Fizikalna svojstva tla i stijena

Zagorec, Jelena

Undergraduate thesis / Završni rad

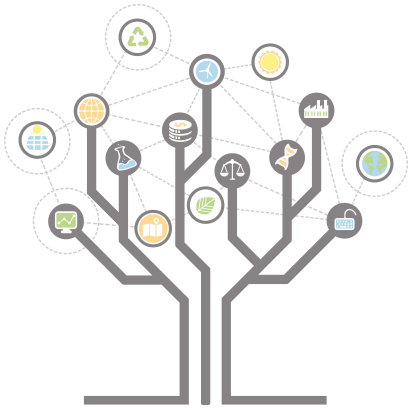
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:773270

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN

JELENA ZAGOREC

FIZIKALNA SVOJSTVA TLA I STIJENA

ZAVRŠNI RAD

Varaždin, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN

ZAVRŠNI RAD

FIZIKALNA SVOJSTVA TLA I STIJENA

Kandidat:

Jelena Zagorec

Mentor:

Doc.dr.sc. Mario Gazdek

Neposredni voditelj:

Dr.sc. Davor Stanko

Varaždin, 2020.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

Fizikalna svojstva tla i stijena

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Mario Gazdek**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 03.veljače 2020.g.

Jelena Zagorec

Zagorec Jelena

SAŽETAK:

IME I PREZIME AUTORA: Jelena Zagorec

NASLOV RADA: Fizikalna svojstva tla i stijena

U radu su opisana osnovna fizikalna svojstva geomedija, najvažniji parametri koji se mogu mjeriti te međusobni odnosi elemenata koji grade strukturu tla i stijena u inženjerskom smislu. Iz literature su izdvojena tla i stijene koje se najčešće susreću u problematici inženjerstva okoliša poput glina, pijesaka, šljunaka, lapora, vapnenaca i dolomita. Osim mehaničkih svojstava, za određivanje stanja i definiranje promjena u inženjerstvu okoliša, važna su i druga svojstva: radioaktivna, termalna, magnetska i električna. Svrha rada je pregledni prikaz svojstava i njihovih fizikalnih parametra koji se mogu odrediti suvremenim geofizičkim metodama te prikaz pojedinih konceptualnih modela iz kojih je moguće interpretirati i dimenzionirati njihova inženjerska svojstva.

KLJUČNE RIJEČI:
Svojstva, klasifikacija, geomedij, stijena, mineral

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. OSNOVNE VRSTE KLASIFIKACIJE GEOMEDIJA 5
2.1. GEOLOŠKA KLASIFIKACIJA 5
2.2. FIZIKALNA KLASIFIKACIJA 9
3. FIZIKALNA SVOJSTVA GEOMEDIJA 11
3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA 11
3.1.1. POROZNOST 11
3.1.2. POROZITET 11
3.1.3. PERMEABILNOST ILI PROPUSNOST 14
3.1.4. GUSTOĆA 16
3.2. ELASTIČNA SVOJSTVA 19
3.2.1. KONSTANTE ELASTIČNOSTI I MODULI ELASTIČNOSTI 21
3.2.2. ELASTIČNA SVOJSTVA MG I MF STIJENE 25
3.2.3. ELASTIČNOST SD STIJENE 27
3.3. RADIOAKTIVNA SVOJSTVA 33
3.3.1. PRIRODNA RA STIJENA 36
3.3.2. RADIOAKTIVNOST MG I MF STIJENA 37
3.3.3. RADIOAKTIVNOST SD STIJENA 37
3.4. MAGNETSKA SVOJSTVA 39
3.4.1. DIJAMAGNETIZAM 41
3.4.2. PARAMAGNETIZAM 41
3.4.3. FEROMAGNETIZAM 41
3.4.4. ANTI-FEROMAGNETIZAM 42
3.4.5. FERIMAGNETIZAM 42
3.4.6. MAGNETSKA SVOJSTVA FLUIDA 46

3.4.7. MAGNETSKA SVOJSTVA STIJENA 46
3.5. TERMALNA SVOJSTVA 49
3.5.1. TERMALNA SVOJSTVA MINERALA I PORNE ISPUNE 53
3.5.2. TERMALNA SVOJSTVA SEDIMENATA 55
3.6. ELEKTRIČNA SVOJSTVA 59
3.6.1. ELEKTRIČNA SVOJSTVA POROZNIH I RASPUCANIH STIJENA 61
3.6.2. STIJENE S ELEKTROLITIČKOM VODLJIVOŠĆU (ARCHIJEVE STIJENE*)* 62
3.6.3. OVISNOST ELEKTRIČNIH SVOJSTAVA O NAPREZANJIMA 64
3.6.4. STIJENE S ELEKTROLITIČKOM I KONTAKTNOM VODLJIVOŠĆU 68
4. ZAKLJUČAK 73
5. LITERATURA 75

POPIS SLIKA

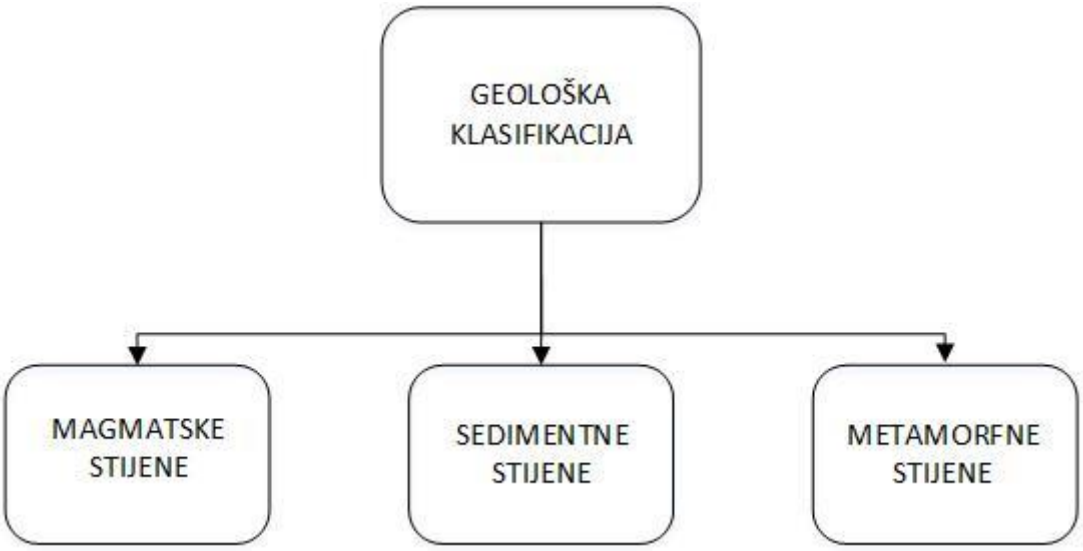
Slika 1. Geološka klasifikacija geomedija 2
Slika 2. Fizikalna svojstva geomedija 3
Slika 3. Lapor 7
Slika 4. Vapnenac 7
Slika 5. Glina 7
Slika 6. Šljunak 8
Slika 7. Pijesak 8

1. **UVOD**

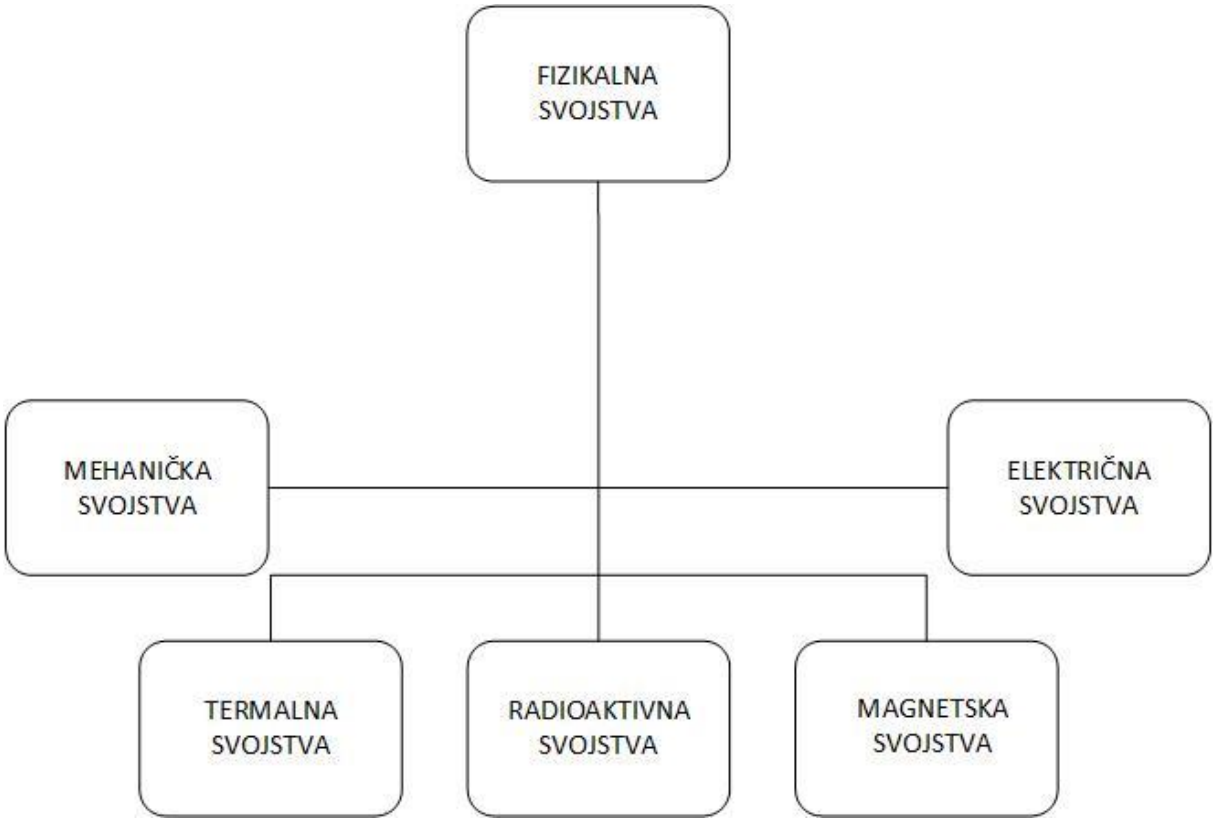
Poznavanje fizikalnih svojstava i relacija koje ih povezuju ili opisuju njihove promjene je postalo od iznimne važnosti, posebno zato što se sustavi (metode i prakse) za njihovo mjerenje na terenu i u laboratoriju danas ubrzano razvijaju. Ipak, osnovno pravilo za uspješnost primjene neke metode, naročito geofizičke, je poznavanje „dijagnostičkog“ svojstva objekta istraživanja. Ako se poznaje i raspon vrijednosti tog svojstva, onda je moguće izdvojiti objekt od njegove okoline kao svojevrsnu anomaliju, dimenzionirati ga, procijeniti njegov utjecaj i konačno, pratiti promjene kroz vrijeme.

Motivacija za ovaj rad je knjiga „Physical Properties of Rocks“, autora Jürgena H. Schöna koja je doživjela nekoliko izdanja, a posljednja su iz 2011. i 2015. godine. Sam autor je u prvim izdanjima predstavlja kao „radnu knjigu“ (engl. workbook), a namijenjena je praktičnoj integraciji različitih područja, od primijenjene geofizike, geotehnike do geotermalnih istraživanja. Sasvim sigurno i inženjerstvo okoliša može ovdje naći svoje mjesto. Njezin sadržaj je također značajan, jer na istome mjestu sabire najvažnije (inženjerski praktične) rezultate mnogobrojnih istraživača nekoliko zadnjih desetljeća.

Svojstvo predstavlja značajku po kojoj se elementi nekog skupa međusobno razlikuju. Geomedij je agregat mineralnih, organskih i drugih tvari te uglavnom vode i zraka, a u geofizici je sintagma za cjelokupni sadržaj materije u tlu ili stijeni. Osnovne vrste klasifikacije geomedija su geološka i fizikalna klasifikacija. Geološka podjela (Slika 1.) temelji se na podjeli stijena prema genezi, to jest prema porijeklu i sastavu. Fizikalna klasifikacija (Slika 2.) se temelji na fizikalnim svojstvima, ali i na fizičkim značajkama to jest strukturi i teksturi mineralnog agregata. Ta klasifikacija ovisi o načinu analiziranja ili usvajanja tri pojavna oblika inherentnih fizikalnih i fizičkih svojstava, a ta svojstva su homogenost-nehomogenost i izotropnost-anizotropnost, struktura i tekstura te mjerila ili skale.



Slika 1. Geološka klasifikacija geomedija



Slika 2. Fizikalna svojstva geomedija

MEHANIČKA SVOJSTVA temelje se na :

a) dimenzijama ili međusobnom razmaku konstituanata, tj. njihovim promjenama
   - svojstva pornog prostora
b) poroznost, specifična unutrašnja površina, propusnost
   - gustoća konstituanata
c) gustoća minerala, gustoća pornih fluida
   - elastična svojstva

elastična svojstva minerala i fluida u pornom prostoru, elastična svojstva stijena

Elastična svojstva kompozita zahtijevaju značajan angažman geofizičkih istraživanja, fizikalnih modela i matematičkih formalizama (fizikalno-matematički modeli)

- brzina elastičnih valova

Brzina elastičnih valova minerala, brzina elastičnih valova fluida u pornom prostoru, brzina elastičnih valova MG, MF i SD stijena

- atenuacija elastičnih valova

TERMALNA ILI TOPLINSKA SVOJSTVA su termalna svojstva minerala i pornih fluida, termalna svojstva MG, MF i SD stijena.

RADIOAKTIVNA SVOJSTVA temelje se na prirodnom zračenju radioaktivnih elemenata ili pobuđenom zračenju specifičnih elemenata u geomediju.

MAGNETSKA SVOJSTVA su magnetska svojstva minerala, magnetska svojstva MG, MF i SD stijena.

ELEKTRIČNA SVOJSTVA su električna svojstva minerala i pornih fluida, električna svojstva MG, MF i SD stijena, vodljivost, dielektričnost, permeabilnost, relaksacija, anizotropija, inducirana polarizacija.

2. **OSNOVNE VRSTE KLASIFIKACIJE GEOMEDIJA**

2.1. **GEOLOŠKA KLASIFIKACIJA**

Podjela stijena prema genezi (porijeklo i sastav)

fundamentalna geološka nomenklatura

- magmatiti MG, magmatske stijene
- sedimenti SD, sedimentne stijene
- metamorfiti MF, metamorfne stijene

MG STIJENE:

U kategoriju magmatskih stijena spadaju magmatske, eruptivne, plutonske, vulkanske te dajkovi koji nastaju kristalizacijom magme (kristalinične stijene).

- dajk (engl. dike, dyke): subvertikalno pločasto tijelo koje razdvaja veće stijenske mase
- sil (engl. sill): subhorizontalno pločasto tijelo koje razdvaja veće stijenske mase.

Osnovni minerali koji grade MG stijene su feldspat (glinenci) koji čini 62% građe te kvarc 21% građe.

Osnovne vrste MG stijena:

- granit, diorit, gabro, bazalt, sijenit.

SD STIJENE:

Sedimentne stijene su produkti procesa rastrožbe i sedimentacije.

Rastrožba ili trošenje je proces mehaničke i/ili kemijske dezintegracije osnovne supstance.

Rezidual trošenja se transportira u otopini i akumulira se na mjestu depozicije i/ili precipitacije.

Depozicija: mehaničko taloženje ili gravitacijska akumulacija taloženjem supstance iz transportirajućeg fluida.

Precipitacija: kemijsko taloženje ili akumulacija supstance iz otopine evaporacijom pri čemu se minerali separiraju.

Osnovne vrste SD stijena:

- depozicijske, klastične ili fragmentarne (oko 8% svih SD stijena su klastiti)
- precipitacijske ili kemijske i biokemijske (oko 92% svih SD stijena su precipitati)
- Republika Hrvatska sastoji je od 95% sedimentnih stijena i tla, a neke od tih su glina (Slika 5.), pijesak (Slika 8.) i šljunak (Slika 6.) te lapor (Slika 3.) i vapnenac (Slika 4.).

Primjer:

- pješčenjaci i šejlovi su klastiti, a karbonati i evaporiti su precipitati.

