

# Određivanje gustoće, poroznosti i sadržaja vode prema metodama ISRM-a

---

Olivani, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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:169:708919>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**ODREĐIVANJE GUSTOĆE, POROZNOSTI I SADRŽAJA VODE PREMA  
METODAMA ISRM-A**

Završni rad

Josip Olivani

R4174

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/84  
URBROJ: 251-70-03-20-2  
U Zagrebu, 17.09.2020.

**Josip Olivani, student**

## **RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME**

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/84, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 24.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

### **ODREĐIVANJE GUSTOĆE, POROZNOSTI I SADRŽAJA VODE PREMA METODAMA ISRM-a**

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu doc. dr. sc. Zlatko Briševac, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**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)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

## **ODREĐIVANJE GUSTOĆE, POROZNOSTI I SADRŽAJA VODE PREMA METODAMA ISRM-A**

Josip Olivani

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

### Sažetak

Određivanje gustoće, poroznosti i sadržaja vode ovisi o svojstvima intaktnog stijenskog materijala, a zbog velike oscilacije svojstava materijala nemoguća je primjena jedne metode u svim slučajevima. ISRM je u svojim preporukama nastojao predložiti dovoljno metoda koje bi mogle biti prikladne za sve vrste problema s kojima se može susresti pri određivanju gustoće, poroznosti i sadržaja vode. Rad se bavi opisom tih predloženih metoda i usporedbom vrijednosti gustoće i poroznosti koje su dobivene različitim metodama. Također, izrađene su jednadžbe međuovisnosti za stijenski materijal načinjen od pješčenjaka.

Ključne riječi: ISRM; gustoća; poroznost; sadržaj vode

Završni rad sadrži: 24 stranice, 2 tablica, 12 slika i 5 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Zlatko Briševac, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Zlatko Briševac, docent RGNF  
Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Ana Maričić, docent RGNF

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PREDLOŽENE METODE ZA ODREĐIVANJE SADRŽAJ VODE, POROZNOST, GUSTOĆE, APSORPCIJE I S NJIMA POVEZANIH SVOJSTAVA .....	2
2.1. Metoda za određivanje sadržaja vode uzoraka stijenskog materijala .....	2
2.2. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću saturacije i pomičnog mjerila	3
2.3. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću saturacije i uzgona.....	5
2.4. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću žive i specifične težine .....	8
2.5. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću žive i Boylovog zakona.....	10
2.6. Metoda za određivanje indeksa pora pomoću brzog upijanja.....	13
3. ANALIZA PRIKUPLJENIH PODATKA .....	15
4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK .....	22
5. LITERATURA .....	24

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Sušionik za sušenje uzoraka (Briševac, 2012).....	2
Slika 2-2 Oprema za saturaciju (Briševac, 2012).....	4
Slika 2-3 Vaga za mjerenje uronjene mase (Briševac, 2012).....	6
Slika 2-4 Eksikator (Hrženjak i Briševac, 2009).....	8
Slika 2-5 Kobe Boyleov porozimetar (Franklin, 1979).....	11
Slika 3-1 Dijagram usporednih vrijednosti gustoće .....	16
Slika 3-2 Dijagram međuovisnosti gustoće određene saturacijom i pomičnim mjerilom sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom .....	16
Slika 3-3 Dijagram međuovisnosti gustoće određene pomakom žive i specifične težine sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom .....	17
Slika 3-4 Dijagram međuovisnosti gustoće određene pomakom žive i Boylevim zakonom sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom .....	18
Slika 3-5 Dijagram usporednih vrijednosti poroznosti.....	19
Slika 3-6 Dijagram međuovisnosti poroznosti određene pomakom žive i specifične težine sa poroznošću određenom saturacijom i uzgonom .....	20
Slika 3-7 Dijagram međuovisnosti poroznosti određene pomakom žive i Boylevim zakonom sa poroznosti određene saturacijom i uzgonom.....	20

## POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Tablica rezultata određivanja gustoće .....	15
Tablica 3-2 Tablica rezultata određivanja poroznosti .....	18

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\rho_s$	$\text{kg/m}^3$	gustoća čvrstih čestica
$\rho_d$	$\text{kg/m}^3$	gustoća u suhom stanju
$n$	%	poroznost
$w$	%	sadržaj vode
$V_v$	$\text{m}^3$	volumen pora
$M_{\text{sat}}$	kg	saturirana masa
$M_s$	kg	masa čvrstih čestica
$\rho_w$	$\text{kg/m}^3$	gustoća vode
$V$	$\text{m}^3$	ukupni volumen
$M_{\text{sub}}$	kg	masa saturiranog i uronjenog uzorka
$\rho_w$	$\text{kg/m}^3$	gustoća vode
$V_f$	$\text{cm}^3$	volumen tikvice
$C_f$	$\text{kg/m}^3$	faktor kompresije
$I_v$	%	indeks pora
$B_v$	$\text{m}^3$	ukupni volumen
$G$	$\text{m}^3$	volumen čestica

## 1. UVOD

U sklopu rada naglasak je bio na opisivanje metode za određivanje gustoće, poroznosti i sadržaja vode prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (eng. International Society for Rock Mechanics ISRM). Takva ispitivanja ovise o svojstvima intaktnog stijenskog materijala, a zbog velike oscilacije svojstava nemoguća je primjena jedne metode za sve vrste stijena. U svrhu izrade rada prikupljeni su dostupni rezultati ispitivanja gustoće i poroznosti koji su dobiveni različitim metodama. Rezultati su uspoređeni te su utvrđene njihove međuovisnosti. ISRM je osnovan u Salzburgu 1962. godine. Osnutak se može ponajprije zahvaliti Leopoldu Mulleru koji je ujedno bio i predsjednik organizacije do 1966. ISRM je neprofitna organizacija kojoj je glavni cilj poticati međunarodnu suradnju i razmjenu ideja i informacija između ljudi koji se bave mehanikom stijena te potaknuti podučavanje, istraživanje i unapređivanje znanja iz mehanike stijena. Cilj je promovirati visoke standarde profesionalne prakse iz mehanike stijena među inženjerima kako bi se građevinski, rudarski i naftni radovi mogli obavljati sigurnije, ekonomičnije i manje štetno za okoliš (ISRM, 2020).

ISRM je u svojim preporukama nastojao predložiti dovoljno metoda koje bi mogle biti prikladne za sve vrste problema s kojima se može susresti pri određivanju gustoće, poroznosti i sadržaja vode. Prikaz tih preporuka koristit će svima koji se stručno bave ovakvim ispitivanjima.

Pješčenjaci i karbonatne stijene imaju osobito širok raspon poroznosti, a otuda i ostalih mehaničkih karakteristika, dok magmatske stijene imaju obično velike poroznosti ako su oslabljene vremenskim trošenjem (Franklin, 1979). U radu su analizirani rezultati ispitivanja poroznosti i gustoće pješčenjaka koji su dobiveni preporučenim metodama ispitivanja. Pri tome su uspostavljene jednadžbe međuovisnosti rezultata ispitivanja pomoću kojih se u ograničenim uvjetima može procijeniti tražene vrijednosti ispitivanja.



## 2. PREDLOŽENE METODE ZA ODREĐIVANJE SADRŽAJ VODE, POROZNOST, GUSTOĆE, APSORPCIJE I S NJIMA POVEZANIH SVOJSTAVA

Generalno gledano, pri određivanju gustoće i poroznosti koristi se saturacija pomoću vode i viša temperatura za istiskivanje vode iz uzorka. Međutim stijenski materijal različito reagira s vodom te neke stijene pri tome mijenjaju volumen, tj. bubre, a neke ne. Isto tako, neke stijene se uslijed povećanja temperature raspadaju, a neke su postojane. Pored toga, neki stijenski materijal može se strojno obraditi u pravilne uzorke, a neki ne može. Sve je to uvjetovalo razvoj većeg broja metoda za ispitivanje gustoće i poroznosti jer se jednim načinom ne bi mogle ispitati sve varijacije stijenskog materijala. ISRM je razvio nekoliko metoda za takva ispitivanja te će one biti opisane u narednim potpoglavljima.

