



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ – ШТИП

ФАКУЛТЕТ ЗА ПРИРОДНИ И ТЕХНИЧКИ НАУКИ

Катедра за геологија и геофизика

М-р Игор Т. Ивановски

**ИНТЕГРИРАНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА АНАЛИЗА НА ГЕОЛОШКИ
СТРУКТУРИ И ПРОЦЕСИ СО ПРИМЕНА НА СОВРЕМЕНИ
ТЕХНОЛОГИИ**

-ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА-

Штип, јануари 2025

Комисија за оценка и одбрана:

- Интерен ментор:** д-р Гоше Петров, редовен професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип
- Екстерен ментор:** д-р Милорад Јовановски, редовен професор
Градежен факултет
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје
- Член:** д-р Виолета Стојанова, редовен професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип
- Член:** д-р Ѓорѓи Димов, вонреден професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип
- Член:** д-р Милош Марјановиќ, вонреден професор
Рударско-геолошки факултет
Универзитет во Белград - Белград

Членови на комисија за оценка и одбрана:

- Претседател:** д-р Ѓорѓи Димов, вонреден професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип
- Член:** д-р Гоше Петров, редовен професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип
- Член:** д-р Милорад Јовановски, редовен професор
Градежен факултет
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје
- Член:** д-р Виолета Стојанова, редовен професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип
- Член:** д-р Милош Марјановиќ, вонреден професор
Рударско-геолошки факултет
Универзитет во Белград - Белград

Научно поле: Применета геологија и геофизика

Научна област: Регионална геологија

Датум на одбрана: _____
Датум на промоција: _____

БЛАГОДАРНОСТ

Патот до докторската титула не е само академска обврска – тоа е и патување на себепознавање, истрајност и верба. Во текот на овие години имав среќа да бидам опкружен со луѓе кои веруваа во мене, кои ми даваа поддршка и кои, со својата посветеност и искреност, придонесоа овој труд да стане реалност. Оваа дисертација е резултат на заеднички напор, охрабрување и несебична поддршка што ја добив од многумина – професори, колеги и пријатели – на кои со длабока благодарност им го посветувам овој воведен дел.

Изразувам најискрена благодарност до мојот интерен ментор, проф. д-р Гоше Петров, за неговата континуирана поддршка, насока и трпение во текот на целото истражување. Неговото водство, смиреноста, како и посветеноста на научната мисла беа од суштинско значење за успешно комплетирање на оваа докторска дисертација.

Голема благодарност упатувам и до мојот екстерен ментор, проф. д-р Милорад Јовановски, за неговите вредни совети, насоки и поддршка, кои во голема мера придонесоа за квалитетот на овој труд. Неговото искуство, експертиза и ентузијазам оставија силен печат врз мојот истражувачки пристап.

Со посебна топлина се обраќам до моето семејство:

На моите родители, Трајче и Вера – ви благодарам што ми го подаривте животот, но уште повеќе што својот го посветивте на мене.

На моите Весна, Марко, Бојан и Лина – ви благодарам што му дадовте смисла на мојот живот, безгранична перспектива и постојана инспирација. Ви благодарам што со љубов ме прифаќавте дури и кога не бев највнимателен сопруг или најстрплив татко.

Овој докторски труд го посветувам на Весна – мојата вистинска сила и сигурно прибежиште. Ти благодарам што низ сите фази на ова патување даде многу повеќе од мене. Тивко се откажа од свои соништа за да можам јас да ги следам моите, и имаше многу повеќе разбирање и љубов отколку што некогаш заслужив.

Рецензирани и објавени трудови произлезени од истражувањето:

Ivanovski, I., Nedelkovska, N., Petrov, G., Jovanovski, M., & Nikolovski, T. (2023). COMPARISON BETWEEN TRADITIONAL AND CONTEMPORARY METHODS FOR DATA RECORDING IN STRUCTURAL GEOLOGY. *Geologica Macedonica*, 37(2), 119-133. <https://doi.org/10.46763/GEOL23372119i>.

Ivanovski, I., Nedelkovska, N., Peševski, I., Petrov, G., Jovanovski, M., & Nikolovski, T. (2024). APPLICATION OF 3D POINT CLOUD DATA FOR CUT SLOPE MONITORING. *Geologica Macedonica*, 38(1), 15-30. Retrieved from <https://doi.org/10.46763/GEOL24381015i>.

Ivanovski I, Nedelkovska N, Petrov G., Jovanovski M, Nikolovski T., Peshevski I, (2024). DETECTION AND MONITORING OF SLOPE MOVEMENT BY USING POINT CLOUD DERIVED FROM THE SfM TECHNIQUE. *Proceedings of the 6th Regional Symposium on landslides in the Adriatic-Balkan Region, ReSyLAB2024, Belgrade, Serbia 15-18th May 2024. 127-132* <https://doi.org/10.18485/resylab.2024.6.ch16>.

Ivanovski I, Maksimov B., Petrov G., Dimov G., Jovanovski M., Nedelkovska N., (2024) USING THE iPhone AS A TOOL IN STRUCTURAL GEOLOGY. *Proceedings of the 5th Congress of the Geologist of the Republic of North Macedonia, Ohrid 2024 285-292.*

ИНТЕГРИРАНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА АНАЛИЗА НА ГЕОЛОШКИ СТРУКТУРИ И ПРОЦЕСИ СО ПРИМЕНА НА СОВРЕМЕНИ ТЕХНОЛОГИИ

Краток извадок

Во оваа дисертација фокусот е ставен на добивање податоци во структурната геологија со употреба на современ пристап преку две различни верификации на методологии потесно поврзани со употребата на 3D-облаци од точки.

Станува општ тренд 3D-моделирањето да биде доминантен начин за анализа во различни области на науката и инженерството, при што корисниците можат да соберат повеќе податоци со висока точност за пократко време од другите методи на мерење. Технологиите кои обезбедуваат 3D-податоци, како што се терестријалните ласерски скенери (TLS), често се скапи, што ги поттикнува корисниците да бараат подостапни алтернативи, истовремено постигнувајќи ја посакуваната точност. Копненото ласерско скенирање (TLS) и техниката „структура од движење“ (SfM), обезбедуваат 3D облаци од точки што овозможуваат геометриска анализа. Научната заедница ги тестира овие две техники уште од почетокот на 2000-тите години, додека компаниите постепено ги интегрираат во своите работни процеси.

Во овој контекст, во дисертацијата се посветува внимание на две методологии за добивање и анализа на податоци. Првата методологија се однесува на собирање структурни податоци од терен, со употреба на паметниот телефон како релативно евтина алатка која ја имплементира технологијата LiDAR. Втората методологија во функција става и други современи методи и техники (SfM), во насока на детекција и мониторинг на геолошки особености. При тоа е направена сеопфатна анализа и споредби на резултатите на мерењата кај поголем број случаи.

Практичната верификација на предложената методологија на работа е извршена преку анализа на снимки од четири различни локалитети, три од нив (Милутинци, Фариш, Серта) во рамките на првата методологија на работа, и уште еден локалитет (Усек 4 кај експресниот пат Длабочица - Чатал), во рамките на втората методологија презентирани во овој докторат.

Прва апроксимација при собирање на податоците во дисертацијата е извршена со примена на апликации преку мобилните телефони, кои стануваат сè погодни за 3D-моделирање, при што најновите верзии iPhone Pro и iPad Pro нудат интегриран сензор LiDAR. Со употреба на iPhone, се извршени снимања на три различни локации во три различни геолошки средини. 3D-облаците од точки добиени со тие снимања се обработени со различни софтвери и аналитички методи, како и со полуавтоматски софтвер за извлекување сетови на рамнини и пресметка на елементи на пад на издвоените рамнини. Добиените резултати од мерењата направени со употреба на 3D облаци од точки покажуваат висока согласност кога се споредуваат со мерењата со геолошки компас.

Втората верификација на применетата методологија се однесува на примена на современи технологии за детекција и мониторинг на одредени структурно-геолошки особености, со имплементирање на SfM-технологијата преку употреба на беспилотно летало - дрон. Анализирани се четири различни комплекти на 3D-облаци од точки од четири различни мерења, спроведени во подолг временски период, каде со оваа методологија се овозможува ефикасно временско следење на деформации на еден современ начин. Со употреба на соодветен софтвер, направени се и дополнителни геометриски карактеристики кои овозможуваат полесна визуелизација на промените во теренот.

Со синтеза на резултатите, формирани се голем број оригинални регресиони зависности меѓу анализираните параметри, кои за првпат се прикажани кај нас во оваа форма. Со ова особено се потенцира и значењето на методологијата за практиката.

Се цени дека добиените сознанија при подготовка на дисертацијата, може да послужат како модел за дефинирање на процедурите за детекција и мониторинг и кај други објекти од тип на патишта и рудници, и да се користат како редовна техника за вакви цели. Со ова се создаваат услови и за натамошна разработка на методологијата во идни научни анализи.

Клучни зборови: DSE, CloudCompare, FACETS, виртуелен компас,

INTEGRATED METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF GEOLOGICAL STRUCTURES AND PROCESSES USING CONTEMPORARY TECHNOLOGIES

Abstract

In this dissertation, the focus is placed on obtaining data in structural geology through a contemporary approach involving two distinct verifications of methodologies closely related to the use of 3D point clouds.

3D modeling has become a dominant trend for analysis in various fields of science and engineering, enabling users to collect more accurate data in less time compared to other measurement methods. Technologies that provide 3D data, such as terrestrial laser scanners (TLS), are often expensive, encouraging users to seek more affordable alternatives while maintaining the desired accuracy. Terrestrial laser scanning (TLS) and the Structure-from-Motion (SfM) technique both provide 3D point clouds that allow geometric analysis. Since the early 2000s, the scientific community has tested these two techniques, while companies have gradually integrated them into their workflows.

In this context, the dissertation focuses on two methodologies for data acquisition and analysis. The first methodology involves collecting structural data from the field using a smartphone as a relatively low-cost tool that implements LiDAR technology. The second methodology employs other modern methods and techniques (SfM) for the detection and monitoring of geological features. A comprehensive analysis and comparison of measurement results were conducted across several cases.

The practical verification of the proposed methodology was carried out through the analysis of recordings from four different locations. Three of these (Milutinci, Farish, Serta) are within the scope of the first methodology, while the fourth location (Cut 4 at the Express Road Dlabochica-Chatal) falls under the second methodology presented in this dissertation.

The initial approximation for data collection in the dissertation was carried out using mobile phones, which are becoming increasingly suitable for 3D modeling. The latest versions of iPhone Pro and iPad Pro offer integrated LiDAR sensors. Using an iPhone, recordings were conducted at three different locations in three distinct

geological environments. The 3D point clouds obtained from these recordings were processed with various software tools and analytical methods, including semi-automatic software for extracting plane sets and calculating the dip and dip direction elements of identified planes. The results of measurements conducted using 3D point clouds showed high agreement when compared with measurements obtained using a geological compass.

The second verification of the applied methodology relates to the use of modern technologies for the detection and monitoring of specific structural-geological features using SfM technology with drones in photogrammetry. Four different sets of 3D point clouds from four separate measurements conducted over an extended period were analyzed. This methodology enables efficient temporal monitoring of deformations in a modern manner. Additional geometric characteristics were generated using appropriate software to facilitate the visualization of terrain changes.

Through the synthesis of results, numerous original regression relationships between the analyzed parameters were formed and presented for the first time in this format in our region. This highlights the practical significance of the methodology.

The findings obtained during the preparation of the dissertation can serve as a model for defining procedures for the detection and monitoring of other objects such as roads and mines, and can be used as a standard technique for such purposes. This also lays the groundwork for further development of the methodology in future scientific analyses.

Key words: DSE, CloudCompare, FACETS, virtual compass

СОДРЖИНА

1. ВОВЕД	1
2. ПРЕГЛЕД НА КОРИСТЕНИ ЛИТЕРАТУРНИ ИЗВОРИ ОД ПРЕТХОДНИ ИСТРАЖУВАЊА	4
3. ДЕФИНИРАЊЕ НА ТЕМАТА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	13
3.1. Актуелност на темата	13
3.2. Основни принципи на методологијата за собирање структурни податоци	17
3.3. Основни принципи на методологијата за детекција и мониторинг на структурно геолошки карактеристики.	27
4. МЕТОДИ НА ИСТРАЖУВАЧКАТА РАБОТА	30
4.1. Традиционални методи за анализа на структурни карактеристики	30
4.2. Современи методи за анализа на структурните карактеристики	32
4.2.1. Користени технологии	32
4.2.1.1. LiDAR	32
4.2.1.2. SfM (Structure from Motion)	35
4.2.2. Користен хардвер	38
4.2.3. Користен софтвер	40
4.2.3.1. 3D Scanner App	41
4.2.3.2. Pix4D	44
4.2.3.3. CloudCompare	46
4.2.3.4. DSE	48
4.2.3.5. FACETS	53
5. ГЕОЛОШКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ИСТРАЖУВАНИОТ ТЕРЕН	56
5.1. Геолошки карактеристики на локалитетот Милутинци	56
5.2. Геолошки карактеристики на локалитетот Фариш	59
5.3. Геолошки карактеристики на локалитетот Серта	61
5.4. Геолошки карактеристики на усек 4 кај експресен пат Длабочица - Чатал	64
5.4.1. Детално инженерско-геолошко картирање	66
5.4.2. Инженерско-геолошка класификација	68
5.4.3. Хидрогеолошки карактеристики	69
5.4.4. Современи инженерско-геолошки процеси и појави	70
5.4.5. Геотехнички карактеристики на теренот	72
6. ВЕРИФИКАЦИЈА НА МЕТОДОЛОГИЈАТА ЗА СОБИРАЊЕ СТРУКТУРНИ ПОДАТОЦИ	74
6.1. Основи за верификација на методологијата за собирање структурни податоци	74
6.2. Применета методологија за собирање структурни податоци за локалитетот Милутинци – изданок во микашисти	77
6.2.1. Локалитет Милутинци – добиени резултати	81

6.2.1.1.	Обработка на податоците добиени од снимање со дрон	81
6.2.1.2.	Обработка на податоците добиени од снимање со телефон.....	83
6.2.1.3.	Споредба помеѓу снимањата добиени со LiDAR и SfM	86
6.2.2.	Приказ на мерењата направени со геолошки компас и виртуелен компас	88
6.2.3.	Анализа на добиените резултати.....	89
6.2.3.1.	Анализа на добиените отстапувања	90
6.2.3.2.	Статистичка анализа.....	93
6.2.3.3.	Регресиона анализа.....	94
6.2.3.4.	Анализи на групи на мерења	96
6.2.3.5.	Графикон Bland-Altman	97
6.2.3.6.	Стереограм.....	100
6.2.4.	Полуавтоматски методи за анализа на добиените резултати	101
6.2.4.1.	DSE (Discontinuity Set Extractor)	101
6.2.4.2.	FACETS.....	113
6.2.5.	Изведени заклучоци за локалитетот Милутинци	125
6.3.	Применета методологија за собирање структурни податоци за локалитетот Фариш – изданок во плочести и банковити варовници.....	127
6.3.1.	Локалитет Фариш - добиени резултати.....	130
6.3.1.1.	Обработка на податоците добиени од снимање со телефон.....	130
6.3.2.	Приказ на мерењата направени со геолошки компас и виртуелен компас	131
6.3.3.	Анализа на добиените резултати.....	132
6.3.3.1.	Анализа на добиените отстапувања	132
6.3.3.2.	Статистичка анализа.....	134
6.3.3.3.	Регресиона анализа.....	135
6.3.3.4.	Анализа на групи на мерења.....	136
6.3.3.5.	Графикон Bland-Altman	137
6.3.3.6.	Стереограм.....	139
6.3.4.	Полуавтоматски методи за анализа на добиените резултати	139
6.3.4.1.	DSE (Discontinuity Set Extractor)	139
6.3.4.2.	FACETS.....	145
6.3.5.	Изведени заклучоци за локалитетот Фариш	149
6.4.	Применета методологија за собирање структурни податоци за локалитетот Серта – изданок во песочници	150
6.4.1.	Локалитет Серта - добиени резултати.....	152
6.4.1.1.	Обработка на податоците добиени од снимање со телефон.....	152
6.4.2.	Приказ на мерењата направени со геолошки компас и виртуелен компас	153

6.4.3.	Анализа на добиените резултати.....	155
6.4.3.1.	Анализа на добиените отстапувања	155
6.4.3.2.	Статистичка анализа.....	156
6.4.3.3.	Регресиона анализа.....	157
6.4.3.4.	Анализа на групи на мерења.....	158
6.4.3.5.	Графикон Bland-Altman	160
6.4.3.6.	Стереограм.....	161
6.4.4.	Полуавтоматски методи за анализа на добиените резултати	162
6.4.4.1.	DSE	162
6.4.4.2.	FACETS.....	167
6.4.5.	Изведени заклучоци за локалитет Серта	172
6.5.	Анализа на добиените резултати од трите локалитети.....	173
6.5.1.	Анализа на добиените отстапувања.....	173
6.5.2.	Статистичка анализа.....	174
6.5.3.	Регресиона анализа	175
6.5.4.	Анализи на групи на мерења	175
6.5.5.	Анализа на добиените резултати од графиконот Bland-Altman.....	176
6.5.6.	Анализа на добиените стереограми.....	176
6.5.7.	Анализа на добиените резултати од DSE	177
6.5.8.	Анализа на добиените резултати од FACETS	178
7.	ВЕРИФИКАЦИЈА НА МЕТОДОЛОГИЈАТА ЗА ДЕТЕКЦИЈА И МОНИТОРИНГ НА СТРУКТУРНО-ГЕОЛОШКИ ОСОБЕНОСТИ.....	179
7.1.	Методологијата за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености	179
7.2.	Добивање податоци	182
7.3.	Обработка на добиените податоци.....	185
7.4.	Анализа на добиените резултати	189
7.5.	Изведени заклучоци за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености	192
7.6.	Методологија при имплементирање дополнителни геометриски карактеристики за мониторинг и детекција	194
7.6.1.	Опис на достапните методи	195
7.6.2.	Изведени заклучоци за имплементирање дополнителни геометриски карактеристики за мониторинг и детекција	201
8.	ДИСКУСИЈА.....	202
8.1.	Евалуација на методологијата за детекција и мониторинг на структурно-геолошки карактеристики.....	203

8.2. Евалуација на методологијата за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особенисти	208
9. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ.....	211
10. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА.....	214

СПИСОК НА СЛИКИ

Слика 1 а) Геолошки компас. б) Поларна и екваторијална проекција на топка.....	18
Слика 2 Процедура за имплементирање на првата методологија	23
Слика 3 Позиции на анализираните локации 1) Милутинци 2) Фариш 3) Серта	25
Слика 4 Графикон за начинот на спроведување на снимањата	25
Слика 5 Фази на примена на методологијата за детекција и мониторинг.....	29
Слика 6 Мерење со геолошки компас а) с. Милутинци б) Фариш в) Серта	31
Слика 7 Принципи на прибирање податоци со ласерски скенер, прикажани на примерот на ТЛС	34
Слика 8 Фотограметриски принцип на SfM.....	37
Слика 9 Користен хардвер: а) iPhone 13 Pro. б) iPhone 15 Pro. в) дрон со камера Phantom 4 RTK. г) Leica Viva GS08. д) Topcon GRS 1.....	38
Слика 10 Користен софтвер	40
Слика 11 Достапни формати за експортирање 3D-снимка од 3D Scanner App	42
Слика 12 Интерфејс на DSE	50
Слика 13 Дијаграм за извлекување геолошки рамнини со FACETS.....	55
Слика 14 Локација на изданок од микашисти (географска ширина и должина 42.204082, 22.161872, Google Earth	56
Слика 15 Поглед на потесното подрачје на истражуваниот изданок	57
Слика 16 Истражуван изданок од микашисти	57
Слика 17 Геолошка карта на поширокиот регион. Со црвена боја е обележана предметната локација	58
Слика 18 Локација на изданок од варовници (географска ширина и должина 42.178670, 22.201061, Google Earth)	59
Слика 19 Поглед на истражуваната локација од југозападна страна	60
Слика 20 Геолошка карта на поширокото подрачје. Со црвена боја е означена предметната локација	60
Слика 21 Плочести и банковити варовници со изразено присуство на набори	61
Слика 22 Истражувана локација (географска должина и ширина 41.575135, 22.224977, Google Earth).....	62
Слика 23 Геолошка карта на поширокото подрачје. Со црвена боја е означена предметната локација	63
Слика 24 Усек 4 (географска должина и ширина 42.178670, 22.201061, Google Earth)	64
Слика 25 Геолошка карта на поширокото подрачје. Со црвена боја е обележана предметната локација	65
Слика 26 Инженерско-геолошка карта за предметниот дел на усек 4	67
Слика 27 а) Нестабилна зона на десна страна на усекот. б) Отворена рамна пукнатина	71
Слика 28 Контурен дијаграм и розета на елементи на азимут на падна насока и паден агол на фолијација кај нестабилната зона	72
Слика 29 Контурен дијаграм и розета на елементи на азимут на падна насока и паден агол на системи пукнатини кај нестабилната зона	72
Слика 30 Најновата нестабилност се појави по фолијација од 180/42°	73
Слика 31 Маркери за геореферентни точки со црвена боја.....	78
Слика 32 Мерење со геолошки компас на локалитетот Милутинци	79
Слика 33 Некои од мерните места обележани со црвени броеви.....	80
Слика 34 LiDAR снимање со паметен телефон на локалитетот Милутинци	80
Слика 35 Снимање со употреба на дрон на локалитетот Милутинци	81

Слика 36	Позиции на камерата за време на летот	82
Слика 37	Финален изглед на 3DOT добиен со Pix4D	82
Слика 38	Геореференцирање на 3DOT и проверка на координатите	83
Слика 39	Споредба на <i>Lidar</i> и <i>Lidar Advanced</i> 3DOT.....	84
Слика 40	Дистрибуција на грешки помеѓу <i>Lidar</i> и <i>Lidar Advanced</i>	85
Слика 41	Приближни растојанија на грешки помеѓу <i>Lidar</i> и <i>Lidar Advanced</i>	85
Слика 42	Дистрибуција на грешки помеѓу LiDAR и SfM	87
Слика 43	Приближни растојанија на грешки помеѓу LiDAR и SfM	87
Слика 44	Некои од мерењата направени со виртуелен компас	89
Слика 45	а) Приказ на распределбата на разликите за азимут на падната насока б) Приказ на распределбата на разликите за падниот агол	92
Слика 46	Регресиона анализа за сите мерења на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите мерења на паден агол.....	95
Слика 47	Регресиона анализа за сите просечни вредности на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите просечни вредности на паден агол.....	95
Слика 48	Приказ на групи мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (портакалово)	97
Слика 49	Процентуална застапеност на сетовите на рамнини	97
Слика 50	Графикон Bland-Altman за измерениот азимут на падна насока	99
Слика 51	Графикон Bland-Altman за мерениот паден агол	99
Слика 52	Стереограм за мерења: а) геолошки компас б) виртуелен компас	100
Слика 53	HSV боење за 3DOT добиен од а) LiDAR б) SfM.....	102
Слика 54	Приказ на облакот од точки со промена на боите во зависност од висината за а) LiDAR б) SfM	103
Слика 55	Приказ на облакот од точки со одредена по една боја на секој сет од рамнини за а) LiDAR б) SfM	104
Слика 56	Стереограм во DSE за 3DOT добиен од LiDAR	105
Слика 57	Стереограм во DSE за 3DOT добиен од SfM	108
Слика 58	Стереограм за а) геолошки компас б) виртуелен компас в) DSE за LiDAR г) DSE за SfM	111
Слика 59	Интерфејс на алгоритмот Kd-tree	113
Слика 60	Поглед на добиениот резултат од Kd-tree а) одозгора б) отстрана.....	115
Слика 61	Интерфејс за експортирање на еден сет на дисконтинуитети со Kd-tree.....	117
Слика 62	Изглед на опциите за филтрирање на фасети во Kd-tree.....	117
Слика 63	Фасет (67/21) во Kd-tree, поглед а) одгоре б) отстрана.....	118
Слика 64	Фасет (331/27) во Kd-tree, поглед а) одгоре б) отстрана.....	119
Слика 65	Фасет (335/88) во Kd-tree, поглед а) одгоре б) отстрана.....	119
Слика 66	Интерфејс на Fast Marching алгоритмот	120
Слика 67	Поглед на добиениот резултат од Fast Marching а) одозгора б) отстрана.....	121
Слика 68	Фасет (331/27) во Fast Marching, поглед а) одгоре б) отстрана	122
Слика 69	Фасет (67/21) во Fast Marching, поглед а) одгоре б) отстрана	122
Слика 70	Фасет (335/88) во Fast Marching, поглед а) одгоре б) отстрана	122
Слика 71	Стереограм за а) Kd-tree б) Fast Marching	123
Слика 72	Изданоци на плочести и банковити варовници на локалитетот Фариш	128
Слика 73	Мерење со геолошки компас на локалитет Фариш	128
Слика 74	а) референтна точка б) снимање со ГПС-уред	129
Слика 75	LiDAR-снимање со употреба на паметен телефон на локалитет Фариш	129
Слика 76	Поглед на снимениот изданок во CloudCompare од: а) запад б) југ	130

Слика 77 Некои од мерењата за азимут и паден агол со виртуелниот компас	132
Слика 78 а) Приказ на распределбата на разликите за азимут на падната насока б) Приказ на распределбата на разликите за падниот агол.	133
Слика 79 Регресиона анализа од сите мерења за а) азимут б) паден агол.....	135
Слика 80 Регресиона анализа од просечни вредности за а) азимут б) паден агол.....	135
Слика 81 Приказ на групи на мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (портокалово).	136
Слика 82 Процентуална застапеност на сетовите на рамнини	137
Слика 83 Графикон Bland-Altman за измерениот азимут на падна насока	137
Слика 84 Графикон Bland-Altman за измерениот паден агол	138
Слика 85 Стереограм за мерења со а) геолошки компас б) виртуелен компас.....	139
Слика 86 Приказ на 3DOT со одредена по една боја на секој сет од рамнини.....	140
Слика 87 Стереограм во DSE за 3DOT од локалитетот Фариш	141
Слика 88 Стереограм за а) геолошки компас б) виртуелен компас в) DSE.....	144
Слика 89 Интерфејс на алгоритмот Kd-tree	145
Слика 90 Поглед на добиениот резултат од Kd-tree од а) запад б) југ	146
Слика 91 Издвоен сет на рамнини 267/49 во Kd-tree.....	146
Слика 92 Издвоен сет на рамнини 65/53 во Kd-tree.....	147
Слика 93 Интерфејс на Fast Marching.....	147
Слика 94 Резултат од Fast Marching, поглед од: а) запад б) југ.....	148
Слика 95 Издвоен сет на рамнини 267/49 во Fast Marching.....	148
Слика 96 Издвоен сет на рамнини 65/53 во Fast Marching.....	149
Слика 97 Изданоци од песочници на локалитетот Серта	150
Слика 98 Мерење со геолошки компас на локалитетот Серта	151
Слика 99 LiDAR снимање со паметен телефон на локалитетот Серта.....	152
Слика 100 Рачно позиционирање на 3DOT	153
Слика 101 Некои од мерењата обележани на а) слика б) со виртуелен компас	154
Слика 102 Приказ на распределбата на разликите за азимут на падната насока б) Приказ на распределбата на разликите за падниот агол	156
Слика 103 Регресиона анализа за сите мерења на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите мерења на паден агол	157
Слика 104 Регресиона анализа за сите просечни вредности на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите просечни вредности на паден агол.....	158
Слика 105 Приказ на групи на мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (портокалово)	159
Слика 106 Процентуална застапеност на мерените сетовите на рамнини	159
Слика 107 Графикон Bland-Altman за измерениот азимут на падна насока	160
Слика 108 Графикон Bland-Altman за мерениот паден агол	160
Слика 109 Стереограм за мерења: а) геолошки компас б) виртуелен компас	162
Слика 110 Приказ на 3DOT со одредена по една боја на секој сет од рамнини.....	162
Слика 111 Стереограм во DSE за 3DOT од локалитетот Серта	163
Слика 112 Стереограм за мерења со а) геолошки компас б) виртуелен компас в) DSE	166
Слика 113 Интерфејс на алгоритмот Kd-tree за 3DOT од локалитетот Серта.....	167
Слика 114 Поглед на добиениот резултат од Kd-tree а) однапред б) отстрана.....	168
Слика 115 Фасет 122/74 во Kd-tree	168
Слика 116 Фасет 264/73 во Kd-tree	169
Слика 117 Интерфејс на Fast Marching за 3DOT од локалитетот Серта	169
Слика 118 Поглед на добиениот резултат од Fast Marching од а) напред б) страна	170

Слика 119 Фасет 115/80 во Fast Marching.....	170
Слика 120 Фасет 264/74 во Fast Marching.....	171
Слика 121 Стереограм за а) Kd-tree б) Fast Marching	171
Слика 122. Споредба на стереограми за а) Милутинци б) Фариш в) Серта	176
Слика 123 Состојба на усек 4 март 2022. Со црвена боја е означена локалната нестабилност на десната страна на усекот	180
Слика 124 а) Состојба на усекот пред да се случи новото свлечиште во делот на црвениот круг. б) Состојба со новото свлечиште на 27.09.2023	180
Слика 125 Дрон при снимање на усекот	182
Слика 126 Графикон за постапка при детекција на движење	183
Слика 127 Позиции на камерата за време на летот	183
Слика 128 Прва снимка - референтна, направена на 13.12.2022.....	184
Слика 129 Втора снимка - компаративна, направена на 20.1.2023	184
Слика 130 Трета снимка - компаративна, направена на 21.2.2023.....	184
Слика 131 Четврта снимка-компаративна, направена на 16.5.2023.....	185
Слика 132 Основен концепт на методот за пресметка на растојание C2C.....	186
Слика 133 Изборот на податочни збирки што ќе се користат во процесот на пресметување на растојанието C2C. 0 е референца, 3 е последната снимка	187
Слика 134 Мени за пресметување на растојание C2C	188
Слика 135 Финален изглед со автоматскиот приказ на пресметка на растојанијата	188
Слика 136 Споредба помеѓу првата и втората снимка.....	189
Слика 137 а) Споредба помеѓу првото и второто снимање со приказ на максималното апсолутно растојание. б) Споредба помеѓу првото и третото снимање со приказ на максималното апсолутно растојание	190
Слика 138 а) Споредба помеѓу првото и четвртото снимање со приказ на максималното апсолутно растојание. б) Споредба помеѓу третото и четвртото снимање со приказ на максималното апсолутно растојание	191
Слика 139 Визуелен приказ на мониторинг на косини	193
Слика 140 Промени на усек 4 во период од 5 месеци	195
Слика 141 Перпендикуларност (нормалност) на теренот	196
Слика 142 Планарност на теренот	198
Слика 143 Вертикалност на теренот	199

LIST OF FIGURES

Figure 1 a) Geological compass b) Polar and equatorial projection of a sphere	18
Figure 2 Procedure for implementing the first methodology	23
Figure 3 Positions of the analyzed locations 1) Milutinci 2) Farish 3) Serta.....	25
Figure 4 Chart for the methodology of conducting surveys	25
Figure 5 Phases of methodology application for detection and monitoring	29
Figure 6 Measurement with geological compass a) v. Milutinci b) Farish v) Serta	31
Figure 7 Principles of laser scanner data acquisition, showing the example of TLS	34
Figure 8 Structure from Motion (SfM) photogrammetric principle.....	37
Figure 9 Used hardware: a) iPhone 13 Pro. b) iPhone 15 Pro. v) drone with camera Phantom 4 RTK. g) Leica Viva GS08. d) Topcon GRS 1	38
Figure 10 Used software	40
Figure 11 Available formats for exporting 3D survey from 3D Scanner App	42
Figure 12 DSE interface	50
Figure 13 Diagram for extracting geological planes with FACETS	55
Figure 14 Location of the mica schist outcrop (latitude, longitude 42.204082, 22.161872, Google Earth).....	56
Figure 15 Overview of the vicinity of the outcrop	57
Figure 16 Mica-shist outcrop	57
Figure 17 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location	58
Figure 18 Location of the limestone outcrop (latitude, longitude 42.178670, 22.201061, Google Earth).....	59
Figure 19 View from southwest on the investigative area.....	60
Figure 20 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location	60
Figure 21 Platy and bedded limestones with increased presence of folds.....	61
Figure 22 Investigative area (longitude, latitude 41.575135, 22.224977, Google Earth)	62
Figure 23 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location	63
Figure 24 Cut 4 (latitude, longitude 42.178670, 22.201061, Google Earth)	64
Figure 25 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location	65
Figure 26 Engineer-geological map of the specific part of cut 4.....	67
Figure 27 a) Unstable area at the right side of the cut. b) Open joint	71
Figure 28 Contour diagram and rose diagram of dip and dip direction of the foliation in the unstable zone.....	72
Figure 29 Contour diagram and rose diagram of dip and dip direction of the joints in the unstable zone.....	72
Figure 30 The latest instability occurred along foliation of 180/42°	73
Figure 31 Red markers for points for georeferencing	78
Figure 32 Measurement using geological compass on Milutinci site	79
Figure 33 Some of the measurement points made at sight marked with red numbers	80
Figure 34 LiDAR recording using smartphone at site Milutinci.....	80
Figure 35 Surveying using drone at site Milutinci	81
Figure 36 Positions of the camera during the flight.....	82
Figure 37 Final model of the 3DPC derived by Pix4D.....	82

Figure 38 Georeferencing the 3DPC and checking the coordinates	83
Figure 39 Comparing the <i>Lidar</i> and <i>Lidar Advanced</i> 3DPC	84
Figure 40 Distribution of errors between <i>Lidar</i> and <i>Lidar Advanced</i>	85
Figure 41 Approximate distances of errors between <i>Lidar</i> and <i>Lidar Advanced</i>	85
Figure 42 Distribution of errors between LiDAR and SfM	87
Figure 43 Approximate distances of errors between LiDAR and SfM	87
Figure 44 Some of measurements using the virtual compass	89
Figure 45 a) Display of distribution of deviations in dip direction measurements. b) Display of distribution of deviations in dip measurements	92
Figure 46 Regression analysis from all measurements for dip direction. b) Regression analysis from all measurements for dip	95
Figure 47 Regression analysis from average measurements for dip direction. 6) Regression analysis from average measurements for dip	95
Figure 48 Display of groups of measurements with geological compass (blue) and virtual compass (orange)	97
Figure 49 Percentage of related discontinuity sets	97
Figure 50 Bland-Altman plot for measured dip direction	99
Figure 51 Bland-Altman plot for measured dip	99
Figure 52 Stereogram for measurements a) geological compass. b) virtual compass	100
Figure 53 HSV coloring for 3DPC acquired from a) LiDAR 6) SfM	102
Figure 54 Display of the point cloud with color changes depending on elevation for a) LiDAR b) SfM	103
Figure 55 Display of the point cloud with designated color for every set of planes for a) LiDAR b) SfM	104
Figure 56 Stereogram in DSE for 3DPC obtained from LiDAR	105
Figure 57 Stereogram in DSE for 3DPC obtained from SfM	108
Figure 58 Stereogram for a) geological compass b) virtual compass v) DSE for LiDAR g) DSE for SfM.	111
Figure 59 Kd-tree algorithm interface	113
Figure 60 View of the result from Kd-tree from a) above b) side	115
Figure 61 Interface for exporting one discontinuity set using Kd-tree	117
Figure 62 Interface fort the filtering the facets feature in Kd-tree	117
Figure 63 Facet (67/21) in Kd-tree, view a) from above b) from the side	118
Figure 64 Facet (331/27) in Kd-tree, view a) from above b) from the side	119
Figure 65 Facet (335/88) in Kd-tree, view a) from above b) from the side	119
Figure 66 Interface for Fast Marching algorithm	120
Figure 67 View of the result from Fast Marching from a) above b) side	121
Figure 68 Facet (331/27) in Fast Marching, view a) from above b) from the side	122
Figure 69 Facet (67/21) in Fast Marching, view a) from above b) from the side	122
Figure 70 Figure 68 Facet (335/88) in Fast Marching, view a) from above b) from side	122
Figure 71 Stereogram for a) Kd-tree. b) Fast Marching	123
Figure 72 Outcrop of platy and bedded limestones at site Farish	128
Figure 73 Measurements using geological compass at site Farish	128
Figure 74 a) reference point b) surveying with GPS	129
Figure 75 LiDAR recording using smartphone at Farish site	129
Figure 76 Recorded outcrop view in CloudCompare from: a) West b) South	130
Figure 77 Some dip and dip direction measurements using the virtual compass	132

Figure 78 a) Display of distribution of deviations in dip direction measurements b) Display of distribution of deviations in dip measurements	133
Figure 79 Regression analysis from all measurements for a) dip direction b) dip	135
Figure 80 Regression analysis from average measurements for a) dip direction b) dip	135
Figure 81 Display of groups of measurements with geological compass (blue) and virtual compass (orange).....	136
Figure 82 Percentage of related discontinuity sets	137
Figure 83 Bland-Altman plot for measured dip direction	137
Figure 84 Bland-Altman plot for the measured dip	138
Figure 85 Stereogram for measurements a) geological compass b) virtual compass.....	139
Figure 86 Display of 3DПЦ with a specific color for each set of planes	140
Figure 87 Stereogram in DSE for 3DPC from Farish site.....	141
Figure 88 Stereogram for a) geological compass b) virtual compass v) DSE.....	144
Figure 89 Kd-tree algorithm interface.....	145
Figure 90 View of the result from Kd-tree from a) West b) South.....	146
Figure 91 Isolated set of planes 267/49 in Kd-tree	146
Figure 92 Isolated set of planes 65/53 in Kd-tree	147
Figure 93 Interface of Fast Marching	147
Figure 94 Results from the Fast Marching, view from: a) West b) South	148
Figure 95 Isolated set of planes 267/49 in Fast Marching	148
Figure 96 Isolated set of planes 65/53 in Fast Marching	149
Figure 97 Sandstone outcrop at Serta site	150
Figure 98 Measurement using geological compass at Serta site	151
Figure 99 LiDAR recording using smartphone at site Serta.....	152
Figure 100 Manual positioning of 3DPC.....	153
Figure 101 Some of the measurements marked on a) image b) with virtual compass	154
Figure 102 Display of distribution of deviations in dip direction measurements. b) Display of distribution of deviations in dip measurements	156
Figure 103 Regression analysis from all measurements for dip direction. b) Regression analysis from all measurements for dip	157
Figure 104 Regression analysis from average measurements for dip direction. 6) Regression analysis from average measurements for dip	158
Figure 105 Display of groups of measurements with geological compass (blue) and virtual compass (orange).....	159
Figure 106 Percentage of measured discontinuity sets	159
Figure 107 Bland-Altman plot for measured dip direction	160
Figure 108 Bland-Altman plot for measured dip	160
Figure 109 Stereogram for measurements a) geological compass. b) virtual compass.....	162
Figure 110 Display of the point cloud with designated color for every set of planes.....	162
Figure 111 Stereogram in DSE for 3DPC from Serta site	163
Figure 112 Stereogram for measurements with a) geological compass b) virtual compass v) DSE ...	166
Figure 113 Kd-tree algorithm interface for 3DPC from Serta site	167
Figure 114 View of the result from Kd-tree from a) the front b) the side	168
Figure 115 Facet 122/74 in Kd-tree.....	168
Figure 116 Facet 264/73 in Kd-tree.....	169
Figure 117 Interface for Fast Marching for 3DPC from Serta site	169
Figure 118 View of the result from Fast Marching from a) front b) side	170
Figure 119 Facet 115/80 in Fast Marching.....	170

Figure 120 Facet 264/74 in Fast Marching.....	171
Figure 121 Stereogram for a) Kd-tree b) Fast Marching.....	171
Figure 122 Comparison of stereograms for a) Milutinci b) Farish v) Serta	176
Figure 123 Condition of the cut on March 4, 2022. Local instability on the right side of the cut is marked in red.....	180
Figure 124 a) Condition of the cut before the new landslide occurred in the area marked with a red circle. b) Condition with the new landslide as of 27.09.2023.....	180
Figure 125 Using the drone for recording the cut.....	182
Figure 126 Procedure of the motion detection	183
Figure 127 Positions of the camera during the flight.....	183
Figure 128 First recording-reference, taken on 13.12.2022.....	184
Figure 129 Second recording-comparative, taken on 20.1.2023	184
Figure 130 Third recording-comparative, taken on 21.2.2023.....	184
Figure 131 Fourth recording-comparative, taken on 16.5.2023	185
Figure 132 The basic concept of C2C distance computation method.....	186
Figure 133 The selection of datasets to be used in the C2C distance computation process. 0 is referenced, and 3 is the last recording	187
Figure 134 C2C distance computation menu	188
Figure 135 Final appearance with automated distance computation	188
Figure 136 Comparison between the first and the second recording	189
Figure 137 a) Comparison between the first and the second survey with the maximum absolute distance. 6) Comparison between the first and the third survey with the maximum absolute distance	190
Figure 138 a) Comparison between the first and the fourth survey with the maximum absolute distance. 6) Comparison between the third and the fourth survey with the maximum absolute distance	191
Figure 139 Visual representation of slope monitoring	193
Figure 140 Changes within 5 months at cut 4.....	195
Figure 141 Perpendicularity (normality) of the terrain.....	196
Figure 142 Planarity of the terrain.....	198
Figure 143 Verticality of the terrain.....	199

СПИСОК НА ТАБЕЛИ

Табела 1 Технички спецификации на користениот геолошки компас	31
Табела 2 Влезни параметри за DSE	51
Табела 3 Координати на референтни точки за локалитетот Милутинци	79
Табела 4 Мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (зелено)	88
Табела 5 Обработка на добиените вредности за азимут и паден агол	91
Табела 6 Рамнините кои се идентификувани кај сите применети методи се обележани со зелена боја	110
Табела 7 Достапни податоци во Excel за дел од добиените рамнини во Kd-tree	116
Табела 8 Координати на референтни точки кај локалитетот Фариш	129
Табела 9 Мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (зелено)	131
Табела 10 Обработка на добиените вредности за азимут и паден агол	133
Табела 11 Рамнините кои се идентификувани кај сите применети методи се обележани со зелена боја	143
Табела 12 Мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (зелено)	154
Табела 13 Обработка на добиените вредности за азимут и паден агол	155
Табела 14 Рамнините кои се идентификувани кај сите применети методи се обележани со зелена боја	165
Табела 15 Максимални отстапувања на мерења кај трите локалитети	173
Табела 16 Максимални и просечни отстапувања на мерења кај трите локалитети	174
Табела 17 Стандардна девијација на мерењата за трите локалитети	174
Табела 18 Податоци за R^2 кај трите локалитети	175
Табела 19 Основни вредности добиени со графиконот Bland-Altman	176
Табела 20 Тренд на промени кај свлечиштето низ период од 5 месеци	191

LIST OF TABLES

Table 1 Technical data for Freiburger Geologist's Compass	31
Table 2 Input parameters for DSE	51
Table 3 Reference points coordinate for Milutinci site	79
Table 4 Measurement with geological compass (blue) and virtual compass (green)	88
Table 5 Processing the obtained values for dip and dip direction	91
Table 6 Planes that are identified at all applied methods are marked with green color	110
Table 7 The available data in Excel for small part of the acquired facets from Kd-tree.....	116
Table 8 Reference points coordinate at Farish site	129
Table 9 Measurement with geological compass (blue) and virtual compass (green)	131
Table 10 Processing the obtained values for dip and dip direction	133
Table 11 Planes identified by all applied methods are marked with green color	143
Table 12 Measurement with geological compass (blue) and virtual compass (green)	154
Table 13 Processing the obtained values for dip and dip direction	155
Table 14 Planes that are identified at all applied methods are marked with green color	165
Table 15 Maximum measurement deviations at the three locations	173
Table 16 Maximum and average measurement deviations at the three locations.....	174
Table 17 Standard deviation of the measurements for the three locations	174
Table 18 Data for R^2 for the three locations.....	175
Table 19 Key values obtained from the Bland-Altman plot	176
Table 20 Trend of changes in the landslide for 5 months period.....	191

1. ВОВЕД

Развојот на науката претставува еден непрекинат процес кој е непосредно поврзан со човештвото. Науката низ човечката цивилизација, сама по себе, имала свои подеми и падови, но човековата љубопитност била стимул таа непрестајно да напредува, да се надополнува и да се развива. Кога би се направил пресек во кој било период на развојот на научните достигнувања, може секогаш да се изработи споредба помеѓу традиционалните и современите методи, практики и апликации. Низ времето, актуелните современи пристапи стануваат општо прифатени, а со текот на времето стануваат и традиционални, кога појавата на нови сознанија, методи и технологии се сметаат за современи. Овој процес е непрекинат, и никогаш нема да застане.

Во овој контекст, во рамките на докторска дисертација, направен е еден пресек, како и една паралела помеѓу традиционални, општоприфатени методи и норми кои се етаблирале во структурната геологија и еден поширок опфат на нови методи, софтвер и хардвер, кои имаат капацитет да се наметнат, и делумно или целосно да ги заменат досегашните.

Некои научни гранки својот брз напредок или зенит го имале во минатото, некои пак, со помош на развојот на компјутерите и нанотехнологијата допрва го добиваат својот подем. Структурната геологија, како гранка од геологијата, генерално го има реализирано својот зенит. Техниките на картирање на геолошките структури се суштински за правилна интерпретација на структурната градба на картираниот терен (Петров и др., 2014). Со помош на достапните техники и применети знаења, структурната геологија комплетно е во контекст на геологијата и геотехниката (Гапковски и др., 2006; Јовановски и др., 2012). Во геологијата, како и во геотехниката и градежништвото сè почесто се применуваат иновативни технологии за прибирање, анализа и обработка на податоци, како што се сложените системи базирани на ласерски технологии, системот за глобално позиционирање и брзи компјутерски хардвери кои податоците ги обработуваат со софтвери кои работат со соодветни алгоритми.

Одредувањето на карактеристиките на карпестата маса е клучен дел од геолошките и инженерскогеолошките истражувања. За да може подобро да се разбере нејзиното однесување, од клучно значење е да се добијат што е можно повеќе информации за постојните дисконтинуитети, особено за ориентацијата и бројот на доминантни множества на дисконтинуитети. Традиционалниот начин вклучува теренско картирање кое генерално обезбедува ограничен број на податоци.

Структурните карактеристики како што се набори, раседи и дисконтинуитети, ја контролираат карпестата маса, нејзиното однесување и придонесуваат за нејзината стабилизација или за дестабилизација, во зависност од нивните ориентации и интензитетот на соодветните карактеристики (Glastonbury et al., 2000; Stead et al., 2006). Ориентацијата, како и бројот на доминантни на дисконтинуитетите значително влијаат на појава на потенцијални нестабилности и затоа претставуваат најкритични параметри во структурните анализи (Menegoni et al., 2019).

Традиционалните испитувања започнуваат со теренски набљудувања на карпестата маса, вклучувајќи нивен опис, како и мерења и карактеризација на дисконтинуитетите. Литологијата, степенот на атмосферски влијанија и јакоста на монолитните делови на карпите се утврдени преку набљудување и *in situ* или лабораториски тестирања (Stead et al., 2019). Во последната деценија, новите системи за добивање податоци, како што се техниките за далечинско набљудување или геофизиката, обезбедуваат различни пакети на голем број податоци. Ова води до идејата дека начинот на кој се пресметуваат различни параметри може да се рedefинира (Riquelme et al., 2018).

Картирањето на геолошките структури е темелот на сите геолошки дисциплини па и во механиката на карпите, при што, тоа доживеало постојана еволуција низ историјата, од класичните методи засновани на теренски набљудувања до софистицираните геофизички и далечински техники за детекција денес. Иднината на геолошкото картирање изгледа уште поинтересна, со хоризонт полн со технолошки иновации и нови пристапи кои ќе го трансформираат начинот на кој ја разбираме структурата на Земјата.

3Д моделирањето со користење 3D-облаци од точки (3DOT), стана неопходна алатка во собирање, толкување и анализа на геолошките и геотехничките податоци (Riquelme et al., 2021). Употребата на 3D-технологиите го намалува потребниот број на луѓе, ја зголемува точноста и го намалува потребното време за извршување одредени мерења или анализи. Мерењата за добивање на 3D-моделите се неинвазивни, безбедни и екстремно прецизни. Употребата на овие техники обезбедува податоци кои можат да се складираат и повторно да се користат, без да има потреба од повторна посета на анализираното подрачје. Исто така, обезбедуваат поголема контрола и евалуација на промените на терен, како и контрола на квалитетот.

3DOT претставуваат точкеста репрезентација на одредени површини и со тоа овозможуваат идентификација и екстракција на постојните дисконтинуитети, нивните ориентации (Ferrero et al., 2009; Riquelme et al., 2014; Dewez et al. 2016; Gomez et al., 2016; Leng et al., 2016; Chen et al., 2016), нормалните растојанија (Riquelme et al., 2015a; Riquelme et al., 2015b) нивните континуитети (Sturzenegger et al., 2011; Riquelme et al., 2016) и рапавоста (Lai et al., 2014), доколку тие се со висок квалитет. Овие облаци од точки вообичаено автоматски се формираат во размер 1:1. Ова дополнително овозможува мерење на должини, површини и волумен (Riquelme et al., 2017).

Со цел добивање разновидност при интегрирање на методологијата за анализа на геолошки структури и процеси со примена на современи технологии во структурната геологија, во оваа дисертација се применија современи технологии за добивање елементарни структурни податоци, како и за следење на структурните особености, промени и деформации на теренот. Се искористи различен хардвер и софтвер кој го отсликува зенитот на денешната технологија која се применува во различни сектори на човековото делување, а е релативно евтина и достапна. Притоа е даден фокус на верификација на две различни методологии низ примени од практиката: *првата методологија* се однесува на **примена на современи технологии за собирање структурни податоци од терен, со употреба на паметниот телефон како алатка, а втората методологија** се однесува на **примена на современи технологии за детекција и мониторинг на одредени структурно-геолошки особености.**

2. ПРЕГЛЕД НА КОРИСТЕНИ ЛИТЕРАТУРНИ ИЗВОРИ ОД ПРЕТХОДНИ ИСТРАЖУВАЊА

Од 2000-тите па наваму, техниките на далечинско набљудување се применуваат на неколку полиња, особено во карактеризација на карпестите маси (Riquelme et al., 2021). Во последните дваесетина години, примената на далечинската детекција во геонауките направи голем напредок, особено во структурната геологија и механиката на карпи (Jaboyedoff et al., 2004; Gigli et al., 2011; Riquelme et al., 2014; Devez et al., 2016; Lukačić et al., 2022). Неколку автори, вклучувајќи ги и (Krosley et al., 2006; Martin et al., 2007; Coggan et al., 2007; Haneberg et al., 2006 и 2007) ја нагласуваат точноста и потенцијалот на фотограметриските техники. Други автори (Wandinger, 2005; Kloeker et al., 2006) даваат обемни податоци за прецизноста и употребливоста на технологијата LiDAR. До денес, се воведоа голем број техники и методи за далечинска детекција, каде основен податок е добивање 3DOT со висока резолуција.

Во однос на презентираната методологија за собирање структурни податоци, може да се каже дека 3DOT се предмет на истражување на голем број автори. Секој од нив има свој специфичен пристап кон тоа како треба да се обезбедат тие 3DOT, како да се обработуваат и за кои цели да се користат. Нивната примена е многу широка, од комерцијални до научни цели. Понатаму, обработката на овие 3DOT како и извлекувањето на структурните елементи кај дисконтинуитетите на сниманите карпести површини се темели на најразлични пристапи. Рачната обработка користи софтвери каде истражувачот рачно ги детектира позициите каде се мерат елементите на пад. Сепак, најголем дел од достапната литература за извлекување на дисконтинуитетите кај карпеста маса се однесуваат на полуавтоматски, односно автоматски методи, кои вклучуваат најразлични алгоритми за поточно добивање на реалните карактеристики на карпата која се истражува.

Голем број на истражувачки теми ја третираат конкретната проблематика:

(Jaboyedoff et al., 2004), даваат кратка историја на оценувањето на технологиите за ласерско скенирање во геонауките, кои се користат за снимање на релјефот преку дигитални модели на терен со висока резолуција (HRDEM)

или 3D модели. Понатаму, даваат општ преглед на техниките за детекција и мерење со светлина (LiDAR) свлечишта, одрони на карпи и наноси.

(Donovan et al., 2005), презентираат истражување каде е развиена методологија за автоматизација на идентификацијата и карактеризацијата на сетови на дисконтинуитети во карпеста маса, користејќи 3DOT добиени со копнено ласерско скенирање.

(Slob et al., 2005), користат ласерско снимање за добивање на 3DOT, кој претставува реална реконструкција на сниманата карпеста маса. Потоа со употреба на алгоритмот „fuzzy k-means“, автоматски ги извлекуваат сетовите на дисконтинуитети од карпата и ги одредуваат елементите на пад.

(Jaboyedoff et al., 2007), даваат еден пример за употреба на софтверот COLTOP-3D за прикажување на реални 3D површини добиени од 3DOT.

(Olariu et al., 2008), го применуваат алгоритмот за класификација на површините на добиените податоци за да извлечат структурни ориентации на рамнините кај 3DOT.

(Sturzenegger et al., 2009a), користат фотограметриски техники за далечинска детекција кај отворен руднички коп, за карактеризација на дисконтинуитетите на карпестата маса на повеќе нивоа.

(Gigli et al., 2011), презентираат алатка за Matlab наречена DiAna (Discontinuity Analysis) за 2D и 3D геоструктурна анализа на дисконтинуитети во карпести маси врз основа на податоци од ласерско скенирање со висока резолуција. Предложениот пристап овозможува полуавтоматско добивање релевантни параметри на карпести маси, како што се ориентација, број на сетови, растојание, RQD, перзистентност, големина на блокови и рапавост, преку анализа на точки со висока резолуција добиени од копнени или воздушни ласерски скенери.

(Campbell et al., 2011), издаваат книга во која се презентирани користените форми на снимки добиени од далечинско снимање и нивните примени во науките за Земјата.

(Sturzenegger et al., 2011), користат копнено ласерско скенирање за добивање 3DOT и прават детална разработка на различни 3D-модел и утврдување на нивните лимити.

(Lato et al., 2012), со цел да ја минимизираат потребата од рачна обработка на податоци и извлекување на структурните карактеристики, развиле софтвер (PlaneDetect) кој автоматски ги идентификува и ги картира планарните дисконтинуитети кај 3D-модел на површини генерирани со LiDAR или фотограметрија.

(Scott et al., 2013), користат беспилотно летало за снимање големи површини при што добиените 3D-снимки ги користат за детекција на теренски карактеристики на карстни предели.

(Lato et al., 2013), воспоставуваат заеднички репозиториум и стандарди за проценка на карактеристиките на карпестите маси користејќи ги LiDAR и фотограметријата.

(Riquelme et al., 2014 и Song et al., 2023), даваат методологија за идентификација и анализа на рамни површини кои се наоѓаат на косина, користејќи 3DOT добиени со копнено ласерско скенирање, односно со фотограметрија респективно. Дополнително, (Riquelme et al., 2014) презентираат нов метод за полуавтоматско препознавање на дисконтинуитети во карпести маси користејќи 3DOT, што е основа за развојот на софтверот DSE за таа намена.

(Vasuki et al., 2014), промовираат полуавтоматизиран метод кој овозможува ефикасно картирање на геолошките раседи со употреба на фотограметриски податоци од карпести површини, добиени со употреба на беспилотно летало.

(Riquelme et al., 2015a), ги користат современите напредоци во добивањето на 3D-податоци со користење на фотограметриски и/или LiDAR-техники кои овозможуваат брза и прецизна карактеризација на дисконтинуитетите во карпестите маси. Даваат методологија за: (а) користење 3DOT за идентификација и анализа на рамни површини на косини; (б) пресметка на растојанието помеѓу различни сетови на дисконтинуитети; (в) полуавтоматска

пресметка на параметрите кои имаат клучна улога во геомеханичката класификација според SMR (Slope Mass Rating).

(Bianchetti et al. 2016), го користат напредокот во техниките за далечинска детекција, кои овозможуваат брзо и прецизно добивање на густе 3DOT, и даваат неколку полуавтоматски пристапи за извлекување на карактеристиките на дисконтинуитетите. За таа цел, развиваат оригинална алатка во Matlab.

(Assali et al., 2016), предлагаат комбиниран пристап кој користи 3D облаци од точки добиен од LiDAR и 2D-дигитални слики, обединети во концептот на „цврста слика“. Овој производ ги поврзува предностите на класичните 2D дигитални слики со вистински бои, со специфичните предности на густите 3DOT, односно геометриската целосност и прецизност. Алатките во овој труд се имплементирани во еден независен софтвер кој врши дигитално геоструктурно истражување и анализа. Функциите вклучуваат извлекување на 3D-координати, мерење 3D-растојанија и површини, пронаоѓање најсоодветна рамнина за ориентација на дисконтинуитети и проценка на големината на блоковите.

(Leng et al., 2016), предлагаат метод за детекција на рамнини на повеќе нивоа, базиран на извлекување единици на раст со користење Хафова (Hough) трансформација и последователно проширување до вистинските димензии и граници на рамнините.

(Thiele et al., 2017), адаптираат решение за брза интерполација на структурни карактеристики во 3DOT. Методот е имплементиран во географски информациски систем QGIS и во софтверот CloudCompare. Користениот алгоритам е применет на четири различни апликации, каде се извлечени: (1) шеми на пукнатини и раседи во ортографски фотографии со висока резолуција, (2) шеми на пукнатини во густ 3DOT, (3) површински пукнатини од земјотресот на раседот Greendale во Нов Зеланд, и (4) океански раседни зони кај северниот дел од Атлантскиот Океан.

(Telling et al., 2017), прават преглед на истражувањата кај науките на Земјата со користење на копненото ласерско скенирање, односно вршат еден вид валоризација на придобивките на оваа технологија.

(Chen et al., 2017), презентираат метод за автоматско извлекување на блокови и пресметка на големината на блокови од 3DOT.

(Drews et al., 2018), промовираат: (1) автоматизиран метод за извлекување на рамнините и нивната просторна ориентација директно од 3DOT, (2) обемни тестови за валидизација придружени со детална статистичка анализа, и (3) пресметка на интензитетот на пукнатини на автоматски сегментирани рамнини.

(Umili et al., 2013; Li et al., 2016; Chen et al., 2016; Zhang et al., 2018; Wu et al., 2020; Chen et al., 2020; Daghigh et al., 2022) презентираат методологија за автоматско извлекување на дисконтинуитети во карпа од 3DOT. Автоматизирана методологија даваат и (Battulwar et al., 2020) од 3DOT добиени со фотограметрија, а (Wang et al., 2016; Ge et al., 2018; Kong et al., 2019; Tang et al., 2022; Wu et al., 2021) од 3DOT добиени со технологијата LiDAR.

Овие автоматски методи се темелат на различни алгоритми како што се: 1) методи за кластеризација и анализа на главни компоненти (PCA) за идентификација и сегментација на структурни карактеристики во 3D облаци од точки (Umili et al., 2013); 2) алгоритми за раст на региони и RANSAC (Random Sample Consensus) за автоматско извлекување на рамнини и други геометриски форми од облаци од точки (Li et al., 2016); 3) методи базирани на густина и кластеризација, како што е DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), за сегментација на 3DOT (Chen et al., 2016); 4) применуваат длабоки невронски мрежи, особено Convolutional Neural Networks (CNNs), за класификација и сегментација на 3DOT (Zhang et al., 2018); 5) користат PointNet архитектура за директна обработка и класификација на 3DOT без потреба од претходна сегментација (Wu et al., 2020); 6) применуваат методи за машинско учење, како што се Random Forests и Support Vector Machines (SVM), за класификација на точки во облакот (Chen et al., 2020); 7) користат хибриден пристап комбинирајќи традиционални алгоритми за обработка на слики со длабоко учење за подобрување на точноста при извлекување податоци од 3DOT (Daghigh et al., 2022); 8) применуваат алгоритми за раст на региони и методи за минимално опишување површини за сегментација на 3DOT (Battulwar et al., 2020); 9) користат методи за анализа на текстура и геометриски карактеристики за автоматско извлекување на структурни информации од 3D-

облаци од точки (Lato et al., 2012); 10) применуваат алгоритми за детекција на рабови и анализа на кривини за идентификација на карактеристични линии и површини во 3DOT (Wang et al., 2016); 11) користат методи за компресија и декомпресија на податоци за ефикасно складирање и обработка на големи 3DOT (Ge et al., 2018); 12) применуваат алгоритми за оптимизација и минимално опишување површини за реконструкција на 3D-модели од 3DOT (Kong et al., 2019); 13) користат длабоки генеративни модели, како што се Generative Adversarial Networks (GANs), за синтеза и пополнување на деловите што недостасуваат во 3DOT (Tang et al., 2022); 14) применуваат методи на трансферно учење за подобрување на точноста при класификација на 3DOT со ограничени податоци (Wu et al., 2021), и др. Обидите за автоматско извлекување податоци демонстрираат широк спектар на алгоритми и техники, вклучувајќи традиционални методи за обработка на податоци, машинско учење и длабоки невронски мрежи (интензивно машинско учење).

(Ozturk et al., 2019), презентираат студија каде се предлага практичен и евтин пристап, со употреба на мобилни телефони и фотограметриски методи, за мерење на ориентацијата (насока и пад) на дисконтинуитетите на теренот.

(Pagano et al., 2020), презентираат геоструктурната анализа на облаци од точки добиени со копнено ласерско скенирање и фотограметрија од беспилотни летала како валидни алатки за анализа на системи на дисконтинуитети. При тоа користат полуавтоматски методи за екстракција на сетовите на дисконтинуитети.

(Serazio et al., 2021), илустрираат процес преку кој е можно да се реконструира триангулацијата на геолошки површини 3D добиени како 3DOT. Овие геолошки површини потоа можат да се користат во кодови на одредување на волуменот при генерирање модели на подземни карпи.

(Monsalve et al., 2021), во својот труд ги оценуваат перформансите на софтверот за автоматско извлекување на дисконтинуитети во споредба со рачно картирање на дисконтинуитети со помош на виртуелниот компас.

(Du et al., 2022), предлагаат нов метод, наречен метод на глобално пребарување, за истражување на хетерогеноста на рапавоста на пукнатините во карпите. Таа се карактеризира врз основа на статистичка анализа на рапавоста

на сите примероци извлечени од различни места на дадена пукнатина во карпата со употреба на ласерски скенер со висока точност.

(Guo et al., 2022 и Ge et al., 2023), даваат свој придонес за да се олесни автоматизацијата и прецизноста при картирање на пукнатини во карпи, при што предлагаат нов метод базиран на промената на боите за автоматска, односно полуавтоматска идентификација и добивање на ориентацијата на пукнатините во карпите.

(Chen et al., 2023), предлагаат употреба на паметни телефони и метод на дигитална фотограметрија за мерење на ориентацијата на дисконтинуитетите во карпеста маса. Потоа добиените податоци ги споредуваат со оние добиени со употреба на геолошки компас.

(Chen, N. et al., 2024), презентираат метода за полуавтоматско извлекување на дисконтинуитети кај карпеста маса од 3DOT. Може да се каже дека полуавтоматските методи се релативно помалку застапени отколку автоматските методи за извлекување на дисконтинуитети во карпестите маси.

(Chen, W. et al., 2024), нудат сеопфатен преглед на принципите и примените на техниките за далечинска детекција во геолошките истражувања, истакнувајќи ги најновите достигнувања во користењето на напредни сензори на платформи, интелигентни методологии за обработка на податоци, како и примени на далечинската детекција во геологијата. Дополнително, ги потенцираат предизвиците поврзани со интерпретацијата на податоци, ограничувањата на податоците и оперативните ограничувања, укажувајќи на насоките за понатамошни истражувања за надминување на овие проблеми.

Во однос на вториот дел од презентираната методологија во оваа дисертација кој се однесува на детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености, може да се каже дека освен трудовите кои се опишани погоре и се однесуваат на основите на далечинската детекција, постои и широк дијапазон на други научни публикации кои потесно се однесуваат на оваа тема.

На пример, (Armesto et al., 2009; Sturzenegger et al., 2011 и Sturzenegger et al., 2009b), го истражуваат потенцијалот на терестричните техники за далечинско набљудување за проценка на просечната должина на пукнатините, нивниот

интензитет и големината/формата на блоковите. (Dunning et al., 2009), ги користат истите техники за добивање структурни и геометриски информации за едно свлечиште.

(Abolmasov et al., 2018) изработиле 3DOT добиен со комбинација на LiDAR и SfM технологија, кој е искористен за картирање на дисконтинуитетите. Овие податоци се искористени како влезни параметри за соодветни анализи на стабилноста на косината, кои понатаму се користени за утврдување на потенцијалните зони на ерозија или одрони.

(Abellan et al., 2009; Jaboyedoff et al., 2016), користат 3DOT добиени со копнено ласерско скенирање за мониторинг на карпести маси, од аспект на детекција на одрони и свлечишта. Истата техника ја користат и (Abellan et al., 2010), за мониторинг на одрон со помали димензии.

Поголема студија е направена од (Ventura et al., 2011), каде скапата технологија LiDAR ја користат за следење на активно свлечиште и даваат увид во корисноста на употребата на оваа технологија во мониторинг на процеси кои се контролирани од гравитацијата.

(Baldo et al., 2009), работат на следење на свлечиште кое трае повеќе децении со воведување технологии LiDAR и GPS за понатамошен мониторинг.

(Lato et al., 2009a), зборуваат за оптимизација на технологијата LiDAR во собирање на геолошките податоци и евалуација на одроните, а (Lato et al., 2009b), ја користат истата технологија за увид и мониторинг во стабилност на патни коридори.

(Lucieer et al., 2014), ја користат SfM-технологијата со фотограмetriја со употреба на беспилотно летало за добивање на 3DOT со цел мониторинг на поместувања на сниманиот терен. Истата технологија ја користат (Carvajal et al., 2012 и Niethammer et al., 2010), за утврдување на свлечиштата на еден патен коридор, односно на непристапен планински терен, респективно. (Damjanovic et al., 2021), ја користат оваа технологија за идентификација и картирање на повторно активирано свлечиште.

(Spyridoula et al., 2020), ја користат SfM-технологијата за снимање терен кој во поголемиот дел е непристапен а е подложен на сеизмотектонски влијанија.

Овие снимки ги користат за различни цели меѓу кои и за евалуација на геолошките и хидрогеолошките карактеристики на теренот, влијанието на подземните води во придвижување на почвата и теренот и идентификација на стабилноста на косините.

На крај на ова поглавје, може да се додаде, дека според сознанијата од анализа на достапните трудови, а врз основа на сопствените анализи и мерења, подготвени се неколку трудови прикажани на почеток на дисертацијата. Низ нив, во авторство или коавторство со поголем број лица, веќе се ставени на критички јавен увид постигнатите резултати пред стручната јавност кај нас и пошироко.

3. ДЕФИНИРАЊЕ НА ТЕМАТА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

3.1. Актуелност на темата

Во денешно време, технологијата која е достапна неспорно е на висината на тоа што го нуди, точноста е голема, а алгоритмите ги решава со голема брзина. Се наметнува прашањето дали во структурната геологија, технологијата може брзо, ефикасно и точно да одговори на одредени барања, односно по потреба соодветно да го замени геолошкиот компас, како и некои од принципите на собирање, анализа и презентација на геолошки и геотехнички податоци.

Од овој аспект, во докторската дисертација вниманието е насочено токму кон примената на современи методи и технологии во различни сегменти, процеси и појави во геологијата и геотехниката, а особено во структурната геологија.

Структурната геологија е наука за деформираните карпи кои ја сочинуваат горната обвивка на Земјата (Suppe, 1985). Таа е наука која врши испитување, опис, анализа, класификација и генетска интерпретација на структурите во Земјината кора, ги проучува просторните и меѓусебните соодноси на карпите, нивните деформации и процесите кои довеле до тоа (Јовановски и др., 2012). Во структурната анализа, главната цел е што попрецизно да се опишат геолошките структури кои се предмет на интерес. Мерењата што ги правиме на карпите, кои по својата природа се неправилни објекти, обично имаат одреден степен на несигурност. Типично, несигурностите или грешките се проверуваат со вршење на повеќе мерења и пресметување на просечни вредности (Allmendinger, 2012).

Карпестите масиви лежат на и под површината на Земјата. Тие заедно со почвите се составен дел на градбата на теренот во зона која е интересна за структурни и инженерски анализи. Инженерите во својата работа мораат да се справат со карпестите масиви во однос на стабилност (патишта, ископи, резервоари, тунели итн.) и екстракција на минерални ресурси кај рудниците. Нивното однесување зависи од карактеристиките на неоштетената карпа заедно со степенот на присуство и карактеристиките на дисконтинуитетите. Последниот термин се однесува на какво било разделување во карпест масив со ниска или речиси нулта цврстина на затегнување, а неговата карактеризација е клучен фактор за стабилноста на карпестите косини. Во 1978 година, Меѓународното

здружение за механика на карпи (ISRM) предложи различни методи за карактеризација на дисконтинуитетите (Barton, 1978).

Овие предлози земаат предвид дека податоците се собирани за време на теренска работа и, следствено, биле ограничени од човечките способности и достапните алатки (како компас, мерна лента и сл.). Со тек на времето, компјутерските машини и електронските алатки достигнаа брз развој во однос на карактеристиките на сензорите, меморијата и обработката и со тоа дадоа свој придонес во делот на надминување на одредени ограничувања.

Традиционалните методи се базирани на физички пристап до површината на карпата. Поради ова, добиените податоци можат да бидат зависни од пристапот на терен и од околните услови. Од почетокот овој век па наваму, далечинските техники на обезбедување на податоци се применети на неколку различни полиња, особено во карактеризирањето на карпестите површини (Riquelme et al., 2021).

Тродимензионалната визуелизација на геолошките објекти и структури е клучна за проучувањето во структурната геологија. Со употреба на дводимензионална карта, визуелизацијата на структурните податоци може да биде тешка, дури и топографскиот релјеф да не е многу комплициран. Со користење Дигитален модел на терен (DTM-Digital Terrain Model), се добива можност значително да се подобри визуелниот приказ на еден комплексно деформиран терен (Paor, 1996).

Податоците добиени со употреба на техники за далечинско снимање се состојат од дигитални датотеки кои ги содржат координатите [X, Y, Z] на точките од површината. Големината на овие податоци може да варира од неколку илјади точки (редок и ограничен 3DOT) до стотици милиони или милијарди точки (неколку регистрирани снимања со висока резолуција). Покрај тоа, точките можат да обезбедат многу повеќе информации.

TLS (Terrestrial laser scanner, Терестрички ласерски скенер) инструментите ги снимаат координатите на точките и ја регистрираат енергијата која се враќа до сензорот односно нејзиниот интензитет. Поновите TLS инструменти можат да обезбедат и информации за снимките, проценувајќи ја вистинската боја на

точките која се регистрира преку комбинацијата на црвена, зелена и сина боја [R, G, B].

SfM (Structure from Motion, Структура од движење) процесите не го снимаат интензитетот бидејќи користат фотографии наместо ласерски зрак. Со оглед на тоа што се користат фотографии, тие директно ја обезбедуваат бојата на точките и лесно можат да ги обработат текстурите (Riquelme et al., 2017). Други истражувачи се фокусирале на мултиспектрални или хиперспектрални информации (Buckley et al., 2013; Kurz et al., 2011), овозможувајќи идентификација на литолошките структури или други примени (Liang et al., 2016; Penasa et al., 2014).

Со употреба на најнови техники, како што се LiDAR (Light Detection and Ranging, Детекција и мерење со светлина) (Van Knapen et al., 2006; Unno, 2021) од TLS-техниката и (Hayakawa et al., 2016), од SfM-техниката, може да се направат снимања на одредени геолошки особености, со употреба на дрон (Phuoc et al., 2019), како алатка за SfM-технологијата и паметен телефон - iPhone (Luetzenburg, 2023), како соодветна алатка на технологијата LiDAR. Потоа, со употреба на соодветни софтвери добиените податоци се обработуваат и соодветно се анализираат. При техничката обработка од овие две технологии се добиваат 3D-облаци од точки, 3D-модел на терен, 3D-геолошки контури кои потоа можат да бидат искористени за карактеризирање на карпести маси, како што се ориентација на дисконтинуитети, идентификација и анализа на планарни структури, и одредување параметри кои се важни за геомеханичките проценки.

Добиените модели се во таков формат што можат да се складираат и повторно да се користат, без дополнителна потреба од посета на терен, особено во случаи каде, на пример, во градежништвото или рударството, одреден терен трпи последици врз основа на ископ и сл. Истите 3D-моделите се користат и како алатка за полесна визуелизација на конкретната состојба на терен од перспектива која е недостапна при класично картирање на терен. Со геореференцирање на тие модели се добива реална 1:1 состојба на теренот, при што лесно се утврдуваат правци, протегања, растојанија, регионални и локални раседи и други структури.

За реализирање на целите на докторската дисертација, а со цел правилна примена на нови технологии и техники, добиените резултати се валидизирани со употреба на традиционалните методи. Резултатите кои се добиени со ваквиот пристап можат да дадат придонес во три главни сегменти.

Првиот сегмент се однесува на начинот на прибирање податоци. Неинвазивните техники, кои вклучуваат далечинско снимање на брз, повторлив и непосредно проверлив начин, можат неколкукратно да го зголемат потенцијалот во структурната геологија. Овој начин на добивање податоци дава можност, научниците и инженерите да го зголемат своето присуство на терен и во непристапни области, на еден почист, побезбеден и побрз начин. Спремноста на научникот/инженерот да одговори на овој тип на собирање податоци е осигурена од аспект дека сите овие технологии се базирани на слични принципи. Со тоа се овозможува и негова лесна трансформација помеѓу примената на овие техники во различни гранки или правци од геологијата и геотехниката.

Вториот сегмент се однесува на применетиот софтвер за обработка на овие податоци. Софтверот, споредбено со хардверот, дава многу поголем опсег од аспект на начини на обработка на податоците, нивна анализа, како и нивна презентација. Изборот на достапен софтвер се зголемува секојдневно и секој може да бира со кој или со кои софтвери ќе работи во зависност од неговите можности и потреби. Пристапите може да се менуваат во зависност од предизвиците кои секојдневно се менуваат. Одликата кај софтверите е нивната достапност и лесна апликативност. Бидејќи хардверот и софтверот мораат да држат чекор еден со друг, софтверот постојано се надградува и усовршува според потребите на модерното општество. Со тоа постои и можност за лесно прилагодување на нови софтвери и програми.

Третиот сегмент се однесува на анализата на податоците добиени со горните два сегмента. Бројот на анализите и нивната разновидност е непосредно поврзан со бројот на влезни параметри и разновидноста на влезните податоци. Со добивање разновидни параметри се зголемуваат и опциите за анализа. Со тоа се добива поширок и посеопфатен шаблон кој би бил лесно прифатен и применет на терен.

Оваа дисертација се фокусира на реално применливите сознанија при што има две главни методологии низ примени од практиката, кои вклучуваат максимално искористување на добиените податоци кои се собираат со помош на снимање со дрон и употреба на SfM-технологијата, односно снимање со паметен телефон-iPhone и употреба на LiDAR-технологијата.

Првата методологија се фокусира на собирање структурни податоци од терен, а втората методологија се фокусира на детекција и мониторинг на одредени структурно-геолошки особености. Освен изготвувањето на 3DOT, тие ќе бидат соодветно обработени користејќи ги сите сознанија и најнови докажани методи и техники со цел нивна директна примена. Може да се каже дека оваа тема претставува прв ваков пристап во структурната геологија во Македонија. Исто така, во светски рамки, за прв пат со ваква разновидност и деталност во пристапот е верификувана ефективната на LiDAR-сензорот кај iPhone паметниот телефон во структурната геологија.

3.2. Основни принципи на методологијата за собирање структурни податоци

Геолошките структури се тродимензионални форми, а се претставуваат и толкуваат преку карти на изданоци и контурни карти на структури, каде се прикажани како закривени дводимензионални површини. Целосно тродимензионалните геолошки модели овозможуваат значително подобри интерпретации кои се многу полесни за споделување со други геолози и со пошироката јавност. Техниките се дизајнирани да помогнат во идентификување и развивање на најдобрата интерпретација од нецелосни податоци и да обезбедат непристрасни техники за контрола на квалитетот за препознавање и корекција на погрешни податоци и погрешни интерпретации. Често пати и топографијата на теренот е во директна корелација со геолошките структури кои се наоѓаат во длабина и таа информација исто така треба да се искористи (Groshong, 2006).

Ориентациите на дисконтинуитетите се од големо значење за воспоставување геолошки модели и оценување на стабилноста на косините кај карпите (Li et al., 2015). Тие се мерат со геолошки компас (сл. 1a).

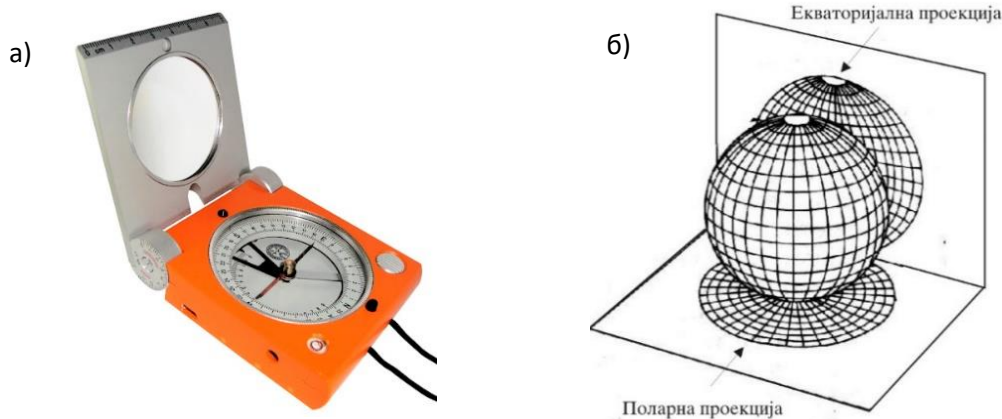
Со деталното набљудување и проучување на откриените делови од карпите (изданоците) се собираат податоци за морфологијата на планарните и линеарните структури, нивната просторна ориентација и др. Просторната ориентација на планарните и линеарните структури е дефинирана со т.н. елементи на пад. Под овој поим се подразбираат следните елементи (Јовановски и др., 2012):

- азимутот на падната насока на структурниот елемент дефиниран со аголот зафатен со правецот север,
- падниот агол на структурниот елемент,
- правецот на протегање на структурниот елемент.

За дефинирање на ориентацијата на секој структурен елемент во просторот, доволно е мерењето на азимутот на падната насока и падниот агол, кои скратено се означуваат со ЕП (скратеница од елементи на пад).

Откако ќе ја знаеме ориентацијата на структурите, можеме да ја одредиме нивната положба во длабочина преку екстраполација или интерполација (Suppe, 1985).

Еден од начините за ориентација на рамнина во структурната геологија е преку нејзиниот пол. Пол е точка кој ја претставува ориентацијата на рамнината во стереографска проекција. Полот на рамнината ретко се мери на терен, но е корисен во манипулирање со податоци, како што ќе видиме подоцна.



Слика 1 а) Геолошки компас. б) Поларна и екваторијална проекција на топка
Figure 1 a) Geological compass b) Polar and equatorial projection of a sphere

За полесна визуелна презентација на половите се користат стереограми (Turner et al., 1963; Ramsay, 1967; Hobbs et al., 1976). Стереограмот (Lisle et al., 2004), претставува проекција на линиите на географска ширина и должина на една полутопка на кружен графикон, односно проекција на една топка во хоризонтална или вертикална рамнина (сл. 16). Во оваа дисертација е користен софтверот Dips v5.1 (www.roscience.com) за графички приказ на стереограмите.

Според геолошкиот процес преку кој се формираат дисконтинуитетите, тие може да се класифицираат на следниов начин (Петров и др., 2014):

Фолијацијата е типичен структурен елемент на внатрешната градба на метаморфните карпи, која може да се надоврзува на примарната слоевитост или да биде развиена по кливажот. Како планарна структура, фолијацијата настанува за време на процесот на деформацијата и рекристализацијата на карпите, кога доаѓа до ориентирање/насочување на зрната.

Линеацијата претставува линеарна структура во карпите, чие формирање може да биде резултат на различни геолошки фактори, а манифестирана со пресеци на планарни површини со различна ориентација, со разместување и ориентација на минерални зрна и фрагменти во карпестите маси, може да произлегува и од линеарниот облик на зрната и фрагментите, од појавата на паралелни тектонски елементи како што се оските на микронаборите, оските на кливажните смолкнувања, стриите и минералната ориентација по површините на тектонските огледала и друго.

Раседите се тектонски создадени површини на кршење (кинење) на карпестите маси, со кои доаѓа до издвојување на тие маси на крила (блокови) нивно и движење. Проучувањето на раседите е мошне важно, бидејќи тие се присутни во сите видови карпи, застапени се на терени со различен тектонски развој, тие се придружни структури на процесите на набирање (пред, истовремено и потоа), со раседи се издвоени планетарните структури, т.е. тектонските плочи, океаните, платформите и геосинклиналите.

Кога карпите се кршат како одговор на стрес, резултатот од тоа кршење се нарекува пукнатина (Ramsay et al., 1997). *Пукнатините* се руптурни структури кои ги сегментираат карпите на блокови (крила) кај кои не доаѓа до поместување или поместувањето е незначително. Пукнатините се најраспространети руптурни

структури кои се образуваат за време и по генезата на седиментните, магматските и метаморфните карпи. Исто така, тие се создаваат и како придружни структури на крупните наборни и раседни структури.