Osnovni klasifikator SD stijena je veličina zrna tvorbenih minerala; kumulativna krivulja distribucije zrna prema veličini izražava srednji promjer zrna d_{50} (promjer na krivulji za koji je masa materije razdijeljena na dva jednaka dijela) i koeficijent sortiranja $S_0 = (d_{25}/d_{75})^{1/2}$

d_i [mm] je promjer na kumulativnoj krivulji koji odgovara određenom postotku ukupne mase.

Postoje vrlo dobro, dobro i slabo sortirani sedimenti ($S_0<1.4$, $1.4<S_0<1.87$, $S_0>1.87$).



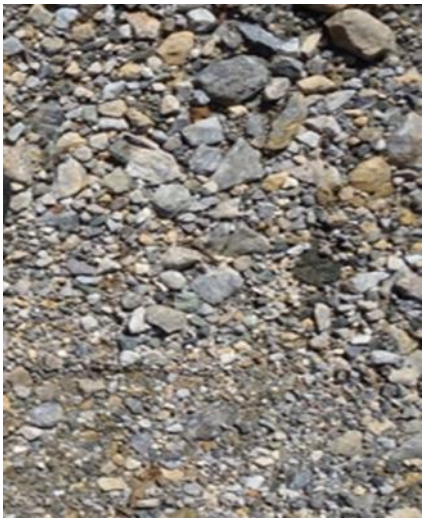
Slika 3. Lapor



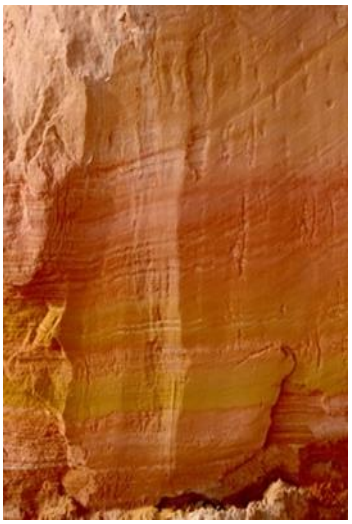
Slika 4. Vapnenac



Slika 5. Glina



Slika 6. Šljunak



Slika 7. Pijesak

MF STIJENE se nazivaju metamorfiti ili šisti, a nastaju metamorfozom svih vrsta stijena.

Metamorfizam je pretvorba/konverzija materije čvrstog stanja pod djelovanjem naprezanja σ i temperature T(preslagivanje mineralne kompozicije u novu pod termodinamičkim uvjetima).

Razlikuju se regionalni, kontaktni i dislokacijski ili kataklastični metamorfizam.

Glavni predstavnici MF stijena: šist, gnajs, slejt, skarn, serpentinit, mramor.

Značajke MF teksture: paralelna orijentacija minerala i specifična orijentacija mikropukotina tj. unutrašnji defekti.

Pojam šistoidnost ili folijacija označava pojavu lamina uzrokovanu izravnim naprezanjima na mineralni agregat.

Tekstura i struktura su pojmovi kojim se opisuje unutrašnja uređenost minerala (stijene); struktura: komponente mineralnog agregata (što se uređuje/ je uređeno?); tekstura: način na koji je uređen mineralni agregat (kako se uređuje/ je uređeno?).

2.2. **FIZIKALNA KLASIFIKACIJA**

Klasifikacija stijena prema fizikalnim svojstvima (fizikalno: ono što je uređeno prema principima fizike; fizičko: ono što se odnosi na tijelo)

Fizikalna klasifikacija se temelji fizikalnim svojstvima (engl. properties), ali i na fizičkim značajkama tj. strukturi i teksturi mineralnog agregata.

Prirodno heterogena stijenska masa se nastoji opisati određenim fizikalnim svojstvima agregirane cjeline i fizičkim značajkama: oblik, dimenzije i uređenost konstituanata u volumenu. (konstitucija: skup svojstava izraženih po/u vanjskom obliku tijela)

U sustav fizikalne klasifikacije su uključeni i kriteriji za opis događaja (efekti, interakcije) na granicama različitih mineralnih cjelina.

Kontrasti tih događaja podrazumijevaju kontrast fizikalnih svojstava i glavni je distinktivni/razlikovni alat svake geofizičke metode(emitira se poznati signal, na granicama se oblikuje odziv, mjeri se ukupni signal; odziv s granica je najčešće rezidual primijenjene metode).

Fizikalna svojstva geomedija određuju:

- uvjeti postanka (termodinamički uvjeti)
- fizikalna svojstva konstituanata
- fizičke dimenzije konstituanata.

Fizikalna klasifikacija stijena

- sadržaj monominerala i poliminerala
- sadržaj pora i količina fluida u porama, geometrija pora
- svojstva veza čvrstih konstituanata na kontaktima (u konsolidiranim stijenama je dominantna uloga cementacije i mostova, a u nekonsolidiranim je značajna uloga frikcije i fizikalno-kemijskih sila poput adhezije i kapilarnog dizanja).

Fizikalna kategorizacija/klasifikacija stijena ovisi o načinu analiziranja ili usvajanja tri pojavna oblika inherentnih fizikalnih i fizičkih svojstava:

[1] homogenost-nehomogenost i izotropnost-anizotropnost

Homogenost i nehomogenost se promatraju u nekom volumenu; označavaju ovisnost nekog svojstva o lokalnim koordinatama unutar volumena; skalarne funkcije koje pokazuju indiferentnost odnosno ovisnost o koordinatama.

Izotropnost i anizotropnost se također promatraju u nekom volumenu; označavaju ovisnost nekog svojstva o pravcu i smjeru obzirom na lokalne koordinate unutar volumena; tenzorske funkcije koje pokazuju indiferentnost obzirom na smjer partikularne promjene svojstva odnosno ovisnost o smjeru.

Nehomogenost pravce deformira u krivulje promjene svojstava.

Istraživanja su potvrdila da je anizotropnost jako vezana uz strukturno-teksturna svojstva.

[2] struktura i tekstura

Definira unutrašnju uređenost stijene ili stijenske mase (vrlo zahtjevna problematika). U geoznanostima nije uvijek jasna distinkcija struktura-tekstura (ponekad su definicije suprotne).U geofizici se upotrebljava Campellova (1984) definicija: tekstura se bavi veličinom, zaobljenošću, sortiranošću i načinom "upakiravanja" konstituanata stijene (kako), a struktura se bavi vrstama konstituanata (što).

[3] mjerila ili skale

Ako homogenost-nehomogenost, izotropnost-anizotropnost i strukturu-teksturu smatramo pojavnim oblicima unutrašnjeg uređenja stijene onda se mora definirati mjerilo u kojem se promatra reprezentativni volumen.

Problem je što različite istraživačke metode koriste različite skale ovisne o mjernom sustavu.

Primjer: vrijednosti ili njihove promjene na uzorku ili „in situ“ se analiziraju obzirom na različit red veličine dimenzija tj. mm i cm skale u laboratoriju i m i km skale in situ znače razliku u redu veličine za 10^3 – 10^6 puta.

3. FIZIKALNA SVOJSTVA GEOMEDIJA

3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA

3.1.1. POROZNOST

Poroznost je svojstvo koje opisuje geometriju pornog prostora: dimenzije, distribuciju, povezanost i orijentaciju. Razlikuju se dva osnovna tipa poroznosti: intergranularna i pukotinska.

Parametri poroznosti su porozitet, specifična unutrašnja površina, permeabilnost; definiraju se kao međusobno nezavisne fizikalne veličine.

- porozitet: omjer volumena pora i ukupnog volumena kompozita značajno utječe na druga mehanička, električna i termalna svojstva (brzina elastičnih valova, vodljivost)
- specifična unutrašnja površina: omjer razvijene površine pora i volumena pora opisuje unutrašnju morfologiju pora i kontrolira događaje na kontaktu pora-čvrsta supstanca koji značajno utječu na elastična i električna svojstva
- permeabilnost ili propusnost: sposobnost formiranja toka fluida kroz pore, važno svojstvo za određivanje izdašnosti ili potencijala protoka fluida.

Porozitet i specifična unutrašnja površina su skalarne veličine, a permeabilnost je tenzor.

3.1.2. POROZITET

Pore su lokalne šupljine koje osiguravaju prostor za uskladištenje pornog fluida; porni kanalići su izdužene pore koje omogućavaju komunikaciju fluida.

porozitet: $n(\equiv\Phi) = V_p / V = 1 - V_m / V$ [1]

V_p: volumen pora [m^3]

V_m: volumen čvrste stijenske matrice [m^3]

V: ukupni volumen kompozita [m^3]

Primarni porozitet je posljedica geoloških, fizikalnih i kemijskih procesa za vrijeme nastanka stijene, a sekundarni porozitet se razvija tijekom geološke povijesti (tektonski procesi, procesi trošenja).

Različiti oblici/tipovi poroziteta obzirom na veličinu i povezanost jesu:

- ukupni (totalni) porozitet = primarni + sekundarni
- vezani porozitet: volumen povezanih pora
- potencijalni porozitet: vezane pore koje imaju potencijal za komunikaciju fluida obzirom na promjer komunikacijskih kanalića (u glinama i šejlovima je potencijalni porozitet<vezani porozitet)
- efektivni porozitet: vezani porozitet koji je slobodan za komunikaciju.

Porozitet različitih vrsta stijena se analizira obzirom na vrstu geološke formacije, regionalnu geologiju i dubinu.

Na primarni porozitet znatno utječe:

- veličina zrna matrice i geometrija pora
- dijagenetski procesi (reorganizacija konstituanata)
- cementacija
- dubina i naprezanje.

Porozitet se općenito smanjuje radi:

- istjecanja slobodne i vezane vode

- mehaničkih deformacija skeleta poroznog medija
- kemijskih deformacija (otapanje, precipitacija, rekristalizacija)
- smanjenje intergranularnog poroziteta se razvija u tri faze:
- pre-pakiravanja zrna u stabilni položaj zbog geološkog naprezanja
- kompakcije zbog deformacija
- cementacije.

U pijescima i pješčenjacima se porozitet smanjuje zbog prepakiravanja i cementacije, a u glinama i šejlovima zbog kompakcije. U oba slučaja se očekuje smanjenje poroziteta n s porastom dubine h i geološkog naprezanja σ_0

tipična ovisnost n-h i n-σ je logaritamska ili eksponencijalna:

$n(h) = n_0 - A_1 \ln h$

$n(\sigma) = n_0 - A_2 \ln \sigma$

n_0: porozitet za h = 0 ili σ = 0

A_1 i A_2 su empirijski koeficijenti koji ovise o kompresibilnosti.

Pretpostavlja se da je diferencijalni pad poroziteta s dubinom ili naprezanjem upravo proporcionalan aktualnom porozitetu n(h) ili n(σ)

- dn(h)/h ~ n(h)

- dn(σ)/σ~ n(σ)

primjer: pješčenjak iz Savske potoline (Jelić, 1984)

$n(h) = 0.496 \cdot \exp(-0.556\ h)$

Naprezanje u izrazima je zapravo efektivno naprezanje σ_{eff} tj. naprezanje na mineralni skelet koje uzrokuje smanjenje pornog prostora i disipaciju pornog tlaka.

$\sigma_{eff} = \sigma_0 - \alpha\ \sigma_{hydro}$

σ_0: litostatsko (geološko) naprezanje

σ_{hydro}: hidrostatsko naprezanje

α: koeficijent tlaka, α ≈ 1 (0.85)

Sve vrste poroznosti (sekundarna, pukotinska,…) slijede isti model ponašanja obzirom na promjenu dubine i naprezanja.

3.1.3. PERMEABILNOST ILI PROPUSNOST

Kapacitet pornog prostora za protok fluida (efektivna poroznost); prikazuje se kao tenzor.

Prema Darcyjevoj definiciji (1856) uveden je pojam: volumna gustoća toka (fluks u vremenu) ili filtracijska brzina v [m s^{-1}] koja je proporcionalna permeabilnosti k [m^2] i gradijentu tlaka u tekućini ∇p [Pa m^{-1}], a obrnuto proporcionalna dinamičkoj viskoznosti μ [Pa s]

$v = - k \nabla p \mu^{-1}$ [m s^{-1}].

Jednakost vrijedi samo za izotropno stanje tj. kada je *k* skalar; za anizotropno stanje permeabilnost *k* je tenzor.

Dinamička *μ* viskoznost tekućine se definira iz Newtonovog izraza proporcionalnosti gradijenta brzine tekućine dv/dy i posmičnog naprezanja τ: t = μ dv / dy

μ = t / (dv/dy) [Nm^{-2} $m^{-1}s$ m].

Kinematička viskoznost v = μ / ρ [m^2 s], odnosno omjer dinamičke viskoznosti *μ* i gustoće tekućine ρ [kg m^{-3}].

Permeabilnost *k* je konačno.

$k = - v \mu / \nabla p$ [m^2]

U hidrogeologiji i geotehnici fluid je redovito voda, a gradijent tlaka tekućine u geomediju dolazi zbog razlike geodetskih visina Δh [m] izvora i ponora na međusobnom razmaku l [m] pa je modificirani praktični Darcyjev izraz:

$v = k_f \cdot \Delta h/l$ [m s^{-1}]

u kojem je k_f: hidraulička permeabilnost ili hidraulička vodljivost geomedija u [m s^{-1}]; naziva se još i koeficijent hidrauličke propusnosti.

Korektan prijelaz Darcyjeve definicije propusnosti u HG definiciju koeficijenta propusnosti mora uzeti u obzir sljedeće:

- fluid koji teče je nestišljiv
- propusnost je ovisna o tlaku plina kada dimenzije pora dosegnu dimenzije plinskog toka
- iznad kritičnog fluksa/brzine filtracije tok je nelaminaran (odnos v-∇p nije linearan pa vrijede Forchhemerove jednadžbe)

Postoje reakcije na kontaktu fluid-čvrsta matrica (strukturni viskozitet).

Kategorije propusnosti ovise o kategorijama poroznosti (raspon vrijednosti je 13 redova veličine).

Općenito propusnost:

- raste s povećanjem poroziteta n
- raste s povećanjem promjera zrna d
- opada s povećanjem kompakcije i cementacije.

Veličina zrna je dominantan parametar o kojem ovisi propusnost u sedimentima; oblik ovisnosti je:

$\log k = A_1 \log d - A_2$.

Posebno se razmatra utjecaj dubine i naprezanja na propusnost; povećanje dubine i naprezanja smanjuje porni prostor, deformira komunikacijske kanaliće i geometriju pornog prostora; odnosi su nelinearni i oblika:

$k = k_0 \exp(-A_k/_{eff})$

k_0: koeficijent propusnosti za s = 0

A_k: kompakcijski koeficijent propusnosti.

U razlomljenim stijenama se propusnost smanjuje zbog „procesa zatvaranja“ pukotina pri povećanju naprezanja.

3.1.4. GUSTOĆA

Gustoća mase *d* (engl. density) je fizikalno svojstvo koje ovisi o mineralnom sastavu i porozitetu (Slika 7.).

Vrlo važan distinktivni geofizički parametar:

$d(\equiv\rho) = dm/dV$ ili $d = m/V$ [kgm^{-3}].