### 2.1. Metoda za određivanje sadržaja vode uzoraka stijenskog materijala

Metoda je namijenjena mjerenju vode sadržane u uzorku stijene. Sadržaj vode izražava se u postocima. Ova metoda koristi se samo kod čvrstih koherentnih uzoraka pravilne geometrije koji pri sušenju ili potapanju u vodi značajno ne bubre i ne raspadaju se.

Od opreme se koristi sušionik (slika 2-1), spremnik za uzorke, eksikator i vaga. Sušionik mora moći održavati temperaturu od 105 °C i pri tome je najveće dopušteno odstupanje od 3 °C u periodu od 24 sata. Spremnik za uzorke mora biti od nekorodirajućeg materijala te imati nepropusni poklopac. Koristi se eksikator koji može primiti uzorke koji se suše tijekom hlađenja i vaga odgovarajućeg kapaciteta koja može vagati s točnošću od 0,01% mase uzorka.



Slika 2-1 Sušionik za sušenje uzoraka (Briševac, 2012)

Za određivanje sadržaja vode koristi se 10 uzoraka, minimalne dimenzije svakog uzorka moraju biti takve da najmanja masa uzorka bude 50 g ili takve da najmanja dimenzija bude najmanje deset puta veća od dimenzije najvećeg zrna u uzorku. Spremnik s poklopcem se čisti i suši te se određuje njegova masa „A”. Uzorak se stavi u spremnik, zamijeni se poklopac i odredi se masa „B” uzorka sa spremnikom. Zatim se uklanja poklopac, a uzorak se ostavlja na sušenju do konstantne mase na temperaturi od 105 ° C. Nakon sušenja se vraća poklopac i hladi uzorak u eksikatoru 30 min te se određuje masa C uzorka i spremnika. Za proračun sadržaja vode koristi se izraz (2-1):

$$w = \frac{B-C}{C-A} \cdot 100, \quad (2-1)$$

gdje su:  $w$ -vlažnost (%),

$B$ - masa uzorka sa posudom i poklopcem (kg),

$C$ - masa posude i osušenog uzorka (kg),

$A$ - masa posude (kg).

U izvještaju o ispitivanju mora se navesti sadržaj vode određen s točnošću od 0,1 % i s naznakom odgovara li ta vrijednost udjelu vode na terenu.

## 2.2. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću saturacije i pomičnog mjerila

Ovo ispitivanje namijenjeno je mjerenju poroznosti, gustoće u suhom stanju i srodnih svojstava uzorka pravilne geometrije. Metoda se koristi samo kod čvrstih koherentnih, strojno obradivih uzoraka stijena pravilne geometrije koji pri sušenju ili potapanju u vodi značajno ne bubre i ne raspadaju se. Metoda je naročito pogodna kod pravilnih uzoraka na kojima se provode i druge metode ispitivanja (Hrženjak i Briševac, 2009).

Potrebni uređaji za provedbu ispitivanja su sušionik koji ima mogućnost da najmanje 24 sata održava temperaturu od 105°C s dopuštenim odstupanjem od 3°C, eksikator u kojem se uzorci čuvaju da ostanu suhi tijekom hlađenja, pomično mjerilo za određivanje dimenzija uzoraka s mogućnošću očitavanja vrijednosti od 0,1 mm. Također, koristi se i oprema za saturaciju (slika 2-2) koja omogućava da uzorci barem jedan sat budu potopljeni u vodi pri tlaku manjim od 800 Paskala te vaga odgovarajućeg kapaciteta kojom se masa uzorka može odrediti s točnošću od 0.01% mase uzorka.



**Slika 2-2** Oprema za saturaciju (Briševac, 2012)

Za ovo određivanje potrebna su najmanje tri reprezentativna uzorka stijene koji se mogu strojno obraditi tako da zadovoljavaju geometriju pravilnoga valjka ili prizme. Minimalne dimenzije svakog uzorka moraju biti takve da masa uzorka bude ili najmanje 50 g ili takve da najmanja dimenzija bude najmanje deset puta veća od dimenzije najvećeg zrna. Prvo se na temelju nekoliko mjerenja pomičnim mjerilom (s točnošću od 0,1 mm) određuju prosječne vrijednosti dimenzija iz kojih se računa obujam uzorka „ $V$ ”. Uzorak se zatim važe na temelju čega se dobije ukupna masa „ $M$ ”. Uzorak se suši minimalno 24 sata na temperaturi od 105 °C. Prije svakog vaganja uzorak je potrebno ostaviti 30 min u eksikatoru da se ohladi. Vaganjem se određuje masa čvrstih čestica „ $M_s$ ”. Ovdje valja naglasiti da ako su uzorci dovoljno postojani, ne zahtijevaju uporabu posuda u koje se smještaju uzorci. Posude se koriste ako je materijal malo trošan ili se raspada. Uzorak se nakon vaganja saturira najmanje 1 sat potapanjem u vodi pri tlaku ne većem od 800 Pa (6 tora) uz periodično protresanje kako bi se oslobodio zarobljeni zrak unutar uzorka. Nakon toga uzorak se vadi iz vode, njegove površine se obrišu vlažnom krpom pri čemu se mora voditi briga da se odstrani samo površinska voda i u isto vrijeme osigura kompaktnost uzorka. Zatim se vaganjem određuje saturirana masa uzorka „ $M_{sat}$ ” (Hrženjak i Briševac, 2009).

Proračuni veličina se obavljaju izrazima od 2-2 do 2-4:

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w}, \quad (2-2)$$

gdje su:  $V_v$  - volumen pora ( $m^3$ )

$M_{sat}$  - saturirana masa (kg),

$M_s$  - masa čvrstih čestica (kg),

$\rho_w$  - gustoća vode ( $kg/m^3$ ).

$$n = \frac{100 \cdot V_v}{V}, \quad (2-3)$$

gdje su: n- poroznost (%),  
 V- ukupni volumen (m<sup>3</sup>),  
 V<sub>v</sub>- volumen pora (m<sup>3</sup>).

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}, \quad (2-4)$$

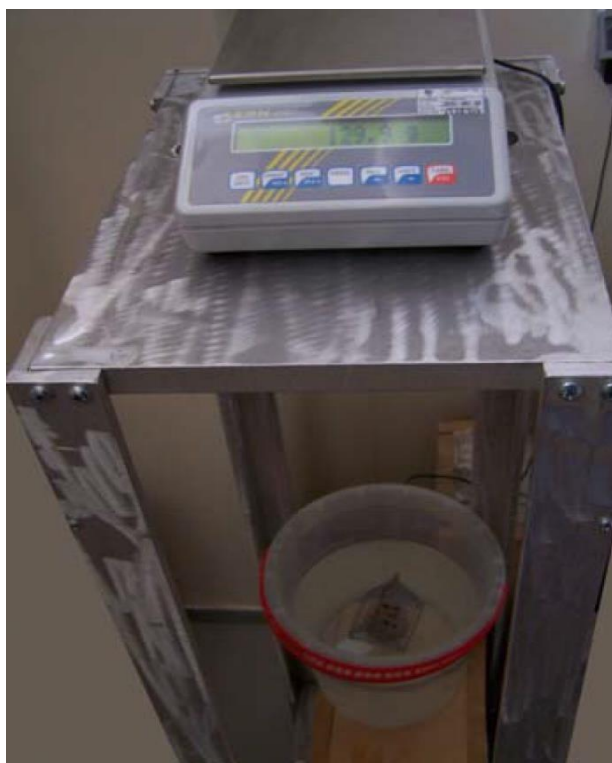
gdje su: ρ<sub>d</sub>- gustoća u suhom stanju (kg/m<sup>3</sup>),  
 M<sub>s</sub>- masa čvrstih čestica (kg),  
 V- ukupni volumen (m<sup>3</sup>)

U izvještaju o ispitivanju osim standardnih podataka o uzorku (lokacija, podaci o uzorkovanju, vrsta materijala i slično) mora biti svakako naznačeno da je ukupni volumen uzorka određen pomičnim mjerilom, a volumen pora saturacijom u vodi. Rezultate mjerenja potrebno je prikazati pojedinačno za svaki ispitivani uzorak, a prosječnu vrijednost za materijal treba izračunati na temelju najmanje tri ispitana uzorka. Vrijednosti gustoće potrebno je odrediti do najbliže vrijednosti od 10 kg/m<sup>3</sup>, a poroznost do najbliže vrijednosti od 0,1 %. Isto tako udio vode potrebno je odrediti do najbliže vrijednosti od 0,1 % s naznakom odgovara li ta vrijednost udjelu vode na terenu.

