



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



**ANALIZA OBLIKA
KOMPLEKSNE 3D GEOMETRIJE
KREIRANE
FOTOGRAMETRIJSKOM 3D
DIGITALIZACIJOM NA
PRIMERU IKONOSTASA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori:
Prof. dr Ratko Obradović
Prof. dr Nebojša Ralević

Kandidat:
Isidora Đurić

Novi Sad, 2021.

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Исидора Ђурић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Ратко Обрадовић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду др Небојша Ралевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Анализа облика комплексне 3Д геометрије креиране фотограметријском 3Д дигитализацијом на примеру иконостаса
Језик публикације (писмо):	Српски (Латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница <u>108</u> Поглавља <u>7</u> Референци <u>135</u> Табела <u>7</u> Слика <u>41</u> Графикона <u>0</u> Прилога <u>3</u>
Научна област:	Рачунарска графика
Ужа научна област (научна дисциплина):	Рачунарска графика
Кључне речи / предметна одредница:	3Д дигитализација, фотограметрија, анализа облика, сегментација облака тачака, културно наслеђе, иконостас
Резиме на језику рада:	Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације може се поделити на неколико основних тема. Како се као основни проблем истраживања поставља анализа облика комплексне геометрије креиране фотограметријском 3Д дигитализацијом, фокус истраживања представља примену методе анализе облика, засноване на нумеричкој дескрипцији, у циљу одређивања јасних релација између карактеристика облика и стилског правца. Истраживање у оквиру докторске дисертације базира се на материјалном културном наслеђу, које обухвата иконостасе, као јединствене елементе културног наслеђа са изразито комплексном геометријом. Основни циљ истраживања представља нумеричку анализу и стилску класификацију карактеристика облика комплексне геометрије иконостаса, креиране фотограметријском 3Д дигитализацијом. У сврху реализације датог циља, примењен је мултидисциплинарни приступ који обухвата шири контекст технологија и знања из области рачунарске графике и математике, које се користе за 3Д дигитализацију и анализу облика.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не користе се са тезом.

	<p>У циљу одређивања јасних релација између карактеристика облика и стилског правца иконостаса, предложен је метод за класификацију облика главних елемената иконостаса у односу на карактеристике стилског правца, заснован на методи 2Д анализе облика.</p> <p>Технике анализе облика, засноване на методи дескрипције коришћене су за нумеричко описивање и класификацију стилских карактеристика разматраних карактеристика облика главних структурних елемената дигитализованих модела иконостаса. Примењени су 2Д глобални дескриптори и њима придружене мере облика, које су засноване на димензијама и пропорцијама појединих елемената иконостаса, а које су дизајниране тако да одражавају карактеристичне атрибуте стварних облика.</p> <p>У сврху 3Д дигитализације, коришћена је фотограметријска дигитализација, као поуздан и приступачан начин 3Д реконструкције реалних просторних структура.</p> <p>Истраживање у оквиру докторске дисертације обухвата и анализу и примену метода сегментације облака тачака и детектовања контура, у циљу креирања прецизних 2Д модела комплексне геометрије иконостаса, који се даље могу користити за 2Д анализу облика.</p> <p>Метод за 2Д анализу облика комплексне 3Д геометрије креиране фотограметријском 3Д дигитализацијом, предложен у оквиру докторске дисертације, илустрован је на репрезентативним примерима три иконостаса, настала на подручју некадашње Карловачке митрополије у периоду уметничких праваца Барока и Класицизма.</p> <p>Резултати истраживања указали су на то да предложене методе и технологије могу бити корисне за 2Д анализу облика комплексне геометрије дигитализованих објеката културног наслеђа.</p> <p>Научни допринос докторске дисертације огледа се у нумеричком приступу анализи обликовних карактеристика културног наслеђа, за које се, због природе комплексне геометрије не могу јасно одредити правила обликовања, нити припадност одређеном стилском правцу. Резултати истраживања такође доприносе проширењу теоријских знања, допуњујући их сазнањима о нумеричким карактеристикама облика анализираних стилских праваца.</p>
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	09.09.2021.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	<p>Председник: др Драган Иветић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Бранислав Попконстантиновић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду</p> <p>Члан: др Весна Стојаковић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p>
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Isidora Đurić
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD Ratko Obradović, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad PhD Nebojša Ralević, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Shape Analysis of Complex 3D Geometry Created Using Photogrammetric 3D Digitization on the Example of Iconostases
Language of text (script):	Serbian language (latin script)
Physical description:	Number of: Pages <u>108</u> Chapters <u>7</u> References <u>135</u> Tables <u>7</u> Illustrations <u>41</u> Graphs <u>0</u> Appendices <u>3</u>
Scientific field:	Computer Graphics
Scientific subfield (scientific discipline):	Computer Graphics
Subject, Key words:	3D digitization, photogrammetry, shape analysis, point cloud segmentation, cultural heritage, iconostasis
Abstract in English language:	<p>The subject of the research is divided into several main topics. The basic problem defined within the dissertation was the shape analysis of complex geometry created by photogrammetric 3D digitization. According to that, the main focus of the research was the application of shape analysis, based on the numerical description, to determine clear relations between shape characteristics and stylistic movement.</p> <p>The research includes iconostases, as unique elements of material cultural heritage, characterized by complex geometry.</p> <p>The aim of the research was the numerical shape analysis and classification of the stylistic characteristics of the complex geometry of the iconostasis, created by photogrammetric 3D digitization. To achieve this goal, a multidisciplinary approach was applied, which includes a broader context of technologies and knowledge in the field of computer graphics and mathematics, which were used for 3D digitization and shape analysis.</p> <p>To determine relations between the shape characteristics and the stylistic movement of the iconostases, a method based on 2D shape analysis has been</p>

²The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

5Ā – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5Γ – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

	<p>proposed for the classification of the main iconostasis elements concerning the stylistic period to which it belongs.</p> <p>Shape analysis method, based on the description techniques, was used for numerical description and classification of stylistic characteristics of the considered shape characteristics of the main structural elements of the digitized iconostasis. The concept was based on the application of 2D global shape descriptors and associated shape measures. The shape measures were based on the dimensions and proportions of individual elements of the iconostasis and were designed to reflect the characteristic attributes of real shapes.</p> <p>For 3D digitization of iconostases, photogrammetric digitization was used, as a reliable and accessible way of 3D reconstruction of real spatial structures.</p> <p>In addition, the research included consideration and application of an approach to obtain 2D CAD-like visualizations of complex geometry from photogrammetric models so that the detected contours of particular object elements can be used for 2D shape analysis.</p> <p>The proposed method for 2D shape analysis based on photogrammetric 3D models was illustrated on representative examples of three iconostases, originated from the Baroque and Classicism art movements on the territory of the former Metropolitanate of Karlovci, in the Vojvodina region.</p> <p>The results indicated that the proposed methods and techniques, with certain improvements, could be useful for 2D shape analysis of complex geometry of digitized objects of cultural heritage.</p> <p>The dissertation contribution is reflected in the numerical approach to the shape analysis of cultural heritage characteristics, whereas the rules of design or belonging to a particular artistic style are not always obvious, due to the complex geometry. The obtained results also contribute to the broadening theoretical knowledge, supplementing it with the metric characteristics of the shapes of the analyzed stylistic directions.</p>
Accepted on Scientific Board on:	9 th September 2021
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	<p>President: PhD Dragan Ivetić, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Branislav Popkonstantinović, Full Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade</p> <p>Member: PhD Vesna Stojaković, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p>
Note:	

Zahvalnica

Pre svega, zahvaljujem se Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, zato što mi je pružio intelektualnu zajednicu i akademsku slobodu, koje su bile od suštinskog značaja za moj rad tokom svih godina studiranja, istraživanja i rada.

Takođe se zahvaljujem Katedri za animaciju u inženjerstvu, posebno profesoru dr Ratku Obradoviću, svom mentoru, koji je omogućio istraživanje predstavljeno u okviru doktorske disertacije, kao i mnoga prethodna. Duboko sam mu zahvalna na ukazanom poverenju, kao i na nesebičnoj pomoći, pružanju znanja, podrške i motivacije.

Veliku zahvalnost dugujem svom drugom mentoru, profesoru dr Nebojši Raleviću, na korisnim i dobronamernim savetima, znanju i podršci koje mi je pružio tokom doktorskih studija i naučnoistraživačkog rada.

Zahvaljujem se članovima komisije: profesoru dr Draganu Ivetiću, profesoru dr Branislavu Popkonstantinoviću i profesorki dr Vesni Stojaković, na konstruktivnim komentarima i sugestijama, koji su unapredili ovu doktorsku disertaciju. Posebnu zahvalnost dugujem profesorki dr Vesni Stojaković, na profesionalnom usmeravanju i pomoći tokom mojih doktorskih studija, kao i na dugogodišnjoj saradnji.

Zahvalna sam mnogim osobama i institucijama koje su mi omogućile istraživanje i odobrile snimanje ikonostasa: Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima, Crkvi Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima i Crkvi Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji.

Veliku zahvalnost dugujem Galeriji Matice srpske u Novom Sadu, pre svega, upravnici dr Tijani Palkovljević Bugarski, na podsticanju interinstitucionalne saradnje koja je, u velikoj meri, odredila pravac istraživanja u okviru moje doktorske disertacije. Takođe se zahvaljujem i dr Snežani Mišić na prijateljskoj i stručnoj pomoći.

Iskreno sam zahvalna osobama koje su uvek bile uz mene, pa i tokom procesa dosadašnjeg obrazovanja i usavršavanja, i ulepšale, nekad, iscrpne trenutke ovog životnog puta: Aleksandru Čovičković i Saši Medić.

Kao i uvek, najviše toga dugujem svojoj porodici, koja je uvek bila moj najiskreniji kritičar i najjači oslonac. Doktorsku disertaciju posvećujem mami i sestri.

SADRŽAJ

SPISAK SLIKA.....	iii
SPISAK TABELA.....	vi
SPISAK KORIŠĆENIH AKRONIMA	vii
1. UVOD.....	1
1.1. Problem istraživanja.....	3
1.2. Predmet istraživanja.....	5
1.3. Cilj istraživanja i hipoteze	6
1.4. Metodologija istraživanja.....	6
1.5. Struktura doktorske disertacije	7
2. PREGLED LITERATURE IZ OBLASTI ISTRAŽIVANJA.....	8
2.1. 3D digitalizacija kulturnog nasleđa	8
2.1.1. Fotogrametrija.....	9
2.1.1.1. Fotogrametrijsko snimanje.....	10
2.1.1.2. Fotogrametrijsko modelovanje	13
2.1.1.3. Komparativna analiza besplatnih softvera	14
2.2. Metode za segmentaciju oblaka tačaka i detekciju kontura.....	17
2.3. Analiza oblika	20
2.3.1. Deskriptori oblika	20
2.3.2. Aktuelno stanje u oblasti kulturnog nasleđa.....	21
3. ZNAČAJ IKONOSTASA U KULTURNOM NASLEĐU	22
3.1. Problem dokumentovanja tehničkih podataka o ikonostasima.....	23
4. MATERIJALI I PRIMENJENE METODE ISTRAŽIVANJA	25
4.1. Studije slučaja digitalizovanih ikonostasa	27
4.1.1. Studija slučaja 1.....	27
4.1.2. Studija slučaja 2.....	28
4.1.3. Studija slučaja 3.....	29
4.2. Fotogrametrijska 3D digitalizacija ikonostasa.....	30
4.2.1. Terensko snimanje	30
4.2.2. Fotogrametrijska 3D rekonstrukcija ikonostasa	34
4.3. Detekcija kontura i ekstrakcija 2D preseka iz 3D modela.....	41
4.3.1. Metod za ekstrakciju 2D preseka zasnovan na presečnim ravnima	41

4.3.2. Metod za automatsku detekciju kontura	42
4.3.3. Metod zasnovan na segmentaciji tačaka	43
4.3.4. Predloženi metod za detekciju kontura i ekstrakciju 2D preseka	45
4.3.4.1. Konverzija teksturisanog poligonalnog 3D modela u oblak tačaka	46
4.3.4.2. Generisanje dubinskih mapa i ambijentalne okluzije.....	47
4.3.4.3. Segmentacija 3D modela na osnovu dubinskih mapa.....	49
4.3.4.4. Segmentacija oblaka tačaka na osnovu vertikalnosti i detekcija kontura.....	52
4.3.5. 2D vizuelizacijaoblaka tačaka u okviru CAD okruženja.....	56
4.4. 2D analiza oblika	59
4.4.1. Koncipiranje mera oblika	60
4.4.2. Primenjeni deskriptori oblika	64
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA	66
5.1. Verifikacija predložene metodologije i rezultata	70
5.2. Diskusija rezultata.....	70
6. ZAKLJUČAK.....	73
6.1. Ograničenja i pravci budućih istraživanja.....	76
7. NAUČNI DOPRINOS	77
LITERATURA	79
PRILOZI - PRIKAZ PRAKTIČNE PRIMENE DIGITALIZOVANIH IKONOSTASA.	91
1. Aplikacija proširene realnosti	91
2. Multimedijalna prezentacija	94
3. Aplikacija virtuelne realnosti	96
BIOGRAFIJA AUTORA	98
BIBLIOGRAFIJA NAUČNIH I STRUČNIH RADOVA.....	99

SPISAK SLIKA

Slika 1. Primeri fotogrametrijskog snimanja objekata: (a) konvergentni tip; (b) kombinacija paralelnog i konvergentnog tipa (Hanke & Grussenmeyer, 2002).	12
Slika 2. Opšte karakteristike besplatnih softvera (Stojaković et al., 2021).....	15
Slika 3. Opšte karakteristike besplatnih softvera (Stojaković et al., 2021).....	16
Slika 4. Primeri postojeće tehničke dokumentacije o ikonostasima iz perioda: (a) Baroka; (b) Klasicizma (Pokrajinski Zavod za Zaštitu Spomenika Kulture Vojvodine, 2021).....	24
Slika 5. Tehnički crtež ikonostasa Saborne crkve u Sremskim Karlovcima (Timotijević, 2019).....	24
Slika 6. Ikonostas u Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima.....	28
Slika 7. Ikonostas u crkvi Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima.	29
Slika 8. Ikonostas u crkvi Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima	30
Slika 9. Tehnički crtež paralelnog plana snimanja ikonostasa ilustrovan kroz: (a) osnovu; i (b) presek crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji (Đurić et al., 2019).....	33
Slika 10. Poligonalni 3D model ikonostasa u Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima: (a) generisan na osnovu gustog oblaka tačaka; (b) generisan na osnovu dubinskih mapa.....	35
Slika 11. 3D rekonstrukcija ikonostasa Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima: (a) Poligonalni 3D model i pozicije kamere; (b) Ortofoto snimak.	38
Slika 12. 3D rekonstrukcija ikonostasa crkve Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima: (a) Poligonalni 3D model i pozicije kamere; (b) Ortofoto snimak.	39
Slika 13. 3D rekonstrukcija ikonostasa crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji: (a) Poligonalni 3D model i pozicije kamere; (b) Ortofoto snimak.	40
Slika 14. Primer preseka kroz 3D model uz pomoć alatke <i>Cross section tool</i> u CloudCompare programu.	42
Slika 15. Primer automatski generisanih kontura iz rasterske projekcije rekonstruisanog modela.....	42

Slika 16. Postupak segmentacije oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti, prikazan na studijama slučaja 1 i 2: (a) vertikalnost izračunata za originalni oblak tačaka; filtriranje tačaka prema vrednostima vertikalnosti na površine koje predstavljaju (b) ikone i (c) ornamentalnu rezbariju.	44
Slika 17. Postupak konverzije teksturisanog 3D modela u novi oblak tačaka, prikazan na studiji slučaja ikonostasa 1: (a) originalni oblak tačaka; (b) poligonalni 3D model kreiran na osnovu originalnog oblaka tačaka i (c) oblak tačaka kreiran iz poligonalnog 3D modela.....	47
Slika 18. Postupak konverzije teksturisanog 3D modela u novi oblak tačaka, prikazan na studiji slučaja ikonostasa 2: (a) originalni oblak tačaka; (b) poligonalni 3D model kreiran na osnovu originalnog oblaka tačaka i (c) oblak tačaka kreiran iz poligonalnog 3D modela.....	47
Slika 19. Studija slučaja ikonostasa 1: (a) RGB i skalarni prikaz dubina 3D modela; (b) primenjeni filter ambijentalne okluzije.....	48
Slika 20. Studija slučaja ikonostasa 2: (a) RGB i skalarni prikaz dubina 3D modela; (b) primenjeni filter ambijentalne okluzije.....	49
Slika 21. Studija slučaja ikonostasa 1: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na osnovu dubina objekta.	50
Slika 22. Studija slučaja ikonostasa 2: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na osnovu dubina objekta.	51
Slika 23. Studija slučaja ikonostasa 1: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na geometrijske karakteristike vertikalnosti.	53
Slika 24. Studija slučaja ikonostasa 2: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na geometrijske karakteristike vertikalnosti.	54
Slika 25. Studija slučaja ikonostasa 2: Ilustracija postupka detekcije i ekstrakcije kontura.	55
Slika 26. Segmentovani oblaci tačaka u vidu različitih lejera: (a) studija slučaja 1; (b) studija slučaja 2.....	56
Slika 27. Studija slučaja 1. Vizuelizacija kontura u CAD-u: (a) ekstrahovane konture celokupne konstrukcije; (b) ekstrahovane konture stubova; (c) ekstrahovane konture ornamenata.....	57
Slika 28. Studija slučaja 2. Vizuelizacija kontura u CAD-u: (a) ekstrahovane konture celokupne konstrukcije; (b) ekstrahovane konture stubova sa ornamentima; (c) ekstrahovane konture ornamenata.	57

Slika 29. Studija slučaja 1: Detalj detektovanih kontura oblika u razmeri 1:50	58
Slika 30. Studija slučaja 2: Detalj detektovanih kontura oblika u razmeri 1:50	58
Slika 31. Ortofoto snimci sa prikazom analiziranih oblika okvira ikona: (a) studija slučaja 1 - ikonostas iz Baroka; (b) studija slučaja 2 - ikonostas iz Klasicizma	59
Slika 32. Ortofoto snimak sa prikazom analiziranih oblika okvira ikona - studija slučaja 3	60
Slika 33. Studija slučaja 1: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike okvira ikona (Đurić et al., 2021).....	62
Slika 34. Studija slučaja 1: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata (Đurić et al., 2021).	62
Slika 35. Studija slučaja 2: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike okvira ikona (Đurić et al., 2021).....	63
Slika 36. Studija slučaja 2: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata (Đurić et al., 2021).	63
Slika 37. Studija slučaja 3: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike okvira ikona (Đurić et al., 2021).....	64
Slika 38. (Prilog 1). AR aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji u okviru izložbe Galerije Matice srpske: (a) prikaz početne stranice aplikacije; (b) prikaz 3D modela ikonostasa u proširenoj realnosti (Djuric et al., 2019).....	93
Slika 39. (Prilog 1). AR aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji u okviru izložbe Galerije Matice srpske (Djuric et al., 2019).....	94
Slika 40. (Prilog 2). Multimedijalna web aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji u okviru izložbe Galerije Matice srpske: (a) Ortofoto prikaz ikonostasa; (b) Slika pojedinačne ikone sa pratećim tekstualnim informacijama (Djuric et al., 2019).....	95
Slika 41. (Prilog 3). VR aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima: (a) Navigacija kroz 3D scenu putem kontrolera; (b) Slika pojedinačne ikone sa pratećim tekstualnim informacijama. (Obradović et al., 2020).	97

SPISAK TABELA

Tabela 1: Parametri snimanja za sve tri studije slučaja ikonostasa (Đurić et al., 2021)..	34
Tabela 2: Komparacija parametara dva metoda za generisanja 3D modela ikonostasa na slici 9.....	36
Tabela 3: Parametri preciznosti 3D rekonstrukcije za tri studije slučaja ikonostasa.....	37
Tabela 4: Komparativni prikaz rezultata deskriptora primenjenih na oblike okvira ikona ikonostasa iz Baroka (I1-B) i Klasicizma (I2-K).....	67
Tabela 5: Komparativni prikaz rezultata deskriptora primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa iz Baroka (I1-B) i Klasicizma (I2-K)	68
Tabela 6: Rezultati klasifikacije oblika svih analiziranih elemenata ikonostasa.....	69
Tabela 7: Studija slučaja 3 - rezultati klasifikacije oblika okvira ikona (Đurić et al., 2021).....	70

SPISAK KORIŠĆENIH AKRONIMA

2D	<i>Two dimensional</i> (srp. Dvodimenzionalno)
3D	<i>Three dimensional</i> (srp. Trodimenzionalno)
AI	<i>Artificial Inteligance</i> (srp. Veštačka inteligencija)
AR	<i>Augmented Reality</i> (srp. Proširena realnost)
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (srp. Modelovanje objekata sa dodatnim informacijama)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (srp. Projektovanje pomoću računara)
CPs	<i>Control Points</i> (srp. Kontrolne tačke)
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> (srp. Digitalni model visina)
DL	<i>Deep Learning</i> (srp. "Duboko" učenje)
DoF	<i>Depth of Field</i> (srp. Dubinska oštrina)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (srp. Geografski informacioni sistem)
GSD	<i>Ground Sample Distance</i> (srp. Veličina pokrivenosti površi jednim pikselom)
H-BIM	<i>Heritage Building Information Modeling</i> (srp. Modelovanje objekata kulturnog nasleđa sa dodatnim informacijama)
HMD	<i>Head-Mounted Display</i> (srp. Uređaj montiran na glavu)
IBM	<i>Image-Based Modeling</i> (srp. Modelovanje na osnovu slika)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (srp. Osetljivost senzora fotoaparata na svetlost)
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i> (srp. Format zapisa digitalne fotografije)
MAR	<i>Mobile Augmented Reality</i> (srp. Aplikacija proširene realnosti za mobilni telefon)
ML	<i>Machine Learning</i> (srp. Mašinsko učenje)
RGB	<i>Red-Green-Blue</i> (srp. Aditivni model boja - crvena, zelena, plava)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (srp. Srednja kvadratna vrednost)
SfM	<i>Structure from Motion</i> (srp. Struktura iz kretanja)
VR	<i>Virtual Reality</i> (srp. Virtuelna realnost)
WEB	<i>Website</i> (srp. Veb stranica)

1. UVOD

Analiza oblika, kao sastavna disciplina matematike, pronašla je svoju primenu u brojnim oblastima, od matematike, inženjerstva i medicine, pa sve do umetnosti (da Fontoura Costa & Cesar Jr, 2010). Oblik je element vizuelne predstave realnog objekta, zajedno sa teksturom i bojom, i kao takav ne zahteva formalnu definiciju. Analiza oblika ima važnu ulogu u oblastima prepoznavanja, razvrstavanja, registracije i analize realnih objekata (Loncaric, 1998; Žunic, 2012). Sa razvojem digitalizacije, danas postoji ogromna distribucija digitalnog sadržaja, pri čemu se metode analize i prepoznavanja oblika uobičajeno koriste kao alati za pretraživanje slika u okviru digitalnih baza podataka. Metode za analizu oblika omogućavaju složeniju percepciju određenih karakteristika realnih objekata, drugačiju od načina na koje ih ljudsko oko vidi. U odnosu na to, metode za analizu oblika primenjene u kulturnom nasleđu mogu predstavljati značajno sredstvo za analizu dostupnog digitalnog sadržaja u cilju sticanja saznanja o karakteristikama objekata koje odlikuje kompleksna geometrija.

Tehnologije za trodimenzionalnu (3D) digitalizaciju zasnivaju se na tehnikama daljinske detekcije (eng. *remote sensing*), i predstavljaju pouzdane metode za prikupljanje prostornih podataka o postojećim objektima kulturnog nasleđa. Tema digitalizacije u cilju očuvanja, diseminacije i analize kulturnog nasleđa predstavlja značajnu oblast aktuelnih naučnih istraživanja, pri čemu, u kontekstu 4. Industrijske revolucije (eng. *Industry 4.0*), savremene tehnologije imaju presudnu ulogu u globalnoj tranziciji na digitalno doba (Inglese & Ippolito, 2018). Sa razvojem novih tehnologija, 3D digitalizacija u poslednje dve decenije sve više pronalazi svoju primenu kao alternativni pristup ili dopuna tradicionalnim načinima očuvanja, diseminacije, analize i arhiviranja kulturnog nasleđa. Ovo potvrđuje i jedan od većih projekata finansiran od strane Evropske komisije pod nazivom *Europeana* (Europeana, 2021), evropska digitalna platforma za kulturno nasleđe koja pruža pristup digitalizovanom nasleđu iz zbirke preko 3.700 biblioteka, arhiva, muzeja, galerija i audio-vizuelnih kolekcija iz cele Evrope (European Commission, 2017). Takođe, kulturne institucije se sve više trude da idu u korak sa vremenom, i implementiraju savremene tehnologije, kako bi na inovativan način nadogradile tradicionalni vid očuvanja i prezentacije kulturnog nasleđa. Prema pojedinim autorima, veliki potencijal koje tehnologije za 3D digitalizaciju imaju za unapređenje kulturnog nasleđa može se porediti sa uticajem koji je imao razvoj fotografije krajem 19. veka (Scopigno et al., 2011).

Tehnike 3D digitalizacije, vizuelizacije i analize kulturnog nasleđa baziraju se na tehnologijama iz oblasti računarske grafike koje se koriste za prikupljanje podataka, 3D modelovanje, virtuelnu reprezentaciju i analizu realnih objekata. Iako su inicijalno nastale u oblasti industrijskih aplikacija i video igara, ove tehnologije pronašle su svoju

široku primenu u očuvanju i 3D rekonstrukciji kulturnog nasleđa (Scopigno et al., 2011). Jedan od pionira projekata u primeni računarske grafike u oblasti 3D digitalizacije kulturnog nasleđa predstavlja projekat “*Digitalni Mikelandelo*” (eng. *The Digital Michelangelo*), objavljen 2000. godine na SIGGRAPH³ konferenciji (ACMSIGGRAPH, 2021), najznačajnijoj svetskoj organizaciji posvećenoj računarskoj grafici (Levoy et al., 2000). U ovom radu, razvijen je hardverski i softverski sistem za digitalizaciju objekata kulturnog nasleđa u vanlaboratorijskim uslovima okoline, koji je ilustrovan kroz 3D digitalizaciju deset Mikelandelovih (*Michelangelo Buonarroti*, 1475-1564) skulptura, uključujući i skulpturu čuvenog “*Davida*” (1501–1504). Iako je prošlo više od dve decenije od pionirskog projekta iz oblasti digitalnog nasleđa, 3D digitalizacija i dalje predstavlja cvetajuće polje istraživanja i primene u kulturnom nasleđu.

Kulturno nasleđe predstavlja širok pojam koji karakteriše kolektivni identitet u okviru određenog kulturnog konteksta. Kao takvo, kulturno nasleđe se može grubo podeliti na materijalno, nematerijalno i prirodno nasleđe (Ceccarelli et al., 2017). Istraživanje u okviru doktorske disertacije bazira se na materijalnom kulturnom nasleđu, koje obuhvata ikonostase, kao jedinstvene elemente crkvenog nasleđa.

U kontekstu crkvenog nasleđa, ikonostas predstavlja jedinstveni nepokretni element materijalnog kulturnog nasleđa koje se može videti samo *in situ*. Ikonostasi su specifični za pravoslavne crkve, i mnogi od njih, pored primarne arhitektonske funkcije, kao oltarske pregrade koja odvaja oltarsku apsidu od naosa crkve, čuvaju retka i jedinstvena dela srpskih umetnika u oblasti crkvenog slikarstva. Takođe se odlikuju izrazito kompleksnom geometrijom sa raskošnom ornamentalnom dekoracijom. Kao takvi, ikonostasi se ujedno mogu posmatrati i kao muzejski predmeti. Rezbarija ikonostasa predstavlja jedan od najsnažnijih doprinosa naše primenjene umetnosti pojedinim pravcima ovih grana u Evropi (Narodni Muzej u Beogradu, 1968). Zbog same prirode ikonostasa, kao jedinstvenog elementa u arhitektonskom, umetničkom i teološkom smislu, karakteristike oblika dekorativne ornamentike ikonostasa oslikavaju, kako određene stilske karakteristike, tako i religijske motive (Leseck, 2000).

S obzirom na veoma heterogenu prirodu rezbarija ikonostasa, postavlja se pitanje da li je moguće utvrditi precizna pravila oblikovanja, i da li je u odnosu na njih moguće jasno definisati stilski pravac kojem pripada.

Vodeća ideja istraživanja u okviru doktorske disertacije bazira se na numeričkoj deskripciji stilskih karakteristika oblika kompleksne geometrije kreirane metodom fotogrametrijske 3D digitalizacije. U tu svrhu, razvijen je metod koji je testiran na studijama slučaja tri reprezentativna primera ikonostasa, kao objekata kulturnog nasleđa

³ Originalni naziv na engleskom jeziku: *Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques*

sa izrazito kompleksnom geometrijom. Predložena metodologija može se podeliti u tri osnovne celine:

- Razvoj strategije za visoko preciznu fotogrametrijsku 3D digitalizaciju na primeru ikonostasa;
- Razvoj metoda za detekciju kontura i kreiranje razumljivih dvodimenzionalnih (2D) preseka kompleksne geometrije kroz digitalizovane 3D modele.
- Primena matematičke metode analize oblika za numeričku deskripciju i klasifikaciju stilskih karakteristika 2D oblika ekstrahovanih iz fotogrametrijskih 3D modela.

U skladu sa tim, istraživanje u okviru doktorske disertacije obuhvata širi kontekst tehnologija i znanja iz oblasti računarske grafike i matematike koje se koriste za 3D digitalizaciju, inverzno modelovanje, odnosno ekstrahovanje 2D preseka i kontura iz digitalizovanih 3D modela, i analizu oblika primenjenih na primeru ikonostasa.

1.1. Problem istraživanja

Objekte kulturnog nasleđa vrlo često karakteriše izrazito kompleksna geometrija i materijalizacija, kao i nepravilna forma ornamenata. Zbog brojnih razloga, kao što je kvalitet trenutnog stanja ili nepoznato poreklo, kao i budući da su mnoge godine protekle od njihovog nastanka, u pojedinim slučajevima je teško povezati vizuelne karakteristike objekta kulturnog nasleđa sa određenim umetničkim pravcem. Kompleksna geometrija objekta dodatno doprinosi neodređenosti i nesigurnosti prilikom određivanja jasnih pravila oblikovanja. Takođe, često ne postoje odgovarajuća tehnička dokumentacija i pouzdani podaci o pravilima oblikovanja pojedinih objekata kulturnog nasleđa.

Digitalna reprodukcija ovakvog tipa objekata uz pomoć tradicionalnih pristupa modelovanju je gotovo nemoguća. Kod objekata sa velikim brojem sitnih i nepravilnih detalja kao što su ikonostasi, tehničko crtanje na osnovu tradicionalnog merenja realnog objekta predstavljalo bi neprecizan i vremenski zahtevan posao. Detaljni 2D CAD (eng. *Computer Aided Design - CAD*) modeli kompleksne geometrije trebalo bi da se zasnivaju na više različitih pogleda za isti 3D model, kao i sa različitim nivoima detalja i apstrakcije (Hohmann et al., 2010).

Osnovni problem istraživanja u okviru doktorske disertacije predstavlja analiza oblika kompleksne geometrije u cilju određivanja jasnih relacija između karakteristika oblika i stilskog pravca.

Budući da je karakteristike složene kompleksne geometrije često teško definisati, matematički pristup analizi oblika realnih karakteristika objekata pokazao se kao efikasan metod u suočavanju sa neodređenošću arhitektonskih tipologija i stilova (Hermon & Niccolucci, 2002b, 2002a; Tepavčević & Stojaković, 2013). Kroz studije koje obuhvataju neke od najznačajnijih primera kulturnog nasleđa, kao što su Panteon u Rimu (*Pantheon*, 113-125) i Palata Guelj u istoimenom parku u Barseloni (*Palau Güell*, 1885-1890) ilustrovan je značaj integracije metamatičkih metoda i 3D digitalizacije za geometrijsku analizu i klasifikaciju suviše kompleksnih ili nedovoljno istraženih karakteristika arhitektonskih objekata (Aliberti & Alonso-Rodríguez, 2017; González et al., 2018). Matematičke metode zasnovane na tehnikama analize oblika imaju široku primenu u zadacima identifikacije, razvrstavanja i klasifikacije objekata kulturnog nasleđa (Costa & Cesar, R.M., 2000; I. Đurić et al., 2019, 2018; Đurić et al., 2021; Žunic, 2012). Takođe, u aktuelnoj literaturi postoje primeri primene vizuelnih deskriptora, kao što su deskriptori boje i teksture, u svrhu prepoznavanja i stilske klasifikacije digitalizovanih umetničkih dela (Bianconi & Bello-Cerezo, 2018; Manjunath et al., 2001). Identifikacija različitih komponenti u 3D modelima kulturnog nasleđa značajna je jer doprinosi efikasnijem proučavanju digitalnog nasleđa i njegovoj integraciji sa metričkim atributima (Eleonora Grilli & Remondino, 2019).

3D digitalizacija je posebno važna u slučajevima prikupljanja podataka, digitalnog arhiviranja, analize i kreiranja verne 3D rekonstrukcije objekata kulturnog nasleđa koje odlikuje kompleksna geometrija, i/ili koje je na neki način nepristupačno. Digitalizovane replike realnih objekata kulturnog nasleđa pružaju različite mogućnosti za dokumentovanje, upravljanje i analizu dostupnih podataka unutar virtuelnog okruženja. Osim važnosti prikupljanja podataka o trenutnom stanju objekta, razvoj različitih tehnika za analizu oblika je značajan za proučavanje kompleksne geometrije digitalizovanih modela, i suočavanje sa neodređenošću u analizi stilskih karakteristika objekata kulturnog nasleđa.

Kada se radi o digitalizaciji kulturnog nasleđa, ona zahteva posebnu pažnju i striktni protokol za digitalizaciju, u poređenju sa predmetima koji nemaju određenu materijalnu vrednost (Pieraccini et al., 2001; Sapirstein, 2016). Umetnička dela uglavnom nije moguće dodirivati, niti pomerati, dok je u velikom broju slučajeva i sam pristup ovakvim objektima ograničen, kako kompleksnom formom objekta, tako i lokacijskim uslovima u kojima se nalazi. S obzirom na to, sama procedura prikupljanja podataka o objektima kulturnog nasleđa zahteva adekvatan izbor metodologije i detaljno osmišljen protokol snimanja (Sapirstein, 2016). Takođe, za razliku od drugih predmeta digitalizacije, zbog potreba arhiviranja objekata kulturnog nasleđa vrlo često se zahteva visoka preciznost 3D rekonstrukcije (Pieraccini et al., 2001).

Važno je istaći da ne postoji jedinstveni pristup ili tehnologija za prikupljanje 3D podataka i modelovanje, koji se mogu primeniti u opštem slučaju 3D digitalizacije. 3D

digitalizacija predstavlja složen proces koji se ne može posmatrati izdvojeno iz konteksta predmeta digitalizacije. Izbor metoda 3D digitalizacije zavisi od pojedinačne vrste i složenosti objekata kulturnog nasleđa, kao i od specifičnih zahteva primene.

Fotogrametrijska 3D digitalizacija predstavlja mernu tehniku zasnovana na pasivnoj metodi za optičko merenje, koja koristi seriju fotografija snimljenih iz različitih uglova i pozicija za generisanje 3D modela objekta. Fotogrametrijski rekonstruisani 3D modeli objekata sadrže niz informacija o realnom stanju objekta, kao što su realistični prikaz materijala, teksture i forme. S obzirom na to da omogućava visoku tačnost 3D rekonstrukcije uz korišćenje pristupačne opreme, fotogrametrijska metoda 3D digitalizacije se u velikom broju slučajeva nameće kao adekvatan metod za prikupljanje podataka u ograničenim uslovima u kojima se objekti kulturnog nasleđa nalaze (Dhonju et al., 2017; Đurić & Letić, 2017; Koutsoudis et al., 2014; McCarthy, 2014; Menna et al., 2016; Rahaman & Champion, 2019; Sapirstein, 2016; Stojakovic & Tepavcevic, 2011).

Istraživanje u okviru doktorske disertacije bavi se i problemom inverznog modelovanja, odnosno, kreiranjem detaljnih 2D preseka kompleksne geometrije iz fotogrametrijski digitalizovanih modela, u cilju ekstrahovanja kontura pojedinih oblika, koje se dalje koriste u 2D analizi oblika. U skladu sa tim, razmatrane su metode za detektovanje kontura u nestrukturiranim oblacima tačaka. Date metode većinski se zasnivaju na tehnikama za segmentaciju oblaka tačaka iz digitalizovanih 3D modela. Na osnovu pregleda dosadašnje literature i prakse iz date oblasti, tehnike segmentacije tačaka korisne su za detektovanje kontura i klasifikaciju nestrukturiranog oblaka tačaka (Hackel et al., 2016a, 2016b; Özdemir et al., 2021; Weinmann et al., 2017).

