отворен пристап. Со успешно изработените парчиња се потврдува успешноста на препораките и правилата.

Со заокружување на истражувањето кое е дел од докторската дисертација креирани се нови знаења во полето на индустрискиот дизајн за АП и ЕМ. Новите знаења се:

- Предности и предизвици за индустриските дизајнери во користење на ЕМ машини со отворен пристап.
- Креирање на методологија за развој на правилата за дизајнирање со ЕМ, применлива на сите процеси од технологиите на АП.
- Дизајн на испитни модели кои се основа за експерименталните истражувања.
- Детална анализа на отстапувањата во профилот и обликот на едноставни геометрии при изработка со машини за ЕМ со отворен пристап.
- Визуелна анализа на парчиња со едноставна и сложена геометрија, изработени на машини за ЕМ со отворен пристап.
- Развој на правила за дизајнирање за процесот на ЕМ.
- Проверка на применливоста на развиените правила за дизајнирање за процесот на ЕМ преку конкретни реални примери.
- Развој на референтен модел за дизајнирање со машини за ЕМ со отворен пристап.

На големи проблеми во однос на квалитетот на површината при изработката на делови со ЕМ се скалестиот ефект и раскончувањето. Со воведувањето на овие нови технологии, треба да се размисли како да се влијае врз менување на начинот на креирање и дизајнирање на формите, за карактеристиките на АП да се искористат поцелосно и да станат предност. Дури и оние карактеристики кои ги заемаме за негативни, како што се скалестиот ефект и раскончувањето може да се земат како предизвици и да

станат составен дел од самиот дизајн. На овој начин деловите изработени со ЕМ ќе бидат единствени.

Се препорачува користењето на ЕМ за изработка на делови во концептуалната фаза, а во одредени случаи и за изработка на финални делови, особено поединечни и во мали серии. Најголемата пречка за масовно користење на ЕМ релативно долгото време за изработка, осредната прецизност, како и видливото отстапувањето во квалитетот на површините и мерките (за машините за ЕМ тоа е  $\pm 0,1$  mm, додека за машините за ЕМ со отворен пристап тоа е  $\pm 0,5$  mm). Со спроведените експериментални истражувања утврдено е дека сите изработените делови имаат отстапувања во рамките на  $\pm 0,1$  mm, освен самостојните цилиндрични елементи.

## **8.1 Препораки за идни истражувања**

---

Во понатамошните истражувања треба да се прошири листата со препораки и правила на склопови. Исто така, треба да се направат напори овие препораки и правила да се постават на веб, како би биле достапни и општо корисни и да се овозможи дополнување со нови правила кои евентуално би произлегле од корисниците, производителите и други. Дополнително, врз база на правилата може да се креира и интерактивна алатка, така што преку едноставни и интуитивни чекори дизајнерот би бил наведуван правилно да го дизајнира делот од прво.

Треба да се најдат и други начини (покрај презентираната алатка) за продлабочување на знаењето на индустриските дизајнерите за ЕМ и воопшто АП, како би можеле во целост да ги искористат нивните предности. На овој начин, технологијата нема да претставува пречка туку можност за креирање на нешто ново и различно. Ова потенцијално може да доведе до креирање на нови производи кои до сега не постоеле како такви, или пак примена на АП во области во кои досега не било замисливо.

## Прилог 1 – користени машини и материјали при експерименталните истражувања

За изработка на експерименталните примероци користени се две машини за ЕМ, чии спецификации се дадени во продолжение.

### Машина 1 (M1) – Prusa Mk3

Технологија на работа	EM
	Marlin1.1.6.2 firmware
Димензии на машината	550×400×500 mm
Работни димензии	250×210×210 mm
Брзина на работење	200+ mm/s
Материјал	1,75 mm (PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Laywood, Laybrick, Nylon, Bamboofill, Bronzefill, ASA, T-Glase, Carbon-fibers filaments, Polycarbonates)
Дебелина на слој	0,05 – 0,35 mm
Дијаметар на бризгалка	0,4 mm
Температура на бризгалката	300 °C
Температура на работната површина	120 °C
	Автоматско нивелирање на работната површина
Додаток	Multi material – додаток за работа со 5 материјали истовремено

### Машина 2 (M2) – Creality Ender 3

Технологија на работа	EM
	Marlin1.1.6.2 firmware
Димензии на машината	440×410×465 mm
Работни димензии	220×220×250 mm
Брзина на работење	180mm/s
Материјал	1,75mm (PLA, TPU, ABS)
Дебелина на слој	0,1 – 0,4 mm
Прецизност на изработка	±0.1mm
Дијаметар на бризгалка	0,4 mm
Температура на бризгалката	255°C
Температура на работната површина	110°C

**Материјал 1 (маџ 1) - Prusament PLA**

Prusament е PLA материјал кој се прави во Prusa, така што е оптимизиран да работи со нивните машини и се очекува квалитетот на изработените делови да биде незаменлив. Материјалот е со дебелина 1,75 mm изработен со прецизност од  $\pm 0.02$  mm.

