

# Utjecaj saturiranosti vodom na tlačnu čvrstoću stijena

---

**Petriško, Mateo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:345197>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**UTJECAJ SATURIRANOSTI VODOM NA TLAČNU ČVRSTOĆU STIJENA**  
Diplomski rad

Mateo Petriško  
R 4251

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/23-01/213  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 16.01.2023.

**Mateo Petriško, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/213, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 12.12.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### UTJECAJ SATURIRANOSTI VODOM NA TLAČNU ČVRSTOĆU STIJENA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv.prof.dr.sc. Zlatko Briševac nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditelja Prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić.

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Zlatko Briševac

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomске ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

## UTJECAJ SATURIRANOSTI VODOM NA TLAČNU ČVRSTOĆU STIJENA

Mateo Petriško

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

### Sažetak

Prisustvo vode ima utjecaj na svojstva stijenske mase i stijenskog materijala. Što se tiče samog stijenskog materijala u njemu voda može biti prisutna u porama te imati različit utjecaj na njegova fizička i mehanička svojstva. U ovom diplomskom radu prvo je prikazan pregled istraživanja koja su provedena sa svrhom utvrđivanja utjecaja sadržaja vode na fizička i mehanička svojstva stijenskog materijala. Nakon toga je u ovom diplomskom radu ispitan i analiziran stijenski materijal sa nekadašnjeg kamenoloma Vukov Dol. Tom materijalu je u prijašnjim istraživanjima, tijekom projektiranja, utvrđena vrlo velika jednoosna tlačna čvrstoća u suhom i u saturiranom stanju pa to predstavlja gornje granice čvrstoće. Dodatnim analizama koje su obavljane u svrhu izrade ovog diplomskog rada željelo se utvrditi donje granice jednoosne tlačne čvrstoće u suhom i zasićenom stanju. Ovaj rad je naznačio potrebu da se kod ležišta koja imaju složeni nastanak i tektonski su dosta poremećena, poput Vukovog Dola nužno treba utvrđivati baš raspone vrijednosti čvrstoće u suhom i saturiranom stanju kako bi se što realnije prikazala promjena čvrstoće stijenskog materijala uslijed saturacije.

Ključne riječi: Saturacija; jednoosna tlačna čvrstoća, Vukov Dol; mramor.

Završni rad sadrži: 34 stranice, 5 tablica, 11 slika, 0 priloga, i 54 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Zlatko Briševac, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Zlatko Briševac, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Mario Klanfar, izvanredni profesor, RGNF

## INFLUENCE OF WATER SATURATION ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF ROCKS

Mateo Petriško

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

In this study, an overview is presented on research conducted to explore how water content influences the physical and mechanical properties of rock materials. The presence of water significantly affects the characteristics of both rock masses and rock materials. Regarding the rock material itself, water can exist within its pores, exerting various effects on its physical and mechanical attributes. Subsequently, the thesis delves into the examination and analysis of rock material sourced from the former Vukov Dol quarry. Previous studies identified this material as possessing exceptionally high uniaxial compressive strength in both dry and saturated states during design processes. These findings set the upper limits of its strength. Additional analyses conducted for this thesis aimed to establish the lower limits of uniaxial compressive strength in dry and saturated conditions. This research underscores the importance of investigating deposits with a complex origin and significant tectonic disturbances, such as Vukovo Dol. Such studies are crucial for accurately delineating the range of strength values in both dry and saturated states, providing a realistic portrayal of how the strength of rock material changes due to saturation.

Keywords: Saturation; uniaxial compressive strength; Vukov Dol; marble.

Thesis contains: 34 pages, 5 tables, 11 figures, 0 appendixes and 54 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Associate Professor Zlatko Briševac, PhD  
Full Professor Trpimir Kujundžić, PhD

Reviewers: Associate Professor Zlatko Briševac, PhD  
Associate Professor Tomislav Korman, PhD  
Associate Professor Mario Klanfar, PhD

## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....                                  | 2  |
| 3. MATERIJALI I METODA .....   | 14 |
| 3.1. Ispitivani stijenski materijal.....                                   | 15 |
| 3.2. Metode i rezultati laboratorijskih ispitivanja.....                   | 22 |
| 4. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA .....                                    | 26 |
| 4.1. Rezultati ispitivanja na mramoru sa bivšeg kamenoloma Vukov Dol ..... | 26 |
| 4.2. Analiza rezultata .....   | 28 |
| 5. ZAKLJUČAK .....   | 30 |
| 6. LITERATURA.....   | 31 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 3-1. Prikaz pripremljenih uzoraka .....   | 23 |
| Slika 3-2. Prikaz uređaja za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće .....  | 23 |
| Slika 3-3. Ispitivanje uzorka 23-7-1 .....  | 24 |
| Slika 3-4. Ispitivanje uzorka 23-7-2 .....  | 24 |
| Slika 3-5. Ispitivanje uzorka 23-7-3 .....  | 25 |
| Slika 3-6. Ispitivanje uzorka 23-7-4 .....  | 25 |
| Slika 4-1. Prikaz uzorka 23-7-1 nakon sloma.....  | 26 |
| Slika 4-2. Prikaz uzorka 23-7-2 nakon sloma.....  | 26 |
| Slika 4-3. Prikaz uzorka 23-7-3 nakon sloma.....  | 27 |
| Slika 4-4. Prikaz uzorka 23-7-4 nakon sloma.....  | 27 |
| Slika 4-5. Odnos prosječne jednoosne tlačne čvrstoće u suhom ( $UCS_{dry}$ ) i vodozasićenom ( $UCS_{sat}$ ) stanju... .. | 28 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 2-1. Prikaz utjecaja vlage na tlačnu čvrstoću pješčenjaka.....                                  | 2  |
| Tablica 2-2. Distribucija UCS gubitka za različit tip stijene.....                                      | 10 |
| Tablica 2-3. Distribucija E gubitka (%) za različit tip stijene .....                                   | 11 |
| Tablica 3-1. Prikaz fizičko-mehaničkih svojstava.....   | 21 |
| Tablica 4-1. Jednoosna tlačna čvrstoća u suhom ( $UCS_{dry}$ ) i vodozasićenom ( $UCS_{sat}$ ) stanju.. | 29 |



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| Oznaka    | Jedinica                           | Opis  |
|-----------|------------------------------------|---|
| $W$       | -                                  | sadržaj vlage   |
| $M_w$     | g                                  | masa vode   |
| $A_w$     | mas. %                             | ukupna apsorpcija vode  |
| $M_{sat}$ | g                                  | masa zasićenog površinski osušenog ispitnog uzorka u zraku  |
| $M_{suh}$ | g                                  | masa ispitnog uzorka osušenog u sušioniku na zraku (g)  |
| $W_i$     | mas. %                             | upijanje vode   |
| $M_t$     | g                                  | masa mokrog uzorka uronjenog u deioniziranu vodu u vremenu $t_i$  |
| $M_0$     | g                                  | masa suhog uzorka   |
| $WA$      | mas. %                             | kapacitet upijanja vode   |
| $W_0$     | g                                  | suha masa uzorka nakon ispitivanja  |
| $W_1$     | g                                  | masa zasićenog uzorka potopljenog u vodi  |
| $W_2$     | g                                  | zasićen uzorak izvagan u zraku  |
| $W_3$     | g                                  | masa uzorka koji se prvo suši, a nakon toga se zasiti vodom i ostavi u vodi da stoji 24 h, a nakon toga se izvažuje |
| $WAC$     | mas. %                             | upijanje vode prema Berrulliju  |
| $M_{max}$ | g                                  | masa uzorka pri maksimalnoj količini vode   |
| $M_d$     | g                                  | masa uzorka nakon ponovnog sušenja  |
| $W_{atm}$ | mas. %                             | upijanje vode pod uvjetima atmosferskog tlaka   |
| $M_w$     | g                                  | mokra masa uzorka uronjenog u vodu u periodu 48 h   |
| $M_{suh}$ | g                                  | suha masa uzorka  |
| $W_{vac}$ | -                                  | upijanje vode u uvjetima vakuma   |
| $M_n$     | g                                  | mokra masa uzorka nakon prisilnog upijanja vode   |
| $M_t$     | g                                  | suha masa uzorka  |
| $S_r$     | %                                  | stupanj zasićenosti   |
| $V_w$     | m <sup>3</sup>                     | volumen vode u porama   |
| $V_v$     | m <sup>3</sup>                     | volumen pora  |
| $W_{ceo}$ | kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> | koeficijent upijanja vode   |
| $m_w$     | kg/m <sup>2</sup>                  | površina upijanja vode  |
| $t$       | h                                  | vrijeme apsorpcije  |

|             |        |  |
|-------------|--------|--|
| $\theta$    | -      | ukupna ili apsolutna poroznost                   |
| $V$         | $m^3$  | volumen uzorka                                   |
| $UCS$       | MPa    | jednoosna tlačna čvrstoća                        |
| $F$         | N      | sila koja se primjenjuje na uzorak               |
| $A$         | $mm^2$ | površina poprečnog presjeka                      |
| $UCS_{dry}$ | MPa    | jednoosna tlačna čvrstoća u suhom stanju         |
| $UCS_{sat}$ | MPa    | jednoosna tlačna čvrstoća u vodozasićenom stanju |

## 1. UVOD

Prisustvo vode ima utjecaj na svojstva stijenske mase i stijenskog materijala. U stijenskoj masi može dovesti do geoloških katastrofa kao što su klizišta, odroni i rasjedi. Zbog toga je jako važno u proračune stabilnosti uvesti vodu kao utjecajan čimbenik. Što se tiče samog stijenskog materijala u njemu voda može biti prisutna u porama te imati različit utjecaj na njegova fizička i mehanička svojstva.

Sam mehanizam utjecaja vode na čvrstoću stijena proučavali su mnogi istraživači, ali za sada ne postoji univerzalan i prihvatljiv način objašnjavanja utjecaja saturacije na čvrstoću stijenskog materijala. Zbog toga je izražena potreba za istraživanjem i dopunjavanjem spoznaja o utjecaju saturacije na svojstva stijenskog materijala. U ovom diplomskom radu prvo je prikazan pregled istraživanja koja su provedena sa svrhom utvrđivanja utjecaja sadržaja vode na fizička i mehanička svojstva stijenskog materijala. Najčešće je to negativan utjecaj na fizička i mehanička svojstva. Također utjecaj vode može varirati ovisno o vrsti stijenskog materijala i kretati se u različitim rasponima od jako malih i neznatnih utjecaja u kvarcu pa sve do jako velikih u škriljancima gdje dolazi do smanjenja jednoosne tlačne čvrstoće i do 90%.

Pregledom literature uočeno je da većinom ne postoje rasponi vrijednosti u kojima se kreće smanjenje jednoosne tlačne čvrstoće za pojedini materijal već se najčešće navodi samo jedna vrijednost u suhom i jedna u zasićenom stanju. Zbog toga je u ovom diplomskom radu analiziran stijenski materijal sa nekadašnjeg kamenoloma Vukov Dol. Tom materijalu je tijekom projektiranja utvrđena vrlo velika jednoosna tlačna čvrstoća u suhom i u saturiranom stanju pa to predstavlja gornje granice čvrstoće. Dodatnim analizama koje su obavljane u svrhu izrade ovog diplomskog rada željelo se utvrditi donje granice jednoosne tlačne čvrstoće u suhom i zasićenom stanju.