### 2.3. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću saturacije i uzgona

Ova metoda namijenjena je mjerenju poroznosti, gustoće u suhom stanju i srodnih svojstava prvenstveno uzorka stijene koji su nepravilne geometrije, ali mogu biti i pravilnog oblika. Metoda se koristi samo za stijene koje ne bubre i ne raspadaju se kada se uranjaju u vodu.

Od opreme za provođenje ove metode potreban je sušionik koji može održavati konstantnu temperaturu od 105 °C od najmanje 24 sata, a dozvoljeno odstupanje od temperaturene vrijednosti je 3° C. Spremnik za uzorke od nekorodirajućeg materijala, uključujući poklopac koji ne propušta zrak. Eksikator za držanje uzorka suhima tijekom hlađenja. Oprema za stvaranje podtlaka, tako da uzorak najmanje 1 sata može biti uronjen u vodu pod vakuumom manjim od 800 Pa (6 torr). Vaga (slika 2-3) odgovarajućeg kapaciteta koja može odrediti masu uzorka s točnošću od 0,1%.



Slika 2-3 Vaga za mjerenje uronjene mase (Briševac, 2012)

Reprezentativni uzorak sadrži najmanje 10 komada pravilne ili nepravilne geometrije od kojih svaki ima masu od najmanje 50 g ili minimalnu dimenziju od najmanje 10 puta veću od veličine zrna stijenskog materijala (ovisno o tome koji je uvjet veći). Uzorak se prvo ispere vodom poradi uklanjanja prašine, a zatim se najmanje jedan sat saturira u vodi pri vakuumu manjem od 800 Pa (6 torr) uz povremeno protresanje radi uklanjanja zarobljenog zraka. Uzorak se zatim prebacuje unutar košarice koja je smještena u kadi za uranjanje te se određuje njegova saturirana uronjena masa „ $M_{sub}$ “ pri tome ta masa ne smije sadržavati masu same košarice.

U međuvremenu se spremnik s poklopcem čisti i suši te se određuje njegova masa „ $A$ “. Uzorak se uklanja iz košarice u kadi za uranjanje i površinski se obriše vlažnom krpom, pazeći da se ukloni samo površinska voda, a da se pri tome ne izgube fragmenti kamena. Zatim se uzorak prebacuje u spremnik i vaganjem se određuje masa „ $B$ “ koja predstavlja masu saturiranog uzorka plus spremnik koji na sebi mora imati poklopac. Nakon toga poklopac spremnika se ukloni, a uzorak se stavlja u sušionik te se suši do konstantne mase na temperaturi od 105 °C. Poslije postizanja konstantne mase poklopac se vrati na spremnik i sve se ostavi 30 minuta da se hladi u eksikatoru. Iza toga mjeri se masa osušenog uzorka i spremnika, a ta se masa označava s „ $C$ “.

Proračun potrebnih veličina se obavlja prema izrazima od 2-5 do 2-10.

$$M_{sat} = B - A, \quad (2-5)$$

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

$$M_s = C - A, \quad (2-6)$$

gdje su:  $M_s$  - masa čvrstih čestica (kg),  
 $C$  - masa osušenog uzorka i spremnika (kg),  
 $A$  - masa samog spremnika za uzorke (kg).

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w}, \quad (2-7)$$

gdje su:  $V$  - ukupni volumen ( $m^3$ )  
 $M_{sat}$  - saturirana masa (kg),  
 $M_{sub}$  - masa saturiranog i uronjenog uzorka (kg),  
 $\rho_w$  - gustoća vode ( $kg/m^3$ ).

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w}, \quad (2-8)$$

gdje su:  $V_v$  - volumen pora ( $m^3$ )  
 $M_{sat}$  - saturirana masa (kg),  
 $M_s$  - masa čvrstih čestica (kg),  
 $\rho_w$  - gustoća vode ( $kg/m^3$ ).

$$n = \frac{100 V_v}{V}, \quad (2-9)$$

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

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}, \quad (2-10)$$

gdje su:  $\rho_d$  - suha gustoća stijene ( $kg/m^3$ ),  
 $M_s$  - masa čvrstih čestica (kg),  
 $V$  - ukupni volumen ( $m^3$ ).

Pri pisanju izvještaja kada se ispituje po ovoj metodi treba napisati vrijednosti poroznosti i suhe gustoće, a treba i navesti da je ukupni volumen određen tehnikom uzgona, a volumen pora dobiven saturacijom s vodom. Vrijednosti gustoće treba izraziti na približno  $10 \text{ kg/m}^3$ , a vrijednosti poroznosti na približno 0,1%.

#### 2.4. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću žive i specifične težine

Ova metoda namijenjena je mjerenju poroznosti, gustoće u suhom stanju i srodnih svojstava uzorka koji su nepravilne geometrije. Posebno je pogodna ako materijal pri uranjanju u vodu nabubri ili se raspadne. Metoda se može koristiti i kada su uzorci pravilne geometrije i ne bubre. Od opreme koristi se sušionik koji održava temperaturu od  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  u periodu od 24 sata, spremnik za uzorke koji je od nekorozivnog materijala i s poklopcem koji ne propušta zrak, eksikator (slika 2-4), tj. posudu za čuvanje uzorka tijekom hlađenja, vagu točnosti 0,001 g, aparat za mjerenje volumena pomoću pomaka žive koji je sposoban mjeriti volumen do (0,5%), tarionik za usitnjavanje uzorka, volumnu tikvicu, vodenu kupelj sa stalnom temperaturom, vakuum opremu koja stvara podtlak od 800 Pa i meku četku.



**Slika 2-4** Eksikator (Hrženjak i Briševac, 2009)

Za ispitivanje se uzima reprezentativni uzorak koji sadrži najmanje deset komadića stijene. Oblik i veličina komada moraju odgovarati gabaritima i mogućnostima aparata za

mjerenje volumena na bazi pomaka žive. Svaki uzorak težine približno 50 grama se očetka radi uklanjanja rastresitog materijala te se volumen mjeri živinim pomakom.

Spremnik za uzorak se očisti, a potom mu se određuje masa koju označavamo s „A“, a masa predstavlja masu posude s poklopcem. Uzorak se stavlja u spremnik. Uzorak materijala u određenom postotku sadrži vodu te se vaganjem mjeri masa koja se označava „B“, a ona predstavlja masu uzorka sa posudom i poklopcem. Poklopac se skida, a uzorak se zatim suši do konstantne mase pri temperaturi od 105 ° C. Nakon toga se poklopcem zatvara spremnik i ostavlja se 30 min na hlađenju. Nakon 30 minuta mjeri se masa posude i osušenog uzorka koju nazivamo masa „C“.

Cijeli gore navedeni postupak ponavlja se za svaki od uzoraka, a zatim se svaki uzorak drobi i tare u tarioniku dok se ne pretvori u prah čija veličina zrna ne prelazi 150 μm. Od tako pripremljenog praha uzima se 15 grama uzorka za daljnja ispitivanja.