Жилите се геолошки тела со специфичен облик, кои многу често се јавуваат во комплекси од магматски и метаморфни карпи, а ретко и во седиментни маси. Тоа се пукнатини и прслини, помали раседни структури и меѓуслојни површини, исполнети со минерален и карпест материјал, претставувајќи дајкови и силиви со различна должина и дебелина.

Словите се типични структурни форми кај седиментни карпи како резултат на различни циклуси на седиментација.

Смолкнувања (Shear) се форми кои се јавуваат кај карпи деформирани со набирање. Овие видови на дисконтинуитети се поразредени и се исполнети со мека почва или карпа.

Човечки предизвикани дисконтинуитети се предизвикани од експлозија или механички ископ. Тие се појавуваат непланирано и генерално не се постојани.

Во структурната геологија, за одредување на карактеристиките на дисконтинуитетите, една од основните алатки е геолошкиот компас, со помош на кој се одредуваат елементите на пад, односно азимутот на падната насока и падниот агол, како и протегањето. Во денешно време преку анализа на податоци добиени од 3DOT, постои можност да се добијат елементите на пад на геолошките структури. Во принцип, методите за добивање на ваков тип на податоци често се скапи, па на тој начин, ги охрабруваат корисниците да бараат прифатливи алтернативи за да ги постигнат посакуваните точности.

Комерцијализацијата на технологијата LiDAR кај телефоните претставува новитет, иако оваа технологија веќе одреден период се користи за комерцијални цели со алатки кои се монтираат на најразлични уреди, како возила, дрони и сл. Сепак телефонот според своите карактеристики (компактност, преносливост, сите го имаат) се наметнува како универзална алатка за комерцијални и рекреативни потреби.

Како резултат на побарувачката на пазарот, и желбата да се понуди поразличен производ, во 2020 година компанијата Apple Inc. го произведе првиот телефон со иновативен вграден сензор базиран на детектирање со помош на светлина (LiDAR) и програмски интерфејс за апликации (API) за зголемена реалност (AR). Почнувајќи од iPhone12 Pro, сите понатамошни „Pro“ верзии на паметниот телефон, вклучувајќи ги и тековните таблети iPad, го поседуваат овој сензор. Иако сензорот iPhone LiDAR не е спремен да скенира површини на ниво на професионалните TLS-уреди, сепак овозможува генерирање 3D-мрежи со вертикална ориентација и размер 1:1. Се разбира за оваа хардверска алатка да функционира потребен е и соодветен софтвер. Постојат повеќе софтвери кои работат на ист начин, а некои од нив се: 3D Scanner App (Laan Labs 2021), Lidar Scanner, Polycam, Lidar Scanner 3D и др. Добиените снимки содржат податоци кои можат да се обработат и да се добијат најразлични повратни информации, да се измерат должини, падови, да се добијат одредени карактеристики и сл.

Ова го поставува iPhone како потенцијален кандидат за работа со различни карактеристики на карпести изданоци, односно како корисна алатка за секој геолог. Идејата за ласерско скенирање на карпести површини со помош на уред што постојано го носиме со нас, може да го промени начинот на кој експертите од областа на структурната геологија и геотехника ги добиваат потребните податоци.

Се разбира, сложеноста на оваа тема, а и идејата паметниот телефон да стане алатка во структурната геологија, треба внимателно да се анализира, и да се подложи на неколку различни валидации. Тие се направени од различни аспекти како што се: употреба на геореференцирање, споредба на облакот од точки, споредба на добиените мерни податоци и повеќекратна независна анализа на добиените резултати.

Во овој случај, најголема тежина има валидацијата на добиените мерни резултати од новите технологии со оние кои се добиени на традиционален начин, односно со употреба на геолошкиот компас.

Еден начин на валидација на 3DOT е неговата споредба со друг облак од точки добиен со друга технологија. Овде станува збор за 3DOT кој е добиен со SfM-технологијата со употреба на беспилотно летало - дрон. Снимките добиени

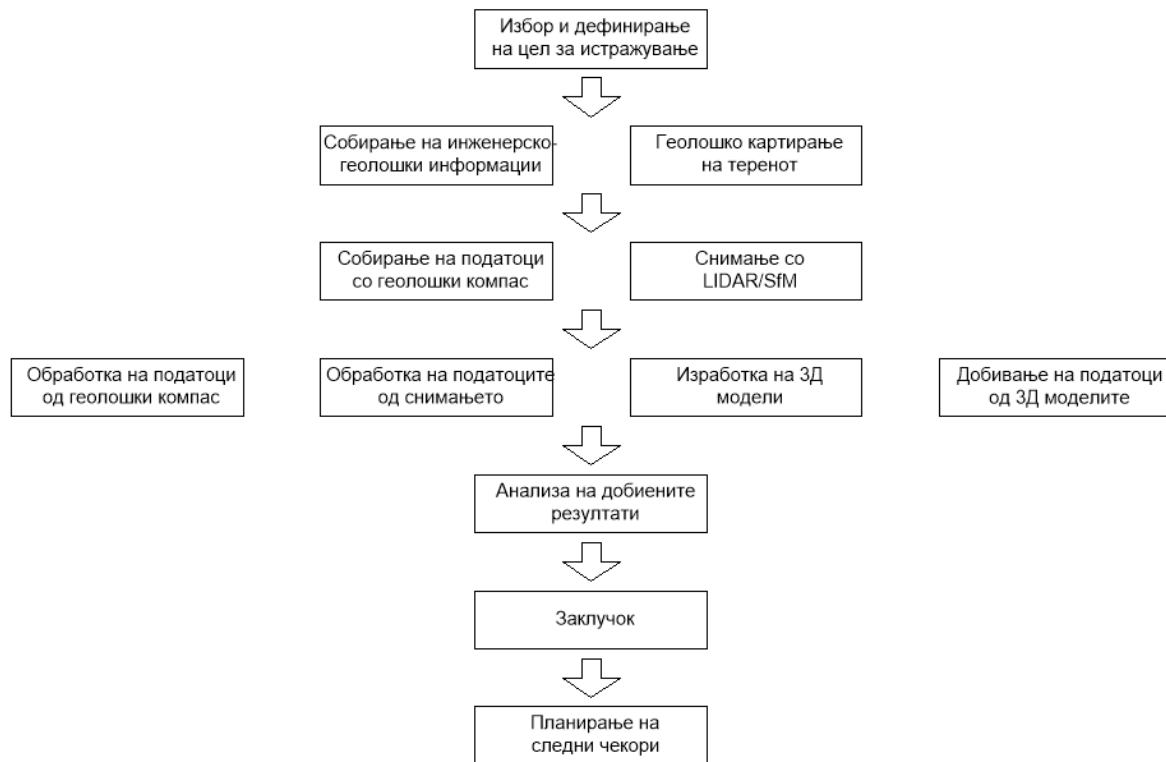
со оваа технологија можат да дадат 3DOT кој е многу детален и прецизен и е соодветен како урнек за споредба на добиениот облак од точки со помош на iPhone. Процесот за развој на оваа задача ги вклучува следниве основни чекори (сл. 2):

- избор и дефинирање на цел за истражување,
- собирање релевантни инженерски и инженерско-геолошки податоци,
- запознавање со теренот и негово геолошко картирање,
- прибирање податоци со употреба на геолошки компас,
- снимање на теренот со употреба на соодветна технологија,
- обработка на добиените податоци од геолошкиот компас,
- обработка на добиените податоци од снимањето,
- изработка на соодветни 3D модели,
- екстракција на податоци од 3D моделите,
- анализа на добиените резултати,
- заклучок,
- правење план за следните чекори.

Анализата на добиените резултати е направена на два начина: Едниот е со употреба на различни статистички и други компаративни методи за анализа преку стереограми, Excel-табели и други типови на дијаграми. Другиот начин е со воведување на т.н. полуавтоматска метода на добивање на речиси целосно автоматизиран начин за извлекување на потребните податоци.

Кога станува збор за полуавтоматската метода, од аспект на најновите истражувања поврзани со оваа тема, во последните две години се појавија неколку позначајни трудови што генерално покриваат еден конкретен сегмент во полуавтоматското и автоматското анализирање на добиените 3D-облаци од точки. Овде се издвојуваат (Wu. et al., 2024), кои го користат sparrow search algorithm (SSA) за автоматска обработка. Потоа (Lu et al., 2024a) и (Kang et al., 2024), кои користат повеќе различни алгоритми за автоматска обработка. (Seyedahmad et al., 2024) и (Cardia et al., 2023), користат неколку различни алгоритми за полуавтоматска обработка на податоците. (Panigrahi et al., 2023), се фокусирани на споредба помеѓу резултатите што ги дава DSE и FACETS методата, нешто што претставува и дел од овој докторат. (Zhou et al., 2024),

испробуваат автоматска метода за детекција на свлечишта. (Lu et al., 2024b), даваат сосема различен пристап кон извлекувањето на дисконтинуитетите.



Слика 2 Процедура за имплементирање на првата методологија
Figure 2 Procedure for implementing the first methodology

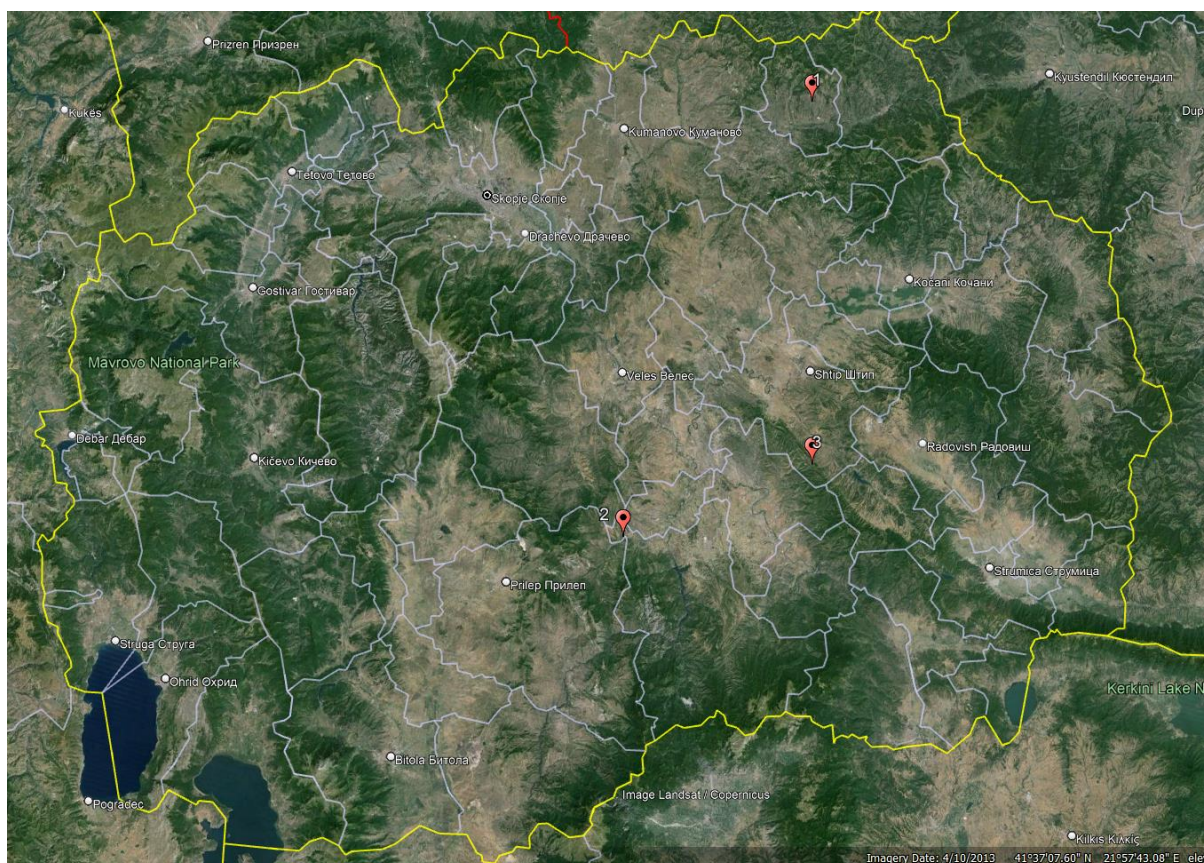
Може да се каже дека во последно време на ова поле фокусот е ставен на полуавтоматските и автоматските методи за обезбедување излезни податоци, каде резултатите сè уште не се на задоволително ниво, или пак не даваат константно поволни резултати. Автоматските методи за комплетно извлекување на дисконтинуитети се базирани на повеќе различни идеи, алгоритми и методологии. Иако даваат ветувачки резултати, сепак нивната реална примена и реални позитивни резултати многу варираат. Тие, исто така, имаат тенденција да детектираат лажно позитивни резултати поврзани со негеолошки карактеристики како што се сенки, патишта или вегетација (Vasuki et al., 2014). Затоа, дури и целосно автоматизирани методи моментално бараат значителен напор за отстранување на негеолошките карактеристики, за да се осигури дека карактеристиките кои ни требаат се правилно детектирани (Thiele et al., 2017). Полуавтоматските методи, од друга страна, даваат одредена доза на контрола на истражувачот на целиот процес и даваат сосема задоволителни и повторливи

резултати (Riquelme et al., 2014; Guo et al., 2018; Li et al., 2019; Delgado-Reivan et al., 2023). Во тој контекст, за потребите на оваа дисертација, е направено опсежно истражување за достапните полуавтоматски методи, при што се избрани две најистакнати во поглед на доверливоста, според достапната стручна литература. Применетите полуавтоматски методи кои се сосема различни меѓу себе, дадоа сосема коректни и логични резултати. Тие методи се DSE и FACETS при што и двете спаѓаат во GNU General Public License (ГНУ-ова општа јавна лиценца) која од 1989 година овозможува да се олесни размената и слободното користење на изворниот код меѓу програмерите. Полуавтоматските методи се состојат во тоа што користат сложени алгоритми за компјутерско анализирање на 3DOT, со тоа што му овозможуваат на корисникот да управува со процесот на класификации.

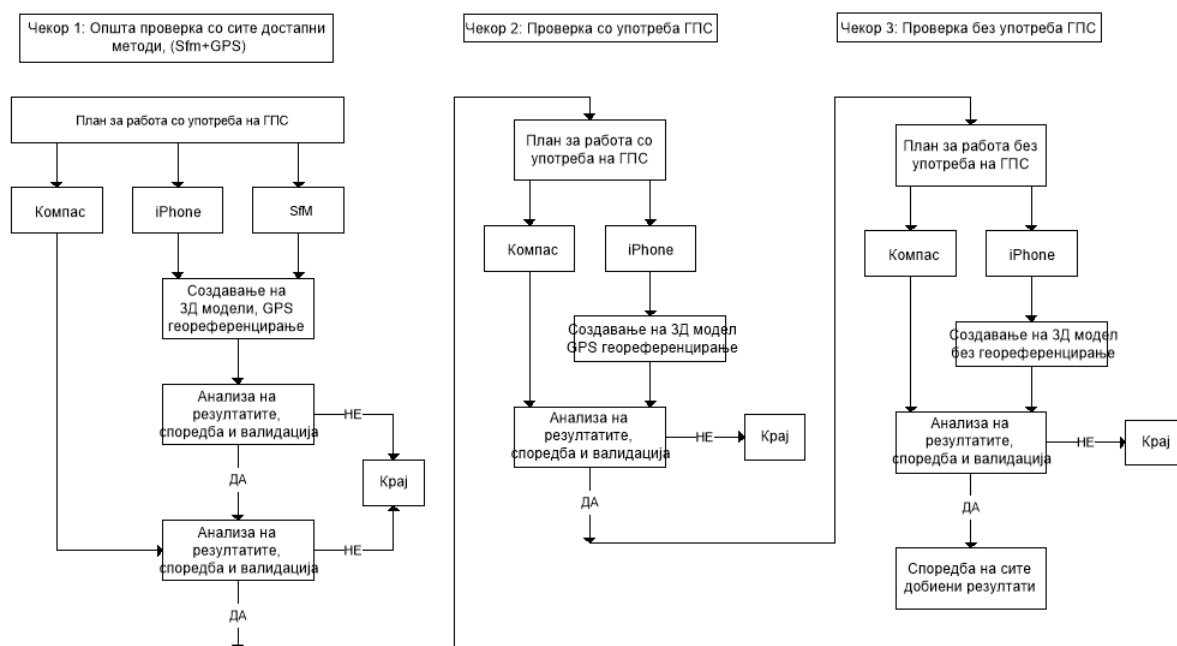
Од аспект на геолошка разновидност, односно елиминирање на влијанието на геологијата врз методологијата, за оваа цел се избрани три различни локации со три различни изданоци и типови на карпи. Со тоа се избегнува монотоноста на направените снимања и анализи, користени се различни генерации на iPhone, и се обработени изданоци со различен геолошки состав и различни структурни особености.

Првата локација се наоѓа во близина на селото Милутинци во Северозападна Македонија во изданок од микашисти. Втората локација е во близина на регионалниот пат Кавадарци - Прилеп, близу селото Фариш во изданоци од банковити варовници, а третата се наоѓа на регионалниот пат Штип - Неготино на планината Серта во флиш, односно песочници (сл. 3).

Кај првиот локалитет, снимањето е извршено со максимална употреба на достапните ресурси и техники. Со докажување на функционалноста, се премина на снимањето кај вториот локалитет каде делумно се потврди независноста на користените техники. По докажување по втор пат на оваа техника, се премина на снимање кај третиот локалитет, каде се искористи функционалноста на iPhone, без дополнителна помош на GPS-уредот (сл. 4).



Слика 3 Позиции на анализираниите локации 1) Милутинци 2) Фариш 3) Серта
Figure 3 Positions of the analyzed locations 1) Milutinci 2) Farish 3) Serta



Слика 4 Графикон за начинот на спроведување на снимањата
Figure 4 Chart for the methodology of conducting surveys

При снимањето на првиот локалитет кај село Милутинци, се искористени сите достапни технологии за валидизација на добиените резултати. Освен основната снимка на изданокот направена со iPhone, направени се и останатите чекори: GPS снимање на геореферентни точки кои подоцна се користени за геореференцирање на добиениот 3DOT; снимање на изданокот со дрон и примена на SfM-технологијата за добивање 3DOT за споредба; мерење со геолошки компас. На тој начин се докажува високиот степен на функционалност на добиениот 3DOT со користење паметен телефон.

Кај вториот локалитет близу село Фариш, е извршено снимање со iPhone, користен е GPS-уред за геореференцирање и направени се мерења со геолошкиот компас. При тоа, по вторпат се валидизирани добиените податоци без потреба од релативно поскапата употреба на дрон, со што е добиен и континуитет во самата работа.

Кај третиот локалитет на планината Серта, е извршено снимање со iPhone и се направени контролни мерења со геолошкиот компас. 3DOT потоа е рачно геореференциран без употреба на GPS и со тоа по третпат се валидизирани добиените податоци и е докажано дека не мора да се поседува GPS-уред, за да се добијат точни податоци за мерените структурни елементи.

Освен основните придобивки за валидација на добиените мерни елементи за азимут на протегање и падниот агол, исто така е направена и основна споредба на информациите што се добиваат при снимање различни геолошки структури, како што се микашисти, варовници и песочници. И од оваа споредба се извлечени одредени заклучоци.

Со тоа се реализирани две главни цели на првата методологија за собирање структурни податоци со употреба на 3DOT добиен со iPhone, а тоа се: докажување на употребливоста на нискобуџетната опција за мерење на елементи на пад со користење паметен телефон, и влијанието на различната геологија врз квалитетот на добиените податоци.

3.3. Основни принципи на методологијата за детекција и мониторинг на структурно геолошки карактеристики.

Појавата на свлечишта, одрони и други типови на нестабилности се многу чести на територијата на Република Македонија, особено на патните правци во периодот на зимските месеци (Пешевски, 2014). Затоа освен детектирањето на овие појави заради нивно подобро разбирање, како покрај примената на современи методи за детекција и карактеризација на нестабилните појави (Неделковска, 2023), потребен е и постојан мониторинг.

Оваа идеја доаѓа од основните постулати на практичност и применливост. Станува збор дека снимањата со кои се добиваат 3DOT се достапни и поевтини. Со тоа и нивната повторливост станува сè полесна. При снимањето на различни површини, особено на косини на усеци или косини во рудници, за потребите на пресметка на количини на ископ и сл. се добиваат 3DOT во постојани временски интервали (на пример еднаш месечно), кои понатаму остануваат архивирани. Која било снимка направена на овој начин, може да се архивира, секогаш на истата локација да се направи нова снимка, и тие снимки меѓусебно да се споредат со цел детектирање на одредени промени.

Следењето на косините кај патиштата или рудниците, претставува клучна активност која не само што обезбедува безбедна работна средина при изведба на работните активности, туку и придонесува за безбедноста и при експлоатација на овие објекти.

Во однос на мерењето и мониторингот на лице место, многу научници користеле уреди за следење како што се сензори за поместување, инклинометри, сензори за содржина на вода и притисок на порите на водата, во комбинација со технологијата IoT (Internet of Things - интернет на нештата) и GNSS (Global Navigation Satellite System - глобален навигациски сателитски систем) технологија за следење на косините (Glastonbury et al., 2000). Овие уреди за следење ја подобруваат ефикасноста на мониторингот (Stead et al., 2006). Сепак, овој тип на сензорска опрема обезбедува точкест мониторинг и не може да постигне сеопфатно покривање на косините. Податоците од мониторингот доаѓаат од различни расеани сензори, а има малку релевантни информации за мониторинг за точките за инсталација што не се сензори (Stead et al., 2011).

Идејата кај оваа методологија е да се презентира пример за детекција и мониторинг на карактеристики и промени на косини во карпа со употреба на 3D облак од точки кој се добива со употреба на копнени LiDAR-скенери или со употреба на SfM технологијата. Во овој случај користиме снимки кои се направени за друга намена, а може да се искористат за потребите на докажување на оваа методологија. Тоа претставува евтин и брз начин на нов пристап кој го заменува класичното истражување на терен, т.е., претходно споменатите методи за следење. Исто така, претходната практика вклучуваше следење на одредена област по појавата на опасност. Во овој случај, овој метод претставува најрана форма на постојано следење и откривање можни свлечишта. Во овој контекст, објавени се различни трудови кои елаборираат за слични проблеми користејќи 3DOT (Riquelme et al., 2014; Thiele et al., 2017; Serazio et al., 2021; Marjanović et al., 2021; Ge et al., 2023).

Фокусот кај втората методологија на работа низ примени од практиката е на податоците кои се добиени при изградба на експресниот пат А2 Крива Паланка - Чатал, конкретно на делницата Длабочица - Чатал. Снимките се направени во усек ископан во карпа, албит-епидот-хлоритски шкрилци.

Користени се снимки од усек 4 на предметната делница (km 11 + 620 – km 12 + 244), кои се добиени со помош на SfM-технологијата, односно снимање со дрон, при што се добиваат 3DOT. Овие снимки се правени еднаш месечно во подолг временски период. Изработени се две фазни анализи со употреба на овие современи технологии. Едната е детекција на свлечиште на мал дел на десната косина кај усекот. Другата е примена на различни геометриски функции кои ги поседуваат современите софтвери на снимки од истиот усек. При реализирање на втората методологија за оваа дисертација се добиени високо квалитетни резултати и се извлечени корисни заклучоци.

Методологијата на истражувањето се состои во пет фази. Тоа се (сл. 5):

- Добивање податоци од терен.
- Обработка на податоците и добивање 3D-облак од точки.
- Геореференцирање на облакот од точки.
- Споредба на добиените облаци од точки.
- Анализа на добиените резултати.



Слика 5 Фази на примена на методологијата за детекција и мониторинг

Figure 5 Phases of methodology application for detection and monitoring

4. МЕТОДИ НА ИСТРАЖУВАЧКАТА РАБОТА

Методологијата на работа кај докторската дисертација опфаќа примена на различни научни методи, употреба на различен хардвер и софтвер, како и различни методи на анализа. По претходна консултација на обемна литература, искористени се сите достапни технологии со цел преку конкретизација да се дојде до соодветни резултати. Сите сознанија во оваа дисертација произлегоа од директни теренски активности, проследени со обемна кабинетска работа, односно со комбинација на теренска и канцелариска работа. Овој концепт е фундаментален особено во геологијата, имајќи ја предвид суштината на нејзиното постоење.

Во последните две децении научната заедница покажа зголемен интерес за извлекување информации за дисконтинуитети од сетови на податоци добиени со далечинско снимање. Ова е доста интересно, бидејќи се овозможува карактеризација на дисконтинуитетите без физички пристап до површината (Ivanovski et al., 2023). Подолу подетално ќе бидат дефинирани традиционалните и современите методи за анализа на структурни карактеристики.

4.1. Традиционални методи за анализа на структурни карактеристики

Традиционалната метода за регистрирање и мерење на елементи на пад на геолошки структури вклучува употреба на геолошки компас. Елементите на пад на слој и на пукнатини за потребите на оваа дисертација беа мерени со помош на Кларов компас, конкретно со моделот на геолошки компас од германската компанија Freiburger Präzisionsmechanik (таб. 1) и (сл. 1а и сл. 6).

Работата со геолошкиот компас претставува употреба на специјализирана алатка со која се мерат и се запишуваат корисни податоци за структурните карактеристики на карпите и нивните формации. Компасот е направен за да ги одреди насоката и падот на карпестите површини, раседи, пукнатини и други структурни елементи.

Табела 1 Технички спецификации на користениот геолошки компас

Table 1 Technical data for Freiburger Geologist's Compass

Graduated circle	counterclockwise numbering	10° (10 gon)
	Ø of compass circle	45 mm
	reading	2° (2 gon)
	estimation	0.5° (0.5 gon)
hinge Incllnometer	diameter	22 mm
	reading	5° (5 gon)
	estimation	1° (1 gon)
clinometer	measuring range	± 90° (± 100 gon)
	reading	2° (2 gon)
	estimation	0.5° (0.5 gon)
graduated edge	length	70 mm
	reading	1 mm
	settling time of the needle	< 50 s
	accuracy of directional indication	± 0.5° (± 0.5 gon)
	adjustment of declination	user-defined
	tilting range of inclination measuring plate	225° (250 gon)
	indication of circular level	ca. 40'
	indication of tubular level	ca. 60'
Instrument	compass dimensions (mm)	93 x 76 x 22 mm
	weight	0.28 kg
leather case	dimensions (mm)	104 x 91 x 45 mm

Мерењето се врши со поставување на компасот на рамна површина на карпата, негово нивелирање и отчитување на податоците кои се добиваат од позицијата на магнетната игла и линијарот за агли. При мерењето на ориентациите, добиените податоци се запишуваат во тетратка.



Слика 6 Мерење со геолошки компас а) с. Милутинци б) Фариш в) Серта
Figure 6 Measurement with geological compass a) v. Milutinci b) Farish v) Serta

4.2. Современи методи за анализа на структурните карактеристики

Во следните неколку поглавја ќе бидат презентирани користените технологии, хардвер и софтвер.

4.2.1. Користени технологии

Како современи методи за собирање структурни информации од различни геолошки форми, како и за добивање 3D-визуелизација на терен, во оваа дисертација се користени технологиите LiDAR и SfM. И двете технологии можат да дадат 3DOT кои понатаму може да биде анализиран за добивање најразлични параметри.

4.2.1.1. LiDAR

Ласерски скенер 3D или копнен ласерски скенер/Terrestrial Laser Scanner (TLS) ја користи технологијата LiDAR. Овој инструмент може да скенира површини до 6000 m² (Riquelme et al., 2021), со голема брзина на собирање на податоците (до 222 000 мерења/секунда) (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017). Овие мерења користат најразлични инструменти кои ја поседуваат технологијата LiDAR од сателити, преку најразлични уреди кои може да се користат монтирани на различни возила или рачно, до тоа да бидат вградени во телефонски уред.

Ласер/LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) е направа која произведува и емитира зрак (или серија на пулсеви) со високо кохерентно, дирекционално и фазно електромагнетно зрачење. Ласерските системи може да се користат за добивање голем број 3D-информации од терен со екстремно брза стапка на снимање. Иако LiDAR вообичаено е терминот кој се користи во литературата, се користат и термините како ласерски скенер или ласерски одредувач на далечина (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2021). Основните принципи и процеси се добро познати уште од 1990-те, додека научната литература брзо се зголеми во периодот 2005 - 2010 година. (Petrie et

al., 2008), даваат свој придонес за разбирање на основните принципи на TLS. Деталните правила може да се најдат напишани од Hiremagalur et al., 2007.

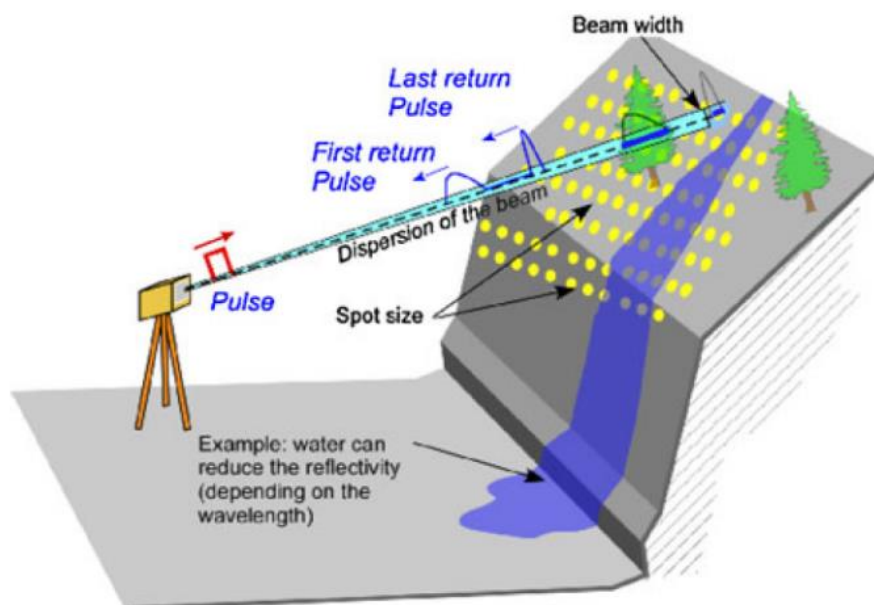
Ласерскиот скенер се состои од трансмитер/рисивер на ласерски зрак и уред за скенирање. Постојат две методи за одредување на растојанието (Wehr et al., 1999): методот фаза и методот пулс. Методот фаза е попрецизен, но е ограничен во опсегот (Petrie et al., 2008).

И сензорите на воздухопловите и тие на земјените платформи испраќаат ласерски импулси кои се рефлектираат од различни објекти (површината на земјата, вегетација, вештачки конструкции и сл.) и го снимаат вратениот сигнал. Пулсните ласерски скенери ја користат мерката на времето на лет (Δt) на ласерскиот импулс за да ја пресметаат оддалеченоста ($2 \times d = c \times \Delta t$), а користат огледала или механика за ориентација на ласерскиот зрак во добро дефинирана насока. Познавањето на насоката на видното поле (LOS) и положбата на уредот овозможува определување на позицијата Δx , Δy , Δz на рефлектирачката површина во однос на уредот. Оддалеченоста се мери без вештачки рефлектори над област еднаква на димензијата на ласерското место (ширина на зракот проектирана на топографијата), која се зголемува со оддалеченоста поради дивергенцијата на ласерскиот зрак (Petrie et al., 2008).

Апсолутната позиција на сензорот ALS е определена со Глобален позициониран систем (GPS), а неговата положба се снима со инерцијален систем. Конечно, координатите на 3DOT се проценуваат ($x+\Delta x$, $y+\Delta y$, $z+\Delta z$) со точност од околу 15 cm (1σ), користејќи земски контролни точки (Habib, 2008). Во пракса, позицијата и ориентацијата (положбата) на сензорот TLS не се точно определени на теренот, освен ако TLS уредот не е исто така поврзан со инерцијален систем и GPS. Ова го прави неопходно понатамошното геореференцирање на TLS на облакот од точки. Овој процес се изведува со порамнување на TLS 3DOT, или користејќи сет на земски контролни точки или користејќи друг веќе геореференциран облак од точки.

LiDAR-сензорот во телефоните, вклучувајќи го iPhone 13 Pro го користи Time of Flight (TOF) или методот пулс за добивање информации за длабочина во просторот. Овој метод вклучува емитирање на ласерски пулс и мерење на времето кое е потребно за тој да се врати откако ќе се одбие од објектот во

природата. Со пресметка на времето кое било потребно за двонасочното патување на пулсот, LiDAR-сензорот може да го утврди растојанието до различни точки во просторот и да креира длабинска карта или облак од точки кои го претставуваат сниманото подрачје (сл. 7) (Jaboyedoff et al., 2012).



Слика 7 Принципи на прибирање податоци со ласерски скенер, прикажани на примерот на TLS

Figure 7 Principles of laser scanner data acquisition, showing the example of TLS

Технологијата LiDAR е интегрирана во моделите на Apple-овите iPhone Pro, почнувајќи со iPhone 12 Pro и продолжувајќи со следните модели. Овој напреден сензор ги подобрува можностите на уредот, особено во проширена реалност (augmented reality - AR), фотографија, и слабо осветлени средини. Тој е дизајниран да биде екстремно брз и прецизен при што мери растојанија на фотонско ниво и може да направи до 300 000 мерења во секунда. Ова овозможува создавање многу детални длабински мапи на околината. Една од главните употреби на LiDAR-сензорот во iPhone е подобрување на искуствата AR (Augmented Reality). Сензорот обезбедува точни податоци за длабина во просторот, што помага дигиталните објекти да се постават пореалистично во реалниот контекст. ARKit, платформата за проширена реалност на Apple, ги користи овие податоци за создавање имерсивни и интерактивни искуства. LiDAR-сензорот значително ги подобрува и фотографските способности на

iPhone. Овозможува побрз и попрецизен автофокус во слабо осветлени услови со разбирање на длабочината на просторот кој се снима. Ова е особено корисно за портрети во ноќен режим и снимање детални фотографии во затемнети средини. Исто така го подобрува портретниот режим, овозможувајќи подобро откривање на рабовите и природни ефекти на замаглување на заднината. LiDAR-сензорот може да се користи за 3D-скенирање и мапирање апликации. Може да создаде прецизни 3D-модели на објекти и околина, кои можат да се користат во различни области, вклучувајќи внатрешен дизајн, архитектура и игри (Riquelme et al., 2021). Apple не ги открива спецификациите за LiDAR-сензорот кај iPhone.

4.2.1.2. SfM (Structure from Motion)

Беспилотните летала (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) се појавуваат како ефикасна алатка при управувањето со опасностите од свлечишта, овозможувајќи брзо собирање слики и производство на фотомозаици со висока резолуција од кои може да се направи безбедна евалуација на деформациите и активностите на свлечиштата. Се одликуваат со способност за: (1) брзо собирање слики со висока резолуција, (2) производство на прецизни фотомозаици со висока резолуција, и (3) безбедна далечинска евалуација на деформациите на свлечиштата (Brook et al., 2019).

Анализата на дисконтинуитетите кај изданоци од карпа преку 3DOT кои се добиени преку далечински техники како што е SfM, добива сè поголемо значење во последните години. SfM обезбедува геометриски информации за површината на карпата, овозможувајќи добивање податоци од места кои се тешко достапни и нивна безбедна анализа. Со оваа техника, се идентификуваат сетови на податоци со висока резолуција на различни нивоа и по релативно ниска цена, што ја прави идеална за нискобуџетни истражувања во оддалечени области (Delgado-Reivan et al., 2023).

Методот на фотограметрија е користен многу пати за да се соберат 3D-информации од 2D-слики (на пр., форма, положба и големина) (Grussenmeyer et al., 2002). Таа нашла примена во различни области, како што се моделирање на фасади (Fritsch et al., 2013), згради (Alidoost et al., 2015 и Hanan et al., 2015),

споменици (Suwardhi et al., 2015 и Murtiyoso et al., 2017) итн. Развојот на технологијата на сензори за снимање го направи овој метод одлична алтернатива или дополнување на терестричките ласерски скенери (Grenzdörffer et al., 2015; Grussenmeyer et al., 2010; Remondino, 2011). Дополнително, се зголеми и користењето на нискобуџетни сензори, како оние што се вградени во паметните телефони (Nocerino et al., 2017).

Слично на тоа, подобрувањата во алгоритмите за густо усогласување (Hirschmüller, 2005; Furukawa et al., 2009) го направија фотограметрискиот процес многу моќен, овозможувајќи добивање густо распоредени облаци од точки со точност од една точка по пиксел (Achille et al., 2015). Во фотограметријата, беспилотните летала овозможија снимање на слики од блиски растојанија, направени од висина. Ова овозможи 3D-мапирање на тешко достапни или непристапни делови (Murtiyoso et al., 2016). Фотограметриските принципи за генерирање на 3D-сцена се базираат на принципите на бинокуларна визија, просторна пресекација, релативна ориентација и апсолутна ориентација, при што се користи геометриската врска помеѓу стереослики и апсолутната трансформација на координатните системи (Zhang et al., 2008).

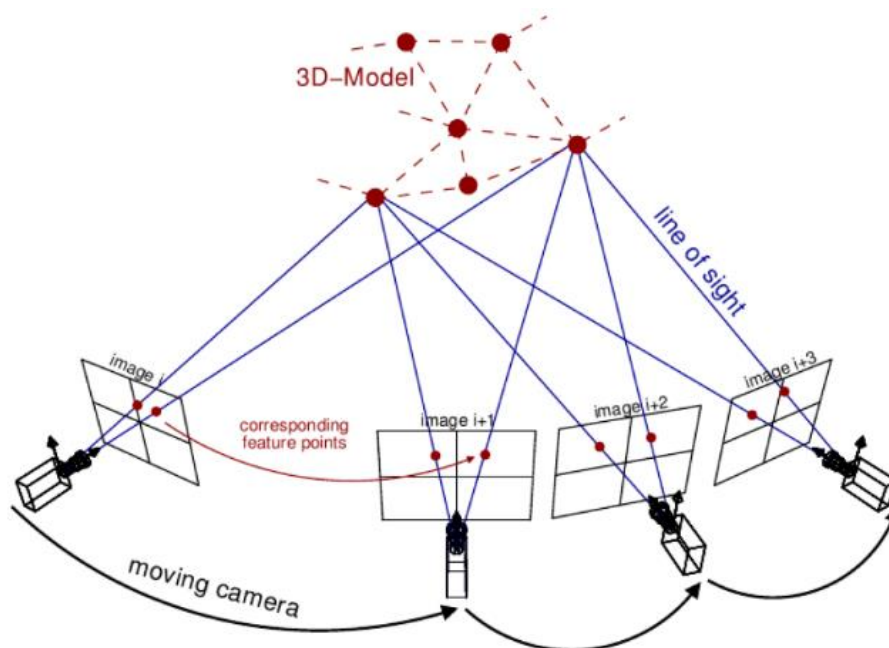
Во овој случај, SfM-технологијата е применета со употреба на беспилотно летало. Како што и сугерира неговото име, тоа претставува летечка платформа која се контролира од земна станица користејќи комуникациска врска за добивање податоци (Colomina et al., 2014). Иако првично е развиено за воени цели, неговата употреба во сите области постојано расте. Дополнително, интеграцијата на сензори за снимање и од неодамна, на уреди за позиционирање, како што се приемниците GNSS (Global Navigation Satellite Systems), го зголеми неговиот потенцијал за примени на блиски растојанија, бидејќи го дополнува класичното земјено прибирање податоци од блиски растојанија (Nex et al., 2014).

SfM-техниката споредбено со LiDAR, е релативно поевтина и затоа е нашироко прифатена помеѓу научната јавност на ова поле. За употреба на оваа технологија се потребни дигитална камера и по потреба, далечински наведувано летало. Таа претставува техника на сликање со фотограметриски опсег за проценка на тридимензионални структури од дводимензионални секвенци на

слики кои меѓу себе може да се спојат со помош на сигнали од локално движење на камерата (Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Micheletti et al., 2015; Salvini, 2017; Murtiyoso et al., 2018).

SfM користи алгоритми за идентификување соодветни одлики во серија на преклопени дигитални слики и ја пресметува локацијата и ориентацијата на камерата од диференцијалните позиции на повеќе соодветни карактеристики. Од овие пресметки, преклопените слики потоа се користат за реконструкција на „редок“ или „груб“ 3D-модел на 3DOT на фотографираниот објект, површина или сцена (Brook et al., 2018; Dell'Unto, 2016) (сл. 8).

Постојат неколку пристапи и алгоритми за реконструкција на ориентацијата и геометријата на камерата со помош на добиените слики. Моментално, најкористениот метод се заснова на SfM-алгоритмите. Овие алгоритми припаѓаат на полето за истражување на компјутерската визија и заедно со техниките за стерео-реконструкција даваат можност да се создадат точни 3D-модел од слики без претходна информација за локацијата, каде се врши снимањето или за параметрите на камерата што се користат при тоа (Verhoeven et al., 2013).



Слика 8 Фотограметриски принцип на SfM

Figure 8 Structure from Motion (SfM) photogrammetric principle

Со оваа метода, 3D-геометријата и движењето на камерата се реконструираат од низа на 2D-слики кои се направени од камера која се движи низ просторот. SfM-алгоритамот детектира заеднички карактеристични точки на повеќе слики и ги користи за реконструкција на движењето на тие точки низ низата на слики. Со оваа информација, локациите на тие точки може да се пресметаат и визуелизираат како 3DOT (Verhoeven et al., 2013).

Според општите правила за фотографирање, за да се обезбеди доволно преклопување помеѓу сликите и да се обезбедат доволно податоци за реконструкција на 3D-модел, потребно е минимално преклопување од 60 % за фотограметрија (Jiménez-Jiménez et al., 2021).

4.2.2. Користен хардвер

При употребата на современите методи за собирање податоци се користи соодветен хардвер. За потребите на оваа дисертација се користени iPhone 13 Pro, iPhone 15 Pro, дрон со камера, GPS Leica, GPS Topcon (сл. 9).



Слика 9 Користен хардвер: а) iPhone 13 Pro. б) iPhone 15 Pro. в) дрон со камера Phantom 4 RTK. г) Leica Viva GS08. д) Topcon GRS 1

Figure 9 Used hardware: a) iPhone 13 Pro. b) iPhone 15 Pro. v) drone with camera Phantom 4 RTK. g) Leica Viva GS08. d) Topcon GRS 1

Паметните телефони обично се опремени со голем број функции. Во последно време, сè поголем број истражувачи обрнуваат внимание на технолошките можности на паметните телефони, што претставува нова тема и интерес за истражување (Chen et al., 2023; Tamimi et al., 2023; Luetzenburg et al., 2021; Pluta et al., 2023; Kartinia et al., 2022; Rutkowski et al., 2023). Паметните телефони и таблетите обично се сметаат за рекреативни уреди за пребарување на веб, играње игри, GPS-навигација, стриминг на YouTube или TikTok, едноставна обработка на текст итн. Во последните години, покрај GPS-модулот,

кој сега се смета за стандарден дел на секој паметен телефон, производителите на уреди почнаа да инсталираат и посоефицирани делови како што се жиро-сензори, термални сензори, 3D-дисплеи и двојна камера за снимање стерео слики и видеа. Ова им овозможува на инженерите од различни гранки да ги користат паметните телефони и таблети за да прават различни типови мерења (координати, стерео слики, надморска височина, температура итн.) со можност за складирање на податоците на уредот или на облачен сервис (cloud service) доколку има активна интернет-конекција. Инженерите исто така можат да создаваат извештаи на лице место, да вршат едноставни или сложени анализи и многу повеќе. Екстремната преносливост и леснотијата на користење им овозможуваат да вршат далечински мерења и дури да контролираат системи (Djuric et al., 2013).

Следните уреди Apple се опремени со LiDAR сензор: iPhone 16 Pro произведен 2024, iPhone 16 Pro Max, iPhone 15 Pro произведен 2023, iPhone 15 Pro Max, iPhone 14 Pro произведен 2022, iPhone 14 Pro Max, iPhone 13 Pro произведен 2021, iPhone 13 Pro Max, 12.9-inch iPad Pro with LiDAR (5. генерација), 11-inch iPad Pro with LiDAR (3. генерација), iPhone 12 Pro произведени 2020, iPhone 12 Pro Max произведен 2020, 12.9-inch iPad Pro with LiDAR (4. генерација) произведен 2020, 11-inch iPad Pro with LiDAR (2. генерација) произведен 2020 год.

Мерењата со телефон за потребите на оваа дисертација се направени со помош на паметен телефон iPhone 13 Pro и iPhone 15 Pro.

iPhone 13 Pro за прв пат е излезен на пазарот во септември 2021 година, изработен од американската компанија Apple. Уредот претставува релативно евтин конкурент на тековните хардверски решенија кои се користат во геодетските истражувања кои бараат солидна точност. Поседува камера од 12 мегапиксели и LiDAR-сензор imx950 кој не може да изврши скенирање на површината како тоа што го прават останатите TLS-уреди, а може да обезбеди облак од точки во боја во размер 1:1. LiDAR-сензорот во моделите iPhone Pro има ефективен опсег до 5 метри (www.apple.com/by/iphone-13-pro/specs).

iPhone 15 Pro е излезен на пазарот во септември 2023 год. LiDAR-сензорот кај овој модел е понов и е со ознака imx951 (www.apple.com/mk/iphone-15-pro/specs).

Беспилотното летало Phantom 4 RTK Professional е пуштено во продажба во ноември 2016 година и вклучува 20-мегапикселен сензор за фотографии. Опремен е со гиростабилизатор со три оски и може да лета приближно 30 минути непрекинато. Сензорот е CMOS со големина на пиксел од три микрони и фокусна должина од 8,8 mm. Станува збор за беспилотно летало од типот мултиротатор со четири ротори. Сензорот на Phantom 4 е интегриран со системот, па затоа снимањата на сликите беа извршени користејќи го вградениот сензор, опремен со стандардна камера со рамка (Murtiyoso et al., 2018; enterprise.dji.com).

4.2.3. Користен софтвер

За работа со хардверот, како и за обработка на добиените податоци се користени неколку софтвери. Тоа се *3D Scanner App*, *CloudCompare*, *Pix4D*, *DSE*, екстензија/додаток за Cloudcompare – *FACETS* (сл. 10).



Слика 10 Користен софтвер

Figure 10 Used software

Од останатите програми, за обработка на податоците и добивање на соодветни резултати, графикони, табели и параметри се користени *Microsoft office*, *Rocscience Dips*, *Autodesk Autocad*, *Corel Draw*, *Photoshop*.

Клучни софтвери во делот на добивање 3DOT: 3D Scanner App е апликацијата која овозможува телефонот да го реализира потребното LiDAR-снимање. CloudCompare и Pix4D се соодветни софтвери за обработка и работа со 3DOT.

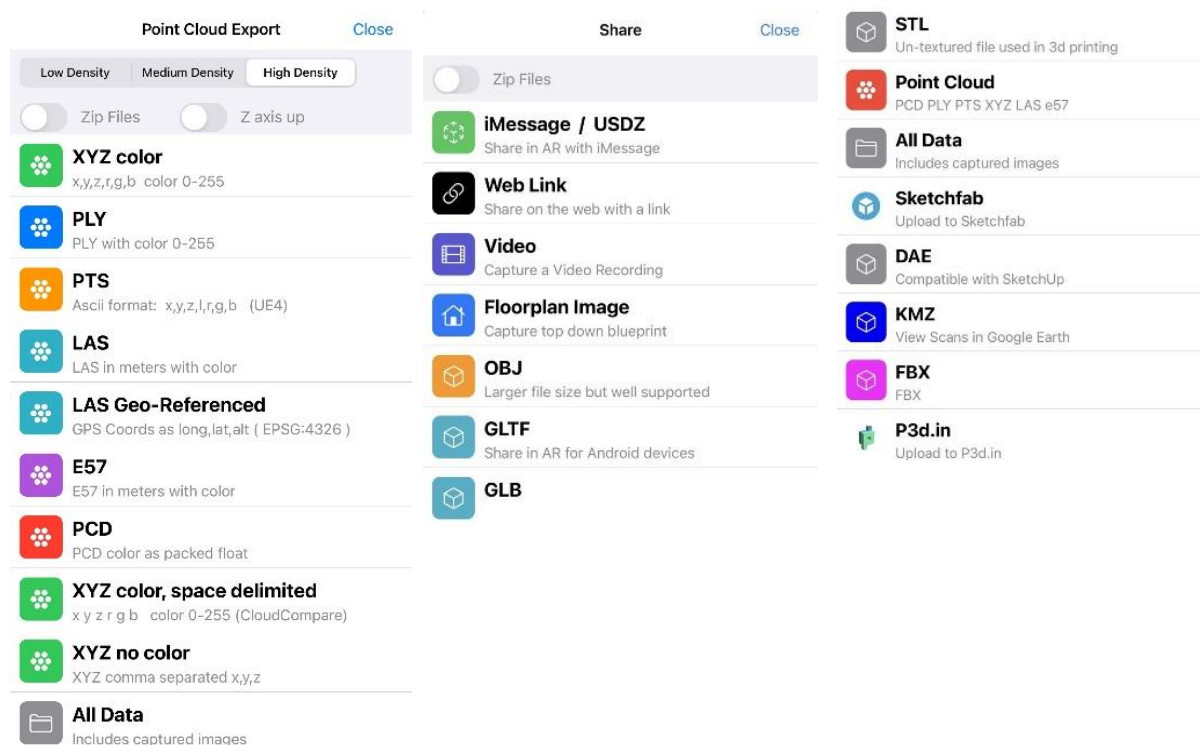
За полуавтоматска анализа на облаци од точки и детекција на дисконтинуитети во геолошки структури, постојат неколку софтверски алатки. Сепак анализата на карактеристиките на сите погоре спомнати софтвери би претставувал обемен процес. Затоа е направено истражување, со цел да се изберат барем два софтвери кои би ги искористиле за полуавтоматска анализа на облаци од точки во структурната геологија. За таа цел, а и според податоците добиени од голем број на трудови (Gigli et al., 2011; Riquelme et al., 2014; Dewez et al., 2016; Riquelme et al., 2015a; Bianchetti et al., 2016; Chen et al., 2016; Slob et al., 2005; Wang et al., 2016; Chen et al., 2017; Gomes et al., 2016; Jaboyedoff et al., 2007; Leng et al., 2016; Yathunanthan et al., 2014; Zhang et al., 2018; Wu et al., 2020; Wu et al., 2021; Chen et al., 2020; Umili et al., 2013; Li et al., 2016; Ge et al., 2018; Kong et al., 2019; Lato et al., 2012; Guo et al., 2022; Monsalve et al., 2021; Wu et al., 2024; Daghigh, 2022; Riquelme et al., 2015b; Lai et al., 2014; Wu et al., 2024; Lu et al., 2024a; Kang et al., 2024; Seyedahmad et al., 2024; Cardia et al., 2023; Panigrahi et al., 2023; Zhou et al., 2023; Lu et al., 2024b; Vasuki et al., 2014; Li et al., 2018; Tung et al., 2018; Li et al., 2015), се избрани софтверите DSE и Cloudcompare со неговиот додаток - плагин (plug in) FACETS. Како што и подолу е прикажано, материјалите добиени од овие споредбени анализи се големи, а може да се каже дека и не е исцрпен целокупниот потенцијал на овие два софтвери.

4.2.3.1. 3D Scanner App

Имајќи предвид дека iPhone има вграден лидар-скенер, најпрво требаше да се најде соодветна апликација-софтвер со која може максимално да се искористат придобивките од овој скенер. По направените анализи на достапните податоци за тоа кои се апликации може да се искористат, како и консултирање на интернет (www.youtube.com/watch?v=dPOldb5yTdg), дополнето со апликативна примена на достапните апликации, 3D Scanner App се покажа како најуспешна. Затоа и оваа апликација е избрана за снимање со телефонот.

3D Scanner App претставува комерцијална апликација развиена од меѓународната компанија Laan Labs (Laan Labs, 2021). Се користи како апликација која овозможува скенирање со телефонот.

Следниве формати за експортирање на 3D-моделот се достапни под менито за споделување од приказот на моделот: (сл. 11).



Слика 11 Достапни формати за експортирање 3D-снимка од 3D Scanner App
Figure 11 Available formats for exporting 3D survey from 3D Scanner App

OBJ – овој формат се смета за универзален формат бидејќи е широко прифатен од апликации кои работат со 3D објекти.

USDZ – овој формат е развиен од Pixar's Universal Scene Description standard, претставува компресиран формат кој најмногу се користи од уредите Apple.

GLTF - (GL Transmission Format) е отворен проект Khronos кој обезбедува заеднички, проширлив формат за 3D-објекти кој е ефикасен и високо интероперабилен со современите веб-технологии и уреди Android.

GLB – претставува бинарна верзија на GLTF форматот кој користи JSON (JavaScript Object Notation) кодирање. Сите придружни податоци се содржат во еден фајл. Исто така е и стандарден формат за Android Уреди.

FBX - Filmbox претставува комерцијален формат на датотека кој се користи најмногу од (.fbx) Autodesk 3D-програмите.

DAE – е отворен формат на датотека за размена на 3D-фајлови, и се користи за размена на дигитални средства помеѓу различни графички програми базирани на XML-шема.

STL – StereoLithography е формат стандарден за CAD-апликации. STL-датотеките немаат текстури на фотографии.

За експортирање 3DOT постојат голем број на специфични типови за експорт кои се бинарни (binary) или ASCII (American Standard Code for Information Interchange), а кои се користат во индустријата како GIS (Geographic Information System), BIM (Building Information Modeling) и во архитектурата. Тоа се:

XYZ – многу едноставен ASCII формат за снимање точки во 3D-простор.

PLY - ASCII полигонски формат.

PTS - форматирање на ASCII-фајлови за складирање податоци за точки обично од LiDAR-скенерите.

LAS – бинарен формат кој се користи специјално за складирање на LiDAR податоци.

LAS + geo ref, E57 - компактен, неутрален формат за складирање облаци од точки, слики и метаподатоци произведени од системи за 3D сликање.

PCD - (Point Cloud Data) формат најчесто користен со Point Cloud Library (PCL).

Со 3D-облаците од точки можат да работат различни софтвери, а тоа се: Autocad, Fusion360, Revit, Recap, Microstation, Autodesk Inventor, SketchUp, Maya, 3Dmax, Blender, Vectorworks, Archicad, Cinema4D, Arcgis Pro, Photoshop, CloudCompare, Meshlab, Unity, Unreal Engine, Spark AR, Snap Lens Studio и др.

Оваа апликација снима скенови во единици од 1,0 метри. Скенирањата немаат специфично ограничување на големината, но најдобро е да се ограничи областа за скенирање на разумна големина за да се избегнат проблеми со меморијата и постобработката. Препорака на производителот за отворени простори е 5 x 5 m површини каде апликацијата работи најдобро. Поновите iPhone и iPad уреди имаат поголема меморија и потенцијално може да вршат поголеми скенирања, но поради различните услови кои влијаат на едно

скенирање, тешко е да се специфицира одреден критериум. Останува на искуството на оној што го врши снимањето, да процени што е најдобро за една правилна снимка. Апликацијата содржи и алатка за продолжување на скенирање на претходно прекинато снимање.

Што се однесува до точноста на LiDAR-скенирањата, во идеални услови, скенирањата може да бидат прецизни до 95 %. Сепак, оваа точност зависи од условите на теренот, од површините што се скенираат и од техниките што се користат при снимањето на скенирањето и, се разбира, од големината на објектот што се снима. Важно е однапред да се испланира скенирањето и можеби ќе бидат потребни неколку скенирања за да се постигнат најдобрите резултати. Важен фактор е површината која се снима. Рефлектирачките површини, како што се стакло, вода, хром, итн. не се скенираат добро и може да влијаат на прецизноста, како и на снимената содржина. Најдобро е да се избегнуваат вакви површини. Друг важен фактор е големината на снимката. Големото скенирање најверојатно ќе има повеќе грешки, бидејќи уредот може да ја изгуби својата позиција за време на скенирањето. Техниката на скенирање е исто така важен фактор. Скенирањето треба да се врши бавно и методично и може да бара повеќекратни обиди. Брзите и нерамни движења ќе влијаат негативно на квалитетот на скенирањето. Иако не постои ограничување за времето на скенирање, многу големи снимки може да не се обработат добро, затоа најдобро е да се прават помали скенирања. При скенирање на површини на отворено, движењето треба да е нагоре-надолу, или од една до друга страна со бавни движења. Скенирањето најдобро функционира на оддалеченост 2-3 метри. Снимањето на истата површина повеќе пати може да доведе до проблеми со точноста (Luetzenburg, 2023).

4.2.3.2. Pix4D

Постојат над 40 различни типови на фотограметриски софтвер и алатки за 3D-реконструкција, како комерцијални, така и со отворен код. Со цел да се изврши 3D фотограметриска реконструкција, сите овие програми генерално следат процес од пет чекори: (1) откривање и преклопување на карактеристики; (2) триангулација; (3) генерирање густ облак од точки; (4) генерирање

површина/мрежа; (5) генерирање DSM (Digital Surface Model) и ортофото (Riquelme et al., 2015a).

За потребите на оваа дисертација е работено со PIX4Dmapper v. 4.4.12 (www.pix4d.com). Тоа е комерцијален софтвер направен од компанија со седиште во Швајцарија која е специјализирана во фотограметрија. Може да работи на desktop, cloud, и различни мобилни платформи. Претставува моќен софтвер за фотограметрија кој користи слики снимени со дрoнови и други извори за да создаде 3D-модели, ортофото мапи, дигитални површински модели (DSM), и други геопросторни продукти.

Како водечки софтвер за фотограметрија нуди широк спектар на алатки и функционалности за обработка и анализа на геопросторни податоци. Софтверот овозможува прецизно мапирање, следење и анализа на терени и објекти, правејќи го вредна алатка за професионалци во различни индустрии како геодезија, земјоделство, градежништво и јавна безбедност.

Pix4Dmapper е основниот производ на Pix4D, кој овозможува обработка на слики за да се создадат 3D-модели и ортофото мапи. Овој софтвер користи алгоритми за фотограметрија за да ги претвори сликите во детални геопросторни продукти. Од функционалности вклучува автоматска калибрација на камери, пресметка на 3D-точки, создавање дигитални површински модели (DSM), и креирање на текстурирани 3D-модели. Поддржува различни формати на слики и податоци, вклучувајќи RGB, мултиспектрални и термални слики. Нуди интеграција со облачни платформи за складирање и обработка на податоци, и овозможува лесно складирање, споделување и обработка на податоци преку интернет.

Софтверот ја реконструира секоја карактеристика која се содржи во комплетот на слики кои се обработуваат. При тоа, единствен начин да се добијат слики од секоја површина бара поместување на објектот што снима за да се добијат различни перспективи на сниманата површина.

Добиените фотографии поминуваат низ фаза на калибрација каде што сликите треба да се усогласат. Само тогаш може да започне процесот на 3D-моделирање. Неопходно е да се изберат добри фотографии за изградба на 3D-модел пред да започнете каква било операција. Заматените или какви било

„лоши“ фотографии треба да се елиминираат од процесот на процесирање. Pix4D прифаќа неколку формати на слики како што се JPEG, TIFF, PNG, BMP и JPEG.

Следниот чекор по усогласувањето на фотографиите е градење густ облак од точки кој би се добил од фотографиите. Софтверот прави проценка на положбите на камерата по што следи пресметка на информациите за длабочината за секој агол на камерата. На крај, тие информации за длабочината се комбинираат во еден облак од точки.

Овој софтвер се смета за една од добрите технологии за корисниците на UAV, бидејќи може да создаде и висококвалитетни 3D-модели врз основа на точни фотографии. Резултатите вклучуваат текстури во речиси сите големини и можности кои ги бара корисникот (Dewez et al., 2016).

4.2.3.3. *CloudCompare*

CloudCompare v.2.12 и v.2.13 (www.cloudcompare.org) е софтвер со отворен код за процесирање и обработка на 3DOT. Може да работи и со триангуларни мрежи и калибрирани слики. Првично дизајниран за споредба помеѓу две 3D-точки или помеѓу точки и триаголна мрежа, CloudCompare нуди широк спектар на алатки за обработка и анализа на податоци. Нуди основни алатки за рачно уредување и рендерирање (генерирање на слика) на 3D-точки и триаголни мрежи. Корисниците можат интерактивно да сегментираат 3D-ентитети, да ротираат и преведуваат објекти, и да изберат поединечни точки за мерење на растојанија и агли. Софтверот поддржува различни методи за проекција, регистрација, пресметка на растојанија, статистичка анализа и сегментација. Преку овие алатки, корисниците можат да извршуваат сложени анализи на 3D-податоци, како пресметка на густина, кривина и рапавост на површините. Исто така, нуди различни алгоритми за процесирање. Корисникот може интерактивно да сегментира 3D-ентитети со користење на 2D-полилинија на екранот, интерактивно да ротира, придвижува еден или повеќе ентитети еден во однос на друг, интерактивно да одбира една или повеќе точки (за добивање соодветни должини) или сетови од три точки (за добивање рамнини и агли). CloudCompare поддржува голем број формати за внес и изнес на податоци,

вклучувајќи ASCII, PLY, OBJ, VTK, STL, LAS/LAZ, и многу други. Ова го прави софтверот флексибилен и компатибилен со различни извори на податоци. Исто така, CloudCompare се здоби со многу функции со текот на годините, а неговата достапност како и зголемениот сет на функции направија да биде стандардна алатка во овие заедници.

Овој софтвер има широка примена и се користи за геолошки истражувања, вклучувајќи анализа на терени, идентификација на геолошки структури и моделирање на површински форми. Ова е особено корисно за истражување на тектонски активности и стабилност на карпести масиви. Овозможува детална анализа и документирање на археолошки наоѓалишта и историски објекти. Преку 3D-скенирање, археолозите можат да создадат прецизни модели на објекти и да ја анализираат нивната состојба. Се користи за мерење и анализа на структури и градби. Преку 3D-скенирање, инженерите можат да ја проверуваат точноста на градежните елементи и да анализираат деформации и оштетувања.

Достапен е за Windows, Linux и macOS платформи. Поддржува 32 и 64 битни архитектури и е развиен на C++ со користење на Qt-библиотеката. Софтверот е под GPL-лиценца, што значи дека корисниците можат да го користат и модифицираат, но мора да го споделат кодот ако го дистрибуираат. CloudCompare е достапен на GitHub, каде што корисниците можат да придонесат кон неговиот развој. Поддржува плагини кои го прошируваат неговиот капацитет. Овие вклучуваат алатки за напредно рендерирање и алгоритми за обработка на податоци. Примери на плагини се ShadeVis за пресметка на амбиентална оклузија (маскирање) и Poisson Surface Reconstruction за реконструкција на површини, како и FACETS-плагинот кој ќе биде подетално опишан подолу (github.com/CloudCompare; en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare; cloudcompare.net).

Во овој случај најмногу е користена алатката Virtual Compass, за мерење на елементи на пад на 3DOT, кој ги дава во форма на азимут и паден агол (Thiele et al., 2017). Исто така е користена функцијата за геореференцирање, ротирање, позиционирање на облак од точки, како и кретење на вишокот на точки и елиминирање на т.н. „шум“ од точки.

4.2.3.4. DSE

Discontinuity Set Extractor (DSE) или Издвојувач на сетови на прекини/дисконтинуитети е компјутерска програма напишана во MATLAB (Matrix Laboratory), дизајнирана да имплементира метод за идентификување и извлекување фамилии на рамни дисконтинуитети од 3D облаци од точки. Овој метод е развиен за време на изработка на докторската теза на Адриан Рикелме на Универзитетот во Аликанте во 2015 година. DSE е програма со отворен код компатибилен со MATLAB и може да се активира на оперативните системи Windows, MAC и Linux (Riquelme et al., 2014; Riquelme et al., 2015a; Riquelme et al., 2017). Користен е DSE v3.0 (Riquelme et al., 2014; Riquelme et al., 2015b). DSE е „open-source software“ или софтвер со отворен код. Работи на Windows, MAC или Linux. Може да се симне од интернет <https://github.com/adriquiriquelme/DSE> и може да се користи за какви било цели, комерцијални и едукативни.

Методата на DSE овозможува полуавтоматска детекција на структурни дисконтинуитети користејќи директно 3DOT, наместо да користи интерполирана 2,5D-мрежна површина. Со оглед на множеството необработени точки на податоци (X, Y и Z) од набљудуваната сцена, ако површината на наклонот е главно дефинирана со дисконтинуитети, точките на излез може соодветно да се подредат во множества што ги дефинираат рамнините. Овие рамнини ги дефинираат множествата на дисконтинуитети.

Овој софтвер користи алгоритми за анализа на геометријата на облакот од точки за да ги открие и карактеризира различните системи на дисконтинуитети. Целта на овој софтвер е издвојување сетови на дисконтинуитети од карпести површини. Работи со 3DOT, кој може да се добие со помош на 3D ласерски скенер (LiDAR или TLS), дигитална фотограметрија (SfM) или синтетички генерирани податоци. Применува методологија за полуавтоматско идентификување точки кои се дел од рамнини кои се пак идентификувани во 3DOT. Корисникот може да контролира различни чекори во извлекувањето на сетовите на дисконтинуитети. Дополнително, вклучува алатка за пресметка на нормалното растојание користејќи го облакот со класифицирани точки.

Предложената методологија има за цел да ги детектира структурните дисконтинуитети користејќи 3DOT. За разлика од другите методологии, оваа ја користи „вистинската“ 3D-информација која се содржи во облакот од точки, отколку да користи интерполирана 2,5D-мрежна површина (mesh surface). Со пакетите на X, Y и Z податоците за секоја точка таа може соодветно да се позиционира во некој сет на точки кој дефинира рамнина. Овие рамнини ги дефинираат сетовите на дисконтинуитети.

Методот во основа врши обезбедување на податоци со компас за секоја точка, но само ако е опкружена со други копланарни точки (точки во иста рамнина). Затоа, постои очигледна предност: може да се добијат милиони виртуелни мерења на компас во неколку минути, дури и во инаку недостапни области каде не може да пријде геологот. Предложената методологија е развиена преку три главни чекори (Riquelme et al., 2014):

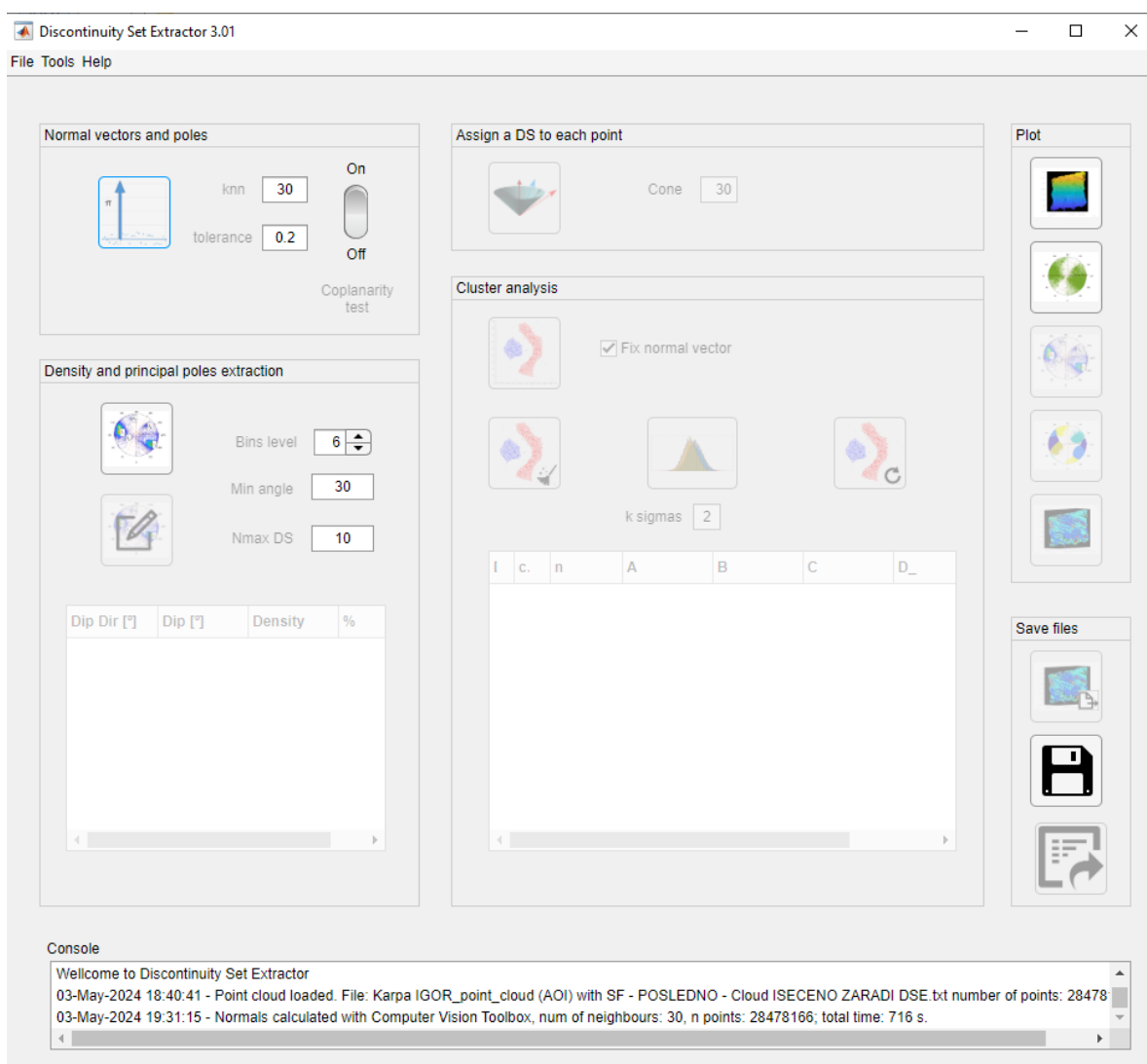
Чекор 1: Пресметка на локална закривеност: ова се состои од пребарување на најблизок сосед и утврдување на ориентација на дисконтинуитет во секоја точка.

Чекор 2: Статистичка анализа на рамнините: ова се состои од определување на главните ориентации, кои ги претставуваат различните множества на дисконтинуитети што влијаат на карпестата маса. Следниот чекор е идентификацијата на оние точки кои припаѓаат на заеднички сет на дисконтинуитети.

Чекор 3: Анализа на кластери: локализација на точките кои дефинираат различни кластери во просторот и пресметување на равенки на рамнините на изданокот.

Првите чекори за поставување на основите се работени на познати геометриски цврсти објекти вклучувајќи коцка, додекахедрон, исосахедрон, октахедрон, хексагонална пирамида, хексагонална призма, октагонална призма и триагуларна призма. Овие едноставни геометрии овозможиле споредба на алгоритмот кој се создавал со помош на споредба на добиените резултати и овозможување на работа со реални рамнини во просторот.

DSE работи на следниот начин: Во делот на вчитување на податоци, софтверот прима облак од точки, кој може да биде генериран од различни извори како што се ласерско скенирање, фотограметрија или други 3D-технологии на скенирање. Понатаму при процесот на сегментација, DSE аплицира алгоритми за сегментација на облакот од точки за да ги изолира областите кои припаѓаат на различни пукнатини или други структурни формации. Следува анализа и квантификација каде софтверот квантифицира геометриските карактеристики на секоја пукнатина, вклучително и ориентација, големина, и распространетост. Овие податоци можат да се користат за статистичка анализа и моделирање на карпестите системи. На сл. 12 е прикажан почетниот интерфејс на софтверот.



Слика 12 Интерфејс на DSE

Figure 12 DSE interface

Бидејќи оваа полуавтоматска метода дозволува промени во параметрите, постојат веројатности каде со измена на основните параметри се добиваат и многу различни резултати. Беа направени неколку помали тестови со промена на параметрите, но во презентираниот материјал се користеа основните поставки од софтверот (таб. 2).

Табела 2 Влезни параметри за DSE
Table 2 Input parameters for DSE

Input parameters Влезни параметри	Value Вредност
Number of nearest neighbors, knn Број на најблиски соседи	30
Tolerance for the co-planarity test, η_{MAX} Толеранција на тестот за ко-планарност	0,2
Kernell Density Estimation parameter, n Параметар за проценка на густината со јадро	6
Angle between normal vectors of discontinuity planes, γ Агол помеѓу нормалните вектори на рамнините на дисконтинуитет	30°
Number of discontinuity sets, N Број на сетови на дисконтинуитети	10
Cone for point alignment, γ_1 Конус за порамнување точки	30°
Cluster distribution threshold, k Праг на распределба на кластерите	2

Број на најблиски соседи: Ова е бројот на најблиски соседи кои се земаат предвид при анализа на дадена точка од облакот. Во овој случај, DSE користи 30 соседни точки за да ги пресмета локалните карактеристики, како што е ориентацијата на дисконтинуитетите. Овој параметар влијае на прецизноста на пресметките и класификацијата на дисконтинуитетите.

Толеранција на тестот за копланарност: Ова е прагот за толеранција во тестот за копланарност. Вредноста 0,2 укажува на тоа колку точки може да отстапат од совршена рамнина и сè уште да се сметаат за копланарни. Поголема

вредност дозволува поголеми отстапувања од идеалната рамнина, додека помала вредност значи повисока прецизност во дефинирањето на планарните површини.

Параметар за проценка на густината со јадро: Ова е параметар за проценка на густината користејќи јадрена метода. Овој параметар ја контролира големината на околината во која се мери густината на точките. Овој параметар влијае на сегментацијата на точките во различни класи на дисконтинуитети. Поголема вредност овозможува анализа на поголеми области.

Агол помеѓу нормалните вектори на рамнините на дисконтинуитет: Овој агол го дефинира максималниот дозволен агол помеѓу нормалните вектори на две дисконтинуитетни рамнини за да се сметаат како дел од ист дисконтинуитетен сет. Поголем агол овозможува класификација на повеќе различни дисконтинуитетни рамнини во еден сет.

Број на сетови на дисконтинуитети: Ова го претставува бројот на дисконтинуитетни сетови кои софтверот треба да ги идентификува и класифицира во облакот од точки. Овој параметар ја одредува сложеноста на моделот. Поголем број сетови значи подетална класификација на дисконтинуитетите.

Конус за порамнување точки: Овој параметар дефинира конус во кој точките треба да се усогласат за да се сметаат како дел од ист дисконтинуитет. Аголот на конусот ја контролира точноста на усогласувањето на точките и класификацијата на дисконтинуитетите.

Праг на распределба на кластерите: Ова е праг за дистрибуција на кластерите, кој одредува колку групирани точки треба да има за да се сметаат за валиден кластер. Поголем праг значи дека помалите групи на точки можат да бидат игнорирани, што ја зголемува прецизноста во кластеризацијата.

Овие параметри се критични за точната анализа на дисконтинуитетите во карпестите формации. Со правилно подесување на овие вредности, DSE-софтверот овозможува прецизно идентификување и класификација на дисконтинуитетни рамнини, што е клучно за геолошките и инженерските анализи.

4.2.3.5. FACETS

FACETS е алгоритам во CloudCompare, кој е дизајниран за обработка на 3DOT од точки со цел идентификација и анализа на фасети (рамни површини) во геометријата на облакот. Овој алгоритам е особено корисен во геолошките и геотехничките истражувања каде што е потребно да се идентификуваат и карактеризираат рамните површини како што се пукнатини или слоеви во карпестите материјали (Dewez et al., 2016).

Тој е специјализиран плагин (додаток/екстензија) за CloudCompare кој овозможува екстракција на геолошки планари од неструктурирани 3D-точки. Овој додаток е особено корисен за геолошки анализи, бидејќи овозможува полуавтоматско и прецизно мерење на геолошките структури, како што се слоеви, раседи и пукнатини. Неговата примена е елаборирана во (Tung et al., 2018; Nagendran et al., 2019).

Развиен е како одговор на потребата за алатка која може ефикасно да сегментира и анализира големи 3DOT во геолошки контекст. Првично дизајниран од тим од Францускиот геолошки институт (BRGM), тој е имплементиран во CloudCompare и е достапен за корисници кои работат со геолошки податоци.

Овозможува автоматска пресметка на наклонот и азимутот на секоја екстрахирана планарна структура. Овие податоци се визуелизираат преку стереограми, што овозможува интуитивно разбирање на геолошката структура. Исто така овозможува корисниците интерактивно да ги прегледуваат и анализираат екстрахираните планарни објекти. Половите на планарните површини можат лесно да се прикажат, и да се сегментираат рачно преку стереограмската алатка. Планарните структури можат да се екпортираат како 3D-полигони во различни формати, вклучувајќи и 3D полигони за GIS-софтвер или како ASCII-датотеки. Ова овозможува анализа и интеграција со други софтверски решенија ([cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Facets_\(plugin\)](http://cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Facets_(plugin))).

FACETS е дизајниран за широк спектар на геолошки апликации, вклучувајќи тектонска анализа, стабилност на карпи и виртуелни геолошки структури. Овој моќен плагин за CloudCompare овозможува екстракција и анализа на геолошки планарни структури од неструктурирани 3D-точки. Со своите напредни алгоритми за сегментација и пресметка на елементи на пад на

разни структури, FACETS претставува вредна алатка за геолошки истражувања и инженерски апликации. Неговата способност за интерактивна анализа и извоз на податоци го прави идеален избор за професионалци кои работат со геопросторни податоци и 3D-моделите. За потребите на оваа дисертација, користен е qFacet Fast Marching Algorithm plugin за Cloud Compare software v.2.12 (Dewez et al., 2016).

Една од основните карактеристики на FACETS е способноста за истражување на планарни објекти, но и 3D-точки со нормали. Половите можат лесно да се прикажат, и рачно да се сегментираат. Иако е дизајниран за геолошки апликации, FACETS може да се применува на секој планарен објект.

FACETS содржи три аспекти:

(1) аспект на обработка на податоци со два различни алгоритми, секој со минимален број параметри;

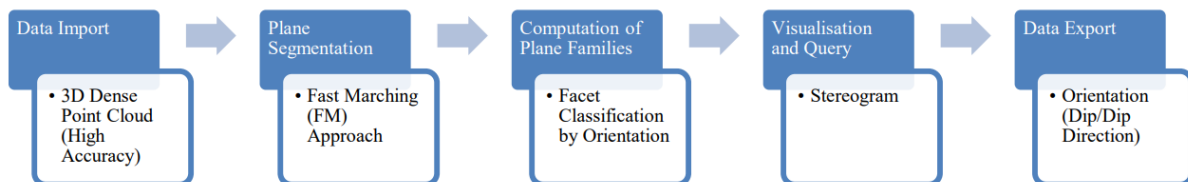
(2) алатка за рендерирање стереограм за изработка на структурни геолошки дијагностики со стандард утврден од заедницата, вклучен со интерактивно прашување и интерфејс за подмножества;

(3) капацитети за извоз кон трети софтвери (специфични за GIS и универзален ASCII извоз) за понатамошна специјализирана интерпретација.

Генерално, пристапот на FACETS се состои во делење на 3D-точките на кластери од соседни точки кои делат одреден степен на копланарност. Одговорот не е единствен бидејќи постојат бесконечни начини за делење на просторот на планарни делови. Овде, FACETS содржи две методи за делење на почетниот простор: *Kd-tree* и *Fast Marching*. И за двете методи, FACETS имплементира алгоритам за најмали квадрати. Откако просторот е рекурзивно поделен, елементарните подделови се групираат назад според копланарен критериум.

Кластеризацијата се изведува на три различни нивоа. Првото ниво на кластеризација пресметува елементарни фасети, секоја од кои соодветствува на мал фрагмент на план. Потоа, второто ниво на кластеризација ги групира елементарните планови во обединувачки планови. Овие се единечни планови кои локално се изразуваат преку фрагменти од планови и припаѓаат на истиот општ план. На крај, паралелните планови се спојуваат во семејства на планови.

Првата кластеризација произведува серија на планарни фасети (секој има своја папка во CloudCompare базата на податоци). Секоја фасета е дефинирана со центроид, нормала, контура и ефективна прецизност. Втората кластеризација ја активира корисникот, групирајќи ја секоја фасета во индивидуални планови, а сите планови се групираат во супер група која содржи паралелни планови (Tung et al., 2018) (сл. 13).



Слика 13 Дијаграм за извлекување геолошки рамнини со FACETS

Figure 13 Diagram for extracting geological planes with FACETS

Пристапот *Kd-tree* го дели 3DOT рекурзивно на мали планарни парчиња додека точките не се вклопат во најдобро вклопената рамнина според прагот на Root Mean Square (RMS, корен од средна квадратна вредност). Овие планарни парчиња потоа се групираат назад во поголеми фасети според критериумот за копланарност.

Од друга страна, пристапот *Fast Marching* систематски го дели 3DOT на помали сегменти и потоа ги групира. Така, сите сегменти ќе имаат слична големина. Откако ќе се извлечат мрежите или фасетите, тие можат да се класифицираат по ориентација (паден агол/азимут на падна насока) во поединечни рамнини и фамилии на рамнини. Може да се произведе стереограм, што е корисно за анализа на стабилноста на карпестите косини. Може да се врши пребарување на стереограмот со избор на дел од изданокот.