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Kod istraživanja jako važno pitanje je utjecaj vode na čvrstoću stijene odnosno količinu vode koja je apsorbirana u pojedinoj stijeni. Gleda se zasićenost odnosno iznos vode u stijeni. Ona može biti od 0 do 1 odnosno od 0 do 100% što znači da ove stijene s 0 % su potpuno suhe dok one s 1 su 100 % zasićene vodom. Potrebno je obratiti pažnju na povezanost pora kako bi se vidjelo da li je uzorak potpuno zasićeno (Wong i sur., 2016).

Postupak zavisi od tehnike koju koristi pojedini istraživač odnosno sama tehnika dobivanja zasićene mase ovisno o primjerku. Zbog velikih odstupanja je osmišljeno da bi trebala postojati točno osmišljena procedura odnosno postupci kako ne bi dolazilo do velikih odstupanja. Price (1960) je utvrdio da postoji razlika između uzorka pješčenjaka sušenih u sušioniku i na zraku što je prikazano u tablici 2-1.

**Tablica 2-1.** Prikaz utjecaja vlage na tlačnu čvrstoću pješčenjaka (Wong i sur., 2016)

| Vrste pješčenjaka | Poroznost (%) | Sušeno u sušioniku | Sušeno na zraku/sušeno u sušioniku | Zasićen/sušeno u sušioniku |
|-------------------|---------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Markham           | 6             | 100%               | 57%                                | N.A.                       |
| Parkgate          | 10            | 100%               | 68%                                | 45%                        |
| Penant            | 2,5           | 100%               | 51%                                | 45%                        |
| Darley Dale       | 19,5          | 100%               | 80%                                | 45%                        |

Sadržaj vode ili sadržaj vlage se računa uz pomoć formule (Wong i sur., 2016):

$$W = \frac{M_w}{M_s} \quad (1)$$

Gdje su:  $W$  = sadržaj vlage,

$M_w$  = masa vode (g),

$M_s$  = masa zrna (g).

Po ASTM-u (2001.) – krupni agregat povećava svoju masu tako što upija vodu i onda ona prodire u pore čestica u određenom vremenu, ali je tu izuzeta voda koja se zalijepi s vanjske strane čestice koja je izražena kao postotak suhe mase.

Ukupna apsorpcija se izražava kao (Wong i sur., 2016):

$$A_w = \frac{(M_{sat} - M_{suh})}{M_{suh}} \cdot 100 \quad (2)$$

Gdje su:  $A_w$  = ukupna apsorpcija vode (mas. %),

$M_{sat}$  = masa zasićenog površinski osušenog ispitnog uzorka  
u zraku (g),

$M_{suh}$  = masa ispitnog uzorka osušenog u sušioniku na zraku (g).

Sljedeća važna stavka je upijanje vode, a sličnu definiciju je dao Borrelli (1999.). Njemu je to bilo važno za kvantificiranje količine vode u poroznim građevnim materijalima što je količina vode koju apsorbira materijal koji je uronjen u deioniziranu vodu pri sobnoj temperaturi i tlaku u uzastopnim intervalima.

Ona je po formuli jednaka (Wong i sur., 2016):

$$W_i = \frac{(M_i - M_0)}{M_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Gdje su:  $W_i$  = upijanje vode (mas. %),

$M_i$  = masa mokrog uzorka uronjenog u deioniziranu  
vodu u vremenu  $t_i$  (g),

$M_0$  = masa suhog uzorka (g).

Kod Borrellija (1999.) je navedeno da se koristi striktno ionizirana voda. Normalno je da se mokra masa uzorka povećava jer je sam uzorak duže uronjen. Sama vrijednost upijanja se određuje kada se postigne stabilna mokra masa odnosno kada masa uzorka ne raste s vremenom uranjanja. Sam naziv upijanje vode je bio drugačiji kod raznih istraživača. Neki još od naziva su: kapacitet upijanja vode, neprisilno upijanje vode, prisilno upijanje vode, ali oni su se definirali na različite načine.

Pojam kapacitet upijanja vode ( $WA$ ) je količina vode koju je apsorbirala stijena koja je uronjena u vodu na određen period. On iznosi (Wong i sur., 2016):

$$WA = \frac{(W_3 - W_0)}{(W_2 - W_1)} \cdot 100 \quad (4)$$

Gdje su:  $WA$  = kapacitet upijanja vode (mas. %),

$W_0$  = suha masa uzorka nakon ispitivanja (g),

$W_1$  = masa zasićenog uzorka potopljenog u vodi (g),

$W_2$  = zasićen uzorak izvagan u zraku (g),

$W_3$  = masa uzorka koji se prvo suši, a nakon toga se zasiti vodom i ostavi u vodi da stoji 24h, a nakon toga se izvaže (g).

Sam postupak zasićenja uzorka se postigne tako da se uzorak stavi u vakuum na 2h i nakon toga taj vakuum kojim je zasićen uzorka otpusti i uzorak se ostavlja u vodi 16 ili više sati.

Upijanje vode prema kapacitetu  $WAC$ , po Borrelliju (1999.), je maksimalna količina vode koju apsorbira materijal na sobnoj temperaturi i tlaku, ali da je zasićenost izražena kao postotak od suhe mase uzorka (Wong i sur., 2016).

$$WAC = \frac{M_{max} - M_d}{M_d} \cdot 100 \quad (5)$$

Gdje su:  $WAC$  = upijanje vode prema Berrulliju (mas. %),

$M_{max}$  = masa uzorka pri maksimalnoj količini vode (g),

$M_d$  = masa uzorka nakon ponovnog sušenja (g).

Upijanje vode pod uvjetima atmosferskog tlaka ( $W_{atm}$ ) je voda koja se još naziva i slobodna ili neprisilno upijanje vode. Ona je definirana od Siegesmund i Snethlage (2010.) i jednaka je po formuli (Wong i sur., 2016):

$$W_{atm} = \frac{(M_w - M_{suh})}{M_{suh}} \cdot 100 \quad (6)$$

Gdje su:  $W_{atm}$  = upijanje vode pod uvjetima atmosferskog tlaka (mas. %),

$M_w$  = mokra masa uzorka uronjenog u vodu u periodu 48 h (g),

$M_{su}$  = suha masa uzorka (g).

Upijanje vode u uvjetima vakuma ( $W_{vac}$ ) je još nazvano i prisilno upijanje vode i po formuli je jednako (Wong i sur., 2016):

$$W_{vac} = \frac{(M_n - M_t)}{M_t} \quad (7)$$

Gdje su:  $W_{vac}$  = upijanje vode u uvjetima vakuma,

$M_n$  = mokra masa uzorka nakon prisilnog upijanja vode (g),

$M_t$  = suha masa uzorka (g).

Različiti članovi u „obitelji adsorpcije vode“ su povezani s različitim trajanjem ovisno o vremenu uranjanja i tlaku.

Stupanj zasićenosti je definiran kao (Wong i sur., 2016):

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (8)$$

Gdje su:  $S_r$  = stupanj zasićenosti (%),

$V_w$  = volumen vode u porama ( $m^3$ ),

$V_v$  = volumen pora ( $m^3$ ).

Koeficijent zasićenja je količina vode koja je u uzorku stijene apsorbirana i iznosi od 0 do 100% pri čemu je 0 potpuno suho stanje. Definira ga je Cooke (1979.) i označava kvocijent prisilne adsorpcije vode. To je ujedno i dio stijene koji apsorbira vodu a pritom je uronjen u vodu 24 h. Tako se može opisati ukupna količina pora dostupna za adsorpciju vode te utvrdi ocjena otpornosti na mraz.

Koeficijent upijanja vode ( $W_{coe}$ ,  $kg/m^2 \cdot h^{0,5}$ ) uzima u obzir samu površinu i vrijeme uranjanja uzorka u vodu i koristi se za opis kapilarne adsorpcije vode.

On se dobije uz pomoć formule (Wong i sur., 2016):

$$W_{coe} = \frac{m_w}{t^{\frac{1}{2}}} \cdot 100 \quad (9)$$

Gdje su:  $W_{coe}$  = koeficijent upijanja vode ( $kg/m^2 \cdot h^{0,5}$ ),

$m_w$  = površina upijanja vode ( $kg/m^2$ ),

$t$  = vrijeme adsorpcije (h).

Sadržaj vode i vlage se koriste kao ključni parametri prilikom različitih studija prilikom određivanja utjecaja vode na mehanička svojstva stijena.

Tijekom samog postupka, zasićenost uzorka tekućinom je vrlo mala čak i u onom slučaju kad je pohranjen u prostoriji koja ima relativno visoku vlažnost.

Izraz tekućina bi pri tome trebao imati ekskluzivno značenje voda a ne vodena para. Erguler i Ulusay (2009.) su istraživali varijacije sadržaja vode na uzorke stijena u situaciji kada je uzorak uronjen u vodu i kada se on nalazi u vlažnoj sobi. Kao rezultat svojeg istraživanja su naveli da je onaj uzorak koji se nalazio u vlažnoj sobi imao puno manji sadržaj vode od onog koji je uronjen u vodu čak i kad je u pitanju bio duži period. Objašnjenje na tu pojavu su dali Grgic i sur. (2005.). Po ovome se voda mogla izraziti kao “masa vode po jedinici stijene“. Zbog toga su različiti istraživači, zbog različitih metoda i mjerenja, imali različite rezultate i to je trebalo ujediniti jer je dovodilo do poteškoća prilikom usporedbe.

Postojala su različita stanja stijene, a neka od njih su:

Sušenje u sušioniku (OD) i tu se sva voda uklanja iz stijene pri temperaturi 105 °C do konstantne mase. Za to je potrebno najmanje 24 h. I tu su sve pore prazne.

Sušenje na zraku (AD) je sušenje gdje se voda uklanja s površine, ali su pore pritom djelomično pune.

Zasićeno površinski suho stanje (SSD) je stanje kad su pore ispunjene vodom, ali je površina uzorka suha i nema tragova vode.

Mokro je ono stanje kad su sve pore potpuno ispunjene vodom s filmom na površini uzorka

Kada pogledamo sva 4 stanja, samo sušenje u sušioniku i zasićeno površinski suho stanje, odgovaraju specifičnom sadržaju vode i to se može koristiti kao referenca prilikom izračuna sadržaja vode.

Kod sušenja na zraku i mokrog stanja je problem što znaju rezultati varirati ovisno o istraživačima. Jedino je SSD poželjan među istraživačima jer on predstavlja ravnotežno stanje vode u stijeni što je reprezentativno za stanje na terenu. Svojstva su povezana formulom (Wong i sur., 2016):

$$\theta = \frac{V_v}{V} \quad (10)$$

Gdje su:  $\theta$  = ukupna ili apsolutna poroznost,

$V_v$  = volumen pora ( $m^3$ ),

$V$  = volumen uzorka ( $m^3$ ).