1.2. Predmet istraživanja

Predmet istraživanja u okviru doktorske disertacije može se podeliti na nekoliko osnovnih tema. Kako se kao osnovni problem istraživanja postavlja analiza oblika kompleksne geometrije ikonostasa kreirane fotogrametrijskom 3D digitalizacijom, fokus istraživanja predstavlja analizu i primenu matematičkih metoda analize oblika, zasnovanih na numeričkoj deskripciji. U svrhu određivanja jasnih relacija između karakteristika oblika i stilskog pravca, korišćeni su 2D deskriptori oblika.

Istraživanje u okviru doktorske disertacije obuhvata i primenu fotogrametrijske 3D digitalizacije, metoda segmentacije oblaka tačaka i detektovanja kontura, u cilju kreiranja preciznih 3D i 2D modela kompleksne geometrije ikonostasa.

1.3. Cilj istraživanja i hipoteze

Osnovni cilj istraživanja predstavlja numeričku analizu i stilsku klasifikaciju karakteristika oblika kompleksne geometrije ikonostasa, kreirane fotogrametrijskom 3D digitalizacijom. U odnosu na dati cilj rada, osnovne hipoteze u okviru doktorske disertacije definisane su na sledeći način:

H1: Primenom deskriptora oblika na 2D preseke karakterističnih elemenata objekta, ekstrahovanih iz fotogrametrijski digitalizovanih 3D modela, mogu se odrediti određene korelacije između karakteristika oblika kompleksne geometrije i stilskog pravca.

H2: Analizom kvantitativnih vrednosti primenjenih deskriptora oblika moguće je formirati skup deskriptora koji se mogu koristiti u zadacima analize, identifikacije i klasifikacije strukturnih elemenata digitalizovanih objekata kulturnog nasleđa.

Specifičan cilj koji proizilazi iz osnovnog cilja istraživanja predstavlja kreiranje strategije za snimanje i detaljnu 3D rekonstrukciju ikonostasa, koja može biti primenjiva i u opštem slučaju digitalizacije ikonostasa, ali i drugih tipova nepokretnog kulturnog nasleđa, sličnih oblikovnih karakteristika (ravan tip objekta, kompleksne površinske geometrije). Takođe, istraživanje obuhvata i poseban cilj koji podrazumeva razvoj modela za detekciju kontura oblika kompleksne geometrije ikonostasa kreirane fotogrametrijskom 3D digitalizacijom, i kreiranje razumljivih formi 2D vizualizacije.

1.4. Metodologija istraživanja

Istraživanje u okviru doktorske disertacije podeljeno je na dve osnovne celine. Prva celina podrazumeva teorijska istraživanja iz oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa i analize oblika. U okviru ove faze izvršen je pregled aktuelne naučne literature o dosadašnjim istraživanjima iz sledećih oblasti:

- Fotogrametrijska digitalizacija kulturnog nasleđa;
- 2D vizuelizacija i detektovanje kontura nepravilne geometrije iz digitalizovanih 3D modela objekata;
- Analiza oblika zasnovana na primeni 2D deskriptora oblika.

Druga celina podrazumeva razvoj modela za analizu oblika kompleksne geometrije digitalizovanih 3D modela na primeru ikonostasa. U okviru ove faze biće izvršene sledeće aktivnosti:

- Digitalizacija tri reprezentativna primera ikonostasa korišćenjem fotogrametrije, kao metode za snimanje i 3D modelovanje objekata na osnovu slika;
- Kreiranje čitljivih 2D preseka i ekstrahovanje kontura karakterističnih delova objekta iz fotogrametrijski generisanih oblaka tačaka, korišćenjem metode segmentacije oblaka tačaka;
- Dizajniranje odgovarajućih mera oblika i primena 2D deskriptora oblika u cilju analize i klasifikacije stilskih karakteristika glavnih strukturnih elemenata digitalizovanih ikonostasa (ikona i konstruktivnih elemenata).

1.5. Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija je organizovana u sedam poglavlja.

U prvom poglavlju predstavljeni su predmet, problem i cilj istraživanja. Takođe, predstavljen je sažeti pregled metodologije istraživanja, kao i struktura doktorske disertacije.

Drugo poglavlje sadrži pregled i analizu literature i praktičnih studija iz oblasti istraživanja. Prikazane su metode i tehnologije korišćene za 3D digitalizaciju, 2D vizuelizaciju digitalizovanih objekata i 2D analizu objekata kulturnog nasleđa.

U trećem poglavlju predstavljeni su istorijski razvoj i značaj ikonostasa u kulturnom nasleđu, kao i problem dokumentovanja tehničkih podataka o postojećem stanju ikonostasa.

Četvoro poglavlje prikazuje materijal i primenjene metode u okviru doktorske disertacije. Prikazane su tri studije slučaja ikonostasa, dok su metode i tehnologije korišćene u okviru eksperimentalnog dela istraživanja detaljno opisane. U ovom poglavlju opisan je postupak za 3D digitalizaciju i razvoj matematičkog modela za 2D analizu oblika kompleksne geometrije, primenjen na tri studije slučaja ikonostasa.

U petom poglavlju dati su rezultati istraživanja, verifikacija predložene metodologije, kao i diskusija rezultata.

U šestom poglavlju izvedeni su zaključci, sa posebnim osvrtom na ograničenja i pravce budućih istraživanja, dok sedmo poglavlje predstavlja naučni doprinos doktorske disertacije.

Doktorska disertacija sadrži tri priloga, u okviru kojih su ilustrovani primeri dosadašnje primene digitalizovanih ikonostasa u praksi. Rad je zaključen biografijom kandidata i bibliografijom naučnih i stručnih radova iz oblasti doktorske disertacije.

2. PREGLED LITERATURE IZ OBLASTI ISTRAŽIVANJA

U okviru istraživanja razmatrane su metode i tehnologije za 3D digitalizaciju kulturnog nasleđa, segmentaciju oblaka tačaka i 2D analizu oblika. Analiza teorijskih i praktičnih istraživanja, kao i aktuelno stanje u oblasti dati su u naredna tri poglavlja.

2.1. 3D digitalizacija kulturnog nasleđa

3D digitalizacija, u širem smislu podrazumeva proces prikupljanja podataka o prostornim strukturama i njihovo konvertovanje u digitalni format. Kao rezultat dobija se digitalna reprezentacija realnog objekta. 3D digitalizacija predstavlja multidimenzionalni i kompleksan proces, koji se sastoji iz tri glavne faze (Pavlidis et al., 2007):

1. Priprema, koja podrazumeva preliminarne aktivnosti koje se odnose na planiranje i izbor adekvatne tehnologije i metoda za 3D digitalizaciju.
2. Snimanje, odnosno merenje u 3D prostoru u cilju prikupljanja podataka o trodimenzionalnom objektu, koje predstavlja glavni proces digitalizacije, a sprovodi se prema planu iz faze 1. Rezultat snimanja su nestrukturirani trodimenzionalni podaci, odnosno oblak tačaka u 3D prostoru (Stojaković, 2018).
3. Obrada i procesiranje prikupljenih podataka koji uključuju modelovanje trodimenzionalne reprezentacije objekta na osnovu oblaka tačaka, i teksturisiranje 3D modela.

Metode 3D digitalizacije omogućavaju efikasno prikupljanje podataka o trodimenzionalnim objektima, kao i detaljnu i tačnu 3D rekonstrukciju i reprezentaciju objekata kulturnog nasleđa. U odnosu na specifične zahteve digitalizacije, kao i u odnosu na kompleksnost samih predmeta digitalizacije, danas postoji mnoštvo metoda i tehnologija za 3D digitalizaciju kulturnog nasleđa. Prema najvećem broju istraživanja, najzastupljenije tehnologije se zasnivaju na metodama za optička merenja (Mathys et al., 2014; Pavlidis et al., 2007; Pieraccini et al., 2001; Sansoni et al., 2009). Optičke metode koriste senzore za detekciju oblika za prikupljanje podataka o prostornim strukturama. Ovakve metode se dele na aktivne i pasivne. Aktivni senzori koriste laserske zrake za procenu i pozicioniranje položaja tačke u 3D prostoru, dok se kod pasivnih metoda kao ulazni podatak koriste fotografije, čijim se naknadnim procesiranjem dobijaju trodimenzionalni podaci (Stojaković, 2018). Reprezentativna tehnika zasnovana na aktivnoj metodi za optičko merenje predstavlja lasersko skeniranje, dok je od pasivnih metoda najzastupljenije modelovanje na osnovu slika (eng. *Image-Based Modeling – IBM*), odnosno fotogrametrija.

Prednost laserskog skeniranja jeste što se postiže visoka preciznost kroz brz i jednostavan način merenja u 3D prostoru, što je omogućeno korišćenjem uređaja visoke cene. S druge strane, fotogrametrijska metoda omogućava nešto manju, ali zadovoljavajuću tačnost prikupljanja podataka uz korišćenje pristupačne opreme, kao što je fotoaparata. Prema najvećem broju istraživanja, fotogrametrija predstavlja najbolje kompromisno rešenje iz aspekta kvaliteta rezultata i cene (Pavlidis et al., 2007; Remondino et al., 2012; Menna et al., 2016). S obzirom na to da koristi minimalnu, lako prenosivu opremu u vidu fotoaparata, fotogrametrija se u velikom broju slučajeva nameće kao adekvatan metod za prikupljanje podataka u striktnim i ograničenim uslovima u kojima se objekti kulturnog nasleđa nalaze.

U studijama slučaja digitalizacije zaštićenih područja ili objekata kulturnog nasleđa velikih razmera, često se koriste integrisane tehnike laserskog skeniranja i fotogrametrije (Luhmann et al., 2020; Owda et al., 2018), ili kombinacija fotogrametrijskog snimanja sa tla i snimanja uz pomoć drona (Febro, 2020).

2.1.1. Fotogrametrija

Fotogrametrija predstavlja efikasnu i široko primenjivu pasivnu metodu 3D digitalizacije. Dva osnovna tipa fotogrametrije su vazдушna (eng. *aerial*) i terenska (eng. *terrestrial*), pri čemu se prvi tip odnosi na snimanje iz vazduha, dok terestrijalna fotogrametrija podrazumeva snimanje sa tla (Hallert, 1960). Fotogrametrija se zasniva na algoritmu za određivanje strukture iz kretanja (eng. *Structure from Motion - SfM*), koji na osnovu slika, automatski određuje parametre orijentacije i položaj kamere (Historic England, 2017). Na ovaj način ne dolazi do fizičkog kontakta mernog senzora sa površinom objekta koji se digitalizuje, pa samim tim nema rizika od eventualnog oštećenja datog objekta. Tokom poslednjih deset godina, istraživači u oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa složili su se da, u većini slučajeva, fotogrametrija predstavlja pouzdan, ekonomičan i fleksibilan pristup za vernu i tačnu rekonstrukciju 3D objekata (Dhonju et al., 2017; Koutsoudis et al., 2014; McCarthy, 2014; Rahaman & Champion, 2019). Štaviše, značajan napredak SfM algoritma omogućio je generisanje 3D modela objekata na osnovu 2D fotografija dostupnih na veb (eng. *web*) repozitorijumu (Kyriakaki et al., 2014).

Kroz veliki broj studija slučaja, u literaturi su ilustrovani različiti pristupi fotogrametrijskoj digitalizaciji, u zavisnosti od složenosti predmeta ili zadatih uslova 3D digitalizacije. Nicolae i koautori (2014) pokazali su uspešnost primene fotogrametrije za kreiranje verne 3D rekonstrukcije muzejskih predmeta složene geometrije i teksture, kao što je izražena refleksija materijala. Apolonio i koautori (2021) razvili su metod za fotogrametrijsko snimanje manjih muzejskih artefakata, zasnovan na korišćenju kamere

mobilnog telefona za snimanje i tehnologije za renderovanje u realnom vremenu (eng. *Real Time Rendering*) za procesiranje podataka.

2.1.1.1. Fotogrametrijsko snimanje

Preciznost fotogrametrijske 3D rekonstrukcije u najvećoj meri zavisi od kvaliteta snimanja. Kvalitet fotogrametrijskog snimanja zavisi od prethodno osmišljenog plana snimanja i korišćene opreme. U cilju postizanja tačne i realistične 3D rekonstrukcije objekta potrebno je kreirati detaljan plan snimanja. Osmišljavanje plana snimanja je od ključne važnosti za postizanja visoke tačnosti 3D rekonstrukcije objekata kulturnog nasleđa (Nocerino et al., 2014). Tačnost 3D digitalizacije kulturnog nasleđa podrazumeva postizanje preciznosti 3D rekonstrukcije koja je manja od 1 mm, ili manje za predmete manjih razmera (Pieraccini et al., 2001; Sapirstein, 2016).

Waldhäusl i Ogleby (1994) definisali su opšta pravila fotogrametrijskog snimanja arhitektonskih objekata, poznata kao *CIPA 3×3* (CIPA, 2017), koja su 1994. godine prihvaćena od strane međunarodnog komiteta za arhitektonsku fotogrametriju - CIPA (eng. *International Committee of Architectural Photogrammetry*⁴).

Praktične preporuke za prikupljanje prostornih podataka o arhitektonskim objektima odnose se na tri ključna pravila (od kojih svako obuhvata po tri ključne preporuke), koja se moraju uzeti u obzir pri fotogrametrijskom snimanju (Waldhäusl & Ogleby, 1994):

1. "Geometrijska pravila"⁵, koja se odnose na analizu geometrije objekta koji predstavlja predmet snimanja, određivanje njegovih dimenzija i načina fotogrametrijskog snimanja.
2. "Fotografska pravila"⁶, koja se odnose na pravilno određivanje i konzistenciju internih parametara kamere.
3. "Organizaciona pravila"⁷, koja podrazumevaju kreiranje elaborata i skica koji se odnose na lokacijske uslove, ograničenja i prpratne informacije vezane za snimanje na terenu.

⁴ Originalni naziv: *Comité International de la Photogrammétrie Architecturale (CIPA Heritage Documentation, 2021)*.

⁵ Prevod autora. Originalni naziv: *The 3 geometrical rules* (Waldhäusl & Ogleby, 1994).

⁶ Prevod autora. Originalni naziv: *The 3 photographic rules* (Waldhäusl & Ogleby, 1994).

⁷ Prevod autora. Originalni naziv: *The 3 organizational rules* (Waldhäusl & Ogleby, 1994).

Iako se danas uočava značajan napredak digitalnih kamera i senzora, SfM algoritma za automatsko određivanje parametara kamere, i softvera za fotogrametrijsko modelovanje, data pravila i dalje predstavljaju osnove protokola fotogrametrijskog snimanja.

Dizajniranje plana snimanja obuhvata određivanje odgovarajućih pozicija i parametara fotoaparata, u odnosu na specifične lokacijske uslove i ograničenja prilikom snimanja. Pravila koja se odnose na određivanje pozicija i parametara fotoaparata, inicijalno su definisani u oblasti vazdušne fotogrametrije (Neumann, 2004, 2008). Da bi se postigla željena preciznost 3D rekonstrukcije potrebno je definisanje veze između realne razmere objekta i njegovih dimenzija na slici. Ovaj odnos prvenstveno je definisan za analogne kamere kao razmera slike koja se određuje prema sledećoj formuli (Neumann, 2008):

$$\text{razmera slike} = \frac{h}{c} \quad (1)$$

Gde su:

h – udaljenost fotoaparata od objekta

c – žižna daljina (eng. *focal length*)

Sa razvojem digitalnih kamera, uvodi se termin GSD (eng. *Ground Sample Distance*) koji predstavlja odnos veličine piksela na senzoru i veličine piksela u prirodi, odnosno vezu između realne razmere objekta i njegovih dimenzija na slici izraženih u pikselima (Felipe-García et al., 2012; Neumann, 2004, 2008). Veličina realnog objekta izražena u pikselima označava se kao GSD i može se odrediti prema sledećoj formuli (Neumann, 2008):

$$GSD = m \times \text{pixel size} \quad (2)$$

Gde su:

GSD – veličina pokrivenosti površine jednim pikselom

m – razmera slike ($\frac{h}{c}$)

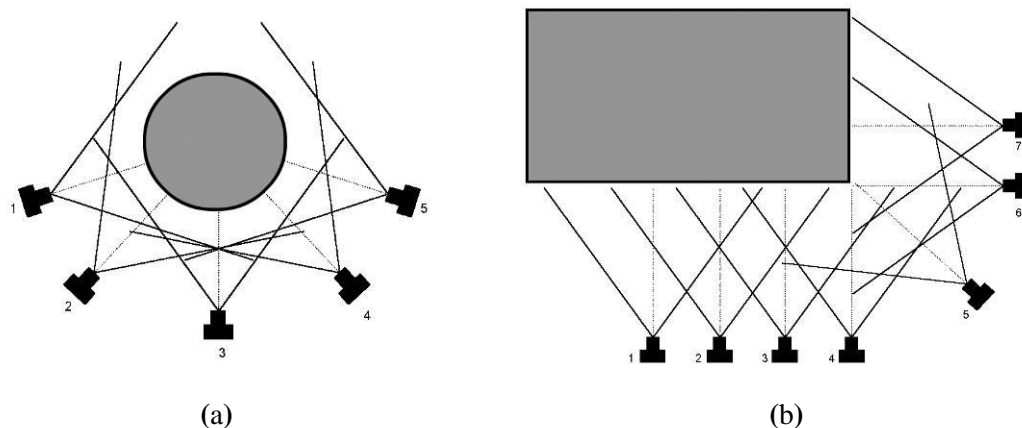
pixel size – veličina piksela

Odnos između površine objekta i broja piksela na slici zavisi od udaljenosti objekta od senzora fotoaparata. Uzimajući u obzir razmeru, odgovarajući nivo detalja 3D rekonstrukcije može se definisati na osnovu GSD vrednosti. GSD mora biti manji od najmanjih detalja koje model treba da sadrži (Stojaković, 2018). Kada se odredi željena

detaljnost 3D rekonstrukcije, moguće je izračunati udaljenost fotoaparata od objekta i razmak između fotografija u skladu sa uslovima snimanja.

Tip fotogrametrijskog snimanja i proračun razmaka između fotografija zavise od oblika objekta snimanja. Osnovno pravilo fotogrametrijskog snimanja podrazumeva da svaka tačka u 3D prostoru treba da bude određena preklapanjem najmanje dva zraka pod odgovarajućim uglom (Hanke & Grussenmeyer, 2002).

Dva osnovna tipa snimanja su konvergentni i paralelni (Hanke & Grussenmeyer, 2002; Waldhäusl & Ogleby, 1994). Konvergentni tip koristi se za snimanje trodimenzionalnih objekata kompaktne forme, dok se paralelni pristup koristi kod ravnog tipa objekata, odnosno onih objekata koji nemaju izraženu dubinu. Primeri konvergentnog tipa snimanja, i kombinacije paralelnog i konvergentnog tipa prikazani su na slici 1. Konvergentni tip predstavlja najpovoljniji tip snimanja, pri čemu preklapanje između fotografija treba da bude najmanje 60%, dok odnos razmaka između uzastopnih fotografija i rastojanja kamere od objekta treba da bude od 1:1 do 1:15 (CIPA, 2017).



Slika 1. Primeri fotogrametrijskog snimanja objekata: (a) konvergentni tip; (b) kombinacija paralelnog i konvergentnog tipa (Hanke & Grussenmeyer, 2002).

Interni parametri fotoaparata obuhvataju žižnu daljinu (eng. *focal length*), eksponažu (eng. *shutter speed*), blendu (eng. *aperture*), osetljivost senzora (eng. *ISO*) i balans bele svetlosti (eng. *white balance*). Parametri fotoaparata treba da budu konzistentni tokom snimanja, što podrazumeva manuelno postavljanje i fiksiranje žižne daljine, fokusa i eksponaže (CIPA *Heritage Documentation*, 2021). Da bi se postigao odgovarajući kvalitet fotografija, potrebno je koristiti fotoaparat sa velikim senzorom (Waldhäusl & Ogleby, 1994). Rezultat fotogrametrijske 3D rekonstrukcije u najvećoj meri zavisi od kvaliteta i izoštrenosti fotografija, pa je usklađivanje datih internih parametara fotoaparata od suštinskog značaja. Oni zavise prvenstveno od lokacijskih uslova i ograničenja prilikom snimanja.

2.1.1.2. Fotogrametrijsko modelovanje

Procesiranje podataka dobijenih na osnovu snimanja zasniva se na SfM algoritmu, odnosno na primeni fotogrametrijskih softvera za automatsko određivanje internih parametara i pozicija fotoaparata. Proces fotogrametrijske rekonstrukcije bazira se na principu triangulacije zraka projektovanih iz najmanje dve, ili uobičajeno više fotografija, na osnovu čega se određuje položaj tačke u 3D prostoru (Mohr et al., 1995; Moons et al., 2009; Xiang & Cheong, 2003). Softveri zasnovani na automatskom SfM algoritmu uobičajeno prate sledeći postupak obrade i procesiranja podataka:

- Procena i određivanje pozicija fotoaparata i preklapanja karakterističnih tačaka na fotografijama (eng. *image alignment*). Produkt ove faze je generisanje retkog oblaka tačaka (eng. *sparse point cloud*) i određivanje pozicija fotoaparata (eng. *camera poses*);
- Generisanje gustog oblaka tačaka (eng. *dense point cloud*) i/ili generisanje dubinskih mapa (eng. *depth maps*);
- Generisanje poligonalnog 3D modela (eng. *mesh*) na osnovu oblaka tačaka ili na osnovu dubinskih mapa;
- Projektovanje realističnih tekstura na poligonalni 3D model.

Danas postoji veliki broj softvera za fotogrametrijsku rekonstrukciju, od čega su neki od najzastupljenijih komercijalnih softvera: *Agisoft Metashape* (Agisoft, 2021), *Reality Capture* (CapturingReality, 2021), *Autodesk ReCap* (Autodesk, 2021a), *Context Capture* (Bentley, 2021). Prema najvećem broju istraživanja, softver *Agisoft* predstavlja najbolje kompromisno rešenje sa aspekta kvaliteta rezultata i cene softvera (Stathopoulou & Remondino, 2019; Rahaman et al., 2019). Nova verzija ovog softvera - *Agisoft Metashape* iz 2019. godine, omogućava generisanje 3D modela direktno na osnovu dubina proračunatih iz fotografija (eng. *depth maps method*), bez potrebe za prethodno kreiranim oblakom tačaka (Agisoft, 2021). 3D model generisan na osnovu dubinskih mapa sadrži znatno manji broj poligona, pri čemu pruža visoki kvalitet modela. Vreme potrebno za generisanje 3D modela na osnovu dubinskih mapa je kraće od vremena potrebnog za generisanje gustog oblaka tačaka.

Nakon 3D rekonstrukcije objekta, moguće je generisati ortofoto snimak. Ortofoto je dvodimenzionalna slika, odnosno, ortogonalna projekcija na izabranu ravan, visokog nivoa detaljnosti, sa realističnim prikazom materijala i tekstura. S obzirom na to da ortofoto predstavlja 2D sliku lišenu perspektivne deformacije, moguće je odrediti preciznost rekonstruisanog 3D modela u odnosu na GSD korišćen prilikom snimanja. Data preciznost predstavlja odnos veličine piksela ortofoto slike i inicijalno postavljene GSD vrednosti. Uvođenjem kontrolnih tačaka (eng. *Control Points – CPs*) moguće je odrediti grešku pri proceni položaja tačke u 3D prostoru i položaja njene ortogonalne projekcije. Kontrolne tačke su referentne tačke na 3D modelu koje predstavljaju

karakteristične distance izmerene na realnom objektu. Greška pri određivanju projekcije 3D tačke (eng. *RMS reprojection error*) izražava se kroz koren srednje kvadratne greške izračunatih koordinata objekta u odnosu na kontrolne tačke, i služi za procenu tačnosti fotogrametrijske 3D rekonstrukcije (Felipe-García et al., 2012).

2.1.1.3. Komparativna analiza besplatnih softvera

Tokom poslednjih godina, uočava se značajan razvoj besplatnih softvera za fotogrametrijsko modelovanje, kao i aplikacija za mobilne telefone. Ipak, većina ovih softverskih rešenja ne predstavlja adekvatnu alternativu komercijalnim programima za 3D rekonstrukciju kulturnog nasleđa (Đuric et al., 2021; Gagliolo et al., 2018).

U okviru istraživanja izvršeni su pregled i komparativna analiza dostupnih besplatnih softvera za fotogrametrijsko modelovanje. Analizirano je ukupno osam softvera: *Colmap* (Colmap, 2021), *Open MVG* (OpenMVG, 2021), *MicMac* (MicMac, 2021; Rupnik et al., 2017), *AliceVision Meshroom* (AliceVision, 2021), *3DF Zephyr Free* (3DFlow, 2021), *Regard3D* (Regard3D, 2021), *VisualSFM* (VisualSFM, 2021; Wu, 2011), *Multi-View Environment* (Fuhrmann et al., 2014; *Multi-View Environment*, 2021).

Programi su analizirani prema kriterijumima koji su značajni za digitalizaciju kulturnog nasleđa, kao što su mogućnost generisanja i optimizacije 3D modela i tekstura, mogućnost uvođenja razmere i merenja sa 3D modela, kompleksnost i intuitivnost pri korišćenju programa i sl. (Stojaković et al., 2021). Tabelarni prikaz komparativne analize opštih karakteristika softvera ilustrovan je na slikama 2 i 3.

SOFTVERI	COLMAP	OpenMVG	MicMac	AliceVision MeshRoom	3DF Zephyr FREE	Regard3D	VisualSFM	Multi-View Environment
Operativni sistem	Windows, MAC OS, Linux	Window, Linux	Window, MAC, and Linux	Window, Linux	Windows	Windows, MAC OS X, Linux, 64-bit samo	Windows, MAC OS, Linux	Windows, MAC OS
Hardverski zahtevi	NVIDIA CUDA	NVIDIA CUDA	CPU	NVIDIA CUDA (2.0) GPU	NVIDIA - 2GB i CUDA - 3.0	Min 4GB RAM, OpenGL GPU	NVIDIA CUDA ili CPU	Specijalni hardverski zahtevi
Izlazni format fajla	ply, vrml	ply	geotiff, ply, xml	abc, obj	ply, obj, fbx, pdf 3D, u3d, dae, pts, ptx, xyz, txt, las, e57	obj, ply	ply	MVE
Mogućnost generisanja 3D modela	delimično	ne	ne	da	da	da	ne	da
Mogućnost generisanja teksture	ne	ne	ne	da	da, izvoz samo teksturisano modela	da (<i>surface generation, colorization method</i>)	ne	da
Mogućnost maskiranja fotografija	ne	ne	da	ne	ne	ne	ne	da
Mogućnost editovanja modela u softveru	ne	ne	ne	ne	da	ne	ne	da (<i>mesh clean</i>)
Mogućnost optimizacije 3D modela	ne	ne	ne	da (<i>decimate mesh + retexture mesh</i>)	da	da (<i>surface generation</i>)	ne	ne
Mogućnost uvođenja dimenzija i merenja sa 3D modela	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne
Mogućnost generisanja ortofoto snimka	ne	ne	da	ne	ne	ne	ne	ne
Nivo složenosti softvera	nizak	nizak	nizak	visok (node-based interfejs)	srednji	nizak (jednostavan UI)	nizak	srednji
Intuitivnost pri korišćenju (interfejs)	da	ne	ne	da	da	da	da	ne
Grafički kvalitet interfejsa	nizak	nizak	nizak	visok	visok	srednji	nizak	nizak
Prilagodjen neiskusnim korisnicima / namenjen stručnjacima	Namenjen profesionalnim korisnicima i istraživačima	Namenjen profesionalnim korisnicima i istraživačima	Namenjen profesionalnim korisnicima i istraživačima. Prilagodjen neiskusnim korisnicima	Složen - (node-based interfejs). Prilagodjen neiskusnim korisnicima	Prilagodjen neiskusnim korisnicima	Neprikladjen neiskusnim korisnicima	Prilagodjen neiskusnim korisnicima	Neprikladjen neiskusnim korisnicima

Slika 2. Opšte karakteristike besplatnih softvera (Stojaković et al., 2021).

Mogućnost postavljanja 3D modela u web okruženje	kao export-ovan 3D model	*moguće kreirati samo oblak tačaka	ne	da (Sketchfab)	ne	ne	*moguće kreirati samo oblak tačaka	kao export-ovan 3D model
Kvalitet materijala / teksture	srednje dobar	srednje dobar	srednje dobar	visok	visok	srednje dobar	*moguće kreirati samo oblak tačaka	visok
Integracija sa drugim softverima	Blender	/	/	Blender, Maya, Houdini Plugins	/	MeshLab	/	/
Ograničenja	Moguće generisati samo oblak tačaka. 3D model je potrebno generisati u drugom 3D softveru. Može da eksportuje 3D model, ali u okviru radnog okruženja moguće raditi samo sa oblakom tačaka	Moguće generisati samo oblak tačaka. 3D model je potrebno generisati u drugom 3D softveru. Komplikovan za korišćenje korisnicima koji nemaju iskustva sa fotogrametrijom	Komplikovan postupak preuzimanja i instalacije (sajt na francuskom)	Ne generiše posebno <i>dense cloud</i> i nema izlaznog formata za oblak tačaka Finalno renderovanje 3D modela zahtevno za procesor (CPU) Oblak tačaka moguće kreirati samo sa NVIDIA grafičkim karticama	Limitirana besplatna verzija (omogućava procesiranje maksimum 50 fotografija), limitirano maskiranje slika	Nije omogućeno generisanja i vizuelizacije gustog oblaka tačaka u okviru programa Otežano eksportovanje .ply fajla Jednostavan zakorišćenje ako se koriste <i>default</i> parametri. Zahteva dodatno poznavanje parametara podešavanja	Zahteva veliku količinu RAM memorije. Nije omogućeno generisanje 3D modela i teksture. Komplikovana forma čuvanja podataka. Model je potrebno generisati u drugom 3D softveru.	Komplikovana instalacija (putem konzole) Komplikovan za korišćenje
Prednosti	Intuitivnost pri korišćenju i brzina izrade 3D modela	Brzina izrade 3D modela	Nastao kao rezultat naučno-istraživačkog rada (Rupnik et al., 2017)	Specifičan <i>node-based</i> interfejs Omogućava reteksturisavanje (<i>retexure mesh</i>) nakon retopologije 3D modela Omogućava poravnavanje (<i>alignment</i>) panorama fotografija	Može da kombinuje podatke kreirane uz pomoć fotogrametrije i laserskog skeniranja	Dozvoljava komercijalnu upotrebu generisanih 3D modela. Sadrži skoro sve opcije kao komercijalni program <i>Agisoft</i> . Mogućnost podešavanja parametara procesiranja. Prikazuje <i>residual</i> nakon triangulacije	Nastao kao rezultat naučno-istraživačkog rada (Wu, 2011)	Nastao kao rezultat naučno-istraživačkog rada (Fuhrmann et al., 2014)

Slika 3. Opšte karakteristike besplatnih softvera (Stojaković et al., 2021).

Na osnovu komparativne analize, testiranja i dosadašnjeg iskustva u modelovanju na osnovu slika, izdvojen je program *Meshroom*, kao potencijalna alternativa među besplatnim programima za primenu u fotogrametijskom 3D modelovanju kulturnog nasleđa. U odnosu na ostale besplatne programe, *Meshroom* se istakao po intuitivnosti pri korišćenju i visokom kvalitetu grafičkog interfejsa koji se bazira na radu sa čvorovima (eng. *node-based interface*). Rezultati testiranja programa pokazali su visok nivo beleženja realnog oblika i reprezentacije teksture i boje digitalizovanih objekata. Za razliku od većine besplatnih programa, *Meshroom* omogućava kompletan postupak obrade i procesiranja podataka: poravnavanje fotografija, generisanje oblaka tačaka, kreiranje 3D modela i generisanje teksture. Kao jedini nedostatak ovog programa ističe se nedostatak mogućnosti vizuelizacija gustog

oblaka tačaka u okviru samog programa. Gusti oblak tačaka moguće je eksportovati, što zahteva uključivanje dodatnih opcija u vidu čvorova.

U cilju utvrđivanja da li među besplatnim softverima postoji adekvatna alternativa komercijalnom softveru za potrebe fotogrametrijskog modelovanja kulturnog nasleđa, izvršena je komparativna analiza besplatnog softvera – *Meshroom* sa komercijalnim softverom – *Agisoft Metashape* (Đuric et al., 2021). Softveri su testirani na primerima dva antička objekta kulturnog nasleđa, čime su obuhvaćena dva pristupa fotogrametrijskom snimanju - konvergentni i paralelni. Na osnovu komparativne analize rezultata, zaključeno je da, za razliku od komercijalnog softvera, rezultati modelovanja u besplatnom softveru variraju u zavisnosti od oblika objekta i primenjenog metoda fotogrametrijskog snimanja (Đuric et al., 2021).

Važno je naglasiti da preciznost fotogrametrijske 3D rekonstrukcije, pre svega, zavisi od kvaliteta fotogrametrijskog snimanja (Remondino and El-Hakim 2006; Barsantiet al. 2013; Sapirstein 2016; Djuric et al. 2019; Đuric et al., 2021; Obradović et al. 2020), što implicira da je produbljeno znanje iz domena fotogrametrijskog snimanja i modelovanja neophodno za tačnu i detaljnu 3D digitalizaciju kulturnog nasleđa.

2.2. Metode za segmentaciju oblaka tačaka i detekciju kontura

Sve veća distribucija novih tehnologija koje se koriste u domenu kulturnog nasleđa promenila je pristup dokumentovanju, razumevanju, tumačenju, analizi i konzervaciji objekata nasleđa. Osim metoda 3D digitalizacije koji se široko koriste za kreiranje digitalnih replika kulturnog nasleđa, metode zasnovane na digitalnoj obradi slike, kompjuterskoj viziji, veštačkoj inteligenciji (eng. *Artificial Inteligance – AI*), mašinskom učenju (eng. *Machine Learning – ML*) i "dubokom" učenju (eng. *Deep Learning – DL*) napravile su pomak u upravljanju prostornim podacima kreiranim uz pomoć 3D digitalizacije.

U naučnoj zajednici uočava se sve veće interesovanje za razvoj alata za digitalnu reprezentaciju, identifikaciju, analizu, i strukturnu organizaciju kulturnog nasleđa. Poslednjih godina, glavni izazovi u oblasti upravljanja digitalizovanim 3D modelima kulturnog nasleđa predstavljaju semantička klasifikacija 3D oblaka tačaka i/ili konvertovanje oblaka tačaka u razumljivu vektorsku grafiku (CAD crteže) (Hackel et al., 2016a, 2016b).

3D modeli kreirani uz pomoć laserskog skeniranja i fotogrametrije, predstavljaju nestrukturirane oblake tačaka koji ne sadrže metapodatke o digitalizovanom objektu. Zbog toga, metode segmentacije sve više pronalaze svoju primenu u klasifikaciji oblaka tačaka kulturnog nasleđa.

Segmentacija oblaka tačaka predstavlja uobičajenu tehniku u geoprostornom domenu digitalizacije i vazdušne fotogrametrije, i koristi se za klasifikaciju oblaka tačaka u određene generičke klase (Özdemir & Remondino, 2019; Özdemir et al., 2021; Weinmann et al., 2017). Metode segmentacije i klasifikacije oblaka tačaka zasnivaju se na AI, ML i DL tehnikama i omogućavaju klasifikaciju oblaka tačaka digitalizovanih objekata i geoprostornih podataka na manje klase tačaka koje predstavljaju određene elemente digitalizovanih modela. Stoga se ove metode sve frekventnije implementiraju u procese inverznog modelovanja (eng. *scan/point cloud to BIM*), koji podrazumevaju postupke procesiranja podataka od oblaka tačaka, nastalog skeniranjem ili fotogrametrijom, do 3D modelovanja objekata sa dodatnim informacijama (eng. *Building Information Modeling – BIM*).

S obzirom na to da omogućava klasifikaciju nestrukturiranih oblaka određenog objekta na njegove strukturne delove, u oblasti kulturnog nasleđa, segmentacija oblaka tačaka predstavlja neophodan korak u procesu inverznog modelovanja. Na osnovu date klasifikacije, olakšava se dalja manipulacija sa digitalnim 3D modelima u okviru aktuelnih sistema za kreiranje i upravljanje multidisciplinarnim podacima o digitalnoj reprezentaciji izgrađenih objekata, kao što su BIM (Croce et al., 2021; Macher et al., 2017; Massimiliano et al., 2021), H-BIM (eng. *Heritage – BIM*) (Croce et al., 2021; Matrone et al., 2020), GIS (eng. *Geographic Information System*) (Massimiliano et al., 2021; Murtiyoso & Grussenmeyer, 2019). U domenu H-BIM sistema, metode segmentacije 3D oblaka tačaka su značajne jer doprinose boljoj interpretaciji 3D scena digitalizovanog kulturnog nasleđa, u smislu njihovog obogaćivanja semantičkim informacijama.

