



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Слободан Б. Малбашић

МОДЕЛ ТРОШКОВА ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ АДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА

докторска дисертација

Крагујевац, 2026



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING

Slobodan B. Malbašić

**COST MODEL FOR ADDITIVE MANUFACTURING
TECHNOLOGY**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2026

Аутор
Име и презиме: Слободан Б. Малбашић
Датум и место рођења: 12.08.1975. године, Сремска Митровица
Садашње запослење: Управа за одбрамбене технологије, Сектор за материјалне ресурсе, Министарство одбране Републике Србије
Докторска дисертација
Наслов: Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама
Број страница: 169
Број слика: 57
Број библиографских података: 158
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК): Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент
Ментор: др Александар Ђорђевић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Број и датум одлуке Већа универзитета о прихватању теме докторске дисертације: IV-04-381/5 од 22.05.2024. године

ЗАХВАЛНОСТ

Ова докторска дисертација је настала као резултат рада у оквиру Тима за адитивну производњу на Војнотехничком институту, Управе за одбрамбене технологије, Сектора за материјалне ресурсе, Министарства одбране Републике Србије.

Желим да се захвалим ментору, проф др Александру Ђорђевићу, на несебичној подршци, конструктивним саветима и предлозима током израде ове дисертације, као и на свим до сада објављеним заједничким радовима.

Посебну захвалност желим да упутим и проф др Богдану Недићу за препознавање значаја предложене теме, датих смерница у кључним тренуцима развоја идеје и предлога да се иста ради у оквиру производног машинства, чиме је успешно спојен теоријски и истраживачки део са пословним сегментом.

Захвалност упућујем и драгим колегама из Управе за одбрамбене технологије, Војне Академије и ФОН-а у Београду, посебно менаџменту, колегама сарадницима и експертима са Војнотехничког института на свесрдној помоћи у извођењу експерименталног дела, заједничким анализама и тумачењима резултата и објављеним радовима. Унапред се радујем наставку сарадње и новим изазовима које ћемо заједно остваривати.

Супрузи Снежани на целокупној подршци да истрајем у својим намерама и замислима, разумевању за време које сам посветио науци и изради ове дисертације.

Захваљујем се оцу, мајци и сестри на разумевању али и константној подршци и вери у мој успех.

Био бих неизмерно захвалан и задовољан ако би колеге и студенти наставили даља истраживања на идејама презентованим у овој дисертацији.

У Крагујевцу,

2026. године

Слободан Малбашић

РЕЗИМЕ

Глобална конкуренција на светском тржишту захтева бржи и економичнији производни процес, већу персонализацију производа модерног дизајна, бољег квалитета и веће софистицираности. Компаније траже нова решења и производне технологије за испуњавање ових захтева. Адитивне производне технологије (АТ) достигле су потребан ниво технолошке зрелости да исте могу бити разматране као одговор на постављене захтеве.

Кроз процес сазревања АТ су превазишле своју првобитну намену брзе израде прототипа и малих серија. Тренутни трендови указују на све већу заступљеност АТ у серијској производњи првенствено сложенијих и комплекснијих делова.

На овом развојном путу још увек постоје одређене препреке које успоравају примену АТ као што су трошкови везани за производни процес (трошкови набавке машина, материјала), слаба конзистентност и поновљивост производног процеса, недостатак у примени напредних технологија за контролу процеса, потреба за едукацијом адекватног кадра, недостатак софтверских решења за интеграцију свих фаза у производном процесу (од фазе пројектовања до фазе постпроцесинга).

Главна тежиште у овој дисертацији је усмерено на анализу трошкова производње металних делова адитивном технологијом спајања металног праха ласером Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). На основу анализе до сада развијених модела трошкова, предложен је нови свеобухватнији модел трошкова и развијено је софтверско решење предложеног модела.

Дисертација разматра и могућност оптимизације трошкова, анализирано је неколико сценарија оптимизације укључујући и истовремену тополошку оптимизацију и оријентацију делова током фазе израде.

Такође, у дисертацији је предложен и оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије. Предложени оквир садржи и објашњава следеће активности: редизајн дела, тополошка оптимизација и FEM анализа, креирање алтернативних оријентација (АО) и избор оптималне оријентације (ОО) применом метода вишекритеријумске оптимизације.

Предложени оквир за планирање процеса и модел трошкова тестирани су кроз студију случаја и упоредну анализе производње одабраног дела применом изабране АТ и традиционалним производним техникама. Резултати су показали да се применом квантитативних и оптимизационих метода и техника, кроз адекватан оквир за планирање и производњу делова, може обезбедити економичан и ефикасан процес који као крајњи излаз има производ захтеваних механичких карактеристика и потребног нивоа квалитета.

Кључне речи: адитивне технологије (АТ), L-PBF метода, тополошка оптимизација, алтернативна и оптимална оријентација, MCDM технике.

ABSTRACT

Global competition in the world market requires faster and more economical production processes, greater personalization of products with modern design, better quality and greater sophistication. Companies are looking for new solutions and production technologies to meet these demands. Additive manufacturing technologies (ATs) have reached the necessary level of technological maturity to be considered as an answer to the set requirements.

Through the maturation process, ATs have surpassed their original purpose of rapid prototyping and small series production, and current trends indicate an increasing presence of ATs in serial production primarily for more complex parts.

On this development path, there are still obstacles that continue to slow down the implementation of AT like the costs related to the production process (costs of purchasing machines, materials, etc.), poor consistency and repeatability of the additive manufacturing production process, lack in application of advanced control technologies, the need for personnel education, lack of software solutions for the integration of all phases of the production process (from the design phase to the post-processing phase).

The main focus of this dissertation is on the analysis of the costs of manufacturing metal parts using the additive technology known as Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Based on the analysis of the cost models developed so far, a new, more comprehensive cost model is proposed and a software solution is developed.

This dissertation also considers the possibility of cost optimization and in this regard several scenarios were considered including the simultaneous application of topological optimization and part orientation during production process.

Also, the dissertation proposes a framework for optimal planning of the additive manufacturing process, which consists of the design phase and the production phase. Additionally, the activities within each of these phases are discussed and explained: part redesign, topological optimization and FEM analysis, creation of alternative build orientations (ABO) and selection of optimal build orientation (OBO) using MCDM methods.

The proposed process planning framework and cost model were tested through a case study and comparative analysis of the production of a selected part using the L-PBF and traditional manufacturing techniques. The results showed that by applying quantitative and optimization methods and techniques, through an adequate framework for planning and manufacturing metal parts using L-PBF additive technology, an economical and efficient process can be provided, which as the final output has a products with the required mechanical characteristics and quality level.

Key words: additive manufacturing, L-PBF, topological optimization, alternative and optimal build orientation, MCDM.

САДРЖАЈ

СПИСАК СЛИКА	vii
СПИСКА ТАБЕЛА.....	x
СПИСАК СКРАЋЕНИЦА.....	xii
1. УВОД.....	1
1.1 ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА.....	1
1.2 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ У ИСТРАЖИВАЊУ	3
1.3 МЕТОДЕ КОЈЕ ЋЕ СЕ ПРИМЕЊИВАТИ У ИСТРАЖИВАЊУ	4
1.4 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА	5
1.5 ОКВИРНИ САДРЖАЈ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ	5
2. ПРОИЗВОДНИ ПРОЦЕСИ КЛАСИЧНЕ И АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ - ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА	7
2.1 ПРОИЗВОДНИ ПРОЦЕСИ И МЕТОДЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПРОЦЕСА.....	7
2.1.1 Пројектовање производа и процеса	7
2.1.2 Методе оптимизације производних процеса.....	11
2.2 ОДНОС КЛАСИЧНЕ И АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ	15
2.3 РАЗЛИКЕ ИЗМЕЂУ КЛАСИЧНИХ И АДТИВНИХ ПРОИЗВОДНИХ ТЕХНОЛОГИЈА.....	16
2.4 ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ КЛАСИЧНЕ И АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ И ОПТИМАЛНИ СЦЕНАРИО ПРОИЗВОДЊЕ.....	18
2.4.1 Економски аспекти класичне производње.....	18
2.4.2 Економски аспекти адитивне производње	19
2.4.3 Економски оптимални сценарио производње.....	20
2.5 ПРЕДНОСТИ У ПРИМЕНИ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА	222
2.6 МОГУЋИ ПУТЕВИ УСВАЈАЊА АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА	23
3. КОНЦЕПТ АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ.....	25
3.1 ОСНОВНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ.....	25
3.2 МАМ (METAL ADDITIVE MANUFACTURING) - ПРОИЗВОДЊА МЕТАЛНИХ ДЕЛОВА АДТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА.....	27
3.3 ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК ИЗРАДЕ ДЕЛОВА ОД МЕТАЛА ПРИМЕНОМ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ (ЛАСЕРСКО СПАЈАЊЕ МЕТАЛНОГ ПРАХА)	30
3.4 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ АДТИВНЕ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ.....	31
3.5 ДИГИТАЛНИ ЛАНАЦ У РАЗМЕНИ ИНФОРМАЦИЈА КОД АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА.....	34
3.6 ТРЕНДОВИ У 3D ШТАМПАЊУ	35
3.7 ПРИМЕНА 4D И 5D ШТАМПЕ У ИНДУСТРИЈИ.....	36
3.8 СТАНДАРДИЗАЦИЈА У ОБЛАСТИ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА	37

3.9 ПРИМЕНА АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА У РАЗВОЈУ И ПРОИЗВОДЊИ НАОРУЖАЊА И ВОЈНЕ ОПРЕМЕ.....	38
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ производа и ПРОЦЕСА ЗА ПРИМЕНУ АДТИВНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ - ПРЕДЛОГ НОВОГ ОКВИРА И ИЗБОР КРИТЕРИЈУМА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ	41
4.1 ИЗАЗОВИ У ПРОЦЕСУ ПЛАНИРАЊА И ПРОЈЕКТОВАЊА ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА.....	41
4.2 СТРАТЕГИЈА ПРОЈЕКТОВАЊА ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ЗА ПРИМЕНУ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА.....	43
4.3 ПРЕДЛОГ НОВОГ ОКВИР ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ АДТИВНЕ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ.....	44
4.4 АНАЛИЗА ТРОШКОВА КАО КРИТЕРИЈУМА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ.....	48
4.5 ОРИЈЕНТАЦИЈА ДЕЛОВА КАО КРИТЕРИЈУМ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ.....	52
4.6 ОПТИМИЗАЦИЈА ТОПОЛОГИЈЕ КАО КРИТЕРИЈУМ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ	54
4.7 ПРИМЕНА МЕТОДА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ У РЕШАВАЊУ ПРОБЛЕМА ОРИЈЕНТАЦИЈЕ ДЕЛА НА РАДНОЈ ПЛОЧИ 3D МАШИНЕ.....	55
5. АНАЛИЗА АКТУЕЛНОГ СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА У ИЗАБРАНИМ ОБЛАСТИМА ОПТИМИЗАЦИЈЕ СА ПРЕДЛОГОМ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА, ОПТИМАЛНЕ ОРИЈЕНТАЦИЈЕ И КРИТЕРИЈУМА ОПТИМИЗАЦИЈЕ	58
5.1 МОДЕЛИ ТРОШКОВА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ АДТИВНЕ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ – АКТУЕЛНО СТАЊЕ И ПРЕДЛОГ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА ...	58
5.1.1 Анализа модела трошкова.....	60
5.1.2 Предлог новог модела трошкова.....	66
5.1.3 Други модели трошкова L-PBF технологије и њихове карактеристике ...	69
5.2 ТОПОЛОШКА ОПТИМИЗАЦИЈА И МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА У АДТИВНОЈ ТЕХНОЛОГИЈИ – АНАЛИЗА СТАЊА	73
5.3 ОРИЈЕНТАЦИЈА РАДНОГ ДЕЛА – ИЗБОР АЛТЕРНАТИВНИХ И ОПТИМАЛНИХ ОРИЈЕНТАЦИЈА РАДНОГ ДЕЛА.....	74
5.3.1 Примена методологије препознавања „кључних“ облика (feature recognition) на изабраном моделу.....	75
5.3.2 Предлог оријентација на радној плочи.....	77
5.4 ИЗБОР КРИТЕРИЈУМА ЗА ОРИЈЕНТАЦИЈУ ДЕЛА НА РАДНОЈ ПЛОЧИ.....	78
5.5 ПРИМЕНА МЕТОДА ВИШЕАТРИБУТИВНОГ ОДЛУЧИВАЊА У АДТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА.....	81
5.6 НАЈЧЕШЋИ ДЕФЕКТИ КОЈИ СЕ ПОЈАВЉУЈУ У ПРОЦЕСУ ИЗРАДЕ ДЕЛОВА ПРИМЕНОМ L-PBF МЕТОДЕ	86
6. РАЗВОЈ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА ЗА L-PBF МЕТОДУ.....	90
6.1 АЛГОРИТАМСКА СТРУКТУРА И РАЗВОЈ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА	90
6.2 МАТЕМАТИЧКА ФОРМАЛИЗАЦИЈА ПРОБЛЕМА	92
6.3 СОФТВЕРСКО РЕШЕЊЕ КАЛКУЛАТОРА ТРОШКОВА	95

6.4 ИЗРАЧУНАВАЊЕ ТРОШКОВА ИЗРАДЕ ДЕЛА ПРИМЕНОМ РАЗВИЈЕНОГ СОФТВЕРСКОГ РЕШЕЊА.....	97
6.4.1 Сценарио оптимизације трошкова применом софтверског решења.....	99
6.5 АНАЛИЗА ТРОШКОВА ИЗРАДЕ ИЗАБРАНОГ ДЕЛА КЛАСИЧНИМ И АДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА.....	102
6.6 АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ У МОДЕЛУ ТРОШКОВА	106
6.6.1 Примена анализе осетљивости - уводна разматрања.....	106
6.6.2 Анализа осетљивости на основу развијеног модела трошкова.....	107
6.7 ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА ДОБИЈЕНИХ ПРИМЕНОМ РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА И СОФТВЕРСКОГ РЕШЕЊА	110
7. СТУДИЈА СЛУЧАЈА	112
7.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОИЗВОДА	113
7.1.1 Методологија избора дела за адитивну производњу	113
7.1.2 Имплементација анализе засноване на методи коначних елемената (МКЕ) и тополошка оптимизација	114
7.2 ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОЦЕСА.....	119
7.2.1 Генерисање алтернативних оријентација (АО) дела	119
7.2.2 Израчунавање вредности критеријума за оријентацију дела	121
7.2.3 Избор оптималне оријентације (ОО) и оптималног ранга алтернатива.....	122
7.3. АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ КОД МЕТОДА ВАО	124
7.3.1 Стабилност решења на промену тежина у критеријумима	124
7.3.2 Осетљивост на уклањање/додавање једне од алтернатива.....	125
7.3.3 Компаративна анализа добијених резултата.....	126
7.4 АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИЈА РЕЗУЛТАТА.....	127
7.5 ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА И МИКРОСТРУКТУРЕ УЗОРАКА ЧЕЛИКА MS1	129
7.5.1 Резултати и анализа испитивања механичких карактеристика.....	129
7.5.2 Резултати и анализа испитивања микроструктуре.....	131
7.5.3 Анализа резултата испитивања затезних карактеристика и микроструктуре узорака MS1	134
7.6 ИСПИТИВАЊЕ ДИМЕНЗИОНИХ КАРАКТЕРИСТИКА УЗОРАКА.....	135
8. ЗАКЉУЧАК.....	137
ПРИЛОГ 1: Основне карактеристике изабраних метода ВАО.....	140
ПРИЛОГ 2: Софтверски код (VISUAL BASIC CODE FOR EXCELL).....	146
ЛИТЕРАТУРА	157

СПИСАК СЛИКА

Слика 1: Приказ класичног и адитивног технолошког процеса.....	16
Слика 2: Графички приказ односа повећања количине и комплексности у односу на трошкове класичне производње, (Leary, 2020).	19
Слика 3: Графички приказ односа „трошкови-количина“ и „трошкови-комплексност“ код класичне и адитивне производње, (Leary, 2020).	20
Слика 4: Графички приказ економских сценарија код класичне и адитивне производње (зона 1 – сценарио производње у малим серијама, зона 2 – сценарио комплексне производње, зона 3 – сценарио високо комплексне производње), (Leary, 2020).	21
Слика 5: Могући путеви усвајања адитивне технологије, (Vaneker и др., 2020).	24
Слика 6: Седам основних технологија адитивне производње, (ISO, 2021).	25
Слика 7: Шематски приказ L-PBF технологије за производњу делова од метала, (Özel и др., 2020).	31
Слика 8: Делови произведени L-PBF технологијом за примену у авио-индустрији: а) држач пре и након тополошке оптимизације, б) држач пре и након термо-еластичне оптимизације, ц) држач сложеног облика, д) бороскоп, е) млазница за гориво, ф) млазница ракетног мотора, г) кабински конектор, х) комора за сагоревање, (Ali и др., 2022).	32
Слика 9: Делови произведени L-PBF технологијом за примену у медицини: а) предњи персонализовани имплант, б) уграђени имплант на делу лица, ц) целуларни имплант за кук, д) протеза за лобању, е) протеза за доњу вилицу, ф) протеза за стопало, г) протеза за карлицу, х) протеза за десну тибију, и) титанијумско ребро, (Ali и др., 2022).	33
Слика 10: Делови произведени L-PBF технологијом за примену у аутомобилској индустрији, (Ali и др., 2022).	33
Слика 11: Приказ дигиталног ланца размене информација код АТ, (Bonnard и др., 2018) и (Bonham и др., 2020).	35
Слика 12: Приказа филозофије 4D штампе, (Muehlenfeld и др., 2018).	37
Слика 13: Приказ могућих области примене адитивних технологија у војне сврхе, (Colorado и др., 2023).	38
Слика 14: Дијаграм стратегије пројектовања за примену адитивних технологија, ISO/ASTM 52910:2018.	43
Слика 15: Предлог новог оквира за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF методе.	47
Слика 16: Шематски приказ углова оријентације на радној плочи машине, (Qin и др., 2021).	53
Слика 17: Корази у процесу извршења тополошке оптимизације, (Sahini и др., 2020).	73
Слика 18: Правила за оријентацију дела, (Al-Ahmagi и др., 2018).	75

Слика 19: Оријентације засноване на препознавању кључних облика (feature recognition).....	78
Слика 20: Оријентације предложене од стране софтверског модула.....	78
Слика 21: Приказ најчешћих дефеката у процесу израде делова применом L-PBF адитивне технологије, (Malekiropur и El-Mounayri, 2018).....	87
Слика 22: Приказ термалних зона код L-PBF технологије, (Taşcıoğlu и др., 2022) и (Pal и др., 2018).....	87
Слика 23: Различити правци оријентације дела на радној плочи за потребе експерименталних испитивања, Delgado и др., 2012.	88
Слика 24: Алгоритамска структура за израду модела трошкова.	91
Слика 25: Структура софтверског решења.....	95
Слика 26: Почетна форма софтверског решења.	95
Слика 27: Изглед форме за унос података (варијабле геометрија и машине).....	96
Слика 28: Изглед форме за унос података (варијабле материјали и операције).....	96
Слика 29: Изглед форме за приказ података.....	97
Слика 30: Анализа укупних трошкова израде дела пре оптимизације.	98
Слика 31: Приказ појединачних и укупних трошкова у софтверу.	98
Слика 32: Графички приказ укупних и појединачних трошкова у софтверу.	98
Слика 33: Приказ укупних трошкова израде пре и након оптимизације.....	100
Слика 34: Упоредни приказ трошкова у фази израде дела (пре и после оптимизације).	101
Слика 35: Упоредни приказ анализираног дела израђеног класичном и адитивном L-PBF технологијом.....	102
Слика 36: Упоредни приказ примењених технологија у изради изабраног дела: класичне (лево) и адитивне L-PBF технологије (десно).	102
Слика 37: Упоредни приказ дијаграма трошкова израде изабраног дела класичним и адитивном L-PBF технологијом.....	104
Слика 38: Резултати једноструке (табеларни преглед) и двоструке анализе (топлотна мапа) осетљивости.....	108
Слика 39: Анализа осетљивости – Торнадо дијаграм.....	109
Слика 40: Методологија избора дела за израду адитивном технологијом, (Chen и др., 2022).....	113
Слика 41: Приказ изабраног дела за израду: а) у склопу, б) појединачно.	114
Слика 42: Анализа деформација (лево) и дистрибуција напрезања (десно) ПРЕ примене тополошке оптимизације.	115
Слика 43: Дефинисање ограничења (лево) и услова оптерећења (десно) у процесу спровођења тополошке оптимизације.	116

Слика 44: Анализа деформација (лево) и дистрибуција напрезања (десно) НАКОН извршене оптимизације.....	117
Слика 45: Коначан изглед тополошки оптимизованог дела.....	118
Слика 46: Приказ коначно оптимизованог дела у склопу.....	119
Слика 47: Приказ оријентација на радној плочи са генерисаним ослонцима.....	120
Слика 48: Графички приказ коначног ранга алтернатива.....	123
Слика 49: Рангирање алтернатива (формат колоне).....	127
Слика 50: Рангирање алтернатива (мрежни формат).....	127
Слика 51: Размештај финалне оријентације изабраног дела на радној плочи.....	128
Слика 52: Распоред епрувета на радној плочи у односу на осу изградње.....	129
Слика 53: Микроструктура узорака у полираном стању: а) хоризонтални, б) вертикални и в) коси правац градње.....	131
Слика 54: Микроструктура узорка В (вертикална оријентација) у нагриженом стању: (а) и (б) издужени елипсasti сегменти структуре, (в) ћелијска и стубаста морфологија унутар зрна.....	132
Слика 55: Микроструктура узорка К (коса оријентација) у нагриженом стању: (а) и (б) полу елипсasti сегменти структуре, (в) ћелијска и стубаста морфологија различите унутар зрна.....	132
Слика 56: Микроструктура узорка Х (хоризонтална оријентација) у нагриженом стању: (а) и (б) ламеларни сегменти структуре, (в) ћелијска и стубаста морфологија различите унутар зрна.....	133
Слика 57: Димензионе вредности (пречници и растојања) узорка.....	135

СПИСКА ТАБЕЛА

Табела 1: Кључне разлике између класичног и савременог приступа пројектовању производа и процеса	10
Табела 2: Области примене и предности адитивних технологија, (Attarian, 2017).	22
Табела 3: Основне технологије адитивне производње и њихове карактеристике, (Bonnard и др., 2018), (Yi и др., 2019).....	26
Табела 4: Основне карактеристике МАМ технологија, (Armstrong и др., 2022).....	28
Табела 5: Позитивни и негативни ефекти производње делова у сопственој режији (in-house), (AMPOWER, 2023).....	51
Табела 6: Позитивни и негативни ефекти производње делова набавком услуге на тржишту (external, on-line manufacturing), (AMPOWER, 2023).....	52
Табела 7: Анализа структуре трошкова у различитим моделима трошкова.....	67
Табела 8: Предлог елемената новог модела трошкова израде делова од метала адитивном L-PBF методом.....	69
Табела 9: Правила закључивања за оријентацију дела, (Zhang и др., 2016).....	76
Табела 10: Кључни параметри који утичу на L-PBF процес, (Abd-Elaziem и др., 2022) и (Fé-Perdomo и др., 2021).....	89
Табела 11: Трошкови фазе израде дела пре оптимизације трошкова.....	99
Табела 12: Сценарио оптимизације трошкова.....	100
Табела 13: Трошкови фазе израде дела након извршене оптимизације.....	100
Табела 14: Поређење кључних елемената израде изабраног дела класичним и адитивним технологијама.....	105
Табела 15: Сценарио анализа промене параметара (време, одржавање, маса) на укупне трошкове.....	109
Табела 16: Резултати масе, напрезања и деформација након спровођења ТО.....	117
Табела 17: Образложење изабраних оријентација.....	121
Табела 18: Тежинске вредности критеријума за рангирање алтернатива.....	122
Табела 19: Матрица одлучивања.....	122
Табела 20: Резултати рангирања алтернатива применом три методе ВАО.....	122
Табела 21: Резултати сценарија за анализу стабилности на промену тежина критеријума.....	124
Табела 22: Резултати осетљивост на уклањање/додавање једне од алтернатива.....	125
Табела 23: Компаративна анализа резултата добијених основним и контролним методама ВАО.....	126
Табела 24: Топлотна мапа компаративне анализе резултата добијених основним и контролним методама ВАО (Спирманов коефицијент корелације).....	126

Табела 25: Механичке карактеристике узорака MS1 у „as built“ стању за различите оријентације изградње.	130
Табела 26: Међусобно поређење димензионих вредности (пречници и растојања) узорака у хоризонталном, вертикалном и косом правцу градње.	136

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

AMT - Additive manufacturing technologies
L-PBF - Laser Powder Bed Fusion
ABO - Alternative Build Orientations
OBO - Optimal Build Orientation
CAD – Computer Aided Design
CAM - Computer-Aided Manufacturing
CAE - Computer-Aided Engineering
CAPP - Computer-Aided Process Planning
RSM - Response Surface Methodology
DFA - Desirability Function Approach
GRA - Grey Relational Analysis
PLM – Product Lifecycle Management
CIM - Computer Integrated Manufacturing
ERP – Enterprise Resource Planning
CRM – Customer Relationship Management
SCM – Supply Chain Management
VP - Virtual Prototyping
DMU - Digital Mockup
VR - Virtual Reality
RP - Rapid Prototyping
LM - Lean Manufacturing
JIT - Just-In-Time
CE - Concurrent Engineering
CM - Cellular Manufacturing
SLA – Stereolithography
DLP – Direct Light Processing
CLIP – Continuous Liquid Interface Production
FDM – Fuse Deposition Modeling
FFF – Fuse Filament Fabrication
ADAM – Atomic Diffusion AM
MJP – Multijet Printing
MJF – Multijet Fusion
SPJ – Single Pass Jetting

SLS – Selective Laser Sintering
SLM – Selective Laser Melting
DMLS – Direct Metal Laser Sintering
LENS – Laser Engineered Net Shape
EBAM – Electron Beam AM
LMDw – Laser Metal Deposition with wire
WAAM – Wire Arc AM
LOM – Laminated Object Manufacturing
UAM – Ultrasonic AM
ISO - International Standardization Organization
CEN - The European Committee for Standardization
ASTM - American Society for Testing and Materials
PSDO - Partner Standards Developing Organization
MAM - Metal Additive Manufacturing
PLM – Product Lifecycle Management
DfAM – Design for Additive Manufacturing
STL – Standard Tessellation Language
AMF - Additive Manufacturing Format
3MF - 3D Manufacturing Format
STEP - Standard for the Exchange of Product
STEP-NC - STEP Numerical Control
CNC – Computer Numerical Control
МКЕ - Метода Коначних Елемената
ТО - Тополошка Оптимизација
АО - Алтернативне Оријентације
ОО - Оптималне Оријентације
SIMP - Solid Isotropic Material with Penalization
BESO - Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
ESO - Evolutionary Structural Optimization
LSM - Level Set Method
MMC - Moving Morphable Components
MMV - Moving Morphable Voids
ABC - Activity Based Costing
PBCM - Process-Based Cost Modeling

BOFs - Build Orientation Factors

MCDM – Multi Criteria Decision Making

ВКО - Вишекритеријумска Оптимизација

ВАО - Вишеатрибутивно Одлучивање

ВКА - Вишекритеријумска Анализа

ВЦО - Вишециљно Одлучивање

COPRAS - Complex Proportional Assessment Methods

TOPSIS - Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

VIKOR - Multi-Criteria Compromise Ranking

AHP – Analytic Hierarchy Process

SAW - Simple Addictive Weighting

MOORA – Multi Objective Optimization Ratio Analysis

WASPAS – Weighted Aggregate Sum Product Assessment

ANP – Analytic Network Process

DEMATEL - Decision Making Trial And Evaluation Laboratory

SEM - Structural Equation Modelling

1. УВОД

Савремено тржиште стално поставља нове захтеве у погледу производа што је директна последица промена у технологији, потрошачким навикама, глобалној економији, еколошкој свести и друштвеним вредностима.

Нови захтеви директно утичу и на процес пројектовања производа и избор типа производње, а често се захтева и редизајнирање читавог процес од иницијалне идеје до готовог производа. У испуњавању постављених захтева неопходно је превазићи и одређена ограничења која постоје у самом пројектовању као и производњи.

Пројектовањем производа потребно је унапредити постојеће или развити нове способности које ће омогућити пројектовање делова виших перформанси, сложеног дизајна, олакшане структуре на веома брз и трошковно ефикасан начин. Пројектовање делова дефинисаних карактеристика захтева примену производних технологија које омогућавају њихову реализацију.

У вези са производним циклусом намећу се одређена ограничења која се односе на: време реализације израде дела (захтева се брзи излазак на тржиште), могућност израде делова сложених геометрија, употребљивост и функционалност произведеног дела, постојаност ланаца снабдевања, могућност дигиталног складиштења података. Напред изнето указује да је неопходно приступити трансформацији процеса пројектовања и производње на следеће начине:

- Фаза пројектовања: пројектовање лакших конструкција, примена процеса скенирања у циљу добијања 3D модела производа (реверзни инжењеринг), убрзање процеса иновација, оптимизација дизајна помоћу напредних алата за анализу напонског стања и симулацију процеса ради потврде дозвољених напрезања, потребне тачности и прецизности и могућности елиминације колизије алата;
- Фаза производње: тежња ка елиминацији сувишних алата, поједностављење процеса монтаже, скраћивање ланаца снабдевања, производња у малим количинама због захтева за персонализованим својствима производа, оптимизација параметара процеса, могућност дистрибуиране производње делова.

Захтеви тржишта су преобразили производњу из пасивног извршиоца ка активном учеснику који не само да прати трендове, већ их анализира, предвиђа и обликује наредне кораке. Компаније које не разумеју ове процесе ризикују да остану неконкурентне на тржишту. Способност брзе адаптације и понуда производа који одговарају савременим захтевима кључна је за опстанак и раст на данашњој глобалној сцени.

1.1 ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет ове докторске дисертације је развој модела трошкова и примена квантитативних метода и оптимизационих техника као кључних алата у процесу доношења одлуке у процесима припреме и планирања адитивне производње.

Аддитивна производња, позната и као 3D штампа, је производни процес у којем се објекти креирају додавањем материјала слој по слој, како би се на крају формирао тродимензионални објекат. Аддитивну производњу чини неколико кључних технологија које својом применом трансформишу класичан начин пројектовања производа и процеса и планирања производње.

Општи циљ ове дисертације је да се прикажу и анализирају неки од кључних параметара процеса и метода за доношење одлука у оквиру савременог концепта аддитивне производње, као и избор адекватних метода оптимизације.

Општи циљ дисертације може се разложити на неколико подциљева чијом реализацијом се он испуњава:

- Развој новог оквира за пројектовање производа и процеса применом аддитивне L-PBF методе;
- Развој модела трошкова за аддитивну L-PBF методу;
- Анализа примене тополошке оптимизације у циљу смањења трошкова;
- Анализа утицаја оријентације дела на радној плочи на укупне трошкове;
- Укључивање преференција доносиоца одлуке кроз квантитативне методе у процесу одлучивања.

Научни допринос дисертације огледа се у систематизацији истраживања о моделима трошкова одабране аддитивне L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) технологије спајања металног праха и развоју новог модела трошкова за изабрану аддитивну технологију, као и развој новог оквира за пројектовање производа и процеса у којем трошкови, процес оптимизације и преференције доносиоца одлука чине кључне елементе за доношење адекватних одлука.

Аддитивна L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) технологија је напредна 3D технологија штампања где се објекат ствара слој по слој топљењем металног или полимерног праха помоћу снажног ласера, што омогућава израду сложених делова са високом прецизношћу, најчешће заступљена у специфичним индустријама у којима се захтева израда специјализованих и комплексних високо функционалних делова, позната и као SLM (Selective Laser Melting) метода код метала односно SLS (Selective Laser Sintering) метода код полимера.

Евидентни су учестали захтеви тржишта са производима сложених конфигурација, кратког времена израде, персонализованих карактеристика и функционалних прототипова. Индустрија 4.0, под утицајем савремених технолошких достигнућа, пружа решења за унапређење и врши трансформацију индустријских процеса. Аддитивна технологија је препозната као један од укупно једанаест технолошких стубова Индустрије 4.0 и представља технологију на којој ће се заснивати будући технолошки развој и напредак.

Аддитивна технологија захтева другачије приступе у припреми, пројектовању производа и процеса и планирању производње. У том смислу постоје и „економски сценарији“ који оправдавају примену аддитивних технологија у испуњавању захтева тржишта. У овој дисертацији аддитивни технолошки процеси су посматрани на нивоу производа (припрема за производњу, могућност оптимизације), на нивоу процеса (анализа адекватних параметара процеса), на нивоу информационог инжењеринга (дизајн, развој, управљање и одржавање информационог система и повезивање свих учесника у производном ланцу) и на нивоу економске димензије (избор и дефинисање параметара трошкова).

Важан сегмент у оквиру производње адитивним технологијама је процес оријентације делова у радној зони (на радној плочи 3D машине) током припреме и планирања производње. Тренутни приступ у оријентацији делова се ослања искључиво на оператера који уз помоћ модула у одговарајућим софтверима може да изабере понуђени сет оријентација, али у коначном резултату то неће у свим случајевима довести до израде крајњег производа са жељеним карактеристикама.

Иако постоје софтверска решења за помоћ у сегменту адитивних технологија, постоји потреба за додатним унапређењима процеса пројектовања производа и процеса и доношења адекватних одлука у овој фази као и развој свеобухватног модела трошкова, са циљем добијања крајњег производа са механичким карактеристикама, временима и трошковима израде, који обухвата и преференције доносиоца одлуке.

На основу прегледа расположиве литературе развијен је модел трошкова и софтверско решења за прорачун трошкова заснован на развијеном моделу. Прегледом литературе (научно истраживачких радова, пројеката, стручних анализа) истраживан је савремени приступи у прорачуну трошкова адитивне производње. На бази анализе прикупљеног сазнања, а затим и на основу генерализације прикупљених података формирана је адекватна основа за развој новог модела трошкова.

Модел трошкова треба да омогући потпуно рашчлањавања свих трошкова насталих у фази пројектовања, израде и накнадне обраде делова, са циљем њиховог умањења. Трошкови учешћа материјала и времена израде, поред адекватне оријентације на радној плочи, могу бити смањени и применом тополошке оптимизације на изабраном делу што ће бити и реализовано у овој дисертацији. Највећи ефекти у планирању производње постижу се применом истовремености у приступу и адекватном оријентацијом дела на радној плочи тополошки оптимизованог дела, што ће бити и реализовано кроз студију случаја.

У фази пројектовања производа и процеса примењене су квантитативне методе и технике како би се укључиле и преференције доносиоца одлуке у вези са жељеним својствима крајњег производа, параметрима трошкова, времена производње и механичким карактеристикама тополошки оптимизованих делова.

1.2 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ У ИСТРАЖИВАЊУ

Основне хипотезе докторске дисертације од којих се пошло на основу постављеног циља истраживања, досадашњих истраживачких активности и резултата других аутора у подручју истраживања, су:

X1: Избор адекватних параметара и карактеристика дела у фази планирања и припреме адитивне производње може се извршити квантитативним методама и техникама.

X2: Могуће је применити тополошке оптимизационе методе за утврђивање оптималног положаја предмета израде (дела) на радној површини са циљем постизања дефинисаних (задатих) карактеристика дела.

X3: Могуће је развити модел трошкова (за адитивну L-PBF технологију спајања металног праха ласером) и пратећи софтверски алат заснован на моделу трошкова који омогућава свеобухватнију анализу трошкова.

X4: Методе и технике у пројектовању и производњи металних делова класичним субтрактивним методама могу бити унапређене применом савремених адитивних технологија и метода производње у погледу ефикасности, економичности и побољшања квалитета.

1.3 МЕТОДЕ КОЈЕ ЋЕ СЕ ПРИМЕЊИВАТИ У ИСТРАЖИВАЊУ

У истраживањима у оквиру докторске дисертације која има теоријски и експериментални карактер, примењиваће се следеће научне методе:

- Анализа и синтеза, генерализација прикупљених података и доношење закључака;
- Моделовање и компаративна метода у процесу формирања модела трошкова;
- Метода мерења и симулација за добијање улазних параметара у експерименталном делу истраживања;
- Експерименталне методе (студија случаја).

Сам истраживачки метод је заснован на прикупљању и анализи података кроз теоријске и експерименталне методе, анализу реалног проблема, тестирање развијеног модела трошкова и анализу предложених решења оптимизације у реалним условима производње. У процесу формирања адекватног модела трошкова као алата за подршку одлучивању о примене адитивне производње коришћена је метода моделовања (израда аналитичког модела трошкова адитивне L-PBF методе и оптимизација трошкова) и компаративна метода (поређење трошкова израде адитивним и класичним производним технологијама, поређење различитих сценарија у оквиру адитивне L-PBF методе).

За проналажење адекватних улазних података коришћена је метода мерења реалних процеса а на бази добијених података примениће се и метода научног експеримента и симулације.

Предложена методологија планирања и доношења одлука у фази планирања, као и развијени модел трошкова представљају основу за експерименталну фазу дисертације. У оквиру експерименталне методе извршено је повезивање хардверске и софтверске структуре у циљу реализације студије случаја. Хардверски део се односи на хардверске компоненте у дигиталном ланцу (компјутер/сервер на којем ће се оптимизовати CAD модел, 3Д штампач/машина као извршни уређај).

Развијени софтверски модел се користи за израчунавање трошкова изабраних оријентација, док су комерцијална софтверска решења коришћена за тополошку оптимизацију и израчунавање времена израде за сваку оријентацију.

Променом различитих оријентација на радној плочи, претходно тополошки оптимизованог дела, направљени су узорци на којима су вршена одређена мерења, ради утврђивања потребних вредности параметара који се могу користити у оквиру квантитативних метода и техника одлучивања.

1.4 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Кроз реализацију истраживања очекивано је остваривање следећих научних и практичних доприноса:

- Развој новог оквира за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије;
- Развој и валидација новог модела за прорачун трошкова код адитивне L-PBF технологије.
- Анализа примене адитивне L-PBF технологије са трошковног и производног аспекта поређењем са класичним производним технологијама;
- Унапређење процеса доношења одлука у планирању производње применом квантитативних метода и техника.

1.5 ОКВИРНИ САДРЖАЈ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација је реализована кроз следећа поглавља:

- *Уводна разматрања*: дефинисани су предмет и циљ истраживања, основне хипотезе, примењене методе са очекиваним резултатима истраживања;
- *Производни процеси класичне и адитивне производње*: дате су основне поставке пројектовање производних процеса (класични и савремени приступ) и методе оптимизације, разматра се однос класичне и адитивне производње као и економски аспекти класичног и адитивног технолошког процеса, назначене су предности које пружа адитивна технологија као и могући путеви усвајања адитивне технологије;
- *Концепт адитивне производње*: приказана је класификација метода АТ, анализирана је производња делова од метала адитивним путем применом L-PBF технологије, објашњен је дигитални ланац повезивања информација заједно са стандардизацијом и трендовима у развоју, презентована је примена адитивних технологија у различитим индустријским гранама;
- *Планирање и пројектовање процеса за примену адитивне технологије – предлог новог оквира и избор критеријума за оптимизацију процеса*: предложен је нови оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије, дефинисани су и детаљно објашњени критеријуми за оптимизацију (трошкови, оптимизација топологије, оријентација делова) који ће се користити у овој дисертацији и објашњен је значај примене метода вишекритеријумског одлучивања у решавању проблема оптимизације;
- *Анализа актуелног стања истраживања у изабраним областима оптимизације са предлогом новог модела трошкова, оптималне оријентације и критеријума оптимизације*: на основу анализе расположиве литературе предложен је нови модел трошкова, разматрана је примена тополошке оптимизације у адитивном технологијама, анализирана проблематика оријентације дела као и приступ у оријентацији делова примењен у овој дисертацији (feature recognition), анализирани су примери примене метода вишекритеријумске оптимизације у адитивној производњи и извршен је избор (основних и контролних) квантитативних

метода за примену у дисертацији, објашњени су најчешћи дефекти који се појављују у процесу израде делова адитивном L-PBF методом;

- *Развој новог модела трошкова за L-PBF технологију*: развијен је алгоритам новог модела трошкова заједно са математичком формализацијом проблема и софтверским решењем, приказана је примена развијеног софтверског решења у реалним условима кроз анализу трошкова израде (адитивним и класичним путем) изабраног дела, извршена је анализа осетљивости на промену одређених параметара трошкова и извршена дискусија добијених резултата;
- *Студија случаја*: извршена је конкретна примена предложеног новог оквира за пројектовање производа и процес адитивном L-PBF методом, приказана примена квантитативних метода у избору оптималне оријентације, анализирани су резултати испитивања механичких карактеристика, микроструктуре и димензионе контроле израђеног дела;
- *Закључак* је изведен на основу постављених циљева, садржи објашњење о испуњености постављених хипотеза и предлоге за даља истраживања;
- На крају дисертације дата је литература, прилози и изјаве аутора.

2. ПРОИЗВОДНИ ПРОЦЕСИ КЛАСИЧНЕ И АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ - ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА

Ово поглавље је подељено у шест делова распоређених по логичном редоследу. У првом делу се анализира могућност пројектовања производа и процеса, објашњавају алати за пројектовање и анализира однос класичног и савременог приступа у пројектовању као и могућност његове оптимизације применом класичних и савремених оптимизационих алата. У другом и трећем делу фокус је на адитивној производњи и њеном односу и разликама са класичним технолошким процесом. У четвртном делу кроз међусобно поређење разматра се економски аспект оба технолошка процеса. Пети део објашњава предности у примени адитивне технологије након чега се, у шестом делу објашњавају могући путеви усвајања адитивне технологије.

2.1 ПРОИЗВОДНИ ПРОЦЕСИ И МЕТОДЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПРОЦЕСА

Комплексност савремених производа се све више повећава. Производни процеси, који трансформишу материјале и сировине у полупроизвод или готов производ, стварају производе који се одликују са више излазних параметара (најчешће се односе на квалитет, механичка својства, димензиона тачност). У производном процесу појављују се и процесни параметри као и други фактори који су најчешће неконтролисани (фактори сметње, енгл. noise factors) али остварују велики утицај на сам процес, (Šibalija и др., 2016).

У циљу задовољења стриктних захтева и потреба потрошача, као и захтева тржишта, неопходно је да произвођач захтеве јасно разуме а затим да креира производни процес који ће постављене захтеве и испунити. Ово се постиже када се акумулирано знање о захтевима потрошача и тржишта, као и претходно стечено искуство, трансформише у адекватне параметре производног процеса.

Финални производ карактерише више параметара квалитета који представљају одговор на захтеве клијената и потражњу тржишта. У том смислу, пројектовање вишеструког одговора представља изазов и потребу савременог производног сектора. За потребе пројектовања потребно је пронаћи, како одговарајуће алате, тако и изабрати адекватне процесе и методе за оптимизацију, о чему ће бити више речи у наредна два поглавља.

2.1.1 Пројектовање производа и процеса

Циљ пројектовања производа и процеса је добијање решења која омогућавају повећање продуктивности уз истовремено обезбеђивање флексибилности, скраћења производних времена, повећање квалитета и вредности производа и услуга. Да би се обезбедила наведена ефикасност, примењују се бројна софтверска решења која подржавају пројектовање производа и процеса у свим фазама развоја, са опцијама симулације процеса у реалном и виртуелном амбијенту.

Будућност у развоју производних система, које је већ и заступљена у појединим развијеним земљама, односи се на интелигентне и адаптивне производне системе са способношћу реконфигурације и међусобне комуникације, са перманентним присуством мониторинга производних активности са циљем повећања квалитета избегавањем или минимизацијом могућих негативних ефеката на крајњи

производ. Ове способности је могуће реализовати применом различитих сензорских система, фузијом и обрадом добијених података уз примену различитих информационо-комуникационих технологија, (Daneshjo и др., 2020).

Историјски развој

Корени савременог приступа у управљању производњом датирају још у периоду 70-их и 80-их година прошлог века када је направљен помак у развоју компјутера који је омогућио и развој нових инжињерских и дизајнерских способности применом компјутера. Ови процеси су се развијали као посебна односно изолована острва аутоматизације. Размена података међу њима била је на мануелан начин.

У међувремену се јављају и први комерцијални софтвери за компјутерско пројектовање производа (CAD - Computer Aided Design) и компјутерско пројектовање производње (CAM - Computer Aided Manufacturing), а након тога узимајући у обзир тежњу ка све већој аутоматизацији и повезивању процеса у производњи настао је концепт познат као компјутером интегрисна производња (CIM - Computer Integrated Manufacturing), који карактерише повезивање пословних процеса на мрежном принципу. Поред CIM концепта појавили су се и нови концепти као што су: „витка“ производња (LM - Lean Manufacturing), правовремено обезбеђивање ресурса за производњу (JIT - Just-In-Time), конкурентно/симултано инжењерство (CE - Concurrent Engineering), ћелијска производња (CM - Cellular Manufacturing), агилна производња (agile manufacturing), холонска производња (holonic manufacturing), дистрибуирана производња (distributed manufacturing), колаборативна производња (collaborative manufacturing), као одговори и решења за унапређење динамичке природе процеса производње, (Halevi, 2001).

Да би се избегли дужи циклуси и већи трошкови развоја производа и проблеми са квалитетом, сарадња међу дистрибуираним и мултидисциплинарним развојним и дизајнерским тимовима постала је неопходна. Јавила се потреба за интеграцијом података о процесима, производима и пословним системима са циљем помоћи компанијама у суочавању са комплексним односима са купцима и сложенијим развојем нових производа за потребе тржишта. Током 90-их година прошлог века, са циљем обезбеђивања заједничке платформе за стварање, организацију и ширење информација о производима (од појаве на тржишту до повлачења из употребе), појављује се концепт управљања животним циклусом производа (PLM - Product Lifecycle Management), (Терзи и др., 2010).

PLM концепт и интеграција са другим системима

Концепт PLM замишљен је као пословна стратегија која користи предности савремених информационо-комуникационих технологија (ИКТ) са циљем управљања подацима, процесима, методама рада, људским ресурсима и информационим системима, који учествују у животном циклусу производа. Софтверска решења које подржавају концепт PLM одликују се, (Enríquez и др., 2019):

- централизацијом свих података у вези са развојем производа и интеграцијом са производним процесом;
- управљање знањем и *know-how* приступом између различитих одељења у компанији;

- инкорпорација различитих софтверских решења (CAD, CAE, PDM) и повезивање са другим пословним системима намењеним за: интеграцију и аутоматизацију пословних процеса Enterprise Resource Planning (ERP), управљање интеракцијама са клијентима Customer Relationship Management (CRM), управљање ланцима снабдевања Supply Chain Management (SCM).

Производне компаније теже ка убрзавању својих производних активности и прате тренд дигитализације информација о производу, како би постале конкурентније на глобалном тржишту. У ту сврху користе се разни алати који ће сажето бити представљени у наставку, (Blanchard и др., 2016).

Алати дигиталног инжењеринга (CAPP, CAM, CAE, VP, DMU, VR, RE)

Алат за планирање процеса подржан компјутером Computer-Aided Process Planning (CAPP) даје подршку производним инжењерима у процесу планирања. За генерисање компјутером подржаних производних датотека и управљање NC машинама користи Computer-Aided Manufacturing (CAM). Рачунаром подржан инжењеринг Computer-Aided Engineering (CAE) обезбеђује анализирање сложених карактеристика структуре производа.

Виртуелна израда прототипова Virtual Prototyping (VP) омогућава пројектантима да одложе физичку израду прототипова и тестирање до самог краја процеса. Дигитални модел Digital Mockup (DMU) чини важан елемент VP и нашироко се користи у симулацији процеса и технолошких система.

Виртуелна реалност Virtual Reality (VR) представља проширену верзију VP-а. Брза израда прототипова Rapid Prototyping (RP) представља процес физичке израде модела или скенираног објекта. Данас ова технологија има шири спектар примене и може се користити и за квалитетну производњу делова у релативно малим серијама.

Реверзни инжењеринг Reverse Engineering (RE) представља поступак откривања технолошких принципа рада уређаја, предмета или системске анализе њихове структуре и функције. Процес реверзног инжењеринга укључује мерење објекта (коришћењем технологије 3D скенирања применом ласерских скенера) а затим његову реконструкцију у 3D модел.

Савремени њрисџуџ (џамејна њпроизводња и Индусџрија 4.0)

Производни системи тренутно пролазе кроз нову фазу еволутивног развоја. Значајне инвестиције у последњих неколико година директно су усмерене на развој концепта паметна производња (*smart manufacturing*) који у реалном времену одговора на захтеве купаца, условима ланца снабдевања и интерним условима фабрике. Паметна производња је кључна компонента у ширем посматрању Индустрије 4.0, и ослања се на креирање везе између дигиталног света и физичких система/компоненти кроз интернет ствари *Internet of Things (IoT)*, упарене са системима у облаку (*cloud systems*), аналитиком података и машинским учењем, (Gehrke и др., 2020).

Интернет ствари Internet of Things (IoT), дџџџџални близанци (Digital twins)

У процесу производње увелико се користе 3D моделирање, 3D штампачи, роботика и апликације у облаку. Појављују се и кибернетско-физички системи као дигитални прикази физичких система (дигитални близанци) односно поседују њихов статус и физичка својства. Ови дигитални близанци свакако скраћују време

које је потребно за развој, производњу и тестирање прототипа као и трошкове производње, који представљају и основу за настанак уређаја са уграђеним сензорима (*embedded systems*), (Lo и др., 2021) и (Perno и др., 2022).

Паметни уређаји опремљени сензорима и софтверима повезани су на интернет и прикупљају и обрађују податке. Ови уређаји су заступљени и на нивоу производне линије (*shop floor*). Развијени су и алати за обраду и анализу великог броја прикупљених података (*Big Data and Analytics*). Ова револуција у производним технологијама омогућава прелазак са масовне производње (економија обима, економија опсега) ка масовном индивидуалном прилагођавању производа на исплатив и одржив начин.

На основу претходно изнетог може се закључити да је децентрализација података кључни приступ а да се пријем и обрада података обављају на лицу места и у реалном времену. Самостално управљање, само-свесност, самоодржавање и самопоправка су неки од атрибута којима се може описати способности поменутог система и његових компоненти као елемената фабрике будућности.

Претходно изнета објашњења, чињенице и констатације искористиће се за међусобно поређење класичног и савременог приступа у пројектовању производа по неколико кључних аспеката, табела 1.

Табела 1: Кључне разлике између класичног и савременог приступа пројектовању производа и процеса

Критеријум	Класични приступ	Савремени/напредни приступ
Основна филозофија	Инжењерско искуство и ручно моделирање	Дигитални модели и аутоматизација
Примена алата	Ручни (технички) цртежи и основни CAD алати, Планирање производње засновано на раним проценама са честим непрецизностима Примена великих плотера за штампање цртежа, Проблематика у складиштењу цртежа и података	Напредни CAD/CAE/CAM алати за пројектовање, симулације и оптимизације Алати за планирање производње (CAPP, ERP, ...) PLM платформе
Време/ресурси за пројектовање	Дужи циклус, више проба и грешака	Брже итерације уз подршку симулација Интеграција свих захтева за производом још у фази планирања
Флексибилност дизајна	Ограничена и слаба флексибилност на промену дизајна, Грешке се уочавају у каснијим фазама процеса	Висока флексибилност Коришћење 3D модела и примена реверзног инжењеринга DfAM приступ
Оптимизација	Аналитичке и статистичке методе,	Хеуристички и еволуциони алгоритми, МКЕ анализа и структурна оптимизација
Интеграција са производњом	Често раздвојено од производње уз постојање такозваних самосталних „изолованих“ острва аутоматизације, Постоји повратна спрега (<i>feedback</i>) али са информацијама тек на крају процеса производње	Интегрисано са дигиталним ланцем, увезивање информационо комуникационих технологија са производом са циљем сталног мониторинга стања и обраде података применом <i>cloud</i> рачунарства, <i>IoT</i> , дигиталних близанаца

Узимајући у обзир наведене аспекте, савремени приступи у пројектовању производа омогућавају виши степен флексибилности, скраћење циклуса развоја и ефикаснију интеграцију са производним системима.

2.1.2 Методе оптимизације производних процеса

У поступку оптимизације производних процеса, осим тражења максималне добити, процес оптимизације подразумева и максимално искоришћење машинских капацитета и њихово усклађивање, искоришћење људских и материјалних ресурса, оптимизације времена производног циклуса, материјалних токова и друго, (Јоррен и др., 2019) и (Hafidi и др., 2023).

Оптимизација је математички алат који омогућава постизање оптимума (минимум или максимум) функције уз одређена ограничења. У инжењерском смислу оптимизација се користи у селекцији најбоље алтернативе из скупа расположивих алтернатива или атрибута. Посматрано са производног аспекта оптимизација обезбеђује селекцију одређених улазних/контролних параметара са циљем постизања тражених излазних вредности. Оптимизација процеса је кључна у постизању жељених вредности процеса или производа.

У процесима истраживања, развоја и производње као неопходних корака у процесу пројектовања крајњег производа, аутори (Šibaliја и др., 2016) истичу значај експеримента као начина за прикупљање улазно-излазних података односно процене улазних на излазне параметре, односа међу њима и ефектима који остварују на процес и производ. Анализа добијених експерименталних резултата је кључна у доношењу даљих одлука. Експеримент се користи за моделирање адекватног одговора система који су зависни од параметара процеса. На овај начин добија се одређени предиктивни модел који представља основ за даљу оптимизацију. Не препоручује се оптимизација процеса у односу на само један параметар јер би то водило добијању неоптималних вредности.

У циљу добијања крајњих производа који са економског аспекта треба да буду исплативи, поред оптимизације производног процеса потребно је размотрити и могућност спровођења тополошке оптимизације. Тополошка оптимизација креира делове сложених геометријских облика и зато је неопходно извршити адекватно повезивање тополошке оптимизације са процесом производње. То се може остварити у фази пројектовања производа укључивањем производних ограничења тополошки оптимизованог дела или применом алтернативних производних метода као што је адитивна производња. За тополошку оптимизацију и оптимизацију производних процеса користе се различите методе оптимизације а њихов сажети приказ изложиће се у наставку.

Тополошка оптимизација

За оптимизацију машинских делова, склопова и конструкција користи се структурна оптимизација. Овом оптимизацијом добијају се конструкције и делови мање масе, који су самим тим и економичне и ефикасне за производњу а задовољавају постављене захтеве. Структурне оптимизације се деле на: оптимизацију попречних пресека, оптимизацију топологије и оптимизацију облика, (Tufloroulos, 2020).

Тополошка оптимизација је метода која се користи за добијање најефикасније расподеле материјала унутар датог пројектног простора, при задатим граничним

условима и оптерећењима. Примењени алгоритам одређује где материјал треба да буде постављен, а где не, ради постизања најбољих механичких, термичких или других карактеристика, уз минималну потрошњу ресурса.

Најважније методе тополошке оптимизације:

- *SIMP метод (Solid Isotropic Material with Penalization)* је најзаступљенији приступ у индустрији и академским истраживањима. Решење се постиже коришћењем релативне густине материјала у свакој финој ћелији мреже (елементу). Вредности густине су између 0 (празно) и 1 (пуна чврстоћа), али се употребом пенализације фаворизују екстремне вредности (0 или 1). Предности SIMP методе: Једноставан за имплементацију, подржан у софтверима као што су Abaqus, Ansys, SolidWorks, Altair. Недостатак SIMP методе: Може давати „замућена” или нејасна гранична решења;
- *ESO/BESO (Evolutionary Structural Optimization / Bi-directional ESO)*: Ради на принципу еволуционог уклањања и додавања материјала на основу критеријума напона или енергетске густине. У BESO варијанти, материјал се може и уклонити и додати (би-дирекционо). Предности ESO/BESO: Интуитиван и стабилан процес. Недостатак ESO/BESO: Спорији процес и захтева више корака од SIMP-а;
- *Level Set метод*: Геометрија се описује као имплицитна функција и еволуира током оптимизације. Метод је добар за прецизно дефинисане и глатке границе облика. Предности Level Set метода: Омогућава бољу контролу граница и облика, прецизно дефинисање рупа и канала. Недостатак Level Set метода: Компликованија имплементација, потребна FEM решетка;
- *Topological Derivative метод*: Заснива се на осетљивости функције циља на уметање мале рупе у структуру. Користи се за иницијално генерисање рупа у конструкцији на основу диференцијалног критеријума. Предност Topological Derivative метода: Математички формално заснован. Недостатак Topological Derivative метода: Ограничена примена у комплексним 3D сценаријима;
- *Level-Set + SIMP хибридни методи*: Комбинују предности обе методе, Примену налази у софистицираним инжењерским решењима, попут биомедицинског инжењеринга и авионаутичке индустрије.

Тополошка оптимизација представља револуцију у инжењерском дизајнирању у стварању лаких, чврстих и ефикасних конструкција. Примена тополошке оптимизације захтева пажљиву интеграцију са аспектима пројектовања производа и процеса у циљу превазилажења изазова и ограничења које ова оптимизација намеће (велика процесорска моћ за обраду података, примена напредних метода обраде, потреба за верификацијом дизајна).

Метод оптимизације производних процеса

Постоји велики број подела оптимизационих метода у зависности од примењених ограничења, начина решавања алгоритама и типа променљивих. На основу разматране литературе (Cavazzuti, 2013), (Bierlaire, 2018) и (Ezugwu, 2021) методе оптимизације производних процеса се могу поделити на:

- Класичне методе оптимизације, које обухватају: планирање експеримента (Taguchi метода, метода површине одговора (Full and Fractional Factorial design)), графичке методе, аналитичке методе и методе математичког програмирања (линеарно, нелинеарно, графичко програмирање);
- Савремене методе оптимизације, које обухватају хеуристичке оптимизационе методе. Ове методе се даље деле на хеуристичке методе са детерминистичким и стохастичким својствима (методе са једним решењем и популационе методе познате као *population-based algorithms* односно методе еволуције и колективне интелигенције). У ову групу убраја се и фази логика и експертски системи, (Sibaliја, 2019).

Такође, у раду (Cavazzuti, 2013) се наводи да свака метода и техника има својих специфичности као и да сама по себи није довољна за решавање изабраних проблема. За нове неконвенционалне методе производње однос улазно-излазних параметара је често непознат, и карактерише га велики броје параметара и њихових односа који су, поред комплексности често и нелинеарног карактера. Ово указује да се за пројектовање и оптимизацију процесних (улазних) параметара не могу користити статистичке методе. У том погледу, а са циљем елиминације неизвесности и проблема апроксимације карактеристичних за статистичке методе, већу примену налазе хеуристичке методе односно поједини еволутивни алгоритми, (Sibaliја, 2019).

Класичне методе оптимизације

Метода спровођења експеримента се односи на серију тестова у оквиру којих се анализира утицај промене улазних параметара процеса на излазне параметре, по одређеним унапред дефинисаним правилима, како би се одредила законитост у променама излазног параметра. Подаци се анализирају применом статистичких метода, а у циљу елиминације утицаја различитих фактора који се могу појавити током експеримента анализирани подаци су подвргнути следећим процесима: понављање (*replication*) са циљем добијања прецизних вредности за средњу вредност и стандардну девијацију, рандомизација (*randomization*) и груписање по сличности (*blocking*) са циљем елиминације негативних утицаја на главни параметар. Ови процеси нису применљиви када се за генерисање података користе нумеричке симулације уместо експеримента.

Методе математичког програмирања се користе искључиво када је познат аналитички модел односа међу улазно/излазним параметрима.

Метода површине одговора (Response surface methodology - RSM) је логичан наставак методе спровођења експеримента (најчешће у форми Full and Fractional Factorial design), непрактична је у случају постојања више од 3 улазна параметра. У оквиру резултата експеримента користи средњу вредност (*mean response value*) а посебно се може користи вредност стандардне девијације (*standard deviation*).