Price (1960.) je testirao niz pješčenjaka iz ležišta ugljena i zaključio da tlačna čvrstoća u potpuno suhim uzorcima varira između 51 i 80% dok je tlačna čvrstoća zasićenih



uzoraka iznosila 45%. od čvrstoće potpuno suhих uzoraka Također su Mann i Fatt (1960.) proveli testove tlačne čvrstoće na 3 različita pješčenjaka i dobili saznanje da stupanj smanjenja čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti ovisi o količini minerala gline. Ta vrijednost modula se smanjila za 6-19% kada su pješčenjaci zasićeni. Nakon njih su Colback i Wiid (1965.) proveli još više opsežna istraživanja na kvarcitnom pješčenjaku i škriljevku iz Afrike. Oni su spoznali da je jednoosna tlačna čvrstoća pješčenjaka smanjena linearno kada je uronjen u tekućine rastuće površinske napetosti. Smanjenje čvrstoće je uglavnom posljedica smanjenja površinske slobodne energije kvarca. Mnogi istraživači poput Bella (1978.) pokazali su da je smanjenje čvrstoće uslijed vode proporcionalno poroznosti stijene.

Dyke i Dobereiner (1991.) su otkrili da prisutnost vode u pješčenjaku pretvara jake veze silicij-kisik u slabije vodikove veze. Njih dva su primijetili da je čvrstoća i krutost pješčenjaka jako povezana s kontaktnim područjem zrna.

Hadizadeh i Law (1991.) su izveli opsežna istraživanja o jednoosnoj čvrstoći i krutosti Penant pješčenjaka iz UK-a. Oni su utvrdili da su unutrašnje mikrostrukture značajke kao npr: geometrija granice zrna, odnos zrna i matrice tj. prisutnost i odsutnost glinastog matriksa, prostor pora, utječu na čvrstoću stijena. Kasnijim istraživanjima je utvrđeno da su slabije stijene osjetljivije na promjenu sadržaja vode.

Shakoor i Barefield (2009.) su primijetili da čvršći pješčenjaci s manjom sposobnosti upijanja vode pokazuju trend linearnog smanjenja jednoosne tlačne čvrstoće s porastom stupnja zasićenja.

Također je dokazano da proces vlaženja i sušenja uzrokuje promjene u pješčenjacima koje su smanjile kvalitetu cementa i oslabile intergranularne veze čime je došlo do smanjenja Youngovog modula od stijene.

Verstrynge i sur. (2014.) su proučavali utjecaj vlažnosti na mehaničko ponašanje željezovitog pješčenjaka. Na smanjenje čvrstoće uslijed saturacije vodom utječe glina, raspodjela pora i veličine zrna i kontinuiranost veziva koji je prisutan (limonit).

Jumikis (1966.) je otkrio da je tlačna čvrstoća škriljavaca u zasićenom stanju bila jedan red veličine manja u odnosu na onu koja se javljala u suhom stanju.

Van Eeckhout i Peng (1975.) i Van Eeckhout (1976.) su zaslužni za otkriće da je smanjenje čvrstoće povezano s vodom škriljevaca iz rudnika ugljena posljedica kombiniranog utjecaja čimbenika kao što su napetosna korozija, smanjenje kapilarne napetosti, povećanje pritiska vode u porama, gubitak kontaktne površine zrno-zrno, kemijsko i korozivno oštećenje.

Anwar i sur. (1998.), Gutierrez i sur. (2000.), Silva i sur. (2008.), Lin i sur. (2005.) su zaslužni za otkriće vezano za škriljavce (kao i za kredu i pješčenjake) da broj ciklusa vlaženja otapa neke minerale kao što su kalcit i klorit u matrici stijene što dovodi do povećanja poroznosti, ali posljedično, i smanjenja čvrstoće. Također su zamijetili da dolazi do rasta smanjenja čvrstoće u stijenama koje su bogate glinom u odnosu na stijene koje su bogate kvarcom.

Lashkaripour i Ajalloeian (2000.) su proučavali učinak vode na fino-zrnate sedimentne stijene uključujući glinene škriljavce i muljnjak. Kao važan zaključak su istakli da su te stijene pretrpjele više od 90% smanjenja čvrstoće i 84% smanjenja modula pri zasićenju, ali i to da dolazi do negativnog eksponencijalnog odnosa između UCS-a i sadržaja vode.

Jiang i sur. (2014.) su izvijestili da se UCS uzorka muljnjaka smanjio s 45 na 5 MPa kada se uzorak uranjao u vodu mjesec dana. Oni su u svojim eksperimentalnim nalazima uz pomoć skenirajuće elektronske mikroskopije i tehnikama rendgenske difrakcije predložili mehanizme slabljenja uzoraka muljnjaka uslijed djelovanja vode u 3 koraka:

- 1) diskontinuiteti mikro veličina osiguravaju put za prodor vode u uzorak
- 2) inkurzivna voda izaziva volumetrijsko bubrenje minerala gline i otapanje karbonata
- 3) ovi procesi uzrokuju širenje i spajanje pukotina.

Prema Ewy-u (2014.) bubrenje odnosno skupljanje u škriljavcima, koji su bogati glinom, dolazi zbog promjene vlažnosti i izravnog kontakta tekućine. Kao rezultat istraživanja je naveden da škriljavci niže poroznosti podvrgnuti su manjoj promjeni volumena i sadržaja vode od onih koji imaju veću poroznost.

Vasarhelyi (2005.) je proučavao utjecaj vode na čvrstoću miocenskog vapnenca i ustanovio je da dolazi do smanjenja od najviše 74 % kod jednoosne tlačne čvrstoće i 53 % u modulu elastičnosti uslijed zasićenja vodom. On je ustanovio da UCS od miocenskih vapnenaca raste kako raste gustoća stijena.

Nedugo nakon toga Torok i Vasarhelyi (2010.) su istraživali, među ostalim, i utjecaj vode na mehaničke parametre dvije travertinske stijene iz Mađarske. Njihov zaključak je bio da UCS eksponencijalno raste kako raste i gustoća travertina. Također su pronašli i negativan eksponencijalni odnos UCS-a i efektivne poroznosti.

Masivni travertin manje poroznosti ima viši UCS, dok porozniji lamelirani travertin ima niži UCS u odnosu na masivni. Gajić i sur. (2011.), ispitivanjem petrofizičkih i mehaničkih svojstava Struganik vapnenca su istaknuli da smanjenje UCS-a od 10% je zbog

zasićenja vodom. Kao još jedan zaključak su naveli da je UCS redukcija u vapnencu sa lokacije Struganik bila samo 5% nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Rajabzadeh i sur. (2012.), su izvijestili da je smanjenje UCS-a u iznosu od 70% bilo zbog zasićenja vodom za njihov vapnenac koji je bio iz pokrajine Fars, južni Iran.

Obert i sur. (1946.) su ustanovili male promjene u tlačnoj čvrstoći u 6 različitih rudničkih stijena, a uzrok tome je razlika u postotku vode.

Erguler i Ulussay (2009.) su promatrali promjene koje uzrokuje voda, a odnosilo se na mehanička svojstva siltita, muljnjaka i lapora. Kako je rastao udio vode tako su se UCS i E smanjivali eksponencijalno. Kao konačni zaključak su ustanovili da stijene bogate glinom pretrpe smanjenje čvrstoće i modula za više od 80%.

Yilmaz (2010.) je proučavao utjecaj vode na UCS i E na uzorcima gipsa ovisno o mjestu s kojeg su uzeti.

Hu i sur. (2014.) su proučavali kako djeluje porni tlak obzirom na rast mikropukotina i kako tlak pora djeluje na mehaničko ponašanje zasićenog glinenca.

Karakul i Ulusay (2013.) su zaslužni za empirijske korelacije između čvrstoće i brzine P vala, pod različitim stupnjevima zasićenjem vodom. Gledao se utjecaj na 14 različitih vrsti stijena sedimentnog ili vulkanskog podrijetla iz Turske. Stijena koja se istakla je ignimbrit i ona je na testiranju pokazala najveću varijaciju od oko 75%. Ignimbrit je najveću poroznost imao u iznosu 27,8% i imao je oko 63,5% gline. Kao zaključak su izveli da se čvrstoća i krutost povezani s poroznošću i sadržajem gline.

Romana i Vasarhelyi (2007.) su predložili pravilo za smanjenje UCS-a u zasićenim stijenama.

Oni su proučavali postotak gubitka UCS zbog zasićenja vodom za 12 različitih vrsta stijena. Te stijene su većinski bile sedimentne dok je manji broj bio magmatskog podrijetla.

Omjer zasićenog i suhog UCS-a za dobro otvrdnute jake stijene pada između 0,8 i 0,9, a za cementirane stijene srednje čvrstoće je bio između 0,6 i 0, a za meke glinovite stijene je on iznosio 0,3.

Kessler i sur. (1940.) su primijetili da tlačna čvrstoća na 116 granitnih stijena iz Amerike kod mokrih uzoraka je bila oko 12% niža u odnosu na suhe.

Studija vezana uz granit, bazalt i gnajs je identificirala gubitak čvrstoće uslijed saturacije na sličan način od strane Ruiza (1966.) Smanjenje čvrstoće je manje u većini magmatskih i metamorfih stijena. Kod dijabaza je primijećeno da dolazi do smanjenja 40% UCS-a, dok je 2-88% čvrstoća smanjena kod tufova.

Celik i sur. (2013.) su procijenili da voda djeluje degradacijski na fizička i mehanička svojstva tufa. UCS test je bio proveden na suhim i zasićenim uzorcima kao i uzorcima tufa koji su bili izloženi procesima smrzavanja i odmrzavanja. Kao rezultat je bilo smanjenje UCS-a za 44% nakon zasićenja i 33% nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Kada se sagledaju sva ispitivanja otkriveno je da su podaci povezani s jednim ispitanim uzorkom, nizom ili prosjekom skupine. Neka istraživanja dala rezultate smanjenja čvrstoće i/ili modula dok kod drugih taj rezultat nije dobiven. Objedinjenje rezultata je bilo od 1940. do 2014. godine, a odnosilo se na utjecaj vode na stijene. Ta referenca je ujedinila podatke o gubitku UCS, E i/ili TS zbog zasićenja vodom (Wong i sur., 2016).