Aktuelna istraživanja pokazala su da postoje brojni primeri implementacije metoda segmentacije i klasifikacije oblaka tačaka na raznim studijama slučaja digitalnog kulturnog nasleđa (Croce et al., 2021; Grilli, Farella, et al., 2019; Grilli, Özdemir, et al., 2019; Matrone et al., 2020; Pierdicca et al., 2020). Croce i koautori (2021) predstavili su poluautomatski metod zasnovan na ML koji omogućava implementiranje digitalizovanog objekta kulturnog nasleđa u H-BIM sistem. Predloženi pristup oslanja se na primenu tehnike mašinskog učenja za klasifikaciju oblaka tačaka na pojedinačne arhitektonske elemente, njihovu semantičku anotaciju i, na kraju, implementaciju modela, dopunjenog informacijama neophodnim za dokumentovanje i upravljanje 3D modelom, u H-BIM sistem.

Matrone i koautori (2020) sproveli su eksperimentalno istraživanje u cilju komparacije dva algoritma zasnovana na metodama ML i DL za klasifikaciju velikih oblaka tačaka kulturnog nasleđa. Autori su zaključili da postupak koji integriše obe metode može da obezbedi najbolje performanse za semantičku segmentaciju oblaka tačaka kulturnog nasleđa. U tom kontekstu, metod zasnovan na kombinaciji ova dva pristupa klasifikacije oblaka tačaka pokazao se kao uspešan u identifikaciji

arhitektonskih elemenata, kao što su stubovi, fasade i prozori (Grilli, Özdemir, et al., 2019).

Osnovni zadatak segmentacije i klasifikacije 2D i 3D prostornih podataka predstavlja identifikacija odgovarajućih geometrijskih karakteristika posmatranih površina (Grilli, Farella, et al., 2019; Grilli et al., 2017; Hackel et al., 2016a, 2016b; Weinmann et al., 2013). Geometrijske karakteristike (eng. *geometric features*) opisuju osobine oblaka tačaka ili regiona oko posmatranih tačaka, izračunavanjem poluprečnika krivine (eng. *local neighborhood radius*) date površi u posmatranoj tački, na osnovu podataka o rasporedu susednih tačaka. One omogućavaju opisivanje karakteristika 3D strukture susedstva tačke (eng. *local neighborhood*) u prostoru na osnovu računanja lokalnih 3D karakteristike tačke. U skladu sa tim, tehnike segmentacije i klasifikacije oblaka tačaka podrazumevaju proces grupisanja tačaka u više homogenih regiona sa sličnim svojstvima na osnovu njihovih geometrijskih karakteristika.

Hackel i koautori (2016a, 2016b) koristili su metod segmentacije tačaka na osnovu njihovih geometrijskih karakteristika u cilju identifikacije i detektovanja kontura u nestrukturiranim oblacima tačaka. Autori su koristili skup geometrijskih karakteristika izdvojenih iz okoline tačke za detekciju kontura karakterističnih prostornih elemenata u oblacima tačaka velikih urbanih područja.

Kada je u pitanju detekcija kontura određenih 2D oblika iz oblaka tačaka, u literaturi iz oblasti ističu se različite tehnike analize površi, pri čemu uobičajen metod koristi rasterizovane slike generisane iz oblaka tačaka (Corso et al., 2017; Galantucci & Fatiguso, 2019; Soto-Martin et al., 2020). Na primer, Galantucci i Fatiguso (2019) primenili su digitalnu tehniku obrade slike koja koristi alate za analizu površi, u cilju detekcije oštećenja na fasadi digitalizovanog objekta kulturnog nasleđa. Corso i koautori (2017) opisali su metodologiju za procesiranje prostornih 3D podataka kreiranih primenom terestrijalnog laserskog skeniranja u dvodimenzionalne podatke koji sadrže vizuelne informacije o dubinama objekta. U cilju razvoja sredstva za proučavanje i geometrijsku analizu promena u strukturi kamena na fasadi objekta kulturnog nasleđa, autori su predložili metod zasnovan na primeni tehnike analize nagiba terena (eng. *slope analysis*) u GIS radnom okruženju. Tehnika analize nagiba omogućava identifikaciju kontura različitih površi, i ima slične karakteristike kao geometrijska karakteristika vertikalnosti površi (Corso et al., 2017).

2.3. Analiza oblika

Analiza oblika obuhvata dva ključna koncepta – reprezentaciju i deskripciju (Dražić, 2019; Loncaric, 1998; Zhang & Lu, 2004). Reprezentacija oblika koristi se za analizu slike i podrazumeva metodu za prevođenja sadržaja slike u nenumeričku reprezentaciju originalnog oblika (na primer, kao grafika), tako da su njegove glavne osobine očuvane. Deskripcija predstavlja postupak numeričkog opisivanja osobina oblika i čini sledeći korak reprezentacije. Postupak deskripcije podrazumeva generisanje vektora koji opisuje dati oblik (Loncaric, 1998). Prema tome, metode za analizu oblika se grubo mogu klasifikovati na numeričke i nenumeričke (Loncaric, 1998; Dražić, 2019).

U literaturi postoji više klasifikacija metoda za analizu oblika (Loncaric, 1998; Rosin, 2005; Sonka et al., 2014; Zhang & Lu, 2004). Prema većini autora, metode za analizu oblika (reprezentacija i deskripcija) se mogu klasifikovati u metode zasnovane na konturama i regionima. Date metode mogu se dalje razložiti na globalni i strukturni pristup deskripciji oblika. Metode zasnovane na konturama oblika uzimaju u obzir karakteristike oblika ekstrahovane samo iz konture, dok metod zasnovan na regionu analizira čitavu oblast oblika. Globalni pristup deskripcije oblik tretira kao celinu, za razliku od strukturnog pristupa, gde je oblik predstavljen segmentima. Globalni pristup koristi podatke iz unutrašnjosti i spoljašnjosti oblika, dok strukturni ili spoljašnji metod koristi samo podatke sa ruba oblika (Loncaric, 1998; Dražić, 2019).

2.3.1. Deskriptori oblika

Pojam deskriptor predstavlja neku osobinu oblika, pri čemu metod deskripcije oblika podrazumava generisanje vektora koji opisuje dati oblik (Loncaric, 1998). Deskriptori oblika najčešće se koriste u analizi i raspoznavanju elemenata sa slike (Loncaric, 1998; Rosin, 2005; Zhang & Lu, 2004; Žunic, 2012).

Da bi se neki oblik opisao uz pomoć deskriptora oblika, potrebno je definisati i izračunati meru tog oblika. Postupak primene deskriptora oblika obično podrazumeva analizu određenih prepoznatljivih atributa razmatranih oblika i primenu odgovarajućih metoda (mera) za numeričku karakterizaciju takvih atributa oblika. Vrednost deskriptora definiše se na osnovu mere tog deskriptora, pri čemu mera izražava u kom stepenu oblik ima neku osobinu (Dražić, 2019). Drugim rečima, deskriptori se mogu klasifikovati na osnovu podataka o obliku koje uzimaju u obzir pri izračunavanju mera datog deskriptora oblika. Kada se radi o 2D deskriptorima, dva osnovna podatka za izračunavanje mera oblika predstavljaju površina i obim posmatranog oblika (Martinez-Ortiz, 2010). Prema tome, kao što je i prethodno navedeno, deskriptori oblika se mogu podeliti na one koji se zasnivaju na konturi ili površini oblika, pri čemu postoje i deskriptori koji koriste oba podatka za izračunavanje mera oblika.

U oblasti primenjene matematike, aktuelno polje istraživanja predstavlja definisanje novih deskriptora i njihova primena u različitim zadacima klasifikacije oblika (Dražić et al., 2010; Ilić, 2019; Ilić & Ralević, 2020, 2021). Brojni deskriptori oblika, kao što je konveksnost (Zunic & Rosin, 2004; Rosin & Mumford, 2006), kompaktnost (Li et al., 2013; Wirth, 2004), izduženost (Dražić et al., 2010; Stojmenović & Žunić, 2008, 2007), pravougaonost, eliptičnost i drugi (Rosin, 2003), kao i komparativne analize različitih deskriptora u generalnim problemima analize oblika (Frejlichowski, 2010), već su dobro istraženi u literaturi.

2.3.2. Aktuelno stanje u oblasti kulturnog nasleđa

U naučnoj zajednici koja integriše matematiku i arhitekturu, beleži se veliki broj studija primene matematičkih principa na različite aspekte analize i projektovanja u arhitekturi (*Nexus Netw. J.*, 2021). González i koautori (2018) predstavili su geometrijsku analizu i klasifikaciju tipova oblika arhitektonskih lukova na fotogrametrijski digitalizovanom objektu arhitekta Antoni Gaudija (*Antoni Gaudí*, 1852–1926). Cipriani i koautori (2020) su, takođe, pokazali uspešnost integracije fotogrametrijske metode digitalizacije i matematičke metode analize oblika na primeru antičkog objekta. Autori su koristili dimenzije arhitektonskih elemenata ekstrahovanih iz fotogrametrijski digitalizovanog 3D modela za određivanje sistema geometrijskih pravila projektovanja. Brojne studije slučaja ilustruju različite matematičke metode za određivanje pravila koja opisuju sistem proporcija arhitektonskih objekata ili pojedinih elemenata (Calvo-López & Salcedo-Galera, 2017; Candelas-Gutierrez, 2017; i Ginovart et al., 2018).

Deskriptori oblika mogu se koristiti za proučavanje, numeričko opisivanje i klasifikovanje različitih vrsta objekata. Đurić i koautori (2018; 2019; 2021) ilustrovali su primenu 2D deskriptora oblika u analizi i klasifikaciji elemenata arhitektonskih stilova, kao i pojedinih inženjerskih elemenata. Autori su koristili standardne deskriptore zasnovane na diskretnim momentima pridruženim obliku, kao i njihovim kombinacijama sa drugim globalnim deskriptorima oblika.

U kontekstu kulturnog nasleđa, Galantucci i koautori (2018; 2019) predstavili su interesantan pristup analize oblika u svrhu detekcije površinskih oštećenja na fotogrametrijski generisanom 3D modelu objekta kulturnog nasleđa. Na osnovu razmatranja važnih geometrijskih karakteristika oblika oštećenih površina fasade objekta, autori su predložili deskriptore oblika, kao što su odnos širine i visine, zaobljenost i kompaktnost, kako bi klasifikovali motive prema njihovom obliku.

3. ZNAČAJ IKONOSTASA U KULTURNOM NASLEĐU

Specifična grana kulturnog nasleđa koja se ističe po jedinstvenoj vrednosti i kontekstu jeste crkveno nasleđe. Ikonostasi predstavljaju monumentalna dela sa raskošnom ornamentalnom dekoracijom, koji u teološkom i umetničkom smislu oslikavaju epohu u kojoj su nastala. Ikonostasi su specifični za naše podneblje, s obzirom na to da predstavljaju monumentalna dela crkvenog nasleđa koji dominiraju entrijerima hrišćanskih pravoslavnih hramova.

Prvi ikonostasi evoluirali su iz niske oltarske pregrade, takozvanog vizantijskog templona (*eng. Byzantine templon*) (Melvani, 2015; Rakićević, 2013; *The Frame Blog*, 2021; Vitto, 2017). Razvoj višespratnih ikonostasa, koji su predstavljali raskošno ukrašen vertikalni okvir koji sadrži ikone, vezuje se za kraj 14. i početak 15. veka (Vitto, 2017). Savremeni ikonostasi razvili su se tokom 16. veka, dok su od 18. veka, višespratni ikonostasi, karakteristični po svom umetničkom, arhitektonskom, vizuelnom i teološkom značaju, smatrani za najdekorativnije elemente pravoslavnih crkava (Rakićević, 2013). Ikonostasi nastali u periodu od 18. veka predstavljaju najdekorativnije celine hrama, u kojima ravnopravno mesto sa ikonama zauzima i raskošna rezbarija (Leseck, 2000).

Konstrukciju višespratnih ikonostasa nastalih u periodu od 18. veka odlikuje uglavnom ravan oblik, ali kompleksna i nepravilna geometrija bogatih ukrasnih rezbarija, sa ikonama postavljenim u visoko ukrašene okvire. Konstrukcija ikonostasa, odlikuje se mermernom i/ili pozlaćenom drvenom strukturom i visoko ornamentalnom rezbarijom. Dekorativne rezbarije predstavljale su dela majstora koji su bili pod uticajem Baroka sa Zapada, ali je poznato i da se na brojnim ikonostasima preplitalo više različitih stilskih pravaca (Leseck, 2000). Ikone su često bila dela najuticajnijih slikara datog perioda. Arhitektonske i vizuelne karakteristike ikonostasa uglavnom se vezuju za period nastanka crkve i dominantni stilski pravac u određenom periodu (Leseck, 2000). Period nastanka ikonostasa vezuje se za period izgradnje crkve, iako postoje primeri naknadnog postavljanja ikonostasa. Dizajn opšteg oblika ikonostasa zasnovan je na simetriji, dok su njegove dimenzije diktirane širinom i visinom oltarskog prostora crkve u kojoj se nalazi. Takođe, postoji relativno stabilan raspored ikona po redovima višespratnog ikonostasa.

Važne elemente ikonostasa čine ikone smeštene u posebno oblikovane okvire. Glavni konstruktivni elementi ikonostasa koji se nalaze na svakom spratu predstavljaju stubove postavljene na postolje (bazu stuba) i horizontalne grede, takozvani arhitrav ikonostasa (Rakićević, 2013). Okviri koji podupiru ikone posebno su izrezbareni u vidu dekorativne ornamentike koja predstavlja različite motive vezane za umetnički stil ili simbole iz Biblije. Broj spratova ikonostasa zavisi od visine crkve, dok najrazvijeniji ikonostasi mogu imati do pet spratova (Melvani, 2015). U zavisnosti od broja spratova, raspored ikona na višespratnim ikonostasima nastalim u periodu od 18. veka obično sledi ustaljenu konvenciju (Rakićević, 2013). Prvi sprat uvek sadrži troje vrata sa uramljenim

ikonama: centralna vrata, takozvane Carske dveri; i još po jedna, simetrično postavljena sa obe strane, koja se nazivaju Severne i Južne dveri. Na prvom spratu nalaze se prestone ikone. Na razvijenim ikonostasima ikone su postavljene i iznad Dveri. Drugi ili treći sprat predstavlja kompoziciju Diezisa ili Dvanaest Apostola, koja sadrži jednu centralnu ikonu i po šest ikona postavljenih sa obe strane. Treći sprat sadži ikone raspoređene oko krsta, često prikazujući Proroke ili Velike praznike (Rakićević, 2013).

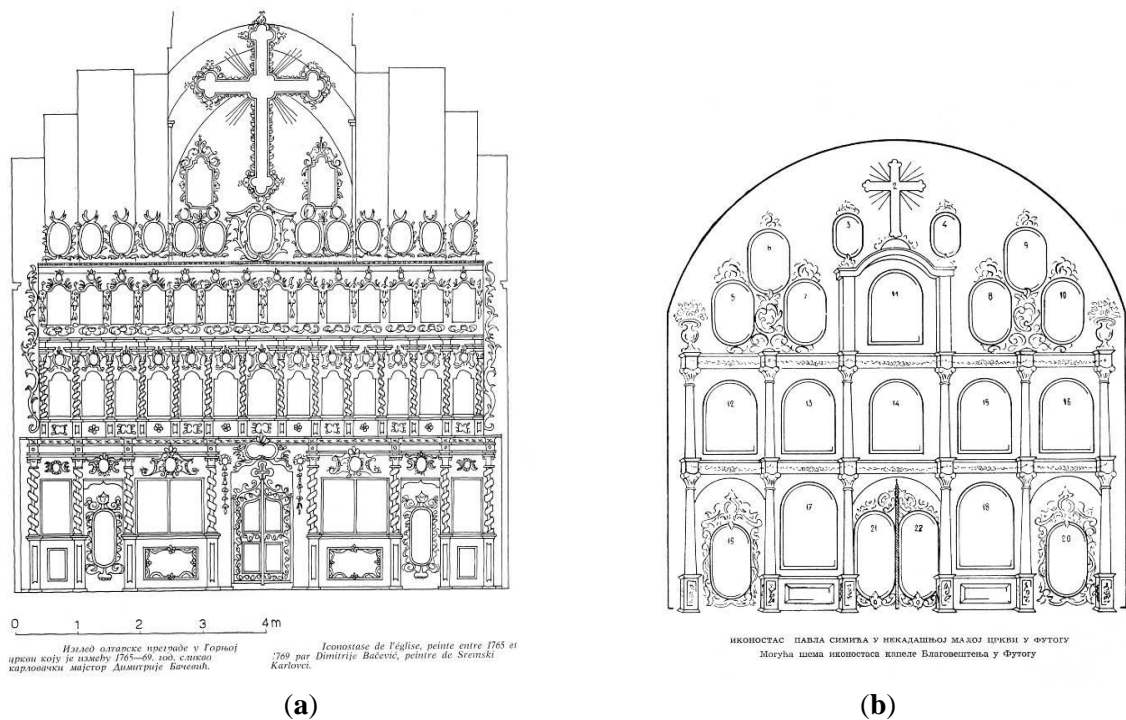
Osim prethodno navedenih poznatih činjenica o dizajnu strukture ikonostasa i simboličkih značenja pojedinih elemenata, u dizajnu dekorativne ornamentike ikonostasa ne mogu se jasno uočiti jedinstvena pravila oblikovanja u skladu sa stilskim karakteristikama datog perioda. Kroz istoriju umetnosti zabeleženo je da ne postoje dva ista ikonostasa (Narodni Muzej u Beogradu, 1968). Poznato je da je rezbarija ikonostasa nastalih u periodu od 18. veka bila pod uticajem Baroka sa Zapada (Lesek, 2000). Međutim, drvorezbarski radovi i dekorativna plastika često se vezuju i za nepoznate majstore (*The Frame Blog*, 2021).

Na teritoriji Srbije, dizajn ikonostasa se posebno istakao tokom dva stilska pravca, Baroka (početak 18. veka do 1790) i Klasicizma (1790-1850), koji su počinjali i bili posebno izraženi na teritoriji bivše Karlovačke mitropolije (Narodni Muzej u Beogradu, 1968). Stilske karakteristike Klasicizma ogledaju se u pravilnosti, simetriji i težnji ka ortogonalnim oblicima, za razliku od Baroka, gde su preovladavali eliptični i asimetrični oblici.

Fokus istraživanja u okviru doktorske disertacije je na višespratnim ikonostasima nastalim na području nekadašnje Karlovačke mitropolije u periodu od 18. do 20. veka, na čijoj izradi su učestvovali najznačajniji slikari tog vremena.

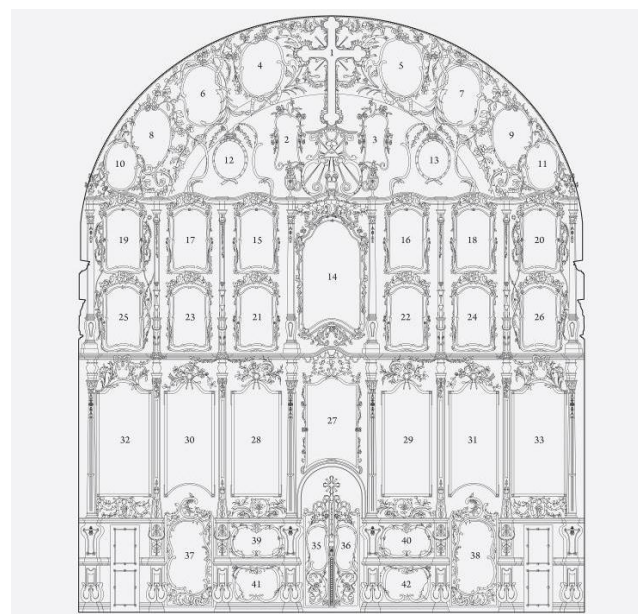
3.1. Problem dokumentovanja tehničkih podataka o ikonostasima

Prema podacima Pokrajinskog Zavoda za zaštitu spomenika kulture Vojvodine, postoje određene poteškoće u arhiviranju tehničke dokumentacije ikonostasa (*Pokrajinski Zavod za zaštitu spomenika kulture Vojvodine*, 2021). Postojeći tehnički crteži ikonostasa zasnivaju se na tradicionalnim manuelnim merenjima na licu mesta, i ne pružaju precizne informacije o sitnim detaljima, kao što su nepravilni oblici rezbarija (Slika 4a), ili se svode na pojednostavljene sheme (Slika 4b) koje ne oslikavaju realno stanje izvedenog objekta. Takođe, nedostatak tehničke dokumentacije nije redak slučaj. Postojeća arhivirana dokumentacija uglavnom je ograničena na tradicionalne crteže crtane rukom, koji sadrže previše ili nedovoljno detalja, pa stoga ne ilustruju tačno stanje originalne strukture, dimenzije i ukrase ikonostasa.



Slika 4. Primeri postojeće tehničke dokumentacije o ikonostasima iz perioda: (a) Baroka; (b) Klasicizma (Pokrajinski Zavod za zaštitu spomenika kulture Vojvodine, 2021).

Arhiviranje tačnih podataka o realnom stanju ikonostasa značajno je za njihovo očuvanje za buduće generacije, ali i za potrebe konzervacije koja se oslanja na poštovanje saznanja o trenutnom stanju. S druge strane, kod objekata sa velikim brojem sitnih i nepravilnih detalja kao što su ikonostasi, izrada detaljnog tehničkog crteža predstavlja iscrpan i vremenski zahtevan posao (Slika 5).



Slika 5. Tehnički crtež ikonostasa Saborne crkve u Sremskim Karlovcima (Timotijević, 2019).

4. MATERIJALI I PRIMENJENE METODE ISTRAŽIVANJA

Predloženi metod za analizu oblika fotogrametrijski digitalizovanih 3D modela ikonostasa bazira se na postupku koji obuhvata tri ključne faze eksperimentalnog istraživanja, primenjene na studijama slučaja tri ikonostasa:

1. Fotogrametrijska 3D digitalizacija;
2. Detekcija kontura i ekstrakcija ravnih preseka iz 3D modela na osnovu segmentacije tačaka;
3. 2D analiza oblika.

U okviru doktorske disertacije korišćena je fotogrametrijska 3D digitalizacija, kao pouzdan i pristupačan način 3D rekonstrukcije realnih prostornih struktura. Fotogrametrijska 3D digitalizacija primenjena je na četiri ikonostasa na teritoriji Vojvodine, od čega su tri prikazana u okviru doktorske disertacije.

Fotogrametrijska 3D digitalizacija ikonostasa izvršena je u okviru prostora datih crkava. Procesiranje, obrada podataka i rezultata, kao i ostala eksperimentalna istraživanja vršena su u računarskoj laboratoriji Katedre za animaciju u inženjerstvu Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

U prvoj fazi, u cilju postizanja detaljne i precizne digitalne 3D rekonstrukcije ikonostasa, osmišljena je strategija za fotogrametrijsku digitalizaciju. Strategija za digitalizaciju ikonostasa se bazira na kreiranju detaljnog plana fotogrametrijskog snimanja, koji može biti primenjiv u opštem slučaju fotogrametrijske digitalizacije ikonostasa.

Snimanje je vršeno uz pomoć stativa i DSLR (eng. *Digital Single Lens Reflex*) fotoaparata marke NIKON D7000 (broj piksela: 4928×3275 ; veličina piksela: $4.78 \mu\text{m}$; veličina senzora: $23.6 \times 15.6 \text{ mm}$; žižna daljina: 18–109 mm).

Za procesiranje prostornih podataka prikupljenih putem snimanja, korišćen je profesionalni softver za fotogrametrijsko modelovanje - *Agisoft Metashape*. Postupak fotogrametrijske digitalizacije obuhvata dva glavna koraka:

- Terensko snimanje, odnosno prikupljanja podataka, pri čemu produkt snimanja predstavljaju fotografije;
- Fotogrametrijska 3D rekonstrukcija, odnosno procesiranje podataka. Produkt procesiranja podataka predstavlja oblak tačaka i/ili dubinske mape (*depth maps*), i teksturisani poligonalni 3D model.

Druga faza istraživanja zasniva se na analizi i primeni metoda za ekstrahovanje ravnih preseka iz digitalizovanih 3D modela i detektovanje kontura, koje se dalje mogu

koristiti u okviru *AutoCAD* (Autodesk, 2021a) okruženja za 2D analizu oblika. U tu svrhu, osmišljen je poluautomatski metod koji se oslanja na tehnike segmentacije tačaka, kako bi se detektovale i izdvojile konture nepravilnih oblika dekorativne ornamentike ikonostasa i glavnih delova konstrukcije. Cilj datog postupka predstavlja kreiranje čitljivih preseka kroz glavne konstruktivne i dekorativne elemente ikonostasa, na način koji isključuje suvišne tačke iz fotogrametrijski generisane 3D rekonstrukcije.

Na osnovu prethodne analize literature iz oblasti i eksperimentalnih istraživanja, uočeno je da segmentacija oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti može da izvrši klasifikaciju oblaka tačaka ikonostasa na njegove glavne strukturne delove.

U slučaju ikonostasa, ideja je bila da se iz digitalizovanog 3D modela izdvoji osnovna struktura ikonostasa, odnosno da se isključe sve tačke koje predstavljaju delove koji nisu od interesa u analizi kompleksne geometrije, kao što su ikone koje reprezentuju ravne slike umetnute u okvire. Umesto postavljanja presečnih ravni kroz celokupan oblak tačaka, segmentacija tačaka omogućava redukovanje broja tačaka i detektovanje kontura glavnih elemenata složene geometrije dobijene primenom fotogrametrijske metode digitalizacije.

Na ovaj način ekstrahovane konture pojedinih elemenata ikonostasa korišćene su u analizi oblika, u cilju određivanja karakteristika umetničkog stila kojem dati ikonostasi pripadaju. Za analizu geometrijskih karakteristika tačaka, njihovu segmentaciju i ekstrahovanje 2D preseka, korišćen je softver za manipulaciju oblakom tačaka - *CloudCompare* (CloudCompare, 2021). *CloudCompare* predstavlja besplatni softver namenjen za analizu, procesiranje i obradu podataka generisanih uz pomoć tehnika za 3D digitalizaciju. Predloženi metod obuhvata sledeće postupke:

- Konverzija teksturisanog poligonalnog 3D modela u oblak tačaka;
- Generisanje dubinskih mapa i ambijentalne okluzije;
- Segmentacija 3D modela na osnovu dubinskih mapa;
- Segmentacija oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti i detekcija kontura;

Tehnike matematičke analize oblika, zasnovane na metodi deskripcije korišćene su za numeričko opisivanje stilskih karakteristika razmatranih karakteristika oblika glavnih strukturnih elemenata digitalizovanih modela ikonostasa (ikona i konstruktivnih elemenata). 2D deskriptori oblika primenjeni su u cilju analize i numeričke klasifikacije stilskih karakteristika glavnih elemenata ikonostasa. Primenjeni su globalni deskriptori i njima pridružene mere oblika, koje su zasnovane na dimenzijama i proporcijama pojedinih elemenata ikonostasa, a koje su dizajnirane tako da odražavaju karakteristične atribute stvarnih oblika.

Kao uzorci za deskriptivnu analizu geometrijskih karakteristika oblika, korišćeni su ekstrahovani oblici okvira ikona čiji je raspored po spratovima ikonostasa ustaljen, kao i glavni konstruktivni elementi ikonostasa, kao što su stub, baza stuba i arhitrav (horizontalna greda). Primena mera oblika izvršena je u okviru *AutoCAD* softvera. Postupak se sastoji od sledećih koraka:

- Koncipiranje mera oblika na osnovu analize određenih prepoznatljivih atributa razmatranih oblika;
- Primena deskriptora oblika u cilju numeričke deskripcije oblika posmatranih elemenata ikonostasa i njihove klasifikacija u odnosu na stilski pravac kome pripadaju.

4.1. Studije slučaja digitalizovanih ikonostasa

Kako se razvoj višespratnih ikonostasa posebno manifestovao tokom stilskih pravaca - Baroka (početak 18. veka do 1790. godine) i Klasicizma (1790-1850), na području nekadašnje Karlovačke mitropolije, predloženi metod primenjen je na reprezentativnim primerima tri ikonostasa iz umetničkih pravaca Baroka i Klasicizma nastalih na teritoriji Vojvodine.

Digitalizacija datih ikonostasa sprovedena je uz odobrenje Pravoslavne Eparhije Sremske iz Sremskih Karlovaca (*Saborna crkva Sremski Karlovci*, 2021), a u saradnji sa Galerijom Matice srpske iz Novog Sada (*Galerija Matice srpske*, 2021) i Kulturnim centrom Đura Jakšić u Srpskoj Crnji.

4.1.1. Studija slučaja 1

Prva studija slučaja obuhvata ikonostas u Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima (Slika 6). Nastao je u periodu između 1780–1781 godine. U odnosu na period nastanka, kao i stilske karakteristike, dati ikonostas predstavlja reprezentativan primer Baroka na području Vojvodine. Takođe, predstavlja vredan element kulturnog nasleđa, s obzirom na to da sadrži ikone koje su naslikali Teodor Kračun i Jakov Orfelin, istaknuti srpski umetnici iz 18. veka. Visoko ornamentalna rezbarija ikonostasa delo je Arsenija Markovića (Leseck, 2000).

Dimenzije ikonostasa iznose 9.75 (širina) × 12 (visina) metara, i u potpunosti prate širinu i visinu oltarskog prostora crkve. Stilske karakteristike ogledaju se u nepravilnosti forme oblika ikona i raskošne rezbarije.



Slika 6. Ikonostas u Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima.

4.1.2. Studija slučaja 2

Druga studija slučaja predstavlja ikonostas srpske pravoslavne crkve Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima (Slika 7). Nastao je u periodu između 1825-1828 godine. Tipičan je primer Klasicizma na teritoriji Vojvodine. Stilske karakteristike ogledaju se u relativnoj pravilnosti forme okvira oblika ikona i konstrukcije ikonostasa. Dimenzije ikonostasa prate dimenzije crkve u kojoj se nalazi, i iznose 7.65 (širina) × 7.40 (visina) metara.



Slika 7. Ikonostas u crkvi Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima.

4.1.3. Studija slučaja 3

Treća studija slučaja predstavlja ikonostas Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji (Slika 8). Godina nastanka ikonostasa - 1788., vezuje se za period nastanka crkve, iako je poznat po tome što sadrži dela Đure Jakšića, jednog od najznačajnijih predstavnika srpske umetnosti i slikarstva 19. veka. Đura Jakšić je naslikao osam ikona u periodu između 1853-1854 godine (Mišić, 2020). Dimenzije ikonostasa iznose 6.65 (širina) × 7.00 (visina) metara. Vizuelne karakteristike ovog ikonostasa sličnije su studiji slučaja 1, dok je po proporcijama bliži studiji slučaja 2. Dati ikonostas korišćen je u svrhu evaluacije metodologije za analizu oblika i klasifikaciju oblika u odnosu na karakteristike stila.



Slika 8. Ikonostas u crkvi Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima

4.2. Fotogrametrijska 3D digitalizacija ikonostasa

Metoda koja je korišćena za 3D digitalizaciju ikonostasa je fotogrametrija, odnosno merna tehnika koja koristi seriju fotografija snimljenih iz različitih uglova i pozicija za generisanje 3D modela objekta. Na ovaj način, kreirana je strategija za fotogrametrijsku digitalizaciju koja se može primeniti i na druge ikonostase, kao i objekte sličnih karakteristika. Strategija za fotogrametrijsku digitalizaciju ikonostasa zasniva se na kreiranju detaljnog plana snimanja koji se može ponoviti u opštem slučaju digitalizacije ikonostasa.

4.2.1. Terensko snimanje

Terensko snimanje ikonostasa podrazumeva kreiranje plana snimanja koji omogućava postizanje visoko precizne 3D rekonstrukcije, u smislu definisanja odnosa između rezolucije teksture i GSD vrednosti. S obzirom na pretežno ravnu formu konstrukcije ikonostasa koja se odlikuje kompleksnom geometrijom dekorativne ornamentike, plan snimanja fokusiran je na postizanju najveće moguće rezolucije najsitnijih detalja objekta.

Osim kompleksne geometrije ikonostasa, ograničenja pri terenskom snimanju u slučaju ikonostasa predstavljaju lokacijski uslovi prostora crkve, koje karakteriše izrazito slabo osvetljenje. Prema tome, plan snimanja ikonostasa osmišljen je imajući u vidu sledeća ograničenja:

- kompleksnu geometriju ikonostasa;
- lokacijske uslovi i osvetljenje u okviru enterijera crkve.

U odnosu na to, kreiranje plana snimanja može se razložiti na dve osnovne faze:

1. Određivanje parametara i pozicija fotoaparata u odnosu na dimenzije i geometriju objekta;
2. Određivanje parametara ekspanze u cilju postizanja najvećeg mogućeg kvaliteta i oštine fotografija.

Prva faza bazira se na određivanju i detaljnom proračunu nekoliko ključnih parametara: žižna daljina (c), udaljenost fotoaparata od objekta (h), obuhvaćen prostor na fotografiji (D) i GSD vrednost. Kako bi cela visina ikonostasa bila obuhvaćena na fotografiji, korišćen je širokougaoni objektiv i žižna dužina od 24 milimetara, kao i maksimalna moguća udaljenost fotoaparata od objekta ($h-max$).

Određivanjem ovih parametara, razmera objekta (m) i GSD vrednost izračunate su na sledeći način:

$$m = \frac{h}{c} \quad (3)$$

$$GSD = m \times \text{pixel size} \quad (4)$$

Da bi se odredila odgovarajuća orijentacija fotoaparata (eng. *landscape / portrait mode*), vrednost obuhvaćenog prostora na fotografiji (D) izračunata je prema sledećim formulama (Stojaković, 2018):

$$D = GSD \times \text{broj piksela (širina)} \quad (5)$$

$$D = GSD \times \text{broj piksela (visina)} \quad (6)$$

gde su parametri širine i visine definisani brojem piksela datog modela fotoaparata (u ovom slučaju broj piksela iznosi: 4928×3275).

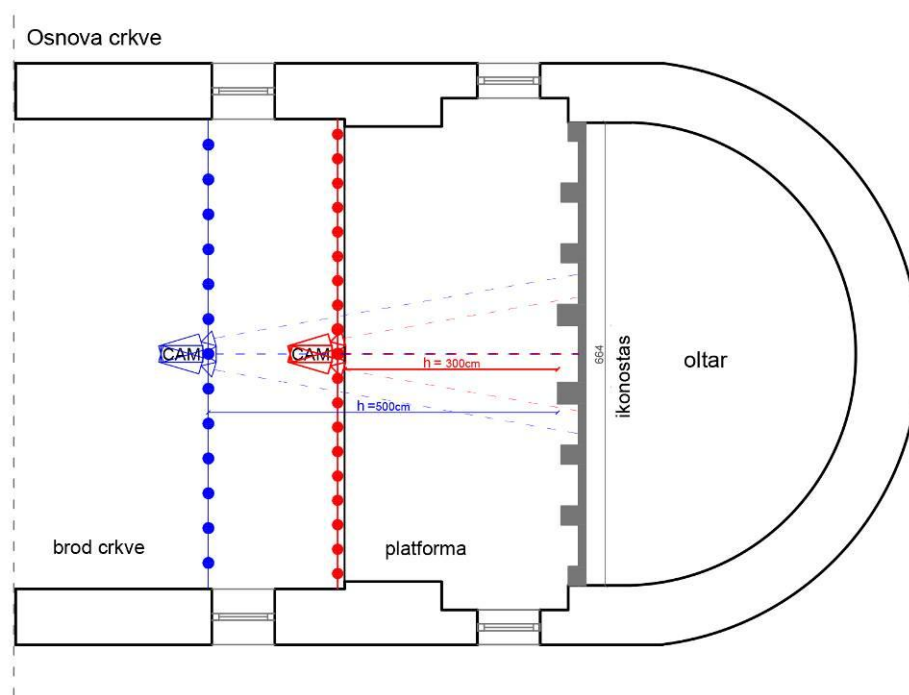
Pošto se paralelni tip smatra najnepovoljnijim za fotogrametrijsku rekonstrukciju, razmak između fotografija treba da bude takav da je preklapanje između uzastopnih

fotografija najmanje 80% (Stojaković, 2018). Da bi se postiglo dato preklapanje, razmak između fotografija (b) proračunat je prema sledećoj formuli (Stojaković, 2018):

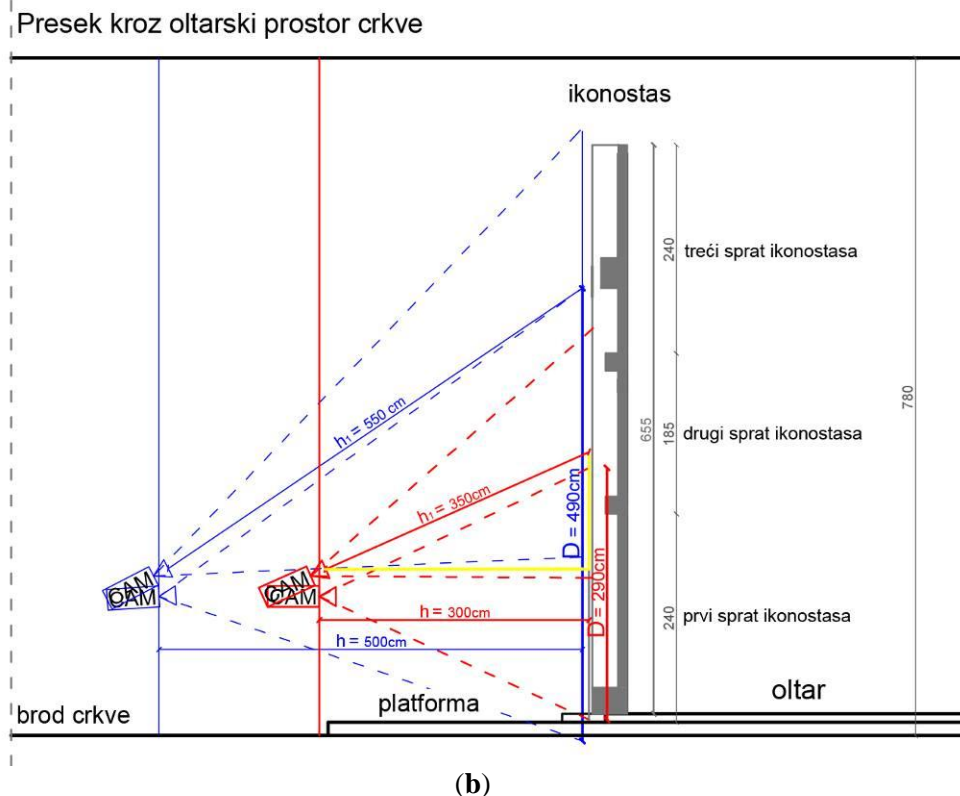
$$b = 0.20 \times (\text{broj piksela (širina)} \times \text{GSD}) \quad (7)$$

Opisani metod proračuna datih parametara, može se primeniti i na inverzan način, odnosno definisanjem GSD vrednosti u odnosu na željene dimenzije prostora obuhvaćenog fotografijom uz prethodno određenu orijentaciju fotoaparata. Imajući u vidu slobodan prostor enterijera crkve bez prepreka ispred samog ikonostasa, GSD vrednost je moguće inicijalno postaviti (na 1 mm ili više) tako da omogući vidljivost najsitnijih detalja 3D rekonstrukcije, na osnovu čega se može izračunati udaljenost fotoaparata od objekta.