Taguchi метод је метода експеримента која омогућава смањење броја извршења експерименталних проба. Циљ је проналажење оптималних вредности процесних (улазних) параметара како би се истовремено добили излазни параметри са дефинисаном вредношћу и најмањим могућим варијацијама. Међутим, Taguchi метод нема могућност истовременог дефинисања односно релације са више излазних параметара, па се у том случају комбинује са методама као што су DFA (Desirability Function Approach) и GRA (Grey Relational Analysis).

Савремене методе оптимизације

Детерминистичка оптимизација, или математичко програмирање, је класична грана оптимизацијских алгоритама у математици. Она представља алгоритме који се у великој мери ослањају на линеарну алгебру. Решења која се добијају представљају локални а не глобални оптимум. Предност ових метода је та што конвергенција до решења захтева мањи број корака у поређењу са употребом алгоритама стохастичке оптимизације. С обзиром да су засновани на ригорозној математичкој формулацији која не укључује стохастичке елементе, резултати детерминистичког процеса оптимизације су недвосмислени и поновљиви.

Методе стохастичке оптимизације су најиновативнији и најнапреднији приступи у оптимизацији. Извор инспирације за ове методе долази из посматрања природе. Нумерички модел је често прилагођено поједностављење природног света у сврху решавања проблема оптимизације кроз одређену шему засновану на еволуцији.

Већина ових метода су алгоритми засновани на популацији, у којима скуп почетних узорака еволуира (или се креће) до конвергенције. Правила еволуције, која увек укључују неки фактор случајности, зависе од изабраног природног модела.

Важан део у овим алгоритмима је балансирање између потреба за истраживањем простора дизајна за побољшање робусности алгоритма и потреба за конвергирањем ка решењу у разумном временском периоду. Подешавање се постиже подешавањем неких контролних параметара. Избор контролних параметара може имати значајан утицај на глобално понашање алгоритма.

У поређењу са детерминистичким методама оптимизације, стохастичке оптимизације имају следеће карактеристике: мање су математички компликовани, садрже случајност у поступку претраге, имају много спорију конвергенцију ка оптималном решењу.

Фази логика је намењена моделирању логичког закључивања које карактерише нејасне или непрецизне изјаве. У том смислу, фази логика је генерализација стандардне логике (сви искази имају вредност истинитости један или нула) на начин да искази могу имати вредност делимичне истинитости, као што је на пример 0.9 или 0.5. Овакав приступ даје више могућности за опонашање реалних животних околности, где су изјаве апсолутне истине или лажи веома ретке. Фази алгоритми су релативно једноставни за кодирање, али захтевају темељну верификацију и тестирање.

Експертски систем је компјутерски програм који користи технологије вештачке интелигенције за симулацију расуђивања и понашања човека (или организације) који имају стручно (експертско) знање и искуство у одређеној области од интереса. Постоји пет примарних типова експертских система: експертски системи засновани на правилима (*rule-based expert systems*), експертни системи засновани на оквирима (*frame-based expert systems*), фази експертни системи (*fuzzy expert systems*), неуронски експертни системи (*neural expert systems*) и неуро-фази експертни системи (*neuro-fuzzy expert systems*).

2.2 ОДНОС КЛАСИЧНЕ И АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

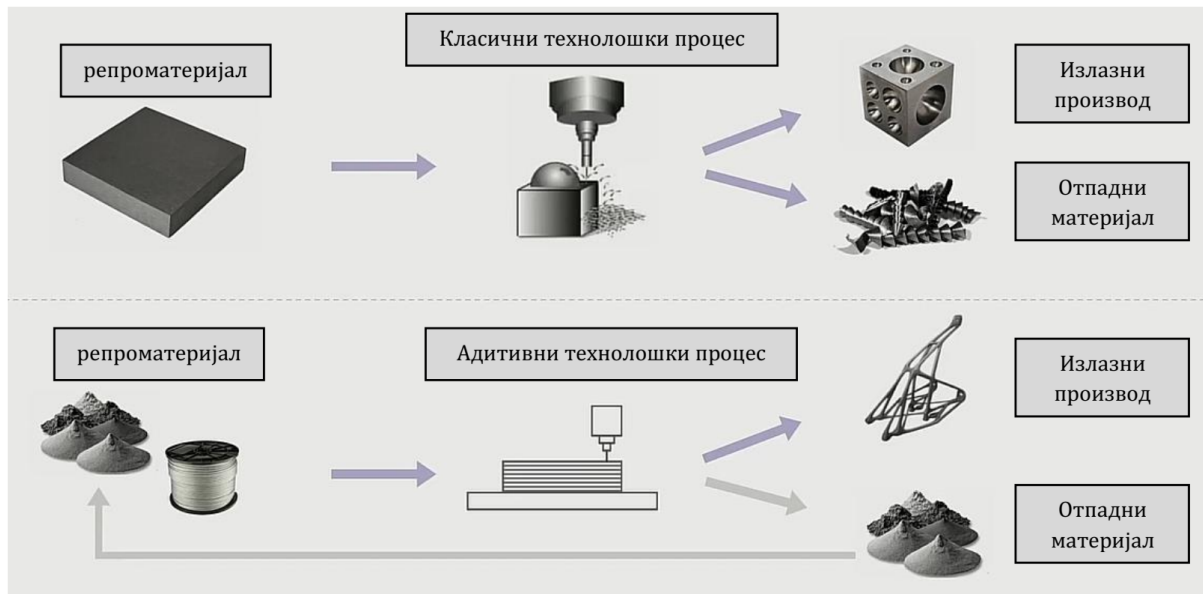
Класичне производне технологије (технологије механичке обраде скидањем струготине) обликовање материјала врше одузимањем (суптракцијом) материјала и његовим накнадним обликовањем, док адитивне технологије обликовање материјала врше процесом додавања материјала (слој по слој). Поред технологија механичке обраде скидањем струготине које се односе на обраду метала резањем (глодање, стругање, бушење), постоје и технологије механичке обраде без скидања струготине (обрада ливењем, спајањем и деформисањем).

Код технологије механичке обраде скидањем струготине у случају потребе добијања геометрија одређене сложености, исте се могу постићи коришћењем вишеосних CNC машина, а променом положаја дела и алата могу се постићи и значајно сложеније геометрије.

Када су у питању унутрашње сложене структуре оне не могу бити постигнуте класичном производњом осим једноставнијих најчешће правоугаоних канала и кружних отвора (користе се нпр. за хлађење алата). Структура трошкова генерисана у класичној производњи је позната и најчешће се односи на трошкове материјала, радне снаге, машине, режијске трошкове као и трошкове додатне обраде и трошкове контроле квалитета.

Елементи класичне производње су дуги низ година заступљени на тржишту. Сви сегменти производње су познати произвођачима и у исте имају поверења, обезбеђују проверени квалитет и дуготрајност у примени. За поједине материјале или машине постоји више добављача, проверене базе података и континуитет и истрајност у раду, усвојени су потребни стандард и алати за машине су доступни на тржишту. Квалитет у производњи је успостављен, постоје софтверска решења за пројектовање и симулацију (CAD/CAM алати), познати су генератори трошкова и исти се могу оптимизовати, време до изласка на тржиште се додатно смањује. Све претходно изнето указује да ће класична производња још дуго бити заступљена на тржишту.

Приликом увођења нових технологија производње јављају се многа питања и траже се додатне информације. Кроз поређења са класичним технологијама по разним сегментима (трошкови, профит, додатне вредности) утврђују се бенефити у усвајању и прихватању ново промовисаних технологија производње. У том смислу треба посматрати и однос класичне и адитивне технологије чији су технолошки процеси приказани на слици 1.



Слика 1: Приказ класичног и адитивног технолошког процеса.

У покушајима да се теоријски и кроз одређене економске показатеље објасне предности адитивне производње и сврсисходност примене, у различитим радовима (Öberg и др., 2018; Jayawardane и др., 2023; Lakshmanan и др., 2023) и дискусијама посвећеним овој тематици, могу се издвојити нека кључна питања од којих треба почети приликом ових разматрања:

- Које су то предности које адитивне технологије имају у односу на класичне производне технологије и којим производним сегментима: на производној линији, производном циклусу (елиминација неких процеса и операција), у фази монтаже производа, кроз утицај на комплексне геометрије, смањење времена и трошкова производње;
- Да ли класичним производним технологијама уопште требају адитивне технологије? Одговор лежи у проналаску адекватних производних сценарија који треба то и да оправдају;
- На ком нивоу треба извршити евентуалну замену класичних са адитивним производним технологијама: на одређеном производном циклусу, на нивоу целе фабрике, у одређеном производном сценарију.

Не постоји универзални одговор на постављена питања. У наредним поглављима покушаће се дати адекватан одговор на постављена питања и представити неке најважније карактеристике адитивне производње.

2.3 РАЗЛИКЕ ИЗМЕЂУ КЛАСИЧНИХ И АДТИВНИХ ПРОИЗВОДНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Технологије механичке обраде засноване на скидању струготине користе различите алате који долазе у контакт са површином материјала за обраду и производи се струготина као нус-продукт. Код технологије ковања, одређена сила врши притисак на материјал (обрадак) и формира његов облик у калупу без да се формира струготина као нус-продукт. Код технологије ливења (или бризгања пластике) материјал у течном стању се утискује у калуп ради формирања крајњег облика.

Компјутером контролисане (CNC) технологије су у основи технологије засноване на компјутерском програмирању. За контролу процеса и побољшање тачности током процеса користе се CNC контролери. CNC технологије, до одређене мере, могу да произведу сложену геометрију дела али пре свега методом одузимања материјала а не додавањем истог. Ово захтева у почетној фази припремак у виду блока материјала димензија које одговарају димензијама крајњег производа.

За разлику од напред објашњеног, адитивне технологије користе металне прахове, филаменте или одређене ликвидне супстанце које се додавају слој по слој, у свим правцима и димензијама, и на тај начин настаје крајњи производ. Аутори (Gibson и др., 2021) су разматрали разлике између класичних и адитивних производних технологија кроз неколико аспеката:

- *Материјал:* Класичне технологије користе материјале познатих механичких карактеристика (челик и друге легуре метала) који су прилично компактне структуре а крајњи производ се добија са тачним димензијама и познатим механичким карактеристикама. Готов производ израђен класичним технологијама има предвидљив квалитет и хомогеност у структури.

Код АТ примена металних прахова и легура, захваљујући оријентацији дела на радној плочи и процесним параметрима, у одређеним случајевима доводи до појаве шупљина (пора) и анизотропности готовог производа.

- *Брзина:* Код АТ израда дела обично кратко траје, до неколико сати. Ако се у једном лоту производи више делова њихово време израде је исто. У зависности од постављених захтева на ово време се могу додати и активности постпроцесинга које може да продужи укупно време израде.

Код класичне CNC машине (чак и код 5-то осних CNC машина) израда одређеног дела може да траје данима, па чак и недељама, што је условљено планирањем производње које обухвата и израду и примену додатних пратећих алата за ослањање и стезање, поготово ако се део производи по први пут. Време израде дела смањиваће се израдом више комада.

- *Комплексност:* Сложеније геометрије не могу бити израђене CNC машинама што је условљено ограничењима у кретању алата при изради одређених површина. Ово се може превазићи израдом дела из више компоненти, применом неконвенционалних поступака обраде и накнадним њиховим спајањем.

Код АТ нема ограничења при изради спољашњих и унутрашњих површина.

- *Тачност:* Код производње CNC машинама тачност димензија, у све три осе, зависе од тачности преносника машине и тачности радног алата (нпр пречника код ротационог алата за сечење).

По питању тачности АТ могу да израђују делове са тачношћу од неколико микрона у различитим правцима. Изградња дела у вертикалном правцу (z-оса) указује на параметар који се односи на дебљину слоја изградње. На тачност постизања димензија у правцу изградње утичу механичке компоненте радне плоче (мотори и преносници у механизму за покретање радне плоче).

- *Геометрија*: Код АТ врши се трансформација 3D модела у низ 2D равни са одређеном номиналном дебљином. Формирањем сваке од ових равни а затим слагањем једне на другу и спајањем формира се тражени део односно 3D површина.

Ово није могуће извести код CNC технологија које применом више алата у 3D простору формирају део. Једноставне конструкције као што су цилиндри, купе или конуси могу се лагано произвести на овај начин. Сложене конструкције захтевају промену оријентације алата, радног дела и додатна подешавања.

Поред напред описаних техничких аспеката, у контексту даље комерцијализације метода АТ битан је и економски аспект. Примена техничких аспеката мора бити истовремено упарена са економским аспектима у циљу постизања комерцијалног успеха адитивног процеса. У наредном поглављу биће више речи о овоме.

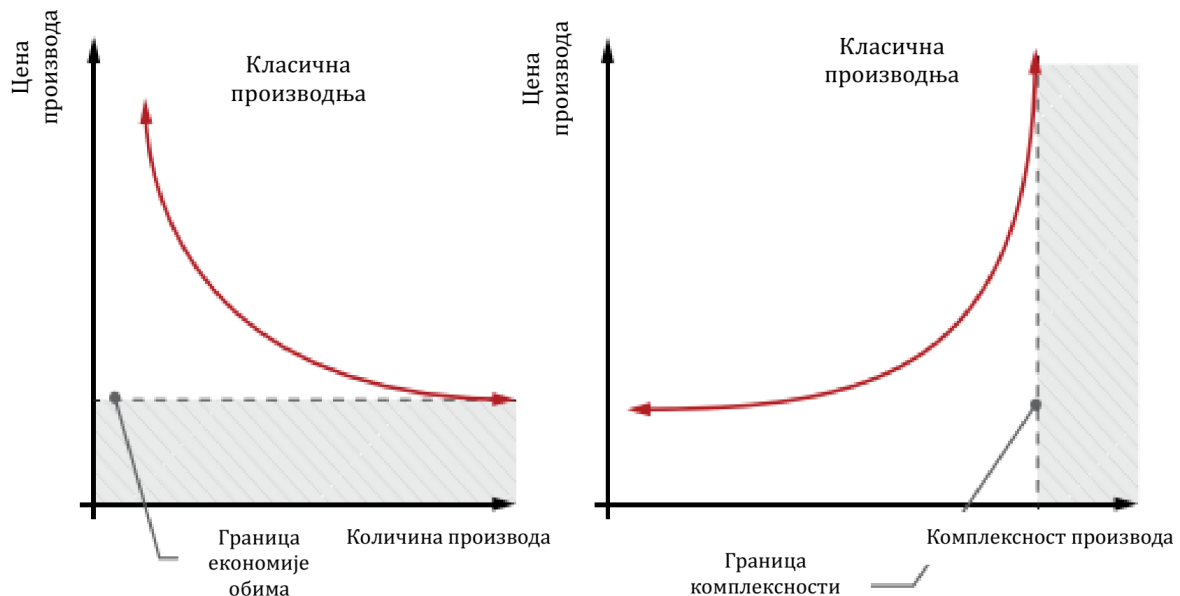
2.4 ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ КЛАСИЧНЕ И АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ И ОПТИМАЛНИ СЦЕНАРИО ПРОИЗВОДЊЕ

У оквиру овог поглавља приказане су кључне области и могуће примене АТ на начин да буде економски оправдана и оптимална, поређењем са класичним технолошким поступком. У том смислу прво се објашњавају економски аспекти на којима се заснива класична производња а затим се кроз економску призму објашњавају и специфичности адитивног процеса, (Leary, 2020).

2.4.1 Економски аспекти класичне производње

Иза сваког инжењерског подухвата обично се налази и одређена економска основа (рачуница), и та такозвана инжењерска економија представља одређени алат за квантификацију инжењерских решења у погледу трошкова и омогућава одређену фискалну оптимизацију дизајнерских решења још у фази пројектовања и развоја производа.

У основи трошкови производа експоненцијално расту са сложенешћу геометрије производа, односно има инверзни раст посматрано са аспекта количине или запремине. Генерално објашњење ове констатације је кроз економију обима. Према наводима у књизи (Јашко и др., 2017) економија обима се односи на производ или услуге које се пружају у што већем обиму, фиксни трошкови пропорционално мање учествују у трошковима по јединици производа, набавне цене улазних производа (сировина) могу бити мање јер се набављају веће количине. Како запремина производа расте јединачни трошкови производње се распоређују на већи број производа, слика 2 (лево).



Слика 2: Графички приказ односа повећања количине и комплексности у односу на трошкове класичне производње, (Leary, 2020).

Трошкови се дефинишу као фиксни и варијабилни у зависности да ли су зависни од количине произведених производа. Фиксни трошкови се односе на пројектовање (укључује радну снагу, софтвер и обуку), продају и маркетинг, хардверски део и одржавање. Варијабилни трошкови се односе на утрошак материјала и пратећих потрошних добара, као и радне снаге која је повезана са производњом. Може се закључити да за малу количину производа јединачна цена је скоро једнака фиксним трошковима генерисаним кроз пројектовање производа. Како се количина/запремина производа повећава укупни трошкови се распоређују на повећани број производа и самим тим јединачна цена постаје мања.

Истовремено како производ постаје геометријски комплекснији, време производње, трошкови примењених мера за контролу квалитета, као и стопа одбацивања производа након контроле постаје већа. Крива трошкова се асимптотски приближава бесконачности за одређени постигнути ниво комплексности специфичан за изабрану производну технологију, слика 2 (десно).

На основи изнетог, за традиционалну производњу се може закључити да се јединачна цена минимизује за производе мање комплексности и за производњу у већој серији. Ово чини основу за економију масовне производње.

2.4.2 Економски аспекти адитивне производње

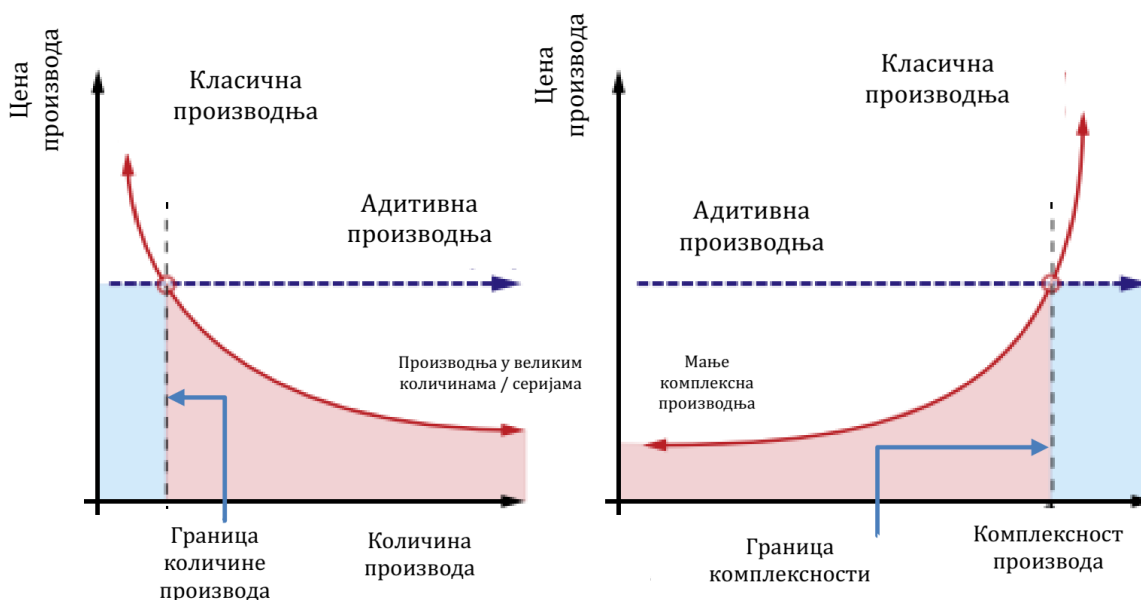
Са економског аспекта, адитивна производња се разликује од традиционалне производње. Разлике настају због дигиталног приступа у пројектовању и производњи, као и због специфичности припреме и потрошње материјала за израду производа. Наведено указује да закључци по питању економије производње донети за класичну производњу не важе и за адитивну производњу.

Трошкови израде комплексног производа у малим серијама могу бити значајно смањени применом различитих АТ. Јединачна цена производа код адитивних

процеса се моделира као независна од његове комплексности. Ово су кључне предности које са собом носе одређене АТ у односу на класичне производне технологије.

Посматрано кроз односе „цена производа – запремина“ и „цена производа – комплексност“ приказаних на слици 3, економске предности адитивне производње постоје у сценаријима који обухватају производњу у малим серијама и производњу високо комплексних геометрија. Граничне вредности када једна производна технологија постаје економски оптималнија у односу на другу дефинисане су кроз: границу количине производа и границу комплексности, слика 3.

Кључни параметар у процени наведених граничних вредности је зрелост технологије. Класичне технологије тренутно имају висок ниво технолошке зрелости у поређењу са појединим АТ. За очекивати је да ће у блиској будућности технолошки „зрелије“ адитивне технологије дефинитивно утицати на цену производа и померање граница у корист АТ.



Слика 3: Графички приказ односа „трошкови-количина“ и „трошкови-комплексност“ код класичне и адитивне производње, (Leary, 2020).

Имајући у виду да су трошкови дела произведеног АТ независни од количине и комплексности производа потребно је дефинисати који су то економски оптимални сценарији који то обезбеђују.

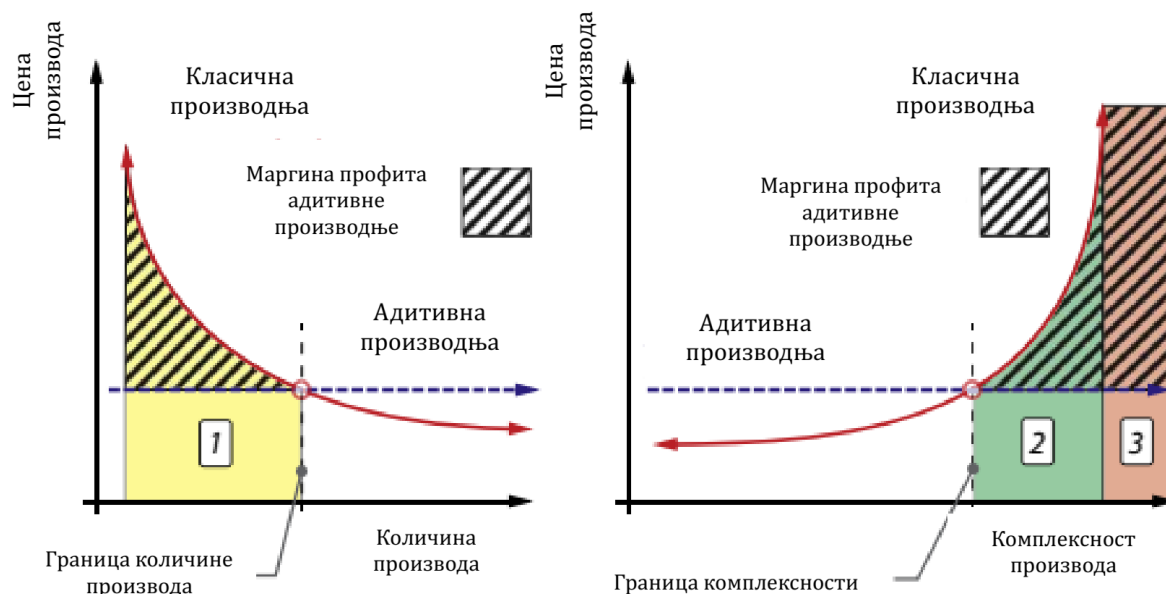
2.4.3 Економски оптимални сценарио производње

При дефинисању економски оптималних сценарија производње узета је реална претпоставка да су предпроцесни трошкови и трошкови пројектовања мали односно имају мало учешће као контрибутори у укупним јединачним трошковима. На овим претпоставкама могу се дефинисати специфичне економске регије (сценарији) које пружају могућности за комерцијализацију АТ, слика 4.

Сценарио производње у малим серијама: За количину производа која је испод граничне вредности јединачни трошкови код АТ су мањи у односу на класичну

производњу (слика 4, зона 1). Овај производни сценарио се односи на производњу концептуалних модела и техничких решења, производњу шаблона и алата, јединачну производњу и веома малу серијску производњу.

Сценарио комплексности: Праг комплексности испод којег постоји економска оправданост примене адитивне технологије у изради комплексне геометрије приказана је на слици 4 (зона 2). Овај сценарио се постиже применом тополошке оптимизације структуре, функционалном интеграцијом система и серијском производњом комплексних производа.



Слика 4: Графички приказ економских сценарија код класичне и адитивне производње (зона 1 – сценарио производње у малим серијама, зона 2 – сценарио комплексне производње, зона 3 – сценарио високо комплексне производње), (Leary, 2020).

Сценарио високе комплексности: Односи се на сценарио у којем класичне производне технологије не могу, у техничком и трошковном смислу, да одговоре на захтеве комплексности. Ово пружа прилику за употребу адитивне технологије у креирању производа високе вредности, применом тополошке оптимизације и генеративног дизајна (слика 4, зона 3).

Сценарио масовне персонализације (кастомизације): Флексибилност адитивних технологија доводи до појаве масовне персонализације, под условом да се укупни број тражених производа може категорисати као масовна производња. Ова производња је омогућена применом генеративног дизајна (аутономност пројектовања и производње применом експертских система са довољном ефикасношћу да варијабилни трошкови буду изузетно мали) и односи се на поље изнад зоне 3 на слици 4.

2.5 ПРЕДНОСТИ У ПРИМЕНИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

У својој мастер тези (Lamei, 2021) наводи да адитивне технологије омогућавају јединствене и карактеристичне предности и исте је груписао у неколико области:

- *Комплексност геометрије/облика: омогућава изградњу такозваног „near net shape“ облика као и унутрашњих канала (обезбеђују конформно хлађење код калупа), што није могуће обезбедити класичним методама производње;*
- *Комплексност хијерархијске структуре: односи се на конфигурацију унутрашње структуре делова (саһасте/ћелијске структуре) која омогућава смањење масе уз обезбеђење потребне чврстоће;*
- *Функционална комплексност: омогућава израду комплексне геометрије као један део (у једном комаду);*
- *Комплексност материјала: поједине адитивне технологије омогућавају израду делова од различитих врста материјал (у једном слоју) који поред различитих механичких карактеристика имају и различите текстуре.*

У раду (Attarian, 2017) сумиране су предности АТ у односу на класичну производњу у различитим областима примене, табела 2.

Табела 2: Области примене и предности адитивних технологија, (Attarian, 2017).

ОБЛАСТ ПРИМЕНЕ	ПРЕДНОСТИ
Брза израда прототипова	Смањење времена изласка производа на тржиште Смањени трошкови производње Компаније постају ефикасније и компетитивне на тржишту
Производња резервних делова	Смањено време за поправку Смањени трошкови радне снаге Избегавање трошкова складиштења
Производња у малим серијама	Мале серије су произведене на ефикасан начин Нема трошкова инвестиција у алате
Израда алата за производњу	Смањени трошкови радне снаге, не постоје трошкови складиштења Могућност масовне персонализације уз мале трошкове
Брза производња делова	Директна израда финализованих производа Израда сложених делова са малим трошковима Трошковано прихватљива производња у малим количинама
Израда компонената за процес производње	Побољшан квалитет, скраћени ланци снабдевања Смањење трошкова пројектовања Помаже код елиминације непотребних компонената
Израда персонализованих производа и/или резервних делова, на лицу места или по захтеву	Масовна персонализација уз мале трошкове Елиминација трошкова складиштења и транспорта Смањује трошкове кроз умањење времена у отказу Значајно умањује трошкове поправке Скраћивање ланца снабдевања Смањена потреба за великим складиштењима Уравнотежава трошкове животног циклуса производа
Брза поправка	Значајно смањење времена поправке Могућност оптимизације делова у складу са новим решењима и дизајном

У циљу обезбеђивања предности које пружају АТ кључни аспект је фаза пројектовања. У том смислу АТ уводе нови концепт Design for the AM (DfAM) односно пројектовање за адитивну производњу, која обухвата неколико кључних сегмената, (Ћирић-Костић и др., 2020):

- Дизајн за смањење масе (тополошка оптимизација, хијерархијске односно решеткасте и ћелијске структуре, бионички принципи и трансформација облика из природе);
- Дизајн за мулти-функционалност остварену обликом;
- Дизајн интегрисаних геометрија - консолидација делова, више делова спојених у једну целину
- Дизајн за побољшање функције и перформанси дела;
- Дизајн и прилагођавање - дизајн по мери корисника;
- Дизајн за оптимизовано хлађење алата.

И поред свих предности које пружа адитивна технологија, процес усвајања адитивне технологије представља део стратешког одлучивања у компанији и углавном зависи од потреба и буџета.

2.6 МОГУЋИ ПУТЕВИ УСВАЈАЊА АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

У складу са наводима у раду (Vaneker и др., 2020) циљ примене адитивних технологија у индустрији је повећање вредности у три карактеристична сегмента: профит (већи), ризик (мањи) и време израде (мање). Такође, исти аутори наводе и тактичке разлоге за примену адитивних технологија који се посматрају са аспекта готовог производа и ланца снабдевања. У вези са изнетим, дефинисана су четири могућа пута за усвајање адитивних технологија, слика 5:

- Пут 1 (*статус мировања*): компаније не траже радикалне модификације у свом производном програму и ланцу снабдевања, али у примени АТ виде могућност увећања вредности својих производа према клијентима. Типични примери су: израда прототипова, алата и помоћног прибора.

Кључни чиниоци који обезбеђују предности АТ: пројектовање и брза израда прототипова, персонализација у изради алата, стварање додатних способности у производњи, производња у малим серијама без да унете промене драстично претходно мењају начин производње.

- Пут 2 (*еволуција у ланцу снабдевања*): примену АТ виде као решење за развој новог пословног модела у којем је примарни циљ производња крајњег/готовог производа. Примери овог приступа се односе на производњу резервних делова и производњу на критичним локацијама (ратне зоне, нафтна индустрија, свемирски програм).

Кључни чиниоци који обезбеђују предности АТ: производња ближе корисницима, брзи одговор на захтеве и флексибилност, управљање неизвесностима, смањење залиха.

- Пут 3 (*еволуција производа*): АТ виде као решење за повећање перформанси својих производа. Примери су израда млазница за авиомоторе, израда делова лаганих структура, израда делова који омогућавају накнадну уградњу електронских компоненти и сензора.

Кључни чиниоци који обезбеђују предности АТ: персонализација производа, повећање функционалности производа, пружање одговора на захтеве тржишта, минимални трошкови у вези са повећањем комплексности производа.

- Пут 4 (*еволуција пословног модела*): развија се нови пословни модел који се заснива на промени концепта ланца снабдевања и потпуно новим производом. Примери су 3D скенирање и штампање (на пример обуће, итд).

Кључни чиниоци који обезбеђују предности АТ: масовна персонализација производа, производња ближе кориснику, смањење посредника у ланцима снабдевања, оснаживање купаца за већим учешћем у адитивним процесима.



Слика 5: Могући путеви усвајања адитивне технологије, (Vaneker и др., 2020).

Све напред наведене путање односе се на пројектовање производа и њихову дистрибуцију у оквиру ланца снабдевања АТ. У свим наведеним процесима, без обзира да ли се ради о тенденцији унапређења перформанси производа или се задржавају претходно усвојене адитивне технологије (без радикалних промена) неопходно је вршити оптимизацију (производа, процеса) у складу са специфичностима (предностима и ограничењима) примењених АТ како би крајњи производ био поуздан, израђен на време и трошковно ефикасан.

Адитивна производња са предностима које пружа, у економском и техничком смислу у односу на класичну производњу, представља адекватно и конкретно решење за даљу примену ради унапређења производног процеса.

3. КОНЦЕПТ АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

Ово поглавље је у потпуности посвећено адитивној производњи и конципирано на начин да се након објашњења основних технологија адитивне производње, у другом делу посебно објасни производња металних делова адитивним путем и изврши поређење доступних АТ са фокусом на L-PBF технологију која је и предмет анализе и оптимизације у овој дисертацији. Технолошки концепт на којем се заснива L-PBF технологија и области примене су детаљно објашњени у трећем и четвртном делу. У наставку поглавља анализира се проблематика у размени информација која прати адитивни процес, затим објашњава концепт 4D и 5D штампе и нови трендови у развоју. Последња два дела објашњавају процес стандардизације у АТ и примену у производњи наоружања и војне опреме.

3.1 ОСНОВНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

Да би прецизно дефинисали и навели основне технологије у адитивној производњи, већина анализираних аутора се обично позивају на дефиниције организација које се баве стандардизацијом у области АТ (Међународна организација за стандардизацију – ISO и Америчка организација ASTM International). Обе организације адитивну производњу дефинишу као „процес спајања материјала у циљу добијања делова и објеката на основу података из 3D модела, најчешће слагањем материјала слој по слој, за разлику од методологије субтрактивне/класичне производње“.

Према (ISO, 2021) постоји 7 (седам) стандардом дефинисаних технологија адитивне производње. За термилошке одреднице стандардизованих седам 3D технологија (слика 6) на српском језику коришћен је превод дефинисан у нацрту српског стандарда референтне ознаке „naSRPS EN ISO/ASTM 52900:2023 (sr)“ (Адитивна производња – општи принципи – основе и речник) који је идентичан са EN ISO/ASTM 52900:2021.



Слика 6: Седам основних технологија адитивне производње, (ISO, 2021).

Свака од седам основних технологија има својих предности и недостатака а у табели 3 наведене су њихове карактеристике, материјали који се користе, области примене и заступљене методе. Адитивне технологије су погодне за производњу

делова од различитих врста—материјала (метали, полимери, керамика и композити). Детаљним проучавањем адитивног процеса утврђени су захтеви за познавањем различитих научних области и метода пројектовања (пројектовање процеса, програмирање, термодинамика, пренос топлоте, механика флуида, наука о материјалима и физика).

Табела 3: Основне технологије адитивне производње и њихове карактеристике, (Bonnard и др., 2018), (Yi и др., 2019).

ОСНОВНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ	КАРАКТЕРИСТИКЕ	МАТЕРИЈАЛ	ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ	ЗАСТУПЉЕНЕ МЕТОДЕ
ФОТО - ПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization)	Селективно очвршћавање течног фотополимера у кади полимеризацијом активирану извором светлости	Полимери, Керамика	Прототип, Функционално тестирање, Моделирање алата, Израда делова са доста детаља, Презентациони модели	SLA – Stereolithography, DLP – Direct Light Processing, CLIP – Continuous Liquid Interface Production
ЕКСТРУДИРАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material extrusion)	Селективно таложење филамента на радну плочу преко млазнице	Полимери, Метал, Керамика, Композит	Прототип, Функционално тестирање, Моделирање алата, Персонална употреба	FDM – Fuse Deposition Modeling, FFF – Fuse Filament Fabrication, ADAM – Atomic Diffusion AM
ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА (Material jetting)	Селективно таложење капљица материјала помоћу главе за штампање	Полимери, Метал, Керамика, Композит	Концептуални модели, Ограничено функционално тестирање, Модели у бојама	Polyjet, MJP – Multijet Printing
ВЕЗИВНА 3D ШТАМПА (Binder jetting)	Селективно наносење течног везивног материјала ради спајања са радним материјалом	Полимери, Метал, Керамика	Прототипови, Готови производи, Алати за ливење и калупи	MJF – Multijet Fusion, SPJ – Single pass Jetting
ФУЗИЈА / СПАЈАЊЕ ПРАХОМ (Powder Bed Fusion)	Селективно наносење праха и његово спајање извором топлотне енергије	Полимери, Метал, Керамика	Готови производи, Тестирање, Брза израда алата, Делови који издржавају велике температуре	SLS – Selective Laser Sintering, SLM – Selective Laser Melting or DMLS – Direct Metal Laser Sintering
СПАЈАЊЕ УСМЕРАВАЊЕМ ЕНЕРГИЈЕ (Direct energy deposition)	Таложење праха или филамента топљених извором топлоте	Метал	Готови производи, Тестирање функције, Брза поправка / ремонт делова, Делови који издржавају велике температуре	LENS – Laser Engineered Net Shape, EBAM – Electron Beam AM, LMDw – Laser Metal Deposition with wire, WAAM – Wire Arc AM
ЛАМИНАЦИЈА ФОЛИЈА / ЛИСТОВА МАТЕРИЈАЛА (Sheet lamination)	Спајање листова материјала и креирање објекта обликовањем спојених листова	Полимери, Метал, Керамика, Композит, Папир	Тестирање форми, Модели алата, Делови мањих тачности	LOM – Laminated Object Manufacturing, UAM – Ultrasonic AM

Док већина АТ укључује фузију материјала (нпр. PBF и DED) заступљена је и технологија производње делова коришћењем везивања и синтеровања (везивна 3D штампа). Сходно томе, у зависности од захтеваних својстава и потребних перформанси делова (смањење заосталих напрезања и порозности, израда делова повећане тачност и димензија), различите адитивне производне технологије су доступне, (Patel и др., 2024).

У раду (Bonnard и др., 2018) објашњава се да су због нижих цена штампача као десктоп решења и широког спектра обрадивих материјала, најпожељније категорије 3D штампе за брзу израду прототипова: фотополимеризација у кади, везивна и директна 3D штампа, и екструдовање материјала.

Међу развијеним адитивним технологијама посебно се издвајају технологије за производњу металних делова. За потребе примене АТ за производњу метала неопходно је познавање и техника припреме сировина (конкретно металних прахова: атомизација водом, атомизација плазмом, електроиндукциона атомизација, центрифугална атомизација) укључујући и саму технологију производње делова као крајњег производа великог нивоа тачности. Различите АТ за производњу метала имају јединствене могућности у погледу брзине производње, постизања велике чврстоће компоненти, малих толеранција, израду делова велике сложености и различитих врста материјала.

У фокусу даљег интересовања, а за потребе ове дисертације детаљније ће се анализирати АТ које користе метални прах као улазну сировину и могу се користити за израду прототипова и готових производа.

3.2 МАМ (METAL ADDITIVE MANUFACTURING) - ПРОИЗВОДЊА МЕТАЛНИХ ДЕЛОВА АДТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА

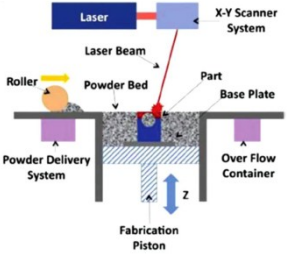
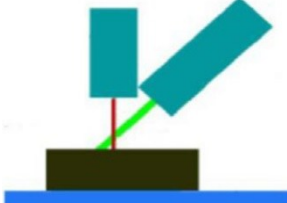
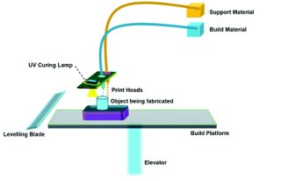
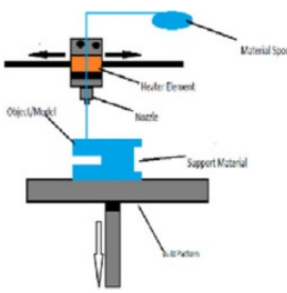
У претходном периоду АТ за производњу делова од метала обично су се референцирале на PBF технологије (ласерско и електро спајање металног праха). Међутим, према наводима у студији (AM Power, 2020) на тржишту постоји више од 18 различитих АТ за израду делова од метала.

Према раду (Dietrich и др., 2019) постоје три примарне адитивне технологије за израду делова од метала: DED (Direct energy deposition) технологија, PBF технологија, директна 3D штампа, док (Patel и др., 2024) у ову групу убрајају и технологију ламинације фолија. Аутори (Armstrong и др., 2022) убрајају и адитивну технологију екструдовање материјала у групу МАМ технологија.

Свака од набројаних МАМ технологија разликује се међусобно по основу тоplotног извора за топљење металног праха (ласерски или електро лук), по облику улазног материјала (прах, жица, листови/фолије), поступка спајања/фузије материјала као и сировине која се додаје у том процесу. DED и PBF технологије за производњу металних делова засноване су на топљењу материјала и као такви широко се користе за израду делова топљењем титанијума, челика, никла и легура на бази алуминијума. Везивну 3D штампу карактерише коришћење везивног агенса за спајање честица праха као и накнадни процес синтеровања за добијање жељених механичких карактеристика. Код технологије ламинације листова, 3D компонента се производи слагањем листова.

У циљу бољег разумевања предности и недостатака сваке до четири МАМ адитивне технологије извршено је њихово међусобно поређење, табела 4.

Табела 4: Основне карактеристике МАМ технологија, (Armstrong и др., 2022).

АДИТИВНА ТЕХНОЛОГИЈА ЗА ИЗРАДУ ДЕЛОВА ОД МЕТАЛА	ПОЗИТИВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	НЕГАТИВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ
<p>СПАЈАЊЕ ПРАХОМ (L-PBF)</p> 	<p>Релативно висока прецизност израде, израда делова у NNS (Near Net Shape) формату, високи степен искоришћености металног праха, висока чврстоћа и тврдоћа материјала, могућност рециклирања металног праха, израда делова велике сложености, употреба различитих врста металног праха</p>	<p>Постојање површинске хрпавости и порозности код израђених делова, висока заостала напрезања, потреба за постпроцесингом, постојање потпорних структура приликом израде, ризици приликом манипулације са металних прахом, слаба продуктивност, лимитираност у величини израде дела, комплексност у односима између параметара процеса и крајњих карактеристика дела</p>
<p>СПАЈАЊЕ УСЕМРАВАЊЕМ ЕНЕРГИЈЕ (DOD)</p> 	<p>Могућност израде релативно великих делова, могућност додавања материјала на већ израђену површину, процесирање различитих материјала, велика брзина изградње, израда делова велике густине, могућност измене материјала током изградње делова, економичност велика када се поправљају релативно скупи делови</p>	<p>Висока заостала напрезања, могућност дисторзије услед заосталог напрезања, велика хрпавост површине, захтева накнадну обраду, контрола процеса може бити захтевна</p>
<p>ВЕЗИВНА 3D ШТАМПА (Binder Jetting)</p> 	<p>Мали капитални трошкови, велика могућност скалабилности, не захтева потпорне структуре, релативно велика брзина изградње делова, релативно добар квалитет завршне површине, мала заостала напрезања у деловима</p>	<p>Порозност, сложеност у предикцији и контроли скупљања дела, комплексан процес везивања честица праха и везива</p>
<p>ЕКСТРУДОВАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material Extrusion)</p> 	<p>Једноставност у употреби, економичност употребе, сигурно и безбедно руковање са улазним материјалом, израда делова релативно високе тачности</p>	<p>Висока порозност израђених делова, појава ефекта степеница што пружује лош квалитет завршне површине, појава анизотропности услед лошег везивања слојева материјала, захтева се процес уклањања везивног материјала, смањена чврстоћа материјал у правцима нормалним на правац изградње, потреба за потпорним ослонцима код делова са препустима</p>

Постизање тачности, прецизности и поузданости код произведених металних делова у великој мери зависи од добре карактеризације металних прахова (репроматеријала), разумевања и примене адекватних параметара процеса, повезаности процеса фузије металног праха и оријентације делова на радној плочи са постизањем механичких карактеристика крајњег производа, (Laureijs и др., 2017) и (Wang и др., 2023).

МAM АТ доживеле су технолошки напредак захваљујући развоју софтвера и хардверских решења које их подржавају, као и еволуцију од фазе израде искључиво прототипова до израде веома сложених делова у серијској производњи. С тим у вези, посебно се истиче могућност да МAM АТ буду транзиционе технологије односно алтернатива за масовну производњу делова од метала.

Аутори (Armstrong и др., 2022) наводе и додатне предности које МAM технологије имају у односу на класичне технологије:

- Смањење потрошње материјала правилним планирањем додавања материјал на за то потребним местима (према потребама саме структуре дела);
- Не захтева се додатна припрема улазних сировина (метални прах или жица, алуминијум/бакар/кобалт легуре) који се код МAM технологија користе као готови производи;
- Израда делова који скоро у потпуности задовољавају захтеве САD модела што смањује потребе за накнадним постпроцесним радовима и обрадама. МAM технологије омогућавају производњу сложених структура са такозваним „near net shape (NNS)“ карактеристикама (приближно истог облика готовог дела као пројектовани део) од различитих врста металних прахова.
- Не производи се додатни шкарт као што је струготина код класичних технологија.

Ипак МAM технологије захтевају одређене дораде у смислу постпроцесинга које се најчешће односе на уклањање дела са радне плоче машине као и потпорних структура. МAM АТ постају епицентар истраживања због својих способности да одговоре захтевима већине индустријских грана, посебно аутомобилске, авио и одбрамбене индустрије као и медицине, (Srivastava и др., 2022).

Међутим, и поред очигледних предности и тенденција ка све већој примени и усвајању код МAM АТ постоје и одређени изазови: техничко-технолошке природе, по питању квалитета материјала, поузданости процеса, економске баријере (велики иницијални и оперативни трошкови), велика потрошња енергије, утицај на окружење и животну средину. Посебно се истичу изазови у областима стандардизације и сертификације, (Miteva и др., 2024).

МAM АТ се налазе на прекретници и решавање наведених техничких, економских и регулаторних изазова биће кључно за њихову ширу примену. Подстицањем сарадње и улагањем у истраживање потенцијал МAM АТ у револуцији производње може се у потпуности реализовати и тако отворити нове могућности за иновације и раст.

Аддитивна L-PBF технологија се издваја међу МAM АТ као најпрецизнија и најсвестранија технологија која је идеална за комплексне и високоперформансне

компоненте. Комбинација прецизности, чврстоће и могућност персонализације даје предност овој технологији у примени у авио и аутомобилској индустрији и медицини. Међутим постоји простора за додатна унапређења у примени L-PBF технологије а то се односи на следеће чињенице:

- Потреба за додатним подешавањем различитих параметара током процеса израде делова и разумевање њиховог утицаја на добијање квалитетнијег производа бољих карактеристика и својстава;
- Истраживање оптималних комбинација међу параметрима у циљу унапређења једног својства производа без угрожавања осталих својстава, што постаје изазовно у ситуацијама које су праћене комплексним термалним процесима у фази израде дела.

Може се закључити да би се не спровођење наведених анализа и не разумевање односа међу параметрима негативно одразило на обезбеђивање конзистентности у напредовању L-PBF и добијању квалитетног финалног производа. Такође, услед наведеног адитивна L-PBF не би у техничком и економском смислу била конкурентна технологија за примену у масовној производњи делова од метала.

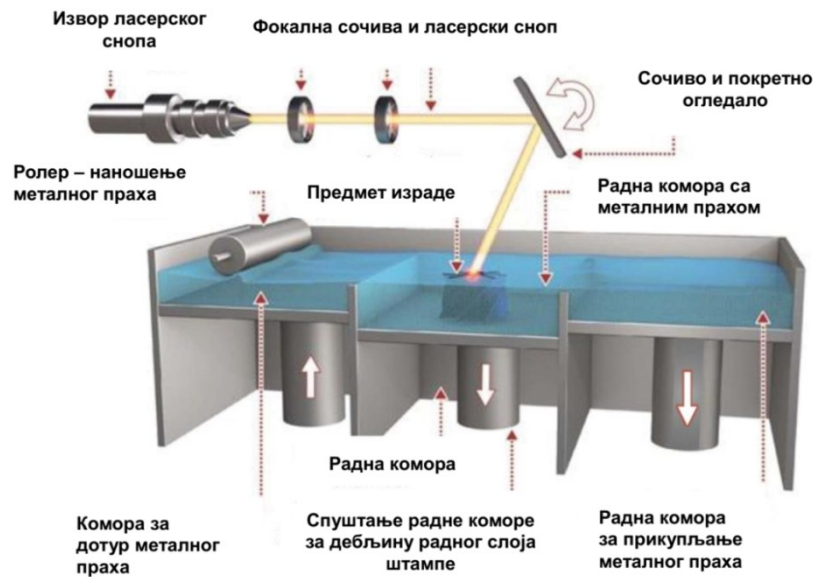
На основу изнетих чињеница и анализа даље истраживање у овој дисертацији је усмерено на адитивну L-PBF технологију. Истраживање је примарно фокусирано на истовремену оптимизацију различитих параметара током процеса израде дела са циљем смањења укупних трошкова израде. Поред модела трошкова, развијен је и нови оквир за пројектовање производа и процеса о чему ће бити више речи у наредним поглављима.

3.3 ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК ИЗРАДЕ ДЕЛОВА ОД МЕТАЛА ПРИМЕНОМ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ (ЛАСЕРСКО СПАЈАЊЕ МЕТАЛНОГ ПРАХА)

У зависности од извора енергије, адитивна PBF технологија је класификована у две групе: ласерска L-PBF технологија и електро E-PBF технологија. Ласерска L-PBF технологија је намењена за производњу металних делова (користећи метални прах или прах од легуре материјала). Користи ласерски зрак за селективно спајање честица металног праха у радној комори, (Wang и др., 2023).

Систем од три компјутером контролисане коморе (комора за довод праха, радна комора и комора за сакупљање праха) и уређај за наношење праха (у једном слоју) омогућавају манипулацију прахом и изградњу делова (слој по слој). Прашкасти материјал се наноси у једном слоју, затим ласерски сноп (преко система огледала) селективно спаја нанете честице праха на предметном слоју стварајући један профил дела (на основу података из CAD модела и претходно формираних слојева за изградњу). Затим се радна платформа спушта ниже за унапред дефинисану дебљину слоја и цео процес се понавља док се предмет изградње не заврши, (Özel и др., 2020).

У радној комори, која је затворена, формира се заштитна атмосфера од одређених гасова (аргон, азот) што зависи од коришћеног металног праха обезбеђујући сигурну радну зону за процес топљења праха, слика 7.



Слика 7: Шематски приказ L-PBF технологије за производњу делова од метала, (Özel и др., 2020).

Поред изнетих карактеристика у табели 4, аутори (Prathyusha и др., 2022), (Taghian и др., 2023) и (Wang и др., 2023) посебно су анализирали предности и недостатке L-PBF технологије. Иако се резултати анализе углавном поклапају са наводима у табели 4, постоји још доста предности које са собом доноси L-PBF AT од којих се неке наводе у наставку: производња различитих компоненти у једном процесу израде, повећана слобода дизајна, производња лаких делова као резултат тополошке оптимизације, консолидација делова у један склоп, уградња додатне функционалности (интерни канали за хлађење), умањење времена животног циклуса између циклуса дизајн-производња-испорука компоненти, висок однос „buy-to-fly ratio“ (однос почетне масе материјала у односу на масу завршног - готовог дела) што доводи до значајних уштеда у трошковима улазне сировине.

Адитивне технологије карактерише чињеница да долази до смањења корака процеса производње, што указује да би укупан број потребних процеса и ресурса могао бити значајно смањен, што у крајњој линији доводи до поједностављења процеса, (Özel и др., 2020).

Све ове чињенице наводе на закључак да је потребно извршити детаљно планирање процеса, од фазе пројектовања до израде завршног дела, а посебну пажњу треба обратити на размену информација у овом процесу.

3.4 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ АДТИВНЕ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ

У наставку поглавља наведени су делови произведени адитивном L-PBF технологијом у различитим областима. Према наводима у раду (Ali и др., 2022) многи истраживачки радови фокусирани су на истраживање механичких својстава појединих метала за могућу имплементацију у различитим сферама, а сам аутор је анализирао готове студије са завршеним и примењеним решењима која су приказана у наставку.

Кључни параметар код компоненти за авио индустрију је тежина. Крајњи циљ сваког истраживања је усмерен на смањење тежине компоненти (структурна

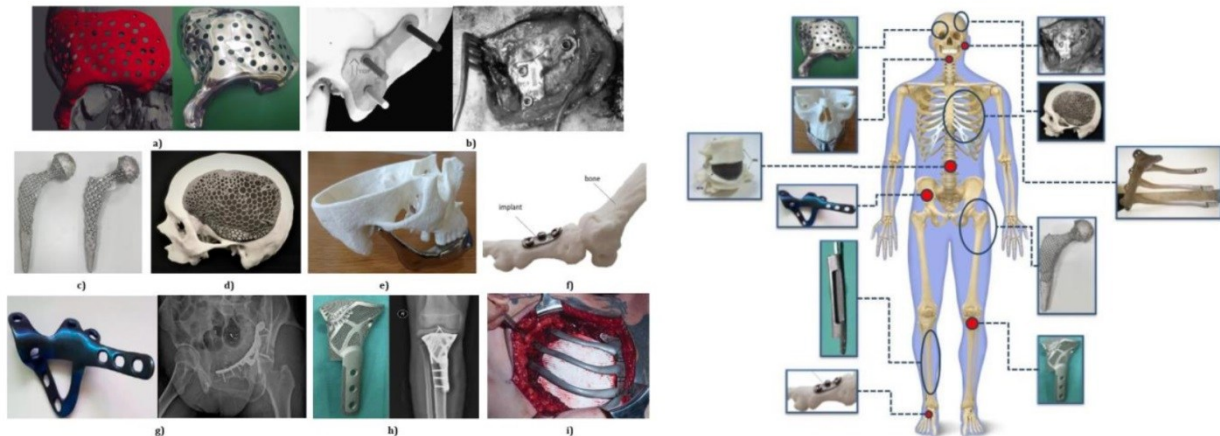
оптимизација) уз истовремено максимално задржавање механичких карактеристика дела. Са друге стране израда компоненти са унутрашњим саћастим структурама, као и консолидација делова у једну целину доприноси смањењу масе као и комплексности, слика 8.

У медицини кључни концепт је израда персонализованих помагала, односно могућност примене помагала на начин да одговарају сваком појединачном човеку. Постигнута су одређена унапређења код помагала, у смислу смањења дебљине и ширине појединих плочица као и смањење тежине израдом порозне структуре. Кључни сегмент је комуникација на линији хируршких тимова и израђивача помагала, слика 9.

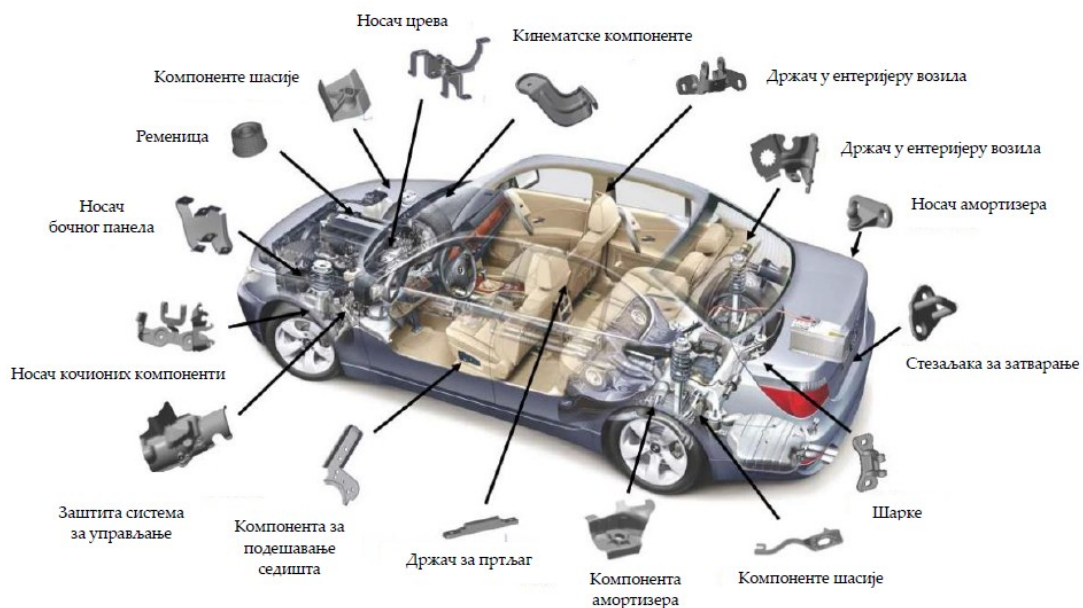


Слика 8: Делови произведени L-PBF технологијом за примену у авио-индустрији: а) држач пре и након тополошке оптимизације, б) држач пре и након термоеластичне оптимизације, ц) држач сложеног облика, д) бороскоп, е) млазница за гориво, ф) млазница ракетног мотора, г) кабински конектор, х) комора за сагоревање, (Ali и др., 2022).

Све наведене предности примене L-PBF технологије искоришћене су и у аутомобилској индустрији за производњу различитих компоненти, слика 10.



Слика 9: Делови произведени L-PBF технологијом за примену у медицини: а) предњи персонализовани имплант, б) уграђени имплант на делу лица, ц) целуларни имплант за кук, д) протеза за лобању, е) протеза за доњу вилицу, ф) протеза за стопало, г) протеза за карлицу, х) протеза за десну тибију, и) титанијумско ребро, (Ali и др., 2022).



Слика 10: Делови произведени L-PBF технологијом за примену у аутомобилској индустрији, (Ali и др., 2022).

Наведени примери идентификовали су кључне захтеве који се постављају у развоју производа, самим тим и за адитивну L-PBF технологију: израда комплексних облика, персонализацији у израду делова, смањење тежине уз обезбеђивање бољих перформанси. У оквиру модела развијеног у овој дисертацији у разматрање се узимају следећи захтеви: смањења тежине дела, обезбеђење потребних механичких карактеристика као и могућности израде комплексне геометрије.

3.5 ДИГИТАЛНИ ЛАНАЦ У РАЗМЕНИ ИНФОРМАЦИЈА КОД АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Напредни развој технологије утицао је да размена информација у производном ланцу сада буде интензивнија и дигитализована. Терминолошки посматрано „дигитални низ (digital thread)“ представља оквир за размену информација међу кључним учесницима (пројектантима, клијентима, провајдерима услуга АТ, произвођачима машина и материјала), (Bonham и др., 2020). Кључна предност овог приступа је у дигиталном документовању сваког примењеног корака у изради делова и дигиталном повезивању свих фаза од пројектовања до израде.

Размена информација се обавља у оба правца (напред / feed-forward и преко повратне спреге / feed-back loops) у циљу повезивања свих процеса у производном ланцу. Све размењене информације треба да буду део једног јединственог дигиталног низа, да буду доступне свим учесницима, да се могу пратити уз неопходност постојања интероперабилности са свим машинама у производном ланцу. Неопходно је поседовати јединствено софтверско решење које ће омогућити размену информација кроз цео производни ланац („end to end“ решење). Данашње тржиште не располаже у великом броју са оваквим решењима, већ постоји велики број појединачних софтверских решења међу којима је неопходно размењивати податке, (Malbašić и др., 2022).

Класичан дигитални низ размене информација код АТ (слика 11) састоји се из следећих корака, (Bonnard и др., 2018), (Bonham и др., 2020) и (Hashmi и др., 2023):

- 3D пројектовање модела: пројектовање у CAD софтверу, пројектовање применом DfAM, репројектовање постојећег модела, 3D скенирање;
- Конвертовање CAD модела у STL формат: на овај начин врши се претварање CAD модела у полигонални модел - скуп троугластих равни како би штампач препознао спољашње и унутрашње ивице модела и њихову оријентацију. Да би се превазишао губитак информација током конверзије у STL формат, појавили су се нови формати: AMF (Additive Manufacturing Format) and 3MF (3D Manufacturing Format), STEP (Standard for the Exchange of Product model data), and STEP-NC (STEP compliant Numerical Control), (Bonnard, 2019);
- Припрема и избор параметара за производњу (build preparation) у адекватном софтверу: овај корак обухвата процесе уноса података односно STL фајла, контролу и поправку површина модела, припрему модела за изградњу (распоред и оријентација модела на радној плочи, генерисање потпорних ослонаца, додавање параметара због накнадне обраде и скупљања дела), претварање модела у низ међусобно паралелних равни (слојева за изградњу), избор параметара за штампу (спајање припремљеног модела са параметрима за штампу), штампање - изградња дела;
- Постпроцесна обрада: избор потребних технологија зависи од захтева пројектанта или клијената;
- Контрола готовог производа: поређење израђеног са иницијалним моделом.



Слика 11: Приказ дигиталног ланца размене информација код АТ, (Bonnard и др., 2018) и (Bonham и др., 2020).

Дигитално повезивање је значајно и са аспекта примене Индустрије 4.0. Један од стубова Индустрије 4.0 је и адитивна технологија, као и „рачунарство у облаку“ које користе провајдери адитивних услуга (преко концепта „on-line manufacturing“) како би клијентима обезбедили: брзу реакцију на захтеве и брзо време испоруке, паметне и флексибилне ланце снабдевања.