Тип	PLA
Дијаметар	1,75 $\pm$ 0.02 mm
Тежина	1 kg
Точка на топење	190 - 220 °C
Граница на течење	57.4 $\pm$ 0.4 MPa
Температура на топлинска деформација	55 °C
Сила на удар	12,7 $\pm$ 0,7 KJ/m <sup>2</sup>

**Материјал 2 (маџ 2) - Gembird PLA**

Тип	PLA
Дијаметар	1,75 $\pm$ 0.05 mm
Тежина	1 kg
Точка на топење	190 - 220 °C
Граница на течење	45 MPa
Температура на топлинска деформација	50 °C
Сила на удар	5 KJ/m <sup>2</sup>

**Материјал 3 (маџ 3) - Gembird PLA Plus**

Тип	PLA +
Дијаметар	1,75 $\pm$ 0.05 mm
Тежина	1 kg
Точка на топење	195 - 235 °C
Граница на течење	72 MPa
Температура на топлинска деформација	47 °C
Сила на удар	5 KJ/m <sup>2</sup>

## Литература

---

- Adam, G.A., 2015. Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Universität Paderborn.
- Adam, G.A.O., Zimmer, D., 2014. Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 7, 20–28.
- Adam, G.A.O., Zimmer, D., 2015. On design for additive manufacturing: Evaluating geometrical limitations. Rapid Prototyp. J. 21, 662–670.
- Alexander, P., Allen, S., Dutta, D., 1998. Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. Comput. Des. 30, 343–359.
- Anitha, R., Arunachalam, S., Radhakrishnan, P., 2001. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. J. Mater. Process. Technol. 118, 385–388.
- Ariadi, Y., Campbell, R.I., Evans, M.A., Graham, I.J., 2012a. Computer Aided Consumer Design. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, pp. 238–249.
- Ariadi, Y., Campbell, R.I., Evans, M.A., Graham, I.J., 2012b. Combining additive manufacturing with computer aided consumer design 238–249.
- Ariadi, Y., Rennie, A.E.W., 2018. Templates For Consumer Use In Designing Customised Products. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. pp. 450–458.
- Armillotta, A., 2006. Assessment of surface quality on textured FDM prototypes. Rapid Prototyp. J. 12, 35–41.
- Atkinson, P., Dean, L.T., 2003. Future Factories: Design work by Lionel Theodore Dean. In: Touring Exhibition, 17 Oct -21 Nov 2003; 1 Dec 2003-16 Jan 2004; 23 Jan-13 Feb 2004, Barnsley; Halifax; Huddersfield.
- Atkinson, P., Unver, E., Dean, L.T., 2004. 'Future Factories': Supportive Technologies As Creative Processes. In: International Design Conference - Design 2004. Dubrovnik, Croatia, pp. 99–104.
- Azman, A.H., Vignat, F., Villeneuve, F., 2014. Evaluating Current CAD Tools Performances in the Context of Design for Additive Manufacturing. In: Proceedings of Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing. Toulouse, France.

- Bellini, A., Güçeri, S., 2003. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyp. J.* 9, 252–264.
- Bernard, A., 1999. Knowledge based system for the choice of rapid prototyping process. In: *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*. pp. 39–45.
- Bertoldi, M., Yardimci, M.A., Pistor, C.M., Güceri, S., Sala, G., 1998. Mechanical characterization of parts processed via fused deposition. In: *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*. pp. 557–565.
- Bin Maidin, S., Campbell, R.I., Pei, E., 2012. Development of a Design Feature Database to Support Design for Additive Manufacturing (DfAM). *Assem. Autom.* 32, 235–244.
- Binnard, M.B., 1999. *Design by composition for Rapid Prototyping*. Stanford University.
- Boschetto, A., Bottini, L., 2015. Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing. *J. Mater. Process. Technol.* 219, 181–192.
- Boschetto, A., Bottini, L., 2016. Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling Robot. *Comput. Integr. Manuf.* 37, 103–114.
- Burton, M.J., 2005. *Design for Rapid Manufacture: Developing an Appropriate Knowledge Transfer Tool for Industrial Designers*. Loughborough University.
- Byun, H.S., Lee, K.H., 2006. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 22, 69–80.
- Campbell, R.I., 1998. *Using Feature-based Product Modelling to Integrate Design and Rapid Prototyping*. University of Nottingham.
- Campbell, R.I., Martorelli, M., Lee, H.-S., 2002. Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *Comput. Des.* 34, 717–725.
- Case, K., Graham, I., Wood, R., 2004. Shape modification using genetic algorithms. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. pp. 827–832.
- Chang, S., Li, H., Ostrout, N., Jhuria, M., 2015. Geometric Element Test Targets for Visual Inference of a Printer's Dimension Limitations. 2015 *Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symposium* 1491–1503.
- Chu, C., Graf, G., Rosen, D.W., 2008. Design for additive manufacturing of cellular