U odnosu na specifične geometrijske karakteristike ikonostasa kao što su znatno manja dubina u odnosu na širinu i visinu objekta, za snimanje je korišćen paralelni tip, u kombinaciji sa divergentnim (Slika 9). Divergentni tip snimanja podrazumeva rotiranje kamere na levu i desnu stranu prilikom snimanja iz iste pozicije, i ne preporučuje se u slučaju modelovanja na osnovu dve slike, takozvanoj restituciji (Hanke & Grussenmeyer, 2002; Waldhäusl & Ogleby, 1994). U slučaju snimanja ikonostasa, primenjeno je rotiranje fotoaparata na levu i desnu stranu pod uglom od približno 10° , kako bi dubina ikonostasa bila obuhvaćena fotografijama. Na slici 9, kroz osnovu i presek crkve, ilustrovan je paralelni plan snimanja ikonostasa, sa primerima različitih proračuna odnosa udaljenosti fotoaparata od ikonostasa (h) i obuhvaćenog prostora na slici (D).



(a)



Slika 9. Tehnički crtež paralelnog plana snimanja ikonostasa ilustrovan kroz: (a) osnovu; i (b) presekcrcrke Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji (Djuric et al., 2019).

Druga faza plana snimanja podrazumeva određivanje i fiksiranje internih parametara fotoaparata, u cilju postizanje odgovarajuće ekspanze fotografije. U ovoj fazi određeni su brzina zatvarača i otvora blende, kao i odgovarajuće vrednosti osvetljenosti. Dati parametri fotoaparata određeni su uzimajući u obzir specifične uslove enterijera crkve karakteristične po izrazito slabom osvetljenju.

Kako bi se izmerila svetlost unutar enterijera crkve, prvo je korišćen automatski režim kamere (eng. *Program mode*). Na ovaj način, izmereni su parametri ekspanze, i određeni su optimalni parametri za osetljivost senzora (ISO = 100) i otvor blende (f/5.6 i f/8) (Tabela 1). Balans bele svetlosti (eng. *white balance*) određen je manuelno u odnosu na iluminaciju prostora enterijera crkve. Dati parametri manuelno su podešeni i fiksirani. Zatim je korišćen poluautomatski režim fotoaparata sa prioriteto blende (eng. *Aperture priority*), u cilju određivanje tačne brzine zatvarača i automatskog prilagođavanja ekspanze (eng. *shutter speed*) intenzitetu svetla u datim uslovima. S obzirom na veoma slabo osvetljenje prostora enterijera crkve, opisani proračun internih parametara fotoaparata rezultirao je dugačakom ekspanzom: od 1 do 1.6 sekundi (Tabela 1).

U odnosu na to, da bi se izbegli trzaji fotoaparata i zamućenost fotografija pri dugom otvoru blende usled lošeg osvetljenja, za snimanje je korišćen stativ.

U cilju postizanja maksimalne izoštrenosti fotografija, tačka fokusa je fiksirana, a dubinska oštrina (eng. *Depth of Field – DoF*) je proračunata kao odnos udaljenosti fotoaparata od objekta i žižne dužine. Proračunati parametri snimanja za sve tri studije slučaja ikonostasa dati su u tabeli 1. Produkt snimanja predstavljaju fotografije visoke rezoulocije, kreirane u JPEG i RAW formatu.

Tabela 1: Parametri snimanja za sve tri studije slučaja ikonostasa (Đurić et al., 2021)

Parametri snimanja	Ikonostas 1	Ikonostas 2	Ikonostas 3
Dimenzije (m)	9.75 (š) x 12.00 (v)	7.65 (š) x 7.40 (v)	6.65 (š) x 7.00 (v)
Površina (m ²)	117	56.61	42.56
h(m)	12.5	7.5	7.5
f (mm)	24	24	24
m (m)	0.523*10 ⁻³	0.314*10 ⁻³	0.314*10 ⁻³
GSD (mm)	2.5	1.5	1.5
D (m)	12.3 (<i>portrait</i>)	7.4 (<i>portrait</i>)	7.4 (<i>portrait</i>)
	8.2 (<i>landscape</i>)	4.9 (<i>landscape</i>)	4.9 (<i>landscape</i>)
Orijentacija kamere	Portrait	Portrait	Portrait
b (m)	0.70	0.50	0.50
ISO	100	100	100
f-stop	f/5.6	f/5.6	f/8
Eksponaža	1.6 sec	1 sec	1 sec
Tačka fokusa (m)	12.5	7.5	7.5
Dubinska oštrina - DoF (m)	3.70 (najbliža tačka)	3.09 (najbliža tačka)	2.50 (najbliža tačka)
	beskonačno (najdalja tačka)	beskonačno (najdalja tačka)	beskonačno (najdalja tačka)
Broj fotografija	51	134	71

Tabela 1 pokazuje da se parametri snimanja ne razlikuju značajno između studija slučaja, što upućuje na to da bi se predložena metodologija za snimanje ikonostasa mogla ponoviti u scenarijima digitalizacije drugih ikonostasa.

4.2.2. Fotogrametrijska 3D rekonstrukcija ikonostasa

Za fotogrametrijsku 3D rekonstrukciju ikonostasa korišćen je automatski softver *Agisoft Metashape*. U cilju postizanja visoko detaljne i precizne 3D rekonstrukcije objekta uz održavanje optimalne brzine procesiranja podataka, za korake koji se odnose na automatsko poravnavanje fotografija (eng. *Align Photos*) i generisanje oblaka tačaka (eng. *Build Point Cloud*), korišćena je visoka tačnost procesiranja podataka (eng. *High Accuracy*).

Za generisanje poligonalnog 3D modela testirani su metod zasnovan na oblaku tačaka i metod zasnovan na dubinskim mapama (eng. *depth maps*), na primeru ikonostasa crkve Svetog Prokopija iz Srpske Crnje, u cilju komparacije dobijenih rezultata 3D rekonstrukcije (Tabela 2). Na osnovu toga uočeno je da oba metoda omogućavaju visoko detaljnu 3D rekonstrukciju objekta pri čemu 3D model generisan na osnovu dubinskih mapa (Slika 10b) sadrži manji broj tačaka i poligona u poređenju sa rekonstrukcijom na osnovu gustog oblaka tačaka (Slika 10a). Kako se sledeća faza odnosi na segmentaciju oblaka tačaka, u daljem radu korišćen je gusti oblak tačaka kao glavni produkt fotogrametrijskog procesiranja podataka.



Slika 10. Poligonalni 3D model ikonostasa u Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima: (a) generisan na osnovu gustog oblaka tačaka; (b) generisan na osnovu dubinskih mapa.

Tabela 2: Komparacija parametara dva metoda za generisanja 3D modela ikonostasa prikazanih na slici 10

Parametri 3D rekonstrukcije	Metod zasnovan na oblaku tačaka	Metod zasnovan na dubinskim mapama
Broj fotografija	51	51
Broj tačaka	904.307	640.943
Broj poligona	1.803.302	1.280.575
Vreme procesiranja podataka	01:06:85	00:56:37
Vreme generisanja 3D modela	00:09:28	00:18:55

Procena preciznosti / tačnosti fotogrametrijske 3D rekonstrukcije određena je nakon uvođenja realne razmere u 3D model. Precizna razmera 3D modela uspostavljena je uvođenjem kontrolnih tačaka u okviru *Agisoft* softvera. Kontrolna tačka predstavlja bilo koju tačku na 3D modelu čiji je položaj u realnom prostoru poznat. U ovom slučaju, kontrolne tačke predstavljaju referentne dimenzije koje su prikupljene manuelnim merenjem karakterističnih distanci na ikonostasima prilikom terenskog snimanja. Uvođenjem kontrolnih tačaka u 3D rekonstrukciju procenjena je srednja kvadratna vrednost greške projekcije tačke (eng. *round square meter error – RMS*), koja predstavlja grešku pri estimaciji položaja tačke u 3D prostoru i njenoj projekciji na slici (Tabela 3). Postignuta tačnost fotogrametrijske 3D rekonstrukcije na osnovu korišćenja parametara visoke tačnosti (eng. *high parameters*) prilikom procesiranja podataka, prikazana je u Tabeli 3. Može se uočiti da je rezultirajuća GSD vrednost 3D rekonstrukcije u okvirima vrednosti inicijalno proračunate prilikom snimanja ikonostasa.

Kako bi se odredila gustina tačaka 3D rekonstrukcije, generisan je i digitalni model visina (eng. *Digital Elevation Model – DEM*). Digitalni model visina uobičajeno se koristi u vazdušnoj fotogrametriji da označi sistem visina u pravilnoj mreži tačaka terena (Borisov et al., 2014). Rezolucija digitalnog modela visina predstavlja gustinu tačaka generisanog 3D modela. Rezolucija DEM snimka zavisi od kvaliteta fotogrametrijskog snimanja, kao i od parametara korišćenih za generisanje gustog oblaka tačaka (*low / medium / high / ultra high*). Prema tome, s obzirom na to da je za generisanje gustih oblaka tačaka korišćena visoka tačnost procesiranja podatak (umesto ultra visoka - eng. *ultra high*), postignuta DEM rezolucija rezultirala je u duplo veću vrednost u odnosu na postignutu GSD vrednost (Tabela 3). Procena gustine tačaka značajna je za dalju analizu preciznosti detekcije konture tokom procesa segmentacije oblaka tačaka.

Tabela 3: Parametri preciznosti 3D rekonstrukcije za tri studije slučaja ikonostasa

Parametri 3D rekonstrukcije	Ikonostas 1	Ikonostas 2	Ikonostas 3
RMS ⁸ greška (mm)	5.20	2.10	2.50
GSD ⁹ (mm)	2.68	1.10	1.20
Rezolucija DEM ¹⁰ snimka (mm/pix)	5.36	2.10	2.35

Kao finalni rezultat 3D digitalizacije ikonostasa, generisani su poligonalni 3D modeli sa projekcijama realističnih tekstura (Slike 11a, 12a i 13a). Takođe, slike 11b, 12b i 13b prikazuju ortofoto snimke generisane na osnovu teksturisanih poligonalnih 3D modela, gde je veličina piksela jednaka GSD vrednosti rekonstruisanih modela. Teksturisani 3D modeli su korišćeni kao referentni modeli za kreiranje novog oblaka tačaka i njegovu pripremu za proces segmentacije.



(a)

⁸Round Square Meter

⁹Ground Sample Distance

¹⁰Digital Elevation Model



(b)

Slika 11. Studija slučaja 1 - 3D rekonstrukcija ikonostasa Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima: (a) Poligonalni 3D model i pozicije kamere; (b) Ortofoto snimak.



Slika 12. Studija slučaja 2 - 3D rekonstrukcija ikonostasa crkve Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima: (a) Poligonalni 3D model i pozicije kamere; (b) Ortofoto snimak.



(a)



(b)

Slika 13. Studija slučaja 3 - 3D rekonstrukcija ikonostasa crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji: (a) Poligonalni 3D model i pozicije kamere; (b) Ortofoto snimak.

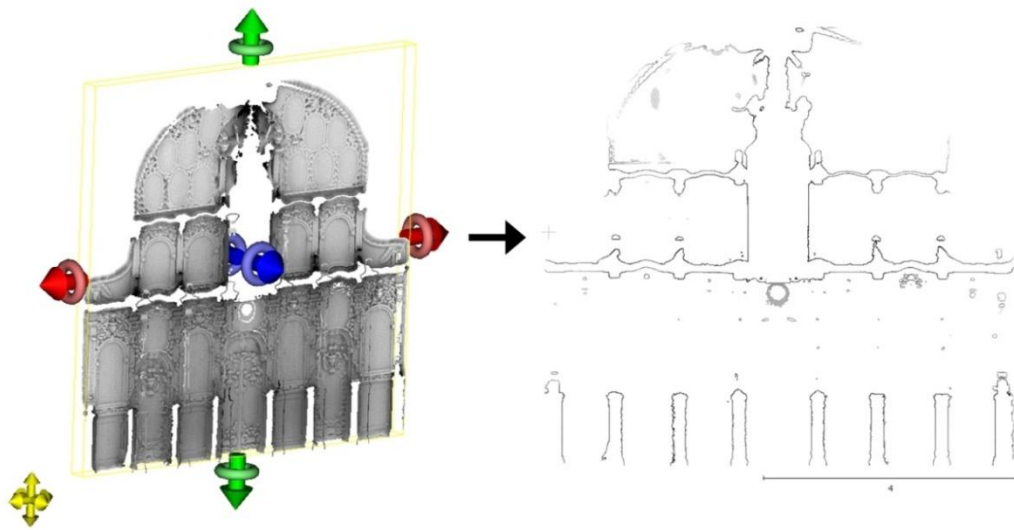
4.3. Detekcija kontura i ekstrakcija 2D preseka iz 3D modela

Postoji nekoliko metoda za ekstrahovanje ortogonalnih preseka i kontura iz digitalizovanih 3D modela. Metod koji se zasniva na tradicionalnom pristupu podrazumeva postavljanje presečnih ravni kroz 3D objekat i na taj način izdvajanje setova tačaka obuhvaćenih prethodno postavljenom projekcijskom ravni ili regionom.

Metod predložen u okviru ovog istraživanja zasniva se na tehnikama mašinskog učenja, i bazira se na kalkulaciji zajedničkih geometrijskih karakteristika posmatranog skupa tačaka u cilju ekstrahovanja novih setova tačaka slične prostorne orijentacije. Dati metodi opisani su u daljem tekstu, dok je metod zasnovan na geometrijskoj karakteristici vertikalnosti tačaka korišćen u daljem istraživanju.

4.3.1. Metod za ekstrakciju 2D preseka zasnovan na presečnim ravnima

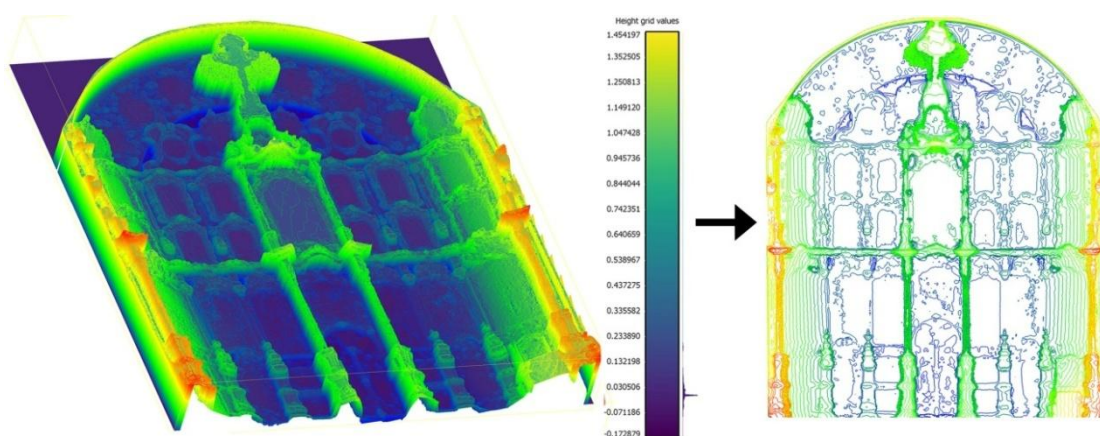
Uobičajeni način za kreiranje preseka kroz 3D oblak tačaka podrazumeva ekstrahovanje svih tačaka koje odgovaraju prethodno postavljenoj presečnoj ravni kroz 3D objekat. Na ovaj način, moguće je izdvojiti sve vidljive tačke projektovane na predefinisanoj projekcijskoj ravni, u vidu kontura i/ili novog podskupa tačaka. U okviru softvera *CloudCompare* postoje dve osnovne opcije za kreiranje preseka kroz 3D objekat (*CloudCompare*, 2021): (1) *Extract cloud sections across polylines*; i (2) *Cross section tool*. Kreiranje ravnih preseka kroz 3D oblak tačaka, zasnovano na istom opisanom principu, moguće je i uz pomoć drugih softvera koji omogućavaju rad sa oblakom tačaka, kao što su *Autodesk AutoCAD* i *MeshLab* (*MeshLab*, 2021). Preseci kroz oblak tačaka kreirani na ovaj način sadrže sve vidljive tačke obuhvaćene presečnom ravni, iz kojih je teško izdvojiti one tačke koje predstavljaju konstrukciju od onih koje predstavljaju ravne površine (Slika 14). U slučaju ikonostasa, tehnički 2D presek kroz konstrukciju trebalo bi da sadrži otvore na mestima gde su ikone.



Slika 14. Primer preseka kroz 3D model uz pomoć alatke *Cross section tool* u *CloudCompare* programu.

4.3.2. Metod za automatsku detekciju kontura

Postoji više načina kreiranja kontura iz oblaka tačaka. *CloudCompare* sadrži opciju za automatsko generisanje kontura prilikom kreiranje ortogonalnih preseka kroz objekat, ali kada se generišu, linije su nestrukturirane i isprepletane što zahteva dosta manualnog sređivanja kako bi se svele na pregledan crtež. U ovom slučaju postoji rizik od nepreciznosti prilikom manualnog crtanja. Napredniji metod predstavlja generisanje DEM snimka i eksportovanje kontura objekta na osnovu njega. Međutim, kod kompleksne geometrije, konture eksportovane u *Metashape* softveru rezultiraju u većinski neprecizne linije koje su proizvoljno interpolirane (Slika 15).



Slika 15. Primer automatski generisanih kontura iz rasterske projekcije rekonstruisanog modela

4.3.3. Metod zasnovan na segmentaciji tačaka

Umesto ekstrahovanja preseka koji obuhvata sve tačke projektovane na presečnu ravan kroz 3D objekat, uočeno je da metod segmentacije oblaka tačaka, zasnovan na geometrijskim karakteristikama tačaka, omogućava filtriranje tačaka sa zajedničkim geometrijskim karakteristikama. Uočeno je da segmentacija oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti može da izvrši klasifikaciju oblaka tačaka ikonostasa na njegove glavne strukturne delove. Izračunavanjem vrednosti vertikalnosti susednih tačaka, segmentirane klase tačaka sa sličnom prostornom orijentacijom mogu biti predstavljene kao posebni elementi strukture ikonostasa, kao što su osnovna konstrukcija, ikone i dekorativna ornamentika rezbarija.

Vertikalnost (eng. *verticality*) je jedna od geometrijskih karakteristika (eng. *geometric feature*) koja se koristi u postupcima segmentacije i klasifikacije 3D oblaka tačaka dobijenih tehnikama 3D digitalizacije (Grilli, Farella, et al., 2019; Hackel et al., 2016a, 2016b; Weinmann et al., 2013). Pored još par geometrijskih karakteristika, vertikalnost se istakla kao jedna od pouzdanih prostornih karakteristika prikladnih za identifikaciju i detekciju kontura u nestrukturiranim oblacima tačaka (Hackel et al., 2016b).

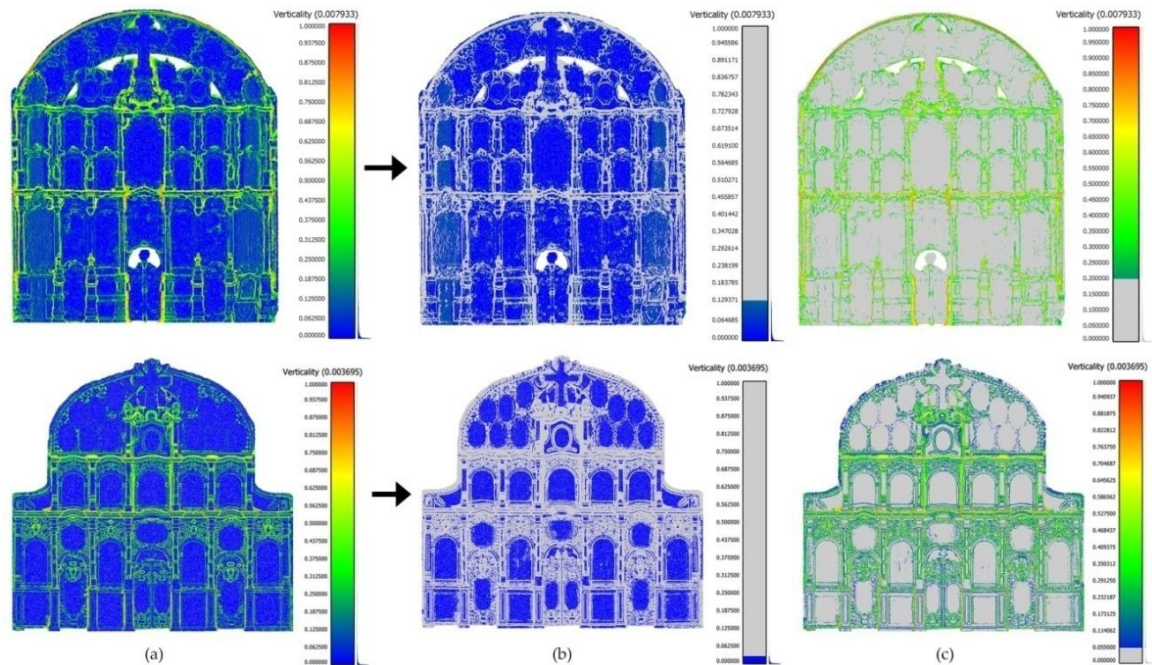
Vertikalnost predstavlja geometrijsku karakteristiku koja se zasniva na tenzor vektoru i definiše prostornu orijentaciju tačaka u odnosu na referentnu (vertikalnu) ravan. Vrednost vertikalnosti dobija se izračunavanjem ugla između vektora normale XY-ravni (vektor $k=(0,0,1)$) i radijus vektora tačkeu posmatranom 3D oblaku tačaka (Grilli, Farella, et al., 2019; Hackel et al., 2016a, 2016b; Weinmann et al., 2013).

Umesto postavljanja presečnih ravni kroz celokupan oblak tačaka, tačke je moguće filtrirati u odnosu na njihovu prostornu (vertikalnu) orijentaciju. Na osnovu geometrijskih karakteristika svake tačke u okviru određenog poluprečnika, moguće je ekstrahovati tačke sa zajedničkom prostornom orijentacijom.

Na primeru ikonostasa, metod segmentacije oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti testiran je u cilju detektovanja kontura glavnih strukturnih i ornamentalnih elemenata ikonostasa (Slika 16). U ovom slučaju, kreirani 3D modeli ikonostasa su prethodno orijentisani tako da leže na XY-ravni, kako bi data ravan bila referentna vertikalna ravan, umesto XZ-ravni koja označava vertikalnu ravan realnog objekta ikonostasa.

Kalkulacija geometrijske karakteristike vertikalnosti vršena je uz pomoć automatskog algoritma u *CloudCompare* softveru. Filtriranje tačaka u odnosu na rezultirajuće vrednosti vertikalnosti vršeno je manuelno. Vrednost vertikalnosti normalizovana je na interval $[0,1]$. Vrednost $V \approx 0.5$ označava skoro vertikalnu strukturu,

dok vrednosti $V \approx 0.0$ ukazuju na pretežno horizontalno orijentisane površine (Weinmann et al., 2017). Vrednosti $V \approx 1$ označavaju vertikalne površine.



Slika 16. Postupak segmentacije oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti, prikazan na studijama slučaja 1 i 2: (a) vertikalnost izračunata za originalni oblak tačaka; filtriranje tačaka prema vrednostima vertikalnosti na površine koje predstavljaju (b) ikone i (c) ornamentalnu rezbariju.

S obzirom na to da su 3D modeli ikonostasa prethodno orijentisani tako da leže na XY-ravni, konture koje označavaju dekorativnu ornamentiku i isturene delove konstrukcije ilustrovani su kao vertikalne površine (Slika 16 - zelena boja), u poređenju sa pretežno horizontalnim površinama koje označavaju ostatak strukture (Slika 16 - plava boja). Određivanjem specifične vrednosti iz normalizovanog intervala $[0,1]$, tačke su filtrirane do nivoa izdvajanja kontura pojedinačnih elemenata 3D površina posmatranog objekta. U datoj ilustraciji na primeru dva ikonosotasa, postupak segmentacije oblaka tačaka na bazi kalkulacije vertikalnosti podrazumeva sledeće korake:

- Kalkulacija vrednosti vertikalnosti za celokupan originalni oblak tačaka;
- Filtriranje tačaka sa pretežno horizontalnom orijentacijom, postavljanjem normalizovane vrednosti na intervale 0-0.1 (Slika 16b - gore) i 0-0.05 (Slika 16b - dole);
- Filtriranje tačaka sa pretežno vertikalnom orijentacijom, postavljanjem normalizovane vrednosti na intervale 0.2-1 (Slika 16c - gore) i 0.05-1 (Slika 16c - dole).

Vrednost poluprečnika krivine površi u svakoj tački (eng. *local point neighborhood radius*) prikazana na histogramu na slici 16 označava gustinu tačaka koja je korišćena u kalkulaciji vrednosti vertikalnosti. Može se uočiti da je celokupan oblak tačaka segmentiran na dva podskupa tačaka, pri čemu je najveća gustina tačaka koncentrisana na pretežno ravnim površinama 3D modela ikonostasa, dok površine koje upućuju na isturene delove konstrukcije i dekorativnu površinsku ornamentiku čine podskup tačaka manje gustine (Slika 16). Podskup tačaka koji ilustruje konstruktivne i ornamentalne elemente ikonostasa je u daljem procesu dodatno segmentiran na pojedinačne dekorativne elemente.

4.3.4. Predloženi metod za detekciju kontura i ekstrakciju 2D preseka

U okviru ovog poglavlja detaljno je opisan predloženi metod za detektovanje kontura i ekstrahovanje karakterističnih 2D preseka kroz 3D geometriju ikonostasa. Predloženi metod zasniva se na prethodno opisanom poluautomatskom postupku segmentacije nestrukturiranog oblaka tačaka na osnovu njihovih dubinskih vrednosti i geometrijskih karakteristika (vertikalnosti). Osnovna ideja ovog postupka jeste automatsko redukovanje suvišnih tačaka iz inicijalno generisanog oblaka tačaka, i kreiranje čitljivih 2D preseka kompleksne geometrije.

Predloženi metod funkcioniše na sledeći način: U prvoj fazi segmentacije, kompletan oblak tačaka segmentira se u odnosu na dubinske razlike objekta, odnosno informacije sadržane u digitalnom modelu visina (DEM). Ovo podrazumeva segmentaciju oblaka tačaka na ravne i isturene delove, pri čemu u slučaju ikonostasa najistureniji delovi predstavljaju konstruktivni sistem, odnosno stubove.

U sledećoj fazi se, za prethodno segmentirane delove računa vrednost vertikalnosti površine u cilju daljeg segmentiranja površina u skladu sa željenim nivoom detaljnosti. Mogući nivo detaljnosti zavisi od gustine oblaka tačaka. U slučaju pretežno planarne forme ikonostasa, dalja segmentacija je izvršena na površine koje predstavljaju dekorativnu plastiku i rezbariju, i na pretežno ravne delove koji predstavljaju ikone. Ideja pri segmentaciji je da se uklone tačke unutar otvora koji predstavljaju ikone, kako bi se izdvojila ornamentalna struktura ikonostasa, odnosno konture okvira ikona.

Kada je kreiran odgovarajući broj segmentiranih oblaka tačaka iz jedne površine oni se mogu direktno eksportovati kao *.dxf* format fajla sa kojim je moguće raditi u okviru *AutoCAD* okruženja.

Celokupan postupak, kao i koraci koji su prethodili procesu segmentacije, a predstavljaju pripremu oblaka tačaka za segmentaciju, detaljno su opisani u narednim poglavljima.

4.3.4.1. Konverzija teksturisanog poligonalnog 3D modela u oblak tačaka

Segmentaciju tačaka u *CloudCompare* softveru moguće je primeniti isključivo na oblak tačaka kao ulazni podatak. Zbog onemogućenog pristupa visokim delovima ikonostasa prilikom fotogrametrijskog snimanja, originalno generisani oblak tačaka sadržao je šupljine na gornjim delovima horizontalnih greda i dekorativne plastike (Slike 17a i 18a). Prilikom generisanja 3D modela u okviru fotogrametrijskog softvera, nepopunjeni delovi automatski su interpolirani, rezultirajući u povezanu i glatku površinu poligonalnog 3D modela (Slike 17b i 18b).

U cilju korišćenja oblaka tačaka homogene i povezane strukture u procesu segmentacije, teksturisani poligonalni 3D model je konvertovan nazad u oblak tačaka, uz pomoć opcije *Sample Points* u *CloudCompare* softveru (Slike 17c i 18c). Novi oblak tačaka korišćen je u daljem procesu segmentacije. Konverzija poligonalnog 3D modela podrazumeva prevođenje mreže poligona u oblak tačaka, pri čemu korisnik specificira tačan broj tačaka ili gustinu novonastalog oblaka tačaka. Na ovaj način, eksportuju se normale, kao i informacije o boji/teksturi sa originalnog teksturisanog 3D modela (*CloudCompare*, 2021).

Prilikom konverzije poligonalnog 3D modela u oblak tačaka bilo je važno zadržati istu gustinu tačaka kao na originalnom fotogrametrijski generisanom oblaku tačaka, kako bi se zadržala i postignuta preciznost 3D fotogrametrijske rekonstrukcije. Prema tome, u studiji slučaja ikonostasa 1, zadržan je isti broj tačaka (6.446.316), odnosno gustina (5.36 mm) kao na originalnom oblaku tačaka (broj tačaka: 6.500.000; gustina: 5 mm). U drugoj studiji slučaja ikonostasa 2, novi oblak tačaka redukovao je na 9.500.000 tačaka, s obzirom na to da se modeli veći od deset miliona tačaka, zbog veličine fajla, automatski optimizuju prilikom pokretanja u okviru *CloudCompare* radnog okruženja. Originalni oblak tačaka sadržao je 17.324.365 tačaka, odnosno gustinu oblaka tačaka od 2.1 mm/pix, dok je novokreirani sveden na 9.500.000 tačaka, pri čemu je i gustina oblaka tačaka smanjena na 3.6 milimetara po jedinici jednog piksela.



Slika 17. Postupak konverzije teksturisanog 3D modela u novi oblak tačaka, prikazan na studiji slučaja ikonostasa 1: **(a)** originalni oblak tačaka; **(b)** poligonalni 3D model kreiran na osnovu originalnog oblaka tačaka i **(c)** oblak tačaka kreiran iz poligonalnog 3D modela.



Slika 18. Postupak konverzije teksturisanog 3D modela u novi oblak tačaka, prikazan na studiji slučaja ikonostasa 2: **(a)** originalni oblak tačaka; **(b)** poligonalni 3D model kreiran na osnovu originalnog oblaka tačaka i **(c)** oblak tačaka kreiran iz poligonalnog 3D modela.

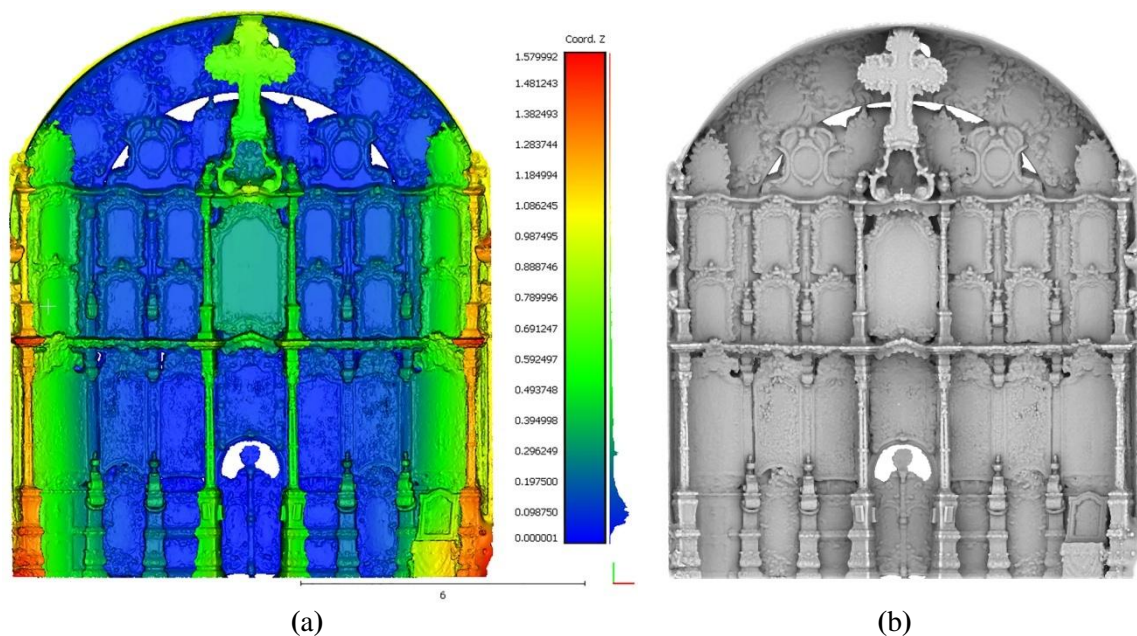
4.3.4.2. Generisanje dubinskih mapa i ambijentalne okluzije

Generisanje dubinskih mapa podrazumeva konvertovanje koordinata 3D modela u skalarnu vrednost. Ovo omogućava detaljni vizuelni (u vidu RGB skale boja) i skalarni prikaz dimenzija digitalizovanog objekta, ukoliko je prethodno uvedena razmera. U slučaju kompleksne geometrije, kao što su primeri ikonostasa kojima je zadnja strana nepristupačna, dubinu objekta je teško fizički izmeriti. U tom smislu, uvođenjem razmere u fotogrametrijski generisane 3D modele i kreiranjem modela digitalne visine, moguće je dobiti preciznu projekciju dubinskih mapa i njihove koordinate, odnosno dimenzije objekta.

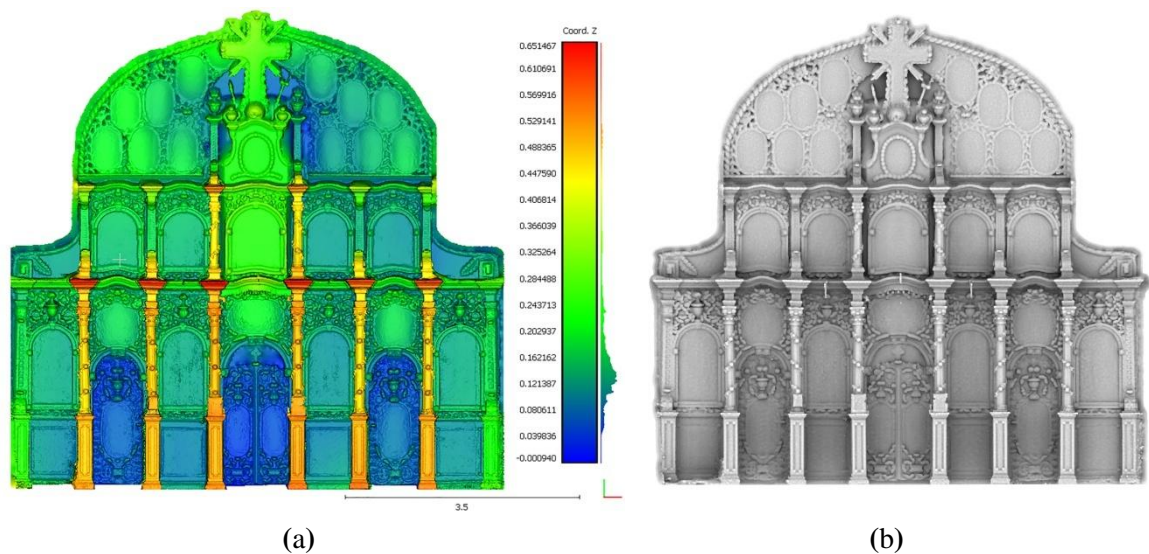
Pošto su 3D modeli ikonostasa u *CloudCompare* programu inicijalno orijentisani da leže na XY-ravni, dubine objekta predstavljene su Z koordinatom. Dati postupak srodan je generisanju digitalnog modela visina (DEM snimka). Podaci o dubinama objekta grafički su predstavljeni putem RGB skale boja i histograma koji prikazuje skalarnu vrednost za različite dubine 3D modela. U ovom slučaju manje dubine ikonostasa predstavljene su plavo-zelenom bojom, dok su najistureniji delovi označeni rasponom žuto-crvene boje (Slike 19a i 20a). Vrednosti histograma date su u metrima.