Zbog heterogenosti stijena razlikuju se gustoće sadržaja pornog prostora i gustoće čvrste stijenske matrice (stijena je binarni kompozit, matrica i ne-matrica).

d: ukupna (engl. bulk) gustoća mase promatranog volumena

d_i: partikularna gustoća i-te komponente

d_m: srednja gustoća mase supstance čvrste matrice

d_p: srednja gustoća mase supstance u pornom prostoru

gustoća stijenskog kompozita od n komponenata

$d = \sum(V_i/V)\, d_i$

V_i/V: volumna frakcija partikularne i-te komponente

$d_{\gamma\gamma}$: gama-gama (elektronska) gustoća koja se mjeri u odnosu na Comptonov efekt

$d = 0.5\, d_{\gamma\gamma}\, (A/Z)$

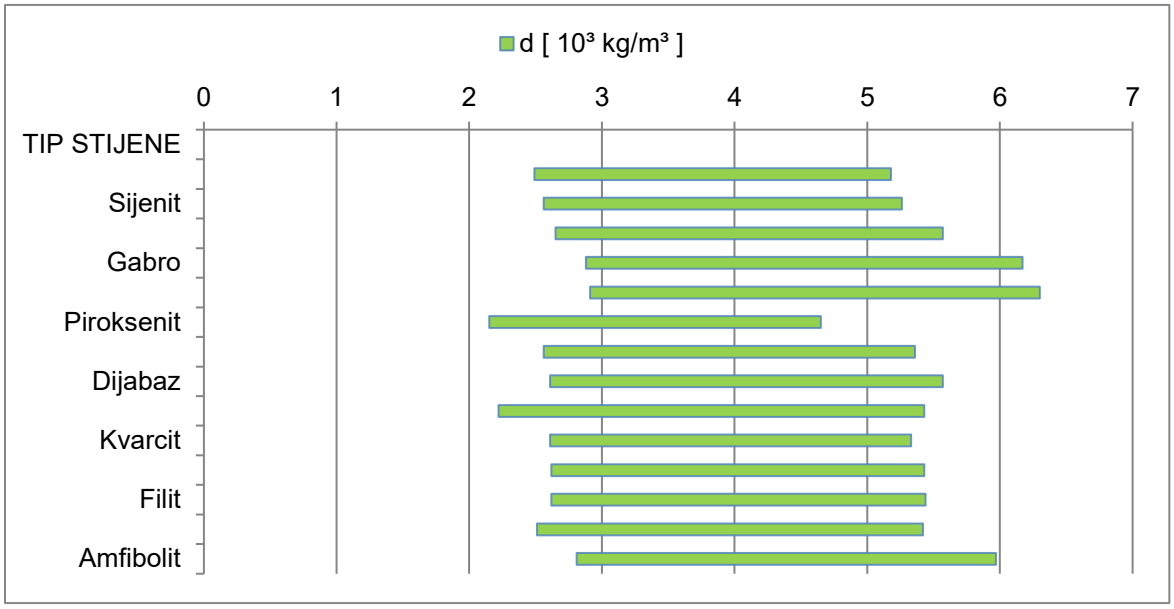
A: atomska masa ili nukleonski broj (broj protona i neutrona jezgre; označava se super skriptom, $^{7}Li_3$)

Z: atomski broj ili protonski (broj protona u jezgri; označava se subskriptom, $^{7}Li_{3}$)

Za porozne sredine, volumna frakcija pornog prostora je baš porozitet n pa je gustoća mase takve sredine:

$d = (1-n)\, d_m + n\, d_p$

Potpun volumetrijski opis porozne sredine zahtijeva poznavanje saturacije pornog prostora $S_f = V_f/V_p$ (f je oznaka za fluid ili za supstancu ispune, npr. w za vodu, g za plin).



Slika 7. Dijagram raspona srednjih gustoća magmatskih i metamorfnih stijena

Volumna gustoća kompozita kada su pore ispunjene vodom i plinom:

$d = (1-n)\, d_m + n\,(S_w\, d_w + (1-S_w)\, d_g)$

GUSTOĆA MINERALA

Ovisi o sastavu, vezama i strukturom minerale rešetke.

Gustoća većine tvorbenih stijenskih minerala je d = 2.2 – 3.5 [Mgm^{-3}].

Gustoća minerala koji tvore temeljne (duboke) stijene je d = 4.0 – 8.0 [Mgm^{-3}].

GUSTOĆA FLUIDA U PORNOM PROSTORU

Ovisi o kemijskom sastavu, ali i o temperaturi T i tlaku p fluida; gustoća raste s porastom tlaka i s padom temperature).

n(CH_2) zemno ulje: 0.85 [Mg m^{-3}]

Voda: 1 [Mg m^{-3}]

Slana voda: 1.146 [Mg m^{-3}]

Koncentracija soli u vodi se često izražava kao masena frakcija C tj. kao omjer koncentracije soli c u [mg/l] i gustoće vode u [g cm^{-3} = 1000 · 1000 mg/l]

ppm (engl. parts per million) je bezdimenzijska jedinica za izražavanje koncentracije u relativnim proporcijama

1 ppm = 10^{-6} ili 1 dio na 10^{6} dijelova

1 ppm = 1 mg/l

mol: količina tvari koja sadrži 6.022 10^{23} (Avogadrov broj) jedinki/čestica (omjer 1[g] neke tvari i molarne mase te tvari [g mol^{-1}]).

API density (American Petroleum Institute).

GUSTOĆE MG I MF STIJENE

Ovise o mineralnom sastavu i sadržaju pornog prostora.

za MG i MF stijene se smatra da je sadržaj pora zanemariv, dok se SD stijene dijele na guste (neporozne) i na porozne sedimente.

MG stijena pokazuju tendenciju porasta gustoće od kiselih (SiO_2) stijena prema bazičnima; mehanički diskontinuiteti u MG stijenama glavni su razlog malog porasta gustoće s naprezanjem; nekompresibilnost mineralne rešetke je glavni razlog relativne nestišljivosti MG stijena.

Gustoća MF stijena ovisi o sastavu i gustoći izvorne mineralne komponente, ali i o stupnju metamorfizma (utjecaj tlaka i temperature); značajnije promjene gustoće nastaju kada se događa zamjena minerala tijekom metamorfizma.

GUSTOĆA SD STIJENE

Postoje dvije važne grupe sedimenata:

- sedimenti bez pora (pore-free, kemogeni)
- porozni sedimenti (tipične SD stijene)

Inicijalno bez pora, karbonati zbog mehaničkih i kemijskih procesa doživljavaju sekundarnu poroznost.

Konstantna gustoća neporoznih sedimenata je određena isključivo njihovom mineralnom kompozicijom; raspon gustoće je vrlo uzak, dok porozni sedimenti za isti mineralni sastav imaju vrlo širok raspon vrijednosti gustoće.

Izraz: $d = (1-n)\, d_m + n\, d_p = d_m - n\,(d_m - d_p)$

Pokazuje kontravarijantno povećanje gustoće obzirom na porozitet; povećanje poroziteta smanjuje gustoću i obrnuto, ali korelaciju određuje gustoća stijenske matrice i gustoća pornog sadržaja.

Za porozne SD stijene najmanje gustoće pokazuju rahli i suhi sedimenti (tla) i marinski sedimenti koji imaju ekstremnu poroznost.

Druga vrlo važna značajka poroznih sedimenata je njihova relativno visoka stišljivost (kompresibilnost) koja je posljedica ovisnosti o naprezanju i/ili dubini.

Očito je ovisnost gustoće o dubini nelinearna; porastom dubine relativna promjena gustoće opada kao rezultat pada kompresibilnosti zbog porasta kompakcije.

Oblik ovisnosti gustoće o dubini je logaritamski:

$d(h) = d(h_0) + A \ln(h/h_0)$

h_0: gornja granica sloja

A: empirijski faktor ovisan o stišljivosti stijene

Relativno visoku gustoću >2.7 [Mg m^{-3}] imaju slabo propusni karbonati i pješčenjaci

3.2. **ELASTIČNA SVOJSTVA**

Određuju se iz brzine širenja elastičnih valova kroz geomedij.

Elastična svojstva stijena (Slika 8.) dobro se opisuju brzinama jer one ovise o elastičnim svojstvima svih konstituanata stijenske matrice, o njihovom frakcijskom volumenu, svojstvima kontakata, cementaciji, temperaturi i tlaku.

Mehanički prostor opisuje se veličinama (d, T, p) tj. gustoća, temperatura i tlak.

Odnos (tenzora) naprezanja i (tenzora) deformacija σ-ε se opisuje teorijom elastičnosti; njihovu vezu opisuje jednadžba stanja ili konstitucijska jednadžba.

Idealno elastičan medij opisuje generalizirani Hookeov zakon elastičnosti.

$\sigma_{ik} = C_{iklm}\,\varepsilon_{lm}$

$\varepsilon_{ik} = S_{iklm}\,\sigma_{lm}$

C: tenzor krutosti (stiffnes) ili tenzor elastičnosti

S: tenzor fleksibilnosti (engl. compliance)

Kada postoji elastičan potencijal (neovisno o energetskom paketu iz geološke povijesti deformacije) i simetričnost tenzora naprezanja i deformacija tada se 81 komponenta reducira na 21; simetrija minerala dalje reducira broj neovisnih komponenata tenzora. Izotropna supstanca ima samo dvije nezavisne komponente, varijable ili konstante koje potpuno opisuju njeno elastično ponašanje.

$\sigma_{ik} = \lambda\,\delta_{km}\,\varepsilon_{mn} + 2\,\mu\,\varepsilon_{ik}$

λ, μ: Lameove konstante elastičnosti [Pa]

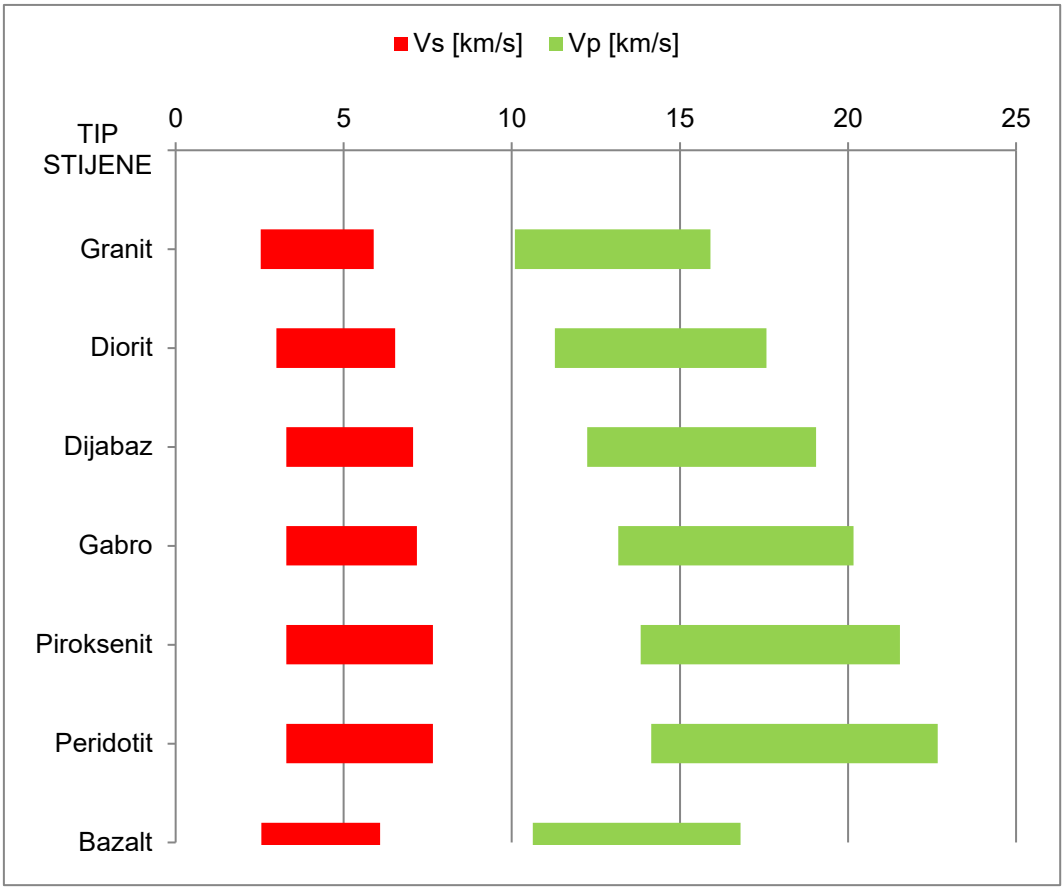
δ: Kronekerova delta [1]

Tehničke konstante elastičnosti izotropnog homogenog tijela: E, v

E: Youngov modul elastičnosti [Pa]

v(≡σ): Poissonov koeficijent (omjer relativnih deformacija)

Elastična svojstva fluida se opisuju modulom kompresije k ili modulom kompresibilnosti c = 1/k



Slika 8. Dijagram raspona srednjih vrijednosti uzdužnih i poprečnih brzina valova

3.2.1. KONSTANTE ELASTIČNOSTI I MODULI ELASTIČNOSTI

M modul P vala, E Youngov modul, μ≡G modul posmika, k≡K modul kompresije, v Poissonov koeficijent.

Brzine elastičnih volumnih valova su neposredno vezanu uz te konstante.

P longitudinalni, kompresijski val

$V_P = ((\lambda+2\mu)/d)^{1/2} = (E/d\ (1-v)\ (1-2v)^{-1}\ (1+v)^{-1})^{1/2} = (M/d)^{1/2}$

S transverzalni, posmični val

$V_S = (\mu/d)^{1/2} = (E/d\ 2\ (1+v)^{-1})^{1/2} = (G/d)^{1/2}$

U laboratoriju se određuje brzina V_r na uzorku iz bušotinske jezgre (oblik štapa promjera Φ i duljine l, duljina elastičnog vala λ, λ<l)

$V_r = (E/d)^{1/2}$

POISSONOV KOEFICIJENT

$(V_S/V_P)^2 = (2\ (1-v)\ (1-2v)^{-1}) = a$

$v = 0.5\ (a-2)/(a-1)$

U elastično anizotropnom mediju su brzine valova funkcije pravca i smjera propagacije

opažanja važna za opis mehaničkog ponašanja stijena (odnos σ-ε).

Moduli elastičnosti (ili komponente tenzora C) ovise o razini naprezanja σ pa je zbog toga odnos σ-ε nelinearan.

Stijene nisu idealno elastične supstance, pa njihov odziv na naprezanje ovisi i o brzini odnosno povijesti deformacije ε = ε(t). Takav otklon od Hookeovog zakona rezultira pojava apsorpcije energije i diskrepancije statičkih i dinamičkih modula elastičnosti.

ELASTIČNA SVOJSTVA MINERALA

Ovise o svojstvima kemijskih elemenata, vezama, obliku rešetke, tlaku i temperaturi.

S obzirom na način kristalizacije potrebno je poznavati posebne neovisne vrijednosti elemenata tenzora C, da bi se moglo cjelovito opisati elastično ponašanje minerala.

Moduli elastičnosti kojima se opisuju elastična svojstva stijena su, u principu, definirani za izotropni materijal (Lameove konstante) ako se pretpostavi da su u prirodnoj stijeni kristalografske osi distribuirane statistički, pa se onda stijena kao kvazi-izotropni geomedij, koji ima makroskopske ili efektivne module elastičnosti strukturnih minerala.

Makroskopske ili efektivne vrijednosti modula su određene eksperimentalno ili su izračunate na mineralnom tvorbenom sklopu uzorka koji predstavlja prirodnu stijenu.

Najpoznatiji modeli tvorbenih skupova su Voightovi (1910) i Reussovi (1929); VR modeli predstavljaju homogene distribucije naprezanja σ i deformacija ε kroz cijeli promatrani mineralni agregat.

VR modeli daju gornje i donje granice vrijednosti elastičnih modula, pa Hill predlaže njihovu srednju vrijednost kao pokazatelj vrijednosti (VRH vrijednosti modula).

Kada je d<4 [Mg m^{-3}], onda geomedij općenito pokazuje povećanje brzine P vala i povećanje VRH vrijednosti modula s povećanjem gustoće.

Kisele stijene imaju manje gustoće, pa su i brzine P vala i moduli manji nego u bazičnim stijenama.

Kada je d>4 [Mg m^{-3}] primijećena je obrnuta tendencija: $d\uparrow \Longrightarrow V_P\downarrow$, EKG↓

Mnogi istraživači su utvrdili postojanje odnosa između brzine V_P, gustoće d i srednje atomske mase A_{sr} za različite minerale, ali postoje mnogi izuzeci pa ni jedan izraz nema opći karakter (ne vrijedi za sve slučajeve).

ELASTIČNA SVOJSTVA PORNE ISPUNE

Općenito su elastična svojstva pornog sadržaja osjetno manja od elastičnih svojstava čvrste mineralne supstance.

Elastična svojstva fluida se najčešće opisuju modulom kompresije *k*, a pokazalo se da postoji odnos brzine V_P i *k* modula.

$V_{Pf} = (k_f/d_f)^{1/2}$ i $V_{Sf} = 0$ jer je $G_f = 0$ tj. nema posmika u fluidima.

Elastičnost plinova i brzine P valova se razmatraju za adijabatska stanja (konstantan volumen plina).

$V_{Pg} = (k_g/d_g)^{1/2}$

$k_g = \kappa\, p$

k_g: adijabatski modul kompresije plina

$\kappa = c_p/c_V$: omjer specifičnog toplinskog koeficijenta plina pri konstantnom tlaku p i konstantnom volumenu V.

Brzine P vala značajno ovise o temperaturi plina, dok je utjecaj tlaka znatno manji. Modul kompresije k i brzine P valova u tekućinama ovise o njihovom kemijskim sastavu, tlaku i temperaturi.

Mnogi istraživači su nastojali detektirati odnos tlaka, temperature i zaslanjenja na elastična svojstva vode, a rezultati su značajni za istraživanje marinskih sedimenata i istraživanje ugljikovodika.