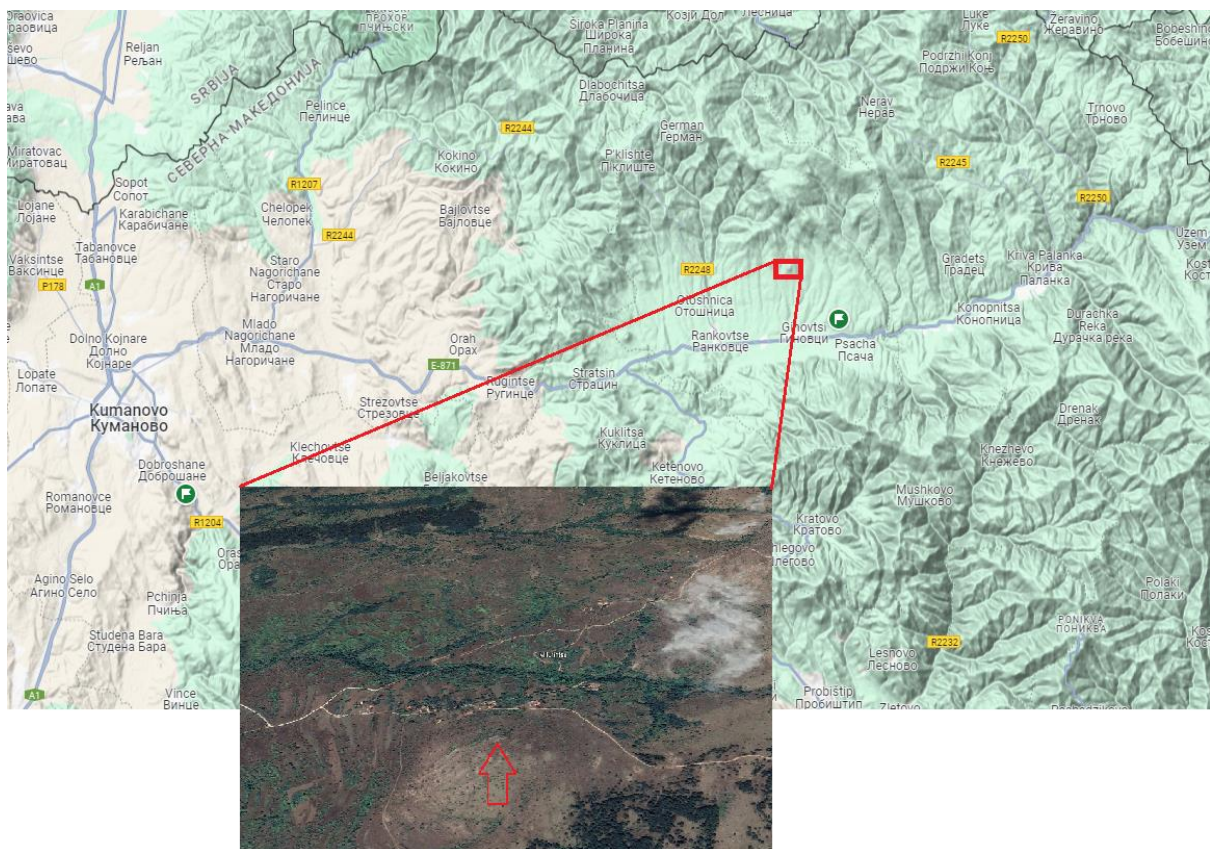
На крај, податоците за фасетите може да се извезат како ASCII-датотека со вредности одделени со запирка (CSV, Comma-Separated Values) или како shapfiles за понатамошна анализа во друг софтвер. Фасетите можат да се групираат по ориентација во единечни планови и семејства на планови (Dewez et al., 2016; [cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Facets_\(plugin\)](http://cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Facets_(plugin))).

5. ГЕОЛОШКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ИСТРАЖУВАНИОТ ТЕРЕН

За потребите на оваа дисертација, направени се снимки за 3DOT од четири различни локалитети, три од нив (Милутинци, Фариш, Серта) во рамките на првата методологија на работа, и уште еден локалитет (Усек 4 кај експресен пат Длабочица - Чатал), во рамките на втората методологија на работа низ примери од практиката.

5.1. Геолошки карактеристики на локалитетот Милутинци

Изданокот од микашисти се наоѓа во северозападниот дел на Македонија, на север од селото Милутинци, односно надвиснува над селото како маркантен дел од околината. Се наоѓа 2 km северно од селото Гиновци, односно 20 km од Крива Паланка и 50 km од Куманово (сл. 14).



Слика 14 Локација на изданок од микашисти (географска ширина и должина 42.204082, 22.161872, Google Earth)

Figure 14 Location of the mica schist outcrop (latitude, longitude 42.204082, 22.161872, Google Earth)

Морфолошки, изданокот се наоѓа на извишување во непосредна близина на с. Милутинци кој со падина е ограничен кон исток, запад и југ. Ова извишување претставува и своевидно обележје на околниот терен, со карактеристични изданоци особено кон неговата југоисточна страна (сл. 15).



Слика 15 Поглед на потесното подрачје на истражуваниот изданок
Figure 15 Overview of the vicinity of the outcrop

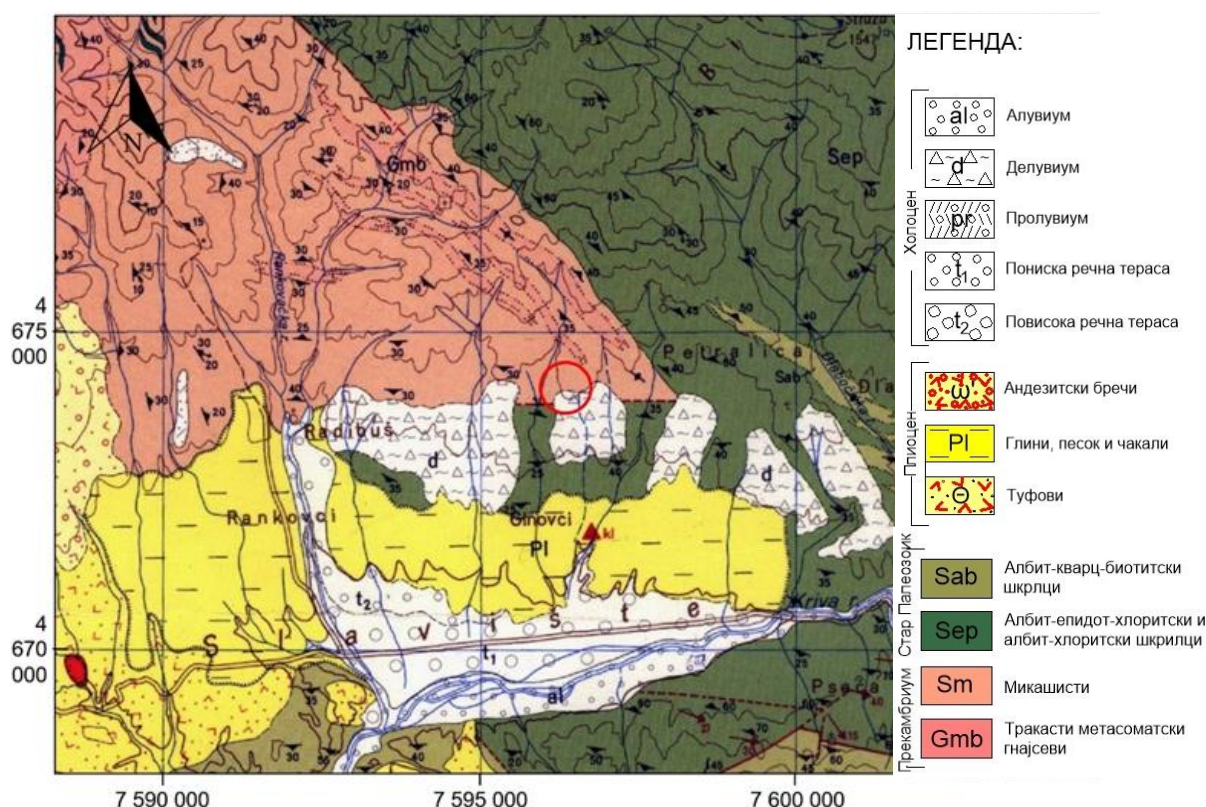
Мерењата се вршени на изданок кој е престапен со релативно цврсти микашисти со генерален пад на фолијацијата кон исток-североисток (сл. 16).



Слика 16 Истражуван изданок од микашисти
Figure 16 Mica-shist outcrop

Во геолошко-структурен однос теренот претставува дел од Српско-македонскиот Масив, кој е изграден од предалпски структурни комплекси. Морфоструктурно, истражуваниот дел припаѓа на германскиот блок, во долниот прекамбриски метаморфен комплекс (Арсовски, 1996), кој ја сочинува основата на теренот (Христов и др., 1969) (сл. 17).

Според литолошко-стратиграфските карактеристики овој изданок припаѓа на геолошката формација метаморфни карпи кои ја сочинуваат основата на теренот. Литолошки, изданокот е изграден од микашисти. Тие се типични лискунски шкрилци со крупни лушпи на лискун (30 – 40 %), некаде содржат и кристали на гранат (до 1 cm) или зрна на албит, кои покрај кварцот и лискунот се покажуваат како битни состојки.



Слика 17 Геолошка карта на поширокиот регион. Со црвена боја е обележана предметната локација

Figure 17 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location

Во микашистите се среќаваат прослојци од кварцити, тракасти гнајсеви, амфиболски карпи и метабазити. Микашистите на изглед се жолтеникави до кафеава карпи со изразена шкрилава текстура и содржина на крупни лушпи од лискуни. Составени се најчесто од кварц (20 – 50 %) и лискуни (30 – 40 %).

Понекаде во составот на микашистите како битна состојка влегува и гранатот или албитот. Кај некои се содржи и ортит како споредна состојка. Количината на гранатот во микашистите варира и се покажува како ретка или честа состојка (до 10 %). Големината на зрната варира од 0,5 до 2 cm. Во гранатите со крупни димензии се забележува и поизразен идиоморфизам (Христов и др., 1969).

5.2. Геолошки карактеристики на локалитетот Фариш

Испитуваната локација во плочести и банковити варовници се наоѓа на југозападната падина на ридот Стража (438 м.н.в.), во близина на селото Фариш, односно на 2 km североисточно од него. Ридот сам по себе претставува маркантна геолошка форма со неговите јужни падини кои стрмно се симнуваат над регионалниот пат Кавадарци - Прилеп (сл.18 и 19).



Слика 18 Локација на изданок од варовници (географска ширина и должина 42.178670, 22.201061, Google Earth)

Figure 18 Location of the limestone outcrop (latitude, longitude 42.178670, 22.201061, Google Earth)

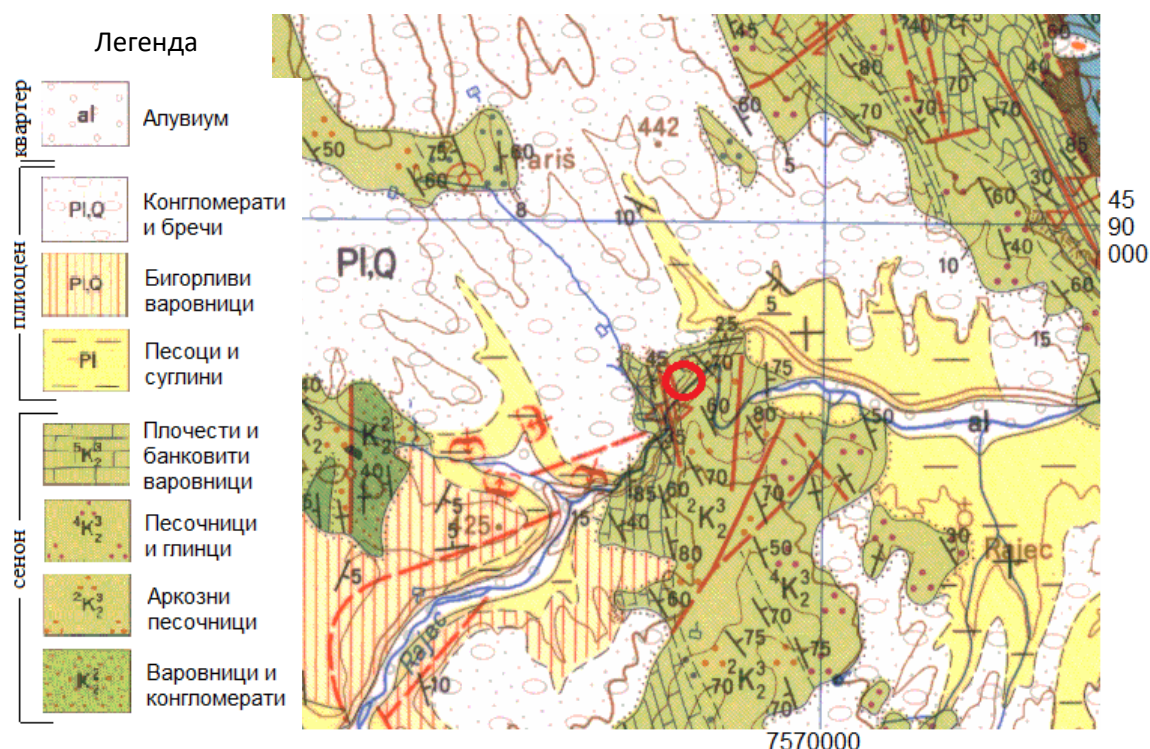
Непосредниот терен е изграден од квартерни наслаги, плиоценско-седиментни и различни типови на кредни седименти (сл. 20). Генерално може да се забележат многу докази за постоење тектонски движења во оваа област, особено со многуте антиклинали, синклинали и набори (сл. 21).

На истражуваната локација се наоѓаат плочести и банковити варовници, како едни од многуте сенонски творби во непосредната близина. Овие карпи заземаат видно место во Сенон. Тие се наоѓаат внатре во поодделни членови од флишот, а се издвојуваат како поголеми засебни маси (Ракиќевиќ и др., 1965).



Слика 19 Поглед на истражуваната локација од југозападна страна

Figure 19 View from southwest on the investigative area



Слика 20 Геолошка карта на поширокото подрачје. Со црвена боја е означена предметната локација

Figure 20 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location

Овие карпи претставуваат чисти кристалести варовници со висок процент на калциум карбонат, кои биле изложени на понизок степен на метаморфизам. Структурата им е кристалеста. Метаморфизмот во нив се огледува главно во прекристализацијата и деформацијата на калциските кристали. Ваков изглед на микроструктурата на варовниците сведочи за постоење поголеми притисоци во времето на активните тектонски движења во зоната на распространетост на овие карпи. Варовниците се најчесто банковити и плочести, додека масивните се поретки. Овие одлики на варовниците се и причина зошто е одбран овој дел од теренот.



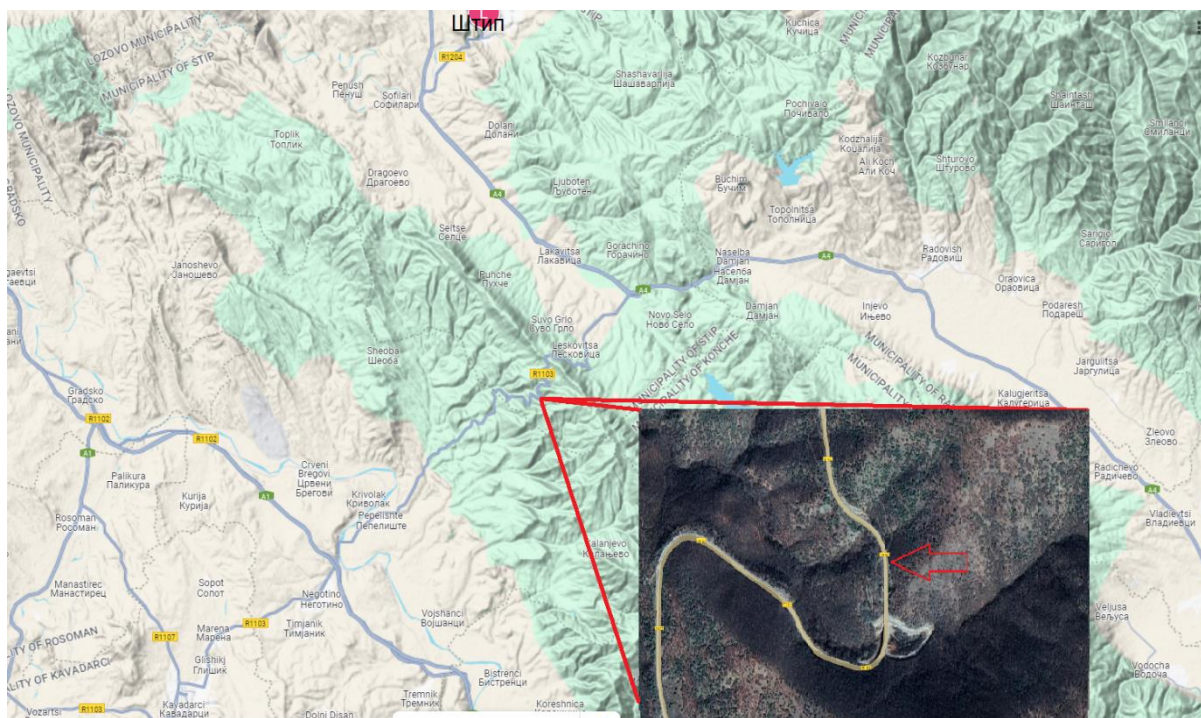
Слика 21 Плочести и банковити варовници со изразено присуство на набори
Figure 21 Platy and bedded limestones with increased presence of folds

Од инженерскогеолошки аспект овие карпи спаѓаат во цврсто врзани каменити карпести маси. На површина тие можат да бидат испукани и делумно распаднати, но во длабочина претставуваат компактни и цврсти маси.

5.3. Геолошки карактеристики на локалитетот Серта

Локацијата на изданокот во песочници се наоѓа на регионалниот пат од Штип за Неготино, поточно на југозападните падини на планината Серта, 3,5 km југозападно од селото Лесковица, во непосредна близина на врвот Ијов Камен (760 м.н.в.) (сл. 22).

Планината Серта се јавува во вид на остар срт со стрмен пад кон североисток (кон Лакавичкиот Грабен), додека падот кон југозапад (кон Тиквешката Депресија и клисурата Демир Капија) е нешто поблаг. Во рамките на геотектонската реонизација на територијата на Македонија, истражуваниот терен припаѓа на Вардарската Зона, која пак ја претставува источната маргина на Динарскиот Систем заедно со Српско-македонскиот Масив.

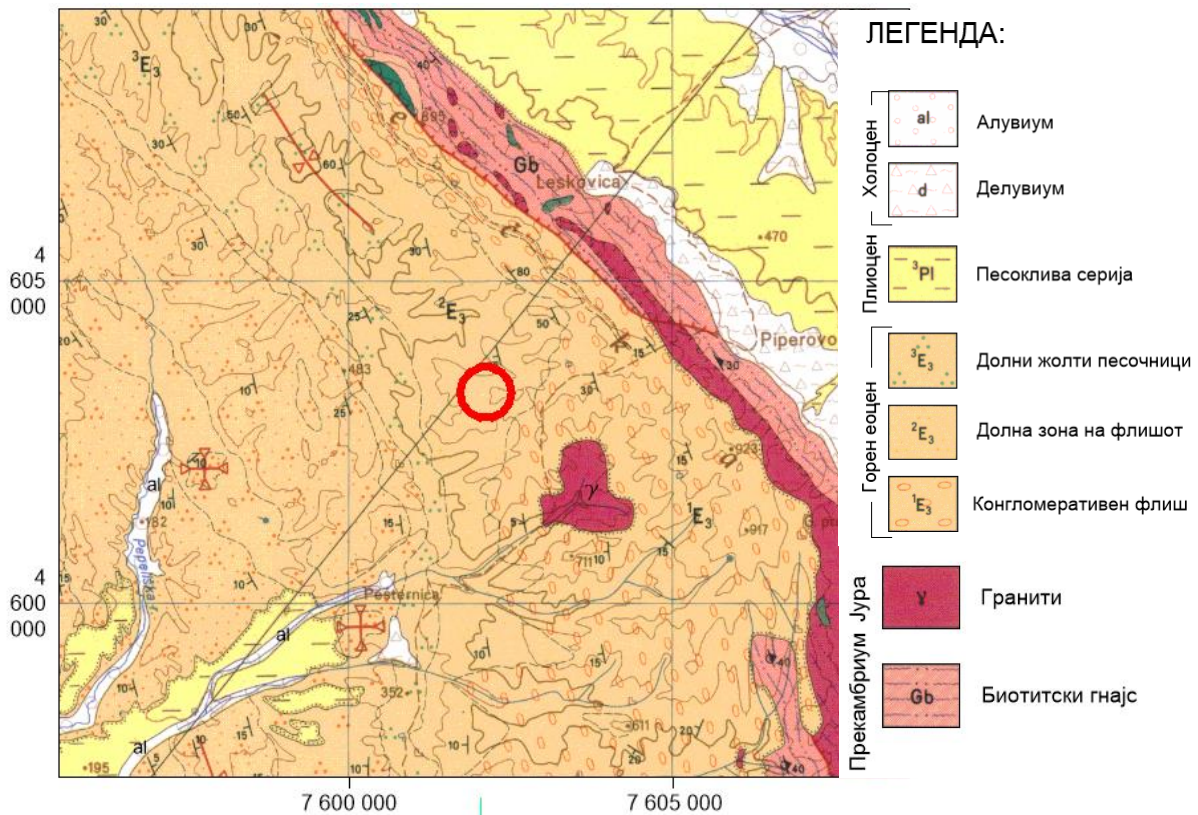


Слика 22 Истражувана локација (географска должина и ширина 41.575135, 22.224977, Google Earth)

Figure 22 Investigative area (longitude, latitude 41.575135, 22.224977, Google Earth)

Областа се наоѓа во долната зона на флишот, која е развиена по должина на J3 падини на планината Серта. Литолошкиот состав на овие седименти е различен и застапени се повеќе литолошки членови, што се сменуваат ритмички, изградувајќи одредени секвенци од 2, 3 или 4 члена: средозрнест песочник 43%, ситнозрнест песочник 42%, лапорец 6%, глинец 2%, варовник 7%. Најнискиот член на секвенцата е обично најкрупнозрнест, а највисокиот најситнозрнест (Христов и др., 1965). Долната зона на флишот лежи конкордантно преку зоната на конгломеративниот флиш и е со дебелина од околу 900 метри. Литолошките членови градат наборни структури со правец на протегање на оските СЗ-ЈИ и падови на слоевите од 20° до 30° (Петров, 1993). Откриената фауна претставена со *Glycimeris allonensis*, *Libitina alpina*, *Cerithium diaboli*, *Cerithium vivari*, *Natica*

vulcaniformis, Natica vulcani, Spondulus bifrons и Ostrea gigantea, укажува на горноеоценска-приабонска старост на овие седименти (Темкова, 1971).



Слика 23 Геолошка карта на поширокото подрачје. Со црвена боја е означена предметната локација

Figure 23 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location

Локацијата се наоѓа во песочници, кои се најчести членови на оваа секвенца. Тие се среднозрнести до ситнозрнести. Покрај кварцот и распаднатите фелдспати, содржат и лискун. По боја се најчесто жолто зелени и сиви и се јавуваат во слоеви и банкови со дебелина 20 - 200 cm (Стојанова, 2008) (сл. 23). Банковите слоеви се обично сложени, слоевити, со чести појави на „брук“, но правилно градирани спрема големината на фракцијата. Се забележува дека градационата слоевитост при врвот на банокот или слојот преоѓа во хоризонтална или брановидна ламинација. Поретко се јавува коса слоевитост, врз основа на што може да се утврди дека транспортот на материјалот доаѓа од север кон југ, што потврдуваат и релативно чести траги од бранување. Нешто поретки се трагите на подморското свлекување. Од текстурните траги на долната површина на слоевитоста се јавуваат траги на седиментална линеација и отпечатоци од траги на течење. И овие знаци ја индицираат насоката на

транспортот на материјалот од север кон југ. Од органогените текстури се забележуваат траги од движење на црви во хоризонтална и вертикална насока во однос на слоевитоста (Христов и др., 1965).

5.4. Геолошки карактеристики на усек 4 кај експресен пат Длабочица - Чатал

Усек 4 се наоѓа на трасата на делница Длабочица - Чатал од експресниот пат Крива Паланка - Чатал, во атар на село Петралица. Од постојниот пат, во северен правец е оддалечен околу 700 метри. Усекот се наоѓа помеѓу повремениите водотеци Голем Дол и Цветин Вир, јужно од Герман Маала и Дикина Маала. Како највисок е средишниот дел на усекот по сртот на Сулиманов Рид. започнува на стационажата на km 11 + 620, а завршува на km 12 + 243,99 со вкупна должина од 623,99 m. Проектиран е во ритчест терен каде што теренот постепено паѓа од северниот кон јужниот дел, односно кон долината на реката Крива Река и кон западната и источната страна кон повремениите водотеци кои имаат правец на течење од север кон југ (кон Крива Река). Теренот во геолошка смисла е изграден од метаморфни шкрилави карпи (сл. 24).

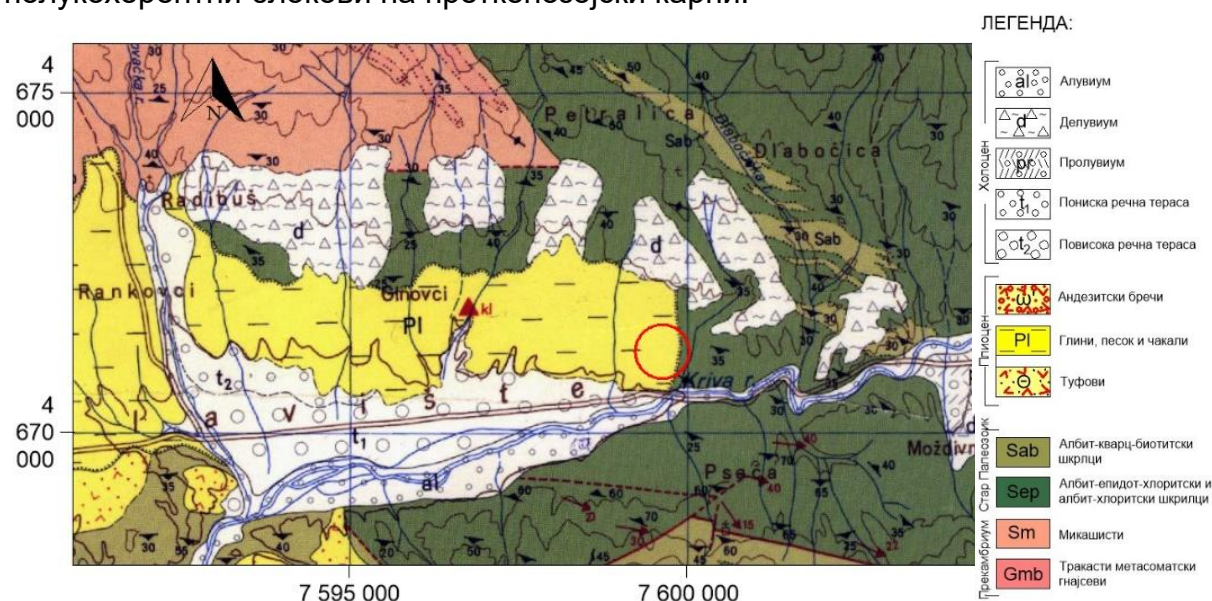


Слика 24 Усек 4 (географска должина и ширина 42.178670, 22.201061, Google Earth)

Figure 24 Cut 4 (latitude, longitude 42.178670, 22.201061, Google Earth)

Српско-македонскиот Масив се состои од рифејски/камбриски мафични плутонски и вулкански карпи, како и долно палеозојски шкрилци и филити во кои се вметнати големи структури на палеозојски гранити. Структурите во преткенозојските основни карпи се доминирани од фолијација во насока на северозапад, набори и раседи кои формираат важна анизотропија на кората која влијаела на многуте раседи во кенозоикот (Думурџанов и др., 2005) (сл. 25).

Алпската орогенза е претставена со дисјунктивна тектоника, што довело до формирање на многу пукнатини исполнети со вулкански карпи и различни други пирокластични структури. Кенозојскиот басен на Крива Паланка содржи раседи само на едната страна и е претежно претставен со гребени во насока северо-запад. Овие тесни басени содржат црвени, кафеави и жолти песочници, и понекогаш многу дебели делови од конгломератни се наоѓаат во флувијалните и езерски средини. Локално овие басени содржат големи маси бречирани до полукохерентни блокови на преткенозојски карпи.



Слика 25 Геолошка карта на поширокото подрачје. Со црвена боја е обележана предметната локација

Figure 25 Geological map of the wider area. Red circle indicates the location

Басенот на Крива Паланка лежи во форма на лак од магматски карпи, а нивното потекло е веројатно поврзано со внатрешната лакова екстензија, која веројатно настанала поради: 1) свиткување и враќање до ровот или 2) проширување, предизвикано од страна на гравитацијата, или пак на двата начина.

Раседите во преткеозојските основни карпи се протегаат во правец СЗ-ЈИ и СИ-ЈЗ со субвертикални структури. Главни раседи во поширокото подрачје на трасата е Крива Река, која е во СИ-ЈЗ правец. Во прелиминарната фаза, раседите се анализирани со стереоскопски слики и сателитски снимки.

Сеизмиката на Република Македонија е поврзана со неотектонските процеси пред сè со вертикално движење на тектонски блокови. Два региона, со специфични неотектонски карактеристики, се добро изразени: Западна Македонија се карактеризира со надолжни (СИ-ЈИ) и централниот и источниот дел на Македонија со трансферзално (И-З) протегање на главните тектонски морфоструктури.

Извршено е детално инженерско-геолошко картирање, со посебен фокус на зоната во која е настанат лом, односно свлекување на поголема маса на карпест материјал, а која е и фокус на овој дел. Основните геолошки одлики на предметната локација се преземени од ОГК 1:100 000 и Толкувачот за листот Кратово и Кустендил К34-69 и К34-70, според геолошката поделба на Република Македонија (Христов и др., 1969) (сл. 25). Сите фази на геолошкиот развој имале крајно влијание врз формирањето на денешната состојба на теренот, што се манифестира во денешниот релјеф. Основата на теренот е изградена од рифеј-камбриски метаморфни карпи со низок до среден кристалинитет кои претставуваат дел од Српско-македонскиот Масив. По целиот потег од двете страни на усекот се распространети зелени албит-епидот-хлоритски шкрилци и албит-хлоритски шкрилци.

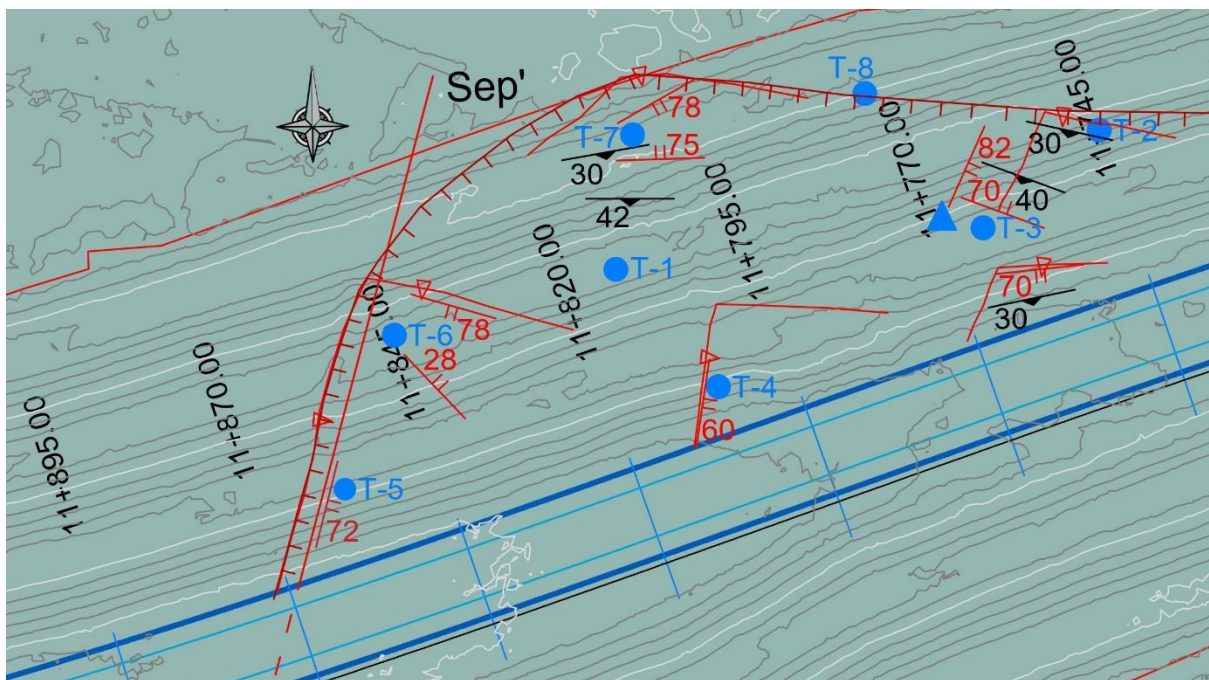
5.4.1. Детално инженерско-геолошко картирање

Со изведеното детално картирање може да се констатира дека теренот каде што е проектиран и изведен усекот има комплексен геолошки и структурно-тектонски склоп. Застапени се рифеј камбријски метаморфни карпи од типот на албит-епидот-хлоритски шкрилци и албит-хлоритски шкрилци со различен степен на испуканост и распаднаост.

Ова е една серија на шкрилци каде по својот минералоски состав може да се издвојат во разноразни литолошки единици во зависност од тоа која

минерална компонента преовладува, но според сличните структурно-текстурни и физичко-механички карактеристики се сврстени во една серија на т.н. зелени шкрилци. При теренското геолошко картирање констатирано е дека албит-епидот-хлоритски шкрилци се карактеризираат со шкрилава текстура, доста се испукани на места и набрани и тектонизирани, а особено во контактните делови со посвежите и поцврсти албит-епидот-хлоритски шкрилци. Албит-епидот-хлоритските шкрилци се распространети по целиот усек од двете страни, а се карактеризираат со различен степен на распаднаост што е констатирано со ИГ картирање на усекот. Генерално, фолијацијата на нискометаморфните албит-епидот-хлоритски шкрилци останува непореметена, иако наместа се забележува микронабирање (плисирање) по фолијацијата.

За конкретниот усек е изработена и инженерско-геолошка карта. На сл. 26 е претставен дел од картата во зоната на локална нестабилност.



Слика 26 Инженерско-геолошка карта за предметниот дел на усек 4

Figure 26 Engineer-geological map of the specific part of cut 4

На ИГ карта е прикажана просторната распространетост на карпите од типот на албит-епидот-хлоритски шкрилци (Sep'). Поизменетите албит-епидот-хлоритски шкрилци се со послаби физичко-механички карактеристики, навидум поушкрилени, лесно трошни и лесно се цепат по фолијацијата.

Во целина застапените албит-епидот-хлоритски шкрилци се карактеризираат со јасна ушкриленост и набраност и со неколку системи на пукнатини ориентирани по фолијацијата, нормално на неа или во различни правци. Доста се кршливи по пукнатини, а по нив и локално интензивно изменети, со појава на глинеста компонента која е продукт на површинското распаѓање, каде што се меки и трошни. Овде се забележани три или повеќе системи на пукнатини, а елементите на пад на насока и паден агол се измерени со помош на геолошки компас. Површините на пукнатините се главно рамни, слабо рапави, стиснати се или имаат милиметарски отвори. По боја се сивкави до зеленкаво-кафеави.

5.4.2. Инженерско-геолошка класификација

Присутните карпи на предметниот усек се класифицирани и од инженерско-геолошки аспект. Кај основната инженерско-геолошка поделба на карпите на повеќе класи се поаѓа од цврстината на врските кои постојат меѓу зрната на минералите од кои карпата се состои, како и јакоста на монолитот на карпа. Во светската практика најмногу се употребува класификацијата на карпите предложена од Комисијата на Меѓународното друштво за инженерска геологија (IAEG), каде што карпите се сврстуваат во групата на: несврзани карпи, слабо сврзани карпи и цврсто сврзани карпи. Според оваа класификација на истражуваниот усек се констатирани карпи кои припаѓаат во групата на цврсто сврзани карпи и цврсто сврзани полукаменити карпи.

Во групата на цврсто сврзани карпести маси се сврстени карпите каде меѓу нивните зрна постојат претежно цврсти кристализациони врски. Застапените карпести маси според минералошко-петрографските карактеристики би требало да бидат сврстени во групата на цврсто сврзани каменити карпи, но од теренското геолошко и инженерско-геолошко картирање на усекот може да се извлече еден општ заклучок дека случајот не е таков. Имено овде карпите по своите физичко-механички карактеристики доста се разликуваат, иако се работи за карпи со сличен минералошко-петрографски состав и слични генетски карактеристики. Ова е предиспонирано пред сè од интензивната тектонска активност и изменетост на карпестите маси

констатирано на постојните косини на усекот. Од теренското инженерско-геолошко картирање на отворените косини констатирано е дека се распространети албит-епидот-хлоритски шкрилци и албит-хлоритски шкрилци со присуство на лискунска компонента. Овие шкрилави карпи на овој усек обично се изменети и деградирани поради што се карактеризираат и со послаби физичко-механички карактеристики.

Во групата на цврсто сврзани полукаменити карпи се сврстени карпести маси со понеповолни физичко-механички својства, констатирани со ИГ картирање, а потврдени и со извршени испитувања со PLT-тест на репрезентативни примероци. При овие теренски активности земени се две проби од карпестите маси Т-1 и Т-3. Испитувањата на индекс на јакост при точкест товар покажаа доста ниски резултати што ги сврстува овие карпи во групата на цврсто сврзани полукаменити карпи. Пробата земена кај Т-1 покажа средна вредност од $\sigma_p = 26,91$ МПа (од 19,15 – 34,92 МПа). Слично пробата земена кај Т-3 покажа средна вредност од $\sigma_p = 29,89$ МПа (од 16,42 – 48,99 МПа). Ова дава за право застапените шкрилци на двете страни на овој усек да бидат класифицирани во оваа подгрупа на цврсто сврзани полукаменити карпи (<50 МПа јакост на притисок на ниво на монолит). Можно е дел од посвежите и послабо изменети шкрилци да имаат и нешто подобри физичко-механички карактеристики со што би припаднале во подгрупата на цврсто сврзани каменити карпи.

5.4.3. Хидрогеолошки карактеристики

Според хидрогеолошката функција овие метаморфни карпи можат да се класифицираат како релативни ХГ изолатори со пукнатински тип на порозност. Ваквата класификација укажува на тоа дека во овие карпести маси генерално не треба да се очекува постоење на типични издански зони, додека евентуално влажнење може да се очекува вдоль раседите и раседни зони кои одат подлабоко и локално по поединечните отворени пукнатини со поголеми димензии (хидрогеолошки поволни пукнатини).

Од претходното може да се констатира дека на истражуваниот простор големо влијание имале и тектонските процеси кои се одвивале во минатото и притоа речиси во целост на отворениот усек карпите се видно изменети, а на места каде тектониката е послабо изразена локално се јавуваат и посвежи карпести маси. Застапените литолошки единици во поголема или помала мера се испукани со најмалку 3 системи на пукнатини. Пукнатините се рамни, стиснати или со отвори од милиметарски димензии и затоа водата нема некое особено влијание на нив. Поради изложеноста на атмосферските влијанија водата може да има неповолно влијание локално по раседните структури и во изменетите зони. Неповолни влијанија би имало при подолготрајно задржување на вода во пукнатините и раседите исполнети со глиновита материја која има особина да ја апсорбира и задржува водата подолготрајно. Во зимскиот период со циклусите на замрзнување и одмрзнување доаѓа до често менување на притисокот по површините на пукнатините, а со тоа може да дојде до откинување на поголеми или помали блокови од карпести маси, што претставува потенцијал за одронување, односно свлекување.

Не се регистрирани појави на подземни води во смисла на влажење, процедување, течење и сл. и не е регистрирано постоење издан и ниво на подземна вода.

5.4.4. Современи инженерско-геолошки процеси и појави

Во поглед на застапеноста на современите инженерскогеолошки процеси и појави на теренот кои може да имаат важна улога на стабилноста исто така е посветено соодветно внимание. Геолошкиот состав на средината во голема мерка условува да се развијат некои од овие несакани појави, а исто така со инженерските активности се забрзува нивниот процес и мошне се влијае тие да се создадат. Во оваа фаза од истражувањата на актуелниот терен регистрирани се процесите на површинско распаѓање на карпите и гравитационо одронување со отпаѓање на карпест материјал.

Со процесот на површинското распаѓање на карпите се променува составот и склопот на карпестата маса и доаѓа до разрушување на карпата во вид на дробина и покрупни парчиња на карпи (со димензии 0,1 – 0,5 m). Овие

современи процеси се антрополошки предизвикани, односно се настанати по преземените градежни активности за трасата на патот и изведба на усекот. На десната страна на усекот ситуацијата е поинаква, особено помеѓу стационажите km 11 + 665 и km 11 + 875 каде се јавуваат тектонски зони (раседи) како и рамни пукнатини и пукнатински системи, на повеќе места се констатирани нестабилни зони, откинати и одвоени карпести маси со тенденција на одронување и лизгање кон пониските делови на косините (сл. 27а и 27б).



Слика 27 а) Нестабилна зона на десна страна на усекот. б) Отворена рамна пукнатина

Figure 27 a) Unstable area at the right side of the cut. b) Open joint

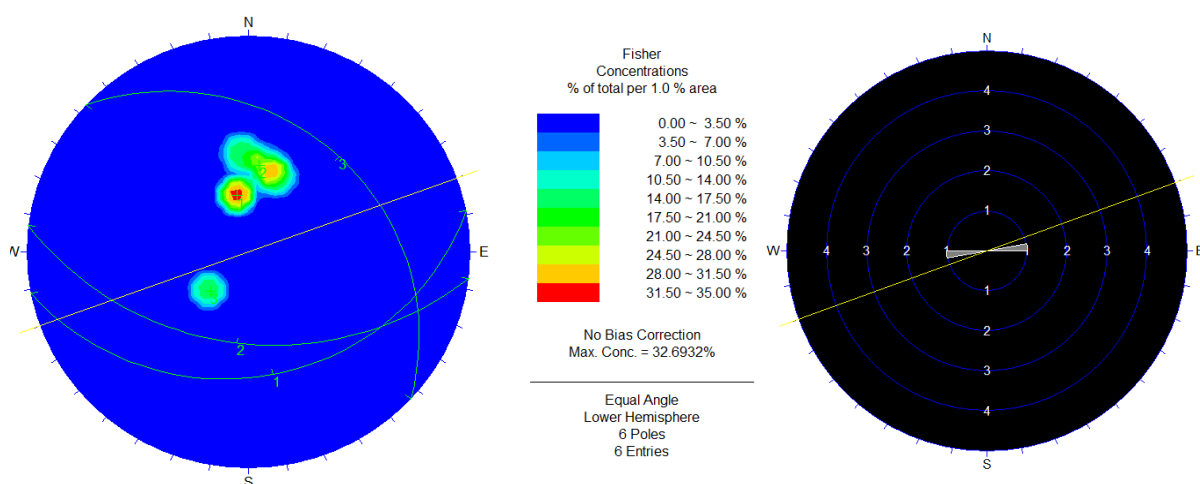
Нестабилните зони се издвоени на ИГ карта (сл. 26) и тие претставуваат потенцијални места за одронување и свлекување на помали и поголеми блокови и карпести маси. Може да се забележи дека правецот на падот на фолијацијата некаде е неповолен во однос на правецот и падот на косината што прави и дополнителен проблем на десната страна на усекот.

Од друга страна и морфологија на теренот, атмосферските врнежи, кислородот, CO₂, температурните осцилации, дејството на мразот и стрмниот наклон на косините исто така влијаат за тие да се создадат. Површинското распаѓање на карпите е изразено по целата должина на отворената косина, а најизразено е на контактните делови помеѓу шкрилците и раседните структури.

На косините постојано има услови гравитациски кон осовината на експресниот пат од повисоките делови на теренот да отпаѓаат ситни парчиња на карпи и поголеми количини на карпест материјал. Неповолниот пад на насока и паден агол на фолијација од десната страна на косините, тектонската испуканост, пресекот на раседните структури со фолијацијата и нормалните пукнатини на неа, како и атмосферската вода, се значајни фактори за појава на нестабилност.

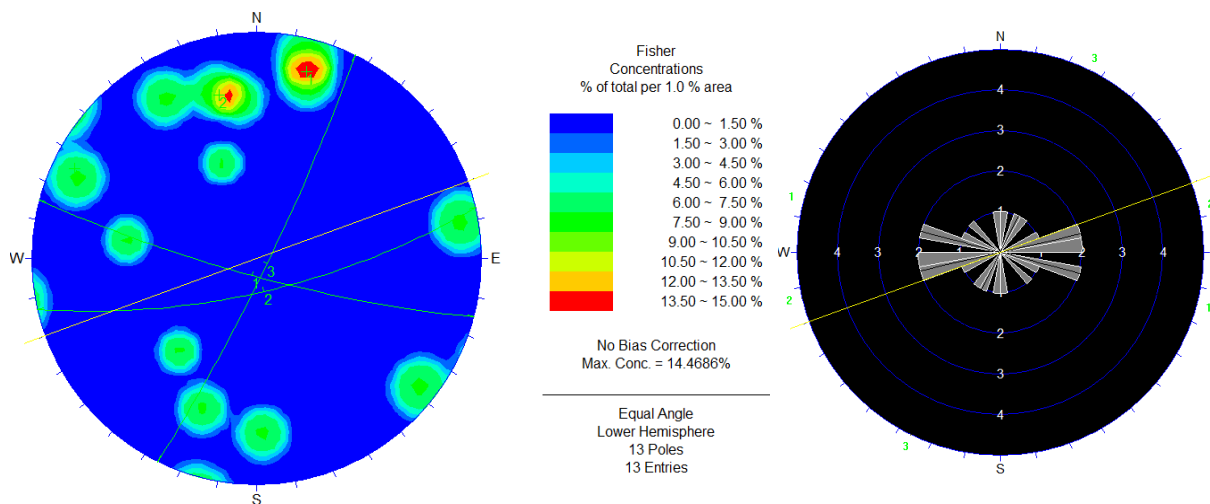
5.4.5. Геотехнички карактеристики на теренот

Со применетото инженерско-геолошко картирање по површината на косините од десната страна на усекот се изведени структурни мерења на карпите со помош на геолошки компас. Тие се прикажани на сликите за контурни дијаграми и розети (сл. 28 и сл. 29).



Слика 28 Контурен дијаграм и розета на елементи на азимут на падна насока и паден агол на фолијација кај нестабилната зона

Figure 28 Contour diagram and rose diagram of dip and dip direction of the foliation in the unstable zone



Слика 29 Контурен дијаграм и розета на елементи на азимут на падна насока и паден агол на системи пукнатини кај нестабилната зона

Figure 29 Contour diagram and rose diagram of dip and dip direction of the joints in the unstable zone

За фолијацијата (сл. 28), на десната страна на усек 4 на потегот на нестабилната зона се гледа дека постојат два максимуми со слична падна насока (азимут) кон југ (169° и 187°) и кос паден агол (30° и 44°). Регистрирани се и послабо застапени системи на пукнатини со поблаг паден агол ($EP = 46/28^\circ$). Овде јасно се гледа дека фолијацијата на карпите има неповолен азимут и неповолен паден агол во однос на трасата на патот, кој на овој дел има правец $70 - 250^\circ$ (линијата што минува низ центарот на кругот).

За пукнатините (сл. 29), од контурниот дијаграм се гледа дека има повеќе системи на пукнатини со различна ориентација. Сепак преовладуваат пукнатинските системи со правец на протегање И-З, ИСИ-ЗЈЗ и ИЈИ-ЗСЗ, што најдобро се гледа на розетата.

Конкретната појава на свлечиште на предметната локација е и условена од главните системи на фолијација кои се со генерален пад кон југ со агол близок до аголот на ископ на последната косина (сл.30).



Слика 30 Најновата нестабилност се појави по фолијација од $180/42^\circ$

Figure 30 The latest instability occurred along foliation of $180/42^\circ$

6. ВЕРИФИКАЦИЈА НА МЕТОДОЛОГИЈАТА ЗА СОБИРАЊЕ СТРУКТУРНИ ПОДАТОЦИ

Со цел верификација на предложената методологија за собирање структурни податоци низ примери од практиката, беше потребно постепено да се дојде до резултати кои би ја потврдиле. Станува збор за употреба на паметен телефон за собирање и интерпретација на податоци кои би дале информации конкретно за структурите на одредена геолошка формација, односно за азимут на падната насока и падниот агол, било таа да е рамнина на фолијација, пукнатина и др.

Со цел да се елиминираат човечките грешки при снимањето на 3D-информации, истражувачите постојано работат на пронаоѓање точни, прецизни и одржливи решенија (Shariati et al., 2021). Изгледот и геометријата на еден објект може да се реконструира преку 3DOT. Најпрецизните и најдеталните начини за извлекување на 3DOT се фотограметријата и ласерското скенирање (Moradi et al., 2021), како што е наведено и погоре.

6.1. Основи за верификација на методологијата за собирање структурни податоци

Во делот на верификација на оваа методологија, сè одеше постепено. Се поставуваше еден предизвик, тој се решаваше, без да може да се антиципираат добиените резултати. Идејата беше за почеток да се искористат сите достапни алатки, традиционални и современи, со цел да се добие реална слика за можностите кои ги дава користењето на паметниот телефон и LiDAR-технологијата која ја поседува.

Најпрво се изврши снимање на изданок од карпа со употреба на геолошки компас, SfM-технологијата со употреба на дрон, и LiDAR-технологијата која ја поседува телефонот. Се направија детални споредби на 3DOT кои се добиени, нивната поставеност во просторот, како и споредба на добиените мерења со оние добиени со геолошкиот компас. Се разбира, сите податоци се обработија со примена на соодветни аналитички методи.

Откако директно се докажа функционалноста на оваа метода, се направи втора верификација на користење ваков тип на собирање податоци, со исфрлање на проверката со SfM-методата, односно снимањето со дрон. Во вториот чекор се користеа геолошки компас и GPS-уред за геореференцирање на добиениот 3DOT со помош на паметниот телефон. Се избра и различна геолошка средина во споредба со онаа каде се вршеше првото мерење.

Откако и втората верификација даде солидни резултати, последниот чекор беше трета верификација, во трета геолошка средина, со исфрлање на GPS-уредот за геореференцирање, и употреба на геолошки компас како репер за директна верификација на облакот од точки кој е геореференциран рачно. За таа цел се искористени мерења добиени од геолошкиот компас, кои служеа како реперни при позиционирањето на 3DOT во просторот.

Со идеја да се покријат што е можно повеќе фактори, услови и примери, една од целите беше и да се работи на изданоци со различна геолошка генеза. Со тоа се добива репрезентативен примерок од различни геолошки формации, како и одредена димензија за тоа како овие техники функционираат во различни геолошки средини.

При тоа, основен репер секогаш се мерењата кои се добиени со геолошкиот компас. Со добивање на 3D-облаците од точки и нивна компјутерска обработка, се добиваат и соодветни елементи на пад кои се споредуваат со оние кои се добиени на традиционалниот начин, односно со употреба на геолошкиот компас. Како чекор понатаму, со употреба на софтвери за полуавтоматска обработка на овие облаци од точки е направен обид да се добијат резултати за измерените елементи на пад со намалување на ангажманот на корисникот, односно со автоматизација на целиот овој процес. Полуавтоматската обработка има за цел многукратно да го забрза времето на добивање податоци од 3DOT со намалување на директното учество на геологот во нивната обработка, односно употреба на автоматски поставки на алгоритми кои бараат минимални интервенции.

Според направените истражувања во овој момент, автоматските методи во голема мерка се подложни на грешка. Овие обиди се во почетна фаза при што постојат верзии кои се ветувачки, но во овој момент не даваат реални резултати,

односно кога тие се споредени со оние кои се добиени на традиционалниот начин, не даваат висок степен на доверливост. Овие автоматски методи иако се побрзи од полуавтоматските, во овој момент не се соодветни за верификација на првата методологија, односно се подложни на поголеми грешки. Сепак, нивната актуелност во моментот на пишување на оваа дисертација е многу голема, како што е и наведено погоре, така што постојано се добиваат нови и различни начини за спроведување на овие методи.

Полуавтоматските софтвери за анализа на 3DOT, од друга страна имаат голем број на позитивни примери на обезбедување солидни податоци од аспект на двонасочна споредба на традиционални и современи методи. Кај полуавтоматските методи е потребно да се дадат основни влезни параметри со цел софтверот да може да ги искористи своите алгоритми на најточен можен начин, односно да ги извлече, а понатаму и да ги анализира реалните рамнини во просторот. Постојењето на повеќе софтвери за полуавтоматска обработка се должи на различните алгоритми кои би се користеле за обезбедување на овие податоци. Постојат повеќе алгоритми, повеќето од нив стари и по повеќе од половина век кои, кога се применуваат посебно или во комбинација со друг алгоритам, даваат задоволителни резултати. Се разбира и овој процес е во фаза на разработка. По направените истражувања е донесена одлука да се искористат два софтвера за полуавтоматска обработка со цел на некој начин да се збогати контролната опција, а и секако и да се изврши меѓусебна споредба на функционалноста на тие два софтвера. Станува збор за софтверот *DSE* и плагинот *FACETS* за CloudCompare, кои се објаснети погоре.

Со тоа, сите податоци се добиени од три локации со три различни геолошки средини, а работени со традиционални и современи методи, понатаму обработени во софтвер рачно, или со употреба на полуавтоматска метода. Така се добива одличен преглед и релативно широка слика при верификација на методата за собирање на структурни податоци. Обемот на добиени информации е голем, а особено треба да се имаат предвид можностите кои ги нудат полуавтоматските методи со измена на некои од основните параметри, со што добиените резултати би биле буквално бесконечно разновидни.

6.2. Применета методологија за собирање структурни податоци за локалитетот Милутинци – изданок во микашисти

Избраниот изданок од карпа е изграден од микашисти и е со димензии 20x20 m. во близина на с. Милутинци, во северозападниот дел на Македонија. Изданокот сам по себе претставува еден истакнат релјефски белег на околината, а според димензиите е соодветен, односно претставува репрезентативен примерок кој одговара на зададените цели. Тие цели се: да е достапен за мерење со геолошки компас, да е достапен за снимање со мобилен телефон, на соодветна оддалеченост која ја диктира технологијата во телефонот и се разбира, да е достапен за снимање со дрон.

На прв поглед истражуваниот изданок остава впечаток дека има еден доминантен систем на рамнини, и повеќе помали системи на рамнини. Главниот сет на рамнина претставува неговата фолијација која генерално отстапува од падовите на сличните структури во околниот терен. Останатите дисконтинуитети ги претставуваат разните пукнатински системи, кои ретко се неправилни, односно во ретки случаи претставуваат предизвик за добивање точен резултат. Генерално изданокот е класичен претставник на карпи со метаморфно потекло. Набирањата не се толку силни, така што најголемиот дел од рамнините се соодветни за вршење структурни мерења со традиционалните и современите методи.

Постапката на собирање податоци со геолошкиот компас е релативно едноставна, при што е потребен геолошки компас и тетратка и молив за запишување на извршените мерења.

Од аспект на современите технологии се користени LiDAR-технологијата која ја поседува паметниот телефон, и SfM фотограметриската технологија со помош на камера која е монтирана на беспилотно летало. Иако станува збор за две различни технологии, добиениот производ од двете техники е 3DOT.

Фотограметријата со употреба на камера монтирана на беспилотно летало се користи веќе подолг период за снимање на најразлични објекти, од згради до патишта и рудници. Точноста на оваа технологија, се разбира во комбинација со соодветна геодетска поддршка може да биде 1 - 3 cm. Имајќи предвид дека прецизноста на оваа технологија е повеќекратно докажана, таа претставува

сосема коректен избор за валидизација на 3DOT кој би се добил со помош на паметниот телефон.

За овие современи методи да бидат комплетни во делот на проверката и валидизацијата на добиените мерења, потребно е и соодветно геореференцирање на добиените 3DOT. Тоа се реализираше со употреба на геодетска поддршка, односно прецизно GPS-снимање на референтни точки на истражуваниот локалитет кои подоцна се користат како референтни точки за поставување на добиениот 3DOT во реални координати, односно негова реална поставеност во просторот.

Елементите на пад на геолошките структури се мерени со Кларов компас (сл. 1а). SfM-техниката е спроведена со помош на беспилотно летало со камера кое лета на мала висина - Phantom 4 RTK, на кинеската компанија DJI (сл. 9в). Мерењата со телефонот се направени со помош на паметен телефон iPhone 13 Pro (сл. 9а). За добивање на геореферентните точки е користен GPS Leica Viva GS08 со глобална позициона сателитска навигација со користење на перманентната Макпос-станица што добива корекции од катастар (сл. 9г).



Слика 31 Маркери за геореферентни точки со црвена боја
Figure 31 Red markers for points for georeferencing

Пред започнување со снимањата на теренот се обележани точки во воочлива боја која треба да е лесно видлива при снимањето со дрон и телефон

(сл. 31). Тие точки се снимаат со GPS-уред со цел подоцна да се изврши геореференцирање на сниманиот терен за потребите на понатамошна обработка на добиените облаци на точки. Со минимум 4 референтни точки се овозможува висок степен на прецизност при геореференцирање на облакот од точки. При тоа се добиени следните точки (таб 3):

Табела 3 Координати на референтни точки за локалитетот Милутинци
Table 3 Reference points coordinate for Milutinci site

Број на точка:	Y	X	Z
1	7596347.331	4674120.401	761.617
2	7596349.806	4674125.653	762.033
3	7596357.265	4674118.438	761.500
4	7596349.441	4674115.804	763.997

Најпрво е извршено мерење на структурните елементи со помош на геолошки компас (сл. 32). При тоа се означени позициите каде се вршени мерењата на претходно направени фотографии, за при работа со виртуелниот компас, визуелно да се лоцираат истите позиции кај изданокот (сл. 33).



Слика 32 Мерење со геолошки компас на локалитетот Милутинци

Figure 32 Measurement using geological compass on Milutinci site

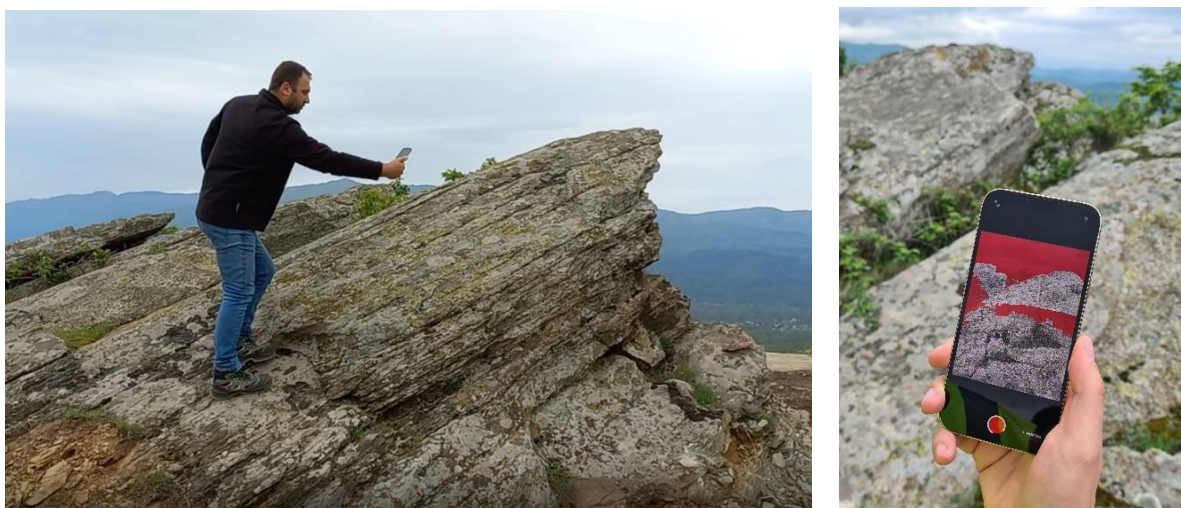
Користејќи ја апликацијата 3D Scanner App е направено LiDAR-скенирање на теренот снимано со користење два различни нејзини пристапи: LiDAR и LiDAR Advanced. Бидејќи претходно немавме искуство како работат овие две функции кај телефонот, решивме да ги употребиме и двете. За снимање, се активира апликацијата од телефонот и се снима достапната површина со помош на LiDAR-сензорот кој се наоѓа на задната страна на телефонот (до камерата). При

снимање телефонот е држен на растојание од површината од 0,3 до 3 метри (сл. 34).



Слика 33 Некои од мерните места обележани со црвени броеви

Figure 33 Some of the measurement points made at sight marked with red numbers



Слика 34 LiDAR снимање со паметен телефон на локалитетот Милутинци

Figure 34 LiDAR recording using smartphone at site Milutinci

Со SfM-техниката со употреба на дрон е сниман целиот објект. Всушност со навибирање на дронот се фотографира сите видливи површини (сл. 35). При снимањето дронот се позиционира користејќи свои координати. За реално да се позиционира добиениот облак од точки, подоцна со употреба на софтвер тој се геореференцира во потребниот координатен систем. Затоа се користат претходните ознаки со спреј како референтни маркери.



Слика 35 Снимање со употреба на дрон на локалитетот Милутинци

Figure 35 Surveying using drone at site Milutinci

6.2.1. Локалитет Милутинци – добиени резултати

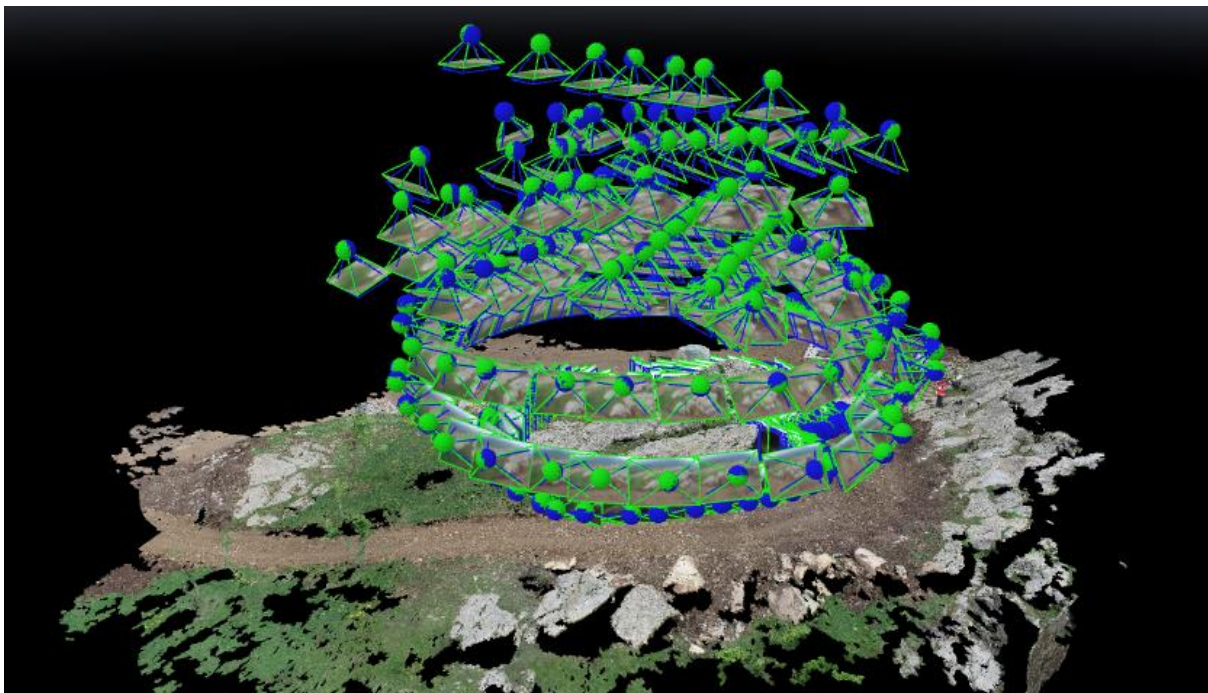
6.2.1.1. Обработка на податоците добиени од снимање со дрон

Со употреба на SfM-технологијата, направено е снимање со дрон на целата површина на изданокот, при што се направени 271 фотографија. Снимањето траеше десетина минути.

Фотографиите кои се добиени со употреба на SfM-техниката, прво се обработени во софтверот Pix4D. Притоа, од достапните фотографии се добива 3DOT. За време на обработката во Pix4D, се добива визуелизација на точните позиции на камерата додека биле направени фотографиите (сл. 36). Од овие фотографии можат да се извлечат облаци од точки со многу висока густина, но за да може правилно да се работи, се избира оптимална густина на точки.

Со комплетна обработка на податоците се добива моделот, односно 3D-облакот од точки (сл. 37). Добиениот модел може да се зачува во една од многуте достапни екстензии: .las, .laz, .ply, .xyz, итн. Фајлот потоа се отвора во софтверот Cloudcompare. Ако снимката покрива поголем дел од околината на изданокот, како што може и да се види на претходните слики, непотребните делови од снимката се сечат со употреба на алатката „segment“. Со тоа се намалува големината на фајлот со кој треба да се работи, се олеснува работата со него, а

дополнително се добива „чиста“ слика на која може да се работи. По соодветната обработка фајлот содржи 34 057 274 точки и е со големина од 2,9 GB.



Слика 36 Позиции на камерата за време на летот

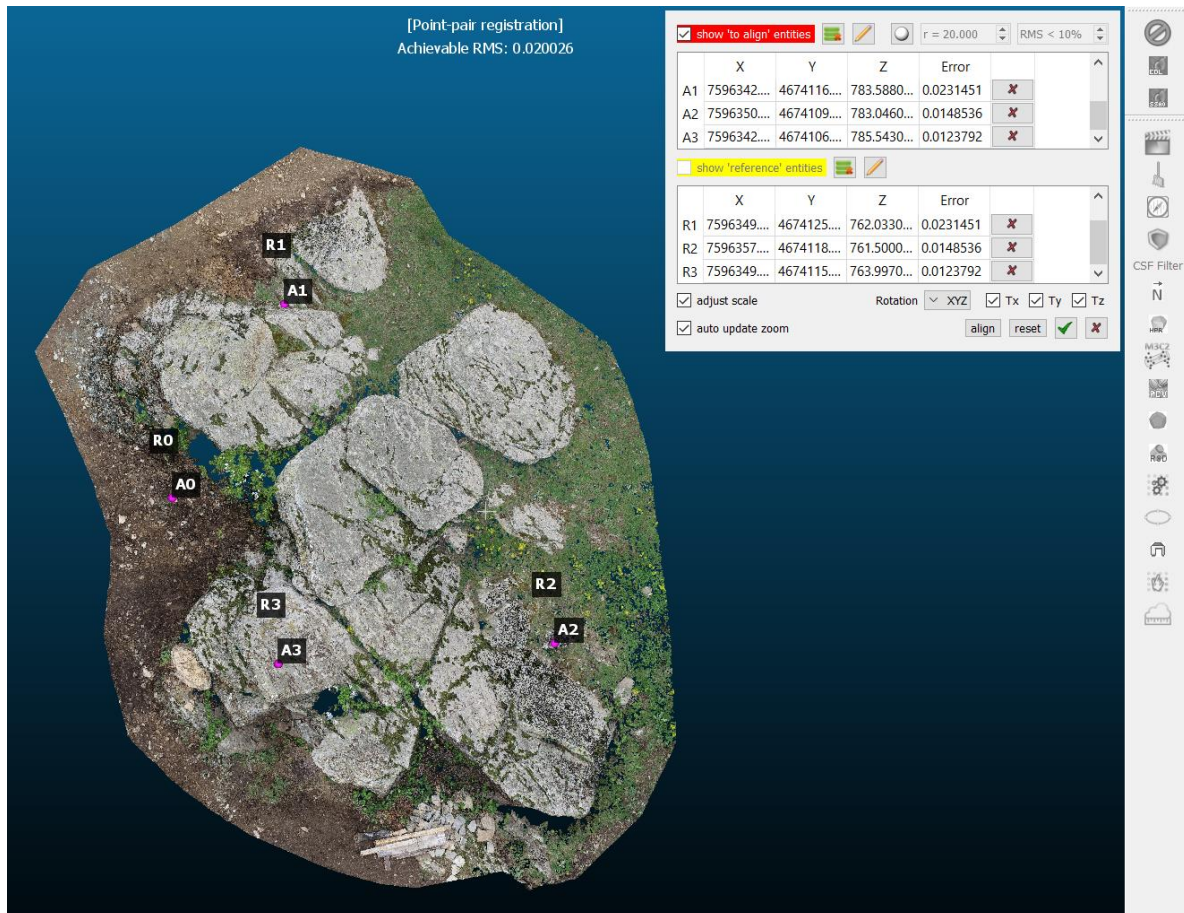
Figure 36 Positions of the camera during the flight



Слика 37 Финален изглед на 3DOT добиен со Pix4D

Figure 37 Final model of the 3DPC derived by Pix4D

Следниот чекор е геореференцирање на 3DOT во познат координатен систем. Ова се прави со алатката „align“ во софтверот CloudCompare. Се одбираат референтните точки со црвена боја направени пред снимање на изданокот. Во овој случај има четири контролни точки. Со користење на алатката „Aligns two clouds by picking (at least 4) equivalent point pairs“ се референцира облакот. Координатите се внесуваат со алатката „Point picking“ (сл. 38).



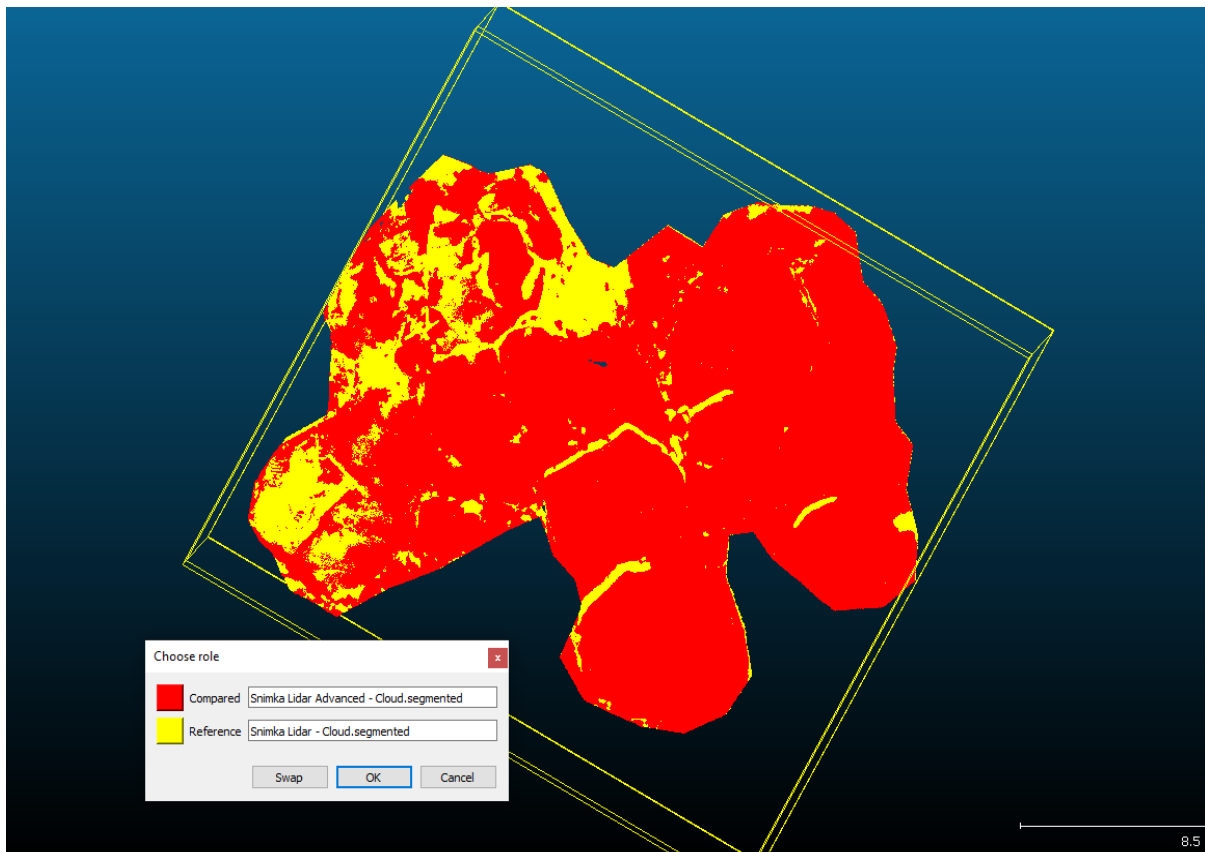
Слика 38 Геореференцирање на 3DOT и проверка на координатите
Figure 38 Georeferencing the 3DPC and checking the coordinates

6.2.1.2. Обработка на податоците добиени од снимање со телефон

Со телефонот се направени две снимки со двете достапни опции на снимање: „Lidar“ и „Lidar Advanced“. И двете снимања траеја околу 5 минути. Од достапните опции за експортирање на снимките е користена екстензијата (.xyz). Првиот фајл беше со големина од 65,2 MB, а вториот 61,6 MB. Големината на фајловите зависи од времето за кое се снима теренот, како и површината која е покриена со снимање. Разликата помеѓу двете опции е во различниот изглед на

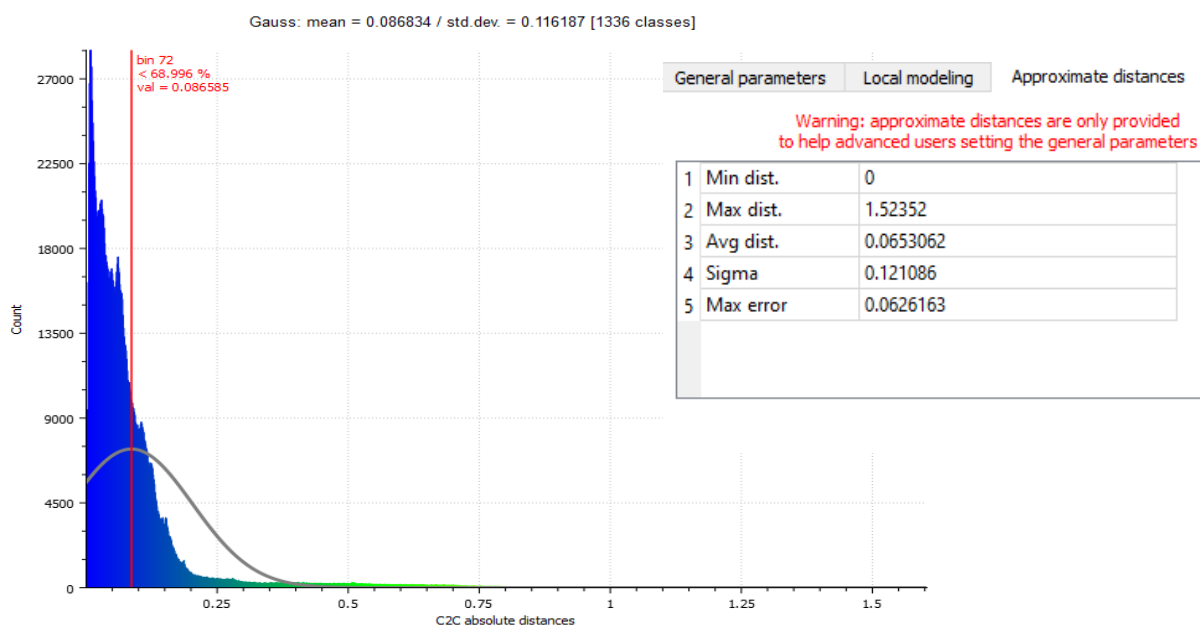
екранот на телефонот, додека при обработката на податоците не беа добиени забележливи разлики. Кај двете снимки, поради различниот пристап на потешките делови на теренот, различен процент од карпата е покриен. Ова е земено предвид при обработка на податоците.

3DOT се геореференцираат во Cloudcompare на истиот начин опишан погоре. Потоа и двата фајла се исчистени од „шум“, непотребни површини и вегетација. Од *Lidar*-фајлот е добиен 3DOT со 2 062 833 точки и големина од околу 67 MB. Од *Lidar Advanced*-фајлот е добиен 3DOT со 1 940 668 точки и големина од околу 63 MB. На прв поглед, овие два фајла изгледаат идентично. Со употреба на алатката „cloud/cloud distance“е направена споредба помеѓу двата облаци од точки (сл. 39). Добиените параметри се прикажани на сл. 40.

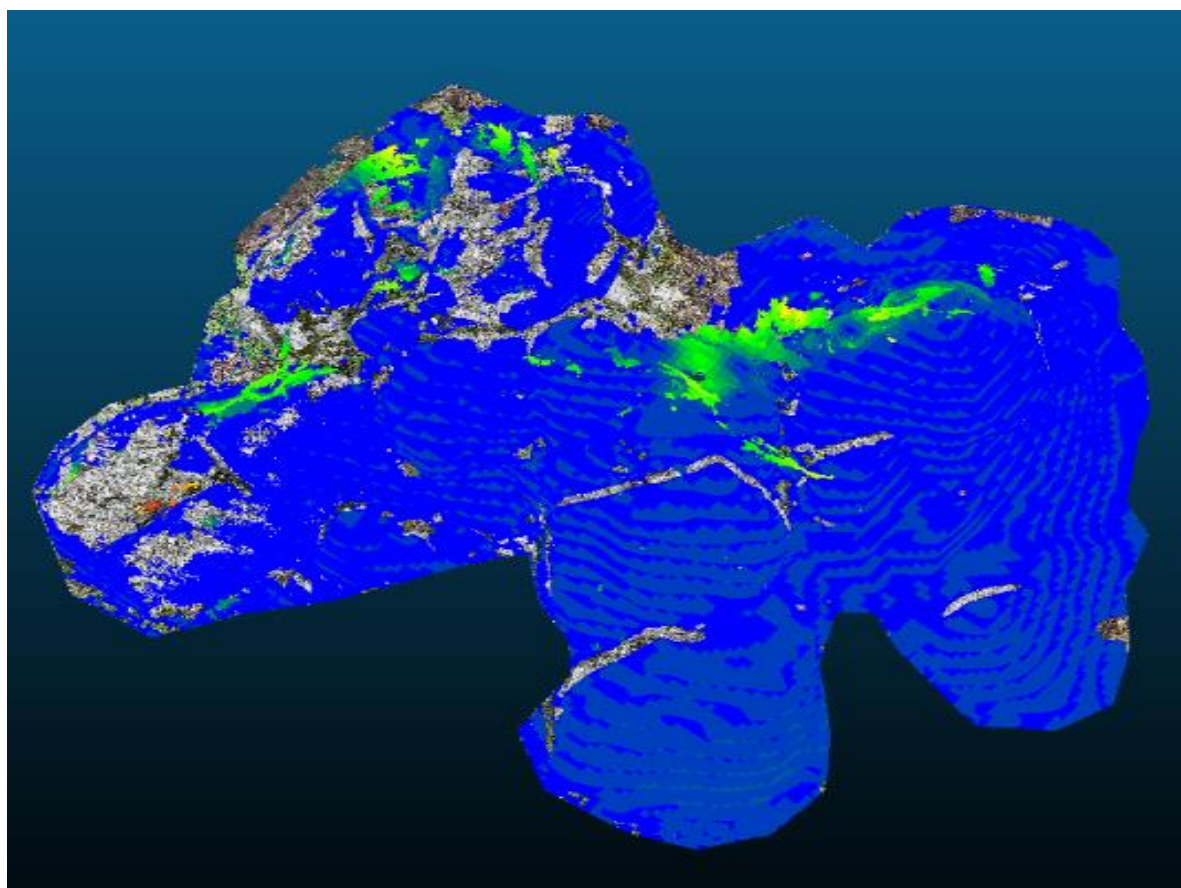


Слика 39 Споредба на *Lidar* и *Lidar Advanced* 3DOT
Figure 39 Comparing the *Lidar* and *Lidar Advanced* 3DPC

Може да се заклучи дека двете снимки се преклопуваат со голема точност. Преклопувањето на двете снимки со нивните отстапувања е прикажано на сл. 41, каде поголемиот дел од отстапувањата се означени со темносива боја, односно претставуваат отстапувања блиски до нула.