Kako bi se dodatno unapredio vizuelni prikaz dubina 3D modela objekta, na oblacima tačaka primenjen je i filter ambijentalne okluzije (eng. *Ambient Occlusion*) (Slike 19b i 20b). Za dodavanje ambijentalne okluzije korišćen je *ShadeVis Plugin* u *CloudCompare* programu.

U računarskoj grafici, ambijentalna okluzija je tehnika senčenja i renderovanja koja određuje izloženost 3D scene ambijentalnom osvetljenju. Takođe, primena ambijentalne okluzije korisna je za vizuelizaciju 3D modela i analizu geometrijskih karakteristika, jer dodaje realizam digitalizovanim modelima, omogućavajući jasniju vizuelnu percepciju i identifikaciju sitnih površinskih udubljenja 3D modela, koji su slabo prepoznatljivi (Galantucci & Fatiguso, 2019).



Slika 19. Studija slučaja ikonostasa 1: (a) RGB i skalarni prikaz dubina 3D modela; (b) primenjeni filter ambijentalne okluzije.



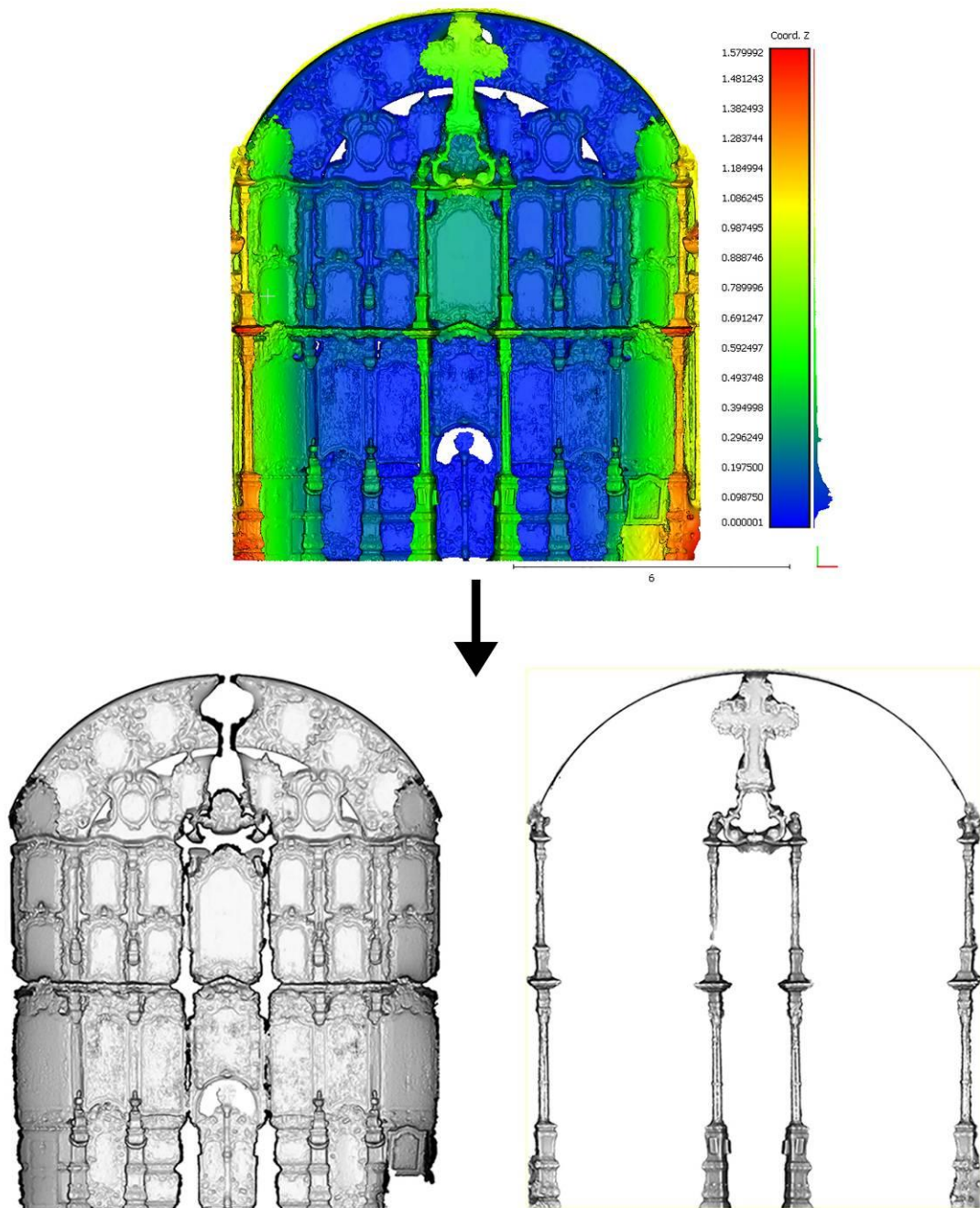
Slika 20. Studija slučaja ikonostasa 2: (a) RGB i skalarni prikaz dubina 3D modela; (b) primenjeni filter ambijentalne okluzije.

4.3.4.3. Segmentacija 3D modela na osnovu dubinskih mapa

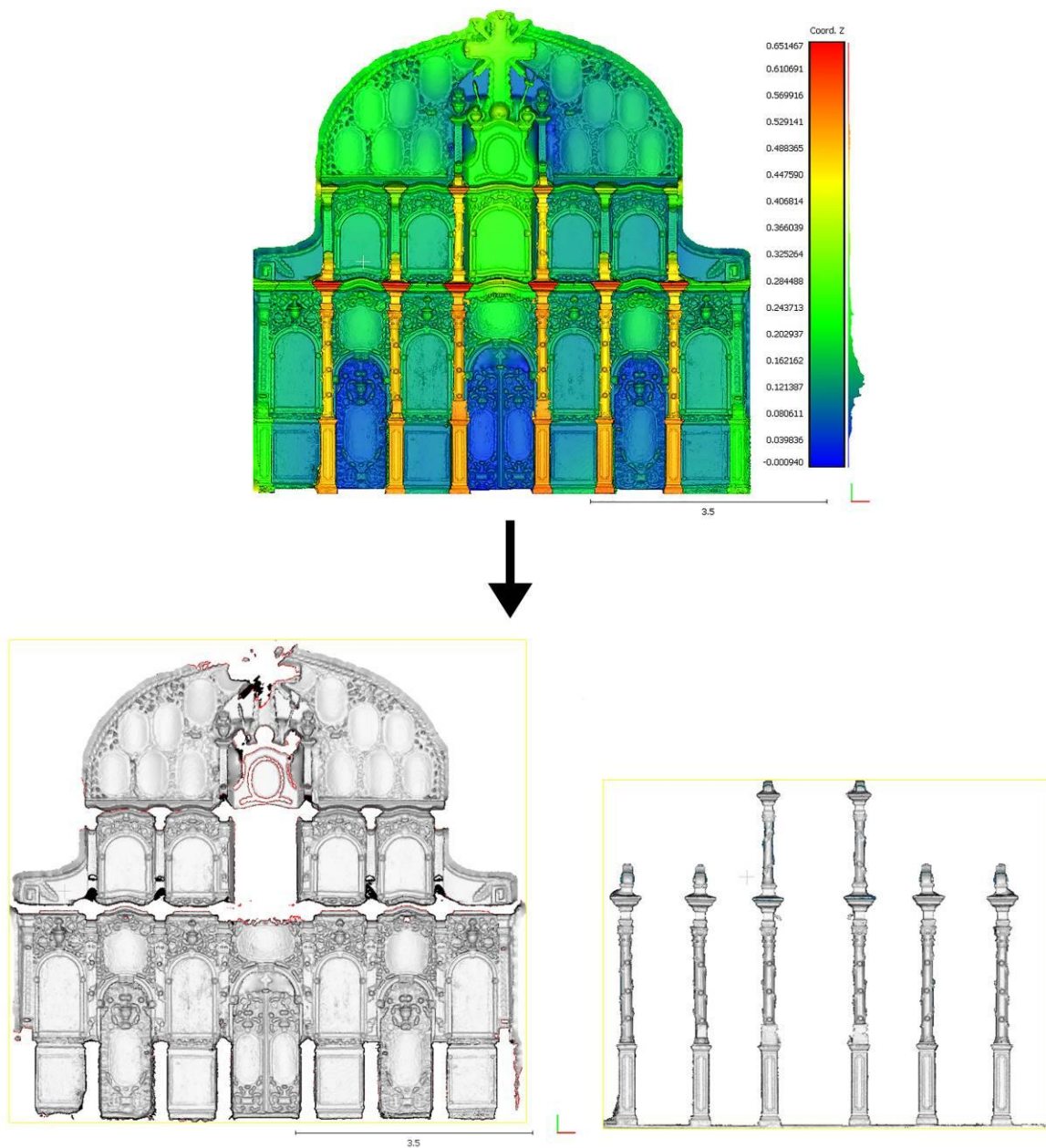
Dubinske mape generisane su sa ciljem da se 3D modeli ikonostasa u prvoj fazi segmentiraju na glavne delove konstrukcije u odnosu na vrednosti njihovih dubina. U *CloudCompare* softveru, datu segmentaciju moguće je izvršiti manuelnim filtriranjem tačaka na osnovu skalarnih vrednosti dubine objekta ili uz pomoć automatskog algoritma.

U slučaju ikonostasa, kompletan oblak tačaka segmentiran je na isturene delove koji predstavljaju konstruktivne elemente, kao što su stubovi i horizontalne grede, i na ostatak konstrukcije pretežno ravne forme, koji sadrži dekorativnu ormanetalnu rezbariju i ikone umetnute u okvire.

Segmentacija je izvršena uz pomoć *CSF (Cloth Simulation Filter)* opcije koja predstavlja *plugin* za *CloudCompare* softver, i izvorno služi za automatsku klasifikaciju tačaka terena u oblacima tačaka kreiranim snimanjem iz vazduha (Zhang et al., 2016). 3D model koji se segmentira potrebno je prvo orijentisati da leži na XY-ravni i podesiti odgovarajuću rezoluciju i prag klasifikacije, kako bi se automatski segmentirale tačke koje označavaju isturene delove u odnosu na ravne površine. U obe studije slučaja ikonostasa, 3D oblaci tačaka segmentirani su na dva seta tačaka koji predstavljaju stubove i ostatak konstrukcije (Slike 21 i 22). Zadržavajući podatke o dubinama segmentiranih delova, pojedinačni setovi tačaka su u narednom koraku filtrirani u odnosu na vrednosti geometrijske karakteristike vertikalnosti tačaka.



Slika 21. Studija slučaja ikonostasa 1: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na osnovu dubina objekta.



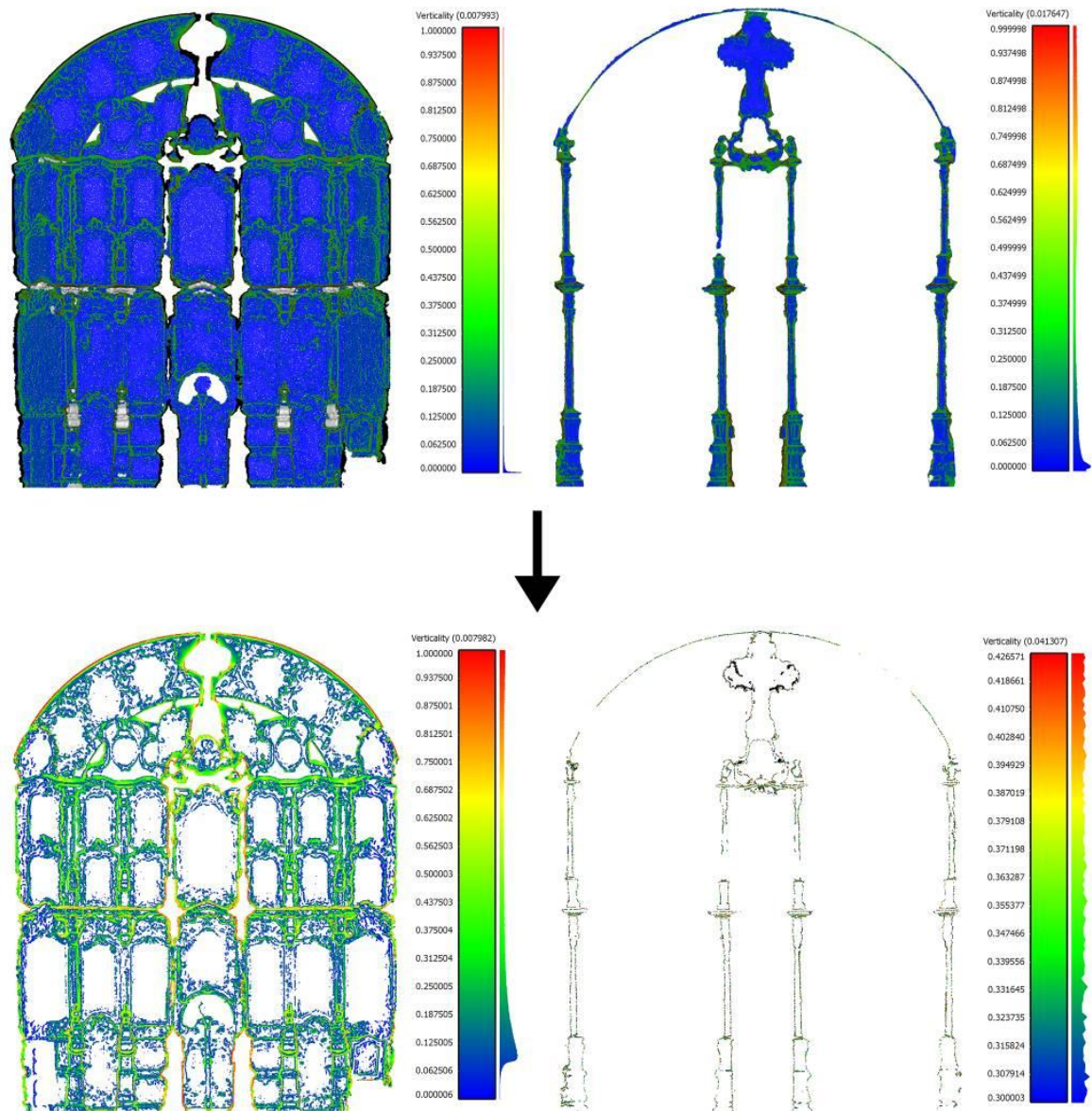
Slika 22. Studija slučaja ikonostasa 2: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na osnovu dubina objekta.

4.3.4.4. Segmentacija oblaka tačaka na osnovu vertikalnosti i detekcija kontura

U cilju detektovanja kontura nepravilnih oblika okvira ikona i kompleksne geometrije dekorativne ornamentike ikonostasa, vršena je segmentacija oblaka tačaka na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti. Kalkulacija vrednosti vertikalnosti oblaka tačaka i filtriranje tačaka, vršeni su u okviru *CloudCompare* softvera.

Vertikalnost je računata za svaki set tačaka prethodno segmentiran na osnovu parametara dubine delova 3D modela. Skalarna vrednost na histogramu (Slika 23) predstavlja primenjeni prag (eng. *threshold*) lokalnog poluprečnika krivine površi (eng. *local point neighborhood radius*), koji se koristi za proračun vrednosti zadate geometrijske karakteristike obuhvaćenih tačaka. U prikazanim studijama slučaja primenjen je *threshold* jednak automatski proračunatoj vrednosti gustine tačaka za date oblake tačaka.

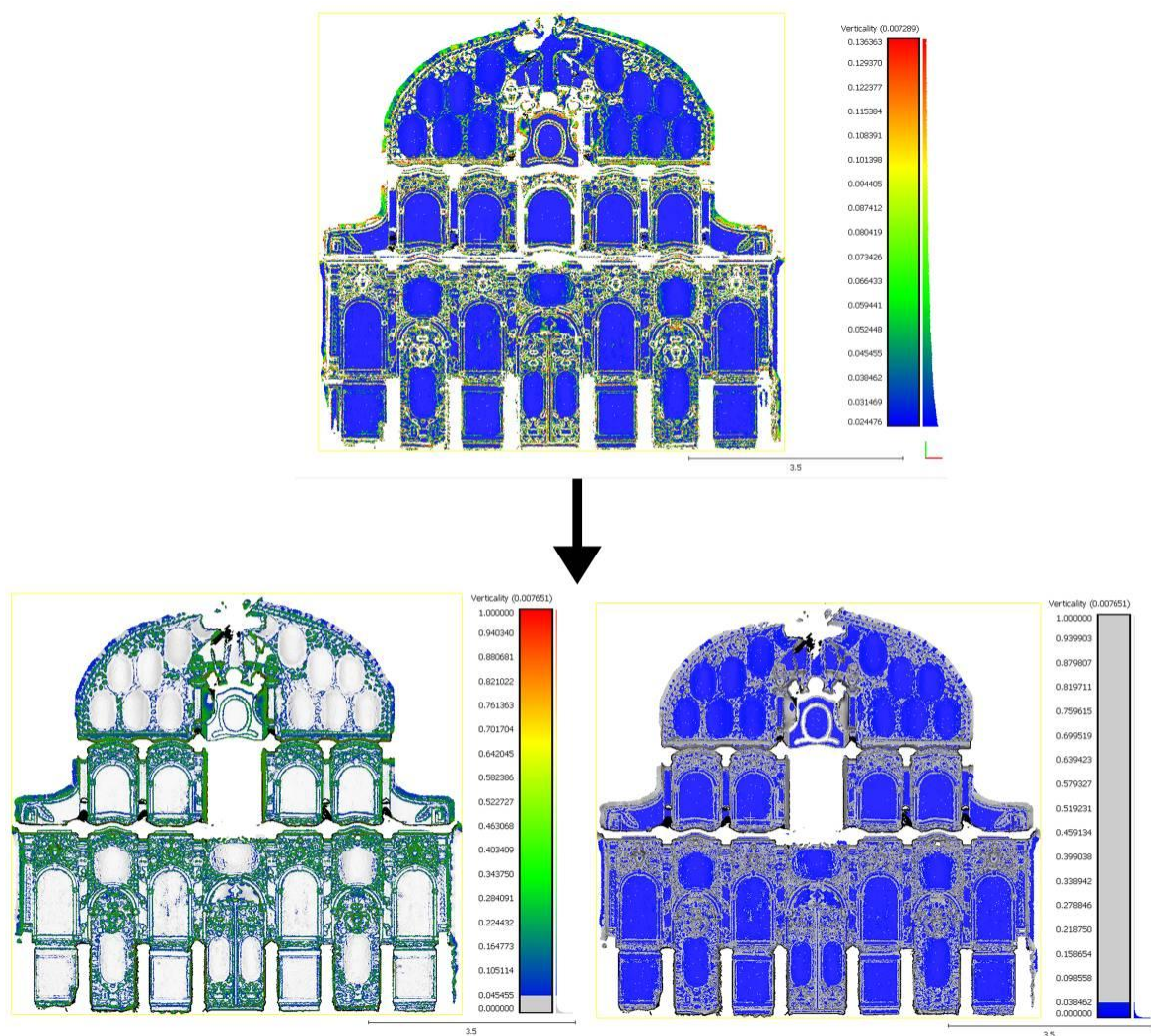
U prvoj studiji slučaja, ilustrovan je postupak filtriranja tačaka na osnovu proračunate vrednosti vertikalnosti za pojedinačne oblake tačaka stubova i ostatka konstrukcije ikonostasa. Oblaci tačaka segmentirani su do nivoa detekcije kontura glavnih konstruktivnih elemenata i oblika okvira ikona i dekorativne rezbarije (Slika 23). Slika 23 prikazuje postupak segmentacije 3D modela, kao i rezultirajuće gustine tačaka novih oblaka tačaka (Slika 23 – histogram).



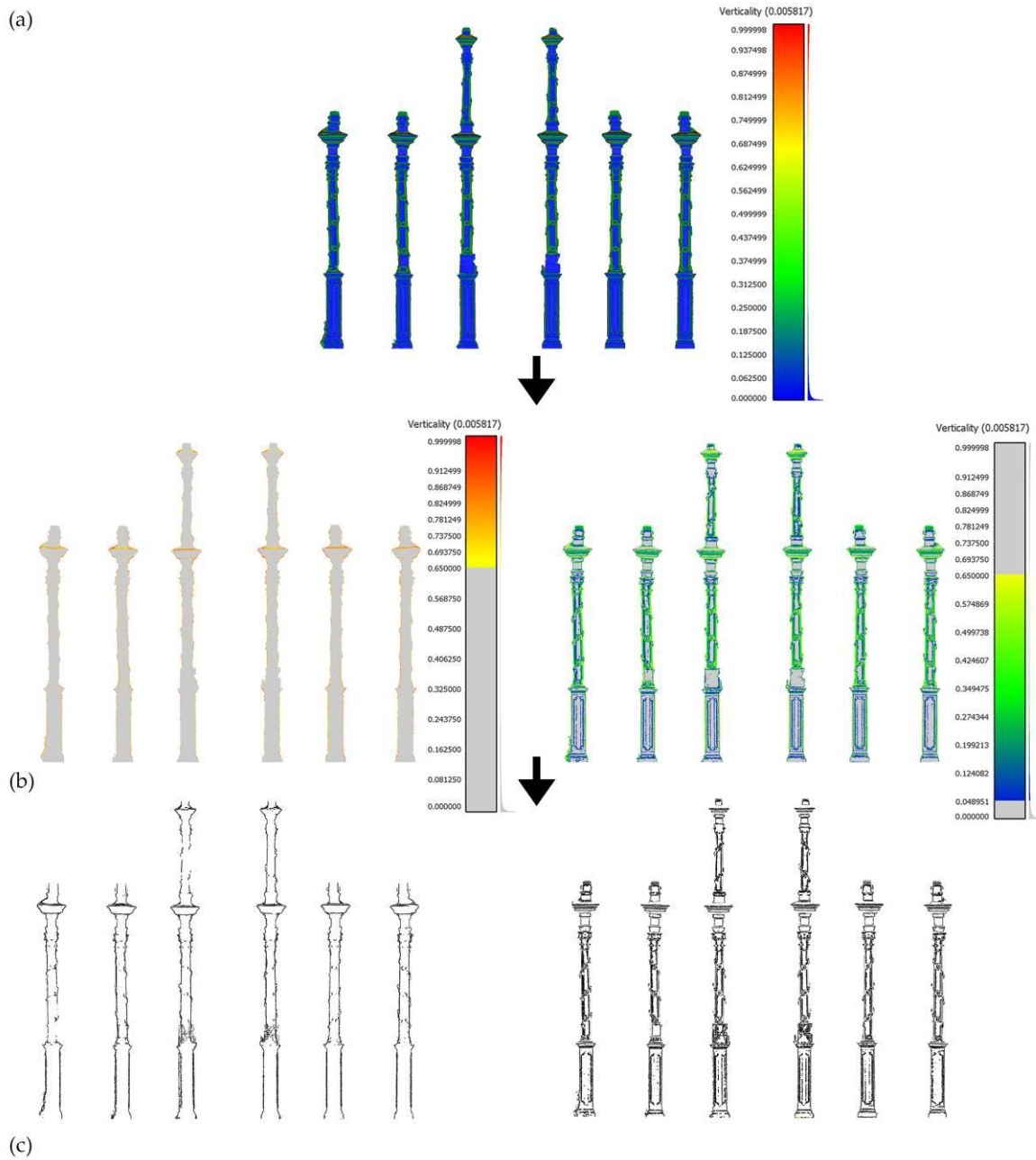
Slika 23. Studija slučaja ikonostasa 1: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti.

U studiji slučaja drugog ikonostasa, postupak proračuna vertikalnosti i filtriranje tačaka je ponovljeno više puta za određene delove 3D modela (stubove) u cilju postizanja većeg nivoa detaljnosti detektovanja kontura oblika manjih razmera. S obzirom na to da je za dati ikonostas postignuta nešto bolja preciznost fotogrametrijske rekonstrukcije, pa je i gustina tačaka bila veća (2 mm/pix) u odnosu na prvi ikonostas, bilo je moguće postizanje većeg nivoa detaljnosti detektovanja kontura.

Oblak tačaka koji se odnosi na pretežno ravan deo konstrukcije, i sadrži ikone i ornamentalnu rezbariju, filtriran je do nivoa koji segmentira tačke na ravne delove – ikone, ekstrahujući okvire ikona i oblike ornamentike (Slika 24). Postupak filtriranja tačaka na osnovu vrednosti vertikalnosti je ponovljen dva puta na oblaku tačaka koji predstavlja stubove ikonostasa. Na ovaj način, ekstrahovane su spoljašnje konture stubova (Slika 25b), kao i konture koje definišu dekorativnu ornamentiku na stubovima (Slika 25c).



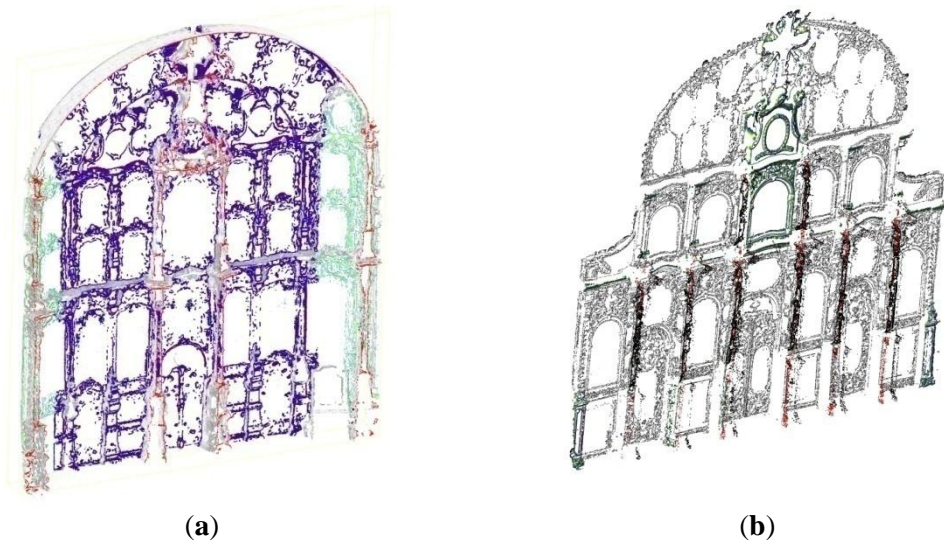
Slika 24. Studija slučaja ikonostasa 2: Ilustracija postupka segmentacije 3D modela na osnovu geometrijske karakteristike vertikalnosti.



Slika 25. Studija slučaja ikonostasa 2: Ilustracija postupka detekcije i ekstrakcije kontura stubova ikonostasa.

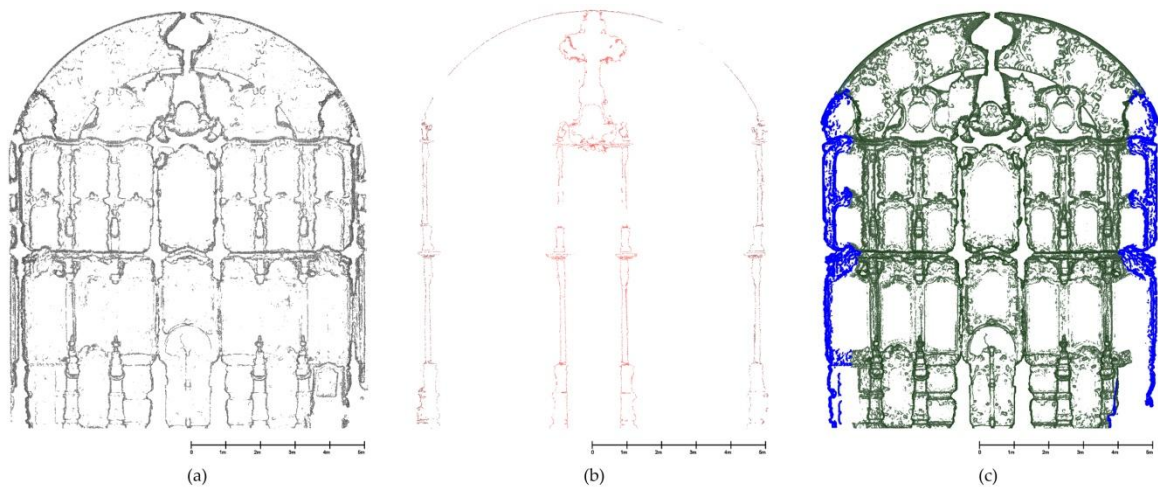
4.3.5. 2D vizuelizacija oblaka tačaka u okviru CAD okruženja

Na ovaj način detektovane i ekstrahovane konture pojedinačnih elemenata digitalizovanih objekata omogućavaju vizuelizaciju kompleksne forme digitalizovanog objekta u vidu 2D ortogonalnih preseka kroz objekat (Slika 26), kao i njihovo dalje eksportovanje u CAD okruženje u cilju analize datih oblika. Skupovi tačaka u formi 2D preseka kroz objekat mogu se eksportovati iz *CloudCompare* programa i uvesti u CAD okruženje koje podržava rad sa oblacima tačaka. S obzirom na to da *CloudCompare* omogućava izvoz fajla u *.dxf* formatu, segmentirani oblaci tačaka se mogu lako vizualizovati u okviru *Autodesk AutoCAD* programa (*Autodesk, 2021*). S obzirom na to da *.dxf* fajl koordinate ne sadrže podatke o dimenzijama o objekta, kada se importuje u *AutoCAD* program, oblak tačaka je potrebno skalirati da bi se omogućilo crtanje u određenim jedinicama. Oblak tačaka moguće je uvesti u *AutoCAD* i u drugim formatima, poput *PLY*, *LAS/LAZ* ali uz pomoć posrednog programa *Autodesk ReCap* (*Autodesk, 2021a*), koji omogućava konvertovanje oblaka tačaka u *RCP* fajl format koji je podržan od strane *Autodesk* programa.

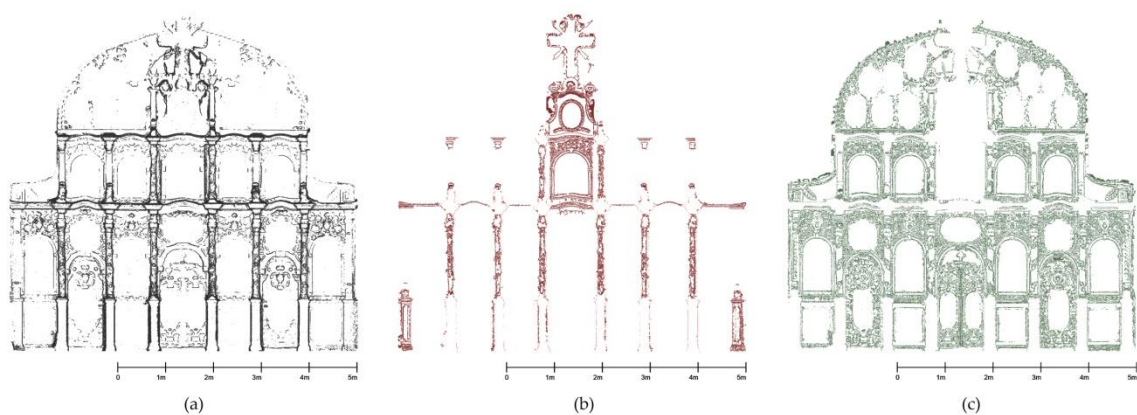


Slika 26. Segmentovani oblaci tačaka u vidu različitih lejera: (a) studija slučaja 1; (b) studija slučaja 2.

Slike 27 i 28 ilustruju *.dxf* fajlove različitih delova konstrukcije ikonostasa, sortirane u odvojene lejere u okviru *AutoCAD* programa za tehničko crtanje. U okviru CAD okruženja, dati skupove tačaka koji reprezentuju konture elemenata objekta mogu se dalje analizirati, meriti, kotirati i izvesti u formi ortogonalnog izgleda željene razmere. Takođe, uvezeni format tačaka u CAD okruženju omogućava precizno precrtavanje oblika pojedinih elemenata, koristeći opciju linijskog crtanja, uz pomoć kursora koji omogućava praćenje postojećih tačaka koje čine konturu datog elementa.

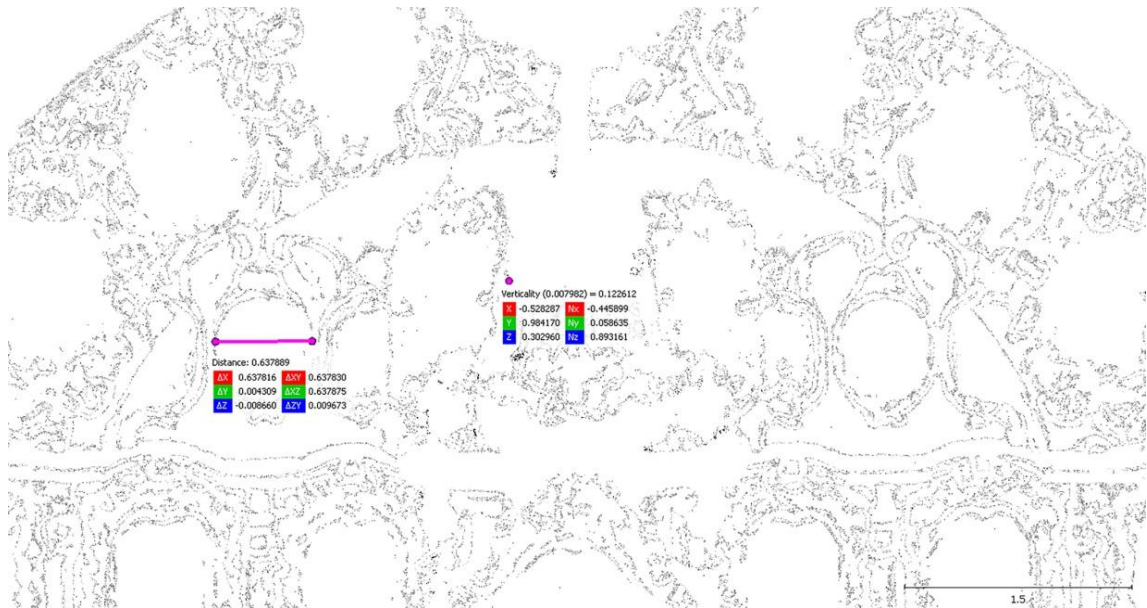


Slika 27. Studija slučaja 1. Vizuelizacija kontura u CAD-u: (a) ekstrahovane konture celokupne konstrukcije; (b) ekstrahovane konture stubova; (c) ekstrahovane konture ornamenata.

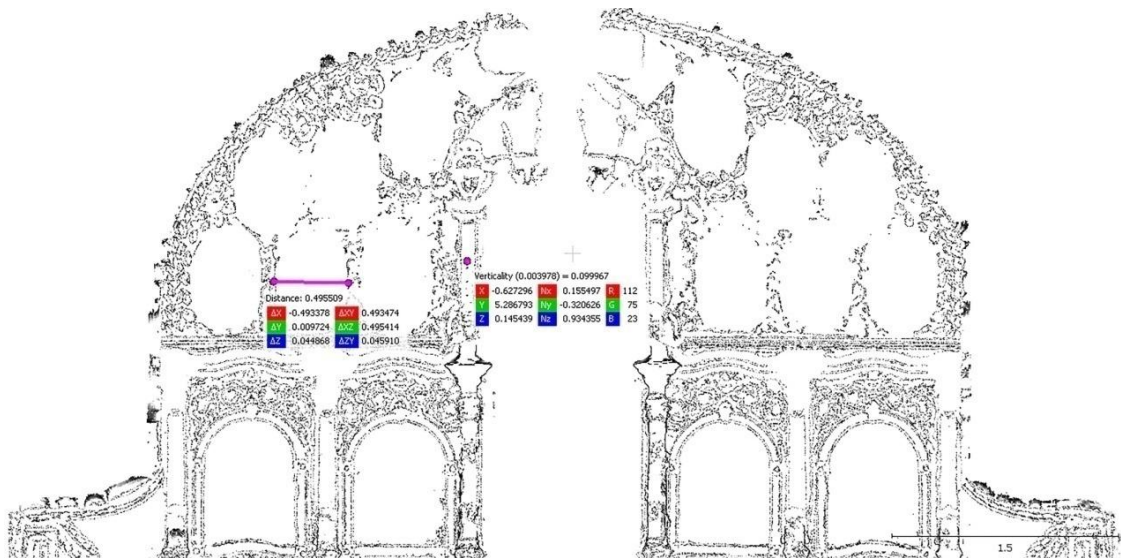


Slika 28. Studija slučaja 2. Vizuelizacija kontura u CAD-u: (a) ekstrahovane konture celokupne konstrukcije; (b) ekstrahovane konture stubova sa ornamentima; (c) ekstrahovane konture ornamenata.