- structures. *Comput. Aided Des. Appl.* 5, 686–696.
- Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S., 2010. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. World Scientific, River Edge.
- Cruz Sanchez, F.A., Boudaoud, H., Muller, L., Camargo, M., 2014. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing. *Virtual Phys. Prototyp.* 9, 151–167.
- Dean, L.T., 2009. *Futurefactories: The application of random mutation to three dimensional design*. The University of Huddersfield.
- Dean, L.T., Atkinson, P., Unver, E., 2005. Evolving individualised consumer products. In: *6th International Conference of the European Academy of Design*. University of the Arts, Bremen, pp. 1–19.
- Decker, N., Yee, A., 2015. A simplified benchmarking model for the assessment of dimensional accuracy in FDM processes. *Int. J. Rapid Manuf.* 5, 145.
- Djokikj, J., Jovanova, J., 2019. DfAM of Nonlinear Cellular Flexible Structures. In: *Proceedings of ASME 2019 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS2019*. Louisville, KY, USA.
- El-Katatny, I., Masood, S.H., Morsi, Y.S., 2010. Error analysis of FDM fabricated medical replicas. *Rapid Prototyp. J.* 16, 36–43.
- Es-Said, O.S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., Pregger, B.A., 2000. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Mater. Manuf. Process.* 15, 107–122.
- Evans, M.A., 2002. *The Integration of Rapid Prototyping within Industrial Design Practice*. Loughborough University.
- Filippi, S., Cristofolini, L., 2007. The Design Guidelines (DGLs), a knowledge-based system for industrial design developed accordingly to ISO-GPS (Geometrical Product specifications) concepts. *Res. Eng. Des.* 18, 1–19.
- Fischer, T., 2008. *Designing (tools (for designing (tools (for ...))))*. RMIT University.
- Frank, D., Fadel, G., 1995. Expert system-based selection of the preferred direction to build for rapid prototyping processes. *J. Intell. Manuf.* 6, 339–345.
- Gausemeier, I.J., 2011. *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Analysis of Promising Industries*. Paderborn, Germany.
- Geraedts, J., Doubrovski, Z., Verlinden, J.C., Stellingwerff, M.C., 2012. Three Views on Additive Manufacturing: Business, Research, and Education. In: *Proceedings of TMCE 2012*. Karlsruhe, Germany.

- Ghazy, M.M., 2012. Development of an Additive Manufacturing Decision Support System (AMDSS). Newcastle University.
- Gibson, I., Goenka, G., Narasimhan, R., Bhat, N., 2010a. Design rules for additive manufacture. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Austin, TX, pp. 705–716.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2015. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, Second Edi. ed. Springer Science+Business Media, New York.
- Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2010b. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, 1st ed. ed. Springer, New York, NY.
- Hague, R.J.M., Campbell, R.I., Dickens, P.M., 2003. Implications on design of rapid manufacturing. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, pp. 25–30.
- Hossain, M.S., Espalin, D., Ramos, J., Perez, M., Wicker, R., 2014. Improved Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling-Manufactured Parts Through Build Parameter Modifications. *J. Manuf. Sci. Eng.* 136.
- Hossain, M.S., Ramos, J., Espalin, D., Perez, M., Wicker, R., 2013. Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. pp. 131–139.
- Hu, K., Jin, S., Wang, C.C., 2015. Support slimming for single material based additive manufacturing. *CAD Comput. Aided Des.* 65, 1–10.
- Jiang, J., Xu, X., Stinger, J., 2018. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *J. Manuf. Mater. Process.* 2, 64.
- Johnson, W.M., Rowell, M., Deason, B., Eubanks, M., 2011. Benchmarking Evaluation of an Open Source Fused Deposition Modeling Additive Manufacturing System. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, pp. 197–211.
- Kamrani, A.K., Nasr, E.A. (Eds.), 2006. Rapid Prototyping: Theory and Practice. Springer Science+Business Media.
- Kantaros, A., Karalekas, D., 2013. Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process. *Mater. Des.* 50, 44–50.