Слика 40 Дистрибуција на грешки помеѓу *Lidar* и *Lidar Advanced*
Figure 40 Distribution of errors between *Lidar* and *Lidar Advanced*



Слика 41 Приближни растојанија на грешки помеѓу *Lidar* и *Lidar Advanced*
Figure 41 Approximate distances of errors between *Lidar* and *Lidar Advanced*

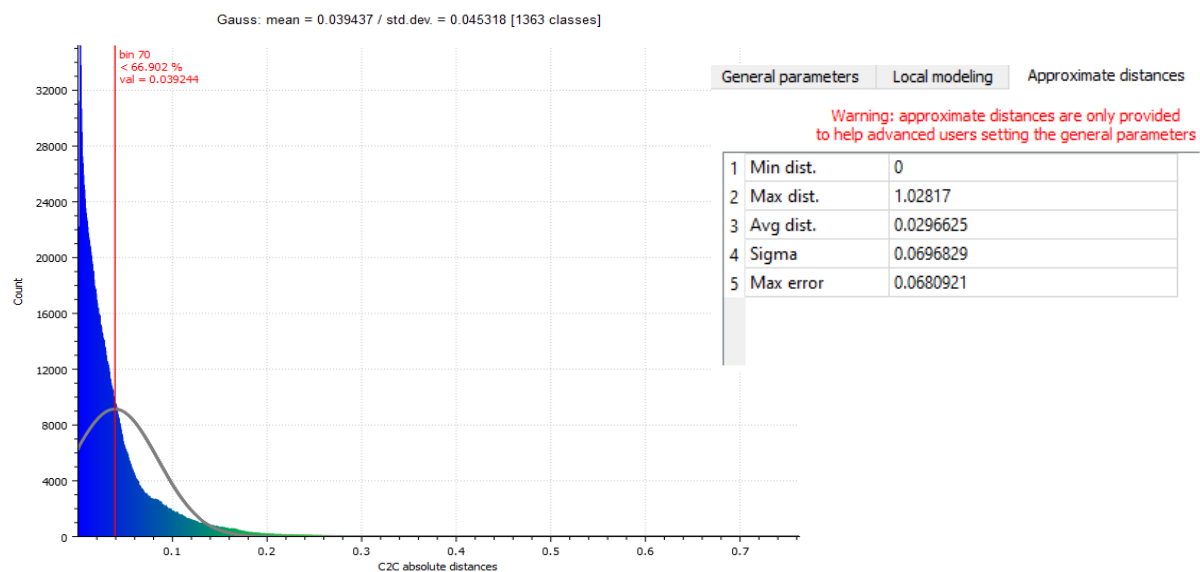
Самиот хистограм покажува дека повеќе од 95 % од точките имаат отстапување од неколку сантиметри. Просечната разлика е 6,5 сантиметри. На сл. 41 деловите со сина боја означуваат преклопување со најмала разлика, додека посветлите бои покажуваат отстапувања помеѓу двата 3DOT. Поголемите отстапувања се во деловите каде што има појава на одредена вегетација, односно во делови од облаците каде што не се направени мерења. Ако се отстранат ефектите од вегетацијата, точноста ќе се зголеми уште повеќе. Во овој случај намерно е оставен дел од вегетацијата со цел добивање реален фидбек и со вклучени „отежнителни“ околности.

Во првиот случај, мерењето беше извршено подетално, со подолг престој на мерните точки. При споредба на бројот на точки добиени со снимките, се покажува дека снимката Lidar има подобра покриеност од снимката Lidar Advanced. Но тоа е поради субјективни причини.

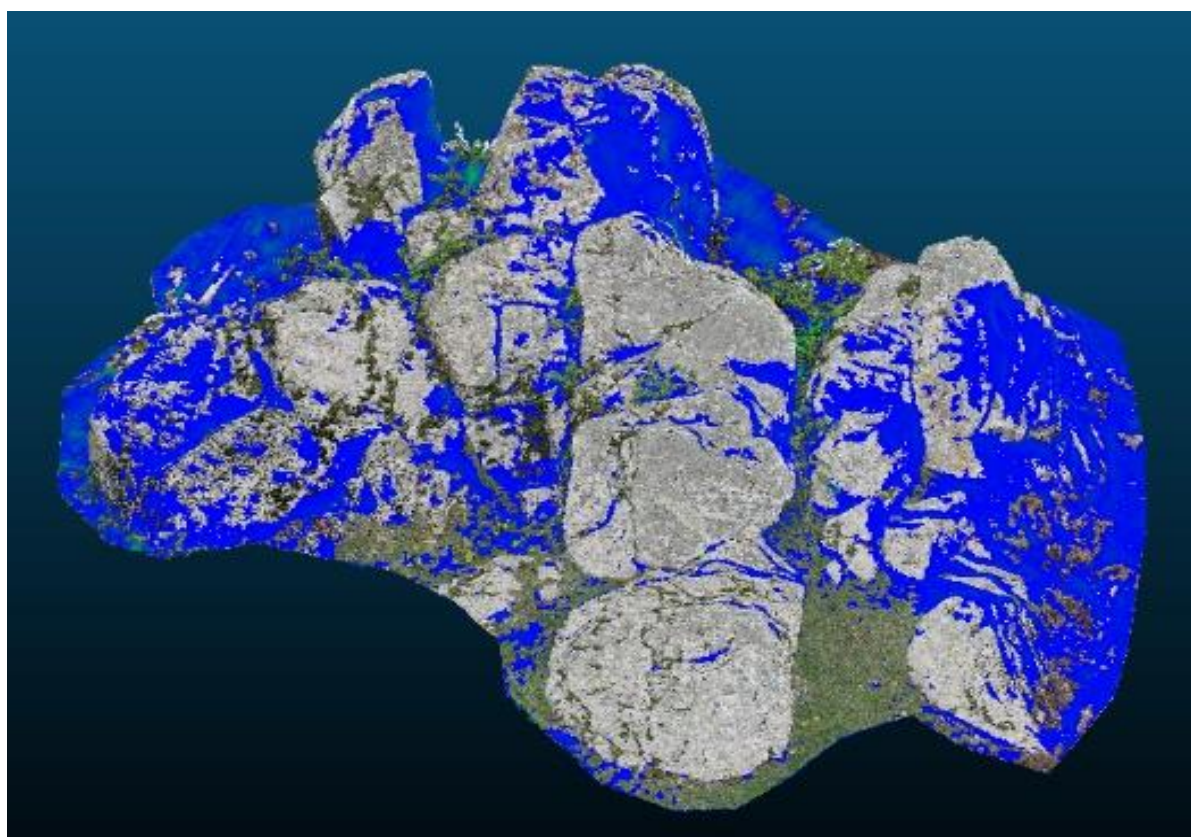
6.2.1.3. Споредба помеѓу снимањата добиени со LiDAR и SfM

По докажувањето дека двете снимки направени со телефонот се речиси идентични, поквалитетната снимка, односно снимката Lidar е користена за понатамошна верификација, односно споредба со снимката SfM, и во понатамошната работа е користена како снимка LiDAR. Со употреба на „cloud/cloud distance tool“ се споредуваат овие два 3DOT. При тоа, се добива дека овие два 3DOT се позиционирани еден спрема друг со многу голема точност. Хистограмот укажува дека повеќе од 95% од точките имаат отстапување од неколку сантиметри, а средната разлика е 3 сантиметри (сл. 42).

Поголемите отстапувања се всушност во деловите со поголема вегетација, односно во деловите на изданокот кои не се покриени еднакво со снимањата. Со ова се извлекува заклучок дека и двата 3DOT кои се добиени со сосема различни технологии се преклопуваат со голема точност (сл. 43).



Слика 42 Дистрибуција на грешки помеѓу LiDAR и SfM
Figure 42 Distribution of errors between LiDAR and SfM



Слика 43 Приближни растојанија на грешки помеѓу LiDAR и SfM
Figure 43 Approximate distances of errors between LiDAR and SfM

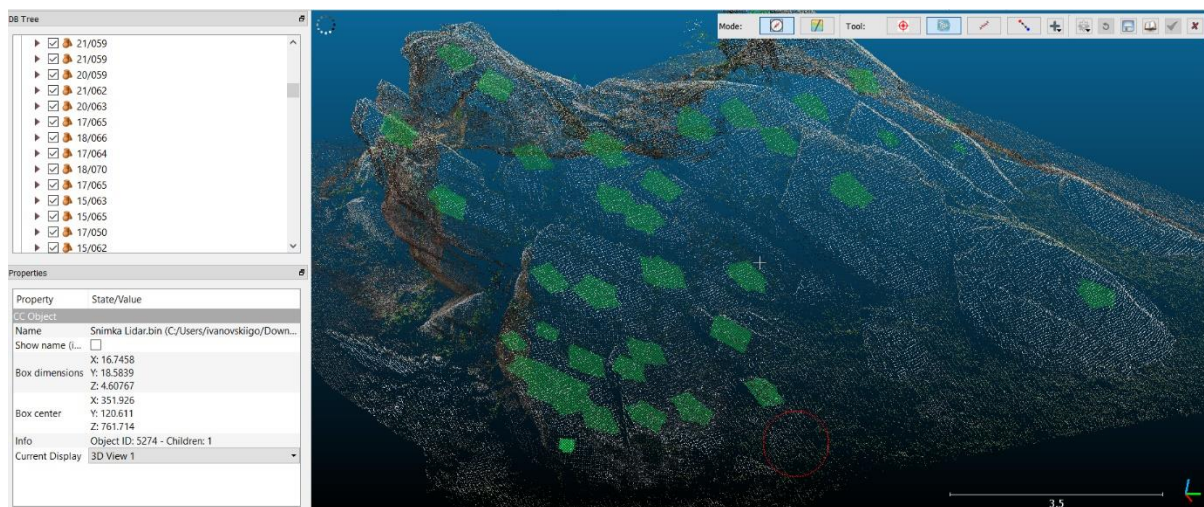
6.2.2. Приказ на мерењата направени со геолошки компас и виртуелен компас

Поради тоа што во природата не постојат идеално мазни рамнини, и поради тоа што со мерење со геолошки компас, на кратки растојанија може да се добијат различни мерења со отстапувања од неколку степени, при мерењето со него на секое мерно место се направени по три мерења. Тоа значи дека за секое мерно место, во радиус 10 - 15 cm, се направени три мерења кои се однесуваат на тоа место. Овие три мерења најчесто се разликуваат меѓу себе за азимутот на падната насока или падниот агол. Вкупно се избрани 71 мерно место, односно се направени 213 мерења (таб. 4). При тоа се водеше сметка да се измерат елементи на пад од сите страни на овој изданок, односно да се постигне разновидност во делот на добивање различни системи на рамнини.

Табела 4 Мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (зелено)
Table 4 Measurement with geological compass (blue) and virtual compass (green)

Бр.	Мерења со геолошки компас			Бр.	Мерења со геолошки компас			Бр.	Мерења со геолошки компас			Бр.	Мерења со геолошки компас		
1	70/16	67/16	64/18	19	61/21	60/20	54/20	37	51/21	52/25	57/21	55	330/89	332/89	325/86
2	55/20	67/18	55/19	20	75/22	64/18	64/18	38	61/21	61/21	42/21	56	23/66	25/59	27/59
3	41/18	51/18	45/22	21	40/22	53/24	46/24	39	55/20	54/20	55/24	57	330/88	332/89	330/89
4	57/19	58/20	60/20	22	56/22	43/20	39/26	40	46/24	50/24	52/25	58	55/20	69/22	65/20
5	50/22	54/18	56/21	23	64/20	60/22	66/26	41	335/27	337/30	335/28	59	40/68	38/70	43/59
6	54/17	70/22	60/20	24	339/40	338/39	335/39	42	345/30	338/26	342/30	60	40/62	43/65	38/60
7	53/20	59/20	61/20	25	336/38	343/39	341/36	43	314/40	314/40	314/39	61	300/75	305/80	301/81
8	52/20	55/18	64/17	26	338/30	338/38	337/32	44	323/43	325/41	324/43	62	298/85	305/80	303/81
9	54/19	56/18	54/18	27	54/28	66/23	56/21	45	323/37	330/40	325/40	63	340/75	348/74	354/78
10	42/18	50/18	57/19	28	60/22	61/20	57/25	46	350/32	324/32	337/35	64	199/43	208/51	208/40
11	54/23	61/20	56/22	29	61/22	76/21	64/27	47	340/29	339/25	337/25	65	228/42	229/48	218/45
12	59/21	50/22	50/22	30	322/36	318/36	320/40	48	316/31	317/34	317/33	66	218/40	220/44	215/41
13	49/20	50/23	51/22	31	60/22	58/18	54/21	49	314/30	319/33	316/32	67	228/50	222/40	218/45
14	55/20	54/21	56/20	32	53/21	57/19	59/19	50	70/21	70/20	70/23	68	206/52	195/50	210/54
15	74/20	63/20	64/21	33	58/21	55/22	61/20	51	33/70	45/80	52/82	69	103/67	106/72	102/68
16	51/23	52/20	55/22	34	62/20	55/20	54/18	52	228/53	236/53	235/61	70	102/71	105/70	99/69
17	55/21	56/21	56/20	35	50/22	52/23	51/23	53	260/26	257/39	248/34	71	116/70	111/70	126/77
18	56/19	61/21	59/23	36	71/26	67/27	67/26	54	150/89	151/89	148/88				
Бр.	Мерења со виртуелен компас			Бр.	Мерења со виртуелен компас			Бр.	Мерења со виртуелен компас			Бр.	Мерења со виртуелен компас		
1	63/15	60/16	61/17	19	65/17	66/18	64/17	37	57/20	51/20	49/22	55	332/87	332/86	332/87
2	70/17	65/16	69/15	20	70/18	65/17	63/15	38	56/19	58/14	54/18	56	29/68	22/69	26/64
3	52/20	53/20	53/20	21	65/15	50/17	62/15	39	62/24	63/23	59/24	57	333/89	333/89	333/89
4	58/19	56/19	56/20	22	64/21	71/27	58/22	40	50/22	50/22	53/24	58	57/20	72/22	49/22
5	62/20	59/21	65/20	23	70/20	64/27	54/26	41	333/26	338/25	332/27	59	37/74	43/46	39/76
6	58/22	61/21	59/20	24	352/31	348/34	347/34	42	343/29	344/29	345/26	60	36/62	37/63	34/61
7	69/16	66/17	65/18	25	343/33	343/34	342/34	43	313/37	316/40	311/41	61	305/81	309/83	310/86
8	63/17	63/17	65/17	26	335/31	338/31	338/31	44	328/39	327/40	325/42	62	307/82	308/84	307/83
9	61/19	60/18	61/18	27	71/15	68/15	59/18	45	329/39	328/41	329/40	63	333/89	335/88	340/76
10	63/17	62/17	59/17	28	65/20	63/20	67/16	46	329/32	331/33	331/29	64	203/50	206/43	207/39
11	68/21	69/21	67/22	29	77/18	73/19	72/20	47	334/31	330/30	340/26	65	226/41	225/40	223/39
12	65/22	63/22	67/21	30	336/26	324/34	331/27	48	324/37	321/34	326/38	66	216/45	220/47	219/44
13	62/19	61/19	60/19	31	61/20	55/20	59/19	49	313/32	316/32	315/35	67	214/38	218/40	217/39
14	61/19	61/19	61/19	32	59/19	57/18	53/18	50	66/21	66/27	67/21	68	194/51	194/53	216/53
15	68/19	66/19	68/19	33	54/20	58/19	57/20	51	42/77	43/46	40/74	69	105/65	105/66	105/66
16	61/22	62/22	63/23	34	56/22	63/22	62/20	52	228/61	231/55	233/59	70	109/67	103/70	109/70
17	59/21	59/21	59/21	35	51/22	51/21	56/22	53	253/38	242/33	258/40	71	111/75	110/71	112/77
18	59/20	62/21	63/20	36	77/25	71/24	60/26	54	151/87	152/88	151/89				

Мерењата на елементите на пад кај 3DOT се прави во софтверот Cloudcompare со употреба на алатката „*A virtual compass for measuring outcrop orientations*“ која се користи во структурната геологија за интерпретирање и анализирање на виртуелни модели на изданоци. Таа алатка ги комбинира флексибилните структурни податоци од достапниот геолошки приказ со серија на алатки за компјутерска дигитализација и вршење на мерења. Алатката „*plane tool*“ се користи за мерење на ориентацијата на достапните планарни структури. Со оваа алатка, се одбираат рамнините кои треба да се измерат, а тоа се позициите, односно мерните места кои претходно се мерени со геолошкиот компас. Истите позиции каде е вршено мерење со геолошкиот компас (сл. 33) се препознаваат кај 3DOT и на тие идентични позиции се прават три мерења и со виртуелниот компас. Со секој клик на површината од облакот од точки се добива нејзин векторски приказ, а од левата страна на работната површина се прикажуваат соодветните елементи на пад (сл. 44). На тој начин, се добиваат еквиваленти за измерените елементи на пад.



Слика 44 Некои од мерењата направени со виртуелен компас

Figure 44 Some of measurements using the virtual compass

6.2.3. Анализа на добиените резултати

По добивање на резултатите од снимањата, може да се направат неколку различни анализи, кои независно можат да дадат различни аспекти на истата проблематика.

6.2.3.1. *Анализа на добиените отстапувања*

Природата на карпата што беше предмет на анализа е таква што, иако е претставена со поголеми површини со релативна униформност во делот на нејзините рамнини, сепак при поставување на геолошкиот компас на таа површина, за една мерна точка со три извршени мерења, се добиваат отстапувања во делот на азимутот на падната насока до максимални 21° , а за падниот агол до максимални 13° .

Користејќи ја алатката за виртуелен компас, се забележува дека трендот добиен со мерењата е во слични рамки како и кај мерењата со геолошкиот компас. Со оваа алатка, за една мерна точка каде што беа направени три мерења, отстапувањата за азимут на падната насока се до максимални 23° , а за падниот агол до максимални 13° .

Во деловите на изданокот каде што рамнините се помазни, совпаѓањата на мерењата со класичниот компас и виртуелниот компас имаат многу сличен тренд. Исто така, мерењето на нерамни делови дава поголеми отстапувања во добиените вредности како со геолошкиот, така и со виртуелниот компас (таб. 5).

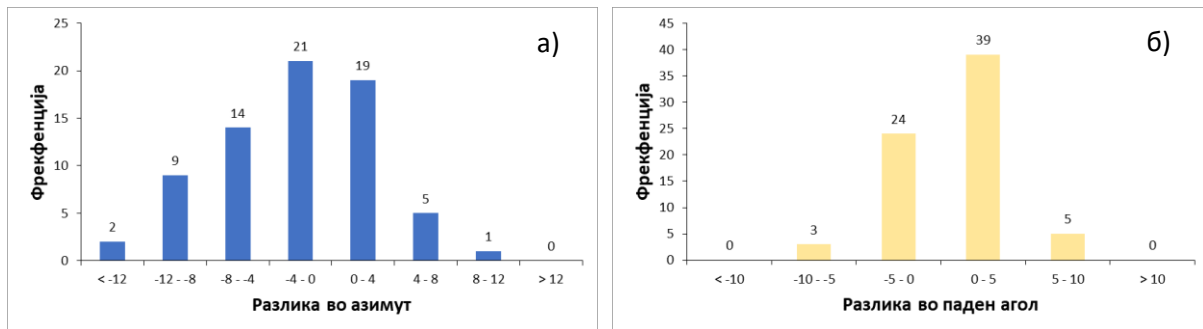
Ако се направи анализа на просечните разлики во сет од три мерења за едно мерно место, тогаш може да се добијат дополнителни податоци за компатибилноста помеѓу овие два пристапа.

Направена е анализа на фреквенцијата на разликите во вредностите добиени со геолошки компас, односно со виртуелен компас, со цел да се добие увид во дистрибуцијата на отстапувањата. Разликата е изразена како отстапување на мерењето со виртуелниот компас во однос на мерењето со геолошкиот компас. Просечните вредности на разликите за една мерна точка кај виртуелниот компас се одземаат од просечните вредности на разликите за една мерна точка добиени со мерење со геолошки компас. Сл. 45а ги прикажува отстапувањата за азимут на падната насока, а на сл. 45б се прикажани отстапувањата на падниот агол.

ИНТЕГРИРАНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА АНАЛИЗА НА ГЕОЛОШКИ СТРУКТУРИ И ПРОЦЕСИ СО
ПРИМЕНА НА СОВРЕМЕНИ ТЕХНОЛОГИИ

Табела 5 Обработка на добиените вредности за азимут и паден агол
Table 5 Processing the obtained values for dip and dip direction

№	Мерења со геолошки компас						Просечна вредност на азимут	Просечна вредност на паден агол	Мерења со виртуелен компас						Просечна вредност на азимут	Просечна вредност на паден агол	Разлики	
	Азимут 1	Паден агол 1	Азимут 2	Паден агол 2	Азимут 3	Паден агол 3			Азимут 4	Паден агол 4	Азимут 5	Паден агол 5	Азимут 6	Паден агол 6			Разлика помеѓу два просека за азимут	Разлика помеѓу два просека за паден агол
1	70	16	67	16	64	18	67,00	16,67	63	15	60	16	61	17	61,33	16,00	5,67	0,67
2	55	20	67	18	55	19	59,00	19,00	70	17	65	16	69	15	68,00	16,00	-9,00	3,00
3	41	18	51	18	45	22	45,67	19,33	52	20	53	20	53	20	52,67	20,00	-7,00	-0,67
4	57	19	58	20	60	20	58,33	19,67	58	19	56	19	56	20	56,67	19,33	1,67	0,33
5	50	22	54	18	56	21	53,33	20,33	62	20	59	21	65	20	62,00	20,33	-8,67	0,00
6	54	17	70	22	60	20	61,33	19,67	58	22	61	21	59	20	59,33	21,00	2,00	-1,33
7	53	20	59	20	61	20	57,67	20,00	69	16	66	17	65	18	66,67	17,00	-9,00	3,00
8	52	20	55	18	64	17	57,00	18,33	63	17	63	17	65	17	63,67	17,00	-6,67	1,33
9	54	19	56	18	54	18	54,67	18,33	61	19	60	18	61	18	60,67	18,33	-6,00	0,00
10	42	18	50	18	57	19	49,67	18,33	63	17	62	17	59	17	61,33	17,00	-11,67	1,33
11	54	23	61	20	56	22	57,00	21,67	68	21	69	21	67	22	68,00	21,33	-11,00	0,33
12	59	21	50	22	50	22	53,00	21,67	65	22	63	22	67	21	65,00	21,67	-12,00	0,00
13	49	20	50	23	51	22	50,00	21,67	62	19	61	19	60	19	61,00	19,00	-11,00	2,67
14	55	20	54	21	56	20	55,00	20,33	61	19	61	19	61	19	61,00	19,00	-6,00	1,33
15	74	20	63	20	64	21	67,00	20,33	68	19	66	19	68	19	67,33	19,00	-0,33	1,33
16	51	23	52	20	55	22	52,67	21,67	61	22	62	22	63	23	62,00	22,33	-9,33	-0,67
17	55	21	56	21	56	20	55,67	20,67	59	21	59	21	59	21	59,00	21,00	-3,33	-0,33
18	56	19	61	21	59	23	58,67	21,00	59	20	62	21	63	20	61,33	20,33	-2,67	0,67
19	61	21	60	20	54	20	58,33	20,33	65	17	66	18	64	17	65,00	17,33	-6,67	3,00
20	75	22	64	18	64	18	67,67	19,33	70	18	65	17	63	15	66,00	16,67	1,67	2,67
21	40	22	53	24	46	24	46,33	23,33	65	15	50	17	62	15	59,00	15,67	-12,67	7,67
22	56	22	43	20	39	26	46,00	22,67	56	24	50	21	49	22	51,67	22,33	-5,67	0,33
23	64	20	60	22	66	26	63,33	22,67	70	20	64	27	54	26	62,67	24,33	0,67	-1,67
24	339	40	338	39	335	39	337,33	39,33	352	31	348	34	347	34	349,00	33,00	-11,67	6,33
25	336	38	343	39	341	36	340,00	37,67	343	33	343	34	342	34	342,67	33,67	-2,67	4,00
26	338	30	338	38	337	32	337,67	33,33	335	31	338	31	338	31	337,00	31,00	0,67	2,33
27	54	28	66	23	56	21	58,67	24,00	71	15	68	15	59	18	66,00	16,00	-7,33	8,00
28	60	22	61	20	57	25	59,33	22,33	65	20	63	20	67	16	65,00	18,67	-5,67	3,67
29	61	22	76	21	64	27	67,00	23,33	77	18	73	19	72	20	74,00	19,00	-7,00	4,33
30	322	36	318	36	320	40	320,00	37,33	336	26	324	34	331	27	330,33	29,00	-10,33	8,33
31	60	22	58	18	54	21	57,33	20,33	61	20	55	20	59	19	58,33	19,67	-1,00	0,67
32	53	21	57	19	59	19	56,33	19,67	59	19	57	18	53	18	56,33	18,33	0,00	1,33
33	58	21	55	22	61	20	58,00	21,00	54	20	58	19	57	20	56,33	19,67	1,67	1,33
34	62	20	55	20	54	18	57,00	19,33	56	22	63	22	62	20	60,33	21,33	-3,33	-2,00
35	50	22	52	23	51	23	51,00	22,67	51	22	51	21	56	22	52,67	21,67	-1,67	1,00
36	71	26	67	27	67	26	68,33	26,33	77	25	71	24	60	26	69,33	25,00	-1,00	1,33
37	51	21	52	25	57	21	53,33	22,33	57	20	51	20	49	22	52,33	20,67	1,00	1,67
38	61	21	61	21	42	21	54,67	21,00	56	19	58	14	54	18	56,00	17,00	-1,33	4,00
39	55	20	54	20	55	24	54,67	21,33	62	24	63	23	59	24	61,33	23,67	-6,67	-2,33
40	46	24	50	24	52	25	49,33	24,33	50	22	50	22	53	24	51,00	22,67	-1,67	1,67
41	335	27	337	30	335	28	335,67	28,33	333	26	338	25	332	27	334,33	26,00	1,33	2,33
42	345	30	338	26	342	30	341,67	28,67	343	29	344	29	345	26	344,00	28,00	-2,33	0,67
43	314	40	314	40	314	39	314,00	39,67	313	37	316	40	311	41	313,33	39,33	0,67	0,33
44	323	43	325	41	324	43	324,00	42,33	328	39	327	40	325	42	326,67	40,33	-2,67	2,00
45	323	37	330	40	325	40	326,00	39,00	329	39	328	41	329	40	328,67	40,00	-2,67	-1,00
46	345	32	324	32	337	35	335,33	33,00	329	32	331	33	331	29	330,33	31,33	5,00	1,67
47	340	29	339	25	337	25	338,67	26,33	334	31	330	30	340	26	334,67	29,00	4,00	-2,67
48	316	31	317	34	317	33	316,67	32,67	324	37	321	34	326	38	323,67	36,33	-7,00	-3,67
49	314	30	319	33	316	32	316,33	31,67	313	32	316	32	315	35	314,67	33,00	1,67	-1,33
50	70	21	70	20	70	23	70,00	21,33	66	21	66	27	67	21	66,33	23,00	3,67	-1,67
51	33	70	45	80	52	82	43,33	77,33	42	77	43	76	40	74	41,67	75,67	1,67	1,67
52	228	53	236	53	235	61	233,00	55,67	228	61	231	55	233	59	230,67	58,33	2,33	-2,67
53	260	26	257	39	248	34	255,00	33,00	253	38	242	33	258	40	251,00	37,00	4,00	-4,00
54	150	89	151	89	148	88	149,67	88,67	151	87	152	88	151	89	151,33	88,00	-1,67	0,67
55	330	89	332	89	325	86	329,00	88,00	332	87	332	86	332	87	332,00	86,67	-3,00	1,33
56	23	66	25	59	27	59	25,00	61,33	29	68	22	69	26	64	25,67	67,00	-0,67	-5,67
57	330	88	332	89	330	89	330,67	88,67	333	89	333	89	333	89	333,00	89,00	-2,33	-0,33
58	55	20	69	22	65	20	63,00	20,67	57	20	72	22	49	22	59,33	21,33	3,67	-0,67
59	40	68	38	70	43	59	40,33	65,67	37	74	43	75	39	76	39,67	75,00	0,67	-9,33
60	40	62	43	65	38	60	40,33	62,33	36	62	37	63	34	61	35,67	62,00	4,67	0,33
61	300	75	305	80	301	81	302,00	78,67	305	81	309	83	310	86	308,00	83,33	-6,00	-4,67
62	298	85	305	80	303	81	302,00	82,00	307	82	308	84	307	83	307,33	83,00	-5,33	-1,00
63	340	75	348	74	354	78	347,33	75,67	333	89	335	88	340	76	336,00	84,33	11,33	-8,67
64	199	43	208	51	208	40	205,00	44,67	203	50	206	43	207	39	205,33	44,00	-0,33	0,67
65	228	42	229	48	218	45	225,00	45,00	226	41	225	40	223	39	224,67	40,00	0,33	5,00
66	218	40	220	44	215	41	217,67	41,67	216	45	220	47	219	44	218,33	45,33	-0,67	-3,67
67	228	50	222	40	218	45	222,67	45,00	214	38	218	40	217	39	216,33	39,00	6,33	6,00
68	206	52	195	50	210	54	203,67	52,00	194	51	194	53	216	53	201,33	52,33	2,33	-0,33
69	103	67	106	72	102	68	103,67	69,00	105	65	105	66	105	66	105,00	65,67	-1,33	3,33
70	102	71	105	70	99	69	102,00	70,00	109	67	103	70	109	70	107,00	69,00	-5,00	1,00
71	116	70	111	70	126	77	117,67	72,33	111	75	110	71	112	77	111,00	74,33	6,67	-2,00



Слика 45 а) Приказ на распределбата на разликите за азимут на падната насока
б) Приказ на распределбата на разликите за падниот агол

Figure 45 а) Display of distribution of deviations in dip direction measurements. б) Display of distribution of deviations in dip measurements

Од добиените резултати за мерењата на азимут на падната насока, може да се заклучи дека најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (97,18%), се во ранг $\pm 12^\circ$. Изразено во процент имајќи предвид дека можните достапни вредности за азимут се од 0° до 360° , може да се заклучи дека 97,18 % од мерењата имаат разлика од 3,33 %, а останатите 3,72 % од мерењата имаат максимална разлика од 3,52 %.

Од добиените резултати за мерењата на падниот агол, може да се заклучи дека најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (88,73 %) се во ранг $\pm 5^\circ$. Изразено во процент имајќи во предвид дека можните достапни вредности за паден агол се од 0° до 90° , може да се заклучи дека 88,73 % од мерењата имаат разлика од 5,55 %, а останатите 11,27 % од мерењата имаат максимална разлика од 10,37 %.

Со ова може да се каже дека добиените статистички резултати се во рангот на нормалните отстапувања. Мерењата на падниот агол покажуваат минимално поголем процент на максимална грешка, една од причините би била и ситната скала на поделци за вредностите на паден агол на компасот, каде лицето што работи може да направи минимална грешка при нејзиното отчитување.

6.2.3.2. Статистичка анализа

За секоја мерна точка беа извршени три мерења и со геолошкиот компас и со виртуелниот компас. Така, за секое мерно место може да се пресмета средната добиена вредност за азимутот на падната насока и падниот агол. Со меѓусебно одземање на вредностите за секое мерно место добиени од геолошкиот и виртуелниот компас, се добива средна вредност, како и максимално и минимално отстапување за секое мерење посебно (таб. 5).

Отстапувањето претставува разлика помеѓу набљудувана вредност и некоја референтна вредност, обично средната вредност (просек) на сите набљудувани вредности. Отстапувањето мери колку една поединечна вредност се разликува од просекот на целиот сет на податоци (Montgomery et al., 2014; Weiss, 2012; Walpole et al., 2012).

Формулата $d_i = x_i - \bar{x}$ каде:

Максималното отстапување е најголемата апсолутна разлика помеѓу една од вредностите во сетот на податоци и просечната вредност. Оваа мерка покажува колку најмногу една вредност отстапува од просекот (Walpole et al., 2012).

$$\text{Max Deviation} = \max(|x_i - \bar{x}|)$$

Отстапувањето на средните вредности за азимутот е максимум $12,67^\circ$. За падниот агол, максималното отстапување од средните вредности е $9,33^\circ$. Така се добива просечно отстапување кај азимутот од $4,46^\circ$, и кај падниот агол од $2,38^\circ$.

Во статистиката, стандардната девијација е мерка за степенот на варијација или дисперзија на сет од вредности. Таа е мерка за дисперзија која покажува колку вредностите во сет на податоци се распространети околу просечната вредност. Таа е квадратниот корен на варијансата и обезбедува увид во тоа колку вредностите се „шират“ околу просекот (Montgomery et al., 2014; Weiss, 2012; Walpole et al., 2012):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Ако стандардната девијација на група податоци е мала, тоа значи дека вредностите се блиску до просекот. Ако е голема, тоа значи дека вредностите се распространети на поголема дистанца од просекот, односно ниска стандардна девијација укажува на тоа дека вредностите имаат тенденција да бидат блиску до просекот (исто така наречена очекувана вредност) на сетот, додека висока стандардна девијација укажува на тоа дека вредностите се распространети на поширок опсег.

За азимутот, стандардната девијација изнесува 3,53, а за падниот агол, стандардната девијација изнесува 2,24. Овие вредности укажуваат на многу мала и дозволлива статистичка грешка.

6.2.3.3. Регресиона анализа

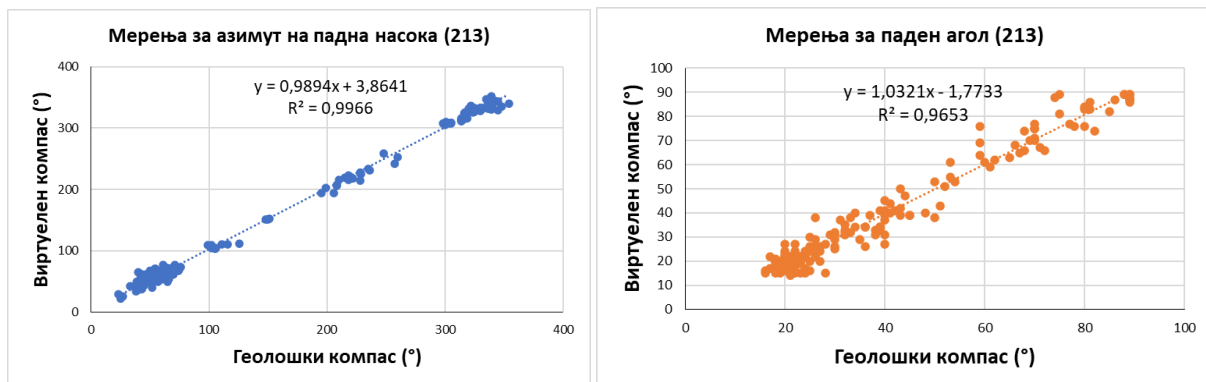
Со цел да се добие увид во односот помеѓу вредностите за измерените елементи добиени со двете методи, односно со геолошкиот компас и виртуелниот компас, беше направена анализа на регресиона зависност. Овој вид анализа овозможува дефинирање на резултатите од истражувањето преку некаква аналитичка врска или равенка. Анализата на линеарна регресија е клучен статистички метод кој овозможува испитување на врската помеѓу зависната променлива и една или повеќе независни променливи. Оваа анализа помага во предвидување и толкување на односите помеѓу променливите во различни истражувачки полиња (Montgomery et al., 2012).

Методата на најмали квадрати е најсоодветна за ваков тип на проблеми. Оваа метода претставува основен пристап во регресионата анализа кој се користи за минимизирање на збирот на квадратите на разликите помеѓу набљудуваните и предвидените вредности. Овозможува да се најдат најдобрите прилагодени линии кои го опишуваат односот помеѓу променливите (Montgomery et al., 2012). Коефициентот на детерминација (R^2) се користи како индикатор за силата на врската помеѓу променливите. Всушност, сигурноста на регресионата

зависност се определува според големината на коефициентот (R^2), каде што вредноста се движи од 0 до 1, а најчесто се користат следниве критериуми:

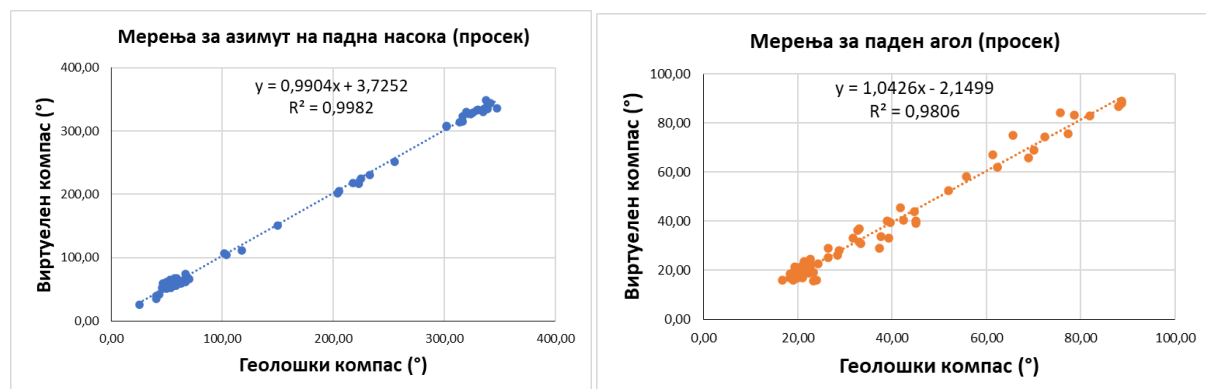
- ако $R^2 = \pm 0,3$ не постои речиси никаква зависност,
- ако $R^2 = \pm 0,3$ до $0,5$ постои корелативна зависност,
- ако $R^2 = \pm 0,5$ до $0,7$ постои умерена зависност,
- ако $R^2 = \pm 0,7$ до $0,9$ постои силна зависност,
- ако $R^2 = > 0,9$ постои многу силна зависност.

Повисока вредност на R^2 укажува на силна врска помеѓу двете променливи. Во следните примери (сл. 46 и сл. 47) се прикажани регресионите анализи извршени за сите измерени вредности со двете методи.



Слика 46 Регресиона анализа за сите мерења на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите мерења на паден агол

Figure 46 Regression analysis from all measurements for dip direction. б) Regression analysis from all measurements for dip



Слика 47 Регресиона анализа за сите просечни вредности на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите просечни вредности на паден агол

Figure 47 Regression analysis from average measurements for dip direction. б) Regression analysis from average measurements for dip

Според направените анализи, може да се заклучи дека постои силна зависност помеѓу добиените вредности за измерениот азимут и паден агол, според двата метода на мерење. Имено, коефициентот на корелација е:

- за сите мерења (213), $R^2=0,9966$ за азимутот и $R^2 = 0,9653$ за падниот агол;
- за просечните вредности (71 мерно место), $R^2 = 0,9982$ за азимутот и $R^2 = 0,9806$ за падниот агол.

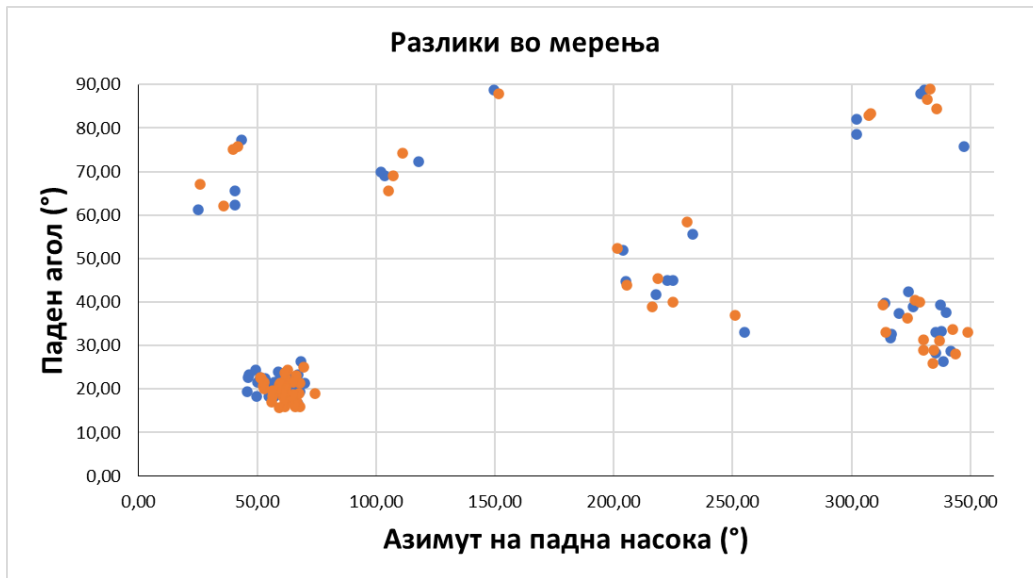
6.2.3.4. Анализи на групи на мерења

Ако резултатите од сите 71 мерни места се групираат според сродните елементи на падот, се добиваат следниве групи:

- 38 мерни точки припаѓаат на група 1 со општа насока кон исток-североисток,
- 13 мерни точки припаѓаат на група 2 со општа насока кон север-северозапад и агол околу 30 - 40°,
- 5 мерни точки припаѓаат на група 3 со општа насока кон југозапад,
- 3 мерни точки припаѓаат на група 4 со општа насока кон исток,
- 3 мерни точки припаѓаат на група 5 со општа насока кон север-северозапад и агол околу 80 - 90°,
- 9 мерни точки не припаѓаат на ниту една од овие групи и претставуваат мерења на површини кои отстапуваат од главните структурни сетови.

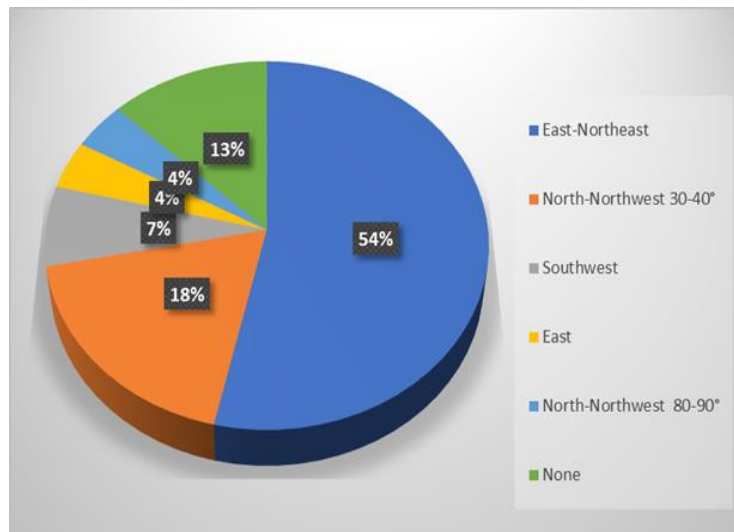
Приказ на сите извршени мерења со геолошки, односно виртуелен компас е претставен во дијаграмот на сл. 48. На сликата може да се забележи компатибилноста на мерењата кај мнозинските групи, и разликите во мерењата кај групите со помалку мерни точки, кои се всушност мерења на позиции кои даваат помала точност.

Процентот на уделот на секоја од овие групи е прикажан на сл. 49 каде се гледа дека повеќе од половина од мерењата се направени кај една група на рамнини, а тоа се рамнините кои ја претставуваат фолијацијата, кои се најдостапни за мерење и нивната зарамнетост е релативно висока.



Слика 48 Приказ на групи мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (портокалово)

Figure 48 Display of groups of measurements with geological compass (blue) and virtual compass (orange)



Слика 49 Процентуална застапеност на сетовите на рамнини

Figure 49 Percentage of related discontinuity sets

6.2.3.5. Графикон *Bland-Altman*

Графиконот *Bland-Altman* може да се користи како статистичка анализа. Тој се користи за визуелизација на разликите во мерењата помеѓу два различни инструменти или две различни техники на мерење, односно е корисен за

одредување на сличноста помеѓу два инструмента или техники. Претставува статистичка метода која се користи за споредба на две различни мерни техники или уреди кои мерат иста варијабла. Ги прикажува разликите помеѓу две мерења против нивниот просек, овозможувајќи визуелна проценка на согласноста помеѓу нив (Bland et al., 1986).

Bland и Altman веруваат дека два метода кои се дизајнирани за мерење на ист параметар (или својство) треба добро да корелираат кога се избира сет на примероци чии својства што треба да се утврдат значително се разликуваат. Ова е графички метод за прикажување на разликите меѓу две мерења во однос на просекот за секој субјект (Altman et al., 1986; Bland et al., 1999). Клучни аспекти на графиконот Bland–Altman се:

Оска X: Го прикажува просекот на двете мерења за секоја поединечна набљудувана точка.

Оска Y: Ја прикажува разликата помеѓу двете мерења за секоја набљудувана точка.

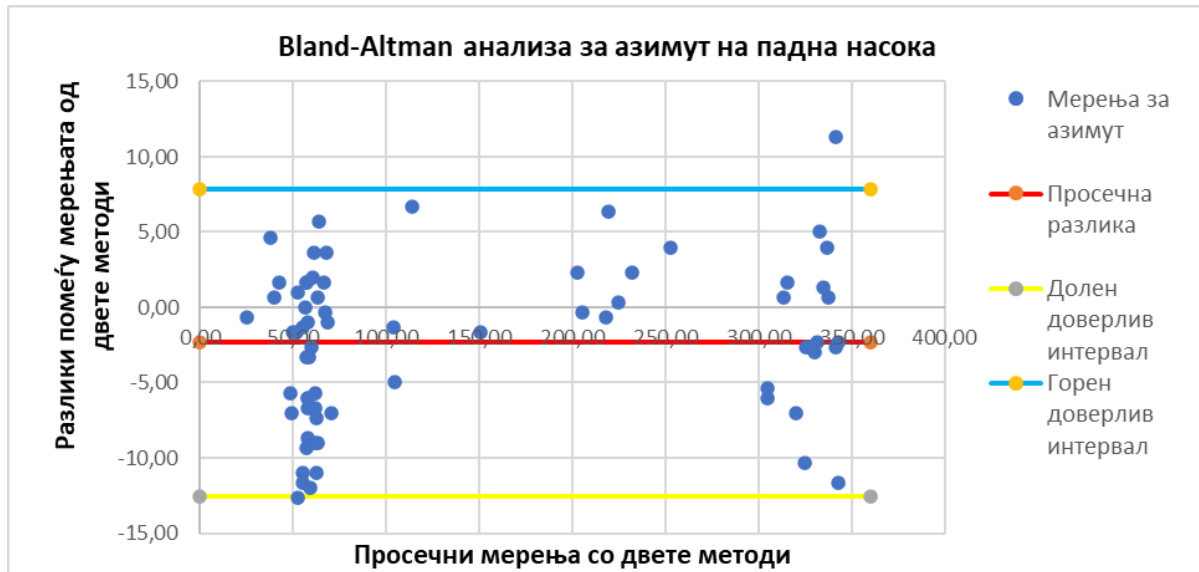
Лимити на договор: Графиконот обично прикажува две хоризонтални линии кои ги означуваат границите на договор, дефинирани како средната разлика $\pm 1,96$ стандардни девијации на разликите. Овие линии го покажуваат опсегот во кој се очекува да влезат 95% од разликите.

Овој метод е особено корисен кога е важно да се процени дали двете методи даваат заменливи резултати, а не само корелативни.

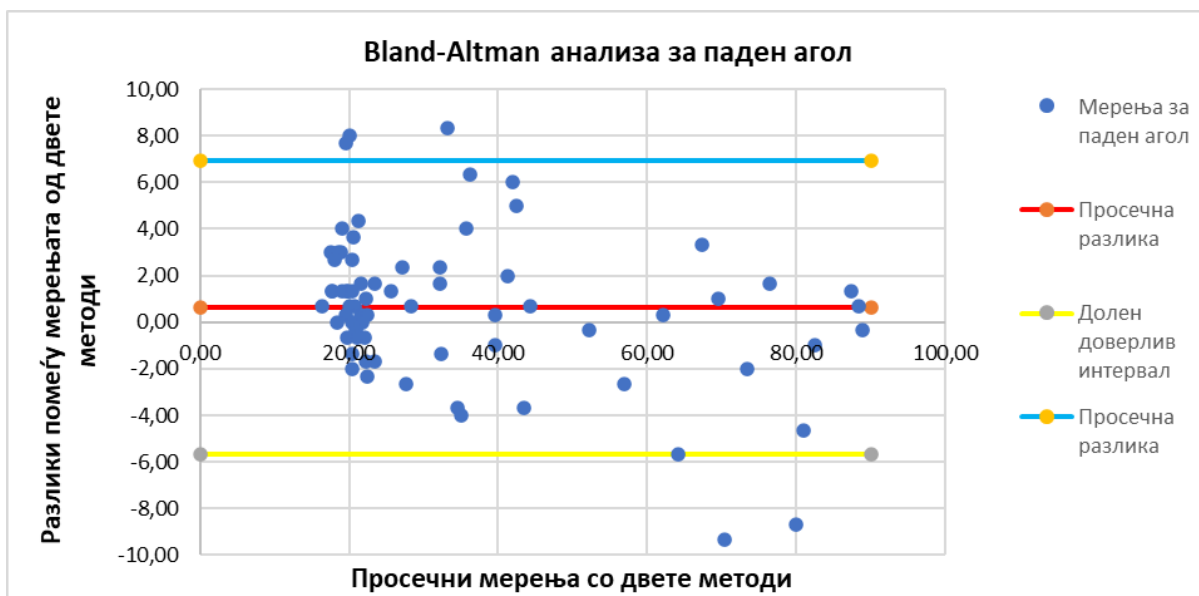
Во овој случај, се определуваат просечната разлика помеѓу двете мерења и интервалите на долната и горната доверлива линија. Во исто време, 95 % од вредностите од просечната разлика се земаат како долна и горна доверлива линија. (сл. 50 и сл. 51).

За азимутот на падната насока (сл. 50) е добиена просечна разлика од $-2,33^\circ$, со долен доверлив интервал од $-12,52^\circ$ и горен доверлив интервал од $4,86^\circ$ што укажува на мала разлика помеѓу методите. Повеќето од точките се наоѓаат во рамките на овие доверливи интервали, што значи дека постои добра согласност помеѓу двата метода на мерење. Заклучокот е дека има релативно мала, но конзистентна разлика помеѓу мерењата со геолошкиот компас и

виртуелниот компас за азимутот, а таа разлика е во рамките на прифатливите граници, што укажува дека двете методи даваат слични резултати.



Слика 50 Графикон Bland-Altman за измерениот азимут на падна насока
Figure 50 Bland-Altman plot for measured dip direction



Слика 51 Графикон Bland-Altman за мерениот падан агол
Figure 51 Bland-Altman plot for measured dip

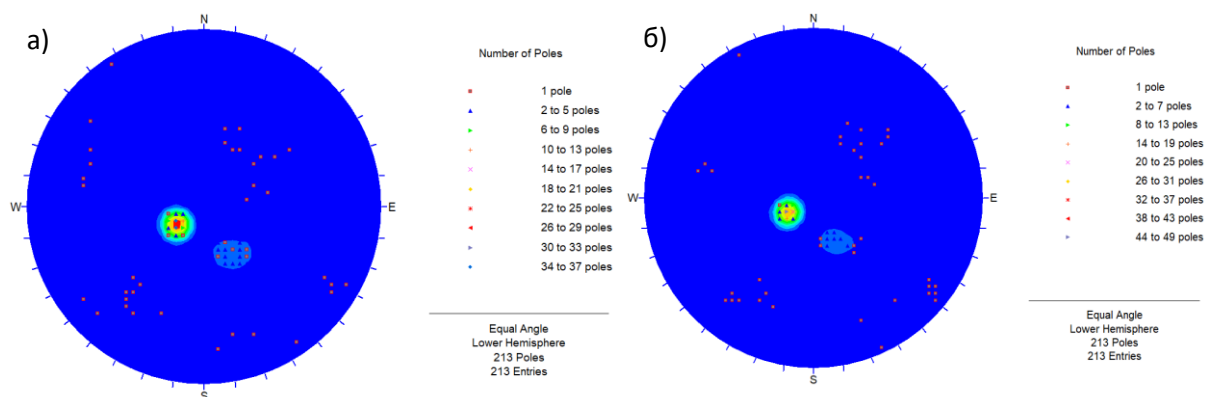
Во делот на измерениот падан агол (сл. 51) е добиена просечна разлика од $0,62^\circ$, со долен доверлив интервал од $-5,69^\circ$ и горен доверлив интервал од $6,94^\circ$ што укажува на многу мала разлика помеѓу мерењата со двата метода. Најголемиот дел од точките се наоѓаат во рамките на доверливите интервали.

Заклучокот е дека мерењата на падниот агол со геолошкиот и виртуелниот компас покажуваат многу мала разлика, што укажува на висока согласност помеѓу двете методи. Ова значи дека виртуелниот компас е еднакво прецизен како и традиционалниот геолошки компас. Овие графикони покажуваат дека разликите помеѓу двата метода на мерење се мали и случајни, со повеќето точки групирани близу до нула, што укажува на добра согласност и минимална систематска грешка помеѓу двете методи.

6.2.3.6. Стереограм

При работа со ваков тип на анализи, треба да се има предвид дека азимутот и падниот агол заедно даваат комплетна слика за ориентацијата на геолошките структури во просторот. Ваков тип на податоци не може да се сумира во еден број бидејќи претставува два различни аспекта на геометриските карактеристики на мерената рамнина. Одредени анализи може да се прават на конкретни вредности, а не на комбинација од ваков тип на информации. Затоа и некои анализи овде се правени посебно за азимутот на падната насока, а посебно за падниот агол. Може да се каже дека постои соодветен начин каде визуелно може да се претстави ваквиот тип на излезни податоци, а тоа е стереограмот кој во овој случај е изработен во софтверот DIPS.

При подготовката на стереограмите, поради поголемиот број мерења, се презентирани половите на измерениот азимут и паден агол, како и приказ на нивната концентрација во употреба на различни бои (сл. 52).



Слика 52 Стереограм за мерења: а) геолошки компас б) виртуелен компас
Figure 52 Stereonogram for measurements a) geological compass. b) virtual compass

На овие два стереограма може да се забележи совпаѓање на добиените вредности со многу висока точност. Ова докажува дека современата метода дава речиси идентични резултати кога ја споредуваме со традиционалната.

6.2.4. Полуавтоматски методи за анализа на добиените резултати

Како што е напоменато и погоре, од повеќето достапни полуавтоматски методи за анализа на 3DOT, по извршените истражувања, DSE и FACETS оставаат впечаток дека можат да ги прикажат придобивките од овие полуавтоматски методи на едно високо ниво. Добиените резултати од секоја од овие полуавтоматски методи за извлекување сетови на рамнини, ќе се искористат и за директна меѓусебна споредба.

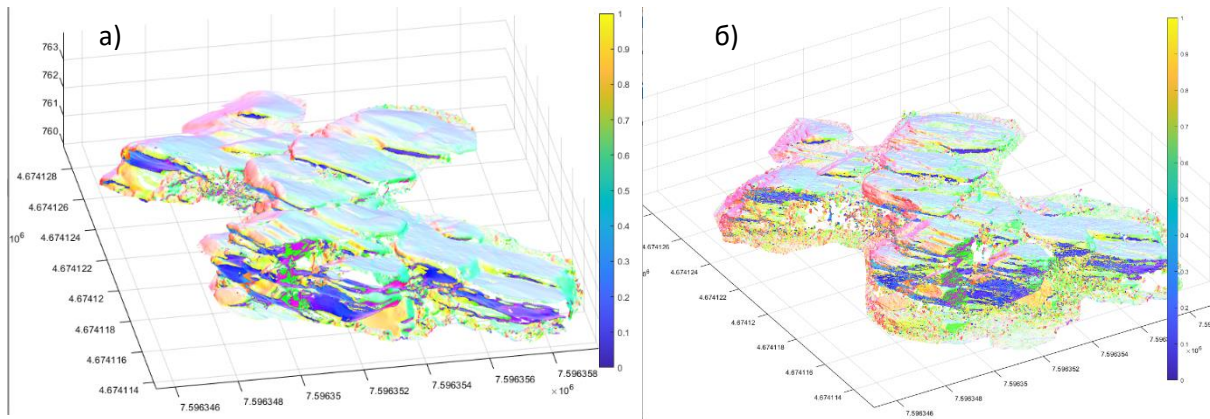
6.2.4.1. DSE (*Discontinuity Set Extractor*)

По направената споредба помеѓу класичното мерење со геолошки компас и податоците добиени со употреба на виртуелниот компас во Cloudcompare, следен чекор е овие два сета на податоци да се споредат со податоците кои ги дава полуавтоматската метода на DSE.

Оваа метода е применета на двата облаци од точки, на оној што е добиен од LiDAR скенерот на iPhone, и оној што е добиен со SfM-методата.

За да можат овие фајлови да бидат соодветно обработени, потребно е да се со наставка .xyz. При таа конверзија, фајлот од iPhone е со големина од околу 100 MB, а фајлот од SfM е со големина од околу 3 GB, односно поголем 30 пати, што значи дека е и подетален, имајќи предвид дека се работи за ист објект. Обработката на овие облаци од точки оди релативно бавно, се разбира процесот зависи и од моќноста на компјутерската единица на која се работи.

Кога се користи DSE за анализа на 3DOT, еден од клучните аспекти е визуализацијата на податоците (сл. 53). Една од опциите кои ги поседува овој софтвер е HSV (Hue, Saturation, Value) колор-мапата за боење на 3DOT, што претставува ефикасен начин за визуелно разликување и интерпретација на различните карактеристики на карпата:



Слика 53 HSV бојење за 3DOT добиен од а) LiDAR б) SfM

Figure 53 HSV coloring for 3DPC acquired from a) LiDAR б) SfM

Hue (Нијанса): Оваа компонента ги прикажува различните бои на видливиот спектар. Во контекст на геолошки податоци, различни нијанси може да се користат за означување различни ориентации или типови на пукнатини. На пример, структурите кои се ориентирани на север може да бидат означени со сина боја, додека оние кои се ориентирани кон југ може да бидат со црвена боја.

Saturation (Заситеност): Заситеноста укажува на тоа колку е изразена или чиста бојата. Во геолошките апликации, висока заситеност може да укажува на повисок степен на изразеност на карактеристиката, како што се јасно дефинирани, односно повеќе значајни пукнатини, додека пониската заситеност може да укажува на помалку значајни или помалку изразени карактеристики.

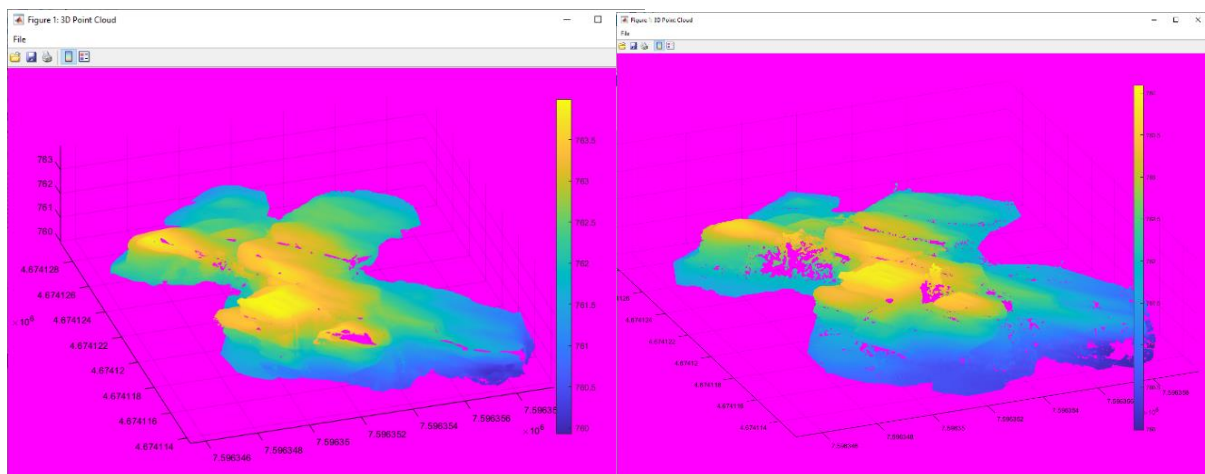
Value (Вредност): Вредноста ја одредува светлината на бојата, со високи вредности кои покажуваат светли бои и ниски вредности кои се темни. Ова може да се користи за покажување на длабочина или релативна висина на карпите, каде поголемите височини може да бидат посветли за да се истакнат.

Гледајќи ја слика 53 а и б, може да се каже дека трендовите кај двата 3DOT се речиси идентични, со тоа што поголемата деталност кај вториот дава поголема деталност и во визуелниот приказ. Поголемата деталност се должи на самата големина на фајлот, односно поголемата густина на точките.

Како придобивки од HSV бојењето би ги издвоиле следните: колор-мапата HSV овозможува подобро разбирање и интерпретација на комплексни геолошки структури со визуелно разликување различни аспекти на карпите. Користењето на различни бои и нијанси помага во брзата идентификација на клучни

карактеристики во голем облак од точки. Секоја боја или нијанса може да се користи за квантификација на одредени аспекти на анализата, овозможувајќи подлабоки статистички и геометриски анализи. Со користење на оваа карта, значајно се подобрува способноста на корисникот да изврши детална визуелна анализа и квантификација на геолошките карактеристики, овозможувајќи подлабоко и поефикасно да ги разбере структурните компоненти на истражуваниот терен. Во оваа дисертација, оваа опција е презентирана само за локалитетот Милутинци, имајќи предвид дека се изведени идентични заклучоци и кај снимањата на локалитетите Фариш и Серта.

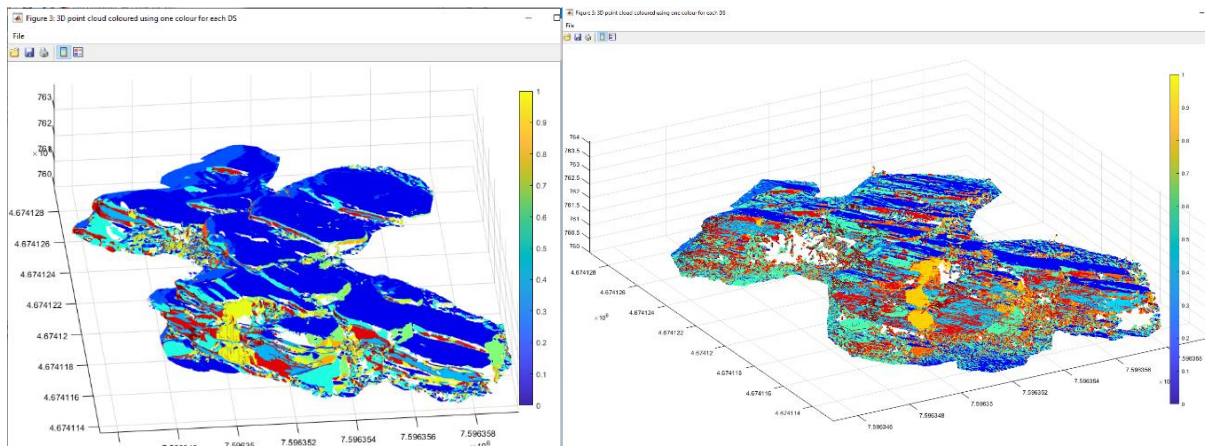
На слика 54 а и б, се наоѓа визуелен приказ на 3DOT каде со различни бои се обележани различните висини во теренот на сниманата област. Оваа опција исто така, има претежно визуелен ефект, каде на корисникот му дава полесна перспектива на промената на висините на теренот, односно дали таму бргу се менуваат боите, што значи дека нагло ја менува висината (стрмен терен), или боите се релативно униформирани, што значи дека висината не се менува многу, (зарамнет терен). И оваа опција е презентирана само за локалитетот Милутинци.



Слика 54 Приказ на облакот од точки со промена на боите во зависност од висината за а) LiDAR б) Sfm

Figure 54 Display of the point cloud with color changes depending on elevation for а) LiDAR б) Sfm

Една од опциите за визуелизација кај DSE е и користење различна боја за секој сет на дисконтинуитети (сл. 55 а и б). Оваа метода на боење го олеснува разбирањето и интерпретацијата на структурните карактеристики на карпите.



Слика 55 Приказ на облакот од точки со одредена по една боја на секој сет од рамнини за а) LiDAR б) SfM

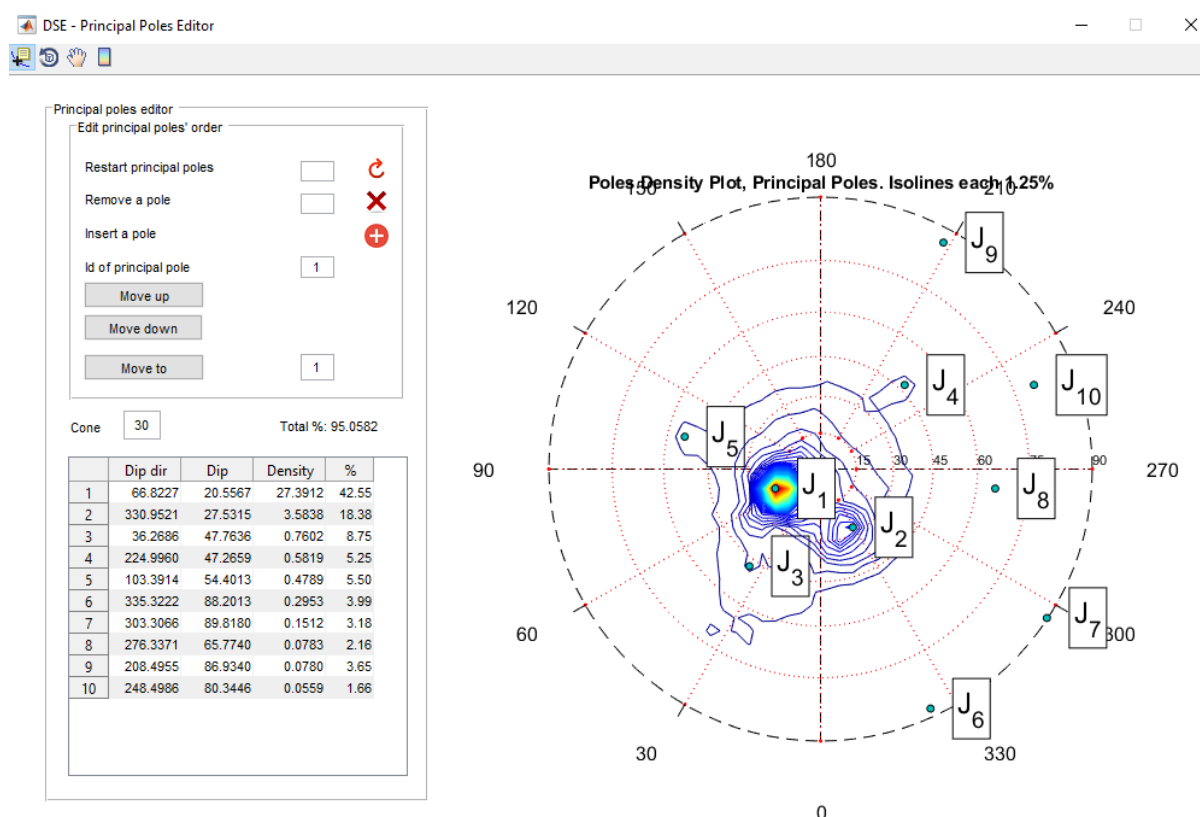
Figure 55 Display of the point cloud with designated color for every set of planes for а) LiDAR б) SfM

При тоа DSE го анализира 3DOT за да идентификува групи на точки што припаѓаат на исти или слични геолошки карактеристики на основа на нивните ориентација, форма, и просторна распределба. Секоја од овие групи се класифицира како посебен дисконтинуитетен сет и се обележува со уникатна боја. Оваа различност во боите му овозможува на корисникот лесно да направи разлика помеѓу различните типови на структурни формации во карпата. Конечниот резултат е 3D-модел на облак од точки каде што секој сет на рамнини е обоен различно со што се овозможува брз преглед и анализа на структурите, истакнувајќи ги нивните поважни карактеристики и заемни односи.

Придобивки од користење на оваа метода се следните: Различните бои за секој сет на дисконтинуитети овозможуваат појасно и поинтуитивно разбирање на геолошката структура, што го олеснува препознавањето на односите меѓу различните структурни елементи. Визуелизациите со различни бои се лесни за споделување и објаснување во научните извештаи или презентации, правејќи ги комплексните геолошки податоци достапни и разбирливи за широка публика. Боите овозможуваат детално следење на одредени структурни трендови и анализа на нивната распространетост, ориентација, и други карактеристики, што може да помогне во геотехнички оценки и идентификација. Во овој случај, поради поголемата густина на точки во вториот пример, е добиен поголем број на рамнини. Подолу ќе се презентира дека генерално поголемата густина на точки не се одразува многу на автоматски добиените податоци за пад и паден агол.

DSE-софтверот вклучува и методи како што се „*Principal Pole Extraction*“ (Извлекување на главниот пол) и создавање на „*Poles Density Plots*“ (Графикони на густина на полови) (сл. 56 и сл. 57). Овие техники се корисни за идентификување и визуелизација на ориентацијата и распространетоста на структурните дисконтинуитети.

Principal Pole Extraction се однесува на процесот на извлекување на главните точки (полови) од секој сет на рамнини во 3DOT. Точките се претставуваат како нормални на рамнините на дисконтинуитетите и се користат за да се определи главната ориентација на структурните елементи. За секоја рамнина во облакот од точки, DSE ја мери нормалата и ја претставува како точка на сфера, каде секоја точка (пол) ја покажува ориентацијата на површината на плочката. Оваа анализа овозможува да се видат доминантните ориентации кај истражуваниот терен. На сл. 56 е прикажан стереограм за снимката добиена од LiDAR, каде се издвоени 10 сета на дисконтинуитети:



Слика 56 Стереограм во DSE за 3DOT добиен од LiDAR
Figure 56 Stereogram in DSE for 3DPC obtained from LiDAR

Овој стереограм ги прикажува распределбата и густината на главните полови на рамнините во 3DOT. Интерфејсот вклучува поларен графикон со изолинии кои ја прикажуваат густината на ориентациите на рамнините и табела со детални податоци за секоја главна рамнина.

Ориентациите се прикажани во поларни координати, со аглите означени од 0° до 360°. Главните рамнински полови се означени со точки (J1 до J10) кои се поврзани со соодветните положби на графиконот. Изолиниите покажуваат нивоа на густина на половите на издвоените рамнини. Повисоката густина на точки во определен регион укажува на почеста појава на рамнини со слична ориентација во тој правец. Највисоката концентрација (прикажана со најтемната боја) го индицира најзастапениот правец на рамнини. Контурите кои претставуваат различни нивоа на густина, се со посебен фокус на најдоминантните ориентации. Секоја контура е означена со бројка која ја означува релативната густина на таа рамнина.

Во табелата, „*Dip Direction*“ и „*Dip*“ укажуваат на ориентацијата на рамнината во просторот. *Dip direction* е аголната ориентација на рамнината, додека *Dip* е аголот на наклонот од хоризонталата. *Density* (густината) укажува на бројот на точки (или интензитетот) на секој пол на издвоена рамнина во однос на целиот облак од точки, додека % (процентите) укажуваат на процентуалната застапеност на секој пол во однос на вкупниот број на рамнини.

Овој стереограм ефикасно прикажува геолошки значајни информации за ориентацијата на рамнините во предметниот терен. Високата концентрација во одредени области покажува каде се најчести дисконтинуитетите, што може да биде од клучно значење за планирање на инженерски активности, анализа на стабилност на карпи или други геолошки анализи. Деталите во табелата овозможуваат специфични квантитативни анализи и може да се користат за натамошно моделирање или симулација.

Етикетите од J1 до J10 во стереограмот претставуваат главни дисконтинуитетни сектори (или фамилии) идентификувани во анализата. Секој од овие сектори има специфичен азимут на падната насока и паден агол (*dip direction* и *dip*), густина на појавување (*density*) и процентуална застапеност (%).

J1: Dip direction: 66,82° Dip: 20,55° Density: 27,39 %: 42,55%. Оваа главна рамнинска фамилија е најдоминантната, со значително висока густина и процентуална застапеност. Ориентацијата на рамнината укажува на блага наклонетост кон исток-североисток со умерен паден агол од околу 20°.

J2: Dip direction: 330,95° Dip: 27,53° Density: 3,58 %: 18,38%. Претставува втор по значење систем со азимут кој паѓа кон северозапад. Застапеноста е помала отколку кај J1, но сепак е значајна.

J3: Dip direction: 36,28° Dip: 47,76° Density: 0,76 %: 8,75%. Овој систем е значително различен од претходните, има релативно кос до стрмен паден агол и е ориентиран кон север-североисток.

J4: Dip direction: 224,99° Dip: 47,27° Density: 0,58 %: 5,25%. Системот е ориентиран кон југозапад со кос паден агол, со релативно помала застапеност и густина.

J5: Dip direction: 103,39° Dip: 54,40° Density: 0,48 %: 5,50%. Помалку застапена рамнина со кос до стрмен паден агол кој е ориентиран кон исток.

J6: Dip direction: 335,32° Dip: 23,01° Density: 0,29 %: 3,99%. Сличен како J2, J6 е ориентиран кон северозапад, но со значително помала застапеност.

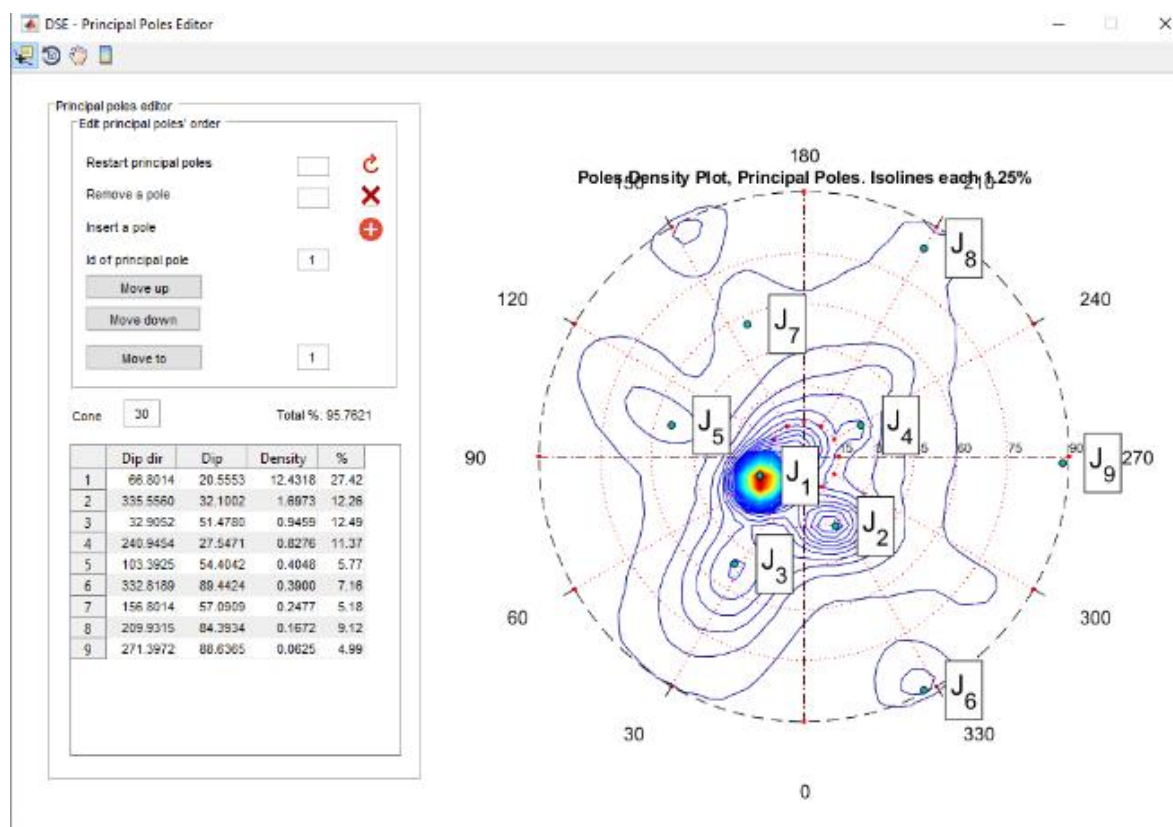
J7: Dip direction: 303,31° Dip: 89,81° Density: 0,15 %: 3,18%. Овој систем има субвертикален паден агол, ориентиран кон северозапад.

J8: Dip direction: 276,33° Dip: 65,77° Density: 0,08 %: 2,16%. Системот има стрмен паден агол, ориентиран кон запад.

J9: Dip direction: 208,50° Dip: 86,93° Density: 0,08 %: 3,65%. Има стрмен паден агол, ориентиран кон југозапад.

J10: Dip direction: 248,50° Dip: 80,34° Density: 0,05 %: 1,66%. Овој систем, кој е најмалку застапен, има речиси субвертикален паден агол, ориентиран кон запад-југозапад.

На вториот стереограм за снимката добиена со SfM (сл. 57) има прикажано девет главни дисконтинуитетни сектори (J1 до J9) со различни ориентации и густини на рамнините.



Слика 57 Стереограм во DSE за 3DOT добиен од SfM
Figure 57 Stereogram in DSE for 3DPC obtained from SfM

Издвоените сетови на дисконтинуитети кај SfM 3DOT имаат сличен тренд со оние издвоени од снимката добиена со LiDAR снимањето:

J1: Dip Direction: 66,80° Dip: 20,55° Density: 12,43 %: 27,42%. Овој сет има најголема застапеност, ориентација кон североисток, со благ паден агол. Ова ја претставува доминантната геолошка структура, односно фолијацијата.

J2: Dip Direction: 335,56° Dip: 32,10° Density: 1,69 %: 12,26%. Системот е ориентиран кон северозапад со кос до благ паден агол. Има помала застапеност од J1.

J3: Dip Direction: 32,95° Dip: 51,47° Density: 0,94 %: 12,49%. Укажува на кос до стрмен паден агол, насочен кон североисток.

J4: Dip Direction: 240,95° Dip: 27,54° Density: 0,83 %: 11,37%. Системот е ориентиран кон југозапад, има умерен паден агол и е средно застапен.

J5: Dip Direction: 103,39° Dip: 54,04° Density: 0,05 %: 5,77%. Има стрмен паден агол ориентиран кон исток, и мала застапеност.

J6: Dip Direction: 332,82° Dip: 89,42° Density: 0,39 %: 7,16%. Има многу стрмен паден агол, насочен кон северозапад.

J7: Dip Direction: 156,80° Dip: 57,09° Density: 0,25 %: 5,18%. Има паден агол кон југ, со многу мала застапеност.

J8: Dip Direction: 209,93° Dip: 84,39° Density: 0,17 %: 9,12%. Овој сет, ориентиран кон југозапад, покажува речиси вертикален паден агол, што индицира постоење на вертикални структури, иако слабо застапени.

J9: Dip Direction: 271,39° Dip: 88,64° Density: 0,06 %: 4,99% Со речиси вертикален паден агол и насока кон запад, овој сет е многу малку застапен.

Анализата и споредбата на двата стереограми кои се базирани на облаци од точки добиени со различни методи нудат интересни информации за тоа како методите на собирање податоци влијаат на геолошката анализа.

Првиот стереограм (LiDAR) е со помала густина на точките, што резултира со помалку детални прикази на стереограмот. Ова може да води до помала точност во анализата кај малите или тесно разделените дисконтинуитети.

Вториот стереограм (SfM) е со поголема густина на точките и покажува повеќе детали. Високата густина овозможува подобра визуелизација на дисконтинуитетните структури и покомплексна анализа.

Овие два 3DOT даваат комплексни визуелизации. Додека недвосмислено најприсутниот систем на рамнини е одреден и кај двата облаци, сепак постојат разлики во пукнатински системи кои се помалку застапени. Различните техники и уреди за снимање може да имаат различни капацитети за детекција на детали. iPhone камерите можеби не се толку способни да ги забележат сите дисконтинуитети, особено во сложени или слабо осветлени услови. SfM-технологијата со дрон овозможува подетален преглед и создава подетален облак од точки, кој е попогоден за прецизни геолошки анализи. Исто така различните сензори и леќи во камерите може да имаат различни оптички карактеристики кои влијаат на геометријата на собраните податоци. Оптичките дисторзии може да влијаат на точноста на мерењата за наклон и ориентација.

Значењето и придобивките од погорното се следните: Овие алатки овозможуваат детална анализа на структурните трендови и се корисни во одредувањето на стабилноста на карпите, планирањето на минирање, и проценка на ризикот од одрони. Информациите од овие анализи помагаат во креирањето на подобри геолошки модели и предвидување на текови на водата или поместување на земјиштето. Визуелизациите се лесни за интерпретација и презентирање, што ги прави идеални за документирање и споделување на податоците. Со користење на овие техники во DSE, може значително да се зголеми точноста и длабочината на структурните геолошки анализи.

Генералниот заклучок во рамките на потребите на структурната геологија е дека DSE даде излезни резултати кои се преклопуваат во најголем процент кај двата облаци од точки. Разликите во стереограмите за потребите на структурната геологија се прифатливи.