**Tablica 2-2.** Distribucija UCS gubitka za različit tip stijene (Wong i sur., 2016.)

| Tip stijene | Frekvencijska distribucija UCS gubitka (%) |       |       |       |       |       |       |       |       |        | Ukupno |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
|             | 0-10                                       | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 |        |
| Sedimentne  |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| Pješčenjak  | 8  | 19    | 66    | 47    | 52    | 21    | 9     | 22    | 14    | 0      | 258    |
| Škriljavac  | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 4     | 0     | 0     | 0     | 2      | 6      |
| Silt        | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 2     | 2     | 0     | 1     | 1      | 6      |
| Muljnjak    | 0  | 0     | 0     | 0     | 1     | 2     | 4     | 4     | 3     | 1      | 18     |
| Lapor       | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 2     | 3     | 3     | 0      | 8      |
| Vapnenac    | 21   | 42    | 11    | 22    | 9     | 7     | 1     | 4     | 0     | 0      | 117    |
| Ugljen      | 0  | 7     | 7     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 14     |
| Magmatske   |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| Granit      | 14   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 14     |
| Tuf         | 3  | 3     | 6     | 3     | 9     | 2     | 6     | 2     | 3     | 0      | 37     |
| Diabaz      | 0  | 0     | 0     | 0     | 8     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 8      |
| Metamorfne  |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| Mramor      | 0  | 0     | 0     | 3     | 0     | 3     | 4     | 0     | 0     | 0      | 10     |
| Škriljavac  | 2  | 3     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 7      |
| Ukupno      |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 503    |

**Tablica 2-3.** Distribucija E gubitka (%) za različit tip stijene (Wong i sur., 2016.)

| Tip stijene       | Frekvencijska distribucija E gubitka (%) |       |       |       |       |       |       |       |       |        | Ukupno |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                   | 0-10                                     | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 |        |
| <b>Sedimentne</b> |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| Pješčenjak        | 8  | 12    | 0     | 0     | 0     | 2     | 2     | 0     | 0     | 0      | 24     |
| Škriljavac        | 2  | 0     | 0     | 0     | 4     | 9     | 4     | 2     | 2     | 0      | 23     |
| Silt              | 0  | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 2     | 0      | 5      |
| Muljnjak          | 0  | 0     | 1     | 0     | 4     | 1     | 2     | 1     | 3     | 1      | 13     |
| Lapor             | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 3     | 0     | 0      | 5      |
| Vapnenac          | 8  | 5     | 7     | 10    | 6     | 2     | 0     | 0     | 0     | 0      | 38     |
| Ugljen            | 0  | 0     | 0     | 9     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 9      |
| <b>Magmatske</b>  |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| Granit            | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      |
| Tuf               | 4  | 2     | 4     | 1     | 1     | 2     | 4     | 4     | 3     | 0      | 25     |
| Diabaz            | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      |
| <b>Metamorfne</b> |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| Mramor            | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      |
| Škriljavac        | 3  | 2     | 2     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 7      |
| Ukupno            |  |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 149    |

Postupak ispitivanja vlačne čvrstoće je proveden brazilskim testom s diskom osim studije Anwara i njegovih suradnika (1998.) koji su proveli test jednoosne vlačne čvrstoće.

Burshtein (1969.) je utvrdio značajni učinak vlage na vlačnu čvrstoću pješčenjaka.

Dube i Singh (1972.) su proučavali učinak okolišne vlažnosti na vlačnu čvrstoću 5 različitih vrsta pješčenjaka i oni su primijetili smanjenje čvrstoće kod pješčenjaka u iznosu od 11,6–48,6% kod potpuno zasićene atmosfere. Utvrđeno je da smanjenje vlačne čvrstoće u pješčenjacima ovisi o poroznosti, prisutnosti minerala gline i o postotku matriksa.

Ojo i Brook (1990.) su također proučavali utjecaj vlage na vlačnu čvrstoću zasićenog pješčenjaka i otkrili su da se ona smanjila za 50%. Karakul i Ulusay (2013.) su uočili da se kod različitih turskih stijena smanjuje vlačna čvrstoća od 63% za zasićene turske

pješčenjake. Uočen je postotak opadanja vlačne čvrstoće sa stupnjem zasićenja koji je sličan onom u UCS-u.

Parate (1973.) je proučavao učinak vode na vapnenac. On je ustanovio da gubitak čvrstoće je posljedica smanjenja kohezijske čvrstoće koja ovisi o površinskoj energiji. Vutukuri je proučavao učinak vode i drugih tekućina na vlačnu čvrstoću vapnenaca. Za nju je utvrđeno da eksponencijalno pada s dielektričnom konstantom i površinskom napetosti tekućina. Vasarhelyi (2005.) je zaslužan za linearni odnos između suhe vlačne čvrstoće i zasićene vlačne čvrstoće vapnenca. Također je zaslužan za otkriće eksponencijalne povezanosti vlačne čvrstoće i gustoće miocenskog vapnenca. Anwar o suradnici su otkrili da se mehanička svojstva stijena iz ležišta ugljena jako pogoršavaju zbog vode.

Erguler i Ulusay (2009.) su otkrili da su vlačna čvrstoća i sadržaj vode kod glinenih stijena eksponencijalno povezani, a to se odnosi na stijene kao npr. silita, lapora i muljnjaka. Oni su zaslužni i za otkriće da su zasićene stijene pretrpjele više od 90% smanjenja vlačne čvrstoće u odnosu na suhe.

Slabljenje uz pomoć vode na vlačnu čvrstoću su istražili Wong i Jong (2013.) proučavajući gips. Oni su ustanovili da je smanjenje vlačne čvrstoće povezano s vodom i ima učinak na pucanje uzoraka gipsa.

Gholami i Rasouli (2013.) su proučavali kako djeluje voda i anizotropija na vlačnu čvrstoću škriljavca. Došlo je do smanjenja vlačne čvrstoće za 21% zbog vode.

Provedeno je puno istraživanja kako bi se otkrio utjecaj anizotropije na čvrstoću pod opterećenjem. Utjecaj vode na modul elastičnosti anizotropijskih škriljavaca proučavali su Van Eeckhout i Peng (1975.).

White i Mazurkiewicz (1989.) su uočili da se u bitumenskom ugljenu smanjuje jednoosna tlačna čvrstoća i modul i da je ono veće kada je slojevitost paralelna sa smjerom nanošenja opterećenja u usporedbi s okomitom orijentacijom. Učinak vode i anizotropije folijacije na UCS, TS i E u škriljavcima istražili su Gholami i Rasouli (2013.). Smanjenje od 27% tlačne čvrstoće je uočeno u mokrom škriljevku kod kuta između ravnine folijacije i smjera maksimalnog naprežanja od 45 stupnjeva. Njihov zaključak je da se maksimalno smanjenje čvrstoće događa kada je kut između 30 i 40 stupnjeva.

Od kasnih 1960-ih se počeo proučavati utjecaj vode na dinamičku čvrstoću stijena. Podio i sur. su otkrili da je zasićenost vodom povećala brzinu kompresijskog vala i da se smanjila brzina smičnog vala, a efekti zasićenja su izraženiji na brzini posmičnog vala nego na brzini tlačnog.

Lou (1994.) je proučavao odnos naprezanja i deformacija na uzorcima granita osušenih u sušioniku i uzoraka granita zasićenog vodom korištenjem eksperimenata SHPB i zaključio je da je modul elastičnosti granita osušenog u sušioniku malo niži od onog koji je zasićen vodom. Njegov zaključak je bio da na krutost granita ne utječe samo intenzitet deformacije nego i također sadržaj vode.

Wang i sur. (2010.) su proučavali dinamičku čvrstoću pješčenjaka pomoću SHPB testa prilikom sušenja na zraku i zasićenosti vodom na brzinu deformacije. Uočili su da je kod pješčenjaka zasićenih vodom ona značajnija nego kod pješčenjaka osušenih na zraku. Također je uočeno da je dinamička čvrstoća različita od statičke jednoosne tlačne čvrstoće.

Sun i sur. (2014.) su proveli kvantitativnu analizu makroskopskih plastičnih volumetrijskih reakcija uzrokovanih kolapsom pora i preslagivanja zrna pomoću analize konačnih elemenata. Također su istraživali potpuno povezane hidromehaničke reakcije vodom saturiranih vapnenaca izloženih različitim brzinama naprezanja.

Lou (1994.) je istraživao dinamičku vlačnu čvrstoću u sušioniku osušenog i vodom zasićenog granita pomoću SHPB tehnike pri čemu je brzina nanošenja deformacija bila u rasponu od  $1,9 \cdot 10^{-8}$  do  $1 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ .

Zaključio je da je dinamička vlačna čvrstoća granita osjetljiva na brzinu deformacije u suhim i vlažnim uvjetima. Također je zaključio da su zasićeni graniti osjetljiviji na brzinu deformacije nego suhi.

Ogata i sur. (2001.) su proučavali kako djeluje zasićenje vodom na dinamičku vlačnu čvrstoću različitih stijena. Otkriće je bilo da zasićenje vodom smanjuje dinamičku vlačnu čvrstoću u Kimacchi pješčenjaku i Tage tufu koji su oboje dosta porozni. Za razliku od njih, beznačajna razlika je ustanovljena u Inada granitu koji je male poroznosti i iznosi 0,49 %. Njihova je pretpostavka bila da je za redukciju dinamičke vlačne čvrstoće zaslužno smanjenje koeficijenta trenja između molekula. To je uzrokovalo smanjenje sile vezanja stijena.

Huang i sur. (2005.) su proveli istraživanje statičke i dinamičke vlačne čvrstoće na Langyou pješčenjaku u suhim i potpuno saturiranim uvjetima. Njihov zaključak je bio da se gubitak dinamičke vlačne čvrstoće smanjuje s povećanjem brzine nanošenja deformacija. Taj postotak smanjenja čvrstoće je varirao. Što je bilo veće nanošenje opterećenja to je bio niži postotak gubitka čvrstoće.

Ostale studije su pokazale da voda nije jedina koja utječe na redukciju čvrstoće i modula elastičnosti stijena već da na to imaju utjecaj i drugi unutarnji i vanjski čimbenici. Pod unutarnje čimbenike smatraju se gustoća, poroznost i strukturni sklop a među najvažnije

vanjske čimbenike ubrajamo brzinu deformacije, površinsku napetost, i dielektričnu konstantu saturirajućeg fluida, postotak apsorpcije, i usisni tlak koji također imaju veliki utjecaj.

Neki od donesenih zaključaka su:

- 1) Zamijećen je negativni potencijalski i/ili eksponencijalni odnos između UCS-a/modula elastičnosti i sadržaja vode (stupnja saturacije, sadržaja vlage, apsorpcije vode).
- 2) primijećen eksponencijalni i/ili potencijalski odnos između UCS-a i gustoće. Ako se povećava gustoća također se povećava i tlačna čvrstoća.
- 3) Zamijećen je negativan potencijalski odnos između tlačne čvrstoće i poroznosti. To potkrjepljuje razlog zašto je za porozne stijene dobivena mala tlačna čvrstoća.
- 4) Zamjećuje se eksponencijalni odnos između TS te površinske napetosti i dielektrične konstante saturirajuće tekućine.
- 5) Potencijalski i/ili linearni odnos je zamijećen između čvrstoće stijena i brzine prirasta deformacija (Wong i sur., 2016).

Zaključak nekih istraživača je da vlaženje uzrokuje promjenu oblika deformacije. Na primjer, čvrste varijante pješčenjaka iskazuju slom aksijalnim klanjem u suhom stanju koji prelazi u slom smicanjem ili kombinacijom smicanja i aksijalnog klanja kod zasićenih uzoraka.