Slike 29 i 30 prikazuju detalje oblika dekorativne ornamentalne rezbarije za obe studije slučaja digitalizovanih ikonostasa u razmeri 1:50. Imajući u vidu da površine ikonostasa 1 i 2 iznose 117 m^2 i 56 m^2 , postignuta razmera detaljnosti ilustruje visok nivo identifikacije kontura sitnih detalja. Može se uočiti da opisana metoda segmentacije oblaka tačaka do nivoa detaljnosti omogućenog gustinom tačaka doprinosi identifikaciji pojedinih oblika ornamenata koji se ne mogu lako razaznati iz inicijalno generisanog oblaka tačaka celokupnog objekta. Nivo detalja filtriranog oblaka tačaka, kao i preciznost detekcije konture zavise od gustine tačaka, što upućuje na to da tačnost fotogrametrijske rekonstrukcije utiče na nivo detaljnosti segmentacije oblaka tačaka.



Slika 29. Studija slučaja 1: Detalj detektovanih kontura oblika u razmeri 1:50.



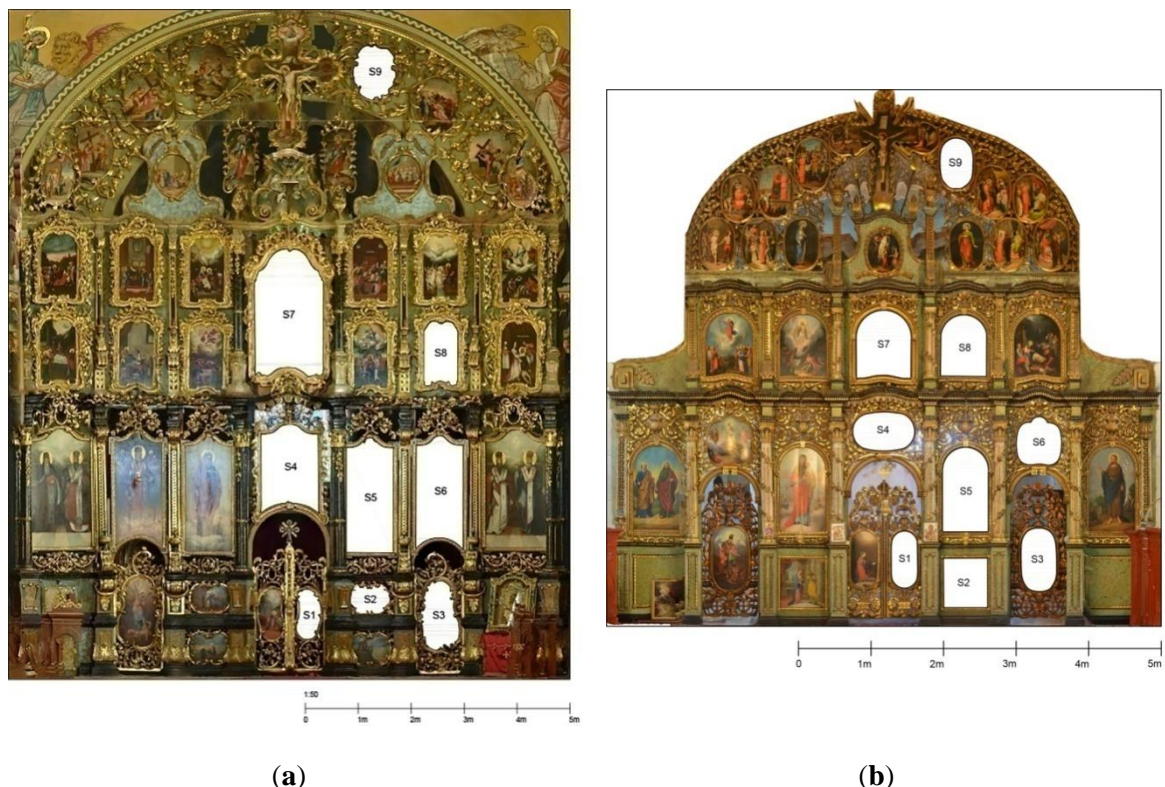
Slika 30. Studija slučaja 2: Detalj detektovanih kontura oblika u razmeri 1:50.

Oblak tačaka u formi ortogonalnog preseka je moguće izvesti iz *CloudCompare* programa i u vidu slike u visokoj rezoluciji, uz pomoć opcije *Render-to-file*. Na ovaj način, renderovani oblak tačaka omogućava detaljnu 2D vizuelizaciju sitnih detalja digitalizovanog objekta koji se ne mogu uočiti na izvorno digitalizovanom oblaku tačaka.

4.4. 2D analiza oblika

U ovom istraživanju, metode 2D analize oblika zasnovane na deskriptorima oblika primenjene su da numerički opišu i klasifikuju karakteristične elemente kompleksne geometrije ikonostasa u odnosu na stilski pravac kome pripadaju. Kombinacija 2D deskriptora oblika je korišćena za određivanje relacija između stilskog porekla i karakteristika oblika posmatranih delova ikonostasa, sa pretpostavkom da će uočiti razlike u oblicima nastalim u različitim stilskim pravcima.

Komparativna analiza i numerička klasifikacija izvršena su na studijama slučaja dva ikonostasa, nastalih u periodu Baroka (Slika 31a) i Klasicizma (Slika 31b). Za verifikaciju predložene metodologije i rezultata korišćena je studija slučaja trećeg ikonostasa (Slika 32), nastalog na prelaznom periodu između dva umetnička pravca. Deskriptori oblika su primenjeni na ekstrahovane oblike ikona čiji je položaj i raspored uniforman na obuhvaćenim studijama slučaja ikonostasa, kao i na oblike poprečnih i podužnih preseka glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa - stubova.



Slika 31. Ortofoto snimci sa prikazom analiziranih oblika okvira ikona: (a) studija slučaja 1 - ikonostas iz Baroka; (b) studija slučaja 2 - ikonostas iz Klasicizma.



Slika 32. Ortofoto snimak sa prikazom analiziranih oblika okvira ikona - studija slučaja 3.

Prva faza predložene metodologije obuhvata analiza određenih prepoznatljivih atributa razmatranih oblika i dizajniranja mera koje numerički ocenjuju u kom obimu posmatrani oblik poseduje te osobine. Mere oblika zasnovane su na detaljnim dimenzijama oblika ekstrahovanih iz digitalizovanih 3D modela. Mere su primenjene u okviru *AutoCAD* softvera. Na osnovu datih mera, u drugoj fazi su primenjeni određeni deskriptori oblika u cilju numeričke klasifikacije posmatranih elemenata ikonostasa u odnosu na stilski pravac kojem pripadaju.

4.4.1. Koncipiranje mera oblika

Mere oblika dizajnirane su tako da zadovoljavaju osobine koje su važne u analizi realnih objekata. Na ovaj način, karakteristike oblika tipičnih okvira ikona koji su zastupljene kod svih ikonostasa predstavljene su numerički kako bi opisale stvarne osobine datih oblika.

Fokus ovog dela istraživanja bio je na tehnikama analize oblika koje numerički opisuju attribute posmatranog oblika. U tu svrhu, korišćen je globalni, numerički metod deskripcije oblika. Ovaj metod koristi podatke iz unutrašnjosti i spoljašnjosti oblika, rezultirajući u numerički vektor mera oblika.

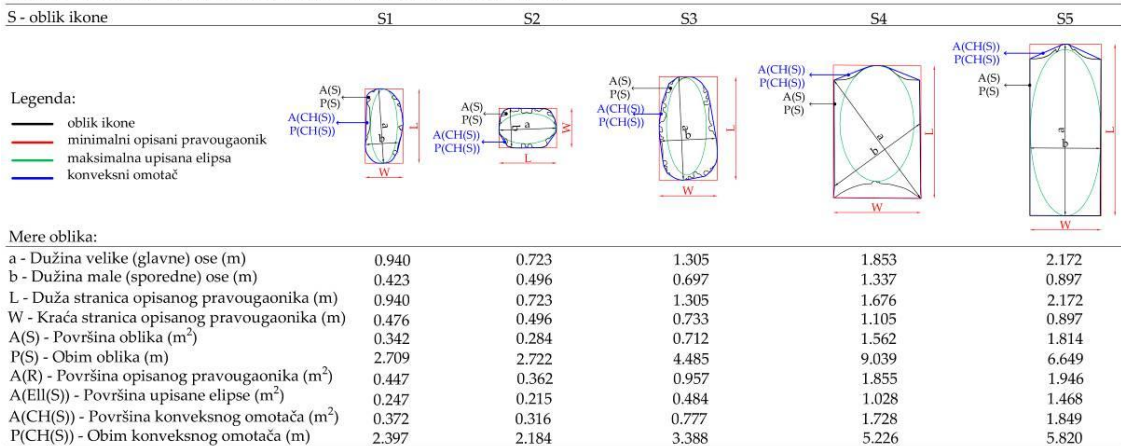
U cilju koncipiranja mera koje opisuju attribute oblika, prvo su analizirani atributi oblika devet glavnih okvira ikona, zastupljenih na oba analizirana ikonostasa (iz perioda Baroka i Klasicizma). Atributi datih oblika opisani su kroz posebno dizajnirane mere razmatranih oblika zasnovane na njegovim dimenzijama: obim, površina, velika i mala osa oblika; dužina, širina, površina minimalnog opisanog pravougaonika, površina maksimalne upisane elipse, obim i površina konveksnog omotača. Date mere predstavljaju fizičke dimenzije koje karakterišu izgled datih oblika. Slike 33, 35 i 37 ilustruju tehničke crteže kontura oblika devet glavnih okvira ikona i njima pridružene mere oblika. Posmatrani oblici obeleženi su oznakom S . Date mere oblika koncipirane su na sledećim pojmovima:

- Velika – glavna osa (a) predstavlja meru najduže prave linije koje se može provući kroz posmatrani oblik.
- Mala – sporedn aosa (b) je mera najduže prave linije koja se može provući kroz oblik, a da pri tome bude upravna na glavnu osu.
- Minimalni opisani pravougaonik $R(S)$ predstavlja najmanji pravougaonik koji se može opisati oko konture datog oblika. Dimenzije pravougaonika predstavljene su njegovim dužom $L(R)$ i kraćom stranicom $W(R)$.
- Maksimalna upisana elipsa $Ell(S)$ predstavlja elipsu maksimalne površine koja se može upisati u posmatrani oblik.
- Konveksni omotač oblika $CH(S)$ predstavlja najmanji konveksni skup koji sadrži dati oblik.

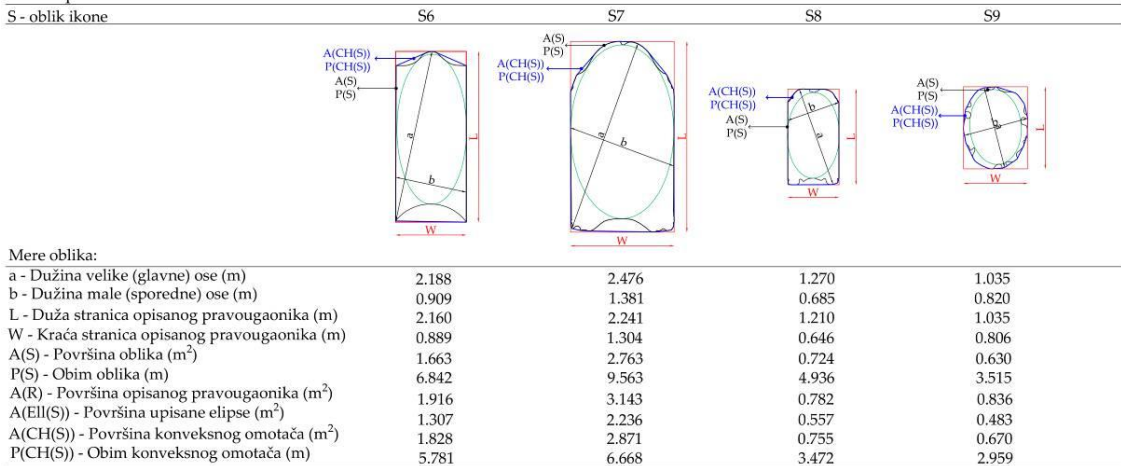
Takođe, površina i obim su izračunati za svaki oblik i njemu pridružene mere. Računanje mera oblika vršeno je manuelno, koristeći konture posmatranih oblika u *AutoCAD* softveru.

Iste mere oblika, osim eliptičnosti, primenjene su na ekstrahovane konture glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa koji obuhvataju bazu, stub i arhitrav. Mera eliptičnosti nije računata, s obzirom na to da nije smatrana relevantnom u razmatranju oblika datih elemenata. Slike 33 - 37 ilustruju grafički i numerički prikaz opisanih mera oblika na posmatranim elementima okvira ikona (Slike 33, 35 i 37), i bočnih i frontalnih preseka vertikalnih konstruktivnih elemenata ikonostasa (Slike 34 i 36). Izračunate numeričke vrednosti mera oblika služile su za dalju primenu deskriptora oblika.

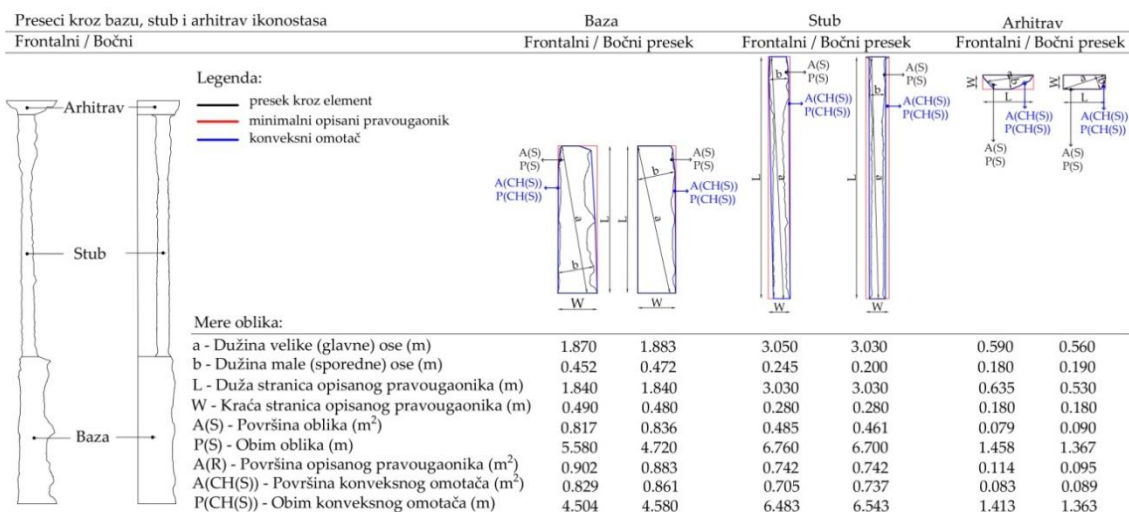
1. sprat - Ikonostas Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima



2. i 3. sprat ikonostasa



Slika 33. Studija slučaja 1: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike okvira ikona (Đurić et al., 2021).



Slika 34. Studija slučaja 1: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata (Đurić et al., 2021).

1. sprat - Ikonostas srpske pravoslavne crkve Svetih apostola Petra i Pavla u Sremskim Karlovcima

S - oblik ikone	S1	S2	S3	S4	S5
<p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> — oblik ikone — minimalni opisani pravougaonik — maksimalna upisana elipsa — konveksni omotač 					
Mere oblika:					
a - Dužina velike (glavne) ose (m)	0.786	0.913	0.873	0.852	1.159
b - Dužina male (sporedne) ose (m)	0.365	0.818	0.489	0.536	0.631
L - Duža stranica opisanog pravougaonika (m)	0.786	0.680	0.873	0.852	1.159
W - Kraća stranica opisanog pravougaonika (m)	0.365	0.605	0.489	0.536	0.631
A(S) - Površina oblika (m ²)	0.254	0.415	0.375	0.385	0.688
P(S) - Obim oblika (m)	1.978	2.560	2.318	2.294	3.312
A(R) - Površina opisanog pravougaonika (m ²)	0.287	0.415	0.427	0.456	0.731
A(Ell(S)) - Površina upisane elipse (m ²)	0.223	0.324	0.337	0.356	0.575
A(CH(S)) - Površina konveksnog omotača (m ²)	0.254	0.415	0.375	0.385	0.688
P(CH(S)) - Obim konveksnog omotača (m)	1.978	2.586	2.318	2.294	3.312

2. i 3. sprat ikonostasa

S - oblik ikone	S6	S7	S8	S9
<p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> — oblik ikone — minimalni opisani pravougaonik — maksimalna upisana elipsa — konveksni omotač 				
Mere oblika:				
a - Dužina velike (glavne) ose (m)	0.680	1.042	0.930	0.696
b - Dužina male (sporedne) ose (m)	0.633	0.946	0.763	0.452
L - Duža stranica opisanog pravougaonika (m)	0.667	0.940	0.841	0.696
W - Kraća stranica opisanog pravougaonika (m)	0.624	0.759	0.630	0.452
A(S) - Površina oblika (m ²)	0.346	0.629	0.491	0.266
P(S) - Obim oblika (m)	2.157	3.070	2.687	1.894
A(R) - Površina opisanog pravougaonika (m ²)	0.416	0.714	0.530	0.314
A(Ell(S)) - Površina upisane elipse (m ²)	0.289	0.533	0.420	0.248
A(CH(S)) - Površina konveksnog omotača (m ²)	0.348	0.648	0.491	0.266
P(CH(S)) - Obim konveksnog omotača (m)	2.134	3.066	2.687	1.894

Slika 35. Studija slučaja 2: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike okvira ikona (Đurić et al., 2021).

Preseci kroz bazu, stub i arhitrav ikonostasa	Baza		Stub		Arhitrav	
Frontalni / Bočni	Frontalni / Bočni presek	Frontalni / Bočni presek	Frontalni / Bočni presek	Frontalni / Bočni presek	Frontalni / Bočni presek	Frontalni / Bočni presek
<p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> — presek kroz element — minimalni opisani pravougaonik — konveksni omotač 						
Mere oblika:						
a - Dužina velike (glavne) ose (m)	1.140	1.213	1.812	1.810	0.410	0.505
b - Dužina male (sporedne) ose (m)	0.260	0.474	0.190	0.200	0.160	0.165
L - Duža stranica opisanog pravougaonika (m)	1.124	1.124	1.815	1.815	0.410	0.480
W - Kraća stranica opisanog pravougaonika (m)	0.280	0.487	0.220	0.235	0.160	0.160
A(S) - Površina oblika (m ²)	0.251	0.479	0.303	0.275	0.052	0.064
P(S) - Obim oblika (m)	2.920	3.152	4.250	4.348	0.960	1.216
A(R) - Površina opisanog pravougaonika (m ²)	0.315	0.548	0.399	0.426	0.066	0.077
A(CH(S)) - Površina konveksnog omotača (m ²)	0.308	0.509	0.368	0.388	0.054	0.068
P(CH(S)) - Obim konveksnog omotača (m)	2.737	3.128	4.036	4.046	0.920	1.198

Slika 36. Studija slučaja 2: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata (Đurić et al., 2021).

1. sprat - Ikonostas Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji

S - oblik ikone	S1	S2	S3	S4	S5
Legenda:					
Mere oblika:					
a - Dužina velike (glavne) ose (m)	0.760	0.440	0.970	0.328	1.058
b - Dužina male (sporedne) ose (m)	0.230	0.430	0.500	0.218	0.442
L - Duža stranica opisanog pravougaonika (m)	0.787	0.427	0.976	0.328	1.034
W - Kraća stranica opisanog pravougaonika (m)	0.273	0.383	0.517	0.218	0.435
A(S) - Površina oblika (m ²)	0.152	0.134	0.376	0.055	0.429
P(S) - Obim oblika (m)	2.176	1.440	3.109	1.055	2.822
A(R) - Površina opisanog pravougaonika (m ²)	0.192	0.164	0.505	0.072	0.450
A(Ell(S)) - Površina upisane elipse (m ²)	0.106	0.101	0.286	0.036	0.354
A(CH(S)) - Površina konveksnog omotača (m ²)	0.178	0.140	0.422	0.062	0.434
P(CH(S)) - Obim konveksnog omotača (m)	1.832	1.344	2.505	0.922	2.804

2. i 3. sprat ikonostasa

S - oblik ikone	S6	S7	S8	S9
Mere oblika:				
a - Dužina velike (glavne) ose (m)	0.338	1.500	0.636	0.480
b - Dužina male (sporedne) ose (m)	0.231	0.750	0.317	0.445
L - Duža stranica opisanog pravougaonika (m)	0.338	1.470	0.636	0.466
W - Kraća stranica opisanog pravougaonika (m)	0.231	0.744	0.317	0.429
A(S) - Površina oblika (m ²)	0.062	0.976	0.156	0.150
P(S) - Obim oblika (m)	1.096	4.225	1.630	1.624
A(R) - Površina opisanog pravougaonika (m ²)	0.078	1.094	0.202	0.199
A(Ell(S)) - Površina upisane elipse (m ²)	0.040	0.788	0.130	0.099
A(CH(S)) - Površina konveksnog omotača (m ²)	0.068	1.036	0.162	0.161
P(CH(S)) - Obim konveksnog omotača (m)	0.956	4.179	1.576	1.439

Slika 37. Studija slučaja 3: Grafički prikaz mera oblika i njihovih numeričkih vrednosti primenjenih na oblike okvira ikona (Đurić et al., 2021).

4.4.2. Primenjeni deskriptori oblika

Na osnovu prethodno opisanih mera, primenjeni su deskriptori oblika koji numerički opisuju posmatrane oblike okvira ikona i poprečnih i podužnih preseka glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa (baze, stuba i arhitrava). U ovom istraživanju, primenjeni su sledeći globalni deskriptori oblika: ekscentricitet (eng. *Eccentricity*), izduženost (eng. *Elongation*), kompaktnost (eng. *Compactness*), Konveksnost (eng. *Convexity*), čvrstoća (eng. *Solidity*), pravougaonost (eng. *Rectangularity*) i eliptičnost (eng. *Ellipticity*). Dati deskriptori opisuju u kojoj meri oblik ima neku osobinu, i koncipirani su tako da se numeričke vrednosti rezultata svode na normalizovane vrednost iz intervala [0,1]. Dati deskriptori su definisani na sledeći način:

Prva dva deskriptora oblika definisani su u odnosu na proporcije posmatranih oblika. Ekscentricitet $Ecc(S)$ je definisan kao odnos dužine male ose (b) prema dužini velike ose (a) oblika (Rosin, 2005; Wirth, 2004):

$$Ecc(S) = \frac{b}{a} \quad (8)$$

Rezultat datog deskriptora je normalizovana vrednost iz intervala [0,1], koja izražava meru ekscentriciteta datog oblika. Oblici niskog ekscentriciteta teže vrednosti 1, dok vrednosti manje od 1 označavaju veći ekscentricitet oblika (Wirth, 2004). U slučaju da je oblik krug ili kvadrat, vrednost $Ecc(S)=1$.

Izduženost $Elo(S)$ oblika je definisana preko odnosa kraće stranice (W) i duže stranice (L) minimalnog pravougaonika opisanog oko datog oblika:

$$Elo(S) = 1 - \frac{W}{L} \quad (9)$$

Dati deskriptor numerički opisuje u kojoj meri je posmatrani oblik izdužen. Što je vrednost deskriptora bliža nuli, dati oblik sličniji je krugu, dok što je vrednost veća od nule, oblik je izduženiji i sličniji pravouglu.

Kompaktnost $Cst(S)$ je deskriptor oblika koji opisuje stepen kompaktnosti oblika (Li et al., 2013). Vrednost $Cst(S)=1$ označava krug, kao objekat najkompaktnijeg oblika. Takođe se može definisati i kao mera glatкости konture oblika (Frejlichowski, 2010). Kompaktnost oblika definisana je na sledeći način (Rosin, 2005; Wirth, 2004):

$$Cst(S) = \frac{4\pi \times A(S)}{P(S)^2} \quad (10)$$

gde je $A(S)$ površina oblika, a $P(S)$ obim datog oblika.

Deskriptor konveksnosti $C(S)$ određuje u kojoj meri je oblik konveksan, odnosno u kojoj meri je kontura oblika „nepravilna ili hrapava“. Konveksnost se izražava kao odnos obima konveksnog omotača $P(CH(S))$ i obima oblika $P(S)$ (Wirth, 2004; Zunic & Rosin, 2004):

$$C(S) = \frac{P(CH(S))}{P(S)} \quad (11)$$

Za konveksne oblike vrednost deskriptora je jednaka 1.

Deskriptor čvrstoće oblika $S(S)$ predstavlja meru gustine oblika i definisan je kao količnik površine oblika $A(S)$ i površine konveksnog omotača datog oblika $A(CH(S))$ (Wirth, 2004):

$$S(S) = \frac{A(S)}{A(CH(S))} \quad (12)$$

Vrednost $S(S)=1$ označava oblik sa pravilnom konturom, dok vrednosti manje od jedan upućuju na oblik koji ima nepravilnu konturu ili sadrži rupe.

Pravougaonost oblika $R(S)$ je definisana na sledeći način:

$$R(S) = \frac{A(S)}{A(R)} \quad (13)$$

gde je $A(S)$ površina oblika, a $A(R)$ površina minimalnog opisanog pravougaonika oko datog oblika. Vrednost $R(S)=1$ označava idealno pravougaoni oblik.

Eliptičnost $Ell(S)$ predstavlja odnos maksimalne površine od svih upisanih elipsiu taj oblik $A(Ell(S))$ i površine posmatranog oblika $A(S)$, pri čemu vrednost $Ell(S)=1$ označava elipsu:

$$Ell(S) = \frac{A(Ell(S))}{A(S)} \quad (14)$$

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Rezultati primene prethodno opisanih deskriptora oblika na glavnim strukturnim elementima dva ikonostasa iz različitih umetničkih pokreta – Baroka i Klasicizma, prikazani su u vidu komparativne analize dobijenih numeričkih vrednosti. U cilju vizuelne simplifikacije i preglednosti tabela sa rezultatima, za prvu studiju slučaja ikonostasa nastalog u periodu Baroka korišćena je oznaka I1-B, dok je druga studija slučaja ikonostasa iz perioda Klasicizma označena sa I2 - K.

Tabela 4 prikazuje numeričke vrednosti izračunatih deskriptora oblika primenjenih na oblike okvira ikona dve studije slučaja ikonostasa koje karakterišu tipične oblikovne karakteristike stilskih pravaca Baroka i Klasicizma. Tabela 5 prikazuje rezultate komparativne analize vrednosti deskriptora primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa, koji obuhvataju frontalne i bočne preseke kroz bazu, stub i arhitrav ikonostasa iz oba umetnička pravca. U slučaju analize oblika glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa, deskriptor eliptičnosti nije uzet u obzir, s obzirom na to da karakteristike oblika koje opisuje nisu relevantne za analizu oblika datih elemenata. Dobijene numeričke vrednosti svih razmatranih deskriptora predstavljaju

normalizovane vrednosti iz intervala [0,1]. Verifikacija predložene metodologije za 2D analizu oblika izvršena je na trećoj studiji slučaja ikonostasa nastalog na prelaznom periodu dva stilska pravca (Poglavlje 5.1.).

Tabela 4: Komparativni prikaz rezultata deskriptora primenjenih na oblike okvira ikona ikonostasa iz Baroka (I1-B) i Klasicizma (I2-K) (Đurić et al., 2021)

Deskriptor	Ikonostas / Stil	Vrednosti deskriptora za oblike okvira ikona								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
<i>Ecc(S)</i>	I1 - B	0.45	0.67	0.53	0.72	0.41	0.42	0.56	0.53	0.79
	I2 - K	0.46	0.89	0.56	0.63	0.54	0.93	0.91	0.82	0.65
<i>Elo(S)</i>	I1 - B	0.49	0.31	0.44	0.34	0.59	0.59	0.42	0.47	0.22
	I2 - K	0.54	0.11	0.44	0.37	0.46	0.07	0.19	0.25	0.35
<i>Cst(S)</i>	I1 - B	0.59	0.48	0.45	0.24	0.52	0.45	0.38	0.37	0.64
	I2 - K	0.82	0.78	0.88	0.92	0.79	0.93	0.84	0.85	0.93
<i>C(S)</i>	I1 - B	0.88	0.80	0.76	0.58	0.88	0.85	0.70	0.70	0.84
	I2 - K	1	1	1	1	1	0.99	0.99	1	1
<i>S(S)</i>	I1 - B	0.92	0.90	0.92	0.90	0.98	0.91	0.96	0.96	0.94
	I2 - K	1	1	1	1	1	0.99	0.97	1	1
<i>R(S)</i>	I1 - B	0.76	0.79	0.74	0.84	0.93	0.87	0.88	0.93	0.75
	I2 - K	0.89	1	0.88	0.84	0.94	0.83	0.88	0.93	0.85
<i>Ell(S)</i>	I1 - B	0.72	0.76	0.68	0.66	0.81	0.79	0.81	0.77	0.77
	I2 - K	0.87	0.78	0.90	0.93	0.84	0.84	0.85	0.86	0.93

Tabela 5: Komparativni prikaz rezultata deskriptora primenjenih na oblike glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa iz Baroka (I1-B) i Klasicizma (I2-K)

Deskriptor	Ikonostas / Stil	Vrednosti deskriptora za oblike konstruktivnih elemenata					
		Baza		Stub		Arhitrav	
		Frontalni presek	Bočni presek	Frontalni presek	Bočni presek	Frontalni presek	Bočni presek
<i>Ecc(S)</i>	I1 - B	0.24	0.25	0.08	0.06	0.30	0.34
	I2 - K	0.22	0.39	0.11	0.11	0.39	0.32
<i>Elo(S)</i>	I1 - B	0.73	0.74	0.91	0.91	0.72	0.66
	I2 - K	0.75	0.57	0.88	0.87	0.61	0.67
<i>Cst(S)</i>	I1 - B	0.33	0.47	0.14	0.13	0.47	0.61
	I2 - K	0.37	0.54	0.21	0.18	0.71	0.54
<i>C(S)</i>	I1 - B	0.81	0.97	0.96	0.98	0.97	0.99
	I2 - K	0.94	0.94	0.95	0.93	0.96	0.98
<i>S(S)</i>	I1 - B	0.98	0.97	0.67	0.62	0.95	0.98
	I2 - K	0.82	0.94	0.82	0.71	0.96	0.94
<i>R(S)</i>	I1 - B	0.90	0.95	0.65	0.62	0.69	0.93
	I2 - K	0.79	0.87	0.76	0.65	0.79	0.83

Na osnovu analize kvantitativnih rezultata prikazanih u prethodne dve tabele, bilo je moguće utvrditi opseg varijacija vrednosti za svaki deskriptor u odnosu na razmatrani umetnički pravac. Na ovaj način izvršena je klasifikacija različitih elemenata ikonostasa, zasnovana na analizi numeričkih rezultata primenjenih deskriptora oblika.

Rezultati klasifikacije elemenata ikonostasa u odnosu na stilski pravac, prikazani su u Tabeli 6. Za svaki razmatrani element ikonostasa, utvrđen je opseg vrednosti određenog deskriptora oblika u odnosu na stilske pravce Baroka i Klasicizma. Takođe, u tabeli 6 je prikazana lista predloženih deskriptora i rasponi njihovih vrednosti za svaki od pojedinačnih elemenata ikonostasa. Lista predloženih deskriptora za analizu i klasifikaciju elemenata ikonostasa zasnovana je na analizi kvantitativnih rezultata proračunatih za svaki razmatrani element ikonostasa. U odnosu na to, u slučaju analize oblika okvira ikona, deskriptori ekscentricitet i izduženost su isključeni iz predložene klasifikacije, jer su pokazali značajne varijacije u dobijenim kvantitativnim vrednostima.

Tabela 6: Rezultati klasifikacije oblika svih analiziranih elemenata ikonostasa

Elementi ikonostasa	Deskriptori	Vrednosti klasifikacije	
		Barok	Klasicizam
Okviri ikona: S1-S9	Kompaktnost - $Cst(S)$	0.20-0.75	0.75-1.00
	Konveksnost - $C(S)$	0.50-0.95	0.95-1.00
	Čvrstoća - $S(S)$	0.85-1.00	0.95-1.00
	Pravougaonost - $R(S)$	0.70-0.95	0.80-1.00
	Eliptičnost - $Ell(S)$	0.60-0.85	0.75-0.95
Baza stuba (frontalni i bočni preseki)	Ekscentricitet - $Ecc(S)$	0.24-0.26	0.22-0.40
	Izduženost - $Ell(S)$	0.73-0.74	0.56-0.76
	Konveksnost - $C(S)$	0.80-0.97	0.93-0.95
	Kompaktnost - $Cst(S)$	0.32-0.48	0.37-0.55
	Čvrstoća - $S(S)$	0.97-0.99	0.81-0.95
Stub (frontalni i bočni preseki)	Pravougaonost - $R(S)$	0.90-0.95	0.79-0.88
	Ekscentricitet - $Ecc(S)$	0.06-0.08	0.10-0.11
	Izduženost - $Ell(S)$	0.90-0.91	0.87-0.89
	Kompaktnost - $Cst(S)$	0.12-0.14	0.18-0.22
	Konveksnost - $C(S)$	0.95-0.98	0.93-0.95
Baza stuba (frontalni i bočni preseki)	Čvrstoća - $S(S)$	0.62-0.67	0.70-0.83
	Pravougaonost - $R(S)$	0.62-0.66	0.64-0.76
	Ekscentricitet - $Ecc(S)$	0.20-0.45	
	Izduženost - $Ell(S)$	0.50-0.80	
	Kompaktnost - $Cst(S)$	0.30-0.60	
Stub (frontalni i bočni preseki)	Konveksnost - $C(S)$	0.75-1.00	
	Čvrstoća - $S(S)$	0.80-1.00	
	Pravougaonost - $R(S)$	0.75-1.00	
	Ekscentricitet - $Ecc(S)$	0.05-0.15	
	Izduženost - $Ell(S)$	0.85-0.95	
Arhitrav (frontalni i bočni preseki)	Kompaktnost - $Cst(S)$	0.10-0.25	
	Konveksnost - $C(S)$	0.90-1.00	
	Čvrstoća - $S(S)$	0.60-0.85	
	Pravougaonost - $R(S)$	0.60-0.80	
	Ekscentricitet - $Ecc(S)$	0.25-0.45	
Arhitrav (frontalni i bočni preseki)	Izduženost - $Ell(S)$	0.55-0.75	
	Kompaktnost - $Cst(S)$	0.45-0.75	
	Konveksnost - $C(S)$	0.90-1.00	
	Čvrstoća - $S(S)$	0.90-1.00	
	Pravougaonost - $R(S)$	0.65-0.95	

5.1. Verifikacija predložene metodologije i rezultata

U cilju verifikacije predložene metodologije i rezultata klasifikacije oblika kompleksne geometrije ikonostasa u odnosu na stilski pravac kojem pripada, prethodno opisani deskriptori oblika primenjeni su na treću studiju slučaja ikonostasa srpske pravoslavne crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji, koji je nastao na kraju umetničkog pravca Baroka (1788). U vizuelnom smislu, dekorativna ornamentika i struktura glavnih elemenata datog ikonostasa, posebno okvira ikona, odlikuje se nepravilnim formama, tipičnim za period Baroka. S druge strane, proporcije celokupne konstrukcije slične su proporcijama drugog razmatranog ikonostasa iz perioda Klasicizma. U cilju komparativne analize, deskriptori oblika primenjeni su na oblike okvira ikona koji su zajednički za sve tri studije slučaja. Rezultati klasifikacije deskriptora za svaki pojedinačni oblik okvira ikona, prikazani su u Tabeli 7.

Tabela 7: Studija slučaja 3 - rezultati klasifikacije oblika okvira ikona (Đurić et al., 2021)

Deskriptor	Oblici ikona								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
<i>Ecc(S)</i>	0.30	0.98	0.52	0.66	0.42	0.68	0.50	0.49	0.93
<i>Elo(S)</i>	0.65	0.10	0.47	0.33	0.56	0.32	0.49	0.44	0.08
<i>Cst(S)</i>	0.40	0.81	0.49	0.62	0.68	0.65	0.69	0.74	0.71
<i>C(S)</i>	0.84	0.93	0.81	0.87	0.99	0.87	0.99	0.97	0.88
<i>S(S)</i>	0.85	0.96	0.89	0.89	0.99	0.91	0.94	0.96	0.93
<i>R(S)</i>	0.79	0.82	0.74	0.76	0.95	0.79	0.89	0.77	0.75
<i>Ell(S)</i>	0.69	0.75	0.76	0.65	0.82	0.64	0.81	0.83	0.66

5.2. Diskusija rezultata

Na osnovu 2D analize oblika kompleksne geometrije digitalizovanih modela tri studije slučaja ikonostasa bilo je moguće izvesti utemeljene zaključke o stilskim karakteristikama ikonostasa na osnovu numeričkih deskriptora oblika. Kvantitativni rezultati deskriptora oblika, primenjenina okvire ikona, pokazali su jasne razlike u karakteristikama oblika ikona u odnosu na razmatrani stilski pravac.