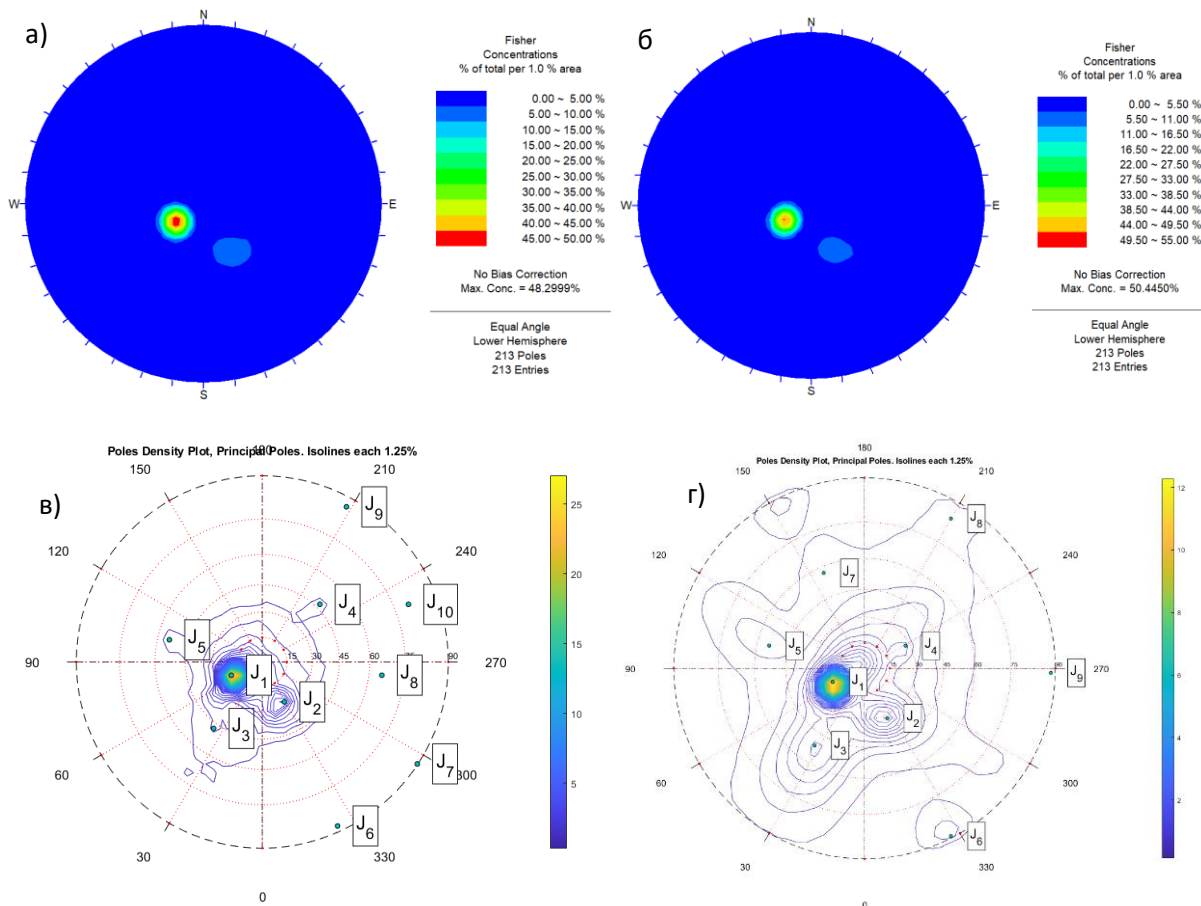
Со добиените елементи на пад од полуавтоматската метода, дополнително може да се направи споредба на средните вредности од добиените мерења со геолошки компас и виртуелен компас (таб. 6):

Табела 6 Рамнините кои се идентификувани кај сите применети методи се обележани со зелена боја

Table 6 Planes that are identified at all applied methods are marked with green color

Геолошки компас										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
57/21	329/35	215/46	108/70	336/84	37/67	233/56	255/33	150/89	302/80	вкупно
38	13	5	3	3	4	1	1	1	2	71
53,52	18,31	7,04	4,23	4,23	5,63	1,41	1,41	1,41	2,82	100,00
Виртуелен компас										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
61/20	331/33	213/44	108/70	334/87	36/70	231/58	251/37	151/88	308/83	вкупно
38	13	5	3	3	4	1	1	1	2	71
53,52	18,31	7,04	4,23	4,23	5,63	1,41	1,41	1,41	2,82	100,00
LIDAR										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
67/21	331/27	36/48	225/47	103/54	335/88	303/90	276/66	20/87	249/80	вкупно
42,55	18,38	8,75	5,25	5,50	3,99	3,18	2,16	3,65	1,66	95,07
Sfm										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
67/21	336/32	33/51	241/28	103/54	333/89	157/57	210/84	271/89		вкупно
27,42	12,26	12,49	11,37	5,77	7,16	5,18	9,12	4,99		95,76

Од табелата се гледа дека најприсутниот систем на рамнини (63/20) кај сите методи е на прво место. Процентот кај SfM-методата генерално е помал, а тоа е најмногу поради тоа што поради поголемата густина на точки при формирањето на рамнините, се добиваат повеќе помали рамнини на сметка на поголемите рамнини, а со тоа се менува и процентуалната застапеност, како што се гледа и кај споредбата на слика 55 а и б. Освен најчестиот, уште два система на рамнини се преклопуваат со мерењата извршени со геолошкиот и виртуелниот компас. (330/32 и 335/87). Овие три рамнини претставуваат најголем дел од добиените рамнини со полуавтоматската метода. Останатите рамнини иако генерално не се поклопуваат со рачно измерените, сепак покажуваат одреден тренд кој делумно се совпаѓа. Со споредба на стереограмите од сите методи би добиле (сл. 58):



Слика 58 Стереограм за а) геолошки компас б) виртуелен компас в) DSE за LiDAR г) DSE за SfM

Figure 58 Stereogram for a) geological compass b) virtual compass v) DSE for LiDAR g) DSE for SfM.

Од стереограмите на сл. 58 се гледа дека трендот е запазен со преклопување на половите во деловите на J1 и J2 кои се најприсутните системи на рамнини.

Кај двата најзастапени сетови на рамнини добиени со полуавтоматската метода, може да се извади заклучок дека односот на тие две системи на рамнини е 1:2,32 кај LiDAR и 1:2,24 кај SfM. Доколку се гледа процентуалниот удел овие вредности се разликуваат кај двата 3DOT, но гледајќи го соодносот може да се дојде до заклучок дека трендот е запазен, односно рамнината 65/20 во однос на рамнината 330/32 е застапена на сликата во сооднос 2,3 спрема 1. Доколку се извршат снимања на „чисти“ карпести површини, без никаков удел на вегетација и друг „шум“, може да се добијат уште пореални соодноси на застапените рамнини. Направени се обиди за чистење на 3DOT од различни непотребни сегменти, нешто што може секогаш да биде направено попрецизно. Земајќи го предвид и фактот дека и снимањето само по себе може секогаш да се направи подобро и попрецизно, се доаѓа до заклучокот дека ова е процес кој може да се разработува огромен број на пати, а со тоа дополнително да се докажува доверливоста на оваа метода.

Дисконтинуитетите кои се детектирани преку DSE покажуваат мали разлики во однос на оние кои се измерени со геолошкиот компас. Овие разлики можат да се должат на неколку фактори: 3DOT од точки може да има различна резолуција и точност, зависно од уредот со кој е сниман и методот на обработка. Пукнатините може да имаат комплексни форми кои тешко се квантифицираат со автоматизирани алатки како DSE. Софтверот може да има специфични алгоритамски ограничувања кои влијаат на интерпретацијата на податоците.

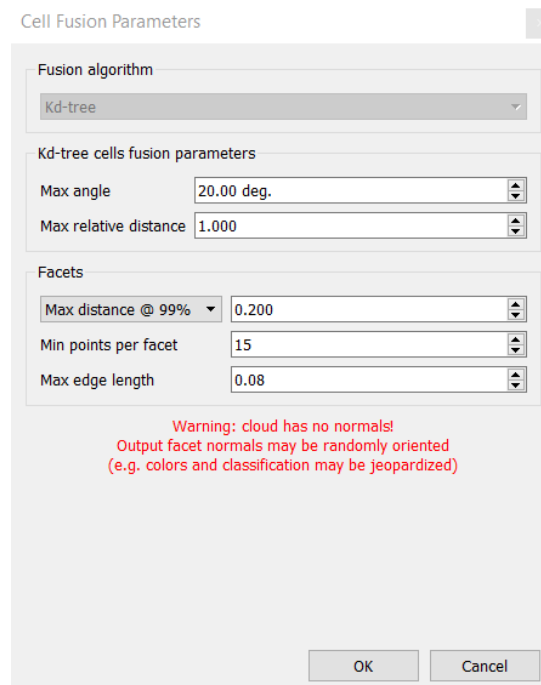
Како што потенцира и самиот автор на овој софтвер, иако има големо подобрување во автоматизацијата со користење на предложената методологија, сепак е потребно поседување солидна основа во структурната геологија и механиката на карпите за да може да се добијат оптимални резултати од предложениот метод. Со сложената методологија и алгоритмите кои се применети во овој софтвер не може комплетно да се раздвојат корисните површини кои искусен геолог ги препознава како предмет на неговото истражување. При автоматските процеси, се добиваат состојби кога површини

кои не се од основен интерес да можат да дадат погрешна насока во добивањето на сетовите на податоци за одреден простор кој се истражува. Во сите примери каде е користен овој софтвер, неспорна е неговата точност кај најприсутните рамнини на еден истражуван простор – изданок. Потребно е само да се пристапи со резерва кај рамнините кои се застапени во помал процент, кои и онака не влијаат суштински на целата слика.

6.2.4.2. **FACETS**

Додатокот FACETS во CloudCompare претставува алатка која овозможува детална и ефикасна анализа на планарни структури кај 3DOT. Со своите способности за детална идентификација и анализа на фасети (рамнини), алгоритмот овозможува корисниците да добијат подлабоко разбирање и подобри резултати во своите истражувања и проекти.

Имајќи предвид дека на располагање со оваа екстензија има два алгоритми, прво е имплементиран алгоритмот Kd-tree. При вклучувањето се појавува следниот интерфејс (сл. 59):



Слика 59 Интерфејс на алгоритмот Kd-tree

Figure 59 Kd-tree algorithm interface

На сл. 59 е прикажан дијалог за поставување параметри за процесот на детекција на фасети или рамнини во CloudCompare користејќи го алгоритмот KD-tree. Ова мени ја овозможува деталната конфигурација на процесот за обединување на ќелии и параметрите за фасетите:

Fusion algorithm: Овозможува да се избере алгоритам за фузија на ќелии. Во овој случај, избран е KD-tree.

Max angle: Максималниот агол во степени кој дефинира колку две точки или фасети можат да бидат наклонети една кон друга пред да бидат сметани како одвоени. Овде е поставен на 20 степени.

Max relative distance: Максималното релативно растојание одредува колку две точки можат да бидат оддалечени една од друга пред да бидат сметани дека не припаѓаат на иста фасета. Во овој случај е поставена на 1,000, што може да биде кој било релативен збир на точки на дистанца споредбено со размерите на облакот од точки.

Max distance @ 99%: Максимално растојание во единици на која 99 % од точките во фасетата се сметаат за дел од таа фасета. Оваа вредност од 0,200 укажува на релативно тесна граница за групирање точки во фасети.

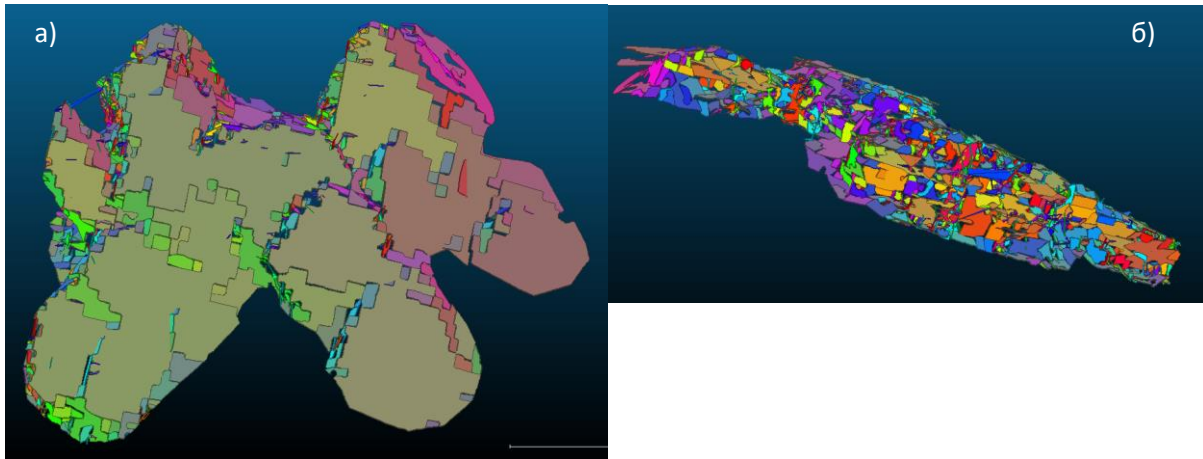
Min points per facet: Минималниот број на точки потребни за да се формира фасета. Вредноста од 15 значи дека секоја фасета мора да содржи најмалку 15 точки за да се смета за валидна.

Max edge length: Максималната должина на рабовите на фасетите. Вредноста од 0,08 укажува на максималната димензија на рабовите во единици.

Warning: cloud has no normals! Output facet normals may be randomly oriented (e.g., colors and classification may be jeopardized): Ова предупредување укажува дека облакот од точки не содржи нормали, што е важно за прецизно ориентирање на фасетите. Ако нема нормали, излезните нормали на фасетите може да бидат случајно ориентирани, што може да влијае на визуелизацијата и класификацијата.

Овие параметри се клучни за фино подесување на процесот на детекција на фасети во CloudCompare, овозможувајќи корисниците да специфицираат

точно како сакаат да се обработат податоците за оптимални резултати. По обработката чие траење зависи најмногу од големината на фајлот и од моќноста на компјутерот се добива (сл. 60):



Слика 60 Поглед на добиениот резултат од Kd-tree а) одозгора б) отстрана
Figure 60 View of the result from Kd-tree from a) above b) side

Сликите прикажуваат различни региони на 3DOT, каде што секоја фасета е обоена во различна боја за да се истакнат разликите во ориентацијата и геометријата на површината. Различните бои на фасетите ги означуваат различните рамнини на дисконтинуитети, што овозможува подлабок увид во структурната комплексност на истражуваната карпеста површина. Видливо е дека фасетите се многу разновидни по големина и форма, што укажува на сложената природа на карпестите формации во облакот од точки. Со овој алгоритам се добиени вкупно 1006 рамнини/фасети. Секоја од овие рамнини, или сите заедно може да бидат експортирани/извлечени во excel или .txt. фајл за нивна понатамошна обработка според потребите. На таб. 7 е прикажан изглед на таков excel фајл. За жал податоците во фајлот не се групирани како што тоа го прави DSE софтверот, туку се расфрлани без некој особен ред. Исто така најголемиот дел од нив се разликуваат меѓу себе, така што останува на корисникот да ги групира соодветно.

Како и на реалниот терен, поголемите рамнини се воочливи со поглед одозгора по Z-оската. Визуелната претстава на најзастапената рамнина соодветствува на реалната состојба. На местата каде се издвоени повеќе помали фасети, при мерења со геолошкиот компас се добиени поголеми разлики при мерење со геолошкиот компас кај три мерења на едно мерно место.

Може да се заклучи дека методот KD-tree успешно ја детектира разноликоста на рамнините. Оваа метода помага во идентификување на структурни блокови што може да бидат од витално значење за структурни анализи, планирање ископ, или оценување на стабилноста на косините.

Табела 7 Достапни податоци во Excel за дел од добиените рамнини во Kd-tree
Table 7 The available data in Excel for small part of the acquired facets from Kd-tree

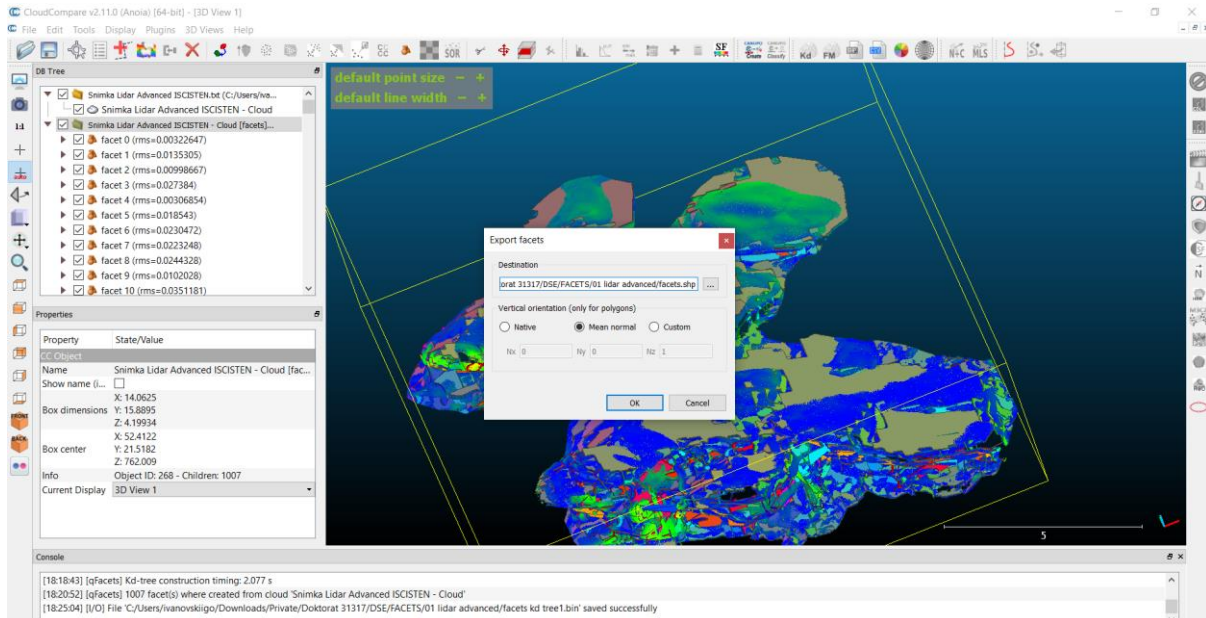
#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Index	CenterX	CenterY	CenterZ	GlobalCer	GlobalCer	GlobalCer	NormalX	NormalY	NormalZ	RMS	Horiz_ext	Vert_ext	Surf_ext	Surface	Dip dir.	Dip	Family inc	Subfamily
2	33	652.501	585.279	397.992	7.57E+11	4.59E+11	397.992	0.937942	0.326943	-0.115641	0.0298079	0.284854	0.429119	0.122236	0.0068680	250	83	0	0
3	350	651.389	585.127	397.547	7.57E+11	4.59E+11	397.547	0.920889	-0.288993	0.261624	0.0220572	0.158849	0.171836	0.027296	0.0177223	107	74	0	0
4	62	648.764	584.784	396.918	7.57E+11	4.59E+11	396.918	-0.400463	0.908277	-0.121087	0.0102592	0.168079	0.169186	0.0284365	0.0239087	156	83	0	0
5	278	651.116	585.284	397.839	7.57E+11	4.59E+11	397.839	0.941701	0.327651	-0.076451	0.0399606	0.236964	0.361867	0.0857496	0.0244434	250	85	0	0
6	0	653.316	586.653	398.304	7.57E+11	4.59E+11	398.304	0.716575	0.150056	-0.681178	0.0267023	0.171936	0.235123	0.040426	0.0024567	258	47	0	0
7	52	649.512	587.123	398.302	7.57E+11	4.59E+11	398.302	0.643237	0.423742	-0.637722	0.0107954	0.244033	0.185996	0.0453891	0.0273206	236	50	0	0
8	310	653.558	585.293	396.829	7.57E+11	4.59E+11	396.829	0.990785	-0.0457796	-0.127472	0.0309406	0.296939	0.301656	0.0895732	0.0286706	272	82	0	0
9	239	649.771	584.175	396.378	7.57E+11	4.59E+11	396.378	0.365011	0.774976	-0.515926	0.0233007	0.322987	0.213617	0.0689954	0.0189398	205	58	0	0
10	358	651.475	584.739	397.139	7.57E+11	4.59E+11	397.139	-0.0237184	0.997191	-0.0710474	0.0136342	0.201259	0.155148	0.0312249	0.0207233	178	85	0	0
11	1	653.174	585.695	397.535	7.57E+11	4.59E+11	397.535	0.0681345	0.980367	-0.185034	0.01981	0.213363	0.223115	0.0476044	0.0061660	183	79	0	0
12	429	649.117	586.314	397.374	7.57E+11	4.59E+11	397.374	0.795356	0.587467	0.149302	0.0054492	0.222313	0.121948	0.0271106	0.0254678	53	81	0	0
13	39	651.193	585.076	397.791	7.57E+11	4.59E+11	397.791	0.26226	0.148686	0.953474	0.0357037	0.293339	0.314604	0.0922858	0.0104601	60	17	0	0
14	231	652.673	586.276	398.096	7.57E+11	4.59E+11	398.096	-0.292057	0.705777	-0.645431	0.0208768	0.237748	0.130595	0.0310487	0.019182	157	49	0	0
15	272	650.441	586.103	398.156	7.57E+11	4.59E+11	398.156	-0.102395	-0.0231803	0.994474	0.0116439	0.644896	0.422984	0.272781	0.122091	257	6	0	0
16	577	648.107	590.059	397.609	7.57E+11	4.59E+11	397.609	0.196318	0.974544	0.108273	0.0199996	0.206917	0.155487	0.032173	0.0147475	11	83	0	0
17	26	648.453	585.546	396.655	7.57E+11	4.59E+11	396.655	0.413162	0.908695	-0.0597494	0.0267248	0.289311	0.458341	0.132603	0.0115933	204	86	0	0
18	530	647.521	587.936	396.702	7.57E+11	4.59E+11	396.702	0.801141	0.258009	0.540004	0.014716	0.575937	0.752394	0.433331	0.271659	72	57	0	0
19	450	651.653	584.642	396.933	7.57E+11	4.59E+11	396.933	0.891312	0.428461	0.148272	0.0187659	0.423524	0.388302	0.164455	0.0466206	64	81	0	0
20	564	647.961	589.126	397.181	7.57E+11	4.59E+11	397.181	0.922836	0.384318	-0.0259346	0.013828	0.163387	0.156792	0.0256176	0.0217048	247	88	0	0
21	8	648.621	584.744	396.817	7.57E+11	4.59E+11	396.817	0.0231694	0.979256	0.201298	0.0056644	0.159004	0.0974508	0.0154951	0.0123686	1	78	0	0
22	290	650.356	585.937	398.744	7.57E+11	4.59E+11	398.744	0.682867	0.615888	0.392904	0.0127999	0.340201	0.295288	0.100457	0.0529767	47	66	0	0
23	2	647.87	590.241	397.019	7.57E+11	4.59E+11	397.019	-0.29761	0.931587	-0.208745	0.0247678	0.379889	0.32801	0.124608	0.001383	162	77	0	0
24	41	652.623	585.007	397.285	7.57E+11	4.59E+11	397.285	0.531885	0.656937	-0.51796	0.0447142	0.230013	0.2922	0.0672096	0.0102242	218	58	0	0
25	149	648.083	590.005	397.493	7.57E+11	4.59E+11	397.493	0.85688	0.0553308	-0.512537	0.0166701	0.55077	0.297473	0.163839	0.0747477	266	59	0	0
26	417	647.901	586.023	396.58	7.57E+11	4.59E+11	396.58	0.822204	-0.568012	-0.0366495	0.0112609	0.662961	0.293471	0.19456	0.0986387	304	87	0	0
27	177	647.546	589.217	396.775	7.57E+11	4.59E+11	396.775	0.848181	-0.520407	-0.0988544	0.0097244	0.163727	0.158945	0.0260235	0.0234024	301	84	0	0
28	254	651.095	585.764	399.239	7.57E+11	4.59E+11	399.239	0.566657	-0.44766	0.691737	0.0163712	0.192973	0.199333	0.0384658	0.0218711	128	46	0	0
29	5	652.749	587.313	398.579	7.57E+11	4.59E+11	398.579	0.515276	0.443829	-0.733148	0.0221163	0.215618	0.225955	0.0487201	0.0099067	229	42	0	0
30	57	650.445	586.957	398.489	7.57E+11	4.59E+11	398.489	0.505135	-0.789836	0.347847	0.0159372	0.214024	0.29384	0.0628888	0.0161178	147	69	0	0
31	3	652.863	586.465	398.582	7.57E+11	4.59E+11	398.582	-0.132496	0.726197	0.674598	0.0318861	0.368353	0.207162	0.0763089	0.0064557	349	47	0	0
32	336	650.455	586.966	398.734	7.57E+11	4.59E+11	398.734	0.610201	-0.736527	-0.29186	0.0180211	0.203928	0.308267	0.0628643	0.0390334	320	73	0	0
33	6	650.722	586.477	399.23	7.57E+11	4.59E+11	399.23	-0.451211	0.127317	0.883289	0.0107928	0.105204	0.186274	0.0195969	0.0125695	285	27	0	0
34	410	649.42	584.896	396.723	7.57E+11	4.59E+11	396.723	0.0256414	0.994195	-0.104492	0.0198014	0.620332	0.297436	0.0195969	0.0184911	181	84	0	0
35	553	648.085	588.74	397.194	7.57E+11	4.59E+11	397.194	0.938906	-0.342834	-0.0303452	0.0255622	0.205536	0.371753	0.0764086	0.0145309	290	88	0	0
36	4	651.098	585.108	397.898	7.57E+11	4.59E+11	397.898	0.146124	0.0250519	0.988949	0.0095082	0.162829	0.183531	0.0298841	0.014476	80	8	0	0
37	301	652.219	586.487	398.775	7.57E+11	4.59E+11	398.775	0.140905	0.92862	-0.343237	0.012306	0.405716	0.343216	0.139248	0.0740723	188	69	0	0
38	7	653.157	586.874	398.359	7.57E+11	4.59E+11	398.359	0.371748	-0.023236	0.928043	0.0109167	0.188402	0.275221	0.0518522	0.0110916	93	21	0	0
39	17	651.091	585.102	397.946	7.57E+11	4.59E+11	397.946	0.681328	-0.0172435	-0.731775	0.0157942	0.169172	0.253548	0.0428932	0.0056630	271	42	0	0
40	114	648.882	588.254	398.319	7.57E+11	4.59E+11	398.319	0.810847	-0.128433	0.570992	0.0174798	0.115815	0.233859	0.0270844	0.0206126	99	55	0	0
41	638	650.994	585.757	399.159	7.57E+11	4.59E+11	399.159	-0.515057	0.78404	-0.345737	0.0782703	0.747902	0.638459	0.477505	0.0845365	146	69	0	0
42	9	653.634	586.259	397.739	7.57E+11	4.59E+11	397.739	-0.169583	0.366036	0.915019	0.0337545	0.653301	0.319219	0.208546	0.0083197	335	23	0	0
43	37	648.481	584.794	396.941	7.57E+11	4.59E+11	396.941	0.594314	0.739058	-0.317149	0.0115574	0.154753	0.186586	0.0288747	0.0230202	218	71	0	0
44	22	648.611	584.784	396.754	7.57E+11	4.59E+11	396.754	0.0719892	-0.444224	0.893019	0.0249083	0.160675	0.192591	0.0309445	0.0019601	170	26	0	0
45	701	648.982	588.278	398.551	7.57E+11	4.59E+11	398.551	0.726138	-0.454553	-0.515854	0.0098776	0.280432	0.416731	0.116865	0.0731918	302	58	0	0

Овој софтвер исто така овозможува издвојување на еден сет на дисконтинуитети за подобра визуелизација и просторна ориентација, кои можат да се експортираат како .shp ili .csv фајлови (сл. 61).

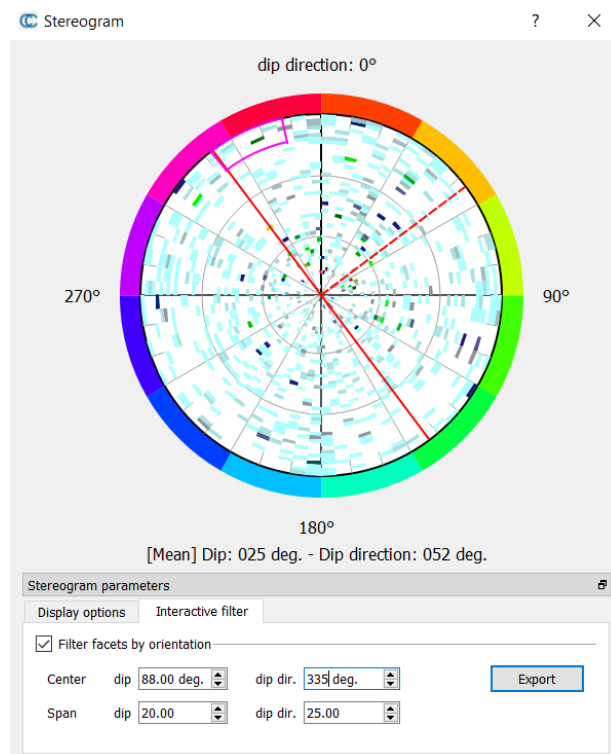
Издвојувањето се врши со користење на опцијата во стереограмската проекција *interactive filter*, односно *filter facet by orientation*. Имајќи предвид дека претходно се утврди дека DSE методата успешно издвојува три рамнински системи кои се поклопуваат со оние кои се измерени рачно, истите три рамнински системи се издвоени и со помош на оваа алатка.

При користење на опцијата за плотање на стереограм во рамките на FACETS во CloudCompare, функцијата *Filter Facets by Orientation* овозможува филтрирање на фасетите според нивната ориентација. Оваа функција е корисна

за издвојување и анализа на специфични ориентации на фасети во рамките на 3DOT. Опциите *Center* и *Span* се дел од оваа функционалност и им овозможуваат на корисниците подетално да специфицираат кои фасети сакаат да ги видат или да ги анализираат (сл. 62):



Слика 61 Интерфејс за екпортирање на еден сет на дисконтинуитети со Kd-tree
Figure 61 Interface for exporting one discontinuity set using Kd-tree



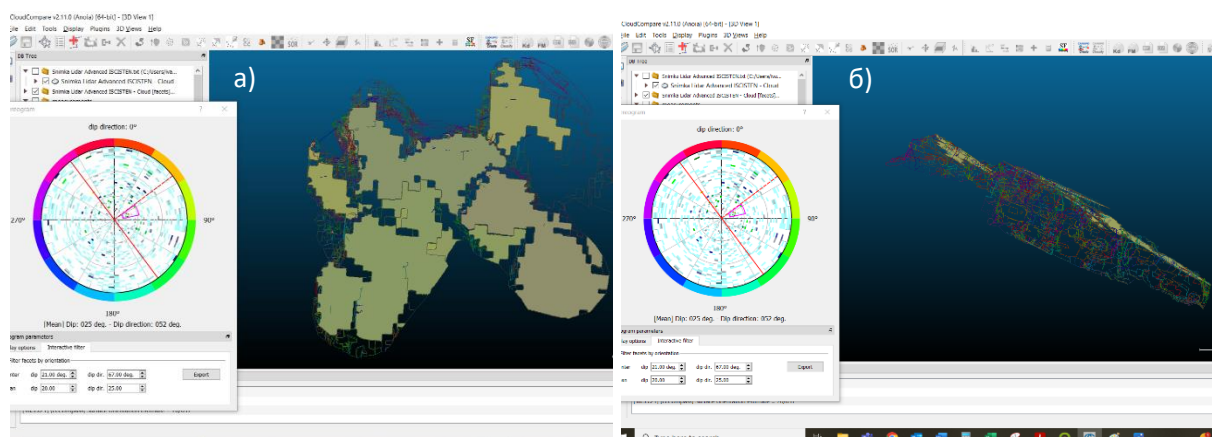
Слика 62 Изглед на опциите за филтрирање на фасети во Kd-tree
Figure 62 Interface for the filtering the facets feature in Kd-tree

Center (Центар): Оваа опција ја дефинира централната ориентација која корисникот сака да ја филтрира. Во суштина, ова е ориентацијата околу која ќе се фокусира филтерот. Корисникот треба да внесе агол за наклонот (dip) и правецот на наклонот (dip direction) кој ја означува централната точка на филтерот. На пример, ако корисникот внесе dip direction од 180 степени и dip од 45 степени, филтерот ќе центрира околу фасети кои се наклонети кон југ со агол од 45 степени.

Span (Распон): Оваа опција го дефинира аголниот распон околу централната ориентација кој ќе биде вклучен во филтерот. Ова го дозволува корисникот да одреди колку широко треба да биде филтерот. На пример, ако е поставен распон од 20°, тогаш филтерот ќе ги вклучува сите фасети кои имаат ориентација на наклон и правец на наклон во распон од $\pm 20^\circ$ од внесените централни вредности за dip и dip direction. Направени се повеќе проверки за функционалноста на овие опции во нашиот случај. Со тоа се одбрани следните опции за SPAN-опсег dip=20° dip dir=25°.

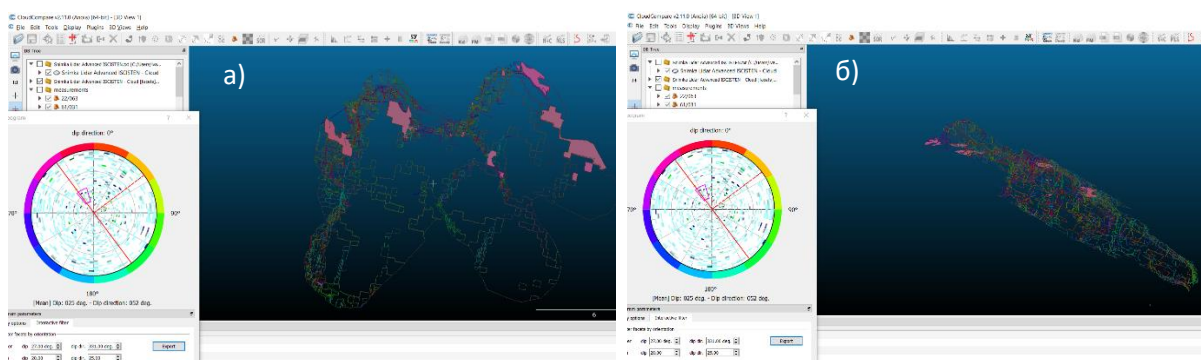
При тоа се добиени следниве резултати:

На слика 63 а и б е прикажан пример на издвојување само на првиот систем (67/21) на рамнини од два различни погледи. Тоа е исто и со слика 64 а и б за вториот систем на рамнини (331/27) и слика 65 а и б за третиот систем (335/88) по застапеност.

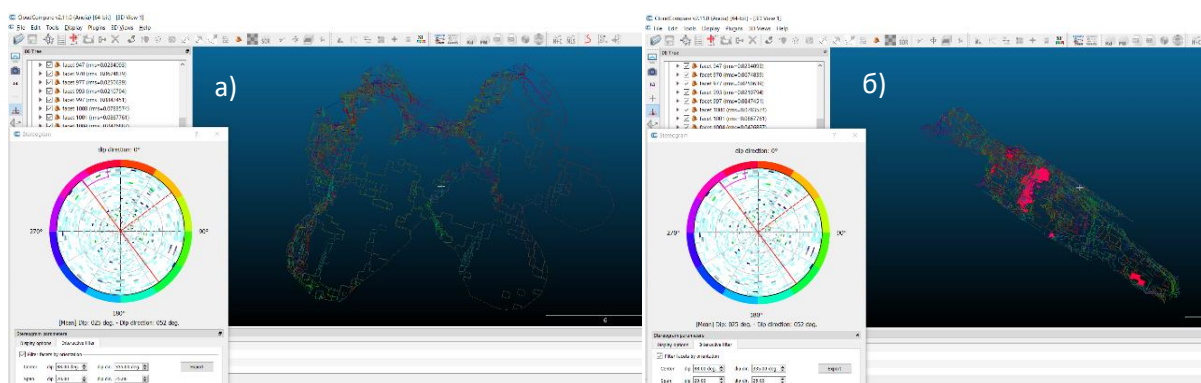


Слика 63 Фасет (67/21) во Kd-tree, поглед а) одгоре б) отстрана

Figure 63 Facet (67/21) in Kd-tree, view a) from above b) from the side



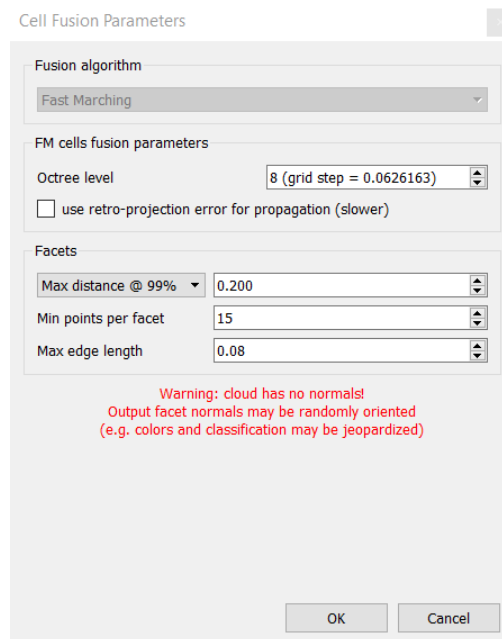
Слика 64 Фасет (331/27) во Kd-tree, поглед а) одгоре б) отстрана
Figure 64 Facet (331/27) in Kd-tree, view a) from above b) from the side



Слика 65 Фасет (335/88) во Kd-tree, поглед а) одгоре б) отстрана
Figure 65 Facet (335/88) in Kd-tree, view a) from above b) from the side

Обработката на облакот од точки со методот Kd-tree за детекција на фасети во CloudCompare покажува дека и покрај техничките ограничувања (како отсуство на нормали), методот може ефикасно да се користи за анализа на структурни дисконтинуитети. Резултатите овозможуваат добра основа за понатамошни геолошки и геотехнички анализи, иако е потребно да се внимава на точноста и надежноста на податоците, особено при планирање на практични апликации.

Следната обработка на достапните податоци е направена со употреба на алгоритмот Fast Marching чиј интерфејс е прикажан на сл. 66. Овој прозорец се користи за да се конфигурираат параметрите за фузија на клетки при изведување сегментација со алгоритмот Fast Marching.



Слика 66 Интерфејс на Fast Marching алгоритмот

Figure 66 Interface for Fast Marching algorithm

Fusion algorithm (Алгоритам за фузија): Прикажува дека е избран алгоритмот Fast Marching, кој се користи за редовна сегментација на просторот врз основа на структурата октаре.

Otree level (Октаре ниво): Поставено на ниво 8, со мрежен чекор од 0,0626163. Ова значи дека просторот ќе биде поделен во воксели (волуменски пиксели) со таа големина. Колку е поголем бројот на нивото, толку е подетална поделбата.

Use retro-projection error for propagation (slower): (користи ретропроекциона грешка за пренесување (поспоро)): Оваа опција е оневозможена. Кога е овозможена, таа прави соседните клетки да се групираат врз основа на глобалното зголемување на RMS (корен на средно-квадратната грешка), но го забавува процесот.

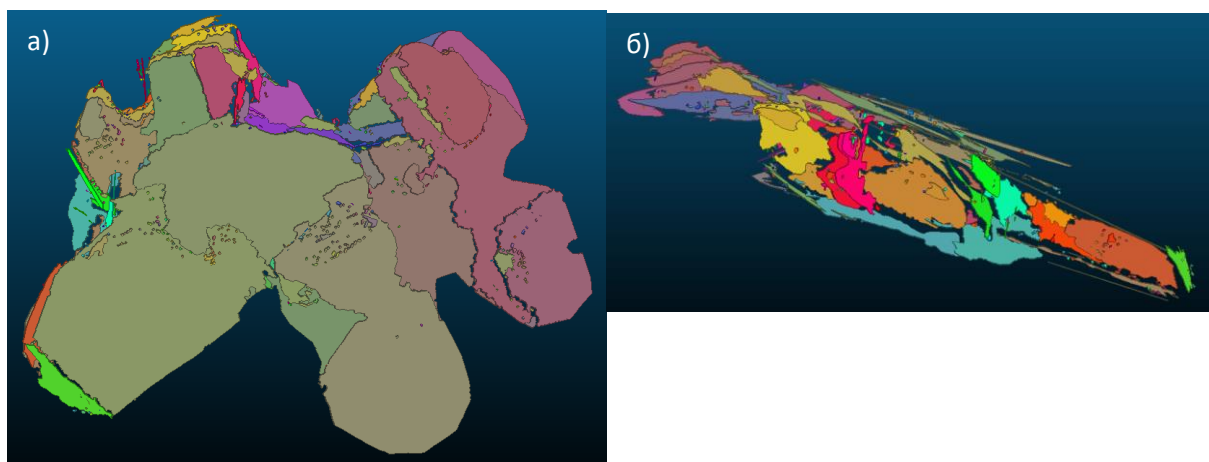
Max distance @ 99 % (Макс растојание @ 99 %): Поставено на 0,200, што значи дека при сегментација, фасетите ќе се групираат ако растојанието помеѓу точките и најдобро соодветствувачкиот план е помало од 0,200.

Min points per facet (Мин точки по фасета): Поставено на 15, што значи дека секоја фасета треба да содржи најмалку 15 точки за да биде валидна.

Max edge length (Макс должина на раб): Поставено на 0,08; што го ограничува максимумот на должината на работ на фасетите.

Warning: cloud has no normals! (Предупредување: облакот нема нормали!): Ова значи дека точките во 3D-облакот немаат нормали, што може да доведе до случајно ориентирани фасети. Ова може да предизвика проблеми со боите и класификацијата.

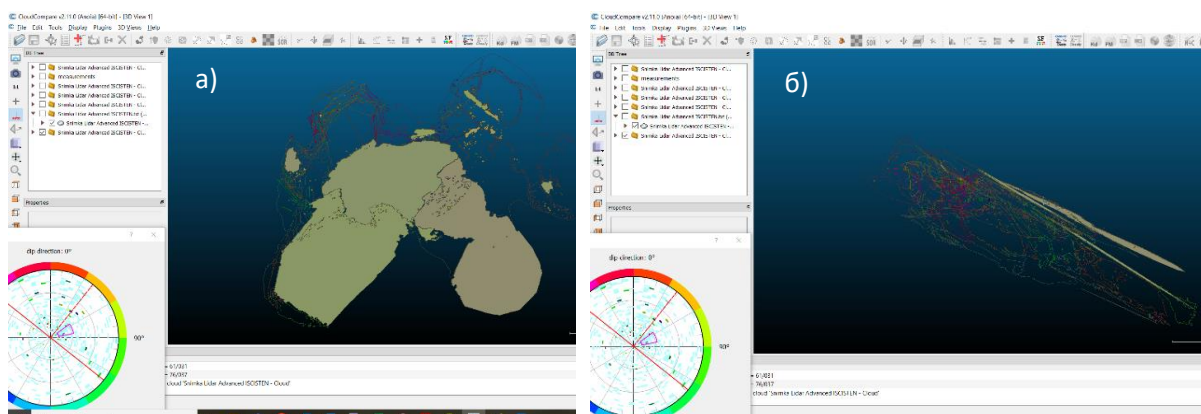
Овој прозорец е важен за конфигурирање на параметрите за фузија на клетки во FACETS, што е клучно за правилна сегментација и анализа на 3D-точките. При се добива следниот резултат (сл. 67):



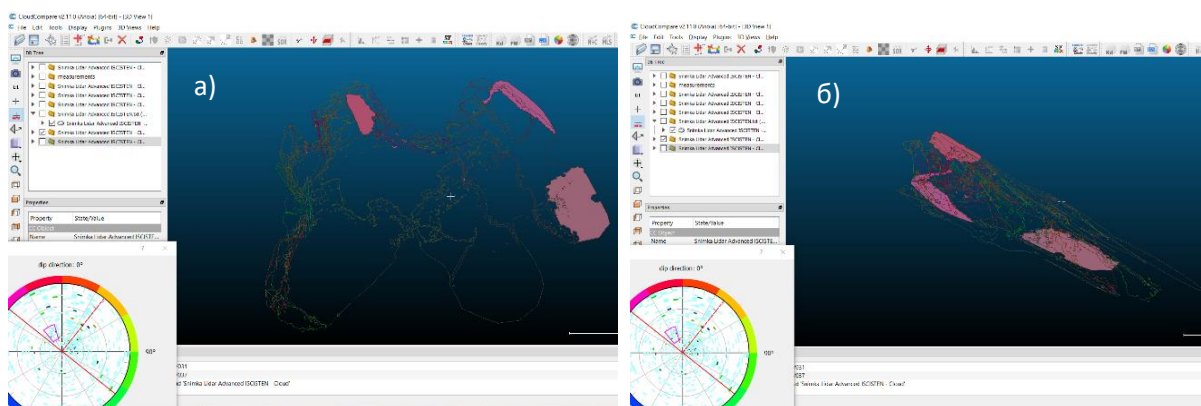
Слика 67 Поглед на добиениот резултат од Fast Marching а) одозгора б) отстрана
Figure 67 View of the result from Fast Marching from a) above b) side

Од овој алгоритам може да се заклучи дека има свои особености споредено со претходниот. Добиени се 1084 фасети, што е за нијанса повеќе отколку со првиот алгоритам. Станува збор дека при оваа визуелизација се издвоени или преголеми рамнини или премали (точкести) рамнини. Трендот е запазен, но може да се забележи дека овие два алгоритми за конкретниот облак од точки се разликуваат во делот на рамнините од втор ранг по значење. И кај овој алгоритам, програмата овозможува извлекување на податоците за азимут и паден агол во excel и .txt со сличен изглед како претходниот.

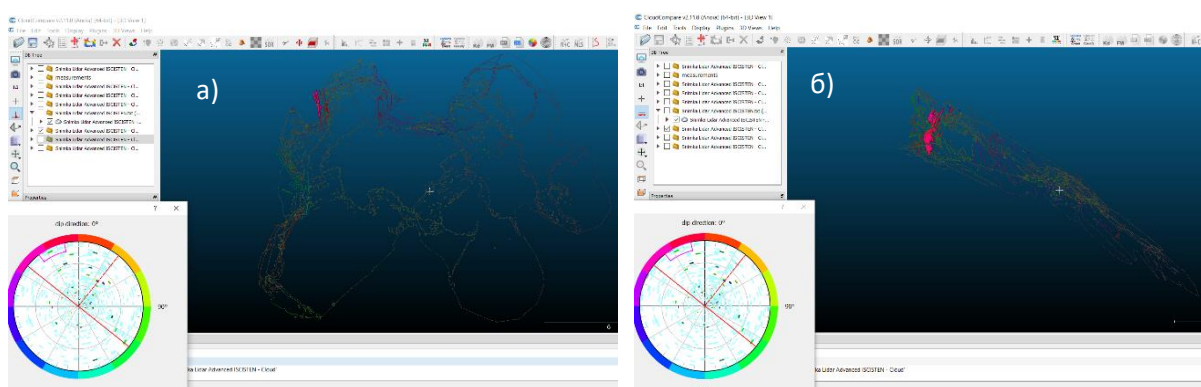
И за оваа метода се издвоени рамнините за првиот (67/21), вториот (331/27) и третиот (335/88) по бројност систем (сл. 68, 69, 70).



Слика 69 Фасет (67/21) во Fast Marching, поглед а) одгоре б) отстрана
Figure 69 Facet (67/21) in Fast Marching, view a) from above b) from the side

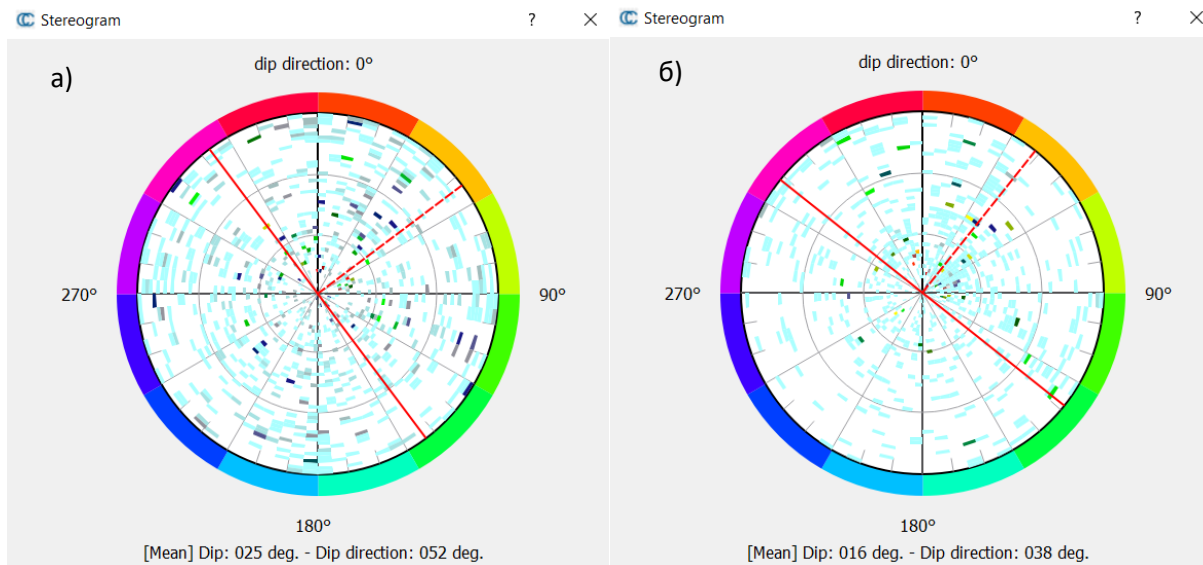


Слика 68 Фасет (331/27) во Fast Marching, поглед а) одгоре б) отстрана
Figure 68 Facet (331/27) in Fast Marching, view a) from above b) from the side



Слика 70 Фасет (335/88) во Fast Marching, поглед а) одгоре б) отстрана
Figure 70 Figure 68 Facet (335/88) in Fast Marching, view a) from above b) from side

Добиени се стереограми од двете различни методи (слика 71 а и б) на кои се наоѓа визуализација на ориентациите на различни рамнини или фасети. Компонентите на стереограмот се:



Слика 71 Стереограм за а) Kd-tree б) Fast Marching
Figure 71 Stereogram for a) Kd-tree. b) Fast Marching

0° - 360° : Овие броеви ги означуваат аголните правци мерени во степени по периферијата на кругот, каде $0^{\circ}/360^{\circ}$ е на врвот (север), 90° е десно (исток), 180° е на дното (југ), и 270° е лево (запад).

Различни Бои: Секторите се обоени во различни бои за да означат различни фамилии или групи на структурни ориентации. Ова помага да се идентификуваат и визуелно да се разликуваат доминантните групи на рамнини во анализираниот простор.

Точки на стереограмот, мали линии или штипки: Секоја точка или штипка на стереограмот претставува ориентација на една рамнина во просторот. Позицијата на овие точки на стереограмот укажува на наклонот и правецот на наклонот на секоја рамнина.

Централни линии, црвена линија: Обично означува некоја специфична карактеристика или просечен правец на доминантните структурни дисконтинуитети.

На стереограмот за Kd-tree (сл. 71 а) може да се забележи сложена распределба на рамнинските ориентации во анализираниот облак од точки. Стереограмот ги покажува ориентациите на рамнините во просторот, при што аглите се означени од 0° до 360° околу периферијата на кругот. Присуството на

рамнини е означено со мали правоаголници распоредени во кругот. Промените во боите укажуваат на различни категории или фамилии на рамнини, што олеснува визуелно групирање и анализа. Црвените линии означуваат доминантни ориентации во облакот од точки. Ова укажува на постоење одредени преовладувачки структурни трендови во карпата. Посочените агли за просечен паден агол (25°) и азимут на падната насока (52°) ја дефинираат преовладувачката ориентација на рамнините. Различните бои и нивната распределба низ кругот можат да укажат за разновидноста на структурните ориентации. Густината на точките во одредени сектори укажува на концентрацијата на рамнините во тие ориентации.

На стереограмот од Fast Marching (сл. 71 б) исто така се прикажани анализите на ориентациите на различни геолошки рамнини. Црвената линија покажува доминантен правец на наклон, со ознаки за просечен паден агол од 16° и правец на наклон од 38° . Ова укажува на тоа дека во истражуваниот регион постои тенденција рамнините да имаат наклон кон североисток со умерен паден агол.

И двата стереограми покажуваат дека истражуваниот објект има комплексна структура со разновидни ориентации на рамнините. Преовладувачките ориентации, обележани со црвени линии и густината на точките во одредени сектори помагаат да се разбере геолошката стабилност и потенцијалните структурни слабости.

За разликите во алгоритамските пристапи можеме да го кажеме следното. алгоритмот Fast Marching има тенденција да ги обележува областите на база на геометриска кохерентност и континуитет, генерирајќи стереограми каде што доминантните ориентации може да бидат позастапени, додека малите или изолираните рамнини може да не бидат толку видливи. Алгоритмот Kd-Tree ефективно ги користи просторните структури за брза индексација и пребарување, што може да доведе до поизбалансирана презентација на рамнините во стереограмот, со потенцијално поголема густина на информации.

Постои видлива разлика во густината и распределбата на точките на стереограмите, што може да укаже на различните капацитети на алгоритмите да ги детектираат и визуелизираат малите или суптилните ориентации.

6.2.5. Изведени заклучоци за локалитетот Милутинци

За првиот локалитет беа направени повеќе типови на споредби, помеѓу повеќе различни методи за добивање структурни податоци. Анализите имплементираа рачни, статистички, стереограмски, како и напредни полуавтоматски методи за добивање различни видови на резултати.

Изведени се голем број на заклучоци. Некои од нив се очекувани, некои според принципот на работата беа и во контекст на планирањата, а некои се неочекувани.

Еден од неочекуваните заклучоци е големата компатибилност помеѓу снимките кои се направени со LiDAR наспрема снимките направени со SfM-техниката. Во овој случај се користени две сосема различни технологии и во поглед на хардверот и во поглед на методологијата. Добиените резултати покажуваат многу високо преклопување на 3DOT.

Понатаму, би се извлекле два главни заклучоци. Првиот заклучок е дека се докажа дека снимката направена со LiDAR-технологиската во телефонот е со многу висока точност. Вториот заклучок е дека достапниот виртуелен компас во CloudCompare со многу висока точност и со слична шема на отстапувања ги отсликува мерењата со геолошкиот компас. Ова беа и основните цели на целата оваа верификација. Да се докаже употребливоста на овој современ пристап. Може да се каже дека во овој случај, на конкретниот објект, работата со новите техники и методологии даваат резултати со сигурност која може да се рамни со оние податоци кои се добиени со геолошкиот компас.

Понатаму, различните типови на анализи, секоја на свој начин укажуваат на високо преклопување на добиените податоци со класичните во однос на современите методи. Разликите се во рамките на оние разлики кои ги произведува самиот геолошки компас, или самата субјективност на лицето кое работи со компасот. Секоја од направените анализи, покажаа на свој начин, дека отстапувањата кај геолошкиот и виртуелниот компас се многу слични меѓу себе, односно шемата на поголеми или помали отстапувања се пресликува од едната на другата метода. Рамнините кои се полесни за снимање со геолошкиот компас, се исто така полесни за снимање и со виртуелниот компас. Од друга страна, кај

рамнините каде нерамноста е поизразена, и двата пристапи даваат поголеми отстапувања и разлики.

Што се однесува на полуавтоматските методи, првиот впечаток е дека DSE во споредба со FACETS ги извлекува рамнините со точност која е многу блиска до реалната состојба. Кај FACETS, двата алгоритми се разликуваат помеѓу себе подрастично отколку што алгоритмот Kd-tree сам по себе се разликува со DSE. Додека DSE даде основи дека има голем потенцијал за полуавтоматска анализа на 3DOT, FACETS иако генерално даде задоволувачки резултати, заостанува зад алгоритмот DSE.

DSE-методата е развиена конкретно за ваков тип на проблеми, така што може да се каже дека е многу ветувачка, дава висок степен на препознавање на дисконтинуитетите, дава солиден број на опции за промена на параметрите во контекст на добивање пореални резултати и дава одличен број на визуелни прикази кои се многу корисни. Високиот број на податоци, присутноста на мали проблеми во облакот од точки, како и неколку други помали проблеми со одредени визуелизации, укажуваат дека DSE во овој момент е многу ветувачки, и може да даде одредена поддршка на геолошките служби.

Од друга страна FACETS има поголем број на недостатоци кога станува збор за работа со ваков тип на изданоци и податоци. Методата Kd-tree е попроста, побрза и дава податоци со голема сличност од DSE. Сепак, визуелните придобивки не се толку добри, како и извлекувањето и работата со добиените вредности. Fast Marching пак, е многукратно побавен од првиот алгоритам, и барем за овој објект, резултатите не доволно ја одразуваат реалната состојба на теренот.

Иако полуавтоматските методи даваат еден сосема различен пристап кон извлекувањето на структурни податоци споредено со виртуелниот компас, сепак во овој момент, самата работа со полуавтоматските методи знае да биде временски подолга, особено доколку компјутерот е послаб, и доколку се навлезе во разработка на дополнителните функции и опции што софтверот ги нуди за подобро разбирање и извлекување на структурните елементи. Во овој момент не би можело да се заклучи дека работата со полуавтоматската метода е многу побрза отколку рачната работа со виртуелниот компас. Постои можност

корисникот лесно да се заплетка при процедурата кај полуавтоматската обработка на податоци и дополнително да се успори при обработка на големи фајлови.

На крај може да се каже дека за верификацијата на методологијата кај локалитетот Милутинци даде висок степен на обработка на облаците од точки, висок степен на нивна примена во функција на геолошкиот компас, како и висока потврда од повеќе различни аналитички методи, како и полуавтоматски алгоритми за обработка и добивање на вредностите на структурните елементи.

6.3. Применета методологија за собирање структурни податоци за локалитетот Фариш – изданок во плочести и банковити варовници

Согласно планот за рационално, разновидно и комплетно покривање на сите достапни технологии и геолошки структури, следен чекор е верификација на резултатите добиени од снимка направена кај локалитетот Фариш. Избраниот изданок од карпа е изграден од плочести и банковити варовници и се наоѓа во централниот дел на Македонија близу селото Фариш, на рабовите на Фаришката Клисуре, а е со димензии 15 x 10 m. Според своите димензии избраната локација е соодветна за снимање со iPhone.

Истражуваниот дел се наоѓа во релативно непристапен терен близу самиот врв на ридот Стража на падина каде изданоците формирале каскадна стрмнина условена со самата плочеста градба на варовниците. Целото подрачје каде се простираат овие изданоци било изложено на силни тектонски процеси при што во непосредната околина се присутни различни набори, антиклинали и синклинали. Избраната микролокација, во најголем дел нема многу набори, но споредбено со изданокот обработен кај локалитет Милутинци, самата конфигурација на карпите дава впечаток дека е потежок за снимање, обработка и анализа. Впрочем тоа беше и целта, со вториот локалитет да се подигне степенот на тежина, односно сниманиот примерок да биде посложен во делот на рапавоста и набраноста. Исто така вегетацијата беше посилна кај овој објект, што беше отежнителна околност при изработка на подетална снимка. Теренот беше тешко пристапен и со тоа потежок за снимање (сл. 72 а и б).



Слика 72 Изданоци на плочести и банковити варовници на локалитетот Фариш
Figure 72 Outcrop of platy and bedded limestones at site Farish

И овој пат класичниот начин на собирање структурни податоци беше со употреба на Кларовиот геолошки компас, (сл. 1а и сл. 73). Мерењата со телефонот се направени со помош на iPhone 13 Pro (сл. 9а). За геореференцирање е користен инструментот GPS TOPCON GRS 1 (сл. 9д).



Слика 73 Мерење со геолошки компас на локалитет Фариш
Figure 73 Measurements using geological compass at site Farish

Пред започнување со снимањата на теренот се обележани 5 референтни точки во силна боја која треба да е лесно видлива при снимањето со телефон, односно да може да се детектира и кај добиениот 3DOT (сл. 74а). Тие точки се снимани со GPS-уредот со цел геореференцирање на добиениот 3DOT (сл. 74б). Положбените и висинските координати во државен координатен систем се прикажани во таб. 8.

Табела 8 Координати на референтни точки кај локалитетот Фариш
Table 8 Reference points coordinate at Farish site

Број на точка:	Y	X	Z
1	7568649.665	4588590.488	398.548
2	7568653.285	4588587.208	398.438
3	7568649.213	4588583.758	396.071
4	7568647.595	4588589.122	397.079
5	7568651.677	4588584.921	398.337



Слика 74 а) референтна точка б) снимање со ГПС-уред

Figure 74 a) reference point b) surveying with GPS

Со алатката 3D Scanner App направено е LiDAR-скенирање на теренот снимано со паметниот телефон. При снимање телефонот е држан на растојание од површината од 0,3 до 3 метри (сл. 75).



Слика 75 LiDAR-снимање со употреба на паметен телефон на локалитет Фариш

Figure 75 LiDAR recording using smartphone at Farish site

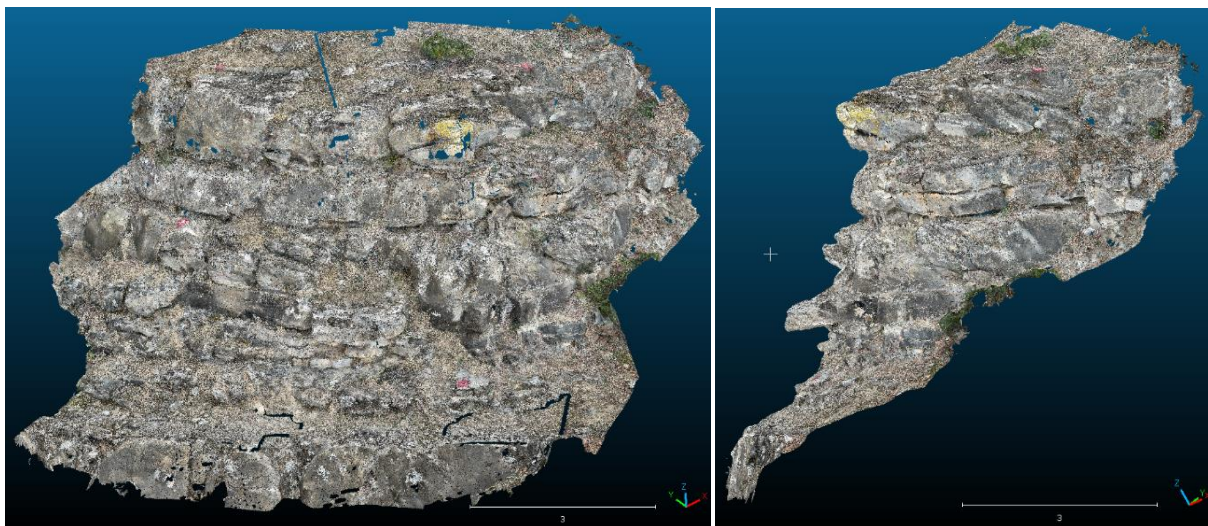
6.3.1. Локалитет Фариш - добиени резултати

6.3.1.1. Обработка на податоците добиени од снимање со телефон

При снимањето на локалитетот Милутинци се констатираше дека нема никакви особени разлики при снимање на некој изданок дали се користи опцијата *Lidar* или *Lidar Advanced*. Според тоа ова мерење е направено со опцијата *Lidar*. Поради релативно лошиот терен, снимањето на целата површина која е цел на оваа анализа траеше околу 20-тина минути. Добиениот фајл е експортиран користејќи ја екстензијата .xyz. Поради неповолниот терен, направените снимки се разликуваа според нивниот квалитет и затоа беа направени неколку мерења со цел, да се добие максимално употреблив фајл.

3DOT беше геореференциран во Cloudcompare на начин кој е опишан претходно за локалитет Милутинци, поглавје 6.2.1.1.

Големината на оригиналниот фајл е околу 132 MB. Со негова дообработка и сечење на вишокот на вегетација и деловите од изданокот кои се надвор од нашиот интерес, но и со негово зачувување како .txt фајл, тој доби тежина од 193,5 MB и содржеше 3 411 695 точки (сл. 76).



Слика 76 Поглед на снимениот изданок во CloudCompare од: а) запад б) југ

Figure 76 Recorded outcrop view in CloudCompare from: a) West b) South

6.3.2. Приказ на мерењата направени со геолошки компас и виртуелен компас

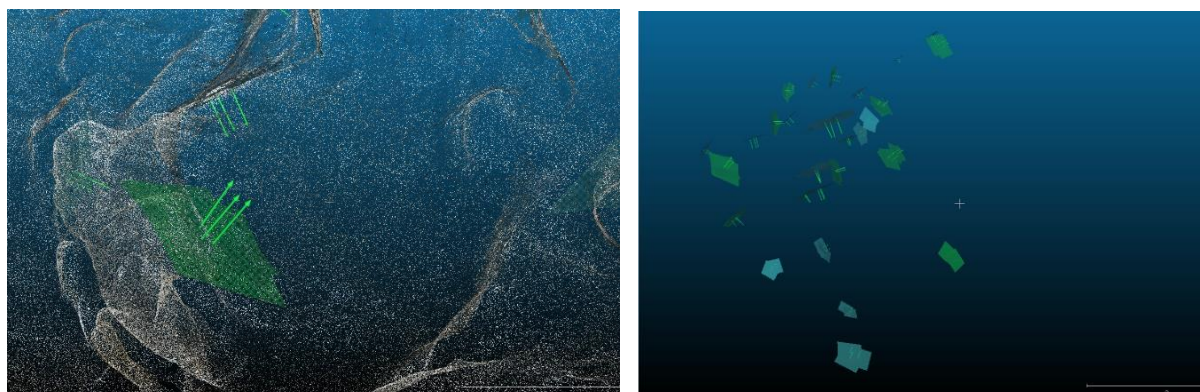
И кај овој локалитет, за секое мерно место беа направени по три мерења. На секое мерно место, во радиус 10 - 15 cm, се направени три мерења кои се однесуваат на тоа место. Вкупно се избрани 28 мерни места, односно се направени 84 мерења (таб. 9). Се водеше сметка да се измерат елементи на пад од сите страни на овој изданок, односно да се постигне разновидност во областа на добивање различни елементи на пад. За овој локалитет може да се каже дека споредено со претходниот, постоеја делови од изданокот кои беа силно набрани и поради тоа на тие места не беа извршени мерења со геолошкиот компас. Бројот на извршени мерења е помал отколку кај претходниот локалитет поради помалиот изданок, како и поселективниот пристап на мерни места.

Табела 9 Мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (зелено)

Table 9 Measurement with geological compass (blue) and virtual compass (green)

Бр	Мерења со геолошки компас			Мерења со виртуелен компас		
	1	2	3	1	2	3
1	33/26	28/29	36/28	35/25	37/25	40/29
2	42/38	37/33	31/32	38/31	37/32	35/31
3	45/29	44/30	35/24	46/26	44/26	46/25
4	265/69	267/65	271/66	264/63	260/70	260/61
5	262/66	259/64	260/69	261/65	260/66	261/63
6	258/61	256/60	259/61	250/59	256/57	256/62
7	173/78	175/80	172/76	172/73	176/73	172/80
8	1/89	3/89	360/85	4/86	4/85	4/85
9	271/59	269/60	278/57	272/65	278/62	275/59
10	43/48	37/48	35/45	40/50	36/52	43/51
11	266/60	268/58	267/61	272/57	270/56	267/54
12	261/66	264/59	263/60	262/67	261/72	265/68
13	265/50	264/49	264/51	256/50	261/50	269/45
14	253/53	259/50	254/49	264/45	265/47	260/52
15	31/21	47/25	25/19	39/19	24/17	43/18
16	57/38	56/40	52/40	65/39	56/42	53/50
17	59/60	57/63	56/61	55/72	55/71	61/70
18	225/80	224/81	223/80	229/75	228/81	227/83
19	248/65	247/62	248/63	251/73	252/72	251/73
20	61/50	63/49	62/49	65/53	59/58	66/53
21	51/54	53/55	50/58	54/60	53/65	49/66
22	268/48	273/49	272/54	276/55	277/53	277/52
23	231/85	236/84	233/79	239/77	239/80	240/78
24	256/79	258/80	259/78	258/77	266/82	258/79
25	149/80	144/79	146/79	146/73	149/74	147/72
26	357/76	354/78	355/79	359/81	355/77	358/74
27	337/82	336/85	338/85	358/79	326/80	340/89
28	142/89	145/88	142/88	146/85	146/85	146/85

И овој пат, при мерењето со геолошкиот компас, се означени сите места каде се вршени мерењата, со цел истите тие позиции да се лоцираат и да се измерат и со виртуелниот компас (сл. 77).



Слика 77 Некои од мерењата за азимут и паден агол со виртуелниот компас
Figure 77 Some dip and dip direction measurements using the virtual compass

6.3.3. Анализа на добиените резултати

И во овој случај, по добивање на резултатите од снимањата, се направија неколку различни анализи, кои независно даваат различни аспекти на истата проблематика.

6.3.3.1. Анализа на добиените отстапувања

При мерење со геолошкиот компас, максималната разлика во азимутот на падната насока за три мерења на едно мерно место изнесува 16° , додека за падниот агол е 6° . За виртуелниот компас, разликите се 32° и 11° соодветно.

И кај овој локалитет, во делови на изданокот каде има поголема зарамнетост на карпата, има помали разлики во мерењата и со геолошкиот и со виртуелниот компас и обратно (таб. 10).

Со направените анализи на просечните разлики во сет од три мерења за едно мерно место, може да се добијат дополнителни податоци за компатибилноста помеѓу овие два пристапа.

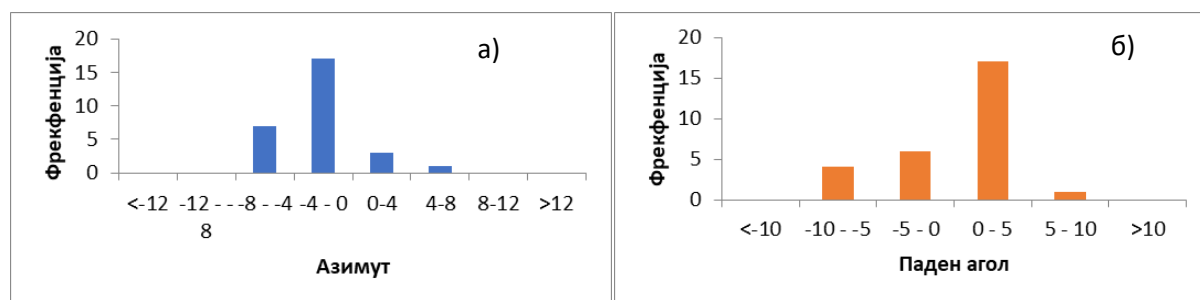
И овде е направена анализа на фреквенцијата на разликите во вредностите добиени со геолошки компас, односно со виртуелен компас, со цел

да се добие увид во дистрибуцијата на отстапувањата. Разликата е изразена како отстапување на мерењето со виртуелниот компас во однос на мерењето со геолошки компас, односно просечните вредности на разликите за една мерна точка од виртуелниот компас се одземаат од просечните вредности на разликите за една мерна точка добиени со мерење со геолошкиот компас (сл. 78 а и б).

Табела 10 Обработка на добиените вредности за азимут и паден агол

Table 10 Processing the obtained values for dip and dip direction

	Мерења со геолошки компас								Мерења со виртуелен компас								Разлики	
	Азимут 1	Паден агол 1	Азимут 2	Паден агол 2	Азимут 3	Паден агол 3	Просечна вредност на азимут	Просечна вредност на паден агол	Азимут 4	Паден агол 4	Азимут 5	Паден агол 5	Азимут 6	Паден агол 6	Просечна вредност на азимут	Просечна вредност на паден агол	Разлика помеѓу два просека за азимут	Разлика помеѓу два просека за паден агол
1	33	26	28	29	36	28	32,33	27,67	35	25	37	25	40	29	37,33	26,33	-5,00	1,33
2	42	38	37	33	31	32	36,67	34,33	38	31	37	32	35	31	36,67	31,33	0,00	3,00
3	45	29	44	30	35	24	41,33	27,67	46	26	44	26	46	25	45,33	25,67	-4,00	2,00
4	265	69	267	65	271	66	267,67	66,67	264	63	260	70	260	61	261,33	64,67	6,33	2,00
5	262	66	259	64	260	69	260,33	66,33	261	65	260	66	261	63	260,67	64,67	-0,33	1,67
6	258	61	256	60	259	61	257,67	60,67	250	59	256	57	256	62	254,00	59,33	3,67	1,33
7	173	78	175	80	172	76	173,33	78,00	172	73	176	73	172	80	173,33	75,33	0,00	2,67
8	1	89	3	89	0	85	1,50	87,67	4	86	4	85	4	85	4,00	85,33	-2,50	2,33
9	271	59	269	60	278	57	272,67	58,67	272	65	278	62	275	59	275,00	62,00	-2,33	-3,33
10	43	48	37	48	35	45	38,33	47,00	40	50	36	52	43	51	39,67	51,00	-1,33	-4,00
11	266	60	268	58	267	61	267,00	59,67	272	57	270	56	267	54	269,67	55,67	-2,67	4,00
12	261	66	264	59	263	60	262,67	61,67	262	57	261	72	265	68	262,67	65,67	0,00	-4,00
13	265	50	264	49	264	51	264,33	50,00	256	50	261	50	269	45	262,00	48,33	2,33	1,67
14	253	53	259	50	254	49	255,33	50,67	264	45	265	47	260	52	263,00	48,00	-7,67	2,67
15	31	21	47	25	25	19	34,33	21,67	39	19	24	17	43	18	35,33	18,00	-1,00	3,67
16	57	38	56	40	52	40	55,00	39,33	65	39	56	42	53	50	58,00	43,67	-3,00	-4,33
17	59	60	57	63	56	61	57,33	61,33	55	72	55	71	61	70	57,00	71,00	0,33	-9,67
18	225	80	224	81	223	80	224,00	80,33	229	75	228	81	227	83	228,00	79,67	-4,00	0,67
19	248	65	247	62	248	63	247,67	63,33	251	73	252	72	251	73	251,33	72,67	-3,67	-9,33
20	61	50	63	49	62	49	62,00	49,33	65	53	59	58	66	53	63,33	54,67	-1,33	-5,33
21	51	54	53	55	50	58	51,33	55,67	54	60	53	65	49	66	52,00	63,67	-0,67	-8,00
22	268	48	273	49	272	54	271,00	50,33	276	55	277	53	277	52	276,67	53,33	-5,67	-3,00
23	231	85	236	84	233	79	233,33	82,67	239	77	239	80	240	78	239,33	78,33	-6,00	4,33
24	256	79	258	80	259	78	257,67	79,00	258	77	266	82	258	79	260,67	79,33	-3,00	-0,33
25	149	80	144	79	146	79	146,33	79,33	146	73	149	74	147	72	147,33	73,00	-1,00	6,33
26	357	76	354	78	355	79	355,33	77,67	359	81	355	77	358	74	357,33	77,33	-2,00	0,33
27	337	82	336	85	338	85	337,00	84,00	358	79	326	80	340	89	341,33	82,67	-4,33	1,33
28	142	89	145	88	142	88	143,00	88,33	146	85	146	85	146	85	146,00	85,00	-3,00	3,33



Слика 78 а) Приказ на распределбата на разликите за азимут на падната насока б) Приказ на распределбата на разликите за падниот агол.

Figure 78 а) Display of distribution of deviations in dip direction measurements б) Display of distribution of deviations in dip measurements

Од добиените резултати за мерењата на азимут на падната насока, може да се заклучи дека сите отстапувањата кај мерењата (100 %), се во ранг $\pm 8^\circ$.

Од добиените резултати за мерењата на падниот агол, може да се заклучи дека најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (82,14 %) се во ранг $\pm 5^\circ$. Изразено во процент имајќи во предвид дека можните достапни вредности за азимут се од 0° до 90° , може да се заклучи дека 82,14 % од мерењата имаат разлика од 5,55 %, а останатите 17,86 % од мерењата имаат максимална разлика од 11,11 %.

Добиените статистички резултати се во рангот на нормалните отстапувања. Мерењата на падниот агол покажуваат поголем процент на максимална грешка, една од причините би била и поситната скала на поделци за вредностите на паден агол на компасот.

6.3.3.2. Статистичка анализа

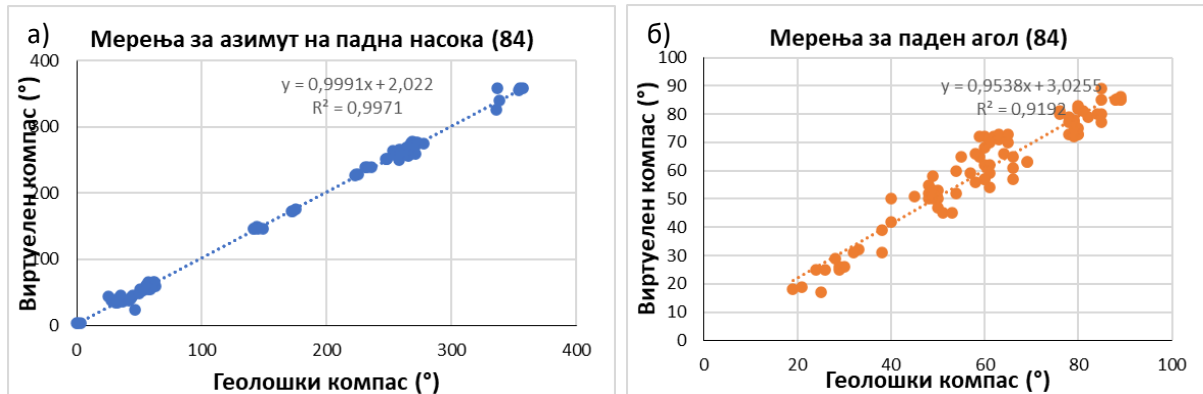
Со направените три мерења и со геолошкиот компас и со виртуелниот компас за секое мерно место може да се пресмета средната добиена вредност за азимутот на падната насока и падниот агол. Со меѓусебно одземање на вредностите за секое мерно место добиени од геолошкиот и виртуелниот компас, се добива средна вредност, како и максимално и минимално отстапување за секое мерење посебно (таб. 10).

Отстапувањето на средните вредности за азимутот е максимални $7,67^\circ$. За падниот агол, максималното отстапување од средните вредности е $9,67^\circ$. Така се добива просечно отстапување за азимут од $2,76^\circ$, и за паден агол од $3,43^\circ$.

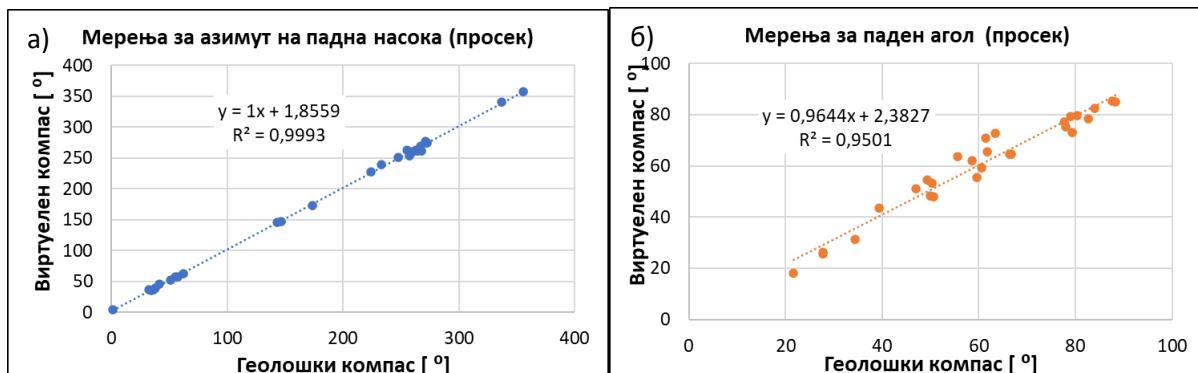
За азимутот, стандардната девијација изнесува 2,09, а за падниот агол, стандардната девијација изнесува 2,45. Овие вредности укажуваат на многу мала и дозволива статистичка грешка.

6.3.3.3. Регресиона анализа

И за овој локалитет беше изработен графикон за регресиона зависност каде повисока вредност на R^2 укажува на силна врска помеѓу двете променливи (сл. 79 и сл. 80).



Слика 79 Регресиона анализа од сите мерења за а) азимут б) паден агол
Figure 79 Regression analysis from all measurements for a) dip direction b) dip



Слика 80 Регресиона анализа од просечни вредности за а) азимут б) паден агол
Figure 80 Regression analysis from average measurements for a) dip direction b) dip

Според ова, може да се заклучи дека постои силна зависност помеѓу добиените вредности за измерениот пад и насоката на пад, според двата метода на мерење. Имено, коефициентот на корелација е:

За сите мерења (84), $R^2 = 0,9971$ за азимутот на падната насока и $R^2 = 0,9192$ за падниот агол.

За просечните вредности (24 мерни места), $R^2 = 0,9993$ за азимутот на падната насока и $R^2 = 0,9501$ за падниот агол.

6.3.3.4. *Анализа на групи на мерења*

Ако резултатите од сите 28 мерни точки се групираат според сродни резултати, се добиваат следниве групи:

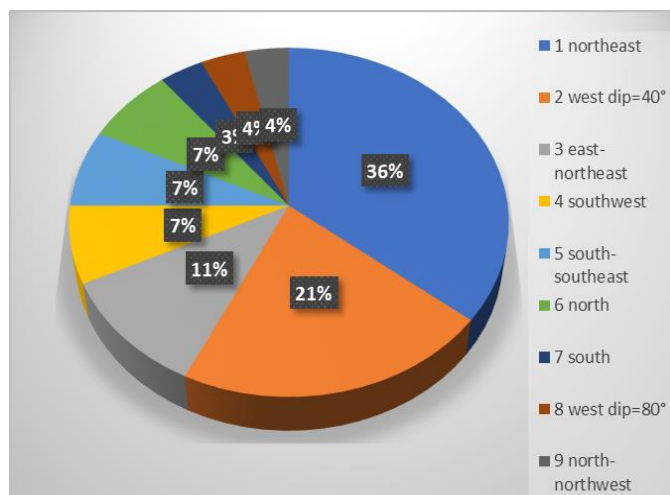
- 10 мерни точки припаѓаат на група 1 со општа насока на падниот агол кон североисток,
- 6 мерни точки припаѓаат на група 2 со општа насока приближно кон запад и паден агол од околу 40°,
- 3 мерни точки припаѓаат на група 3 со општа насока кон исток-североисток,
- 2 мерни точки припаѓаат на група 4 со општа насока кон југозапад,
- 2 мерни точки припаѓаат на група 5 со општа насока кон југ-југоисток,
- 2 мерни точки припаѓаат на група 6 со општа насока кон север,
- 1 мерна точка припаѓа на група 7 со приближна општа насока кон југ,
- 1 мерна точка припаѓа на група 8 со општа насока приближно кон запад и агол на пад од околу 80°,
- 1 мерна точка припаѓа на група 9 со општа насока кон север-северозапад.

Приказ на сите мерења кои се направени со геолошкиот и виртуелниот компас се прикажани во дијаграм сл. 81. Процентуалниот удел на сите од овие групи е прикажан на слика 82.