Određuje se masa čiste i suhe tikvice s čepom „D“. Tikvica se zatim puni s tekućinom koja ne reagira sa stijenom (takav je toluen). Razina tekućine podešava se na 50 cm<sup>3</sup> i sve se zagrije na konstantnu temperaturu vodene kupelji. Nakon toga se tikvica izvadi iz vodene kupelji začepi i odredi se masa „E“.

Poslije vaganja tikvica se prazni i osuši, a u nju se dodaje 15 g usitnjenog uzorka u prah te se mjeri masa „F“. Nakon približno 20 min dodaje se pažljivo tekućina kojom se vlaži uzorak te potpuno istiskuje zrak. Tikvica se pažljivo ispunjuje tekućinom do 50 cm<sup>3</sup> i stavlja u vodenu kupelj koja ima konstantnu temperaturu. Nakon kupelji tikvici s uzorkom se hladi i određuje se masa „G“.

Za proračun sadržaja vode koristi se izraz (2-1) koji je naveden i opisan u poglavlju 2.1. Metoda za određivanje sadržaja vode uzorka stijenskog materijala, a za proračun ostalih značajki koriste se izrazi od 2-11 do 2-14

$$\rho_s = \frac{F - D}{V_f \cdot \left(1 - \frac{G - F}{E - D}\right)} \quad (2-11)$$

gdje su:  $\rho_s$ - gustoća čvrstih čestica (kg/m<sup>3</sup>),

$V_f$ - volumen kalibrirane tikvice koji je uobičajeno 50 (cm<sup>3</sup>)

$D$ - masa tikvice s čepom(kg),

$E$ - masa tikvice ispunjene tekućinom (kg),

$F$ - masa tikvice i praškastog uzorka stijene (kg),

$G$ - masa tikvice, tekućine i uzorka (kg).



$$M_s = C - A, \quad (2-12)$$

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

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}, \quad (2-13)$$

gdje su:  $\rho_d$  - gustoća u suhom stanju ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $M_s$  - masa čvrstih čestica (kg),  
 $V$  - ukupni volumen ( $\text{m}^3$ ).

$$n = \frac{100 \cdot (\rho_s - \rho_d)}{\rho_s}, \quad (2-14)$$

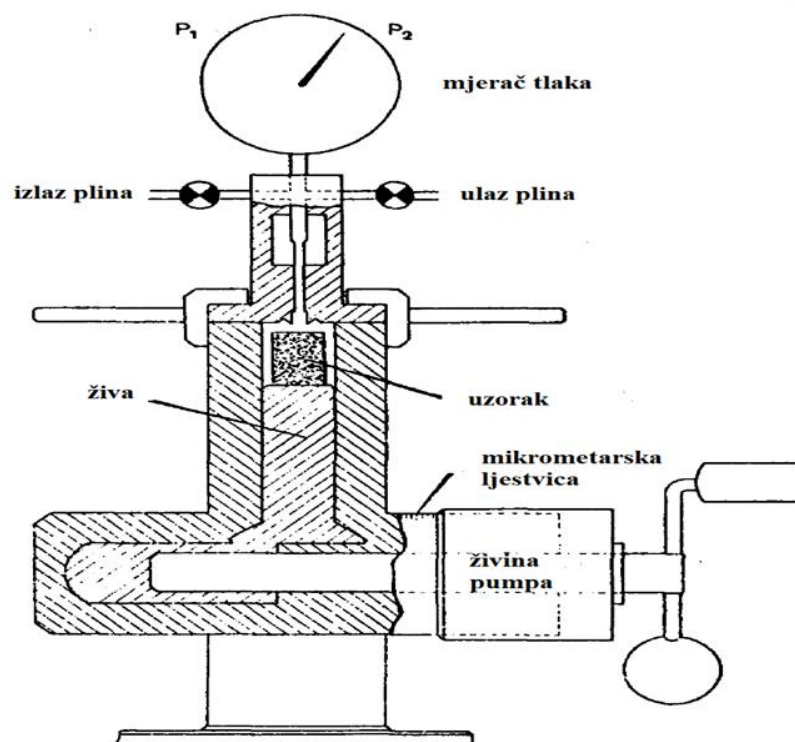
gdje su:  $n$  - poroznost (%),  
 $\rho_s$  - gustoća čvrstih čestica ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $\rho_d$  - gustoća u suhom stanju ( $\text{kg/m}^3$ ).

U izvještaju je potrebno navesti pojedinačne vrijednosti gustoće u suhom stanju za svaki uzorak kao i prosjek za materijal. Također, u izvještaju treba navesti da se ukupni volumen dobio uređajem koji radi na principu pomaka žive. Vrijednosti gustoće treba izraziti na približno  $10 \text{ kg/m}^3$ , a vrijednosti poroznosti na približno 0,1%.

## 2.5. Metoda za određivanje poroznosti i gustoće pomoću žive i Boylevog zakona

Ovaj test namijenjen je mjerenju poroznosti, gustoće u suhom stanju i srodnih svojstava uzorka stijene. Metoda se koristi za stijene koje se minimalno mijenjaju tijekom grijanja u sušioniku.

Oprema za provođenje ovog ispitivanja isto kao i u prošlim metodama uključuje sušionik, spremnik za uzorke od nekorodirajućeg materijala i eksikator. Osim toga, potrebna je i vaga odgovarajućeg kapaciteta koja može odrediti masu uzorka s točnošću od 0,01%. Karakteristično za ovu metodu je upotreba porozimetra. Može se koristiti Kobe Boyleov (slika 2-5) ili sličan uređaj.



Slika 2-5 Koba Boyleov porozimetar (Franklin, 1979).

Porozimetar sadrži živinu klipnu pumpu s mikrometrom za stupnjevito mjerenje volumena žive s točnošću od  $0,01 \text{ cm}^3$ , komoru za uzorke gdje se umeću uzorci, prozirno staklo s referentnom linijom ili električni indikator koji mjere razinu žive. Sadrži također i ventile za dovod i odvod plina te precizni manometar s rasponom od 100 kPa do oko 400 kPa koji služi za mjerenje tlaka plina u komori s uzorkom. Osim toga, treba imati izvor inertnog plina poput helija, a ako se koristi običan zrak, on mora biti primjereno suh.

Za ispitivanje ovom metodom potrebna su najmanje tri uzorka odabrana iz reprezentativnog uzorka materijala, a svaki uzorak se odvojeno testira kako bi se na kraju dobio prosječan rezultat za materijal. Veličina i oblik uzorka trebaju tijesno pasati u komoru za uzorke porozimetra kako bi se osigurali točni rezultati. Komora je obično cilindrična i prihvaća jezgru standardne veličine.

Spremnik s uzorkom i poklopac potrebno je osušiti te izvagati da bi se odredila masa „A”. Poklopac spremnika se ukloni, a uzorak osuši do konstantne mase na temperaturi od  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , poklopac se vrati i uzorak se ostavi na hlađenju 30 minuta u eksikator. Nakon toga mjeri se masa osušenog uzorka i spremnika i ta masa se bilježi oznakom „B”.

Očitanje živine pumpe porozimetra na početku svake kompresije ili ekspanzije naziva se početna točka. Uzorak se stavlja u komoru porozimetra koja je spojena s referentnom komorom. U mjernoj komori vlada atmosferski tlak, a volumeni obje komore su poznati.

Za određivanje faktora kompresije komora se prvo ispuni plinom, otvara se izlazni ventil, a pumpa radi do početnog očitavanja. Kada se izlazni ventil zatvori, mjerna komora je na atmosferskom tlaku. Očitava se „C<sub>0</sub>“ kada pumpa dosegne tlak „P<sub>2</sub>.” Komora se ponovo ispuni plinom, a kad se otvori izlazni ventil, početna točka pumpe je na novoj poziciji koja je 10 cm<sup>3</sup> iznad početne točke. Izlaz komore je zatvoren dok pumpa ponovo radi i očitava se „C<sub>1</sub>” kad tlak ponovno dosegne „P<sub>2</sub>”.