Дигитални приступ обезбеђује и повезивање са ERP/MES индустријским системима и праћење производа током његовог животног циклуса, примену вештачке интелигенције (за идентификацију проблема) и „дигиталих близанаца“ ради израда измена без постојања физичких прототипова.

Упркос теоретским предностима дигиталног ланца, имплементација у реалним условима често је отежана због недостатка интероперабилности између различитих софтверских решења и машина. У овој дисертацији у циљу превазилажења овог проблема коришћено је једно софтверско решење (Siemens NX) које поседује модуле за пројектовање и структурну оптимизацију. Такође, за комплетну припрему и обраду података за штампу коришћено је једно софтверско решење (Materialize Magics). Интероперабилност са машином за штампање (која има инсталиран софтвер Hatch), као и током читавог процеса припреме и планирања производње, обезбеђена је разменом података у адекватним форматима.

3.6 ТРЕНДОВИ У 3D ШТАМПАЊУ

Постоји велики напредак у развоју софтверских решења, материјала и легура повезани са 3D штампом, (Akinsowon и Nahirna, 2020). По питању материјала за АТ, приметна је сарадња између произвођача штампача и произвођача материјала у циљу стварања тзв. „отворених модела материјала (open material models)“ чиме се ствара могућност за развој и производњу различитих врста нових материјала. Овај приступ се јавио као одговор на препреке које намећу „прве“ компаније које су освојиле тржиште АТ као што су EOS и Stratasys јер су наметнуле своје власништво (кроз патентну заштиту) над материјалима за штампање (приступ познат као „затворени систем“) и директно их повезале са коришћењем на својим штампачима.

Полимерни 3D штампачи су најзаступљенији у употреби, док метални 3D штампачи све више преузимају примат на тржишту. Потражња за индустријским

3D системима који су мањи и економски исплативији довела је до пораста у продаји десктоп 3D штампача (технологије FFF и SLA) као и компактних металних 3D штампача (намењени за индустријске купце „entry-level“ нивоа односно почетног нивоа у 3D штампи). Велики пробој на тржишту остварују и штампачи за везивну 3D штампу. У напредној фази развоја налазе се и други типови штампача (керамички, електронски и композитни 3D штампачи) са тенденцијом да остваре значајнији тржишни удео.

Тренд који карактерише тржиште хардвера је унапређење процеса праћења и осигурања квалитета кроз интеграцију 3D штампача са сензорима/камерама и машинском визијом.

Поред платформи и материјала, паралелно се ради и на развоју софтверских решења која подржавају АТ. Тенденција је ка развоју мултифункционалног софтверског решења које може да подржи цео циклус припреме делова за штампу (пројектовање, оптимизација структуре дела, покретање симулационе анализе, оријентација дела, генерисање потпорних структура). Покретањем симулационе анализе у фази пројектовања дела избегавају су релативно скупи експерименти, а у међувремену обезбеђује се поновљивост и поузданост 3D штампе.

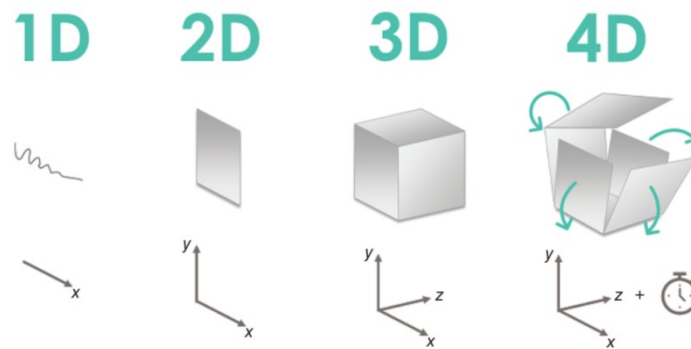
Може се закључити да су кључни трендови у адитивној производњи усмерени ка: индустријализацији адитивне производње, примени напредних материјала, дигитализацији, смањењењу трошкова, изради делова великих формата, усвајању нових технологија и одрживости (зелена агенда).

Кроз поређење израде изабраног дела класичном и адитивном L-PBF технологијом у овој дисертацији се разматра могућности индустријализације L-PBF технологије и примена у серијској производњи, као и могућност оптимизације самог процеса смањењем трошкова израде делова.

3.7 ПРИМЕНА 4D И 5D ШТАМПЕ У ИНДУСТРИЈИ

Термин 4D штампа односи се на додавање четврте димензије, односно димензије времена. 3D штампани објекти се трансформишу и мењају облик током времена под утицајем спољашњих стимуланса као што су вода, светлост, топлота, електрична енергија, магнетно поље, (Mahmood и др., 2022). Материјали који реагују на спољашње или унутрашње стимулусе називају се паметним материјалима.

4D штампа у суштини користи 3D штампач за штампање паметних материјала у жељене објекте који затим пролазе кроз трансформацију структуре или својства када су изложени спољашњим или унутрашњим стимулансима, (пример: након излагања паметног материјала води, доћи ће до апсорпције воде, што доводи до контракције или експанзије материјала, контракција или проширење ће довести до делимичног савијања или савијања целе структуре). Као и 3D штампа и 4D штампа има неколико ограничења које спречавају да 4D штампа оствари свој пуни економски потенцијал: немогућност стварања сложених структура, недоступност штампача који користе више различитих материјала, висока цена паметних материјала. Филозофија примењена код 4D технологије, на основу (Muehlenfeld и Roberts, 2018), приказана је на слици 12.



Слика 12: Приказа филозофије 4D штампе, (Muehlenfeld и др., 2018).

Иако постоје ограничења у примени 4D штампе (ограничен избор материја, њихова висока цена, проблематика око симулације процеса) и иста није још увек масовније заступљена, примена динамичких структура за 4D штампање представља револуцију у изради делова и представља велики потенцијал за напредак и развој различитих индустрија.

Неопходно је поменути и 5D штампу која представља комбинацију 3D штампе и додатна два степена слободе (две ротације око x и y осе) чиме се обезбеђују још сложеније геометрије (без потребе за потпорним ослонцима) као и механички отпорнији делови (ова технологија омогућава изградњу и слагање слојева у правцима оптерећења).

3.8 СТАНДАРДИЗАЦИЈА У ОБЛАСТИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Паралелно са развојем адитивних технолошких процеса, машина и пратеће опреме, неколико организација за стандардизацију (међународне, регионалне и националне) укључено је у развој стандарда за АТ. Три кључне организације које раде на стандардизацији и сертификацији АТ су Међународна организација за стандардизацију (ISO - International Standardisation Organisation), Европска организација за стандардизацију (CEN - The European Committee for Standardisation) и Америчка организација ASTM International (American Society for Testing and Materials). ASTM International и Међународна организација за стандардизацију потписали су уговор о сарадњи (Partner Standards Developing Organization - PSDO) како би додатно унапредили сарадњу на нивоу техничких комитета (ASTM International Committee F42 и ISO Technical Committee 261). Споразум има за циљ да убрза процес усвајања стандарда развијених под окриљем ASTM International као део међународних стандарда ISO, званично усвајање већ објављених ISO стандарда од стране ASTM International, заједнички рад на објављивању стандарда и публикација, заштите ауторских права као и других комерцијалних аранжмана.

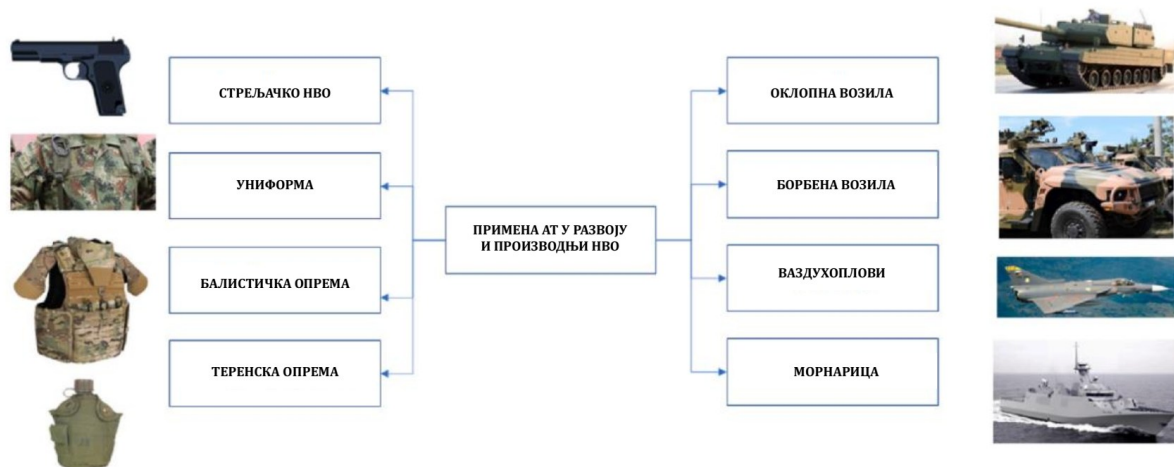
Општи АМ стандарди су подељени у десет категорија: 1) Методе тестирања (Test methods), 2) Правила пројектовања (Design guides), 3) Формати података (Data formats), 4) Терминологија (Terminology), 5) Модели узорака (Test artefacts), 6) Правила квалификације (Qualification guidance), 7) Сигурност (Safety), 8) Перформансе и поузданост (System performance and reliability), 9) Протоколи тестирања (Round robin test protocols) and 10) Методе инспекције (Inspection methods), (Pei и Kabir, 2022).

У оквиру Института за стандардизацију Републике Србије формирана је Комисија за стандарде и сродне документе KS M261 – Адитивне технологије. Предмет рада ове комисије је стандардизација у области АТ у вези са њиховим процесима, терминима и дефиницијама, процесним ланцима (хардвер и софтвер), процедурама испитивања, параметрима квалитета, уговорима о снабдевању и другим основама. Комисија прати рад: 1) Техничког комитета CEN/TC 438, Адитивне технологије, Европског комитета за стандардизацију и 2) ISO/TC 261, Адитивне технологије, Међународне организације за стандардизацију.

Иако постоји успостављена сарадња међу две најважније организације за стандардизацију у адитивној индустрији, још увек заступљена фрагментација стандарда доводи до конфузије код корисника. Стандарди морају да прате брзу динамику развоја адитивних технологија и сходно томе и да се благовремено прилагођавају. Иако постојање стандарда повећава квалитет, поузданост и интероперабилност, сложеност у имплементацији и прелазни период за усвајање могу да успоре и ограниче иновације у адитивном сегменту.

3.9 ПРИМЕНА АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА У РАЗВОЈУ И ПРОИЗВОДЊИ НАОРУЖАЊА И ВОЈНЕ ОПРЕМЕ

Интеграција технологије 3D штампања у сектору НВО (Наоружања и Војне Опреме) представља револуционарну трансформацију у производњи са широким опсегом могуће примене (слика 13), уједно наглашавајући њен еволутивни карактер који прате и одређени изазови, (Colorado и др., 2023).



Слика 13: Приказ могућих области примене адитивних технологија у војне сврхе, (Colorado и др., 2023).

Одбрамбена индустрија је једна од највећих корисника адитивне L-PBF технологије. Неопходно је препознати предности које пружа АТ и исте применити у пројектовању и производњи средстава НВО.

Кључне предности које примена адитивне L-PBF технологије обезбеђује у одбрамбеном сегменту односи се на следеће: брза производња делова чиме се обезбеђује скраћивање ланца снабдевања (хитна производња делова и њихово штампање на терену на удаљеним локацијама), смањена тежина (обезбеђује побољшану покретљивост код индивидуалне заштитне опреме и израду олакшаних структурних делова), персонализација производа кроз прилагођавање

делова за специјалне јединице, отпорност на екстремне услове (примена материјала који су отпорни на високе температуре и корозију).

Неке од кључних технологија које треба да омогући примена адитивних технологија односи се на развој и примену нових врста материјала, иновативних структура побољшаних перформанси (нпр. интеграција карбон-фибера у термопластичне материјале, хијерархијске структуре, егзоскелети, саћасте и ћелијске структуре и развој дизајна инспирисане животињским врстама као што су камелеони). Такође, потребан је развој вештачких мишићних структура (створених комбинацијом микрофлуидике и 3D штампања) за побољшање мобилност и ефикасност војног особља.

Адитивна производња се посматра као обећавајућа и одржива замена за традиционалне методе производње у изради војне опреме и балистичке заштите. Ова транзиција у производњи представља одговор на променљиве захтеве модерног ратовања, којег карактеришу потребе за модернизованим и персонализованим решењима за балистичку заштиту која мора и да задовољи критеријуме да буде лагана за ношење.

На путу усвајања и примене АТ постоје одређени изазови који се морају решити. Ово се пре свега односи на потребу развоја и усвајања општих и појединачних стандарда, решавање питања у вези са контролом квалитета (квалитета површине, димензионих тачност), као и успостављање ригидних процедура тестирања и валидације како би се осигурала поузданост 3D штампаних компоненти намењених за војну употребу.

Са аспекта животног циклуса производа НВО (нарочито борбене платформе које су у употреби и по неколико деценија) захтева се широк дијапазон подршке у свим фазама: од почетног развоја, преко производње, употребе, одржавања, процесу модернизације, па све до процеса одлагања на крају животног века. Комплексност и сложеност коју са собом доноси софистицирана технологија често захтева и опсежне превентивне радње одржавања спроведених од стране високо обученог људства (техничара одређених специјалности) како би таква средства имала захтевани ниво оперативне употребе.

У сврху испуњења претходно изнетих захтева 3D штампачи постају критични алати како за одбрамбену индустрију тако и оперативних јединица непосредно на терену. Предности које су 3D штампачи до сада показали током своје употребе у процесу производње и одржавања НВО према наводима у студији (UltiMaker, 2024) односе се на следеће чињенице:

- У производном окружењу, производни инжењери користе широк спектар алата. 3D штампачи представљају мале „мини“ производне погоне, непосредно поред великих обрадних центара и CNC машина, пружајући брзи одговор за израду нових алата, заменских алата или оптимизованих алата и уређаја за мерење (ергономски обликованих и ефикаснијих за употребу, на бази повратне информације из производње);
- Постојање дигиталног инвентара (складишта) омогућава инжењеру у фабрици и на терену да приступи неограниченој бази података 3D делова без генерисања трошкова и простора које захтева велико складиште. Адекватно генерисан захтев за ангажовањем 3D штампача доводи до производње потребних делова.

Модуларност у развоју компоненти омогућава боље одржавање у теренским условима и утиче на оптимизоване ланце снабдевања.

Са друге стране примена 3D штампе у медицинске сврхе значајно може да помогне војницима ако се иста пракса примени и на терену у операцијама ван матичне локације јединице.

На основу претходно изнетих констатација може се закључити да адитивне технологије нуде револуционарне могућности за војну индустрију, посебно у брзој производњи, прилагодљивости и смањењу трошкова. Међутим, изазови као што су ограничена чврстоћа, сигурносни ризици и регулаторна питања захтевају пажљиву имплементацију. У будућности ће 3D штампање вероватно постати стандард у производњи војне опреме, али је потребно балансирати иновације са поузданошћу и безбедношћу.

Ова дисертација управо разматра сегменте смањења трошкова и тежине у примени адитивне L-PBF технологије при изради дела који своју употребу има у једном борбеном систему наоружања и војне опреме.

4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ЗА ПРИМЕНУ АДИТИВНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ - ПРЕДЛОГ НОВОГ ОКВИРА И ИЗБОР КРИТЕРИЈУМА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ

Први део овог поглавља објашњава изазове у планирању и пројектовању производа и процеса применом адитивне технологије. У другом поглављу објашњена је стратегија пројектовања производа и процеса дефинисана пратећим ISO стандардом. На основу критичке анализе разматраних модела, у трећем делу предложен је нови оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије. У наредним поглављима појединачно се анализирају критеријуми за оптимизацију (трошкова, топологије и оријентације делова). У последњем седмом поглављу, објашњена је примена метода вишекритеријумског одлучивања у решавању проблема одлучивања при избору оптималне оријентације дела на радној плочи 3D машине.

Значај овог поглавања је у чињеници да се развијени оквир за процес планирања и производње адитивним путем даље користи у студији случаја, како би исти био верификован и показао своју функцију у пракси. Једна од предности развијеног оквира је да он у себи садржи и све неопходне критеријуме за оптимизацију адитивног процеса, чиме је и испуњен један од циљева постављен у овој дисертацији.

4.1 ИЗАЗОВИ У ПРОЦЕСУ ПЛАНИРАЊА И ПРОЈЕКТОВАЊА ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Компаније које су усвојиле одређене адитивне технологије као део свог производног процеса суочавају се са одређеним изазовима у процесу планирања производње. У вези са процесом планирања производње, поставља се питање како успоставити однос између различитих параметара процеса и квалитета финалног дела (геометријско димензиона и толеранцијска својства, механичка својства) и ове области су предмет истраживања многих аутора. Постоје и друге области за истраживање, с обзиром да сам процес 3D штампања још увек карактерише и неколико других недостатака: потреба за завршном обрадом израђеног дела, појава скупљања делова услед температурних деформација изазваних ласерским третманом, појава порозности и микро-пукотина у деловима, појава дефеката изазваних заосталим напонима. Сви наведени недостаци утичу на дизајн и карактеристике финалног производа.

Тенденције у развоју адитивних технологија крећу се ка ефикаснијем планирању процеса производње и оптимизацији производних параметара у циљу добијања финалног производа високих перформанси и оптимизованих карактеристика. Кључни елементи у процесу планирања који обезбеђују додатну вредност производу су тополошка оптимизација, могућност консолидације више делова у једну целину и истовремена оптимизација више параметара процеса, односно интеграција оптимизације топологије са адитивним технологијама. Поред параметара процеса производње, кључни фактор у разматрању треба да буде и сам предмет израде (крајњи производ) који је најчешће сложене геометрије а подаци о самом производу се добијају најчешће из његовог CAD модела.

У раду (Reichwein и др., 2021) разматрана су додатна побољшања у фази процеса планирања са циљем смањења трошкова кроз процес оријентације делова.

Процесом оријентације утиче се на квалитет целокупног дела, или појединих његових функционалних површина, преко потпорних ослонаца. Потпорни ослонци, поред наведеног, имају значајан ефекат и на трошкове производње. Аутор је навео и проблем расположивог простора радне коморе машине па се тако у раду разматра и поступак раздвајања делова, са циљем добијања економичнијег процеса. Развијен је поступак за аутоматско раздвајање делова, узимајући у обзир аспект трошкова, а предложено решење је довело до смањења трошкова производње (разматрана је L-PBF технологија) за 54%.

У раду (Ulu и др., 2019) приказана је истовремена (симултана) оптимизација топологије и параметара процеса (снага и брзина ласера) који имају одређени утицај на микроструктуру материјала. Разматрана је производња металних делова L-PBF технологијом. Иницијално је процењено да се истовременом оптимизацијом могу постићи одређене уштеде у трошковима адитивне производње. Сагледане су користи које даје оптимизација топологије кроз смањење обима употребљеног материјала, чиме се индиректно смањују трошкови материјала. Коначни резултати су показали да су применом симултане оптимизације топологије и параметара процеса укупни трошкови производње смањени за 15%, а време производње побољшано за 21%.

У раду (Wang, 2022) предложена је симултана оптимизација оријентације дела на радној плочи и топологије за самоносеће затворене шупљине које се израђују технологијама адитивне производње. Математичка формулација за анализу топлотног флуksа за одређене геометрије интегрисана је у алгоритам за тополошку оптимизацију и на тај начин је решен проблем пројектовања самоносећих затворених шупљина.

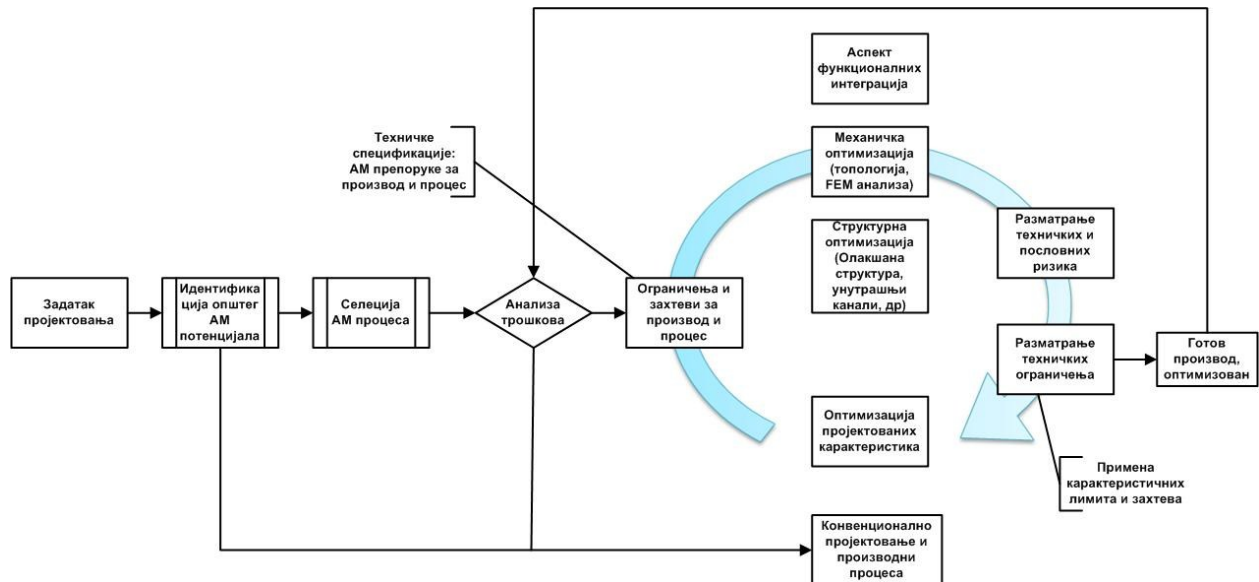
У раду (Haveroth и др., 2024) разматрана је и накнадно примењена истовремена оптимизација оријентације геометрије и њене носеће структуре. Аутори су закључили да правац изградње има важну улогу у процесу дефинисања укупних трошкова производње. Иновација у овој студији била је увођење ефикасног термичког модела за тополошку оптимизацију код АТ и интеграција потпорних структура у процес пројектовања и оптимизације.

Тополошка оптимизација и њена интеграција са адитивном производњом су такође анализирани у раду (Prathyusha и др., 2022). Аутор наводи чињеницу да су се адитивна производња и тополошка оптимизација разматрали одвојено уназад неколико година, али најновија истраживања везана за интеграцију оптимизације топологије и АТ произилази из неколико разлога:

- Тополошки оптимизовани делови имају веома сложене облике и не могу се производити традиционалним технолошким процесима већ технологијама адитивне производње.
- Други разлог је цена израде која је пропорционална материјалу и тежини, што даје предност у примени АТ.
- Оптимизација топологије омогућује производњу делова са побољшаним перформансама и механичким својствима, без угрожавања иницијалних затезних и механичких карактеристика дела.

4.2 СТРАТЕГИЈА ПРОЈЕКТОВАЊА ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ЗА ПРИМЕНУ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Свеукупна стратегија пројектовања производа и процеса за примену АТ представљена је у стандарду (ISO/ASTM 52910:2018) и приказана је на слици 14.



Слика 14: Дијаграм стратегије пројектовања за примену адитивних технологија, ISO/ASTM 52910:2018.

Стратегија се састоји се из неколико процеса са следећим карактеристикама:

- **Пројектовање:** Пројектовање производа врши се на основу дефинисаних тактичко-техничких захтева за производ. АТ постављају нове принципе за пројектовање производа, увођењем оквира за пројектовање за примену АТ (DfAM) који се бави дизајнирањем производа уз истовремени фокус на производњу и монтажу тог производа.
- **Идентификација општег потенцијала дела за АТ:** Неопходно је утврдити могућности или „потенцијал“ изабраног дела (пројектован у претходној фази) за његову производњу применом АТ. За фазу идентификације општег потенцијала постоји посебна процедура у наведеном стандарду, где се главни критеријуми одлучивања фокусирају на доступност материјала за АТ а затим идентификује најмање једна од следећих карактеристика дела (обезбеђена нова функционалност дела, персонализован део за потребе купца, олакшана структура, сложена геометрија) за које је примена АТ посебно погодна. Више информација о примени и значају анализе потенцијала дела за израду путем АТ може се пронаћи у раду (Živković и др., 2022).
- **Избор адекватне АТ:** Избор адекватне адитивне технологије се првенствено врши из скупа стандардом препознатих седам основних технологија. Међутим, избор није ограничен само на ове технологије поготово са аспекта развоја нових технологија за производњу металних делова. Избор адекватне технологије зависи од њене тренутне доступности на тржишту.
- **Анализа трошкова:** Трошкови се такође анализирају као један од критеријума за одлучивање. Произвођач може да замени критеријум трошкова са критеријумом квалитета, роком испоруке или неким другим

релевантним критеријумом за одлучивање, под условом да је изабрани критеријум применљив у конкретном случају.

- *Анализа могућих ограничења и захтева специфичних за израду дела и саму адитивну технологију:* Планирање процеса је једна од критичних активности у адитивном производном ланцу и односи се на дефинисање процесних варијабли неопходних за изградњу дела. Неке од кључних варијабли које треба дефинисати кроз процес планирања су: оријентација дела, генерисање потпорних ослонаца, процес изградње по слојевима (слајсирање), дефинисање параметара процеса.
- *Пројектовање функционалне интеграције, механичка и структурна оптимизација:* У оквиру ове фазе спроводе се технике за оптимизацију геометрије производа засноване на DfAM.
- *Разматрање потенцијалних ризика и ограничења:* Овај корак обухвата анализу техничких и пословних ризика везаних за изабрану АТ као и неких техничких ограничења.
- *Готов део (оптимизован):* Ово је коначан исход након реализације свих претходно описаних корака.

Уколико се у фази дефинисања потенцијала за АМ, као и почетних трошкова, утврди да предложена АТ није адекватна нити економски исплатива, односно уколико се утврди да су трошкови израде завршног дела превисоки, може се донети одлука о примену традиционалних производних технологија.

Стандард ISO 52910:2018 је неопходан за сваког ко жели да максимално искористи предности адитивне производње. Стандард омогућава бољу комуникацију између дизајнера и произвођача, применом стандарда смањују се могуће грешке у дизајну и касније скупих неуспеха у производњи а такође пружа помоћ у стандардизацији процеса, што је кључно за већи број индустрија.

Недостатак стандарда је тај што се он фокусира на опште принципе пројектовања за примену адитивних технологија што у основи и треба да буде његов примарни задатак. Међутим, на тај начин се не обезбеђује довољно података и препорука за појединачне адитивне технологије (конкретно адитивну L-PBF технологију) у вези са: оптимизацијом производа и процеса, избором параметара процеса, применом дигиталних алата, планирањем и избором методологије за оријентацију делова на радној плочи, начином верификације резултата, а по потреби и материјалима односно и смерницама за постпроцесе.

У том смислу неопходно је било предложити нови оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије који би обухватио примену оптимизационих и дигиталних алата, избор кључних параметара за одлучивање, примену квантитативних алата за одлучивање и предложио начин анализе и верификације резултата.

4.3 ПРЕДЛОГ НОВОГ ОКВИР ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ АДИТИВНЕ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ

У циљу припрема за дефинисање неопходних елемената новог процеса планирања и производње, анализирано је неколико радова који се баве овом тематиком. На основу извршене анализе предложен је нови оквир за оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије.

У раду (Dotcheva и др., 2020) фокус је на важности креирања ефективног процеса планирања за примену АТ. Разматра се SLS метода селективног ласерског синтеровања, предложени приступ је опште намене и може се применити за било коју АТ која третира производњу металних делова. Аутор наводи да примена метода АТ захтева блиску интеграцију процеса пројектовања и планирања производње. Представљени модел за планирање пројектовања и производње АТ састоји се од 3 процеса:

- Припрема 3D модела за штампу;
- Процена квалитета и активности инспекције;
- Планирање неопходних процеса завршне обраде.

Један од закључака указује да правилно дефинисан и довољно детаљан процес планирања, уз укључивање свих неопходних фактора у креирању и производњи 3D модела, значајно доприноси повећању трошкова и времена израде. На основу овог закључка, кључни параметри (трошкови и време производње) коришћени су као параметри у процесу доношења одлуке применом метода вишеатрибутивног одлучивања који се примењује у овој дисертацији.

Планирање процеса са аспекта оријентације делова је такође разматрано у (Luo и др., 2016). Истиче се да је у поређењу са конвенционалним технологијама, планирање процеса за АТ потпуно другачије, као и да је планирање кључни корак у осигурању квалитета финалног производа. Методологија пројектовања и планирања процеса АТ представљена у овом раду састоји се од следећих корака:

- *Фаза пројектовања*: дефинисање модела, анализа функције дела, тополошка оптимизација модела. Излаз из ове фазе је CAD модел са захтеваним механичким својствима;
- *Припрема скупа параметара процеса*: (оријентација дела, дефинисање дебљине слоја, генерисање потпорне структуре, избор адекватне АТ и потребног материјала и машине) како би се извршила симулација процеса производње на основу унапред дефинисаних параметара;
- *Имплементација и анализа процеса симулације*: Да би се добила најоптималнија решења, неопходно је извршити неколико корака симулације;
- *Фаза производње*: аутор предлаже коришћење система за праћење процеса производње са могућношћу анализе прикупљених података и откривања могућих дефеката. Корективне радње се могу преко повратне петље вратити уназад све до фазе планирања или чак пројектовања дела.

Аутор наглашава да је пре избора оријентације дела на радној плочи потребно извршити функционалну анализу CAD модела и тополошку оптимизацију. Управо овај закључак је искоришћен као један од улазних података у оквиру прве фазе новог оквира за пројектовање производа и процеса предложеног у овој дисертацији. Из наведеног се може закључити и да фаза оријентације дела треба да буде садржана у другој фази предложеног оквира.

Интересантан закључак о процесу планирања дат је у раду (Livesu и др., 2019). Термин планирање процеса односи се на дефиницију скупа појединачних производних операција потребних за производњу дефинисаног дела на одређеној машини. На основу прелиминарне анализе више научних радова, аутори у свом раду закључују:

- Процес планирања код АТ „у већини случајева“ састоји се од скупа стандардних операција (поправка САД модел, избор оријентације, генерисање потпорне структуре, сечење и генерисање путање алата);
- Ови такозвани „блокови или фазе“ се не могу третирати одвојено – 3D штампа би била предвидљивија када би се међусобни однос између ових блокова могао боље анализирати;
- Оријентација дела на радној плочи је стратешки избор јер остварује свој утицај „од времена изградње дела па све до квалитета површине“.

Закључци који су аутори извели указују на чињеницу да фазе у новом моделу не могу бити одвојене, односно неопходно је јасно дефинисати улазе и излазе из сваке фазе, што је у предлогу новог оквира за пројектовање производа и процеса и јасно наглашено.

Рад (De Antón и др., 2023) нуди оквир за формализовање проблема планирања адитивне производње на оперативном нивоу. Идеја је произашла из чињенице да примена АТ доноси одређени скуп проблема специфичних за ову технологију, као што је оријентација делова на радној плочи или могућност израде више хетерогених делова у истом циклусу штампе, који се не појављују у традиционалним процесима планирања производње. На основу детаљне анализе дошло се до крајњег закључка да не постоји једнообразност у идентификацији и решавању наведених проблема у примени адитивних технологија. Управо овај закључак потврђује потребу за израдом посебног оквира за планирање за примену адитивне L-PBF технологије.

У раду (Dalpadulo и др., 2024) фокус је на симулацијама потпомогнутим процесима пројектовања и производње делова, са циљем њихове оптимизације. Пројектовање производа је засновано на интеграцији тополошке оптимизације и алата за симулацију процеса у циљу потребног редизајнирања иницијалног производа. Пројектовање процеса производње је засновано на системској употреби симулација у циљу превенције појаве грешака у производњу услед могуће варијације температуре код делова од метала као и појаве резидуалног стреса и деформација. Такође, приступ се заснива на примени интегрисане пројектно-производне PLM платформе која омогућава дигитални проток информација. Кључни закључци наведеног рада, значајни за предлог новог оквира за пројектовање производа и процеса у овој дисертацији, односе се на чињеницу о могућем редизајнирању модела за потребе изабране АТ, потреби примене тополошке оптимизације као и неопходности извршења симулација. Такође, у оквиру предлога новог оквира неопходно је и постојања следећих фаза: 1) пројектовање процеса и 2) пројектовање производа.

Неопходни елементи новог оквира за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије

На основу раније изнете констатације да је неопходно развити процесно специфичан оквир за планирање (у случају ове дисертације за L-PBF технологију), анализом доступних радова који третирају ову области и изнетих закључака, потребе за применом дигиталних алата ради оптимизације и симулација процеса, дефинисани су неопходни елементи који треба да буду садржани у новом оквиру за пројектовање и планирање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије:

- Омогућити функцију редизајнирања улазног модела;
- Обезбедити могућност функционалне анализе дела (позиције у склопу, оптерећења);
- Извршити тополошку оптимизацију дела као део активности усмерен на смањење масе;
- Извршити адекватну анализу оптерећења пре и после оптимизације масе;
- Обезбедити економичност у приступу кроз истовремену оптимизацију више параметара, што поред оптимизације топологије указује и на могућност оптимизације оријентације дела на радној плочи (спроводити у другој фази).
- Обезбедити расположивост доступних метода за оријентацију дела на радној плочи ради генерисања алтернативних оријентација;
- Јасно и недвосмислено омогућити избор кључних критеријума за доношење одлуке о оптималној оријентацији.
- Омогућити примену алата за вишекритеријумско одлучивање укључујући и преференције доносиоца одлука и донети одлуку о избору оптималне оријентације.
- Извршити анализу и верификацију резултата добијених у претходним корацима.

Нови оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије приказан је на слици 15.



Слика 15: Предлог новог оквира за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF методе.

Предложени оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF методе обухвата три фазе:

- *Прва фаза (пројектовање производа)* – улаз у ову фази је CAD модел, фаза укључује примену различитих алата за симулацију ради процене структуре и механичких карактеристика пројектованог дела. Обухвата подфазе избора адекватног дела (оптимизација/редизајн постојећег CAD модел или пројектовање новог дела), имплементацију анализе засновану на методи коначних елемената (МКЕ) и тополошку оптимизацију (ТО). МКЕ се врши пре и после ТО због чињенице да унутрашњи напони (реакција структуре дела) пре и после тополошке оптимизације нису исти. Излаз из ове фазе је тополошки оптимизован део који је уједно и улаз у наредну фазу;
- *Друга фаза (пројектовање процеса)* – ова фаза укључује део активности припреме производње кроз генерисање алтернативних оријентација (АО) дела на радној плочи, дефинисање и израчунавање критеријума за избор

оријентације а затим избор оптималне оријентације (ОО). Излаз из ове фазе је оптимална оријентација изградње (ОО) за тополошки оптимизован део.

За потребе ове дисертације изабрани су следећи параметри оптимизације: време израде, трошкови израде, запремина потпорних ослонаца, површина потпорних ослонаца на радној плочи, број површина дела које захтевају потпорне ослонце;

- *Трећа фаза (анализа и верификација резултата)* – Избор оптималне оријентације је увек компромис између економских (трошковних) критеријума израде и других критеријума које треба да испуни израђени део: механичких (затезних) карактеристика, микроструктуре и димензионо/геометријских карактеристика. Економски критеријум не обезбеђује увек најбоље механичке и димензионе карактеристике као ни микроструктуру јер оријентација дела утиче на ове карактеристике.

У оквиру процеса пројектовања производа и процеса, осим економских критеријума, није увек могуће измерити друге напред наведене критеријуме. Вредности ових критеријума, а уважавајући оптималну оријентацију, могуће је добити из стандарда или из база података о карактеристикама испитиваних материјала под одређеним условима оптерећења. Студијом случаја у оквиру ове дисертације реализована су испитивања механичких и микроструктурних карактеристика на основу којих се могу донети одлуке везане за избор оптималне оријентације.

4.4 АНАЛИЗА ТРОШКОВА КАО КРИТЕРИЈУМА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ

У данашње време, високи трошкови машина и материјала чине АТ скупљом од класичних производних технологија, а иницијалне процене указују да је њена употреба добра само за мали обим производње. Истраживачи који су своје истраживање усмерили ка моделима трошкова код АТ, исте заснивају на анализи различитих структура трошкова. За поделу трошкова постоје две основне класификације, (Fera и др., 2017):

- *Подела трошкова на директне и индиректне трошкове.* Директни трошкови у већини случајева обухватају трошкове материјала (укупни трошак пропорционалан је количини утрошка материјала), индиректни трошкови односе се на остале трошкове као што су: трошкови машине, радне снаге, административни и режијски трошкови, трошкови енергије, а величина ових трошкова је директно пропорционална дужини трајања процеса;
- *Подела трошкова на добро структуриране* (радна снага, материјал, трошкови машине) *и не-структуриране* (складиштење, припрема машине, откази).

На путу ка свеобухватнијем усвајању АТ, треба превазићи одређене баријере, међу којима је једно од критичних питања велики почетни инвестициони трошак за успостављање адитивног процеса (укључујући опрему и особље), посебно за мала и средња предузећа, с тога процена трошкова производње у контексту АТ представља важну тему за истраживање. Анализа трошкова има важну улогу у евалуацији адитивних технологија. Помаже и у развоју кључних варијабли одлучивања са аспекта трошкова, које су директно повезане и са пословним перформансама. Повећани трошкови могу да доведу до слабе економије обима док потцењивање вредности трошкова може да доведе до губитака.

У раду (Busachi, 2017) приказани су одређени закључци на бази анализе доступних модела трошкова адитивне производње. Наводи се да се развијени модели користе за брзу процену трошкова адитивне производње и да за те потребе дају одређени ниво тачности. Такође, детаљнија анализа развијених модела указује и на одређене недостатке јер не обухватају све процесе заступљене у адитивној производњи. Утврђени недостаци представљају добру основу за надоградњу постојећих или примену у новим моделима трошкова. Недостаци се односе на не урачунавање следећих трошкова: пред и постпроцесне трошкове, трошкове манипулације са прахом (припрема, регенерација, пречишћавање), уклањање потпорних структура, додатне обраде ради добијања квалитета површине. Такође, у раду се напомиње да се у оквиру трошкова требају урачунати и трошкови пројектовања и инвестиција у CAD софтвере, редизајнирање делова и тополошка оптимизација, активности оптималне оријентације делова ради минимизације времена израде и трошкови потпорне структуре.

С обзиром да развој модела трошкова има своју историју, први и најзначајнији на које се већина аутора референцира, настали су почетком овог века. Временом сваки аутор је додавао нешто ново претходном моделу трошкова чиме се омогућава повећање тачности код ново развијених модела и укључивање неких нових фактора што је неминовно доводило и до повећања нивоа детаља.

Модели су се развијали од иницијалних модела са константним параметрима до модела који се базирају на activity-based моделима трошкова, (Hajjafadul и др., 2020). Као што су се и трошковни модели развијали, тако је и адитивна технологија у трошковном смислу постајала ефикаснија у односу на класичну производњу омогућивши производњу економски прихватљивих готових производа, (Liu, 2017). У том смислу се издваја и адитивна L-PBF технологија.

Activity-based (ABC - Activity Based Costing) модели трошкова заснивају се на декомпозицији процеса у саставне активности, рачунање трошкова сваке активности и њихово сумирање, (Fera и др., 2017). Трошкови су подељени на директне и индиректне трошкове.

Насупрот овим моделима постоје и процесни модели трошкова (PBCM - Process-based cost modeling) који трошкове повезују директно са самим процесима (пројектовања, тестирања, контроле, производње). Измене у пројектним варијаблама као и условима производње се најбоље рефлектују на укупне трошкове, (Kadir и др., 2020).

Непосредно пре детаљне анализе трошкова и математичких формулација потребно је дефинисати перспективе из којих се посматрају трошкови. Према (Kadir и др., 2020) постоје три кључне перспективе трошкова:

- Финансијско-рачуноводствена перспектива;
- Производна перспектива (фаза пројектовања и фаза производње);
- Менаџмент (управљачка) перспектива: односи се на трошкове повезане са животним циклусом, одржавањем, модернизацијом, складиштењем.

У раду (Jarrar и др., 2021) констатује се да већина анализираних модела трошкова користи произвођачку перспективу, што ће бити примењено и у овој дисертацији.

Различити приступи у анализи трошкова

Детаљна анализа трошкова, тржишних цена материјала и компоненти везаних за АТ, као и поређење производних трошкова насталих кроз: 1) „in-house“ опцију и 2) „external manufacturing“ опцију односно производњу код пружаоца услуга, извршена је у раду (AMPOWER, 2023).

Констатује се да јединачни трошкови дела добијају све већи значај у адитивној производњи. Ово произилази из чињеница да је АТ превазишла фазу примене у изради прототипова и сада се користи за производњу готових делова (у серијској производњи) и с тим у вези потребно је трошкове адитивне производње поредити са класичним технологијама користећи параметар јединачних трошкова.

Кроз процес пружања подршке бројним компанијама на њиховом путу ка утврђивању могућности примене адитивне производње, између осталог и кроз преиспитивања примењених конвенционалних производних процеса у компанији, у (AMPOWER, 2023) је закључено следеће:

- Повећање потреба за израду великих делова је скоро линеарно пропорционално повећању запремине дела;
- Главни генератор трошкова делова потиче од самог процеса израде, на који посебно утиче цене машине. Сходно томе, пажљиво планирање производње постаје императив са циљем да се секундарни процеси (манипулација са прахом, време када машина није у раду) и застоји сведу на минимум. У зависности од изабране АТ, употреба машине, као и искоришћеност радне коморе за изградњу дела имају додатни утицај на јединачну цену по делу.

Одређене АТ (конкретно и L-PBF) захтевају веће трошкове производње. Примена ових технологија са пословног аспекта постаје повољна само када се примењују додатни елементи за уштеду трошкова током циклуса производње. Да би се то обезбедило, компаније морају разумети све генераторе трошкова (директне и индиректне) у целом производном ланцу као и бенефита који се остварују применом одређене адитивне технологије и направити одређени баланс у примени.

Један од фактора који утиче на смањење трошкова производње је и попуњеност радне коморе машине. Адитивне технологије које у свом раду користе радне коморе - платформе (PBF технологије, фото-полимеризација) подразумевају различите фазе депозиције и очввршћавања материјала, при чему се материјал депонује преко целе платформе за изградњу, без обзира на број делова у серији. За АТ засноване на платформи, густо распоређивање делова у 2D конфигурацији постаје од суштинског значаја за дистрибуцију трошкова повезаних са секундарним процесима на све делове који се производе. За многе АМ технологије, искоришћеност радне коморе и последично евентуално повећано коришћење машине су кључни за смањење трошкова по делу.

Произвођачи машина за PBF технологију спајања металним прахом примењују различите стратегије за смањење јединачних трошкова произведеног дела:

- Развој технологије базирану на диодном ласеру како би повећала продуктивност и повећала трошковну ефикасност;

- Нови произвођачи машина који се појављују на тржишту нуде јефтине машине за производњу чиме је и иницијални трошак почетних инвестиција смањен;
- Примена других технолошких решења (коришћење термалне енергије уместо ласера) има потенцијал да додатно смање трошкове због одсуства скупих машинских компоненти као што су ласерски извори.

Анализа различитих приступа у адитивној производњи („in-house“ насупрот „external manufacturing“)

Свеобухватна анализа рентабилности код ова два приступа је изазовна због различитих предуслова који се морају узети у разматрање, у вези са почетним инвестицијама као и са организационим односно режијским трошковима који су специфични за сваку компанију. За разумну одлуку набавити или купити (make or buy), трошак је само један међу више елемената које треба узети у обзир. Препоручује се дугорочна адитивна стратегија, у оквиру које треба проценити ризик у ланцу снабдевања, стратегију стварања вредности, као и аспекте интелектуалне својине и знања (know-how).

Атрактивна цена за клијенте у оквиру „in-house“ производње може се постићи када је машина у потпуности искоришћена и када се у цену рачунају само директни трошкови производње као што су материјал, амортизација машина, рада и потрошни материјал, табела 5.

На пример, различите алате и приборе као и прототипове често је економичније набавити на тржишту, делове и компоненте система са високим захтевима за квалитет, сложеним дизајном и заштитом интелектуалне својине, могу се производи интерно или набављати директно од добављача (TIER1 ниво добављача).

Заштита интелектуалне својине и високо постављени стандарди квалитета код захтевних индустрија (ваздухопловство, енергетика и медицина) не могу се лако испунити и због тога је већина готових производа, које можемо да видимо на тржишту да припадају овим индустријама, произведена интерно или у сарадњи са TIER1 добављачем.

Табела 5: Позитивни и негативни ефекти производње делова у сопственој режији (in-house), (AMPOWER, 2023).

 <p>Развој и унапређење параметара процеса, заштита интелектуалне својине (процеса, обезбеђење квалитета), унапређење производње доводи до унапређења квалитета производа</p>	 <p>Велики режијски трошкови утичу на крајњу цену производа, велики почетни инвестициони трошак и ризик, ограничена флексибилност у примени материјала и технологије, мања искоришћеност опреме у иницијалној фази</p>
--	---

Са друге стране, различити пружаоци услуга производње делова и *online* тржиште могу да понуде веома брзо време испоруке потребних делова, широк избор технологија, обима израде и материјала, табела 6.

Табела 6: Позитивни и негативни ефекти производње делова набавком услуге на тржишту (*external, on-line manufacturing*), (AMPOWER, 2023).

+	Нема почетног улагања у инфраструктуру (машине и опрема), могућност трансфера знања и know-how међу учесницима у пружању услуге, широка могућност избора материјала и адитивних технологија у иницијалној фази	-	Недовољна заштита интелектуалне својине и права у процесу, немогућност унапређења процеса производње и избора параметара, непостојање могућности за развој и унапређење знања и know-how
---	--	---	--

Међутим, одељења за адитивну производњу у компанијама често су оптерећена и додатним високим трошковима који се морају урачунати у укупне трошкове. Разлог лежи у чињеници што многе компаније у укупне трошкове укључују и иницијалне трошкове за почетну обуку и потребне квалификације радне снаге у своја разматрања рентабилности, што адитивни приступ „на прву руку“ може учинити мање привлачним посматрано из комерцијалне перспективе.

Блиску будућност карактерисаће развој АТ који ће редефинисати парадигме трошкова. Нове технологије имају за циљ смањење трошкова и побољшање ефикасности. Овај приступ је много шири и обухвата не само оптимизацију трошкова већ и усвајање дугорочних стратегија адитивне производње које се односе на резистентност ланца снабдевања, стварање ланца вредности и разматрање интелектуалне својине.

4.5 ОРИЈЕНТАЦИЈА ДЕЛОВА КАО КРИТЕРИЈУМ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ

Једна од најбитнијих одлука у раним фазама планирања и пројектовања за АТ је оријентација дела на радној плочи. Оптимална оријентација делова посматра се као критично питање код адитивних технологија јер исто утиче на кључне параметре производње као што су: време и трошкови процеса, механичке карактеристике, количина материјала за потпору. Оријентација делова на радној површини односи се на правац изградње делова, (Leutenecker-Twelsieka и др., 2016).

Оријентација делова се третира као процес оријентације око координатних оса машине у оквиру радног простора саме машине. Ова терминологија се не односи на транслацију делова око координатних оса машине.

Оријентација делова има значајан утицај на пројектовање делова. Сама технологија израде (слој по слој) подразумева да се делови континуирано израђују на нивоу x, y – осе (у једном слоју) што је нормално (ортогонално) на правац израде делова који је у правцу z -осе и који је у дискретним корацима који

зависе од дебљине слоја и у крајњем од висине дела. Поред наведеног, поједине технологије захтевају и израду потпорне структуре, технологија израде и температурни коефицијент утичу и на ефекат савијања и смањивања делова, што још више указује на значај правилне оријентације делова.

Оријентација делова је у директној вези са достизањем одређених карактеристика квалитета крајњег производа (геометријска и димензионална тачност, квалитет површине, микроструктура) као и трошкова самог процеса који зависе од: времена израде, запремине дела и потпорне структуре, искоришћености радног простора 3D машине, обима постпроцесинга.

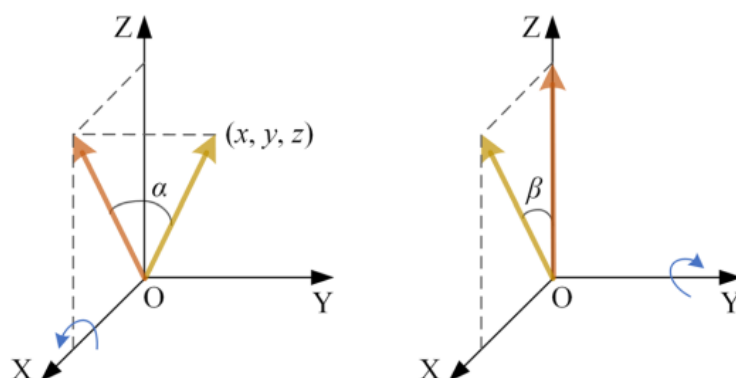
Оријентација делова одређене геометрије у радном простору омогућава достизање оптималних вредности карактеристика квалитета и генератора трошкова, и то је у основи процес вишекритеријумске оптимизације ради постизања компромиса. Циљеви производње који се желе постићи преко оптималне оријентације (ОО) делова на радној плочи се дефинишу/постављају преко оријентационих фактора (build orientation factors -BOFs), односно фактора на које утицај има оријентација делова, (Qin и др., 2021).

Проблематика оријентације дела на радној површини

У контексту реализације адитивног процеса оријентација дела односи се на оријентацију у односу на раван сечења (слајсирања) адитивне машине. Теоретски посматрано може постојати бесконачан број оријентација, те у том смислу из овог бесконачног скупа бира се оптимална оријентација.

Оријентација дела се представља са две компоненте - два угла (α , β), тако да, као што је приказано на слици 16, оријентација изградње се поставља дуж Z-осе након ротације 3D модела око X-осе за угао α ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$) и око Y-осе под углом од β ($0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$). Оријентација изградње се такође може изразити јединичним вектором (X, Y, Z), где (X, Y, Z) може да се конвертује у (α , β) коришћењем следећих једначина, (Qin и др., 2021):

$$\alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{z}\right) & \text{ако } y \neq 0 \text{ или } z \neq 0 \\ 0 & \text{ако } y = 0 \text{ и } z = 0 \end{cases}, \quad \beta = -\arctan\frac{x}{\sqrt{y^2+z^2}}$$



Слика 16: Шематски приказ углова оријентације на радној плочи машине, (Qin и др., 2021).

У раду (Qin и др., 2021) истиче се да је у оквиру скупа активности у процесу адитивне технологије планирање процеса адитивне производње критична

активност. Оријентација дела на радној површини је први од укупно четири процеса (конфигурисање потпорних ослонаца, дефинисање слојева за изградњу, планирање путање) који претходе фази израде дела.

Може се закључити да оријентација дела на радној површини представља избор оптималног положаја предмета израде (дела) са циљем постизања дефинисаних (задатих) карактеристика дела. У реалности, овај параметар се дефинише на основу искуства и интуиције оператора на машини (коришћење софтвера за припрему процеса). За исти предмет израде други оператор дефинисао би другачију оријентацију на радној плочи под истим условима припреме. Ово би имало негативан ефекат на стабилност и поновљивост адитивног процеса као и на квалитет предмета израде. Зато се оријентацији дела на радној плочи, као једном од критеријума за оптимизацију процеса, мора посветити посебна пажња.

4.6 ОПТИМИЗАЦИЈА ТОПОЛОГИЈЕ КАО КРИТЕРИЈУМ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ

Оптимизација топологије налази све интензивнију примену у пројектовању делова. Најновија адаптација ове методе у оквиру концепта DfAM односи се на укључивање и ограничења код структуре потпорних ослонаца, код пројектовања целуларних структура, структура са унутрашњим каналима и у медицини за израду потпора за разна ткива.

Конкурентна (истовремена) оптимизација подразумева разматрање утицаја тополошке оптимизације на производне трошкове, заједно са процесном оптимизацијом параметара адитивне производње како би се смањили укупни трошкови. У раду (Ulu и др., 2019) управо се разматра тополошка оптимизација истовремено са оптимизацијом параметара процеса производње делова од метала адитивном технологијом.

У циљу обезбеђивања комерцијалног успеха у примени АТ, у раду (Leary, 2020) се истиче неопходност обезбеђивања приступа системским методама и техникама које, уз примену ефикасних софтверских решења која то подржавају, могу омогућити структурну оптимизацију односно дистрибуцију материјала унутар неке конструкције или дела.

Једно од кључних ограничења код тополошки оптимизованих производа је ограничење у производњи добијених комплексних геометрија применом традиционалних производних технологија. Ово се променило појавом АТ што је омогућило комерцијалну распрострањеност и синергију тополошке оптимизације и АТ.

Иако је предмет изучавања дуги низ година, практична примена тополошке оптимизације је дуго времена била доступна малом броју истраживача. У последњој деценији њена примена добија на значају и тополошка оптимизација постаје доступна многим захваљујући интеграцији модула за тополошку оптимизацију у комерцијалне инжењерске (CAD) софтвере укључујући и алате за DfAM технологију – пројектовање за адитивну производњу.

Највише прогреса постигло се у интеграцији тополошке оптимизације и DfAM алата. Појављује се све више DfAM алата који могу да интегришу велики број захтева постављених пред тополошку оптимизацију, као што су: интеграција захтева за радним површинама које не захтевају потпорне ослонаце, или интеграција захтева за минимизацијом укупне запремине потпорних ослонаца.

Компромис између тополошки оптимизованог производа и производних ограничења довео је до развоја две стратегије:

- стратегије које модификују исходе тополошке оптимизације тако да су задовољена ограничења производности примењене АТ.
- стратегије које задржавају оптимизовану геометрију након ТО, али кроз омогућавање постојања потпорне структуре и накнадни постпроцесинг задовољавају услове производности код примењене АТ.

Прве стратегије компромитују резултате структурне оптимизације у корист способности производности, док друге стратегије дају предности резултатима тополошке оптимизације и примењују додатне активности постпроцесне обраде. Прве стратегије више примењују истраживачи и теоретичари производње, док друге стратегије користе комерцијално оријентисане организације и појединци.

Како због комплексности и потребних софтверских алата за примену првих стратегија, тако и због значаја резултата структурне оптимизације, анализирани L-PBF технологије, могућности извршења експеримента, у овој дисертацији ће се применити друга стратегија (задржавање оптимизоване геометрије након ТО).

4.7 ПРИМЕНА МЕТОДА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ У РЕШАВАЊУ ПРОБЛЕМА ОРИЈЕНТАЦИЈЕ ДЕЛА НА РАДНОЈ ПЛОЧИ 3D МАШИНЕ

За подршку доносиоцима одлука и решавање проблема планирања који укључују вишеструке (обично супротстављене) критеријуме једно од најприкладнијих решења су примена квантитативних метода и техника (односно метода вишекритеријумског одлучивања и оптимизације).

На основу истраживања доступног у раду (Ransikarbun и др., 2021) а везано за фазу пројектовања процеса код адитивне производње, закључено је да се проблеми оријентације делова на радној плочи машине (укључујући и пратећи скуп критеријума), могу решити квантитативним методама и техникама односно методама вишекритеријумског одлучивања и оптимизације.

У књизи (Памучар, 2018) вишекритеријумска оптимизација је објашњена као задатак оптимизације две или више функција циља на неком скупу могућих решења. Од проблема везаних за вишекритеријумску оптимизацију истакнуто је неколико чињеница: 1) за одлучивање постоји више критеријума (функције циља и ограничења), 2) за доношење одлука постоји више алтернатива, 3) постоји процес пројектовања или избора решења, 4) међу критеријумима постоје конфликти, 5) мерне јединце које се користе су често неупоредиве, врши се избор једног коначног решења из скупа акција.

У раду (Qie и др., 2018) у фази пројектовања процеса адитивне производње препознат је проблем оријентације делова на радној плочи. Решење проблема аутор објашњава приступом у два корака: (1) избором алтернативних оријентација (АО), (2) избором најбоље оријентације (оптималне оријентације - ОО) из скупа АО. За избор оријентација аутор предлаже следеће методе:

- Методе оптимизације које проблем избора АО третирају као проблем вишециљног одлучивања. Проблем се обично решава применом метода хеуристичке оптимизације.

- Методе евалуације које посматрају проблем оријентације као проблем доношења одлука са више атрибута (више атрибутивно одлучивање). Фактори који утичу на избор оријентација третирају се као атрибути.

BAO (вишеатрибутивно или ВКА вишекритеријумска анализа) и ВЦО (вишециљно) одлучивање су две главне области у оквиру вишекритеријумске оптимизације (ВКО), (Gade и Osuri, 2014).

Аутор (Памучар, 2018) наводи да у зависности од анализираног проблема постоје три основна приступа у решавању проблема BAO: 1) проблем рангирања, 2) проблем избора једне варијанте, 3) проблем избора више варијанти.

Доношење одлука са више атрибута (BAO). BAO је доказан и успешан скуп метода које омогућавају евалуацију и доношење одлука између више супротстављених критеријума током процеса планирања и доношења одлука. Велики број аутора предлаже да се ограничења у једној методи BAO могу превазићи комбиновањем са другом методом, односно применом хибридних метода. На основу истраживања доступних радова, аутори (Ransikarbun и др., 2021) доносе одређене закључке који су важни са аспекта анализе извршене у овој дисертацији:

- Примена метода BAO још увек нису превише заступљене у напредним производним технологијама као што је адитивна производња;
- Најзаступљеније технике адитивне производње у садашњим радовима су (FDM и SLS) технике;
- Аутори предлажу унапређење квантитативних и квалитативних метода евалуације на начин да се укључи и перспектива доносилаца одлука.

У раду (Chandra и др., 2022) је дата општа индикација да су методе BAO способне да реше сложене проблеме које карактеришу различити конфликтни критеријуми. Алати BAO подједнако користе и квантитативне и квалитативне факторе. Технике и приступи који су доступни омогућавају ефикасно решавање проблема, а адекватним избором из скупа решења проналазе оптимално решење.

На основу рада (Emovon и др., 2020), неке од најпопуларнијих метода BAO су: Weighted Sum Model (WSM), Weighted product model (WPM), Analytic Hierarchy Process (AHP), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), PROMETHEE, ELECTRE, Multi-Criteria Compromise Ranking (VIKOR), Multi-Attribute Utility Analysis (MAUA).

Оквир за BAO карактерише четири елемента: алтернативе (као могући избори), критеријуми (атрибути), тежине критеријума (према компаративном значају сваке од њих), оцена алтернатива према критеријумима, (Li и др., 2024).

Методе BAO помажу доносиоцима одлука да одаберу или рангирају алтернативе, али први корак је квантитативно или квалитативно вредновање групе одабраних критеријума. За квантитативну процену наведених критеријума, у оквиру генерисаних алтернативних оријентација изградње, развијен је велики број метода и математичких формулација.

Што се тиче критеријума или фактора оријентације дела на радној површини 3D машине, на основу којих се упоређују одређене алтернативе, постоји неколико кључних критеријума као што су: време израде, цена израде, цена накнадне обраде, време накнадне обраде, потпорна структура, квалитет површине, хрпаваост.

Више циљно одлучивање (ВЦО) - Multi Objective Decision Making (MODM). У вези са ВЦО одлучивањем а на основу исцрпног истраживања литературе, аутори (Qin и др., 2021) разликују две методе за примену у проблемима одлучивања: једностепене и двостепене метода.

Код једностепене методе (методе у једном кораку) технике оптимизације које се најчешће користе су: алгоритам за оптимизацију заснован на популацији (population-based optimisation algorithm), генетски алгоритам (genetic algorithm), оптимизација роја честица (particle swarm optimisation algorithm), BFOA алгоритам (bacterial foraging optimisation algorithm) и ELMA алгоритам (electromagnetism-like mechanism algorithm). Једностепене методе тренутно не дају адекватан одговор на питање која је адекватна величина корака ротације дела на радној плочи 3D машине (користи се за добијање алтернативних оријентација изградње). Питање које се поставља је да ли корак треба да има малу или насумичну вредност, што заузврат може да доведе до огромног времена израчунавања/претраживања, или је боље подесити величину корака ротације на 1 или 5 степени.