- Kattethota, G., Henderson, M., 1998. A visual tool to improve layered manufacturing part quality. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. pp. 327–334.
- Khabazi, Z., 2012. Generative Algorithms using Grasshopper, version 2. ed. AA on-line book.
- Knoop, F., Schoepner, V., 2015. Analysis and Optimization of the Dimensional Accuracy for FDM Parts Manufactured with ABS-M30. In: Proceedings of the ASPE 2015 Spring Topical Meeting Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing.
- Kolarevic, B. (Ed.), 2003. Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing. Spon Press, Taylor & Francis, New York and London.
- Lanzotti, A., Del Giudice, D.M., Lepore, A., Staiano, G., Martorelli, M., 2015. On the geometric accuracy of RepRap open-source three dimensional printer. J. Mech. Des. Trans. ASME 137, 1–8.
- Lee, C.S., Kim, S.G., Kim, H.J., Ahn, S.-H., 2007. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. J. Mater. Process. Technol. 187–188, 627–630.
- Lee, K.W., 2013. Full Customisation, Quick Performance Estimation and Optimisation of Parametric Solid and Design. RMIT University.
- Lieneke, T., Adam, G.A., Lauders, S., Knoop, F., Josupeit, S., Delfs, P., Funke, N., Zimmer, D., 2015. Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, pp. 371–384.
- Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G.A.O., Zimmer, D., 2016. Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling. Procedia CIRP 43, 286–291.
- Livesu, M., Ebero, S., Martínez, J., Lefebvre, S., Attene, M., 2017. From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline. Comput. Graph. Forum 37, 537–564.
- Luis Perez, C.J., Vibancos, J., Sebastian, M.A., 2001. Surface roughness analysis in layered forming processes. Precis. Eng. J. Int. Soc. Precis. Eng. Nanotechnol. 25, 1–12.
- Maher, A., 2011. Designing the design: establishing boundary conditions for designing parametrically. RMIT University.

- Mahmood, S., Talamona, D., Goh, K.L., Qureshi, A.J., 2016. Fast Deviation Simulation for 'Fused Deposition Modeling' Process. In: *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., pp. 327–332.
- Micevska, J., Kandikjan, T., 2016. PERSONALISATION IN DESIGN THROUGH NEW TECHNOLOGICAL ACHIEVEMENT. *South East Eur. J. Archit. Des.* 2016, 1–5.
- Mohamed, O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L., 2015. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.* 3, 42–53.
- Munguía Valenzuela, F.J., 2009. RMADS: Development of a concurrent Rapid Manufacturing Advice System. *Universitat Politecnica de Catalunya*.
- Nadiyapara, H.H., Pande, S., 2017. A Review of Variable Slicing in Fused Deposition Modeling. *J. Inst. Eng. Ser. C* 98, 387–393.
- Onwubolu, G.C., Rayegani, F., 2014. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. *Int. J. Manuf. Eng.* 2014, 1–17.
- Panda, S.K., Padhee, S., Sood, A.K., Mahapatra, S.S., 2009. Optimization of Fused Deposition Modelling (FDM) Process Parameters Using Bacterial Foraging Technique. *Intell. Inf. Manag.* 1, 89–97.
- Pandey, P.M., Reddy, N. V., Dhande, S.C., 2003. Real time adaptive slicing for fused deposition modelling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43, 61–71.
- Pena De Leon, A., 2014. Separation of concerns: strategies for complex parametric design modelling.
- Pham, D.T., Dimov, S.S., 2003. Rapid prototyping and rapid tooling - the key enablers for rapid manufacturing. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Engineering Sci.* 217, 1–23.
- Ponche, R., Hascoët, J.-y., Kerbrat, O., Mognol, P., 2012. A new global approach to design for additive manufacturing. *Virtual Phys.* 7, 93–105.
- Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., Hascoët, J.Y., 2014. A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 30, 389–398.
- Raut, S., Jatti, V.K.S., Khedkar, N.K., Singh, T.P., 2014. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts. In: *Procedia Materials Science*. Elsevier B.V., pp. 1625–1630.
- Redwood, B., Schöffner, F., Garret, B., 2017. *The 3D Printing Handbook* -

Technologies, design and applications, 3D Hubs.