Faktor kompresije se računa pomoću podataka dobivenih mjerenjima formulom:

$$C_f = \frac{10}{10 - (C_0 - C_1)}, \quad (2-15)$$

gdje su: C<sub>f</sub> - faktor kompresije,  
 C<sub>0</sub> - početna kompresija,  
 C<sub>1</sub> - završna kompresija.

Svako ispitivanje sadrži kompresiju praćenu ekspanzijama u praznoj komori, a nakon toga u komori s uzorkom. Sa zatvorenim ulaznim i otvorenim izlaznim ventilom živin stupac pri atmosferskom tlaku daje očitavanje na mikrometru „R<sub>1</sub>”. Zatvaranjem i izlaznog ventila stupac žive raste do očitane vrijednosti „R<sub>2</sub>” pri tlaku „P<sub>2</sub>”. Komoru treba ispuniti plinom te postaviti uzorak u nju. Ponavljanjem postupka za očitavanje kao za „R<sub>1</sub>” treba očitati „R<sub>3</sub>” za komoru s uzorkom. Još jednom zatvaranjem izlaznog ventila tlak raste do vrijednosti „P<sub>2</sub>” pri čemu se očitava „R<sub>4</sub>”.

Proračuni se izvode izrazima od 2-16 do 2-20.

$$B_v = R_3 - R_1, \quad (2-16)$$

gdje su: B<sub>v</sub> - ukupni volumen (m<sup>3</sup>),  
 R<sub>1</sub>- očitavanje mikrometra kod atmosferskog tlak (mm),  
 R<sub>3</sub>- očitavanje mikrometra u komori s uzorkom (mm).

$$G_v = C_f \cdot (R_4 - R_2), \quad (2-17)$$

gdje su: G<sub>v</sub>- volumen čestica (m<sup>3</sup>)  
 R<sub>2</sub>- očitavanje mikrometra kod dosezanja P<sub>2</sub> tlak (mm),  
 R<sub>4</sub>- očitavanje mikrometra kod ponovnog dosezanja P<sub>2</sub> tlaka (mm),  
 C<sub>f</sub>- faktor kompresije.

$$G_w = B - A, \quad (2-18)$$

gdje su:  $G_w$ - masa čestica (g) ,  
 $B$ - masa sušenog uzorka u posudi (g) ,  
 $A$ - masa posude (g).

$$n = \frac{(B_v - G_v)}{\rho_s} \cdot 100, \quad (2-19)$$

gdje su:  $n$ - poroznost (%),  
 $B_v$ - ukupni volumen ( $m^3$ ),  
 $G_v$ - volumen čestica ( $m^3$ ),  
 $\rho_s$ - gustoća čvrstih čestica ( $kg/m^3$ ).

$$\rho_d = \frac{G_w}{B_v}, \quad (2-20)$$

gdje su:  $\rho_d$ - gustoća u suhom stanju ( $kg/m^3$ ),  
 $G_w$ - masa čestica (g),  
 $B_v$ - ukupni volumen ( $m^3$ ).

Kod pisanja izvještaja treba zabilježiti svaki uzorak zajedno s prosječnim vrijednostima. Izvještaj treba navesti da je ukupni volumen dobiven tehnikom istiskivanja žive i da je poroznost izračunata iz volumena zrna mjerenja pomoću Boyleove zakonske tehnike. Vrijednosti gustoće treba dati na najbližih  $10 \text{ kg/m}^3$ , a vrijednosti poroznosti na najbližih 0,1%.

## 2.6. Metoda za određivanje indeksa pora pomoću brzog upijanja

Metoda je namijenjena za mjerenje indeksa pora koji je definiran kao masa vode sadržana u uzorku stijene nakon jednosatnog uranjanja. Indeks je u korelaciji s poroznošću te se test koristi samo za stijene koje se ne raspadaju prilikom uranjanja u vodu. Test je dizajniran tako da koristi najmanje opreme.

Od opreme se koristi spremnik za uzorke od nekorodirajućeg materijala, određena količina dehidriranog silika gela i vaga točnosti 0,5 g.

Prvo se odabire reprezentativni uzorak koji sadrži najmanje 10 komada stijene. Svaki uzorak treba težiti oko 50 g. Uzorci se suše tako što se smještaju u spremnik u kojem trebaju biti okruženi kristalićima silika gela i drži ih se u takvom stanju 24 sata. Nakon 24 sata

spremnik se prazni. Uzorci se čiste četkicom od kristala silika gela i određuje im se masa „A“.

Uzorak se vraća u spremnik u koji se dodaje voda sve do potpunog uranjanja uzorka i u takvom stanju se ostavlja 1 sat. Spremnik treba protresati radi uklanjanja mjehurića zraka. Nakon jednog sata uzorak se uklanja iz spremnika, briše se vlažnom krpom pazeći pritom da se ne uklone fragmenti stijena i mjeri mu se masa „B“.

Formula za izračun indeksa pora je prikazana izrazom (2-21):

$$I_v = \frac{B-A}{A} \cdot 100, \quad (2-21)$$

gdje su:  $I_v$ -indeks pora (%) ,

A-masa uzorka prije uranjanja (g),

B- masa obrisanog uzorka nakon uranjanja (g).

Pri pisanju izvještaja indeks pora se mora približno izraziti na najmanje 1%. Mora se navesti da se indeks pora odredio na osušenom uzorku nakon jednosatnog uranjanja.

### 3. ANALIZA PRIKUPLJENIH PODATKA

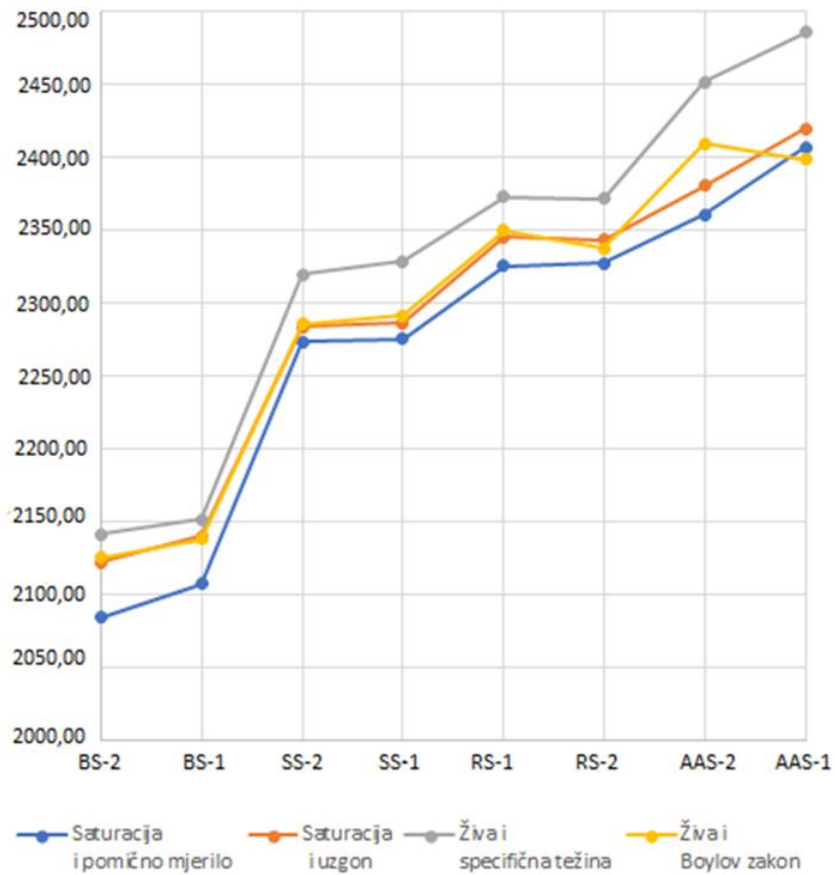
Za analizu su prikupljeni rezultati ispitivanja gustoće i poroznosti iz studije japanskih znanstvenika (Lin i dr., 2015). Ispitivanja gustoće i poroznosti provedena su metodama saturacije i pomičnog mjerila, saturacije i uzgona, žive i specifične težine te žive i Boylovog zakona.