Објектно оријентисана функција која се генерише у овом процесу може бити формулисана као:

- Модел отежаних сума (WSM): $w_1F_1(O) + w_2F_2(O) + \dots + w_mF_m(O)$;
- Парето фронт анализа (PFA) [$F_1(O), F_2(O), \dots, F_m(O)$];
- MIN-MAX функција (MMFs) ($\min/\max\{F_1(O)\}, \min/\max\{F_2(O)\}, \dots, \min/\max\{F_m(O)\}$);

где је: O – оријентација, m – број разматраних критеријума, $F_i(O)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) објектно оријентисана функција за одређени критеријум у изабраној алтернативи, и w_i – тежинска вредност критеријума.

Код двостепене методе проблем оријентације делова подељен је у два корака: 1) генерисање АО, 2) избор оптималне оријентације изградње из генерисаних АО из првог корака. У постојећим методама у два корака, генерисање АО се реализује следећим техникама: препознавање критичних облика (*feature recognition*), генерисање конвексних површина (*convex hull generation*), ротација дела у све три димензије (*quaternion rotation*), кластерисање површина (*facet clustering*).

За избор ОО примењује се нека од метода ВЦО. Међутим, двостепена метода генерално има потенцијално висок ризик да се током избора АО пропусти (не изабере) најбоља оријентација, јер без обзира на то која техника избора АО је усвојена тешко је осигурати да генерисане АО морају садржати и праву ОО.

У овој дисертацији примениће се двостепена модификована метода, која представља хибридни приступ и обухвата следеће кораке: генерисање АО применом методе препознавања критичних облика и примену метода ВАО за избор најбоље/оптималне алтернативе.

5. АНАЛИЗА АКТУЕЛНОГ СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА У ИЗАБРАНИМ ОБЛАСТИМА ОПТИМИЗАЦИЈЕ СА ПРЕДЛОГОМ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА, ОПТИМАЛНЕ ОРИЈЕНТАЦИЈЕ И КРИТЕРИЈУМА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

У овом поглављу приказана је ретроспектива досадашњих истраживања везаних за области оптимизације које омогућавају смањење трошкова у примени адитивне P-PBF технологије. Уважавајући тему истраживања у овој дисертацији, најобимнија разматрања у поглављу су повезана са аспектом трошкова, кроз анализу литературе на основу које ће се дати и предлог елемената новог модела трошкова.

Кроз разраду наведених делова у оквиру овог поглавља дати су одговори на постављени циљ истраживања да се на основу анализе савремених приступа у прорачуну трошкова изврши генерализација прикупљеног сазнања и формира адекватна основу за развој новог модела трошкова. У наставку поглавља анализирана је доступна литература у области тополошке оптимизације, методе коначних елемената, оријентације радног дела са предлогом могућих оријентација које ће се применити у студији случаја и извршиће се избор критеријума за примену у ВАО.

Такође, посебан сегмент у поглављу посвећен је анализи радова из области примене ВАО у АТ на основу којих ће се дефинисати адекватне методе за примену у овој дисертацији за одлучивање при избору оптималне оријентације.

Иако оптимизација доноси предности са аспекта трошкова и смањења масе, цео процес није ослобођен од појаве дефеката. С тим у вези, шести део овог поглавља посвећен је приказу најчешћих дефеката који се појављују у процесу израде делова адитивном L-PBF методом.

5.1 МОДЕЛИ ТРОШКОВА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ АДТИВНЕ L-PBF ТЕХНОЛОГИЈЕ – АКТУЕЛНО СТАЊЕ И ПРЕДЛОГ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА

Трошкови производње су једни од најважнијих и најчешће анализираних компоненти у процесу пројектовања производа и процеса производње. Анализа трошкова је стандардом (ISO/ASTM 52910:2018) прописана процедура током пројектовања процеса за примену адитивних технологија.

У процесу освајања тржишне позиције компаније разматрају нове опције и технологије за производњу, при чему се посебно истичу адитивне технологије. Без обзира на изабрану технологију пројектанти морају квантификовати трошкове својих дизајнерских решења употребом адекватних модела трошкова. Иако су адитивне технологије заступљене на тржишту више од 30 година, произвођачи свакодневно траже начине да смање трошкове производње. У случају адитивних технологија пројектанти морају бити упознати са најважнијим генераторима трошкова (варијабле и фактори који утичу на висину трошкова) како би остали конкурентни на тржишту.

Неопходно је анализирати утицај трошкова адитивне производње на процес управљања производњом. У данашње време, високи трошкови машина и материјала чине ову технологију скупљом од традиционалне, а иницијалне

процене указују да је њена употреба добра само за мали обим производње. Истраживачи који су своје истраживање усмерили ка моделима трошкова исте заснивају на анализи различитих структура трошкова у адитивној производњи (директне и индиректне трошкове, структуриране и не структуриране трошкове).

Ипак, на путу ка свеобухватнијем усвајању адитивног процеса, треба превазићи одређене баријере, међу којима је једно од критичних питања велики почетни инвестициони трошак за успостављање процеса адитивне производње (укључујући набавку опреме, ангажоване стручног особља), посебно за мала и средња предузећа, стога предвиђање и процена трошкова производње у контексту адитивне производње представљају важне теме за истраживање. Истраживачи су препознали и друге важне аспекте које је требало узети у обзир а везани су за материјале који се користе у адитивној производњи, трошкове потрошње енергије, постпроцесинга.

Комплексност у процесу развоја модела трошкова тражи шири приступ и анализу, посебно имајући у виду сложеност адитивне L-PBF технологије коју карактерише: учешће радне снаге, велики броја процесних параметара, велика потрошња материјала и енергије, што указује на чињеницу да је за ову технологију неопходно развити нови и свеобухватнији модел трошкова.

У процесу израде свеобухватне и адекватне методе за анализу трошкова адитивне L-PBF технологије извршено је истраживање најрелевантнијих модела трошкова који се односе на различите PBF методе (DMLS, EBM и SLS). Међу анализираним моделима трошкова извршено је испитивање сличности и разлика и истражене њихове снаге и слабости. Сва запажања о постојећим моделима трошкова, и синтеза њихових снага и слабости, су искоришћени да се поставе темељи за дефинисање и изградњу новог модела трошкова који треба да помогну у решавању отворених питања која се у овој дисертацији анализирају. Анализа модела трошкова указала је да појединачни модели трошкова нису урачунали све генераторе трошкова у L-PBF процесу иако су сви модели подједнако тежили ка свеобухватности и реалистичности.

У овој дисертацији, процена трошка врши се из произвођачке перспективе коју карактеришу пројектна и процесна фаза. Кроз ове две фазе анализираће се и приказати сви значајнији пројектни и произвођачки трошкови који су битни за модел трошкова односно директне и индиректне трошкови који се појављују у овим фазама, (Kadir и др, 2020).

У приступу анализи трошкова примењен је трошковни модел познат као ABC (Activity Based Cost) модел који анализира све укључене активности које могу генерисати трошкове. Овај модел обрачуна трошкова заснованих на активностима обезбеђују менаџменту тачније информације о цени производа, помаже му да прилагоди цене и процени перформансе, модификује производни метод идентификовањем активности на бази трошкова које остварују, (Al-Mekhlafi и др., 2023). Трошкови активности су подељени у директне (трошкови материјала) и индиректне (радна снага, машине, администрација и режија) трошкове. За директне трошкове количина утрошеног материјала је битна за калкулацију, док се код индиректних трошкова рачунају времена ангажовања или трајања процеса.

Производња делова од метала се сматра скупом технологијом и у литератури постоји велики број истраживања која разматрају начине за смањење трошкова како би израда делова адитивним технологијама била комерцијално изводљива. L-PBF технологија је на тржишту најзаступљенија адитивна технологија за производњу делова од метала. У литератури је приказан велики број аналитичких модела за прорачун трошкова ове технологије. Међутим, мали број радова разматра анализу осетљивости у циљу евалуације најзначајнијих процесних параметара и параметара производа који утичу на трошкове производње. Техника анализе осетљивости је алат који помаже у идентификовању генератора трошкова, (Kamps и др., 2018).

У циљу задовољења клијената аутори (Woźniak и др, 2022) предлажу увођење додатних сервиса у виду контроле квалитета, што у коначном свакако доводи до повећаних трошкова. Посебно се напомиње да приликом анализе процеса контроле треба узети у разматрање неколико фактора: време извршења, трошкове извођења контролних процеса, расположивост опреме, као и способност у тумачењу резултата. На основу изнетих констатација аутора, у предложеном моделу трошкова у оквиру ове дисертације, биће укључени и трошкови контроле квалитета.

5.1.1 Анализа модела трошкова

У овом поглављу извршиће се анализа неколико модел трошкова који су поставили кључне основе за анализу трошкова код адитивне L-PBF технологије као и њихове варијације тј новоразвијене моделе засноване на овим (основним - базичним) моделима.

Основни (базични) модели трошкова L-PBF адитивне технологије

У овом делу презентована су два базична модела трошкова од аутора (Baumers и др., 2012) и (Rickenbacher и др., 2013).

Аутори (Baumers и др., 2012) користе назив „паралелна“ производна технологија за АТ што указује на чињеницу да се у оквиру једног циклуса могу производити различити производи (по облику, димензији и маси) што свакако отежава калкулацију трошкова (посебно у смислу одређивања јединачне цене), односно утрошка енергије по јединици производа. У том смислу разматра опције за минимизацију трошкова и утрошка енергије и решење које је представљено (и доказано) је неопходност комплетне искоришћености и попуњености радне површине машине и ово представља и кључни закључак овог рада. У контексту изнетог, аутор је у раду користио технику познату као „automated build volume packing technique“ за оптимизовану попуњу радне површине.

Основна формула за прорачун трошкова од које полазе аутори (Baumers и др., 2012) је претходно дефинисана формула трошкова од аутора Ruffo (из 2006. године) а користи и технику за прорачун трошкова познату као ABC (Activity Based Costing). У објашњењу методологије, аутори наглашавају и да су фиксни елементи процеса припреме машине (machine start-up) и поновног nanoшења праха (powder re-coating) амортизовани због количине производа на радној плочи. Као индиректне трошкове аутори рачунају: административне режијске трошкове, производне режијске трошкове (као трошкове радне снаге), трошкове машине за штампање и трошкове машине у постпроцесу за одвајање делова од радне

површине. Методологија не садржи неке од не структурираних трошкова као што су: могућност грешке у процесу израде, потрошња праха (фаза постпроцесинга), трошкови инвентара и период неактивности машине. У развијеној методологији за прорачун трошкова значајна је примена ABC технике, у прорачун трошкова урачунати су и трошкови скидања делова са радне плоче, а аутори посебно наглашавају потребу попуњености радне плоче у циљу ефикасније производње. ABC техника и параметри трошкова везани за радну плочу су искоришћени као улазни подаци у процесу развоја новог модела трошкова за потребе ове дисертације.

Аутори (Rickenbacher и др., 2013) објашњавају да је изабран SLM процес јер омогућава израду готовог производа од метала, и у том смислу представља доброг кандидата као замена класичним технологијама ливења или стругања. Констатује се да за израду прототипова и малих серија класичне производне технологије немају предност у односу на АТ посматрано кроз трошкове и време израде. Истиче се да је веома важно развити трошковни модел који рачуна стварне трошкове појединачних делова произведених адитивном технологијом, иако делови могу бити направљени заједно са осталим деловима (подразумевајући и различите геометрије) у једном циклусу израде.

У формули за трошкове израде делова, у наведеном раду (поред времена машине обухваћени су и трошкови потрошње инертног гаса) посебно се потенцира и отвара могућност да се укључи и формула за деградацију праха. На основу спроведене студије случаја закључује се да израда више делова на радној површини доприноси смањењу трошкова, као и да се запремина коришћеног праха може смањити израдом саћастих унутрашњих структура. Напред наведене карактеристике (смањење запремине и симултана производња више делова различитих геометрија) утичу и на смањење укупног времена израде по делу, али се структура трошкова по делу за пре и постпроцесинг повећава (потребно време за припрему процеса а затим и за постпроцесинг). У раду се закључује следеће:

- Важност утврђивања стварне алокације времена и трошкова како би се могла размотрити потребна умањења трошкова;
- Развијени модел иако потенцира симултану израду више делова на радној плочи не преферира израду нити једног дела посебно. Аутори закључују да је време израде један од главних покретача трошкова али наглашавају да се исто може оптимизовати (мањом запремином, мањом висином делова, кретањем ласера);
- Ако се смањење времена обезбеди кроз претходно објашњене активности, даљи фокус смањења треба усмерити на пред и постпроцесинг.

Овај модел трошкова послужио је већини аутора, укључујући и ову дисертацију, као основа за даљу надоградњу и развој нових модела трошкова.

Модел трошкова који се заснивају на базичним моделима

Од модела који се заснивају на представљеним базичним моделима трошкова у наставку ће се приказати два модела трошкова од аутора (Barclift и др., 2016) и (Fera и др., 2017).

Основ за дефинисање трошковног модела у (Barclift и др., 2016) је модел предложен од стране (Rickenbacher и др., 2013) који је у одређеним фазама измењен на начин да се користе друге математичке формуле.

Кључни детаљ које аутори (Barclift и др., 2016) разматрају, и који чини битну разлику у односу на полазни модел, је имплементација деградационог трошковног модела за рециклирани материјал (метални прах). Разлози за поновну употребу рециклираног металног праха је тај што је метални прах има велику тржишну цену па се тако тражи могућност смањења трошкова његовом поновном употребом. Развијени деградациони модел је познат под називом Sum-of-the-Year's Digits (SOYD). Студија случаја (коришћен материјал Ti64 и метода DMLS) је показала да посматрано за појединачне трошкове израде по делу, трошкови припреме машине и деградације су били највећи процентуално заступљени трошкови. Трошкови израде дела који обухватају и трошкове деградације праха повећани су у границама 13-75% за материјал Ti64. После одређеног броја циклуса израде односно поновне употребе овог праха (вредност деградације се смањује до одређене вредности након чега постаје константна) долази и до уштеде у трошковима израде дела, односно нема повећања трошкова.

Аутори у раду (Fera и др., 2017) развили су модел трошкова MiProCAMAM (Mixed Production Cost Allocation Model For Additive Manufacturing) који у се у основи заснива на комбинацији улазних података представљених у Excel формату, интерфејса и програмског кода израђеног у програму Matlab, за L-PBF технологију. Предложено софтверско решење се састоји четири целине: улазни подаци (Data import), процена времена израде дела (Build time estimator), трошковни калкулатор (Cost calculator) и извештај (Build report). Предложени модел обухвата 5 процеса: припрема (геометрије), припрема процеса израде дела, подешавање, израда дела, уклањање. За алокацију времена по јединачним геометријама користи формулу преко запремине коју геометрија заузима у радном простору. Развијени модел се заснива на следећим законитостима:

- Алгоритам алокације времена наношења праха развијен у раду (Rickenbacher и др, 2013) и исти је уз незнатне измене коришћен за рачунање укупног времена израде;
- Постоји могућност рачунања јединачне цене дела у случају производње делова различитих геометрија на радној плочи, у једном производном циклусу;
- Као основ за рачунање времена израде дела (build time estimator) искоришћена је математичка формулација представљена у (Baumers и др., 2012);
- Трошковни модел обухвата пре и постпроцесне активности као што су: припрема геометрије – пројектовање, припрема радне плоче, припрема машине, уклањање радне плоче и делова са радне плоче;
- Постпроцесне активности као што су обрада површине или термичка обрада, уклањање материјала и контрола квалитета су разматране али нису укључене у коначну формулу. Циљ рада је било рачунање укупних трошкова производње. Формула за рачунање свих пост процесних активности није могла бити свеобухватна за све процесе:
 - У постпроцесним активностима као што су термичка обрада и површински третман, уклањање материјала и контрола квалитета су урачунати у трошкове;
- У трошкове радне снаге урачунате су различите квалификације и структура кадра;

- У укупне трошкове су урачунати и трошкови коришћења инертног гаса и промене материјала за рада;
- Уводи се и фактор поновне употребе праха у процесу, као опција која утиче на укупну цену;
- Естиматор процене времена је модификован употребом индикатора перформансе за ефективну производњу Overall Equipment Effectiveness (ОЕЕ) кроз рачунање расположивости машине, губитак перформанси и квалитета (availability, performance and quality losses).

У студији случаја аутори (Fera и др., 2017) су ради поређења развијеног модела са постојећим моделима користили иста полазну основу (исти подаци из докторске дисертације аутора Baumers и др., 2012) и утврдили да су трошкови у њиховом моделу већи за 37% (због урачунатих додатних трошкова: припреме, израде дела, уклањање дела са радне плоче), а сами трошкови фазе израде дела су већи за 17%. Разлике су очигледне и јасне јер модел трошкова аутора (Fera и др., 2017) детаљније разматра адитивни процес и урачунава трошкове за фазе које су уведене у оквиру овог модела. На основу изнетог, може се закључити да су (Fera и др., 2017) детаљно анализирали трошкове адитивног процеса а кроз развијени модел омогућено је израчунавање јединачних трошкова дела за случај израде различитих геометрија на радној плочи током фазе израде.

Модели трошкова који су искоришћени за израду новог модела трошкова у овој дисертацији

Поред два основна (базична) модела трошкова и додатна два модела трошкова заснованих на базичним моделима који су напред објашњени, за израду предлога новог модела трошкова коришћени су и модели неколико аутора: (Remedios, 2021), (Sequeira, 2019), (Lamei, 2021) и (Jarrar и др, 2022). Ови модели су појединачно објашњени у наставку.

У раду (Remedios, 2021) анализиран је економски ефекат примене две различите адитивне технологије (Direct Energy Deposition - DED and Powder Bed Fusion - PBF) у производњи металног дела из авио индустрије, и извршено поређење са трошковима производње истог дела технологијом ковања. За трошкове израде дела технологијом PBF коришћен је модел трошкова развијен у дисертацији (D. Sequeira, 2019).

Аутор (Remedios, 2021) закључује да примена обе адитивне технологије има економског оправдања за коришћење у малосеријској производњи делова (праг економичности је 44 комада за PBF и 118 комада за DED) у анализираној студији случаја. Студија потврђује и да се трошкови израде код ковања повећавају са сложености дела, док код обе адитивне технологије трошкови су константни јер нема улагања за израду алата.

У дисертацији (Sequeira, 2019) анализира се производња металних делова адитивним путем. Аутор објашњава три технологије које третирају производњу металних делова: L-PBF, DED и везивну 3D штампу. Модел трошкова је развијен за L-PBF технологију. Активности су подељене на три процеса: предпроцес, процес и постпроцес. По питању трошкова анализирани су:

- Варијабилни трошкови (материјал, радна снага, енергија и остали конзументи – гас, филтери и неискоришћени прах који је третиран у процесу):

- Трошкови материјал се односе на утрошени прах за производњу дела и потпорних ослонаца, као и део који је третиран у процесу али се не може више користити, док прах који се поново може користити у процесу није третиран са аспекта трошкова;
- Радна снага је рачуната у оквиру сваке активности у којој учествује;
- Трошкови енергије су урачунати само они који се односе на рад машине, док остали трошкови енергије који немају процентуално велики удео нису разматрани;
- Аутор је посебно разматрао и дао објашњења за трошкове осталих конзумента у процесу: трошкови гаса за формирање инертне атмосфере су урачунати, трошкови услуге за уклањање филтера за пречишћавање праха (уграђени на машини) су урачунати, док трошкови потрошње радне плоче и њене обраде (након сваког процеса) нису урачунати;
- Фиксни трошкови (машина, рентирање простора за рад, одржавање опреме за рад, остала опрема):
 - Трошкови материјала се рачунају преко његове набавне цене;
 - Трошкови рентирања простора за рад су урачунати преко величине заузетости простора за машине и сигурносне зоне око машине;
 - Трошкови опреме за рад се односе на коришћење хардвера и софтвера и односе се на трошкове лиценцирања. У свакој активности аутор рачуна трошкове на годишњем нивоу и по јединачном делу/геометрији (добити поделом годишњих трошкова са укупно израђеним бројем делова или дефинисаних потреба).

Укупни број израђених делова је увећан за процењени број делова који могу бити „оштећени“ током манипулације у постпроцесном циклусу. Укупни трошкови су збир трошкова по активностима: припреме модела, припреме машине, израде дела, уклањања дела са радне плоче и чишћења машине и збира свих потребних постпроцесних активности.

Аутор је спровео и анализу осетљивости у циљу анализе утицаја појединих параметара на укупне трошкове. Урађена је анализа осетљивости за потенцијално смањење трошкова цене машине, имајући у виду процену да највећи утицај на цену производа имају управо ови трошкови. Закључено је да постоји зависност, да мањи трошкови машине умањују јединачну цену производа, и да је неопходно да у перспективи на тржишту дође до смањења цена машина за PBF адитивну технологију (услед повећане понуде на тржишту као и укидања патентних права).

Анализа осетљивости је спроведена за величину серије од 50 и 100 комада, и трошкови упоређени са трошковима израде истог дела али методом ковања. Закључено је да је неопходно да за веће серије производа (у конкретном случају 100 комада) треба веће умањење цене машине (за око 300.000 еура у односу на смањење од 100.000 еура за производњу 50 комада). Ово се може тумачити на начин да за серију од 100 комада, метода ковања остварује већу уштеду у јединачној цени што се тумачи кроз економију обима. Ова анализа је корисна јер је аутору показала која је то критична „тржишна“ вредност машине по којој има економског оправдања користити адитивну производњу и за израду већих серија делова.

Аутор је предложио и неке од наредних корака у циљу унапређења постојећег модела јер у моделу трошкова нису урачунати: 1) трошкови сертификације (нарочито битно у авио индустрији када се машина и предметни делови посебно сертифицију и не може се извршити промена машине, дела или материјала да пре тога не буде извршена ресертификација), 2) процена утицаја на животну средину (кроз потрошњу енергије у процесу израде дела, као и кроз студију случаја утицај смањења потрошње горива у авио индустрију на околину).

Анализа и начин рачунања варијабилних трошкова као и спровођење анализе осетљивости су кључни фактори који овај модел трошкова чини другачијим у односу на остале моделе. Исти приступ (укључујући и поједине параметре при анализи осетљивости) ће бити примењен и у новом моделу трошкова у овој дисертацији.

Модел развијен и презентован у раду (Lamei, 2021) додатно разматра и четири, како то аутор наглашава, недостајућа трошка у моделима које је у међувремену разматрао. У питању су трошкови процесне контроле, деградације материјала, трошкови тестирања и трошкови потрошње материјала у процесу тестирања. Идеја аутора је развој трошковног модела који би био применљив на свих седам расположивих адитивних технологија. Развијени трошковни модел садржи три фазе разматрања трошкова:

- Фаза предпроцесинга (укључује трошкове радне снаге, припреме машине и режијски трошкови);
- Фаза процеса или израде дела (у којој се генерише највише трошкова: материјала, машине, радне снаге, енергије, контроле процеса, режијски трошкови);
- Фаза постпроцесинга (укључује трошкове материјала, машине, енергије, режијски трошкови и трошкови тестирања).

Предложени модел је омогућио прецизно рашчлањивање трошкова и њихову естимацију у циљу доношења одлуке. Аутор је посебно разрадио трошкове материјала, за случај када се користи исти материјал за производни део и потпорне ослонце, односно када се за наведено користе различити материјали. Нови модел трошкова у овој дисертацији ће се такође заснивати на анализи трошкова кроз три кључне фазе: предпроцесинг, фаза израде дела и постпроцесинг, као је и предложено од стране аутора (Lamei, 2021).

На основу анализе неколико претходно развијених модела трошкова аутори (Jaggar и др, 2022) су предложили модел трошкова који се такође заснива на ABC приступу. У раду су предложени и главни покретачи трошкова. Развијени модел трошкова, између осталих, покрива: трошкове припреме модела, трошкове припреме машине, трошкове рада машине (пуњења машине прахом и производње дела), трошкове потрошње материјала (маса материјала помножена са ценом), неколико кључних трошкова пост постпроцесинга (уклањање радне плоче, уклањање заосталог праха са плоче и заглављеног праха у производним деловима и њиховим ослонцима, уклањање ослонаца), трошкове накнадне обраде (термичке обраде, накнадна обрада површине), трошкове израде извештаја и мониторинга и трошкове контроле квалитета. Аутори коначну формулу за модел трошкова представљају преко трошкова материјала (за израду дела, неповратно утрошеног материјала, материјала за узорковање и анализу), трошкова коришћења радне платформе (разматра опцију коришћена радних платформи

различитих димензија) и збирних трошкова осталих активности. Аутори констатују да предложени модел има неколико недостатка:

- Не разматра статус металног праха (нови, рециклирани, микс старог и новог праха), те је као иницијална вредност праха узета његова комерцијална вредност;
- Модел је искључиво оријентисан на методу спајања металног праха. За употребу у другим ситуацијама (остале адитивне технике, други материјали) неопходно је извршити одређене корекције;
- У моделу трошкова нису урачунати трошкови грешака у изради дела нити редизајнирања у фази пројектовања.

Аутори су предложили и одређена будућа унапређења постојећег модела кроз истраживање нових режијских и неструктурираних трошкова (грешке у изради, рентирање објеката, потрошња енергије, административни трошкови), као и проширење модела у смислу укључивања трошкова који се односе на целокупан животни циклус производа.

И поред одређених недостатака и предлога будућих унапређења, трошковни модел је обухватио кључне генераторе трошкова у процесу припреме, израде дела и постпроцесинга и исти је узет у разматрање за потребе ове дисертације и развоја модела.

5.1.2 Предлог новог модела трошкова

Сумарни приказ извршене анализе претходно објашњених модела трошкова и процеса који су у њима разматрани налази се у табели 7. Анализирани елементи ће послужити као основа за дефинисање новог трошковног модела (елементи су назначени у табели као **НОВИ ПРЕДЛОГ**).

Табела 7: Анализа структуре трошкова у различитим моделима трошкова.

ПРОЦЕСИ И СТРУКТУРА ТРОШКОВА	АУТОРИ							НОВИ ПРЕДЛОГ
	Baumers at all. (2012)	Rickenbauer at all. (2013)	Barclift at all (2016)	Fera at all. (2017)	D. Sequeira (2019)	Lamei (2021)	Jarrar at all. (2022)	
ПРЕД ПРОЦЕС								
Радна снага					●	●		●
Режије / администрација	●				●	●		
Припрема модела		●	●	●		●	●	●
Припрема процеса		●	●	●				●
Припрема машина		●	●	●	●		●	●
ПРОЦЕС								
Радна снага	●					●		
Машина	●	●	●	●	●	●	●	●
Материјал	●	●	●	●	●	●	●	●
Режијски трошкови	●				●	●		
Енергија	●			●	●	●		●
Контрола процеса						●		
Гас		●	●	●	●			●
Одржавање					●			●
ПОСТ ПРОЦЕСИНГ								
Радна снага					●	●		●
Машина (излазни / output cost)						●	●	●
Материјал (уклоњен / заглављен)					●	●	●	
Режијски трошкови					●	●		
Енергија	●					●		
Извештавање						●	●	
Контрола / инспекција							●	●
Мониторинг							●	
Уклањање делова и радне плоче		●	●	●				●
Накнадна обрада делова		●	●		●			●

Детаљнија објашњења неких од кључних и неопходних елемената новог модела трошкова адитивне L-PBF технологије наведени су у наставку као и табели 8:

- Анализу трошкова извршити кроз три кључне фазе: предпроцесинг, фаза израде дела и постпроцесинг.
- Процену трошка вршити из произвођачке перспективе коју карактеришу пројектна и процесна фаза. Кроз ова два приступа обухватити пројектне и произвођачке трошкове који су битни за модел трошкова, односно директне и индиректне трошкове који се појављују у овим фазама;

- За анализу трошкова користити трошковни модел ABC (Activity Based Cost) који анализира укључене активности (у свакој фази), за сваку активност рачуна трошкове, и на крају сумарне и појединачне трошкове по израђеном делу;
- Омогућити израчунавање јединачне цене производа различитих геометрија који се израђују у једном циклусу израде;
- У оквиру предложеног модела омогућити израчунавање трошкова за активности пре и после процеса као што су припрема геометрије, припрема и подешавање машине, уклањање радне плоче из машине и делова са радне плоче. Анализом трошкова производње, за сваки корак и за сваку геометрију, омогућити идентификацију фактора који највише утичу на трошкове;
- У оквиру процесне фазе трошкове потрошње материјала увећати за 10% - ови трошкови се односе на прах који се неповратно потроши (не може се накнадно рециклирати);
- Урачунати трошкове за постпроцесне активности као што су термички и површински третмани, уклањање материјала и контрола квалитета;
- Цену рада оператера (по радном сату) рачунати на начин да исти зависи од потребних специјалности оператора (оператор за припрему CAD модела и припрему штампе, оператор на радној машини);
- Улазне податке добијати из софтвера за припрему штампе, искуствених података оператера (односе се на времена трајања процеса) и са тржишта (цена ангажовања услуга на тржишту за постпроцесинг);
- Трошкове која се односе на: припрему модела за штампу, припрему радне плоче, припрему машине, уклањања радне плоче са машине, подједнако распоредити по свим геометријама на радној плочи. Због технологије ових активности времена извршења не зависе од геометрије дела који се налази на радној плочи већ од укупног броја делова;
- У оквиру активности трошкови припреме машине (фаза предпроцеса) и трошкови уклањања делова са радне плоче (фаза постпроцеса) урачунати и трошкове машине (односе се на трошкове неактивности машине због наведених процеса);
Трошкове машине рачунати сумарно као збир трошкова амортизације и трошкова одржавања машине;
- Урачунати следеће трошкове који се односе на активности са радном плочом машине:
 - Трошкове термичке обраде ради елиминисања заосталих напона након обраде радне плоче са деловима у машини;
 - Трошкове скидања делова са радне плоче (за шта се најчешће користи EDM машина) израчунавати по основу површине коју радни делови (геометрије) заузимају;
 - Не рачунати трошкове механичке обраде радне плоче који се врше периодично. Претпоставити да ови трошкови не утичу значајно на укупне трошкове израде;
- За постпроцесне операције рачунати трошкове као суму свих појединачних активности (све завршне обраде по захтеву наручиоца, уклањање потпорних ослонаца, уклањање праха из унутрашњости израђеног дела);

- Исти принцип применити и за трошкове контролних процеса, с обзиром постоји велики број машина и процедура за извршење контроле готовог производа. Кориснику софтвера омогућити да самостално уноси операције контроле процеса и њихове трошкове.

Након извршења процене укупних трошкова применом ново развијеног модела, потребно је извршити и анализу осетљивости кроз избор критичних параметара процеса након чега извршити симулација њиховог утицаја на укупне трошкове процеса и појединих фаза.

Табела 8: Предлог елемената новог модела трошкова израде делова од метала адитивном L-PBF методом.

КЉУЧНЕ ПРЕПОРУКЕ ИЗ ПРЕТХОДНО РАЗВИЈЕНИХ МОДЕЛА ТРОШКОВА КОЈИ СУ САДРЖАНИ У НОВОМ МОДЕЛУ ТРОШКОВА	СПЕЦИФИЧНОСТИ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА
Омогућити израчунавање јединачне цене производа различитих геометрија	Трошкове рада машине израчунавати као збир трошкова амортизације и трошкова одржавања машине на годишњем нивоу. Трошкове машине приказати као трошкове ангажовања по сату рада.
Трошкове која се односе на: припрему модела за штампу, припрему радне плоче, припрему машине, уклањања радне плоче са машине, подједнако распоредити по свим геометријама на радној плочи	У трошковима припреме машине и уклањања радне плоче из машине урачунати и трошкове неактивности машине (трошкови = време не активности x цена норма сата машине)
Трошкове скидања делова са радне плоче израчунавати по основу површине коју радни делови заузимају на радној плочи	Трошкове потрошње материјала увећати за 10% - односи се на прах који се неповратно потроши и не може се накнадно рециклирати
	Урачунати трошкови потрошње енергије машине у оквиру процеса израде дела
	Због специфичности захтева различитих корисника, постпроцесне операције и операције контроле квалитета израчунавати као суму свих појединачних активности. Софтверским решењем обезбедити могућност уношења појединачних активности а трошкове рачунати по формули (трошкови = цена рада машине x време рада)
	Спровођење анализе осетљивости ради избора критичних параметара процеса

5.1.3 Други модели трошкова L-PBF технологије и њихове карактеристике

У овом поглављу анализирано је неколико модела трошкова који нису укључени у табелу 7, али пошто такође третирају адитивну L-PBF технологију пожељно је напоменути примењене приступе и донети одређене закључке и паралеле са предложеним моделом.

Трошковни модел који је развијен од стране аутора (Piili и др., 2015) није коришћен у табели 7 јер има доста ограничења. Полазна формула у моделу трошкова преузета је од аутора рада (Baumers и др., 2012). Циљ рада је било

приказати како различити сценарији производње делова (попуњеност радног простора, елиминација склапања и монтаже) утиче на укупне трошкове и закључено је следеће:

- Редукција висине израђених делова утиче на укупне трошкове;
- Укупни трошкови су у директној пропорцији са смањењем времена израде по једном комаду (процент попуњености радне плоче је велики);
- Смањење времена израде доводи и до укупно мањих трошкова материјала и потрошње енергије;
- На укупно време рада машине утиче и време наношења праха (слој по слој), али је важно истаћи да је ово време увек исто без обзира да ли је један део на радној плочи или је она у потпуности попуњена.

На основу студије случаја, изведен је закључак да у разматраном случају након 42 произведена комада адитивна производња није више економски исплатива у односу на традиционалну, што указује који је то оптимални моменат када је могуће применити адитивну технологија за производњу делова од метала. И у овом раду је закључено да оптимизација попуњености радне плоче има кључну улогу у регулисању трошкова, имајући у виду да су иницијални трошкови набавке машине велики.

Постоји и неколико ограничења у предложеном моделу трошкова: трошкови радне снаге нису рачунати, трошкови гаса су урачунати у трошкове машине (нема генератора гаса), коришћене формуле за трошкове енергије и машине су претходно развијене код других аутора, није рачунато време потребно за уклањање делова са радне површине (аутори међутим закључују да се 5% од укупне цене израде односи на овај процес и да ови трошкови не би требали бити занемарени).

Аутори рада (Atzeni и др., 2012) су анализу спровели на начин да се у радној комори производи само један тип дела, па се с тим у вези и производни трошкови могу сматрати константним током производње. Модел трошкова предложен од стране аутора садржи следеће компоненте: материјалне трошкове и трошкове предпроцеса (припрема машине), процеса (амортизација машине) и постпроцеса (радна снага и термичка обрада). За добијања запремине делова користе се подаци из софтвера, иста је увећана за 10% и на тај начин је урачуната потреба материјала за потпорне ослонце и губитак. Нису урачунати административни трошкови (енергија, рентирање објекта, коришћење додатне опреме). С обзиром да машина може самостално да обавља активности (stand-alone), радна снага је урачуната у процесе припреме машине и мониторинга процеса, као и за пост процесе (чишћење машине, уклањање ослонаца).

Студија случаја анализира производњу дела традиционалном технологијом (израда у калупима) у односу на адитивну производњу готовог металног дела ласерским спајањем металног праха. Закључак је да је тачка прелома 42 комада након чега је економски оправдано примењивати традиционалну технологију. По том основу аутори констатују да је адитивна технологија адекватна за производњу малих и средњих серија готовог производа. Анализа трошкова указује да су највећи трошкови у ствари трошкови рада машине, док остали трошкови имају мали процентуални удео. Очекује се да временом трошкови набавке машине буду мањи и да самим тим укупни трошкови по јединачном делу буду мањи.

Рад не анализира све трошкове у L-PBF процесу а кључно ограничење у овом раду је констатација аутора да се у радној комори може производити само један тип дела, што у пракси није тачно и може да доведе до погрешних закључака у примени ове технологије.

У раду (Šoškić и др, 2019) развијен је свеобухватни модел трошкова за адитивну multi-jet-fusion (MJF) технологију, на основу анализе целог производног ланца односно сличности ове технологије са SLS технологијом (обе технологије користе исти полимерни материјал – полиамид, не захтева се потпорна структура, технолошка основа за обе технологије је постојање коморе за прах, фузија праха је другачије извршена: ласерским снопом код SLS технологије а код MJF технологије прах је изложен дејству агенса који се потом третира ултраљубичастом светлошћу). Аутори овог рада даље наводе да је менаџмент компаније увек заинтересован за процену производних трошкова појединачних делова због производње у малим серијама а понекад и појединачних комада.

Неке од карактеристика развијеног модела трошкова а које имају утицај и на трошковни модел развијен у овој дисертацији су следећи:

- Трошкови пројектовања делова су подељени подједнако по свим деловима јер се ова активност одвија само једном за сваки део;
- Режијски трошкови (менаџмента, рентирања зграде, грејања) су такође подељени подједнако по деловима јер исти не зависе од броја делова на радној плочи;
- Трошкови припреме радне плоче, припреме производње (машине), као и трошкови уклањања делова са радне плоче су пропорционални са бројем делова на радној плочи јер захтевају појединачну манипулација са сваким делом;
- Трошкови израде дела су пропорционални његовој запремини, односно ови трошкови су генерисани преко трошкова материјала (зависе од запремине дела) и опреме (генерисани временом израде дела);
- Оријентација делова на радној плочи има утицај на време израде дела;
- Трошкови пескарења (у фази постпроцесинга) пропорционални су површини дела, јер време потребно за пескарење као и утрошак абразива зависи од количине праха који је остао везан за површину дела.

Трошковни модел који је развијен у раду (Mandolini и други, 2022) је заснован на анализи и синтези појединих детаља из већ развијених модела (Rickenbacher и др., 2013; Baumers и др., 2012; Lindemann и др., 2012.), али укључује већи број детаља у односу на анализирани модел. Ово је посебно значајно јер аутори наводе да анализирани модели ретко или скоро никако не разматрају процесне параметре, што развијене моделе по његовом мишљењу чини бескорисним. Развијени модел је заснован на програму MS Excel у којем је урађена и анализа осетљивости, што је битно са аспекта ове дисертације. Модел трошкова садржи следеће генераторе трошкова: материјал, машина, радна снага, остали потрошачи и енергија, према следећем:

- Трошкови материјала директно утичу на трошкове финалног производа а аутор у својој формули урачунава и трошкове рециклираног материјала;
- Трошкови машине чине: трошкови припреме (пуњење радне коморе прахом, монтажа радне плоче и припрема CAD фајла), трошкови машине

када није у радном процесу (загревање и хлађење машине, уклањање радне плоче и праха) и трошкови рада (укључено време наношења праха у слојевима и време за скенирање по слојевима за израду дела и посебно за израду носача);

- Трошкови радне снаге: током припреме машине, инсталације и скидања радне плоче и трошкови мониторинга процеса (процена аутора је да један оператор може да контролише до 5 машина);
- Трошкови потрошног материјала се односе на трошкове потрошње инертног гаса и компримованог ваздуха;
- Трошкови потрошње енергије (током загревања, рада и хлађења машине) мултиплицирају се са јединачном ценом енергије и добијају се укупни трошкови.

Производни сценарио који се у раду разматра односи се на производњу зупчаника у малој и серијској производњи. Три индустријска процеса за производњу зупчаника (machining, hobbing, and LBM - Laser Beam Melting) су разматрана, са посебним фокусом који олакшана структура зупчаника има на потрошњу енергије и трошкове производње. У раду се констатује да се трошкова и енергетска ефикасност морају проценити како би се идентификовао исплатив сценарио за примену LBM технологије. Такође, констатује се и да је оптимизација масе (олакшана структура) најзначајнији фактор који утиче на смањење трошкова и енергетску ефикасност.

Један од закључака, који се односи на примену LBM технологије у индустријским размерама, је да ако се одлука не базира искључивао на разматрању трошкова него и на факторима одрживости као што је енергетска ефикасност, посебни модели за њихове прорачуне се морају применити јер трошкова ефикасност не доводи увек до енергетске ефикасности.

Добијени резултати указују на потребу планирања за примену одређених производних технологија па и LBM технологије. Једноставна замена технологија (за разматране производне технологије и сценарије) није увек применљива. За доносиоце одлука у избору технологије за имплементацију (избор пута производње), трошкови и енергетска ефикасност се морају разматрати јер су доминанти фактори. У конкретном случају, трошкова ефикасност у индустријској производњи доминира у процесу одлучивања у избору производне технологије:

- За трошковну ефикасност, показало се да су машина/опрема, трошкови материјала и алата кључни фактори. Потрошња енергије има мањи утицај и за LBM процес чини само 4% производних трошкова;
- За енергетску ефикасност, потрошња материјала (праха) заједно са потрошњом енергије машине представља кључне факторе;
- У LBM процесу јавља се значајнији губитак материјала али то не утиче на енергетску ефикасност.

Анализом предности и недостатака до сада развијених модела трошкова адитивне L-PBF технологије дефинисани су неопходни елементи новог модела трошкова чиме је и испуњен постављени циљ истраживања. Између осталог, нови модел трошкова карактерише: израчунавање појединачних трошкова у свим производним фазама, израчунавање трошкова пратећих процеса, квалитета,

одржавања и других активности. Такође, може се закључити да се применом анализе осетљивости обезбеђује повећање ефикасност адитивног процеса јер се анализом параметара врши фокусирање само на оне најкритичније а затим превентивним деловањем врши њихова адекватна оптимизација.

5.2 ТОПОЛОШКА ОПТИМИЗАЦИЈА И МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА У АДИТИВНОЈ ТЕХНОЛОГИЈИ – АНАЛИЗА СТАЊА

Оптимизација топологије је техника структурног обликовања конструкције која оптимизује облик и материјалну компоненту дела коришћењем технике методе коначних елемената (МКЕ) и различитих техника оптимизације, (Ulu и др., 2019). Имајући у виду да МКЕ структуру дефинише као скуп коначних елемената где је сваки коначни елемент дефинисан као променљива, на овај начин и уз примену алгоритама тополошке оптимизације омогућава се добијање веома сложене коначне геометрије.

Тополошка оптимизација се састоји од корака приказаних на слици 17, (Sahini и др., 2020):

- 3D моделирање коришћењем одговарајућег CAD софтвера;
- Оптимизација топологије: На основу резултата анализе расподеле напона у структури, алгоритам оптимизације уклања материјал из области где је расподела оптерећења мања;
- Ремоделирање почетног CAD модела на основу резултата оптимизације;
- Верификација дизајна применом МКЕ или тестирање прототипа.



Слика 17: Кораци у процесу извршења тополошке оптимизације, (Sahini и др., 2020).

Постоји неколико предности и области примене структурне - тополошке оптимизације, (Sahini и др., 2020):

- Велика слобода у дизајну због великих граница флексибилности и побољшане ефикасности;
- Тополошка оптимизација може да генерише неколико варијација дизајна које дозвољавају различите примене;
- Тополошка оптимизација се фокусира на елементе крутости, тежине, дистрибуције материјала, лагане конструкције (лакша компонента једнаке или веће чврстоће);
- Доприноси мањем расипању материјала (због оптималне дистрибуције материјала);
- Скраћује време изласка производа на тржиште.

У новије време се примењује и мултидисциплинарна оптимизација, која подразумева да пројектована конструкција мора да испуни више циљева и одређена ограничења као што су сложена оптерећења, отпорност на топлотне ефекте, ограничена напрезања и померања. Интеграција материјала, структура,

процеса и њихових перформанси је веома важна и неопходна за постизање производа високих перформанси, мултифункционалних карактеристика и лаке структуре, (Zhu и др., 2021). Оптимизација топологије налази све интензивнију примену у пројектовању делова. Најновија адаптација ове методе у оквиру концепта DfAM односи се на укључивање и ограничења потпорних структура, унутрашњих структура, односно у пројектовању хелијских структура, структура са унутрашњим каналима и у медицини за производњу носача за различита ткива. Преузимањем најбољих предности које пружају оптимизација топологије и адитивна производња постиже се синергијски ефеката и обезбеђује велики потенцијал за практичну примену, а приступ као такав све више налази примену у савременој производњи.

Метода коначних елемената (МКЕ) има важну улогу у фази пројектовања производа јер може да истакне проблеме структуре и чврстоће и открије њихову тачну локацију. Поред провере напрезања код ново пројектованих делова, често се користи и за проверу напрезања код већ дизајнираних САД модела подложних одређеним модификацијама структуре и облика (као што то чини тополошка оптимизација). Анализа симулације унутрашњих напрезања у раној фази пројектовања (уместо извођења експеримента) код изабраног дела је од велике користи за дефинисање правилног крајњег облика (посредно и оријентација дела на радној плочи) како би се обезбедиле и добре механичке и структурне перформансе. МКЕ користи систем кодирања бојама како би се боље разумели резултати спроведених анализа напрезања (von Mises stress analysis). Светлије нијансе боја представљају унутрашњу структуру дела са малим напрезањем, а тамније боје представљају унутрашњу структуру дела са великим напрезањем, док црвена боја представља поље максималног напрезања, (Matúš и др., 2023).

5.3 ОРИЈЕНТАЦИЈА РАДНОГ ДЕЛА – ИЗБОР АЛТЕРНАТИВНИХ И ОПТИМАЛНИХ ОРИЈЕНТАЦИЈА РАДНОГ ДЕЛА

Оријентација делова има пресудан утицај на многе карактеристике производње делова и у том смислу су неопходна одређена правила, процедуре и оквири за пројектовање, (Zhu и др., 2021). Као што је већ и напоменуто у поглављу 4.5, у термилошком смислу реч је о процесу оријентације делова око координатних оса унутар радног простора саме машине, при чему се оријентација не односи на транслаторно кретање делова око (или у правцу) координатних оса машине. Стандардом (ISO 17295, 2023) прописано је позиционирање и оријентација делова у односу на координатни систем 3D машине.

Према (Qin и др. 2021) постоје две методе за избор алтернативних оријентација делова на радној плочи машине: 1) Методе директне претраге: примена метода заснованих на нелинеарној оптимизацији и оптимизационих алгоритама заснованих на популацији, 2) Методе евалуације: прво се дефинише скуп АО, а затим се из овог скупа генерише ОО.

За генерисање АО могу се користити следеће технике: 1) препознавање облика (feature recognition), (Martinsen и др., 2020) и (Shi и др., 2020), 2) генерисање конвексних облика (convex hull generation), (Byun и Lee, 2006), 3) ротација у 3D простору (quaternion rotation), (Yu и др., 2019) и 4) кластеризација површина (facet clustering), (Zhang и др., 2019).

5.3.1 Примена методологије препознавања „кључних“ облика (feature recognition) на изабраном моделу

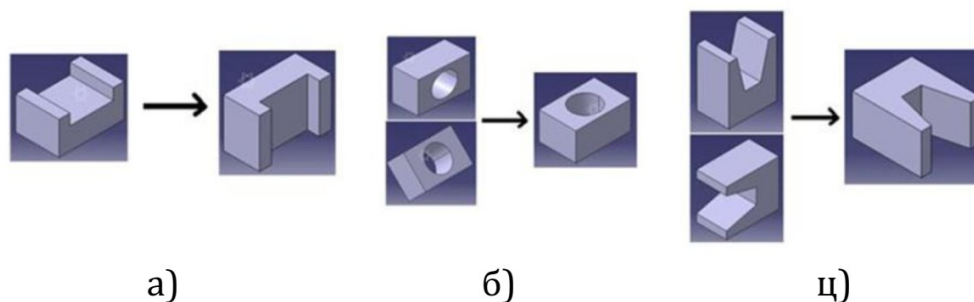
Геометрија радног дела је носилац неких важних информација, и за разлику од традиционалне производње, код АТ има другачије значење. Означена као „кључна геометрија (површина)“ у традиционалним технологија у основи служи за позиционирање алата, као површина за стезање или ослањање. Код АТ кључне површине зависе од много других параметара (оријентације дела, постојање површина са препустима, потребе за потпорним ослонцима, утицај параметара процеса као и стратегије скенирања) и у комбинацији са наведеним параметрима директно утиче на креирање механичких и димензионих карактеристика готовог производа. Изнете чињенице говоре у прилог значају избора алтернативних а затим и оптималних оријентација. Неколико студија случајева о кључним геометријама наведено је у (Zhang и др., 2016) и (Abdulhameed и др., 2022)

У вези са концептом препознавања „кључних“ облика који ће бити примењен у овој дисертацији, говори се о дефинисању сета основних површина (облика): цилиндрични облик, конусна површина, планарне равни са цилиндричним, равним или кривим ивицама (укључујући и комбинацију наведених равни), као полазна основа за њихов избор. Затим се на основу дефинисаних геометрија и уведених правила закључивања о оријентацијама формира скуп алтернативних оријентација. Кључна ствар код избора алтернативних оријентација је да се избегне стварање такозваног ефекта „степеница“ (stair-step effect) приликом штампања.

Оријентације за неке такође критичне површине (површине са препустима, површине са две равни, површине са отворима и површине са странама под одређеним углом) дефинисане су у раду (Al-Ahmari и др., 2018).

Аутор закључује следеће:

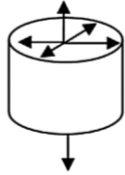
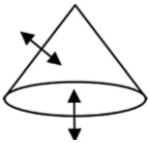
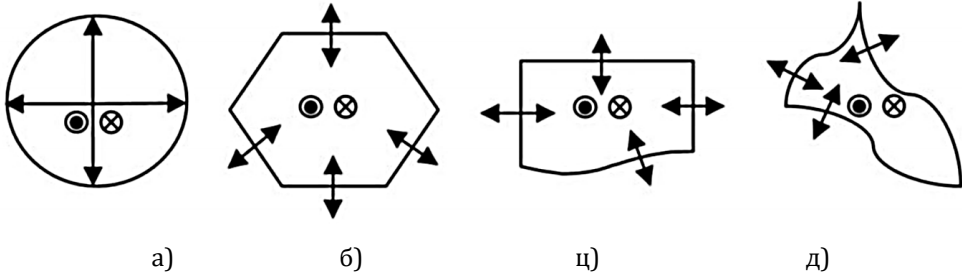
- а) Ако су осе две „карактеристичне површине“ паралелне међусобно извршити оријентацију на начин да њихове осе буду у правцу осе изградње (z-осе) – слика 18 под а);
- б) Ако део поседује отвор на себи и ако је оса отвора под неким углом или нормална на радну плочу, део оријентисати на начин да оса отвора буде у правцу осе изградње (z-осе) – слика 18 под б);
- ц) Ако део поседује „критичне“ површине које су под неким углом, или је позициониран тако да површине под углом формирају препусте, оријентисати га на начин да осе (површине под углом) буду нормалне на правац изградње – слика 18 под ц).



Слика 18: Правила за оријентацију дела, (Al-Ahmari и др., 2018).

Систематизација оријентација „критичних“ површина извршена је у раду (Leutenecker-Twelsiek и др., 2016). Међу критичним површинама издвајају се: прорези (cuts), избочине (protrusions), овалне површине (shells). При избору „критичних“ површина битно је дефинисати координатни систем ради оријентације дела, као и правац z-осе која представља правац израде дела. У раду (Zhang и др., 2016) су на основу анализе доступне литературе из ове области дефинисана одређена правила закључивања, табела 9.

Табела 9: Правила закључивања за оријентацију дела , (Zhang и др., 2016).

<p>Потпуне или делимичне цилиндричне површине и отвори (рупе, осовинице, стубови, ...)</p> 	<p>Оријентисати цилиндричну површину на начин да јој оса буде паралелна са осом изградње ради елиминације ефекта „степеница“. Када је цилиндрична површина веома дуга (или у себи садржи цилиндрични отвор) правац изградње треба да буде вертикалан тј у правцу осе изградње. Циљ оријентације треба да буде таква да осе цилиндричних површина буду вертикалне или нормалне на правац изградње.</p>
<p>Конусне површине</p> 	<p>За конусну површину предложене су две оријентације: 1) у правцу вертикалне оријентације доње површине и 2) у правцу који је нормалан на једну од две конусне површине.</p>
<p>Планарне равни</p>  <p>а) Планарне равни ограничене са кружним или елиптичним ивицама (укупно 4 оријентације) – исто правило важи као за цилиндричне површине.</p> <p>б) Планарне равни ограничене са равним ивицама (укупно 6 оријентација) – дефинисати две оријентације које су вертикално у правцу изградње (горња и доња страна равни). Оријентација по ивицама: ако број ивица прелази 4 (ако су у питању полигоналне равни) онда се предлаже генерисање само 4 оријентације на најдужим ивицама.</p> <p>ц) Планарне равни ограничене са равним и кружним/елиптичним ивицама (укупно 6 оријентација) – оријентације представља комбинацију претходна два решења, укључујући и две оријентације за доњу и горњу страну равни.</p> <p>д) Планарне равни ограничене са нерегуларним/кривим ивицама (укупно 5 оријентација) - две оријентације за доњу и горњу страну равни, као и по једна оријентација на свакој кривој ивици.</p>	
<p>Специфични случајеви</p>	<p>Ови случајеви се односе на сваку могућу комбинацију горе наведених примера. Такође, односе се и на унутрашњу структуру дела (саћаста, порозна или другог облика). Свака комбинација захтева посебно разматрање и дефинисање оријентација.</p>

На основу претходно изнетог као и закључака дефинисаних од стране аутора у (Al-Ahmar и др., 2018) може се закључити да се најбоље димензионе и механичке карактеристике делова могу добити кроз максимизацију и минимизацију следећих карактеристика (дефинишу се у у фази избора алтернативних оријентација):

- Омогућити што већи број хоризонталних или нормалних површина код разматраног дела, како би исте могле бити окренуте у смеру градње;
- Осе цилиндричних облика (отвори, рупе, конуси) поставити у паралелан однос са осом правца израде (z – оса);
- Површине са закривљеним ивицама постављати у хоризонталну раван;
- Максимизирати број равних површина (равни);
- Минимизовати број површина које су под одређеним угловима у односу на основу дела;
- Минимизовати број препуста и затворених форми.

Утицај оријентације делова на радној плочи на трошкове производње (за L-PBF технологију) разматран је у раду аутора (Reiher и др., 2017) и наведено је неколико битних чињеница:

- Оријентација дела утиче на укупну масу потпорних структура;
- Оријентација дела утиче и на висину радног дела у радном простору машине;
- Оријентација делова на радној плочи утиче на број делова који се могу производити истовремено у једној штампи;

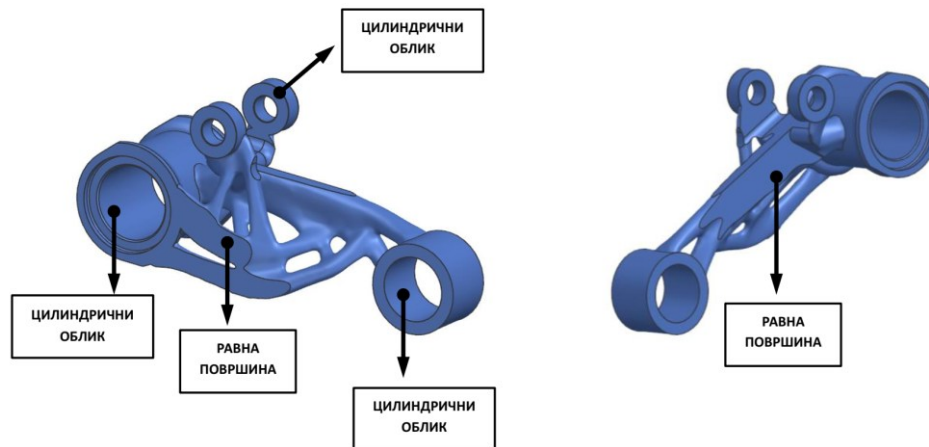
На основу спроведеног експеримента у наведеном раду, а који обухвата две различите оријентације истих компоненти на радној плочи, закључује се да је потребно прво израчунати трошкове производње предметних делова (на основу изабраних оријентација), а затим изабрати најповољније решење. На основу овог закључка изабран је параметар трошкова (као један од пет критеријума) за анализу у овој дисертацији.

5.3.2 Предлог оријентација на радној плочи

За оријентацију дела на радној плочи користиће се два расположива приступа:

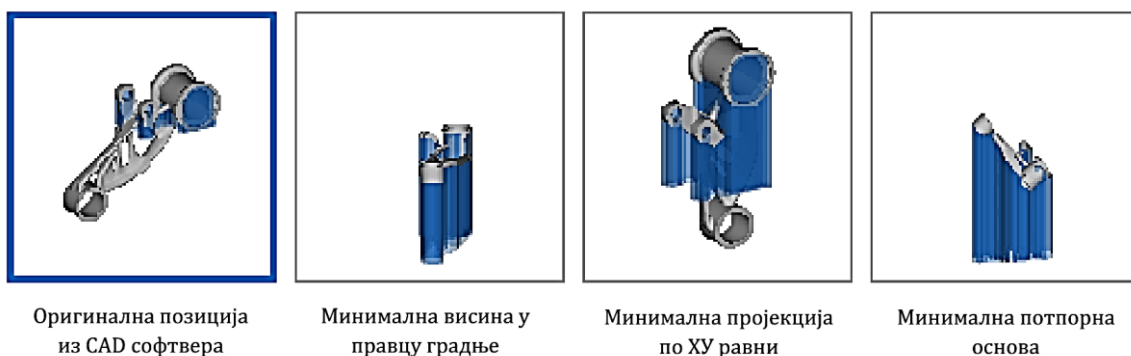
- Оријентација заснована на препознавању кључних облика (feature recognition), слика 19.
- Решења која предложи софтверски модул у оквиру Siemens NX.

Код изабраних решења не сме бити преклапања.



Слика 19: Оријентације засноване на препознавању кључних облика (feature recognition).

Софтверски модул избор оријентација врши по четири основа (слика 20): 1) оригинална позиција из CAD софтвера, 2) минимална висина у правцу градње, 3) минимална пројекција по ХУ равни, 4) минимална потпорна основа.



Слика 20: Оријентације предложене од стране софтверског модула.

Изабрано решење обухвата следеће оријентације и исто ће бити приказано у студији случаја (Поглавље 7):

- Три предложене оријентације из софтверског модула;
- Три оријентације изабране по основу препознавања кључних облика.

5.4 ИЗБОР КРИТЕРИЈУМА ЗА ОРИЈЕНТАЦИЈУ ДЕЛА НА РАДНОЈ ПЛОЧИ

У циљу избора адекватних критеријума за оријентацију дела на на радној плочи 3D машине, у наставку ће се анализирати неколико радова који анализирају ову тематику. На основу (Qin и др., 2021) и стандарда (ISO 17296-3, 2014) неки од главних критеријума за оријентацију дела су:

- Механичке карактеристике дела (чврстоћа, тврдоћа, елонгација, резидуални стрес, замор материјала). Механичке карактеристике готовог производа израђеног применом АТ су увек анизотропне;
- Тачност готовог производа (димензионе и геометријске грешке, запреминске грешке). Оријентација дела директно утиче на

карактеристике готовог производа (настаје смањење, увијање, дисторзија) што доводи до димензионалних и геометријских грешака. Запреминске грешке настају као последица изградње дела по слојевима, односно због појаве познате као ефекат „степеница“. Овај ефекат не може бити уклоњен у потпуности, утиче на крајњи квалитет, али адекватан избор оријентације дела и параметра дебљине слоја може га знатно умањити.

У раду (Chandra и др., 2022) аутори су извршили селекцију критеријума на главне факторе (укупно 5) и под факторе у оквиру сваке од главне групе на следећи начин:

- Перформансе материјала и крајњег производа (тврдоћа, чврстоћа, флексибилност, димензиона тачност, квалитет површине, термална проводљивост);
- Перформансе машине (максимална величина дела, дебљина слоја за наношење, резолуција штампе, могућност израде у различитим бојама, геометријска комплексност, број делова за израду у једној серији);
- Стабилност тржишта (поузданост машине и производа, време израде, расположивост радне снаге);
- Укупни трошкови (трошкови материјала, трошкови предпроцеса, трошкови процеса израде, постпроцесни трошкови);
- Еколошке вредности (потрошња енергије, еколошка производња).