Слика 81 Приказ на групи на мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (портакалово).

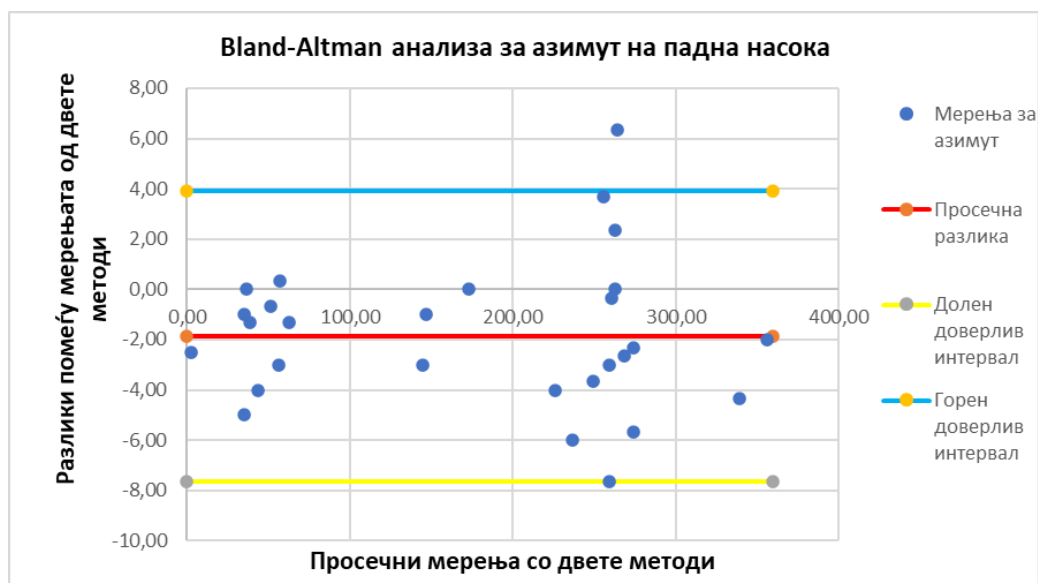
Figure 81 Display of groups of measurements with geological compass (blue) and virtual compass (orange).



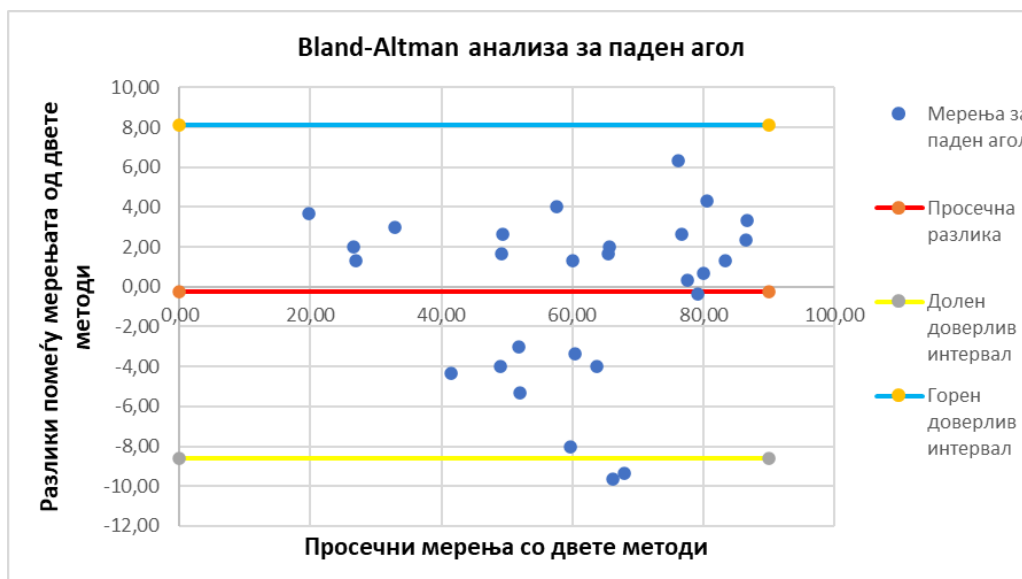
Слика 82 Процентуална застапеност на сетовите на рамнини
Figure 82 Percentage of related discontinuity sets

6.3.3.5. Графикон Bland-Altman

Графиконот Бланд-Алтман во поглед на сличноста на двата пристапа, дава резултати прикажани на сл. 83 и сл. 84:



Слика 83 Графикон Bland-Altman за измерениот азимут на падна насока
Figure 83 Bland-Altman plot for measured dip direction



Слика 84 Графикон Bland-Altman за измерениот паден агол

Figure 84 Bland-Altman plot for the measured dip

За азимутот е добиена просечна разлика од $-1,85^{\circ}$, со долен доверлив интервал од $-7,64^{\circ}$ и горен доверлив интервал од $3,93^{\circ}$ што укажува на мала разлика помеѓу методите. Повеќето од точките се наоѓаат во рамките на овие доверливи интервали, со повеќето точки групирани блиску до нула. Ова укажува на тоа дека постои добра согласност помеѓу методите. Повеќето од точките се наоѓаат во рамките на доверливите интервали, што укажува на тоа дека разликите помеѓу мерењата се мали и случајни. Заклучокот е дека разликите во мерењата на насоката на пад помеѓу геолошкиот и виртуелниот компас се мали и нема значајни систематски отстапувања.

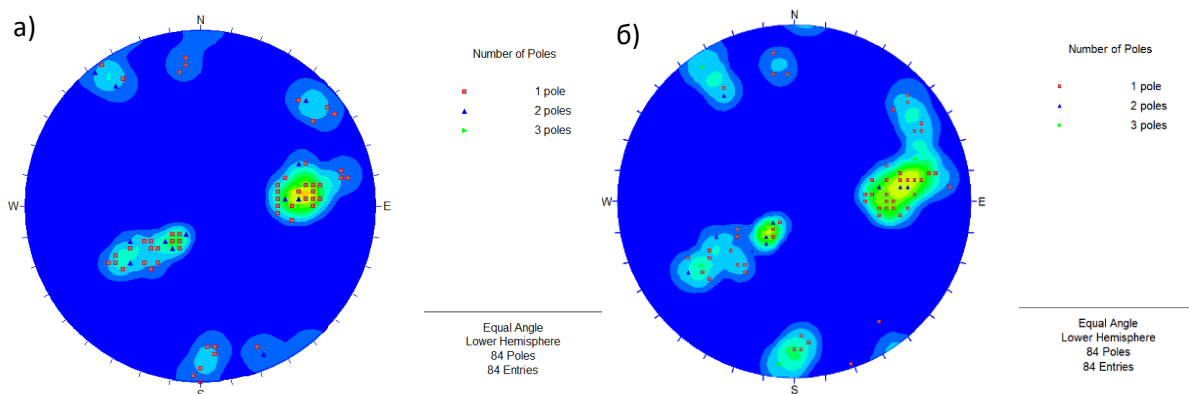
Во делот на измерениот паден агол е добиена просечна разлика од $-0,24^{\circ}$, со долен доверлив интервал од $-8,59^{\circ}$ и горен доверлив интервал од $8,11^{\circ}$ што укажува на многу мала разлика помеѓу мерењата со двете методи. Најголемиот дел од точките се наоѓаат во рамките на доверливите интервали и укажува на мали и случајни разлики помеѓу методите. Заклучокот е дека мерењата со геолошкиот и виртуелниот компас меѓу себе покажуваат многу мала разлика, што укажува на висока согласност и минимална систематска грешка.

За двете вредности, односно за азимутот на падната насока и падниот агол, повеќето од точките на податоците се наоѓаат во рамките на границите на согласност, што укажува на добра согласност помеѓу двете методи за повеќето

мерења. Неколку точки се блиску до границите на согласност, а некои се надвор од нив. Овие отстапки може да се должат на грешки при мерењето, екстремни вредности или други фактори кои влијаат на мерењата. Графиконите сугерираат дека двата метода на мерење генерално се добро усогласени, со повеќето разлики што се движат во очекуваниот опсег. И двата графика на покажуваат дека повеќето точки на податоци се наоѓаат во рамките на границите на согласност, што сугерира добра општа согласност помеѓу двата метода на мерење.

6.3.3.6. Стереограм

И за овој случај се направени стереограми со цел подобра визуелизација на комплетот од азимут на падна насока и паден агол (сл. 85) .



Слика 85 Стереограм за мерења со а) геолошки компас б) виртуелен компас
Figure 85 Stereonogram for measurements a) geological compass b) virtual compass

Од погоре прикажаното, може да се заклучи дека половите добиени со геолошкиот и виртуелниот компас прилично добро се совпаѓаат.

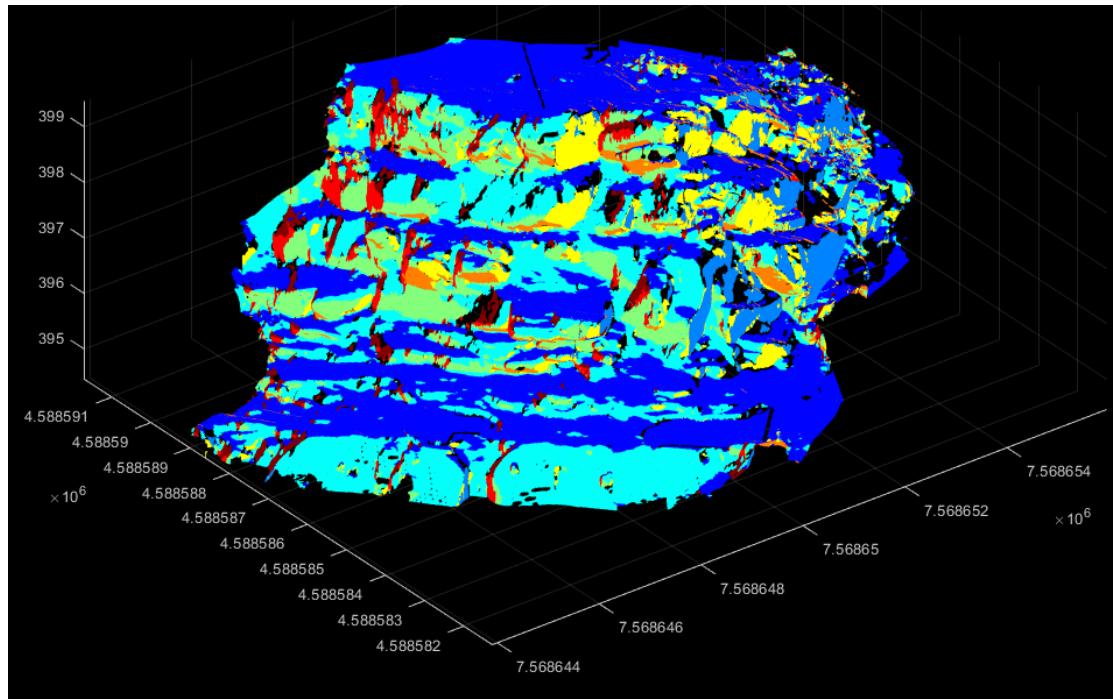
6.3.4. Полуавтоматски методи за анализа на добиените резултати

6.3.4.1. DSE (Discontinuity Set Extractor)

И за овој локалитет, по направената споредба помеѓу мерењето со геолошкиот компас и виртуелниот компас, следен чекор е овие два сета на податоци да се споредат со податоците кои ги исфрла полуавтоматската метода

на DSE. Кај вториот локалитет има само еден 3DOT, така што анализата ќе биде направена на конкретната снимка.

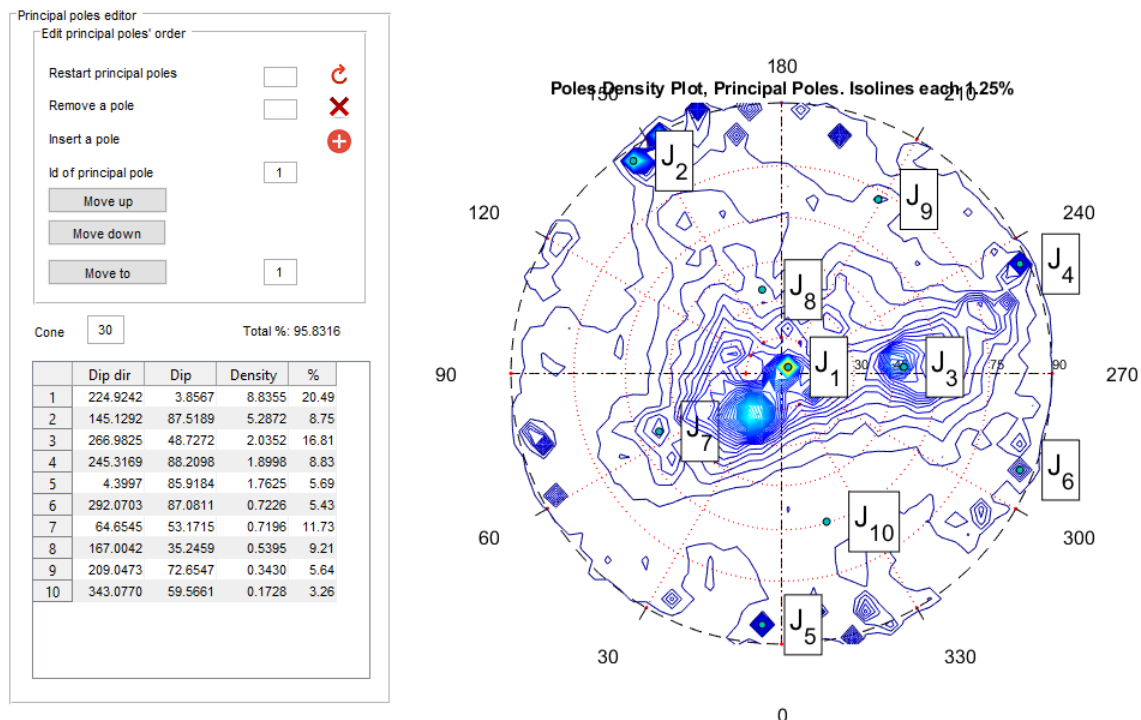
Опцијата за визуелизација која користи различна боја за секој дисконтинуитетен сет (DS) е прикажана на сл. 86.



Слика 86 Приказ на 3DOT со одредена по една боја на секој сет од рамнини
Figure 86 Display of 3DПЦ with a specific color for each set of planes

Оваа метода на бојење кај овој локалитет укажува на поголема сложеност од аспект на позициите на рамнините кои се издвоени со софтверот, кое се поклопува со реалната состојба на терен.

Следува *Principal Pole Extraction* за креирање *Poles Density Plots* прикажан на сл. 87, процес кој подетално е опишан во глава 6.2.4.1.



Слика 87 Стереограм во DSE за 3DOT од локалитетот Фариш

Figure 87 Stereogram in DSE for 3DPC from Farish site

J1: Dip Direction: 224,9242° Dip: 3,8567° Density: 8,8355 Percentage 20,49%:
Оваа ориентација е доминантна со најголема застапеност и укажува на постоење главен сет на рамнини кој го дефинира теренот. Во реалноста, овој сет на рамнини ја отсликува површината која е зарамнета со присуство на хумус и пролувилјален материјал, и не одразува реална рамнина на изданокот.

J2: Dip Direction: 145,1292° Dip: 87,5189° Density: 5,2872 Percentage 8,75%:
Значајна структура, со стрмен агол, што укажува на субвертикална структура.

J3: Dip Direction: 266,9825° Dip: 48,7272° Density: 2,0352 Percentage 16,81%:
Втората по застапеност структура со пад кон запад.

J4: Dip Direction: 245,3169° Dip: 88,2098° Density: 1,8998 Percentage 8,83%:
Оваа група исто така има стрмен паден агол, што укажува на уште една субвертикална структура.

J5: Dip Direction: 4,3997° Dip: 85,9184° Density: 1,7625 Percentage 5,69%:
Овој сет на рамнини има речиси вертикален паден агол.

J6: Dip Direction: 292,0703° Dip: 87,0811° Density: 0,7226 Percentage 5,43%:
Субвертикална структура, со помала застапеност.

J7: Dip Direction: 64,6545° Dip: 53,1715° Density: 0,7196 Percentage 11,73%:
Значително застапена структура со кос до стрмен агол.

J8: Dip Direction: 167,0424° Dip: 35,2459° Density: 0,5395 Percentage 9,21%:
Средно застапен сет на рамнини со кос агол.

J9: Dip Direction: 209,0473° Dip: 72,6547° Density: 0,3430 Percentage 5,64%:
Оваа ориентација е со релативно стрмен наклон, но со помала застапеност.

J10: Dip Direction: 343,0770° Dip: 59,6561° Density: 0,1728 Percentage 3,26%:
Овој сет на рамнини е со најмала застапеност.

Од стереограмот и податоците за дисконтинуитетите можеме да се извлечеме неколку важни заклучоци:

Најзастапениот сет на рамнини (J1) за жал не одразува реална структурна карактеристика на карпата, туку дел од теренот кој природно се формирал на одредени места. Неколку ориентации покажуваат стрмен паден агол (над 85°), што укажува на значајни вертикални или речиси вертикални структури. Различните ориентации и нивната распространетост сугерираат дека теренот е структурно комплексен, со присуство на различни типови на дисконтинуитети, вклучувајќи хоризонтални, коси и вертикални структури. Оваа комплексност е резултат на сложени тектонски процеси кои делувале во минатото. Со вкупна застапеност од 95,8316 %, може да се заклучи дека анализата опфаќа голем дел од присутните ориентации во теренот, што ја прави оваа анализа релевантна и репрезентативна за теренот.

Добиените вредности со полуавтоматската метода споредени со вредностите кои се добиени со мерењата со геолошки и виртуелен компас се прикажани на таб. 11. Од табелата може да се заклучи дека податоците добиени со геолошкиот и виртуелниот компас се совпаѓаат со висока прецизност. Кога овие резултати се споредени со резултатите добиени од полуавтоматската метода, веќе се забележуваат одредени несогласувања имајќи го предвид целиот пакет на сетови на рамнини.

Табела 11 Рамнините кои се идентификувани кај сите применети методи се обележани со зелена боја

Table 11 Planes identified by all applied methods are marked with green color

Геолошки компас										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
263/59	40/33	57/55	358/83	229/82	145/84	173/78	258/79	337/84		вкупно
10	6	3	2	2	2	1	1	1		28
35,71	21,43	10,71	7,14	7,14	7,14	3,57	3,57	3,57	0,00	100,00
Виртуелен компас										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
264/59	42/33	57/63	4/36	234/79	147/79	173/75	261/79	341/83		вкупно
10	6	3	2	2	2	1	1	1		28
35,71	21,43	10,71	7,14	7,14	7,14	3,57	3,57	3,57	0,00	100,00
DSE										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
225/4	145/88	267/49	245/88	4/86	292/87	65/53	167/35	209/73	343/60	вкупно
20,49	8,75	16,81	8,83	5,69	5,43	11,73	9,21	5,64	3,26	95,84

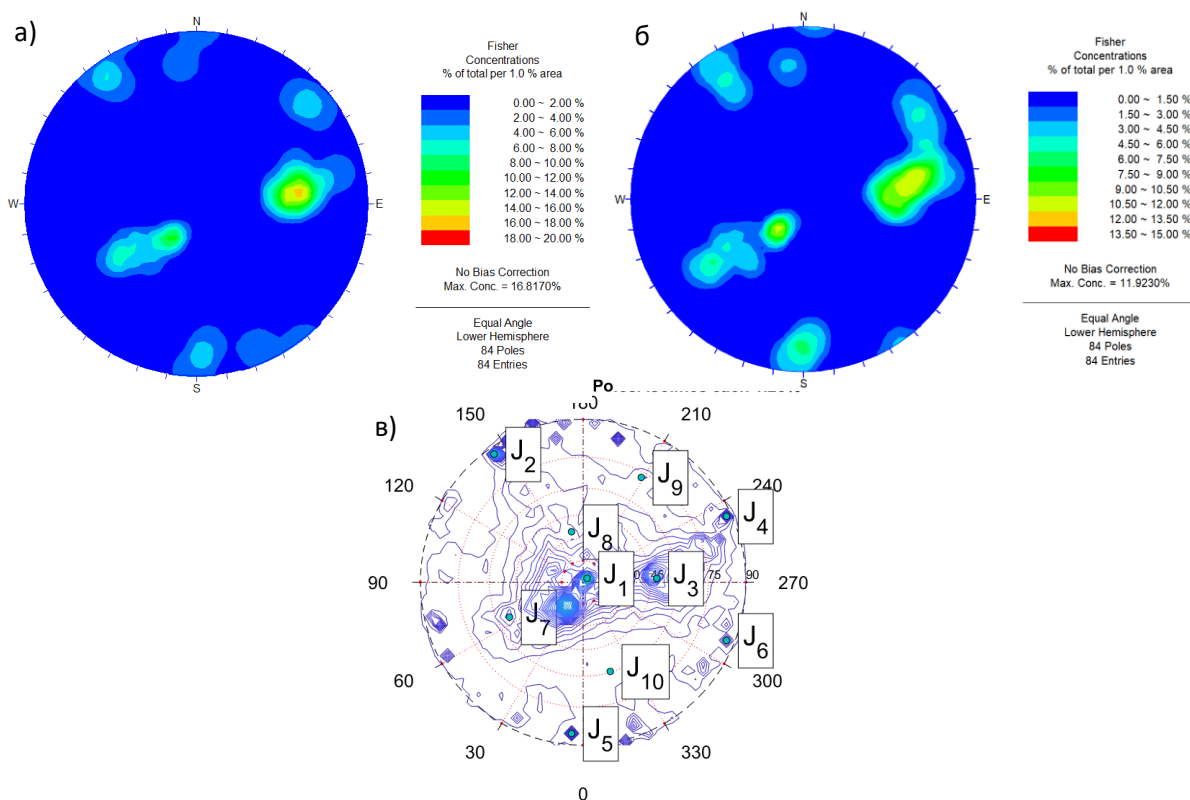
Податоците кои се регистрирани со геолошкиот компас и виртуелниот компас се однесуваат на рамнини кои се избрани да бидат прибележани при нивното мерење, а тоа зависело од теренските услови, изложеноста на рамнината, закривеноста/рамноста на рамнината, како и едноставно одлуката донесена на лице место. Полуавтоматската метода ги регистрира сите можни рамнински системи кои ги добива со употреба на нејзините алгоритми. Во овој случај се добива успешно совпаѓање, доколку се исфрли најприсутната рамнина кај полуавтоматската метода.

Најчесто мерената рамнина со претходните методи, DSE ја регистрира како втора по застапеност. Останатите сетови на рамнини даваат задоволителен број на преклопувања, со што може да се извлече аналогија дека полуавтоматскиот систем успеал да препознае реални системи на дисконтинуитети. Сепак теренот е составен од изданоци на карпа и останати неинтересни делови за структурната геологија кои влегуваат во снимката која е направена, а полуавтоматскиот софтвер нема капацитет да ги издвои како невалидни.

Ова покажува дека полуавтоматскиот систем не е совршен во поглед на тоа дека формира рамнини без оглед на поврзаноста на точките, односно дека тие не припаѓаат на ист сет на рамнини иако се во непосредна близина. Затоа и

работата со овие системи треба да се врши со максимална посветеност и фокусираност. Имајќи предвид дека полуавтоматската метода дава опции за вршење измени во поставките кои ги користи, тоа дава за можност повторно пуштање на 3DOT низ софтверот со промена на одредени карактеристики на формирање рамнини, со што би се очекувале и подобри резултати. Некогаш, самиот терен диктира да мора да се отстапи од основните подесување во софтверот, за што и постојат.

Со споредба на стереограмите од сите методи се добива (сл. 88):

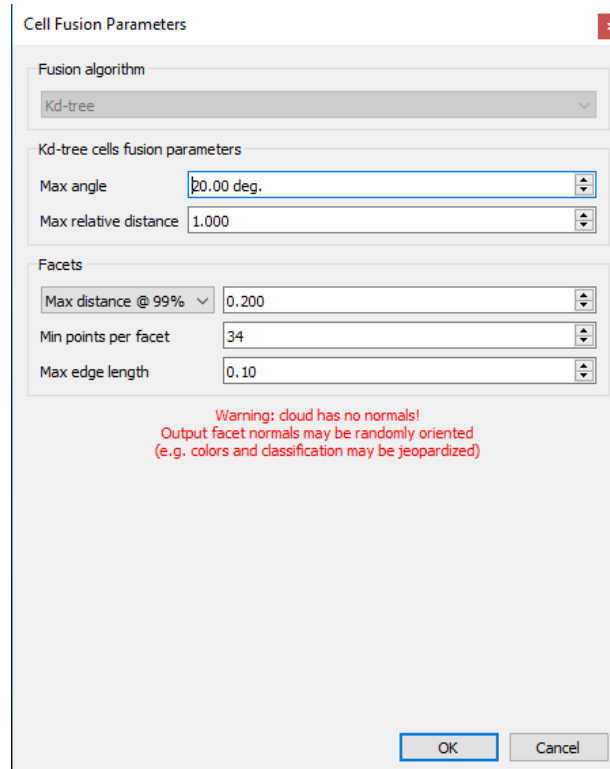


Слика 88 Стереограм за а) геолошки компас б) виртуелен компас в) DSE
 Figure 88 Stereogram for a) geological compass б) virtual compass в) DSE

Од стереограмите може да се извади заклучок дека доколку се исфрли J1 од полуавтоматската метода, тогаш има високо совпаѓање на добиените полови на сите три начини, и може да се извлечат реални заклучоци за структурната состојба на теренот гледајќи во кој било од стереограмите. Се разбира подетална анализа за појава на разлики во мерењата, како и придобивките се веќе елаборирани во поглавје 6.2.4.1.

6.3.4.2. **FACETS**

Истиот ЗДОТ е обработен и во FACETS плагинот со алгоритмите KD-tree и Fast Marching. Прво е работено со KD-tree каде при вклучувањето се појавува автоматски интерфејс кој е различен отколку кај случајот со претходниот локалитет (сл. 89).

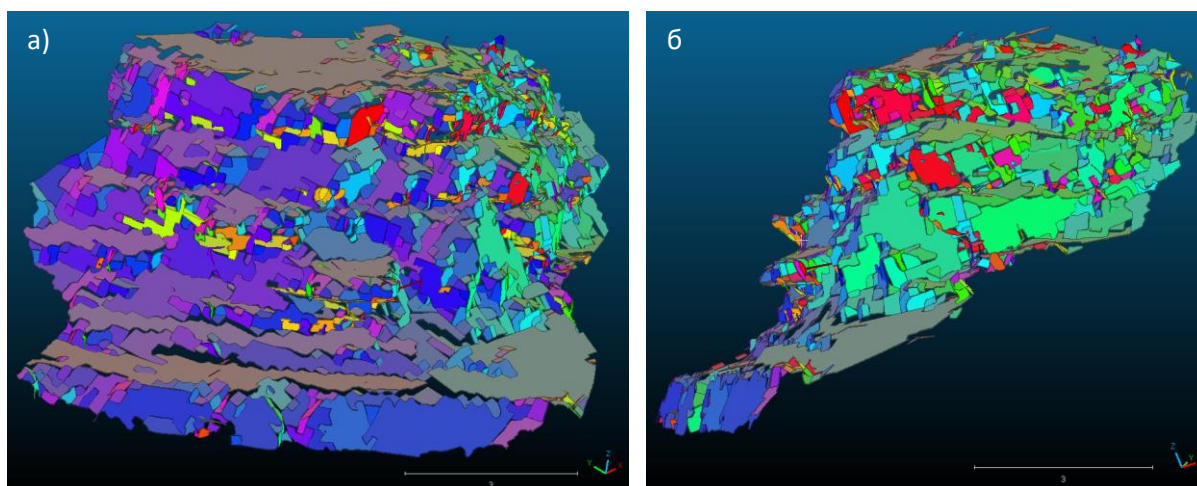


Слика 89 Интерфејс на алгоритмот Kd-tree

Figure 89 Kd-tree algorithm interface

Максималниот агол и тука е поставен на 20°, како и максималната релативна дистанца поставена на 1,000 и максимална дистанца во единици на која 99 % од точките во фасетата се сметаат за дел од таа фасета, која е ставена на 0,200. Разликата е во минималниот број на точки потребни за да се формира фасета која сега е ставена на 34. Вредноста од 34 значи дека секоја фасета мора да содржи најмалку 34 точки за да се смета за валидна. Разлика има и кај максималната должина на рабовите на фасетите. Вредноста од 0,10 укажува на максималната димензија на рабовите во единици.

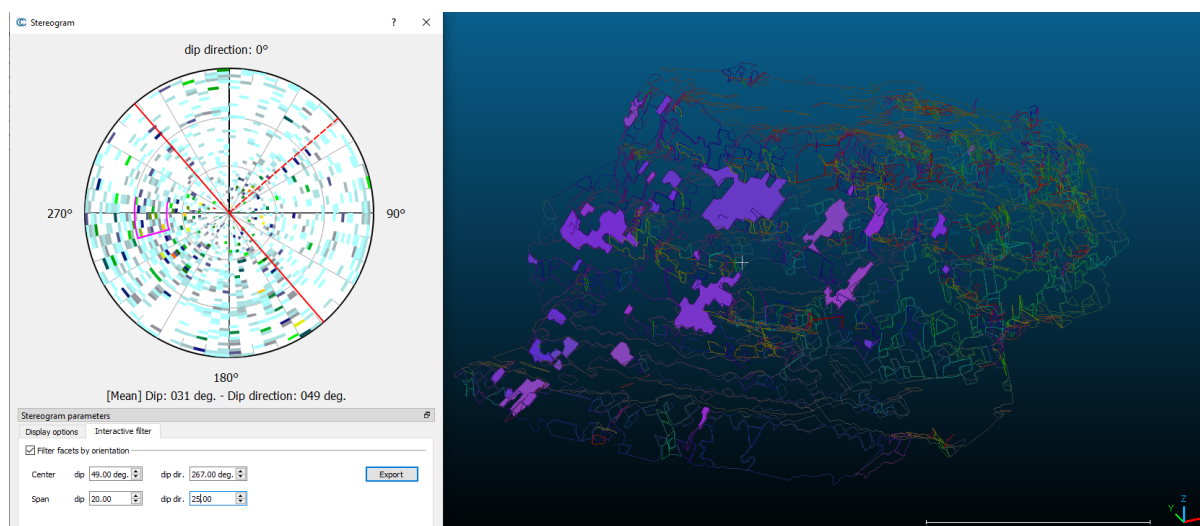
При тоа се добива следниот резултат (сл. 90 а и б):



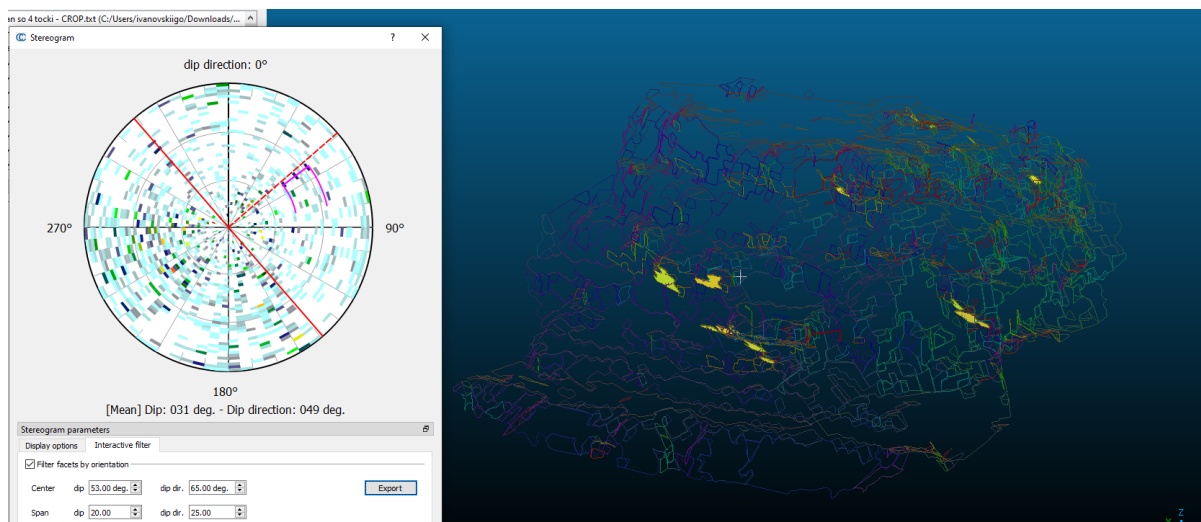
Слика 90 Поглед на добиениот резултат од Kd-tree од а) запад б) југ
Figure 90 View of the result from Kd-tree from a) West b) South

Реалната состојба на теренот е доловена и со помош на оваа визуелизација. 1284-те издвоени фасети се многу разновидни по големина и форма, што укажува на сложената природа на карпестите формации во облакот од точки. Може да се каже и дека закривувањата и наборите присутни кај овој изданок, придонесуваат на формирање повеќе фасети. Овој изданок е помал од оној кај локалитетот Милутинци, а има формирано повеќе фасети.

И во овој случај е направено издвојување на најприсутните рамнини и тоа: (267/49) и (65/53) (сл. 91 и 92).



Слика 91 Издвоен сет на рамнини 267/49 во Kd-tree
Figure 91 Isolated set of planes 267/49 in Kd-tree

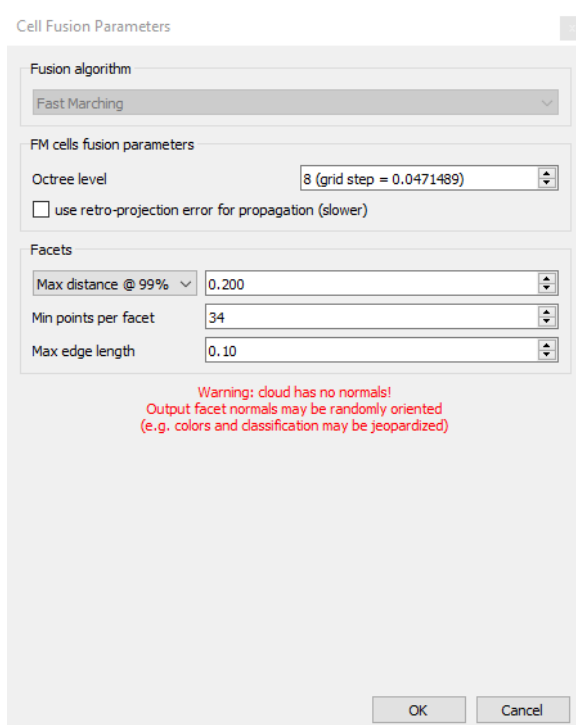


Слика 92 Издвоен сет на рамнини 65/53 во Kd-tree

Figure 92 Isolated set of planes 65/53 in Kd-tree

Заклучоците ги отсликуваат истите од глава 6.2.4.2

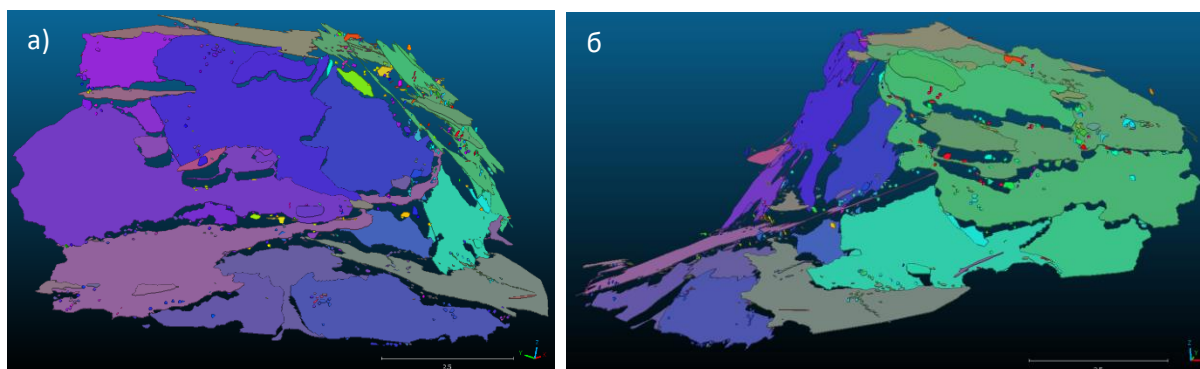
Следен е изработен алгоритмот Fast Marching каде времетраењето на обработка е многу подолг. При вклучувањето се појавува интерфејс на сл. 93:



Слика 93 Интерфејс на Fast Marching

Figure 93 Interface of Fast Marching

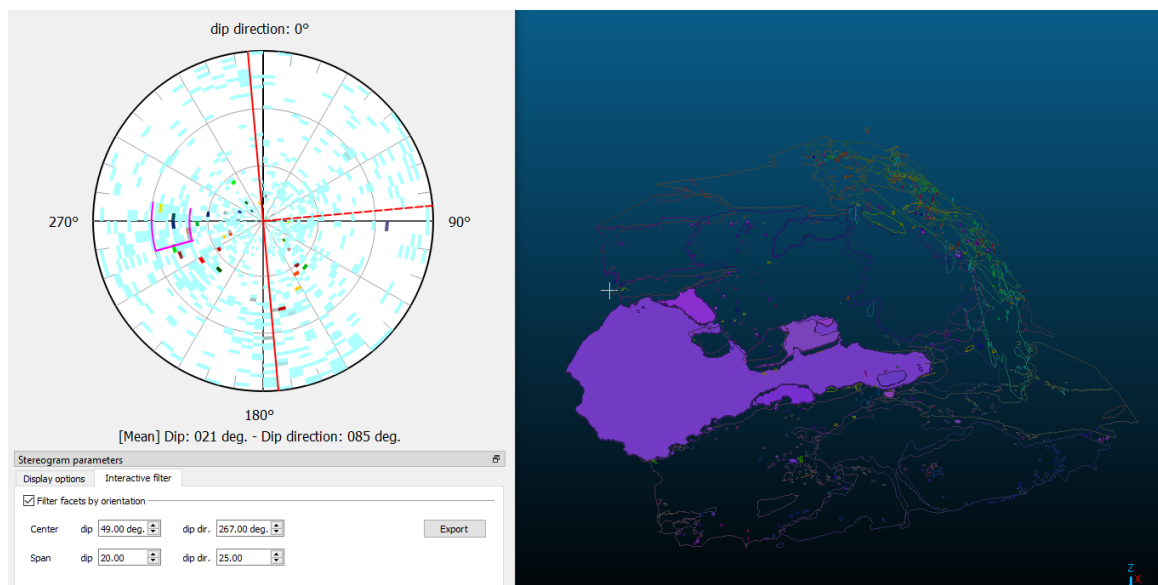
Поставките кај интерфејсот се разликуваат од оние кај локалитетот Милутинци. Октаре (структура за поделба на простор на осум дела) ниво е со помал мрежен чекор од 0.0471489, односно просторот ќе биде поделен во помал број на воксели (волуменски пиксели). Разлика има и во минималниот број на точки по фасета кој е поставен на 15 и максималната должина на раб каде тука е помал на 0.08. При тоа се добива следниот резултат (сл. 94 а и б):



Слика 94 Резултат од Fast Marching, поглед од: а) запад б) југ

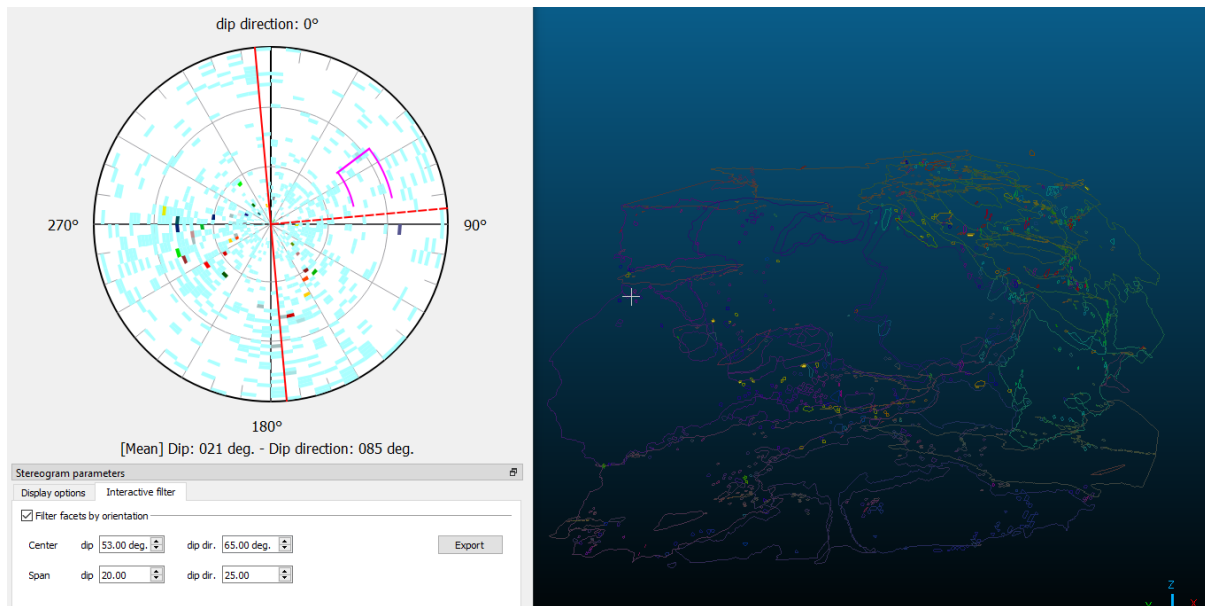
Figure 94 Results from the Fast Marching, view from: a) West b) South

Со овој алгоритам се добија 1116 фасети, што не е многу помалку од претходниот. Сепак тука се гледа една сосема друга тенденција на формирање рамнини каде има издвојување на многу поголеми и многу помали рамнини споредбено со претходниот алгоритам. И во овој случај е направено издвојување на најприсутните рамнини и тоа: (267/49) и (65/53) (сл. 95 и 96).



Слика 95 Издвоен сет на рамнини 267/49 во Fast Marching

Figure 95 Isolated set of planes 267/49 in Fast Marching



Слика 96 Издвоен сет на рамнини 65/53 во Fast Marching

Figure 96 Isolated set of planes 65/53 in Fast Marching

6.3.5. Изведени заклучоци за локалитетот Фариш

Вториот локалитет со себе носи свои особености. Изданокот е различен во споредба со оној од претходниот локалитет и по геолошки состав, и по структурни особености и по присуството на посилна вегетација, која беше потешко да се елиминира при обработката на облакот од точки.

Секој геолог треба да го има на ум структурниот и геолошкиот контекст на картираното подрачје. Во овој случај, теренот е изграден од банковити и плочести варовници, кои на одредени места беа набрани, при што мерењата со геолошкиот компас дадоа различни резултати на блиски позиции. При рачното собирање на податоците со геолошки компас, намерно се избегнати одредени места на изданокот каде набирањата беа поголеми, а со тоа и геолошкиот компас на мали растојанија даваше различни резултати. Ова би се одразило и на работата со виртуелниот компас, со што би се усложнила интерпретацијата на резултатите, како и самата верификација на оваа метода. На овој начин се создаде стабилен сет на мерења кои при понатамошната анализа покажаа стабилни и компатибилни резултати. Главниот заклучок е дека добиените податоци со новите методи се конзистентни во поглед на податоците добиени со

геолошкиот компас. Способноста на извлекување на податоците со виртуелниот компас е на ниво на оние кои се добиваат со геолошкиот компас.

Полуавтоматските методи во овој случај даваат послаби резултати. И повторно, FACETS дава понереални резултати отколку DSE. Генералниот впечаток е дека DSE е многу постабилен отколку FACETS во генерирањето на сетови на диксонтинуитети. Кога би ги споредиле методите Kd-tree и Fast Marching, може да се заклучи дека иако доаѓаат од ист софтвер, тие даваат различни податоци. Fast Marching дава понереални сетови на рамнини споредено со алгоритмот Kd-tree, каде издвоените рамнини се многу поблиску до оние кои се издвоени со DSE.

6.4. Применета методологија за собирање структурни податоци за локалитетот Серта – изданок во песочници

Како трет и последен чекор од верификација на методологијата за собирање структурни податоци е обработка на добиените резултати од локалитетот Серта. Локацијата се наоѓа во изданоци од песочници, кои се најчести членови на секвенцата во еоценот, и се јавуваат во слоеви и банкови со дебелина 20 - 200 cm. Анализираниот изданок е со димензии 8 x 3 метри (најмал од сите локалитети) и се наоѓа на регионалниот пат од Штип за Неготино, поточно на југозападните падини на планината Серта, 3,5 km југозападно од селото Лесковица. Локацијата според достапноста и димензиите одговараше за потребите за снимање со геолошки компас и паметен телефон, а и беше најподобна од аспект на отсуство на вегетација (сл. 97).



Слика 97 Изданоци од песочници на локалитетот Серта
Figure 97 Sandstone outcrop at Serta site

Оваа локација претставува една стрмна косина која е свртена накај регионалниот пат (сл. 97). Застапеноста на рамнините може да се каже дека е релативно избалансирана кога би се споредиле со претходните два локалитета, додека рамнината која ја дефинира слоевитоста на карпата беше најтешка за мерење со геолошкиот компас. Пукнатинските рамнини го прават најголемиот дел од површините кои беа одредени со сите методи. Главна цел кај овој локалитет беше рачното геореференцирање на добиениот 3DOT, без употреба на GPS-уред. И овој пат класичниот начин на собирање структурни податоци беше со употреба на Кларовиот геолошки компас (сл. 1а и сл. 98).



Слика 98 Мерење со геолошки компас на локалитетот Серта
Figure 98 Measurement using geological compass at Serta site

На оваа локација мерењата со телефонот се направени со помош на паметен телефон iPhone 15 Pro. (сл. 96 и сл. 99). При снимање телефонот е држан на растојание од површината од 0,3 до 3 метри. Во овој случај не е користен GPS-уред за геореференцирање на добиениот облак. Идејата е да се измерат одредени рамнини со геолошкиот компас кои би се користеле како референтни. Подоцна со внесување на добиениот 3DOT во Cloudcompare, со употреба на достапните алатки да се изротира облакот и на тој начин да се доведе во положба која одговара на реалната поставеност во просторот.



Слика 99 LiDAR снимање со паметен телефон на локалитетот Серта

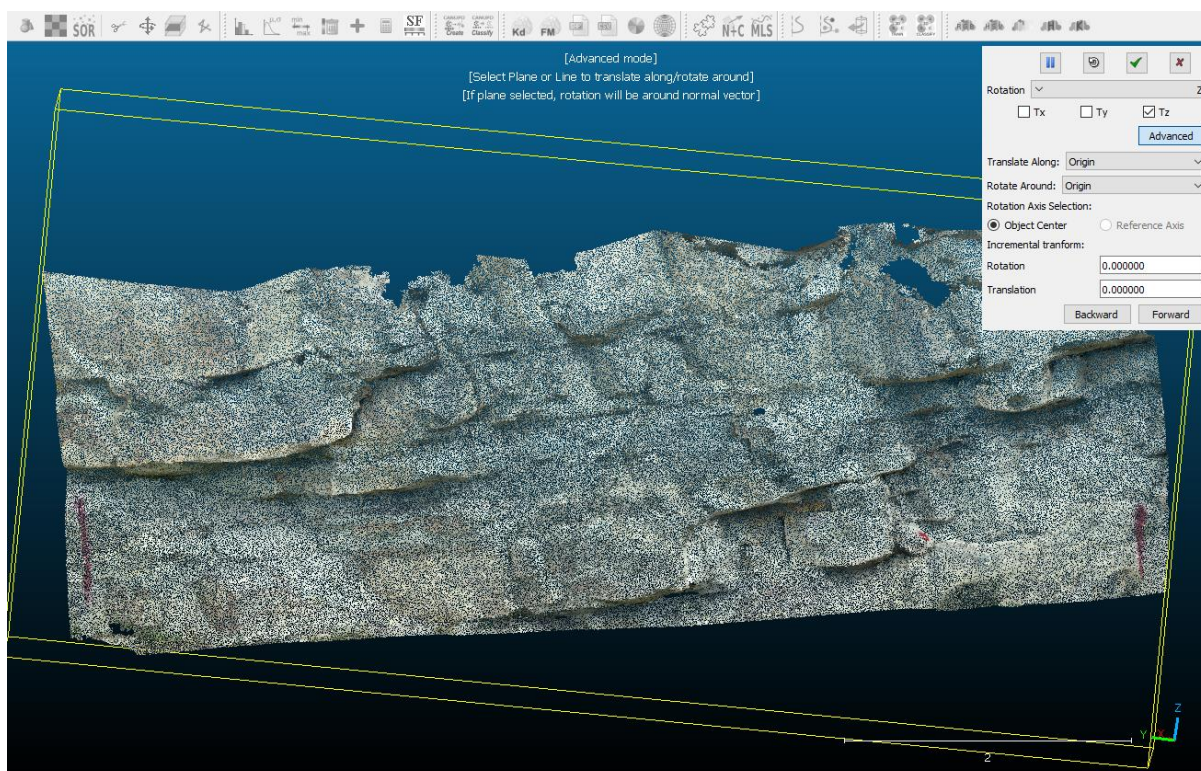
Figure 99 LiDAR recording using smartphone at site Serta

6.4.1. Локалитет Серта - добиени резултати

6.4.1.1. Обработка на податоците добиени од снимање со телефон

За снимање е користена опцијата Lidar кај паметниот телефон. Снимањето траеше околу 3 минути со оглед на малата површина за снимање и лесниот пристап. Беа направени неколку снимки, кои не се разликуваа особено во нивниот квалитет. Сниманиот фајл е со 685 690 точки со големина 23 668 MB, додека обработениот финален фајл е со 509 444 точки и големина од 20 454 MB.

Бидејќи не беа користени референтни точки и GPS-уред, референцирањето се изврши рачно во софтверот Cloudcompare со алатката *Translate/Rotate* (сл. 100). Како и во претходните случаи, препознатлива беше тенденцијата 3DOT кој се добива од iPhone, да го има задржано генералниот правец на Z-оската. Со употреба на мерења со геолошкиот компас на рамнини кои се релативно рамни, истите тие рамнини беа пронајдени во Cloudcompare, и со ротирање доведени на бараниот наклон. При тоа речиси минимално се изврши ротација по Z-оската, додека главните ротации беа по X и Y-оската. Тоа резултираше со добивање на референтен 3DOT со голема точност. 3DOT не се наоѓа во реални координати, туку само неговата поставеност, односно падот на рамнините соодветствуваат на реалните падови во просторот.



Слика 100 Рачно позиционирање на 3DOT

Figure 100 Manual positioning of 3DPC

6.4.2. Приказ на мерењата направени со геолошки компас и виртуелен компас

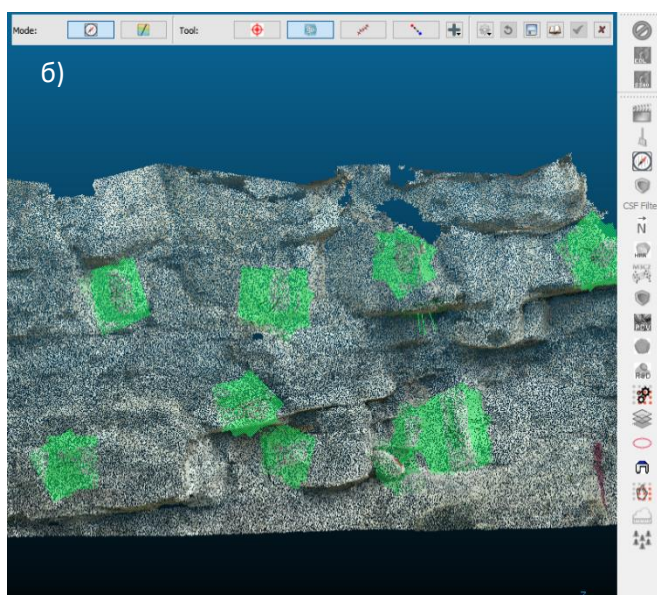
Мерењата со геолошки компас се направени на рамнините кои беа релативно прикладни за овој тип на анализа. Станува збор дека оваа локација носи свои карактеристики, а тие се следните: Најприсутен е сетот на рамнини на пукнатини, кој зафаќа најголем процент од извршените мерења. Овие рамнини даваат една стабилна ситуација каде може да се извршат структурни мерења. Одредени рамнини, кои беа пукнатински, како и рамнините на слоевитост на карпата, иако беа помалку на број, имаа закривувања на кратки интервали, па затоа и при мерењето со геолошки компас, особено на едно мерно место, се добиваа релативно различни резултати. Мал предизвик беше мерењето на слоевитоста на карпата, поради нејзината специфична поставеност во просторот. Со цел добивање поголема контрола врз процесот, фокусот беше ставен на мерење на рамнини кои генерално се стабилни во делот на „извлекување“ податоци за азимутот и падниот агол. Во овој случај беа

обработени 18 мерни места и беа направени 54 мерења (таб. 12). Секое мерно место беше измерено по три пати со геолошки компас, во радиус 10 - 15 cm на мереното место. Истите тие локации беа соодветно обележани на претходно направена фотографија, со цел полесно нивно наоѓање при работа со виртуелниот компас во 3DOT (сл. 101 а и б).

Табела 12 Мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (зелено)

Table 12 Measurement with geological compass (blue) and virtual compass (green)

Бр.	Мерења со геолошки компас			Бр.	Мерења со виртуелен компас		
	1	2	3		1	2	3
1	240/48	244/50	245/45	1	239/51	246/50	242/48
2	102/80	100/84	101/82	2	92/79	85/82	88/81
3	30/89	32/88	25/89	3	45/83	39/83	36/78
4	225/87	228/88	210/88	4	232/88	230/88	230/85
5	115/73	116/73	118/76	5	115/65	113/72	112/62
6	113/79	117/82	119/81	6	115/88	113/86	111/82
7	115/89	116/81	118/85	7	122/85	113/89	108/83
8	113/79	115/82	110/81	8	109/82	109/81	107/75
9	119/80	123/79	127/78	9	130/74	128/74	129/71
10	112/80	115/78	115/75	10	118/75	110/76	108/73
11	112/84	107/80	109/81	11	105/80	103/82	102/79
12	120/82	116/80	121/81	12	117/81	124/84	124/76
13	122/79	123/83	118/80	13	122/77	123/80	123/78
14	118/76	117/76	116/74	14	119/69	116/70	114/72
15	71/87	65/88	67/89	15	82/81	77/84	81/76
16	249/70	253/72	252/70	16	261/77	258/72	263/71
17	30/12	35/13	33/15	17	34/18	41/19	36/14
18	25/20	35/18	31/22	18	37/20	32/18	36/32



Слика 101 Некои од мерењата обележани на а) слика б) со виртуелен компас

Figure 101 Some of the measurements marked on a) image b) with virtual compass

6.4.3. Анализа на добиените резултати

И за третиот локалитет се направија неколку различни анализи, кои независно даваат различни аспекти на истата проблематика.

6.4.3.1. Анализа на добиените отстапувања

При мерење со геолошкиот компас, максималната разлика во азимут на падната насока за три мерења на едно мерно место изнесува 18° , додека за падниот агол таа максимална разлика е 8° . За мерењата добиени со виртуелниот компас, разликите се 14° и 14° соодветно (таб. 13). И овде може да се констатира дека трендовите на отстапувања се слични кај двата пристапа.

Табела 13 Обработка на добиените вредности за азимут и паден агол

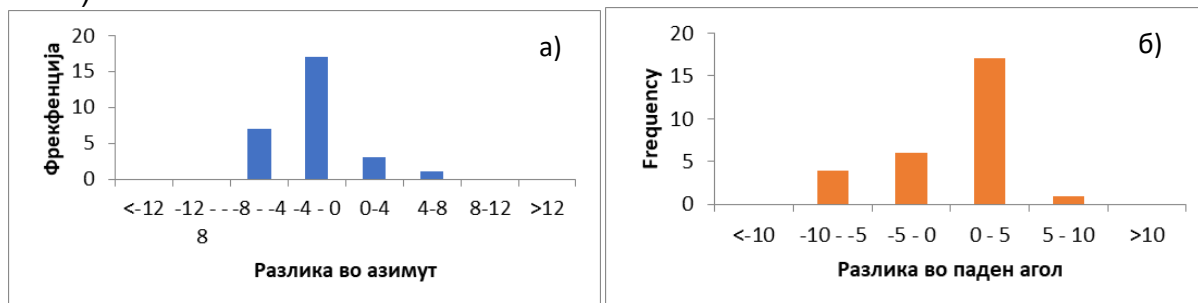
Table 13 Processing the obtained values for dip and dip direction

	Азимут 1	Паден агол 1	Азимут 2	Паден агол 2	Азимут 3	Паден агол 3	Просеч на вредно ст на азимут	Просеч на вредно ст на паден агол	Азимут 4	Паден агол 4	Азимут 5	Паден агол 5	Азимут 6	Паден агол 6	Просеч на вредно ст на азимут	Просе чна вредно ст на паден агол	Разлика помеѓу два просека за азимут	Разлика помеѓу два просека за паден агол
1	240	48	244	50	245	45	243,00	47,67	239	51	246	50	242	48	242,33	49,67	0,67	-2,00
2	102	80	100	84	101	82	101,00	82,00	92	79	85	82	88	81	88,33	80,67	12,67	1,33
3	30	89	32	88	25	89	29,00	88,67	45	83	39	83	36	78	40,00	81,33	-11,00	7,33
4	225	87	228	88	210	88	221,00	87,67	232	88	230	88	230	85	230,67	87,00	-9,67	0,67
5	115	73	116	73	118	76	116,33	74,00	115	65	113	72	112	62	113,33	66,33	3,00	7,67
6	113	79	117	82	119	81	116,33	80,67	115	88	113	86	111	82	113,00	85,33	3,33	-4,67
7	115	89	116	81	118	85	116,33	85,00	122	85	113	89	108	83	114,33	85,67	2,00	-0,67
8	113	79	115	82	110	81	112,67	80,67	109	82	109	81	107	75	108,33	79,33	4,33	1,33
9	119	80	123	79	127	78	123,00	79,00	130	74	128	74	129	71	129,00	73,00	-6,00	6,00
10	112	80	115	78	115	75	114,00	77,67	118	75	110	76	108	73	112,00	74,67	2,00	3,00
11	112	84	107	80	109	81	109,33	81,67	105	80	103	82	102	79	103,33	80,33	6,00	1,33
12	120	82	116	80	121	81	119,00	81,00	117	81	124	84	124	76	121,67	80,33	-2,67	0,67
13	122	79	123	83	118	80	121,00	80,67	122	77	123	80	123	78	122,67	78,33	-1,67	2,33
14	118	76	117	76	116	74	117,00	75,33	119	69	116	70	114	72	116,33	70,33	0,67	5,00
15	71	87	65	88	67	89	67,67	88,00	82	81	77	84	81	76	80,00	80,33	-12,33	7,67
16	249	70	253	72	252	70	251,33	70,67	261	77	258	72	263	71	260,67	73,33	-9,33	-2,67
17	30	12	35	13	33	15	32,67	13,33	34	18	41	19	36	14	37,00	17,00	-4,33	-3,67
18	25	20	35	18	31	22	30,33	20,00	37	20	32	18	36	32	35,00	23,33	-4,67	-3,33

Со анализа на просечните разлики во сет од три мерења за едно мерно место, се добиваат дополнителни податоци за компатибилноста помеѓу овие два пристапа.

И овде е изработена анализа на фреквенцијата на разликите во вредностите добиени со геолошки компас, односно со виртуелен компас, со цел да се добие увид во дистрибуцијата на отстапувањата. Разликата е изразена како отстапување на мерењето со виртуелниот компас во однос на мерењето со

геолошкиот компас. Просечните вредности на разликите за една мерна точка добиени со виртуелниот компас се одземаат од просечните вредности на разликите за една мерна точка добиени со мерење со геолошки компас (сл. 102 а и б).



Слика 102 Приказ на распределбата на разликите за азимут на падната насока
 б) Приказ на распределбата на разликите за падниот агол

Figure 102 Display of distribution of deviations in dip direction measurements. б)
 Display of distribution of deviations in dip measurements

Од добиените резултати за мерењата на азимут на падната насока, може да се заклучи дека сите мерења (100,00 %), се во ранг $\pm 8^\circ$. Изразено во процент имајќи предвид дека можните достапни вредности за азимут се од 0° до 360° , се добива дека 100.00 % од мерењата имаат разлика од 2.22 %.

Од добиените резултати за мерењата на падниот агол, може да се заклучи дека најголемиот број од отстапувањата кај мерењата се во ранг $\pm 5^\circ$. Изразено во процент имајќи предвид дека можните достапни вредности за азимут се од 0° до 90° , може да заклучиме дека 82,14 % од мерењата имаат разлика од 5,55 %, а останатите 17,86 % од мерењата имаат максимална разлика од 10,37 %.

Со ова може да се каже дека добиените статистички резултати се во рангот на нормалните отстапувања. Мерењата на падниот агол покажуваат незначително поголем процент на максимална грешка, и овде една од причините би била и ситната скала на поделци за вредностите на паден агол на геолошкиот компас.

6.4.3.2. Статистичка анализа

За секоја мерна точка и кај овој локалитет беа извршени по три мерења со геолошкиот компас и со виртуелниот компас. За секоја мерна точка може да

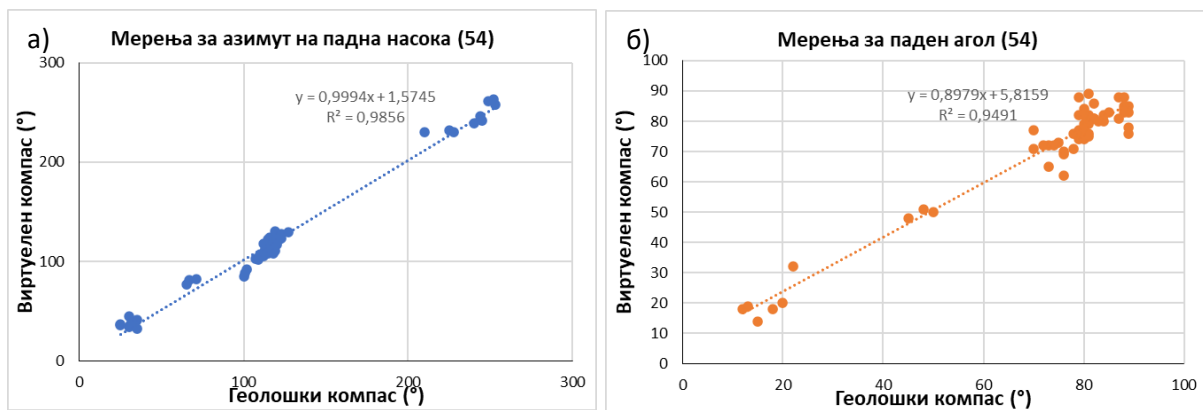
се пресмета средната добиена вредност за азимутот и падниот агол. Со меѓусебно одземање на вредностите за секое мерно место добиени од геолошкиот и виртуелниот компас, се добива средна вредност, како и максимално и минимално отстапување за секое мерење посебно (таб. 12).

Отстапувањето на средните вредности за азимутот е максимални $12,67^\circ$. За падниот агол, максималното отстапување од средните вредности е $7,67^\circ$. Така се добива просечно отстапување за азимут од $5,35^\circ$, и во паден агол од $3,41^\circ$.

За азимутот, стандардната девијација изнесува 3,98, а за падниот агол, стандардната девијација изнесува 2,45. Овие вредности укажуваат на многу мала и дозволлива статистичка грешка.

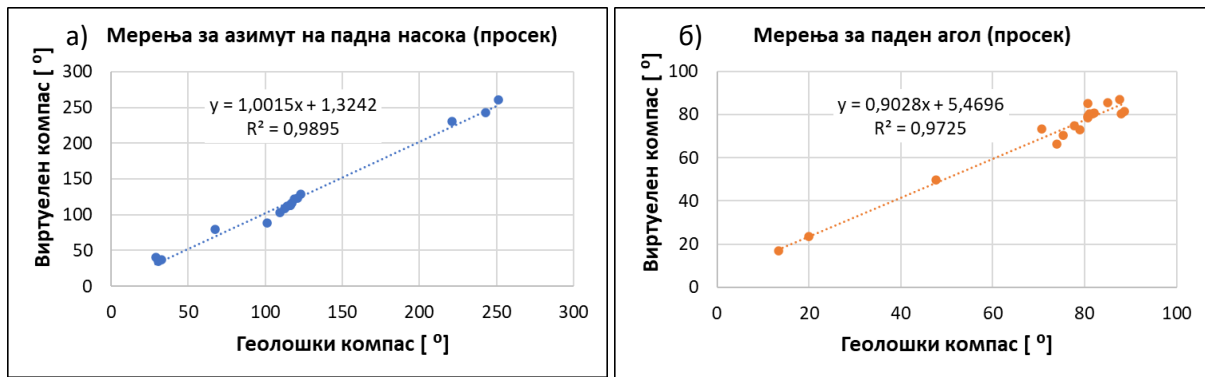
6.4.3.3. Регресиона анализа

И за овој локалитет беше изработена регресиона зависност каде повисока вредност на R^2 укажува на силна врска помеѓу двете променливи. На сл. 103 и 104 се прикажани регресионите анализи за извршени за мерења.



Слика 103 Регресиона анализа за сите мерења на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите мерења на паден агол

Figure 103 Regression analysis from all measurements for dip direction. б) Regression analysis from all measurements for dip



Слика 104 Регресиона анализа за сите просечни вредности на азимут на падната насока. б) Регресиона анализа за сите просечни вредности на паден агол

Figure 104 Regression analysis from average measurements for dip direction. б) Regression analysis from average measurements for dip

Според ова, може да се заклучи дека постои силна зависност помеѓу добиените вредности за измерениот пад и насоката на пад, според двата метода на мерење. Имено, коефициентот на корелација е:

За сите мерења (54), $R^2 = 0,9856$ за азимутот и $R^2 = 0,9491$ за падниот агол.

За просечните вредности (18), $R^2 = 0,9895$ за азимут и $R^2 = 0,9725$ за паден агол.

6.4.3.4. *Анализа на групи на мерења*

Ако резултатите од сите 28 мерни точки се групираат според сродни резултати, се добиваат следниве групи:

- 11 мерни точки припаѓаат на група 1 со општа насока кон исток-југоисток,
- 2 мерни точки припаѓаат на група 2 со општа насока југозапад и субвертикален паден агол,
- 1 мерна точка припаѓа кон група 3 со општа насока југозапад и паден агол од околу 45° ,
- 1 мерна точка припаѓа кон група 4 со општа насока кон североисток и субвертикален паден агол,
- 1 мерна точка припаѓа на група 5 со општа насока кон исток-североисток,
- 1 мерна точка припаѓа кон група 6 со општа насока кон североисток.

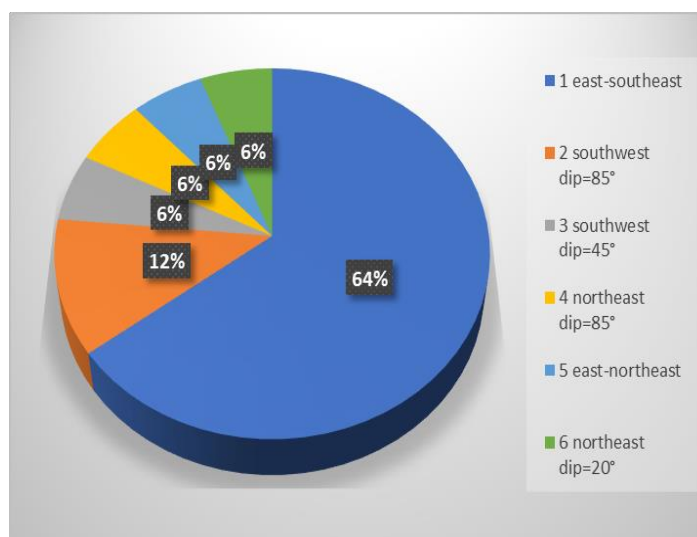
Приказ на сите извршени мерења со геолошки, односно виртуелен компас е претставен во дијаграмот на сл. 105.



Слика 105 Приказ на групи на мерења со геолошки компас (сино) и виртуелен компас (портокалово)

Figure 105 Display of groups of measurements with geological compass (blue) and virtual compass (orange)

Процентуалниот удел од овие групи во вкупниот број на сродни рамнини е прикажан на сл. 106.

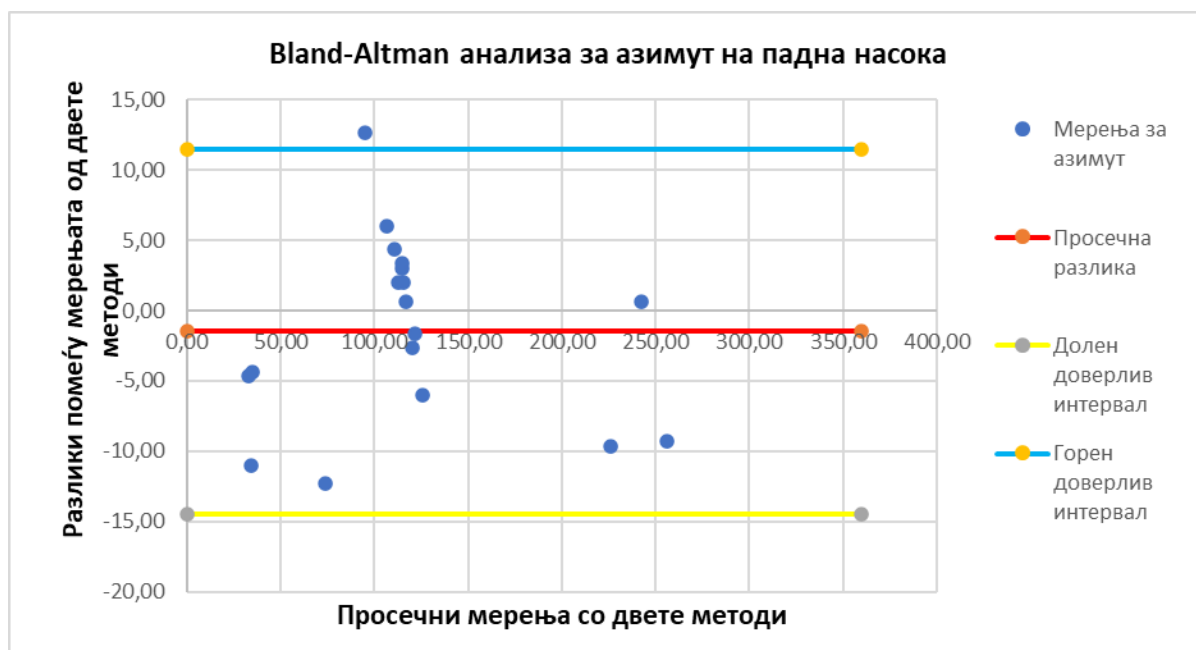


Слика 106 Процентуална застапеност на мерените сетовите на рамнини
Figure 106 Percentage of measured discontinuity sets

Најизложената пукнатинска рамнина е најприсутна во мерењата. Рамнината на фолијацијата е многу помалку застапена во мерењата поради нејзината потешка достапност на терен.

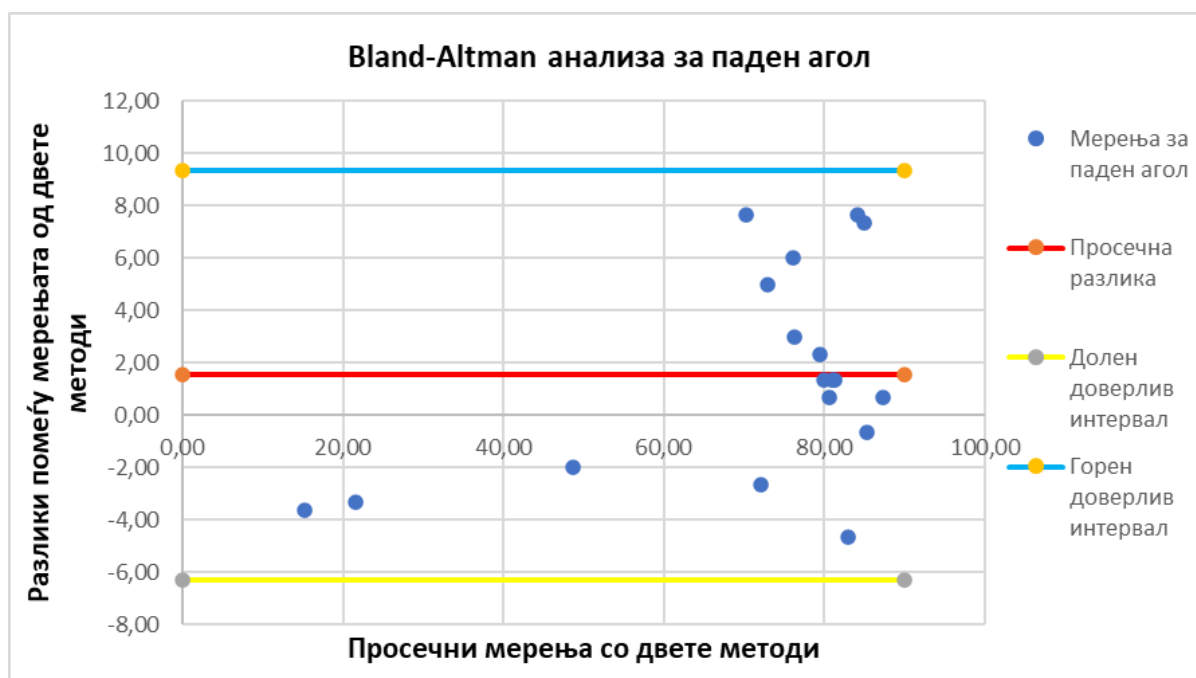
6.4.3.5. Графикон Bland-Altman

Графиконот Бланд-Алтман во поглед на сличноста на двата пристапа, ги дава следниве резултати (сл. 107 и 108).



Слика 107 Графикон Bland-Altman за измерениот азимут на падна насока

Figure 107 Bland-Altman plot for measured dip direction



Слика 108 Графикон Bland-Altman за мерениот паден агол

Figure 108 Bland-Altman plot for measured dip

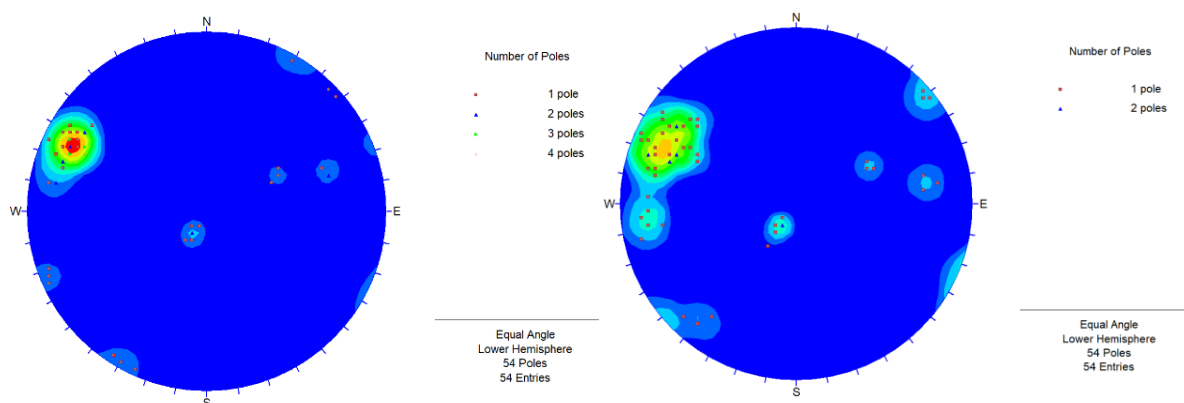
За азимутот е добиена просечна разлика од $-1,50^\circ$, со долен доверлив интервал од $-14,46^\circ$ и горен доверлив интервал од $11,46^\circ$ што укажува на мала разлика помеѓу методите. Повеќето од точките се наоѓаат во рамките на овие доверливи интервали, што значи дека постои добра согласност помеѓу двата метода на мерење. Постојат неколку точки кои отстапуваат од оваа линија, што укажува на ретки случаи каде двата пристапа се разликуваат. Генерално, графиконот покажува дека разликите се мали и дека методите имаат добра согласност.

Во делот на измерениот паден агол е добиена просечна разлика од $1,52^\circ$, со долен доверлив интервал од $-6,28^\circ$ и горен доверлив интервал од $9,32^\circ$ што укажува на многу мала разлика помеѓу мерењата со двете методи. Најголемиот дел од точките се наоѓаат во рамките на доверливите интервали, односно се движат околу средната разлика која е близу $0,00^\circ$. Ова укажува на добра согласност меѓу двата пристапа за мерење на наклонот. Постојат неколку точки кои покажуваат поголеми разлики, но тие се внатре во границите на доверба, што значи дека методите генерално се согласуваат со незначителни варијации.

И двата графикона покажуваат дека двете методи за мерење се компатибилни и имаат добра согласност. Просечните разлики помеѓу методите се многу мали и не покажуваат значителна систематска пристрасност. Постојат некои варијации, но тие се внатре во нормалните граници на доверба, што укажува дека методите се соодветни за користење во практична примена. Ова значи дека 3DOT може да се користи за мерење на структурни елементи со висока доверба во точноста на добиените резултати.

6.4.3.6. Стереограм

И за овој локалитет се изработени два стереограма со цел подобро да се визуелизира сетот на азимут и паден агол во еден графички приказ (сл. 109). Од прикажаното, може да се заклучи дека половите на мерењата добиени со геолошкиот и виртуелниот компас прилично добро се совпаѓаат.



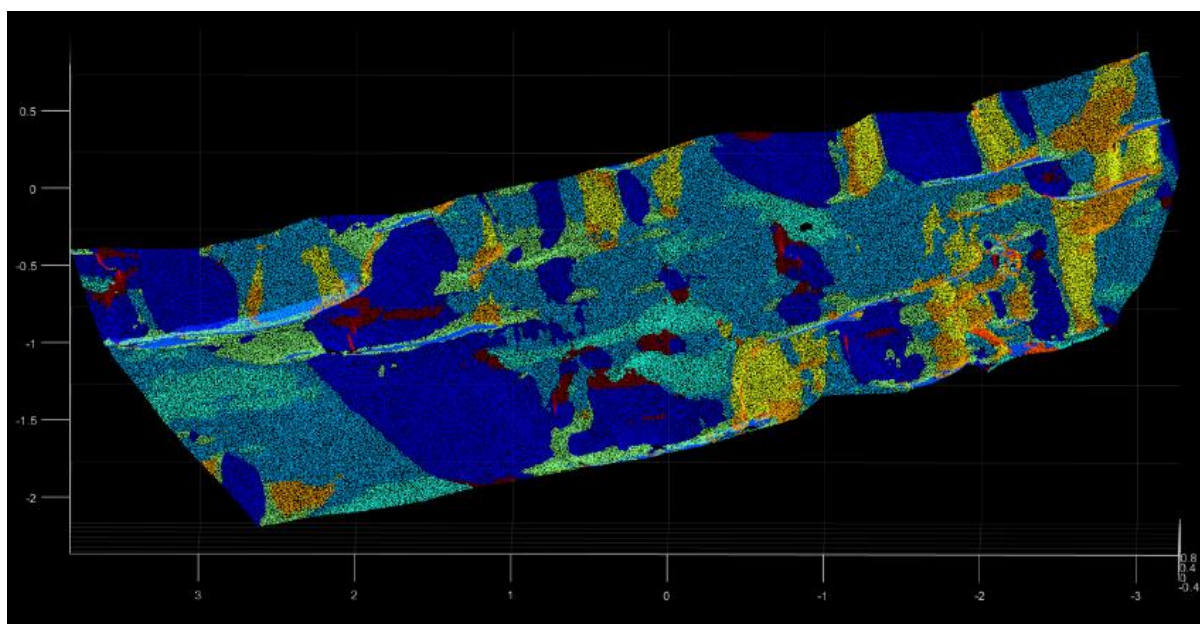
Слика 109 Стереограм за мерења: а) геолошки компас б) виртуелен компас

Figure 109 Stereogram for measurements a) geological compass. b) virtual compass

6.4.4. Полуавтоматски методи за анализа на добиените резултати

6.4.4.1. DSE

И за третиот локалитет, добиениот 3DOT е обработен со DSE. Предизвикот во овој случај е тоа дека овој 3DOT е геореференциран без употреба на GPS-уред, односно мануелно. Опцијата за визуелизација која користи различна боја за секој сет на рамнини е прикажана на сл. 110 а и б.