Općeniti oblik definicije brzine P vala u vodi

$V_P = A_1 + A_2T + A_3T^2 + A_4C + A_5p$

T: temperatura vode [°C]

p: tlak u vodi [Pa]

C: koncentracija soli u vodi [%]

A_i: empirijske konstante

Zanimljiva su istraživanja brzine P vala u vodenim suspenzijama čestica tla (water-based mud); brzina V_P u takvim suspenzijama opada s kvadratom porasta gustoće (0.8 – 1.8 [Mg m^{-3}]), ali ipak V_P raste linearno s porastom tlaka u suspenziji, jer se povećava modul kompresije.

Ugljikovodici pokazuju pad V_P s porastom temperature T i poratom njihove molarne mase.

ELASTIČNA SVOJSTVA MJEŠAVINE PLINA I TEKUĆINE

Ovise o gustoćama i elastičnim svojstvima svojih konstituanata, ovise o volumnom omjeru konstituanata i njihovoj distribuciji u pornom prostoru.

Kompresibilnost c=1/k ovisi o stupnju saturacije vode plinom, najčešće zrakom; za raspon saturacije vode S_w = 0.1 – 0.9 k se mijenja za tri reda veličine. Uz to i činjenicu da je distribucija u pornom prostoru nije poznata kao ni efekti na kontaktu fluid- čvrsta matrica, onda elastična svojstva poroznog geomedija treba uzimati s velikom rezervom, partikularno i oprezno.

3.2.2. ELASTIČNA SVOJSTVA MG I MF STIJENE

Brzina P valova se uzima kao pokazatelj elastičnosti u tim stijenama je ovisi o:

- mineralnom sastavu stijena
- utjecaju diskontinuiteta (pore, pukotine, prsline)
- utjecaju anizotropije, posebno u metamorfitima
- temperaturi i tlaku.

Općenito s porastom naprezanja raste i brzina V_P posebno zbog zatvaranja mikropukotina; guste stijene pokazuju zanemarivu ovisnost σ-V_P jer elastična svojstva minerala ne ovise značajno o vanjskom naprezanju.

U MG i MF stijenama osim mikro-diskontinuiteta na vrijednost V_P značajno utječe i mineralni sastav, a posebno sadržaj kvarca SiO_2; kada sadržaj kvarca raste onda brzine P vala pokazuju umjereno linearni pad vrijednosti pa kisele stijene imaju manje vrijednosti od bazičnih.

Odnos d-V_P je u MG i MF stijenama gotovo linearan, zbog činjenice da varijacija mineralnog sastava jednako utječe na promjenu gustoće i promjenu brzine P vala, a oblik odnosa je:

V_P [km s^{-1}] = 2.76 d [Mg m^{-3}] - 0.68

Ako se promatra regresija odnosa d-V_P pri različitim naprezanjima, onda s porastom σ raste koeficijent korelacije.

Odnos d-V_P se može analizirati i s obzirom na srednju atomsku masu A_{sr}, a ustanovljena je slaba ovisnost V_P-A_{sr}, dok ovisnost V_S-A_{sr} gotovo i ne postoji.

Na mehanička, ali i ostala fizikalna svojstva, dominantno utječe poroznost mikro-diskontinuiteta posebno pri malim naprezanjima u stijenama; mikro-diskontinuiteti znatno smanjuju brzine P i S valova u odnosu na kompaktnu stijenu iste vrste.

Osnovni razlozi su promjene/prekidi veza između minerala ili konstituanata i slabija mehanička svojstva ispune.

$V_{Pmineral} > V_{P\ voda} > V_{Pplin}$

S povećanjem poroziteta *n* opada brzina P vala, a pri različitim naprezanjima krivulja linearne regresije n-V_P se praktički samo translatira; oblik ovisnosti je linearan:

V_P [km s^{-1}] = 0.227 n [%] - 7.121.

"Ispadanjem" minerala iz rešetke povećava se poroznost, pa će ista stijena imati veću brzinu V_P ako je tvore fino zrni minerali.

Porni sadržaj značajno utječe na promjenu V_P, a opća tendencija je povećanje brzine s povećanjem stupnja saturacije vodom; mala povećanja vlažnosti u suhim MG i MF stijenama znatne poroznosti mogu značajno povećati V_P i V_S brzine kroz stijenu.

Razlika brzina u suhom i vodom saturiranom stanju raste s povećanjem poroznosti *n* i pada s povećanjem naprezanja σ; utjecaj je značajniji za V_P nego za V_S; promjena V_P registrira razlike kompresibilnosti tekućine i plina, a V_S se može promijeniti zbog promjene gustoće i zbog efekata na kontaktima konstituanata i granicama geomedija.

Ovisnost brzine o naprezanjima je nelinearna; što je veće naprezanje manje je moguća promjena brzine. Promjena brzine u ciklusima opterećenje-rasterećenje je parcijalno ireverzibilna pa nastaje histereza brzine.

Regresijska krivulja omjera brzina u odnosu na omjer poroziteta pri različitim naprezanjima pokazuje različite nagibe, ovisno o veličini zrna minerala; krupnozrni minerali pokazuju najveći nagib.

Pokazalo se da različiti uzroci nastajanja diskontinuiteta (tektonika, termika) jesu važni za određivanje mehaničkog ponašanja raspucane stijene.

Strukturno-teksturna svojstva i termodinamička povijest stijene znatno utječu i kontroliraju odnos brzina-porozitet.

Općenita ovisnost brzine elastičnih valova u MG i MF stijenama je obrnuto proporcionalna porastu temperature T, $V \sim 1/T$; dok male razine naprezanja uzrokuju velike promjene brzine (porast), brzina značajnije opada pri većim razlikama temperature.

Promjena temperature utječe na promjene elastičnih svojstava i brzina zbog termalne ovisnosti elastičnih svojstava minerala, pornih konstituanata i promjena na kontaktima.

Kada su T<150°C onda dominantni utjecaj imaju svojstva pornih konstituanata, a pri većim T minerali dominiraju odnosom V□ -T.

Da bi se formirao korektan odnos brzine i dubine V-h potrebno je poznavati gradijente promjene naprezanja δσ/δh i gradijente promjene temperature δT/δh uz poznate odnose V-σ i V-T.

U domeni inženjerskih konstrukcija (h≤50 m) utjecaj temperature se zanemaruje, a utjecaj naprezanja je značajniji.

3.2.3. ELASTIČNOST SD STIJENE

Porozne stijene u odnosu na guste pokazuju općenito manje brzine i veći raspon vrijednosti; obje značajke su rezultat slabijih elastičnih svojstava porne ispune.

Dominantni parametri koji utječu na brzine su:

- mineralni sastav čvrste stijenske matrice
- konsolidacija i cementacija stijenske matrice
- porozitet, oblik i sadržaj pora
- temperatura i naprezanje

Dodatni parametri utjecaja na brzine su raspucanost (posebno karbonati) i anizotropija zbog različite strukture i teksture.

SD stijene se obično dijele u dvije važne grupe: konsolidirane i nekonsolidirane.

ELASTIČNA SVOJSTVA KONSOLIDIRANIH SEDIMENATA

Mineralna kompozicija znatno utječe na brzine, a pokazuje se kao efekt frakcijske kompozicije čvrste stijenske matrice i pornog prostora; osim toga vrlo važnu ulogu ima cementacija odnosno kontaktni uvjeti.

Za neke vrste stijena dominantan utjecaj na brzine ima i porozitet *n.*

Evaporiti se u praksi smatraju kao stijene bez pora (engl. pore-free), pa brzine slabo ovise o dubini i naprezanju; vrijednosti brzina iste vrste stijene može se odrediti u vrlo uskim granicama, pa je brzina dobar distinkcijski i dijagnostički parametar litologije.

Za polimineralne komponente vrijedi pravilo smjese (engl. mixing rule), pa se pad brzine u dolomitnoj stijeni može objasniti većim sadržajem minerala kalcita koji zamjenjuje mineral dolomit.

Elastična svojstva poroznih klastita i karbonata osim mineralnog sastava stijenske matrice određuje i poroznost; sastav matrice određuje kontaktne uvjete cementacije i veza (mostova); porozitet pri malim varijacijama matrične strukture znatno smanjuje brzine.

Utjecaj čvrste stijenske matrice i pora na brzinu kompozita se određuje poznatom Wyllie-Gregory-Gardnerovom jednadžbom (modelom) srednjeg vremena (engl. time-average).

$1/V_{Pk} = (1-n) / V_{Pm} + n / V_{Pp}$

n: porozitet kompozita

V_{Pk}: brzina P vala kompozita

V_{Pm}: brzina P vala čvrste stijenske matrice

V_{Pp}: brzina P vala kroz pornu ispunu

Rymer (1980) je ustanovio kvadratni odnos

$V_{Pk} = (1-n)^2 V_{Pm} + n V_{Pp}$

Nafe & Drake (1963), a Gardner (1974) daju odnos brzine P vala i gustoće d

$d\ [Mgm^{-3}] = 0.31\ V_P^{1/4}\ [km\ s^{-1}]$

Glina kao ispuna stvara dodatne probleme u određivanju elastičnosti; minerali gline značajno reduciraju brzinu i module; kvarcna ili karbonatna stijenska matrica ima osjetno veće brzine pa i veći sadržaj gline znači veći pad brzine.

Deformabilnost ili kompresibilnost gline znatno je veća u odnosu na stijensku matricu, a to dovodi do jače ovisnosti brzine o naprezanju V-σ s porastom glinenog sadržaja.

Fizikalna svojstva gline jako ovise o sadržaju vode pa porozne stijenske mase s glinenom ispune pokazuju jaku i složenu ovisnost elastičnih svojstava o saturaciji.

Navedeni efekti gline jako ovise o njenoj distribuciji unutar kompozita; glina između kontakata mineralnih zrna značajno doprinosi promjeni/padu elastičnih svojstava; kada se glina nalazi samo u pornom prostoru i nije na kontaktu onda se mijenja gustoća kompozita.

Značajna istraživanja su pokazala linearnu ovisnost brzine P vala obzirom na porozitet i sadržaj gline u pješčenjacima u obliku:

$V_P[kms^{-1}] = 5.02 - 5.63\ n\ [1]$

$V_S[kms^{-1}] = 3.03 - 3.78\ n\ [1]$

odnosno, ako se uzima u obzir i volumni sadržaj gline C [1]

$V_{\square}[kms^{-1}] = A_0 - A_1\ n\ [1] - A_2\ C[1]$

$V_P[kms^{-1}] = 5.59 - 6.93\ n\ [1] - 2.18\ C[1]$

$V_S[kms^{-1}] = 3.52 - 4.91\ n\ [1] - 1.89\ C[1]$

Pokazalo se da obzirom na predviđanja, vrlo mali porast sadržaja gline C=0.01 može znatno smanjiti elastične module pješčenjaka.

Veličina utjecaja sadržaja gline na brzine P i S valova u pješčenjaku je usporediva, ali su S valovi manje osjetljivi na saturaciju pa je efekt gline znatno važniji za propagaciju S vala.

Koeficijenti A_i linearnog odnosa ovise o naprezanju; kada se mjere V_P i V_S in situ moguće je procijeniti porozitet formacije.

Utjecaj saturacije pornog prostora vodom na odnos VP-s u vapnencima je takav da se povećava brzina kompozita (VPw>VPair) dok se u pješčenjacima (s glinenom cementacijom) i u šejlovima događa znatan pad brzine zbog efekta omekšavanja stijenske matrice (fluid koji ne omekšava čvrstu stijensku matricu u pravilu uvijek povećava brzinu elastičnog vala).

Ovisnost brzine o naprezanju σ, dubini h i temperaturi T:

- V-h ovisnost je nelinearna (gradijent brzine se smanjuje s dubinom)
- V-h ovisnost u stijenama s ispunom od gline ili šejla je vrlo jaka
- V-h ovisnost je vrlo slaba za guste (neporozne) stijene.

V-σ je nelinearan, a ovisnost o naprezanju raste s porastom deformabilnosti (npr. poroziteta); ne-elastične deformacije rezultiraju histerezom elastičnosti; s porastom naprezanja brzine općenito rastu, ali s različitim iznosima (engl. rate) pa se onda formira ovisnost brzina o naprezanju σ i Poissonovom koeficijentu v, V-(σ,v).

Općenito brzine rastu s povećanjem naprezanja s jer se smanjuje porozitet n i poboljšava se kontakt čvrste stijenske matrice (događa se „zbijanje“ matrice kompozita).

Naprezanje koje djeluje na matricu kompozita (engl. rock-sceleton) se naziva efektivno naprezanje σ_{eff} i ono je kritični parametar ovisnosti i promjene brzina.

$\sigma_{eff} = \otimes\sigma = \sigma_0 - \alpha\, \sigma_p$

σ_0: ukupno naprezanje

σ_p: porni tlak (tlak fluida u porama)

α: koeficijent kompresibilnosti stijenske matrice, α = 0.63 – 1.20 [1] ovisno o dubini

α ≈ 1 za P i S valove, a α<1 za slabo porozne stijene

također treba primijetiti da se elastična svojstva glinene ispune mijenjaju s porastom pornog tlaka σ_p

$V_{\square} = V_{\square 0} - A_1\, n - A_2\, C^{b1} + A_3\, (\sigma_{eff}/\sigma_0 - \exp(b_2\, \sigma_{eff}/\sigma_0))$

Ai i bj su empirijski parametri.

Temperaturnog efekta gotovo i nema za temperature T = 0 – 300ºC tj. zanemarivi su odnosu na poroznost i saturaciju; događa se tek malo opadanje brzine s porastom temperature.

ELASTIČNA SVOJSTVA NEKOSOLIDIRANIH SEDIMENATA

Postoje dvije osnovne kategorije ovih sedimenata: kohezivne i ne kohezivne.

Međusobno se razlikuju zbog različitih fizikalnih svojstava na kontaktima mineralnih zrna.

Svojstva ne kohezivnih sedimenata ovise o unutrašnjem trenju ili frikciji, a svojstva kohezivnih sedimenata ovise o fizikalno-kemijskim pojava između zrna (kohezija). Brzina u ne kohezivnim sedimentima ovisi uglavnom o porozitetu n, naprezanju σ i saturaciji vodom S_w.

Odnos V_P-n je sličan odnosu u konsolidiranim sedimentima, ali su vrijednosti znatno manje; brzine V_P u suhim nekonsolidiranim sedimentima znatno su manje (200 – 500 m/s) u odnosu na brzine u istim ali saturiranim sedimentima (1500 – 2000 m/s).

Brzina V_P i V_S opada s porastom poroziteta, ali su gradijenti pada brzine V_P znatno veći; u marinskim sedimentima s poratom poroziteta brzina opada na vrijednost brzine P vala u vodi.

Ako je mineraloška kompozicija sedimenta konstantna, onda se može uspostaviti linearni ili kvadratni odnos brzine V_P i gustoće d (V_P-n → V_P-d).

Primjerice u vodom zasićenim jezerskim sedimentima

V_P [m/s]= 1917 - 566 n

V_P [m/s]= 2380 - 2197 n [1] - 1333 n^2 [1]

Ako se prati odnos koeficijenata pora e=n/(1-n) onda postoji odnos V_P-e za marinske sedimente u obliku:

$V_P = 1.6929\ e^{-0.1993}$ [km/s]

U zaglinjenim šljuncima povećanje poroziteta i sadržaja gline smanjuje brzine V_P, a povećanje karbonatne komponente stabilizira matricu pa povećava krutost a time i V_S.

OVISNOST BRZINE O SATURACIJI

U nekonsolidiranim sedimentima brzina je ovisna o osjetljivosti kontakta među zrnima i utjecaju kapilarnog naprezanja (tenzije), pa se govori o koheziji i prividnoj koheziji.

Brzina V_P se sporo mijenja do saturacije S_w = 0.80 – 0.85, ali se tada naglo povećavaju brzine na vrijednosti veće od V_P vode.

Vs trpi male padove s porastom saturacije.

Do saturacije S_w = 0.8 – 0.9 kompresibilnost pornog prostor određena je velikom stišljivošću zraka ($c_{air}/c_w > 2\ 10^4$), a s povećanjem saturacije kompresijski modul c pornog prostora „skače“ na vrijednost vode.

Nejednolika distribucija zraka i vode u porama različite veličine i geometrije stvara relativno male zone velikih vrijednosti brzina kada je:

μ(≡G) nije pod utjecajem vode jer je $\mu_w = 0$

Mali porast V_P do S_w = 0.9 i V $_S$kroz cijeli raspon saturacije događa se zbog povećanja gustoće pornog prostora.