На основу анализе радова (Di Angelo и др., 2020), (Ga и др., 2018) и (Ransikarbun и др., 2021), могу се издвојити шест најзначајнијих критеријума за анализу према следећем:

- Време израде (*build time*) – односи се на време потребно за скенирање свих слојева радног дела током штампе. Треба напоменути и да висина дела на радној плочи зависи од оријентације дела која самим тим утиче и на време израде;
- Трошкови израде (*build cost*) – односи се на трошак ресурса током израде дела а у основи то су директни (материјал за израду дела) и индиректни трошкови (процењују се на основу времена израде што посредно доводи до оријентације дела на радној плочи);
- Квалитет површине (*surface-quality criterion*) – делови чије су површине нормалне и паралелне са правцем изградње имају бољи квалитет површине, за разлику од површина које су под одређеним углом у односу на правац изградње. Оријентација дела и у овом параметру има утицај а површине под углом могу да буду изложене и ефекту „степеница“;
- Тачност дела (*part-accuracy criterion*) – односи се на разлику у пројектованим и израђеним димензијама, а зависи од оријентације дела, анизотропних карактеристика као и чињенице да су делови изложени ефектима смањења, увијања, дисторзије;
- Запремина потпорне структуре (*support-volume criterion*) – ово је карактеристика АТ које захтевају потпорну структуру као што је L-PBF технологија.

У раду (Wang и др., 2018) направљен је следећи избор критеријума:

- Технички критеријуми:
 - Карактеристике површине: финално стање површине, боја:

- Геометријске карактеристике: димензиона тачност, величина/површина;
- Механичке карактеристике: затезна чврстоћа, јачина притиска, отпорност на смицање.
- Термалне и електричне карактеристике: отпорност на провођење топлоте, електрична кондуктивност.
- Економски критеријуми:
 - Трошкови: текући трошкови, трошкови материјала, постпроцесни трошкови;
 - Време: припреме, израде/извршења, постпроцесно време.
- Индиректни критеријуми:
 - Статус ресурса: расположивост машине;
 - Логистика: локација машине.

У раду (Malbašić и др., 2024) у процесу планирања израде дела адитивном L-PBF методом, а на основу анализе доступне литературе, изабрано је четири критеријума: трошкови производње, време производње, запремина потпорних ослонаца и површина дела на радној плочи. У раду се наводи и да су изабрани параметри доступни у фази пројектовања адитивног процеса, што олакшава процес доношења одлука.

У раду (Huang и др., 2021) фокус је на процесу планирања производње адитивним путем. Аутор наводи четири неопходна процеса везано за планирање адитивне производње (дефинисање оријентације изградње дела, генерисање потпорних ослонаца, слајсирање, планирање путање). Такође, аутор наводи да је у фази планирања производње један од проблема и избор машине или селекције материјала који захтева анализу неколико кључних параметара (карактеристике материјала, квалитет дела, квалитет површине, време израде, трошкови израде дела), и да овај проблем такође представљају класичан проблем ВКА. Наводи и значај проблематике оријентације дела на радној плочи који такође зависи од неколико фактора (тачност дела, квалитет површине, потпорна структура, производно време и трошкови).

Аутор констатује и да је спроведени експеримент потврдио добијене математичке резултате применом изабраних метода ВКА. Посебно објашњава значај примене метода ВКА у овом процесу јер се у обзир узима интеракција међу критеријумима, ризик у доношењу одлука и умањује ефекат у одступању у подацима.

Избор критеријума за оријентацију за потребе докторске дисертације

Кључни параметри који се разматрају у овој дисертацији су параметри чије се вредности могу добити унапред (без спровођења експеримента) на бази података из расположивог софтвера за пројектовање и припрему штампе, односно софтвера за прорачун трошкова.

На основу расположиве литературе анализиран је сет параметара који се разматрају у процесу пројектовања адитивног процеса. Неопходно је нагласити да механичке карактеристике и геометријско-димензионе карактеристике неће бити предмет анализе у процесу планирања јер оне, могу бити дефинисане након спроведеног експеримента.

У вези са напред изнетим, а за потребе спровођења студије случаја у овој дисертацији, изабрани су следећи критеријуми:

- *Укупно време израде/штампе изабраног дела (print time)*: избором овог параметра обухваћено је укупно време израде дела (без фазе припреме и постпроцесинга).
- *Трошкови штампе изабраног дела (print cost)*: избором овог параметра посредно су урачунати и трошкови материјала, електричне енергије, инертног гаса и амортизација машине.
- *Запремина потпорних ослонаца (support volume)*: овај параметар директно утиче на утрошак материјала у процесу штампе, овај утрошени материјал се не може рециклирати и директно је завистан од избора оријентације дела.
- *Површина коју потпорни ослонци заузимају на радној плочи (support surface)*: овај параметар директно утиче на трошкове постпроцеса који се односе на уклањање делова са радне плоче што је једна од карактеристика овог процеса адитивне производње. Захтева ангажовање додатне опреме и машина а често је и део услужних активности. Такође зависи и од избора оријентације дела на радној плочи.
- *Број површина који захтевају ослонце*: овај параметар је дефинисан на основу радова (Chowdhury и др., 2018) и (Di Angelo и др., 2020) у којем се истиче да је параметар преузет из DfAM приступа а који аутори сматрају критичним са аспекта производње делова адитивним путем. Свакако овај параметар је и у директној вези са постпроцесингом (трошкови уклањања потпорних ослонаца) а поготово аспектом квалитета (квалитет површине након уклањања потпорних ослонаца захтева додатну обраду).

5.5 ПРИМЕНА МЕТОДА ВИШЕАТРИБУТИВНОГ ОДЛУЧИВАЊА У АДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА

У овом делу извршена је анализа неколико радова у којима су примењене методе вишеатрибутивног одлучивања код адитивних технологија и у другим областима. Примењене методологије и изабране методе, као и спровођење анализе осетљивости добијених резултата, пружиће добру основу за коначан избор метода ВАО за примену у овој дисертацији.

Методе ВАО су алати за смањење субјективности у процесу доношења одлука. Сваку методу ВАО карактерише другачији математички приступ, а у одређеним случајевима примена различитих метода на исти проблем може дати различита решења, што значи да алтернативни избори не зависе само од изабраних критеријума већ и од изабране методе ВАО, као и процеса нормализације података (свођење вредности у матрици одлучивања на интервал од 0 до 1). Иако резултати у великој мери зависе од примењених метода и анализираних проблема, неопходно је спровести и анализу осетљивости.

У раду (Chandra и др., 2022) је након избора адекватних критеријума, као интегрисана метода за вишекритеријумско одлучивање изабрана комбинација SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio) - COPRAS (Complex Proportional Assessment Methods) у процесу селекције адекватног метода АТ разматрајући концепт одрживости. Избор одрживог концепта у производним организацијама може се посматрати кроз одрживост материјала, дизајна производа, процеса,

адекватних метода и технологија (у конкретном случају адитивних технологија FDM, LOM, SLA и SLS при чему је FDM изабрана као најбоља технологија).

SWARA метода је коришћена за оцену тежинских вредности изабраних критеријума од стране доносиоца одлука. Аутор наводи да ова метода пружа доносиоцима одлуке више значаја у оцењивању критеријума а заснива се на њиховим професионалним знањима и искуству. Наводи се и да је процес прикупљања података и координација са доносиоцима одлука олакшан и user-friendly (са интерфејсом прилагођеним кориснику). COPRAS метод је значајан јер максимизира вредности критеријума бенефит типа односно минимизира вредности критеријума не бенефит типа. Такође, истовремено разматра најбоље и најлошије солуције и захтева мало времена за добијање резултата.

У раду (Ransikarbun и др, 2021) анализиран је предложени интегрисани оквир за примену метода ВАО у процесу оријентације делова на радној плочи код АТ. Предложен је хибридни приступ од три технике: DEA (Data Envelopment Analysis), АНП (Analytic Hierarchy Process) и LN (Linear Normalization). Као излазно решење применом DEA технике добија се укупни коефицијент ефикасности анализираних алтернатива. Најефикасније су алтернативе са скором 1 (један) и може их бити више. DEA техника не укључује у процес рачунања преференције доносиоца одлука. У превазилажењу напред изнетог, аутор примењује АНП технику за израчунавање тежинских коефицијената преференција доносиоца одлука, као и за рангирање алтернатива. У циљу превазилажења могућег проблема везаног за промену рангирања алтернатива (насталог употребом различитих мерних јединица) примењена је техника линеарне нормализације. Наиме комбинацијом тежинских коефицијената добијених применом АНП методе и нормализованих вредности добија се адекватно рангирање алтернатива.

Предложени интегрисани оквир је показао своју сврсисходност при коришћењу предложених метода. Предлаже се проширење предложеног приступа на начина да се селекција оријентације врши и за сложеније структуре (тополошки оптимизоване делове). Такође, предлажу и укључивање у разматрање и друге параметре (путања ласера, параметре машине) са циљем избора најбоље алтернативе. Предложени модел се може проширити на друге проблеме селекције (селекција материјала или избор адекватне машине за 3D штампу).

Селекција материјала за изабране АТ (FDM, SLS, SLA) приказан је у раду (Agrawal, 2021), употребом хибридног приступа са четири методе: SAW, MOORA, TOPSIS и VIKOR. Овај рад је карактеристичан по следећем:

- За израчунавање тежинских коефицијената изабраних критеријума коришћен је IEM (*Information Entropy Method*) метод;
- Анализа и поређење добијених резултата применом наведених метода вршена је применом Спирмановог коефицијента корелације. Закључено је да је највиша корелација ранга добијена између метода SAW и MOORA, SAW и VIKOR, MOORA и VIKOR;
- У фази селекције алтернатива извршена је и анализа проблема познатог као „проблем измене рангова (*Rank reversal problems*)“ и добијени одређени закључци о одрживости решења. Резултат показује да TOPSIS и MOORA методе имају проблема са променама ранга. Методе SAW и VIKOR нису показале проблем са променама ранга.

У вези са изабраним методама аутор закључује следеће: 1) TOPSIS је најпогоднија у процесу селекције материјала, 2) SAW и MOORA су најопштије а уједно и најједноставније методе које се користе за проблем избора материјала, 3) VIKOR је значајна метода јер обезбеђује компромисно решење у процесу доношења одлуке, 4) све изабране методе су корисне, поуздане и широко распрострањене у процесу селекције материјала за АТ.

Рад (Ghaleb и др, 2020) анализира примену метода ВАО (АНР, TOPSIS и VIKOR) у селекцији и избору пет производних процеса (gravity die casting, investment casting, pressure die casting, ливење у песку и адитивна производња) на бази следећих критеријума: продуктивност, тачност, комплексност, флексибилност, искоришћеност материјала, квалитет и оперативни трошкови. Тежински коефицијенти изабраних критеријума одређени су применом методе АНР.

Оно што карактерише овај рад је и међусобна евалуација примењених метода по следећим основама: број процесуираних алтернатива и критеријума, агилност у процесу доношења одлука, комплексност израчунавања, погодност за подршку у процесу одлучивања, понашање приликом додавања или уклањања критеријума. Испоставило се да је метода VIKOR најбоља у свим параметрима, као и да су и VIKOR и TOPSIS надмашили АНР у сваком параметру. Закључци донети у овом раду пружиће поуздану основу за избор метода ВАО за примену у овој дисертацији. На крају, аутор закључује да је идентификација адекватних квантитативних техника са листе потенцијалних кандидата тежак задатак.

Методички преглед примене метода ВАО у избору материјала код АТ дат је у [Емоџи и др., 2020]. Закључено је да комбинација две или више метода ВАО представља најбољи приступ у процесу одабира материјала.

Рад (Malbašić и др, 2024) приказује примену различитих оптимизационих техника вишекритеријумске анализе у процесу планирања адитивне L-PBF технологије са циљем одређивања оптималне оријентације дела на радној плочи. Критеријуми према којим се врши избор адекватне оријентације су: трошкови и време израде дела, запремина и површина потпорне структуре. Вишекритеријумска анализа обухвата хибридни приступ према следећем: за одређивање тежинских коефицијента изабраних критеријума (са учешћем доносиоца одлука) користи се АНР метода, док се избор ОО врши применом TOPSIS и VIKOR методе.

Примењена је и анализа осетљивости за методу VIKOR за два услова: 1) услов довољне предности прве у односу на другу алтернативу и 2) услов довољне стабилности (вариран је фактор равнотеже између укупне користи и максималног индивидуалног одступања).

Примена метода ВАО у другим областима

На основну анализе изабраних радова у области одрживог инжењеринга (грађевинарство и инфраструктура, управљање ланцем снабдевања, транспорт и логистика, енергетика и друге инжењеринг дисциплине) у раду (Stojčić и др., 2019) донети су одређени закључци битни са аспекта разматрања ВАО. Аутори су изабрали област ВАО јер је поред своје мултидисциплинарности карактерише и могућност примене различитих метода, како кроз хибридни приступ тако и појединачно. Такође, аутори указују и на растући тренд у примени и третирању теорије неизвесности (фази и груби бројеви, теорија сивих бројева, neutrosophic theory) ради решавања проблема ВКО који карактерише парцијално или

недовољно познавање информација. Аутори истичу и да је сам проблем избора метода ВКО такође вишекритеријумски проблем. Свака од метода која се користи у процесу ВКО има своје предности и мане, и не може се тврдити да је било која метода погоднија од других. Избор методе у великој мери зависи од преференција доносиоца одлука и самих аналитичара. Неопходно је размотрити погодност, валидност и расположивост метода за разматрани проблем. На крају (Stojčić и др., 2019) закључују да највећу заступљеност у области одрживог инжењеринга има АНР метода (у 35.19% анализираних папира) као и теорија фази скупова (у 23.15% анализираних папира).

Други значајан рад је (Matić и др., 2019) у којем је развијен нови хибридни модел за селекцију потенцијалних добављача у ланцу снабдевања једне грађевинске компаније. За оцену тежинских вредности изабраних критеријума примењена је метода FUCOM (*Full Consistency Method*) док је за селекцију алтернатива изабрана нова COPRAS метода проширена са грубим бојевима. За процес агрегације коришћен је Dombi агрегатор проширен са грубим бројевима. Поред примене грубих бројева значај овог рада се огледа у примени процеса анализе осетљивости који је обухватио следеће кораке: 1) варијација у тежинама критеријума, 2) компаративна анализа добијених резултата са другим методама (ARAS, WASPAS, SAW, MABAC), 3) промена изабраног параметра у једначини, 4) примена Спирмановог коефицијента корелације. Аутори објашњавају да је изабрана метода FUCOM јер је боља метода за процену тежинских коефицијената у односу на АНР и BWM (*Best Worst Method*). Такође, наводе и да оправданост за примену COPRAS налазе у могућности инкорпорирања и бенефитних и трошковних критеријума у анализи, да има једноставну процедуру за рачунање и да у поређењу са осталим методама као излазни резултат приказује степен корисности алтернативе.

У раду (Bakıoglu и др., 2021) наглашено је да појединачне квантитативне технике не могу увек дати најбоље решење за анализирани проблем, па су сходно томе предложили хибридни модел који може да побољша „слабост и појача ефекат и поузданост решења добијених кроз појединачне моделе“. За анализирани проблеме (приоритизација ризика у аутономним возилима) аутори су предложили примену хибридних вишекритеријумских метода одлучивања користећи АНР, TOPSIS и VIKOR методе.

Након анализе расположиве литературе, рад (Kumar и др., 2021) предложио је хибридни приступ састављен од 5 метода BAO (SAW, WPM, WASPAS, EDAS, TOPSIS) у процесу избора адекватног материјала у медицинској индустрији. Свака од наведених метода BAO користи другачији математички апарат за рангирање постављених алтернатива. Рангирање алтернатива је извршено у условима када сви изабрани критеријуми имају исте тежинске вредности (*equal weight method*) и применом технике DoM (*Degree Of Membership*). У овом раду, анализа осетљивости је заснована на променама тежинских вредности изабраних критеријума. Наиме, примењене су 3 технике за израчунавање тежинских вредности критеријума (метода стандардне девијације, метода ентропије и фази АНР метода) након чега је вршено поређење добијених решења за рангирање алтернатива.

У раду (Wang и Luo, 2009) показано је да се промена ранга (услед додавања или одузимања алтернатива) не јавља само у АНР методи, већ је то установљено и код метода SAW, TOPSIS, DEA. Може се очекивати да се промена ранга јавља код многих метода и да то постаје нормална појава. Рад констатује да се код додавања

нових алтернатива не мора вршити само копија постојећих већ се може додати потпуно нова алтернатива са новим вредностима. У раду се потврђује да се не спровођењем нормализације може спречити промена ранга, али да је нормализација неопходна за већину MCDM приступа како би се елиминисала различитост у мерним јединицама.

Избор адекватних параметара процеса бушења постављен је као проблем вишекритеријумског одлучивања у раду (Varatharajulu и др., 2022). Коришћен је метод ВАО применом две методе: TOPSIS и COPRAS. Установљено је да се добијени подаци (рангирање 17 алтернатива) применом ових метода поклапају у 64.71%, и то је оцењено као „значајно“ поклапање резултата. Такође, примењене методе ВАО су изабране јер су једноставне и лагане за разумевање и погодне за поређење алтернатива и избор параметара бушења. Добијени резултати су затим упоређени применом одређене експерименталне методе (Response Surface Methodology - RSM) и такође је закључено да су добијени резултати веродостојни односно да је разлика незнатна и износи 4.215%.

Закључак око избора метода ВАО за примену у овој дисертацији

На основу спроведене анализе, закључено је да се у овој дисертацији за избор најбоље оријентацији користи хибридни метод који чине три методе:

- COPRAS – комплексна пропорционална процена.
- TOPSIS – техника за одређивање приоритета на основу сличности са идеалним решењем.
- VIKOR – вишекритеријумско компромисно рангирање.

За израчунавање тежинских коефицијената изабраних критеријума користиће се

- АHP – аналитичко хијерархијски процес.

Избор метода нормализације за методу TOPSIS и понашање током промена вредности тежина критеријума и конзистентности рангова приказана је и објашњена у (Chakraborty и Chung-Hsing, 2009). Закључак је да највећу оправданости у процесу нормализације код TOPSIS методе има примена векторске нормализације и да иста даје највећу стабилност резултата. На основу анализа спроведених у (Krishnan и др., 2023) такође се сугерише да је за методу TOPSIS најбоље користити векторску или линеарну (sum-based) методу. На основу напред изнетих закључака за потребе ове дисертације, како за методу TOPSIS тако и за методе ВАО, користиће се векторска нормализација.

Такође, извршиће се и анализа осетљивости ради провере стабилности излазних резултата на промене вредности изабраних параметара.

Према (Kumar и др., 2021) анализа осетљивости у примени метода ВАО представља анализу неизвесности у излазним варијаблама изабраног математичког модела (или система одлучивања) на појаву различитих ризика и промена у улазним параметрима. Ова анализа се спроводи у циљу провере конзистентности добијених резултата (ранг алтернатива) као и утврђивања чињенице да ли систем одлучивања или предложени модел може да функционише у променљивим условима околине (повољним или неповољним). Позитивни резултати добијени анализом осетљивости код метода ВАО указују на трајност и стабилност добијеног решења.

5.6 НАЈЧЕШЋИ ДЕФЕКТИ КОЈИ СЕ ПОЈАВЉУЈУ У ПРОЦЕСУ ИЗРАДЕ ДЕЛОВА ПРИМЕНОМ L-PBF МЕТОДЕ

Производња делова од метала адитивним технологијама, са процесним параметрима препорученим од стране произвођача 3D штампача, не обезбеђује у потпуности производњу делова без дефеката, (Dejene, 2024). Карактеризација материјала (кроз микроструктурно и механичко испитивање) обавезно се спроводи након иницијалног подешавања машине, као и након сваке промене параметара процеса, у циљу обезбеђивања континуитета у постизању високо квалитетних крајњих производа захтеваних механичких својстава и минимизацији могућих дефеката, наводи се у (Mladenović и др., 2024).

Оријентација дела у радном простору машине је један од главних фактора који утичу на анизотропне карактеристике штампаних делова. Варијације у механичким карактеристикама, за делове који су различито оријентисани у радном простору машине, морају се узети у разматрање при анализама, наводи се у (Sojocaru и др., 2022).

Дефекти који се појављују у процесу израде делова применом L-PBF технологије

У циљу анализе примене изабране АТ, поред анализе трошкова и њихове оптимизације и анализе могуће примене АТ у серијској производњи, неопходан сегмент за анализу је и обезбеђивање механичких карактеристика произведених делова. С тим у вези, неопходно је анализирати најчешће дефекте који се појављују у процесу израде делова применом L-PBF технологије.

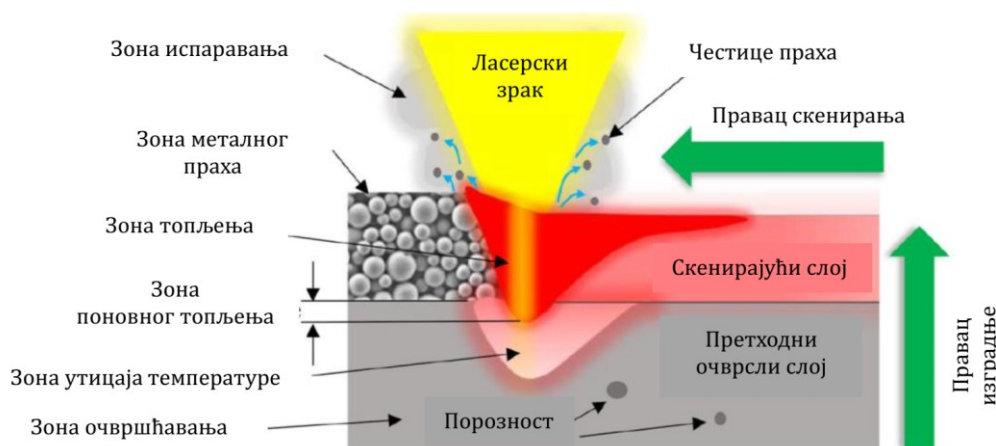
У раду (Malekiroouf и El-Mounaougi, 2018) наводи се да присуство дефеката ограничава поновљивост и прецизност процеса и спречава даље усвајање АТ. Циљ рада је био да се изврши свеобухватан преглед свих важних дефеката насталих током адитивних процеса и идентификују параметри који доприносе појави дефеката, као и објашњење њихових односа посебно у адитивној L-PBF технологији. Најчешћи дефекти и параметри који доприносе њиховој појави приказани су на слици 21 и могу се категорисати у четири подручја на основу начина на који утичу на израђени део:

- Геометрија (одступање облика) и димензије (димензиона одступања);
- Квалитет површине (храпавост и морфологија површине, balling (појава стварања куглица) и деформација површине као три главна извора површинских дефеката);
- Микроструктура (анизотропност, хетерогеност и порозност (лоша густина) су дефекти који утичу на микроструктуру израђеног дела);
- Механичка својства (лом/пукотина/рупа, неадекватна (фузиона) веза између слојева, порозност и мала чврстоћа су дефекти који резултирају slabим механичким својствима).



Слика 21: Приказ најчешћих дефеката у процесу израде делова применом L-PBF адитивне технологије, (Malekiour и El-Mounayri, 2018).

У зони топљења метала ласерским зраком аутори рада (Pal и др., 2018) су идентификовали следеће зоне приказане на слици 22: инертна зона (услед постојања заштитног гаса), зона металног праха, зона топљења, зона поновног топљења, кашаста (mushy) зона, зона очвршћавања, зона под утицајем високе топлоте, зона испаравања. Услов за добијање крајњег производа високог квалитета је трансформација зона (из једне у другу) на веома лаган начин без турбуленција. Ове зоне се контролишу адекватним и стабилним процесним параметрима, (Bergmueller и др., 2023).



Слика 22: Приказ термалних зона код L-PBF технологије, (Таџсиоғлу и др., 2022) и (Pal и др., 2018).

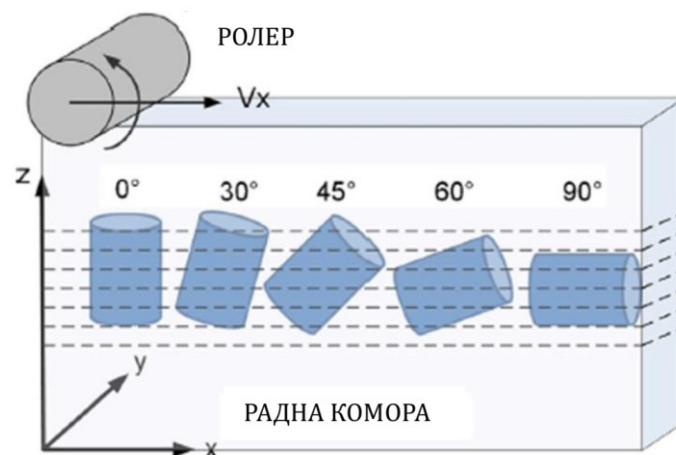
У раду (Wang и др., 2021) аутори су анализирали узроке настанка дефеката у оквиру L-PBF технологије и навели неколико узрочника: нестабилност зоне топљења метала (услед нагле промене температуре узроковане великом брзином ласера) коју карактерише недостатак фузије међу слојевима, пукотине, отвори, нечистоће (услед могућности укључивања рециклираног праха), појава куглица и ерозија (denudation) у зони топљења, што све заједно доводи до умањења

перформанси израђеног дела. Исти аутори наводе и друге факторе (који нису повезани са процесом израде дела) а могу да доведу до одређених дефеката:

- Процес трансфера САД фајла у фајл потребан за 3D штампу, исто се може решити адекватним и прецизним процесом превођења (теселације);
- Избор адекватне оријентације, процес слајсирања/сечења у одређени број хоризонталних равни, као и генерисање потпорних структура ради лакшег уклањања у фази постпроцесинга.

У раду (Delgado и др., 2012) експерименталним путем је испитан утицај стратегије скенирања, дебљине слоја и правца изградње на следеће карактеристике дела: димензионе грешке, храпавост површине и механичка својства. Испитано је пет различитих оријентација делова на радној плочи, слика 23.

Резултати показују да оријентација радног дела у односу на вертикалну z-осу утиче на порозност на начин да најмања порозност (највећа чврстоћа на притисак) постоји на 90° , а најмања чврстоћа на притисак (највећа порозност) постоји на 0° и 45° . Ово указује да су делови произведени АТ структурно и механички анизотропни.



Слика 23: Различити правци оријентације дела на радној плочи за потребе експерименталних испитивања, Delgado и др., 2012.

Аутори констатују и да правац скенирања може утицати на изотропна својства произведеног дела, тако што утиче на затезну чврстоћу, издужење и друга механичка својства. Да би се постигло такозвано „изотропно“ штампање (односно елиминација својства анизотропности) потребно је применити вишесмерни режим скенирања делова. Такође, констатују и да слабије механичке карактеристике делова настају услед дефеката као што су: појава шупљина и напслена као и неадекватно спајање/фузија слојева.

На основу радова (Abd-Elaziem и др., 2022) и (Fé-Perdomo и др, 2021) могу се издвојити и груписати кључни параметри који имају утицаја на извршење адитивног L-PBF процеса, табела 10.

Табела 10: Кључни параметри који утичу на L-PBF процес, (Abd-Elaziem и др., 2022) и (Fé-Perdomo и др., 2021).

КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА	КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛАСЕРА (И СТРАТЕГИЈЕ СКЕНИРАЊА)	КАРАКТЕРИСТИКЕ РАДНОГ ПРОСТОРА МАШИНЕ
Дистрибуција величина зрна (Particle size distribution)	Дефокусирање (Defocusing)	Дебљина слоја (Layer thickness)
Морфологија праха (Powder morphology)	Стратегија скенирања / путање ласера (Scanning strategy / scan pattern)	Стратегија депозиције (Deposition strategy)
Унутрашња порозност и густина (Internal porosity and apparent density)	Брзина скенирања (Scanning speed)	Густина праха у радном простору (Powder-bed density)
Способност протока праха (Powder flow ability)	Растојање између путање ласера (Hatch spacing)	Стање атмосфере у радној комори са карактеристичним температурама (радне коморе, рикоутера, униформност температуре)
Хемијски састав (Chemical composition)	Врста ласера (Laser type)	
	Снага ласера (Laser power)	
	Величина ласерског снопа (Spot size)	
	Трајање пулса и фреквенција (Pulse duration and frequency)	

У раду (Abd-Elaziem и др., 2022) констатује се да појава дефеката у суштини зависи од параметара процеса, које треба оптимизовати да би се произвеле компоненте без дефекта. У том смислу предложено је неколико активности како би се обезбедио квалитет у L-PBF процесу, као што су:

- “On-line” праћење топлотне емисије у зоне интеракције ласер – материјал.
- Постављање оптималних параметара ласерског снопа.
- „In-site“ мониторинг израде делова у смислу геометријске усаглашености, тачности и површинске храпавости.

У оквиру дисертације, након израде делова L-PBF технологијом, извршено је мерење одређених механичких и димензионих карактеристика као и микроструктуре дела. Резултати су приказани у студији случаја.

6. РАЗВОЈ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА ЗА L-PBF МЕТОДУ

У овом поглављу објашњена је методологија развоја новог модела трошкова. Алгоритам за израду модела трошкова приказан је у првом делу поглавља и представља оригиналан резултат истраживања спроведених у овој дисертацији и објашњених у петом поглављу. У другом делу поглавља приказана је математичка формализација проблема трошкова, која је послужила за развој софтверског решење калкулатора трошкова који такође представља оригинални допринос ове дисертације.

Прорачун трошкова различитих оријентација дела на радној плочи извршен је применом софтверског решења у трећем делу. Добијени резултати су затим оптимизовани а део добијених резултата искоришћен је за спровођење анализе у студији случаја. У четвртом делу извршено је упоређивање трошкова производње изабраног машинског дела класичним технологијама и адитивном L-PBF технологијом уз табеларни приказ добијених резултата.

У петом делу извршена је анализа осетљивости у развијеном моделу трошкова на промене вредности појединих параметара и донети одговарајући закључци. Шести део се односи на дискусију добијених резултата кроз њихово поређење са постављеним захтевима приликом израде новог модела трошкова (тачка 5.1.2 – предлог елемената новог модела трошкова).

6.1 АЛГОРИТАМСКА СТРУКТУРА И РАЗВОЈ НОВОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА

У циљу анализе трошкова адитивне L-PBF технологије, као и додатна помоћ у развоју софтверског решења развијен је алгоритам. Разумевање проблема који се анализира и добро структурирање алгоритма су битни предуслови за развој ефикасног и функционалног софтверског решења.

Проблем који се анализира је развој новог модела трошкова код адитивне L-PBF технологије са могућношћу аутоматизације процеса уношења података, израчунавања трошкова и графичке интерпретације резултата. Нови модел трошкова обухвата следеће трошкове (по фазама):

$$C_{total}(P_i) = C_{preproces}(P_i) + C_{proces}(P_i) + C_{postproces}(P_i)$$

где су:

- $C_{total}(P_i)$ – укупни трошкови (јединачна цена израде);
- $C_{preproces}(P_i)$ – трошкови фазе предпроцеса;
- $C_{proces}(P_i)$ – трошкови фазе израде (процеса);
- $C_{postproces}(P_i)$ – трошкови фазе постпроцеса.
- P_i – i -та геометрија

Трошкови фазе предпроцеса:

- $C_{prep}(P_i)$ – трошкови припреме модела за штампу;
- $C_{buildjob}(P_i)$ – трошкови припреме радне плоче;
- $C_{setup}(P_i)$ – трошкови припреме машине.

Трошкови фазе израде (процеса):

- $C_{build}(P_i)$ – трошкови израде дела.

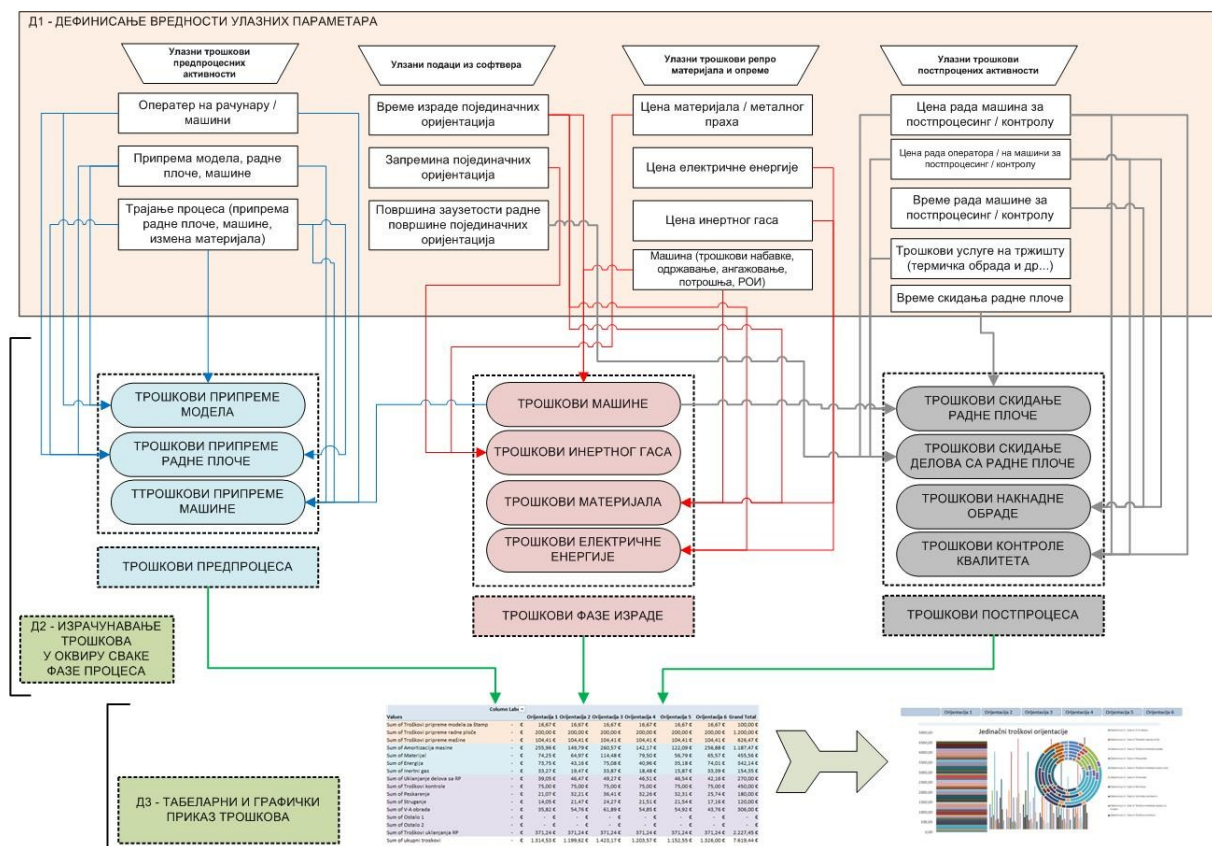
Трошкови фазе постпроцеса:

- $C_{removal}(P_i)$ – трошкови скидања радне плоче са машине;
- $C_{substrate}(P_i)$ – трошкови скидања делова са радне плоче;
- $C_{postp}(P_i)$ – трошкови накнадне обраде делова;
- $C_{quality}(P_i)$ – трошкови контроле квалитета.

Укупни трошкови (по свакој фази) састоје се од следећих појединачних трошкова:

$$C_{total}(P_i) = C_{prep}(P_i) + C_{build\ job}(P_i) + C_{setup}(P_i) + C_{build}(P_i) + C_{removal}(P_i) + C_{substrate}(P_i) + C_{postp}(P_i) + C_{quality}(P_i),$$

У конкретном случају, уважавајући чињеницу да су сви улазни параметри унапред познати, да историјски подаци о трошковима код адитивне L-PBF технологије (ради могућности предвиђања трошкова) аутору нису били познати, да су параметри процеса рада машине константни и оптимално дефинисани (по препоруци произвођача и не представљају могуће варијабле за промену), као и да се оптимизација процеса врши током фазе планирања процеса, изабрана је секвенцијална и детерминистичка алгоритамска структура као најбоље решење. Ова алгоритамска структура подразумева извршавање активности корак по корак према унапред дефинисаном распореду, слика 24.



Слика 24: Алгоритамска структура за израду модела трошкова.

Објашњење тока алгорита

Алгоритам се састоји из три основна дела:

- *Д1 – дефинисање вредности улазни параметара:* Улазни параметри се добијају из следећих релевантних извора: снимањем радног процеса (трајање појединих операција које обављају инжењери или оператори на 3D машини), користе се подаци из софтверских апликација који подржавају 3D штампу (површине и запремине делова на радној плочи, процењено време штампе), као и подаци са тржишта (трошкови репроматеријала и услужних делатности додатне обраде). Ови подаци се преко форми за унос података уносе у Excel табелу која је форматирана у *Default format table* облику ради накнадне обраде података. Вредности појединих улазних параметара (амортизација машине, трошкови одржавања по радном сату, процентуална заузетост дела на радној плочи и процентуални део запремине) се такође израчунавају у овој фази;
- *Д2 – дефинисање трошкова у оквиру сваке фазе процеса:* За израчунавање кључних трошкова у оквиру све три фазе (предпроцес, фаза израде и постпроцес) користе се математичке формуле које су детаљно објашњене у наредном делу овог поглавља. За променљиве у математичким формулама користе се улазни подаци из корака Д1. Excel табела у којој се похрањују израчунате вредности трошкова такође мора бити форматирана у *Default format table* облику ради касније табеларне и графичке обраде података у наредном кораку;
- *Д3 – табеларна и графичка интерпретација трошкова* (појединачно и по фазама): За извршење ове функције у Excel-у је неопходно активирати опцију *Pivot table* и генерисати одређени број *Pivot* табела. Опција *Pivot table* омогућава избор и сортирање података који се затим визуелно приказују.

Предност предложеног алгоритамског решења је чињеница да је алгоритам једноставан за разумевање и детерминистички одређен (за исте улазе даје исте излазе). Недостатци предложеног алгоритамског решења су следећи: 1) оптимизација трошкова се врши искључиво током фазе припреме производње променом вредности неких од улазних параметара: смањењем времена за припрему, мањим трошковима радне снаге и улазних сировина, структурном оптимизацијом, истовременом производњом више делова, оптимизацијом амортизационих трошкова, 2) при већем броју података може доћи до смањене ефикасности.

Детаљан преглед активности са математичким формулама за сваку операцију у предложеном моделу дат је у наставку.

6.2 МАТЕМАТИЧКА ФОРМАЛИЗАЦИЈА ПРОБЛЕМА

За трансформацију описаног проблема израчунавања трошкова у облик погодан за његову даљу анализу и израчунавање применом софтверског решења извршиће се његова прецизна математичка формализација. Математичка формализација односи се на сваки појединачни трошак у оквиру све три фазе: фазе предпроцеса, фазе израде (процеса) и фазе постпроцеса.

*Математичка формализација трошкова фазе предпроцеса**C_{prep}(P_i) - трошкови припреме (CAD) модела за штампу*

$$C_{prep}(P_i) = (C_{oper} + C_{PC}) * \frac{T_{prep}(P_i)}{N_i}$$

- P_i – i-та геометрија;
- C_{oper} – трошкови рада оператера на рачунару (припрема CAD модела);
- C_{PC} – трошкови коришћења радне станице и софтверског пакета;
- T_{prep} – време припреме CAD података i-те геометрије;
- N_i – број делова i-те геометрије.

C_{buildjob}(P_i) - трошкови припреме радне плоче (у адекватном софтверу)

$$C_{buildjob}(P_i) = T_{buildjob} * \frac{(C_{oper} + C_{PC})}{\sum_i N_i}$$

- P_i – i-та геометрија;
- C_{oper} – трошкови рада оператера на рачунару (припрема радне плоче);
- C_{PC} – трошкови коришћења радне станице и софтверског пакета;
- T_{buildjob} – време припреме радне плоче;
- N_i – број делова i-те геометрије.

C_{setup}(P_i) - трошкови припреме машине (по i-тој геометрији)

$$C_{setup}(P_i) = (C_{oper} + C_{Machine}) * \frac{(T_{setup} + T_{mat.change})}{\sum_i N_i}$$

- P_i – i-та геометрија;
- C_{oper} – трошкови рада оператера на машини;
- C_{Machine} – трошкови (не) рада машине (у конкретном случају односи се на време неактивности машине услед припреме за нови процес);
- T_{setup} – време припреме машине;
- T_{mat.change} – време измене материјала и осталих пратећих активности;
- N_i – број делова i-те геометрије.

*Математичка формализација трошкова фазе израде**C_{build} - трошкови фазе израде*

$$C_{build}(P_i) = T_{build}(P_i) * (C_{machine} + C_{inertgas}) + \rho * V(P_i) * C_{material} * 1.1 + C_e$$

- P_i – i-та геометрија;
- T_{build} – време израде дела (час);
- C_{machine} – трошкови машине (час);
- C_{inertgas} – трошкови потрошње инертног гаса (€/kg);
- V – запремина дела (mm³);
- ρ – густина металног праха;
- C_{material} – трошкови материјала (€/kg);
- C_e – трошкови утрошка енергије;
- Вредност 1.1 – односи се на 10% неповратног губитка праха у процесу (прах који се не може рециклирати).

У оквиру трошкова израде кључни трошкови су трошкови рада машине и трошкови енергије а њихова математичка формализација дата је у наставку.

$C_{machine}$ – трошкови рада машине по часу

$$C_{machine} = \frac{Machine\ purchase\ cost}{h * upt} + \frac{Maintenance\ cost\ per\ year}{upt}$$

- Machine purchase cost – набавна вредност машине;
- Maintenance cost per year - годишњи трошкови одржавања машине;
- h – период депресијације (губитка вредности) машине;
- upt – време рада машине у часовима у једној години.

C_e – трошкови потрошње енергије

$$C_e = E * T_b * E_R$$

- E – потрошња енергије од стране машине (kW);
- T_b – време израде дела (час);
- E_R – трошкови електричне енергије по kW.

Математичка формализација трошкова фазе постпроцеса

$C_{removal}(P_i)$ – трошкови скидања радне плоче са машине

$$C_{removal}(P_i) = (C_{operator} + C_{machine}) * \frac{T_{removal}}{\sum_i N_i}$$

- P_i – појединачни део i -те геометрије;
- $C_{operator}$ – трошкови оператора;
- $C_{machine}$ – трошкови (не) рада машине (односи се на трошкове неактивности машина због постпроцесних активности);
- $T_{removal}$ – време уклањања радне плоче;
- $\sum_i N_i$ – укупан број делова (N_i - број делова једне геометрије).

$C_{substrate}(P_i)$ – трошкови скидања дела са радне плоче

$$C_{substrate}(P_i) = \frac{C_{stress}}{\sum_i N_i} + C_{EDM} * \frac{A_{con}(P_i)}{\sum_i N_i * A_{con}(P_i)}$$

- P_i – i -та геометрија;
- C_{stress} – трошкови термичке обраде радне плоче;
- $\sum_i N_i$ – укупни број делова на радној плочи (N_i - број делова i -те геометрије);
- C_{EDM} – трошкови употребе ерозимата;
- $A_{con}(P_i)$ – површина коју заузима i -та геометрија део на радној плочи.

$C_{postproces}$ – укупни трошкови накнадне обраде делова (постпроцесних активности)

$$C_{postproces}(P_i) = \sum_i (T_{postproces}(P_i) * (C_{op} + C_{tools}))$$

- P_i - i -та геометрија;
- $T_{postproces}$ – време постпроцесинга по i -тој геометрији;
- C_{op} – трошкови рада оператора;
- C_{tools} – трошкови рада употребљених машина и алата за постпроцесинг.

C_Q – укупни трошкови контроле квалитета

$$C_Q = \sum_i T_{QC}(P_i) * (C_{QC-tool} + C_{QC-operator})$$

- P_i - i -та геометрија;
- T_{QC} - време потребно за извршење контроле по једној геометрији;
- $C_{QC-tool}$ - трошкови употребе мерне опреме (по јединици времена) (3D скенер, координатна мерна машина);
- $C_{QC-operator}$ - трошкови оператора (по јединици времена).

6.3 СОФТВЕРСКО РЕШЕЊЕ КАЛКУЛАТОРА ТРОШКОВА

Калкулатор трошкова израчунава цену производње делова од метала (конкретно 316L и MS1) за адитивну L-PBF технологију уз могућност додавања других врста материјала. Софтвер се заснива на математичким калкулацијама трошкова објашњених у претходном делу поглавља. Структура софтверског решења приказана је на слици 25 и састоји се од: 1) Форме за унос података и 2) Форме за приказ података. Почетна форма софтверског решења приказана је на слици 26. Коришћењем структуре софтверског решења на приказан начин обезбеђује се: 1) комплетан прорачун трошкова за цео производни ланац, 2) табеларно и визуелно приказивање трошкова.



Слика 25: Структура софтверског решења.



Слика 26: Почетна форма софтверског решења.

Форма за унос података

Форма за унос података омогућава унос вредности за следеће варијабле: геометрија, машине, материјали за израду дела, операције накнадне обраде и приказане су на сликама 27 и 28. На основу улазних вредности врши се обрада података за све три фазе након чега се подаци приказују у визуелном формату.

За варијаблу геометрије могу се унети следећи подаци: назив, број делова на радној плочи, површина и запремина на радној плочи, време израде, време контроле.

Id	Naziv	Broj delova	Jedinačna površina na radnoj ploči	Jedinačna zapremina na radnoj ploči	Vreme izradi	Vreme kontrole	Ukupna površina	Ukupna zapremina
1	Orientacija 1	1	24,14	63,29	11,09	1	24,14	63,29
2	Orientacija 2	1	36,9	55,38	6,49	1	36,9	55,38
3	Orientacija 3	1	41,71	97,58	11,39	1	41,71	97,58
4	Orientacija 4	1	36,96	67,77	6,16	1	36,96	67,77
5	Orientacija 5	1	37,01	48,41	5,29	1	37,01	48,41
6	Centracija 6	1	25,67	15,73	11,13	1	25,67	15,73

Id	Naziv	Kupovna vrednost	Period korišćenja	Vreme rada	Potrošnja el.	Amortizacija	Gas	Uklanjanje i Vrem
1	3D Printer	800,000.00	10,00	170,00	13,3	19,61	Inertni gas /	32,00 / 7,00

Слика 27: Изглед форме за унос података (варијабле геометрија и машине).

За варијаблу машине могу се унети следећи подаци: назив, набавна цена, период амортизације, број радних дана у години, потрошња енергије, трошкови одржавања, време припреме машине, време припреме радне плоче, време термичке обраде радне плоче.

За варијаблу материјали постоји опција за уношење података за инертни гас и за материјале за израду (метални прахови), где се за сваку варијаблу поред назива уносе и подаци о цени.

Id	Naziv	Cena
1	Inertni gas Argon	3

Id	Naziv	Procen	vreme	cena
1	Upotreba Erozivna			120
2	Izmena materijala	2		
3	Operator kontrolor			50
4	Operator na mašini			50
5	Operator projektant			55
6	Ostala obrada 1	0		0
7	Ostala obrada 2	0		0
8	PC radna stanica	0		0
9	Postavljanje	1,5		70
10	Priprema prostih CAD podataka	2		0
11	Priprema CAD složenih podataka	0		0
12	Struganje	1,2		80
13	Troškovi električne energije			0,5
14	Upotreba merne opreme	0		25
15	Vibraciona obradna obrada	1,8		120

Слика 28: Изглед форме за унос података (варијабле материјали и операције).

За варијаблу операције (сви генерисани трошкови у свим операцијама) уносе се следећи трошкови (преко времена и цене): припреме података, трошкови оператора, трошкови коришћења свих машина у пост процесу, трошкови рада машине. Софтвер омогућава додавање података у складу са потребама.

Форма за приказ података

Након уноса почетних података и калкулације трошкова коју изврши програм, на излазној табли (*dashboard*) се приказују појединачни и сумарни подаци трошкова са дијаграмом трошкова како је то приказано на слици 29. Излазна табла омогућава избор појединих оријентација, њихово међусобно поређење и поређење трошкова израде коришћењем различитих металних прахова (MS1 и 316L).



Слика 29: Изглед форме за приказ података.

Програмски код софтверског решења израђен у Visual basic for application (VBA) и налази се у Прилогу 1 дисертације. VBA је програмски језик компаније Microsoft који је уграђен у Microsoft Office апликације укључујући и Excel. Употребом VBA for Excel кода извршена је аутоматизација уноса података, израчунавања трошкова и графички приказ добијених резултата трошкова код адитивне L-PBF технологије.

6.4 ИЗРАЧУНАВАЊЕ ТРОШКОВА ИЗРАДЕ ДЕЛА ПРИМЕНОМ РАЗВИЈЕНОГ СОФТВЕРСКОГ РЕШЕЊА

У циљу приказа способности софтверског пакета извршено је израчунавање трошкова израде 6 делова (један изабрани део са 6 различитих оријентација дефинисаних у тачки 5.3.2 ове дисертације) који су постављени на радној плочи машине. Након израчунавања укупних и појединачних трошкова, у наставку је извршена оптимизације насталих трошкова кроз различите сценарије. Трошкови израде су рачунати за 3D машину Eplus-3D EP-M450 Metal 3D Printer која има следеће параметре и пратеће трошкове:

- Карактеристике машине EP-M450: снага 500 W, димензије/запремина радне коморе (455 x 455 x 500 mm), са могућношћу уградње додатног ласера (укупно 2 комада), брзина изградње дела (са једним ласером) од 15-35 cm³, брзина ласера је 8 m/s, дебљина слоја изградње 20-120 μm, величина ласерског снопа 90-130 μm, машина може да користи 4 врсте металног праха и њихових легура (Titanium Alloy, Aluminium Alloy, Stainless Steel 316, MS1), има могућност коришћења два типа инертног гаса (Ar /N₂);
- Улазни параметри изабране машине: трошкови набавке машине (800.000,00 €), период коришћења (10 година), време рада годишње (170 дана), трошкови одржавања на годишњем нивоу (30.000,00 €);
- Трошкови амортизације = 19.61 €/сат;
- Трошкови одржавања машине = 3.41 €/сат.

Укупни трошкови израде дела пре оптимизације

Укупни трошкови израде 6 различитих оријентација износе 7.619,44 €. Од ових трошкова, трошкови предпроцеса износе 1.926,47 € и чине 25 % укупних трошкова, трошкови фазе израде дела износе 2.139,52 € и чине 28 % док трошкови постпроцеса износе 3.553,45 € и чине 47 % укупних трошкова. Графички приказ односа трошкова дат је на слици 30.

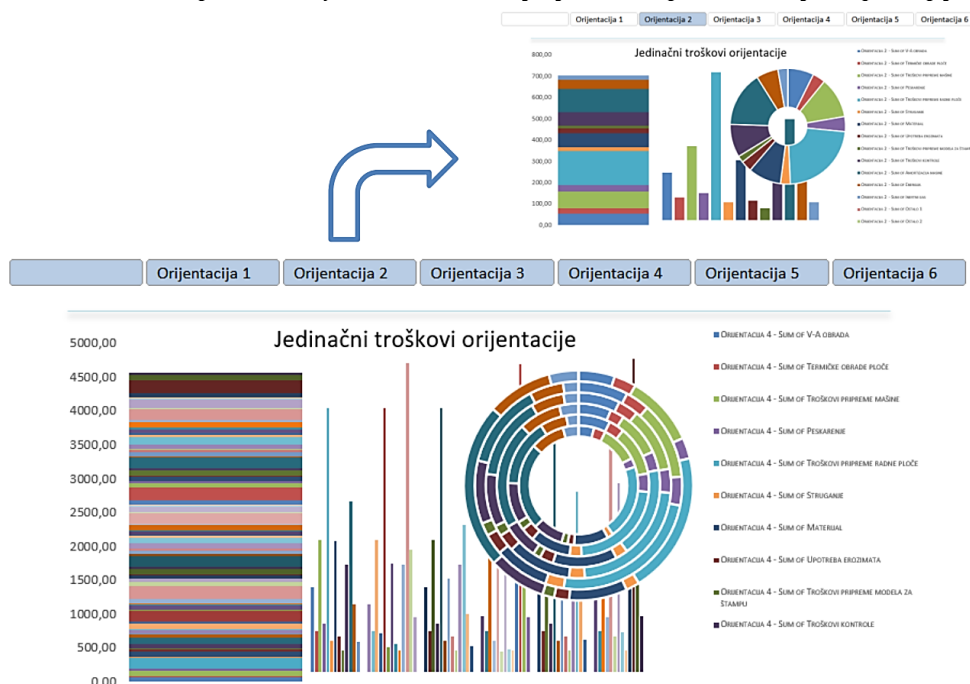


Слика 30: Анализа укупних трошкова израде дела пре оптимизације.

Појединачни и сумарни подаци о трошковима свих оријентација приказани су на слици 31, док је графичка презентација трошкова појединачно по једној оријентацији и њихово међусобно поређење приказано на слици 32.

Values	Column Label	Orijentacija 1	Orijentacija 2	Orijentacija 3	Orijentacija 4	Orijentacija 5	Orijentacija 6	Grand Total
Sum of Troškovi pripreme modela za štamp	- €	16,67 €	16,67 €	16,67 €	16,67 €	16,67 €	16,67 €	100,00 €
Sum of Troškovi pripreme radne ploče	- €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	200,00 €	1.200,00 €
Sum of Troškovi pripreme mašine	- €	104,41 €	104,41 €	104,41 €	104,41 €	104,41 €	104,41 €	626,47 €
Sum of Amortizacija masine	- €	255,96 €	149,79 €	260,57 €	142,17 €	122,09 €	256,88 €	1.187,47 €
Sum of Materijal	- €	74,25 €	64,97 €	114,48 €	79,50 €	56,79 €	65,57 €	455,56 €
Sum of Energija	- €	73,75 €	43,16 €	75,08 €	40,96 €	35,18 €	74,01 €	342,14 €
Sum of Inertni gas	- €	33,27 €	19,47 €	33,87 €	18,48 €	15,87 €	33,39 €	154,35 €
Sum of Uklanjanje delova sa RP	- €	39,05 €	46,47 €	49,27 €	46,51 €	46,54 €	42,16 €	270,00 €
Sum of Troškovi kontrole	- €	75,00 €	75,00 €	75,00 €	75,00 €	75,00 €	75,00 €	450,00 €
Sum of Peskarenje	- €	21,07 €	32,21 €	36,41 €	32,26 €	32,31 €	25,74 €	180,00 €
Sum of Struganje	- €	14,05 €	21,47 €	24,27 €	21,51 €	21,54 €	17,16 €	120,00 €
Sum of V-A obrada	- €	35,82 €	54,76 €	61,89 €	54,85 €	54,92 €	43,76 €	306,00 €
Sum of Ostalo 1	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Sum of Ostalo 2	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
Sum of Troškovi uklanjanja RP	- €	371,24 €	371,24 €	371,24 €	371,24 €	371,24 €	371,24 €	2.227,45 €
Sum of ukupni troškovi	- €	1.314,53 €	1.199,62 €	1.423,17 €	1.203,57 €	1.152,55 €	1.326,00 €	7.619,44 €

Слика 31: Приказ појединачних и укупних трошкова у софтверу.



Слика 32: Графички приказ укупних и појединачних трошкова у софтверу.

Трошкови фазе израде дела пре оптимизације

Утицај оптимизације различитих параметара (кроз различите сценарије), поред утицаја на укупне трошкове анализираће се и кроз њихов утицај на трошкове у фази израде дела. Трошкови израде дела не обухватају трошкове предпроцесних и постпроцесних активности. Трошкови фазе израде дела за 6 оријентација дати су у табели 11. Фаза израде дела носи највећи технички ризик и захтева највећу пажњу и контролу. Ова фаза израде је готово неповратан процес јер се тешко могу исправити грешке настале током израде дела. У економском смислу генерише неке од најзначајнијих трошкова који се не могу избећи, посебно када је у питању адитивна L-PBF метода. Подаци о трошковима добијени у овој фази користиће се касније у студији случаја.

Табела 11: Трошкови фазе израде дела пре оптимизације трошкова.

Трошкови/ оријентација	OR-1	OR-2	OR-3	OR-4	OR-5	OR-6	УКУПНО
Машина	255,96 €	149,79 €	260,57 €	142,17 €	122,09 €	256,88 €	1.187,47 €
Материјал	74,25 €	64,97 €	114,48 €	79,50 €	56,79 €	65,57 €	455,56 €
Енергија	73,75 €	43,16 €	75,08 €	40,96 €	35,18 €	74,01 €	342,14 €
Инертни гас	33,27 €	19,47 €	33,87 €	18,48 €	15,87 €	33,39 €	154,35 €
УКУПНО	437,23 €	277,39 €	484,00 €	281,12 €	229,93 €	429,85 €	2139,52 €

6.4.1 Сценарио оптимизације трошкова применом софтверског решења

У циљу анализе могућности оптимизације трошкова израде у овом делу извршиће се њихова оптимизација применом различитих сценарија.

Сценарио оптимизације и укупни трошкови након оптимизације

Сценарио оптимизације трошкова обухватио је следеће кораке:

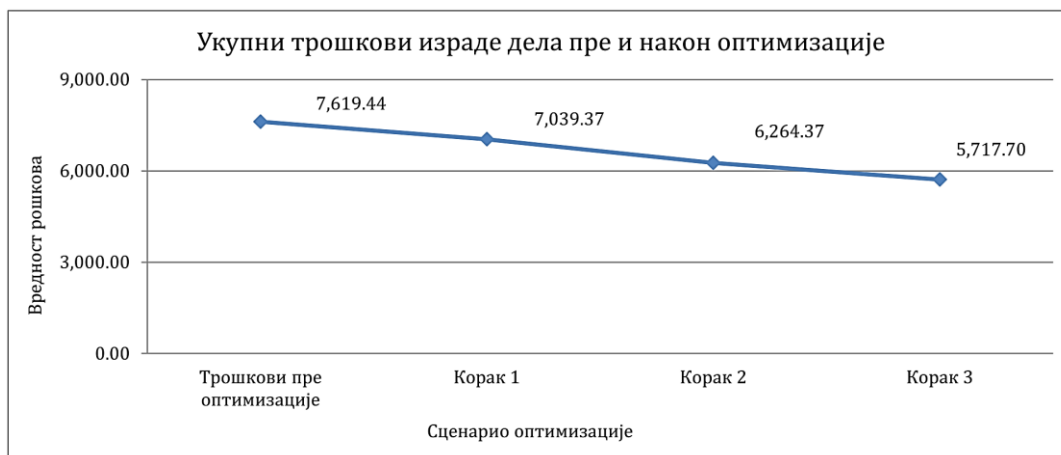
- **Корак 1:** Смањење трошкова набавке машине за 20% и повећање искоришћености машине на годишњем нивоу на 200 радних дана. Резултат су смањени укупни трошкови за 9 % (са 7.619,44 € на 7.039.36 €) док су трошкова израде дела умањени за 28% (услед мањих трошкове машине);
- **Корак 2:** На претходно оптимизоване трошкове (корак 1) умањени су трошкови ангажовања радне снаге за 20% што даје вредност укупних трошкова од 6.264,35 € односно умањење је 18.2 % у односу на почетне трошкове (7.619,44 €). (умањење је у фазама пре и постпроцеса где трошкови радне снаге највише учествују).
- **Корак 3:** Уклањање трошкова машине из активности у којима је машина неактивна (трошкови припреме машине и трошкови уклањања радне плоче из машине).
Уклањањем трошкова машине из активности у којима је машина неактивна укупни трошкови су смањени за око 9% (са 6264,35 € на 5717,69 €). Умањење трошкова је настало у фазама предпроцеса и постпроцесинга.

Детаљна објашњења сценарија оптимизације са добијеним резултатима и напоменама дата су у табели 12.

Табела 12: Сценарио оптимизације трошкова.

