

Određivanje poroznosti analizom mikroskopskih izbrusaka i obradom rezultata mjerenja otvorene poroznosti

Šijak, Deni

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:381375>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**ODREĐIVANJE POROZNOSTI ANALIZOM MIKROSKOPSKIH IZBRUSAKA I
OBRADOM REZULTATA MJERENJA OTVORENE POROZNOSTI**

Diplomski rad

Deni Šijak
R207

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/62
URBROJ: 251-70-11-21-1
U Zagrebu, 13.04.2021.

Deni Šijak, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/21-01/62, UR. BROJ: 251-70-11-21-1 od 13.04.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

ODREĐIVANJE POROZNOSTI MIKROSKOPSKIH IZBRUSAKA I OBRADOM REZULTATA MJERENJA OTVORENE POROZNOSTI

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Zlatko Briševac, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, a za suvoditelja dr. sc. Ivica Pavičić.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Zlatko Briševac

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva
za završne i diplomske
ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Dr. sc. Ivica Pavičić

(titula, ime i prezime)

**Prodikan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

ODREĐIVANJE POROZNOSTI ANALIZOM MIKROSKOPSKIH IZBRUSAKA I OBRADOM
REZULTATA MJERENJA OTVORENE POROZNOSTI

Deni Šijak

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Svrha ovog istraživanja je prikazati geometrijsku karakterizaciju izmjerenim vrijednostima poroznosti žumberačkih gornjotrijaskih dolomita, kroz analizu niza geometrijskih parametara. Parametri pora analizirani su na mikrofotografijama impregviranih izbrusaka koji su u mjerilu. Mikrofotografije su postupcima računalne obrade pretvorene u binarne fotografije. Ukupno je izdvojeno i analizirano 13 938 pora. Otvorene poroznosti svih formacija i facijesa nalaze se pretežito u intervalu od 0,314 % do 4,564 %. Neki uzorci su sadržavali veće pukotine, ili više pukotina, pa zato imaju veće vrijednosti otvorene poroznosti, koja tada nije rezultat samo taložne i dijagenetske nego dominantno mikropukotinske poroznosti. Analizirani su parametri: površina i opseg pora, kružnost, AR, eliptičnost, „Solidity“, Feret AR, kompaktnost i fraktalna dimenzija. Svaki od izmjerenih parametara na određeni način kvantificira geometriju i kompleksnost oblika pore. Površina i opseg mjere su dimenzija pora. Kružnost je parametar koji opisuje koliko je analizirani objekt, u slučaju ovog istraživanja, pora, slična obliku kruga. Elipsoidnost, AR i Feret AR parametri su koji opisuju koliko je pora slična elipsi te kvantificiraju izduženost pore. Parametar „Solidity“ i kompaktnost kvantificiraju neravnine pore odnosno „hrapavost“. Fraktalna dimenzija kvantificira svojstvo sebisličnosti a time i kompleksnosti oblika pore. Rezultati ukazuju da su pore uglavnom manje od 1 mm uz mali broj pora koje su veće i mogu se smatrati ekstremi koji značajno utječu na izgleda histograma frekvencija površina i opsega pora. Ostali parametri koji kvantificiraju oblik i kompleksnost pora u očekivanim su intervalima te ukazuju da su pore uglavnom izdužene sa dužom osi pripadajuće elipse 1,7 do 2 x većom od kraće osi. Veće vrijednosti kružnosti i manje vrijednosti elipsoidnosti ukazuju da su pore bez obzira na izduženost bliže obliku kruga nego elipse. Parametri koji kvantificiraju neravnine pora, odnosno „hrapavost“, „Solidity“, kompaktnost i fraktalna dimenzija imaju poprilično ujednačene raspodjele a njihove vrijednosti ukazuju na izraženu kompleksnost geometrije pora. To posebno potvrđuje fraktalna dimenzija. Analizom mikrofotografija pomoću „Image Processing“ metodologije moguće je prikupiti veliki broj egzaktnih podataka te se postupak pokazalo se iznimno korisnim u kvantifikaciji geometrijskih značajki pora.

Ključne riječi: Poroznost, geometrija pora, ISRM, dolomiti, fraktalna dimenzija, Žumberak

Završni rad sadrži: 31 stranica, 2 tablice, 15 slika, 10 priloga, i 19 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr.sc. Zlatko Briševac, docent RGNF

Komentor: Dr.sc. Ivica Pavičić, Asistent RGNF

Ocjenjivači: dr.sc. Zlatko Briševac, docent RGNF
dr.sc. Anja Vrbaški, docent, RGNF
dr.sc. Željko Duić, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 16.4.2021, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

POROSITY QUANTIFICATION BASED ON ANALYSIS OF MICROPHOTOGRAPHS WITH
CORRESPONDENCE TO MEASUREMENTS OF OPEN POROSITY

Deni Šijak

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The purpose of this research is to present the geometric characterization of the measured porosity of the Upper Triassic dolomites of Žumberak Mts., through the analysis of several geometric parameters. Pore parameters were analyzed on microphotographs of impregnated thin sections in scale. Microphotographs have been converted into binary photographs by image processing techniques. A total of 13,938 pores were isolated and analyzed. Effective porosity of all analyzed geological formations and facies are in the interval from 0,314 % to 4,564 %. Some samples had higher measured porosity, but they also contained fractures so measured porosity was not only depositional and diagenetic but also microfracture porosity. The analyzed parameters are: Pore surface, pore circumference, circularity, AR, Roundness, Solidity, Feret AR, Compactness and Fractal dimension. Each of the measured parameters quantifies the geometry and complexity of the pore shape in a certain way. The area and extent of the measure are the dimensions of the pores. Circularity is a parameter that describes how much is the analyzed object like the shape of a circle. Roundness, AR, and Feret AR are parameters that describe how similar a pore is to an ellipse and quantify pore elongation. The Solidity and Compactness quantify pore irregularities or "roughness". The fractal dimension quantifies the property of self-similarity and thus the complexity of the pore shape. The results indicate that the pores are generally less than 1 mm with a small number of pores that are larger and can be considered extremes that significantly affect the appearance of histograms of surface frequencies and pore circumferences. Other parameters that quantify the shape and complexity of the pores are at the expected intervals and indicate that the pores are generally elongated with the longer axis of the corresponding ellipse 1.7 to 2 times larger than the shorter axis. Higher values of circularity and lower values of Roundness indicate that the pores, regardless of elongation, are closer to the shape of a circle than ellipses. Parameters that quantify pore irregularities, ie. "roughness", "Solidity", Compactness, and Fractal dimension have similar distributions and their values indicate a pronounced complexity of the pore geometry. This is especially confirmed by the fractal dimension values. Image Processing techniques in microphotographs analysis is a very powerful tool for collecting large number of exact data. The proposed methodology is very useful in quantification of pore geometry parameters.

Keywords: Porosity, Pore geometry, ISRM, Dolomites, Fractal Dimension, Žumberak Mts.

Thesis contains: 31 pages, 2 tables, 14 figures, 9 appendixes, i 19 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Zlatko Briševac, PhD

Cosupervisor: Assistant Ivica Pavičić, PhD

Reviewers: Assistant Professor Zlatko Briševac, PhD
Assistant Professor Anja Vrbaški, PhD
Associate Professor Željko Duić, PhD

Defence date: 16.4.2021, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GEOLOŠKE ZNAČAJKE	3
3. TEORIJSKE OSNOVE RADA.....	5
3.1. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću saturacije i uzgona.....	5
3.2. Analize mikroskopskih izbrusaka za određivanje poroznosti.....	9
4. OPIS REZULTATA ISTRAŽIVANJA	15
4.1. Rezultati mjerenja otvorene poroznosti metodom uronjene mase	15
4.2. Rezultati analize geometrijskih značajki pora na mikrofotografijama	16
4.2.1. Površina pora	17
4.2.1.1. Član Vranjak formacije Slapnica	17
4.2.1.2. Formacija Glavni dolomit	17
4.2.1.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije.....	17
4.2.2. Opseg pora	18
4.2.2.1. Član Vranjak formacije Slapnica	18
4.2.2.2. Formacija Glavni dolomit	18
4.2.2.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije.....	18
4.2.3. Kružnost pora.....	18
4.2.3.1. Član Vranjak formacije Slapnica	18
4.2.3.2. Formacija Glavni dolomit	19
4.2.3.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije.....	19
4.2.4. Odnos duže i kraće osi pripadajuće elipse (AR).....	19
4.2.4.1. Član Vranjak formacije Slapnica	19
4.2.4.2. Formacija Glavni dolomit	19
4.2.4.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije.....	20
4.2.5. Elipsoidnost	20
4.2.5.1. Član Vranjak formacije Slapnica	20
4.2.5.2. Formacija Glavni dolomit	20
4.2.5.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije.....	21
4.2.6. Parametar „Solidity“	21
4.2.6.1. Član Vranjak formacije Slapnica	21
4.2.6.2. Formacija Glavni dolomit	21
4.2.6.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije.....	21

4.2.7.	Feret AR.....	22
4.2.7.1.	Član Vranjak formacije Slapnica	22
4.2.7.2.	Formacija Glavni dolomit	22
4.2.7.3.	Gornjotrijaski (T ₃) dolomiti nesvrstani u formacije.....	22
4.2.8.	Kompaktnost.....	22
4.2.8.1.	Član Vranjak formacije Slapnica	22
4.2.8.2.	Formacija Glavni dolomit	23
4.2.8.3.	Gornjotrijaski (T ₃) dolomiti nesvrstani u formacije.....	23
4.2.9.	Fraktalna dimenzija.....	23
4.2.9.1.	Član Vranjak formacije Slapnica	23
4.2.9.2.	Formacija Glavni dolomit	24
4.2.9.3.	Gornjotrijaski (T ₃) dolomiti nesvrstani u formacije.....	24
5.	DISKUSIJA.....	25
6.	ZAKLJUČAK	27
7.	LITERATURA.....	29

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Zemljopisni položaj istraživnog područja u sklopu geomorfološke cjeline Žumberačkog i Samoborskog gorja te Gorjanaca u Republici Sloveniji (Pavičić, 2018).....	1
Slika 2-1. Geološka karta, profil i stup istraživnog područja (prema PAVIČIĆ, 2018).....	4
Slika 3-1. A i B) Fotografije uzoraka pravilnog oblika; C i D) uzorci za vrijeme saturacije vodom (iz Pavičić 2018).....	8
Slika 3-2. Primjer mikrofotografije formacije Glavni dolomit unutar gornjotrijskih žumberačkih dolomita.	9
Slika 3-3. Binarna fotografija i matrica slike: 0-crna boja; 1-bijela boja (Jie et al., 2007).	10
Slika 3-4. Primjer izvorne mikrofotografije impregniranog uzorka i binarne fotografije istog uzorka.	10
Slika 3-5. Određivanje mjerila fotografije.....	11
Slika 3-6. Grafički prikaz opisa analiziranih parametara.	11
Slika 3-7. Grafički prikaz i odnos kružnosti, elipsodivosti i Ferret AR-a.	12
Slika 3-8. Grafički prikaz i objašnjenje parametra „Solidity“ (http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm#PnPParameters/Measure_Shape_Parameters.htm#Roundnes) (13.10.2020).	13
Slika 3-9. Grafički prikaz i objašnjenje parametra kompaktnosti (https://slideplayer.com/slide/9293085/) (13.10.2020).	13
Slika 3-10. Fraktalne dimenzije topoloških objekata sa cjelobrojnim fraktalnim dimenzijama i primjer fraktalnog sustava pukotina s dimenzijom $D=1,76$ (preuzeto iz Verbovšek, 2009).	14
Slika 3-11. Kochov otok i njegovi sastavni elementi (iz Pavičić, 2018).....	14
Slika 4-1. Dijagram otvorene poroznosti uzoraka mjerenih metodom uronjene mase (Pavičić, 2018).....	15

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Rezultati mjerenja otvorene poroznosti (n_{ot}) na uzorcima T ₃ dolomita. Uz rezultate mjerenja poroznosti prikazani su i rezultati izračuna gustoće (ρ i ρ_{ot}) (Pavičić, 2018).....	15
Tablica 5-1. Osnovni statistički parametri geometrijskih značajki pora žumberačkih gornjotrijaskih dolomita.	26

POPIS PRILOGA

Prilog 1-1. Histogrami frekvencija površina, opsega i kružnosti pora člana Vranjak formacije Slapnica.

Prilog 1-2. Histogrami frekvencija elipsoidnosti, kompaktnosti i parametra “solidity” pora člana Vranjak formacije Slapnica.

Prilog 1-3. Histogrami frekvencija AR-a, Feret AR-a i fraktalnih dimenzija pora člana Vranjak formacije Slapnica.

Prilog 2-1. Histogrami frekvencija elipsoidnosti, kružnosti i kompaktnosti formacije Glavni dolomit.

Prilog 2-2. Histogrami frekvencija parametra “Solidity” i fraktalnih dimenzija formacije Glavni dolomit.

Prilog 2-3. Histogrami frekvencija AR-a i Feret AR-a formacije Glavni dolomit.

Prilog 3-1. Histogrami površine i opsega pora te kružnosti pora uzoraka gornjotrijaskih dolomita nesvrstanih u formacije i članove.

Prilog 3-2. Histogrami frekvencija elipsoidnosti, kompaktnosti i parametra “solidity” pora uzoraka gornjotrijaskih dolomita nesvrstanih u formacije i članove.

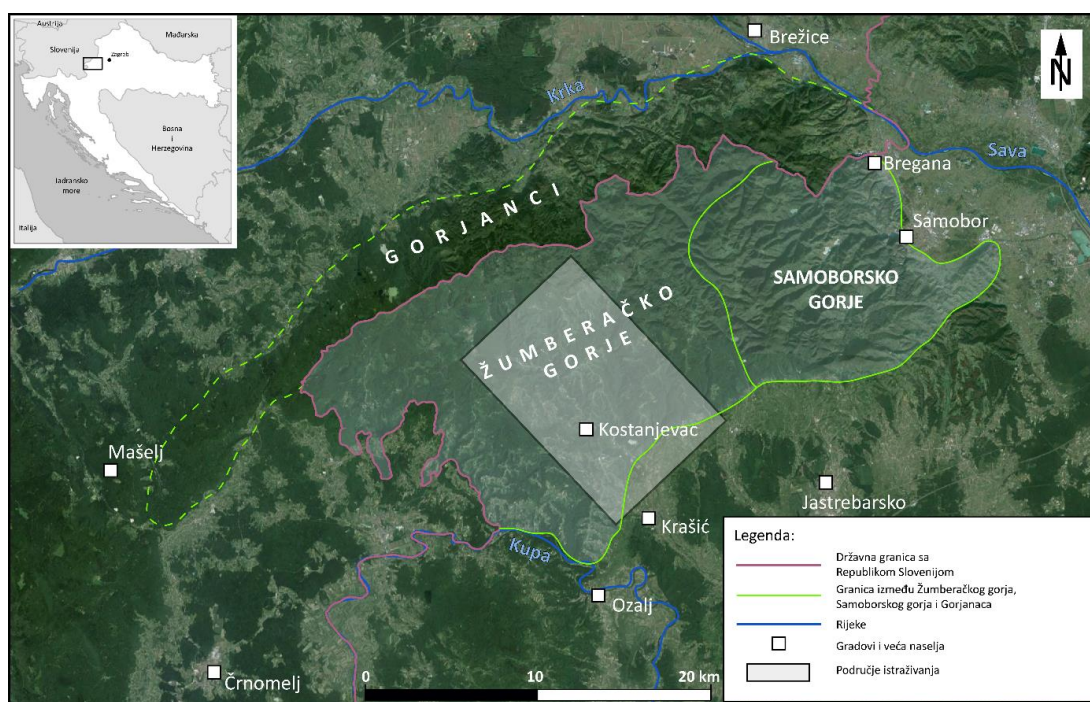
Prilog 3-3. Histogrami frekvencija AR-a, Feret AR-a i fraktalnih dimenzija pora uzoraka gornjotrijaskih dolomita nesvrstanih u formacije i članove.