OVISNOST BRZINE O NAPREZANJIMA

Odnosi se na ovisnost V_Υ-σ_{eff}

U ne kohezivnim sedimentima brzina raste s porastom naprezanja σ, a odnos je nelinearan.

Postoje znatne razlike u V_P brzinama vodom saturiranog i ne-saturiranog (suhog) sedimenta; razlike V_S su vrlo male.

Osnovni uzrok porastu brzina V s porastom naprezanja σ je promjena uvjeta na kontaktima zrna čvrste supstance; samo pad poroznosti ne može objasniti varijacije brzina.

Odnos V_Υ-σ u logaritamskom mjerilu je linearan, a oblik je:

$V_\Upsilon = V_{\Upsilon 0} \cdot (\sigma/\sigma_0)^m$

je brzina pri naprezanju σ_0, određuje se eksperimentalno, a kao i eksponent m ovisi o svojstvima sedimenata.

Takav oblik ovisnosti $V_\square$-σ u nekonsolidiranim sedimentima se događa zbog utjecaja promjene stanja σ-ε u kontaktnim zonama.

Različiti oblici zrna će proizvoditi različite konkretne uvjete pa onda i različitu vrijednost eksponenta m; m je manji za oštrobridna zrna (nepravilan oblik zrna), a veći je za obla zrna.

V_P u saturiranom geomediju ima male vrijednosti jer je m ≈ 1/20 – 1/14

zbog toga što modul kompresije vode kontrolira uvjete kontakta među zrnima

V_P u suhom geomediju je određena svojstvima mineralnog skeleta (skelet zrna)

V_P u vodom saturiranim sedimentima je određena svojstvima porne ispune.

3.3. **RADIOAKTIVNA SVOJSTVA**

Prirodna radioaktivnost RA znači spontano raspadanje atomske jezgre tako da element gubi masu, a pri tome emitira energiju; pri tome nastaju izotopi manje mase.

Raspad ili gubitak mase jezgre prati emisija α, β i γ čestica ili zračenja.

Čestice jezgre atoma He označavamo s *a*, dok su *b* čestice elektroni.

Zračenje u pravom smislu emisije EM valova visoke energije i frekvencije (10^{19} – 10^{21} Hz) predstavlja g zračenje.

Domet α i β čestica je vrlo mali, dok γ zračenje zbog svoje vrlo male valne duljine (10^{-11} – 10^{-13} m) može penetrirati vrlo duboko u geomedij.

Osnova za promatranje RA je zakon EM zračenja prema kojem je energija zračenja E proporcionalna frekvenciji v[Hz].

$E = h\,v$ [J]

h = 6.6253 10^{-34} [Js] je Plankova konstanta

E se obično izražava u elektron-voltima [eV], a energije prirodnog zračenja su reda veličine MeV.

1 eV = 1.602176487 10^{-19} [J] je energija jednaka po iznosu elementarnom naboju izraženom u Coulombima [C].

Prirodna RA stijene se prati opadanjem količine prirodnih radionuklida (RA elementi) koji se nalaze u mineralnom skeletu; proces raspadanja se opisuje vjerojatnošću da jezgra radionuklida izgubi masu i emitira energiju.

Svaki radionuklid ima svojstvenu vjerojatnost raspad u jedinici vremena, a ona je neovisna o vanjskim utjecajima (σ,T).

Za proces raspadanja je karakteristično vrijeme polu-raspada $t_{1/2}$ ili konstanta raspada Λ pri čemu se broji aktualni broj nuklida N(t).

$N(t) = N_0 \exp(-\Lambda t)$

N_0: početni broj nuklida u t=0

t: vrijeme potrebno za raspad svih nuklida

$t_{1/2}$: vrijeme polu-raspada u kojem se raspadne polovica broja svih nuklida N0

$n(t_{1/2}) = N_0/2 = N_0 \exp(-\Lambda t) \rightarrow 2^{-1} = (\exp(-\Lambda t))^{-1}$

$\ln 2 = \Lambda t_{1/2} \rightarrow t_{1/2} = \ln 2/\Lambda \; 0.693/\Lambda$

(radio)aktivnost nekog uzorka se definira kao broj raspada u jedinici vremena:

$dN(t)/dt = N_0 \exp(-\Lambda t) (-\Lambda)$.

Očito da RA izvora opada eksponencijalno s vremenom.

Povijesno je jedinica za RA bila definirana kao broj raspada elementa ^{226}Ra mase 1 [g] u jedinici vremena; novija jedinica je Curie 1 [Ci] koji označava broj od $3.7\ 10^{10}$ raspada u sekundi.

Koristi se i jedinica Bequerel 1 [Bq], a označava 1 raspad u jednoj sekundi:

1 [Ci] = [Bq]

Jedan parentalni (početni) nuklid s konstantnom raspada Λ_0 raspadne se na dva radioaktivna potomka s karakteristikama Λ_1, a potom se proces raspadanja nastavlja do n-te razine potomstva pri čemu je sačuvana RA ravnoteža, tj. vrijedi:

$\Lambda_0 \cdot 1 = \Lambda_2 \cdot 2 = \ldots = \Lambda_i \cdot N_i = \ldots = \Lambda_n \cdot N_n$

U stijenskim masama su prepoznate tri vrste prirodnih radionuklida:

1. uranova serija: parentalni izotopi su ^{238}U i ^{235}U, a krajnji potomci su ^{206}Pb i ^{205}Pb s vremenom $t_{1/2}$ od 4.5 10^9 i 7.1 10^8 godina.

2. torijeva serija: parentalni izotop je ^{232}Th, a kraj serije je ^{208}Pb s vremenom $t_{1/2}$ od 1.4 10^{10} godina.

3. kalijeva serija: parentalni izotop je ^{40}K, a 89% krajnjih potomaka je 4^0Ca uz emisiju b čestica, dok 11% čini ^{40}Ar pri čemu se emitira γ zračenje od 1.46 MeV; vrijeme $t_{1/2}$ je 1.3 10^9 godina.

U i Th serije emitiraju svojstvene energetske spektre γ zračenja tijekom raspada, dok K serija pokazuje mono-energetski spektar.

Za praktičnu primjenu se koriste energetski mono-spektri od:

1.46 Mev za ^{40}K

1.76 Mev za $^{235}U \rightarrow ^{214}Bi$

2.61 MeV za $^{232}Th \rightarrow ^{208}Th$

norme: 1 ppm = 10^{-6}, 1 ppc = 10^{-2}

Kalij K je konstituant velikog broja tipičnih i glavnih stijenskih minerala; obično tvori kemijski spoj u mineralima gline kao dio strukture, u evaporitima u kojima se pojavljuje kao sol i u mineralima stijena kao dio silikatne strukture.

Iliti sadrže najveću količinu K (3.5 – 8.3%), dok karbonati sadrže vrlo malo K.

Montmoriloniti, klotiti i kaoliniti sadrže K kao adsorbent (uvučena supstanca).

Većina glina su mineralne mješavine, a šejlovi sadrže relativno konstantnu količinu K (2.7%).

Minerali feldspata sadrže značajne količine kalija (mikroklin sadrži 16% K, ortoklas sadrži 14% K).

Većina stijenskih tvorbenih minerala sadrži vrlo male količine U i Th; više koncentracije nalaze se u uranovim rudačama (uranitit, bekerelit; karnotit, tyuyamunit s više od 76% U) te u rudačama u kojima je mineral urana agregiran(uranium-bearing)(fergusonit, piroklor, uranotil s više od 56% U).

Manje količine Th sadrže akcesorni minerali.

Velika količina urana je disperzirana sub-mikroskopski na kontaktima mineralnih zrna, na unutrašnjim plohama minerala, na mikro-prslinama; i mala količina slabe kiseline može isprati uran pa on zato ima veliku mobilnost u geo procesima.

Izvorni uran dolazi iz kiselih MG stijena gdje formira topive soli u obliku uranil iona (UO_2),a u takvom je obliku prisutan i u riječnim i jezerski vodama.

Iz vode uranil ulazi u sastav sedimenata precipitacijom, adsorpcijom u organske tvari, apsorpcijom u fosfate; općenito ne tvori kemijske spojeve kao K u mineralima stijena.

Th dolazi iz kiselih i srednje kiselih magmatita; u usporedbi s uranom torij je vrlo stabilan i ne ulazi u otopine; u sedimente ulazi kao detritični (ebgl. detrital) mineral.

Th dolazi u stabilnim teškim mineralima (cirkon, epidot), ali ga ima u relativno velikim količinama i u rezidualnim tlima (boksiti, kaoliniti).

Budući da mineralne gline tvore alternirani minerali, veće količine K, U i Th su očekivane; međusobno se minerali glina razlikuju po Th/K omjeru.

100 API unit ima šejl (mid USA) koji sadrži 4.07 ppc K, 24.2 ppm Th i 13.1 ppm U i služi kao etalon γ zračenja za karotažna mjerenja.

Broj raspada bilo kojeg izvora s različitim udjelima U, Th i K se može prevesti u ekvivalentnu koncentraciju urana za isti broj raspada J.

J = k (a K + 1 U + b Th)

k: konstanta sonde

a i b: koncentracije urana u ppm koje daju isti broj raspada kao i 1 ppc K i 1 ppm Th

Stare jedinice za mjerenja gama zračenja su mikro-radioaktivni-ekvivalent po toni stijene [μRa/t] i mikro-rentgen po satu [μR/h].

1 [μRa/t] = 16.5 API

1 [μR/h] = 7.2 API

3.3.1. PRIRODNA RA STIJENA

Dolazi od doprinosa raspada sva tri prirodna radionuklida U, Th i K.

Koncentracije U, Th i K ovise o mineralnom sastavu.

U praksi je zanimljiva integralna, totalna ili ukupna RA koja je glavno dijagnostičko svojstvo jer ovisi o:

- sadržaju U, Th i K
- specifičnom doprinosu pojedinog elementa U, Th i K
- karakteristikama spektra zračenja

Radioaktivnost MG stijena raste od kiselih prema bazičnima, dok radioaktivnost SD stijena raste od „čistih“ prema zaglinjenim šejlovitim stijenama.

3.3.2. RADIOAKTIVNOST MG I MF STIJENA

Trend porasta sadržaja U, Th i K u magmatitima prati trend porasta SiO_2 sadržaja.

Visoka RA u MG stijenama posljedica je prisutnosti akcesornih uranovih minerala.

U, Th i K koncentracije i njihovi odnosi služe za genetičke studije MG stijena, granita i grandiorita posebno. Najveća koncentracija U je pronađena u porfirima.

U MF stijenama je prisutnost RA trojke posljedica izvornog sadržaja eduktne (rngl. educt) materije MG i SD stijena, ali i mogućeg metamorfizma kada se trojka adsorbira i rekristalizira ovisno o stupnju promjena.

Ipak, s porastom stupnja metamorfizma količina RA elemenata se smanjuje, a U i Th pokazuju tendenciju migracije od zone taljenja prema gore tj. dalje od baze kore (migmatiti).

Mobilnost U je znatno veća u odnosu na Th jer je U dio slabe granice između mineralnih zrna i unutrašnjih površina.

3.3.3. RADIOAKTIVNOST SD STIJENA

U SD stijenama RA doprinos K je manji nego doprinosi U i Th koji su podjednaki.

Karbonati pokazuju najmanju RA od svih sedimenata, a šejlovi imaju najveću.

Gama sonde se zato prvenstveno koriste za distinkciju šejlova od ostalih sedimenata,a posebno pijesaka. Osim toga služe za određivanje glinenog sadržaja ili šejlovitosti kao i za razvrstavanje samih glina.

Ako u sedimentima ima drugih RA minerala koji se inače nalaze u MG i MF stijenama, onda je distinkcija različitih glinenih slojeva otežana.

Postoji korelacija na bazi ukupnog gama zračenja u glinama definirana na normaliziranom ɣ intenzitetu ΔI_γ pomoću kojeg se određuje sadržaj gline ili šejla V_{SH}

$\Delta I_\gamma = (I_\gamma - I_{\gamma min}) / (I_{\gamma max} - I_{\square min}) = V_{SH}^a$

I_γ: izmjereni ɣ intenzitet

$I_{\gamma min}$: intenzitet ɣ zračenja u čistom pijesku

$I_{\gamma max}$: intenzitet ɣ zračenja u glini

a: empirijski eksponent, a = 0.3 – 0.8

Eksperimentalno se utvrdila mogućnost detekcije čestica manjih od 0.02 mm na temelju normaliziranog ɣ zračenja.

$\Delta I_\gamma = 0.733 \log V_{0.02} - 0.41$

$V_{0.02}$: sadržaj frakcija manjih od 0.02 mm

Postoje različite korelacije ΔI_γ-V_{SH}, a standardno se za detekciju šejlovitosti uzima nekoliko različitih procjena da bi se potom kao relevantna uzela najmanja vrijednost.

Istraživanjima se pretpostavlja da se svojstva glina ne mijenjaju u različitim bušotinama što nije realna pretpostavka, ali sadržaj gline može pružiti i dobre informacije o potrebnim korekcijama poroziteta, permeabilnosti i procjene saturacije.

Definirane su i korelacije šejlovitosti prema spektru komponenata (Th, K) u intenzitetu gama zračenja.

Budući da sadržaj Th i K varira u različitim tipovima glina, u normalizaciji gama intenziteta se uzima produkt doprinosa oba elementa koji je virtualno neovisan o vrsti gline, ponekad se uzima samo analiza za Th koja daje korektnije procjene volumena gline.

U pješčenjacima se najčešće promatraju omjeri Th/K koji su različiti za različite vrste pješčenjaka.

U karbonatima mjerenje gama zračenja je slabi indikator gline jer rezultati više ukazuju na prisutnost urana nego na sadržaj gline.

Ako je detektirana prisutnost U, Th i Konda je karbonat zaglinjen (glinoviti karbonati i lapori).

Zbog velike mobilnosti urana i vrlo stabilnog ponašanja Th korelacije sadržaja omjera Th/U u okolini mogu biti vrlo indikativne:

Th/U>7: oksidirajuća okolina, trošna stijena

Th/U< 7: marinske naslage, šejlovi zeleni i sivi

Th/U< 2: crni marinski šejlovi

Praćenje retencijskog ponašanja iona u in situ pokusima crpljenja u slabo propusnim vodonosnicima je jasno pokazalo pad količine U, odnosno njegovo ispiranje.

RA zračenje kao oblik emisije energije je glavni izvor topline u geomediju i općenito u kori.

Generiranje RA topline se izražava u [μWm^{-3}] i znatno doprinosi ukupnoj količini topline u stijenskim masama.

Zbog RA raspada elemenata u kori srednji toplinski fluks na površini je oko 65 [mWm^{-2}], a približno 20 [mWm^{-2}], dolazi kondukcijom iz plašta (odnos 70:30%).

Količina topline A(≡Q) generirana iz RA raspada se može procijeniti iz izraza:

$A = d\,(9.52\,C_U + 2.56\,C_{Th} + 3.48\,C_K)\,10^{-5}$ [μWm^{-3}]

C: koncentracije RA elemenata u ppm za U i Th i u ppc za K

d: gustoća stijene [kgm^{-3}]

3.4. **MAGNETSKA SVOJSTVA**

Izvor magnetičnosti je dvojak

- gibajući električni naboj kreira magnetsko polje MP (Mawellove jednadžbe)
- svaka čestica po svojoj prirodi ima masu i električni naboj, ali i magnetski moment koji najvjerojatnije nije nula; intrinzično magnetične imaju ne-nula magnetski moment.

U magnetičnim materijalima su izvor magnetizacije elektroni u orbitalama koji se gibaju u oblaku oko jezgre i intrinzični elektronski magnetski dipolni moment.

Drugi izvor je nuklearni magnetski moment koji je 1000 puta manji od elektronskog; taj moment je važan u kontekstu nuklearne magnetske rezonance (NMR) i nuklearne magnetske tomografije (MRI).

Dakle, elektroni daju dvije komponente: orbitalna + intrinsična.

Općenito su elektroni u materiji uređeni u ljuskama tako da se njihova oba M momenta dokidaju; djelomično zbog toga što se elektroni grupiraju u parove sa suprotnim intrinzičnim momentom (Paulijev princip: nikoja dva elektrona istog atoma nemaju ista sva četiri kvantna broja) ili tvore popunjene ljuske s nula orbitalnim momentom (engl. zero net orbital motion).