ПРИМЕЊЕНИ СЦЕНАРИО	РЕЗУЛТАТИ ОПТИМИЗАЦИЈЕ	НАПОМЕНА
<i>Корак 1:</i> -20 % трошкови набавке машине + повећање искоришћености машине на 200 р/д по години	Смањење укупних трошкова за 9 % и износе 7.039.36 € Трошкови израде дела су умањени за 28 % (са 2139,52 € на 1816,7 €)	Почетни инвестициони трошак набавке је велики. Трендови у производњи машина указују на смањење трошкова набавке машина.
<i>Корак 2:</i> Корак 1 + смањење трошкова радне снаге за 20 %	Смањење укупних трошкова за 18.2 % и износе 6.264,35 € Трошкови израде остају исти	Смањење трошкова је настало у фазама пре и постпроцесинга где се и ангажује радна снага.
<i>Корак 3:</i> корак 1 + корак 2 + уклањање трошкова машине у фазама када је машина неактивна	Смањење укупних трошкова за додатних 9 % и износе 5717,69 € Трошкови израде остају исти	У појединим моделима трошкова рачунају се и трошкови када је машина неактивна током процеса припреме за израду делова и касније у фази постпроцеса током чишћења машине.

Након извршене оптимизације кроз сва три корака може се закључити да укупно смањење почетних трошкова износи 25 % (са 7.619.44 на 5717,69 €), слика 33.



Слика 33: Приказ укупних трошкова израде пре и након оптимизације.

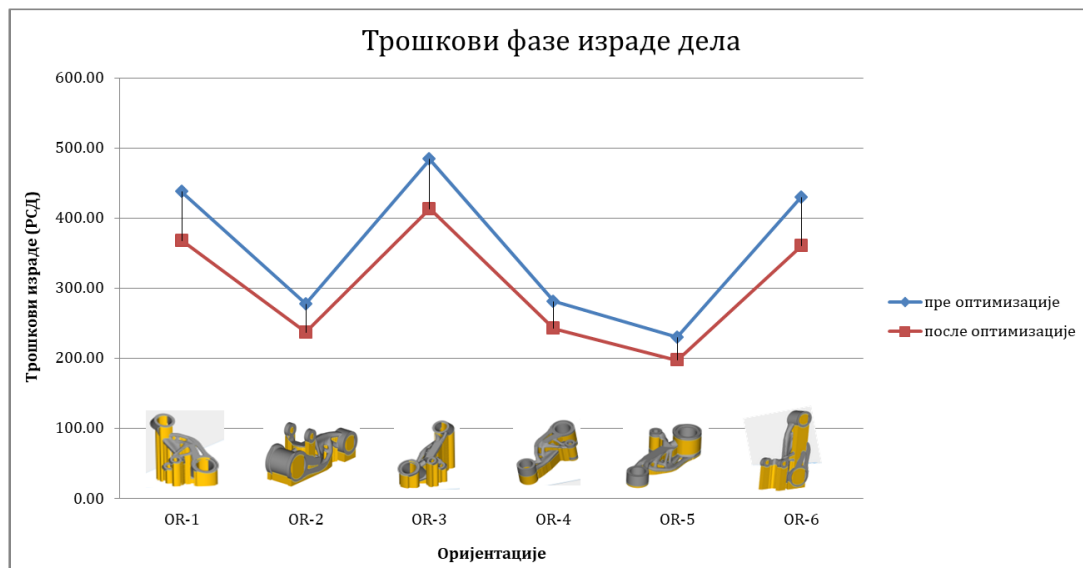
Трошкови фазе израде дела након оптимизације

Након спроведених сценарија оптимизације, цена фазе израде (као и цена појединачних делова) смањена је за 28% услед смањења трошкова машине и исти су приказани у табели 13.

Табела 13: Трошкови фазе израде дела након извршене оптимизације.

Трошкови/ оријентација	OR-1	OR-2	OR-3	OR-4	OR-5	OR-6	УКУПНО
Машина	186,37 €	109,07 €	189,73 €	103,52 €	88,90 €	187,05 €	864,65 €
Материјал	74,25 €	64,97 €	114,48 €	79,50 €	56,79 €	65,57 €	455,56 €
Енергија	73,75 €	43,16 €	75,08 €	40,96 €	35,18 €	74,01 €	342,14 €
Инертни гас	33,27 €	19,47 €	33,87 €	18,48 €	15,87 €	33,39 €	154,35 €
УКУПНО	367,64 €	236,67 €	413,16 €	242,46 €	196,74 €	360,02 €	1816,7 €

Упоредни приказ трошкова фазе израде дела пре и након након оптимизације приказан је на слици 34.



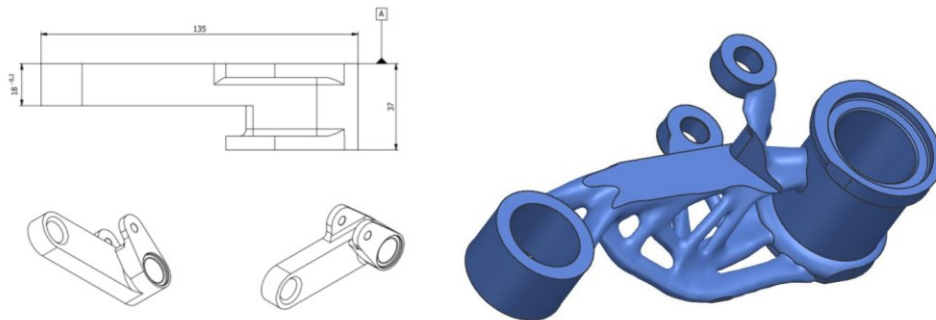
Слика 34: Упоредни приказ трошкова у фази израде дела (пре и после оптимизације).

Након спроведених сценарија оптимизације трошкова као и њиховог упоредног приказа, може се закључити да су укупни трошкови, као и трошкови по свим појединачним фазама, променљива категорија и да зависе од тржишних услова, иницијалних трошкова набавке, критеријума оптимизације и подложни су детаљним анализама и оптимизацијама из неколико разлога који ће бити објашњени у наставку:

- Трошкови предпроцеса:
 - Трошкови рада оператера на рачунару, коришћења радне станице и софтверског пакета се могу оптимизовати док се трошкови (не) рада машине у одређеним случајевима не морају рачунати.
- Трошкови фазе израде:
 - Иницијално велики трошкови набавке машине утичу на трошкове амортизације. Исти се могу смањити ако се повећа ангажованост машине на годишњем нивоу;
 - Трошкови материјала: могу се смањити детаљнијом анализом тржишта у циљу добијања јефтених улазних сировина, као и диверзификацијом потенцијалних снабдевача;
 - Тополошка оптимизација и оријентација дела на радној плочи значајно утичу на укупне трошкове ове фазе.
- Трошкови постпроцесинга:
 - Трошкови који морају бити урачунати односе се на уклањање делова са радне плоче;
 - Остали трошкови постпроцеса не морају бити урачунати ако корисник не захтева додатну обраду;
 - Трошкови постпроцеса се могу смањити ако постоје сопствени капацитети за постпроцесинг. Ако се постпроцесинг ради услужно предлаже се потражња више понуда на тржишту;
 - Аутоматизација процеса манипулације са металним прахом може значајно смањити трошкове постпроцесинга али и учешће радне снаге.

6.5 АНАЛИЗА ТРОШКОВА ИЗРАДЕ ИЗАБРАНОГ ДЕЛА КЛАСИЧНИМ И АДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА

У оквиру ове тачке извршено је поређење трошкова израде и осталих пратећих елемената производње за израду изабраног дела класичним и адитивним технологијама, слика 35.



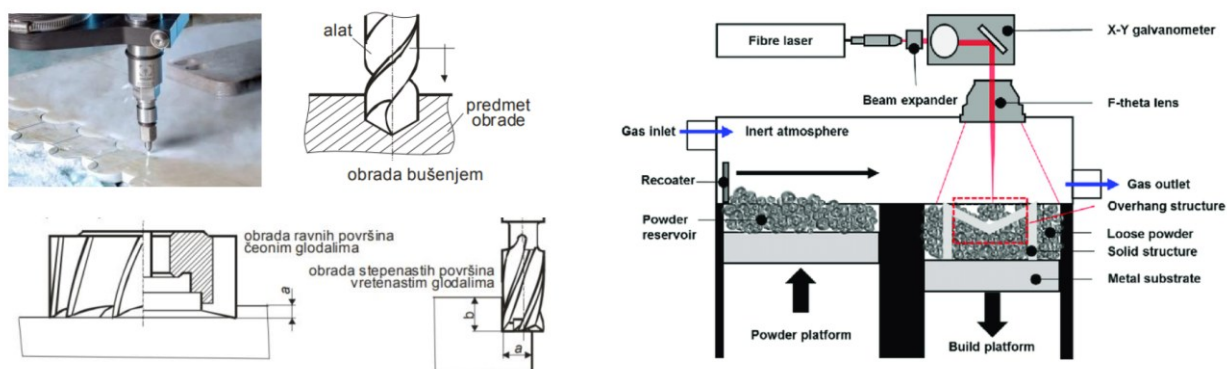
Слика 35: Упоредни приказ анализираног дела израђеног класичном и адитивном L-PBF технологијом.

Анализа израде дела класичним технологијама

Класичну производну технологију карактеришу следећи елементи, слика 36:

- Примењене су 4 врсте обраде (сечење воденим млазом (Water Jet), браварски рад, глодање и бушење) за израду дела, укључујући и постпроцесинг као услугу (пескарење и побољшање);
- Потребно је ангажовање 4 различита профила мајстора (бравар, оператор на машини за сечење воденим млазом, металостругар и бушач);
- У процесу израде потребно је ангажовати 3 различите машине (машина за сечење воденим млазом, брусилница, глодалица);
- Процент шкарта материјала је изузетно велики и износи око 76% улазног материјала (улазна тежина је 2.85 kg репроматеријала челик 30CrMoV9 (Ћ4734.1), добијена излазна тежина дела је 0.764 kg или 24 % почетне тежине материјала).

На ове активности треба додати и пратеће активности у процесу класичне производње: складиштење материјала, унутрашњи транспорт, манипулативни радови, припрема више врста машина, остали међу процеси.



Слика 36: Упоредни приказ примењених технологија у изради изабраног дела: класичне (лево) и адитивне L-PBF технологије (десно).

Анализа израде дела адитивном L-PBF технологијом

Примену адитивне технологије које уједно представљају и предности у примени у односу на класичну технологију карактерише:

- Време израде појединачног дела (зависи од избора оријентације), у конкретном случају се креће у опсегу од 5.29 до 11.13 сати, док код класичне производње време израде је нешто више од 10.00 часова;
Времена израде: OR-1 (11.09 min), OR-2 (6.49 min), OR-3 (11.29 min), OR-4 (6.16 min), OR-5 (5.29 min), OR-6 (11.13 min);
- Број ангажованих људи (2 лица): у процесу израде/штампе 1 лице (накнадно и за постпроцесинг) као и 1 лице за припрему израде дела;
- Смањење масе (посредно и цене штампе) и могућност израде тополошки оптимизованог дела: оптимизовани део је за 67% лакши (0.250 kg у односу на 0.764 kg);
- Ангажује се једна машина у једном радном простору;
- Постоји затворени циклус производње без интерног транспорта и међу процеса.

У конкретном случају није извршена консолидација делова, иста је могућа али са деловима вишег склопа, што тражи и другачији приступ у планирању производње и прорачуна трошкова. Заједничка карактеристика код обе производње је потреба за постпроцесингом.

Анализа сценарија код класичне и L-PBF адитивне производње

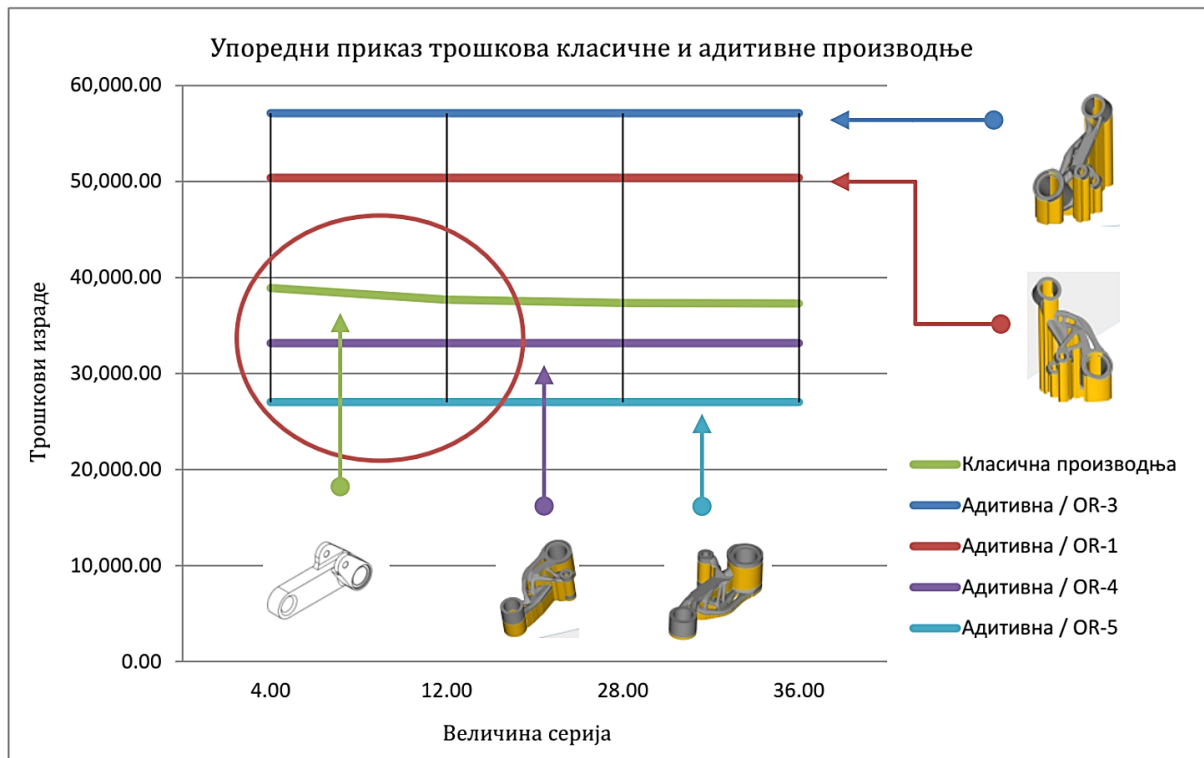
У циљу анализе могућег сценарија производње, односно упоређивања економских аспеката примене класичне и адитивне L-PBF технологије у циљу доношења одређених закључака, направљен је дијаграм трошкова, слика 37.

Анализа дијаграма указује на неколико битних чињеница које ће се изнети у наставку. На дијаграму је приказано међусобно поређење трошкова израде предметног дела класичним технологијама и адитивном L-PBF технологијом (изабране су 4 различите оријентације – OR-1 и OR-3, OR-4 и OR-5 од укупно 6 оријентација), под претпоставком да се планира серијска производња за оба случаја производње.

Код класичне производње са повећањем броја израђених делова (тенденција ка великосеријској производњи) дијаграм се асимптотски приближава једној константној вредности (око 37.000,00 динара), што би и представљало оријентациону цену предметног дела у великосеријској производњи.

Код адитивне технологије оријентација дела на радној плочи (директно утиче и на време израде дела) диктира и укупне трошкове израде који, на основу изнетог, варирају од 27.000,00 динара до 57.000,00 динара.

На пример, трошкови израде за оријентацију OR-4 (33.158,00 динара) су исти без обзира на величину серије (4, 12, 28, 36 комада) и биће исти и за веће обиме серије. Незнатно повећање трошкова би се појавило (и манифестовало као благи скок на дијаграму) само у фази када се припрема нова радна плоча (због капацитета радног простора) али се и овај трошак касније смањује до претходне вредности израде (33.158,00 динара).



Слика 37: Упоредни приказ дијаграма трошкова израде изабраног дела класичним и адитивном L-PBF технологијом.

У одговору на питање, које је постављено у почетном поглављу доктората а у вези са границом економичности и сценаријима израде, може се констатовати да је оправдана израда дела изабраном адитивном технологијом у случају оријентација (OR-4 и OR-5) за разлику од оријентација (OR-1 и OR-3).

Међутим, при разматрању оријентација (OR-1 и OR-3) не треба само разматрати трошкове, него узети у обзир и предности које се могу постићи овим оријентацијама кроз сатурацију односно комплетну попуњеност радне плоче. Односно, у једном циклусу израде обе ове оријентације дозвољавају већи број израђених делова него код оријентација (OR-4 и OR-5) због постављања делова на радној плочи у релативно усправном положају. У сваком случају коначна одлука о избору адекватне оријентације је компромис међу многим критеријумима.

На основу напред изнетих анализа и поређења могуће је направити упоредну анализу примене класичне и адитивне технологије по неколико кључних сегмената за изабрани део, табела 14.

Упоредна анализа показује које све предности доноси адитивна производња (конкретно адитивна L-PBF технологија) без обзира што у појединим сегментима (постпроцесинг) нема кључне предности у примени.

Табела 14: Поређење кључних елемената израде изабраног дела класичним и адитивним технологијама.

ЕЛЕМЕНТИ ЗА ПОРЕЂЕЊЕ	КЛАСИЧНА ПРОИЗВОДЊА	АДИТИВНА ПРОИЗВОДЊА (L-PBF МЕТОДА)
УКУПАН БРОЈ ПРИМЕЊЕНИХ ТЕХНОЛОГИЈА ОБРАДЕ	Примењене су 4 врсте обраде (сечење воденим млазом, браварски рад, глодање,бушење)	Једна врста обраде, додавање материјала слој по слој
БРОЈ И ПРОФИЛ СТРУЧНИХ ЛИЦА АНГАЖОВАНИХ НА ИЗРАДИ ДЕЛА	Ангажовање 4 различита профила мајстора (бравар, оператор, металостругар, бушач)	1 лице (оператор) током процеса израде дела који врши мониторинг процеса
БРОЈ АНГАЖОВАНИХ МАШИНА	Ангажовање 3 различите машине (Water Jet, брусница, глодалица)	1 машина (3D штампач) који подржава L-PBF технологију
ПРОЦЕНАТ ШКАРТА У ПРОЦЕСУ ПРОИЗВОДЊЕ	76% улазног материјала (улазна тежина је 2.85 kg репроматеријала челик Č.4734.1, добијена излазна тежина дела је 0.764 kg - 24 % почетне тежине материјала).	Нема шкарта у производњи, метални прах се накнадно рециклира, могућност неповратног утрошка праха је само око 10%
ВРЕМЕ ПОТРЕБНО ЗА ИЗРАДУ ДЕЛА	Више од 10.00 часова	Зависи од избора оријентације), у конкретном случају се креће у опсегу од 5.29 до 11.13 сати
МОГУЋНОСТ СМАЊЕЊА МАСЕ И ПРИМЕНА ОПТИМИЗАЦИОНИХ МЕТОДА	Није примењива	Постоји могућност. Оптимизовани део је за 67% лакши (0.250 kg према 0.764 kg) због примене ТО као и МКЕ методе за анализу оптерећења, могућност консолидације делова
ТРОШКОВИ ИЗРАДЕ ДЕЛА	Са повећањем броја израде делова дијаграм се асимптотски приближава једној константној вредности (око 37.000,00 динара)	Оријентација дела на радној плочи директно утиче и на време израде дела, трошкови израде варирају од 27.000,00 динара до 57.000,00 динара
МОГУЋНОСТ РЕЦИКЛИРАЊА У ОКВИРУ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ	НЕ	ДА, врши се рециклирање металног праха и накнадна употреба која доводи до смањење цене материјала у наредним фазама производње
ОСТАЛИ ПРАТЕЋИ ПРОЦЕСИ	Складиштење материјала, унутрашњи транспорт, манипулативни радови, припрема више машина,	Манипулација са радном плочом, просејавање праха, уклањање потпорних ослонаца са дела, скидање делова са радне плоче

Утицај процеса рециклирања металног праха на трошкове израде

У односу на спроведену анализу сценарија, трошкови се могу додатно смањити на следеће начине:

- коришћењем материјала ниже тржишне вредности (конкретно 316L у односу на MS1, предложено софтверско решење омогућава уношење различитих врста материјала);
- коришћењем рециклираног праха који има мању цену у односу на чисти прах (почетна цена праха се смањује са сваким бројем рециклирања до одређене константне вредности, начелно после неких 5-10 циклуса рециклирања, након чега се препоручује коришћење комбинације 30% чистог и 70% рециклираног праха).

Процес употребе рециклираног праха, чија механичка својства опадају кроз циклусе употребе, мора да буде праћен константном контролом квалитета и механичких својстава праха. Разлози за наведено се налазе у чињеници да се током технолошког процеса израде дела метални прах излаже утицају ласерског зрака и инертног гаса у радној комори машине, што доводи до промена у његовим иницијалним хемијским својствима а утиче и на механичке карактеристике дела који се израђује од рециклираног праха, (Santecchia и др., 2020).

Анализа процеса деградације праха кроз L-PBF процес, кроз истраживање промена у самом праху (морфологија честица, микроструктура и хемијска композиција) као и својствима израђеног дела (порозност, микроструктура, тврдоћа) предложена је у (Delacroix и др., 2022). Спроведена студија случаја је указала да је дошло до промена у структури металног праха SS316L. На значај процеса рециклирања праха указано је и у раду (Warner и др., 2024) као начина за смањење цене материјала за израду дела, а са друге стране се смањује и утицај на животну средину (кроз мањи број одлагања металног праха). Аутор посебно истиче значај развоја стратегије за рециклирање праха у процесу израде дела и указује на три најчешће стратегије: 1) употреба праха из једне производне шарже (*single batch and collective ageing methods*), 2) додавање просејаног или новог праха на преостали прах у комори (*top up method*), 3) Миксовање новог и преосталог праха (*refreshing method*). Стратегија број 3 је уједно и најзаступљенија стратегија.

6.6 АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ У МОДЕЛУ ТРОШКОВА

Анализа осетљивости се може описати као метод за мерење утицаја у неизвесности једне или више независних (улазних) варијабли које доводе до неизвесности и промена вредности код зависних (излазних) варијабли, (Mandolini и др, 2022).

Анализа осетљивости помаже у разумевању ризика повезаних са изабраним моделом трошкова и критичним факторима који утичу на излазне параметре и омогућава доносиоцима одлуке да исте донесу на бази проверених информација и анализа. Конкретно, циљ анализе осетљивости спроведен у овој дисертацији је дефинисање процесних и параметара самог производа који највише утичу на трошкове израде дела применом L-PBF технологије. Након анализе неколико радова који разматрају ову проблематику, анализа осетљивости се ће спровести узимајући у разматрање резултате из фазе израде дела у оквиру развијеног модела трошкова.

6.6.1 Примена анализе осетљивости - уводна разматрања

Аутори (Di и Yang, 2020) спровели су анализу осетљивости у којој се процењивао утицај параметара (инвестиције за набавку машине, цена радне снаге, цена енергије, цена материјала) на трошкове адитивне L-PBF технологије. Резултати су показали да јединачна цена материјала и трошкови машине имају највећи утицај на укупне трошкове, док трошкови енергије и радног сата радне снаге имају мањи утицај. Сам аутор наводи да у овој анализи нису разматрани параметри процеса као што су: дебљина штампаног слоја, брзина ласера, фактор оптерећења и време наношења праха, што представља недостатак.

У раду (Kretzschmar, 2015) аутор показује како маса и висина производа остварују утицај на трошкове процеса. Резултати указују да управо маса (репроматеријала – улазни производ) има значајнији утицај на трошкове него висина производа. Такође, процесни параметри нису разматрани у оквиру анализе осетљивости.

У раду (Mandolini и др., 2022) аутори проширују обухват анализе осетљивости у процесу адитивне L-PBF технологије, како би се дефинисали најзначајнији параметри производа и процеса који имају утицај на трошкове. У том смислу аутори анализирају укупно девет параметара (сама анализа обухвата 8 делова и 5 материјала и њихов утицај на модел трошкова). На овај начин долази се до скупа пројектних и производних параметара који могу да имају утицај на трошкове (односно исти се могу подешавати), као и до скупа различитих материјала који се могу варирати у циљу оптимизације трошкова.

Анализирани параметри су груписани у два типа. За параметре производа изабрани су висина и запремина, док су осталих седам параметара процесни параметри: фактор оптерећења машине, дебљина слоја, брзина штампе, време наношења праха и јединачне цене енергије, материјала и радне снаге. Трошкови машине по радном сату нису разматрани као параметар јер исти зависе од фактора оптерећења. Добијени резултати указују на следеће:

- У вези са параметрима производа: висина дела остварује већи утицај на трошкове у односу на запремину дела;
- У вези са процесним параметрима: фактор оптерећења има највећи утицај на трошкове штампе, а на другом месту је дебљина слоја штампе, а затим и трошкови металног праха као улазне сировине.

Једна од кључних констатација везаних за потребу спровођења анализе осетљивости наведена је у раду (Schröder и др., 2015) у којем се указује да се анализа спроводи у циљу идентификације економских ефеката које има адитивна производња. Анализа је указала на следеће економске одреднице:

- Највећи утицај на трошкове израде имају инвестициони трошак набавке машине и фактор оптерећења/искоришћености:
 - Мањи трошкови набавке машине и боља искоришћеност радног простора доводе до смањења трошкова;
 - Штампање већег броја различитих делова у исто време (кроз максималну искоришћеност радног простора машине) доводи до смањења јединачних трошкова израде делова. За мањи број делова користити машине мањих димензија радних простора чиме се смањују и трошкови рада по јединици времена;
- Највећи потенцијал за оптимизацију постоји у случају постпроцесинга (накнадне обраде ради обезбеђења квалитета) великог броја малих делова:
 - Посматрано са аспекта масовне производње ови трошкови се могу умањити кроз процес аутоматизације.

6.6.2 Анализа осетљивости на основу развијеног модела трошкова

У овој дисертацији анализа осетљивости се спроводи користећи софтверски програм Excel („what-if“ анализа), у такозваном Data tables моду, на начин да се спроводе следеће анализе:

- Анализа осетљивости променом вредности једног параметра (једнострука или *one-way sensitivity* анализа);
- Анализа осетљивости променом вредности два параметра (двострука или *two-way sensitivity* анализа).

Параметри који су варирани (у одређеном процентуалном износу) су цена материјала (једнострука анализа) и цена материјал и запремина дела (двострука анализа) и разматран је њихов утицај на укупне трошкове израде изабране оријентације (оријентација 5). Вредности улазних параметара и излазне вредности за обе спроведене анализе приказане су на слици 38.

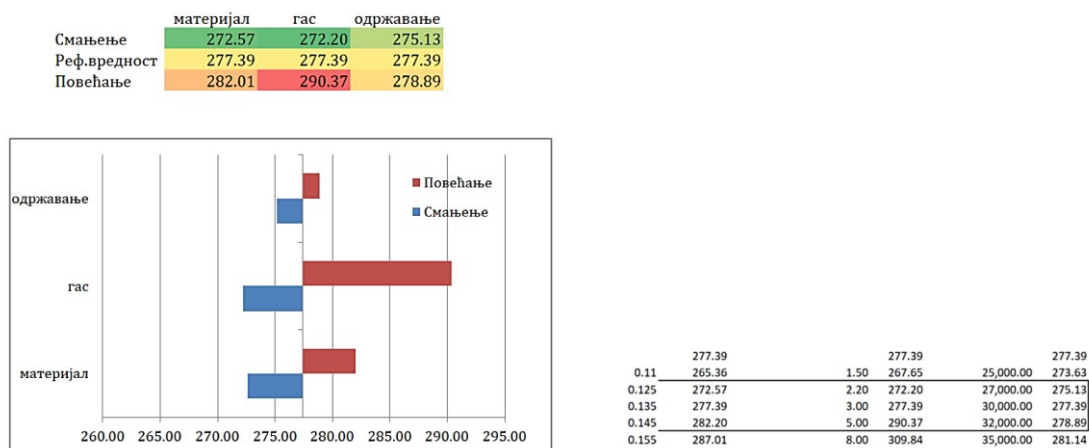
УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ (ОРИЈЕНТАЦИЈА 5)									
ВРЕМЕ ИЗРАДЕ ДЕЛА	6.49	часова							
ЗАПРЕМИНА ДЕЛА И ОСЛОНАЦА	55.38	грама							
ЦЕНА МАТЕРИЈАЛА	0.1350	еура							
ЦЕНА ИНЕРТНОГ ГАСА	3.00	еура							
ЕНЕРГИЈА ЦЕНА / KW	0.50	еура							
ЕНЕРГИЈА МАШИНА / KW	13.30	KW							
ВРЕДНОСТ МАШИНЕ	800,000.00	еура							
ПЕРИОД КОРИШЋЕЊА	10.00	година							
ВРЕМЕ РАДА / ГОД	4,080.00	часова							
ТРОШАК ОДРЖАВАЊА / ГОД	30,000.00	еура							
ГУСТИНА МАТЕРИЈАЛА	7.90								
ИЗЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ			цена материјала		оптимизација масе / запремине дела				
ТРОШКОВИ МАШИНЕ	149.79	еура		277.39	277.39	60	55.38	52	47
ТРОШКОВИ ИНЕРТНОГ ГАСА	19.47	еура	0.11	265.36	0.11	269.772	265.3559	262.125	257.345
ТРОШКОВИ МАТЕРИЈАЛА	64.97	еура	0.125	272.57	0.125	277.593	272.5746	268.903	263.472
ТРОШКОВИ ЕНЕРГИЈЕ	43.16	еура	0.135	277.39	0.135	282.807	277.3872	273.422	267.556
УКУПНО	277.39	еура	0.145	282.20	0.145	288.021	282.1997	277.941	271.64
			0.155	287.01	0.155	293.235	287.0122	282.46	275.725

Слика 38: Резултати једноструке (табеларни преглед) и двоструке анализе (топлотна мапа) осетљивости.

Резултати, код једноструке и двоструке анализе осетљивости, показују директну зависност трошкова израде од трошкова материјала и запремине дела. Једнострука анализа је корисна за иницијално тестирање али не открива сложене везе међу параметрима за разлику од двоструке анализе.

Поред напред наведених анализа коришћен је и Торнадо дијаграм (хоризонтални бар-дијаграм, слика 39) као један од алат за визуелизацију у анализи осетљивости. На Торнадо дијаграму приказан је утицај у променама вредности три варијабле (трошкови: одржавања, инертног гаса и материјала као улазне сировине) на укупне трошкове штампе оријентације 5. У односу на једноструку и двоструку анализу код Торнадо дијаграма су укључена два нова параметра (трошкови инертног гаса и одржавања).

Резултати потврђују директну зависност трошкова штампе од трошкова материјала (констатовано код једноструке и двоструке анализе осетљивости) и показују такође директну зависност укупних трошкова штампе од трошкова инертног гаса и одржавања. Торнадо дијаграм не открива интеракције између параметара и приказује осетљивост око једне тачке (номиналне вредности). За детаљнију анализу интеракција међу параметрима неопходно је користити напредније методе (Surface Response Methodology или дизајн експеримената - DOE).



Слика 39: Анализа осетљивости – Торнадо дијаграм

Поред анализе осетљивости излазне варијабле (променом једног или два параметра) Excel програм омогућава и креирање одређеног сценарија који комбинује неколико ситуација битних за одлучивање. У оквиру ове дисертације анализираће се сценарио који се односи на следеће: 1) промена времена израде дела (рефлектује промене у параметрима процеса, нпр снаге ласера), 2) промена трошкова одржавања и 3) промена у маси (рефлектује обим извршене тополошке оптимизације). Подаци су приказани у табели 15 а резултати показују директну зависност међу варијаблима, односно трошкови израде дела директно су пропорционални повећању/смањењу вредности анализираних варијабли (времена израде, трошковима одржавања, промени масе дела).

Табела 15: Сценарио анализа промене параметара (време, одржавање, маса) на укупне трошкове.

СЦЕНАРИО	ТРЕНУТНЕ ВРЕДНОСТИ	ВРЕМЕ ИЗРАДЕ 1	ВРЕМЕ ИЗРАДЕ 2	ВРЕМЕ ИЗРАДЕ 3	ВРЕМЕ ИЗРАДЕ 4
ПРОМЕНЉИВА					
ВРЕМЕ	6.49	6.10	8.20	9.70	11.50
РЕЗУЛТАТ					
ЦЕНА	277.39	264.62	333.36	382.45	441.36

СЦЕНАРИО	ТРЕНУТНЕ ВРЕДНОСТИ	ОДРЖАВАЊЕ 1	ОДРЖАВАЊЕ 2	ОДРЖАВАЊЕ 3	ОДРЖАВАЊЕ 4
ПРОМЕНЉИВА					
ОДРЖАВАЊЕ	30,000.00	25,000.00	27,500.00	32,500.00	34,800.00
РЕЗУЛТАТ					
ЦЕНА	277.39	273.63	275.51	279.27	280.99

СЦЕНАРИО	ТРЕНУТНЕ ВРЕДНОСТИ	МАСА 1	МАСА 2	МАСА 3	МАСА 4
ПРОМЕНЉИВА					
МАСА	55.38	58.00	62.00	51.00	49.00
РЕЗУЛТАТ					
ЦЕНА	277.39	280.46	285.15	272.25	269.90

Из спроведене анализе можемо закључити да су укупни трошкови „осетљиви“ на утицај анализираних параметара и да даља оптимизација у трошковима треба

бити усмерена управо ка овим параметрима (њиховим смањењима с обзиром на директну зависност). Анализом осетљивости трошкова израде на промене одређених параметара вршимо и управљање ризицима у случају неке непланске ескалације цена на тржишту, и у том смислу морају се и развити одређене мере предострожности.

У овој дисертацији нису анализиране промене процесних параметара (параметара штампе) јер су оне константне (по препоруци произвођача машине подешене на оптималне вредности).

6.7 ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА ДОБИЈЕНИХ ПРИМЕНОМ РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА ТРОШКОВА И СОФТВЕРСКОГ РЕШЕЊА

Развијени модел трошкова представља еволуцију анализираних модела трошкова (тачка 5.1.1) увођењем одређених новина, поједностављења и другачијих тумачења заснованих на практичним искуствима. Основа за развијени модел трошкова заснива се на предлозима елемената новог модела трошкова (тачка 5.1.2) и математичким формулацијама представљеним у овом поглављу.

Развијени модел и пратеће софтверско решење унапређују процес израчунавања трошкова израде делова од метала применом L-PBF адитивне технологије јер, поред примене већ проверених решења и приступа у израчунавању трошкова, исте надограђује детаљнијом анализом генератора трошкова у свим фазама израде дела и за исте прецизније дефинише математичке формуле за израчунавање вредности. Кључни елементи предложеног модела и софтверског решења су следећи:

- Укупна формула за трошкове се састоји од осам процеса (у односу на анализираних моделе додати су трошкови контроле квалитета). Програмско решење даје трошкове за сваки подпроцес и по свакој геометрији, као и укупне трошкове по фазама. На овај начин, приказом свих генерисаних трошкова, добија се простор за оптимизацију појединих трошкова за које се покаже да су велики. Омогућен је и визуелни приказ свих трошкова и међусобног поређења ради лакшег закључивања.
- Трошкови потребни за уклањање радне плоче из машине су подједнако расподељени на све заступљене геометрије, (Šoškić и др, 2019).
- Трошкови термичке обраде радне плоче такође су подједнако распоређени према броју геометрија. На ове трошкове додати су трошкови употребе ерозимата (скидање делова са радне плоче), (Barclift и др., 2016). Алокација трошкова по геометријама пропорционална је површини коју геометрија заузима на радној плочи.
- Трошкови постпроцесних активности: софтверски програм омогућава појединачно уношење свих постпроцесних активности, а не укупно време за постпроцесе, (Rickenbacher и др., 2013). Овај приступ је битан из разлога, што појединачне геометрије на радној плочи могу захтевати различите додатне постпроцесне активности.

Исти принцип је примењен и за трошкове контроле који се такође могу посебно рачунати за сваку геометрију у зависности од примењеног процеса контроле квалитета или мерног уређаја за контролу.

- Трошкови потрошње коришћених гасова: урачунати су трошкови потрошње инертног гаса у оквиру фазе штампања дела, што није обухваћено у свим анализираним моделима.
- Такође, према доступним подацима из праксе трошкови потрошње металног праха који се неповратно троши (и накнадно уклони из машине) у процесу израде делова износи до 10% укупне масе. Овај трошак је у математичкој формули представљен коефицијентом 1.1.
- За алокацију трошкова по геометријама, у процес скидања делова са радне плоче, користи се процентуална заузетост површине радне плоче сваке геометрије, (Fera и др, 2017).
- Софтвер предлаже коришћење података из специјализованих софтвера за адитивну производњу (*Materialise Magics, Hatch*) како би се добили прецизни подаци о површинама заузетости на радној плочи, запреминама дела и потпорних ослонаца као и временима штампе.

Представљено решење не обрачунава следеће трошкове:

- Трошкови отклањања грешака у радном процесу, трошкови поновног покретања/наставак процеса након појаве грешке, трошкови формирања заштитне атмосфере, према (Jarrag и др, 2022);
- Трошкови деградације материјала, односно компензациони коефицијент. У моделу трошкова користи се цена новог праха;
- Трошкови потрошње енергије за машине које се користе у постпроцесним активностима. Један од разлога је и чињеница да се ове активности могу извршити и услужно.

Даљи развоја софтверског решења може се одвијати у неколико праваца:

- Развој софтверског кода у другом програмском језику (*Python, ...*);
- Интеграција модула за анализу осетљивости у постојећи програмски код;
- Директна интеграција са програмима за припрему адитивне производње (*Materialise Magics, Hatch*) ради ажурирања улазних података у реалном времену;
- Директно повезивање са базама података о ценама материјала и електричне енергије, као и о стварним трошковима одржавања и амортизације машине ради динамичког управљања са подацима.
- Излазне податке о трошковима повезати са системима за управљање пројектима/ресурсима и праћење производње (ERP/MES).

Такође, излазне резултате из софтвера (трошкови израде дела) потребно је упоредити са другим расположивим софтверима за прорачун трошкова (on-line софтвери, модули за прорачун трошкова у оквиру CAD софтверских пакета, комерцијално доступни софтвери за прорачун трошкова) у циљу анализе оправданости предложеног модела.

Ово поглавље даје потврдан одговор на постављену хипотезу у којој се предвиђа могућност развоја свеобухватнијег модела трошкова са пратећим софтверским алатом за адитивну L-PBF технологију.

Треба напоменути и да анализа осетљивости, која је спроведена у овом поглављу а није била спроведена код већине претходно анализираних модела трошкова, има важну улогу у оптимизацији процеса (одређивању параметара који имају највећи утицај на механичке карактеристике дела чиме се посредно смањују и трошкови спровођења експеримента), побољшању квалитета производа (утврђивање параметара који су најосетљивији на промену и утичу на квалитет) и смањењу трошкова производње (анализа параметара који доводе до повећања/смањења трошкова).

7. СТУДИЈА СЛУЧАЈА

Циљ студије случаја је демонстрација применљивости предложеног оквира (за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије) кроз анализу стварног инжењерског проблема и доношење одлука заснованих на

подацима добијеним симулацијама и експериментима. Оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије састоји из три фазе:

1. Пројектовања производа;
2. Пројектовање процеса;
3. Анализа и верификација резултата.

У студији случаја сваки предложени корак оквира анализиран је и приказан на конкретном примеру уз подршку одговарајућег софтвера и тумачење добијених резултата.

У завршном делу студије случају анализирани су резултати утицаја различитих оријентација (хоризонтална, вертикална, коса) на механичке (тврдоћа, напон течења, затезна чврстоћа, елонгација, енергија удара), микроструктурне и димензионе (осно растојање, пречник) карактеристике тополошки оптимизованог дела и донети су одређени закључци битни при избору оптималне оријентације.

За конкретан пример изабран је сложени мулти-функционални MFMP (Multi Functional Mechanical Part) део који има своју реалну примену у пракси. Избор овог дела мотивисан је његовом сложеном геометријом, функционалним захтевима и потенцијалним добицима при преласку на адитивну производњу.

Јединствен допринос ове студије је анализа механичких својстава за различите оријентације, што директно утиче на доношење одлуке о позиционирању у адитивној производњи.

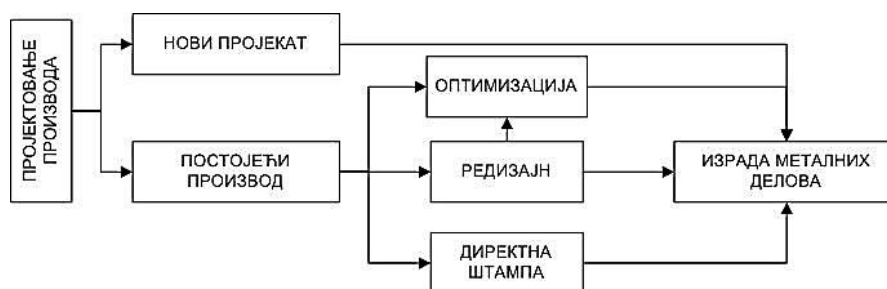
7.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОИЗВОДА

Фаза пројектовање производа обухвата следеће активности: 1) избор адекватног дела, 2) имплементација анализе заснована на методи коначних елемената (МКЕ) и тополошка оптимизација (ТО).

7.1.1 Методологија избора дела за адитивну производњу

Методологија за избор дела за производњу, приказана на слици 40, заснива се на могућности избора или селекције између постојећег (претходно пројектованог) CAD модела или се пројектује потпуно нови део, (Chen и др., 2022).

При избору постојећег CAD модела, као опције за даљу израду, у наредном кораку могу се применити три варијанте: 1) извршити оптимизација, 2) редизајнирати део применом правила DfAM (пре или након оптимизације) и 3) израда дела директно 3D штампом.

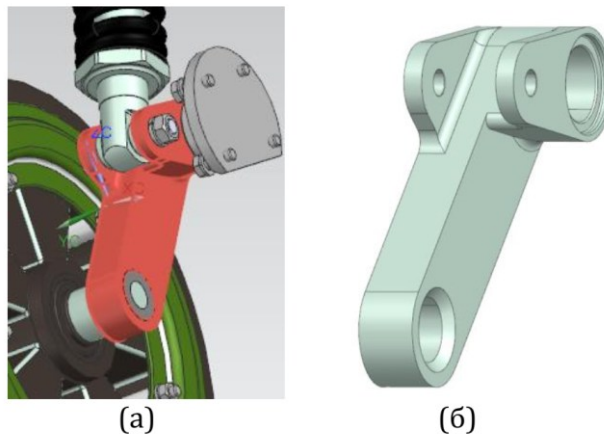


Слика 40: Методологија избора дела за израду адитивном технологијом, (Chen и др., 2022).

У овој дисертацији изабран је постојећи CAD модел јер омогућава директну примену ТО, чиме се скраћује време развоја новог производа. При избору адекватног дела треба напоменути и опште прихваћено правило међу произвођачима а то је да ако се део може економично произвести коришћењем конвенционалног производног процеса, тај део не би требало да се производи коришћењем АТ, (Malbasić и др., 2023).

Неопходан услов у вези са одабраним делом је захтевање одређених информација везаних за његову основну функцију, услове оптерећења (динамичка, статичка) као и одређена ограничења. Наведене информације су неопходне да би се поставили полазни параметри за извршења наредних корака у овој фази: анализа методом коначних елемената (МКЕ) и ТО.

У овој студији случаја разматран је MFMP део који је елемент система ослањања безпосадног даљински управљаног возила. Функција изабраног дела је повезивање непокретних и покретних делова система ослањања и носи одређена оптерећења, слика 41.



Слика 41: Приказ изабраног дела за израду: а) у склопу, б) појединачно.

MFMP део се састоји од одређеног броја равни као и цилиндричних површина чије су осе међусобно паралелне. Део је првобитно дизајниран за производњу коришћењем традиционалних производних технологија, а кроз студију случаја анализира се могућност и економичност производње помоћу изабране адитивне L-PBF технологије.

7.1.2 Имплементација анализе засноване на методи коначних елемената (МКЕ) и тополошка оптимизација

У овом делу приказан је поступак спровођења МКЕ и ТО на изабраном MFMP делу. На основу добијених резултата и спроведених анализа извршен је избор финалне верзије дела за даљу израду.

Циљ спровођења МКЕ је дефинисање стварних оптерећења и деформација разматраног дела на основу реалног оптерећења којима део може бити изложен. МКЕ ће бити спроведена за изабрани део пре и након спроведене ТО.

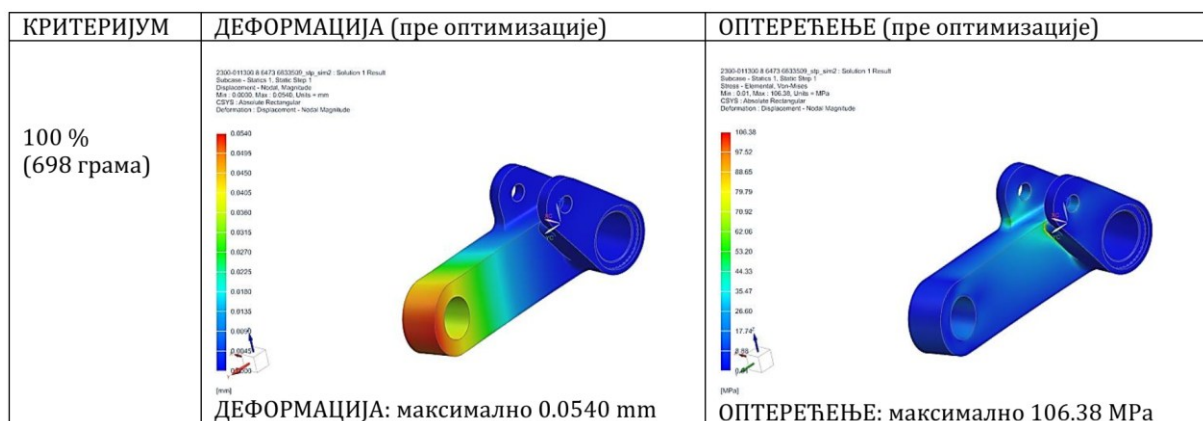
ТО се спроводи са циљем смањења масе при чему код тополошки оптимизованог дела неопходно је проверити расподелу оптерећења и деформација у односу на реалне услове оптерећења.

Примена методе коначних елемената

У наставку је приказан поступак МКЕ анализе која претходи тополошкој оптимизацији. Да би се извршила МКЕ анализа, важно је дефинисати неколико почетних параметара, а затим извршити симулацију оптерећења и деформација. За спровођење МКЕ коришћен је *Siemens NX* додатни модул *NASTRAN* у којем су генерисани следећи параметри:

- Тип оптерећења (структурна анализа, статичко оптерећење са једним ограничењем);
- Мрежни параметри (3D тетраедарска мрежа са 10 чворова која је погодна за израду сложених облика, више чворова обезбеђује довољно густу мрежу ради добијања високе тачности симулација);
- Дефинисање карактеристика оптерећења (одабрано је фиксно и променљиво оптерећење - ротација) као и магнитуда и смер деловања силе од 1250 N.

Након дефинисања стварних оптерећења и правца деловања силе а затим и извршења симулације пре примене ТО, добијена је расподела напрезања и деформација у изабраном делу као на слици 42. Ови подаци служе као референтна основа за касније поређење резултата.



Слика 42: Анализа деформација (лево) и дистрибуција напрезања (десно) ПРЕ примене тополошке оптимизације.

МКЕ је извршена за алатни челик од легуре метала (Maraging Steel MS1) са следећим механичким карактеристикама:

Механичке карактеристике:

- Затезна чврстоћа (Tensile strength): 1100±100 МПа (XY), 1100±100 МПа (Z);
- Граница развлачења (Yield strength): 1050±100 МПа (XY), 1000±100 МПа (Z);
- Елонгација при лому (Elongation at brake): (10±4)% (XY), (10±4)% (Z);
- Тврдоћа (Hardness): 33-37 HV5;
- Модул еластичности (Modulus of elasticity): 160±25 GPa (XY), 150±20 GPa (Z).

Физичке карактеристике:

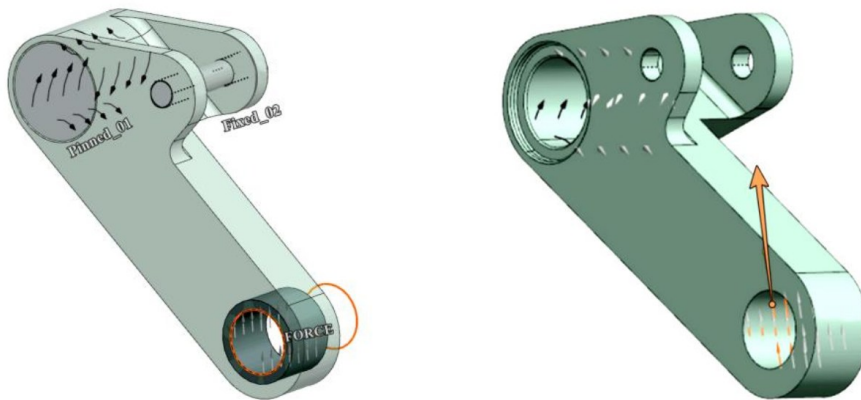
- Густина (Density): 8 g/cm³;

- Тачка топљења (Melting point): 1370-1400°C).

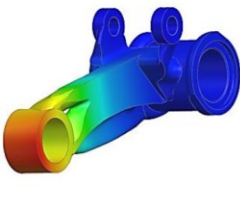
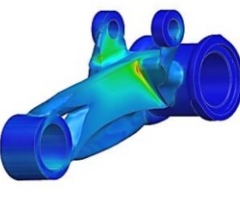
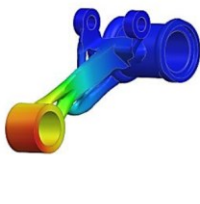
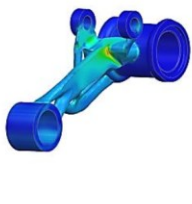
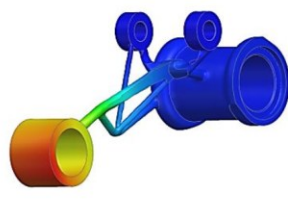
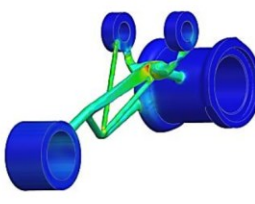
Тополошка оптимизација (ТО)

У наставку је приказан поступак спровођења ТО. Оптимизација топологије је моћан алат за добијање оптималног дизајна заснованог на МКЕ пројектованог простора (изабрани део), дефинисаних услова оптерећења (конкретно: сила оптерећења на доњем отвору дела где је осовина од точка повезана и преноси силу са точка на амортизер) и дефинисаних ограничења (конкретно: фиксно оптерећење код осовиница као места на којима је део фиксиран за друге компоненте огибљења – амортизер и цилиндрично ограничење као веза дела са полуосовином точка) што је и приказано на слици 43.

Тополошка оптимизација се спроводи у неколико итерација док се не добије оптималан резултат (у конкретној примени маса је редукована у корацима до вредности од 200 грама), слика 44. За извођење оптимизације топологије коришћен је *Siemens NX* додатни модул *Topology Optimizer*.



Слика 43: Дефинисање ограничења (лево) и услова оптерећења (десно) у процесу спровођења тополошке оптимизације.

КРИТЕРИЈУМ	ДЕФОРМАЦИЈА (после оптимизације)	ОПТЕРЕЂЕЊЕ (после оптимизације)
350 грама	 <p>ДЕФОРМАЦИЈА: максимално 0.0733 mm</p>	 <p>ОПТЕРЕЂЕЊЕ: максимално 95.72 МПа</p>
250 грама	 <p>ДЕФОРМАЦИЈА: максимално 0.146 mm</p>	 <p>ОПТЕРЕЂЕЊЕ: максимално 169.56 МПа</p>
200 грама	 <p>ДЕФОРМАЦИЈА: максимално 0.778 mm</p>	 <p>ОПТЕРЕЂЕЊЕ: максимално 569.80 МПа</p>

Слика 44: Анализа деформација (лево) и дистрибуција напрезања (десно) НАКОН извршене оптимизације.

Анализа резултата након ТО

Тополошка оптимизација може утицати на геометрију, тежину и дозвољено напрезање код оптимизованог дела, те с тим у вези треба додатно анализирати добијене резултате који су приказани у Табели 16.

Табела 16: Резултати масе, напрезања и деформација након спровођења ТО

ИТЕРАЦИЈА	Маса (g)	Напон (МПа)	Деформација (mm)	Закључак
Почетни дизајн	698	106.38	—	—
ТО Итерација 1	350	95.72	0.0733	Ниже напрезање
ТО Итерација 2	250	169.56	0.146	Изабрани модел
ТО Итерација 3	200	569.80	0.778	Прекомерно напрезање

Анализа добијених резултата указује на следеће:

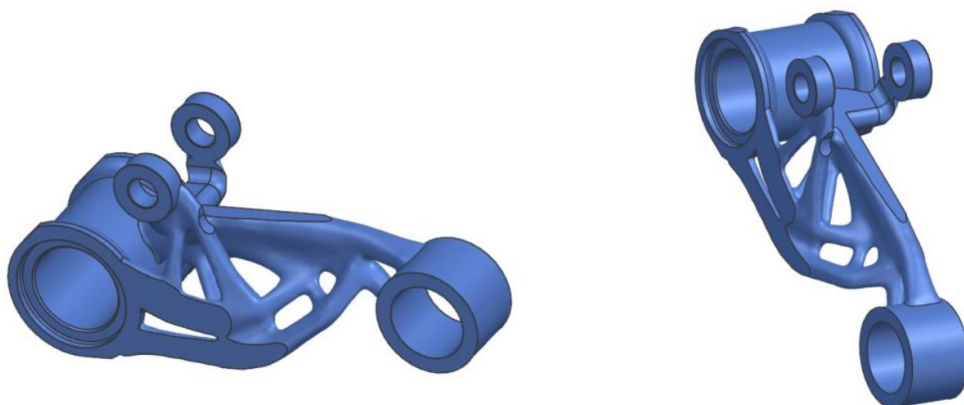
- По питању смањења масе тополошки оптимизовани део је 65% лакши у односу на почетни део (250 грама у поређењу са 698 грама);

- У вези са анализом деформација, са растом напрезања долази и до већих деформација али оне не прелазе критичне вредности за изабрани материјал MS1;
- Након оптимизације, ниво напрезања код нове геометрије треба да буде на истом нивоу или већи од оптерећења код почетног дизајна (106.38 МПа), због уклањања-расподеле материјала и напона и долази се у ситуацију да „мања маса трпи веће напонско стање“.
- У првој итерацији након тополошке оптимизације вредност оптерећења је мања у односу на напрезање код првобитног дизајна (95.72 МПа у поређењу са 106.38 МПа). У нормалним околностима резултат добијеног напрезања би требало да буду већи од 106.38 МПа. Овај специјалан случај, под условом да буде изабран као крајње решење захтевао би додатне анализе и допуне: избор других параметара и типа мреже при спровођењу МКЕ ради избегавања могућих грешака у процени напона, анализу смера и величине силе оптерећења, анализу унутрашње деформације.
- Код друге две итерације добијени напони након тополошке оптимизације су већи од првобитног дизајна (169.56 МПа и 569.80 МПа у поређењу са 106.38 МПа), што у потпуности одговара изнетој констатацији да у овим случајевима мања маса трпи веће напонско стање. Свакако добијене вредности оптерећења (напони) пре и након тополошке оптимизације су мањи од границе течења изабраног материјала (1050 ± 100 МПа).

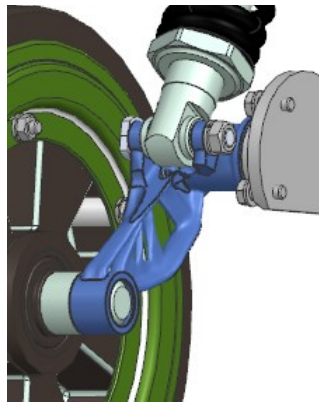
Извршеном симулацијом и оптимизацијом потврђено је да је могуће значајно смањење масе без преласка критичних напрезања, уз очувану механичку стабилност дела, што потврђује применљивост ТО у адитивној производњи делова сложене геометрије.

Избор финалне верзије за даљу израду

Након анализе добијених резултата (напрезања и деформације) као и саме геометрије дела, за даљу израду изабран је део добијен након друге итерације (циљна маса 250 грама). Коначан изглед тополошки оптимизованог дела приказан је на сликама 45 и 46 (у склопу).



Слика 45: Коначан изглед тополошки оптимизованог дела.



Слика 46: Приказ коначно оптимизованог дела у склопу.

Након изабране финалне верзије тополошки оптимизованог дела за даљу израду, неопходно је спровести процес пројектовања процеса (производње) ради избора оптималне оријентације дела на радној плочи.

7.2 ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОЦЕСА

Фаза пројектовања процеса укључује следеће активности:

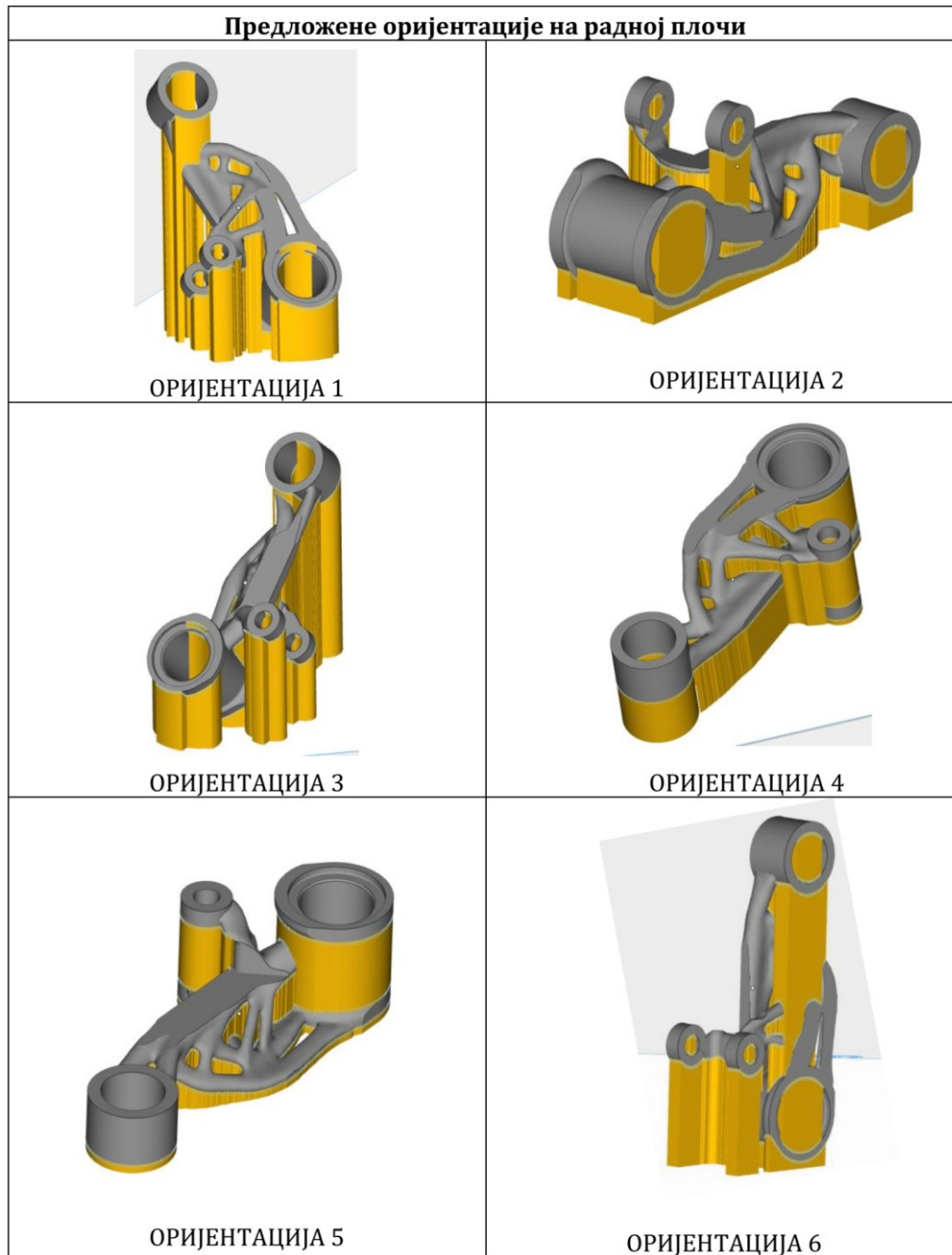
- Генерисање алтернативних оријентација (АО) дела на радној плочи;
- Израчунавање вредности изабраних критеријума за избор оријентације (цена израде, трошкови израде, запремина потпорних ослонаца, површина потпорних ослонаца на радној плочи, број површина дела које захтевају потпорне ослонце);
- Избор оптималне оријентације (ОО);

Излаз из ове фазе је оптимална оријентација изградње (ОО) за тополошки оптимизован део.