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	duljina
O	m	opseg
P	m ²	površina
M_{sat}	kg	saturirana masa uzorka
M_{sub}	kg	saturiran masa potopljenog uzorka
B	kg	masa saturiranog uzorka i spremnika
A	kg	masa samog spremnika za uzorak
M_s	kg	masa osušenog uzorka
C	kg	masa osušenog uzorka uzorka i spremnika
A	kg	masa samog spremnika za uzorak
V	m ³	volumen
ρ_w	kg/m ³	gustoća vode
n	%	poroznost
V_v	m ³	volumen pora
ρ_d	kg/m ³	suha gustoća stijena
V	m ³	volumen
h	mm	visina pojedinačne pore
E_l	mm	duža os pripadajuće elipse pore
E_s	mm	kraća os pripadajuće elipse pore
α	°	(od 0° do 180°) orijentacija duže osi elipse pore
Circ	-	kružnost
F_{max}	mm	najveća udaljenost između neke dvije točke na vanjskom rubu pore
$F\alpha$	°	kut linije koja povezuje dvije najudaljenije točke na pori
F_{min}	mm	najmanja udaljenost između dvije točke na vanjskom rubu pore
AR	-	Odnos između duže i kraće osi pripadajuće elipse oko pore
Round.	-	Elipsoidnost
Solidity	-	omjer površine objekta i površine konveksnog zatvaranja.
F_{AR}	-	Odnos između duže i kraće Ferret osi pripadajuće elipse oko pore
Comp	-	kompaktnost
Ex	-	odnos površine pore i površine najmanjeg pravokutnika oko pore
Fdim	-	fraktalna dimenzija pore

1. UVOD

U području sjeverozapadne Hrvatske, u gorskim i planinskim područjima, velike površine zauzimaju karbonatne stijene gornjotrijaske starosti. Najčešće su to tektonski razlomljeni dolomiti, relativno male primarne i dijagenetske poroznosti. Ovisno o njihovom strukturnom položaju i dubini na kojoj se nalaze, te stijene mogu sadržavati ugljikovodike, mogu biti vodonosnici i geotermalni vodonosnici te se mogu koristiti kao tehničko-građevni kamen (Pavičić, 2018). Istraživano područje nalazi se u Žumberačkom gorju, sjeverno od mjesta Krašić (Slika 1-1). Područje se nalazi u zapadnom dijelu sjeverozapadne Hrvatske, na prijelazu iz ravničarskog u gorsko, krško područje. Područje Žumberka i Samoborskog gorja pripada umjerenom klimatskom pojasu (Frangen, 2013). Prema Köppenovoj podjeli klima se može svrstati u Cfbwx klimu, tj. umjereno topla kišna klima bez suhog razdoblja s toplim ljetom (Köppen, 1918; Vujnović, 2010). Srednja godišnja temperatura zraka varira od 5 °C u nadmorski najvišim dijelovima Žumberka, do 10 °C na krajnjem istoku Žumberka.



Slika 1-1. Zemljopisni položaj istraživanog područja u sklopu geomorfološke cjeline Žumberačkog i Samoborskog gorja te Gorjanaca u Republici Sloveniji (Pavičić, 2018)

Prethodnim istraživanjima na uzorcima gornjotrijaskih dolomita, laboratorijskim metodama mjerene su i kvantificirane otvorene poroznosti. Otvorena poroznost takvih uzoraka rezultat je uglavnom taložne i dijagenetske poroznosti, a u određenim slučajevima i mikropukotinske poroznosti (Pavičić, 2018). Takvim mjerenjima dobivene su vrijednosti

poroznosti no nema podatka o njihovim geometrijskim značajkama, tj. nema podataka o tome kako te pore izgledaju, koje su njihove dimenzije i kompleksnost oblika pora. Ovim istraživanjem se nastojalo izmjerenim vrijednostima poroznosti dati i geometrijski opis pora kroz analizu niza parametara na mikrofotografijama impregniranih izbrusaka. Analizirani su parametri: površina i opseg pora, kružnost, AR, eliptičnost, „Solidity“, Feret AR, kompaktnost i fraktalna dimenzija.

Ovaj diplomski rad ima zadatak istražiti mogućnosti korištenja analize mikroskopskih izbrusaka te mjerenja poroznosti na uzorcima u laboratoriju u svrhu određivanja poroznosti i geometrijskih značajki pora kao fizikalnih značajki materijala. Mikroskopski izbrusci napravljeni su i impregnirani smolom u svrhu određivanja taložne i dijagenetske poroznosti žumberačkih gornjotrijaskih dolomita .

Trijaski dolomiti su predmet ispitivanja jer često predstavljaju vodonosnike, a u dubljim strukturama mogu biti kolektori geotermalne vode i ugljikovodika. Pored toga te se stijene često koriste kao tehničko-građevni kamen. Zbog toga je razumljiv znanstveni interes da se i geološki podatci iskoriste za procjenu fizikalno mehaničkih značajki koje su bitne za kvalitetu mineralne sirovine i pratećih stijena. Svrha diplomskog rada je doprinijeti znanstvenom istraživanju svojstava gornjotrijaskih dolomita te kvantificirati geometrijska svojstva pora koje posebno u dubokim strukturama mogu biti značajne za uskladištenje fluida.

2. GEOLOŠKE ZNAČAJKE

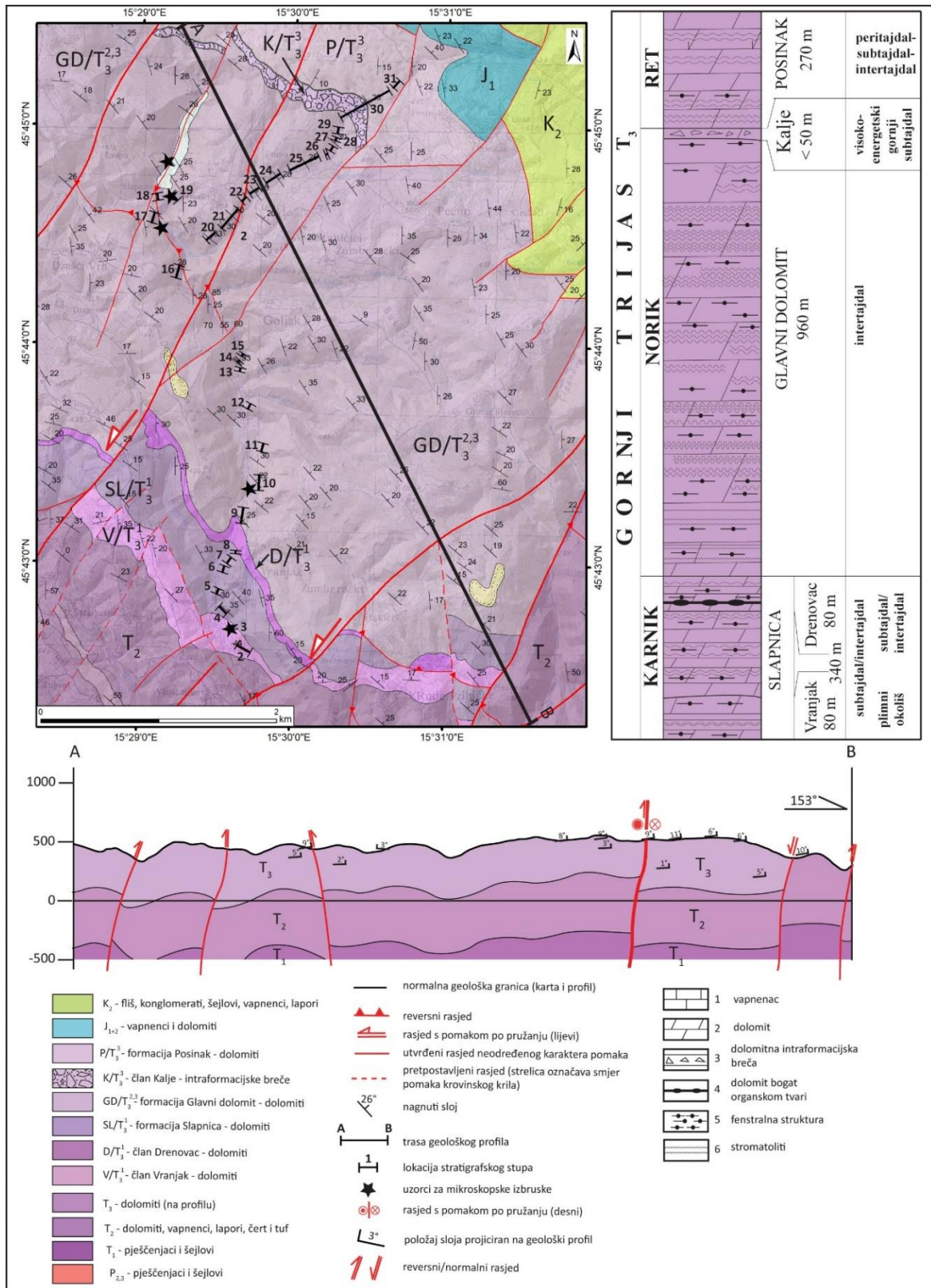
U istraživanom području gornjotrijaski dolomiti su najzastupljeniji u geološkoj građi. Veliki udio u površinskoj geološkoj građi omogućuje proučavanje značajki gornjotrijaskih dolomita na izdancima u različitim strukturnim položajima, od tektonski neporemećenih do potpuno razlomljenih. Dosadašnja istraživanja nedovoljno opisuju poroznost žumberačkih gornjotrijaskih dolomita a vrijednosti su procijenjene na temelju literaturnih podataka na 1 do 3 % (Dragičević, 1997) te mjerenjima od 0,314 % do 4,564 % (Pavičić, 2018).

Područje Žumberka karakterizira vrlo zamršena geološka građa sa stijenama na površini u rasponu od donjeg trijasa do holocena. Grgasović (1998) je izdvojio unutar gornjotrijaskih naslaga tri formacije („Slapnica“, „Glavni dolomit“ i „Posinak“) (Slika 2-1) i tri člana („Vranjak“, „Drenovac“ i „Kalje“) (Slika 2-1). Debljina gornjotrijaskih dolomita procjenjuje na oko 1570 m (Grgasović, 1998). Geološka građa Žumberačkog gorja prikazana je geološkom kartom, geološkim profilima te geološkim stupom (Slika 2-1). Stijene formacije **Slapnica** predstavljene su dolomitima, a mjestimično se javljaju proslojci slabo litificiranih šejlova, a rjeđe siltoznih i pjeskovitih šejlova. Također se mjestimično javlja visok udio organske tvari (kerogena). Dolomiti su „ranodijagenetski“, mjestimično rekristalizirani u kristalasti dolomit, moguće u kasnoj fazi dijageneze. Boja stijene na prijelomu je uglavnom siva, u nekim dijelovima naslaga i tamno siva do crna. Dolomiti su dobro uslojeni i imaju jasno izražene slojne plohe, koje su pretežno ravne ili blago neravne, a iznimno mogu imati i oblik erozijskih kanala. Ponekad se javlja i valovita i lećasta slojevitost. Debljina slojeva varira, ali se najčešće kreće između 20 i 50 cm. Debljina naslaga formacije Slapnica iznosi oko 340 m (Slika 2-1).

Naslage **Glavnog dolomita** široko su rasprostranjene u istraživanom području od Sv. Gere sve do Samobora i izgrađuju središnji dio Žumberka. Debljina naslaga formacije Glavnog dolomita u istraživanom području je oko 960 m (Slika 2-1). Donja granica formacije predstavljena je pojavljivanjem masivnih dolomita s karakterističnim finovalovitim, gotovo vodoravnim stromatolitima, a gornja granica njihovim izostajanjem i pojavom uslojenih dolomita, često s horizontalnom laminacijom. U gornjem dijelu izdvojen je član Kalje dolomitnih intraformacijskih breča. Debljina ovog člana dosta varira, a na području stratotipova iznosi oko 60 m.

Naslage formacije **Posinak** dobro su otkrivene od Petričnog Sela i Mrzlog Polja Žumberačkog do mjesta Pećno i Posinak. Debljina iznosi oko 270 m (Slika 2-1). Donja granica predstavljena je prestankom pojavljivanja breča iz člana Kalje i početak

pojavljivanja uslojenih dolomita s često izraženom horizontalnom laminacijom. Gornja granica je označena pojavom vapnenaca donje jure (formacija Rajići).



Slika 2-1. Geološka karta, profil i stup istraživanog područja (prema PAVIČIĆ, 2018).

3. TEORIJSKE OSNOVE RADA

3.1. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću saturacije i uzgona

Laboratorijske metode i postupci korišteni u ovom radu su predložene od ISRM-a (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) odnosno međunarodne organizacije za mehaniku stijena i inženjerstvo u stijenama. ISRM organizacija osnovana je 1962. godine u Salzburgu a bavi se studijama i istraživanjima fizičko-mehaničkih svojstava stijena i stijenskih masa te primjeni stečenog znanja u bolje razumijevanje geoloških procesa u svim poljima koje ISRM obuhvaća (<https://www.isrm.net/gca/?id=141>; 23.11.2020). Predložene metode ISRM su "objašnjenja preporučenih postupaka koje treba slijediti u različitim aspektima karakterizacije, ispitivanja i praćenja stijena (Franklin, 1979.; Hrženjak i Briševac, 2009).

Metoda je namijenjena mjerenju poroznosti, gustoće suhe tvari i srodnih svojstava uzorka stijene koji su nepravilne geometrije, ali se može primijeniti na uzorke pravilne geometrije. Metoda se koristi samo za stijene koje ne bubre kada se uranjaju u vodu i ne raspadaju se kada se suše (Franklin, 1979.; Briševac, 2012.)

Oprema za provođenje ovog ispitivanja je:

1. Sušionik koja može održavati temperaturu od 105 °C u razdoblju od najmanje 24 sata, a pri tome je dozvoljeno odstupanje do 3 °C
2. Spremnik za uzorke od nekorodirajućeg materijala, uključujući poklopac koji ne propušta zrak.
3. Desikator za držanje uzorka tijekom hlađenja.
4. Oprema za stvaranje podtlaka, tako da uzorak najmanje 1 sata može biti uronjen u vodu pod vakuumom manjim od 800 Pa (6 torr).
5. Vaga odgovarajućeg kapaciteta koja može odrediti masu uzorka s točnošću od 0,01 %.
6. Kada za uranjanje te žičana košara ili perforirani spremnik, tako da se uzorak uronjen u vodu može slobodno objesiti na vagu kako bi se odredila zasićena potopljena masa (košaricu treba okačiti na vagu pomoću fine žice tako da samo žica presiječe vodenu površinu u kadi).

Postupak započinje odabirom reprezentativnog uzorka koji sadrži najmanje 10 komada pravilne ili nepravilne geometrije, od kojih svaki ima masu od najmanje 50 g ili minimalnu dimenziju koja je najmanje 10 puta veća od veličine zrna stijenskog materijala (ovisno o tome koji je uvjet veći) (Slika 3-1).

Uzorak se ispere u vodi kako bi se uklonila prašina a zatim najmanje jedan sata saturira u vodi pri vakuumu manjem od 800 Pa (6 torr), uz povremeno protresanje radi uklanjanja zarobljenog zraka. Uzorak se zatim prebacuje u košaricu koja je u kadi za uranjanje te odrađuje njegova saturirana potopljena masa M_{sub} (s točnošću od 0,1 g) na način da se od zasićene i potopljene mase uzorka i košarice oduzme masa same košare.

Spremnik s uzorkom s poklopcem se čisti i suši, a određuje se i njegova masa koja se označava s A . Uzorak se uklanja iz uronjene kupelji i površinski se obriše vlažnom krpom, pazeći da se ukloni samo površinska voda uz osiguravanje da se ne izgube fragmenti kamena. Uzorak se prebacuje u spremnik s uzorkom, zamjenjuje se poklopac i određuje masa (koju označavamo s B) koja predstavlja masu saturiranog uzorka plus spremnik. Poklopac spremnika se ukloni, a uzorak osuši do konstantne mase na temperaturi od 105 °C, poklopac se vrati i uzorak ostavi da se 30 minuta hladi u uređaju za sušenje. Mjeri se masa osušenog uzorka i spremnika, a to se označava s C .

Proračun potrebnih veličina se obavlja prema izrazima od 3-1 do 3-5

$$M_{sat} = B - A, \quad (3-1)$$

gdje su: M_{sat} - saturirana masa uzorka (kg),
 B - masa saturiranog uzorka i spremnika (kg),
 A - masa samog spremnika za uzorak (kg).

$$M_s = C - A, \quad (3-2)$$

gdje su: M_s - masa osušenog uzorka (kg),
 C - masa osušenog uzorka uzorka i spremnika (kg),
 A - masa samog spremnika za uzorak (kg).