Reiner, T., Lefebvre, S., 2016. Interactive modeling of support-free shapes for fabrication. Euro-Graphics.

Rias, A.L., Bouchard, C., Segonds, F., Abed, S., 2016. Design for additive manufacturing: A creative approach. Proc. Int. Des. Conf. Des. DS 84, 411–420.

Rosen, D.W., 2007. Design for additive manufacturing: A method to explore unexplored regions of the design space. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, pp. 402–415.

Rubio, R., Martin-Laguna, S., 2010. New Geometries and Additive Manufacturing Design Tools.

Ruiz-Huerta, L., Ortega-Rodriguez, A., Caballero-Ruiz, A., 2014. RELATION BETWEEN TIP SIZE, DEPOSITION SPEED AND ROUGHNESS IN FDM TECHNOLOGY.

Saqib, S., Urbanic, J., 2012. An Experimental Study to Determine Geometric and Dimensional Accuracy Impact Factors for Fused Deposition Modelled Parts. Enabling Manuf. Compet. Econ. Sustain. 295–298.

Shubham, P., Sikidar, A., Chand, T., 2016. The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling. Key Eng. Mater. 706, 65–67.

Singh, R., 2013. Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components. Rapid Prototyp. Manuf. Conf. 1, 58–63.

Smith, P., Rennie, A., 2010. Computer aided material selection for additive manufacturing materials. Virtual Phys. Prototyp. 5, 209–213.

Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., 2009. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. Mater. Des. 30, 4243–4252.

Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., 2010. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. Mater. Des. 31, 287–295.

Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., 2012. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. J. Adv. Res. 3, 81–90.

Sun, Q., Rizvi, G.M., Bellehumeur, C.T., Gu, P., 2008. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyp.

J. 14, 72–80.

- Taufik, M., Jain, P.K., 2016. A Study of Build Edge Profile for Prediction of Surface Roughness in Fused Deposition Modeling. *J. Manuf. Sci. Eng.* 138, 061002.
- Teitelbaum, G.A., Schmidt, L.C., Goer, Y., 2009. Examining potential design guidelines for use in fused deposition modeling to reduce build time and material volumen. In: *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009*. San Diego, CA, pp. 1–10.
- Thomas, D., 2009. *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*. University of Wales Institute.
- Thompson, M.K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R.I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., Martina, F., 2016. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65, 737–760.
- Thrimurthulu, K., Pandey, P.M., Reddy, N.V., 2004. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 44, 585–594.
- Unver, E., Atkinson, P., Marshall, J., 2006. Automake physics: Random craft production. *Comput. Aided. Des. Appl.* 5, 58–65.
- Urbanic, R.J., Hedrick, R., 2016. Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex Components Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex ABSTRACT 4360.
- Vasudevarao, B., Natarajan, D.P., Henderson, M., Razdan, A., 2000. Sensitivity of RP Surface Finish to Process Parameter Variation. In: *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*. Austin, TX, pp. 251–258.
- Vayre, B., Vignac, F., Villeneuve, F., 2012. Designing for additive manufacturing. In: *Procedia CIRP*. pp. 632–637.
- Wang, C.C.L., Hui, K.C., Tong, K.M., 2007. Volume parameterization for design automation of customized free-form products. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 4, 11–21.
- Wang, T.-H., 2012. *Customizing Pattern-Based Tessellation for NURBS Surface Reconstruction with Irregular Boundary Conditions*. Carnegie Mellon University.
- Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R.K., Harik, R., 2014. Evaluating the design for

additive manufacturing: A process planning perspective. In: Procedia CIRP. Elsevier B.V., pp. 144–150.

Ziemian, C.W., Crown III, P.M., 2001. Computer aided decision support for fused deposition modeling. Rapid Prototyp. J. 7, 138–147.

Кочов, А., 2015. Технологија на брзи прототипови, модели и алати. Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје.

Машински факултет - Скопје

***Инџернеј сѝрани***

<https://3dsystems.com/blog/foc> (пристапено на 5.8.2019)

<https://creality.com/> (пристапено на 20.10.2019)

<https://gembird.com/> (пристапено на 20.10.2019)

<https://materialise.com/en/mgx> (пристапено на 5.8.2019)

<https://n-e-r-v-o-u-s.com/> (пристапено на 5.8.2019)

<https://prusament.com/> (пристапено на 20.10.2019)

<https://shop.prusa3d.com/> (пристапено на 20.10.2019)

Машински факултет - Скопје