(broj ljuski n, broj podljuski l, broj orbitala m_l, spin m_s)

U oba slučaja uređenost elektrona je takva da se dokida doprinos svakog pojedinog elektrona.

Čak i kada svi elektroni nisu upareni ili ljuske nisu ispunjene, čest je slučaj u krutim tvarima da različiti elektroni doprinose M momentu koji je usmjeren u drugim i različitim smjerovima pa takva materija ne pokazuje M svojstva.

Ponekad se spontano ili pod utjecajem vanjskog MP magnetski momenti pojedinog elektrona u prosjeku usklade u istom pravu/smjeru pa tada supstanca generira svoje ukupno MP (engl. net total M field)koje potencijalno može biti dosta jako.

Magnetsko ponašanje supstance ovisi o njenoj strukturi, posebno elektronskoj konfiguraciji, ali i o temperaturi jer slučajna termalna gibanja pri većim temperaturama otežavaju „poravnavanje“ elektrona.

3.4.1. DIJAMAGNETIZAM

Oblik magnetizma koji se pojavljuje u svim tvarima, a označava tendenciju formiranja unutarnjeg MP takvog da se suprotstavlja djelujućem vanjskom MP (unutrašnje odbijanje, unutrašnji repelent).

U pravim dija-supstancama nema ne-uparenih elektrona pa je intrinzični M moment ne proizvodi nikakav efekt (engl. bulk effect); magnetizacija intrinzičnim M momentom je nula, orbitalni elektronski moment je nula.

U vanjskom MP elektroni koji se gibaju u elektronskom oblaku oko jezgre će osim Coulombove privlačne sile prema jezgri, trpjeti i Loretnzovu silu od vanjskog MP; ovisno o smjeru gibanja elektrona u orbitali Lorentzova sila može povećati centripetalno djelovanje na elektrone pa ih „čupa“ iz oblaka i gura prema jezgri ili može smanjiti djelovanje Coulombove sile pa ih onda „čupa“ iz jezgre i gura u oblak.

Efekt komunikacije elektrona jezgra-oblak povećava komponenta orbitalnog momenta koja se suprotstavlja vanjskom MP, a smanjuje onu koja je paralelna VMP prema Lenzovom pravilu; to rezultira malim (engl. bulk) M momentom koji se suprotstavlja VMP(opis je heuristički, a pravu sliku daje kvantna mehanika).

3.4.2. PARAMAGNETIZAM

U para-supstancama postoje ne-upareni elektroni tj. atomska ili molekularna orbitala sa samo jedni elektronom.

Par elektrona je potreban da bi se formirao intrinzični M moment (engl. spin) u suprotnim smjerovima, pa se njihovo djelovanje dokida; neupareni elektron je slobodan podrediti orijentaciju svog orbitalnog momenta djelujućem VMP pa ga zato pojačava.

3.4.3. FEROMAGNETIZAM

U fero-supstancama kao i u para-supstancama postoje neupareni elektroni, ali uz intrinzični moment koji se inače nastoji podrediti VMP postoji tendencija da se svi

intrinzični momenti usklade da bi se održala niža energetska razina pa onda i nakon prestanka djelovanja VMP oni ostaju međusobno usklađeni.

Svaki fero materijal ima svojstvenu Curievu temperaturu iznad koje gubi svoja sfero svojstva (Ni, Fe, Co, Gn).

3.4.4. ANTI-FEROMAGNETIZAM

Za razliku od fero supstanci u anti-fero supstancama postoji unutrašnja tendencija da se intrinzični M momenti susjednih elektrona orijentiraju međusobno suprotno.

Kada se svi atomi supstance poslože tako da njihov susjed ima suprotnu orijentaciju onda je supstanca anti-fero.

Anti-fero materijali imaju nula net M moment tj. supstanca ne proizvodi nikakvo MP.

Anti-fero supstance su vrlo rijetke

Ponekad postoji tendencija za međusobno suprotne orijentacije, ali geometrija rešetke to ne dozvoljava (engl. spin glass is example of geometrical frustration).

3.4.5. FERIMAGNETIZAM

Feri-suspstance kao i fero-supstance zadržavaju svoju magnetizaciju i nakon djelovanja VPM, ali kao u antifero-supstancama spinovi elektronskog para nastoje biti suprotno orijentirani.

Takvo ponašanje nije kontradiktorno jer pri optimalnom geometrijskom rasporedu uvijek postoji magnetski moment pod-rešetke u jednom smjeru veći nego što je moment u drugom smjeru.

Magnetit je ferimagnetičan.

OSNOVNE FIZIKALNE VELIČINE U MAGNETIZMU

U vakuumu vrijedi odnos

$B = \mu_0 H$

B: magnetska indukcija [T]

H: jakost vanjskog MP [A/m]

μ_0: magnetska permeabilnost vakuuma [1]

u materijalnoj supstanci vrijedi odnos

$B = \mu_0 (H + M)$

M: jakost unutrašnjeg/intrinzičnog MP [A/m]

$M = \chi H$

χ: konstanta susceptibilnosti [1]

pa vrijedi suma:

$B = \mu_0 H + \mu_0 M$

$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0 H (1 + \chi) = \mu_0 H \kappa$

$\mu_0 M$: magnetizacija ili magnetska polarizacija [A/m]

κ: relativna susceptibilnost [1]

$\kappa = (1 + \chi) = \mu/\mu_0 = \mu_r$

μ: magnetska permeabilnost supstance [1]

Ako je intenzitet H vanjskog MP vrlo mali, onda se je u dija i para supstancama magnetizacija linearna.

$1\ [T] = 1\ [N\ s\ C^{-1}\ m^{-1}] = 10^5$ gauss

Dvije definicije magnetskog momenta m:

$\mathbf{m} = p\ \mathbf{L}\ [Am^2]$

p: jakost magnetskog pola[Am]

L: vektor udaljenosti polova [m] (usmjeren S→N, tj. od pozitivnog prema negativnom M polu)

m = I**s** [Am^2]≡[JT^{-1}]

I: jakost struje [A]

s: vektor površine kružne zavojnice kojom teče struja I [m^2]

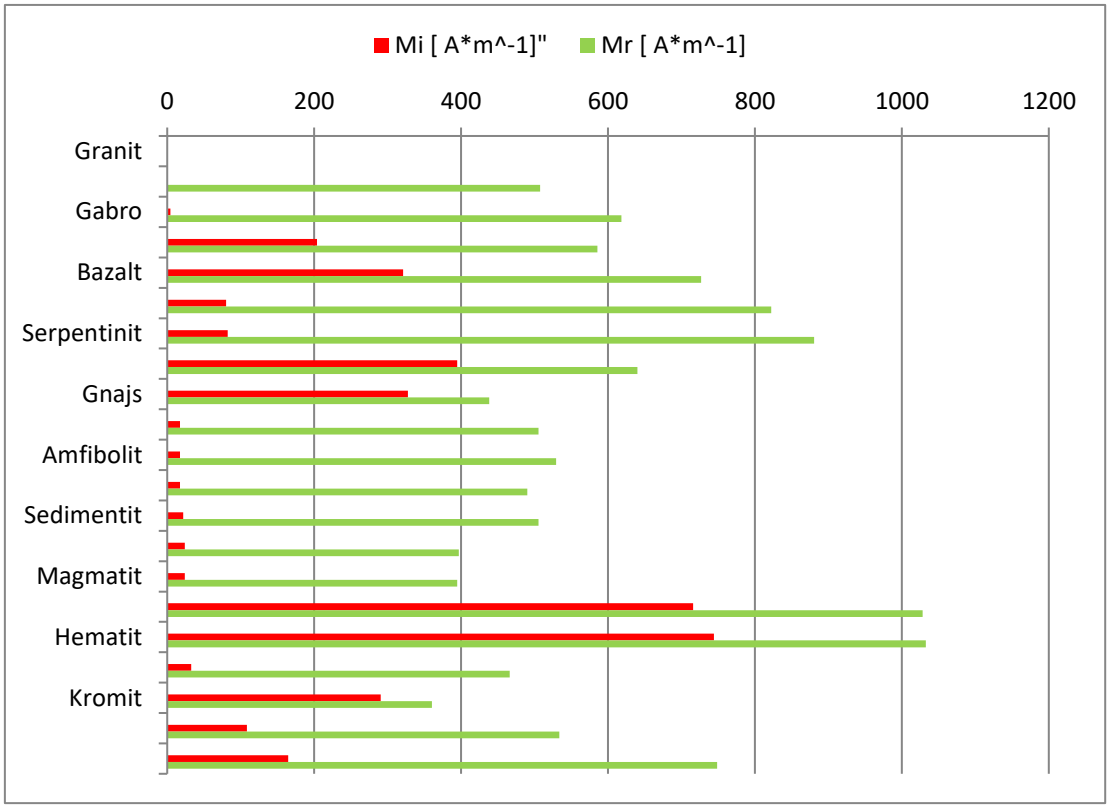
MAGNETSKA SVOJSTVA GEOMEDIJA

Proučavanje prirodne supstance koja ima slična svojstva kao i magnet (engl. load-stone).

Magnetska svojstva geomedija su kompleksan i heterogena pa zahtijevaju vrlo sustavno kategoriziranje koje se temelji na fizikalnim usporedbama s „pravim“ magnetskim supstancama.

Magnetska svojstva opisuju ponašanje geomedija pod utjecajem magnetskog polja

(Slika 9.)



Slika 9. Dijagram izazvane Mi i remanentne Mr magnetizacije za neke vrste stijena

Magnetizam ili magnetska svojstva stijenske supstance ovise o doprinosu mineralnih komponenti, a on može biti dvojak: magnetski red i magnetski nered pa se tako i klasificiraju sve mineralne supstance u tri osnovne grupe: dijamagnetične, paramagnetične i feromagnetične.

Dija i para magnetične supstance doprinose magnetskom neredu.

DM i PM minerali imaju vrlo male susceptibilnosti; svaka feromagnetska nečistoća može znatno povećati vrijednost susceptibilnosti.

Paramagnetsku susceptibilnost kontrolira sadržaj iona Fe^{++} i Fe^{+++}

Feromagnetične, antiferomagnetične i ferimagnetične supstance tvore magnetične minerale; najvažnija komponenta koja kontrolira susceptibilnost takvih minerala je prisutnost Fe i FeTi oksida.

Značajni doprinos mogu dati i Fe hidroksidi i Fe sulfidi.

Fe-Ti-O su dominantne magnetske supstance u MG stijenama (titanomagnetiti, ilmenit-hematiti, pseudo-btokiti, titanomaghemiti).

90% magnetsko efektivne supstance u eruptivnim stijenama su titanomagnetiti $Fe_{3-x}Ti_xO_4$ (i=0,1) i ilmenit-hematiti $Fe_{2-x}Ti_xO_3$ (i=0,1).

3.4.6. MAGNETSKA SVOJSTVA FLUIDA

Većina fluida su DM supstance i imaju vrlo mali utjecaj na magnetska svojstva stijena

susceptibilnost vode $\kappa_w = -0.9\ 10^{-5}$ [1].

Mineralizacija ima vrlo mali utjecaj jer se većina soli ponaša kao PM supstanca.

Kisik je PM supstanca i njegova susceptibilnost je $\kappa_{air} = 0.04\ 10^{-5}$ [1].

3.4.7. MAGNETSKA SVOJSTVA STIJENA

Magnetizam stijena kontroliraju mineralni konstituanti koji proizvode magnetske efekte.

Magnetska svojstva variraju ovisno o vrsti stijene i ovise o kemijskoj nehomogenosti, kristalizaciji i post-formacijskim uvjetima.

Magnetska svojstva nisu nužno predvidljiva po vrsti stijena tj. litologiji jer je geološka klasifikacija utemeljena na genezi i dominantnim tvorbenim mineralnim grupama, a magnetska svojstva najčešće kontrolira posebna, mala i ograničena grupa konstituanata.

Većina osnovnih tvorbenih u stijenama su DM i PM supstance, a magnetska svojstva kontrolira sadržaj FM supstanca; u MG stijenama je to Fe-Ti grupa, a u SD stijenama je to Fe-hidroksidna grupa.

Susceptibilnost je značajno različita unutar iste vrste stijena:

- u MG stijenama susceptibilnost raste od kiselih prema bazičnim stijenama
- u SD stijenama susceptibilnost raste s povećanjem glinenog sadržaja
- u MG i MF stijenama na susceptibilnost su utjecali specifični uvjeti geneze

Alteracijski procesi znatno mogu promijeniti magnetsko ponašanje stijena; odnos susceptibilnosti κ i Fe sadržaja je vrlo varijabilan i uvijek je specifičan (ne može se govoriti o poopćavanju odnosa)→susceptibilnost je gotovo nemoguće predvidjeti pa je se treba uvijek mjeriti.

Osim odnosa κ-Fe može se koristiti i odnos susceptibiliteta κ i sadržaja količine magnetita V_m koji je u obliku:

$\kappa = 0.338\ V_m + 0.0011\ V_m^2$ (V_m = 10 – 100%).

Efektivna susceptibilnost κ_{eff} promatra se kao zbroj doprinosa DM i PM supstanci kojem se dodaje utjecaj FM supstanci u dvije različite koncentracije (manje od 0.01 – 0.1% i veća od 0.01 – 0.1%).

Ustanovilo se da κ opada kada se smanjuju dimenzije d zrna minerala u čvrstoj stijenskoj matrici koja sadrži magnetit, a oblik odnosa κ-d je:

$\kappa = 0.101 \ln d + 0.502$ (d u [μm]).

Raspršene rude s mineralima većih dimenzija su podložne procesu demagnetizacije pa se susceptibilnost stijenske mase smanjuje.

Utjecaj strukture stijene na susceptibilnost κ se opisuje magnetskom anizotropijom

κ je tenzor II. reda, a opisuju je tri glavne susceptibilnosti $\kappa = \kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_3$.

Magnetska anizotropija se opisuje određenim parametrima.

Srednja $\kappa_{sr} = (\kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_3)/3$

- stupanj anizotropije: $P = \kappa_1 / \kappa_3$
- stupanj folijacije: $F = \kappa_2 / \kappa_3$
- stupanj lineacije: $L = \kappa_1 / \kappa_2$

Utvrđena su pravila orijentacije dulje osi elipse anizotropije stijena:

- os se pruža duž ravnine folijacije F u MF stijenama
- os se pruža duž ravnine lineacije L (uslojavanja) SD stijenama
- os se pruža duž linije toka magnetske supstance u MG stijenama

UTJECAJ TEMPERATURE I NAPREZANJA NA MAGNETSKA SVOJSTVA

Temperaturna ovisnost mineralne supstance karakterizira temperaturnu ovisnost M svojstava stijene.

Naprezanje utječe na anizotropiju M svojstava stijene; jednoosno naprezanje ukazuje na pad susceptibilnosti κ s porastom naprezanja σ u pravcu paralelnom naprezanju i porast u okomitom pravcu: $\sigma_{\parallel}\uparrow \rightarrow \kappa\downarrow$ i $\sigma_{\perp}\uparrow \rightarrow \kappa\downarrow$.

Osjetljivost na naprezanje s u titanomagnetitima raste s porastom sadržaja Ti i veličine zrna minerala.

Primjećena je pojava da je promjena κ-σ reverzibilna.

Odnos σ-ε-κ je zamijećen u svim vrstama stijena, a općenito deformacije uzrokuju specifičnu orijentaciju magnetske supstance.

PRIRODNA REMANENTNA MAGNETIZACIJA

Ukupna magnetizacija M supstance je zbroj vektora pobuđene magnetizacije M_P ovisne o VMP i remanentne magnetizacije M_R koja je inherentna i ne ovisi o VMP.

Koenigbergerov omjer Q u stijenama je omjer inherentne remanentne magnetizacije M_R i pobuđene magnetizacije M_P

$Q = M_R / M_P$

u MG i MF stijenama je Q = 1 – 40

u SD stijenama je Q = 0.02 – 10

3.5. **TERMALNA SVOJSTVA**

Proučavaju se termalna (toplinska) svojstva komponenata geomedija zbog razumijevanja njegove termalne strukture (termalnog uređenja), (Slika 10.)

Geotermalna istraživanja vezana su uz mnoga pitanja iz geoznanosti, primjerice: fizikalno i fizičko stanje Zemlje, tektonika, vulkanizam, seizmičnost, ali su također vezana za inženjersku problematiku dubokog bušenja, miniranja, eksploatacije mineralnih sirovina, eksploatacije geotermalnih izvora i geotermalnih metoda istraživanja u primijenjenoj i inženjerskoj geofizici (engl. environmental geophysics).