7.2.1 Генерисање алтернативних оријентација (АО) дела

На основу теоријске поставке дефинисане у поглављу 5 изабрано решење обухвата оријентације приказане на слици 47, према следећим критеријумима:

- Три оријентације из софтверског модула (оријентације 1, 2 и 4);
- Три оријентације изабране по основу препознавања кључних облика (оријентације 3, 5 и 6) и других битних карактеристика (избор угла позиционирања, оригинална позиција из CAD софтвера).



Слика 47: Приказ оријентација на радној плочи са генерисаним ослоњцима. Објашњења избора предложених оријентација дата су у табели 17.

Табела 17: Образложење изабраних оријентација.

Оријентација 1	Дефинисана од стране софтверског модула – основ за избор оријентације је минимална количина потпорне структуре.
Оријентација 2	Дефинисана од стране софтверског модула и у сагласности са методом кључних површина – основ за избор оријентације је оригинално „пресликана“ позиција из CAD софтвера, „идентификована“ раван паралелна са правцем изградње.
Оријентација 3	Изабрана од стране аутора – део је постављен под углом од 45° како би део био у сагласности са углом постављања епрувете за испитивање механичких карактеристика.
Оријентација 4	Дефинисана од стране софтверског модула – основ за избор оријентације је минимална оријентација по Z - оси како би се обезбедила минимална висина израде дела, уједно цилиндричне површине су у правцу изградње (сагласно са методом кључних површина).
Оријентација 5	Дефинисана по основу методе кључних површина – основ за избор је постављање „идентификоване“ равне површине паралелно са радном плочом (нормално на правац изградње).
Оријентација 6	Дефинисана од стране софтверског модула – основ за избор оријентације је минимална пројекција на хоризонталној ху равни.

7.2.2 Израчунавање вредности критеријума за оријентацију дела

За потребе студије случаја изабрано је 5 критеријума (цена израде, трошкови израде, запремина потпорних ослонаца, површина потпорних ослонаца на радној плочи, број површина дела које захтевају потпорне ослонаце) на које оријентација има највећи утицај. За разлику од механичких критеријума, изабрани критеријуми су доступни у фази пројектовања процеса, што олакшава доношења одлука.

Израчунавање дефинисаних критеријума извршено је на следећи начин:

- Количина материјала за потпорну структуру добијена је из софтвера за припрему штампе (*Materialize Magics*);
- Укупно време штампања добијено је директно из софтвера (*Hatch*) који је подршка машини за штампање, стога директно представља време производње/шtamпе;
- Софтвер *Materialize Magics* обезбеђује аутоматско генерисање потпорне структуре и омогућава добијање податка за критеријум - број површина дела које захтевају потпорне ослонаце. За ову студију случаја, да би се обезбедила стабилност дела и бољи квалитет дела, потпорна структура је генерисана комбинацијом следећих типова носача: конуси, контуре и блокови;
- Развијено софтверско решење генерише податке за трошкове у фази штампе по свакој изабраној оријентацији.

Бројне вредности параметара, чије су вредности добијене на горе описани начин, искоришћени су за добијање матрице одлучивања.

7.2.3 Избор оптималне оријентације (ОО) и оптималног ранга алтернатива

У процесу доношења одлуке о избору ОО применом метода ВАО примењен је хибридни метод који чине три методе: COPRAS, TOPSIS, VIKOR. Методе COPRAS, TOPSIS и VIKOR су одабране јер омогућавају вишекритеријумско рангирање уз различите приступе: компензациони (TOPSIS), компромисни (VIKOR) и линеарни (COPRAS), што обезбеђује поузданију евалуацију. За израчунавање тежинских коефицијената изабраних критеријума коришћена је метода АНР. Основне карактеристике изабраних метода ВАО приказане су у прилогу 2 ове дисертације.

Тежине критеријума

Тежинске вредности критеријума добијене су експертским проценама. Агрегирање добијених резултата извршено је применом принципа АНР методе а коначне тежинске вредности приказане су у табели 18.

Табела 18: Тежинске вредности критеријума за рангирање алтернатива.

Критеријум	Тежина
Време израде	0.45
Трошкови израде	0.34
Запремина потпорних ослонаца	0.08
Површина ослонаца на радној плочи	0.07
Број површина радног дела са ослонцима	0.06

Матрица одлучивања и резултати рангирања

За избор оптималне оријентације користи се хибридни метод сачињен од три изабране методе (COPRAS, TOPSIS, VIKOR) које су примењене на матрицу одлучивања (табела 19).

Табела 19: Матрица одлучивања.

Критеријуми	Време израде	Трошак израде	Запремина потпорних ослонаца	Површина ослонаца на радној плочи	Број површина радног дела са ослонцима
Тежина / оријентације	0.39	0.34	0.1	0.09	0.08
OR-1	11.09	437.23	31,291.73	2,413.57	24
OR-2	6.49	277.39	23,377.79	3,690.15	17
OR-3	11.29	484.00	65,552.02	4,171.65	19
OR-4	6.16	281.12	35,761.72	3,696.12	10
OR-5	5.29	229.93	16,401.95	3,700.12	12
OR-6	11.13	429.85	23,889.70	2,949.64	22

Рангирање алтернатива применом изабраног хибридног приступа показују резултате приказане у табели 20.

Табела 20: Резултати рангирања алтернатива применом три методе ВАО.

	TOPSIS	VIKOR	COPRAS
OR-1	5	5	5
OR-2	2	3	3
OR-3	6	6	6
OR-4	3	2	2
OR-5	1	1	1
OR-6	4	4	4

На основу анализе добијених резултата могу се извући следећи закључци:

- Оријентација 5 је најбоља у 100% случајева;
- Оријентација 4 је друга најбоља у 66% случајева;
- Оријентација 2 је трећа најбоља у 66% случајева;
- Оријентација 6 је четврта најбоља у 100% случајева;
- Оријентација 1 је пета најбоља у 100% случајева;
- Оријентација 3 је шеста најбоља у 100% случајева.

На основу напред изнетог коначни ранг алтернатива (од најбоље ка најлошијој) је следећи: OR-5 > OR-4 > OR-2 > OR-6 > OR-1 > OR-3.

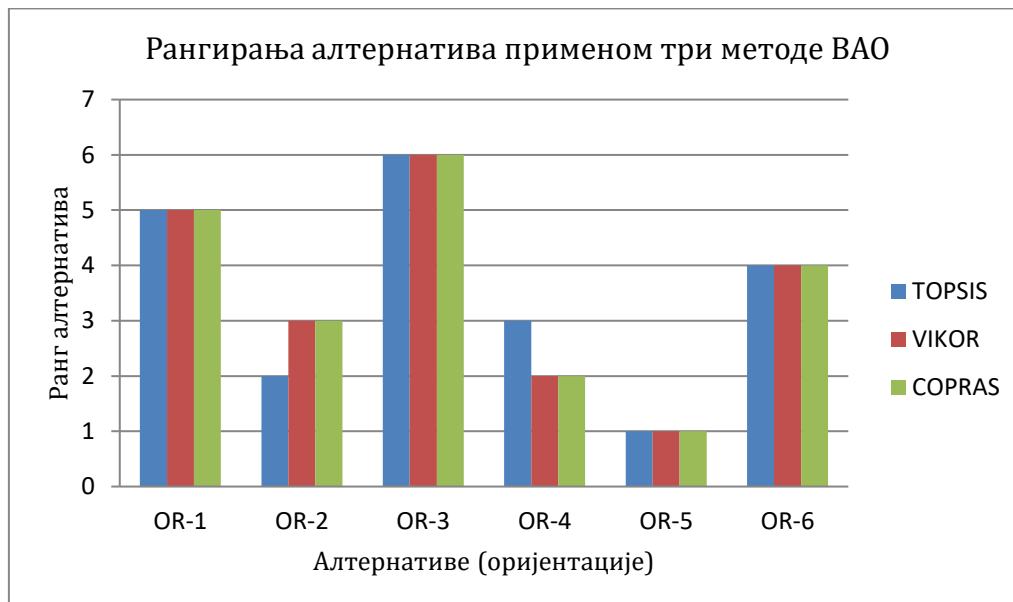
Анализа резултата и компромисно решење

Избор оријентације 5 као оптималне алтернативе је оправдан јер према оба најважнија критеријума (време штампе и трошкови штампе) има најбоље резултате у поређењу са осталим алтернативама.

С обзиром да је метода VIKOR компромисна метода, након анализа услова које мора да испуни оптимална алтернатива, идентификовано је компромисно решење које чине OR-5, OR-4 и OR-2 као оптималне. Посматрајући матрицу одлучивања може се закључити да све три оријентације имају најниже вредности за два најважнија критеријума (време штампе и трошак штампе) чиме се оправдава ово компромисно решење.

Графички приказ резултата

На слици 48 дат је графички приказ коначног ранга алтернатива (од 1 до 6).



Слика 48: Графички приказ коначног ранга алтернатива.

На основу анализе спроведене применом три ВАО методе и израчунатих тежина, утврђено је да је оријентација OR-5 оптимална алтернатива. Њена предност се огледа у најбољим резултатима за најзначајније критеријуме – време и трошак израде. Поред тога, оријентације (OR-5, OR-4 и OR-2) формирају компромисни скуп алтернатива што додатно потврђује поузданост изабране оријентације.

7.3. АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ КОД МЕТОДА ВАО

За потребе ове дисертације анализа осетљивости обухвата следеће анализе:

- *Стабилност решења на промену тежина у критеријумима* – сценарио подразумева варијацију тежина најважнијег критеријума а затим анализу добијених сценарија и стабилности резултата;
- *Осетљивост на уклањање/додавање једне од алтернатива* - испитује се стабилност добијених резултата;
- *Компаративна анализа* добијених резултата методама (COPRAS, TOPSIS, VIKOR) са другим „контролним“ методама (SAW, MOORA, WASPAS) применом Спирмановог коефицијента корелације ради процене сагласности између различитих метода рангирања (да ли све методе воде до сличних или истих редоследа алтернатива).

Анализа осетљивости је кључна за проверу поузданости и стабилности доношења одлука у оквиру вишекритеријумских метода, нарочито у инжењерским применама са критичним последицама избора.

7.3.1 Стабилност решења на промену тежина у критеријумима

Циљ анализе је испитивање стабилности решења при промени тежина најважнијег критеријума (време штампе).

Дефинисана су три сценарија:

- Сценарио 1: смањење тежинске вредности критеријума времена на 0.39, при чему остали најнижи критеријуму пропорционално имају повећање тежинских вредности (0.34, 0.10, 0.09, 0.08);
- Сценарио 2: изједначавање вредности два најважнија критеријума (критеријум времена и трошкова) на вредност 0.34, при чему такође остали критеријуми пропорционално имају повећање тежинских вредности (0.34, 0.12, 0.10, 0.10);
- Сценарио 3: смањење тежинске вредности критеријума времена на начин да значајнији критеријум буде трошкови штампе (0.30 у односу на 0.34), при чему остали најнижи критеријуми пропорционално имају повећање тежинских вредности (0.13, 0.12, 0.11).

Резултати анализе и тумачење резултата

Резултати анализе су приказани у табели 21.

Табела 21: Резултати сценарија за анализу стабилности на промену тежина критеријума.

				сценарио 1			сценарио 2			сценарио 3		
	TOPSIS	VIKOR	COPRAS	TOPSIS	VIKOR	COPRAS	TOPSIS	VIKOR	COPRAS	TOPSIS	VIKOR	COPRAS
OR-1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
OR-2	2	3	3	2	3	3	2	2	3	2	2	3
OR-3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
OR-4	3	2	2	3	2	2	3	3	2	3	3	2
OR-5*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
OR-6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

* - најбоља (оптимална) оријентација

Анализа сценарија је показала да је код сценарија 2 и 3 дошло до промене у рангирању алтернатива за методу VIKOR (друга и треће рангирана алтернатива су измениле места). Ово је оправдано јер треће рангирана алтернатива (OR-2) постаје оптималнија варијанта од алтернативе 3 због критеријума трошкова који кроз сценарио 2 и 3 постаје прво једнако важан а потом и важнији од критеријума времена израде.

Оријентација 4 има укупан трошак израде мањи од алтернативе 2 јер је мања укупна запремина утрошеног материјала (за радни део и за ослонце). Без обзира на насталу промену, као оптимална алтернатива код све три методе је и даље остала оријентација 5.

Закључак

На основу добијених резултата може се констатовати да су резултати стабилни на промену тежина критеријума за две изабране основне методе (TOPSIS и COPRAS) односно да оријентација 5 задржава прво место, док метода VIKOR показују већу осетљивост резултата на промену тежина критеријума.

7.3.2 Осетљивост на уклањање/додавање једне од алтернатива

Циљ анализе је испитивање стабилност добијених резултата на могућност уклањања/додавања једне од алтернатива.

Дефинисан је један сценарио који подразумева уклањање најлошије алтернативе (оријентација 6) након чега је извршена анализа добијених резултата.

Резултати анализе и тумачење резултата

Резултати анализе приказани су у табели 22.

Табела 22: Резултати осетљивост на уклањање/додавање једне од алтернатива.

	Иницијално рангирање алтернатива за 6 оријентација			Рангови алтернатива након уклањања најлошије алтернативе		
	TOPSIS	VIKOR	COPRAS	TOPSIS	VIKOR	COPRAS
OR-1	5	5	5	4	4	4
OR-2	2	3	3	3	3	3
OR-3	6	6	6	5	5	5
OR-4	3	2	2	2	2	2
OR-5*	1	1	1	1	1	1
OR-6	4	4	4			

* - најбоља (оптимална) оријентација

Закључак

На основу добијених резултата може се констатовати да метода TOPSIS није стабилна на промену рангова и да у току процеса одлучивања, у случају појаве сценарија овог типа, треба тежити ка рангирању алтернатива користећи друге расположиве методе. У ту сврху могу да послуже методе VIKOR и COPRAS јер исте јесу стабилне на промену рангова. Оријентација 5 је и даље остала оптимална алтернатива.

7.3.3 Компаративна анализа добијених резултата

Циљ компаративне анализа је поређење иницијалних резултата добијених основним ВАО методама (COPRAS, TOPSIS, VIKOR) са другим, у овом случају контролним, ВАО методама (SAW, MOORA, WASPAS) применом Спирмановог коефицијента корелације (омогућава да се и на малом броју узорака прикаже степен корелације рангова). Вредност коефицијента корелације може да има вредности у распону -1 до 1. Вредност блиска 1 указује на висок степен сагласности у рангирању док вредност блиска -1 указује на низак ниво или непостојање сагласности у резултатима.

Резултати компаративне анализе и тумачење резултата

Компаративне анализе рангова алтернатива добијених основним и контролним ВАО методама приказани су у табели 23. Спирманов коефицијента корелације међу добијеним резултатима (ранговима) приказан је у табели 24.

Табела 23: Компаративна анализа резултата добијених основним и контролним методама ВАО.

	TOPSIS	VIKOR	COPRAS	SAW	MOORA	WASPAS
OR-1	5	5	5	5	5	5
OR-2	2	3	3	2	2	2
OR-3	6	6	6	6	6	6
OR-4	3	2	2	3	3	3
OR-5*	1	1	1	1	1	1
OR-6	4	4	4	4	4	4

* - најбоља (оптимална) оријентација

Табела 24: Топлотна мапа компаративне анализе резултата добијених основним и контролним методама ВАО (Спирманов коефицијент корелације).

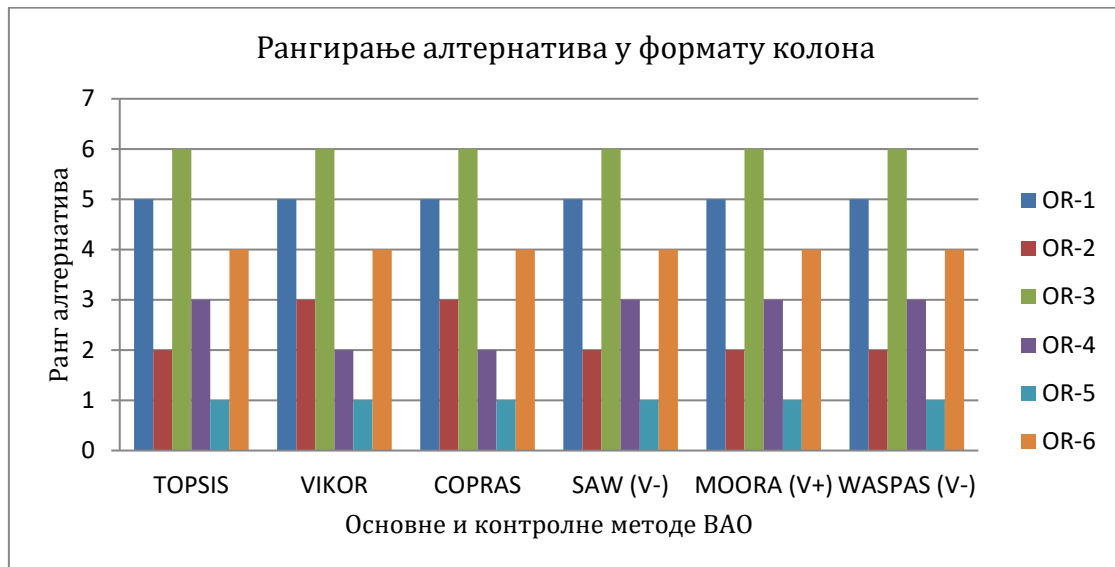
	TOPSIS	VIKOR	COPRAS	SAW	MOORA	WASPAS
TOPSIS	1	0.942857	0.942857	1	1	1
VIKOR		1	1	0.942857	0.942857	0.9428571
COPRAS			1	0.942857	0.942857	0.9428571
SAW				1	1	1
MOORA					1	1
WASPAS						1

Закључак и графички приказ

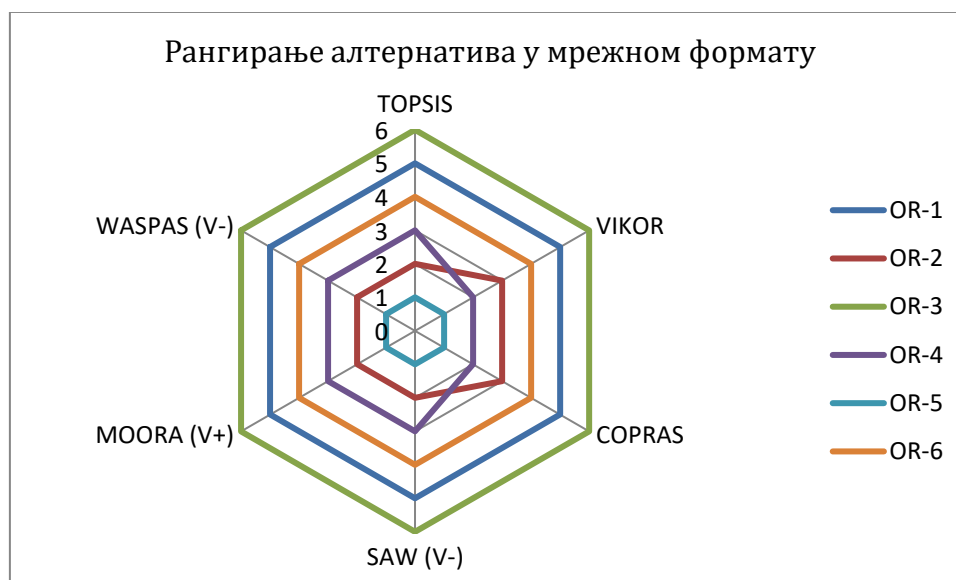
На основу добијених резултата може се констатовати да:

- Све методе ВАО показују високу сагласност (94% - 100%) у рангирању алтернатива, што указује и на добар избор методе нормализације;
- Такође, код контролних метода постоји потпуно поклапање рангова (100%, зелено поље).

Графички приказ рангирања алтернатива за све разматране ВАО методе у формату колона приказно је на слици 49 а у мрежном формату на слици 50. У оба формата оптимална алтернатива има најмање вредности на дијаграмима (мања вредност представља бољи ранг алтернатива) и то је оријентација 5.



Слика 49: Рангирање алтернатива (формат колона).



Слика 50: Рангирање алтернатива (мрежни формат).

Сprovedена анализа осетљивости потврдила је стабилност резултата већине примењених БАО метода, са изузетком методе VIKOR у појединим сценаријима промене тежина. Конзистентност рангирања кроз различите приступе, као и висока корелација међу методама, потврђује поузданост избора оријентације 5 као оптималног решења.

7.4 АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИЈА РЕЗУЛТАТА

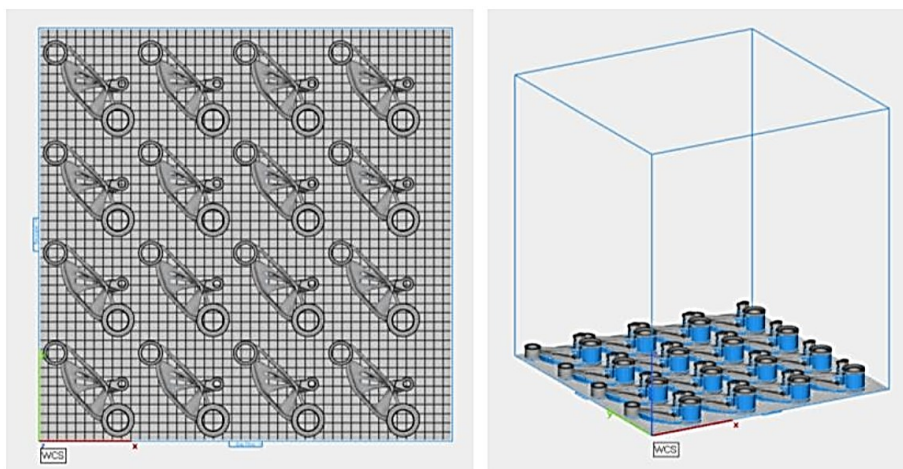
Утицај оријентације дела на ефикасност самог процеса кроз истовремену тополошку оптимизацију и оптималну оријентацију дела на радној плочи машине анализиран је у претходним деловима овог поглавља. Резултати процеса одлучивања о избору оптималне оријентације су показали да је најбоља

оријентација број 5 јер је у односу на преостале оријентације показала најбоље резултате по свим изабраним параметрима:

- захтева најмање време израде и најмањи трошак израде;
- утрошак материјала за додатне ослонце је најмањи;
- обезбеђује најбољи квалитет израде јер има мали број површина које су подложне додатним ослонцима;
- трошкови додатне обраде односно скидања дела са радне плоче су такође мали (оријентација заузима најмању површину на радној плочи).

На основу напред изнетог, у оквиру процеса припреме и избора параметара за производњу (слика 8), конкретно кроз подфазу „припрема модела за изградњу“ у адекватном софтверу оријентисати тополошки оптимизован део на радној плочи на начин да одговара оријентацији број 5. За виртуелно позиционирање коришћен је софтвер *Materialise Magics* који омогућава визуелизацију радне плоче, распоређивање делова и генерисање ослонаца.

У зависности од потребног броја делова за израду и капацитета радне плоче 3D машине, тежити таквом распореду да се изврши сатурација односно потпуна попуна радне плоче машине, слика 51. Јединачни трошкови једног или максималног броја делова, током једне фазе израде, остају непромењени. Софтвер *Materialise Magics* поседује алгоритам који аутоматски врши максималну попуну (сатурацију) радне плоче на начин да се обезбеђује минимално међусобно растојање делова ради избегавања термичког преклапања и адекватног протока инертног гаса у процесу.



Слика 51: Размештај финалне оријентације изабраног дела на радној плочи.

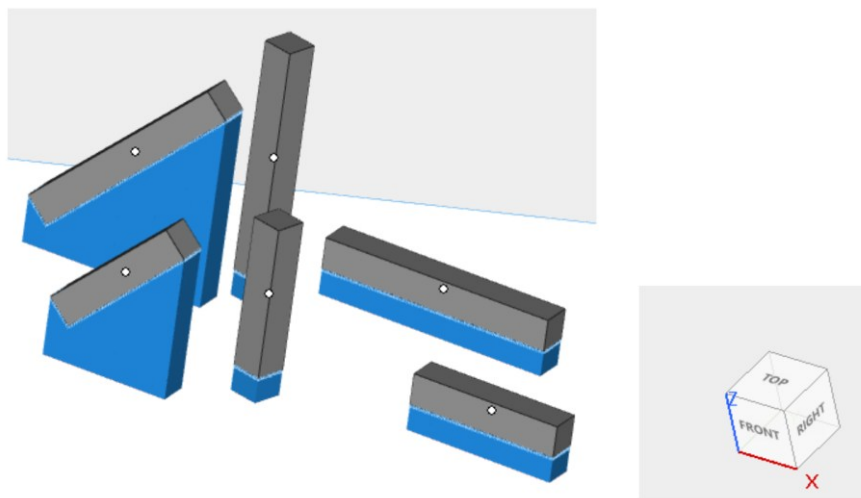
Како би се извршила валидација предложеног оквира за пројектовање производа и процеса, односно потврдио избор оптималне оријентације као коначног решења у циљу задовољења механичких, микроструктурних и димензионих карактеристика, за потребе ове дисертације извршена су експериментална испитивања узорака.

Ови резултати могу послужити као добра основа и база података за поређење са резултатима оптималних оријентација добијених применом предложеног оквира за пројектовање производа и процеса. У наставку су приказани резултати ових испитивања.

7.5 ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА И МИКРОСТРУКТУРЕ УЗОРАКА ЧЕЛИКА MS1

Циљ испитивања је да се код израђених узорка испитају тврдоћа, затезна чврстоћа, жилавост и микроструктура материјала за анализирани део израђен L-PBF адитивном технологијом. Испитивање челика MS1 извршено је на следећим узорцима (слика 52):

- 9 припремака (3 израђена хоризонтално, 3 вертикално и 3 под углом од 45 степени) од челика MS1, димензија 11x11x80 mm, за испитивање затезањем;
- 9 припремака (3 израђена хоризонтално, 3 вертикално и 3 под углом од 45 степени) од челика MS1, димензија 11x11x55 mm, за одређивање енергије удара.



Слика 52: Распоред епрувета на радној плочи у односу на осу изградње.

7.5.1 Резултати и анализа испитивања механичких карактеристика

Експериментални рад обухватио је мерења на узорцима који одговарају хоризонталном, вертикалном и косом правцу градње:

- *Мерење тврдоће:* Тврдоћа је мерена методом Brinell-а (HB 2,5/187,5) према стандарду за мерење тврдоће SRPS EN ISO 6506-1 (Метални материјали – Испитивање тврдоће по Brinellу – Део 1: Методе испитивања), са челичном куглицом пречника 2,5 mm и силом утискивања 1,839 kN;
- *Испитивање затезних карактеристика:* Механичком обрадом достављених припремака израђене су затезне епрувете кружног попречног пресека пречника $d_0 = 6$ mm и почетне мерне дужине $L_0 = 25$ mm. Испитивање затезних својстава извршено је према стандарду SRPS EN ISO 6892-1:2020 (Метални материјали – Испитивање затезањем – Део 1: Метода испитивања на собној температури).
- *Испитивање енергије удара (жилавости)* извршено је методом ударног испитивања по Шарпију, у складу са стандардом SRPS EN ISO 148-1:2017 (Метални материјали — Испитивање ударом Шарпијевим клатном — Део 1: Метода испитивања).

- *Испитивање микроструктуре:* Микроструктура материјала испитана је у уздужном, попречном и косом правцу у односу на правац градње. Узорци за микроструктурну анализу су припремљени по стандардној металографској процедури, брушењем на SiC брусном папиру финоће од P400 до P1200 и полирањем са дијамантским пастама финоће од 7/5 до 1 микрона. Финално полирање је извршено са силицијум оксид суспензијом финоће 0.25 микрона. Металографски узорци су у полираном и нагриженом стању испитани на светлосном микроскопу „Leitz Metalloplan“, који је опремљен камером DFC 295 и софтвером за обраду слике LAS 4.3.1.

Резултати средњих вредности мерења проистекли експерименталним радом приказани су у табели 25. Испитивање механичких карактеристика извршено је на епруветама у почетном „as built“ стању без термичке и механичке обраде.

Табела 25: Механичке карактеристике узорака MS1 у „as built“ стању за различите оријентације изградње.

	хоризонтална (X) оријентација	вертикална (V) оријентација	коса (K) оријентација	врста материјала
	 Оријентација 5	 Оријентација 6	 Оријентација 3	MS1 (мартензитни челик)
Трошкови израде (€)	229.3	429.85	484	
РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ЗАТЕЗНИХ КАРАКТЕРИСТИКА				MS1 затезне карактеристике
Тврдоћа (HV)	340	310	311	33-37 HV5 (325B)
Граница течења Rp0.2 [MPa]	1113	1163	1098	1050±100 MPa (XY) 1000±100 MPa (Z)
Затезна чврстоћа Rm [MPa]	1189	1217	1201	1100±100 MPa (XY) 1100±100 MPa (Z)
Модул еластичности E [GPa]	218	209	206	160±25 GPa (XY) 150±20 GPa (Z),
Дуктилност (издужење при прекиду) A [%]	16.6	14	17.6	(10±4)% (XY) (10±4)% (Z)
Енергија удара (живавост) A [%]	103	102.4	109.4	

Резултати испитивања затезних карактеристика

Резултати испитивања затезних карактеристика указују на следеће закључке:

- Узорци израђени у вертикалном правцу градње имају највећу затезну чврстоћу и границу течења. Ово је битно за делове изложене затезним оптерећењима.
- Узорци изграђени у хоризонталном правцу имају највеће вредности модула еластичности и тврдоће што их чини погодним за примену код делова изложеним хабањима и за круте делове (способност мале деформације под оптерећењем).

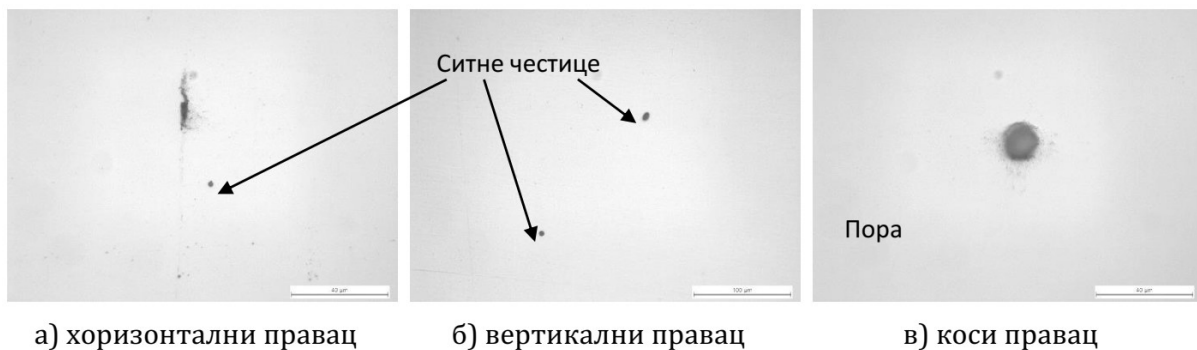
- Узорци израђени у косој оријентацији имају највећу дуктилност и жилавост што их чини погодним за динамичка и ударна оптерећења.

7.5.2 Резултати и анализа испитивања микроструктуре

У овом делу извршиће се приказ и анализа резултата испитивања микроструктуре узорака у полираном и нагриженом стању.

Микроструктура узорака у полираном стању

Микроструктура узорака у полираном стању приказана је на слици 53. У структури материјала су присутне ситне честице, које су равномерно дисперговане у основи метала. Уочено је и присуство мањег броја пора.



Слика 53: Микроструктура узорака у полираном стању: а) хоризонтални, б) вертикални и в) коси правац градње.

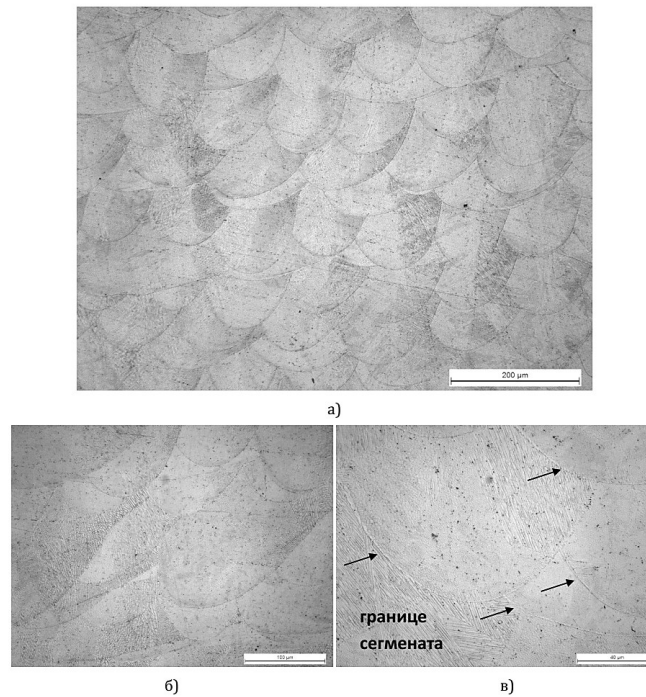
Резултати испитивања микроструктуре узорака у полираном стању

Порозност у структури може да настане због лошег преноса топлоте и недовољног топлења металног праха. Често делују и као места концентрације напона. Нестабилно топлење је више карактеристично за вертикалне оријентације које су и више склоне појави порозности јер поре имају тенденцију да се накупљају дуж граница слојева (Z-правац). Код хоризонталне оријентације порозност је најмања а у случају њене појаве најчешћи узрок су лоше подешени параметри процеса. Делови који имају косу оријентацију најчешће дају компромисна решења са умереном порозношћу.

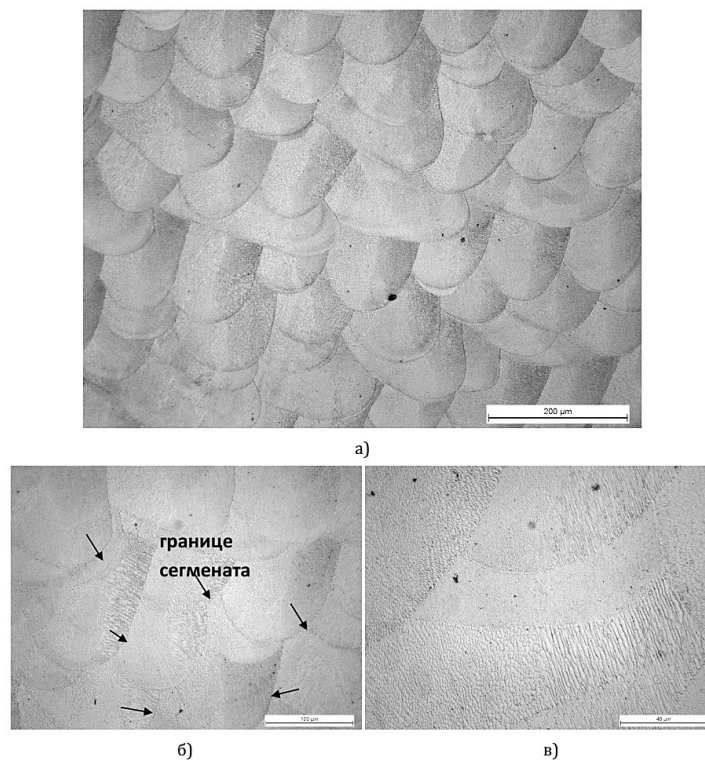
Микроструктура узорака у нагриженом стању

На сликама 54 до 56 приказана је микроструктура узорака у нагриженом стању. Уочено је присуство ламеларних сегмената структуре. Ови сегменти, посматрано у попречном правцу у односу на правац градње, су издуженог елипсастог облика (слика 54а и 54б) и оне представљају трагове ласера, у уздужном правцу у односу на правац градње су у облику полу елипсе (слика 55а и 55б), односно у косом правцу у односу на правац градње су ламеларне структуре (слика 56а и 56б).

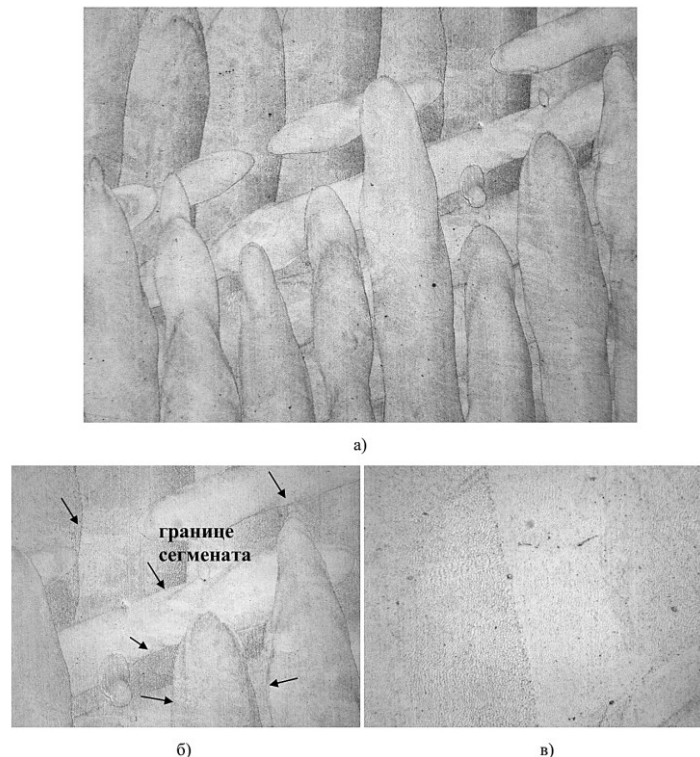
На већим увећањима, унутар појединачних зрна уочљиво је присуство ћелијске субструктуре, која се одликују ћелијама са еквиаксијалном и стубастом морфологијом (слике 54в, 55в и 56в). Без обзира на облик ћелија, основа је чврсти раствор. Међутим, неколико крупних и доста финих честица је присутно у структури. Повремено, уочен је и епитаксијални раст ћелија у суседне области. Структура испитаних узорака одговара типичној структури челика израђеног адитивном L-PBF технологијом (топлење металног праха ласером).



Слика 54: Микроструктура узорка В (вертикална оријентација) у нагриженом стању: (а) и (б) издужени елипсasti сегменти структуре, (в) ћелијска и стубаста морфологија унутар зрна.



Слика 55: Микроструктура узорка К (коса оријентација) у нагриженом стању: (а) и (б) полу елипсasti сегменти структуре, (в) ћелијска и стубаста морфологија различите унутар зрна.



Слика 56: Микроструктура узорка X (хоризонтална оријентација) у нагриженом стању: (а) и (б) ламеларни сегменти структуре, (в) ћелијска и стубаста морфологија различите унутар зрна.

Резултати испитивања микроструктуре узорка у нагриженом стању

Резултати испитивања указују да топлотни ток и ефекат усмеравања зрна имају утицај на микроструктуру и затезне карактеристике на следећи начин:

- Хоризонтална оријентација: у хоризонталном правцу долази до изотропног распрострањања топлоте што ствара финију и равномернију микроструктуру, зрна су усмерена у правцу ласерског скенирања. Ова појава утичу на повећање еластичности (способност материјала да се пластично деформише пре пуцања, односно да више или мање апсорбује енергију у пластичној зони) и жилавости (енергија удара, пукотине имају тежи пут за ширење кроз ситнију и равномернију микроструктуру);
- Вертикална оријентација (Z-правац): топлотни ток је најинтензивнији у правцу изградње (Z-правац) што производи појаву издужених (стубастих) зрна у смеру грађења и појаву анизотропних својстава (различита тврдоћа и чврстоћа у зависности од правца испитивања). Појава издужених зрна ствара слабе тачке у границама слојева и доводи до слабе еластичности и жилавости (пукотине се лакше шире дуж граница слојева и смањују енергију удара). Топлотни ток условљава и појаву одређене кристалографске структуре у правцу грађења (због епитаксијалног раста на претходни слој) што доводи до веће чврстоће у вертикалном правцу.
- Коса оријентација: по питању микроструктуре представља комбинацију хоризонталних и вертикалних карактеристика, по питању затезних карактеристика представља компромис међу оријентацијама, сама оријентација показује умерену анизотропију услед чега има највећу дуктилност и енергију удара.

7.5.3 Анализа резултата испитивања затезних карактеристика и микроструктуре узорака MS1

За доношење коначних закључака о избору оптималне оријентације, поред података о перформансама и трошковима по оријентацијама (приказаним у табели 25) неопходно је анализирати и оптерећења којима је изложен анализирани део. На основу анализе спроведене у студији случаја у питању је аксијално оптерећење које се манифестује кроз затезање и притисно оптерећење.

На основу спроведених испитивања и анализе резултата може се закључити:

- Механичке карактеристике не прате и економске аспекте израде дела. Оријентација 5 која је економски најповољнија нема нужно и најбоље механичке карактеристике;
- Оријентација дела на радној плочи машине треба да буде у правцу доминантног оптерећења при чему су могући и одређени компромиси:
 - Ако је примарни циљ економске природе потребно је изабрати хоризонталну оријентацију јер има најниже трошкове израде, а обезбеђује довољно добру чврстоћу (1189 МПа) за различите примене и има прихватљиву дуктилност (16.6%). Недостаци су у нижој чврстоћи од вертикалне оријентације и слабијој отпорност на оптерећење у Z-правцу.
 - Ако је примарни циљ обезбедити отпорност на аксијална (затезна) оптерећење потребно је изабрати вертикалну оријентацију која пружа највећу чврстоћу за ова оптерећења, уз ограничења која се односе на веће трошкове израде и нижу дуктилност.
- За остваривање баланса између перформанси и трошкова, као и адекватног одговора на могућа динамичка и ударна оптерећења, може се изабрати коса оријентација. Косо оријентисани део има највећу дуктилност (17.6%) и жилавост (109.4 J) – отпорност на удар а чврстоћа (1201 МПа) је близу највеће чврстоће (код вертикалне оријентације). Недостатак се огледа у сложенијој изради и трошковима израде који су већи у односу на хоризонталну и вертикалну оријентацију.

С обзиром да оријентација дела има битну улогу у крајњим карактеристикама квалитета израђеног дела, потребно је још у фази пројектовања размотрити величину и динамику оптерећења дела и сходно напред изнетим закључцима дефинисати оптималну оријентацију.

Резултати мерења су показали да су добијене добре механичке карактеристике дела у “*as built*” стању. Може се констатовати да параметри L-PBF процеса као и оријентација дела на радној плочи утичу на микроструктуру дела и да је потребна њена оптимизација кроз накнадни постпроцесинг ради добијања бољих карактеристика дела. Наведено се односи на поступке оптимизације микроструктуре термичким обрадама (отпуштање, каљење, HIP - Hot Isostatic Pressing) након израде, чиме би се повећале механичке карактеристике дела (чврстоћа, тврдоћа и жилавост), смањила резидуална напрезања, као и настале поре у структури.

Ради међусобног поређења добијених карактеристика предлаже се и спровођење испитивања и са другим врстама металних прахова (316L, Inconel) и формирање

базе података који би послужила ка основа за доношење одлука о избору материјала, адекватних параметара процеса и оријентација при изради делова.

Добијена микроструктура карактерише се типичним обрасцима за L-PBF технологију и оријентација изградње значајно утиче на развој зрна и унутрашњу морфологију. Оптимизација параметара процеса и термичке дораде су неопходни за добијање изотропних особина и побољшање квалитета.

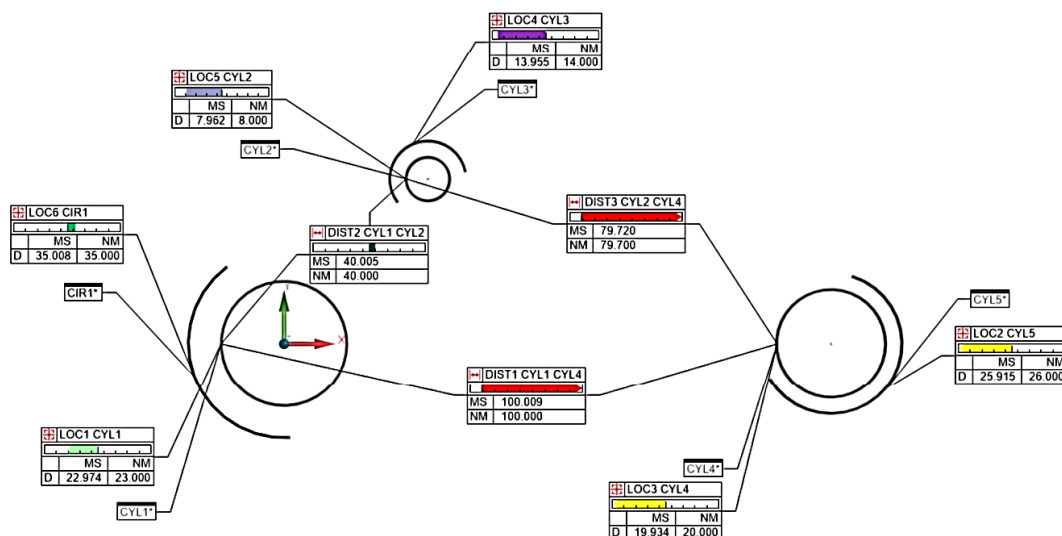
Поред претходно изнетих карактеристика, потребно је извршити и мерење димензионих карактеристика израђеног дела и његово поређење са иницијалним мерама (CAD модел) ради доношења закључка о могућим одступањима.

7.6 ИСПИТИВАЊЕ ДИМЕНЗИОНИХ КАРАКТЕРИСТИКА УЗОРАКА

Контрола квалитета израде дела мерењем димензионих (номиналних) мера извршена је коришћењем координатне мерне машине DEA EPSILON 2304. Геометријске мере (нормалност, кружност) нису биле предмет анализе и мерења.

У разматраним примерима иницијални CAD модел није имао урачунате димензионе компензације. Препорука произвођача је да за MS1 метални прах скупљање износи +/- 0.2% за мере веће од 100 mm, односно +/- 0.1% за мере мање од 100 mm. Први разлог за не урачунавање компензација код CAD модела је чињеница да је фокус експерименталних истраживања био на тополошкој оптимизацији и оријентацији делова на радној плочи. Други разлог је и чињеница да се не може са јасном прецизношћу одредити на којим мерама ће доћи до могућег скупљања дела услед топлотних деформација. Ова анализа треба да послужи као основ за будуће закључивање у смислу потребних компензација у погледу димензија.


На слици 57 (генерисана софтвером у координатној мерној машини) приказане су димензије дела (кружни отвори и линијска растојања) које су анализиране у процесу контроле квалитета.



Слика 57: Димензионе вредности (пречници и растојања) узорка.

Изабране димензионе мере су измерене за све три оријентације (хоризонтална, вертикална и коса) и приказане у табели 26.

Табела 26: Међусобно поређење димензионих вредности (пречници и растојања) узорака у хоризонталном, вертикалном и косом правцу градње.

Називна мера (mm)	Дефинисане толеранције	Хоризонталн и део (mm) 	Вертикални део (mm) 	Коси део (mm) 
Пречник: 20 mm	$20^{+0.05}$ (19.950-20.050)	19.960 +	19.936 -	19.949 -
Пречник: 8 mm	$8^{+0.04}$ (7.960-8.040)	7.962 +	8.011 +	7.956 -
Осно растојање: 100 mm	$100^{+0.2}$ (99.800-100.200)	100.009 +	99.774 -	100.193 +
Осно растојање: 79.7 mm	-	79.720	79.530	79.766

Анализа резултата мерења димензионих карактеристика узорака

Анализа резултата мерења (пречника и осних растојања) указују да тачност номиналних мера варира у зависности од њихове оријентације (хоризонтална, вертикална, коса) а услед појаве ефеката „степеница“, топлотне деформације и постављања ослонаца. Општи закључци који се могу извести на основу напред изнетог (иако резултати могу да варирају због услова мерење и прецизности мерне машине, тако и од услова израде штампе) указују на следеће:

- Најтачније димензионе карактеристике добијају се приликом хоризонталне оријентације (x-y оса), јер су слојеви изградње равномернији и изграђују се у равни оптималног ласерског синтеровања.
- Хоризонтална оријентација има већу стабилност дуж x-y осе, а могућа скраћења/издужења могу да настану дуж z-осе услед ефекта „степеница“;
- Избежавати косу оријентацију. Највеће варијација у димензијама настају при угловима од 45 степени а главни узроци су комбинована деформација (комбинација негативних утицаја по хоризонталној и вертикалној оси). Такође, могући су и проблеми приликом мерења услед грешака при позиционирању мерне сонде што додатно утиче на тачност.

Може се закључити да за димензије мање од 100 mm, и препоручене константне параметре процеса, није потребно радити компензације у димензијама основног CAD модела, под условом да се део оријентисе на радној плочи у хоризонталној (x-y) равни.

Закључак који указује да се најбоље димензионе карактеристике добијају приликом хоризонталне оријентације се поклапа са резултатима избора најбоље оријентације (након истовремене оптимизације топологије и оријентације) а то је хоризонтална оријентација (оријентација број 5 у студији случаја). Испитивањем механичких карактеристика, микроструктуре и димензионих карактеристика узорака израђених адитивном L-PBF методом потврђено је да оријентација изградње утиче на резултујућа својства. Подаци добијени овом анализом представљају основу за квалитетније планирање адитивне производње и избор оптималних параметара у будућим применама.

8. ЗАКЉУЧАК

Примена адитивних технологија у различитим гранама индустрије, за потребе производње сложених и комплексних делова, има све већу заступљеност. Код одређеног броја компанија оријентисаних на класичне производне технологије постоји сумња у оправданост примене ових технологија са различитих аспеката.

Многе индустрије приступају адитивним технологијама као покушај директне замене за конвенционалне производне технологије. Међутим, овај приступ не обезбеђује у потпуности све бенефите и јединствене могућности које адитивне технологије нуде.

Један од главних циљева дисертације био је да се кроз практичну анализу и примену покажу предности и специфичности адитивних технологија, са циљем отклањања сумњи у њихову примену у индустријском контексту.

Као конкретан пример разматрана је адитивна L-PBF технологија (спајање металних прахова ласером) која омогућава производњу готових делова од метала. Неки од кључних доприноса дисертације наведени су у наставку.

Развијен је оптимални оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије који омогућава примену одређених оптимизационих техника и метода у циљу обезбеђивања ефикасности и економичности у приступу чиме је проширен, до сада заступљен, општи приступ у процесу пројектовања. Кроз студију случаја извршено је тестирање и потврђени су позитивни ефекти у његовој примени.

Развијен је, тестиран и потврђен нови модел трошкова (конкретно за изабрану адитивну L-PBF технологију) који је јасно рашчланио и идентификовао све генераторе трошкова по фазама производње, што је омогућило њихову даљу анализу и оптимизацију. Модел трошкова је показао да различите оријентације дела на радној плочи значајно утичу на укупне трошкове. Уз одређене модификације нови модел трошкова може наћи примену и код других развијених адитивних технологија што се може означити и као један од будућих праваца истраживања.

У циљу смањења масе изабраног дела спроведена је оптимизација топологије. За анализу структуре оптерећења дела пре и после оптимизације коришћена је метода коначних елемената. Након анализе могућих оријентација на радној плочи изабран је концепт препознавања кључних облика (feature recognition) и исти примењен кроз студију случаја. Истовременом оптимизацијом топологије и оријентације на радној плочи постигнут је синергетски ефекат у коначном исходу (смањење трошкова производње).

Такође, у оквиру студије случаја извршено је и мерење механичких карактеристика (тврдоћа, затезна чврстоћа, модул еластичности, издужење, енергија удара), микроструктуре тополошки оптимизованог дела и димензионих карактеристика за одређене оријентације дела на радној плочи машине на начин како је то дефинисано у самој фази пројектовања производа и процеса. Утврђена је директна зависност између оријентације дела и одређених механичких и димензионих карактеристика. Неопходно је утврђену законитост користити у даљем раду у процесу оријентације делова на радној плочи 3D машине.

Спроведено истраживање има и неколико ограничења: 1) истраживање је рађено само за једну врсту материјала (мартензитни челик – MS1) и није вршено поређења са другим материјалима (металним праховима који се могу користи на изабраној машини за штампање: 316L, легуре AL и Ti), 2) параметри процеса (брзина и снага ласера, дебљина слоја, начин скенирања) су били фиксни и није анализиран утицај промена параметара на карактеристике дела, 3) механичке особине израђеног дела мерене су само у израђеном („as built“) стању и исте нису упоређиване са резултатима након могућих додатних постпроцесних активности (отпуштање, каљење и друге активности), 4) тестирање модела трошкова није извршено на различитим геометријама и материјалима ради упоредних анализа у циљу додатних оптимизација, као ни у индустријским условима употребе. Наведена ограничења нису утицала на крајњи исход анализа и мерења.

На почетку истраживања дефинисане су полазне хипотезе чија је анализа испуњености дата у наставку.

Х1: Избор адекватних параметара и карактеристика дела у фази планирања и припреме адитивне производње може се извршити квантитативним методама и техникама.

У фази планирања адитивне производње неопходно је извршити избор кључних параметара битних за процес доношења одлуке (трошкови, време израде, карактеристике оријентација дела). Доношење адекватне одлуке може се решити применом одређених метода вишекритеријумске анализе, а најпогодније је кроз хибридни приступ, што је у овој дисертацији и успешно извршено применом АНР и метода ВАО (TOPSIS, COPRAS, VIKOR), уз анализу осетљивости и високу сагласност резултата. Стога се хипотеза сматра доказаном.

Х2: Могуће је применити тополошке оптимизационе методе за утврђивање оптималног положаја предмета израде дела на радној површини са циљем постизања дефинисаних (задатих) карактеристика дела

Тополошка оптимизација је процес који применом адекватних алгоритамских решења врши смањивање масе дела без утицаја на његове механичке карактеристике. На овај начин добијају се делови изузетно сложене геометрије. Различитим оријентацијама претходно тополошки оптимизованог дела на радној плочи машине утиче се на трошкове израде дела као и на механичке карактеристике. Резултати из спроведене студије случаја показали су да су као крајњи резултат добијене задовољавајуће механичке карактеристике на изабраном делу чиме је ова хипотеза потврђена.

Х3: Могуће је развити модел трошкова за L-PBF методу спајање металног праха ласером.

На основу анализе и синтезе претходно развијених модела трошкова дефинисан је свеобухватни модел (кроз математичку формализацију и софтверско решење) који на најбољи начин репрезентује све фазе адитивног процеса и са њима повезане трошкове. На овај начин постављена хипотеза је доказана.

Х4: Методе и технике у пројектовању и производњи металних делова класичним субтрактивним методама могу бити унапређене применом савремених адитивних технологија и метода производње у погледу ефикасности, економичности и побољшања квалитета.

Указано је да технике адитивне производње неоспорно пружају знатно више позитивних елемената у производњи делова од метала у односу на класичне (субтрактивне методе). Адитивна технологија „додавања“ материјала (на местима где је потребно и колико је потребно) пружа јасну предност са аспекта технолошког поступка и потрошње материјала у односу на класичну субтрактивну технологију (одузимање-скидање материјала и самим тим стварање непотребног шкарта). Анализом различитих сценарија примене објашњена је ефикасност и економичност у примени адитивне L-PBF методе и исто доказано поређењем трошкова израде дела класичним и адитивним путем. Анализом осетљивости на промене одређених параметара указано је на директну зависност укупних трошкова на варијације у њиховим вредностима. Постављена хипотеза је на овај начин и доказана.

Аутоматизација активности постпроцесинга као и аутоматизација манипулације и пречишћавања металног праха може значајно да смањи учешће радне снаге у овим физички захтевним пословима, унапреди безбедност и здравље на раду, а последично има утицај и на мање укупне трошкове. Будућност у примени L-PBF технологије налази се у потпуној аутоматизацији процеса и интелигентној оптимизацији.

На основу спроведеног истраживања и добијених резултата може се закључити да је адитивна L-PBF технологија применљива као ефикасна и економична алтернатива за израду металних делова сложене геометрије. Развијени модели у овој дисертацији за пројектовање производа и процеса, односно оптимизацију и анализу трошкова адитивне производње пружају основу за даљу примену у различитим индустријским контекстима. Предложени оквир је показао потенцијал да унапреди процес доношења одлука, смањи трошкове и осигура квалитет. Иако постоје одређена ограничења, резултати указују на значајан потенцијал за даљи развој и широку примену у адитивној производњи.

Даљи правци истраживања треба да буду усмерени у неколико праваца:

- примена и других оптимизационих метода (израда делова различитих унутрашњих структура, консолидација више делова применом интегрисаног приступа);
 - извршити тестирање модела трошкова кроз примену различитих материјала и геометрија;
 - укључити параметре процеса у анализе и истражити њихов утицај на квалитет производа;
 - развој модела за мониторинг процеса израде дела у реалном времену у циљу формирања затвореног процеса контроле и управљања;
 - развој сложених алгоритама за оптимизацију и контролу процеса у реалном времену ради детекције аномалија и грешака (вештачком интелигенцијом генерисана алгоритамска решења, примена машинског учења);
 - кроз фазе израде и постпроцесинга истражити могућност комбинације адитивне L-PBF технологије са CNC машинама (хибридни приступ) ради потребних дорада и унапређења квалитета израђених делова.
- Неопходно је спровести и анализу утицаја примене адитивних технологија на заштиту животне средине, енергетску одрживост и размотрити могућност да АТ постане део зелене агенде у развоју и иновацијама.

ПРИЛОГ 1: Основне карактеристике изабраних метода ВАО

АНР - Аналитичко хијерархијски процес

Када је реч о методи АНР аутори (Zhou и др., 2020) објашњавају да се већина других аутора определила за ову методу због њене способности да на једноставан начин узме у обзир и квантитативне и квалитативне податке у процесу доношења одлука, као и мерење конзистентности матрице поређења по паровима што помаже минимизирању у недоследности доносилаца одлука. Са способношћу декомпоновања проблема на више хијерархијских нивоа АНР је структурирани алат за подршку одлучивању који се може користити за решавање сложених проблема одлучивања.

У оквиру математичког прорачуна који прати ову методу, АНР разматра приоритете сваког критеријума, (Sari, 2021). У оквиру хибридног приступа, ова метода се претежно користи за процењивање релативне важности изабраних критеријума.

За потребе ове дисертације метода АНР је искоришћена за процењивање релативне важности критеријума оријентације дела на радној површини машине у оквиру адитивне производње. У процени је учествовало укупно 6 експерата.

За међусобно поређење критеријума и конструкцију матрице поређења по паровима користи се Saati-јева скала дефинисана на интервалу [1-9]. Да би се проверила конзистентност добијених резултата (преференција), АНР метода израчунава степен конзистентности (CI), који би требало да буде мањи од 0,1 у случају конзистентности, у супротном, вредност преференција треба додатно проверавати (Safian и Nawawi, 2011).

Степен конзистентности (CR) се рачуна по формули: $CR = CI/RI$.