Glavna tema prilikom istraživanja su uvijek bili efekti vodom uzrokovanih oslabljenja zbog velikih praktičnih vrijednosti. Vrlo važna stvar je da istraživači daju jasne definicije procedura pomoću kojih se definiralo suhu masu, mokru masu i trajanje saturacije kako bi se olakšalo uspoređivanje podataka (Wong i sur., 2016).

### **3. MATERIJALI I METODA**

Kameni materijal je u rudarstvu vrijedna mineralna sirovina koja se puno eksploatira u svijetu i na području Republike Hrvatske, a kako vrijeme prolazi dobiva sve veći značaj. U Hrvatskoj se najviše eksploatiraju karbonati, prvenstveno vapnenci, ali i druge vrste kamena. Najveća primjena stijenskog materijala u Hrvatskoj je u vidu tehničko-građevnog kamena koji se u građevinarstvu najčešće koristi za izradu betona. Postoje i lokacije gdje je prestala



eksploatacija tehničko-građevnog kamena zbog uvjeta zaštite prirode ili prestanka koncesije, ali stijenski materijal i s tih lokacija može biti interesantan za proučavanje. Takav jedan stijenski materijal je mramor sa lokacije bivšeg kamenoloma Vukov Dol.

### **3.1. Ispitivani stijenski materijal**

Bivši kamenolom Vukov Dol se nalazi 3 km od Kašine u neposrednoj blizini prometnice Sesvete-Kašina-Marija Bistrica. Pozicija kamenoloma je bila na sjevernoj strani padine doline koja ima smjer pružanja istok zapad prema selu Planina. Od glavne ceste je udaljena 1km prema zapadu. Bivši kamenolom se nalazi pod nagibom 40° i prekriven je šumom. Prednost kamenoloma bila je ta što je udaljen od objekata i naselja pa nema opasnosti prilikom miniranja.

Naslaga je mlado paleozojske, dijelom mezozojske i najviše tercijarne starosti. Naslage devon - karbonatne starosti se rasprostiru kao široka zona koja ima smjer JZ-SI (sjeverno od Kašine) i ZI odnosno zapadno od Zelinske gore. Sama starost je dokazana nalaskom konodonata (Đurđanović, 1973.) i matoporoidea i briozoa (Kochansky-Devide, 1981.).

Izgrađen je od silikatnih ortometamorfita i parametamorfita, retrogradno i progradno metamorfoziranih eruptiva i sedimenata od facijesa koji su nastali metamorfozom i sadrže klorit, kvarc, sericit, albit i epidot. Kod karbonatnih facijesa predstavljeni su mramor i mramorasti vapnenac koji predstavljaju leće različitih dimenzija koje su uložene u silikatnim metamorfita. Regionalne metamorfoze su zahvaćene u permu u vrijeme salske orogenetske faze. Sjeverno, zapadno i južno su tercijarne naslage, prvenstveno miocenske koje su u eroziona - transgresivnom odnosu, a manje u tektonskom rasjedu. Na području tektonske poremećenosti leži mramor, a u jugozapadnom dijelu, sjever- sjeverozapad se nalazi Vukov Dol (Mesec i sur., 1986.).

Naslage donjopermske starosti su karakteristične škriljave strukture s velikim udjelom škriljavih mramoriziranih vapnenaca i mramora. Parametamorfiti su izgrađeni od kvarca, klorita, kalcita i sericita. Oni su kvarc - kalcit- sericit - kloritski škriljavci i slabije metamorfozirani šejlovi i siltiti. Mramori i mramorasti vapnenci su na mjestima jake limonitizacije. U južnom dijelu oni graniče s naslagama devon-karbonatne starosti. Na ostalim stranama su okružene s naslagama tercijara u eroziona – transgresivnim, a dijelom u tektonsko – rasjednom kontaktu.

Od naslaga trijaskе starosti su jako mala prostranstva. Donji trias se rasprostire zapadno od Križevne bukve, a srednji na Zelinskoj gori. Donji trias je na permskim naslagama, a u njegovom donjem dijelu je zastupljen kvarcni pješčenjak, grauvakom, vapnenački lapor i sporedno dolomiti. Srednji trias je predstavljen vapnenačkim dolomitima i dolomitičnim vapnencima s pojavom čerta.

Naslage kredne starosti se nalaze u području Oštroг huma. Zastupljeni su grauvakama i subgrauvakama, a manje šejlovi, lapori, vapnenci i čertovi. Asocirane su magmatskim stijenama, spilitima i diabazima koji se malo nalaze u području Oštroг huma.

Naslage paleozoika i mezozoika su okružene naslagama tercijara. Miocen je u početku bio slatkovodan, a kasnije je postao izrazito marinski i imao je karbonatne sedimente. Kasnije je opet postao slatkovodan pa su slatkovodni sedimenti iz pliocena prešli pleistocen (Mesec i sur., 1986.).

Paleozojske niskometamorfne stijene od horta Medvednice su odijeljene tercijarnim naslagama u području sela Planine. Dio rasjeda je dinarskog protezanja, a s njim se podudaraju gornji dio toka Kašine, Glavničica, Nespeš, Moravče te Mala i Velika rijeka (Mesec i sur., 1986.).

Geološka građa je vrlo složena i ona je posljedica taloženja sedimenata heterogenog sastava odnosno geneze produkata koji su nastali kao produkta metamorfnih procesa uz nastanak mramora, vapnenaca, filita i argilošista i nekoliko faza tektonskih procesa. Što se tiče geološke građe, u gornjoj etaži je uzet uzorak koji je tamnosive boje i slabo naglašene škrljivosti. Taj uzorak je nazvan mramor i ta stijena je gusta i u mikroskopskom preparatu vidimo granoblastičnu, slabo izraženu kataklastičnu, jednolično zrakastu strukturu. Zrna kalcita su poligonalna gdje je slabo izražen duguljast i ravan kontakt zrna ili je izraženo zubičasto i klinasto urastanje. Sva zrna kalcita imaju tlačne sraslačke lamele koje su dijelom lomljene ili se dijelom povijaju. Zrna su veličine 0,10 do 0,55 mm. Duž zrna se mjestimično može primijetiti drobljenje. Akcesornih sastojaka ima oko 2% i oni su lepidoblasti, listići muskovita, i oni se uklinjavaju i urastaju u zrna kalcita. Njihove dimenzije iznose 0,012 · 0,2 mm. Zrna kvarca su potiskivana kalcitom i dimenzije zrna kvarca iznose 0,15 mm. Pigment je fini prah koji je integriran i trakasto agregiran. Mjestimično dolazi do povijanja traka. Prah je dimenzija od 0,0001 do 0,005 mm (Mesec i sur., 1986.).

Mramor je glavni dio stijenske mase i on se je nalazio u središnjem i zapadnom dijelu radilišta u kamenolomu na obje radne etaže. Duž pukotina je bila crvena masa koja se sastoji od hematita. On se nalazi poput finog filma duž pukotina stijenskog masiva.

Na istočnom dijelu gornje etaže se nalazio kataklazirani mramor. Njegove karakteristike su bijela boja, jako škrljav, ispresijecan žilicama koje se protežu okomito na škrljavost. Struktura je jako granoblastična do kataklastične. Zrna su bila duguljasta veličine od  $0,08 \cdot 0,4$  mm,  $0,15 \cdot 0,65$  i  $0,3 \cdot 1,5$  mm. Kontakti među zrnima su konkavno-konveksni i zrna su međusobno klinasto, zubičasto i cik-cak urastaju (Mesec i sur., 1986.).

Između zrna je uočeno da dolazi do drobljenja. Zrna kalcita imaju tlačne sraslačke lamele koje su ili lomljene ili se povijaju. Također se mogu vidjeti lepidoblasti koji su dijelom uklopljeni s zrnima kalcita. Tekstura je jako škrljava.

Na gornjoj etaži na istočnom dijelu je kamen koji se naziva brečasti i kataklazirani mramor. Taj kamen je bijele boje, brečast izgled, jako škrljav i dolazi do osipanja duž ploha škrljavosti i pukotina.

U mikroskopskom preparatu se uočavala kataklastična i granoblastična struktura. Zrna kalcita su duguljasta, a dimenzije zrna su manje nego kod kataklastičnog mramora. Zrna kalcita imaju tlačne sraslačke lamele koje se povijaju ili su lomljene. Zrna su međusobno u konkavno-konveksnom odnosu sa klinastim, zubičastom i cik-cak urastanjem. Te zone kataklaziranja su međusobno okomite škrljavosti.

Pojavljivale su se zone u kojima je dolazilo do oslabljivanja međuzrnih veza jer u tim područjima kataklazira između zrna i duž same zone. Udio akcesornih sastojaka je neznatan. To su lepidoblasti i zrna detritarnog kvarca. Muskovit je djelomično uklopljen u zrna kalcita dok je kvarcni detritus potiskivan kalcitom. Kod tog kamena je jako izraženo kataklaziranje duž škrljavosti i duž zone okomitih škrljavosti. Mramor koji je pronađen u tom dijelu ležišta se pjeskuljavo osipa jer je on izlegnut djelovanju egzogenih faktora i na mjestima pronalazimo fino granuliran bjeličast pijesak koji se može pronaći u znatnim količinama.

Uzorak koji se nalazio na gornjoj etaži u središnjem dijelu bivšeg kamenoloma se naziva kvarc-kalcitni filit i on je žućkastosive boje, tekstura mu je jako škrljava, raspada se pločasto, lističavo do iverasto. Raspadanje se događa duž ploha škrljavosti koje su sedefastog sjaja. Pod mikroskopom se može uočiti granoblastična do lepidoblastična struktura. Pojavljuju se dijelovi koji su različitog sastava koji se izmjenjuju okomito na škrljavost. Na tom dijelu vrstanja prevladava kvarc. Ona su poligonalna s ravnim konturama ili je došlo do klinastog urastanja. Zrna su različitih dimenzija. Osim kvarca još se pojavljuje i muskovit-sericit koji ima subparalelno orijentirane listiće. Praškasta tvar je inergranulirana ili trakasto agregirana. Uz kalcit se pojavljuje i promjenjiv udio kvarca i listići muskovita sericita. Oni naglašavaju plohe škrljavosti. Zone kataklaziranja su pigmentirane limonitnom supstancijom. Hematit i limonitna supstancija su na nekim mjestima trakasto agregirani.

Kvarc- kalcitni filit je definiran kao fino vrstanje kvarcita, kalcit-kvarc-sericitnog škriljavca i kalcit-kvarcnog škriljavca (Mesec i sur., 1986.).