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w}, \quad (3-3)$$

gdje su: V - ukupni volumen (m³),
 M_{sat} - saturirana masa (kg)
 M_{sub} - saturiran masa potopljenog uzorka (kg)
 ρ_w - gustoća vode (kg/m³).

$$n = 100 \cdot \frac{V_v}{V}, \quad (3-4)$$

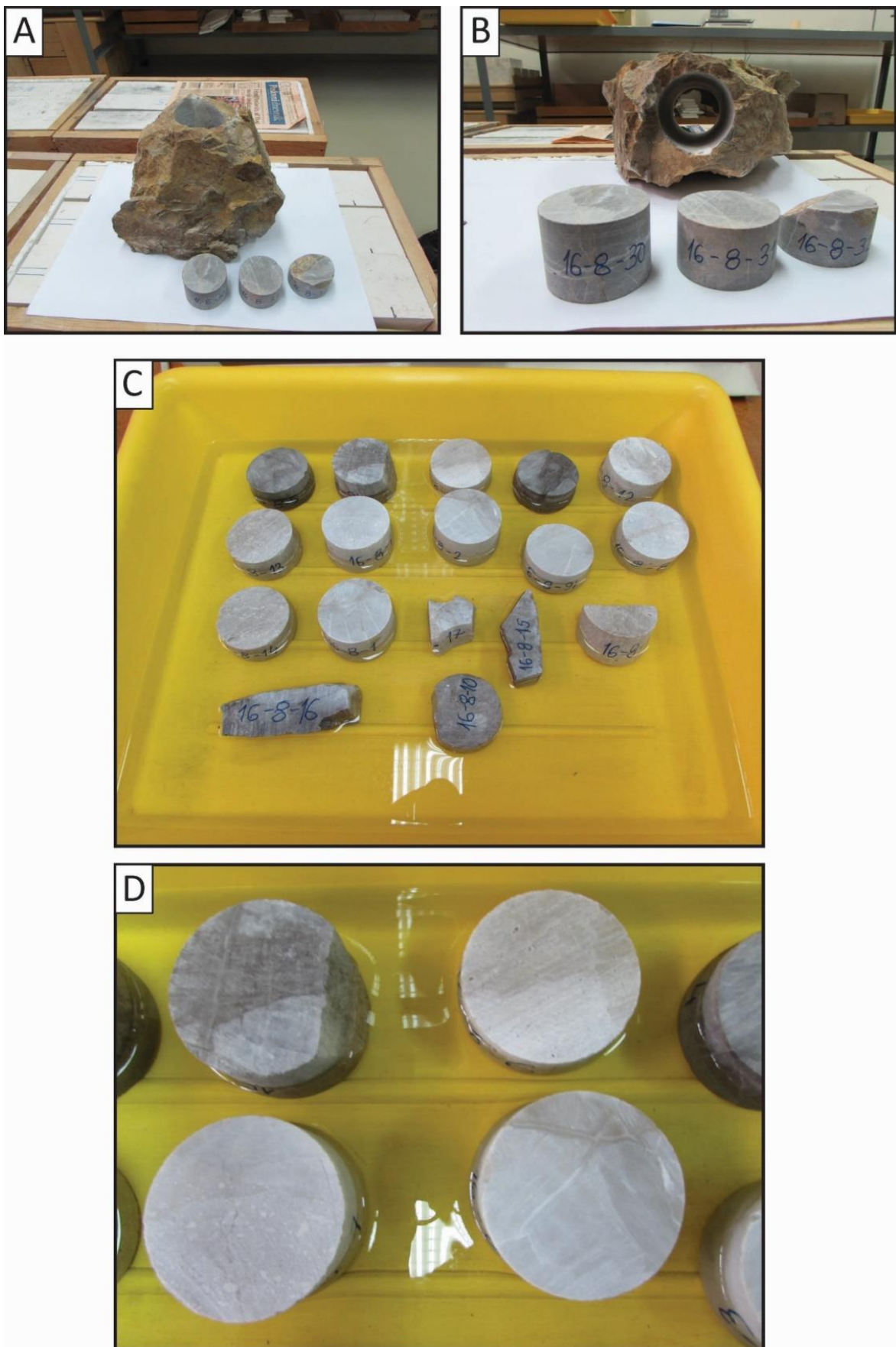
gdje su: n - poroznost (%),
 V_v - volumen pora (m^3)
 V - ukupni volumen (m^3).

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}, \quad (3-5)$$

gdje su: ρ_d - suha gustoća stijena (kg/m^3),
 M_s - masa čvrstih čestica (kg)
 V - ukupni volumen (m^3).

Prikaz rezultata (eng. "Reporting of Results")

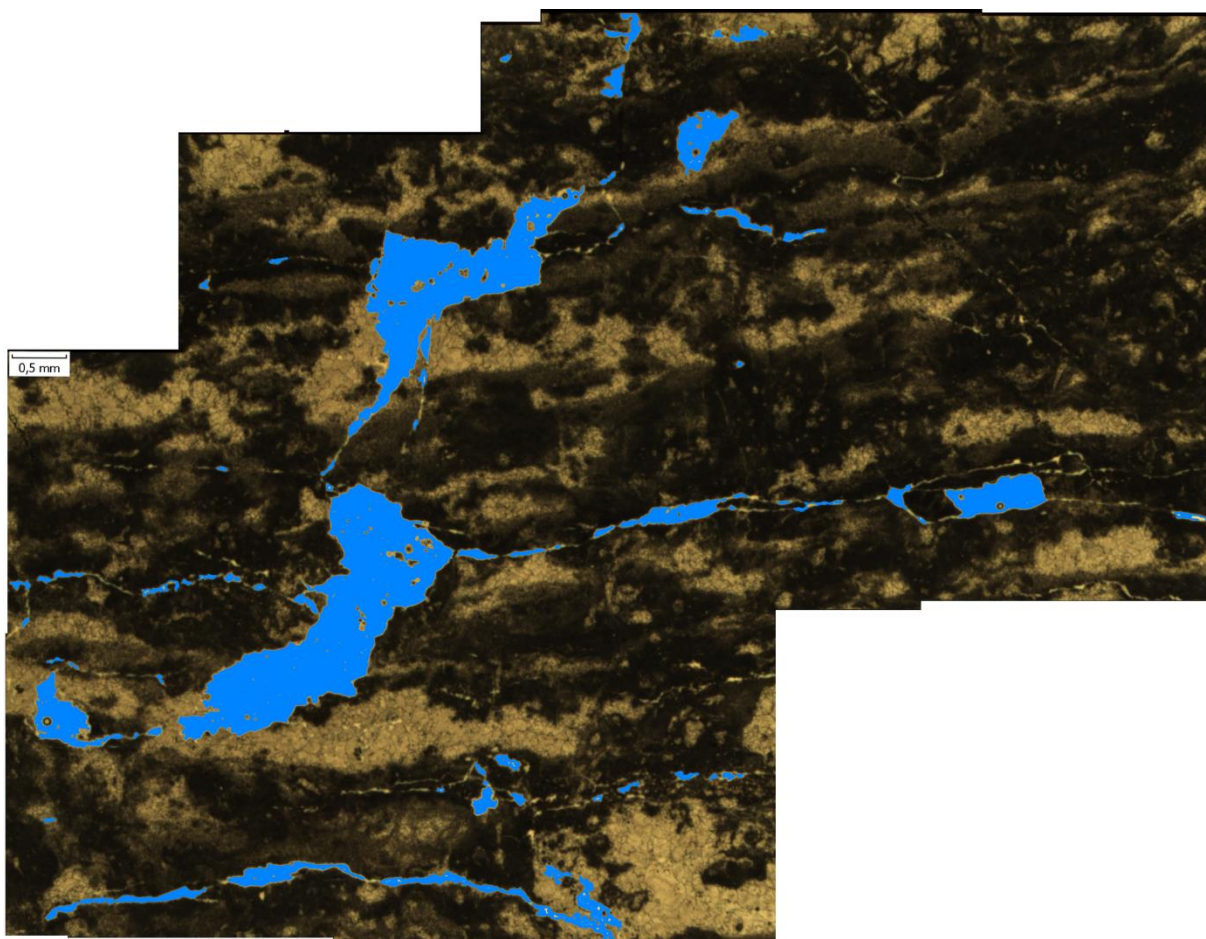
Izvještaj treba sadržavati vrijednosti poroznosti i suhe gustoće za uzorak i treba navesti da je najveći volumen dobiven tehnikom uzgona, a da je volumen pora dobiven zasićenjem vode. Vrijednosti gustoće treba dati na najbližih 10 kg/m^3 , a vrijednosti poroznosti na najbližih 0,1 postotka.



Slika 3-1. A i B) Fotografije uzoraka pravilnog oblika; **C i D)** uzorci za vrijeme saturacije vodom (iz Pavičić 2018).

3.2. Analize mikroskopskih izbrusaka za određivanje poroznosti

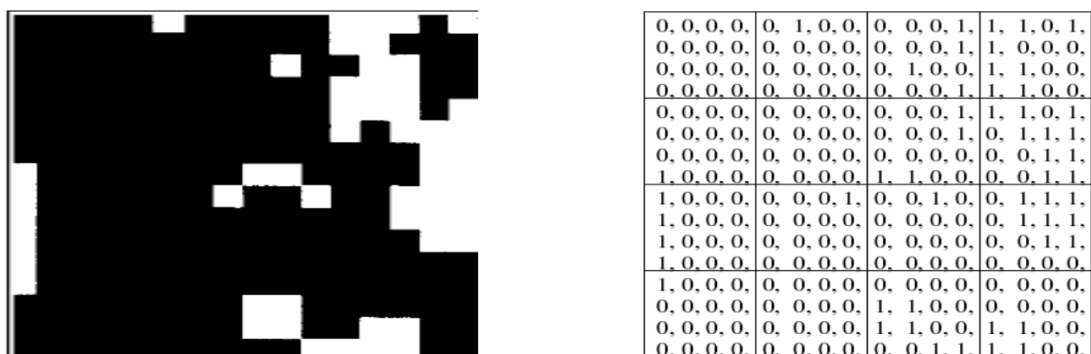
Analiza mikroskopskih izbrusaka načinjena je na mikrofotografijama izbrusaka. Mikroskopski izbrusci impregnirani su fluorescentnom smolom plave boje, te se pore jasno mogu razaznati na mikrofotografijama (Slika 3-2).



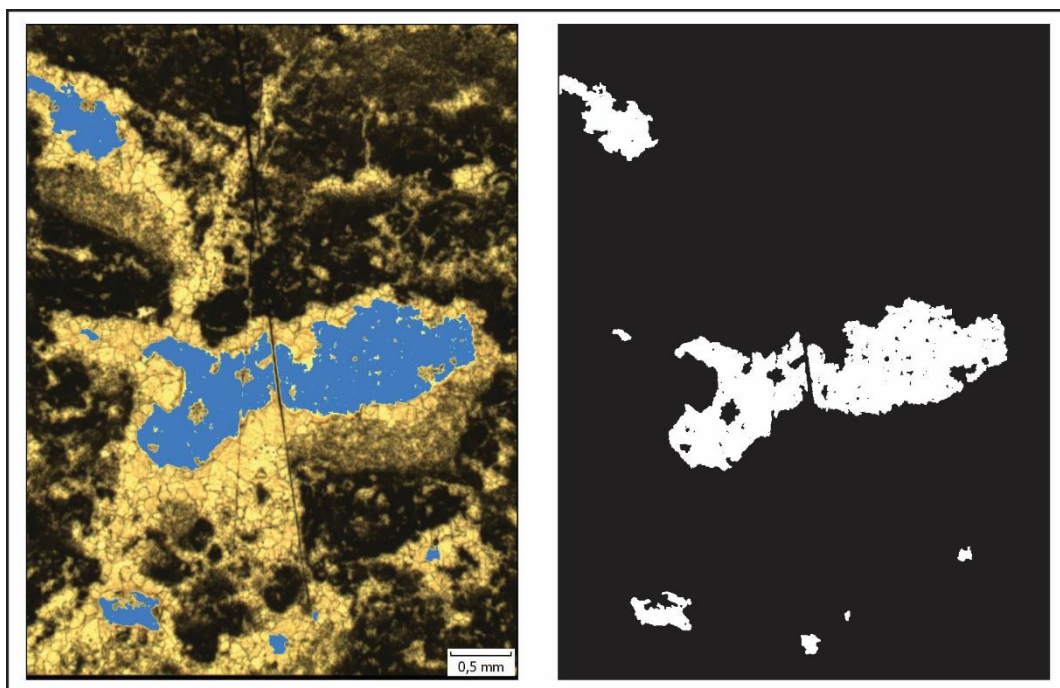
Slika 3-2. Primjer mikrofotografije formacije Glavni dolomit unutar gornjotrijskih žumberačkih dolomita.

Svrha analize pora na mikrofotografijama je analizirati geometrijske značajke pora te mjerenim vrijednostima u laboratoriju dati geometrijsku i vizualnu karakterizaciju. Analiza mikrofotografija obavljena je u računalnom softveru Fiji ImageJ (Schneider et al., 2012; Schindelin et al., 2012; Rueden et al., 2017) pomoću dva „plugin-a“: Biovoxxel (Brocher, 2015) i FracLac (Karperien, 2001a, 2001b). Provedene analize predstavljaju mali dio posebnih tehnika razvijenih za pridobivanje čim više informacija iz fotografija a nazivaju se „Image Processing“.

Prvi korak u obradi fotografija bio je fotografije pripremiti i pretvoriti u binarne fotografije. U mikrofotografijama izbrusaka stijena, pore su radi impregnacije, fluorescentno plavo obojane što odudara od ostatka boja na mikrofotografijama. Zato je bilo moguće jednostavno izdvojiti plave boje koje su u binarnoj fotografiji predstavljene bijelom bojom a ostatak stijene crnom bojom. Binarne fotografije sastoje se samo od crne i bijele boje odnosno od 1 (crna/bijela) i 0 (bijela/crna) (Slika 3-3 i Slika 3-4).

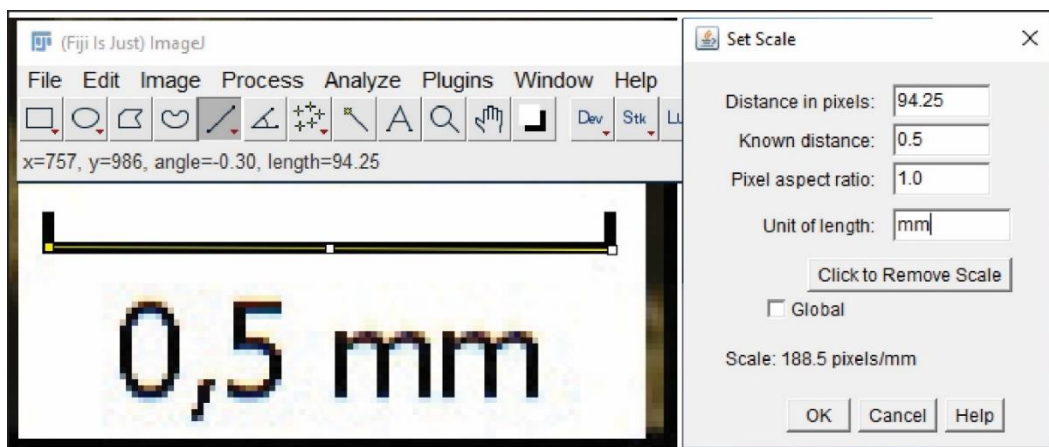


Slika 3-3. Binarna fotografija i matrica slike: 0-crna boja; 1-bijela boja (Jie et al., 2007).