Случајни индекс RI се рачуна на основу броја критеријума и табеле

Број критеријума	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

Индекс конзистентности (CI) се рачуна по формули: $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, где је λ_{\max} – максимална сопствена вредност матрице поређења (за λ_{\max} ближе броју n , мања је неконзистентност).

TOPSIS – Техника за одређивање приоритета на основу сличности са идеалним решењем

У стручној литератури метода TOPSIS је највише заступљена и анализирана метода, посебно са аспекта процеса нормализације вредности. Метода се заснива на концепту да оптимална алтернатива има најмању Еуклидску удаљеност од позитивно идеалног решења и највећу удаљеност од негативно идеалног решења. Оба решења (позитивна и негативна) су хипотетичка решења за које вредности атрибута имају најпожељније или најмање пожељне вредности у односу на друге критеријуме. Најбоље рангирано решење максимизира критеријуме користи и минимизира критеријуме трошкова, (Mukhametzyanov и Ратићар, 2018) (Madić и др., 2015) и (Ратићар, 2018). Методу карактерише једноставност и способност решавања проблема без обзира на број критеријума и алтернатива, (Sari, 2021).

Метода TOPSIS тежи универзалности у избору алтернатива (за потребе адитивних технологија) и повезује евалуацију алтернатива са њиховим карактеристикама и предностима (Sartini и др., 2023).

Корак 1: Дефинисање матрице одлучивања

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Корак 2: Нормализација матрице одлучивања

У раду (Sarrafi и др., 2024) предложена је нормализација векторског типа. У већем броју других радова који анализирају методу TOPSIS такође је предложен овај тип нормализације као најоптималнији.

$$r_{ij}(x) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n.$$

Корак 3: Дефинисање отежане матрице одлучивања (множење нормализованих вредности из претходног корака са тежинским коефицијентима критеријума)

$$V_{ij} = w_j * r_{ij}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n.$$

Корак 4: Израчунавање позитивног и негативног идеалног решења

$$A^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \text{ где је } V_j^+ \\ = \{ \max(V_{ij}) \text{ за бенефитни тип; } \min(V_{ij}) \text{ за трошковни тип} \}$$

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \text{ где је } V_j^- \\ = \{ \min(V_{ij}) \text{ за бенефитни тип; } \max(V_{ij}) \text{ за трошковни тип} \}$$

Корак 5: Израчунавање растојања свих вредности из отежане матрице одлучивања од позитивног и негативног идеалног решења

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2}, \quad i = 1, \dots, m$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}, \quad i = 1, \dots, m$$

Корак 6: Израчунавање релативне близине алтернатива.

Вредности релативних близина се крећу у границама [0-1] и могу да се поклапају са овим граничним вредностима што представља и поклапање са +/- идеалним решењима. Рангирање алтернатива се врши према опадајућим вредностима.

$$C_i^- = \frac{S_j^-}{S_i^+ + S_j^-}, \quad i = 1, \dots, m$$

VIKOR – Вишекритеријумско компромисно рангирање

Метода VIKOR рангира алтернативе и одређује оптимално решење упоређивањем алтернатива у односу на меру блискости идеалној алтернативи. Ова метода је погодна за проблеме доношења одлука у којима преовладавају атрибути квантитативне природе, на основу (Zhou и др., 2020) и (Sari, 2021). Даље, у раду (Sari, 2021) се наводи да оно што VIKOR чини једном од популарнијих метода у концепту ВКО јесте једноставност алгоритма и способност добијања приближно тачних резултати.

У раду (Milovanović и др., 2024) је наглашено да је ова метода погодна за употребу јер је мање сложена за примену од других, метода је стабилна на промене одређених параметара а слични резултати се добијају применом сложенијих метода (у случају наведеног рада поређење је извршено са методом ELECTRE).

Корак 1: Дефинисање матрице одлучивања

$$X = [f_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix}$$

Корак 2: Одређивање минималних и максималних вредности из матрице одлучивања према формулама:

$$f_j^* = \max_i f_{ij}, \quad f_j^- = \min_i f_{ij}, \quad \dots \quad \text{за профитни тип критеријума}$$

$$f_j^* = \min_i f_{ij}, \quad f_j^- = \max_i f_{ij}, \quad \dots \quad \text{за трошковни тип критеријума}$$

Корак 3: Одређивање две метрике или две ранг листе: S_i – мера одступања као максимизација групне корисности и R_i – мера одступања као максималног растојања алтернативе од идеалне.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)$$

$$R_i = \max_j [w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)]$$

Корак 4: Дефинисање вредности компромисне ранг листе (представља линеарну комбинацију претходне две ранг листе)

$$Q_i = v (S_i - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v) (R_i - R^*) / (R^- - R^*)$$

$$\text{где је: } S^- = \min_i S_i, \quad S^* = \max_i S_i, \quad R^- = \min_i R_i, \quad R^* = \max_i R_i,$$

Параметар v се зове тежина задовољења стратегија и у компромисном случају има вредност 0.5. Овај параметар се иначе рачуна по формули: $v = (n+1)/2n$.

Корак 5: Рангирање алтернатива према вредностима Q_i . Оптимална алтернатива има најнижу вредност.

У случају да вредности за Q_i износе 0 односно 1 та решења се поклапају са позитивним идеалним и негативним идеалним решењем.

Корак 6. Провера да ли је најбоља алтернатива уједно и оптимална алтернатива.

Алтернатива која је на првом месту, уједно је и оптимална, ако задовољава следеће карактеристике: 1) има „довољну предност“ над алтернативом на следећој позицији, 2) са променом вредности параметра ν показује „довољну стабилност“.

Довољна предност се рачуна као разлика вредности за Q , односно према формули: Q (друга алтернатива) - Q (прва алтернатива) $\geq \min$ ((0.25; (1/1-број алтернатива))).

За „довољну стабилност“ прва алтернатива мора да испуни бар један од следећа три услова: 1) прву позицију према S листи, 2) прву позицију према R листи, 3) прву позицију за Q када коефицијент ν узима вредности 0.25 и 0.75.

Закључивање у вези са оптималним и компромисним решењима:

- Ако прва алтернатива не испуни ни први ни други услов, тада се формира компромисно решење које чини прва и друга најбоља алтернатива;
- Ако се не испуни други услов, онда је друга најбоља алтернатива уједно и оптимална (бира се као компромисно решење);
- Ако се не испуни први услов, тада се формира компромисна ранг листа која садржи све алтернативе до алтернативе која испуњава услов да прва алтернатива нема довољну предност над том алтернативом.

COPRAS (Complex Proportional Assessment Methods) – комплексна пропорционална процена

Метода COPRAS користи математички апарат којим се дефинише степен корисности разматраних алтернатива. У склопу математичког прорачуна рачуна се позитивно-идеално и негативно-идеално решење. Кораци који се спроводе у оквиру методе COPRAS су следећи, (Madić и др., 2015) и (Więckowski и др., 2024):

Корак 1: Дефинисање матрице одлучивања

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Корак 2: Нормализација матрице одлучивања (Więckowski и др., 2024) предложио је нормализацију типа SUM

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

Корак 3: Дефинисање отежане матрице одлучивања (нормализоване вредности из корака 2 множе се са тежинским коефицијентима критеријума)

$$V_{ij} = r_{ij} * w_j$$

Корак 4: Добијање сума за отежане нормализоване вредности (за трошковне и бенефитне критеријуме)

$$S_{+i} = \sum_{j=k+1}^k V_{ij} \quad S_{-i} = \sum_{j=k+1}^n V_{ij}$$

Корак 5: Израчунавање функције корисности

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} * \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} * \sum_{i=1}^m \left(\frac{S_{-min}}{S_{-i}}\right)}$$

Корак 6: Израчунавање степена корисности алтернатива на основу којег се врши рангирање (алтернатива са највећом вредношћу степена корисности је уједно и оптимална алтернатива)

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_i^{max}} * 100\%$$

Основне карактеристике „контролних“ метода ВАО (SAW, MOORA, WASPAS)

У процесу анализе осетљивости за компаративну анализу резултата добијених методама (COPRAS, TOPSIS, VIKOR) као „контролне“ методе користиће се методе (SAW, MOORA, WASPAS). У наставку ће се презентовати основне поставке ових метода, (Lubis и др., 2020), (Jayant и Singh, 2018), (Manurung и др., 2021).

Код све три „контролне“ методе Корак 1 (Дефинисање матрице одлучивања), је заједнички.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Такође, Корак 2 (Нормализација матрице одлучивања) је заједнички али у својој иницијалној поставци методе користе различите методе нормализације:

SAW и WASPAS – користе MIN-MAX тип нормализације:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}}, & \text{за бенефитни тип критеријума} \\ \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}}, & \text{за трошковни тип критеријума} \end{cases}$$

MOORA – користи нормализацију векторског типа

$$r_{ij}(x) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n.$$

Корак 3: Израчунавање вредности алтернатива:

SAW - нормализоване вредности из корака 2 множе се са тежинским коефицијентима критеријума. Алтернатива са највећом вредношћу је уједно и оптимална алтернатива.

$$V_{ij} = w_j * r_{ij}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n.$$

MOORA – израчунавање нормализоване оцене алтернатива врши се према формули:

$$y_i = \sum_{j=1}^g w_j * x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n w_j * x_{ij}^*$$

x_{ij}^* – нормализована вредност, w_j – тежински коефицијент, g – број максимизационих критеријума, $n - g$ (број минимизационих критеријума).

Најбоља (оптимална) алтернатива је она која има највећу вредност нормализоване оцене.

WASPAS – збирни критеријум оптималности је комбинација два критеријума и рачуна се према формули:

$$Q_i = \lambda * \sum_{j=1}^n r_{ij} * w_j + (1 - \lambda) * \prod_{j=1}^n r_{ij}^{w_j},$$

w_j – тежински коефицијент, λ – параметар који узима вредности од 0 до 1.

Најбоље рангирана алтернатива је она са највећом вредношћу збирног критеријума. За параметар $\lambda=0$ метода WASPAS је иста као метода WPM (Weighted Product Method), односно за вредност $\lambda=1$ одговара методи WSM (Weighted Sum Method).

ПРИЛОГ 2: СОФТВЕРСКИ КОД (VISUAL BASIC CODE FOR EXCELL)**КОРИСНИЧКА ФОРМА (UserForm1)**

```
Sub Reset()  
  
Dim iRow As ArrayList  
Dim tbl As ListObject  
Set iRow = New ArrayList  
  
Set tbl = Worksheets("Geometrije").ListObjects("Geometrije")  
iRow.Add tbl.Range.Rows.Count ' identifying the last row  
Set tbl = Worksheets("Masine").ListObjects("Masine")  
iRow.Add tbl.Range.Rows.Count ' identifying the last row  
Set tbl = Worksheets("Materijali").ListObjects("Gasovi")  
iRow.Add tbl.Range.Rows.Count ' identifying the last row  
Set tbl = Worksheets("Materijali").ListObjects("Celici")  
iRow.Add tbl.Range.Rows.Count ' identifying the last row  
Set tbl = Worksheets("Operacije").ListObjects("Operacije")  
iRow.Add tbl.Range.Rows.Count ' identifying the last row  
Set tbl = Worksheets("Geometrije").ListObjects(1)  
  
With UserForm1  
    .TextBox1.Value = ""  
    .TextBox2.Value = ""  
    .TextBox3.Value = ""  
    .TextBox4.Value = ""  
    .TextBox5.Value = ""  
    .TextBox6.Value = ""  
    .TextBox7.Value = ""  
    .TextBox8.Value = ""  
    .TextBox9.Value = ""  
    .TextBox10.Value = ""  
    .TextBox11.Value = ""  
    .TextBox12.Value = ""  
    .TextBox13.Value = ""  
    .TextBox14.Value = ""  
    .TextBox15.Value = ""  
    .TextBox18.Value = ""  
    .TextBox19.Value = ""  
    .TextBox20.Value = ""  
    .TextBox25.Value = ""  
    .TextBox26.Value = ""  
    .TextBox27.Value = ""  
    .TextBox28.Value = ""  
    .TextBox29.Value = ""  
    .TextBox30.Value = ""  
    .TextBox31.Value = ""
```

```
.SelRed = ""
.Masine_dummy = ""
.MatSelRed = ""
.PrahSelRed = ""
.OperSelRed.Text = ""
.ComboBox1.Value = ""
.SelRed.Value = 0
If iRow.Count > 0 Then
    .ListBox1.RowSource = "Geometrije!A5:M" & iRow(0) + 3
    .ListBox1.Value = ""
    .ListBox2.RowSource = "Masine!A5:M" & iRow(1) + 3
    .ListBox2.Value = ""
    .ListBox3.RowSource = "Materijali!A5:C" & iRow(2) + 3
    .ListBox3.Value = ""
    .ListBox4.RowSource = "Materijali!U5:X" & iRow(3) + 3
    .ListBox4.Value = ""
    .ListBox5.RowSource = "Operacije!A5:M" & iRow(4) + 3
    .ListBox5.Value = ""
Else
    .ListBox1.RowSource = "Geometrije!A5:M5"
    .ListBox2.RowSource = "Masine!A5:M5"
    .ListBox3.RowSource = "Materijali!A5:C5"
    .ListBox4.RowSource = "Materijali!U5:X5"
    .ListBox5.RowSource = "Operacije!A5:M5"
End If
End With
' UserForm1.CommandButton1.Enabled = False
' UserForm1.CommandButton6.Enabled = False
' UserForm1.CommandButton15.Enabled = False
' UserForm1.CommandButton21.Enabled = False
' UserForm1.CommandButton24.Enabled = False
```

End Sub

```
Private Sub CommandButton1_Click()
' Geometrija Unos podataka

Dim iRow As Long
Dim sh As Worksheet
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Geometrije")
If UserForm1.SelRed.Value = 0 Then
    iRow = [counta(Geometrije!B:B)] + 3
Else
    iRow = UserForm1.SelRed.Value
    UserForm1.SelRed.Text = 0
End If

With sh
    .Cells(iRow, 1).Formula = "=Row()-4"
```

```
.Cells(iRow, 2) = UserForm1.TextBox1.Value  
.Cells(iRow, 3) = UserForm1.TextBox2.Value  
.Cells(iRow, 4) = UserForm1.TextBox3.Value  
.Cells(iRow, 5) = UserForm1.TextBox4.Value  
.Cells(iRow, 6) = UserForm1.TextBox5.Value  
.Cells(iRow, 7) = UserForm1.TextBox6.Value  
.Cells(iRow, 8) = UserForm1.TextBox7.Value  
End With
```

```
Call Reset
```

```
End Sub
```

```
Private Sub GeometrijeDodaj_Click()  
' Geometrije dodavanje nove Geometrije
```

```
Dim iRow As Long  
Dim sh As Worksheet  
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Geometrije")  
iRow = [counta(Geometrije!B:B)] + 3
```

```
With sh  
    .Cells(iRow, 1).Formula = "=Row()-4"  
    .Cells(iRow, 2) = "Nova Geometrija "  
End With  
Call Reset  
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton13_Click()  
Dim sh As Worksheet  
Dim iRow As Integer  
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Operacije")  
iRow = Val(UserForm1.ListBox5.Text) + 4
```

```
If iRow > 4 Then  
    sh.Rows(iRow).Delete  
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton14_Click()
```

```
Dim iRow As Long  
Dim sh As Worksheet  
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Operacije")  
If Val(UserForm1.ListBox5.Text) <> 0 Then
```

```
    iRow = Val(UserForm1.ListBox5.Text) + 4  
    With UserForm1
```

```
UserForm1.OperSelRed.Text = iRow - 4
.TextBox18.Text = sh.Cells(iRow, 2)
.TextBox19.Text = sh.Cells(iRow, 3)
.TextBox20.Text = sh.Cells(iRow, 4)
End With
End If

End Sub

Private Sub CommandButton15_Click()

Dim iRow As Long
Dim sh As Worksheet
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Operacije")
If Val(UserForm1.OperSelRed.Value) = 0 Then
    iRow = [counta(Operacije!B:B)] + 4
Else
    iRow = Val(UserForm1.OperSelRed.Value) + 4
    UserForm1.OperSelRed.Text = 0
End If
With sh
    .Cells(iRow, 1).Formula = "=IFERROR(VALUE(R[-1]C),0)+1"
    .Cells(iRow, 2) = UserForm1.TextBox18.Value
    .Cells(iRow, 3) = UserForm1.TextBox19.Value
    .Cells(iRow, 4) = UserForm1.TextBox20.Value
End With

Call Reset

End Sub

Private Sub CommandButton17_Click()
    Dim msgValue As VbMsgBoxResult

    msgValue = MsgBox("Da li zelite da restujete podatke?", vbYesNo + vbInformation,
"Potvrda brisanja")

    If msgValue = vbNo Then Exit Sub

    Call Reset

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()
    UserForm1.Hide
End Sub

Private Sub CommandButton21_Click()
```

```
Dim iRow As Long
Dim sh As Worksheet
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Materijali")
If Val(UserForm1.PrahSelRed.Value) = 0 Then
    iRow = [counta(Materijali!V:V)] + 4
Else
    iRow = Val(UserForm1.PrahSelRed.Value)
    UserForm1.PrahSelRed.Text = 0
End If
```

```
With sh
    .Cells(iRow, 22) = UserForm1.TextBox30.Value
    .Cells(iRow, 23) = UserForm1.TextBox25.Value
    .Cells(iRow, 24) = UserForm1.TextBox26.Value
    .Cells(iRow, 21).Formula = "=Row() - 4"
End With
```

```
Call Reset
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton23_Click()
    Dim msgValue As VbMsgBoxResult
```

```
    msgValue = MsgBox("Da li zelite da restujete podatke?", vbYesNo + vbInformation,
"Potvrda brisanja")
```

```
    If msgValue = vbNo Then Exit Sub
```

```
    Call Reset
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton24_Click()
```

```
Dim iRow As Long
Dim sh As Worksheet
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Materijali")
If Val(UserForm1.MatSelRed.Value) = 0 Then
    iRow = [counta(Materijali!B:B)] + 4
Else
    iRow = Val(UserForm1.MatSelRed.Value) + 4
    UserForm1.MatSelRed.Text = 0
End If
```

```
With sh
    .Cells(iRow, 2) = UserForm1.TextBox27.Value
    .Cells(iRow, 3) = UserForm1.TextBox29.Value
    .Cells(iRow, 1).Formula = "=ROW()-4"
End With
```

Call Reset

End Sub

Private Sub CommandButton26_Click()

Dim msgValue As VbMsgBoxResult

msgValue = MsgBox("Da li zelite da restujete podatke?", vbYesNo + vbInformation, "Potvrda brisanja")

If msgValue = vbNo Then Exit Sub

Call Reset

End Sub

Private Sub CommandButton27_Click()

Dim sh As Worksheet

Dim iRow As Integer

Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Materijali")

iRow = Val(UserForm1.ListBox3.Text) + 4

If iRow > 5 Then

sh.Range("B" & iRow).ListObject.ListRows(iRow - 4).Delete

End If

End Sub

Private Sub CommandButton28_Click()

Dim iRow As Long

Dim sh As Worksheet

Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Materijali")

If UserForm1.ListBox3.Text <> "" Then

iRow = Val(UserForm1.ListBox3.Text) + 4

With UserForm1

.TextBox27.Text = sh.Cells(iRow, 2)

.TextBox29.Text = sh.Cells(iRow, 3)

End With

UserForm1.MatSelRed.Text = iRow - 4

End If

End Sub

Private Sub CommandButton29_Click()

Dim sh As Worksheet

Dim iRow As Integer

Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Materijali")

iRow = Val(UserForm1.ListBox4.Text) + 4

```
If iRow > 5 Then
    sh.Range("U" & iRow).ListObject.ListRows(iRow - 4).Delete
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton30_Click()
    Dim iRow As Long
    Dim sh As Worksheet
    Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Materijali")
    If Val(UserForm1.ListBox4.Text) <> 0 Then
```

```
        iRow = Val(UserForm1.ListBox4.Text) + 4
        With UserForm1
            .TextBox30.Text = sh.Cells(iRow, 22)
            .TextBox25.Text = sh.Cells(iRow, 23)
            .TextBox26.Text = sh.Cells(iRow, 24)
            UserForm1.PrahSelRed.Text = iRow
        End With
    End If
```

```
End Sub
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton6_Click()
    ' Masine UpisiPodatke

    Dim iRow As Long
    Dim sh As Worksheet
    Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Masine")
    If Val(UserForm1.Masine_dummy.Text) = 0 Then
        iRow = [counta(Masine!B:B)] + 3
    Else
        iRow = Val(UserForm1.Masine_dummy.Text) + 4
    End If
```

```
With sh
    .Cells(iRow, 1).Formula = "=Row()-4"
    .Cells(iRow, 2) = UserForm1.TextBox8.Value
    .Cells(iRow, 3) = UserForm1.TextBox9.Value
    .Cells(iRow, 4) = UserForm1.TextBox10.Value
    .Cells(iRow, 5) = UserForm1.TextBox11.Value
    .Cells(iRow, 6) = UserForm1.TextBox12.Value
    .Cells(iRow, 8) = UserForm1.ComboBox1.Value
    .Cells(iRow, 9) = UserForm1.TextBox13.Value
    .Cells(iRow, 10) = UserForm1.TextBox14.Value
    .Cells(iRow, 11) = UserForm1.TextBox15.Value
    .Cells(iRow, 12) = UserForm1.TextBox16.Value
```

```
.Cells(iRow, 13) = UserForm1.TextBox31.Value  
End With
```

```
Call Reset
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton7_Click()  
    UserForm1.Hide  
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton8_Click()  
'Masine CANCEL
```

```
    Dim msgValue As VbMsgBoxResult  
    msgValue = MsgBox("Da li zelite da restujete podatke?", vbYesNo + vbInformation,  
"Potvrda brisanja")  
    If msgValue = vbNo Then Exit Sub  
    Call Reset
```

```
End Sub
```

```
Private Sub EditGeometrije_Click()
```

```
    Dim iRow As Long  
    Dim sh As Worksheet  
    Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Geometrije")  
    UserForm1.CommandButton1.Enabled = True
```

```
If UserForm1.ListBox1.Text <> "" Then
```

```
    iRow = Val(UserForm1.ListBox1.Text) + 4  
    With UserForm1  
        .TextBox1.Text = sh.Cells(iRow, 2)  
        .TextBox2.Text = sh.Cells(iRow, 3)  
        .TextBox3.Text = sh.Cells(iRow, 4)  
        .TextBox4.Text = sh.Cells(iRow, 5)  
        .TextBox5.Text = sh.Cells(iRow, 6)  
        .TextBox6.Text = sh.Cells(iRow, 7)  
        .TextBox7.Text = sh.Cells(iRow, 8)  
    End With
```

```
End If  
End Sub
```

```
Private Sub EditMasine_Click()
```

```
    Dim iRow As Long
```

```
Dim sh As Worksheet
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Masine")
UserForm1.CommandButton6.Enabled = True

iRow = Val(UserForm1.ListBox2.Text) + 4

With UserForm1
    .TextBox8.Text = sh.Cells(iRow, 2)
    .TextBox9.Text = sh.Cells(iRow, 3)
    .TextBox10.Text = sh.Cells(iRow, 4)
    .TextBox11.Text = sh.Cells(iRow, 5)
    .TextBox12.Text = sh.Cells(iRow, 6)
    .ComboBox1.Text = sh.Cells(iRow, 8)
    .TextBox13.Text = sh.Cells(iRow, 9)
    .TextBox14.Text = sh.Cells(iRow, 10)
    .TextBox15.Text = sh.Cells(iRow, 11)
    .TextBox16.Text = sh.Cells(iRow, 12)
    .TextBox31.Text = sh.Cells(iRow, 13)
    .Masine_dummy.Text = sh.Cells(iRow, 1)
    .SelRed.Text = iRow
End With

End Sub

Private Sub ListBox1_Click()
    UserForm1.SelRed.Value = Val(UserForm1.ListBox1.Text) + 4
End Sub
```

```
Private Sub Geometrije_obrisi_Click()
Dim sh As Worksheet
Dim iRow As Integer
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Geometrije")
iRow = Val(UserForm1.ListBox1.Text) + 4

If iRow > 5 Then
    sh.Rows(iRow).Delete
End If
UserForm1.ListBox1.ListIndex = 0
End Sub

Private Sub Masine_Delete_Click()
Dim sh As Worksheet
Dim iRow As Integer
Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Masine")
iRow = Val(UserForm1.ListBox2.Text) + 4

If iRow > 5 Then
    sh.Rows(iRow).Delete
```

End If

End Sub

Private Sub MasineDodaj_Click()

' Masine dodavanje nove masine

Dim iRow As Long

Dim sh As Worksheet

Set sh = ThisWorkbook.Sheets("Masine")

iRow = [counta(Masine!B:B)] + 3

With sh

.Cells(iRow, 1).Formula = "=Row()-4"

.Cells(iRow, 2) = "Nova masina"

End With

Call Reset

End Sub

Private Sub UserForm_Initialize()

Call Reset

End Sub

Private Sub ResetButton_Click()

Dim msgValue As VbMsgBoxResult

msgValue = MsgBox("Da li zelite da restujete podatke?", vbYesNo + vbInformation,
"Potvrda brisanja")

If msgValue = vbNo Then Exit Sub

Call Reset

End Sub

МОДУЛИ (МАКРОИ):

Sub KorisnickaForma()

UserForm1.Show (0)

' UserForm1.CommandButton1.Enabled = False

' UserForm1.CommandButton6.Enabled = False

' UserForm1.CommandButton15.Enabled = False

' UserForm1.CommandButton21.Enabled = True

```
' UserForm1.CommandButton24.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Sub Macro1()
```

```
'
```

```
' Macro1 Macro
```

```
'
```

```
'
```

```
    Range("B5").Select
```

```
    ActiveSheet.PivotTables("PivotTable1").PivotCache.Refresh
```

```
End Sub
```

```
Sub Macro2()
```

```
'
```

```
' Macro2 Macro
```

```
'
```

```
'
```

```
    Range("A6").Select
```

```
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=ROW()-4"
```

```
    Range("A7").Select
```

```
End Sub
```

ЛИТЕРАТУРА

1. Abd-Elaziem, W., Elkatatny, S., Abd-Elaziem, A.-E., Khedr, M., Abd El-baky, M. A., Hassan, M. A., Abu-Okail, M., Mohammed, M., Järvenpää, A., Allam, T., & Hamada, A. (2022). On the current research progress of metallic materials fabricated by laser powder bed fusion process: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 681–707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.085>
2. Abdulhameed, O., Mian, S. H., Moiduddin, K., Al-Ahmari, A., Ahmed, N., & Aboudaif, M. K. (2022). A multi-part orientation planning schema for fabrication of non-related components using additive manufacturing. *Micromachines*, 13(10), 1777. <https://doi.org/10.3390/mi13101777>.
3. Agrawal, R. (2021). Sustainable material selection for additive manufacturing technologies: A critical analysis of rank reversal approach. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126500>
4. Akinsowon, W., Nahirna, M. (2022) The Additive Manufacturing Landscape 2020, <https://amfg.ai/whitepapers/the-additive-manufacturing-landscape-2020-report/>
5. Al-Ahmari, A. M., Abdulhameed, O., & Khan, A. A. (2018). An automatic and optimal selection of parts orientation in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 698–708. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2016-0208>
6. Ali, Md. H., Sabyrov, N., & Shehab, E. (2022). Powder bed fusion–laser melting (PBF–LM) process: Latest review of materials, process parameter optimization, application, and up-to-date innovative technologies. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(6), 1395–1422. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00311-9>
7. Al-Mekhlafi, M. A., & Salah Eddin Othman, M. (2023). The role of activity based costing system in cost control in Saudi manufacturing firms. *International Journal for Quality Research*, 17(2), 603–616. <https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-19>
8. AM Power. (2020). Additive Manufacturing - New metal technologies, www.am-power.de/insights.
9. AMPower. Additive Manufacturing: Part Cost and Pricing (White paper). (2023, August). www.ampower.eu
10. Armstrong, M., Mehrabi, H., & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>
11. Attarian, M., (2017). The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing, *Business Horizons*, Vol. 60, No. 5, pp. 677-688.
12. Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9–12), 1147–1155. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
13. Bakioglu, G., & Atahan, A. O. (2021). AHP integrated TOPSIS and VIKOR methods with Pythagorean fuzzy sets to prioritize risks in self-driving vehicles. *Applied Soft Computing*, 99, 106948. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106948>

14. Barclift, M., Joshi, S., Simpson, T., & Dickman, C. (2016). Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference 7th Annual International. <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/89747/162-Barclift.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
15. Bastian Leutenecker-Twelsieka*, Christoph Klahnb, Mirko Meboldt. (2016). Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. 26th CIRP Design Conference. Procedia CIRP 50. 408–413. doi: 10.1016/j.procir.2016.05.016.
16. Baumers, M., Tuck C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E., & Hague, R. (2012). Combined build–time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering. In: SOLID FREEFORM FABRICATION PROCEEDINGS: 932-944; Austin; University of Texas. <https://www.researchgate.net/publication/287719627>.
17. Bergmueller, S., Gerhold, L., Fuchs, L., Kaserer, L., & Leichtfried, G. (2023). Systematic approach to process parameter optimization for laser powder bed fusion of low-alloy steel based on melting modes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126(9–10), 4385–4398. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11377-2>
18. Bierlaire, M. (2018). Optimization: Principles and Algorithms. Second edition, EPFL Press.
19. Blanchard, B., Blyler, J. (2016). System Engineering Management, 5th edition. John Wiley & Sons.
20. Bonham, E., McMaster, K., Thomson, E., Panarotto, M., Müller, J. R., Isaksson, O., & Johansson, E. (2020). Designing and integrating a digital thread system for customized additive manufacturing in multi-partner kayak production. Systems, 8(4), 43. <https://doi.org/10.3390/systems8040043>
21. Bonnard, R., Hascoët, J.-Y., Mognol, P., & Stroud, I. (2018). STEP-NC digital thread for additive manufacturing: Data model, implementation and validation. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31(11), 1141–1160. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1509130>
22. Bonnard, R., Hascoët, J.-Y., Mognol, P., Zancul, E., & Alvares, A. J. (2019). Hierarchical object-oriented model (Hoom) for additive manufacturing digital thread. Journal of Manufacturing Systems, 50, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.003>
23. Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F., Watts, C., & Drake, R. (2017). A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 19, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.07.001>
24. Byun, H.-S., & Lee, K. H. (2006). Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22(1), 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.03.001>

25. Chakraborty, S., Yeh, C.H. (2009). A Simulation Comparison of Normalization Procedures for TOPSIS. Published in: 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering. <https://www.researchgate.net/publication/240644369>.
26. Chandra, M., Shahab, F., Kek, V., & Rajak, S. (2022). Selection for additive manufacturing using hybrid MCDM technique considering sustainable concepts. *Rapid Prototyping Journal*, 28(7), 1297–1311. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0155>
27. Chen, Z., Han, C., Gao, M., Kandukuri, S. Y., & Zhou, K. (2022). A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 17(2), 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
28. Chowdhury, S., Mhapsekar, K., & Anand, S. (2018). Part build orientation optimization and neural network-based geometry compensation for additive manufacturing process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(3), 031009. <https://doi.org/10.1115/1.4038293>
29. Ćirić-Kostić, S., Bogojević, N. (2020). Принципи и примена адитивне технологије. Факултет за машинство и грађевинарство Краљево, Универзитет у Крагујевцу.
30. Cojocar, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C.-O., & Marginean, G. (2022). The influence of the process parameters on the mechanical properties of pla specimens produced by fused filament fabrication—A review. *Polymers*, 14(5), 886. <https://doi.org/10.3390/polym14050886>
31. Colorado, H. A., Cardenas, C. A., Gutierrez-Velazquez, E. I., Escobedo, J. P., & Monteiro, S. N. (2023). Additive manufacturing in armor and military applications: Research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 3900–3913. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.030>
32. D4AM Wiki – Open repository of design rules for AM, <https://www.mfkv.kg.ac.rs/d4am/>. Date of last access: 05th April 2022.
33. Dalpadulo, E., Pini, F., & Leali, F. (2024). Powder bed fusion integrated product and process design for additive manufacturing: A systematic approach driven by simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(11–12), 5425–5440. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13042-8>
34. Daneshjo, N., Rudy, V., Drábik, P., & Malega, P. (2020). Methods and procedures applied to design of production processes and systems. *TEM Journal*, 1435–1442. <https://doi.org/10.18421/TEM94-15>
35. De Antón, J., Villafañez, F., Poza, D., & López-Paredes, A. (2023). A framework for production planning in additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 61(24), 8674–8691. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2160026>
36. Dejene, N.D. (2024). Effects of Process Parameters on the Quality of Metal Additive Manufacturing in Laser Powder Bed Fusion Systems. PhD Thesis. Department of Mechanical and Structural Engineering and Material Science, University of Stavanger, Norway.
37. Delacroix, T., Lomello, F., Schuster, F., Maskrot, H., & Garandet, J.-P. (2022). Influence of powder recycling on 316L stainless steel feedstocks and printed parts in

- laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 50, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102553>
38. Di Angelo, L., Di Stefano, P., & Guardiani, E. (2020). Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 71. <https://doi.org/10.3390/jmmp4030071>
39. Di Angelo, L., Di Stefano, P., Dolatnezhadsomarin, A., Guardiani, E., & Khorram, E. (2020). A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: The application to FDM technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(1-2), 263-276. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05359-x>
40. Di, L., & Yang, Y. (2020). Cost modeling and evaluation of direct metal laser sintering with integrated dynamic process planning. *Sustainability*, 13(1), 319. <https://doi.org/10.3390/su13010319>
41. Dietrich, D.M.; Cudney, E.A.; Kenworthy, M. (2019). *Additive Manufacturing Change. Management—Best Practices*. CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA.
42. Dotcheva, M., Favrot, J., Dotchev, K., & Zekonyte, J. (2020). Planning for metal additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 51, 710-716. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.100>
43. Douglas S. Thomas, D.S. (2017). Chapter 11 – Economics of Additive Manufacturing. In Bian, L., Shamsaei, N. & Usher, J: *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. CRC Press. Taylor & Francis Group. <https://www.researchgate.net/publication/319261384>.
44. Emovon, I., & Oghenenyero, O. S. (2020). Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. *Results in Materials*, 7, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100115>
45. Enríquez, J. G., Sánchez-Begines, J. M., Domínguez-Mayo, F. J., García-García, J. A., & Escalona, M. J. (2019). An approach to characterize and evaluate the quality of product lifecycle management software systems. *Computer Standards & Interfaces*, 61, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.05.003>
46. Ezugwu, A. E., Shukla, A. K., Nath, R., Akinyelu, A. A., Agushaka, J. O., Chiroma, H., & Muhuri, P. K. (2021). Metaheuristics: a comprehensive overview and classification along with bibliometric analysis. *Artificial Intelligence Review*, 54, 4237-4316.
47. Fé-Perdomo, I. L., Ramos-Grez, J. A., Beruvides, G., & Mujica, R. A. (2021). Selective laser melting: Lessons from medical devices industry and other applications. *Rapid Prototyping Journal*, 27(10), 1801-1830. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0151>
48. Fera, M., Fruggiero, F., Costabile, G., Lambiase, A., & Pham, D. T. (2017). A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing (Miprocamam). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9-12), 4275-4291. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0492-x>
49. Ga, B., Gardan, N., & Wahu, G. (2018). Methodology for part building orientation in additive manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, 16(1), 113-128. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2019.113-128>

50. Gade, P.K.; Osuri, M. Evaluation of Multi Criteria Decision Making Methods for Potential Use in Application Security. Master's Thesis, School of Computing, Blekinge Institute of Technology, Blekinge, Sweden, 2014.
51. Gehrke, I., Schauss, M., Küsters, D., & Gries, T. (2020). Experiencing the potential of closed-loop PLM systems enabled by Industrial Internet of Things. *Procedia Manufacturing*, 45, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.091>
52. Ghaleb, A. M., Kaid, H., Alsamhan, A., Mian, S. H., & Hidri, L. (2020). Assessment and comparison of various mcdm approaches in the selection of manufacturing process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 4039253. <https://doi.org/10.1155/2020/4039253>
53. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies* (Third Edition). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
54. Hafidi, N., El Barkany, A., El Mhamedi, A. (2023). Joint optimization of production, maintenance, and quality: A review and research trends. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(4), 282–296. <https://doi.org/10.24867/IJIEM-2023-4-339>
55. Hajalfadul, M., & Baumers, M. (2020). Building a quality cost model for additive manufacturing. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(1), 124–133. <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2020.v05i01.017>
56. Halevi, G. (2001). *Handbook of Production Management Methods*, Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP.
57. Hashmi, A. W., Mali, H. S., & Meena, A. (2023). A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts. *Rapid Prototyping Journal*, 29(3), 504–557. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0133>
58. Haveroth, G. A., Thore, C.-J., Ausas, R. F., Jakobsson, S., Cuminato, J. A., & Correa, M. R. (2024). A thermal model for topology optimization in additive manufacturing: Design of support structures and geometry orientation. *Computers & Structures*, 301, 107453. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107453>
59. Huang, M., Chen, L., Zhong, Y., & Qin, Y. (2021). A generic method for multi-criterion decision-making problems in design for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(7–8), 2083–2095. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06832-x>
60. International Standard Organization. (2018). *ISO/ASTM 52910:2018: Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations*. <https://www.iso.org/home.html>
61. International Standard Organization. *ISO 17296-3 (2014) Additive manufacturing—General principles—Part 3: Main characteristics and corresponding test methods*. International Organization for Standardization
62. International Standard Organization. *ISO/ASTM 52900:2021 (Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary)*. <https://www.iso.org/home.html>. Date of last access: 02nd October 2022.

63. ISO 17295:2023 Additive manufacturing — General principles (Part positioning, coordinates and orientation)
64. Jarrar, Q., Bernard, A., Belkadi, F. (2022). An Activity-Based Costing Model for Additive Manufacturing. 18th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management. Online Event,, Brazil. pp.492-507,
65. Jaško, O., Čudanov, M., Jevtić, M., Krivokapić, J. (2017). Организациони дизајн, приступи методе и модели. Универзитет у Београду, ФОН.
66. Jayant, A., Singh, S. (2018). An Integrated Approach with MOORA, SWARA, and WASPAS Methods for Selection of 3PLSP. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Paris, France. <https://www.researchgate.net/publication/335136412>
67. Jayawardane, H., Davies, I. J., Gamage, J. R., John, M., & Biswas, W. K. (2023). Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100015>
68. Joppen, R., Enzberg, S., Kühn, A., Dumitrescu, R. (2019). A practical Framework for the Optimization of Production Management Processes. Procedia Manufacturing 33, 406–413. https://www.researchgate.net/publication/333468163_A_practical_Framework_for_the_Optimization_of_Production_Management_Processes
69. Kadir, A. Z. A., Yusof, Y., & Wahab, M. S. (2020). Additive manufacturing cost estimation models—A classification review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107(9–10), 4033–4053. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05262-5>
70. Kamps, T., Lutter-Guenther, M., Seidel, C., Gutowski, T., & Reinhart, G. (2018). Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 21, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.01.002>
71. Kretschmar, N. (2015), Economic Validation of Metal Powder Bed Based AM Processes, 7 May, Master's Thesis, Aalto University, available at: www.aalto.fi.
72. Krishnan, A. R., Hamid, M. R., Tanakinjal, G. H., Asli, M. F., Boniface, B., & Ghazali, M. F. (2023). An investigation to offer conclusive recommendations on suitable benefit/cost criteria-based normalization methods for TOPSIS. MethodsX, 10, 102227. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102227>
73. Kumar, R., Dubey, R., Singh, S., Singh, S., Prakash, C., Nirsanametla, Y., Królczyk, G., & Chudy, R. (2021). Multiple-criteria decision-making and sensitivity analysis for selection of materials for knee implant femoral component. Materials, 14(8), 2084. <https://doi.org/10.3390/ma14082084>
74. Lakshmanan, R., Nyamekye, P., Virolainen, V.-M., & Piili, H. (2023). The convergence of lean management and additive manufacturing: Case of manufacturing industries. Cleaner Engineering and Technology, 13, 100620. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100620>
75. Laureijs, R. E., Roca, J. B., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J. L., & Fuchs, E. R. H. (2017). Metal additive manufacturing: Cost competitive beyond low volumes. Journal of

Manufacturing Science and Engineering, 139(8), 081010.
<https://doi.org/10.1115/1.4035420>

76. Leary, M. (2020). Design for Additive Manufacturing (Additive Manufacturing Materials and Technologies). Elsevier Inc. <https://www.elsevier.com/books-and-journals>

77. Leirmo, T. S., & Martinsen, K. (2020). Deterministic part orientation in additive manufacturing using feature recognition. *Procedia CIRP*, 88, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.070>

78. Leutenecker-Twelsiek, B., Klahn, C., & Meboldt, M. (2016). Considering part orientation in design for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 50, 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.016>

79. Li, Y., He, X., Martínez, L., Zhang, J., Wang, D., & Liu, X. A. (2024). Comparative analysis of three categories of multi-criteria decision-making methods. *Expert Systems with Applications*, 238, 121824. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121824>

80. Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>

81. Lubis, A. I., Sihombing, P., & Nababan, E. B. (2020). Comparison SAW and MOORA methods with attribute weighting using rank order centroid in decision making. 3rd International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology (MECnIT), 127–131. <https://doi.org/10.1109/MECnIT48290.2020.9166640>

82. Luo, Z., Yang, F., Dong, G., Tang, Y., Zhao, Y.F. (2016) Orientation Optimization in Layer-Based Additive Manufacturing Process. In Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Charlotte, NC, USA, 21–24 August 2016.

83. Madić, M., Nedić, B., Radovanović, M. Business and Engineering Decision-Making Using Multi-Criteria Optimization Methods. Faculty of Engineering Sciences, University of Kragujevac, Kragujevac, Republic of Serbia, 2015.

84. Mahmood, A., Akram, T., Chen, H., & Chen, S. (2022). On the evolution of additive manufacturing (3D/4D printing) technologies: Materials, applications, and challenges. *Polymers*, 14, 4698. <https://doi.org/10.3390/polym14214698>

85. Malbašić, S., Đorđević, A., Živković, S., Džunić, D., & Sokolović, V. (2024). Topology optimization, part orientation, and symmetry operations as elements of a framework for design and production planning process in additive manufacturing L-PBF technology. *Symmetry*, 16(12), 1616. <https://doi.org/10.3390/sym16121616>

86. Malbašić, S., Nedić, B., Đorđević, A., Živković, S. (2023). Applications and economics of additive metal production technologies. 39th International conference on production engineering of Serbia - ICPES 2023. Novi Sad, Serbia.

87. Malbašić, S., Živković, S., Petrović, V., Grubić, A. (2022). Digital thread for additive manufacturing. 10th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2022, Belgrade, Serbia. <http://www.vti.mod.gov.rs/oteh22/elementi/rad/054.pdf>

88. Malbašić, S.; Đorđević, A.; Živković, S.; Džunić, D.; Sokolović, V. (2024). Topology Optimization, Part Orientation, and Symmetry Operations as Elements of a Framework

for Design and Production Planning Process in Additive Manufacturing L-PBF Technology. *Symmetry* 2024, 16, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

89. Malekipour, E., & El-Mounayri, H. (2018). Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1-4), 527-550. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1172-6>
90. Mandolini, M., Sartini, M., Favi, C., & Germani, M. (2022). Cost sensitivity analysis for laser powder bed fusion. *Proceedings of the Design Society*, 2, 1411-1420. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.143>
91. Manurung, S., Simamora, I.M., & Allagan, H. (2021). Comparison of MOORA, WASPAS and SAW Methods in Decision Support Systems. *Jurnal Mantik*, 5 (2) 485-493. <https://typeset.io/pdf/comparison-of-moora-waspas-and-saw-methods-in-decision-51sqnwhu3p.pdf>
92. Marco Cavazzuti, M. (2013). *Optimization Methods: From Theory to Design: Scientific and Technological Aspects in Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
93. Marco Livesu, Marco Attene, Michela Spagnuolo, Bianca Falcidieno. 2016. A Study of the State of the Art of Process Planning for Additive Manufacturing. Available online: <http://www.imati.cnr.it/reports>, (accessed on 28 May 2024).
94. Matić, B., Jovanović, S., Das, D. K., Zavadskas, E. K., Stević, Ž., Sremac, S., & Marinković, M. (2019). A new hybrid MCDM model: Sustainable supplier selection in a construction company. *Symmetry*, 11(3), 353. <https://doi.org/10.3390/sym11030353>
95. Matúš, M., Križan, P., Kijovský, J., Strigáč, S., Beniak, J., & Šooš, Ľ. (2023). Implementation of finite element method simulation in control of additive manufacturing to increase component strength and productivity. *Symmetry*, 15(11), 2036. <https://doi.org/10.3390/sym15112036>
96. Milovanovic, V., Aleksic, A., Sokolovic, V., Milenkov, M. (2024). Ranking of key performance indicators of the overhaul process of technical systems. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 31(1). <https://doi.org/10.2305/ijietap.2024.31.1.9685>
97. Miteva, A., Hodjaoglu, G. (2024). Technologies for additive manufacturing of metal structures. *International scientific journal "machines, technologies, materials"*, Year XVIII, Issue 9, p.p. 290-293.
98. Mladenović, M., Mandić, J., Ćitić, A., Pejović, V., Grubić, A., & Živković, S. (2024). Influence of process parameters in additive manufacturing on the quality of produced metal parts. 11th International Scientific Conference on Defensive Technologies - OTEX 2024 - Zbornik Radova, 560-566. <https://doi.org/10.5937/OTEH24102M>
99. Muehlenfeld, C., Roberts, S.A. (2018). 3D/4D Printing in Additive Manufacturing: Process Engineering and Novel Excipients. In Maniruzzaman, M. *3D and 4D Printing in Biomedical Applications* (pp 1-23). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://media.wiley.com/product_data/excerpt/38/35273444/3527344438-66.pdf
100. Mukhametzyanov, I., Pamučar, D. (2018). A Sensitivity Analysis in MCDM Problems: A Statistical Approach. *Decis. Making Appl. Manag. Eng.* 1, 51-80. <https://doi.org/10.31181/dmame1802050m>

101. Öberg, C., Shams, T., & Asnafi, N. (2018). Additive manufacturing and business models: Current knowledge and missing perspectives. *Technology Innovation Management Review*, 8(6), 15–33. <https://doi.org/10.22215/timreview/1162>
102. Özel, T., Altay, A., Kaftanoğlu, B., Leach, R., Senin, N., & Donmez, A. (2020). Focus variation measurement and prediction of surface texture parameters using machine learning in laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(1), 011008. <https://doi.org/10.1115/1.4045415>
103. Pal, S., Drstvensek, I., & Brajliah, T. (2018). Physical Behaviors of Materials in Selective Laser Melting Process, In Daaam International Scientific Book. pp. 239-256 Chapter 21. DOI: [10.2507/daaam.scibook.2018.21](https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2018.21)
104. Pamučar, D. (2018). Операциона истраживања, Медија центар ОДБРАНА, Београд.
105. Pamučar, D. (2017) *Operational Research—Deterministic Methods and Models*; RABEK: Beograd, Serbia.
106. Pant, M., Nagdeve, L., Kumar, H., & Moona, G. (2022). A contemporary investigation of metal additive manufacturing techniques. *Sādhanā*, 47(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01770-6>
107. Patel, S., Liu, Y., Siddique, Z., & Ghamarian, I. (2024). Metal additive manufacturing: Principles and applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 131, 1179–1201. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.101>
108. Pei, E., Kabir, I. (2022). Design for AM. In: Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., Ureña Alcázar, J. (eds) *A Guide to Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9_3
109. Pei, E., Kabir, I. (2022). Standardisation in AM. In: Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., Ureña Alcázar, J. (eds) *A Guide to Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9_3
110. Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>
111. Piili, H., Happonen, A., Väistö, T., Venkataramanan, V., Partanen, J., & Salminen, A. (2015). Cost estimation of laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 78, 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.053>
112. Prathyusha, A. L. R., & Raghu Babu, G. (2022). A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, 62, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.604>
113. Qie, L., Jing, S., Lian, R., Chen, Y., & Liu, J. (2018). Quantitative suggestions for build orientation selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5–8), 1831–1845. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2295-0>
114. Qin, Y., Qi, Q., Scott, P. J., & Jiang, X. (2019). Determination of optimal build orientation for additive manufacturing using Muirhead mean and prioritised average

- operators. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(8), 3015–3034. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01497-6>
115. Qin, Y., Qi, Q., Shi, P., Scott, P. J., & Jiang, X. (2021). Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5–6), 1295–1328. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06996-6>
116. Ransikarbum, K., Pitakaso, P., Kim, H., Ma, J. (2021). Multi criteria decision analysis framework for part orientation analysis in additive manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2021, 8(4), 1141–1157. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab037>.
117. Reichwein, J., & Kirchner, E. (2021). Part orientation and separation to reduce process costs in additive manufacturing. *Proceedings of the Design Society*, 1, 2399–2408. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.501>
118. Reiher, T., Lindemann, C., Jahnke, U., Deppe, G., & Koch, R. (2017). Holistic approach for industrializing AM technology: From part selection to test and verification. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1–2), 43–55. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0018-y>
119. Remedios, S. (2021). Cost Model for Additive Manufacturing of Metal in Aeronautics. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997262886/74067 Resumo.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997262886/74067%20Resumo.pdf)
120. Rickenbacher, L., Spierings, A., & Wegener, K. (2013). An integrated cost-model for selective laser melting (SLM). *Rapid Prototyping Journal*, 19(3), 208–214. <https://doi.org/10.1108/13552541311312201>
121. Safian, E.E.M.; Nawawi, A.H. The Evolution of Analytical Hierarchy Process (AHP) as a Decision Making Tool in Property Sectors. 2011. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/254445031> (accessed on 10 May
122. Sahini, D.K., Ghose, J., Jha, S.K., Behera, A., & Mandal, A. (2020). Chapter 10 - Optimization and Simulation of Additive Manufacturing Processes: Challenges and Opportunities – A Review In Balasubramanian, K.R., & Senthilkumar, V. *Additive Manufacturing Applications for Metals and Composites*. IGI Global 2020. <https://www.researchgate.net/publication/342799796>. DOI: 10.4018/978-1-7998-4054-1.ch010.
123. Santecchia, E., Spigarelli, S., & Cabibbo, M. (2020). Material reuse in laser powder bed fusion: Side effects of the laser—metal powder interaction. *Metals*, 10(3), 341. <https://doi.org/10.3390/met10030341>
124. Sari, F. (2021). Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644>
125. Sartini, M., Luca, M., Claudio, F., & Marco, M. (2023). A multi-criteria decision-making approach to optimize the part build orientation in additive manufacturing. *Proceedings of the Design Society*, 3, 293–302. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.30>

126. Schröder, M., Falk, B., & Schmitt, R. (2015). Evaluation of cost structures of additive manufacturing processes using a new business model. *Procedia CIRP*, 30, 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.144>
127. Sequeira, D. (2019). Metal Additive Manufacturing in Aeronautics: a Life Cycle Cost Perspective. PhD thesis. University of Lisbon, Portugal. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090418492/Thesis_DiogoSequeira_79590.pdf
128. Sheng, H., Xu, J., Zhang, S., Tan, J., & Wang, K. (2023). Build orientation determination of multi-feature mechanical parts in selective laser melting via multi-objective decision making. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(2), 21. <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0737-8>.
129. Shi, P., Qi, Q., Qin, Y., Scott, P. J., & Jiang, X. (2020). A novel learning-based feature recognition method using multiple sectional view representation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1291–1309. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01533-w>
130. Šibalija, T. V. (2019). Particle swarm optimisation in designing parameters of manufacturing processes: A review (2008–2018). *Applied Soft Computing*, 84, 105743. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105743>.
131. Šibalija, T.V., Majstorović, V.D. (2016). Review of Multiresponse Process Optimisation Methods. In Šibalija, T.V., Majstorović, V.D., *Advanced Multiresponse Process Optimisation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19255-0_2
132. Šoškić, Z., Monti, G. L., Montanari, S., Monti, M., & Cardu, M. (2021). Production cost model of the multi-jet-fusion technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(10), 1917–1929. <https://doi.org/10.1177/0954406219837300>
133. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., & Koppad, P. G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612–2641. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.015>
134. Stojčić, M., Zavadskas, E. K., Pamučar, D., Stević, Ž., & Mardani, A. (2019). Application of mcdm methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. *Symmetry*, 11(3), 350. <https://doi.org/10.3390/sym11030350>
135. Taghian, M., Mosallanejad, M. H., Lannunziata, E., Del Greco, G., Iuliano, L., & Saboori, A. (2023). Laser powder bed fusion of metallic components: Latest progress in productivity, quality, and cost perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 6484–6500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.049>
136. Taşcıoğlu, E., Kaynak, Y., Sharif, S., Pıtır, F., & Suhaimi, M. A. (2022). Machining-induced surface integrity of Inconel 718 alloy fabricated by powder bed fusion additive manufacturing under various laser processing parameters. *Machining Science and Technology*, 26(1), 49–71. <https://doi.org/10.1080/10910344.2021.1998107>
137. Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., & Kiritsis, D. (2010). Product lifecycle management – from its history to its new role. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(4), 360. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2010.036489>

138. Tyflopoulos, E., & Steinert, M. (2020). Topology and parametric optimization-based design processes for lightweight structures. *Applied Sciences*, 10(13), 4496. <https://doi.org/10.3390/app10134496>.
139. UltiMaker. (2024). 2024 3D printing guide for military and defense (White paper). <https://explore.ultimaker.com/3dprintingguideformilitaryanddefense.html>
140. Ulu, E., Huang, R., Kara, L. B., & Whitefoot, K. S. (2019). Concurrent structure and process optimization for minimum cost metal additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 141(6), 061701. <https://doi.org/10.1115/1.4042112>
141. Vaneker, T., Bernard, A., Moroni, G., Gibson, I., & Zhang, Y. (2020). Design for additive manufacturing: Framework and methodology. *CIRP Annals*, 69(2), 578–599. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006>
142. Varatharajulu, M., Duraiselvam, M., Kumar, M. B., Jayaprakash, G., & Baskar, N. (2022). Multi criteria decision making through TOPSIS and COPRAS on drilling parameters of magnesium AZ91. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(10), 2857–2874. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.05.006>
143. Wang, C. (2022). Simultaneous optimization of build orientation and topology for self-supported enclosed voids in additive manufacturing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 388, 114227. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114227>
144. Wang, H., & Fuh, J. Y. H. (2023). Metal additive manufacturing and its post-processing techniques. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 47. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010047>
145. Wang, H., Chen, L., Dovgvy, B., Xu, W., Sha, A., Li, X., Tang, H., Liu, Y., Wu, H., Pham, M.S. (2021). Micro-cracking, microstructure and mechanical properties of Hastelloy-X alloy printed by laser powder bed fusion: As-built, annealed and hot-isostatic pressed. *Additive Manufacturing* 39 (2021) 101853. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101853>
146. Wang, Y., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2018). A decision support system for additive manufacturing process selection using a hybrid multiple criteria decision-making method. *Rapid Prototyping Journal*, 24(9), 1544–1553. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2018-0002>
147. Wang, Y.-M., & Luo, Y. (2009). On rank reversal in decision analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5–6), 1221–1229. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.06.019>
148. Warner, J. H., Ringer, S. P., & Proust, G. (2024). Strategies for metallic powder reuse in powder bed fusion: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 110, 263–290. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.066>
149. Wozniak, J., Budzik, G., Przeszlowski, L., Fudali, P., Dziubek, T., & Paszkiewicz, A. (2022). Analysis of the quality of products manufactured with the application of additive manufacturing technologies with the possibility of applying the industry 4.0 conception. *International Journal for Quality Research*, 16(3), 831–850. <https://doi.org/10.24874/IJQR16.03-12>
150. Yi, L., Gläßner, C., Aurich, J.C.. (2019). How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the

commercial vehicle industry. *Journal of Manufacturing Systems* 53. pp. 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.09.007>.

151. Yu, C., Qie, L., Jing, S., & Yan, Y. (2019). Personalized design of part orientation in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 25(10), 1647–1660. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2018-0309>

152. Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R. K., & Harik, R. (2016). Feature based building orientation optimization for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 358–376. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0037>

153. Zhang, Y., Harik, R., Fadel, G., & Bernard, A. (2019). A statistical method for build orientation determination in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 25(1), 187–207. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2018-0102>

154. Zhengdong Liu . (2017). Economic comparison of selective laser melting and conventional subtractive manufacturing processes. Master Thesis. Northeastern University Boston, Massachusetts. <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:cj82q473j/fulltext.pdf>.

155. Zhou, M., Chen, Y.-W., Liu, X.-B., Cheng, B.-Y., & Yang, J.-B. (2020). Weight assignment method for multiple attribute decision making with dissimilarity and conflict of belief distributions. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106648. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106648>

156. Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>

157. Živković, S., Malbašić, S., Grubić, A. (2022). AM potencijal – projektovanje za aditivnu proizvodnju, 43. JUPITER konferencija. Beograd, Srbija.

158. Zohreh Lamei. (2021). A comprehensive cost estimation for additive manufacturing. [Master Thesis. Wichita State University]. <https://soar.wichita.edu/items/0d393da0-6d82-4849-a66c-ba28b4b858e1>.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Слободан Малбашић рођен је 12.08.1975. године у Сремској Митровици, где је завршио основну и средњу школу. Војно техничку академију у Београду уписао је школске 1994/1995. године на смеру Техничке службе – специјалност наоружање и исту завршио 1999. године.

Школске 2000/2001. године уписао је магистарске студије на Машинском факултету у Крагујевцу (Одсек за моторна возила и моторе). Магистарску тезу под насловом „Управљање ризиком као фактор безбедности саобраћаја“ одбранио је новембра 2006. године.

Ова чињеница је била опредељујућа и за упис докторских академских студија на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, одредивши се за смер Индустриско инжењерство и инжењерски менаџмент.

У оквиру своје каријере, дуге преко 25 године, кандидат је обављао више различитих извршних и управних функција из домена планирања, контроле и извршења послова ремонта и одржавања средстава наоружања и војне опреме, израде ремонтно-конструктивне документације, затим као пројектни менаџер на међународном пројекту за потребе Министарства одбране као и у пословима међународне војнотехничке и војноекономске сарадње.

Тренутно запослење у Управи за одбрамбене технологије везано је за активности у управљању животним циклусом производа, са посебним фокусом на праћењу и управљању пројектима развоја и модернизације средстава наоружања и војне опреме, учешће у процесима уговарања, контроле норматива времена и материјала као и процеса производње средстава наоружања и војне опреме у фабрикама Одбрамбене индустрије Србије.

Ангажован је и на реализацији научно истраживачког пројекта на Војнотехничком институту, који представља истраживање у области примене адитивних технологија у пројектовању и производњи делова и склопова наоружања и војне опреме. Тренутни научно-истраживачки рад и интересовања усмерена су у области истраживања технологија, савремених трендова и оптимизационих техника у оквиру адитивних технологија.

Поред познавања рада у основним Microsoft апликацијама, познаје и рад у софтверским пакетима Siemens NX, Material Magics. Завршио је неколико међународних курсева у областима планирања набавки и управљању пројектима а поседује и сертификат за управљање пројектима PRINCE2 (Foundation ниво). Течно говори енглески језик.

Образац 1

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:


**МОДЕЛ ТРОШКОВА ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ АДИТИВНИМ
ТЕХНОЛОГИЈАМА**

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

у КРАГУЈЕВЦУ, 27.01.2026. године,



потпис аутора

Образац 2

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под
насловом:

**МОДЕЛ ТРОШКОВА ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ АДИТИВНИМ
ТЕХНОЛОГИЈАМА**

истоветне.

У КРАГУЈЕВЦУ, 27.01.2026. године,



потпис аутора

Образац 3

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕЈа, СЛОБОДАН МАЛБАШИЋ дозвољавам не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

**МОДЕЛ ТРОШКОВА ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ АДИТИВНИМ
ТЕХНОЛОГИЈАМА**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем преузимања.

Овом Изјавом такође

 дозвољавам не дозвољавам¹

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У КРАГУЈЕВЦУ, 27.01.2026. године,



потпис аутора

² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>