Komparativna analiza dobijenih rezultata za prve dve studija slučaja ikonostasa iz Baroka i Klasicizma (Tabela 4), upućuje na to da sledeći deskriptori mogu biti uspešno primenjeni u zadacima klasifikacije ikona u odnosu na stilski pravac: kompaktnost, konveksnost i čvrstoća. Dobijene numeričke vrednosti za analizirane okvire ikona (S1-S9) ikonostasa iz perioda Klasicizma pokazuju kompaktnije ikonveksnije oblike, pravilnijih kontura, za razliku od istih ikona iz perioda Baroka koje karakterišu manje

kompaktni i konveksni oblici, nepravilnih kontura. U studiji slučaja ikonostasa iz perioda Klasicizma, od ukupno devet analiziranih oblika ikona, sedam je pokazalo apsolutnu konveksnost i čvrstoću oblika ($C(S)=1$; $S(S)=1$), dok su date vrednosti za iste ikone iz studije slučaja ikonostasa iz Baroka, bile manje od 1.

Rezultati deskriptora eliptičnosti oblika nisu pokazali značajne razlike u dobijenim numeričkim vrednostima, ali upućuju na to da svi oblici ikona iz perioda Klasicizma imaju veći stepen eliptičnosti oblika u poređenju sa istim ikonama iz perioda Baroka. S obzirom na to, može se reći da ikone iz Klasicizma više teže pravilnom eliptičnom obliku u odnosu na ikone iz perioda Baroka. Takođe, u studiji slučaja ikonostasa iz perioda Klasicizma, većina ikona pokazala je veći ili jednak stepen pravougaonosti u poređenju sa studijom slučaja ikonostasa iz Baroka. Prethodno opisani rezultati konzistentni su sa činjenicom da stilske karakteristike Klasicizma odražavaju sklonost pravilnim i ortogonalnim oblicima, za razliku od Baroka koji teži nepravilnosti oblika.

S druge strane, za primenjene deskriptore ekscentricitet i izduženost, rezultati su pokazali značajne oscilacije dobijenih vrednosti, bez jasnih pravilnosti koje bi mogle povezati određene oblike ikona sa stilskim pravcem. S obzirom na to da se deskriptor izduženosti zasniva na proporcijama datog oblika, dobijene oscilacije vrednosti deskriptora izduženosti konzistentne su sa očekivanim rezultatima. Dati rezultati podudaraju se sa činjenicom da dimenzije ikonostasa, a samim tim i ikona po spratovima ikonostasa, nisu zavisile od stilskog pravca kome pripada, već od visine i širine crkve u kojoj je smešten. Ipak, u slučaju deskriptora ekcentriciteta oblika, može se uočiti da veći broj ikona iz perioda Klasicizma teži pravilnosti oblika (kruga/kvadrata), odnosno pokazuje niži stepen ekscentriciteta u odnosu na ikone iz Baroka (osim S4 i S9 koje predstavljaju izuzetke). Važno je napomenuti da je na osnovu rezultata deskriptora ekscentriciteta, izduženosti i eliptičnosti, utvrđeno da nijedan oblik ikone, nezavisno od stilskog pravca, ne predstavlja u potpunosti pravilan oblik, kao što je krug, kvadrat ili elipsa.

Kada su u pitanju analizirani 2D preseki (frontalni i bočni) konstruktivnih elemenata koji obuhvataju bazu, stub i arhitrav ikonostasa, deskriptori oblika su pokazali drugačije karakteristike u poređenju sa prethodno opisanom klasifikacijom oblika ikona. Tabela 2 pokazuje da, iako su pojedini deskriptori pokazali određene razlike u vrednostima kada se primene na različite delove ikonostasa iz Baroka i Klasicizma, većina deskriptora nije dala jasnu klasifikaciju u smislu njihovih stilskih karakteristika. Uočeno je da je jedino u slučaju kompaktnosti oblika, vrednost rezultata konzistentna, upućujući na to da svaki od pojedinačnih konstruktivnih elemenata ikonostasa iz perioda Klasicizma, u veoma malom opsegu vrednosti, odlikuje kompaktniji oblik, odnosno veća glatkoća konture. Deskriptori ekscentricitet, izduženost, čvrstoća i pravougaonost

pokazali su mogućnost klasifikovanja baze i stuba ikonostasa (ali ne i arhitrava) prema stilskom pravcu.

Međutim, komparativna analiza rezultata svakog deskriptora ukazala je na to da se opseg vrednosti određenog deskriptora oblika može povezati sa tipovima konstruktivnih elemenata, nezavisno od stilskog pravca kojem pripada. Na primer, stubovi ikonostasa mogu se numerički opisati sledećim rasponima vrednosti koji su zajednički za oba preseka: ekscentricitet: 0,05-0,15; kompaktnost: 0,10-0,25; pravougaonost: 0,60-0,80; čvrstoća: 0,60-0,85; izduženost: 0,85-0,95; konveksnost: 0,90-1,00.

S obzirom na to, može se zaključiti da se analizirani deskriptori oblika mogu koristiti u klasifikaciji tipova konstruktivnih elemenata ikonostasa analizirajući jedan i/ili oba 2D preseka kroz dati element, nezavisno od stilskog pravca ikonostasa.

U odnosu na komparativne analize prethodno opisanih rezultata, izvršena je klasifikacija svih razmatranih elemenata ikonostasa u odnosu na stilski pravac ili tip elementa (Tabela 6). Tabela 6 prikazuje utvrđene raspone vrednosti za svaki deskriptor u odnosu na tip elementa ikonostasa ili pripadnost stilskom pravcu Baroka ili Klasicizma. Takođe, na ovaj način kreirana je lista predloženih deskriptora koji su se najbolje pokazali u zadacima klasifikacije datih elemenata ikonostasa.

Prema tome, za analizu i klasifikaciju oblika okvira ikona u zavisnosti od karakteristika umetničkog pravca kojem pripadaju, predloženi su sledeći deskriptori, kao i rasponi numeričkih vrednosti za svaki od njih: kompaktnost - $Cst(S)$; konveksnost - $C(S)$; čvrstoća - $S(S)$; pravougaonost - $R(S)$; eliptičnost - $Ell(S)$. Kao što je već prethodno napomenuto, deskriptori ekscentricitet i izduženost nisu odgovarajući za ovaj tip klasifikacije, s obzirom na to da opisuju proporcije oblika koje su zavisile od proporcija crkve u kojoj se ikonostas nalazi, a ne od stilskog pravca.

Kada je u pitanju određivanje pripadnosti glavnih konstruktivnih elemenata ikonostasa određenom stilskom pravcu, svi opisani deskriptori, primenjeni na 2D preseke datih elemenata, pojedinačno ili međusobno kombinovani, mogu se koristiti u klasifikaciji oblika baze i stuba ikonostasa. Nijedan deskriptor nije pokazao dovoljnu preciznost klasifikacije u slučaju arhitrava ikonostasa. Međutim, kao što se može videti iz Tabele 6, svi analizirani deskriptori, u određenim rasponima vrednosti, predloženi su kao pogodni za klasifikaciju svakog od pojedinačnih konstruktivnih elemenata, nezavisno od stilskog pravca.

Predloženi metod za klasifikaciju oblika ekstrahovanih iz kompleksne geometrije ikonostasa prema pravcu stilske pripadnosti ikonostasa, verifikovan je na oblicima okvira ikona iz treće studije slučaja ikonostasa nastalog u periodu sa kraja Baroka. U poređenju sa rezultatima deskriptora iz prve dve studije slučaja, dobijeni rezultati su u skladu sa

očekivanim. Kao što se može videti iz tabele 7, numeričke vrednosti primenjenih deskriptora težile su kvantitativnim rezultatima istih deskriptora dobijenih za oblike ikona tipičnog primera ikonostasa iz perioda Baroka. Za razliku od studije slučaja ikonostasa iz perioda Klasicizma, gde se većina oblika ikona odlikuje apsolutno konveksnim oblicima pravilnih kontura, u ovom slučaju, dobijeni rasponi vrednosti za deskriptore konveksnost i čvrstoću pokazuju veće tendencije ka studiji slučaja Baroknog ikonostasa. Niže vrednosti dobijene za deskriptor eliptičnosti oblika takođe ulaze u okvire vrednosti klasifikacije oblika ikona iz Baroknog pravca. Rasponi vrednosti za deskriptore ekscentriciteta i izduženosti približniji su vrednostima dobijenim u studiji slučaja ikonostasa iz Klasicizma, što je takođe očekivano, s obzirom na to da su ova dva ikonostasa približno istih dimenzija. Rezultati preostalih deskriptora pokazali su veći stepen varijacije vrednosti između prve dve studije slučaja, što se može povezati sa sličnošću proporcija sa ikonostasom iz Klasicizma, ali i sa prelaznim periodom nastanka ovog ikonostasa. Može se reći da osobine deskriptora u trećoj studiji slučaja koja je služila za verifikaciju rezultata, pretežno oslikavaju karakteristike oblika ikonostasa nastalog krajem Baroknog perioda.

6. ZAKLJUČAK

Istraživanje u okviru doktorske disertacije predstavlja rezultat dugogodišnjeg istraživačkog i praktičnog rada u oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa. Digitalizacija reprezentativnih primera ikonostasa na teritoriji Vojvodine ostvarena je u saradnji sa Galerijom Matice srpske iz Novog Sada kroz projekte digitalizacije i virtualne reprezentacije objekata kulturnog nasleđa u okviru izložbi umetničkih dela Galerije.

U okviru doktorske disertacije izvršena je analiza oblika kompleksne geometrije ikonostasa kreirane primenom fotogrametrijske 3D digitalizacije. U cilju određivanja jasnih relacija između karakteristika oblika i stilskog pravca ikonostasa, predložen je metod za klasifikaciju glavnih elemenata ikonostasa zasnovan na matematičkoj metodi deskripcije oblika. U svrhu realizacije datog cilja, primenjen je multidisciplinarni pristup koji obuhvata tehnologije i znanja iz oblasti računarske grafike i matematike.

Na osnovu pregleda i kritičke analize dostupne literature iz oblasti istraživanja, izdvojene su tehnologije za fotogrametrijsku 3D digitalizaciju kulturnog nasleđa, segmentaciju oblaka tačaka i analizu oblika, koju su primenjene u eksperimentalnom delu istraživačkog rada. Detaljnim uvidom u aktuelno stanje u oblasti, predstavljeni su osnovni problemi i pravci postojećih istraživanja, kao i primeri primene datih metoda i tehnologija u praksi. Na osnovu velikog broja analiziranih studija slučaja iz oblasti 3D digitalizacije kulturnog nasleđa, zaključeno je da fotogrametrijska 3D digitalizacija, tokom poslednjih godina ima sve veću primenu, kao relativno pristupačna metoda koja je

pokazala visoku tačnost 3D rekonstrukcije. Takođe, analizirane su metode upravljanja nestrukturiranim podacima kreiranim procesom 3D digitalizacije, pri čemu je zaključeno da metod segmentacije oblaka tačaka, iako se inicijalno koristi za klasifikaciju oblaka tačaka, može biti koristan za detektovanje kontura oblika kompleksne geometrije. Istraživanja iz oblasti analize oblika, pokazala su da deskriptori oblika mogu biti uspešno primenjeni u zadacima klasifikacije oblika. Data teorijska i prethodna eksperimentalna istraživanja doprinela su daljem razvoju koncepta koji je prikazan u okviru doktorske disertacije.

U okviru eksperimentalnog dela istraživanja predložen je metod za 2D analizu oblika kompleksne 3D geometrije kreirane fotogrametrijskom 3D digitalizacijom. Dati metod ilustrovan je na studijama slučaja tri reprezentativna ikonostasa, nastala na području nekadašnje Karlovačke mitropolije u periodu umetničkih pravaca Baroka i Klasicizma.

Postupak fotogrametrijske 3D digitalizacije ikonostasa detaljno je opisan u okviru rada. Na osnovu kreiranja jedinstvenog plana snimanja koji zadovoljava specifične uslove oblika i lokacije ikonostasa, kao i određivanjem uniformnih parametara 3D rekonstrukcije, postignuta je verna i detaljna 3D rekonstrukcija ikonostasa visoke preciznosti (GSD vrednosti od 1 mm do 2.7 mm prikazane u Tabeli 3). Na ovaj način, razvijena je strategija za fotogrametrijsku 3D digitalizaciju ikonostasa koja može biti primenjena i na druge primere ikonostasa. Visoka preciznost (GSD vrednost) kreiranih 3D modela, predstavlja rezultat detaljno osmišljenog plana fotogrametrijskog snimanja i 3D rekonstrukcije, što ukazuje na to da tačnost fotogrametrijske 3D digitalizacije zavisi od parametara snimanja i modelovanja.

U cilju detekcije kontura oblika i kreiranja preglednih 2D izgleda digitalizovanih 3D modela, predložen je metod zasnovan na segmentaciji oblaka tačaka. Osnovna ideja ovog dela istraživanja podrazumevala je razvoj automatskog postupka za ekstrakciju vizuelno razumljivih i preciznih 2D preseka kroz kompleksnu geometriju ikonostasa. U tu svrhu, predložen je poluautomatski metod segmentacije na osnovu geometrijskih karakteristika 3D oblaka tačaka, koji je omogućio detektovanje kontura glavnih strukturnih elemenata ikonostasa.

Dvodimenzionalna (CAD) vizuelizacija filtriranih oblaka tačaka, nastalih kao proizvod segmentacije oblaka tačaka, omogućila je identifikaciju oblika malih dimenzija i sitnih detalja koji se nisu mogli lako izdvojiti iz prvobitno fotogrametrijski generisanog 3D oblaka tačaka. Zbog metričkih karakteristika ovog tipa ortogonalnog prikaza kompleksne 3D geometrije, segmentovani oblaci tačaka glavnih elemenata ikonostasa korišćeni su u okviru CAD okruženja, u svrhu dalje analize oblika.

Na osnovu preciznih kontura oblika glavnih elemenata ikonostasa, bilo je moguće izvršiti 2D analizu oblika i izvesti utemeljene zaključke o stilskim karakteristikama ikonostasa. Analiza oblika realizovana je kroz dizajniranje odgovarajućih mera oblika i primenu deskriptora oblika. Deskriptori oblika primenjeni su na oblike okvira ikona prve dve studije slučaja ikonostasa nastalih u periodima Baroka i Klasicizma, u cilju klasifikacije oblika ikona iz različitih stilskih pravaca.

Numerički rezultati primenjenih 2D deskriptora pokazali su jasne razlike u glavnim karakteristikama oblika analiziranih stilskih pravaca. Komparativna analiza numeričkih rezultata deskriptora pokazala je da oblike ikona ikonostasa nastalog u periodu Klasicizmu odlikuju kompaktni i konveksni oblici sa pravilnim konturama, za razliku od istih ikona prisutnih na ikonostasima iz perioda Baroka, koje karakteriše većinski nepravilan oblik konture. Dati rezultati u skladu su sa stilskim karakteristikama posmatranih umetničkih pravaca, s obzirom na to da pravila oblikovanja u periodu Klasicizma oslikavaju pravilnost oblika, u poređenju sa Barokom gde je preovladavala tendencija ka nepravilnosti i asimetričnosti forme. S druge strane rezultati deskriptora koji se odnose na proporcije oblika, kao što su izduženost i ekscentricitet bili su u skladu sa očekivanim rezultatima, s obzirom na činjenicu da proporcije ikonostasa nisu zavisile od stilskog pravca, već od dimenzija crkve u kojoj se nalazi.

Efikasnost predloženog metoda za 2D analizu oblika i verodostojnost prethodno opisanih rezultata, potvrđeni su u trećoj studiji slučaja ikonostasa, koja je služila za verifikaciju metodologije i rezultata (Poglavlje 5.1.). Kvantitativni rezultati bili su u skladu sa vizuelnim karakteristikama oblika datog ikonostasa, koje teže karakteristikama ikonostasa iz perioda Baroka. Dobijeni rasponi numeričkih vrednosti potvrđili su da opisani deskriptori oblika pojedinačno ili kombinovanjem, mogu biti uspešno primenjeni za ovako definisan klasifikacioni zadatak.

Važno je napomenuti da su rezultati deskriptora ekscentricitet, izduženosti, eliptičnosti i pravougaonosti, ukazali na to da nijedan oblik ikone, nezavisno od stilskog pravca, ne predstavlja u potpunosti pravilan oblik, kao što je krug, kvadrat ili elipsa. Ovo potvrđuje činjenicu da ikonostase odlikuje izuzetno kompleksna geometrija, i da je veoma teško odrediti jasna pravila njihovog oblikovanja.

Kada je reč o analizi oblika 2D preseka (frontalnih i bočnih) konstruktivnih elemenata ikonostasa, koji obuhvataju bazu, stub i arhitrav, zaključeno je da se svi opisani deskriptori, sa većim ili manjim stepenom preciznosti, mogu koristiti u klasifikaciji oblika baze i stuba ikonostasa u odnosu na stilski pravac. Takođe, utvrđeno je da se precizno određeni rasponi numeričkih vrednosti za svaki deskriptor oblika, mogu koristiti u klasifikaciji tipova elemenata ikonostasa, uzimajući u obzir jedan i/ili oba 2D preseka kroz dati element, nezavisno od stilskog pravca ikonostasa.

Kao jedan od glavnih zaključaka, ističe se da je na osnovu komparativne analize primenjenih deskriptora bilo moguće realizovati klasifikaciju svih razmatranih elemenata ikonostasa u odnosu na stilski pravac ili tip elementa, kao i klasifikaciju deskriptora koji mogu da opišu određene karakteristike analiziranih oblika. Na ovaj način formiran je skup deskriptora oblika koji, pojedinačno ili međusobno kombinovani, mogu biti uspešno primenjeni u datim klasifikacionim zadacima.

Na osnovu prethodno navedenog, potvrđene su osnovne hipoteze doktorske disertacije:

H1: Primenom deskriptora oblika na 2D preseke karakterističnih elemenata objekta, ekstrahovanih iz fotogrametrijski digitalizovanih 3D modela, mogu se odrediti određene korelacije između karakteristika oblika kompleksne geometrije i stilskog pravca.

H2: Analizom kvantitativnih vrednosti primenjenih deskriptora oblika moguće je formirati skup deskriptora koji se mogu koristiti u zadacima analize, identifikacije i klasifikacije strukturnih elemenata digitalizovanih objekata kulturnog nasleđa.

6.1. Ograničenja i pravci budućih istraživanja

Rezultati istraživanja ukazali su na to da predložene metode i tehnologije mogu biti korisne za 2D analizu oblika kompleksne geometrije digitalizovanih objekata kulturnog nasleđa. Glavna ograničenja istraživanja, moguća poboljšanja i pravci budućih istraživanja ogledaju se u nekoliko aspekata koji su u nastavku opisani.

Predloženi postupak ekstrahovanja 2D preseka kroz 3D geometriju digitalizovanog objekta zasniva se na segmentaciji oblaka tačaka, što implicira da preciznost detekcije kontura oblika zavisi od kvaliteta i gustine oblaka tačaka. Zbog velikih dimenzija ikonostasa, kao i njegove kompleksne geometrije i materijalizacije, digitalizovani 3D modeli sadržali su veliki broj tačaka (oko 10 miliona), što je rezultiralo i velikim brojem suvišnih tačaka. Veliki broj tačaka komplikuje proces detekcije i ekstrakcije oblika malih razmera i izaziva nejasnoće pri identifikaciji sitnih detalja. S obzirom na to da ekstrahovani preseki kroz 3D objekat predstavljaju nove setove filtriranih oblaka tačaka, poboljšanje kvaliteta i čitljivosti ovog tipa 2D vizuelizacije, postiglo bi se uključivanjem naprednijih tehnika za optimizaciju oblaka tačaka, koje ne utiču na kvalitet rekonstruisanog 3D modela.

Takođe, oblak tačaka predstavlja relativno nepogodan format za 2D vizuelizaciju u okviru CAD okruženja. Za potrebe kreiranja jasnih tehničkih crteža, oblak tačaka bi trebalo konvertovati u vektorski format. U slučaju složene geometrije sa velikim brojem sitnih detalja, primenjene tehnike za konvertovanje rasterske slike (generisane na osnovu

digitalizovanog 3D modela) u vektorsku grafiku, rezultirale su skupom nepovezanih i isprepletenih linija. S obzirom na to, pravci budućih istraživanja na ovu temu odnose se na analizu i primenu tehnika i metoda za automatsku vektorizaciju kompleksne geometrije.

Kada je reč o primenjenoj metodologiji za 2D analizu oblika, fokus ovog istraživanja bio je na matematičkoj tehnici deskripcije oblika koja podrazumeva postupak numeričkog opisivanja određenih osobina oblika. Okvir istraživanja doktorske disertacije odnosi se na osnovne koncepte matematičkih deskriptora oblika primenjenih u zadacima klasifikacije kompleksne geometrije kreirane metodom fotogrametrijske 3D digitalizacije. Metod analize oblika primenjen je u okviru CAD radnog okruženja, bez uključivanja tehnika računarske obrade slike (eng. *image-processing*) koje se koriste u analizi oblika. U odnosu na to, pravci daljih istraživanja odnose se na automatizaciju procesa analize, identifikacije i klasifikacije oblika uz pomoć alata koji uključuju računarsku obradu slike i određene elementa mašinskog učenja za potrebe klasifikacije oblika. Takođe, buduća istraživanja na ovu temu imaju za cilj razmatranje i primenu potencijalnih 3D deskriptora za analizu oblika.

Važno je napomenuti da su zaključci o karakteristikama primenjenih deskriptora oblika i njihovoj uspešnosti u klasifikaciji oblika u odnosu na stilski pravac izvedeni na osnovu pojedinačnih studija slučaja ikonostasa iz dva reprezentativna stilska perioda. S obzirom na to, za utvrđivanje pouzdanijih rezultata bilo bi potrebno primeniti deskriptore oblika na veći broj primera.

7. NAUČNI DOPRINOS

Koristeći interdisciplinarni pristup koji koristi 2D deskriptore oblika u zadacima analize strukturnih elemenata kompleksne geometrije digitalizovanih 3D modela ikonostasa razvijen je metod za 2D vizuelizaciju i klasifikaciju oblika u odnosu na karakteristike stilskog pravca. Naučni doprinos doktorske disertacije ogleda se u numeričkom pristupu analizi oblikovnih karakteristika kulturnog nasleđa, za koje se, zbog prirode kompleksne geometrije ne mogu jasno odrediti pravila oblikovanja, niti pripadnost određenom stilskom pravcu. Rezultati istraživanja takođe doprinose proširenju teorijskih znanja, dopunjujući ih saznanjima o numeričkim karakteristikama oblika analiziranih stilskih pravaca.

Zbog sličnosti geometrijskih i dekorativnih karakteristika ikonostasa sa visoko ornamentalnim fasadama objekata kulturnog nasleđa, predloženi metod 3D digitalizacije, 2D vizuelizacije i analize oblika kulturnog nasleđa može se primeniti i na slučajeve ravnih arhitektonskih objekata nepokretnog kulturnog nasleđa, kao što su fasade objekata.

Takođe, na osnovu pažljivo osmišljenog plana fotogrametrijskog snimanja ikonostasa, koji je primenjen na tri studije slučaja ikonostasa različitih dimenzija, kreirana je strategija za fotogrametrijsku digitalizaciju koja se može primeniti i na druge ikonostase. S obzirom na to da su GSD vrednosti digitalizovanih 3D modela ikonostasa bile konzistentne sa inicijalno određenim vrednostima, utvrđeno je da preciznost fotogrametrijske 3D rekonstrukcije zavisi od plana snimanja.

Budući da se ikonostasi nalaze u crkvenim i manastirskim prostorima i da kao jedinstveni elementi monumentalnih enterijera treba da ostanu *in situ*, 3D digitalizacija predstavlja jedan od načina premošćavanja fizičkih distanci i diseminacije značajnog elementa crkvenog nasleđa. Digitalizovani ikonostasi nude brojne mogućnosti za dalju primenu u praksi. U kontekstu savremenih tehnologija, ovo je jedna od suštinskih primena 3D digitalizacije kulturnog nasleđa, koja doprinosi očuvanju kulturnog nasleđa i nacionalnog identiteta u procesu globalizacije.

Takođe, 3D digitalizacija omogućava analiziranje postojećeg stanja objekata, putem manipulacije sa virtuelnim 3D modelom, pri čemu ne dolazi do fizičkog kontakta sa posmatranim objektom kulturnog nasleđa. Arhiviranje tačnih podataka o realnom stanju ikonostasa značajno je za njihovo očuvanje za buduće generacije, ali i za potrebe konzervacije koja se oslanjaju na poštovanje saznanja o trenutnom stanju.

Značaj 3D digitalizacije kulturnog nasleđa ovog tipa, ogleda se i u zajedničkoj saradnji institucija kulture, crkve i naučno-obrazovne ustanove, što u velikoj meri podstiče interdisciplinarni pristup kako u razvoju digitalizacije, tako i u istraživanju, i efikasnijoj zaštiti i korišćenju kulturnog nasleđa.

LITERATURA

1. Aliberti, L., & Alonso-Rodríguez, M. Á. (2017). Geometrical Analysis of the Coffers of the Pantheon's Dome in Rome. *Nexus Network Journal*, 19(2), 363–382.
2. Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., & Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. *Remote Sensing*, 13(3), 486.
3. Barsanti, S. G., Remondino, F., & Visintini, D. (2013). 3D Surveying and Modelling of Archaeological Sites-some critical issues. *ISPRS photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 5, W1.
4. Bianconi, F., & Bello-Cerezo, R. (2018). Evaluation of visual descriptors for painting categorisation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012037>
5. Borisov, M., Petrović, V. M., & Vulić, M. (2014). Vizuelizacija 3D modela geopodataka i njihova primjena. *Geodetski Glasnik*, 48(45), 29–45.
6. Calvo-López, J., & Salcedo-Galera, M. (2017). Geometrical Proportion in the Sixteenth Century: Methods and Constraints. *Nexus Network Journal*, 19(1), 155–178.
7. Candelas-Gutierrez, A. (2017). The power of geometric relationships in mudéjar timber roof frames. *Nexus Network Journal*, 19(2), 521–545.
8. Ceccarelli, M., Cigola, M., & Recinto, G. (2017). *New Activities For Cultural Heritage: Proceedings of the International Conference Heritagebot 2017*. Springer.
9. CIPA. (2017). *Photogrammetric Capture The — 3 x 3 Rules*. https://www.cipaheritagedocumentation.org/wp-content/uploads/2017/02/CIPA__3x3_rules__20131018.pdf
10. Cipriani, L., Fantini, F., & Bertacchi, S. (2020). Composition and shape of Hadrianic domes. *Nexus Network Journal*, 22(4), 1041–1061.
11. Commission, E. (2017). *Mapping of Cultural Heritage actions in European Union policies, programmes and activities Latest update: August 2017. August*. https://www.open-heritage.eu/wp-content/uploads/2018/12/2014-heritage-mapping_en.pdf

12. Corso, J., Roca, J., & Buill, F. (2017). Geometric analysis on stone façades with terrestrial laser scanner technology. *Geosciences*, 7(4), 103.
13. Costa, L. D. F. D., & Cesar, R.M., J. (2000). *Shape Analysis and Classification: Theory and Practice* (1st ed.). CRC Press, Inc.: Boca Raton, FL, USA.
14. Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Jacquot, K., Piemonte, A., & Véron, P. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. *Remote Sensing*, 13(3), 461.
15. da Fontoura Costa, L., & Cesar Jr, R. M. (2010). *Shape analysis and classification: theory and practice*. CRC press.
16. Dhonju, H. K., Xiao, W., Sarhosis, V., Mills, J. P., Wilkinson, S., Wang, Z., Thapa, L., & Panday, U. S. (2017). Feasibility study of low-cost image-based heritage documentation in Nepal. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 237–242.
17. Djuric, I., Stojakovic, V., Misic, S., Kekeljevic, I., Vasiljevic, I., Obradovic, M., & Obradovic, R. (2019). *Church Heritage Multimedia Presentation-Case study of the iconostasis as the characteristic art and architectural element of the Christian Orthodox churches*.
18. Dražić, S. (2019). *Shape Based Methods for Quantification and Comparison of Object Properties from Their Digital Image Representations*. University of Novi Sad (Serbia).
19. Dražić, S., Ralević, N., & Žunić, J. (2010). Shape elongation from optimal encasing rectangles. *Computers & Mathematics with Applications*, 60(7), 2035–2042.
20. Đurić, I., Ilić, V., & Ralević, N. (2019). SHAPE DESCRIPTORS APPLIED TO THE ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF THE ENGINEERING ELEMENTS. *Journal of Production Engineering*, 22. <https://doi.org/http://doi.org/10.24867/JPE-2019-01-029>
21. Đurić, I., Ilić, V., & Ralević, N. (2018). Deskriptori oblika i njihova primena u analizi elemenata klasičnog arhitektonskog stila. *ETIKUM 2018*, 201–204.
22. Đuric, I., Vasiljevic, I., Obradovic, M., Stojakovic, V., Kicanovic, J., & Obradovic, R. (2021). *Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage*.

23. Đurić, I., & Letić, J. (2017). *Image-Based Modeling of Complex Geometric Forms in Restricted Surveying Conditions – A Case Study of the Coach of Metropolitan of Karlovci in the Museum of Vojvodina*. May 2016.
24. Đurić, I., Obradović, R., Vasiljević, I., Ralević, N., & Stojaković, V. (2021). Two-Dimensional Shape Analysis of Complex Geometry Based on Photogrammetric Models of Iconostases. *Applied Sciences*, 11(15), 7042.
25. Febro, J. D. (2020). 3D Documentation of Cultural Heritage Sites Using Drone and Photogrammetry: A Case Study of Philippine UNESCO-Recognized Baroque Churches. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 11(8), 1–14.
26. Felipe-García, B., Hernández-López, D., & Lerma, J. L. (2012). *Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys*. <https://doi.org/10.1007/s12518-012-0084-2>
27. Frejlichowski, D. (2010). An experimental comparison of seven shape descriptors in the general shape analysis problem. *International Conference Image Analysis and Recognition*, 294–305.
28. Fuhrmann, S., Langguth, F., & Goesele, M. (2014). MVE-A Multi-View Reconstruction Environment. *GCH*, 11–18.
29. Gagliolo, S., Ausonio, E., Federici, B., Ferrando, I., Passoni, D., & Sguerso, D. (2018). 3D cultural heritage documentation: A comparison between different photogrammetric software and their products. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 2.
30. Galantucci, R. A., & Fatiguso, F. (2019). Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis. *Journal of Cultural Heritage*, 36, 51–62. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.09.014>
31. Galantucci, R. A., Fatiguso, F., & Galantucci, L. M. (2018). A proposal for a new standard quantification of damages of cultural heritages, based on 3D scanning. *SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology*, 8(1), 121–138. <https://doi.org/10.2423/I22394303V8N1P121>
32. González, G., Samper, A., & Herrera, B. (2018). Classification by type of the arches in Gaudi's Palau Güell. *Nexus Network Journal*, 20(1), 173–186.
33. Grilli, E, Farella, E. M., Torresani, A., & Remondino, F. (2019). Geometric feature analysis for the classification of cultural heritage point clouds. *27th CIPA International Symposium —Documenting the Past for a Better Future*, 42, 541–548.

34. Grilli, E., Özdemir, E., & Remondino, F. (2019). APPLICATION OF MACHINE AND DEEP LEARNING STRATEGIES FOR THE CLASSIFICATION OF HERITAGE POINT CLOUDS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
35. Grilli, Eleonora, Menna, F., & Remondino, F. (2017). A review of point clouds segmentation and classification algorithms. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 339.
36. Grilli, Eleonora, & Remondino, F. (2019). Classification of 3D digital heritage. *Remote Sensing*, 11(7), 847.
37. Hackel, T., Wegner, J. D., & Schindler, K. (2016a). Fast semantic segmentation of 3D point clouds with strongly varying density. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 177–184.
38. Hackel, T., Wegner, J. D., & Schindler, K. (2016b). Contour detection in unstructured 3d point clouds. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1610–1618.
39. Hallert, B. (1960). *Photogrammetry, basic principles and general survey*.
40. Hanke, K., & Grussenmeyer, P. (2002). Architectural photogrammetry: Basic theory, procedures, tools. *ISPRS Commission*, 5, 1–2.
41. Hermon, S., & Niccolucci, F. (2002a). A fuzzy logic approach to typology in archaeological research. *The Digital Heritage of Archaeology: CAA*, 307–310.
42. Hermon, S., & Niccolucci, F. (2002b). Estimating subjectivity of typologists and typological classification with fuzzy logic. *Archeologia e Calcolatori*, 13, 217–232.
43. Historic England. (2017). Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. In *Guidance for Good Practice*. <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/>
44. Hohmann, B., Havemann, S., Krispel, U., & Fellner, D. (2010). A GML shape grammar for semantically enriched 3D building models. *Computers & Graphics*, 34(4), 322–334. <https://doi.org/10.1016/J.CAG.2010.05.007>
45. i Ginovart, J. L., López-Piquer, M., & Urbano-Lorente, J. (2018). Transfer of Mathematical Knowledge for Building Medieval Cathedrals. *Nexus Network Journal*, 20(1), 153–172.

46. Ilić, V. (2019). *Application of new shape descriptors and theory of uncertainty in image processing; Doktorska disertacija*. University of Novi Sad (Serbia).
47. Ilić, V., & Ralević, N. M. (2020). Hexagonality as a New Shape-Based Descriptor of Object. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 62, 1136–1158.
48. Ilić, V., & Ralević, N. M. (2021). Fuzzy squareness: A new approach for measuring a shape. *Information Sciences*, 545, 537–554.
49. Inglese, C., & Ippolito, A. (2018). *Analysis, conservation, and restoration of tangible and intangible cultural heritage*.
50. Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., & Chamzas, C. (2014). Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 73–79.
51. Kyriakaki, G., Doulamis, A., Doulamis, N., Ioannides, M., Makantasis, K., Protopapadakis, E., Hadjiprocopis, A., Wenzel, K., Fritsch, D., & Klein, M. (2014). 4D reconstruction of tangible cultural heritage objects from web-retrieved images. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(2), 431–451.
52. Leseck, M. (2000). *Umetnička baština u Sremu*. Srpska pravoslavna Eparhija Sremska; Republički zavod za zaštitu spomenika kulture; Izdavačko preduzeće Matice srpske, Novi Sad.
53. Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., & Ginsberg, J. (2000). The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 131–144.
54. Li, W., Goodchild, M. F., & Church, R. (2013). An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(6), 1227–1250.
55. Loncaric, S. (1998). A survey of shape analysis techniques. *Pattern Recognition*. [https://doi.org/10.1016/S0031-2023\(97\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0031-2023(97)00122-2)
56. Luhmann, T., Chizhova, M., & Gorkovchuk, D. (2020). Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia. *Drones*, 4(3), 53.
57. Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2017). From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors of existing buildings. *Applied Sciences*, 7(10), 1030.

58. Manjunath, B. S., Ohm, J. R., Vasudevan, V. V., & Yamada, A. (2001). Color and texture descriptors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. <https://doi.org/10.1109/76.927424>
59. Martinez-Ortiz, C. A. (2010). *2D and 3D shape descriptors*.
60. Massimiliano, P., Domenica, C., Alfio, V. S., Restuccia, A. G., & Papalino, N. M. (2021). Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*.
61. Mathys, A., Brecko, J., & Semal, P. (2014). Cost analyse of 3D digitisation techniques. *Digital Present. Preserve. Cult. Sci. Heritage*, 4, 206–212.
62. Matrone, F., Grilli, E., Martini, M., Paolanti, M., Pierdicca, R., & Remondino, F. (2020). Comparing machine and deep learning methods for large 3D heritage semantic segmentation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 535.
63. McCarthy, J. (2014). Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science*, 43, 175–185.
64. Melvani, N. (2015). *The Byzantine sanctuary barriers of Mount Athos. Templon and iconostasis*. 305–335.
65. Menna, F., Nocerino, E., Remondino, F., Dellepiane, M., Callieri, M., & Scopigno, R. (2016). 3D DIGITIZATION OF AN HERITAGE MASTERPIECE-A CRITICAL ANALYSIS ON QUALITY ASSESSMENT. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
66. Mišić, S. (2020). *Đura Jakšić* (T. P. Bugarski (Ed.); 1st ed.). Galerija Matice srpske.
67. Mohr, R., Quan, L., & Veillon, F. (1995). Relative 3D reconstruction using multiple uncalibrated images. *The International Journal of Robotics Research*, 14(6), 619–632.
68. Moons, T., Van Gool, L., & Vergauwen, M. (2009). *3D reconstruction from multiple images: principles*. Now Publishers Inc.
69. Murtiyoso, A., & Grussenmeyer, P. (2019). Point cloud segmentation and semantic annotation aided by GIS data for heritage complexes. *8th International Workshop 3D-ARCH" 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architecture"*, 42, 523–528.