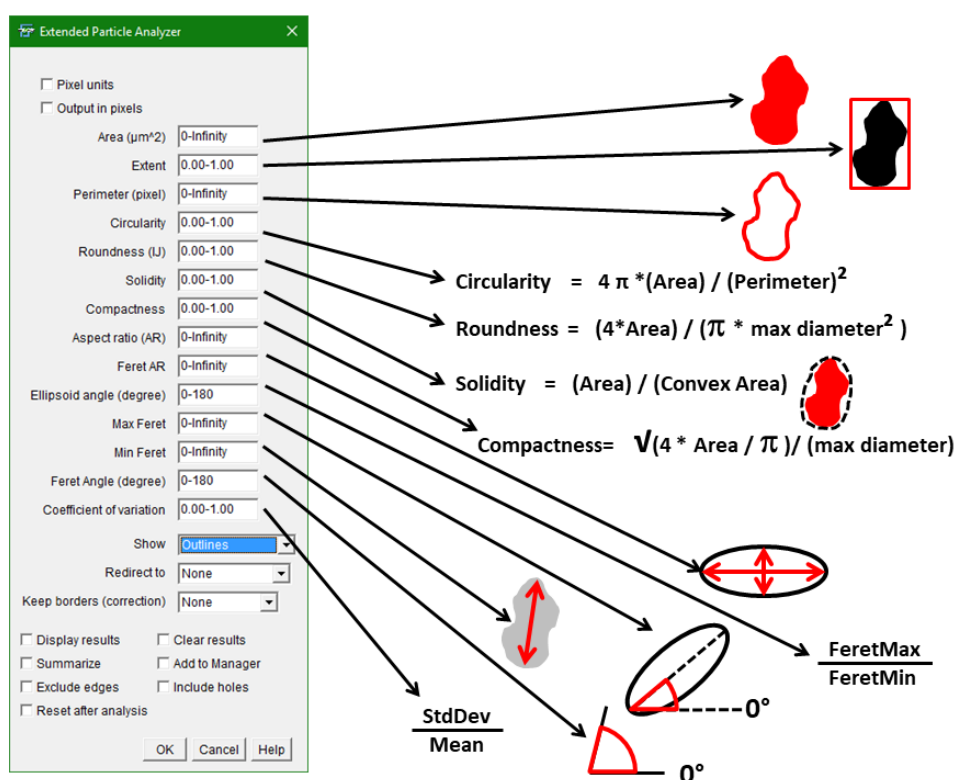
Slika 3-4. Primjer izvorne mikrofotografije impregniranog uzorka i binarne fotografije istog uzorka.

Sljedeći korak bio je fotografijama dati mjerilo, kako bi se mogle izračunati geometrijski parametri pora. Svaka je fotografija imala grafičko mjerilo te se za svaku fotografiju definiralo mjerilo u obliku X piksela = Y milimetara (Slika 3-5).



Slika 3-5. Određivanje mjerila fotografije.

Kada su fotografije pretvorene u binarne i kada im je zadano mjerilo u milimetrima, bitno je bilo odrediti parametre koji su potrebni za čim precizniji opis geometrije pora.

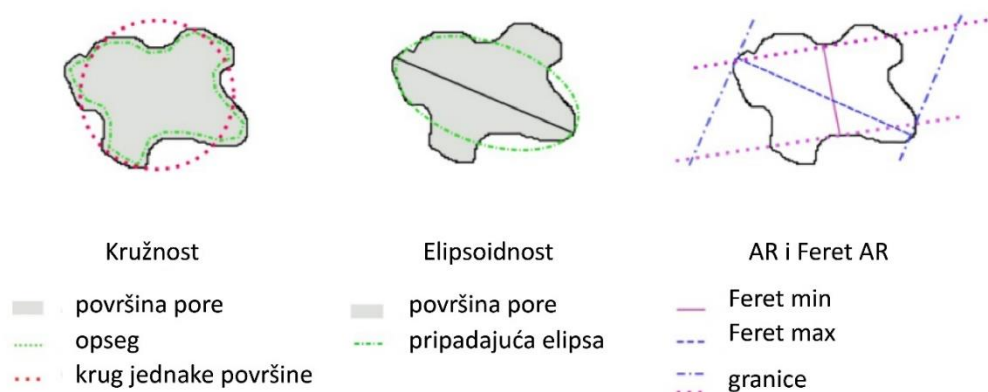


Slika 3-6. Grafički prikaz opisa analiziranih parametara.

Odabrani su sljedeći parametri (Slika 3-6):

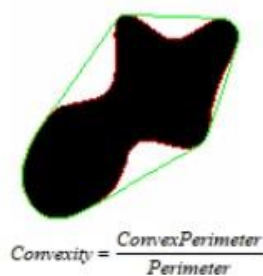
- **Površina** (engl. „Area“) (mm^2) – površina svake pojedinačne pore

- **Opseg** (engl. „Perimeter“) (mm) – opseg svake pojedinačne pore
- **Duljina** (engl. „Width“) (mm) – duljina svake pojedinačne pore
- **Visina** (engl. „Height“) (mm) – visina svake pojedinačne pore
- **Duža os** (engl. „Major“) (mm) – duža os pripadajuće elipse svake pojedinačne pore
- **Kraća os** (engl. „Minor“) (mm) – kraća os pripadajuće elipse svake pojedinačne pore
- **Kut** (engl. „Angle“) (od 0° do 180°) – orijentacija duže osi elipse svake pojedinačne pore
- **Kružnost** (engl. „Circularity“) (-) – parametra kojim se brojčano izražava devijacija oblika objekta u odnosu na kružnicu (Slika 3-7)
- **Feret** (mm) - Najveća udaljenost između neke dvije točke na vanjskom rubu pore (Slika 3-7)
- **Feret kut** (FeretAngle) (od 0° do 180°) – kut linije koja povezuje dvije najudaljenije točke na vanjskom rubu pore
- **Min Feret** (mm) – najmanja udaljenost između dvije točke na vanjskom rubu pore
- **AR** (engl. „Aspect Ratio“) (-) – Odnos između duže i kraće osi pripadajuće elipse oko pore
- **Elipsoidnost** (engl. „Roundness“) (-) – Parametar vrlo sličan kružnosti no predstavlja mjeru „hrapavosti“ objekta u odnosu na kružnicu (Slika 3-7).



Slika 3-7. Grafički prikaz i odnos kružnosti, elipsoidnosti i Ferret AR-a.

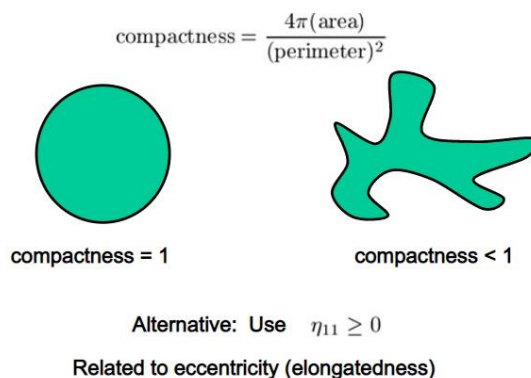
Parametar „Solidity“ (-) – predstavlja omjer površine objekta i površine konveksnog zatvaranja. (engl. „convex hull“). Ovaj parametar možemo zamisliti kao ovojniciu oko nekog objekta. Parametar Solidity bi tada bio omjer površine objekta i površine unutar ovojnice. Također jedan od parametara koji opisuju „hrapavost“ objekta (Slika 3-8).



Slika 3-8. Grafički prikaz i objašnjenje parametra „Solidity“ (<http://www.imagemet.com>).

Feret izduženost (engl. „Feret AR ili „Elongation indeks“) (-) - Odnos između duže i kraće Ferret osi pripadajuće elipse oko pore.

Kompaktnost (engl. „Compactness“) (-) – još jedan od parametara koji opisuju koliko je analizirani objekt sličan krugu i daje još jednu mjeru izduženosti i „hrapavosti“ (Slika 3-9)



Slika 3-9. Grafički prikaz i objašnjenje parametra kompaktnosti (<https://slideplayer.com>).

Rasprostranjenost (engl. „extent“) (-) je odnos površine pore i površine najmanjeg pravokutnika koji se može opisati oko pore

Fdim (-) – fraktalna dimenzija pojedine pore (Slika 3-10 i Slika 3-11). Pojam dimenzije u matematici promatra se s različitih stajališta te postoje različite definicije dimenzije (SCLEICHER, 2007). Topološke dimenzije su konačne i cjelobrojne te grubo definiraju prostor. No nije sve objekte u prostoru moguće opisati topološkim dimenzijama. MANDELBROT, 1967, 1983 je primijetio da se u prirodi pojavljuje puno objekata koji se ne mogu potpuno opisati topološkim dimenzijama. Njihovu je dimenziju, definirao kao fraktalnu dimenziju a ona predstavlja mjeru koliko neki objekt ispunjava metrički prostor tj. prostor koji se može mjeriti pomoću nekog parametra. Npr. točka ima dimenziju iznosa 0, pravac iznosa 1, ploha iznosa 2 a kocka iznosa 3 (Slika 3-10) (Pavičić, 2018).

MANDELBROT je fraktal definirao kao skup, objekt, pojavu čija je fraktalna dimenzija (D) veća od topološke (DT) (MANDELBROT, 1983) (3-6):

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{i+1}}{N_i}\right)}{\ln\left(\frac{r_i}{r_{i+1}}\right)} = \frac{\log\left(\frac{N_{i+1}}{N_i}\right)}{\log\left(\frac{r_i}{r_{i+1}}\right)} \quad (3-6)$$

Gdje su:

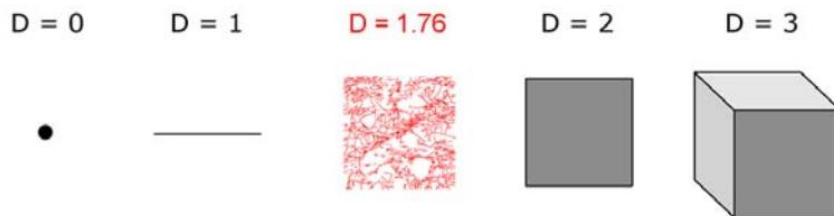
$\ln$ - logaritam s bazom e

$\log$ - logaritam s bazom 10.

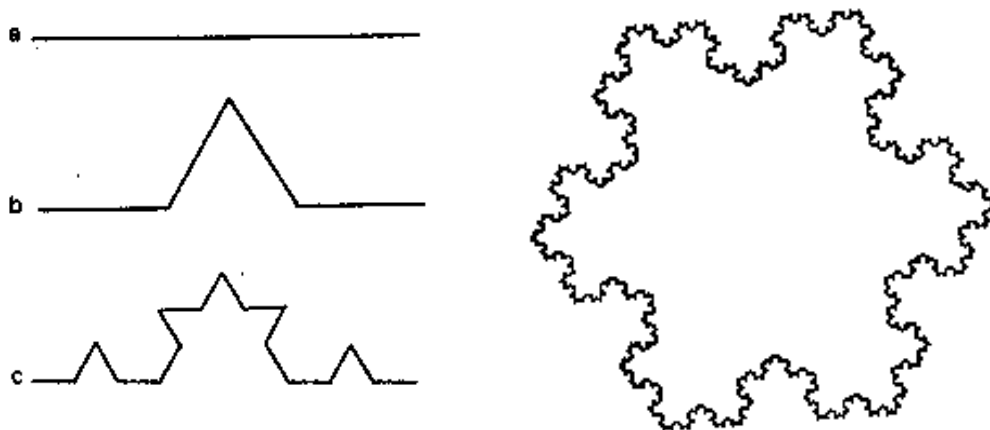
N_i – broj objekata, fragmenata karakteriziranih linearnom mjerom r

r_i – linearna mjera parametra N

Na taj način fraktalna dimenzija predstavlja mjeru kompleksnosti mjerenog objekta.



Slika 3-10. Fraktalne dimenzije topoloških objekata sa cjelobrojnim fraktalnim dimenzijama i primjer fraktalnog sustava pukotina s dimenzijom $D=1,76$ (preuzeto iz Verbovšek, 2009).

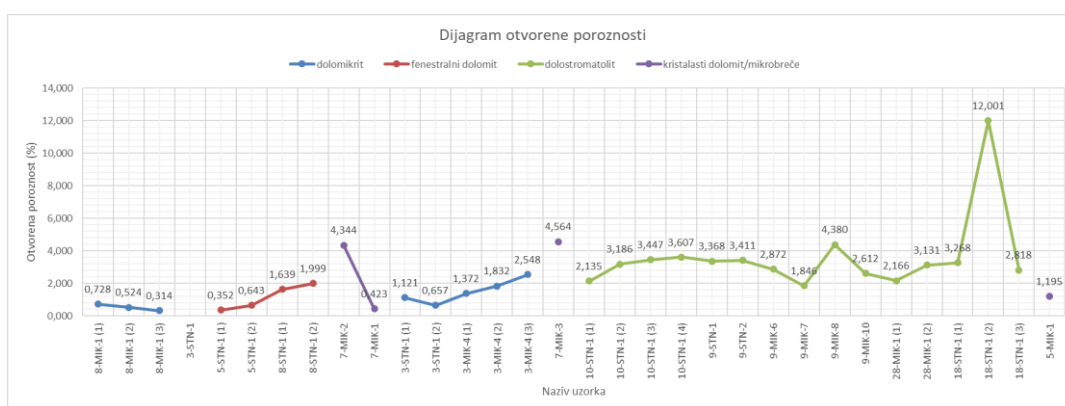


Slika 3-11. Kochov otok i njegovi sastavni elementi (iz Pavičić, 2018).

4. OPIS REZULTATA ISTRAŽIVANJA

4.1. Rezultati mjerenja otvorene poroznosti metodom uronjene mase

Otvorene poroznosti svih formacija i facijesa nalaze se pretežito u intervalu od 0,314 % do 4,564 % (Slika 4-1 i Tablica 4-1) (Pavičić, 2018). Neki uzorci su sadržavali veće pukotine, ili više pukotina, pa zato imaju veće vrijednosti otvorene poroznosti, koja tada nije rezultat samo taložne i diagenetske nego dominantno mikropukotinske poroznosti. Takav uzorak je 18-STN-1 (2) (Slika 4-1 i Tablica 4-1) kojemu je izmjerena otvorena poroznost od 12 % te kao takav nije reprezentativan za ovo istraživanje.



Slika 4-1. Dijagram otvorene poroznosti uzoraka mjerenih metodom uronjene mase (Pavičić, 2018).

Tablica 4-1. Rezultati mjerenja otvorene poroznosti (n_{ot}) na uzorcima T₃ dolomita. Uz rezultate mjerenja poroznosti prikazani su i rezultati izračuna gustoće (ρ i ρ_{ot}) (Pavičić, 2018).