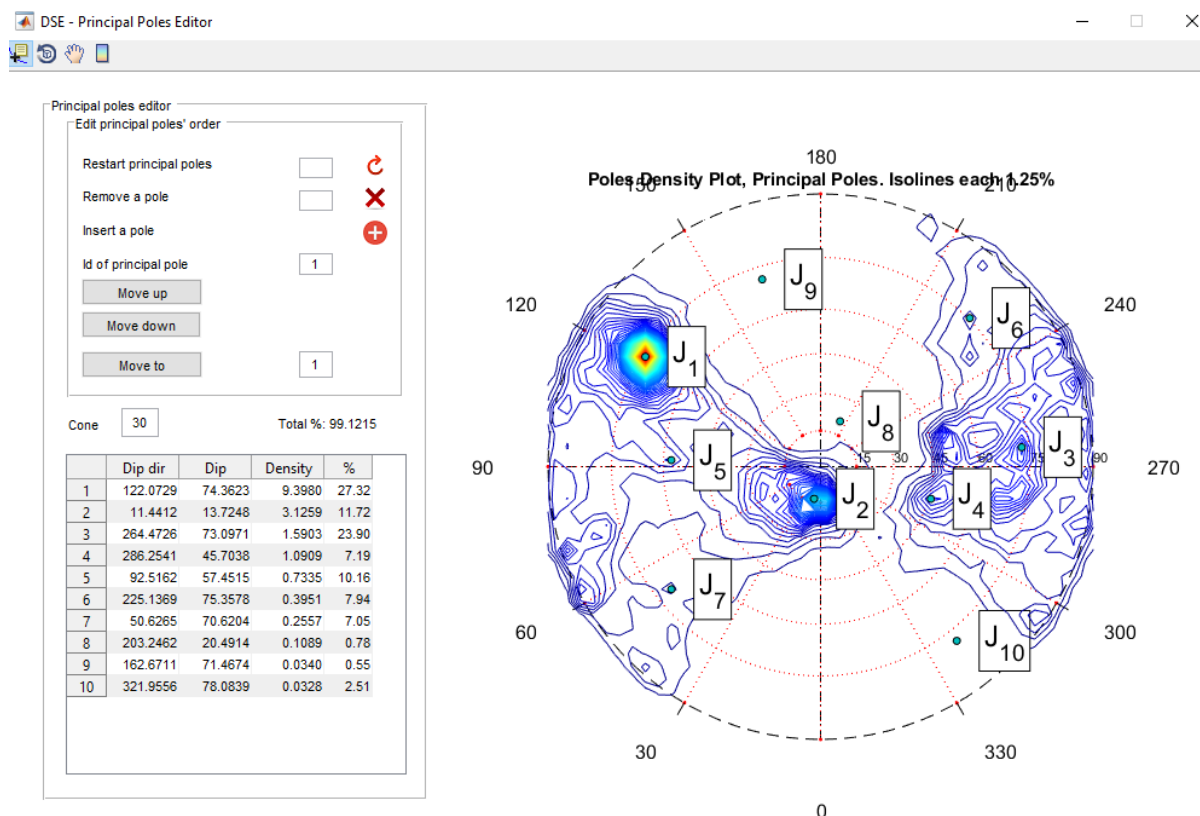


Слика 110 Приказ на 3DOT со одредена по една боја на секој сет од рамнини

Figure 110 Display of the point cloud with designated color for every set of planes

И кај овој локалитет, оваа метода на боење го олеснува разбирањето и интерпретацијата на структурните карактеристики на карпите. При тоа се гледа дека кај локалитетот Серта површините на рамнините се покомпактни и нема набори и чести закривувања кај карпата. Во овој случај придобивките се дека освен разбирањето на геолошките структури од самата посета на терен, се овозможува и една подетална слика со користењето на јаките бои. При тоа се приметуват и кој систем е најприсутен според тоа која боја е најприсутна на анализата.

Следниот чекор е активирање на опцијата *Principal Pole Extraction* за креирање *Poles Density Plots* (Графикони на густина на полови) (сл. 111), процес кој подетално е опишан во 6.2.4.1. при што на стереограмот се прикажани половите на различните дисконтинуитети.



Слика 111 Стереограм во DSE за 3DOT од локалитетот Серта
Figure 111 Stereogram in DSE for 3DPC from Serta site

J1 е најзастапената ориентација, со азимут од $122,07^\circ$ и паден агол од $74,36^\circ$ и зафаќа 27,32% од вкупниот број на рамнини, што значи дека е доминантна структура кај испитуваниот изданок, а претставува пукнатинска рамнина.

J2 е втората најзастапена ориентација, со азимут од $11,41^\circ$ и паден агол од $13,72^\circ$ и зафаќа 11,72% од вкупниот број на рамнини. Оваа структура го претставува падот на слојот на карпата.

J3 има азимут од $264,47^\circ$ и паден агол од $73,08^\circ$ и зафаќа 23,90% од вкупниот број на рамнини, што ја прави втора најзначајна структура по застапеност.

J4 е со азимут од $286,25^\circ$ и паден агол од $45,70^\circ$ и зафаќа 7,19% од вкупниот број на рамнини.

J5 има азимут од $92,52^\circ$ и паден агол од $57,45^\circ$ со 10,16% застапеност.

J6 до J10 се помалку застапени системи на рамнини, секоја со различни азимут на падна насока и паден агол, но сепак претставуваат важни елементи за целокупната интерпретација. Вкупната процентуална застапеност на детектираните структури е 99,12 %, што значи дека речиси сите ориентации се опфатени во анализата.

Стереограмот покажува сложена структура со повеќе доминантни ориентации. J1 и J2 се најзначајните структури, со највисока застапеност. Во овој случај рамнината на слоевитоста на карпата е застапена пореално. Поради потешкиот пристап на карпата за мерење на слоевитоста, таа не беше измерена во поголем број со геолошкиот, а со тоа и со виртуелниот компас, но DSE успешно ја препознава таа рамнина како една од главните рамнини кај овој објект. Високата застапеност на вертикални структури укажува на присуство на раседи или пукнатини, што е и сосема соодветно според реалната теренска состојба.

Со добиените елементи на пад од полуавтоматската метода, и овде се направи споредба на средните вредности од добиените мерења со полуавтоматската метода, геолошкиот компас и виртуелниот компас (таб. 14).

Табела 14 Рамнините кои се идентификувани кај сите применети методи се обележани со зелена боја

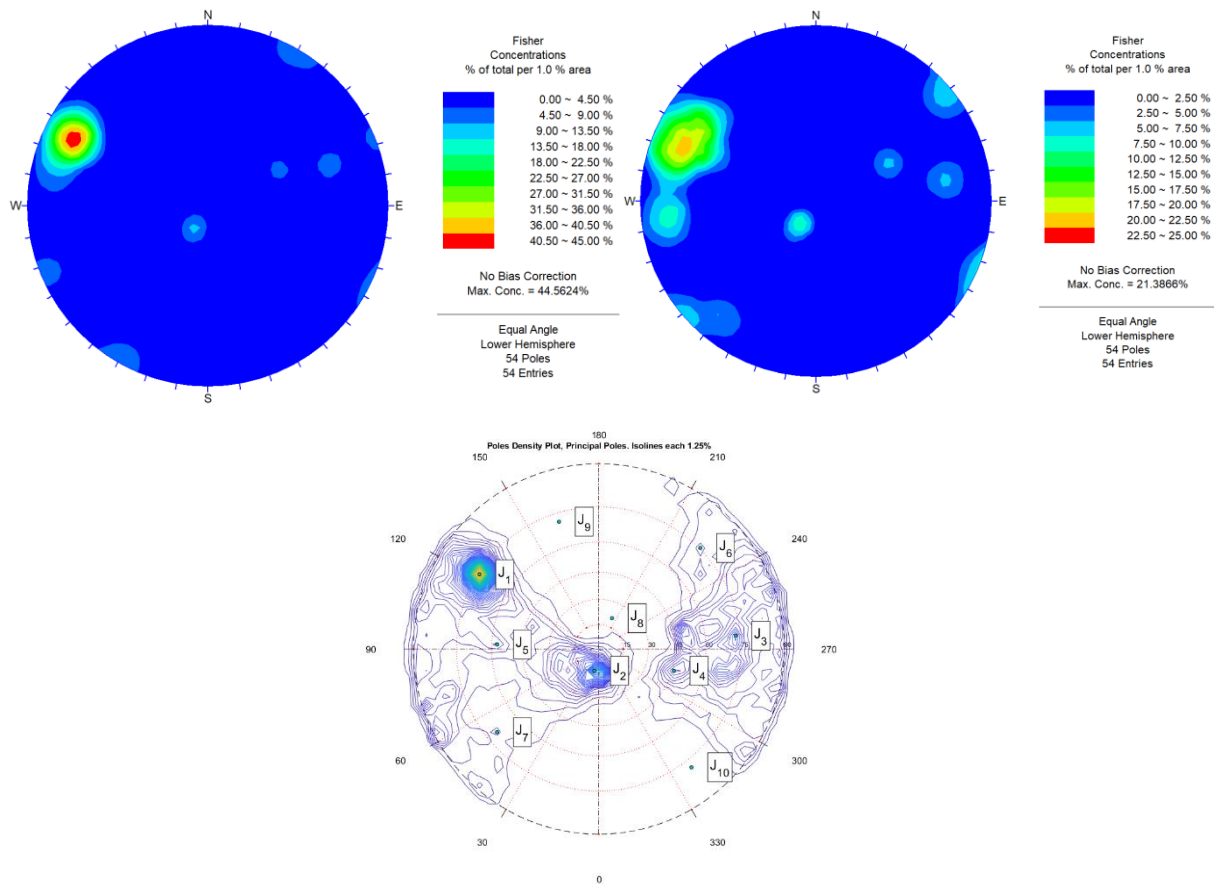
Table 14 Planes that are identified at all applied methods are marked with green color

Геолошки компас										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
115/80	236/79	243/48	29/89	68/88	33/13					вкупно
11	2	1	1	1	1					17
64,71	11,76	5,88	5,88	5,88	5,88	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Виртуелен компас										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
113/78	246/80	242/50	40/81	80/80	37/17					вкупно
11	2	1	1	1	1					17
64,71	11,76	5,88	5,88	5,88	5,88	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
DSE										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
122/74	11/14	264/73	286/46	93/57	225/75	51/71	203/20	163/71	322/78	вкупно
27,32	11,72	23,90	7,19	10,16	7,94	7,05	0,78	0,55	2,51	99,12

Од оваа табела може да се заклучи дека податоците добиени со геолошкиот и виртуелниот компас се совпаѓаат со многу висока прецизност. Релативно висок на степен на совпаѓање има во најприсутната мерена рамнина со геолошкиот компас, која е реално пукнатина која е најмногу изложена визуелно. Соодносот на детекција и на останатите пукнатини е исто така на високо ниво. Рамнината на слоевите која беше релативно потешка да се измери и исто така детектирана, би рекле дури поуспешно од страна на DSE, бидејќи ја детектира како трета по застапеност, што е и идентично со реалната состојба.

Кај локалитетот Серта се појавија и дополнителни придобивки од ваквиот начин на работа. Додека кај локалитетот Милутинци се добија одлични преклопувања, кај локалитетот Фариш, DSE како најчеста рамнина прикажа рамнина која не беше реална, кај локалитетот Серта, каде воопшто не е користено геореференцирање со помош на GPS повторно има зголемување на степенот на совпаѓање на добиените резултати кога се споредува DSE со геолошкиот и виртуелниот компас. Со тоа, рачното геореференцирање на добиениот 3DOT, односно користењето на елементите на пад на позната рамнина, се покажа дека е одржлива и успешна операција. При рачното ротирање на облакот од точки и поставување во реална позиција, може да се добие 3DOT на кој успешно ќе се извршат структурни мерења со голема точност. Единствен недостаток е тоа што 3DOT нема да биде во реални координати, но

за конкретните потреби тоа не претставува пречка. Со споредба на стереограмите од сите методи се добива (сл. 112):



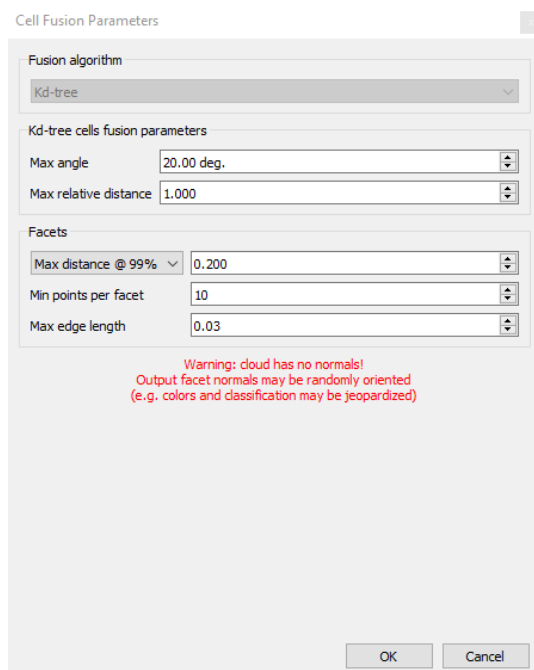
Слика 112 Стереограм за мерења со а) геолошки компас б) виртуелен компас в) DSE

Figure 112 Stereogram for measurements with a) geological compass b) virtual compass v) DSE

Од стереограмите се гледа дека сите можни различни методи за добивање структурни податоци се комплементарни, и се во функција на добивање реални и одржливи резултати. За овој случај, стереограмот добиен со DSE најдобро ја претставува реалната состојба на терен, кога се гледа сниманиот изданок како целина. Подетална анализа за појава на разлики во мерењата, како и придобивките се веќе презентирани во поглавје 6.2.4.1.

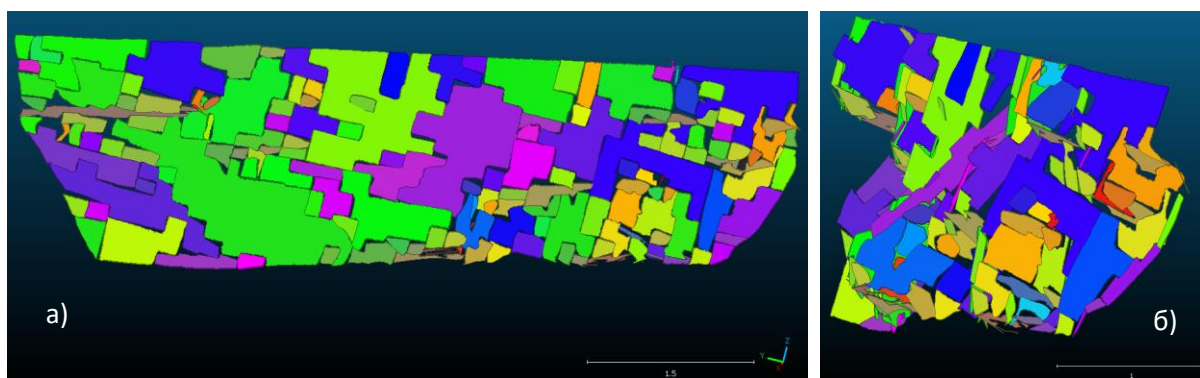
6.4.4.2. *FACETS*

Добиениот 3DOT од локалитетот Серта е обработен и во додатокот FACETS со алгоритмите Kd-tree I Fast Marching соодветно. Кај методата Kd-tree се појавува следниот автоматски интерфејс (сл. 113).



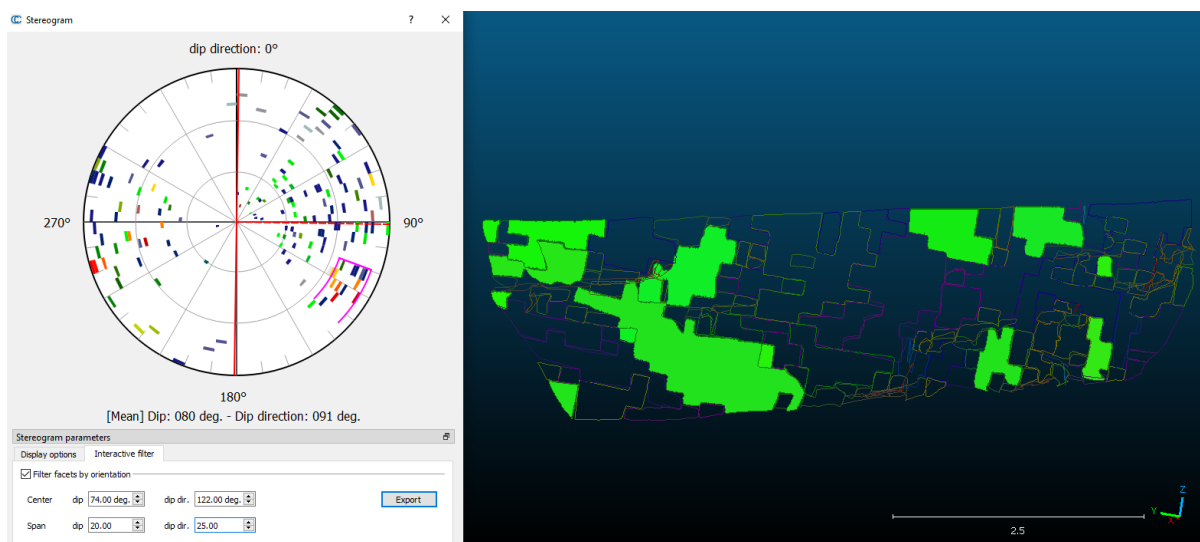
Слика 113 Интерфејс на алгоритмот Kd-tree за 3DOT од локалитетот Серта
Figure 113 Kd-tree algorithm interface for 3DPC from Serta site

Максималниот агол и тука е поставен на 20 степени, како и максималната релативна дистанца поставена на 1,000 и максимална дистанца во единици на која 99 % од точките во фасетата се сметаат за дел од таа фасета, која е ставена на 0,200. Разликата е во минималниот број на точки потребни за да се формира фасета која сега е ставена на 10. Вредноста од 10 значи дека секоја фасета мора да содржи најмалку 10 точки за да се смета за валидна. Разлика има и кај максималната должина на рабовите на фасетите. Вредноста од 0,03 укажува на максималната димензија на рабовите во единици. Овие фактори подетално се опишани во поглавје 6.2.4.2. При тоа се добива резултатот прикажан на сл. 114 а и б.



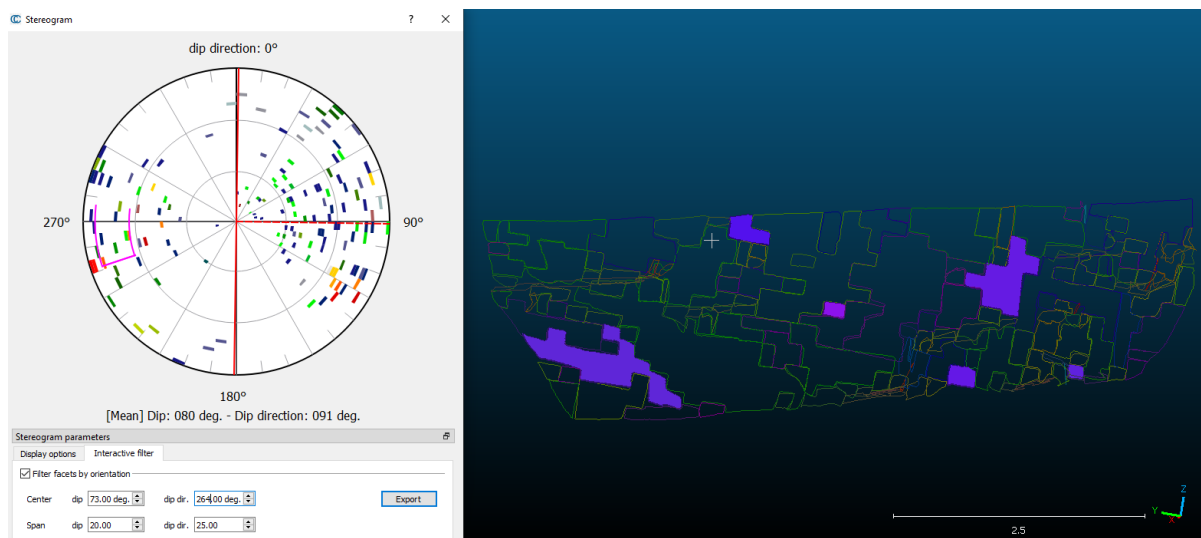
Слика 114 Поглед на добиениот резултат од Kd-tree а) однапред б) отстрана
Figure 114 View of the result from Kd-tree from a) the front b) the side

Со употреба на овој алгоритам реалната состојба на теренот е доловена релативно добро. Различните бои на фасетите ги означуваат различните рамнини на дисконтинуитетите. Бидејќи сниманиот објект по површина е најмал од сите до сега истражувани, издвоени се само 154 фасети. За споредба, кај претходните локации беа издвоени над илјада фасети. Овде допринесува и тоа што овој изданок спореден со претходните два има најголем процент на релативни големи рамни површини, и најмал процент на неповолни фактори како што се вегетација, набори и сл. И овде се издвоени најприсутните рамнини (122/74) (264/73) (сл. 115 и сл. 116)



Слика 115 Фасет 122/74 во Kd-tree

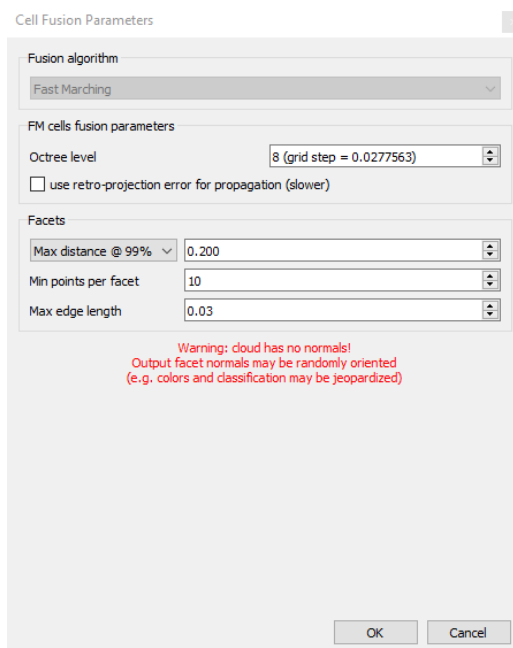
Figure 115 Facet 122/74 in Kd-tree



Слика 116 Фасет 264/73 во Kd-tree

Figure 116 Facet 264/73 in Kd-tree

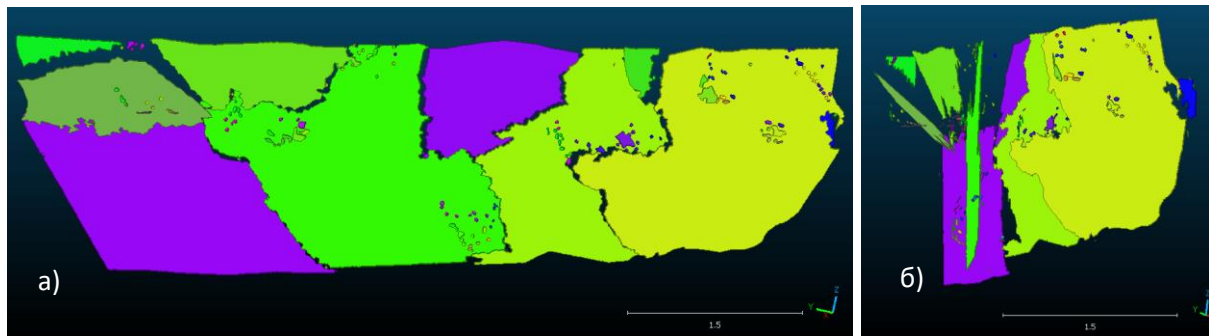
Следен е изработен фасетот Fast Marching каде времетраењето на компјутерска обработка трае многу подолго споредено со алгоритмот Kd-tree. При вклучувањето се појавува следниот интерфејс (сл. 117).



Слика 117 Интерфејс на Fast Marching за 3DOT од локалитетот Серта

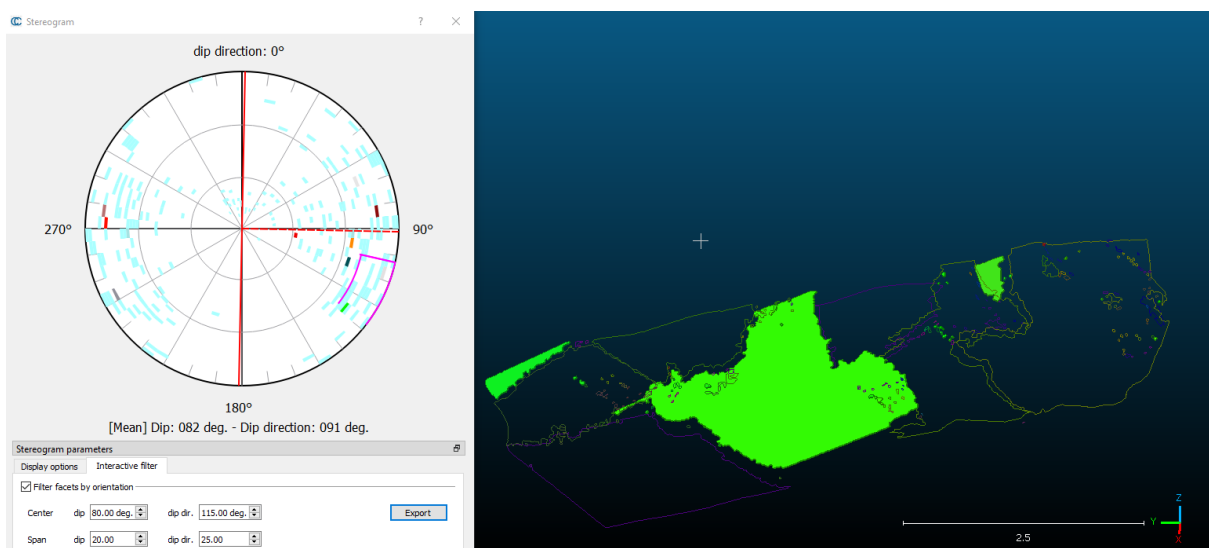
Figure 117 Interface for Fast Marching for 3DPC from Serta site

Поставките за овој алгоритам се разликуваат делумно од оние кај локалитетите Милутинци и Фариш. Октаре ниво е со уште помал мрежен чекор од 0.0277563, односно просторот ќе биде поделен во најмал број на воксели до сега. Разлика има и во минималниот број на точки по фасета кој е поставен на 10 и максималната должина на раб, каде тука е најмал на 0,03. Овие поставки подетално се опишано во глава 6.2.4.2. При тоа се добиваат 248 фасети (сл. 118).

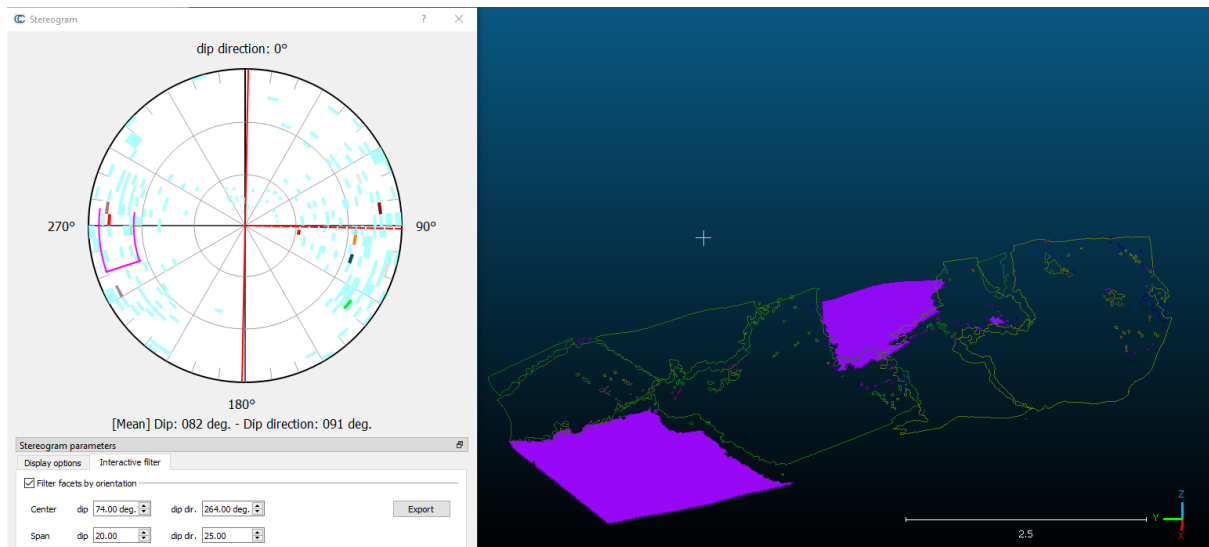


Слика 118 Поглед на добиениот резултат од Fast Marching од а) напред б) страна
Figure 118 View of the result from Fast Marching from a) front b) side

Кај овој приказ се гледа една тенденција на формирање рамнини каде се издвоени многу големи и многу мали рамнини споредбено со алгоритмот Kd-tree. На прв поглед изгледа дека претходниот алгоритам дава рамнини кои релативно се поблиски до реалниот терен, додека тоа не може да се каже за овој алгоритам. И во овој случај е направено издвојување на најприсутните рамнини и тоа 115/80 и 264/74 (сл. 119 и 120).

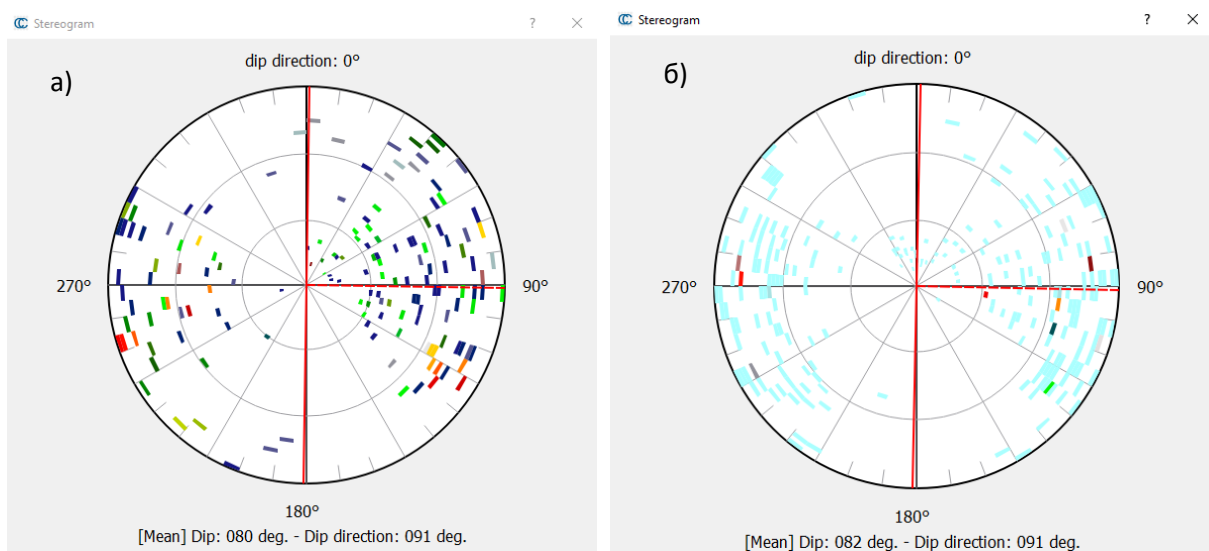


Слика 119 Фасет 115/80 во Fast Marching
Figure 119 Facet 115/80 in Fast Marching



Слика 120 Фасет 264/74 во Fast Marching
Figure 120 Facet 264/74 in Fast Marching

Со овие алгоритми се добиени стереограми чии компоненти подетално се објаснети во 6.2.4.2. Кај првиот стереограм, средниот паден агол е 80° , а средниот азимут на падна насока е 91° . Кај вториот стереограм средниот паден агол е 82° и средниот азимут на падна насока е 91° . Ова значи дека, генерално, структурите се субвертикални со ориентација кон исток. Тие структури се слично претставени на двата стереограма (сл. 121).



Слика 121 Стереограм за а) Kd-tree б) Fast Marching
Figure 121 Stereogram for a) Kd-tree b) Fast Marching

6.4.5. Изведени заклучоци за локалитет Серта

Кај локалитетот Серта фокусот беше ставен на прашањето дали може да се добие 3DOT кој ќе даде реални податоци во за структурните елементи на мерената површина, а без притоа да се користи GPS-уред. Меѓу другото, идеја беше да се одбере и различна геолошка средина споредено со претходните две геолошки средини. Избраниот изданок поседуваше релативно зарамнети површини, а присуството на вегетацијата беше минимално. Големината на сниманата површина беше најмала од сите досега, бидејќи во претходните два случаја генерално се потврди успешноста на оваа технологија, со употреба на GPS-уред, па во овој случај не беше битно да се покрие голема површина, туку да се добие функционален 3DOT без употреба на GPS.

Рачното позиционирање на 3DOT во софтверот Cloudcompare користејќи две познати наклони на рамнини, претходно добиени мерење со геолошкиот компас, даде позитивни резултати. При мерењето со виртуелниот компас се добија релативно исти резултати споредени со оние добиени од геолошкиот компас. Трендот на отстапувањата на виртуелниот и геолошкиот компас се задржа во рамките како кај претходните два локалитети. Направените анализи исто така потврдија дека разликите се во дозволените рамки.

Во поглед на полуавтоматските методи, DSE даде сосема висок степен на точност во поглед на целиот објект. Мерењата со геолошкиот компас беа изведени според донесени одлуки на лице место. DSE со полуавтоматскиот пристап даде многу реален резултат во делот на процентуална застапеност на рамнините во 3DOT.

За FACETS може да се каже дека двата користени алгоритми, Kd-tree и Fast Marching даваат различни резултати. Kd-tree даде повисока точност во споредба отколку Fast Marching, но варијациите на грешка кај овој алгоритам се сè уште големи и доверливоста кај користењето на овој софтвер е сè уште мала, особено кога се има предвид дека за ваков тип на анализи DSE е попрецизен и од двата алгоритми во FACETS.

6.5. Анализа на добиените резултати од трите локалитети

6.5.1. Анализа на добиените отстапувања

Максималните отстапувања за добиените мерења со геолошкиот компас и виртуелниот компас за сите три локации се претставени во таб. 15.

Табела 15 Максимални отстапувања на мерења кај трите локалитети

Table 15 Maximum measurement deviations at the three locations

Милутинци				Фариш				Серта			
геолошки к.		виртуелен к.		геолошки к.		виртуелен к.		геолошки к.		виртуелен к.	
азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол
21°	13°	23°	13°	16°	6°	32°	11°	18°	8°	14°	14°

Добиените разлики на мерењата кај локалитетот Милутинци се релативно поголеми гледано спрема локалитетот Фариш и локалитетот Серта. Сепак доколку се има предвид бројот на мерни места 71 кај првиот локалитет, 28 кај вториот и 18 кај третиот, односно 213, 84 и 54 мерења соодветно, може да се каже дека кај првиот локалитет се мерени поголем дел од изложените површини, додека кај вториот и третиот локалитет е направена одредена селекција кои рамнини ќе бидат измерени. Кај вториот локалитет причината за селективност беше присуството на набори и ситни чести закривувања во карпата, а кај третиот локалитет причина беше самата достапност на одредени рамнини, како и релативно помалиот опфат за работа.

Фреквенциите на разликите на вредностите кај геолошкиот и виртуелниот компас укажуваат на минимални отстапувања за паден агол и особено за азимутот на падна насока, каде кај првиот локалитет за азимут најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (97,18 %), се во ранг $\pm 12^\circ$, а за паден агол најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (88,73 %) се во ранг $\pm 5^\circ$. Кај вториот локалитет за азимут сите отстапувањата кај мерењата (100 %), се во ранг $\pm 8^\circ$, а за паден агол најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (82,14 %) се во ранг $\pm 5^\circ$. Кај третиот локалитет за азимут сите мерења (100,00 %), се во ранг $\pm 8^\circ$, а за паден агол најголемиот број од отстапувањата кај мерењата (82,14 %) се во ранг $\pm 5^\circ$.

Од овој аспект, споредувајќи ги трите локации, може да се каже дека генерално отстапувањата се најголеми кај локалитетот Милутинци, но имајќи

предвид дека бројот на извршени мерења несразмерно е поголем отколку кај останатите два локалитета, може да се каже дека кај сите мерења се задржува еден сличен тренд на максимални отстапувања на вредностите. Кога би ги споредиле фреквенцијата на разликите во вредностите кај геолошкиот и кај виртуелниот компас, може да се заклучи дека тенденцијата е виртуелниот компас да вади за нијанса поголеми разлики отколку геолошкиот компас, но тоа е во занемарливи граници.

6.5.2. Статистичка анализа

Добиените вредности од статистичката анализа каде се направени пресметки на максимални и просечни отстапувања на средните вредности од разликите на мерењата направени со геолошкиот компас и виртуелниот компас, кај трите локалитети се претставени во таб. 16.

Табела 16 Максимални и просечни отстапувања на мерења кај трите локалитети
Table 16 Maximum and average measurement deviations at the three locations

Милутинци				Фариш				Серта			
максимални		просечни		максимални		просечни		максимални		просечни	
азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол
12,67	9,33	4,46	2,38	7,67	9,67	2,76	3,43	12,67	7,67	5,35	3,41

Овие бројки даваат мала предност на мерењата кај локалитетот Фариш, пред останатите два локалитета, додека средните вредности на отстапување кај локалитетите Милутинци и Серта се многу блиски.

Стандардната девијација на мерењата за трите локалитети е дадена во таб. 17.

Табела 17 Стандардна девијација на мерењата за трите локалитети
Table 17 Standard deviation of the measurements for the three locations

Милутинци		Фариш		Серта	
азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол
3,53	2,24	2,09	2,45	3,98	2,45

И овде, за вториот локалитет се добиваат за нијанса подобри вредности, додека кај првиот и третиот локалитет добиените вредности се речиси идентични. Сите овие вредности укажуваат на многу мала и дозволлива статистичка грешка.

6.5.3. Регресиона анализа

Вредностите за R^2 кај направената регресиона анализа на мерењата кај трите локалитети се прикажани во таб. 18.

Табела 18 Податоци за R^2 кај трите локалитети

Table 18 Data for R^2 for the three locations

Милутинци				Фариш				Серта			
сите мерења		просечни		сите мерења		просечни		сите мерења		просечни	
азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол
0.9966	0,9653	0,9982	0,9806	0,9971	0,9192	0,9993	0,9501	0,9856	0,9491	0,9895	0,9725

Регресионата анализа за кај сите три локалитети дава заклучок дека постои силна зависност помеѓу добиените вредности за измерениот азимут на падна насока и паден агол, според двата начина на мерење.

6.5.4. Анализи на групи на мерења

Ако се анализираат бројот на мерења кои се направени со геолошкиот компас, тогаш може да се заклучи дека кај сите три локалитети доминантната рамнина учествува непропорционално повеќе од сите останати направени мерења. Кај првиот локалитет доминантниот сет на рамнини учествува со 38 мерни места од 71 односно 54 %. Кај вториот локалитет таа е кај 10 од 28 мерни места, односно 36 %, заедно со 21 % присутност на вториот по застапеност сет на рамнини. Кај третиот локалитет доминантниот сет на рамнини од 28 мерни точки ја има кај 11 од нив, што укажува на 64 % застапеност.

Овие податоци укажуваат на факторот на пристрасност на оној што ги врши мерењата, бидејќи се случува најголемиот број од мерења да бидат направени на најдостапната рамнина за работа. Ова треба да се има предвид кога направените мерења со геолошки компас се споредуваат со новите методи.

6.5.5. Анализа на добиените резултати од графиконот Bland-Altman

И овде се добиваат одлични резултати при споредба на двете различни техники на мерење, односно податоците добиени со геолошкиот во однос на податоците добиени со виртуелниот компас (таб. 19).

Табела 19 Основни вредности добиени со графиконот Bland-Altman

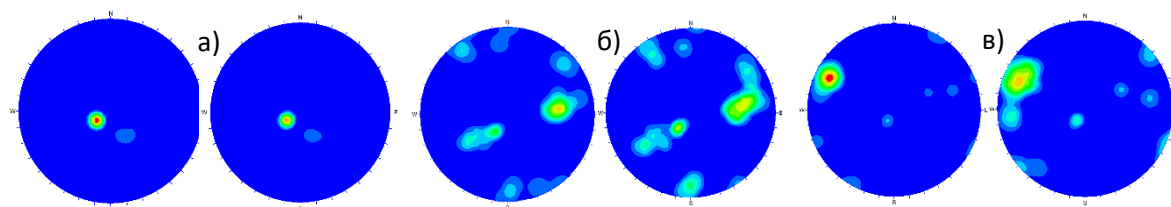
Table 19 Key values obtained from the Bland-Altman plot

	Милутинци		Фариш		Серта	
	азимут	агол	азимут	агол	азимут	агол
горен доверлив интервал	4,86°	6,94°	3,93°	8,11°	11,46°	9,32°
просечна разлика	-2,33°	0,62°	-1,85°	-0,24°	-1,5°	1,52°
долен доверлив интервал	-12,52°	-5,69°	-7,64°	-8,59°	-14,46°	-6,28°

Овие податоци укажуваат на многу мала разлика помеѓу мерењата со двете методи. Се издвојува вториот локалитет со минимално поголема точност, каде добар дел од мерењата се направени селективно, додека кај првиот локалитет се опфатени сите можни рамнини.

6.5.6. Анализа на добиените стереограми

Визуелниот приказ кај стереограмите прикажува најголема поврзаност помеѓу геолошкиот и виртуелниот компас кај Милутинци, потоа следува Серта и најмала поврзаност има кај локалитетот Фариш (сл. 122).



Слика 122. Споредба на стереограми за а) Милутинци б) Фариш в) Серта

Figure 122 Comparison of stereograms for а) Milutinci б) Farish в) Serta

6.5.7. Анализа на добиените резултати од DSE

Кај локалитетот Милутинци, најприсутниот сет на рамнини измерени со геолошкиот компас (57/21) и кај виртуелниот компас (61/20) беше издвоена и со полуавтоматската метода на DSE (67/21).

Кај локалитетот Фариш, најприсутниот сет на рамнини измерени со геолошкиот компас (263/59) и кај виртуелниот компас (264/59) беше издвоена со DSE како втора по присутност со агол (267/49).

Кај локалитетот Серта, најприсутната рамнина измерена со геолошкиот компас (115/80) и кај виртуелниот компас (113/78) е издвоена како најприсутна и со DSE (122/74).

Од аспект на DSE, разликите кај овие три локалитети се релативно поизразени, Може да се каже дека при ваква споредба, кај локалитетот Серта има најдобра повратна обработка од страна на софтверот. Тоа може да се должи и на самите димензии и сложеноста на сниманиот објект, како и присуството на вегетација и должината на снимањето. Најголеми несовпаѓања се добија кај локалитетот Фариш, каде снимањето траеше најдолго и имаше најмногу вегетација.

Стереограмот што го дава DSE, заедно со придружните елементи, е многу корисен во добивање увид во структурните податоци. Самата визуелизација на стереограмот е на највисоко можно ниво.

Може да се заклучи дека DSE има поголем дијапазон на обработка на вакви податоци во споредба со геолошкиот компас и виртуелниот компас и бидејќи поголем број на фактори влијаат врз неговите резултати. DSE овозможува широк дијапазон на подесувања на сите достапни инструменти кои ги има за подобрување на конечниот фидбек, каде практично можностите се неограничени.

Со оглед на обемот на добиените податоци, оваа метода дава на брзина, но за таа брзина е потребна и посилна компјутерска конфигурација.

6.5.8. Анализа на добиените резултати од FACETS

И за овој софтвер може да се извлечат повеќе заклучоци. Применети беа двата достапни алгоритми Kd-tree и Fast Marching.

Најпрво треба да се напомене дека извлекувањето на податоци за процентот на најприсутните рамнини е посложено отколку кај DSE. Мерењата изразени во азимут и паден агол, кога се прикажани во табела, не се сортирани на начин кој е лесно достапен за корисникот. Впечатокот е дека секоја рамнина (над илјада во првите два случаи) за себе носи различна вредност од соседната, така што понатамошната обработка на тие податоци не дава ист степен на доверливост како што е случајот кај DSE. Од друга страна, увидот во сетовите на рамнини и нивното изолирање е на високо ниво.

Генералниот впечаток е дека првиот алгоритам за овие локалитети дава многу пореални фасети-рамнини. Кај вториот алгоритам премногу е очигледна разликата помеѓу едната половина на рамнини кои се преголеми и другата половина кои се премали. Може да се каже дека овој алгоритам не е соодветен за овој тип на анализи, или треба дополнително да се интервенира во делот на подесување на опциите. Дополнително, времето за процесирање на овој алгоритам е околу 10 пати подолго отколку првиот. При обработката на овие податоци, алгоритамот Kd-tree е сосема доволен. Алгоритамот Fast marching за жал, не беше на висина на очекувањата, особено кога би го споредиле со DSE. Сепак, за добивање на пореален увид во функционирањето на сите применети методи, ги употребивме и Kd-tree и Fast Marching, каде се докажа дека резултатите кои ги дава првиот алгоритам се повеќе слични на оние од DSE, отколку што тие се слични меѓу себе. Доколку во иднина се појави потреба од ваков тип на анализи во FACETS, сосема е доволна примената на алгоритамот Kd-tree. Се разбира Fast Marching има свој придонес, така што не се исклучува употребата и на овој алгоритам, особено со фактот дека овие плагини постојано се развиваат и усовршуваат.

Стереограмот кај овој софтвер е потешок за разбирање спореден со оној што го дава DSE. Сепак тој е одлична опција за брзо издвојување сетови на рамнини.

7. ВЕРИФИКАЦИЈА НА МЕТОДОЛОГИЈАТА ЗА ДЕТЕКЦИЈА И МОНИТОРИНГ НА СТРУКТУРНО-ГЕОЛОШКИ ОСОБЕНОСТИ

Главната цел со верификацијата на оваа методологија е да се презентира пример за детекција и мониторинг на движења на карпести косини со употреба на 3DOT добиен со нискобуџетната, далечинска и прецизна техника SfM (Structure from Motion) како и со употреба на соодветен софтвер. Ваков сличен пристап, со употреба на SfM за мониторинг на косини во литературата може да се најде кај (Carvajal et al., 2012, Niethammer et al., 2010, Damjanovic et al., 2021, Spyridoula et al., 2020) и други. При оваа верификација, ќе се прикажат два пристапа: *Детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености и дополнителни геометриски карактеристики.*

7.1. Методологијата за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености

Истражуваната област претставува мал дел (60 x 25 m) од третата косина на десната страна на усек 4 на експресниот пат А2 Крива Паланка-Страцин, конкретно на делницата Длабочица-Чатал, во близина на селата Петралица и Псача (сл. 24). Усекот е со должина од околу 700 m и е ископан во ридест терен каде земјиштето постепено се спушта од север кон југ, што значи кон долината на реката Крива Река. Теренот, во геолошка смисла, е составен од метаморфни карпи – албит-епидот-хлоритски шкрилци.

Усекот беше веќе ископан во најголем дел кога моменталниот изведувач почна да работи на овој проект. На десната страна на почетокот од усекот на косините кои беа веќе ископани со наклон од 1:1,5 (33,7°), имаше појава на локално свлекување на карпи кое се протегаеше во должина од околу 200 m. (сл. 123). По дадените предлози на санација на оваа нестабилност, за тој потег од усекот се изработи „Дополна на основен проект“ при што се изврши ублажување на косините и воведување нулта берма, со цел смирување на оваа состојба и обезбедување услови за идна безбедна експлоатација на експресниот пат. При тоа, првите две косини беа изработени со наклон од 1:2 (26,6°), а третата (најгорната) беше изработена со наклон од 1:1,5 (33,7°).



Слика 123 Состојба на усек 4 март 2022. Со црвена боја е означена локалната нестабилност на десната страна на усекот

Figure 123 Condition of the cut on March 4, 2022. Local instability on the right side of the cut is marked in red

По санацијата на косините, тие останаа стабилни уште една година (сл. 124 а). На почетокот на февруари 2023 година, беше добиена информација дека се случило свлечиште на третата косина на десната страна на усекот. Нестабилноста беше од мали размери, со димензии од околу 30 x 20 m. Во периодот по појавата на нестабилноста, таа се зголемуваше, а како резултат на тоа и дополнителни карпи се откинуваа од косината (сл. 124 б).



Слика 124 а) Состојба на усекот пред да се случи новото свлечиште во делот на црвениот круг. б) Состојба со новото свлечиште на 27.09.2023

Figure 124 а) Condition of the cut before the new landslide occurred in the area marked with a red circle. б) Condition with the new landslide as of 27.09.2023.

Од страна на Изведувачот на градежните работи на овој експресен пат, минимум еднаш месечно се вршеа редовни снимања со дрон, и употреба на технологијата SfM, да се добијат 3DOT со кои понатаму би се пресметувале количини на изработен ископ, односно насип.

Овие снимки се изработени независно од геолошките нестабилности кои се појавуваа на трасата. Сепак, имајќи предвид дека се направени снимки пред и по појавата на свлечиштето, се доби идејата детално да се прегледаат овие снимки за да може да се добијат дополнителни информации и да се извечат евентуални нови заклучоци. Главна придобивка беше во тоа дека за да се добие увид во геолошките процеси, како и за да се направи мониторинг на стабилноста на косините, не требаше да се прават дополнителни трошоци, туку само да се искористат снимки кои се направени за други потреби на овој проект.

При прегледувањето на снимките, точноста на нивното преклопување беше околу 3 cm, а некогаш и до 1 cm. При тоа се доби увид во состојбата на конкретната локација пред и по појавата на нестабилноста со многу висок степен на точност. При споредување на снимките, се забележа дека на конкретната локација каде се појави нестабилноста, се појавиле минимални движења, односно откинувања на помали парчиња карпа и послаба ерозија, пред појавата на локалната нестабилност. Овие минимални промени не беа воочливи на лице место кога се работеше во тој дел од трасата. Сепак колку и да биле мали тие промени, сепак тие укажуваа на појава на локална нестабилност од размери кои не се занемарливи. Со идејата дека појавата на нестабилности на косини при изградба на линиска структура како што е експресниот пат може да се мониторира, а со тоа во иднина да се предвидат вакви или слични настани, со цел зголемување на безбедноста на градилиштето, како и навремена реакција, целта беше да се направи детална анализа на конкретниот пример. Паралелно, се изврши анализа и на останатите усеци во карпа, како и постојан мониторинг на сите усеци. За среќа, до пишувањето на оваа дисертација, не беа забележани нови слични проблеми, така што беспредметно е да се презентираат направените анализи на другите усеци, бидејќи освен промените при ископ, нема појава на нестабилности. За таа цел, ќе биде презентирана локалната нестабилност на усек 4 со цел прикажување и валоризација на можностите на технологијата, како и нејзина економска исплатливост во вакви случаи.

7.2. Добивање податоци

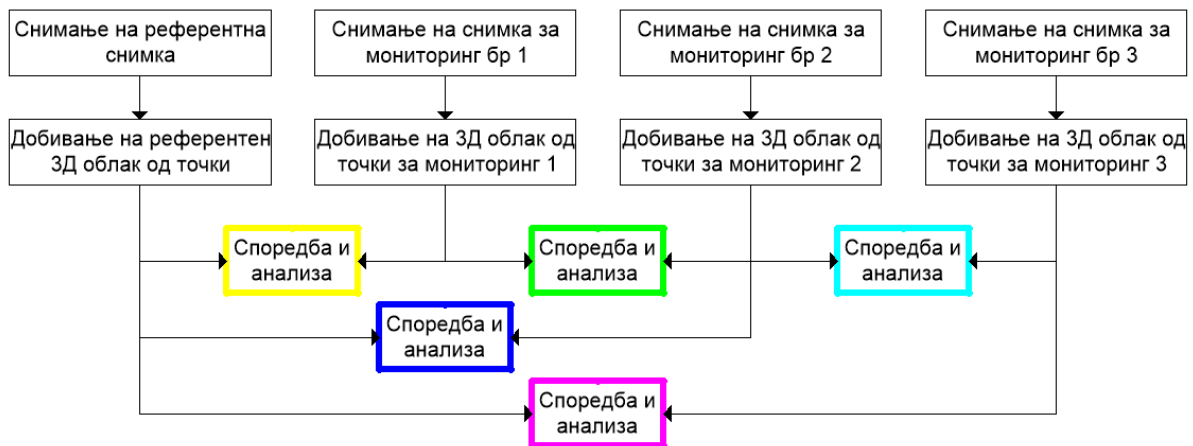
Постојат неколку пристапи и алгоритми за реконструирање на ориентацијата и геометријата на површината со направените фотографии. Во моментот, еден од најкористените методи се базира на примена на алгоритми за Структура од движење (Structure-from-Motion, SfM). Овие алгоритми припаѓаат на областа на истражување во компјутерската визија и заедно со техники за стерео-реконструкција обезбедуваат можност за создавање точни 3D модели од слики без претходни информации за локацијата на снимање на сликите или за параметрите на камерите користени за снимање (Verhoeven et al., 2013, Bedford, 2017, Murtiyoso et al., 2018).

Снимките се обезбедени со употреба на беспилотно летало-дрон Phantom 4 RTK (сл. 9 и сл. 125). Големината на фотографиите кои ги прави се 5742 x 3648 пиксели со хоризонтална и вертикална резолуција од 72 dpi/точка на пиксел.



Слика 125 Дрон при снимање на усекот
Figure 125 Using the drone for recording the cut

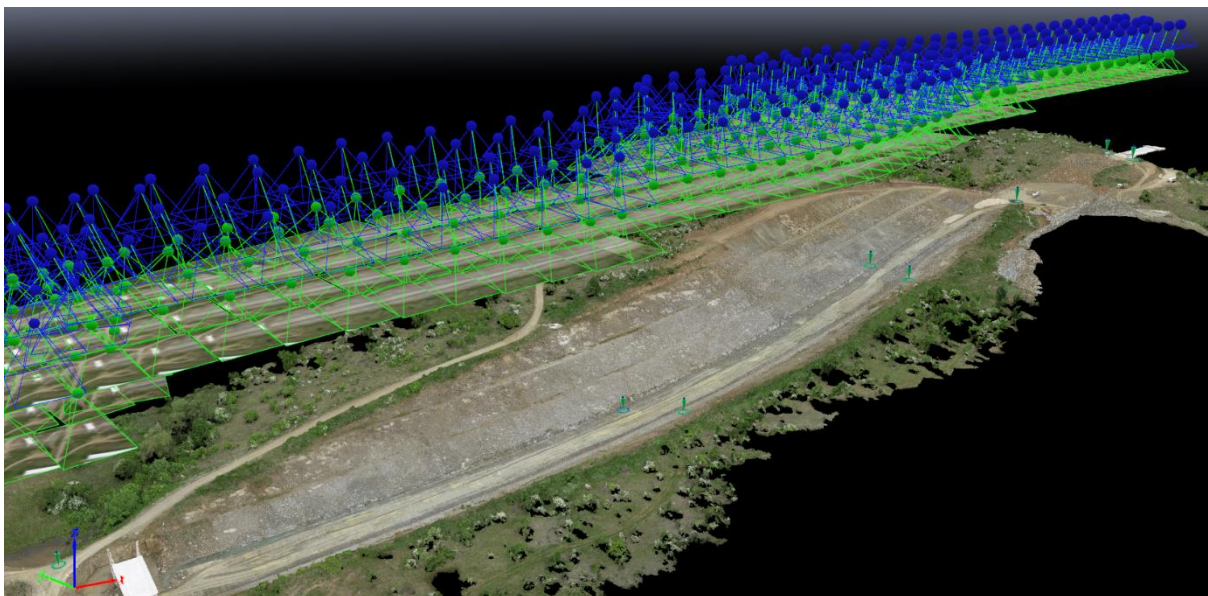
Користени се четири различни снимки кои се направени во период од 5 месеци, и се добиени четири различни 3DOT при оваа верификација. Облакот од точки добиен пред детектираното движење се користи како референтен 3DOT, а следните три се компаративни. Мултитемпоралните геоморфолошки промени во областа на свлечиштето беа идентификувани со споредба на 3DOT во парови. 3D-растојанијата беа проценети со споредба на модел до модел за секој пар на облаци од точки (сл. 126).



Слика 126 Графикон за постапка при детекција на движење

Figure 126 Procedure of the motion detection

Користени се два софтвера. Pix4D mapper за добивање на 3DOT и CloudCompare за работа со 3DOT. За време на обработката на добиените фотографии од дронот во Pix4D, се добива следната визуелизација (сл. 127).



Слика 127 Позиции на камерата за време на летот

Figure 127 Positions of the camera during the flight

Од овие фотографии можат да се добијат 3DOT со многу високи резолуции, но со цел да може да се работи соодветно, се бира оптимална густина на точки за 3DOT. По процесирањето и добивање на облакот од точки, моделот се зачувува во една од многуте достапни екстензии: .las, .laz, .ply, .xyz, итн. (сл. 128 до сл. 131). Овие четири 3DOT имаат помеѓу 510 034 и 655 834 точки.



Слика 128 Прва снимка - референтна, направена на 13.12.2022

Figure 128 First recording-reference, taken on 13.12.2022



Слика 129 Втора снимка - компаративна, направена на 20.1.2023

Figure 129 Second recording-comparative, taken on 20.1.2023



Слика 130 Трета снимка - компаративна, направена на 21.2.2023

Figure 130 Third recording-comparative, taken on 21.2.2023



Слика 131 Четврта снимка-компаративна, направена на 16.5.2023

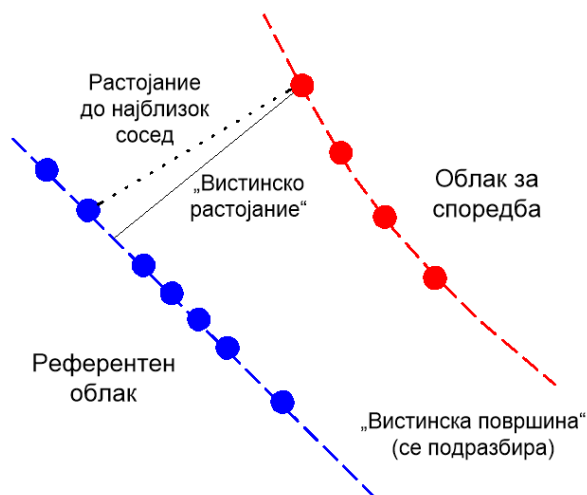
Figure 131 Fourth recording-comparative, taken on 16.5.2023

Следниот чекор е геореференцирање на добиениот облак од точки и сместување во познат координатен систем. Тоа е сложена процедура која направена од страна на геодетската служба. Овие снимки се работени во рамките на изградба на експресниот пат А4 делница Длабочица - Чатал, при што геодетската основа е поврзана на т.н. оперативен „полигонски влак“, кој има за цел правилно пренесување на проектот на терен. На една позната точка од оперативниот полигонски влак се поставува база (Trimble Zephyr 3), а после со инструментот rover (Trimble R780) се снимаат претходно поставени маркици кои служат за геореференцирање на моделот. Бројот на маркиците е отприлика околу 12, што зависи од формата и големината на усекот. Дронот има вграден GPS со точност од 2-3 cm, по што со геореференцирањето точноста може да дојде и до 1 cm. Геореференцирањето се врши мануелно во софтверот Pix4D, при што постапката за геореференцирање би одела со пикирање на секоја маркица од фотографиите. Услов е секоја маркица да се наоѓа на најмалку 3 фотографии, а оптимално е 10 - 15 фотографии.

7.3. Обработка на добиените податоци

Еден од најчестите методи за пресметување на растојанието помеѓу облаци е методот Cloud-to-Cloud (познат како C2C метод). C2C методот е пресметка на растојанијата помеѓу два 3DOT или помеѓу 3DOT и мрежа. Целта на методот C2C во оваа студија, е да се одреди разликата во растојанието помеѓу

две епохи на мобилни ласерски скенирања. Разликите во растојанието се однесуваат на движењето на свлечиштето кое се случило на конкретната локација. Сл. 132 го прикажува основниот концепт на пресметковниот метод C2C (Fuad et al., 2018).



Слика 132 Основен концепт на методот за пресметка на растојание C2C

Figure 132 The basic concept of C2C distance computation method

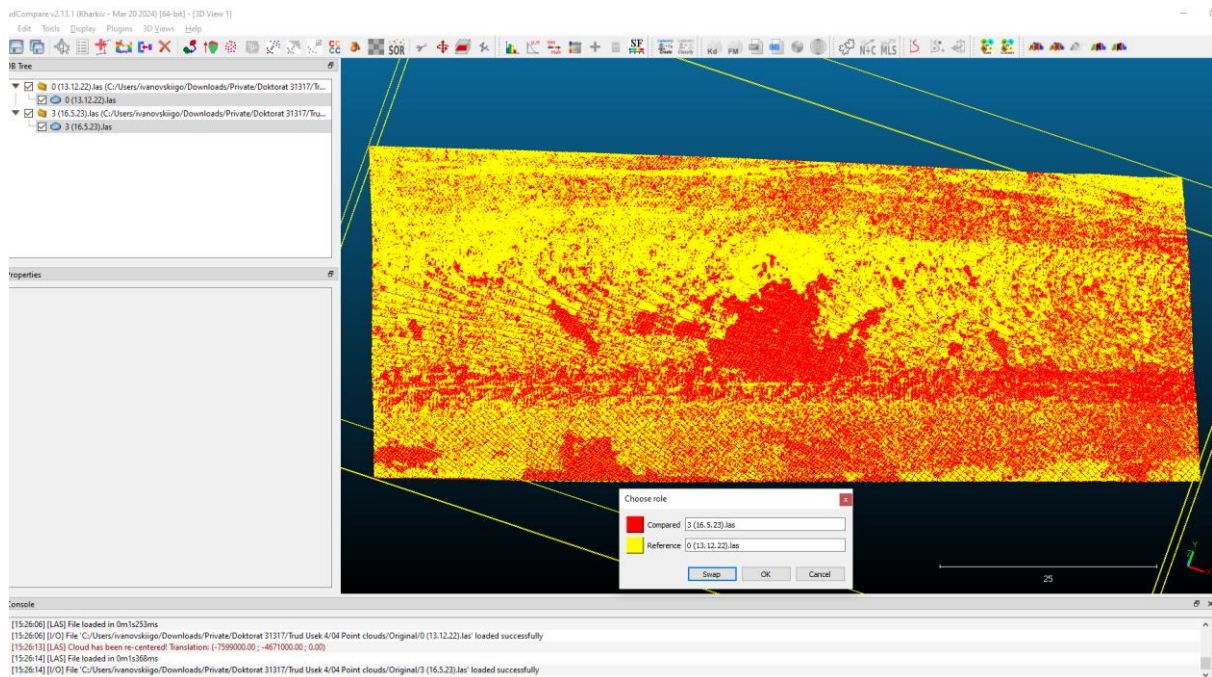
Основниот метод C2C за пресметување на растојание го пресметува растојанието до најблискиот сосед помеѓу референтниот 3DOT и споредуваните 3DOT. Принципот на растојание до најблискиот сосед се користи за да се пресметаат растојанијата помеѓу двете точки, при што за секоја точка во споредуваниот облак се пребарува најблиската точка во референтниот облак и се пресметува нивното Евклидово растојание. За да се добие подобра апроксимација на вистинското растојание до референтната површина, беше воведен локален модел на површина (Fuad et al., 2018).

Според Јафари, 2016, алгоритмот за пресметување на растојанието C2C го имплементира Хаусдорфовото растојание кое ги пресметува растојанијата помеѓу кореспондирачките точки. Хаусдорфовото растојание од множеството A до множеството B е максимална функција дефинирана како во равенката:

$$E(R, t) = \min_{R, t} \sum_i \|p_i - (Rq_i + t)\|^2$$

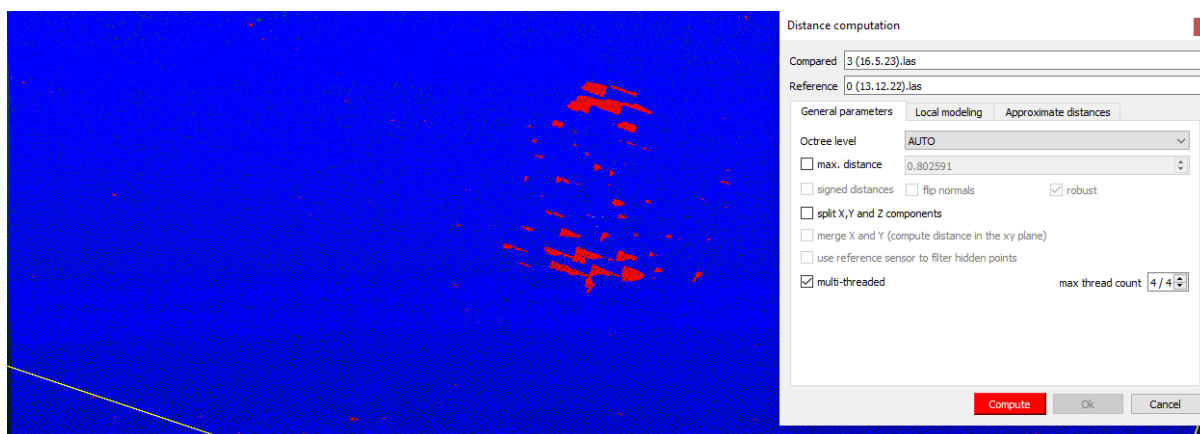
Каде $p^i \in P$ е точка од референтен, а $q^i \in Q$ е точка од споредуван 3DOT

За да се употреби алатката C2C треба да се штиклираат два (и само два) 3DOT. Пред да го прикаже интерфејсот (корисничкиот приказ) , програмата ќе праша за улогите на секој облак: кој ќе се користи како референтен, а кој за споредба? Во овој случај, постариот облак треба секогаш да биде референтен (cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Cloud-to-Cloud_Distance) (сл.133).



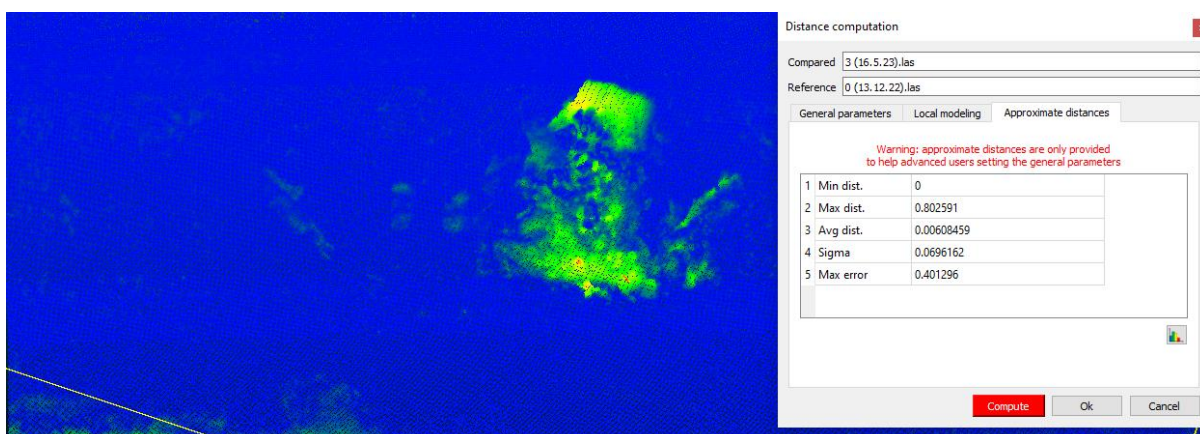
Слика 133 Изборот на податочни збирки што ќе се користат во процесот на пресметување на растојанието C2C. 0 е референца, 3 е последната снимка
Figure 133 The selection of datasets to be used in the C2C distance computation process. 0 is referenced, and 3 is the last recording

Софтверот CloudCompare најпрво ќе ги пресмета приближните резултати за пресметување на растојанието помеѓу избраните збирки на податоци. Пресметувањето на растојанието C2C до најблискиот сосед може да се изврши користејќи ги стандардните поставки со избирање на опцијата „Compute“. Стандардните поставки автоматски ќе ја пресметаат соодветната вредност за нивото на *Octree* кое е соодветно за користење во процесот на пресметување. Резултатот од 3D отстапувањето на површината е прикажан и зачуван во податочната збирка од епоха 2, каде што корисникот лесно може да го визуелизира резултатот со активирање на податоците во панелот со слоеви. На сл. 134 е прикажано менито за пресметување на растојание C2C.



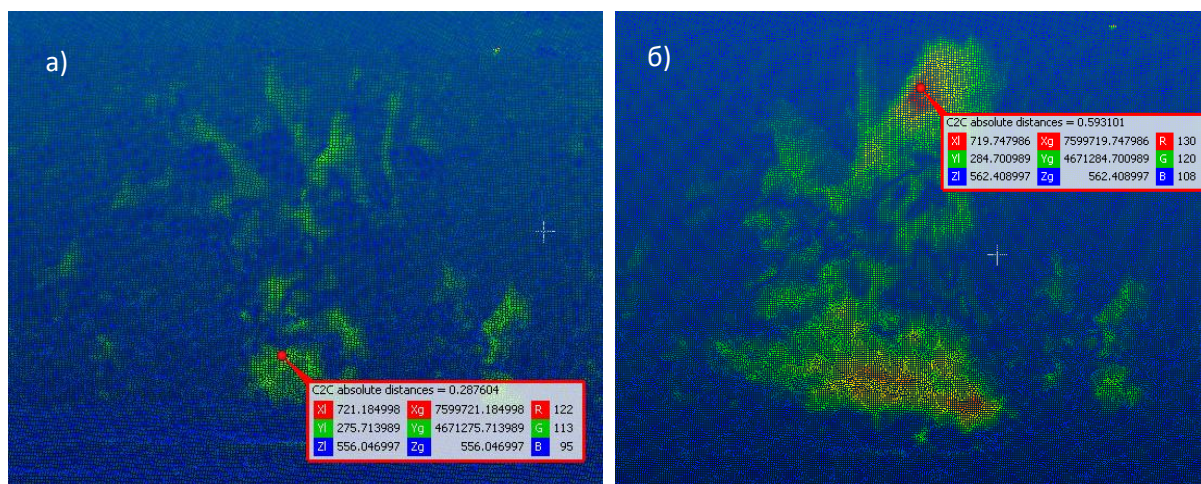
Слика 134 Мени за пресметување на растојание C2C
Figure 134 C2C distance computation menu

Пресметувањето на растојанието C2C е извршено автоматски со користење на опцијата „Compute“ (сл. 135).



Слика 135 Финален изглед со автоматскиот приказ на пресметка на растојанијата
Figure 135 Final appearance with automated distance computation

За секоја пресметка на растојанија, софтверот дава четири вредности за растојанија: максимално растојание, просечно растојание, средно растојание и стандардна девијација. Во овој случај, не се користени автоматските вредности, туку рачно се лоцирани позициите каде се случува свлекувањето. За тоа ќе се користи алатката *Point picking*. Со автоматската пресметка на растојанијата, може да се добие погрешен впечаток за ваков тип на анализи, поради редепонирање на материјал кој се откинал од косината, при што извлечените растојанија, односно детектирани промени нема да дадат реална слика.

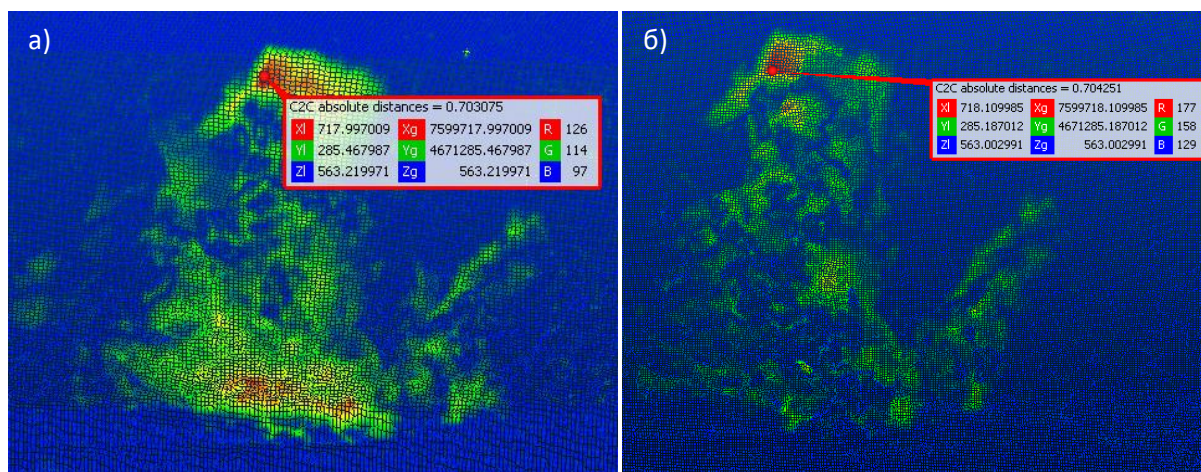


Слика 137 а) Споредба помеѓу првото и второто снимање со приказ на максималното апсолутно растојание. б) Споредба помеѓу првото и третото снимање со приказ на максималното апсолутно растојание

Figure 137 а) Comparison between the first and the second survey with the maximum absolute distance. б) Comparison between the first and the third survey with the maximum absolute distance

Со споредба на првата снимка со третата (снимка по реалната појава на нестабилноста), може веќе да се забележат поголеми разлики (сл. 137 б). Освен визуелната потврда за појавата на оваа локална нестабилност, дополнително со употреба на софтверот Cloudcompare, се гледаат промените на терен. При тоа, рачно може да се одберат позиции на сниманата област за да се провери колкави се промените, односно разликите помеѓу двата облаци од точки. Кај втората споредба, најголемата разлика е во горниот дел на косината и изнесува 59,31 cm.

Со споредба на првото со последното (четврто) снимање, може да се забележи дека разликите помеѓу двата 3DOT се зголемуваат и се рашируваат на поголема област (сл. 138 а). Апсолутното максимално растојание изнесува 70 cm. Забележителна е промената на формата на свлечиштето, особено во неговите горни делови. Ова се случува поради константното откинување на материјал особено од горниот дел на косината и негово депонирање во долниот дел на косината, односно на бермата. Се разбира тука е присутна и засилената ерозија. Со теренски увид, може да се забележи дека реалната активност на свлечиштето е во погорните делови на косината иако снимките покажуваат промени и на горниот и на долниот дел. На долниот од снимката промените се поради натрупување на откинат материјал од горните делови на косината.



Слика 138 а) Споредба помеѓу првото и четвртото снимање со приказ на максималното апсолутно растојание. б) Споредба помеѓу третото и четвртото снимање со приказ на максималното апсолутно растојание

Figure 138 a) Comparison between the first and the fourth survey with the maximum absolute distance. б) Comparison between the third and the fourth survey with the maximum absolute distance

Споредбата помеѓу претпоследното (трето) и последното (четврто) снимање може да се искористи како контролна мерка за да се провери дали свлечиштето уште е активно (сл. 138 б). При оваа споредба може да се забележи дека постојат разлики и помеѓу овие две снимки. Најголемото растојание останува 70 см, но на друга позиција што укажува на измена на состојбата. Се забележуваат разлики низ целата косина, што укажува на постоење на одредени движења особено во горниот дел. Тоа се случува поради константната ерозија на тој дел од косината, проследена со откинување на нов карпест материјал.

При тоа е изработен тренд на промени на површината на свлечиштето (таб. 20).

Табела 20 Тренд на промени кај свлечиштето низ период од 5 месеци

Table 20 Trend of changes in the landslide for 5 months period

Споредба	Максимална разлика (cm)	Поминати денови	Движење cm/ден
0 со 1	28,700	38	0,755
0 со 2	59,300	70	0,847
0 со 3	70,300	154	0,456
2 со 3	70,400	84	0,001

На табелата може да се забележи дека во периодот кога се правени овие снимки, движењето на свлечениот материјал не е со голема брзина. Може да се каже на почетокот движењето било помалку од 1 cm на ден. Гледано на последните две снимања, може да се заклучи дека дошло до одредено смирување, иако статистички може да се забележи минимално движење.

7.5. Изведени заклучоци за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености

Оваа верификација иако се фокусира на помало локално свлечиште, дава потврда дека методологијата која е прикажана овде може ефикасно да обезбеди увид во различни форми на движења, вклучувајќи го и предвидувањето на разни планарни или клинести ломови.

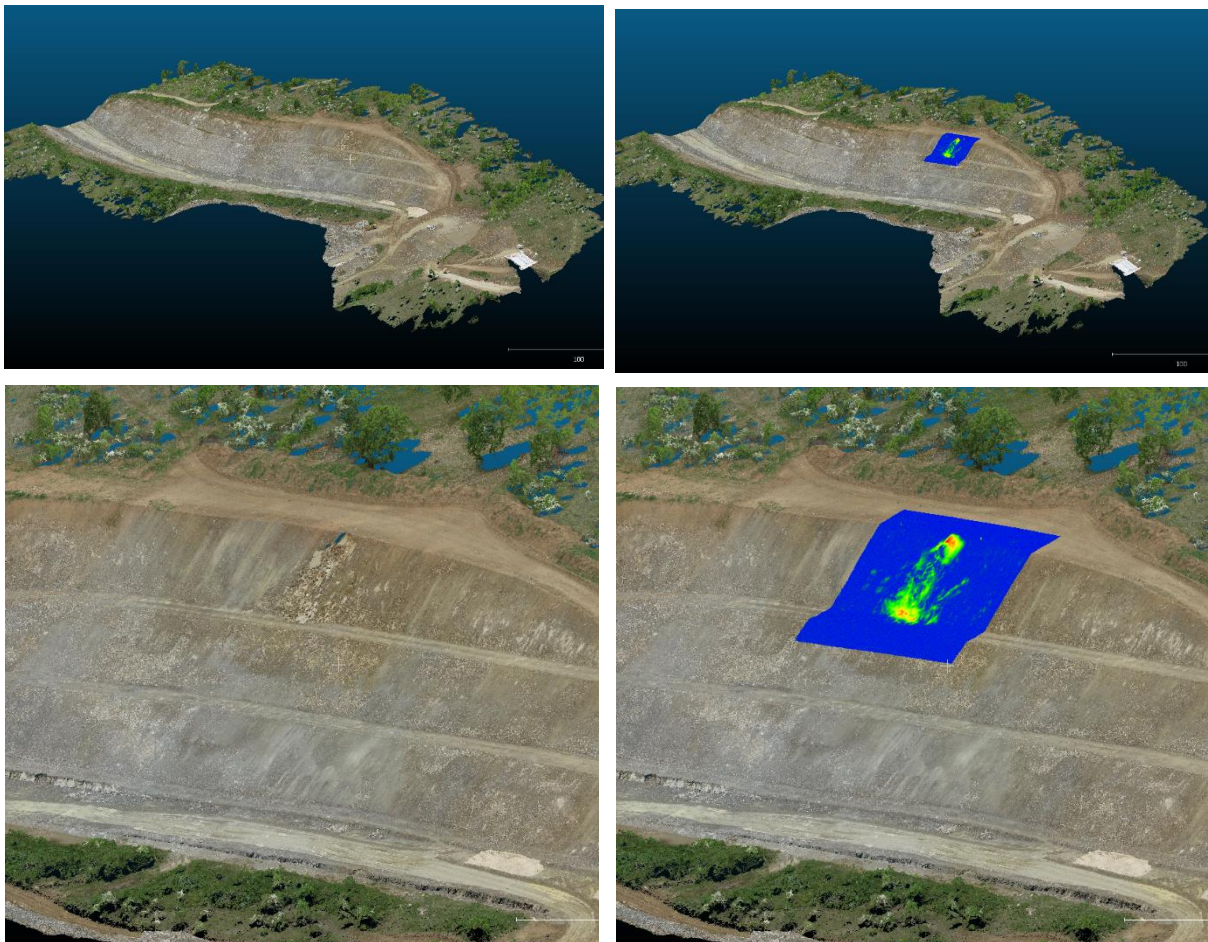
Изворот на нестабилноста е една рамнина од фолијацијата на карпата со елементи на пад од $180/42^\circ$, додека косината е изработена со агол од 34° и протегање $70 - 250^\circ$. Структурните карактеристики на присутните пукнатински системи се неповолни, што дополнително ја влошува компактната на карпата. Заклучоците од теренската перспекција се во корелација со анализите добиени со податоците од 3DOT.

Промените кај направените снимки се најголеми во горниот дел на косината, каде и реално се случува свлекување на материјал по фолијацијата на шкрилците која во комбинација со неповолната поставеност на пукнатините создава услови за такво нешто. Заклучоците изведени од овие споредби се совпаѓаат со заклучоците кои се изведени со извршените геолошки истраги, каде се утврдени неповолни параметри на конкретната микро-локација.

Употребата на овие снимки дава поширок увид во целата состојба. Даваат информација дека на конкретната локација, свлечиштето почнало пред неговата визуелната детекција, што може многу да даде придонес во идни случаи каде со навремена реакција ќе се заштитат луѓето и машините кои работат во близина на таква појава. Исто така, дава информација дека и по настанување на главното свлекување, сепак во тој дел локалната нестабилност продолжува со помал интензитет.

Оваа техника е користена при периодични снимања на сите усеци на експресниот пат, со цел постојан мониторинг на состојбата на усекот и неговите косини, и добивање релевантни податоци кои помагаат да се предвидат евентуални идни нестабилности

Треба да се има предвид дека оваа методологија не претставува имплементација на најновите иновации во технологијата, туку примена на неколку софтверски и хардверски решенија кои се користат во инженерството со години. Овој пример служи како демонстрација на практичната примена на оваа методологија во реални сценарија, покажувајќи ја нејзината директна инволвираност за време на изградбата на експресен пат (сл.139).



Слика 139 Визуелен приказ на мониторинг на косини
Figure 139 Visual representation of slope monitoring

Во праксата, нестабилноста се идентификува визуелно, каде потоа се иницира потрага по одговорите за нејзиниот настанок. Преку предложената методологија, можно е да се откријат потенцијални помали или поголеми

нестабилности пред визуелна детекција, што овозможува спречување или минимизирање на значителни штети, како и подобро разбирање на состојбата на теренот.