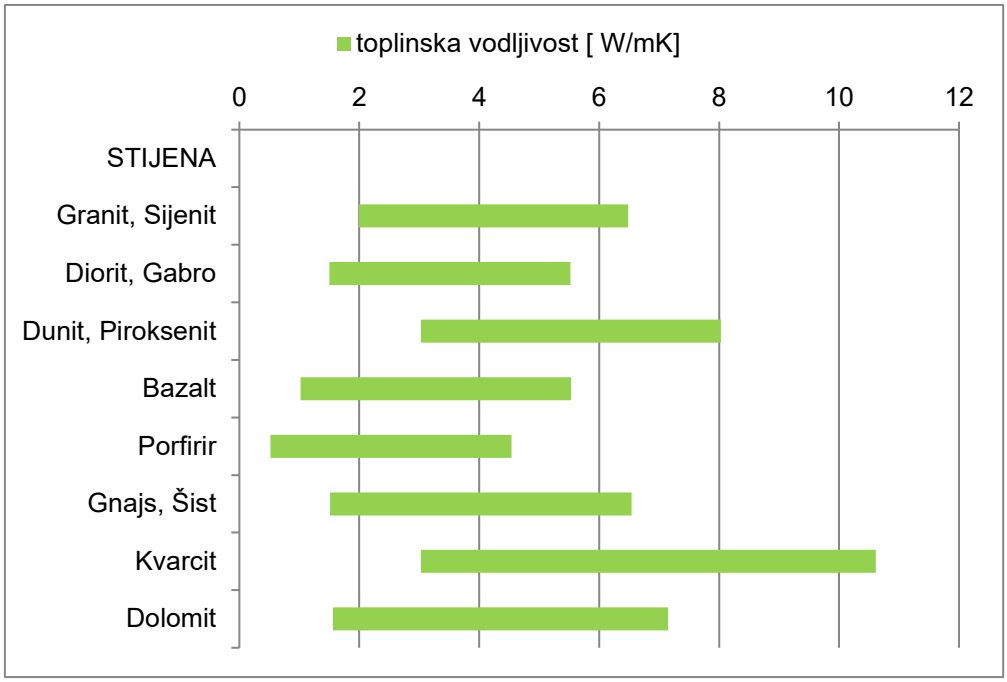
Osnovni termalni parametri koji opisuju petrofizikalna svojstva (petrofizika≡fizika stijena):

λ: termalna vodljivost

a: temperaturna vodljivost

c: specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet c (specifična količina topline) označava količinu topline koju tijelo može pohraniti (kapacitet) po jedinici mase; definira se kao omjer količine topline Q [J] koja zagrijava masu m [kg] i rezultirajućeg porasta temperature ΔT [K]



Slika 10. Dijagram srednjih raspona toplinske vodljivosti za obilne vrste stijena

$c = (Q/m) / \Delta T$ [J $kg^{-1}K^{-1}$]

$c = Q\ d^{-1}\ V^{-1}\Delta T^{-1} = c_V\ d$

$c_V = Q\ V^{-1}\Delta T^{-1}$ [J $m^{-3}K^{-1}$]

c_V: volumni toplinski kapacitet

Specifična toplina c koju tijelo apsorbira ovisi o termalnom procesu unutar tijela koji rezultira podizanjem njegove temperature. Razlikuje se specifična količina topline pri konstantnom volumenu c_V i pri konstantnom tlaku c_P (povećanje unutrašnje energije tijela rezultira promjenama njegovog volumena i/ili tlaka).

U izotropnim materijalima je dan općeniti odnos c_P-c_V

$c_P - c_V = (3\alpha_T)^2\ k\ T\ d^{-1}$ [J $kg^{-1}K^{-1}$]

α_T: koeficijent linearne termalne ekspanzije (toplinsko širenje) [K^{-1}]

k: modul kompresije [Pa]

d: gustoća [kgm^{-3}]

T: temperatura [K]

Vrlo male vrijednosti koeficijenta α_T u čvrstim i većini tekućih materijala rezultiraju malom razlikom $\Delta c = c_P - c_V$.

Vrijednosti α_T su u rasponu $\alpha_T = (1 – 3)10^{-5}$ [K^{-1}] za tvorbene minerale stijena.

Termalna vodljivost λ supstance opisuje njegova svojstva vodljivosti (kondukcije) topline.

Termalni gradijent ∇T i toplinski tok j povezuje Fourierova jednadžba iz koje se definira vodljivost λ.

$\lambda = -j / \nabla T$ [$W\ m^{-1}K^{-1}$]

Temperaturna vodljivost a ili termalna difuznost ovisi o termalnoj vodljivosti λ medija neke gustoće d koji ima specifični toplinski kapacitet c_P

$a = \lambda (d\ c_P)^{-1}$[$m^2s^{-1}$]

Prijenos topline (transfer toplinske energije $Q = \Delta U+W$) se realizira kao:

- kondukcija: prijenos Q zbog interakcije kristalne rešetke; energiju prenosi supstanca
- konvekcija: prijenos Q se odvija relativnim gibanjem nekih čestica supstance
- zračenje: prijenos Q se odvija EM zračenjem između udaljenih čestica supstance

Prijenos Q zračenjem je zanemariv u litosferskim uvjetima kao i prijenos konvekcijom pa je za geofizička istraživanja geotermalnih procesa važan samo prijenos kondukcijom; osnovno termalno svojstvo geomedija je zbog toga termalna vodljivost λ.

Postoje dva fundamentalna procesa po kojima se realizira termalna vodljivost: elektronska vodljivost i vodljivost rešetke (engl. phonon conductivity; phonon: kvant akustičke/vibracijske energije diskretne čestice).

U čvrstim metalima se Q prenosi dominantno kroz elektronsku vodljivost dok je u silikatima vodljivost rešetke dominantna.

Pri malim temperaturama vibracije rešetke su glavni mehanizmi termalne vodljivosti u dielektričnim supstancama kao što su stijene.

Debye (1912) razvija teoriju termalne vodljivosti u kristaliničnim materijalima.

Prijenos topline u dielektricima i poluvodičima se objašnjava titranjem kristalne rešetke (engl. phonon motion) na što utječe unutrašnja struktura rešetke; termalna vodljivost u toj teoriji je svojstvo koje ovisi o temperaturi (engl. Debye-temperature).

Za raspon temperatura u kori i gornjem plaštu (0 – 1500ºC) vodljivost λ opada s povećanjem temperature (!); za vodljivost rešetke vrijedi odnos λ~ 1/T.

Amorfne supstance (staklo, feldspati) pokazuju proporcionalnost λ~ T pa se vodljivost povećava s temperaturom za razliku od kristaliničnih struktura; brzina elastičnih valova pokazuju suprotne tendencije u kristaliničnim i anorfnim supstancama obzirom na ovisnost o temperaturi.

Oblik ovisnosti je (Ratclife, 1959):

$\lambda = 1.323 + 0.00193\ T - 0.67\ 10^{-3}\ T^2$ (za amorfni kvarc, -150 – 60ºC)

$\lambda = (0.1450 + 0.578\ 10^{-3}\ T)^{-1}$ (za kristalinični kvarc, 0 – 120ºC

3.5.1. TERMALNA SVOJSTVA MINERALA I PORNE ISPUNE

Kvarc i minerali koje sadrže MF stijene imaju relativno veliku vodljivost λ; minerali koji tvore gorja (engl. ore-minerals) imaju ekstremno visoke vrijednosti vodljivosti λ, dok male vrijednosti pokazuju primjerice mineralne skupine: liskuni i polihaliti (engl. mica, polyhalite).

Podjela glavnih mineralnih skupina obzirom na utjecaj smanjenja vodljivosti λ(Kobranova, 1989) unatoč znatnim fluktuacijama vrijednosti;

doprinos smanjenju λ (□) [W $m^{-1}K^{-1}$]:

sadržaj prirodnih metala i elemenata kao što su grafit i dijamant (120),

sadržaj sulfida (19), oksida (12), fluorida i klorida (6), karbonata (4), silikata i sulfata (3.3 – 3.8) i nitrata (2.1)

sadržaj nemetala (0.85).

Eksperimentalno je ustanovljena ovisnost vodljivost λ, gustoće d i atomske mase A minerala (Horai & Simmons, 1969) u obliku:

$\lambda = a + b\ d$

$\lambda = 5.5\ 10^{-3}\ d - 10.9 + 1.36\ (20-A)$[SI jedinice]

a: empirijska vrijednost ovisna o atomskoj masi A

b: empirijska vrijednost neovisna o atomskoj masi A.

Termalna anizotropija ovisi o strukturi rešetke.

Analiza pornog sadržaja obzirom na dva glavna konstituanata: zrak i voda su ukazala na dvije činjenice:

$\lambda_{matrix} > \lambda_{pore}$: jasna razlika vodljivosti čvrste stijenske matrice tj. minerala (matrix) i porne ispune (pore)

$\lambda_{water} > \lambda_{oil} > \lambda_{gas,air}$: jasna razlika u vodljivosti pornih fluida.

UTJECAJ TLAKA I TEMPERATURE NA TERMALNA SVOJSTVA

Utjecaj tlaka je relativno mali u odnosu na veličinu utjecaja temperature.

Porast naprezanja od 10 MPa će za vodu pri 30ºC značiti porast vodljivosti s 0.61 na 0.63 dok će za zrak pri 18ºC značiti porast od 0.025 na 0.031 [W $m^{-1}K^{-1}$].

Voda pri 120ºC pokazuje smanjenje vodljivosti λ jer se smanjuje atrakcija molekula fluida; za tlak od 1200 MPa vodljivost λ_w opada na polovicu vodljivosti pri tlaku od 0.1 Mpa.

Naprezanja od $\sigma < 3 – 4$ MPa imaju vrlo mali efekt na promjenu λ.

Kaye & Laby (1968) definiraju odnos λ_w i temperature u [ºC].

$\lambda_w = 0.56 + 0.002\ T - 1.01\ 10^{-3}\ T^2 + 6.71\ 10^{-9}\ T^3$ [W $m^{-1}K^{-1}$].

OVISNOST O TEMPERATURI

Obzirom na mineralni sastav i unutrašnju strukturu, ovisnost termalnih svojstava i temperature se analizira za tri grupe stijenskih masa:

- kristalinične (graniti, dioriti)
- amorfne (obsidjan)
- kristalo-amorfne (dijabaz, porfir)

Za većinu stijenskih masa je opadanje vodljivosti λ s porastom temperature λ↓□T↑ rezultat dominantnog ponašanja kristalne rešetke; za većinu praktičnih problema se može koristiti pojednostavljeni izraz ovisnosti λ-T za raspon T =0-600C (Cermak & Rybach, 1982).

$\lambda(T) = \lambda_0\ (1 + a_T\ T)^{-1}$

λ_0: termalna vodljivost pri površinskim uvjetima

a_T: empirijski faktor, $a_T = 1.4\ 10^{-3}$ [K^{-1}]

λ(T): vodljivost pri temperaturi T

Pokazalo se opravdanim prikazivati ovisnost λ-T u eksponencijalnom obliku (Siepold, 1991).

$\lambda = 146\ T^{-0.66}$ za T u [K]

Specifična količina topline c ovisi o temperaturi T; obično porast T uzrokuje povećanje kapaciteta c

$c_P = 0.754\ (1 + 6.14\ 10^{-4}\ T - 1.928\ 10^{-4}\ T^{-2})$ [kJ $kg^{-1}K^{-1}$] za T u [K].

Anizotropija vodljivosti λ i difuznosti a ovisi o tri glavna razloga:

- anizotropija kristalne rešetke kojoj doprinose tvorbeni minerali
- intrinsična ili strukturna anizotropija zbog oblika i rasporeda minerala u stijeni (folijacija, šistoidnost, …)
- orijentacija i geometrija diskontinuiteta i drugih defekata rešetke.

Opažena ili izmjerena anizotropija je uglavnom posljedice sve tri komponente, dok orijentacija i geometrija ovise i o naprezanju.

Anizotropija se opisuje omjerom vodljivosti λ□ i λ⊥ paralelno i okomito na ravnine folijacije ili šistoidnosti.

Gnajsovi i šistovi pokazuju impresivnu anizotropiju ovisnu o strukturno-teksturnim svojstvima (više od 20%).

3.5.2. TERMALNA SVOJSTVA SEDIMENATA

Razlikuju se obzirom na guste i porozne sedimente.

Neporozne SD stijene pokazuju iste utjecaje na termalna svojstva kao i MG stijene: mineralni sastav i njegova termalna svojstva, odnosno unutrašnja struktura stijene.

Tipično gusti sedimenti su: anhidriti, karbonati, različite soli.

Termalna vodljivost soli opada s porastom temperature i raste s porastom naprezanja.

Primjese u gustim stijenama značajno mijenjaju vodljivost λ i difuznost a; s porastom T do neke vrijednosti λ prvo raste, a nakon te vrijednosti opada; difuznost a opada po čitavom rasponu porasta temperature T.

POROZNI SEDIMENTI

Termalna svojstva značajno ovise o porozitetu i sadržaju vlage; značajna je distinkcija svojstava stijenske matrice minerala i različite porne ispune.

Vodljivost λ opada s porastom poroziteta n i raste s porastom sadržaja vode.

Općenito, termalna vodljivost λ raste:

- ako poroznost opada
- ako raste vodljivost λ porne ispune
- ako raste vodljivost mineralne supstance
- ako se poboljšavaju kontaktni uvjeti i cementacija

Kontaktni uvjeti dolaze do izražaja kada je vodljivost porne ispune značajno mala, a kontrast vodljivosti mineralne i porne ispune je značajno velik.

Manja veličina zrna povećava broj kontakata mineralnih zrna u jedinici volumena pa se vodljivost λ smanjuje.

U nekonsolidiranim sedimentima (pijesci) je razlika u vodljivosti λ značajnija obzirom na vrstu ispune: zrak, voda, (zemno ulje); u cementiranim pješčenjacima ta je razlika manja jer se toplina dominantno prenosi kroz cementirani matriks.

Linearna empirijska relacija n-λ u jurskim karbonatima.

$\lambda = 4.12 - 9.82\ n\ [W\ m^{-1}K^{-1}]$

Obzirom na gustoću d u $[kgm^{-3}]$ i odnos d-λ je linearan.

$\lambda = 0.00735\ d - 16.73\ [W\ m^{-1}K^{-1}]$ za suhe sedimente.

$\lambda = 0.0042\ d - 8.030\ [W\ m^{-1}K^{-1}]$ za vodom saturirane sedimente.

U n-λ odnosu je nagib pravca veći za veću starost stijena, a rasipanje podataka u linearnoj regresiji ovisi o sadržaju kvarca.

Opći oblik ovisnosti n-λ i d-λ je

$\lambda = a_1 - b_1 n$

$\lambda = - a_2 + b_2 d$

pa vrijedi izraz

$\lambda = - a_2 + b_2 ((1-n) d_m + n d_p)$

Zanimljiv je i omjer vodljivosti za suhe λ_{dry} i saturirane λ_{sat} sedimente ovisno o vodljivosti porne tekućine λ_{fluid} (Somerton, 1958)

$\lambda_{sat} / \lambda_{dry} = (\lambda f_{luid} / \lambda_{dry})^{c n}$

n: porozitet [1]

c: empirijski eksponent, c = 0.9 – 1.3 [1]

Utjecaj porne ispune na vodljivost kompozita raste s poratom poroziteta.

Odnos „suhe“ i „vlažne“ termalne vodljivosti u obliku (Cermak & Rybach, 1982)

$\lambda_{wet} = \lambda_{dry} \exp(2.4 c_w)$

Pokazuje porast vodljivosti s porastom sadržaja vode, koji dosiže maksimum pri 20 – 30% poroznosti: c_w je volumni sadržaj vode, $c_w = n S_w$.

NEKONSOLIDIRANI SEDIMENTI

Marinski sedimenti su specifični jer imaju visoku poroznost i vrlo slabe kontakte između zrna; oblik ovisnosti je obrnuto proporcionalan $n \sim 1/\lambda$ (Bullard & Day, 1961)

$\lambda = ((0.161 \pm 0.014) + (0.651 \pm 0.30) n)^{-1}$

U tlima dominantna utjecaj ima sadržaj vlage, a odnos n-λ je nelinearan; u suhim tlima je vodljivost izuzetno mala λ = 0.2 – 0.8 [W $m^{-1}K^{-1}$], a doseže maksimum pri 20 – 30w% i iznosi λ= 2 – 3 [W $m^{-1}K^{-1}$], pa se potom smanjuje i ustaljuje na približnoj vodljivosti vode λ_w = 0.6 [W $m^{-1}K^{-1}$]; uzrok tom smanjenju je povećanje poroziteta jer nestlačiva voda razmiče zrna pa se smanjuje prijenos topline preko mineralnog skeleta tla.