Redn i br.	Terenska točka	Član/Formacija	Mikrofacijes dolomita	Naziv uzorka	n	n_{ot}	ρ	ρ_{ot}	razlika $\rho_{ot}-\rho$
1	MIK-10	Glavni dolomit	stromatolitni	10-STN-1	2,105	2,135	2743,66	2783,31	-39,640
2	MIK-10	Glavni dolomit	stromatolitni	10-STN-1	3,100	3,186	2648,87	2722,15	-73,270
3	MIK-10	Glavni dolomit	stromatolitni	10-STN-1	3,379	3,447	2685,61	2739,69	-54,080
4	MIK-10	Glavni dolomit	stromatolitni	10-STN-1	3,579	3,607	2719,26	2740,98	-21,730
5	MIK-15	Srednji trijas	stromatolitni	28-MIK-1	1,298	2,166	1685,45	2813,62	-1128,17
6	MIK-15	Srednji trijas	stromatolitni	28-MIK-1	1,885	3,131	1644,18	2731,27	-1087,09
7	MIK-17	Glavni dolomit	kristalasti	7-MIK-2	4,130	4,344	2553,64	2686,23	-132,580
8	MIK-17	Glavni dolomit	rasjedna breča	7-MIK-3	4,240	4,564	2520,58	2713,38	-192,800
9	MIK-18	T ₃	stromatolitni	18-STN-1	3,233	3,268	2733,89	2763,30	-29,400
10	MIK-18	T ₃	stromatolitni	18-STN-1	12,979	12,001	2933,00	2711,98	221,030
11	MIK-18	T ₃	stromatolitni	18-STN-1	2,672	2,818	2648,23	2792,87	-144,640
12	MIK-3	Vranjak/Slapnica	dolomikrit	3-STN-1	1,555	1,562	2768,91	2782,36	-13,450
13	MIK-3	Vranjak/Slapnica	organogeni dolomikrit	3-STN-1	1,117	1,121	2781,12	2791,22	-10,090
14	MIK-3	Vranjak/Slapnica	organogeni dolomikrit	3-STN-1	0,637	0,657	2753,90	2844,27	-90,370

15	MIK-3	Vranjak/Slapnica	organogeni dolomikrit	3-MIK-4	1,333	1,372	2739,25	2820,27	-81,020
16	MIK-3	Vranjak/Slapnica	organogeni dolomikrit	3-MIK-4	1,745	1,832	2742,02	2878,15	-136,140
17	MIK-3	Vranjak/Slapnica	organogeni dolomikrit	3-MIK-4	3,027	2,548	3372,16	2839,11	533,050
18	MIK-5	Glavni dolomit	fenestralni	5-STN-1	0,348	0,352	2806,67	2836,87	-30,200
19	MIK-5	Glavni dolomit	fenestralni	5-STN-1	0,634	0,643	2809,43	2846,70	-37,270
20	MIK-5	Glavni dolomit	fenestralni	5-MIK-1	1,201	1,195	2890,80	2876,62	14,170
21	MIK-7	Glavni dolomit	kristalasti	7-MIK-1	0,565	0,423	3738,95	2799,24	939,710
22	MIK-8	Glavni dolomit	dolomikrit	8-MIK-1	0,834	0,728	3254,35	2840,80	413,550
23	MIK-8	Glavni dolomit	dolomikrit	8-MIK-1	0,520	0,524	2825,18	2843,83	-18,640
24	MIK-8	Glavni dolomit	dolomikrit	8-MIK-1	0,306	0,314	2771,95	2843,11	-71,170
25	MIK-8	Glavni dolomit	fenestralni	8-STN-1	1,616	1,639	2771,83	2810,58	-38,760
26	MIK-8	Glavni dolomit	fenestralni	8-STN-1	1,927	1,999	2679,19	2779,29	-100,100
27	MIK-9	Glavni dolomit	stromatolitni	9-STN-1	9,902	3,368	8069,42	2744,77	5324,650
28	MIK-9	Glavni dolomit	stromatolitni	9-STN-2	3,344	3,411	2694,94	2749,07	-54,130
29	MIK-9	Glavni dolomit	stromatolitni	9-MIK-6	2,441	2,872	2397,02	2821,00	-423,980
30	MIK-9	Glavni dolomit	stromatolitni	9-MIK-7	1,889	1,846	2895,57	2828,52	67,040
31	MIK-9	Glavni dolomit	stromatolitni	9-MIK-8	4,989	4,380	3182,85	2794,27	388,580
32	MIK-9	Glavni dolomit	stromatolitni	9-MIK-10	2,630	2,612	2812,28	2793,28	19,010

4.2. Rezultati analize geometrijskih značajki pora na mikrofotografijama

Na temelju geološke građe istraživanog područja, mikrofotografije poroznosti podijeljene su prema stratigrafskim značajkama. Analizirane su mikrofotografije člana Vranjak, formacije Glavni dolomit te uzoraka koji nisu stratigrafski razvrstani u formacije no pripadaju gornjotrijaskim dolomitima. Rezultati analize svih mikrofotografija nalaze se u prilogu 1 koji je dostupan u digitalnom obliku. Od svih analiziranih parametara, opisani će biti samo oni koji su značajniji za geometrijski opis pora a to su: Površina i opseg pora, kružnost, AR, eliptičnost, „Solidity“, Feret AR, kompaktnost i fraktalna dimenzija. Ukupno je analizirano 12.074 pora formacije Glavni dolomit, 1.227 pora člana Vranjak formacije Slapnica te 637 pora gornjotrijaskih dolomita koji nisu svrstani u formacije što sveukupno čini 13.938 pora (prilog 4).

4.2.1. Površina pora

4.2.1.1. Član Vranjak formacije Slapnica

Površine pora člana Vranjak, formacije Slapnica nalaze se u rasponu od 0 do 6518 mm². Iako taj raspon izgleda poprilično veliko, iz tablice te histograma frekvencija površina pora (Prilog 1) vidljivo je da je preko 95 % pora zapravo površine između 0 i 1 mm² te se sve skupa nekoliko pora nalazi unutar raspona od 1 do 6518 mm². Detaljnijom analizom frekvencija površina pora vidljivo je da je gotovo 850 od 1227 pora površine od 0 do 0,002 mm² (Prilog 1) među kojima ponovno dominiraju manje pore te se frekvencija smanjuje kako se povećava površina pora (Prilog 1). Medijan i srednja vrijednost su 61,50 mm² i 71.430 mm²

4.2.1.2. Formacija Glavni dolomit

Za formaciju Glavni dolomit nisu prikazivani histogrami frekvencija površina pora radi velikog broja podataka i izuzetno velikog raspona od 0 do 44.039 mm² s time da je 99 % pora manje od 1 mm² (Prilog 2). Na to ukazuje i velika razlika između medijana (0,05 mm²) i srednje vrijednosti (129,53 mm²). Pore s površinom 0 su zapravo tako male pore da se ne mogu analizirati pomoću mikrofotografija u ovom mjerilu. Te pore, koje su toliko male da im ovom metodom nije bilo moguće izmjeriti površinu rezultiraju anomalijama u histogramima frekvencija ostalih parametara („Solidity“, fraktalne dimenzije, elipsoidnost, kružnost i kompaktnost).

4.2.1.3. Gornjotrijaski (T₃) dolomiti nesvrstani u formacije

Vrijednosti površina pora T₃ dolomita nalaze se u rasponu od 0,00078 mm² do 1,94 mm² te kao i kod člana Vranjak i formacije Glavni dolomit najveći broj pora nalazi se u donjem dijelu intervala odnosno najveći je broj pora vrlo sitnih dimenzija (Prilog 3). Medijan i srednja vrijednost površina pora su 0,008 i 0,03 mm² te je vidljivo puno manji raspon nego kod ostalih analiziranih formacija i članova što rezultira boljim histogramima frekvencija bez anomalija na rubnim vrijednostima.

4.2.2. Opseg pora

4.2.2.1. Član Vranjak formacije Slapnica

Opseg pora člana Vranjak, formacije Slapnica nalaze se u rasponu od 0,028 do 854 mm. Kao i kod površine pora, taj raspon izgleda poprilično veliko, no iz tablice te histograma frekvencija površina pora (prilog 1) vidljivo je da je gotovo 860 od 1227 pora površine od 0,028 do 0,002 mm² među kojima ponovno dominiraju manje pore te se frekvencija smanjuje kako se povećava opseg pora (prilog 1). Medijan i srednja vrijednost su 34,39 mm i 89,11 mm.

4.2.2.2. Formacija Glavni dolomit

Za formaciju Glavni dolomit nisu prikazivani histogrami frekvencija opsega pora radi velikog broja podataka i izuzetno velikog raspona od 0,01 do 17.738 mm s time da je 99% pora ima opseg manje od 1 mm (prilog 2). Na to ukazuje i velika razlika u medijanu (0,04 mm) i srednjoj vrijednosti (16,75 mm) opsega pora. Histogram frekvencija opsega pora vrlo je sličan histogramu frekvencija površini pora, što je i očekivano radi međusobne ovisnosti ta dva parametra.

4.2.2.3. Gornjotrijaski (T₃) dolomiti nesvrstani u formacije

Histogram frekvencija opsega pora T₃ dolomita prati histogram frekvencija površina te je raspodjela gotovo identična raspodjelama za prethodne dvije cjeline. Interval je kao i kod površina nešto manji nego za dosadašnje cjeline a kreće se od 0,11 do 20 mm (prilog 3). Medijan i srednja vrijednost su 0,43 mm i 0,84 mm.

4.2.3. Kružnost pora

4.2.3.1. Član Vranjak formacije Slapnica

Kružnost pora je parametar koji opisuje koliko geometrija pore odstupa od kružnice. Što je vrijednost kružnosti bliže vrijednosti 1, to je oblik mjerenog objekta bliže krugu. Savršeni krug ima iznos kružnost 1. Kružnosti člana Vranjak, nalaze se u rasponu od 0,06 do 1 s time da su frekvencije vrijednosti poprilično ujednačeno raspoređene po cijelom rasponu vrijednosti (prilog 1). Ipak po frekvenciji, najviše pora, 93 % nalaze se u rasponu od 0,98 do 1 što ukazuje da su te pore gotovo identične krugovima. Najmanji broj pora ima kružnosti blizu 0 odnosno najmanje je pora s velikim odstupanjima oblika u odnosu na kružnicu. Medijan i srednja vrijednost iznose 0,67 i 0,64.

4.2.3.2. *Formacija Glavni dolomit*

Kružnost pora formacije Glavni dolomit nalazi se u rasponu od 0,02 do 1. U histogramu frekvencija, sličan, samo puno izraženiji skok u odnosu na član Vranjak, vidljiv je kod vrijednosti 1 što ukazuje da je veliki broj (preko 4 000) pora vrlo malog odstupanja od oblika kruga, što potvrđuju i drugi parametri ove formacije. (prilog 2) Razlog tome je veliki broj pora premalih dimenzija da bi se mjerile na temelju mikrofotografija ovog mjerila. Osim toga, kružnosti ove formacijemogu se aproksimirati s normalnom raspodjelom vrlo blage amplitude, sa medijanom i srednjom vrijednosti 0,81 i 0,77.

4.2.3.3. *Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije*

Histogram frekvencija kružnosti pora T_3 dolomita pokazuje konstantan trend porasta broja pukotina kako raste kružnost od 0 do 1 (prilog 3). Raspodjela je više-manje normalna bez ekstremnih vrijednosti. Medijan i srednja vrijednost su 0,55 i 0,54 što potvrđuje približno podjednaku zastupljenost svih vrijednosti unutar raspona kružnosti.

4.2.4. Odnos duže i kraće osi pripadajuće elipse (AR)

4.2.4.1. *Član Vranjak formacije Slapnica*

Odnos duže i kraće osi pripadajuće elipse ukazuje na izduženost mjerenog objekta odnosno u slučaju ovog istraživanja, na izduženost pore. AR s iznosom 1 znači da se radi o krugu a što je veći iznos to je objekt izduženiji. Iznosi AR-a člana Vranjak nalaze se u rasponu od 1 do 16,25 (prilog 1). Najveći broj pora ima AR u rasponu od 1 do 3,6 odnosno od toga da su obje osi elipse jednake duljine do toga da je duža od gotovo 4 puta duža od kraće. Medijan i srednja vrijednost AR-a člana Vranjak iznose 1,71 i 2,00.

4.2.4.2. *Formacija Glavni dolomit*

Odnos duže i kraće osi pripadajuće elipse ima približno sličnu raspodjelu kao i kod člana Vranjak a raspon vrijednosti je od 1 do 11 sa medijanom 1,60 a srednjom vrijednosti 1,75 (prilog 2). To ukazuje da su duljine duže i kraće osi približno slične kod velikog broja pora tj da pore nisu izdužene niti u jednom smjeru. Izuzetno male pore su karakterizirane AR-om iznosa 1 ili oko 1 a kako je tih pora daleko najviše u ukupnom setu, dobiveni rezultati su logični. Zanimljivo je da se ta anomalija ne vidi na histogramu frekvencija Feret AR-a.

4.2.4.3. *Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije*

Odnos duže i kraće osi pripadajuće elipse za T_3 ima približno sličnu raspodjelu kao i kod člana Vranjak i formacije Glavni dolomit a raspon vrijednosti je od 1 do 15,78 (prilog 3) sa medijanom 1,79 a srednjom vrijednosti 2,11. Te vrijednosti a i histogram frekvencija ukazuje da je veći dio pora s približno jednakom duljinom osi te broj izduženih pora i izduženost pora naglo opada.

4.2.5. Elipsoidnost

4.2.5.1. *Član Vranjak formacije Slapnica*

Elipsoidnost pora je parametar koji opisuje koliko geometrija pore odstupa od pripadajuće elipse. Što je vrijednost elipsoidnosti bliže vrijednosti 1, to je oblik mjerenog objekta bliže pripadajućoj elipsi. Kada objekt odnosno pora ima iznos elipsoidnosti 1, to znači da nema nikakvih neravnina nego je njezina geometrija potpuno identična elipsi. . Elipsoidnosti člana Vranjak, nalaze se u rasponu od 0,0062 do 1 s time da su frekvencije vrijednosti poprilično ujednačeno raspoređene po cijelom rasponu vrijednosti (prilog 1) s time da je jasno vidljivo da frekvencija raste iznad 0,2 pa sve do 0,65 kada ponovno blago pada. To ukazuje da najviše ima pora s „umjerenim“ devijacijama“ od pripadajuće elipse. Ovaj parametar do određene razine kvantificira „hrapavost“ objekta odnosno neravnine a prema tome i histogramu frekvencija, najmanje pora je vrlo slično pripadajućoj elipsi te s velikim odstupanjima dok je 70 % vrijednosti u rasponu od 0,2 do 0,85. Medijan i srednja vrijednost navedenog parametra imaju iznose 0,59 i 0,58.

4.2.5.2. *Formacija Glavni dolomit*

Histogram frekvencija pora formacije Glavni dolomit prikazuje istu anomaliju kao i kružnost, tj. da veliki broj pora ima elipsoidnost jednaku 1 odnosno gotovo su identične pripadajućoj elipsi. Ako uzmemo da je najviše pora ima mali AR, odnosno AR blizu 1, može se zaključiti da te pore uglavnom nisu izdužene. Elipsoidnost pora formacije Glavni dolomit nalazi se u rasponu od 0,09 do 1 sa medijanom 0,63 a srednjom vrijednosti 0,64 (prilog 2). Na histogramu frekvencija mogu se primijetiti dva ekstrema. Jedan je velika frekvencija pora elipsoidnost od 0,9 do 1 što je rezultat rezolucije i malih dimenzija pora, te drugi ekstrem, veliki porast frekvencija u intervalu od 0,491 do 0,516.

4.2.5.3. *Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije*

Elipsoidnost T_3 dolomita slično kao i kružnost je čini se normalno raspoređena u rasponu od 0,063 do 0,988 sa medijanom i srednjom vrijednosti 0,56 (prilog 3). Kod T_3 ne vide se „anomalije“ u histogramu frekvencija koje su kod člana Vranjak i formacije Glavni dolomit, rezultat rezolucije i mjerila fotografije u odnosu na veličine pora.

4.2.6. Parametar „Solidity“

4.2.6.1. *Član Vranjak formacije Slapnica*

Parametar „Solidity“ također je jedan od parametara koji opisuje „hrapavost“ pore na način da kvantificira koliko pora odstupa od konveksnog zatvaranja. Vrijednosti ovog parametra trebaju se nalaziti u rasponu od 0 do 1 s time da vrijednost 1 će imati pora čija je geometrija identična njezinom konveksnom zatvaranju. Iznosi ovog parametra člana Vranjak nalaze se u intervalu od 0,365 do 1 (prilog 1). Što je vrijednost „Solidity“ parametra manja, to je pora različitija od svog konveksnog zatvaranja tj to pora ima više neravnina. Prema histogramu frekvencija „Solidity“ vidljivo je da je relativno malo pora s malim iznosima a medijan raspona iznosi 0,81 što ukazuje da većina pora ima relativno malo neravnina.

4.2.6.2. *Formacija Glavni dolomit*

Histogram frekvencija parametra „Solidity“ također pokazuje sličnu značajku kao i ostali analizirani parametri da veliki broj pora (točnije 3012) ima vrijednost približno 1 (prilog 2). To je rezultat velikog broja sitnih pora čija se geometrija ne može analizirati u ovom mjerilu istraživanja. Vrijednosti ovog parametra za formaciju Glavni dolomit nalaze se u rasponu od 0,35 do 1 sa medijanom 0,84 i srednjom vrijednosti 0,85. Osim ekstrema oko vrijednosti 1, parametra „Solidity“ nema većih odstupanja od blage asimetrične normalne raspodjele.

4.2.6.3. *Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije*

Histogram frekvencija T_3 dolomita pokazuje blagi rast frekvencija od 0,252 sve do 0,707 nakon čega histogram stagnira do 0,952 kada frekvencija naglo pada na svega 25 pora od 0,952 do 1 (prilog 3). Takva raspodjela parametra „Solidity“ ukazuje da unutar raspona vrijednosti dominiraju pore sa relativno malom razlikom njezine stvarne geometrije te pripadajućeg konveksnog zatvaranja no i da je izuzetno malo pora koje su skoro identične

kao njihovo konveksno zatvaranje. Medijan i srednja vrijednost parametra „Solidity“ iznose 0,80 i 0,78.