Uzorak kamena koji se nalazio odmah uz kvarc-kalcitni filit naziva se kataklazirani -kvarc-kalcitni filit. On je bijele boje, jako škriljave teksture, raspad mu se događa listićavo, pločasto ili iverasto duž ploha škriljavosti. Također se pojavljuje različit sastav kao u uzorku. U dijelu vrstanja je veliki udio kvarca i on je glavna komponenta. Zrna kvarca su poligonalna. Akcesorni su subparalelno orijentirani listićavi muskovit-sericit i granoblastični kalcit koji su razvijeni dijelom kao i idioblasti gdje dolazi do potiskivanja kvarca. Sva zrna kalcita imaju tlačne sraslačke lamele koje su dijelom povijene i lomljene. Tinjac je dijelom detritaran, a uzrok su listići češljastih rubova ili se povijaju i prilagođavaju zrnima kalcita. Tinjci naglašavaju plohe škriljavosti i oni su dijelomično subparalelno centrirani. Jako je naglašeno kataklaziranje koje zahvaća granoblaste kalcita. Udio limonitnog pigmenta je neznatan. Na mjestima se mogu uočiti relikti klastične psamitske i siltitske strukture.

Na sjeveroistočnom dijelu kamenoloma je kamen koji se naziva argilošist. Taj kamen je crne boje, struktura je jako škriljava i raspad je pločast do listićav. Struktura je reliktna klastična pelitosiltitska do lepidoblastične. Glavni sastojci su listićavi ilit-sericit i kvarc. Čestice kvarca mogu biti uglate i subuglate. Listićav ilit-sericit je subparalelno orijentiran i neorijentirani kada čini mrežaste spletove. Ponekad može biti savijen i agregiran u snopove. Dimenzije mogu biti od  $0,0001 \cdot 0,015$  do  $0,0001 \cdot 0,03$  mm. Sastojci su apatit, turmalin (stupičast, paleohroitičan, idiomorfan i dimenzija može biti do  $0,008 \cdot 0,06$  mm), granat koji ima promjer zrna do 0,006 mm i rutil. Praškasta supstanca je trakasto agregirana ili može biti fino raspršena. Limonitna supstanca je za razliku od praškaste supstance mrežasto spletena ili može biti poput žilica i ona je paralelna sa škriljavosti (Mesec i sur., 1986).

Na tom području razlikujemo nekoliko različitih vrsti metamorfnih stijena: mramor, brečasti i kataklazirani mramor, kvarc – kalcitni filit, kataklazirani kvarc – kalcitni filit i argilošist.

Mramor se ističe kao jako kvalitetan kamen i on se upotrebljava u građevinarstvu i ima jako široku primjenu. Brečasti i kataklazirani mramor je manje kvalitetan od mramora i puno nepovoljnijih fizikalno mehaničkih svojstava i njegova primjena je dosta ograničena.

Kvarc – kalcitni filit je manje kvalitetan kamen i njegova otpornost na habanje je dosta varijabilna i jako ovisi o udjelu kvarca. Također njegova primjena je dosta ograničena.

Kataklazirani kvarc – kalcitni filit je nekvalitetan kamen i njegova primjena je jako ograničena.

Argilošist se upotrebljava u građevinarstvu kao jalovina i njega se pronalazi na sjevernom i sjevernoistočnom dijelu ležišta i na samom krajnjem jugozapadnom dijelu ležišta. Na sjevernom i sjevernoistočnom dijelu je on mramoru i kvarc – kalcitnom filitu krovina i tu je tektonsko – rasjedni kontakt. Na temelju lističavog i grusnog pločastog materijala u humusu je utvrđeno pružanje argilošista koje je prema grebenu. Sjevernoistočni dio ležišta koji je malo uzvišen također sadrži mramor, ali taj mramor se ne eksploatira zbog zaštite prirode i pogleda na grebeni dio potoka Kašine.

Kvarc – kalcitni filit se nalazi na sjevernom rubu kamenoloma, u sredini između gornje i donje etaže i na južnom dijelu ležišta. Na sjeverozapadnom dijelu je također nalazište kvarc-kalcitnog filita, ali su tu izdanci rijetki pa ga je teže utvrditi u pogledu količina (Mesec i sur., 1986).

Mramor se nalazi na središnjem i zapadnom dijelu i od tud se proteže prema zapadnom i središnjem dijelu kamenoloma te prema vrhu grebena. Kako se ide prema istočnom dijelu ležišta to su više brečasti i kataklazirani.

Geneza ležišta tokom paleozoika, devon-karbona je vrlo složena i glavni dio sedimenata je silikatnog sastava među kojima prevladavaju klastični sedimenti pelitske, psamitske i siltitske građe. Te stijene su slojevite i fino granulirane i nastale su konsolidacijom i kompresijom gline i silta ili mulja ili izmjenama kvarcnog pješčenjaka i grauvakama. Mjestimično se može pronaći leće vapnenaca koje su raznih dimenzija.

Kasnije tokom perma je bila hercinska orogeneza. Progradnom metamorfozom gline, mulja i silta su nastali argilošisti, kvarcni kalcitni filiti, a na samom kraju vapnenci mramorizirani vapnenci i mramori. Sedimentne strukture nisu se potpuno uništile već su na mjestima zaostale forme.

Složenost građe silikatnih i karbonatnih sedimenata se povećala progradnim metamorfnim procesima, a još više tokom alpske orogeneze (Mesec i sur., 1986).

Vukov dol je jako složene tektonike. Samo ležište je bilo izloženo raznim procesima i rađene su analize zasjecima stjenske mase. Zapadno i sjeverno od pružanja radilišta i kako je išla padina, utvrđena je određena vrsta stijene koja se nije mogla odrediti na pojedinim mjestima zbog škrljavosti i tektonskih diskontinuiteta čime je bila ugrožena sigurnost. Na pojedinim izdancima je došlo do obrušavanja i prevaljivanja većih blokova što je poremetilo tektoniku. Prilikom mjerenja škrljavosti dobivene su 2 vrijednosti škrljavost koje su iznosile  $58/50^\circ$  i  $158/42^\circ$ . Tu je uočeno da je jedan dio pripadao tektonici za područje

Medvednice, a drugi dinarskoj škriljavosti. Škriljavost koja je išla u smijeru zapad-jug-zapad prema istok-sjever- istok je upadala na jug-jug-istok i ona je upadala na radilište na obje etaže.

To je razlog zašto je to područje ispresijecano tektonskim elementima i rasjednim zonama uz razne pukotinske sisteme. Te zone su zaslužne za razbijenu stijensku masu na manje i veće bokove. Kako su se razvila 2 pukotinska sistema razlikujemo 2 maksimuma i 2 minimuma. Maksimum I ( $48/75^\circ$ ) i submaksimum IV ( $250/88^\circ$ ) pripadaju dinarskom sistemu dok su maksimum II ( $140/68^\circ$ ) i submaksimum III ( $10/80^\circ$ ) su svrstani pod područje Medvednice. Pozitivnu ulogu kod stijenskog masiva imaju maksimum I ( $48/75^\circ$ ) i submaksimum III ( $10/80^\circ$ ) (Mesec i sur., 1986.).

U pogledu propusnosti imaju argilošisti koji su vodopropusne stijene i oni su pozicionirani na sjeveru ležišta, odnosno oni predstavljaju krovinu mramora i kvarc-kalcitnog filita. Kako je propusna karbonatna stijena pozicionirana ispod to nema utjecaj na hidrogeološki režim ležišta. Njega također možemo pronaći i na jugozapadnom dijelu ležišta gdje je on nepropusna barijera i može služiti kao rezervoar podzemne vode, ali je količina ograničena. Karbonatne stijene su drenirajuće što pospješuje pukotinski porozitet. Količina kamene mase koja se računala se uzimala do dubine od 250 odnosno 270m je predstavljala rezerve. Taj izračun se radio do područja koje ima dobru odvodnju s najnižih etaža u odnosu na potok koji se nalazi u Vukovom dolu.

Mramori i raspucan kvarc-kalcitni filit je nepropusna naslaga s naglašenim pukotinskim porozitetom. Rasjedne zone koje sadrže kamen materijal i glinenu supstancu nisu vodonepropusne barijere.

Kada se gleda inženjersko-geološko stajalište imaju 4 kategorije stijena:

1) Mramori koji su povoljnih inženjersko-geoloških svojstava i oni su očuvani ili slabije tektonski poremećeni i za njih se smatra da imaju povoljna inženjersko-geološka svojstva. Njih se može naći u zapadnom i središnjem dijelu ležišta.

2) Mramori koji su tektonski jako oštećeni i poremećeni i oni imaju nepovoljna inženjersko geološka svojstva. Oni su jako kataklazirani i brečasti i možemo ih pronaći u istočnom dijelu.

3) Argilišisti koji su jako škriljavi i tektonski poremećeni i njih karakteriziraju jako nepovoljna inženjersko geološka svojstva. Na sjeveroistočnom dijelu oni nepovoljno zaliježu u položaju na frontu radilišta. Po pitanju sigurnost i stabilnosti nisu jako povjerljivi

i zato se prilikom iskopa uvijek ostavlja sloj mramora i kvarc-kalcitni filit koji služe kao zaštita.

Kada gledamo fizičko-mehanička svojstva imamo različite vrijednosti koje su prikazane u tablici 3-1.

**Tablica 3-1.** Prikaz fizičko-mehaničkih svojstava (Mesec i sur., 1986.)

|   |          |     |
|---|----------|-----|
| Čvrstoća na pritisak u MPa u suhom stanju                                 | maks.    | 206 |
|   | min      | 141 |
|   | srednja  | 172 |
| U vodom zasićenom stanju  | maks.    | 154 |
|   | min      | 108 |
|   | srednja  | 134 |
| Poslije smrzavanja  | maks.    | 148 |
|   | min      | 105 |
|   | srednja  | 130 |
| Otpornost na habanje struganjem po Bohmeu $\text{cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ | 22,3     |     |
| Otpornost protiv udara metodom Treton (%)                                 | 12,2     |     |
| Gustoća $\text{g/cm}^3$   | 2,71     |     |
| Prostorna masa $\text{g/ cm}^3$   | 2,70     |     |
| Porozitet %   | 0,37     |     |
| Upijanje vode %   | 0,09     |     |
| Na mraz   | postojan |     |

Kada se pogledaju rezultati iz tablice 3-1 vidi se da sam kamen ima dobra svojstva i da se može koristiti za različite namjene kao drobljeni kamen na željezničkim prugama, za zidanje i utvrde na obalama, za nosive i bitumenizirane nosive slojeve u cestogradnji i agregata za beton i armirani beton.

Svojstva mramora su drugačija od kvarc-kalcitnog filita. Sastav i struktura su po svojstvima slična mramorima, ali je kod njih drugačija otpornost na habanje. Kod filita svojstva se razlikuju ovisno o udjelu kvarca koji je promjenjiv. Filit također ima različitu

anizotropiju čvrstoće na pritisak, ovisno o škriljavosti može biti paralelno ili okomito. Različite vrste filita s većim udjelom muskovita i sericita imaju dosta nepovoljnija svojstva od mramora, a prilikom drobljenja nastaje agregat pločastog oblika jer se raspadanje događa duž ploha škriljavosti. Brečasti i kataklazirani mramor okarakterizirani su jako nepovoljnim fizičko mehaničkim svojstvima (Mesec i sur., 1986.).