Istraživanja su obavljena na osam vrsta stijena, ali jedino su na uzorcima pješčenjaka korištene sve preporučene metode ISRM za određivanje gustoće i poroznosti te je zbog toga ta vrsta materijala izabrana za analizu u svrhu izrade ovog rada. Ispitivani su „Berea“ pješčenjaci iz Amerike (uzorci s oznakom BS) uzorci, „Shirahama“ pješčenjak iz Japana (uzorci s oznakom SS), pješčenjak Rajasthan iz Indije (uzorci s oznakom RS) te žuti australski pješčenjak (uzorci s oznakom AAS). Rezultati ispitivanja gustoće svih nabrojanih pješčenjaka su preuzeti iz studije japanskih autora (Lin i dr., 2015) i prikazani u tablici 3-1.

**Tablica 3-1** Tablica rezultata određivanja gustoće

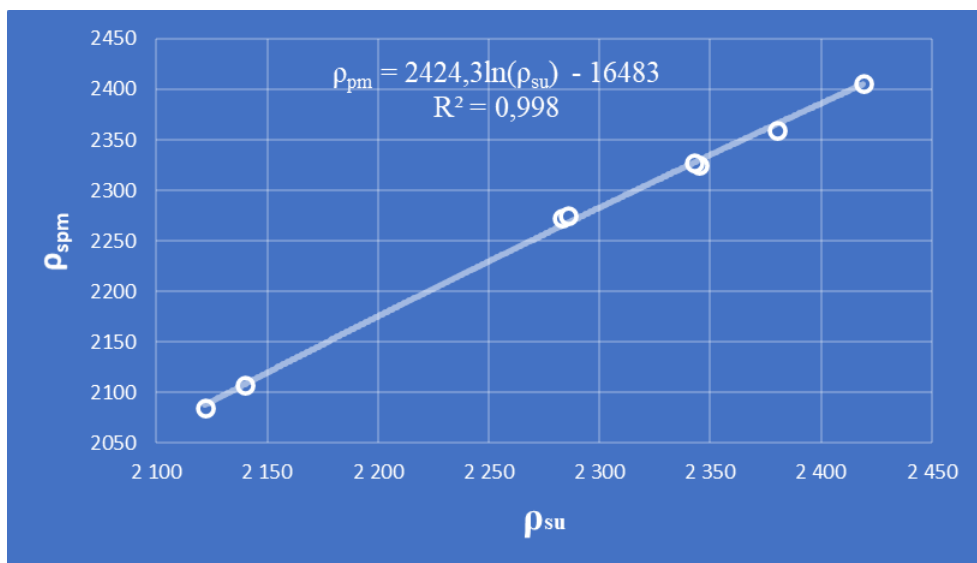
Oznaka uzorka	Saturacija i pomično mjerilo (kg/m <sup>3</sup> )	Saturacija i uzgon (kg/m <sup>3</sup> )	Živa i specifična težina (kg/m <sup>3</sup> )	Živa i Boylov zakon (kg/m <sup>3</sup> )
<i>BS-2</i>	2 084	2 122	2 141	2 125
<i>BS-1</i>	2 107	2 140	2 151	2 138
<i>SS-2</i>	2 273	2 283	2 319	2 285
<i>SS-1</i>	2 275	2 286	2 328	2 291
<i>RS-1</i>	2 325	2 345	2 372	2 349
<i>RS-2</i>	2 327	2 343	2 371	2 337
<i>AAS-2</i>	2 360	2 380	2 451	2 409
<i>AAS-1</i>	2 406	2 419	2 485	2 398

Na temelju podataka iz Tablice je načinjen linijski dijagram (slika 3-1). Na dijagramu je vidljivo da ispitivanje saturacijom i pomičnim mjerilima daje najmanje vrijednosti, a ispitivanje živom i specifičnom težinom najveće vrijednosti gustoće. Gustoće dobivene ispitivanjem saturacijom i uzgonom te živom i Boylovim zakonom se gotovo pa preklapaju uz mala odstupanja kod uzoraka australskog pješčenjaka.



Slika 3-1 Dijagram usporednih vrijednosti gustoće

Da bi se došlo do jednadžbi međuovisnosti, na temelju vrijednosti iz tablice 3-1 načinjena su tri točkasta dijagrama (slike od 3-2 do 3-4). Na njima je načinjena krivulja trenda čija jednadžba je ujedno izraz međuovisnosti.



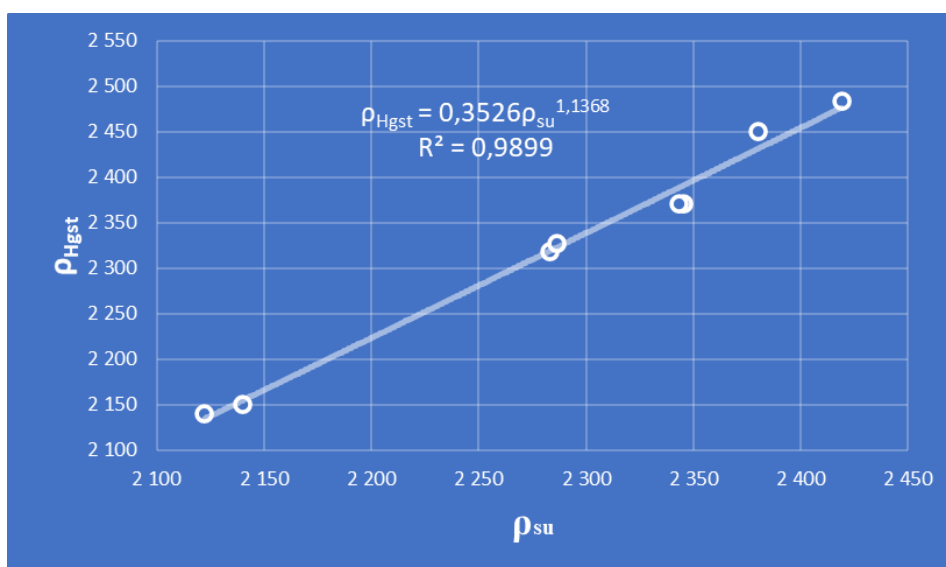
Slika 3-2 Dijagram međuovisnosti gustoće određene saturacijom i pomičnim mjerilom sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom

Točkastim dijagramom (slika 3-2) načinjena je jednažba 3-1 koja pokazuje međuovisnost između gustoće određene metodom saturacije i pomičnog mjerila sa gustoćom koja je određena saturacijom i uzgonom.

$$\rho_{spm} = 2424,3 \cdot \ln(\rho_{su}) - 16483, \quad (3-1)$$

gdje su:  $\rho_{spm}$ -gustoća određena metodom saturacije i pomičnog mjerila ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $\rho_{su}$ -gustoća određena metodom saturacije i uzgona ( $\text{kg/m}^3$ ),

Također, mogla bi biti interesantna međuovisnosti između gustoće određene pomoću žive i specifične težine s gustoćom koja je određena saturacijom i uzgonom. Ta međuovisnost je određena dijagramom 3-3 i izrazom 3-2.