4.2.7. Feret AR

4.2.7.1. Član Vranjak formacije Slapnica

Odnos duže i kraće Feret osi pripadajuće elipse također kao i AR ukazuje na izduženost pore. Feret AR s iznosom 1 znači da su najmanja i najveća udaljenost unutar pore jednake odnosno da se radi o kružnici. Što je veći iznos to je objekt izduženiji. Iznosi Feret AR-a člana Vranjak nalaze se u rasponu od 1,1 do 11,2 (prilog 1). Frekvencija Histogram frekvencija Feret AR-a vrlo je sličan histogramu frekvencija AR-a što je i očekivano jer se ta dva slično izračunavaju te kvantificiraju istu geometrijsku značajku pore. Najveći broj pora ima Feret AR u rasponu od 1 do 3,25 odnosno od toga da su i najveća i najmanja udaljenost između dvije točke u pori jednake do toga da je najveća udaljenost između dvije točke oko 3 puta veća od najmanje udaljenosti između dvije točke pore. Medijan Feret AR-a za član Vranjak iznosi 1,67 a srednja vrijednost 1,87.

4.2.7.2. Formacija Glavni dolomit

Odnos duže i kraće Feret osi pripadajuće elipse ima približno sličnu raspodjelu kao i kod člana Vranjak te slično kao i parametar AR, a raspon vrijednosti je od 1,10 do 8,47 (prilog 2) sa medijanom 1,63 a srednjom vrijednosti 1,77. To ukazuje, isto kao i kod AR-a ove formacije da su duljine duže i kraće Feret osi približno slične kod velikog broja pora tj. da pore nisu izdužene niti u jednom smjeru.

4.2.7.3. Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije

Izgled Feret AR histograma frekvencija gotovo je identičan histogramu frekvencija AR-a i vrlo sličan ostalim članu Vranjak i formaciji Glavni dolomit. Unutar raspona od 1,11 do 10,10 dominiraju niže vrijednosti Feret AR-a (prilog 3) što potvrđuju i medijan i srednja vrijednost koje iznose 1,66 i 1,88.

4.2.8. Kompaktnost

4.2.8.1. Član Vranjak formacije Slapnica

Kompaktnost je parametar koji opisuje geometriju pore odnosno kvantificira velike neravnine u geometriji pore (za razliku od 'parametra „Solidity“ koji više kvantificira manje

neravnine). Vrijednosti kompaktnosti mogu biti u intervalu od 0 do 1, s time da 1 odgovara krugu. Kompaktnosti člana Vranjak nalaze se u rasponu od 0,248 do 1 a Histogram frekvencija relativno je sličan histogramu frekvencija parametra „Solidity“ što ukazuje da manje neravnine prate velike odnosno ukoliko nema velikih neravnina na pori nema ni manjih (prilog 1). Medijan je 0,77.

4.2.8.2. *Formacija Glavni dolomit*

Vrijednosti kompaktnosti za formaciju Glavni dolomit nalaze se u rasponu od 0,30 do 1,00 (prilog 2) sa medijanom i srednjom vrijednosti iznosa 0,79. Na histogramu frekvencija vidljiva je ista značajka koja je primijećena i kod histograma frekvencija eliposidnosti, Solidity-a, kružnosti da veliki broj pora ima približno iznos kompaktnosti 1, kao rezultat rezolucije mikrofotografija u odnosu na neravnine pora.

4.2.8.3. *Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije*

Raspodjela vrijednosti kompaktnosti u histogramu frekvencija vrlo je slična histogramu frekvencija parametra „Solidity“. Takva raspodjela kompaktnosti ukazuje da unutar raspona vrijednosti dominiraju pore sa relativno malim anomalijama u geometriji koje bi značajno snizile kompaktnost tj. da je kompleksnost pora u krupnijem („Solidity“) i sitnijem (kompaktnost) mjerilu vrlo slična. Medijan i srednja vrijednost kompaktnosti iznose 0,75 i 0,74 (prilog 3) a te vrijednosti potvrđuju sličnosti sa parametrom „Solidity“.

4.2.9. Fraktalna dimenzija

4.2.9.1. *Član Vranjak formacije Slapnica*

Fraktalna dimenzija je parametra koji najbolje opisuje „hrapavost“ odnosno kompleksnost geometrije nekog objekta. Ovisno o ulaznim podacima fraktalna dimenzija može biti u rasponu od 0 do 3 no kako su ulazni podaci fotografije, te pore analiziramo u 2 dimenzije, fraktalne geometrije nalaze se u rasponu od 0 do 2. Za član Vranjak raspon fraktalnih dimenzija je od 1,0875 do 2 (prilog 1) sa medijanom 1,64 što potvrđuje da se analizirane pore mogu smatrati prirodnim fraktalom. Vrijednosti od 1,0875 ukazuju da je računalo te pore prepoznalo kao segmente (vjerojatno vrlo male segmente radi rezolucije fotografija) a vrijednosti 2 kao krugove (nema neravnina). To je rezultat rezolucije fotografija, tj. te su pore toliko male da se u ovom mjerilu manifestiraju bez neravnina.

4.2.9.2. *Formacija Glavni dolomit*

Fraktalne dimenzije pora formacije Glavni dolomit nalaze se u rasponu od 0 do 2 (prilog 2). Iako su ulazni podaci dvodimenzionalni (mikrofotografije), pretpostavke sa ograničenjem rezolucije (mikrofotografije imaju rezoluciju ispod koje se neravnine na porama ne mogu uočiti) potvrđene su vrijednostima fraktalne dimenzije. Pore sa fraktalnim dimenzijama vrijednosti 0, su toliko male da se na mikrofotografijama vide kao točke (fraktalna dimenzija točke je 0). To je jasno vidljivo i na histogramu frekvencija. Također druga „anomalija“ na histogramu frekvencija nalazi se oko fraktalne dimenzije 1, a to su pore koje se na mikrofotografijama manifestiraju kao minijturni segmenti. Ista je anomalija prisutna i kod člana Vranjak. Medijan i srednja vrijednost fraktalnih dimenzija ove formacije su 1,52 i 1,31 što potvrđuje da su oblici pora prirodni fraktali.

4.2.9.3. *Gornjotrijaski (T_3) dolomiti nesvrstani u formacije*

Fraktalne dimenzije ovog seta pora imaju najpravilniju raspodjelu u odnosu na član Vranjak i formaciju Glavni dolomit. Kako fraktalna dimenzija kvantificira geometriju odnosno kompleksnost analiziranog objekta predstavlja odličan parametar za potvrdu zaključaka donesenih analizom parametara „Solidity“ i kompaktnosti. Zaključak da su neravnine odnosno „hrapavost“ u oba mjerila koja ta dva parametra kvantificiraju slična, potvrdila je raspodjela fraktalnih dimenzija koja je gotovo identična navedena dva parametra. Nema anomalija izazvanih rezolucijom mikrofotografija te su dimenzije raspoređene u rasponu od 1,2224 do 1,8674 (prilog 3) sa medijanom i srednjom vrijednosti iznosa 1,65.

5. DISKUSIJA

Trijaski dolomiti regionalno su rasprostranjene stijene te se nalaze u raznolikim strukturnim položajima na površini terena te duboko u podzemlju. U regionalnom pogledu predstavljaju najvažnije geotermalne vodonosnike a mogu biti i kolektori ugljikovodika te vodonosnici podzemne vode. Iako je u većini slučajeva za to odgovorna pukotinska poroznost, utjecaj taložne i diagenetske poroznosti je uvelike zapostavljen.

U doktorskoj disertaciji (Pavičić, 2018), metodom uronjene mase izmjerene su poroznosti uzoraka gornjotrijaskih dolomita. Mjerene poroznosti su okarakterizirane kao otvorena poroznost, odnosno sve pore u koje uđe voda kada se uzorak stijene određeno vrijeme natapa vodom pri atmosferskom tlaku ili se voda utiskuje pod tlakom (iz Pavičić, 2018). Mjerene otvorene poroznosti na tim uzorcima nalaze se u rasponu od 0,31 % do 4,5 %. Prema genetskoj klasifikaciji poroznosti (Ahr, 2008) ta se poroznost može opisati kao taložna i diagenetske te u gornjem dijelu raspona i mikropukotinska poroznost. (Maričić, et al., 2018, Pavičić, 2018).

Obavljenim mjerenjem dobio se uvid u vrijednosti poroznosti koje zasigurno zaslužuju pozornost i daljnje istraživanje njihovog udjela u ukupnoj poroznosti ovih dolomita. Osim iznosa poroznosti, geometrijske značajke pojedinih pora do sada nisu istraživane. Ovim istraživanjem, nastojalo se prikazati geometrijsku karakterizaciju izmjerenim vrijednostima poroznosti kroz analizu niza geometrijskih parametara pora vidljivih u mikrofotografijama. Također, cilj rada je opisati na koji način koji od parametara karakterizira geometriju pora te dati smjernice za daljnja istraživanja.

Geometrijske značajke pora rezultat su niza procesa koji su djelovali na istraživane stijene od njihovog nastanka te kroz višefazne diagenetske promjene. Veličina pora, njihov oblik, izduženost, „hrapavost površina“ te povezanost značajno utječu i kontroliraju iznose propusnosti stijena (Zhang et al., 2018; Wang et al., 2019). U ovom radu izmjeren je niz geometrijskih značajki pora koje se u daljnjim istraživanjima mogu korelirati sa petrofizikalnim značajkama kao što je propusnost. Parametri pora analizirani su na mikrofotografijama impregniranih izbrusaka u mjerilu. Mikrofotografije su postupcima računalne obrade pretvorene u crno-bijele, binarne fotografije gdje bijela boja predstavlja pore a crna ostatak stijene. Ukupno je izdvojeno i analizirano 12.074 pora formacije Glavni dolomit, 1.227 pora člana Vranjak formacije Slapnica te 637 pora gornjotrijaskih dolomita koji nisu svrstani u formacije što sveukupno čini 13.938 pora. Analizirani su parametri: **površina i opseg pora, kružnost, AR, eliptičnost, „Solidity“, Feret AR, kompaktnost i**

fraktalna dimenzija (Tablica 5-1). Svaki od izmjerenih parametara na određeni način kvantificira geometriju i kompleksnost oblika pore.

Tablica 5-1. Osnovni statistički parametri geometrijskih značajki pora žumberačkih gornjotrijaskih dolomita.

Formacija/član	Statistički parametar	Površina (mm ²)	Opseg (mm)	Kružnost	AR	Elipsoid.	Solidity	Feret AR	Kompaktnost	Fdim
Član Vranjak	MIN	10,00	10,49	0,06	1,00	0,06	0,37	1,11	0,25	1,09
	MAX	71430,00	1939,1	1,00	16,26	1,00	1,00	11,28	1,00	2,00
	MEDIJAN	61,50	34,39	0,67	1,71	0,59	0,81	1,67	0,77	1,64
	SR. VR.	564,46	89,11	0,64	2,00	0,58	0,79	1,87	0,75	1,65
Formacija Glavni dolomit	MIN	0,00007	0,02800	0,02	1,00	0,09	0,35	1,10	0,30	0,00
	MAX	6518,00000	853,70300	1,00	11,01	1,00	1,00	8,47	1,00	2,00
	MEDIJAN	0,00044	0,0930	0,81	1,60	0,63	0,85	1,63	0,79	1,52
	SR. VR.	45,89076	6,3121	0,77	1,75	0,64	0,84	1,77	0,79	1,31
T ₃ dolomiti	MIN	0,00078	0,1130	0,05	1,02	0,06	0,39	1,11	0,25	1,22
	MAX	1,94100	20,023	0,97	15,78	0,98	0,95	10,15	0,99	1,85
	MEDIJAN	0,00800	0,4380	0,55	1,79	0,56	0,80	1,66	0,75	1,65
	SR. VR.	0,03763	0,8424	0,54	2,11	0,56	0,78	1,88	0,74	1,65

Površina i **opseg** mjere su dimenzija pora. **Kružnost** je parametar koji opisuje koliko je analizirani objekt, u slučaju ovog istraživanja, pora, slična obliku kružnice. **Elipsoidnost**, **AR** i **Feret AR** parametri su koji opisuju koliko je pora slična elipsi te kvantificiraju izduženost pore. Parametar „Solidity“ i kompaktnost kvantificiraju neravnine pore odnosno „hrapavost“. Fraktalna dimenzija kvantificira svojstvo sebisličnosti a time i kompleksnosti oblika pore.

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih analiza i dobivenih rezultata mogu se izdvojiti sljedeći zaključci:

- da bi se potpuno kvantificirale geometrijske značajke pora neke stijene potrebno je analizirati niz parametara: površina i opseg pora, kružnost, AR, eliptičnost, „Solidity“, Feret AR, kompaktnost i fraktalna dimenzija;
- svaki od navedenih parametara na drugačiji način kvantificira geometriju pore: površina i opseg mjere su dimenzija pora, kružnost je parametar koji opisuje koliko je pora, slična obliku kružnice, elipsoidnost, AR i Feret AR parametri su koji opisuju koliko je pora slična elipsi te kvantificiraju izduženost pore, „Solidity“ i kompaktnost kvantificiraju neravnine pore odnosno „hrapavost“ a fraktalna dimenzija kvantificira svojstvo sebisličnosti a time i „hrapavost“ i kompleksnost oblika pore.
- iz analize svih parametara odnosno histograma frekvencija navedenih parametara može se zaključiti da pore imaju promjere uglavnom manje od 1 mm uz mali broj pora koje su veće i mogu se smatrati ekstremi (prilozi 1,2,3 i 4).
- Ostali parametri koji kvantificiraju oblik i kompleksnost pora u očekivanim su intervalima te ukazuju da su pore uglavnom izdužene sa dužom osi pripadajuće elipse 1,7 do 2 x većom od kraće osi. Veće vrijednosti kružnosti i manje vrijednosti elipsoidnosti ukazuju da su pore bez obzira na izduženost bliže obliku kruga nego elipse.
- Parametri koji kvantificiraju neravnine pora, odnosno „hrapavost“, „Solidity“, kompaktnost i fraktalna dimenzija imaju poprilično ujednačene raspodjele a njihove vrijednosti ukazuju na izraženu kompleksnost geometrije pora. To posebno potvrđuje fraktalna dimenzija.
- Izraženije odnosno više vrijednosti „hrapavosti“ površine pore, odnosno kompleksnija geometrija pore najvjerojatnije je rezultat višefazne dijageneze i rekristalizacije što se može negativno odraziti na vrijednosti propusnosti (vidi u Zhang et al., 2018).
- Parametri koji imaju gornju i donju granicu (npr. fraktalna dimenzijama može biti u rasponu od 0 do 2) sadržavaju određeni broj pora s graničnim vrijednostima a to ukazuje da su te pore premale da bi bile kvantificirane u ovom mjerilu. Ova

pojava ujedno kvantificira mjerilo u kojemu je metoda pouzdana te precizno definira koje pore treba isključiti iz analize.

- Analizom mikrofotografija pomoću „Image Processing“ metodologije moguće je prikupiti veliki broj egzaktnih podataka te se postupak pokazalo se iznimno korisnim u kvantifikaciji geometrijskih značajki pora

7. LITERATURA

AHR, W.M. (2008): *Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks*. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470370650>

BRIŠEVAC Z. 2012. *Model međuovisnosti fizikalno-mehaničkih značajki karbonatnih stijena*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

BROCHER, J. (2015): *The BioVoxel Image Processing and Analysis Toolbox*., EuBIAS-Conference, 2015.

DRAGIČEVIĆ, I., BLAŠKOVIĆ, I., MAYER, D., ŽUGAJ, R., TOMLJENović, B. (1997): *Gorski i prigorski vodonosnici sjeverne Hrvatske (izvješće o radovima u 1997. godini)*. fond stručne dokumentacije RGNF, Zagreb.

FRANGEN, T. (2013): *Određivanje značajki krškoga vodonosnika na području jugozapadnoga Žumberka kvantitativnim trasiranjem u različitim hidrološkim uvjetima*. Doktorska disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

FRANKLIN, J.A., 1979. *Suggest Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 16, 141-156.

GRGASOVIĆ, T. (1998): *Stratigrafija gornjotrijaskih naslaga Žumberka*. Magistarski rad. PMF, Sveučilište u Zagrebu.