70. Narodni Muzej u Beogradu. (1968). *Klasicizam kod Srba: Katalog crkvenog slikarstva i primenjene umetnosti (eng. Classicism of the Serbs: Catalog of Church Painting and Applied Arts)* (1st ed.). Prosveta, Beograd.
71. Neumann, K. J. (2004). Operational aspects of digital aerial mapping cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B1), 222–225.
72. Neumann, K. J. (2008). Trends for digital aerial mapping cameras. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Info. Sci.(ISPRS)*, 28, 551–554.
73. Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Photogrammetry applied to problematic artefacts. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 451.
74. Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 45.
75. Obradović, M., Vasiljević, I., Đurić, I., Kićanović, J., Stojaković, V., & Obradović, R. (2020). Virtual reality models based on photogrammetric surveys—A case study of the iconostasis of the serbian orthodox cathedral church of saint nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Applied Sciences*, 10(8), 2743.
76. Owda, A., Balsa-Barreiro, J., & Fritsch, D. (2018). Methodology for digital preservation of the cultural and patrimonial heritage: Generation of a 3D model of the Church St. Peter and Paul (Calw, Germany) by using laser scanning and digital photogrammetry. *Sensor Review*.
77. Özdemir, E., & Remondino, F. (2019). CLASSIFICATION OF AERIAL POINT CLOUDS WITH DEEP LEARNING. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
78. Özdemir, Emre, Remondino, F., & Golkar, A. (2021). An Efficient and General Framework for Aerial Point Cloud Classification in Urban Scenarios. *Remote Sensing*, 13(10), 1985.
79. Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., & Chamzas, C. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.007>
80. Pieraccini, M., Guidi, G., & Atzeni, C. (2001). 3D digitizing of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(01\)01108-6](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(01)01108-6)

81. Pierdicca, R., Paolanti, M., Matrone, F., Martini, M., Morbidoni, C., Malinverni, E. S., Frontoni, E., & Lingua, A. M. (2020). Point cloud semantic segmentation using a deep learning framework for cultural heritage. *Remote Sensing*, 12(6), 1005.
82. Rahaman, H., & Champion, E. (2019). To 3D or not 3D: choosing a photogrammetry workflow for cultural heritage groups. *Heritage*, 2(3), 1835–1851.
83. Rakićević, T. M. (2013). *The Altar Screen—Iconostasis in the Period from the 4th to the Middle of the 17th Century: Its Forms, Functions and Symbolism*. Faculty of Orthodox Theology, University of Belgrade, Belgrade, Serbia.
84. Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, 21(115), 269-291.
85. Rosin, P. L. (2003). Measuring shape: ellipticity, rectangularity, and triangularity. *Machine Vision and Applications*, 14(3), 172–184.
86. Rosin, P. L. (2005). Computing global shape measures. In *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision* (pp. 177–196). World Scientific.
87. Rosin, P. L., & Mumford, C. L. (2006). A symmetric convexity measure. *Computer Vision and Image Understanding*, 103(2), 101–111.
88. Rupnik, E., Daakir, M., & Deseilligny, M. P. (2017). MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(1), 1–9.
89. Sansoni, G., Trebeschi, M., & Docchio, F. (2009). State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s90100568>
90. Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites. *Journal of Archaeological Science*, 66, 137–145. <https://doi.org/10.1016/J.JAS.2016.01.002>
91. Scopigno, R., Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Ranzuglia, G. (2011). 3D models for cultural heritage: Beyond plain visualization. *Computer*. <https://doi.org/10.1109/MC.2011.196>
92. Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2014). *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning.

93. Soto-Martin, O., Fuentes-Porto, A., & Martin-Gutierrez, J. (2020). A digital reconstruction of a historical building and virtual reintegration of mural paintings to create an interactive and immersive experience in virtual reality. *Applied Sciences (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/app10020597>
94. Stathopoulou, E. K., & Remondino, F. (2019). Open-source image-based 3D reconstruction pipelines: Review, comparison and evaluation. *6th International Workshop LowCost 3D–Sensors, Algorithms, Applications*, 331–338.
95. Stojaković, V. (2018). *Modelovanje na osnovu slika* (1st ed.). Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
96. Stojaković, V., Obradović, R., Đurić, I., Vasiljević, I., Obradović, M., & Kićanović, J. (2021). *Razvoj strategije za standardizaciju kreiranja fotogrametrijskih 3D digitalnih objekata kulturnog nasleđa – faza I; Projekat Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije iz oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa u Republici Srbiji*.
97. Stojakovic, V., & Tepavcevic, B. (2011). Image-based modeling approach in creating 3D morphogenetic reconstruction of Liberty Square in Novi Sad. *Journal of Cultural Heritage*, 12(1), 105–110.
98. Stojmenović, M., & Žunić, J. (2008). Measuring elongation from shape boundary. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 30(1), 73–85.
99. Stojmenović, M., & Žunić, J. (2007). New measure for shape elongation. *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*, 572–579.
100. Tepavčević, B., & Stojaković, V. (2013). Procedural modeling in architecture based on statistical and fuzzy inference. *Automation in Construction*, 35, 329–337. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2013.05.015>
101. Timotijević, M. (2019). *Teodor Kracun* (1.). Galerija Matice srpske u Novom Sadu; Pokrajinski zavod za zaštitu spomenika kulture Vojvodine, Novi Sad.
102. Vitto, F. (2017). The Origin of the Iconostasis in Early Christian Churches in The Holy Land. *Actual Problems of Theory and History of Art: Collection of Articles*, 7, 222–231.
103. Waldhäusl, P., & Ogleby, C. L. (1994). 3 x 3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30, 426–429.

104. Weinmann, M., Jutzi, B., & Mallet, C. (2013). Feature relevance assessment for the semantic interpretation of 3D point cloud data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(W2), 1.
105. Weinmann, M., Weinmann, M., Mallet, C., & Brédif, M. (2017). A classification-segmentation framework for the detection of individual trees in dense MMS point cloud data acquired in urban areas. *Remote Sensing*, 9(3), 277.
106. Wirth, M. A. (University of G. (2004). Shape Analysis & Measurement Shape Analysis & Measurement. *Image Processing*, 1–49.
107. Wu, C. (2011). *VisualSFM: A visual structure from motion system*.
108. Xiang, T., & Cheong, L. (2003). Understanding the Behavior of SFM Algorithms: A Geometric Approach. In *International Journal of Computer Vision* (Vol. 51, Issue 2).
109. Zhang, D., & Lu, G. (2004). Review of shape representation and description techniques. *Pattern Recognition*. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.07.008>
110. Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501.
111. Žunic, J. (2012). *Shape descriptors for image analysis*. *Zbornik Radova* (No. 23). <http://elib.mi.sanu.ac.rs/files/journals/zr/23/zunic2.pdf>
112. Zunic, J., & Rosin, P. L. (2004). A new convexity measure for polygons. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(7), 923–934. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2004.19>

INTERNET IZVORI

113. *3DFlow*. (2021). Dostupno na: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-free/>. [Pristupljeno 09.08.2021.]
114. *ACMSIGGRAPH*. (2021). Dostupno na: <https://www.siggraph.org/>. [Pristupljeno 06.09.2021.]
115. *Agisoft*. (2021). Dostupno na: <https://www.agisoft.com/>. [Pristupljeno 14.06.2021.]

116. *AliceVision*. (2021). Dostupno na: <https://alicevision.org/>.
[Pristupljeno 14.06.2021.]
117. *Autodesk*. (2021a). Dostupno na:
<https://www.autodesk.com/products/recap/overview>. [Pristupljeno 09.08.2021.]
118. *Autodesk*. (2021b). Dostupno na:
<https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>. [Pristupljeno 09.08.2021.]
119. *Bentley*. (2021). Dostupno na:
<https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>.
[Pristupljeno 14.06.2021.]
120. *CapturingReality*. (2021). Dostupno na: <https://www.capturingreality.com/>.
[Pristupljeno 14.06.2021.]
121. *CIPA Heritage Documentation*. (2021). Dostupno na:
<https://www.cipaheritagedocumentation.org/>. [Pristupljeno 06.09.2021.]
122. *CloudCompare*. (2021). Dostupno na: <https://www.cloudcompare.org/>.
[Pristupljeno 09.08.2021.]
123. *Colmap*. (2021). Dostupno na: <https://colmap.github.io/>.
[Pristupljeno 14.06.2021.]
124. *Europeana*. (2021). Dostupno na: *Europeana*. <https://www.europeana.eu/en>.
[Pristupljeno 09.08.2021.]
125. *Galerija Matice srpske*. (2021). Dostupno na:
<https://www.galerijamaticesrpske.rs/>. [Pristupljeno 06.09.2021.]
126. *MeshLab*. (2021). Dostupno na: <https://www.meshlab.net/>.
[Pristupljeno 09.08.2021.]
127. *MicMac*. (2021). Dostupno na: <https://micmac.insg.eu/index.php/Accueil>.
[Pristupljeno 14.06.2021.]
128. *Multi-View Environment*. (2021). Dostupno na: <https://www.gcc.tu-darmstadt.de/home/proj/mve/>. [Pristupljeno 14.06.2021.]
129. *Nexus Network Journal*. (2021). Dostupno na: <https://www.nexusjournal.com/>.
[Pristupljeno 06.09.2021.]
130. *openMVG*. (2021). Dostupno na: <https://github.com/openMVG/openMVG>.
[Pristupljeno 14.06.2021.]

131. *Pokrajinski zavod za zaštitu spomenika kulture Vojvodine.* (2021). Dostupno na: <http://eng.pzzzsk.rs/>. [Pristupljeno 06.09.2021.]
132. *Regard3D.* (2021). Dostupno na: <https://www.regard3d.org/>. [Pristupljeno 14.06.2021.]
133. *Saborna crkva Sremski Karlovci.* (2021). Dostupno na: <https://www.sabornacrkvarems.rs/>. [Pristupljeno 08.09.2021.]
134. The Frame Blog. (2021). *An introduction to Greek Orthodox iconostases.* Dostupno na: <https://theframeblog.com/2014/11/12/an-introduction-to-greek-orthodox-iconostases/>. [Pristupljeno 09.08.2021.]
135. *VisualSFM.* (2021). Dostupno na: <http://ccwu.me/vsfm/>. [Pristupljeno 09.08.2021.]

PRILOZI - PRIKAZ PRAKTIČNE PRIMENE DIGITALIZOVANIH IKONOSTASA

Primeri dosadašnje praktične primene fotogrametrijski digitalizovanih 3D modela ikonostasa prikazani su u nastavku.

1. Aplikacija proširene realnosti

Proširena realnost (eng. *Augmented Reality* - AR) predstavlja sistem u kojem su virtuelni objekti u realnom vremenu integrisani u stvarno trodimenzionalno okruženje. Najpoznatija i opšte prihvaćena definicija u literaturi proizašla je 1997. godine iz naučnog rada autora Ronalda Azuma¹¹ koji sumira koncept tehnologije proširene realnosti definišući ga kao sistem koji zadovoljava tri ključne karakteristike:

1. Kombinuje realno i virtuelno (dopunjuje realno okruženje virtuelnim objektom);
2. Interaktivan je u realnom vremenu (omogućava manipulaciju virtuelnim sadržajem);
3. Omogućava 3D registraciju (podrazumeva da je korisniku omogućeno da se kreće dok virtuelni objekat ostaje na fiksiranom mestu).

Tri ključne tehnologije neophodne za razvoj sistema proširene realnosti predstavljaju¹² (Van Krevelen & Poelman, 2010):

1. D displej za AR prikaz koji omogućava kombinovanje realnog okruženje sa virtuelnim;
2. Praćenje koje koristi senzore za praćenje pozicije i orijentacije korisnika, odnosno displeja, kako bi registrovao i prikazao virtuelni sadržaj u okviru realnog fizičkog koordinatnog sistema korisnika;
3. Registracija koja omogućava usklađivanje virtuelnog sadržaja sa korisnikovom percepcijom o realnom okruženju. AR registracija podrazumeva stepen integracije 3D sadržaja sa realnim okruženjem. U odnosu na to, praćenje predstavlja sredstvo za postizanje registracije.

¹¹ Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

¹² Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality*. <https://doi.org/10.20870/ijvr.2010.9.2.2767>

U poređenju sa starijim AR ekranima koji su se zasnivali na displejima montiranim na glavi (*head-mounted display - HMD*), napredak u tehnologijama pametnih mobilnih uređaja doveo je do razvoja takozvane MAR (eng. *mobile augmented reality*) tehnologije, odnosno integrisanih platformi za kreiranje aplikacija proširene realnosti za ručne prenosive uređaje¹³. Prva aplikacija proširene realnosti u kulturnom nasleđu predstavljala je personalizovanu turu kroz arheološko nalazište – *ARCHEOGUIDE*^{14, 15}, koja omogućava korisnicima vizuelizaciju ruiniranih spomenika iz prošlosti. Posetioци arheološkog nalazišta morali su da nose ranac sa prenosivim računarom koji je služio kao server, i uređaj montiran na glavi za prikaz digitalnog sadržaja u okviru realnog okruženja.

Danas, sa razvojem tehnologija procesora, kamere i senzora za praćenje i orijentaciju dovoljno malih dimenzija i naprednih tehničkih specifikacija da kroz kameru omoguće prikaz 3D sadržaja, pametni telefoni i tablet uređaji predstavljaju najdostupnije i najprikladnije hardvere za prezentacije kulturnog nasleđa u proširenoj realnosti. Razvoj MAR tehnologije omogućio je kreiranje AR aplikacija za *Android* i *IOS* operativne sisteme koje kroz kameru uređaja u realnom vremenu kombinuju stvarno fizičko okruženje sa virtuelnim sadržajem. Na ovaj način AR aplikacije su postale dostupne širokom spektru korisnika, od kulturnih institucija do njihovih posetioца.

Glavni cilj aplikacija proširene realnosti u kulturnom nasleđu jeste da omoguće diseminaciju, bolje razumevanje i nova saznanja o objektima kulturnog nasleđa, kao i vizuelizaciju objekata kulturnog nasleđa iz prošlosti koji više ne postoje.

Aplikacija proširene realnosti za vizuelizaciju digitalizovanog 3D modela ikonostasa Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji kreirana je 2018. godine za potrebe izložbe Galerije Matice srpske - "Đura Jakšić. Između mita i stvarnosti"¹⁶. Cilj aplikacije proširene realnosti ikonostasa bio je da se korisnicima

¹³ Panou, C., Ragia, L., Dimelli, D., & Mania, K. (2018). An architecture for mobile outdoors augmented reality for cultural heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. <https://doi.org/10.3390/ijgi7120463>

¹⁴ Vlahakis, V., Ioannidis, N., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Stricker, D., Gleue, T., Daehne, P., & Almeida, L. (2002). Archeoguide: An augmented reality guide for archaeolog sites. In *IEEE Computer Graphics and Applications*. <https://doi.org/10.1109/MCG.2002.1028726>

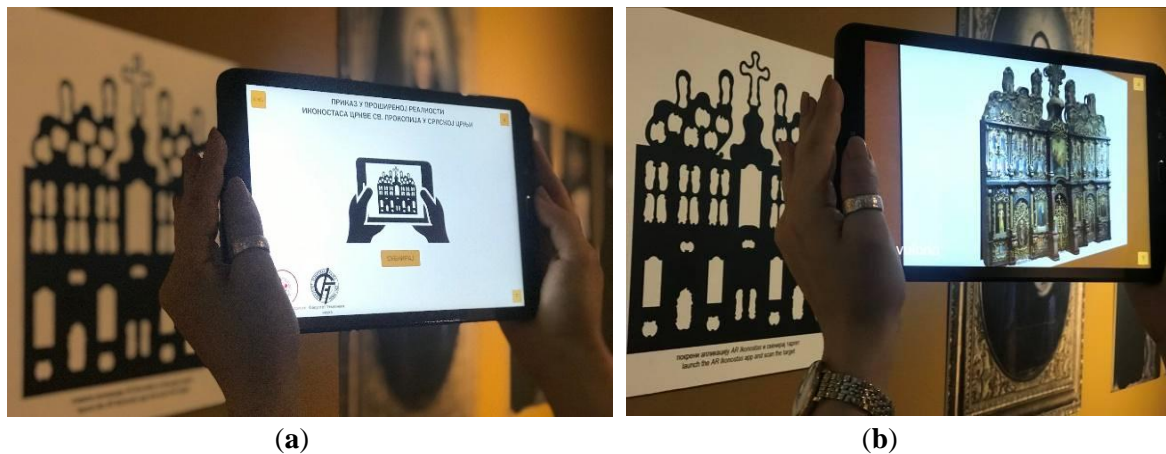
¹⁵ Vlahakis, V., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Almeida, L., Stricker, D., Gleue, T., Christou, I. T., Carlucci, R., & Ioannidis, N. (2001). ARCHEOGUIDE: First Results of an Augmented Reality, Mobile Computing System in Cultural Heritage Sites. *Proceedings VAST 2001 Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage*.

¹⁶ Djuric, I., Stojakovic, V., Mistic, S., Kekeljevic, I., Vasiljevic, I., Obradovic, M., & Obradovic, R. (2019). *Church Heritage Multimedia Presentation-Case study of the iconostasis as the characteristic art and architectural element of the Christian Orthodox churches*.

omogućiti vizuelizaciju ikonostasa izvan fizičkog prostora crkve i na način koji nije moguć u okviru realnog enterijera. Ovo podrazumeva sagledavanje ikonostasa iz različitih perspektiva, i sa različitih distanci, kao i ravnopravno sagledavanje, kako niskih tako i visokih delova ikonostasa.

Aplikacija je razvijena uz pomoć softvera za razvoj igara - *Unity*¹⁷ i *Vuforia*¹⁸ biblioteke za praćenje, koja omogućava preklapanje virtuelnog sadržaja i stvarnog okruženja, odnosno razvoj AR aplikacija za mobilne uređaje. *Vuforia* predstavlja SDK (eng. *software development kit*) integrisan u *Unity* radno okruženje, zasnovan na tehnologijama kompjuterske vizije za prepoznavanje i praćenje 2D slika i 3D objekata u realnom vremenu.

S obzirom na to da se u AR aplikaciji 3D model renderuje interaktivno u realnom vremenu, u cilju funkcionalnog prikazivanja 3D modela korišćen je prethodno optimizovani fotogrametrijski rekonstruisan 3D model ikonostasa. Registracija digitalizovanog 3D modela u okviru realnog prostora izložbe realizovana je uz pomoć prethodno kreiranog targeta u vidu shematskog prikaza ikonostasa, a koji predstavlja jedno od sredstava za registraciju i praćenje. Vizuelizacija 3D modela u okviru realnog prostora Galerije je omogućena uz pomoć kamere tablet uređaja (Slike 38 i 39). Interakcija i navigacija između stranica u okviru AR aplikacije postignute su kroz kreiranje odgovarajućih skripti uz pomoć programskog jezika C# koji je podržan u okviru *Unity* radnog okruženja.



Slika 38. AR aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji u okviru izložbe Galerije Matice srpske: (a) prikaz početne stranice aplikacije; (b) prikaz 3D modela ikonostasa u proširenoj realnosti¹⁶.

¹⁷ *Unity*. (2021). Dostupno na: <https://unity.com/>

¹⁸ *Vuforia engine*. (2021). Dostupno na: <https://developer.vuforia.com/>



Slika 39. AR aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji u okviru izložbe Galerije Matice srpske.

2. Multimedijalna prezentacija

Multimedijalna prezentacija podrazumeva objedinjavanje različitih medija kao što su 2D slike, tekst, 3D modeli, animacije i ostali vizuelni i audio sadržaji, relevantnih za opis određenog digitalnog sadržaja. Prema mnogim autorima, jedan od najboljih načina da se digitalno kulturno nasleđe približi publici jeste kroz “pričanje priče” (eng. *storytelling*), što se najbolje postiže kroz integraciju više različitih medija¹⁹. Druga ključna stavka jeste interakcija. Mogućnost interakcije sa digitalnim sadržajem u velikoj meri utiče na pozitivna iskustva različitih tipova korisnika.

Multimedijalna veb (eng. *web*) prezentacija za vizuelizaciju digitalizovanog 3D modela ikonostasa Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji kreirana je, takođe, 2018. godine za potrebe izložbe Galerije Matice srpske - "Đura Jakšić. Između mita i stvarnosti"^{16,20,21,22,23}.

¹⁹ Paolini, P., & Di Blas, N. (2014). Storytelling for cultural heritage. In *Innovative technologies in urban mapping* (pp. 33–45). Springer.

²⁰ Obradović, R., Stojaković, V., Đurić, I., Vasiljević, I., Kekeljević, I., & Obradović, M. (2019). *3D Digitalization and AR Presentation of the Iconostasis of the Church of St. Procopius the Great Martyr in Srpska Crnja*. In *Exhibition Catalogue Đura Jakšić. Between Myth and Reality*. <https://doi.org/ISBN978-8-80706-27-6>

Multimedijalna prezentacija kreirana je u cilju detaljnog prikaza ikonostasa, kao i pojedinačnih ikona u okviru izložbe. Osnovna ideja ovog tipa prezentacije bila je da korisnicima omogući interakciju sa digitalnom reprezentacijom ikonostasa koja pruža dodatne informacije, poput detaljnije vizuelizacije pojedinačnih ikona sa pratećim tekstualnim podacima o naslovu dela, autoru, periodu nastanka i ključnim karakteristikama umetničkog dela. Aplikacija se zasniva na tehnologiji za razvoj veb interfejsa i omogućava interakciju putem osnovnih opcija, kao što su klik i zum (eng. *click and zoom*). Zbog prirode geometrijskih karakteristika ikonostasa koje odlikuje pretežno ravna forma, za vizuelizaciju je, umesto 3D modela, korišćen 2D ortofoto generisan na osnovu digitalizovanih 3D modela. Pored ortofoto slike celog ikonostasa (Slika 40a), prezentacija je obuhvatala fotografije pojedinačnih ikona visoke rezoulocije sa pratećim tekstualnim informacijama o delu (Slika 40b).



Slika 40. Multimedijalna web aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa crkve Crkve Svetog Velikomučenika Prokopija u Srpskoj Crnji u okviru izložbe Galerije Matice srpske: **(a)** Ortofoto prikaz ikonostasa; **(b)** Slika pojedinačne ikone sa pratećim tekstualnim informacijama¹⁶.

²¹ *Računarska grafika*. (2018). Dostupno na: <http://racunarska-grafika.com/karlovci/>

²² *Računarska grafika*. (2019a). Dostupno na: <http://racunarska-grafika.com/mitrovica/>

²³ *Računarska grafika*. (2019b). Dostupno na: <http://www.racunarska-grafika.com/srpska-crnja/http://www.racunarska-grafika.com/srpska-crnja/>

3. Aplikacija virtuelne realnosti

Za razliku od proširene realnosti, virtuelna realnost (eng. *Virtual Reality - VR*) potpuno zamenjuje realno okruženje virtuelnim. Kako bi omogućila potpuno stapanje korisnika sa kompjuterski generisanim okruženjem, VR tehnologija koristi optičke HMD uređaje, kao što su posebni tipovi naočara (*Oculus Rift, HTC Vive i Playstation VR*). U odnosu na tip HMD ekrana, moguće je kreirati dve verzije VR sistema: desktop i mobilnu verziju. Desktop VR koristi HMD uređaj povezan sa kompjuterom, dok je najjednostavniji primer mobilne verzije VR-a *Google Cardbord* – jednostavno kućište od kartona sa dva sočiva i mestom za telefon koji prikazuje dva stereografska prikaza. VR tehnologija bazira se na stereoskopskim slikama, kod kojih se trodimenzionalna struktura sagledava korišćenjem binokularnog vida, odnosno sagledavanjem dve dvodimenzionalne slike istovremeno, radi stvaranja dubinske percepcije trodimenzionalnog prostora. Počeci ove tehnologije se mogu povezati sa istraživanjima Ivana Saterlenda (*Ivan Sutherland*) i razvojem prvog HMD uređaja²⁴.

U poslednjoj deceniji, virtuelna realnost je pronašla široku primenu u oblasti kulturnog nasleđa. Veliki broj studija slučaja bazira se na primeni fotogrametrije i virtuelne realnosti u cilju 3D rekonstrukcije, očuvanja i virtuelne reprezentacije kulturnog nasleđa. Jedan od popularnih načina dokumentacije i diseminacije kulturnog nasleđa takođe predstavljaju virtuelni muzeji (eng. *Virtual Museum -VM*)^{25,26,27}. Prema najvećem broju istraživanja, za razvoj VR aplikacija koriste se softveri za razvoj igara, od kojih su najpopularniji *Unity* i *Unreal Engine*²⁸.

²⁴ Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, 757–764.

²⁵ Aiello, D., Fai, S., & Santagati, C. (2019). VIRTUAL MUSEUMS AS A MEANS for PROMOTION and ENHANCEMENT of CULTURAL HERITAGE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-33-2019>

²⁶ Anastasovitis, E., & Roumeliotis, M. (2018). Virtual Museum for the Antikythera Mechanism: Designing an Immersive Cultural Exhibition. *Adjunct Proceedings - 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2018*. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00092>

²⁷ Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., & Deggim, S. (2017). Development of a virtual museum including a 4D presentation of building history in virtual reality. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017>

²⁸ *Unreal Engine*. (2021). Dostupno na: <https://www.unrealengine.com/en-US/>

Aplikacija virtuelne realnosti za prikaz ikonostasa u Sabornoj crkvi Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima razvijena je 2020. godine za potrebe naučnog istraživanja²⁹. Virtuelno okruženje za vizuelizaciju ikonostasa u VR-u kreirano je u okviru *Unreal Engine 4*, dok su vizuelizacija, kretanje i interakcija sa 3D modelom omogućene uz korišćenje *Oculus Rift* HMD displeja i ručnih kontrolera. Virtuelno okruženje sastoji se od optimizovanog 3D modela fotogrametrijski rekonstruisanog ikonostasa, galerije 2D slika pojedinačnih ikona i tekstualnih informacija o njihovim karakteristikama, kao i dodatnog svetla na sceni (Slika 41).

Interakcija sa 3D modelom omogućena je kroz opcije teleporta i kretanja po nivoima u cilju sagledavanja visokih delova ikonostasa i njegovih pojedinačnih ikona. Date opcije su kreirane putem specifičnog koncepta skriptovanja u *Unreal Engine* softveru, zasnovanog na povezivanja čvorova (eng. *Blueprint Visual Scripting system*). Cilj VR aplikacije za vizuelizaciju ikonostasa predstavljao je realistično sagledavanje ikonostasa kroz različite nivoe detaljnosti, na način koji u realnom enterijeru crkve nije moguć.



Slika 41. VR aplikacija za vizuelizaciju ikonostasa Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima: (a) Navigacija kroz 3D scenu putem kontrolera; (b) Slika pojedinačne ikone sa pratećim tekstualnim informacijama²⁹.

²⁹ Obradović, M., Vasiljević, I., Đurić, I., Kićanović, J., Stojaković, V., & Obradović, R. (2020). Virtual reality models based on photogrammetric surveys—A case study of the iconostasis of the serbian orthodox cathedral church of saint nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Applied Sciences*, 10(8), 2743.

BIOGRAFIJA AUTORA

Isidora Đurić, master inženjer arhitekture, rođena je 27.12.1990. godine u Zrenjaninu. Gimnaziju "Svetozar Marković" u Novom Sadu, završila je 2009. godine, kada upisuje Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, smer Arhitektura i urbanizam. Godine 2013. završava osnovne akademske studije, a 2014. master akademske studije na modulu Savremene teorije i tehnologije u arhitekturi.



Odmah potom (2014. godine) upisuje doktorske akademske studije na smeru Računarska grafika – Animacija u inženjerstvu, na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. Kao student doktorskih akademskih studija, bila je stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja od 2014. do 2018. godine. Od 2014. godine, bila je uključena u naučnoistraživački projekat Ministarstva (OI 174009).

Od 2018. godine počinje sa angažovanjem na Katedri za animaciju u inženjerstvu (Računarsku grafiku) na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, kao istraživač pripravnik u okviru naučnoistraživačkog projekta Ministarstva, dok od 2019. godine stiče zvanje asistenta i aktivno je uključena u nastavu.

Kao deo tima učestvuje u projektima iz oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa i saradnji sa kulturnim institucijama. Bila je član projektnog tima sa Fakulteta tehničkih nauka iz oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa u Republici Srbiji, podržanog od strane Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije za 2020. godinu (naziv projekta: „Razvoj strategije za standardizaciju kreiranja fotogrametrijskih 3D digitalnih objekata kulturnog nasleđa – faza I“).

Učestvovala je u 3D digitalizaciji i razvoju aplikacija za virtuelnu reprezentaciju kulturnog nasleđa za nekoliko izložbi organizovanih od strane Galerije Matice srpske, Narodnog Muzeja u Beogradu i Muzeja Vojvodine u Novom Sadu. Aktivni je učesnik aktuelnih projekata 3D digitalizacije i virtuelne prezentacije odabranih dela Galerije Matice srpske i Galerije Terra u Kikindi. Član je Srpskog udruženja za geometriju i grafiku (SUGIG).

Objavila je tri rada na SCI listi i dva rada u časopisima od nacionalnog i međunarodnog značaja. Objavila je i izlagala radove na više nacionalnih i međunarodnih konferencija.

Kontakt adresa: isidoradjuric@uns.ac.rs

BIBLIOGRAFIJA NAUČNIH I STRUČNIH RADOVA

Rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M22)

1. **Đurić, I.**, Obradović, R., Vasiljević, I., Ralević, N., & Stojaković, V. (2021). Two-Dimensional Shape Analysis of Complex Geometry Based on Photogrammetric Models of Iconostases. *Applied Sciences*, 11(15), p.7042. <https://doi.org/10.3390/app11157042>
2. Vasiljević, I., Obradović, R., **Đurić, I.**, Popkonstantinović, B., Budak, I., Kulić, L. and Milojević, Z., 2021. Copyright Protection of 3D Digitized Artistic Sculptures by Adding Unique Local Inconspicuous Errors by Sculptors. *Applied Sciences*, 11(16), p.7481. <https://doi.org/10.3390/app11167481>
3. Obradović, M.; Vasiljević, I.; **Đurić, I.**; Kićanović, J.; Stojaković, V.; Obradović, R. (2020). Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys—A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Applied Sciences* 2020, 10, p.2743. <https://doi.org/10.3390/app10082743>

Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom (M24)

4. **Đurić I.**, Obradović R., Viana V., Krstanović L., Banjac B., Letić J., Ralević N.(2019). Algorithm for Image-Based Architectural Element Recognition. *FME Transactions*, Vol. 47, No. 2, pp. 287-292, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, ISSN: 1451-2092 [doi:10.5937/fmet1902287D](https://doi.org/10.5937/fmet1902287D)

Rad u časopisu nacionalnog značaja (M52)

5. **Đurić I.**, Ilić V., Ralević N. (2019). Shape Descriptors Applied to the Analysis of Different Types of the Engineering Elements. *Journal of Production Engineering*, Vol. 22, No.1, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad. <http://doi.org/10.24867/JPE-2019-01-029>

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)

6. **Đurić I.**, Vasiljević I., Obradović M., Stojaković V., Kićanović, J., Obradović R. (2021). Comparative analysis of open-source and commercial photogrammetry software for cultural heritage. In: *eCAADe 2021 International Scientific Conference*, Novi Sad, Serbia, Septembar 8-10.
7. Vasiljević I., Obradović R., **Đurić I.**, Santoši Ž., Obradović M., Budak I. (2020). ACQUISITION OF PHOTOGRAPHS FOR PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION OF SCULPTURE IN DIFFERENT LIGHTING CONDITIONS – INDOOR AND OUTDOOR PHOTOGRAPHY. In: *The 7th International Conference on Geometry and Graphics Mongeometrija 2020*. September 2020. pp. 395-404. ISBN 978-86-6060-046-4
8. **Đurić I.**, Stojaković V., Mišić S., Kekeljević I., Vasiljević I., Obradović M., Obradović R. (2019). Church heritage multimedia presentation: Case study of the iconostasis as the characteristic art and architectural element of the Christian Orthodox churches. In: *eCAADe / SIGraDi 2019 International Scientific Conference*, Porto, Portugal.
9. **Đurić I.**, Obradović R., Viana V., Krstanović L., Letić J., Banjac B., Ralević N. (2018). Algorithm for shape recognition of Gothic window. In: *6th International Conference – moNGeometrija 2018*, Novi Sad, June 7-9.
10. **Đurić I.**, Obradović, R., Ralević, N. (2017). A Review of Augmented Reality for Architectural and Cultural Heritage Visualization. In: *Aproged's IV International Conference Geometrias 2017, Thinking, Drawing, Modelling*, Coimbra, Portugal, pp. 84-88. June 16-18.
11. Letić, J., **Đurić I.** (2016). Automatic Photogrammetric Approach for 3D Reconstruction of Complex Geometric Forms. In: *The 5th International Scientific Conference on Geometry and Graphics – moNGeometrija 2016*, Belgrade, Serbia, pp. 87-95. June 23-26.
12. **Đurić I.**, Letić, J. (2016). Image-based Modeling of Complex Geometric Forms in Restricted Surveying Conditions – a Case Study of the Coach of Metropolitan of Karlovci in the Museum of Vojvodina. In: *4th eCAADe International Regional Workshop: Between Computational Models and Performative Capacities*, Novi Sad, Serbia, pp. 62-74. May 19-20.

Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini (M63)

13. Đurić I., Ilić V., Ralević N., (2018). Deskriptori oblika i njihova primena u analizi elemenata klasičnog arhitektonskog stila. In: *International Scientific Conference – ETIKUM 2018*, Novi Sad, December 2018.

Javno izvođenje umetničkog dela u reprezentativnom izvođačkom ili prikazivačkom prostoru od nacionalnog značaja (DU-52)

14. Obradović R., Stojaković V., Đurić I., Vasiljević I., Kekeljević I., Obradović M., (2019). 3D digitalization and AR presentation of the iconostasis of the Church of St. Procopius the Great Martyr in Srpska Crnja. In: The exhibition catalogue *Đura Jakšić. Between Myth and Reality*. ISBN: 978-8-80706-27-6
15. Obradović R., Stojaković V., Đurić I., Vasiljević I., Kekeljević I., Obradović M., (2020). Multimedijalna prezentacija digitalizovanih ikonostasa crkve Svetog arhidakona Stefana u Sremskoj Mitrovici i ikonostasa Saborne crkve Svetog Nikole u Sremskim Karlovcima, izložba „Kračun“, Galerija Matice srpske u Novom Sadu

Tehnički izveštaj

16. Stojaković, V., Obradović, R., Đurić, I., Vasiljević, I., Obradović, M., & Kićanović, J. (2021). *Razvoj strategije za standardizaciju kreiranja fotogrametrijskih 3D digitalnih objekata kulturnog nasleđa – faza I; Projekat Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije iz oblasti digitalizacije kulturnog nasleđa u Republici Srbiji.*

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Анализа облика комплексне 3Д геометрије креиране фотограметријском 3Д дигитализацијом на примеру иконостаса
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду б) Саборна црква Светог Николе у Сремским Карловцима в) Црква Светих апостола Петра и Павла у Сремским Карловцима г) Црква Светог Великомученика Прокопија у Српској Црњи
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Рачунарска графика - Анимација у инжењерству.
1. Опис података
<i>1.1 Врста студије</i> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација
<i>1.2 Врсте података</i> а) <u>квантитативни</u> б) <u>квалитативни</u>
<i>1.3. Начин прикупљања података</i> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____

д) узорци ткива: навести врсту _____

ђ) снимци, фотографије: навести врсту **Дигиталне фотографије креиране фотограметријском методом за прикупљање просторних података о објектима**

е) текст, навести врсту _____

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати **Рачунарски експерименти**

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека _____

г) Текстфајл, датотека _____

д) JPG фајл, датотека **.jpg, .raw, .png**

е) Остало, датотека **.psx, .obj, .mtl, .bin, .dwg, .dxf**

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **256 фотографија креираних фотограметријском методом 3Д дигитализације**

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) **не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак између поновљених мера је _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на _____

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

Фотограметријска метода 3Д дигитализације

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип Рачунарски експерименти

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип Анализа доступне литературе

д) остало, навести шта Фотограметријско теренско снимање објеката и софтверско процесирање података

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

ДСЛР фотоапарат марке NIKON D7000 (број пиксела: 4928 × 3275; величина пиксела: 4.78 μm; величина сензора: 23.6 × 15.6 мм; жижна даљина: 18–109 мм).

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан поређењем дигитализованих 3Д модела са реалним објектима, софтверским увођењем контролних тачака и измерених димензија објекта. У складу са препорукама из литературе, мерена су одступања дигитализованог 3Д модела од реалног објекта.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података је изведена на основу експертног знања.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у *Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду*.

3.1.2. URL адреса <https://www.cris.uns.ac.rs/theses.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- a) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2. Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен?

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- а) **јавно доступни**
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство - некомерцијално

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Исидора Ђурић, isidoradjuric@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Исидора Ђурић, isidoradjuric@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Исидора Ђурић, isidoradjuric@uns.ac.rs