Иако оваа локална нестабилност не е од поголеми размери, и не дава некои брзи промени на терен, важноста е во тоа што регистрираните движења и разлики се со точност во сантиметри, што во геологијата е повеќе од доволно за следење на вакви геолошки појави. Ова дава сосема разумен заклучок дека оваа технологија дефинитивно е на висина на задачата, а со тоа што може да се искористи паралелно со други цели, максимално ја оправдува неговата имплементација, од аспект на економичност. При употребата на оваа технологија кај ваквите линиски објекти, таа може да се искористи без дополнителни трошоци и за мониторинг на стабилноста на косините. Увидот во овие снимки, може да се изврши за неколку минути, а излезните податоци се доволно јасни за да може моментално да се утврдат одредени отстапувања.

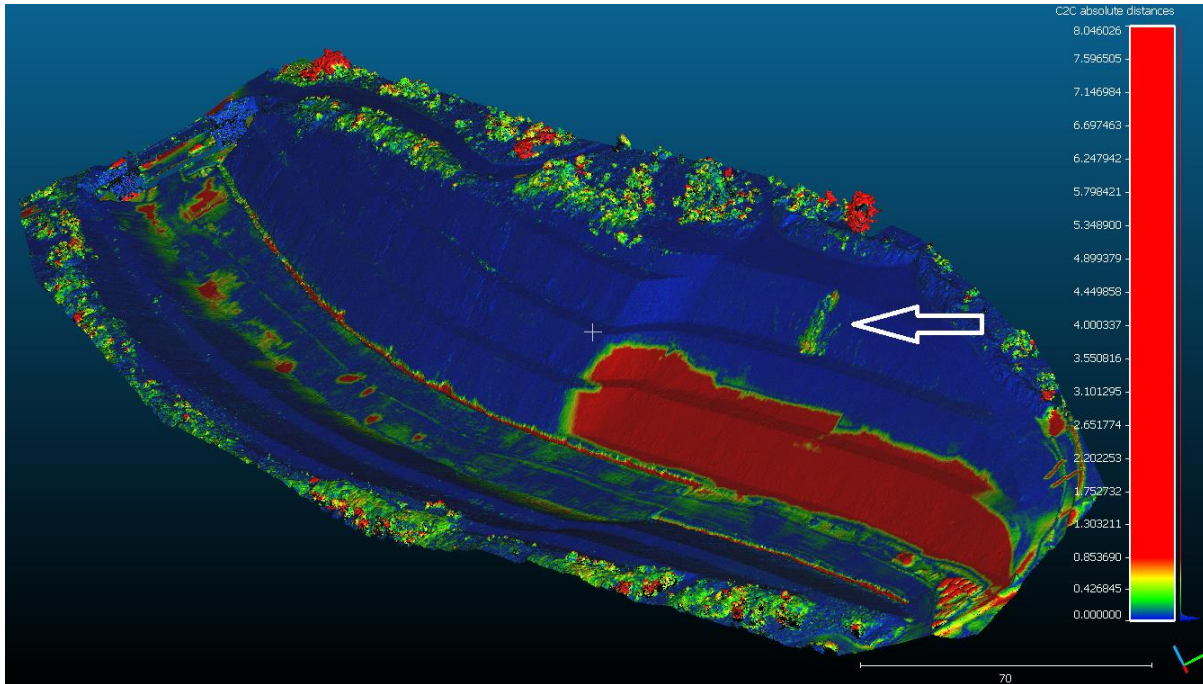
Имплементацијата на ваква постапка за мониторинг на патни и рударски косини, користејќи снимки кои првично се наменети за други цели за време на процесот на изградба, како што е прикажано во овој случај, би била многу практична. Овој пристап не носи дополнителни трошоци, го зголемува нивото на детали во проспекцијата, заменува бавни теренски инспекции со брза обработка на 3DOT и дава брзи визуелни податоци. Оваа метода се одликува со извонредна доверливост, што е докажано преку нејзината способност да открие и најситни процеси и промени.

7.6. Методологија при имплементирање дополнителни геометриски карактеристики за мониторинг и детекција

Освен користената методологија која е опишана погоре, софтверот Cloudcompare поседува неколку други опции и алатки кои може да придонесат за подобро разбирање, визуелизација и мониторинг на различни геолошки структури и различни објекти како што се патишта, рудници и др. Во овој софтверски пакет може да се пресметаат различни геометриски карактеристики како што се *Anisotropy, Eigentropy, Planarity, Surface variation, Surface roughness, Sphericity, Verticality, Normality, Roughness, Curvature, Density* и др.

7.6.1. Опис на достапните методи

Со примената на оваа технологија при снимање и мониторинг на поголеми области, секоја помала промена може лесно да се детектира. На сл. 140 се забележливи разликите кои настанале на предметниот усек во периодот помеѓу 13.12.2022 и 16.5.2023



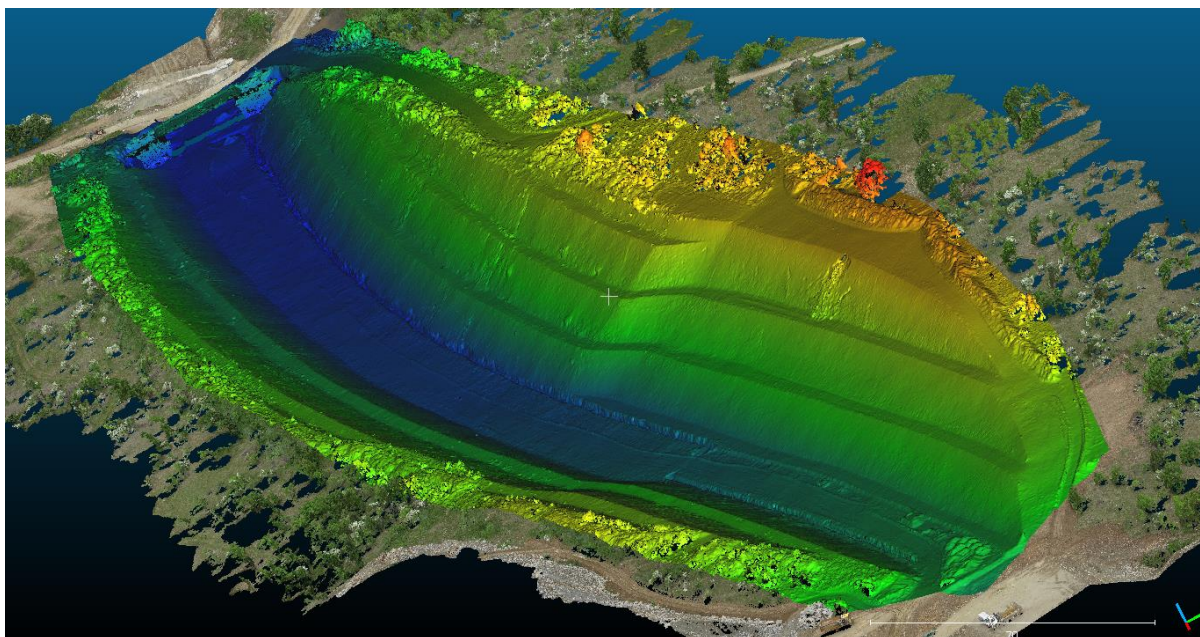
Слика 140 Промени на усек 4 во период од 5 месеци

Figure 140 Changes within 5 months at cut 4

Со темно сина боја се обоени деловите од усекот каде во периодот помеѓу двете снимања не се случиле промени на терен. Деловите со црвена боја укажуваат на делови од усекот каде се случиле најголеми промени. Најголеми разлики се забележуваат на десната страна на почетокот на усекот, каде во овој период е вршен ископ на косините. Исто така на периферијата на усекот се забележуваат поголеми разлики, кои се должат на промени во вегетацијата, со започнувањето на пролетта. Со бела стрелка е обележана промената која се случила на усекот, а која беше цел на првиот мониторинг и детекција на нестабилности, опишан во првиот дел од оваа верификација.

Опцијата за утврдување на *Normals* (нормали) во CloudCompare се користи за пресметување на нормалните вектори за точки во 3DOT. Нормалите се вектори кои се перпендикуларни (нормални) на површината што ја дефинира точковниот облак во дадена точка. Овие нормали се многу важни за различни

анализи, како што се идентификација на рамнини, класификација на точки или визуелизација на геометриски карактеристики (сл. 141).



Слика 141 Перпендикуларност (нормалност) на теренот
Figure 141 Perpendicularity (normality) of the terrain

При активирање на оваа опција, CloudCompare нуди различни методи за утврдување на насоките на нормалите: K-Nearest Neighbors (K-најблиски соседи), каде се пресметува нормала со анализа на „k“ најблиски точки околу секоја точка; и Radius (Радиус), кој нормала врз основа на точки што се наоѓаат во даден радиус околу точката. За секоја точка, нормалниот вектор е пресметан како насока која е перпендикуларна на површината.

На сл. 141, сината боја ги прикажува пониските делови, а црвената боја ги прикажува повисоките делови на сниманото подрачје. При оваа распределба на бои, може да се детектираат промени на теренот, кои се тешко воочливи при нормална визуелизација.

Нормалите се користат за подобро разбирање на геометриската структура на 3DOT, идентификација на рамни површини и групирање на точки со слични ориентации, за 3D рендерирање и осветлување, во откривање на промените во површинската ориентација, како на пример раседи или пукнатини.

Следење на косините на теренот може да се направи и од перспектива на планарност и вертикалност. Различните бои и нивните нијанси даваат сосема

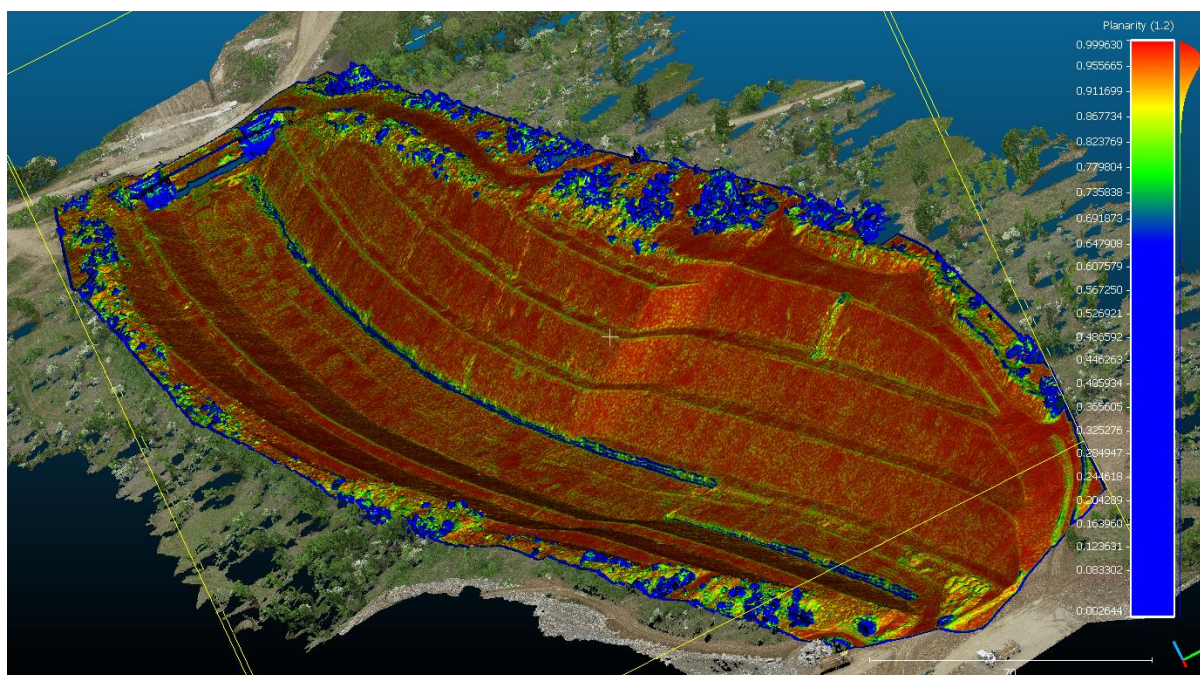
добра перспектива на можните промени кои би алармирале за грешки при ископ, но и евентуална појава на свлечишта и одрони (сл. 142 и 143).

Вертикалноста (Verticality) е добро прилагодена за разликување помеѓу вертикални и хоризонтални рамнини, додека планарноста (Planarity) ја детектира рапавоста. Планарноста е поврзана со сопствените вредности, додека во случајот на вертикалноста, таа се екстрахира користејќи ја нормалната z компонента од секоја 3D-точка. Мазноста на површината, која е донекаде поврзана со мерката на нерамност, може да се опише преку планарноста и квалитетот на вклопувањето на рамнината за проценка на нормалниот вектор.

Во CloudCompare, Planarity се користи за мерење на степенот на рамнина на точки од 3DOT. Таа пресметува колку добро точките во даден регион (локална околина) може да се вклопат во рамнина. Попрецизно кажано, се однесува на степенот до кој површината или подрачјето во сетот на податоци од облак од точки покажува планарни карактеристики, што значи дека е приближно рамна или следи рамнина. Ја користи Principal Component Analysis (PCA) за локалната околина околу секоја точка. PCA го анализира распоредот на точките во 3D простор и ги идентификува главните компоненти: Првата компонента (λ_1): Главната оска на распределбата на точките. Втората компонента (λ_2): Втората најзначајна оска. Третата компонента (λ_3): Освен ако областа е рамна, λ_3 ќе има мала вредност. Се користи следната формула:

$$Planarity = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1}$$

Каде λ_1 , λ_2 и λ_3 се сопствени вредности (eigenvalues) добиени од PCA



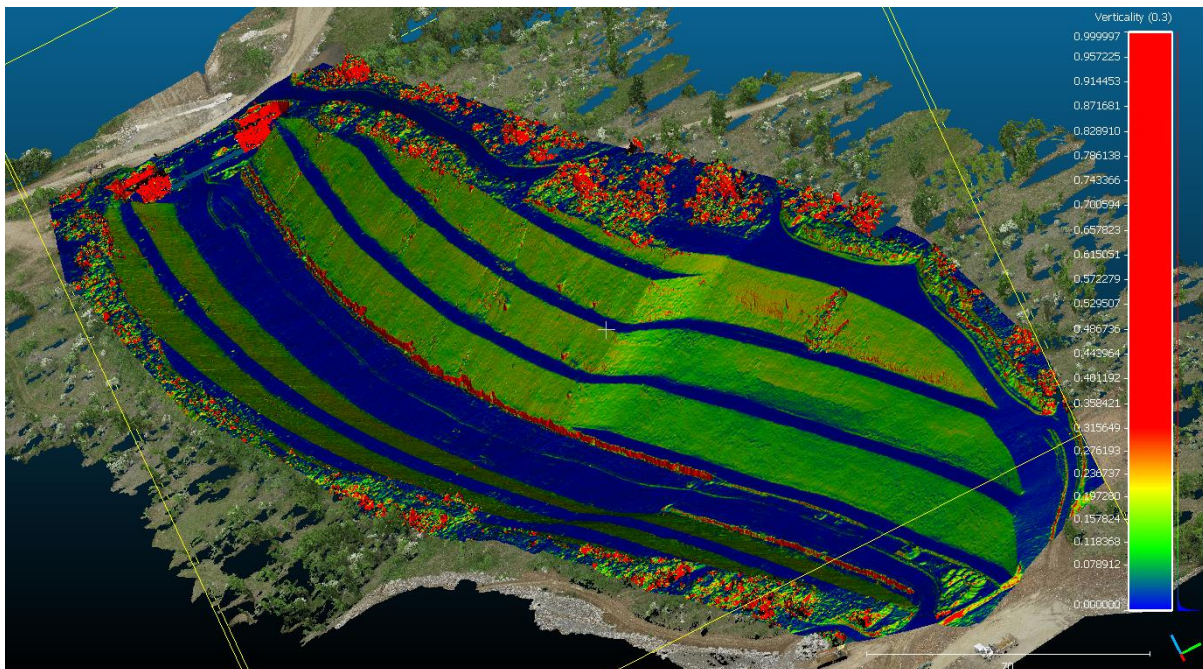
Слика 142 Планарност на теренот
Figure 142 Planarity of the terrain

На сл. 142, црвената боја укажува на висока планарност на теренот. Црвените делови претставуваат површини со висок степен на зарамнетост, каде што точките се добро распоредени за да формираат рамни површини. Во овој случај овие рамни површини се косините и бермите на усекот. Сините области претставуваат точки со ниска зарамнетост, односно неправилни или груби површини. Најмногу се видливи по рабовите на усекот, што укажува на области покриени со вегетација, нерамност на теренот или други неправилности. Деловите со жолта или зелена боја укажуваат на преодни зони помеѓу целосно рамни површини и груби, што може да сугерира на благи наклони или делови со мешана геометрија.

Планарноста често се мери како отстапување на точките во рамките на одреден регион од најдобро вклопената рамнина. Неговите алатки можат да пресметаат растојанија како што се средната квадратна девијација (RMSD) или коефициентот на детерминација (R^2) за да ја квантифицираат планарноста на површините. Дополнително, CloudCompare може да визуелизира планарни површини со прикажување во различни бои или со примена на градиенти на бои врз основа на вредностите за планарност. Анализата на планарност во податоците од 3DOT може да биде корисна за задачи како што се откривање

рамни површини кај градежни објекти, идентификација на геолошки слоеви или проценка на квалитетот на произведените компоненти. *Planarity* ќе помогне да се идентификуваат кои делови од теренот се рамни и стабилни (висока планарност) и кои се нестабилни или закривени (ниска планарност). Ова им помага на корисниците да ги разберат геометриските карактеристики на површините и да донесуваат издржани одлуки врз основа на нивните планарни својства (cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Compute_geometric_features).

Во CloudCompare, карактеристиката „Вертикалност“ се однесува на степенот до кој некоја карактеристика или објект во облак од точки е ориентирана вертикално, што обично се мери како агол на наклон од вертикалната оска (сл. 143). Verticality е метрика која ги мери аголот или односот помеѓу нормалата на површината на точката и вертикалната оска (обично Z-оска). Вредностите се движат од 0 (целосно вертикално) до 1 (целосно хоризонтално). Вертикалноста се изразува како косинус или синус на аголот меѓу нормалниот вектор на точката и Z-оската: $\text{Verticality} = 1 - |\mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}|$ каде „ $\mathbf{N}$ “ е нормалниот вектор, „ $\mathbf{Z}$ “ е единичниот вектор во насока на Z-оската, „ $\cdot$ “ претставува скаларен производ. Пресметаната вертикалност се зачувува како скаларно поле, каде што секоја точка добива вредност што ја претставува нејзината вертикалност.



Слика 143 Вертикалност на теренот
Figure 143 Verticality of the terrain

На сл. 143 со сина боја се претставени областите кои се блиски до хоризонтални, што значи дека површината на тие делови е речиси рамна. Овие зони најчесто се јавуваат во долните делови од усекот (коловозната конструкција) или на бермите. Црвените области претставуваат вертикални површини, каде што нормалите се најблиски до Z-оската. Овде оваа боја е на периферијата на усекот каде постои вегетација и други нерамнини. Зелената боја прикажува преодни зони, каде нормалите се со умерен наклон. Ова укажува на површини со кос наклон, односно косини.

Оваа карактеристика е корисна за анализа на структури како што се геолошките формации за да се утврди нивната вертикална усогласеност или отстапување од вертикалната насока. Со анализа на вертикалноста на објекти или структури, може да се процени нивната стабилност, ориентација и усогласеност во однос на вертикалната оска.

Примената на вертикалноста може да биде за анализа на вертикални структури, како што се карпести сидови или раседи, идентификација на стрмни падини за проценка на стабилност, детекција на вертикални сидови или конструкции, разликување меѓу вертикални, хоризонтални и коси површини. Користењето на овие две карактеристики паралелно дава одличен увид во различни перспективи на истражуваното подрачје. Оваа информација може да биде вредна за различни апликации, како што се структурна анализа и геолошко картирање.

Набљудувајќи го целиот усек со имплементираните карактеристики за планарност и вертикалност, лесно може да се забележат и други промени на усекот, покрај свлечиштето, кое е фокус на оваа верификација. Најзначајната разлика е дека и кај планарноста и кај вертикалноста, боите кои обично се користат за постепени промени во аголот на наклоните/рамнините се униформни во нивните транзиции. Наглата промена на тие бои исто така укажува на неправилно отстапување во планарноста и вертикалноста, што, освен што покажува неправилен ископ, може да укаже и на акумулација на нерамномерен материјал, односно појава на свлечиште.

7.6.2. Изведени заклучоци за имплементирање дополнителни геометриски карактеристики за мониторинг и детекција

Искористувањето на геометриските карактеристики извлечени од облаците од точки може да овозможи континуиран и сигурен мониторинг на усек или косина, помагајќи во раното откривање на какви било несакани проблеми. Достапноста на повеќе алатки за споредба на добиените облаци од точки може да понуди разновидни увиди за анализираната област; ако една карактеристика не успее да обезбеди сеопфатен увид, друга може да го обезбеди тоа.

Овие неколку карактеристики кои се искористија во оваа задача, даваат недвосмислена потврда за функционирањето на овие нови методологии и технологии. Користениот софтвер содржи уште и други алатки и додатоци кои може да се искористат за различни геолошки цели. Се разбира тука се и голем број на други софтвери кои можат да најдат примена во геологијата, односно структурната геологија. Останува на сенсот на научниците и инженерите како и нивната желба колку време ќе посветат сите овие достапни методи, со цел подобрување на квалитетот на податоците кои ги добиваат при анализа на вакви или слични појави.

8. ДИСКУСИЈА

Иновативната примена на методите за далечинско снимање користејќи високо-резидуални 3DOT претставува чекор напред во истражувањето на инженерско-геолошки карпести масиви.

Методите за далечинска детекција со нивниот производ-снимка, односно 3DOT имаат многу предности, а тоа се:

Снимка може да се направи на места кои се тешко пристапни за истражувачот, односно индиректно мора да ги измери структурните елементи.

Снимката може да се зачува и неброен број на пати да се разгледува, да се анализира и повторно да се обработува.

Снимката овозможува да се „зароби“ едно време на реалниот терен да ги зачува особеностите на тие карпи или изданоци кои биле потребни во тој период. Во голем број случаи теренот може да се измени со ископ, или со појава на нестабилности, или едноставно да е многу оддалечен и да не се исплаќа негова повторна посета.

Доколку се забележи дека одреден терен е под закана од појава на некои идни нестабилности, тој терен може да се мониторира на подолг период со употреба на редовни снимања. При тоа, прецизноста е таква што може да се забележи и утврди појава на пукнатини, нестабилности па дури и да се антиципира појава на поголеми одрони и свлечишта. Добиените материјали може да се споредуваат меѓу себе за најразлични цели.

Начинот на кој што моментално функционираат достапните технологии, дава ветувачки изгледи дека најверојатно може многу да се смени целиот пристап на анализа на геолошки структурни особености во Земјината кора. Се разбира, најмногу во контекст на намалување на физичкото присуство на геологот на одредени подрачја. Сепак, технологијата не може потполно да го замени сенсот што го има геологот при увид на лице место. Со овие техники, увидот на лице место може да се поткрепи на начин кој овозможува проширување на перспективите и повторна консултација или анализа. Овие технологии дозволуваат виртуелна повторна посета на геологот на одредено подрачје, нешто што во минатото било непрактично поради оддалеченост,

недоволно време или промена на изгледот на самиот терен. Доколку сето тоа е направено на еден евтин, лесно применлив начин, тоа само може да ја збогати колекцијата на достапни алатки за еден геолог.

Неповолностите при примена на современите технологии се повеќе виртуелни отколку реални:

Непознавањето на работа со Microsoft Office, или одредени други одамна применети апликации во современiot свет, би резултирало со тоа да секој што работи со овие современи техники ќе има проблем. Технички и софтверски подготвен инженер не би ги почувствувал овие негативности.

Друга негативност е правилната употреба на технологиите, поставувањето на софтверите и сè она што се обработува како податок. Додека при традиционалните методи е потребен геолошки компас, тетратка и молив, и потребно е доволно добро да се подеси компасот, овде постојат повеќе ситуации каде може да се направи пропуст: При снимање со телефонот или дронот, при обработка на добиената снимка во 3DOT, при неговото геореференцирање, при работа со виртуелниот компас, при работа и сетирање на полуавтоматските методи итн.

Една од посериозните негативности е дека снимање на поголеми површини претставува предизвик како за уредот што снима, така и за компјутерот што ги обработува податоците. Просечен компјутер би имал сериозни проблеми со обработка на поголеми податоци, така што со ова би отпаднала идејата во делот на примена на евтина технологија. Технологијата сама по себе би била достапна но не би била веќе толку евтина.

8.1. Евалуација на методологијата за детекција и мониторинг на структурно-геолошки карактеристики

Оваа верификација даде една слика која ни е позната при употребата на традиционалните методи. А тоа е дека постојат главни фактори за едно истражување да даде солидни резултати. Тоа се структурните карактеристики на изданокот, исправноста на геолошкиот компас, правилната употреба на геолошкиот компас, како и сенсот на лицето кои ги врши истражувањата, односно

неговиот аналитички пристап, будност кон непланирани проблеми и правилна ориентација во просторот. При примената на традиционалните техники некогаш се добива лепеца од различни податоци, дури и евентуални грешки, кои подоцна се проверуваат. Истиот впечаток се добива и со употребата на современите техники и методи. При употребата на овие техники во геологијата може да се забележи дека при промена на пристап, фокус, или кој било дел од целиот процес јавува промени и во добивањето на конечните резултати. Генерален впечаток е дека овие шеми на однесување на добиените резултати при употреба на традиционалните и современите техники и методи имаат многу сличен ако не и идентичен матрикс.

Мерењето со геолошкиот компас одзема релативно повеќе време споредено со работата со далечинска детекција со објаснување дека освен времето, влијанието на временските и теренските услови претставува релативен предизвик. Обработката на 3DOT одеше релативно брзо и одземаше десетина минути за облаците добиени со LiDAR и до час-два за облакот добиен со SfM. Анализирањето со виртуелниот компас беше побрзо отколку со геолошкиот компас, но обемот на податоците кој зависеше од покриеноста со геолошкиот компас, не даде некое особено забрзување на процесите на извлекување на елементите на пад. Во некои случаи требаше релативно повеќе време. Разликата ја прави тоа што за тоа време тие можат да дадат поголем број на излезни податоци, и табеларно и графички. Според критериумите податоци/време, полуавтоматската метода се покажа како неспоредливо ефикасна пред останатите. Од аспект на точност, поголема контрола имаше со виртуелниот компас, односно со геолошкиот компас.

При првата верификација беа направени мерења на изданок со геолошки компас, беа направени снимки со паметен телефон и дрон, со што се добија 3DOT кои понатаму беа обработени од аспект на извлекување структурни податоци. При тоа се направени повеќе статистички, стереограмски и други анализи. Направени беа анализи на добиените отстапувања, регресиона анализа, стереограми, статистички анализи, анализи на групи на мерења, и графикони Бланд-Алтман. Сите дадоа многу висок степен на совпаѓање на резултатите добиени од геолошкиот компас, спрема оние добиени од виртуелниот компас.

Виртуелниот компас ги има следните предности и недостатоци:

Неговите предности се дека тој овозможува мерење на ориентацијата на дисконтинуитети и површини со висока прецизност, особено на тешко достапни или ризични терени. Користењето на виртуелниот компас ги елиминира физичките ризици поврзани со работа на стрмни, нестабилни или опасни терени и со него може да се анализираат многу податоци за кратко време, што ја зголемува продуктивноста. Тој овозможува мерење на ориентации од различни агли и позиции без ограничувања од теренот и се користи кај различни 3DOT генерирани со различни технологии, LiDAR или SfM. Податоците се дигитално зачувани и можат да се прегледуваат или повторно да се анализираат во иднина, што ја зголемува транспарентноста и репродуктивноста на истражувањето.

Негативни страни кај виртуелниот компас се тоа што прецизноста на мерењата директно зависи од резолуцијата и точноста 3DOT. Облаци со мала густина или многу „шум“, можат да доведат до неточни мерења. На неправилни или многу закривени површини, мерењето ориентации може да биде потешко или помалку прецизно. За разлика од геолошкиот компас кој може да игнорира микро-неправилности на снимената површина, виртуелниот компас може да ги измери и нив, што може да даде неточни или сложени податоци.

Кога станува збор за DSE, научната заедница го цени за неговата способност да обезбеди детална и квантификативна анализа, што помага во подобро разбирање и управување со геолошки податоци. Сепак, како и секој софтвер, успехот на неговата примена зависи од точноста на влезните податоци и од соодветноста на алгоритмите за специфичните услови на секоја истражувана област. Опциите за подесување на алгоритмите се огромни, и при тоа е овозможен пристап на визуелни, табеларни, процентуални и стереограмски прикази. Во оваа докторска дисертација, кај сите три проучувани локалитети се добија различни позитивни ефекти од употребата на овој софтвер.

DSE-софтверот ги има следниве предности: автоматизирана анализа, прецизност во идентификацијата, класификација на дисконтинуитети, визуелизација, интеграција со други алатки.

Недостатоците се: зависност од квалитетот на податоците, потреба за мануелна верификација, ограничени параметри за персонализација, високи барања за хардвер.

Придобивки од користење на DSE би биле следните: DSE овозможува брза и ефикасна анализа на големи сетови податоци. Тој овозможува висок степен на прецизност во идентификацијата и карактеризацијата на дисконтинуитетите и дава широка понуда на напредни опции за визуелизација кои ја олеснуваат интерпретацијата на структурните карактеристики.

Разликите во резултатите помеѓу директните мерења и оние добиени преку DSE не се големи и обесхрабрувачки; тие се драгоцен дел од научниот процес кој обезбедува длабоко разбирање на методологиите и нивните ограничувања. Објаснувањето на овие разлики ќе го зголеми нејзиното научно вреднување и ќе понуди важни увиди за подобрување на методите во иднина. Може да се каже дека овој полувтоматизиран процес поставува здрава основа врз основа на која може да се очекуваат придобивки во ова, но и на други полиња каде се разработува слична тематика. Се разбира резултатите кои ги исфрла DSE како полуавтоматска метода, секогаш можат да бидат и подобри, а тоа се постигнува со промена на основните параметри кои се задаваат на софтверот а се објаснети во претходните поглавја. Постои неограничен број на можности на сетирање и дотерување на резултатите, за што нема доволно место во овој текст.

FACET-плагин во CloudCompare со своите алгоритми ги има следниве предности и недостатоци:

KKD-tree ги има следниве предности: Прецизно делење на облак од точки, брзина на обработка, автоматизирано вклопување на точки, флексибилност и може да се користи за широк спектар на геометриски анализи. Недостатоци се зависноста од добро поставени параметри, добивањето на комплексни структури и потреба од поголема меморија кај компјутерот.

Fast Marching ги има следниве предности: Еднаква распределба на делови, конзистентност, добро справување со сложени структури. Недостатоци се: Осетливост на „бучава“ во податоците, помалата прецизност и помалата контрола врз сегментацијата. Исто така бара посоефистицирано поставување и

оптимизација за да се добијат точни резултати. Во овој случај тој не беше на висина на задачите поставени при верификацијата на овие методи.

Кога би ги споредиле двете полуавтоматски методи може да се каже дека DSE е побрз и поавтоматизиран метод кој е одличен за брза анализа на големи сетови на податоци, особено кога е потребно брзо класифицирање на дисконтинуитети. Од друга страна, FACETS нуди поголема флексибилност и деталност, но бара поголем степен на мануелна работа и фино подесување. Во овој случај DSE се покажа како многу корисен и често и многу прецизен. FACETS со Kd-tree даде подоверливи резултати отколку со Fast Marching. DSE има голем потенцијал за работа со вакви проблеми, додека не може да го кажеме истото за FACETS. Може да се каже дека за добивање најдобри резултати, препорачливо е да се користат двата метода комплементарно, во зависност од конкретните потреби на истражувањето.

На база на разликите и особеностите на рачното и полуавтоматското собирање на податоците за дисконтинуитети, може да се извлече следниов заклучок:

Споредбата меѓу рачното собирање на податоци со геолошки компас и полуавтоматските методи како оние што ги користи DSE покажува дека секој пристап има свои предности и ограничувања. Рачното собирање податоци овозможува директен контакт со теренот и детално проучување на значајни структурни формации, што може да даде прецизни и насочени информации за критичните карактеристики на карпата. Геолозите можат да одбираат кои рамнини да ги анализираат, фокусирајќи се на најрелевантните за нивната студија. Ова резултира со висок степен на контрола врз квалитетот на податоците и овозможува флексибилност во адаптација на методите во зависност од специфичните услови на теренот.

Од друга страна, полуавтоматските методи нудат брзина и објективност во обработката на податоците, обезбедувајќи широка и комплексна анализа на сите видливи површини, вклучувајќи ги и оние што може да бидат занемарени во рачниот пристап. Иако овие методи нудат голема количина на податоци и можат да откријат шеми кои не се веднаш видливи за геологот на теренот, тие се ограничени од точноста на технологијата за собирање податоци и на нив

влијание може да имаат вегетацијата и други екстерни фактори кои ја нарушуваат видливоста.

За оптимални резултати во геолошките истражувања, најдобро би било да се користи комбиниран пристап. Рачното собирање на податоците би се користело за детална анализа на критични и стратешки значајни рамнини, додека полуавтоматските методи би се искористиле за широка анализа и верификација на податоци. Ова би овозможило користење на силните страни на двата пристапа, минимизирајќи ги при тоа нивните ограничувања.

На крај на верификацијата на оваа методологија се дојде и до реализација на првичната идеја: Постепено, преку запознавање со технологијата да се дојде до одржливи и економични резултати. Кај третиот локалитет се минимизираа потребните технологии со исфрлање на скапиот GPS-уред, и потребата од вклученост на повеќе стручни лица.

8.2. Евалуација на методологијата за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености

Користењето на овој вид проспекција и мониторинг овозможува рано откривање на нестабилности, овозможувајќи навремена имплементација на соодветни мерки за подобрување на безбедноста на работниците и машините кои работат во специфични области. Оваа постапка исто така може да се препорача за мониторинг на косините и за време на експлоатацијата на патот. Истата препорака може да се даде и за мониторинг на косините при работа во рудниците.

Недостигот на континуираното и систематизираното прибирање на податоци за свлечишта и други нестабилности кај патната и рударската инфраструктура, може делумно да се компензира со воведување методологии на мониторинг на косините и други критични позиции кај овие објекти, а со тоа би се реализирале повеќе цели:

- подобро разбирање на геолошките и геотехничките услови кај овие објекти,

- зголемување на нивото на безбедност при работа на овие објекти и можноста за навремена евакуација или престанок на работите пред настанување на поголема опасност,
- предвидување на однесувањата на други делови на објектот каде постојат слични геолошки услови,
- обезбедување безбедна експлоатација на патната инфраструктура,
- мониторинг на веќе настанати нестабилности, утврдување на нивните димензии, брзина на движење и добивање на останати вредни податоци,
- зголемување на базата на податоци, а со дигитализацијата и овозможување овие податоци да се споделуваат и да се користат од други субјекти како што се органи на власта, научни институции и др.,
- евалуација и подобрување на користената опрема а со тоа и можност за нејзина надградба со цел зголемување на точноста, прецизноста и достапноста.

При верификација на оваа метода, се употребија сите достапни материјали за детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености кај еден усек. При тоа се обработија 3DOT на едно потесно подрачје каде извесен период има појава на локална нестабилност на косина. Со многу висока точност се утврдија два важни заклучоци:

- локалната нестабилност се појавила пред нејзината визуелна детекција,
- локалната нестабилност е сè уште активна и покрај тоа што визуелно не се детектираат брзи или бавни промени кај свлечиштето.

Овие заклучоци се суштински при ваков тип на анализи. Големата точност дава повеќе од задоволителни можности при употребата на ваквата технологија во геологијата.

При употреба на некои дополнителни геометриски карактеристики кои ги поседува софтверот CloudCompare, се добија дополнителни резултати и прикази кои се во функција на подобро разбирање на состојбата на теренот, како и полесна детекција и мониторинг на неговите различни промени.

Предностите на овие дополнителни геометриски карактеристики во геологијата се во делот на детекција на рамни, хоризонтални, вертикални и коси

површини, нивната рапавост, како и промени низ текот на времето. Исто така тие можат да обработат поголеми површини за кратко време и да дадат снимки со висока резолуција. Со нивната употреба се намалува потребата од теренска работа или работа кај тешко пристапни локации или опасни терени. Овие дигитални податоци можат да се зачуваат во различни форми и да се употребуваат повторно.

Негативности се нивната зависност од густината на обработуваниот 3DOT, неговата прецизност и присуството на „бучава“. Големите 3DOT можат да бидат предизвик за послаби компјутерски конфигурации.

9. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ

Целта на оваа докторска дисертација е да се обединат различни методологии, техники и да се направат комбинации помеѓу повеќе типови на пристапи на современите технологии во однос на барањата во структурната геологија. Иако се зборува за современи методологии, сепак тие меѓу себе се многу различни, создадени во различни временски периоди од стручњаци од разни области, за различни цели. Со имплементирањето на овие различни технологии, се докажува дека тие се компатибилни меѓу себе. При тоа се изврши верификација на основната идеја за воведувањето на паметниот телефон како алатка за собирање структурни податоци, а се верифицираше и употребата на 3DOT при детекција и мониторинг на структурно-геолошки особености.

Низ верификацијата на добиените податоци, нивна споредба и валидизација со повеќе или помалку познати методи, софтвер и хардвер, се презентираа техники и методи кои ги дополнуваат потребите на геологијата во овие нови времиња. Се разбира, и понатаму постојат огромен број на можности кои се на располагање на инженерската и научната фела.

Позитивните и негативните заклучоци се наведени во претходните поглавја. Генералниот заклучок се однесува на следново:

При првиот чекор во анализата и верификација на методологијата беа направени структурни анализи со употреба на традиционални и современи методи на три различни изданоци кај три локалитети. Современите техники ја применија далечинската детекција при што се имплементираа неколку различни методи и пристапи за обработка и анализа на тие податоци. Во соодветен софтвер со рачна обработка се добиваа соодветни елементи на пад. Дополнително со употреба на полуавтоматски методи се добија и други начини и сосема друг тип на повратни структурни, табеларни и визуелни информации.

Кај вториот чекор при верификација на методологијата, се прикажаа дополнителни придобивки од методите, техниките, хардверот и софтверот кои беа користени во првата верификација, за сосема друга потреба, односно детекција и мониторинг на структурни особености кои би се примениле во контекст на следење на стабилноста на косини кај патишта и рудници. Снимките кои беа користени се добиени за други цели, односно за пресметка на количини

при ископ или насип, не бараа дополнителни трошоци. Од аспект на точност, може да се каже дека за овие потреби во геологијата, точноста на користените снимки е задоволителна.

Со оглед на тоа дека предностите ги надминуваат недостатоците кај овие нови методи, а имајќи го предвид и забрзаниот развоток на технологијата, прашање на време е кога овие нови технолошки помагала успешно ќе може да се користат исто како и геолошкиот компас. Се разбира, во никој случај не може да се исфрли геолошкиот компас од употреба. Неговата корисност останува неспорна иако новите технологии достигнуваат многу голема прецизност. Фактот што овие податоци се снимаат на многу јасен и достапен начин, а потоа може да се користат неброен број на пати, дава за сигурност дека овие технологии ќе се наметнат на идните инженери и научници. Исто така, со запознавањето на овие технологии со поголем број на инженери, со напорите за нивно имплементирање, повторливоста на постапките и учењето на грешките може да придонесе за надминување на недостатоците и нивна поефективна примена.

И покрај високиот степен на точност што го овозможува користењето на технолошките придобивки, теренската работа има клучна улога во запознавање со карактеристиките на кој било терен, како и максимално препознавање и карактеризирање на присутните дисконтинуитети. И покрај сите напредоци во технологијата, сепак инженерите и геолозите треба да го добијат своето искуство на терен. *Доброто познавање на геолошката предиспозиција и процесите на теренот, во комбинација со силна геотехничка основа, е клучно за правилна интерпретација на добиените резултати од овие современи методологии.*

Треба да се потенцираат следниве очекувања и препораки:

- Кога станува збор за iPhone и неговата употребливост, во блиска иднина може да се очекува да постојат апликации кои на лице место не само што ќе го снимаат теренот, туку и веднаш ќе ги извлечат податоците за елементите на пад. Исто така, за очекување е и останатите производители на телефони да ја имплементираат оваа технологија, со што би се зголемила достапноста и економичноста на оваа опција.

- Реални се очекувањата дека и вештачката интелигенција ќе даде свој придонес во напредокот на сите овие и други методи и технологии во насока на подигнување на степенот на точност и доверливост.
- Доколку површински коп, или линиски објект како што е пат или железничка пруга во изградба секојдневно се снима со употреба на овие технологии, податоците од 3DOT можат да бидат достапни преку интернет, така што секој ќе може да пристапи до податоците од каде било преку своите телефони, таблети или компјутери. Овие податоци потоа би се користеле за следење на косините, за евентуални движења или промени како и за добивање точни волумени на ископ, изминиран материјал или изработен насип. Геолошките пукнатини, раседи, стратиграфските и хидролошките карактеристики исто така би можело да бидат автоматски извлечени од 3DOT. Овие податоци може да се спојат со јавни геолошки и владини бази на податоци, како и на увид на изведувач, надзор, инвеститор, преку интернет пристапот кој ќе им овозможи на сите страни да пристапат до анализите и да донесуваат одлуки. Ова ќе овозможи заштеда на големи средства, брзо отплатувајќи ја инвестицијата во хардверските и софтверските барања на системот.
- Иднината на користењето на 3DOT во геологијата и сите поврзани гранки лежи во поголема автоматизација и поврзувањето на добиените податоци. За да се подигне ова на следното ниво, софтверските компании треба да ги интегрираат сите овие податоци во формат кој може да ги поврзе сите достапни податоци за анализа, моделирање и инженерски дизајн.

Во рамките на оваа дисертација е започнато со работа на верзија на полуавтоматски софтвер за детекција на структурни особености кај карпести површини. Во овој момент, сè уште е рано да се зборува за финални резултати, но со понатамошен ангажман е извесно дека ќе се добијат конкретни исходи. Секој може да се вклучи во овие процеси и да се обиде да даде свој придонес, како во геологијата, така и во напредокот на технологијата воопшто.

Тука може да се потенцира, дека тоа беа и основните цели поставени при изработката на дисертацијата, односно да се создадат услови за помасовна примена во практиката, но и да се создадат полиња за идни научни анализи, што само по себе наметнува потреба од создавање соодветни академски и финансиски услови за натамошен развој.

10. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abellan, A., Jabuedoff M., Oppikofer T. and Vilaplana, M. (2009). Detection of millimetric deformation using terrestrial laser scanner: experiment and application to rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Sciences* Vol 9, Issue 2, 365-372. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-365-2009>.
- [2] Abellan, A., Calvet, J., Vilaplana, J.M. and Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology* 119: 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.016>.
- [3] Abolmasov, B., Marjanović, M., Milenkovic, S., Pejic, M. and Berisavljevic, Z., (2018). Rockfall simulation on a rock slope along E75 road at km 890+725 to 891+093. *XVI Danube - European Conference on Geotechnical Engineering 07-09 June 2018, Skopje, R. Macedonia*. 269-274. <https://doi.org/10.1002/cepa.682>.
- [4] Achille, C., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Fassi, F., Fregonese, L. and Taffurelli, L. (2015). UAV-based photogrammetry and integrated technologies for architectural applications-methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy). *Sensors* 2015, 15, 15520–15539 <https://doi.org/10.3390/s150715520>.
- [5] Alexander, S., Larson, E. Bomberger, C., Greenwaldt, B., Alexander Jr, E. and Rahimi, M. (2013). Combining LiDAR, aerial photography, and pictometry tools for karst features database management. *Proc. of the XIII Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2. 441-448.
- [6] Alidoost, F. and Arefi, H. (2015). An image-based technique for 3D building reconstruction using multi-view UAV images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015; XL-1/W5, 43–46. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-43-2015>.
- [7] Allmendinger, R., Cardozo, N. and Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*. Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-01200-4. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920202>.

- [8] Altman, D.G. and Bland J.M. (1983). Measurement in medicine: The analysis of method comparison studies. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)* Vol. 32, No. 3 (Sep. 1983), pp. 307-317. <https://doi.org/10.2307/2987937>.
- [9] Armesto, J., Ordonez, C., Alejano, L. and Arias, P. (2009). Terrestrial laser scanner used to determine geometry of granite boulder for stability analysis purposes, *Geomorphology*, Vol. 106, Issues 3–4, 15 May 2009, Pages 271-277 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.11.005>.
- [10] Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N. and Viguiet, F. (2016). Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities. *Comput. Geosci.* 89, (3-4) 21–31 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.002>.
- [11] Baldo, M., Bicocchi, C., Chiocchini, M., Giordan, D. and Lollino, G. (2009). LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicotani landslides, Province of Sienna, Central Italy. *Geomorphology* 105 (3): 193-201 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.015>.
- [12] Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: ISRM, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319-368.
- [13] Battulwar, R., Emami, E., Naghadehi, M.Z. and Sattarvand, J. (2020). Automatic extraction of joint orientations in rock mass using PointNet and DBSCAN. *Lecture Notes in Computer Science*, 12510. Springer, Cham, Switzerland, p718–727. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64559-5_57.
- [14] Bedford, J. (2017). *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage; Historic: Swindon, UK*, p. 128.
- [15] Bland, J. M. and Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, Vol. 327 Issue 8476, p.307-310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8).
- [16] Bland, J.M. and Altman, D.G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research* 8: 135-60 <https://doi.org/10.1177/096228029900800204>.

- [17] Brook, M. and Tunnicliffe J. (2018). Rapid, cost-effective 3D monitoring of urban landslide displacements using UAV-Structure from Motion (SfM) (3714483).
- [18] Brook, M.S. and Merkle J. (2019). Monitoring active landslides in the Auckland region utilizing UAV/structure-from-motion photogrammetry. Japanese Geotechnical Society Special Publication 6(2): 1-6. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v06.GIZ01>.
- [19] Buckley, S.J., Kurz, T.H., Howell, J.A. and Schneider, D. (2013). Terrestrial lidar and hyperspectral data fusion products for geological outcrop analysis. Comput. Geosci. 54, 249–258 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.018>.
- [20] Campbell B. J. and Wynne H. R. (2011). Introduction to remote sensing-fifth edition. The Guilford Press. ISBN 978-1-60918-176-5.
- [21] Cardia, S., Palma, B., Langella, F., Pagano, M. and Parise, M. (2023). Alternative methods for semi-automatic clusterization and extraction of discontinuity sets from 3D point clouds. Earth Science Informatics. 16(3): 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01029-0>.
- [22] Carvajal, F., Aguera, F., and Perez, M. (2011). Surveying a landslide in a road embankment using unmanned aerial vehicle photogrammetry. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22: 201–206. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-201-2011>.
- [23] Chen, J., Zhu, H. and Li, X. (2016). Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. Comput. Geosci. 95, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.015>.
- [24] Chen, K. and Jiang, Q. (2023). A non-contact measurement method for rock mass discontinuity orientations by smartphone. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Volume 15, Issue 11, P.2892-2900 <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.002>.
- [25] Chen, N., Kemeny, J., Jiang, Q. and Pan, Z. (2017). Automatic extraction of blocks from 3D point clouds of fractured rock. Comput. Geosci. 109 (2), 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.08.013>.

- [26] Chen, N., Cai, X., Li, S., Zhang, X. and Jiang, Q. (2020). Automatic extraction of rock mass discontinuity based on 3D laser scanning Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology Vol. 54(1) <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-054>.
- [27] Chen, N., Wu, X., Xiao, H., Yao, C. and Cheng, Y. (2024). Semi-automatic recognition of rock mass discontinuity based on 3D point clouds SN Applied Sciences 6:230 | <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05876-4>.
- [28] Chen, W., Li, X., Qin, X. and Wang, L. (2024). Geological Remote Sensing: An Overview. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8997-3_1.
- [29] Coggan, J.S., Wetherelt, A., Gwynn, X.P. and Flynn, Z.N. (2007). Comparison of hand-mapping with re-mote data capture systems for effective rock mass characterization. In Proceedings of 11th Congress of the ISRM – p. 201-205.
- [30] Colomina, I. and Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing. ISPRS Journal of Photogramm. Remote Sens. 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- [31] Daghigh, H. (2022). Efficient automatic extraction of discontinuities from rock mass 3D point cloud data using unsupervised machine learning and RANSAC. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy at the University of British Columbia.
- [32] Damjanović, V., Mihalić A., Gazibara, S., Peranić, J., Sečanj, M., Krkac, M., and Arbanas, Z. (2021). Landslide Mapping Based on UAV Photogrammetry Using SfM—The Prnjavor Čuntićki Landslide Case Study, Croatia. In Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_9.
- [33] De Paor, D.G. (1996). Structural Geology and Personal Computers. Department of Earth and planetary Sciences Harvard University 1996 ISBN 0 08 042430 9.
- [34] Delgado-Reivan, X., Paredes-Miranda, C., Loaiza, S., Echeverria, M.D.P.V., Mulas, M. and Jordá-Bordehore, L. (2023). Stability Analysis of Rocky Slopes on the Cuenca–Girón–Pasaje Road, Combining Limit Equilibrium Methods, Kinematics, Empirical Methods, and Photogrammetry. Remote Sensing 15 (3) 862. <https://doi.org/10.3390/rs15030862>.
- [35] Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C. and Rohmer, J. (2016). Facets: A CloudCompare Plugin to Extract Geological Planes from Unstructured 3D Point

Clouds International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B5 799-804 <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016>.

[36] Djuric, U., Abolmasov, B., Petrovic, D., Marjanovic, M., and Kuzmic, P. (2013). Portable geotechnics – Using android smartphones and tablets for geotechnical field investigations 13th SGEM GeoConference Volume: I <https://doi.org/10.5593/SGEM2013/BB2.V1/S08.028>.

[37] Donovan, J., Kemeny, J. and Handy, J. (2005). The application of three-dimensional imaging to rock discontinuity characterization. Paper ARMA/USRMS 05-745 presented at the 40th US Symposium on Rock Mechanics.

[38] Drews, T., Miernik, G., Anders, K., Höfle, B., Profe, J., Emmerich, A. and Bechstädt, T. (2018). Validation of fracture data recognition in rock masses by automated plane detection in 3D point clouds. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 109, 19–31 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.023>.

[39] Du, S., Lin, H., Yong, R. and Liu, G. (2022). Characterization of joint roughness heterogeneity and its application in representative sample investigations. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(6) 1-25 <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02837-4>.

[40] Dunning, S. A., Massey, C. I., and Rasser, N.J. (2009). Structural and geomorphological features of landslide in the Buthan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning, Geomorphology, 103, (1):17-29 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.04.013>.

[41] Esposito, G., Salvini, R., Matano, F., Sacchi, M., Danzi, M., Somma, R. and Troise, C. (2017). Multitemporal monitoring of a coastal landslide through SfM-derived point cloud comparison. The Photogrammetric Record. 32 (160). 459-479. <https://doi.org/10.1111/phor.12218>.

[42] Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., Voyat, H.I. (2009). Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization. Rock Mech. Rock Eng. 42, 631–665 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00603-008-0010-4>.

- [43] Fithrotin N., Yusoff A., Ismail Z., and Majid Z. (2018). Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLII-4/W9. 11-21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018>.
- [44] Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L. and Carbonneau, P. E., (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. Earth Surface Processes and Landforms, 38(4): 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>.
- [45] Fritsch, D., Becker, S., Rothmel, M. (2013). Modeling Façade Structures Using Point Clouds from Dense Image Matching. In Proceedings of the International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, pp. 57–64.
- [46] Furukawa, Y.; Ponce, J. (2009). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32(8), 1362–1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>.
- [47] Ge, Y., Tang, H., Xia, D., Wang, L., Zhao, B., Teaway, J. W., Chen, H. and Zhou, T. (2018). Automated measurements of discontinuity geometric properties from a 3D point cloud based on a modified region growing algorithm Engineering Geology 242 44–54 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.007>.
- [48] Ge, Y., Cao, B., Chen, Q. and Wang Y. (2023). Rock joint detection from 3D point clouds based on color space. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology Volume 56(4) <https://doi.org/10.1144/qjegh2023-012>.
- [49] Gigli, G. and Casagli, N. (2011). Semi-automatic Extraction of Rock Mass Structural Data from High-Resolution LiDAR Point Clouds Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sc. 48(2) 187 – 198. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.009>.
- [50] Glastonbury, J., Fell, R., (2000). Report on the Analysis of “Rapid” Natural Rock Slope Failures. University of New South Wales. School of Civil and Environmental Engineering. Report No. R390. ISBN: 0858413574.
- [51] Gomes, R.K., de Oliveira, L.P.L., Gonzaga, L., Tognoli, F.M.W., Veronez, M.R. and de Souza, M.K.: An algorithm for automatic detection and orientation estimation of

planar structures in LiDAR-scanned outcrops. *Comput. Geosci.* 90, 170–178.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.011>.

[52] Grenzdörffer, G.J., Naumann, M., Niemeyer, F. and Frank, A. (2015). Symbiosis of UAS Photogrammetry and TLS for Surveying and 3D Modeling of Cultural Heritage Monuments—A Case Study About the Cathedral of St. Nicholas in the City of Greifswald. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015, XL-1/W4, 91–96. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-91-2015>.

[53] Groshong, R. H. (2006). 3-D Structural Geology A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation Second Edition. Library of Congress ISBN 3-540-65422-4 <https://doi.org/10.1007/978-3-540-31055-6>.

[54] Grussenmeyer, P., Al Khalil, O. (2002). Solutions for exterior orientation in photogrammetry: A review. *The Photogrammetric Record* 2002, 17, 615–634.
<https://doi.org/10.1111/0031-868X.00210>.

[55] Grussenmeyer, P., Landes, T., Alby, E. and Carozza, L. (2010). High Resolution 3D Recording and Modelling of the Bronze Age Cave “Les Fraux” in Perigord (France). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2010, XXXVIII, 262–267.

[56] Guo, J., Wu, L., Zhang, M., Liu, S. and Sun, X. (2018). Towards Automatic Discontinuity Trace Extraction from Rock Mass Point Cloud without Triangulation. *Int. Journal of Rock Mechanic and Mining Science* 2018, 112, 226–237.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.023>.

[57] Guo, J., Zhang, Z., Mao, Y., Liu, S., Zhu, W. and Yang, T. (2022). Automatic Extraction of Discontinuity Traces from 3D Rock Mass Point Clouds Considering the Influence of Light Shadows and Color Change. *Remote Sens.* 14(21), 1-19.
<https://doi.org/10.3390/rs14215314>.

[58] Habib, A. (2008). Accuracy, quality assurance and quality control of LIDAR data, Chap 9. In: *Topographic laser ranging and scanning*: pp 269–294
<https://doi.org/10.1201/9781420051438.ch9>.

[59] Hanan, H., Suwardhi, D., Nurhasanah, T. and Bukit, E.S. (2015). Batak Toba Cultural Heritage and Close-range Photogrammetry. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 184, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.05.079>.

- [60] Haneberg, W.C., Norrish, N.I. and Findley, D.P. (2006). Digital outcrop characterization for 3-D structural mapping and rock slope design along interstate 90 near Snoqualmie Pass, Washington. In Proc. 57th annual Highway Geology Symp., Breckenridge, Colorado.
- [61] Haneberg, W.C. (2007). Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In Rock Mechanics Symp., Vancouver, 101-106. <https://doi.org/10.1201/NOE0415444019-c13>.
- [62] Hayakawa, Y., Obanawa, H., Saito, H. and Uchiyama, S. (2016). SfM/ Geomorphological Applications of Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry: A Review, Transactions, Japanese Geomorphological Union, 2016, Volume 37, Issue 3, Pages 321-343 https://doi.org/10.60380/tjgu.37.3_321.
- [63] Hiremagalur, J., Yen, K.S., Akin, K., Bui, T., Lasky, T.A. and Ravani, B. (2007). Creating standards and specifications for the use of laser scanning in CalTrans projects. Technical report no F/CA/RI/2006/46, California Department of Transportation, US.
- [64] Hirschmüller, H. (2005). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., 2, 807–814. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.56>.
- [65] Hobbs, B. E., Means, W. D. and Williams, P. F. (1976). An Outline of Structural Geology. John Wiley & Sons, Inc., New York, New York ISBN-10: 0471401579.
- [66] Ivanovski, I., Nedelkovska, N., Petrov, G., Jovanovski, M. and Nikolovski, T. (2023). Comparison between traditional and contemporary methods for data recording in structural geology. Journal Geologica Macedonica (37):119-133. <https://doi.org/10.46763/GEOL23372119i>.
- [67] Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M. H., Locat, J. and Turmel, D. (2007). New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. In: Rock mechanics: Meeting Society's challenges and demands. Proceedings of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada. pp. 61–68 <https://doi.org/10.1201/NOE0415444019-c8>.

- [68] Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philipossian, F. and Rouiller, J. D. (2008). Assessing the Fracture Occurrence using the „Weighted fracturing density“: a Step Towards Estimating Rock Instability Hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4 (1), pp.83-93. fahal-00299073.
- [69] Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M-H. Loye, A., Metzger, R. and Pedrazzini, A. (2012) Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* 61: 5–28 <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>.
- [70] Jafari B.M., (2016). Deflection Measurement Through 3D Point Cloud Analysis. Thesis. Master of Science Civil and Infrastructure Engineering. George Mason University.
- [71] Jiménez-Jiménez, S.I., Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, M.d.J. and Enciso, J. (2021). Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry. Methodology and Accuracy. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021, 10(5), 285. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>.
- [72] Kang, J., Fu, X., Sheng, Q., Ge, Y., Chen, J. and Wang, H. (2024). Semi-automatic identification of rock discontinuity orientation based on 3D point clouds and its engineering application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 83(5). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03681-2>.
- [73] Kartini, G. A. J., Gumilar, I., Abidin, H. Z. and Yondri, L. (2021). The comparison of different LiDAR acquisition software on iPad Pro M1 2021. *The Int. Arch. of the Photogram., Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLVIII-2/W1-2022 Germany.
- [74] Kloeker, L., Geller, C., Kloeker, A. and Eckstein, L. (2020). High-Precision Digital Traffic Recording with Multi-LiDAR Infrastructure Sensor Setups. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) <https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294543>.
- [75] Kong, D., Wu, F. and Saroglou, C. (2019). Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds, *Engineering Geology* (265:105442), <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105442>.

- [76] Krosley, L.K., Shaffner, P.T., Oerter, E. and Ortiz, T. (2006). Digital ground-based photogrammetry for measuring discontinuity orientations in steep rock exposures. In Proc. 41st U.S. Symp. on Rock Mechanics ARMA, Golden, June 2006, Paper No. ARMA-06-1026.
- [77] Kurz, T.H., Buckley, S.J., Howell, J.A. and Schneider, D. (2011). Integration of panoramic hyperspectral imaging with terrestrial lidar data. Photogramm. Rec. 26(134), 212–228 <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00632.x>.
- [78] Lai, P., Samson, C. and Bose, P. (2014). Surface roughness of rock faces through the curvature of triangulated meshes, Comput. Geosci. 70 (4) 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.05.010>.
- [79] Lato, M., Diederich, M.S., Hutchinson, D.J. and Harrap, R. (2009a). Optimization of LIDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 46, Issue 1, p. 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.04.007>.
- [80] Lato, M., Hutchinson, D.J., Diederich, M.S., Ball, D. and Harrap, R. (2009b). Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LIDAR. Natural Hazards and Earth System Sciences 9, 935-946. May 2009 Natural Hazards and Earth System Sciences 9(3) <https://doi.org/10.5194/nhess-9-935-2009>.
- [81] Lato, M.J., Vöge, M. (2012). Automated mapping of rock discontinuities in 3D LIDAR and photogrammetry models. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 54, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003>.
- [82] Lato, M., Kemeny, J., Harrap, R. M. and Bevan, G. (2013). Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry. Comp. & Geosciences 50 106–114.
- [83] Leng, X., Xiao, J. and Wang, Y. (2016). A multi-scale plane-detection method based on the Hough transform and region growing. Photogramm. Rec. 31(154), 166–192 <https://doi.org/10.1111/phor.12145>.

- [84] Li, X., Chen, Z., Chen, J. and Zhu, H. (2016). A new method for automated discontinuity trace mapping on rock mass 3D surface model. *Computers & Geosciences* 89 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.12.010>.
- [85] Li, X., Chen, Z., Chen, J. and Zhu, H. (2019). Automatic Characterization of Rock Mass Discontinuities Using 3D Point Clouds. *Eng. Geol.*, 259(1), 105131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.008>.
- [86] Li, Y.Y., Wang, Q., Chen, J.P., Xu, L.M. and Song, S.Y. (2015). K-means algorithm based on particle swarm optimization for the identification of rock discontinuity sets. *Rock Mech. Rock Eng.* 48 (1), 375-385. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0569-x>.
- [87] Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M. and Vastaranta, M.: (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 115, 63–77 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>.
- [88] Lisle, R. J. and Leyshon, P. R. (2004). *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. 2nd ed. viii+112 pp. Cambridge University Press ISBN-13 978-0-521-82890-1.
- [89] Lu, G., Cao, B., Zhu, X., Bai, D., Tao, C., Li, Y. and Lin, Z. (2024a). Identification of rock mass discontinuity from 3D point clouds using improved fuzzy C-means and convolutional neural network. *Bull Eng Geol Environ* 83(5), 1-18 <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03658-1>.
- [90] Lu, G., Zhu, X., Cao, B., Li, Y., Tao, C. and Yang, Z. (2024b). A New Approach for Discontinuity Extraction Based on an Improved Naive Bayes Classifier. *Appl. Sci.* 2024, 14, 2050. <https://doi.org/10.3390/app14052050>.
- [91] Lucieer, De Jong, S. M. and Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography *Progress. in Physical Geography* Vol. 38(1) 97–116 <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>.
- [92] Luetzenburg, G., Kroon, A. and Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports* 11(1) <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

- [93] Lukačić, H., Krkač, M., Gazibara, S. B., Arbanas, Z. and Arbanas, S. M. (2022). Detection of geometric properties of discontinuities on the Špičunak rock slope (Croatia) using high-resolution 3D Point Cloud generated from Terrestrial Laser Scanning. *Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining* Volume: 1214. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012006>.
- [94] Marjanović, M., Abolmasov, B., Berisavljević, Z., Pejić, M. and Vranić P. (2021). Pre-failure deformation monitoring as rockfall prediction tool. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 833 012197 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012197>.
- [95] Martin, C.D., Tannant, D.D. and Lan, H. (2007). Comparison of terrestrial-based, high resolution, LiDAR and digital photogrammetry surveys of a rock slope. In *Proc. 1st Can.-U.S. Rock Mech. Symp.*, 37-44 <https://doi.org/10.1201/NOE0415444019-c5>.
- [96] Menegoni, N., Giordan, D., Perotti, C. and Tannant, D. (2019). Detection and Geometric Characterization of Rock Mass Discontinuities using a 3D High-Resolution Digital Outcrop Model Generated from RPAS Imagery – Ormea Rock Slope, Italy. *Engineering Geology* 252 145 – 163 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.028>.
- [97] Mehrishal, S., Kim, J., Song, J. J. and Sainoki, A. (2024). A semi-automatic approach for joint orientation recognition using 3D trace network analysis. *Engineering Geology*, Vol. 332,(3) 107462, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107462>.
- [98] Micheletti, N., Chandler, J. H. and Lane, S. N., (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. Chapter 2, Section 2.2 in *Geomorphological Techniques* (Online edition). British Society for Geomorphology, UK. 12 p. ISSN 2047-0371.
- [99] Monsalve, J. J., Pfreundschuh, A., Soni, A. and Ripepi, N. (2021). Automated Discontinuity Extraction Software Versus Manual Virtual Discontinuity Mapping: Performance Evaluation in Rock Mass Characterization and Rockfall Hazard Identification. *Mining, Metallurgy & Exploration* 38(6) <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00416-9>.
- [100] Montgomery, D. C., Peck, E. A. and Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5th ed.). John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-54281-1.
- [101] Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (6th ed.). John Wiley & Sons. ISBN: 9781118744123.

- [102] Moradi, S., Heinze, T., Budler, J., Guantilake, T., Kemna, A. and Huisman, J. A. (2021). Combining site characterization, monitoring, and hydromechanical modeling for assessing slope stability. *Land* 10(4):423. <https://doi.org/10.3390/land10040423>.
- [103] Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Koehl, M. and Freville, T. (2016). Acquisition and Processing Experiences of Close Range UAV Images for the 3D Modeling of Heritage Buildings. *Euro-Mediterranean Conference* https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_34.
- [104] Murtiyoso, A. and Grussenmeyer, P. (2017). Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: Dense matching issues, comparison and case studies. *Photogramm. Rec.* 2017, 32(7), 206–229. <https://doi.org/10.1111/phor.12197>.
- [105] Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Börlin, N., Vandermeersch, J. and Freville, T. (2018). Open Source and Independent Methods for Bundle Adjustment Assessment in Close-Range UAV Photogrammetry. *Drones* 2 (1): 3 <https://doi.org/10.3390/drones2010003>.
- [106] Nagendran, S. K., Ismail, M. and Wen, Y. (2019). Corpus Photogrammetry approach on geological plane extraction using CloudCompare FACET plugin and scanline survey. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 68:151-158 <https://doi.org/10.7186/bgsm68201916>.
- [107] Nex, F. and Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics* 6(1). <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>.
- [108] Niethammer, U., Rothmund, S., Josfig, M., James, M. R. and Travelletti, J. (2010). UAV-based remote sensing of landslides. *Internat. Arch. of the Photogr., Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII, Part 5*: 496–501.
- [109] Nocerino, E., Lago, F., Morabito, D., Remondino, F., Porzi, L., Poiesi, F., Rota Bulo, S., Chippendale, P., Locher, A., Havlena, M., et al. (2017). A smartphone-based 3D pipeline for the creative industry—The replicate EU project. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2017, 42, 535–541.
- [110] Olariu, M.I., Ferguson, J.F., Aiken, C.L. V. and Xu, X. (2008). Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at

Big Rock Quarry, Arkansas. Geosphere. 4 (1), 247–259
<https://doi.org/10.1130/GES00139.1>.

[111] Ozturk, H.S., Kocaman, S. and Gokceoglu, C. (2019). A low-cost approach for determination of discontinuity orientation using smartphone images and application to a part of Ihlara Valley (Central Turkey). Engineering Geology, 254, 63–75
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.011>.

[112] Pagano, M., Palma, B., Ruocco, A.M. and Parise, M. (2020). Discontinuity characterization of rock masses through terrestrial laser scanner and unmanned aerial vehicle techniques aimed at slope stability assessment. Applied Sciences, 10(8), 2690. <https://doi.org/10.3390/app10082960>.

[113] Panigrahi, B., Srivastava, D.C., Tiwari, S., Agarwal, A., Rit, B. and Syed, A. A. (2023). Application of semi-automated methods for extraction of geological surface orientations: A case study from the outer Garhwal Himalaya. J Earth Syst Sci 132(4), 171 <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02194-y>.

[114] Penasa, L., Franceschi, M., Preto, N., Teza, G. and Polito, V. (2014). Integration of intensity textures and local geometry descriptors from Terrestrial Laser Scanning to map chert in outcrops. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 93, 88–97.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.003>.

[115] Petrie, G. and Toth, C. K. (2008). Introduction to laser ranging, profiling, and scanning, Topographic laser ranging and scanning: principles and processing, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781420051438.ch1>.

[116] Phuoc, P., Paron, P., Popescu, I. and Silviu, C. (2019). Evaluation of topographic information from drone images and SfM for hydraulic modeling. EGU2019.

[117] Pluta, P. and Siemek, D. (2023). Possibilities and limitations of using iPhone 13 Pro with built-in LiDAR sensor in cave research -on the example of paleoflow analysis in Mylna Cave (Western Tatra Mts, Poland) Landform Analysis 42:51-62
<https://doi.org/10.12657/landfana-042-004>.

[118] Ramsay, J. G. (1967). Folding and Fracturing of Rocks. McGraw-Hill, New York, New York. 568 pages. ISBN 0070511705.

- [119] Ramsay, J. G. and Huber, M. I. (1987). The techniques of Modern Structural Geology Vol. 2: Faults and fractures. Academic Press. ISBN-13: 978-0-12-576922-8.
- [120] Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sens.* 2011, 3(6), 1104–1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>.
- [121] Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R. and Jaboyedoff, M. (2014). A New Approach for Semi- Automatic Rock Mass Joints Recognition from 3D Point Clouds. *Computers & Geosciences* 68 38-52 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>.
- [122] Riquelme, A., Tomás, R., Abellán, A., Cano, M. and Jaboyedoff, M. (2015a). Semi-automatic characterization of fractured rock masses using 3D point clouds: discontinuity orientation, spacing, and SMR geomechanical classification. *EGU General Assembly* Vol. 17.
- [123] Riquelme, A., Abellán, R. and Tomás, R. (2015b). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds, *Eng. Geol.* Vol. 195 pp.185–195. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>.
- [124] Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R. and Abellán, A. (2016). Using open-source software for extracting geomechanical parameters of a rock mass from 3D point clouds: Discontinuity Set Extractor and SMRTTool. in: *Rock Mech. Rock Eng. From Past to Future 2*, pp. 1091–1096. <https://doi.org/10.1201/9781315388502-190>.
- [125] Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R. and Abellán, A. (2017). Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis. In: *Procedia Engineering* 191. pp. 838–845. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>.
- [126] Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J. L. and Abellán, A. (2018). Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Rock Mech. Rock Eng.* 51(10). <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9>.
- [127] Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J. L. and Jordá-Bordetore, L. (2021). Extraction of discontinuity sets of rocky slopes using iPhone-12 derived 3DPC and comparison to TLS and SfM datasets. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 833(1): 012056 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012056>.

- [128] Rutkowski, W. and Lipecki, T. (2023). Use of the iPhone 13 Pro LiDAR Scanner for Inspection and Measurement in the Mineshaft Sinking Process. *Remote Sens.* 2023, 15(21), 5089. <https://doi.org/10.3390/rs15215089>.
- [129] Serazio, C., Tamburini, M., Verga, F. and Berrone, S. (2021). Geological surface reconstruction from 3D point clouds, *MethodsX*, Volume 8, ISSN 2215-0161. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101398>.
- [130] Shariati, M. and Fereidooni, D. (2021). Rock slope stability evaluation using kinematic and kinetic methods along the Kamyaran-Marivan road, west of Iran. *J. Mt. Sci.* (2021) 18(3): 779-793. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6438-z>.
- [131] Slob, S., Van Knapen, B., Hack, H.R., Turner, K. and Kemeny, J. (2005). Method for Automated Discontinuity Analysis of Rock Slopes with Three-Dimensional Laser Scanning. *Transportation Research Record Journal* 1913, 187–194 <https://doi.org/10.1177/0361198105191300118>.
- [132] Song, J., Du, S., Yong, R., Wang, C. and An, P. (2023). Drone Photogrammetry for Accurate and Efficient Rock Joint Roughness Assessment on Steep and Inaccessible Slopes. *Remote Sens.*, 15(19), 4880. <https://doi.org/10.3390/rs15194880>
- [133] Stanota, E., Spyrou, N., Andreadakis, E., Skourtsos, E., Lozios, S. and Lekkas, E. (2020). Landslide Behaviour and Risk Reduction using SfM and 3D modelling techniques with Unmanned Aerial Systems (UAS). Chios island (Greece). 22nd EGU General Assembly, id.18852 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18852>.
- [134] Stead, D., Eberhardt, E. and Coggan, J.S. (2006). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modeling techniques. In *Engineering Geology* 83(1-3), pp.217-235. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.033>.
- [135] Stead D., Wolter A. and Clague J. J. (2011). A critical review of landslide failure mechanisms. *Journal of Structural Geology* 74 1-23.
- [136] Sturzenegger, M., Stead, D., Beveridge, A., Lee, S. and Van As, A. (2009a). Long-range terrestrial digital photogrammetry for discontinuity characterization at Palabora open-pit mine. In: *Third Canada--US Rock Mechanics Symp.* pp. 1–10.

- [137] Sturzenegger, M. and Stead, D. (2009b). Close range digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology* 106(3-4):163-182 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>.
- [138] Sturzenegger, M., Stead, D. and Elmo, D. (2011). Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Eng. Geol.* 119, issues 3-4 pp.96–111 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.02.005>.
- [139] Suleymanoglu, B., Tamimi, R., Yilmaz, Y., Soycan, M. and Toth C. (2023). Road Infrastructure Mapping by Using iPhone 14 Pro: An Accuracy Assessment. *The Int. Arch. of the Photogram., Vol. XLVIII-M-1-2023* 347-353 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-347-2023>.
- [140] Suppe, J. (1985). *Principles of structural geology*. Department of Geological and Geophysical sciences Princeton University p537.
- [141] Suwardhi, D., Menna, F., Remondino, F., Hanke, K. and Akmalia, R. (2015). Digital 3D Borobudur—Integration of 3D Surveying and Modeling Techniques. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015, XL-5/W7, 417–423. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-417-2015>.
- [142] Tamimi, R. and Toth, C. (2023). Comparison of iPhone 13 Pro's Camera and LiDAR Sensor to UAS Photogrammetric Model of the Great Pyramid of Giza. *The International Archives of the Photogrammetry, Volume XLVIII- M-3-2023*:299-306 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-3-2023-299-2023>.
- [143] Tang, M., Yang, S., Huang, G., Xie, X., Guo, J. and Zhai, J. (2022). Automatic extraction of rock discontinuities from the point cloud using dynamic DBSCAN algorithm. *Adv. in Civil Eng.*, 2022(1) 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/7754179>.
- [144] Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P and Glennie, C. (2016). Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth Science Reviews* 169. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>.
- [145] Thiele, S., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S. and Cruden, A. (2017). Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images, and geophysical data. *Solid Earth*. 8. 1241-1253 <https://doi.org/10.5194/se-8-1241-2017>.

- [146] Tung, W. Y., Nagendran, S. K. and Ismail, M. (2018). 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 169 (1) 012051 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012051>.
- [147] Turner, F. J. and Weiss, L. E. (1963). Structural Analysis of Metamorphic Tectonites. McGraw-Hill, New York, New York. 545 pages ISBN 007065574X.
- [148] Umili, G., Ferrero, A. and Einstein, H. H. (2013). A new method for automatic discontinuity traces sampling on rockmass 3D model. Computers & Geosciences Vol. 51 pp.182–192 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026>.
- [149] Unno, Y. (2023). INFIERI 2021: Hands-on Lab – LiDAR. Journal of Instrumentation. 18(04) C04010. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/04/C04010>.
- [150] Van Knapen, B. and Slob, S. (2006). Identification and characterization of rock mass discontinuity sets using 3D laser scanning. In: IAEG 2006: Preproceedings 10th International Congress International Association of Engineering Geology: paper 438.
- [151] Van Riel, S. (2016). Exploring the use of 3D GIS as an analytical tool in archaeological excavation practice. Thesis for Master of Arts. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4738.2643>.
- [152] Vasuki, Y., Holden, E-J., Kovesi, P. and Micklethwaite, S. (2014). Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. Computers & Geosciences, Volume 69, 2014, Pages 22-32, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>.
- [153] Ventura, G., Vilardo, G., Terranova, C. and Sessa, E. B. (2011). Tracking and evolution of complex active landslides by multitemporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). Remote Sensing of Environment 115(12): 3237–3248. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.007>.
- [154] Verhoeven, G., Sevara, C., Karel, W., Ressler, C., Doneus, M. and Briese, C. (2013). Undistorting the Past: New Techniques for Orthorectification of Archaeological Aerial Frame Imagery. In: Good Practice in Archaeological Diagnostics, 1st ed. pp.31-67. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6_3.

- [155] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. and Ye, K. (2012). Probability and Statistics for Engineers and Scientists (9th ed.). Pearson. ISBN-10 0321629116.
- [156] Wandinger, U. (2005). Introduction to Lidar. In: Lidar. Series in Optical Sciences, vol 102. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_1.
- [157] Wang, X., Zou, L., Shen, X., Ren, Y. and Qin, Y. (2017). A region-growing approach for automatic outcrop fracture extraction from a three-dimensional point cloud. Comput. Geosci. 99, 100– 106 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.002>.
- [158] Wehr A. and Lohr U. (1999), Airborne laser scanning—an introduction and overview. ISPRS J Photogramm Remote Sens 54: issues2-3 68–82. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8).
- [159] Weiss, N. A. (2012). Introductory Statistics (9th ed.). Pearson. Boston 193.
- [157] Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. and Reynolds, J. M., (2012). “Structure-from-motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179 (66): 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- [160] Wu, W., Zhang, K. and Zhu, H. (2020). A fast automatic extraction method for rock mass discontinuity orientation using fast k-means++ and fast silhouette based on 3D point cloud. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 570 052075 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/570/5/052075>.
- [161] Wu, W., Feng, W., Yi, X., Zhao J. and Zhou, Y. (2024). Sparrow search algorithm-driven clustering analysis of rock mass discontinuity sets. Comput Geosci 28(4):1-13. <https://doi.org/10.1007/s10596-024-10287-w>.
- [162] Wu, X., Wang, F., Wang, M., Zhang, X., Wang, Q. and Zhang, S. (2021). A New Method for Automatic Extraction and Analysis of Discontinuities Based on TIN on Rock Mass Surfaces. Remote Sens. 2021, 13, 2894. <https://doi.org/10.3390/rs13152894>.
- [163] Zhang, C. and Yao, W. (2008). The Comparisons of 3D Analysis between Photogrammetry and Computer Vision. ISPRS Proceedings XXXVII congress 33–36.
- [164] Zhang, P., Du, K., Tannant, D., Zhu, H. and Zheng, W. (2018). Automated method for extracting and analysing the rock discontinuities from point clouds based on digital

surface model of rock mass. Engineering Geology 239 109–118

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.020>.

[165] Zhou, J-W. Chen, J. and Li, H. (2024). An optimized fuzzy K-means clustering method for automated rock discontinuities extraction from point clouds. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 173(5). 105627. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105627>.

[166] Арсовски М. (1996). Тектоника на Македонија.

[167] Гапковски Н. и Јовановски М. (2007). Општа геологија. Учебник на Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје ISBN 978-9989-2469-7-5.

[168] Думурџанов и сор., (2005).

[169] Јовановски М., Гапковски Н., Пешевски И. и Аболмасов Б. (2012). Инженерска геологија, Учебник на Градежен факултет при Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје, ISBN, 978-608-4510-13-0.

[170] Неделковска, А. Н. (2023). Современи методи за детекција и карактеризација на нестабилни појави на теренот. Докторски труд Скопје.

[171] Пешевски, П. И. (2014). Пристап за моделирање на подложноста кон свлекување на теренот со примена на ГИС технологија-докторска дисертација-Скопје, стр. 181.

[172] Петров, В. Г. (1993). Геодинамика на геотектонските процеси на лакавичкиот гробен, Универзитет „Св Кирил и Методиј“ – Скопје, Рударско-геолошки факултет-Штип. Магистерска работа стр.93.

[173] Петров Г. и Думурџанов Н. (2014). Геолошко картирање, Учебник на Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип, ISBN 978-608-244-137-5.

[174] Ракиќевиќ, Т., Стојанов, Р. и Арсовски, М. (1965). Толкувач за листот Прилеп К 34-92, Геолошки завод Скопје, Издаден во Белград 1973 год.

[175] Стојанова, Т. В. (2008). Еволуција и стратиграфија на палеогенот на територијата на Република Македонија – докторска дисертација, Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип, Факултет за рударство, геологија и политехника стр 196.

- [176] Темкова, В. (1971-72). Распространетост на алб-ценоман во околината на Штип-Мочарник, Трудови на Геолошки завод (77-99) Скопје.
- [177] Христов, С., Карајовановиќ, М. и Страчков М. (1965). Толкувач за листот Кавадарци К 34-93, Геолошки завод Скопје, Издаден во Белград 1973 год.
- [178] Христов, С. и Карајовановиќ М. (1969). Толкувач за листовите Кратово К 34-69 и Кустендил К 34-70 Геолошки завод Скопје, Издаден во Белград 1976 год.
- [179] RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2017). RIEGL VZ-6000 3D Very Long-Range Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing Terrestrial Laser Scanning.
- [180] RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2021 RIEGL - Produktdetail VZ-400i.
- [181] Laan Labs 2021 3D Scanner App - LIDAR Scanner for iPad & iPhone Pro. Available online: <https://www.3dscannerapp.com> accessed 25.07.2024.
- [182] <https://www.apple.com/by/iphone-13-pro/specs/> accessed 25.07.2024.
- [183] <https://www.apple.com/mk/iphone-15-pro/specs/> accessed 25.07.2024.
- [184] <https://www.youtube.com/watch?v=dPOldb5yTdg> accessed 25.07.2024.
- [185] École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Computer Vision Lab in Switzerland – Pix4D mapper. Available online: <https://www.pix4d.com/> accessed 25.07.2024.
- [186] 3D point cloud and mesh processing software Open-Source Project Available at: www.cloudcompare.org accessed 30.07.2024.
- [187]] <https://github.com/CloudCompare/CloudCompare> accessed 30.07.2024.
- [188] <https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare> accessed 30.07.2024.
- [189] https://cloudcompare.net/doc/qCC/Documentation_CloudCompare_version_2_1_en_g.pdf accessed 30.07.2024.
- [190] [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Facets_\(plugin\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Facets_(plugin)) accessed 30.07.2024.

- [191] <https://enterprise.dji.com/phantom-4-rtk/specs> accessed 12.03.2024.
- [192] https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Cloud-to-Cloud_Distance
accessed 12.03.2024.
- [193] https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Compute_geometric_features
accessed 12.03.2024.
- [194] <https://www.rocscience.com/software/dips> accessed 10.11.2024.