HRŽENJAK P., BRIŠEVAC Z., 2009. *Upute i predlošci za laboratorijske Vježbe i programe iz mehanike stijena*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KARPERIEN, A. (2001a). *FracLac for ImageJ; JavaDoc, source code, and jar*, (Version 2.5) [Software]. Albury, NSW: Charles Sturt University. Retrieved October 1, 2011. Dostupno na: US National Institutes of Health. http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fractal/Frac_Lac.jar

KARPERIEN, A. (2001b). *FracLac User's Guide*, Dostupno na internetu na: <http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/fractal/FLHelp/Introduction.htm> [Pristupljeno 2020].

KÖPPEN, W. (1918): *Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf*, Petermanns Geographische Mitteilungen, 64, 193-203.

MANDELBROT, B. B. (1983a): *The fractal geometry of nature /Revised and enlarged edition*. W. H. Freeman and Company. New York.

MANDELBROT, B. (1967a): *How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension*. Science 156, 636–638.
<https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636>

MARIČIĆ, A., STARČEVIĆ, K. & BARUDŽIJA, U. (2018): *Physical and mechanical properties of dolomites related to sedimentary and diagenetic features – case study of the Upper Triassic dolomites from Medvednica and Samobor Mts., NW Croatia*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik Vol 33, No 3, Zagreb.

PAVIČIĆ, I. (2018): *Geneza, prostorna raspodjela i kvantifikacija žumberačkih gornjotrijaskih dolomita*. Doktorski rad, 246, p. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

RUEDEN, C. T.; SCHINDELIN, J. & HINER, M. C. et al. (2017): *ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data*, BMC Bioinformatics 18:529, PMID 29187165, doi:10.1186/s12859-017-1934-z

SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I. & FRISE, E. et al. (2012): *Fiji: an open-source platform for biological-image analysis*, Nature methods 9(7): 676-682, PMID 22743772, doi:10.1038/nmeth.2019.

SCHLEICHER, D. (2007): *Hausdorff dimension, its properties, and its surprises*. American Mathematical Monthly 114, 509–528.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S. & ELICEIRI, K. W. (2012): *NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis*, Nature methods 9(7): 671-675, PMID 22930834 (on Google Scholar).

VUJNOVIĆ, T. (2010): *Hidrogeološke značajke Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje*. Doktorska disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

WANG, J., CAO, Y., LIU, K., GAOD Y. & QIND, Z. (2019): *Fractal characteristics of the pore structures of fine-grained, mixed sedimentary rocks from the Jimsar Sag, Junggar Basin: Implications for lacustrine tight oil accumulations*. Journal of Petroleum Science and Engineering 182.

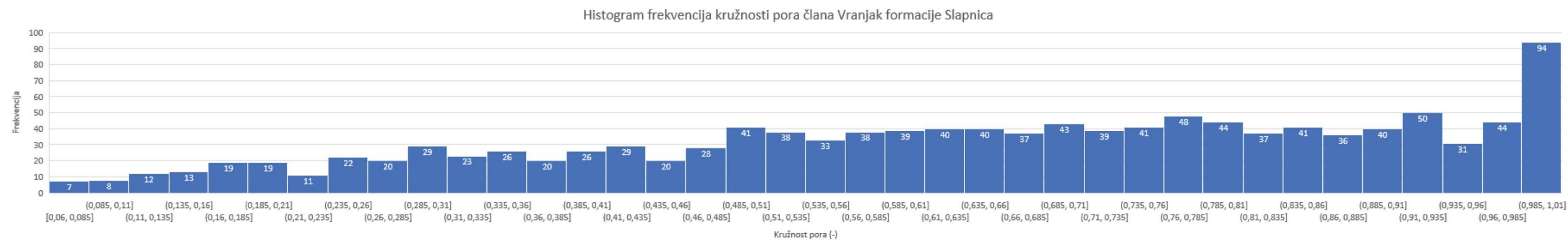
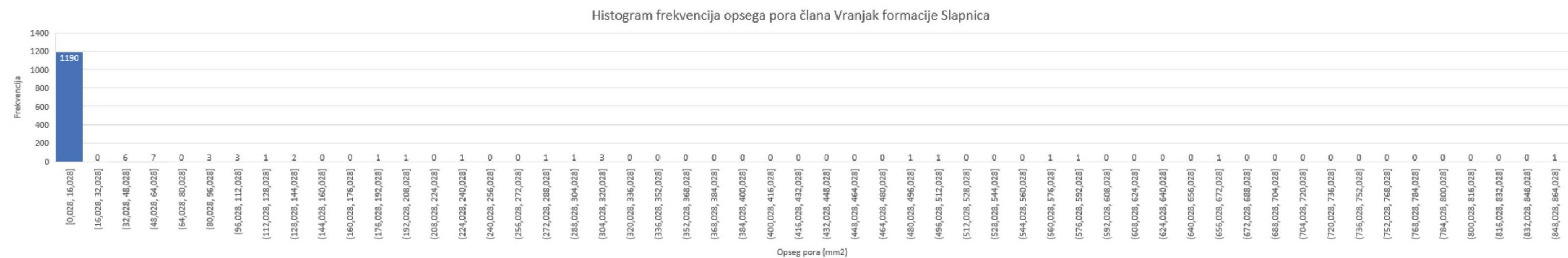
ZHANG, K., PANG, X., ZHAO, Z., SHAO, X., ZHANG, X., LI, W. & WANG, K. (2018): *Pore structure and fractal analysis of Lower Carboniferous carbonate reservoirs in the Marsel area, Chu-Sarysu basin*. Marine and Petroleum Geology, Volume 93, 2018.

Internetski izvori:

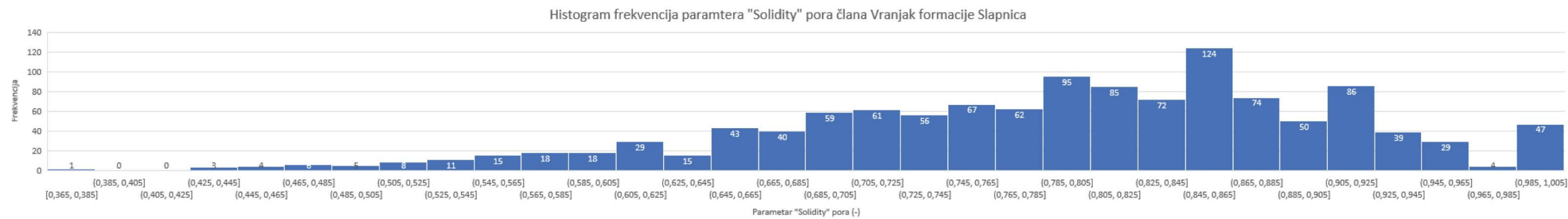
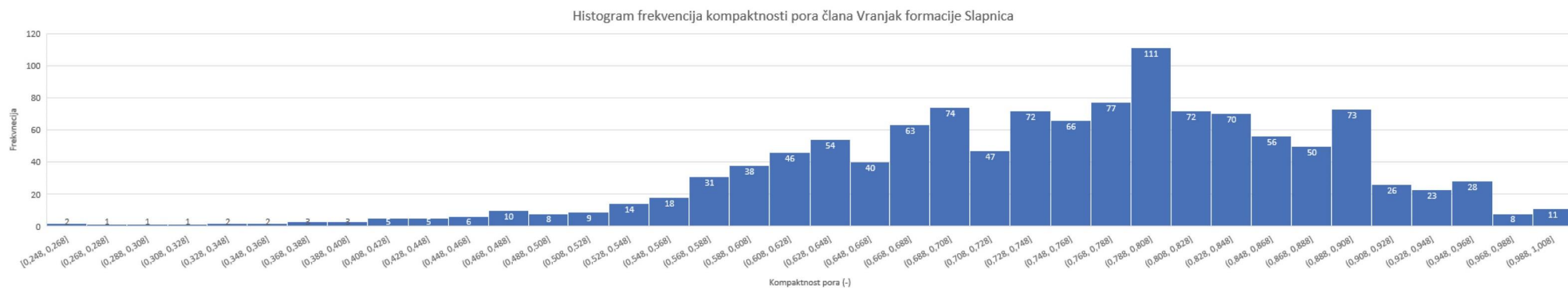
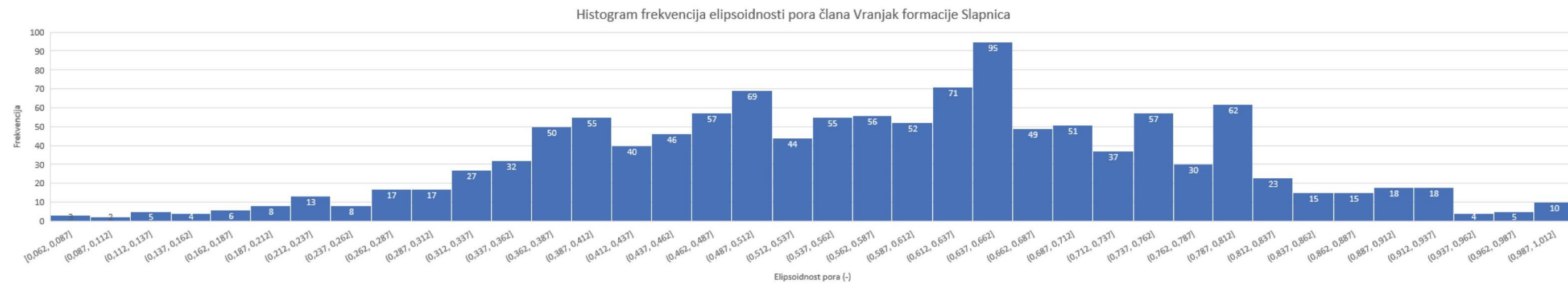
(http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm#PnPParameters/Measure_Shape_Parameters.htm#Roundnes) (pristupljeno 13.10.2020).

(<https://slideplayer.com/slide/9293085/>) (pristupljeno 13.10.2020).

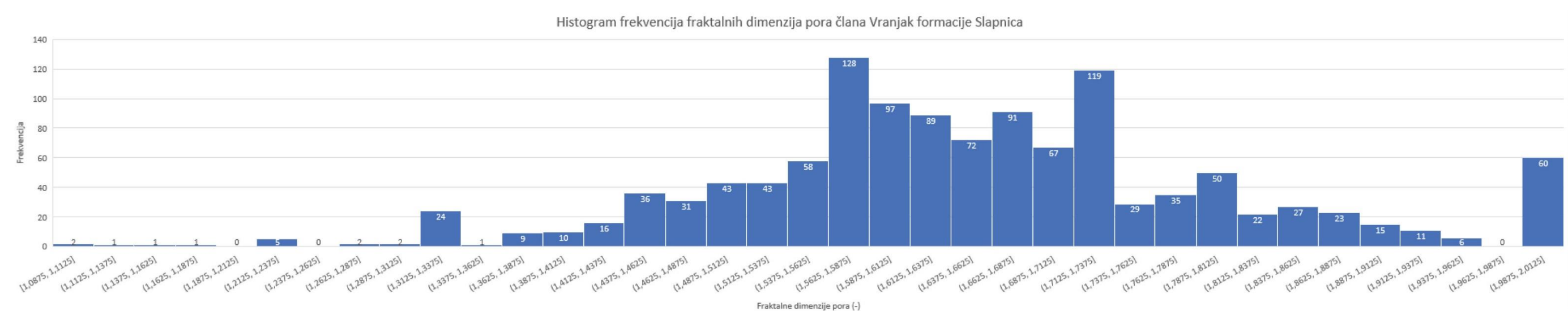
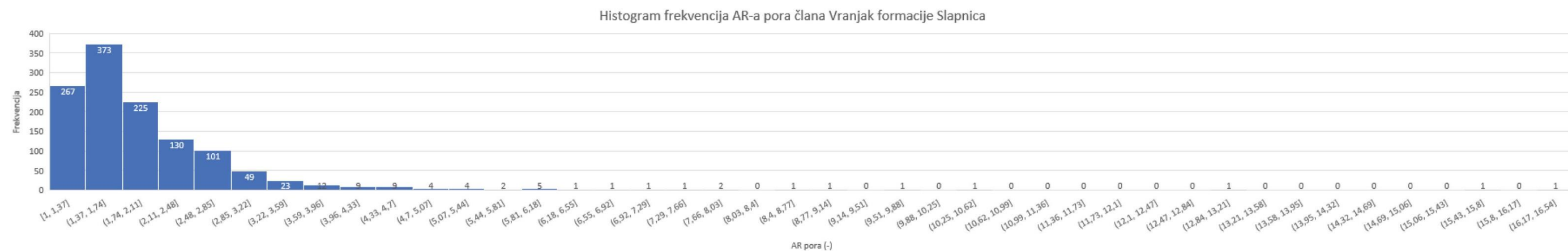
PRILOZI



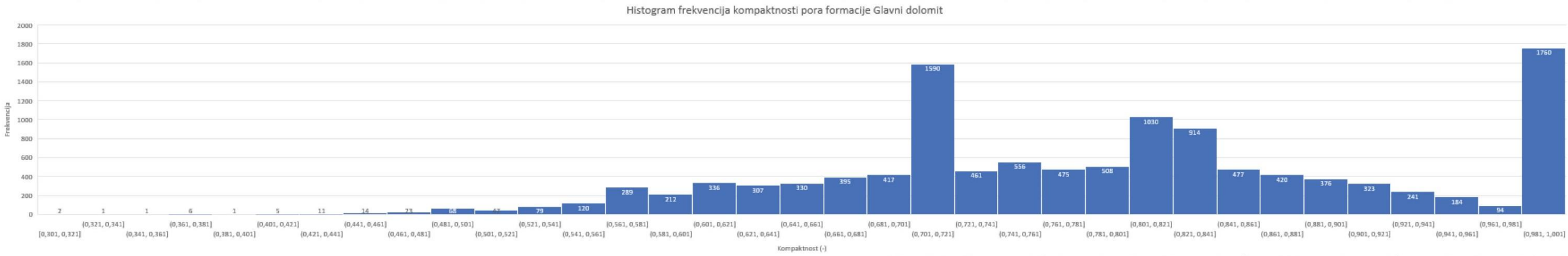
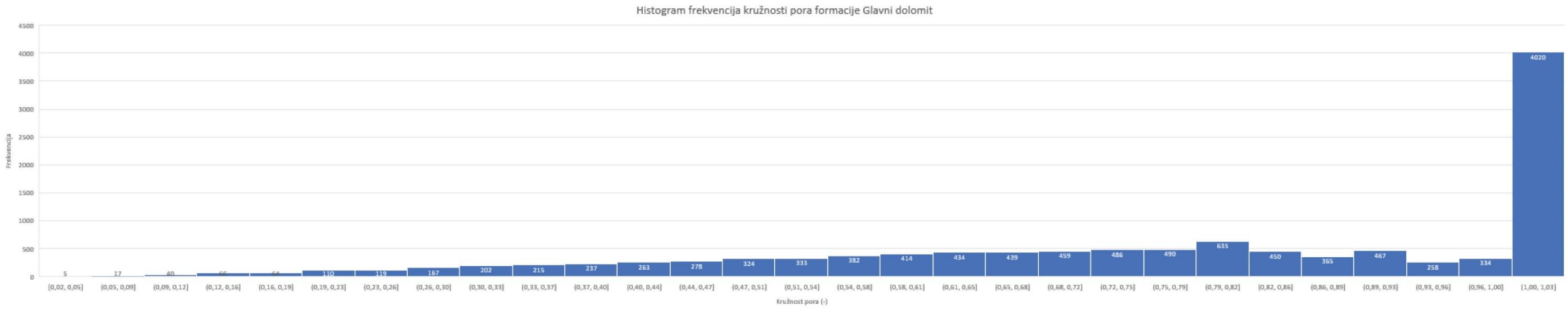
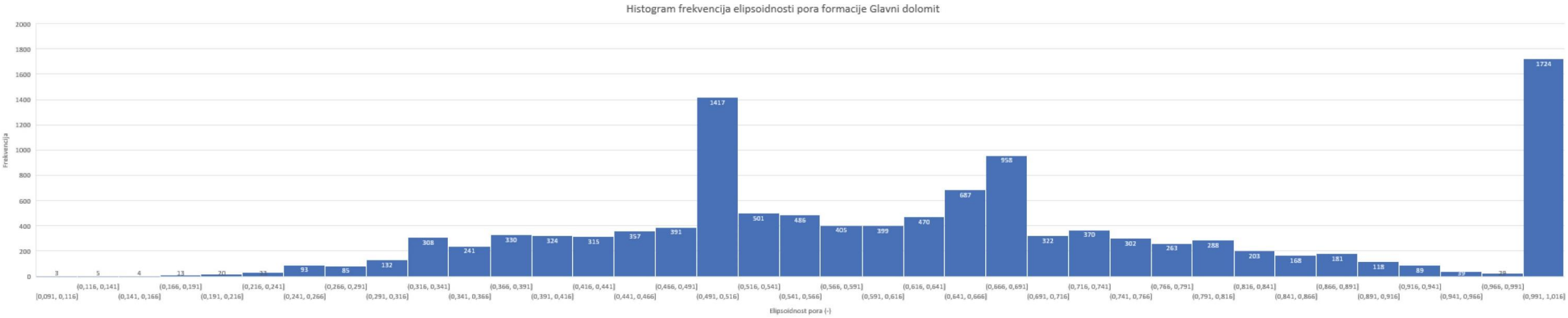
Prilog 1-1. Histogrami frekvencija površina, opsega i kružnosati pora člana Vranjak formacije Slapnica.