### 3.2. Metode i rezultati laboratorijskih ispitivanja

Postupak određivanja UCS-a obavljen je prema europskim standardima 1926:2006 i sam princip ove metode je da se primijeni neraspodijeljeno i kontinuirano opterećenje koje se povećava na uzorke kamena i gleda se do koje će se granice povećavati opterećenje dok ne dođe do sloma. Kao uzorak se rabe ili kocke koje su dimenzija  $70\pm 5$  mm ili  $50\pm 5$  ili kružni cilindri dimenzija  $70\pm 5$  mm ili  $50\pm 5$ .

UCS se računa uz pomoć formule:

$$UCS = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Gdje su:  $UCS$  = jednoosna tlačna čvrstoća (MPa),

$F$  = sila koja se primjenjuje na uzorak (N),

$A$  = površina poprečnog presjeka ( $\text{mm}^2$ ).

Postupak određivanja jednoosne tlačne čvrstoće se sastojao od pripreme četiri uzorka sa bivšeg eksploatacijskog polja Vukov dol (slika 3-1). Dva uzorka su ispitana u suhom stanju te su prethodno osušena u sušioniku 24 sata i ohlađena u eksikatoru, a dva su ispitana u saturiranom stanju te su prije toga 24 sata zasićivani s vodom. Kao ispitni uređaj koristila se preša ELE ADR 2000 (slika 3-2).





Slika 3-1. Prikaz pripremljenih uzoraka



Slika 3-2. Prikaz uređaja za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće

Prvi uzorak je imao oznaku 23-7-1 i on je bio visok 54,10 mm, promjer 1 ( $d_1$  mu je bio 49,9 mm), promjer 2 mu je iznosio  $d_2 = 49,7$  mm, a masa mu je bila 283,82 g. Površina poprečnog presjeka je iznosila 1946,831 mm<sup>2</sup>, a volumen je iznosio 105323,55 mm<sup>3</sup>.



Slika 3-3. Ispitivanje uzorka 23-7-1

Drugi uzorak je imao oznaku 23-7-2 i on je bio visok 53,1 mm, promjer  $d_1$  je bio isti kao promjer  $d_2$  i oni su iznosili 49,7 mm dok je masa bila 278,61 g. Površina poprečnog presjeka je iznosila 1939,021 mm<sup>2</sup>, a volumen je iznosio 102962,015 mm<sup>3</sup>.



Slika 3-4. Ispitivanje uzorka 23-7-2

Treći uzorak je označen oznakom 23-7-3 i visok je 53,1 mm, promjer  $d_1$  je bio isti kao promjer  $d_2$  i oni su iznosili 49,7 mm dok je masa bila 278,97 g. Površina poprečnog presjeka je iznosila 1939,021 mm<sup>2</sup>, a volumen je iznosio 102962,015 mm<sup>3</sup>. Važno je napomenuti kako je treći uzorak imao pukotinu na krajnjem gornjem rubu.



**Slika 3-5.** Ispitivanje uzorka 23-7-3

Zadnji uzorak je bio pod oznakom 23-7-4 i on je visok 52,2 mm, promjer  $d_1$  je bio isti kao promjer  $d_2$  i oni su iznosili 49,7 mm dok je masa bila 278,49 g. Površina poprečnog presjeka je iznosila 1939,021 mm<sup>2</sup>, a volumen je iznosio 101216,896 mm<sup>3</sup>.



**Slika 3-6.** Ispitivanje uzorka 23-7-4

## 4. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

### 4.1. Rezultati ispitivanja na mramoru sa bivšeg kamenoloma Vukov Dol

Uzorku 23-7-1 utvrđena je gustoća od  $2694,744 \text{ kg/m}^3$  i jednoosna tlačna čvrstoća  $77,408 \text{ MPa}$ , a sila pri kojoj se dogodio slom je iznosila  $150,7 \text{ kN}$ . Izgled uzorka poslije sloma je prikazan na slici 4-1.



Slika 4-1. Prikaz uzorka 23-7-1 nakon sloma

Uzorku 23-7-2 utvrđena je gustoća od  $2705,949 \text{ kg/m}^3$  i jednoosntlačna čvrstoća  $74,006 \text{ MPa}$ , a sila pri kojoj se dogodio slom je iznosila  $143,5 \text{ kN}$ . Izgled uzorka poslije sloma je prikazan na slici 4-2.



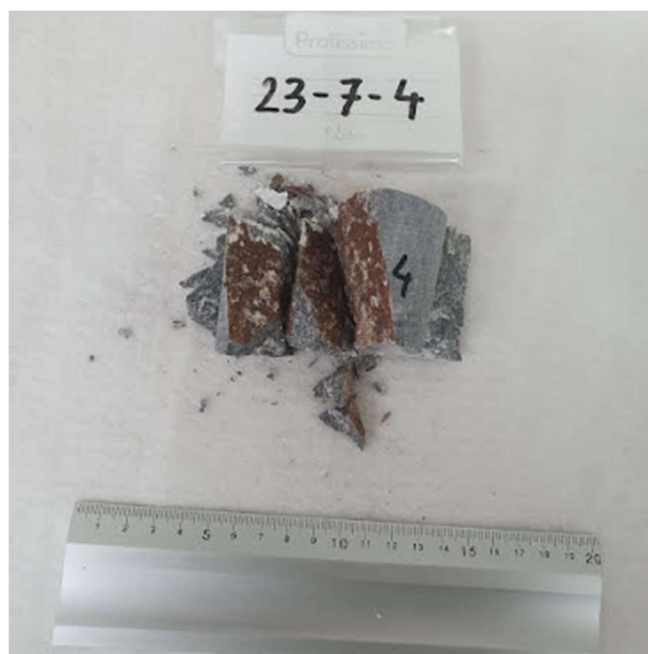
Slika 4-2. Prikaz uzorka 23-7-2 nakon sloma

Uzorku 23-7-3 utvrđena je gustoća od  $2709,446 \text{ kg/m}^3$  i jednoosna tlačna čvrstoća  $80,917 \text{ MPa}$ , a sila pri kojoj se dogodio slom je iznosila  $156,9 \text{ kN}$ . Izgled uzorka poslije sloma je prikazan na slici 4-3.



**Slika 4-3.** Prikaz uzorka 23-7-3 nakon sloma

Uzorku 23-7-4 utvrđena je gustoća od  $2751,418 \text{ kg/m}^3$  i jednoosna tlačna čvrstoća  $43,785 \text{ MPa}$ , a sila pri kojoj se dogodio slom je iznosila  $84,9 \text{ kN}$ . Izgled uzorka poslije sloma je prikazan na slici 4-4.



**Slika 4-4.** Prikaz uzorka 23-7-4 nakon sloma

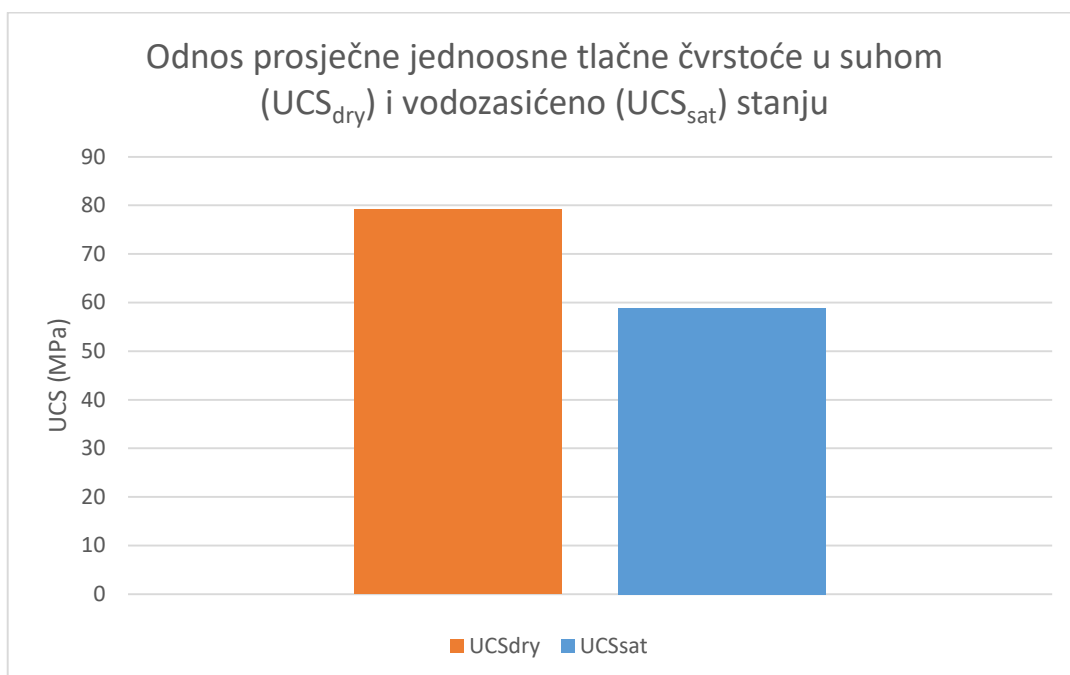
## 4.2. Analiza rezultata

Prema prijašnjim istraživanjima koja su obavljena za izradu Glavnog rudarskog projekta (Mesec i sur., 1986.) kamen iz ležišta Vukov Dol je klasificiran kao mramor i utvrđena mu je tlačna čvrstoća u suhom stanju od 172 MPa, a u vodom zasićenom stanju 134 MPa.

Rezultati novih ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće koja su obavljena u svrhu izrade ovog diplomskog rada prikazani su u tablici 4-1.

**Tablica 4-1.** Jednoosna tlačna čvrstoća u suhom ( $UCS_{dry}$ ) i vodozasićenom ( $UCS_{sat}$ ) stanju

| Oznaka uzorka      | $UCS_{dry}$ (MPa) | Oznaka uzorka      | $UCS_{sat}$ (MPa) |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 23-7-1             | 77,408            | 23-7-2             | 74,006            |
| 23-7-3             | 80,917            | 23-7-4             | 43,785            |
| Srednja vrijednost | 79.1625           | Srednja vrijednost | 58.896            |



**Slika 4-5.** Odnos prosječne jednoosne tlačne čvrstoće u suhom ( $UCS_{dry}$ ) i vodozasićenom ( $UCS_{sat}$ ) stanju

Usporedba rezultata iz prijašnjih i novijih ispitivanja prikazana je u tablici 4-2 te se na osnovu nje mogu odrediti intervali čvrstoće u suhom i zasićenom stanju. Vrijednosti iz Glavnog rudarskog projekta su gornja granica intervala, a novija ispitivanja predstavljaju

donju granicu intervala u kojem se kreću vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće za mramor iz bivšeg kamenoloma Vukov Dol.

**Tablica 4-2.** Jednoosna tlačna čvrstoća u suhom ( $UCS_{dry}$ ) i vodozasićenom ( $UCS_{sat}$ ) stanju

|                         | $UCS_{dry}$ (MPa) | $UCS_{sat}$ (MPa) | saturirano/suho |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Glavni rudarski projekt | 172               | 134               | 0,779           |
| Novo ispitivanje        | 79,1625           | 58,896            | 0,744           |

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu pregleda literature i analize provedenih ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na mramornom stijenskom materijalu sa bivšeg kamenoloma Vukov Dol izvedeni su slijedeći zaključci.