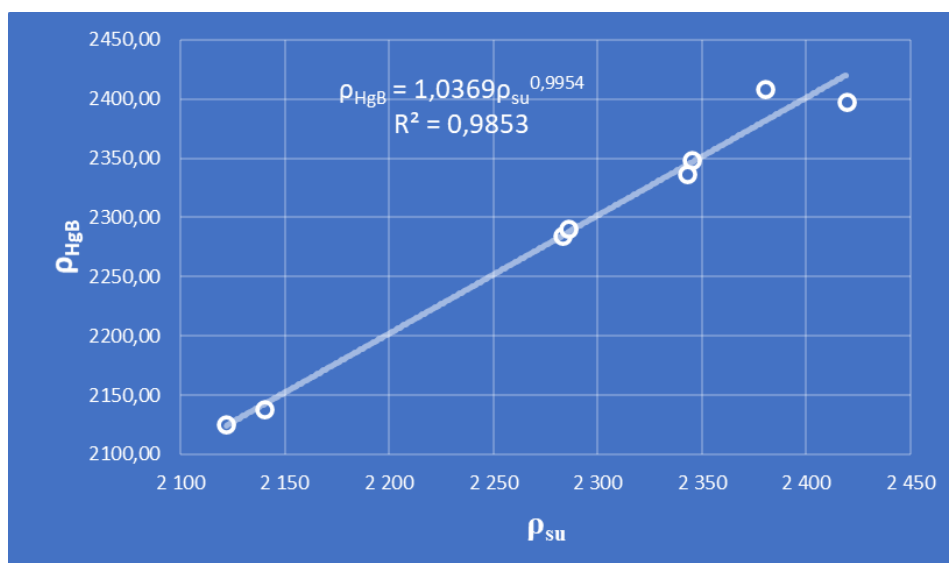
Slika 3-3 Dijagram međuovisnosti gustoće određene pomakom žive i specifične težine sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom

$$\rho_{Hgst} = 0,3526 \cdot \rho_{su}^{1,1368}, \quad (3-2)$$

gdje su:  $\rho_{sp}$ -gustoća određena metodom saturacije i pomičnog mjerila ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $\rho_{su}$ -gustoća određena metodom saturacije i uzgona ( $\text{kg/m}^3$ ),

Na kraju je određena međuovisnost (slika 3-4 i izraz 3-3) između gustoće određene pomakom žive i Boylevim zakonom sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom.





Slika 3-4 Dijagram međuovisnosti gustoće određene pomakom žive i Boylevim zakonom sa gustoćom određenom saturacijom i uzgonom

$$\rho_{HgB} = 1,0369 \cdot \rho_{su}^{0,9853}, \quad (3-3)$$

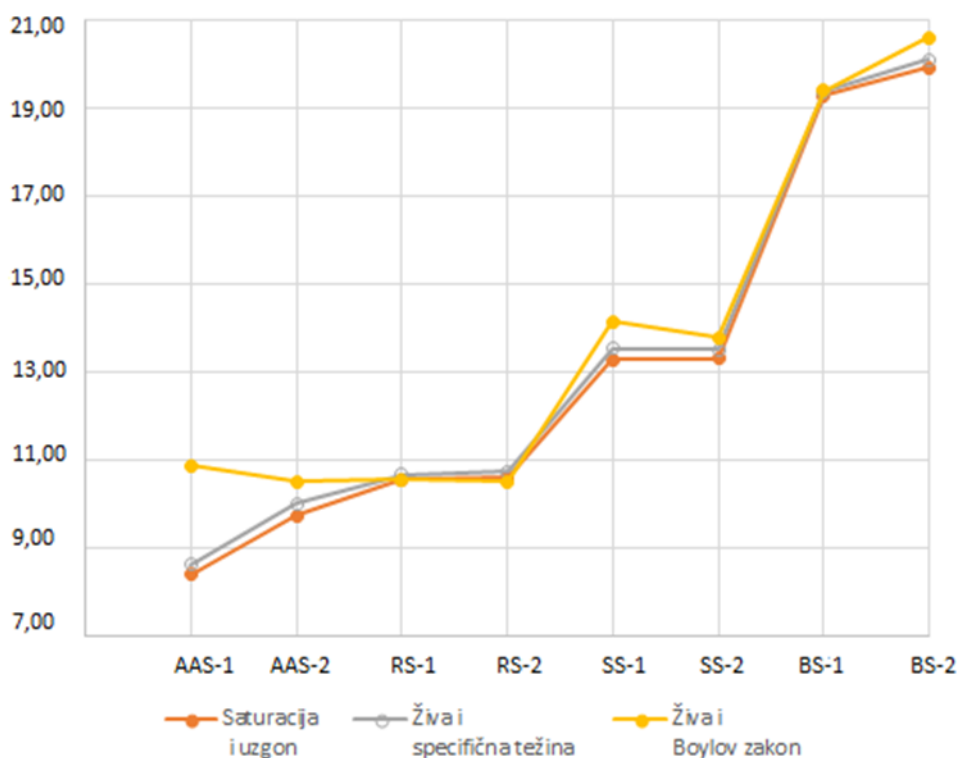
gdje  $\rho_{sp}$ -gustoća određena metodom pomaka žive i Boylevim zakonom ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $\rho_{su}$ -gustoća određena metodom saturacije i uzgona ( $\text{kg/m}^3$ ),

Rezultati mjerenja poroznost za pješčenjačke stijene su preuzeti iz studije japanskih autora (Lin i dr., 2015) i prikazani u tablici 3-2.

Tablica 3-2 Tablica rezultata određivanja poroznosti

Oznaka uzorka	Saturacija	Živa i	Živa i
	i uzgon (%)	specifična težina (%)	Boylov zakon (%)
<i>AAS-1</i>	8,39	8,62	10,87
<i>AAS-2</i>	9,72	10,01	10,51
<i>RS-1</i>	10,55	10,67	10,54
<i>RS-2</i>	10,60	10,72	10,50
<i>SS-1</i>	13,28	13,52	14,15
<i>SS-2</i>	13,30	13,50	13,78
<i>BS-1</i>	19,29	19,39	19,41
<i>BS-2</i>	19,92	20,10	20,62

Linijski dijagram na slici 3-5 prikazuje usporedbu rezultata mjerenja prema različitim metodama. Iz tog dijagrama nisu uočljive tako jasne razlike rezultata mjerenja poroznosti prema različitim metodama, ali se uočava da metoda mjerenja poroznosti saturacijom i uzgonom daje najmanje vrijednosti, a metoda pomaka žive i Boylovog zakona daje najveće vrijednosti .



Slika 3-5 Dijagram usporednih vrijednosti poroznosti

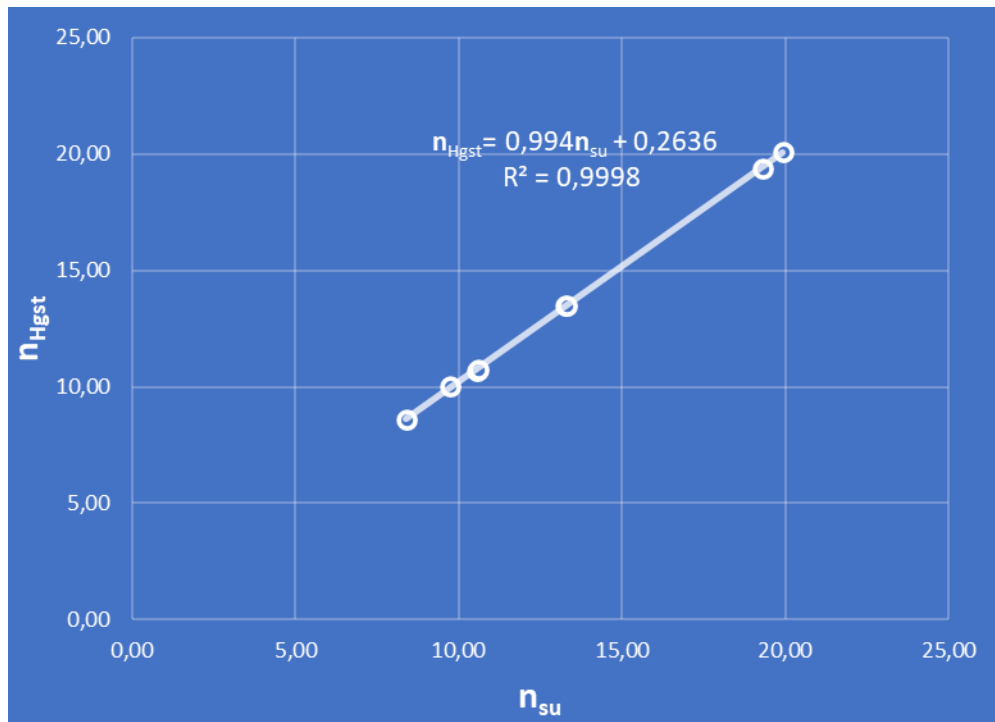
I u slučaju poroznosti načinjene su jednadžbe međuovisnosti rezultata do kojih se došlo prema različitim metodama.