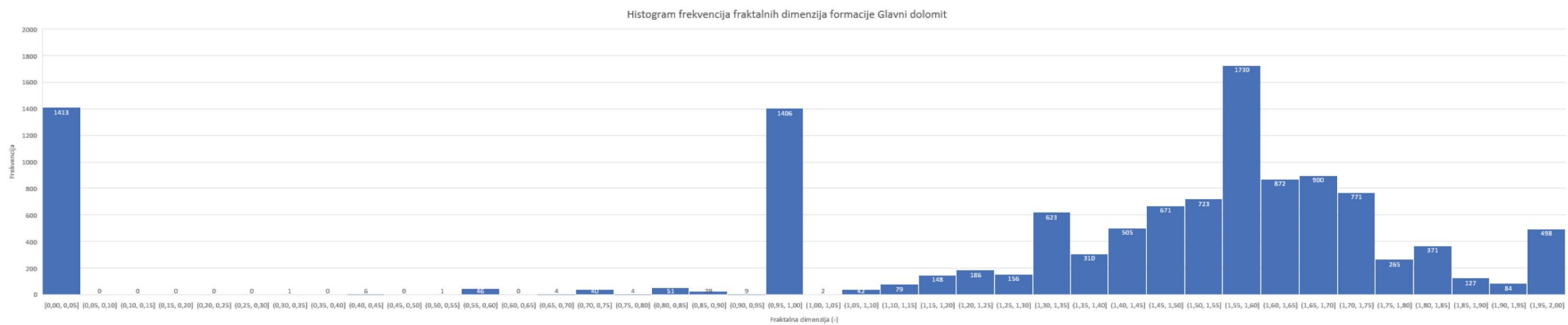
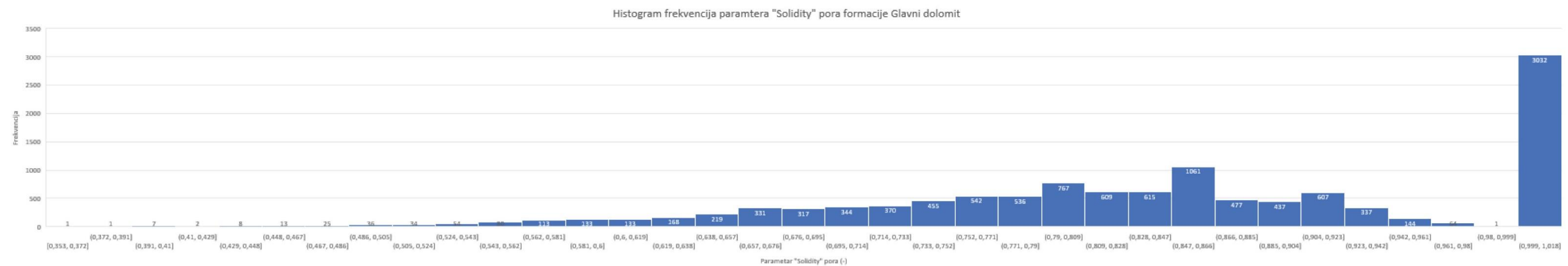
Prilog 1-2. Histogrami frekvencija elipsoidnosti, kompaktnosti i paramtera "solidity" pora člana Vranjak formacije Slapnica.



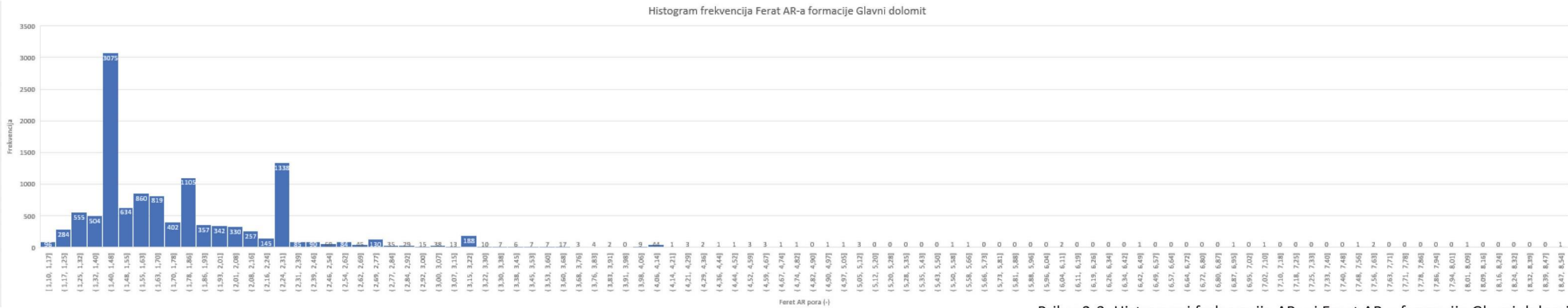
Prilog 1-3. Histogrami frekvencija AR-a, Feret AR-a i fraktalnih dimenzija pora člana Vranjak formacije Slapnica.



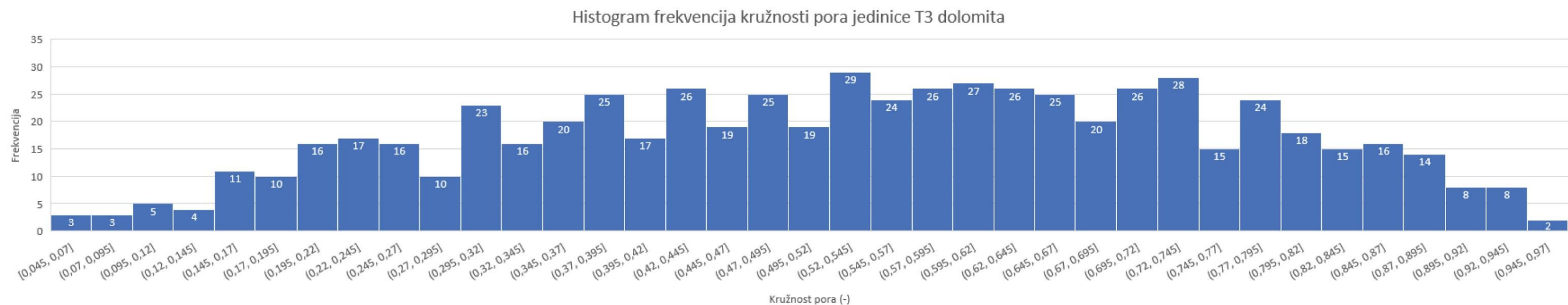
Prilog 2-1. Histogrami frekvencija elipsoidnosti, kružnosti i kompaktnosti formacije Glavni dolomit.



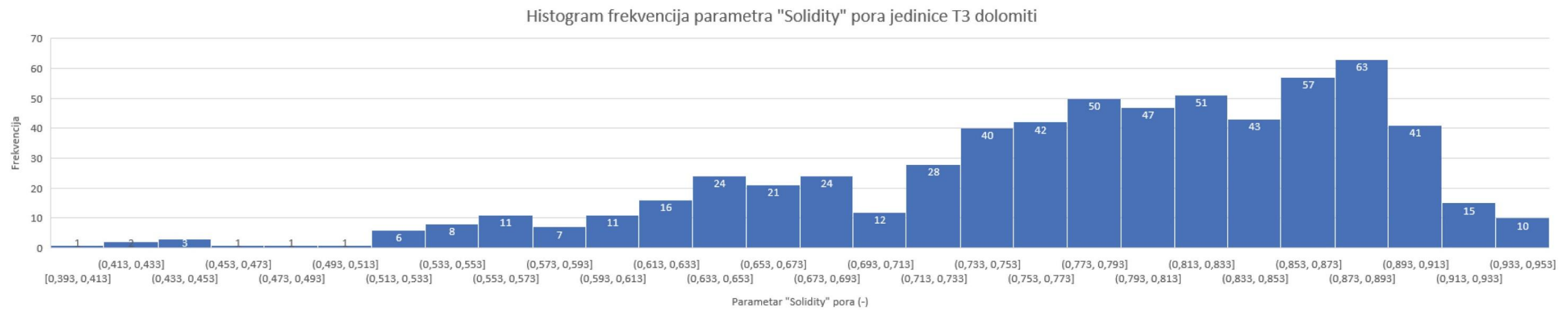
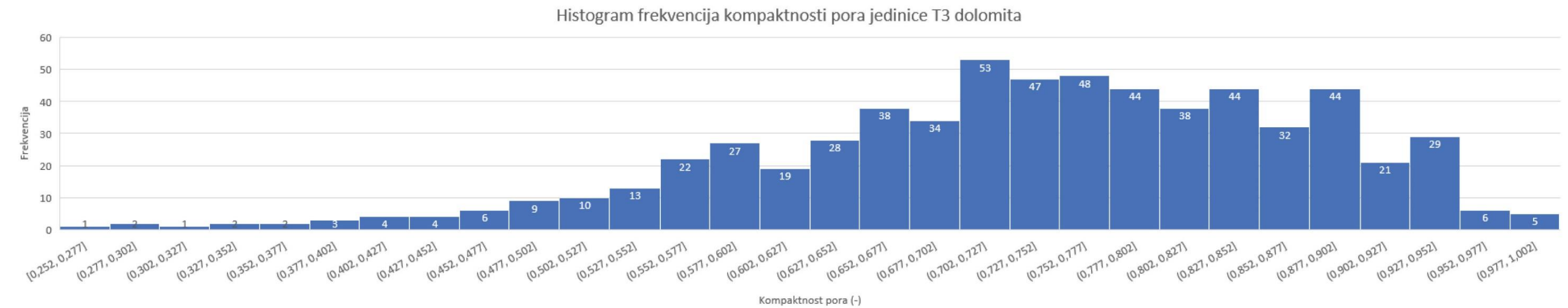
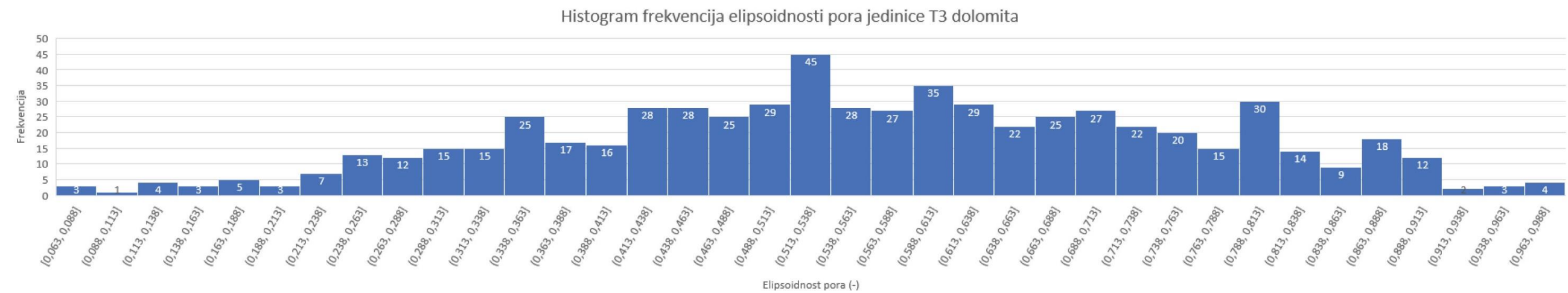
Prilog 2-2. Histogrami frekvencija paramtera "Solidity" i fraktalnih dimenzija formacije Glavni dolomit.



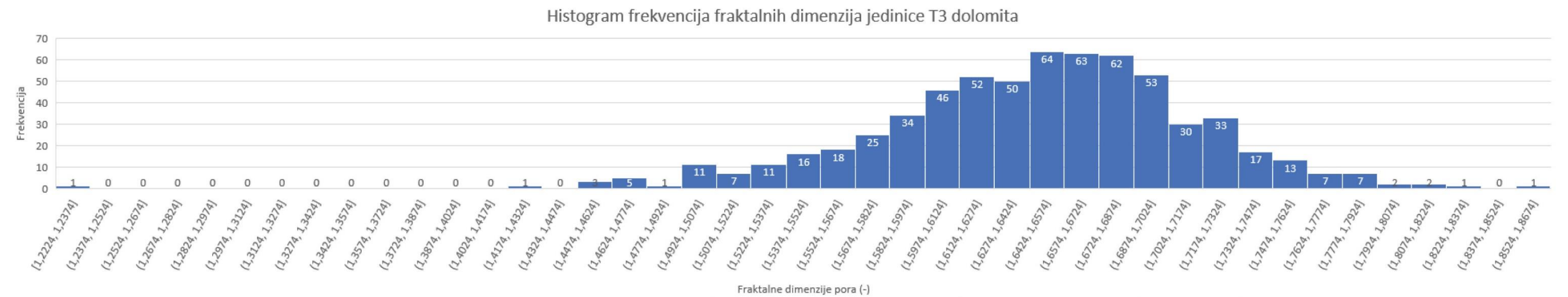
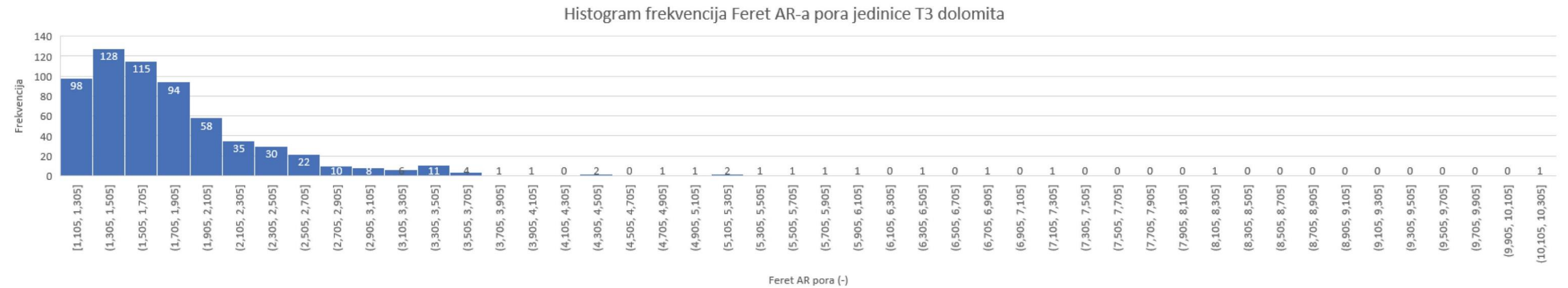
Prilog 2-3. Histogrami frekvencija AR-a i Feret AR-a formacije Glavni dolomit



Prilog 3-1. Histogrami površine i opsega pora te kružnosti pora uzoraka gornjotrijaskih dolomita nesvrstanih u formacije i članove.



Prilog 3-2. Histogrami frekvencija elipsoidnosti, kompaktnosti i paramtera "solidity" pora uzoraka gornjotrijaskih dolomita nesvrstanih u formacije i članove.



Prilog 3-3. Histogrami frekvencija AR-a, Feret AR-a i fraktalnih dimenzija pora uzoraka gornjotrijaskih dolomita nesvrstanih u formacije i članove.