U literaturi se najčešće ne prikazuju rasponi vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće u suhom i zasićenom stanju. No kod ležišta koja imaju složeni nastanak i tektonski su dosta poremećena poput Vukovog Dola nužno je utvrđivati baš raspone vrijednosti čvrstoće kako bi se što realnije utvrdio utjecaj saturiranosti na stijenski materijal u ležištu.

Istraživanjima koja su obavljena u svrhu izrade Glavnog rudarskog projekta na ležištu Vukov Dol utvrđena je jednoosna tlačna čvrstoća u suhom stanju od 172 MPa, a u vodom zasićenom stanju 134 MPa. Ove vrijednosti se smatraju gornjim granicama intervala u kojima se jednoosna tlačna čvrstoća kreće.

Istraživanjima koja su obavljena u svrhu izrade ovog rada utvrđena je jednoosna tlačna čvrstoća u suhom stanju od 79,1625 MPa, a u vodom zasićenom stanju 58,896 MPa. Ove vrijednosti se smatraju donjim granicama intervala u kojima se jednoosna tlačna čvrstoća kreće.

Omjer jednoosne tlačne čvrstoće u saturiranom i suhom stanju kreće se od 0,744 do 0,779.

Razlog zašto je novijim ispitivanjem utvrđena niža jednoosna tlačna čvrstoća u suhom i saturiranom stanju jest to što je ležište zapravo iscrpljeno i više se ne eksploatira pa su u njemu preostali samo slabiji materijali.



## 6. LITERATURA

Anwar, HZ., Shimada, H., Ichinose, M., Matsui, K., 1998. *Deterioration of mechanical properties of coal measure rocks due to water*. In: Mine planning and equipment selection. Balkema, Rotterdam

ASTM, 2001. *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. Annual book of ASTM standards, str. 6

Bell, FG., 1978. *The physical and mechanical properties of the fellsandstones, Northumberland, England*. Eng Geol 12, str. 1–29

Borrelli, E., 1999. *ARC laboratory handbook: porosity, vol 2*. ICCROM, Rome, str. 12–13

Briševac, Z., Maričić, A., Kujundžić, T., Hrženjak, P., 2023. *Saturation Influence on Reduction of Compressive Strength for Carbonate Dimension Stone in Croatia*. University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, str. 1-10

Burshtein, LS., 1969. *Effect of moisture on the strength and deformability of sandstone*. Sov Min 5(5), str. 573–576

Celik, M., Akbulut, H., Ergul, A., 2013. *Water absorption process effect on strength of Ayazini tuff, such as the uniaxial compressive strength (UCS), flexural strength and freeze and thaw effect*. Environ Earth Sci, str. 1–13

Colback, PSB., Wiid, BL., 1965. *The influence of moisture content on the compressive strength*. In: Proceedings of the 3rd Canadian symposium on rock mechanics. University of Toronto

Cooke, R., 1979. *Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments*. Earth Surf Process 4(4), str. 347–359

Dube, AK., Singh, B. 1972. *Effect of humidity on tensile strength of sandstone*. J Mines Metals Fuels 20(1), str. 8–10

Dyke, CG., Dobereiner, L., 1991. *Evaluating the strength and deformability of sandstones*. Q J Eng Geol Hydrogeol 24(1), str. 123–134

Đurđanović, Ž., 1973. *O paleozoiku i trijasu Medvednice (Zagrebačke gore) i područja Dvora na Uni na temelju konodonta*. Geološki vjesnik 25, str. 29.

Erguler, ZA., Ulusay, R., 2009. *Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks*. Int J Rock Mech Min Sci 46(2), str. 355–370

Ewy, R., 2014. *Shale swelling/shrinkage and water content change due to imposed suction and due to direct brine contact*. Acta Geotech 9(5), str. 869–886

- Gajić, V., Matović, V., Vasić, N., Srećković-Batoćanin, D., 2011. *Petrophysical and mechanical properties of the Struganik limestone (Vardar Zone, western Serbia)*. Geološki anali Balkanskoga poluostrva 72, str. 87–100
- Gholami, R., Rasouli, V., 2013. *Mechanical and elastic properties of transversely isotropic slate*. Rock Mech Rock Eng, str. 1–11
- Grgic, D., Giot, R., Homand, F., Giraud, A., 2005. *Effect of suction on the mechanical behaviour of iron ore rock*. Int J Numer Anal Methods Geomech 29(8), str. 789–827
- Gutierrez, M., Øino, L.E., Høeg, K., 2000. *The effect of fluid content on the mechanical behaviour of fractures in chalk*. Rock Mech Rock Eng 33(2), str. 93–117
- Hadizadeh, J., Law, R.D., 1991. *Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 28(5), str. 431–439
- Hu, D., Zhang, F., Shao, J., 2014. *Experimental study of poromechanical behavior of saturated claystone under triaxial compression*. Acta Geotech 9(2), str. 207–214
- Huang, S., Xia, K., Yan, F., Feng, X., 2010. *An experimental study of the rate dependence of tensile strength softening of Longyou sandstone*. Rock Mech Rock Eng 43(6), str. 677–683
- Jiang, Q., Cui, J., Feng, X., Jiang, Y., 2014. *Application of computerized tomographic scanning to the study of water-induced weakening of mudstone*. Bull Eng Geol Environ 73(4), str. 1293–1301
- Jumikis, A.R., 1966. *Some engineering aspects of Brunswick shale*. In: 1st congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon
- Karakul, H., Ulusay, R., 2013. *Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation*. Rock Mech Rock Eng 46(5), str. 981–999
- Kessler, D., Insley, H., Sligh, W., 1940. *Physical, mineralogical and durability studies on the building and monumental granites of the United States*. J Res Natl Bur Stand 24, str. 161–206
- Kochansky-Devide, V., 1981. *Karbonski Stromatoporoidea i Bryozoa kod Markuševca (Medvednica)*. Geološki vjesnik 34, Geološko-paleontološki zavod Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, str. 15
- Lashkaripour, G.R., Ajalloeian, R., 2000. *The effect of water content on the mechanical behaviour of fine-grained sedimentary rocks*. str. 13.

- Lin, ML., Jeng, FS., Tsai, LS., Huang, TH., 2005. *Wetting weakening of tertiary sandstones—microscopic mechanism*. Environ Geol 48(2), str. 265–275
- Lou, W., 1994. *Dynamic fracture behavoiur of dry and waterlogged granites*. Explosion and shock waves 14(3), str. 6
- Mann, R., Fatt, I., 1960. *Effect of pore fluids on the elastic properties of sandstone*. Geophysics 25(2), str. 433–444
- Mesec, J., Crnković, B., Krsnik, J., Prokopović, P., Žunec, I., 1986 *Glavni rudarski projekt eksploatacije mramora u kamenolomu “Vukov Dol” kod Kašine*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, OOUR Viša geotehnička škola, Varaždin, str. 2-8
- Obert, L., Duvall, WI., Windes, SL., 1946. *Standardised tests for determining the physical properties of mine rocks. Report of Investigations* (United States. Bureau of Mines). Vol. 3891. U.S. Bureau of Mines, Washington, str. 67
- Ogata, YJ., Wada, Y., Jung, W., Seto, M., Katsuyama, K., Ogawa, T., 2001. *Effects of water saturation and strain rate on the tensile strength of rocks under dynamic load*. Proc Jpn Soc Civil Eng 673, str. 53–59
- Ojo, O., Brook, N., 1990. *The effect of moisture on some mechanical properties of rock*. Min Sci Technol 10(2), str. 145–156
- Parate, NS., 1973. *Influence of water on the strength of limestone*. AIME Transactions, Vol 254. AIME
- Price, NJ., 1960. *The compressive strength of coal measure rocks*. Colliery Eng 37(437), str. 283–292
- Rajabzadeh, MA., Moosavinasab, Z., Rakhshandehroo, G., 2012. *Effects of rock classes and porosity on the relation between uniaxial compressive strength and some rock properties for carbonate rocks*. Rock Mech Rock Eng 45(1), str. 113–122
- Romana, M., Vasarhely, B., 2007. *A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples*. In: Proceedings of 11th ISRM congress, Lisboa, “The second half century of rock mechanics”, str. 139–142
- Ruiz, MD., 1966. *Some technological of twenty-six characteristics Brazilian rock types*. Proceedings of the 1st congress of the International Society of Rock Mechanics. Lisbon
- Shakoor, A., Barefield, EH., 2009. *Relationship between unconfined compressive strength and degree of saturation for selected sandstones*. Environ Eng Geosci 15(1), str. 29–40

Siegesmund, S., Snethlage, R., 2010. *Stone in architecture: properties, durability, 4th edn.* Springer, Berlin

Silva, RM., Schroeder, C., Verbrugge, J-C., 2008. *Unsaturated rock mechanics applied to a low-porosity shale.* Eng Geol 97(1–2), str. 42–52

Sun, W., Chen, Q., Ostien, J., 2014. *Modeling the hydro-mechanical responses of strip and circular punch loadings on water-saturated collapsible geomaterials.* Acta Geotech 9(5). str. 903–934

Torok, A., Vasarhelyi, B., 2010. *The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary.* Eng Geol 115(3–4), str. 237–245

Van Eeckhout, EM., 1976. *The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales.* Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 13(2), str. 61–67

Van Eeckhout, EM., Peng, SS., 1975. *The effect of humidity on the compliances of coal mine shales.* Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 12(11), str. 335–340

Vasarhelyi, B., 2005. *Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the miocene limestone.* Rock Mech Rock Eng 38(1), str. 69–76

Verstryngge, E., Adriaens, R., Elsen, J., Van Balen, K., 2014. *Multiscale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone.* Constr Build Mater 54, str. 78–90

Wang, B., Li, X., Yin, T., Ma, C., Yin, Z., Li, Z., 2010. *Split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments on dynamic strength of water-saturated sandstone.* Chin J Rock Mech Eng 29(5), str.7

White, JM., Mazurkiewicz, M., 1989. *Effect of moisture content on mechanical properties of Nemo coal, Moberly, Missouri U.S.A.* Min Sci Technol 9(2), str. 181–185

Wong, L., Jong, M., 2013. *Water saturation effects on the brazilian tensile strength of gypsum and assessment of cracking processes using high-speed video.* Rock Mech Rock Eng, str. 1–13

Wong, LNY., Maruvanchery, V., Liu., G., 2016. *Water effects on rock strength and stiffness degradation.* Acta Geotechnica, str. 713-737

Yilmaz, I., 2010. *Influence of water content on the strength and deformability of gypsum.* Int J Rock Mech Min Sci 47(2), str. 342–347

Zhang, X-P., Wong, LNY., Wang, S-J., Han, G-Y., 2011. *Engineering properties of quartz mica schist.* Eng Geol 121(3–4), str. 135–149