Prvo je uspostavljena jednadžbe međuovisnosti između rezultata mjerenja poroznosti pomakom žive i specifične težine sa rezultatima dobivenim pomoću metode određene saturacijom i uzgonom. Jednadžba je prikazana izrazom 3-4 koji je nastao iz krivulje trenda na točkastom dijagramu 3-6.

$$n_{Hgst} = 0,994 \cdot n_{su}^{1,1368} + 0,2636 \quad (3-4)$$

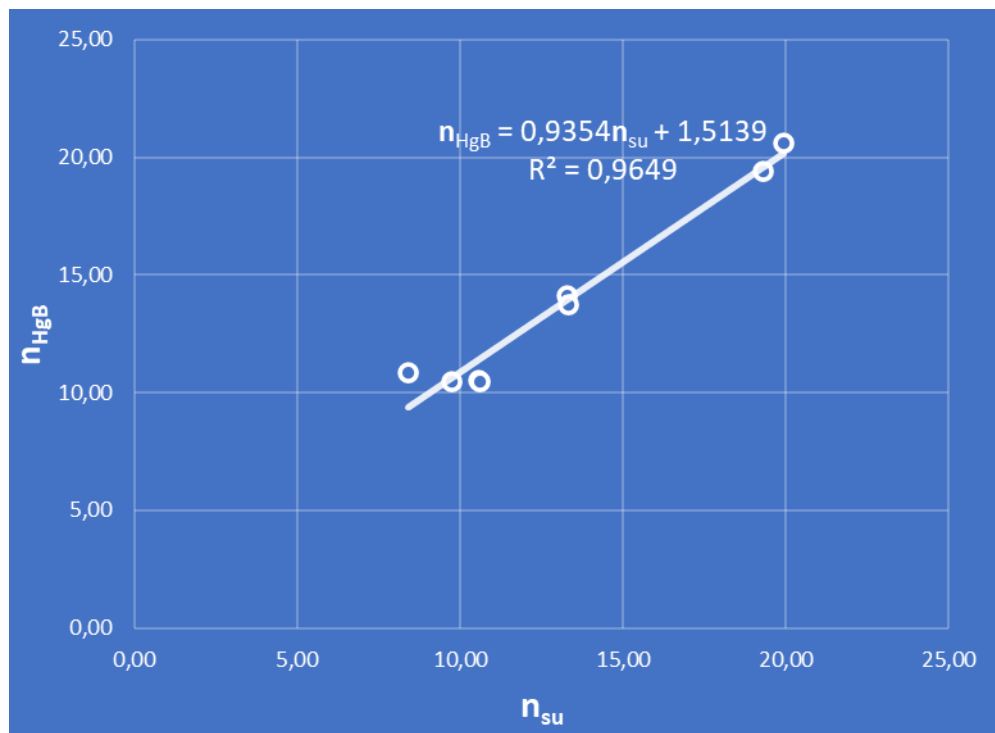
gdje su:  $n_{Hgst}$  -poroznost određena metodom pomaka žive i specifične težine (%),

$n_{su}$  -poroznost određena metodom saturacije i uzgona (%),



**Slika 3-6** Dijagram međuvisnosti poroznosti određene pomakom žive i specifične težine sa poroznošću određenom saturacijom i uzgonom

Pomoću krivulje trenda iz točkastog dijagrama 3-7 načinjene je jednadžba međuvisnosti prikazana izrazom 3-5.



**Slika 3-7** Dijagram međuvisnosti poroznosti određene pomakom žive i Boylovim zakonom sa poroznosti određene saturacijom i uzgonom

Izraz 3-5 pristavlja međuovisnost rezultata ispitivanja poroznosti prema metodi pomaka žive i Boylovog zakona sa rezultatima ispitivanja poroznosti prema metodi saturacije i uzgona.

$$n_{HgB} = 0,9354n_{su} + 1,5139, \quad (3-5)$$

gdje su:  $n_{HgB}$  -poroznost određena metodom pomaka žive i Boylovim zakonom (%),

$n_{su}$  -poroznost određena metodom saturacije i uzgona (%),

#### 4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Gustoća i poroznost su temeljna i važna fizikalna svojstva stijena u razmatranju različitih inženjerskih problema i utječu na ostala fizička svojstva poput brzine elastičnih valova, propusnosti, električne otpornosti, čvrstoće, Youngova modula itd. Mjerenja gustoće i poroznosti provode se pri različitim inženjerskim zahvatima (Lin i dr., 2015). Međutim, stijenski materijal različito reagira pod utjecajem vode i povišene temperature pa su tome i prilagođene metode određivanja kako gustoće i poroznosti, tako i s njima povezanim svojstvima.

Stijenski materijal koji je postojan pod utjecajem vode i temperature može se ispitivati metodom saturacije i pomičnog mjerila te metodom saturacije i uzgona. Pri tom se nepravilni uzorci mogu ispitivati jedino primjenom metode saturacije i uzgona. Isto tako, kada se ispituje metodom saturacije i uzgona potrebno je više pojedinačnih uzoraka (najmanje 10) u odnosu na metodu saturacije i pomičnog mjerila kada je dovoljno ispitati 3 pojedinačna uzorka na osnovu kojih se računa srednja vrijednost za materijal. To je zbog toga što je metoda saturacije i uzgona prvenstveno osmišljena za nepravilne uzorke kod kojih veći broj uzoraka daje pouzdaniju srednju vrijednost za materijal.

Nastavljajući se na potrebu poznavanja i gustoće i poroznosti te možebitnu potrebu za procjenom gustoće i poroznosti, u ovom radu su kao izvorni doprinos uspostavljene jednadžbe međuovisnosti (izrazi od 3-1 do 3-3) između rezultata ispitivanja gustoće po različitim metodama. Jednadžbe imaju oblik logaritamske krivulje (3-1) i krivulje opće potencije (3-2 i 3-3), ali svaki oblik ima vrlo visok stupanj koeficijenta determinacije  $R^2$ , što je vidljivo na dijagramima (slike od 3-2 do 3-4). Ipak se mora uzeti u obzir kako su linije trenda u svim tim slučajevima načinjene na malom broju podataka pa se međuovisnosti mogu uzeti samo kao orijentacione za pješčenjačke vrste stijene.

Za poroznost su isto tako napravljene jednadžbe međuovisnosti koje imaju oblik pravca sa vrlo velikim koeficijentom determinacije, no i u ovom slučaju je broj uzoraka bio mali.

Uzevši sve navedeno u obzir može se zaključiti sljedeće:

- preporučene metode ISRM razlikuju se prema svojstvima materijala za koji su namijenjene, a prvenstveno se to odnosi na mogućnost obrade materijala u pravilne uzorke te postojanosti na vodu i povišenu temperaturu
- za metode koje ispituju uzorke nepravilne geometrije potreban je veći broj uzoraka nego kod metoda s uzorcima pravilne geometrije

- uspostavljene jednadžbe međuovisnosti u ovom radu mogu se koristiti samo orijentacijski, a za pouzdaniju procjenu potrebno je načiniti jednadžbe međuovisnosti na temelju barem 30 uzoraka za istu vrstu materijala.

## 5. LITERATURA

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

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.

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

ISMR,2020 URL: <https://www.isrm.net/>(17.8.2020)

LIN, W., TADAI, O., TAKAHASHI, M., SATO, D., HIROSE, T., TANIKAWA, W., HAMADA, Y., HATAKEDA, K. 2015. *An Experimental Study on Measurement Methods of Bulk Density and Porosity of Rock Samples*. Journal of Geoscience and Environment Protection, 3, str. 72-79. doi: 10.4236/gep.2015.3500