U SD stijenama povećanje naprezanja vodi k povećanju termalne vodljivosti primarno zbog:

- poboljšanja prijenosa topline kroz kontakte čvrstih mineralnih zrna odnosno čvrste stijenske matrice
- smanjenja poroziteta

Ovisnost σ-λje značajnija u stišljivijim stijenama, a σ_{eff} je glavni uzrok.

Nelinearnost i ireverzibilnost (histereza) odnosa λ-σ_{eff} objašnjava se ovisnošću promjena termalnih svojstava o deformacijskom ponašanju.

U log-log prezentaciji σ-λ odnos je u prvoj aproksimaciji linearan, a njegov oblik je:

$\lambda = \lambda_0 (\sigma/\sigma_0)^m$

m: empirijski eksponent, m = 0.02 – 0.03

Ovisnost o dubini h je kombinacija ovisnosti vodljivosti λ o naprezanju i temperaturi, tj. vertikalnom naprezanju i temperaturnom gradijentu; osim toga, dubina pokriva promjene λ ovisne o dijagenezi, kompakciji i cementaciji.

Oblik ovisnosti je $\lambda = 0.229\ h_0^{0.256}$ pri čemu je h dubina u [m].

Rasipanje podataka ovisi o sastavu i strukturi stijene tj. o sadržaju gline i kvarca.

Primjećena je i tendencija porasta λ s geološkom starošću sedimenata.

Ovisnost h-λ je složena pa ju je potrebno izravno mjeriti; intervalni primjer pokazuje da u prvih 30m vodljivost λ raste prilično naglo, od 0.9 na 1.6, a potom do dubina >140 m raste sporije, od 1.6 do 2.4 [$W\ m^{-1}K^{-1}$].

Ako porozna stijena sadrži čvrstu matricu m i porni prostor p onda se može definirati anizotropija obzirom na smjer prijenosa topline u odnosu na granicu.

$\lambda = (1-n)\ \lambda_m + n\ \lambda_p$ (serijski)

$\lambda = ((1-n)/\ \lambda_m + n/\lambda_p)^{-1}$ (paralelno)

Stvarne, eksperimentalno određene vrijednosti λ uglavnom leže između vrijednosti za serijski i paralelni prijenos topline; da bi se bolje objasnila razlika proračunate i izmjerene vrijednosti λ postoji niz različitih modela koji aproksimiraju transfer topline kroz kompozitni geomedij (engl. effective medium theory, variabile internal structure, sphere or inclusion model).

3.6. **ELEKTRIČNA SVOJSTVA**

Voda je najvažniji uzrok varijacija električnog ponašanja stijena.

Većina minerala pokazuje vrlo visoku otpornost pa se slična i usporediva svojstva mogu očekivati i za potpuno suhe stijene (pitanje poroziteta).

Porozne stijene i vodonosnici imaju veću vodljivost od gustih stijena jer je povećava elektrolitička vodljivost vode i interakcije između čvrste i fluidne komponente (Slika 11.).

Utjecaj porne vode proširuje raspon vrijednosti svojstava za svaku stijenu kroz više redova veličine, a uzrokuje i preklapanje vrijednosti različitih litoloških vrsta; zbog toga je otpornost slabo dijagnostičko svojstvo, ali su ipak zamijećene tendencije:

- otpornost pada s porastom poroznosti i diskontinuiranosti, (n, ◙)↑⟹ρ↓
- permitivnost raste s porastom poroznosti i diskontinuiranosti, (n, ◙)↑⟹ε↑

i nazivaju se "efekti porne vode".

Dijagram efekata različitih geo-procesa na otpornost ρ stijena (Ward, 1990):

alteracija glina ↓ρ rastrožba ↓ρ

razlomljenost ↓ρ precipitacije ↑ρ

intruzija slane vode ↓ρ silicifikacija ↓ρ

posmični lomovi ↓ρ metamorfizam ↕ρ

Modeli i teorije koje opisuju električna svojstva kompozitne stijene se dijele u dvije grupe:

- opisivanje individualnih disjunktnih svojstava (σ, ε, kontaktni uvjeti)
- opisivanje kompleksnih efekata pojedinog električnog svojstva

Vodljivost u gustim i potpuno suhim stijenama ovisi o svojstvima čvrste stijenske matrice (poluvodičko ponašanje, defekti rešetke, vodljive nečistoće), a zabilježena su tri značajna oblika ponašanja:

- visoke apsolutne vrijednosti otpornosti
- eksponencijalni pad otpornosti s porastom temperature T
- nelinearan pad otpornosti s porastom naprezanja

Vrijednosti otpornosti su vrlo visoke $\rho > 10^4$ [Ωm], a ε_r = 3 – 5 je niska i ovisi o dominantnim mineralima.

Eksponencijalna ovisnost ρ-T se ne može uvijek opisati jednostavnim eksponencijalnim izrazom (jedna exp funkcija jednog argumenta) već su ti izrazi vrlo složeni.

Smanjenje otpornosti ρ pri povećanju naprezanja se događa zbog zatvaranja diskontinuiteta koji su barijere za prolaz struje kroz stijensku matricu i zbog pada potrebne energije aktivacije.

σ-ρ ovisnost do prve aproksimacije se može opisati (engl. fracture mode) izrazom:

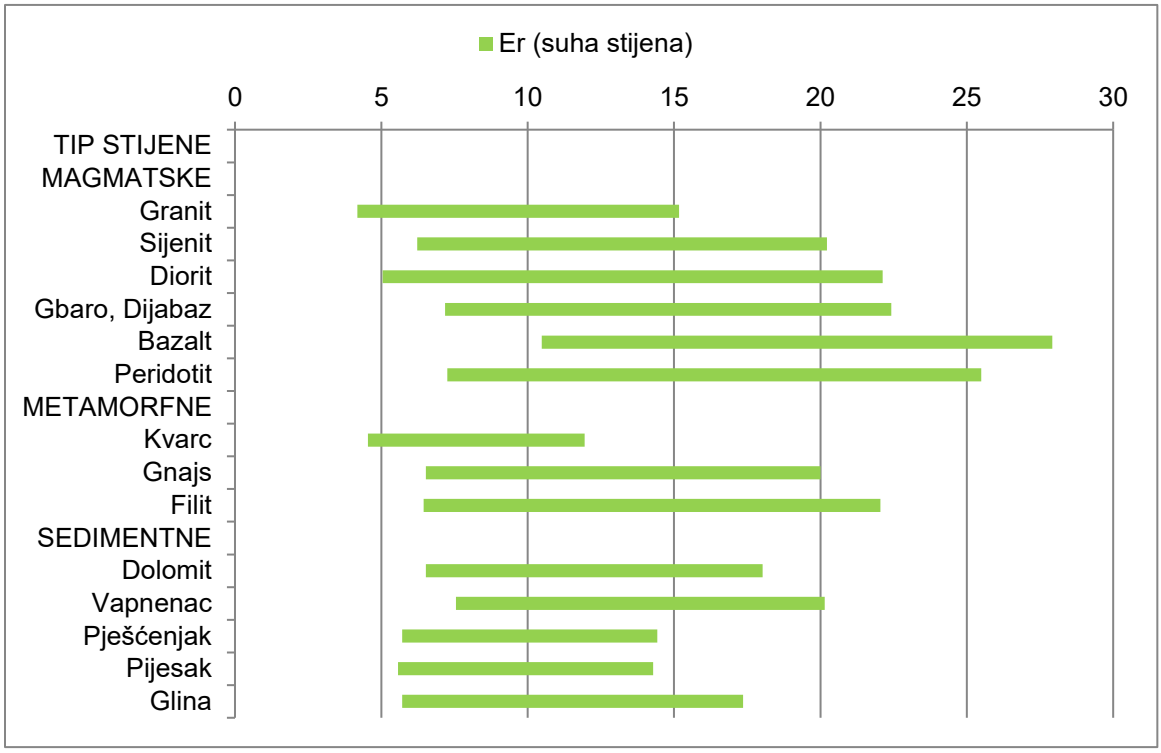
$\rho^{-1}(\sigma) = \rho^{-1}_{matrix} (1 - D_0 \exp(-\sigma/\sigma^*))$

$\rho^{-1}(\sigma)$: aktualna vodljivost pri naprezanju σ

ρ^{-1}_{matrix}: vodljivost stijenske matrice

σ^*: deformacijsko svojstvo stijene izraženo naprezanjem

D_0: inicijalni parametar defekta otpornosti



Slika 11. Dijagram raspona srednjih vrijednosti raspona specifične relativne propusnosti

3.6.1. ELEKTRIČNA SVOJSTVA POROZNIH I RASPUCANIH STIJENA

Svojstva dominantno ovise o svojstvima vode kao elektrolita.

Svojstva stijenske matrice su zanemariva, osim kada se radi o raspršenim sulfidima, nekim oksidima i grafitima.

Otopljene soli u prirodnoj vodi stvaraju anione i katione koji doprinose vodljivosti stijene na dva načina: svojom intrinzičnom elektrolitskom vodljivošću; geometrija vezanih pora ili pukotina određuje geometriju vodljivog toka; analiza odnosa vodljivosti i poroznosti opisuje Archijeva jednadžba.

Elektrokemijska interakcija čvrste matrice i fluida na njihovom kontaktu; geometrija toka ovisi o svojstvima unutrašnje površine; kontaktna vodljivost (engl. excess

conductivity) smatra se praktično neovisnom o elektrolitičkoj vodljivosti; relacije koje opisuju ovu pojavu su izveli Rink & Schopper (1974).

Dominantna elektrolitička vodljivost se pojavljuje u tzv. čistim poroznim stijenama (bez glinovitih i šejlovitih primjesa).

Pojava kontaktne vodljivosti zabilježena je u šejlovitim pijescima (engl. shaly sands); u pješčenjacima i pijescima slabije vodopropusnosti ustanovljen je i efekt kontaktne vodljivosti na što utječe geometrija pornog prostora.

Istraživanja su pokazala da unutrašnja površina djeluje istovremeno i kao vodič i kao kondenzator (engl. capacitor).

3.6.2. STIJENE S ELEKTROLITIČKOM VODLJIVOŠĆU (ARCHIJEVE STIJENE)

Proučavajući vodljivost pijesaka Archie (1942) je uvidio (predložio) proporcionalnost između vodljivosti slanom vodom saturiranog geomedija i vodljivosti slane vode (brine), kao i proporcionalnost otpornosti vodom zasićenog geomedija ρ_0 i otpornosti slane vode ρ_w, $\rho_0 \sim \rho_w$.

Proporcionalnost indicira da je elektrolitička vodljivost slane vode jedini mehanizam vodljivosti pa uvodi pojam formacijskog faktora otpornosti F.

$\rho_0 = F\ \rho_w$

F: izražava razinu povećanja otpornosti geo-formacije obzirom na sadržaj slane vode prisutne u ne-vodljivoj stijenskoj matrici (engl. formation).

Pokazalo se da je odnos logF-logn logaritamski omjer formacijskog faktora F i poroziteta n linearan (pravac nagiba -m) tj.

logF= -m logn

pa je nastala prva Archijeva jednadžba

$F = \rho_0 / \rho_w = n^{-m}$

m: eksperimentalno utvrđen eksponent cementacije

$m \approx 1.3$ za nekonsolidirane pijeske

m = 1.8 – 2.0 za konsolidirane pješčenjake.

Važnost Archijeve jednadžbe leži u činjenici da je (1942) dao prvi praktičan odnos između mjerljivog električnog svojstva tj. otpornosti stijenske formacije ρ_0 i važnog inženjerskog parametra poroziteta n (važno svojstvo rezervoarskih stijena).

Postoji i modificirani oblik Archijeve jednadžbe (Humble & Winsauer, 1952) za pijeske s parametrima a = 0.62 i m = 2.15 pa se osnovni izraz transformira

$F = n^{-m} \Longrightarrow F = a\, n^{-m}$ ili $F = 0.62\, n^{-2.15}$

$m = 1.87 + 0.019\, n^{-1}$ (Shellova jednadžba za slabo propusne karbonate s poroznošću n koja ovisi o cementaciji m).

Shellova formula se može dobro iskoristiti u karbonatima s poroznošću *n* = 0.04 – 0.25.

Daljnja istraživanja potvrdila su bolju aproksimaciju mjerenih podataka za dobro eksperimentalno određeni empirijski parametar *a*.

Miocenski pijesci: *a* = 1.97, *m* = 1.29

Pleistocenski pijesci: *a* = 2.45, *m* = 1.08

Vrijednosti parametara *a* i *m* su vrlo osjetljive na lokalna geološka stanja; *a* i *m* kontrolira geometrija pornih kanalića tj. teksturna svojstva stijene; valoviti kontakti imaju nešto veći *m* ≈ *2.2*, dok ispresijecani (engl. cross-beded) imaju manju vrijednost *m* ≈ *2.05.*

Formacijski faktor F u odnosu na poroznost karbonata dobro aproksimira mjerenja.

Kredni vapnenci: m = 1.7 – 1.8

Kristalinični i granularni karbonati: m = 1.8 – 2.0

"Rupičasti" karbonati (vugs: small unfilled cavities).

Load rock: genetski opisuje proces konsolidacije pod geološkim opterećenjem u "kvant"

obrnuto, različite vrijednosti m mogu biti indikatori morfologije pora uz poznatu geološku interpretaciju geneze.

m dominantno kontrolira geometrija vodljive trase (engl. paths), a ne volumna frakcija vode u porama.

3.6.3. OVISNOST ELEKTRIČNIH SVOJSTAVA O NAPREZANJIMA

Ako se vodljivi porni kanalići (trase vodljivosti) smanjuju deformacijom zbog naprezanja, onda *ρ* stijene raste, odnosno formacijski faktor *F* raste.

S porastom naprezanja *σ* otpornost *ρ* raste nelinearno (smanjuju se trase vodljivosti); nelinearno ponašanje deformacija-naprezanje rezultira nelinearnim ponašanjem *F*; porastom naprezanja smanjuje se veličina pora, odnosno "presjek vodiča" u stijeni, a osim toga se mijenja "krivudavost" pornih kanalića (engl. tortuosity).

Ustanovljen je proporcionalan odnos logaritama logF- logσ (naprezanje) odnosno $F \sim \sigma^g$ pri čemu je g eksponent naprezanja.

$F = 10^2 – 10^3$ [1], $\sigma = 10 – 10^3$ [MPa]

$F_p = F_1 \sigma^g$

F_1: formacijski faktor za σ = 1 [MPa]

F_p: formacijski faktor za aktualno naprezanje σ

u šejlovitim sedimentima je ustanovljeno da je nelinearan odnos F-σ podložan stvarnim ne-elastičnim deformacijama pa se pri opterećivanju i rasterećivanju javlja histereza

kada se određuje F i n pri istim razinama naprezanja za različite varijante istog geomedija, može se odrediti ovisnost m-σ; ipak je ustanovljen mali porast m s porastom naprezanja σ

ako se radi o suhim stijenama, onda porast σ uzrokuje bolje kontakte čvrste stijenske matrice pa će se povećati vodljivost kroz kompozit.

ARCHIEV ODNOS U NEKONSOLIDIRANIM SEDIMENTIMA

Nekonsolidiranim sedimentima je svojstvena relativno mala vrijednost faktora cementacije *m* = 1.1 – 1.3, a parametar geometrije pornih kanalića (presjek vodljivog dijela u stijenskom kompozitu, trasa vodljivosti) *a* ≈ 1.

m: faktor cementacije

a: koeficijent geometrije trase vodljivosti.

Istraživanje utjecaja oblika zrna na odnos F-n su pokazala linearnu ovisnost cementacije *m* i zaobljenosti (sferičnosti) S u obliku:

m = 1.8 S - 2.9

Izravna istraživanja odnosa F-n na brojnim mjernim podacima su pokazala tri tipa funkcijske ovisnosti:

- iracionalne funkcije (logn = f(log(F^{-1}))
- polinomi trećeg stupnja P3
- polinomi četvrtog stupnja P4.

Ustanovilo se da polinomi P3 imaju dovoljno slobode za dobru aproksimaciju podataka (Kermabon, 1969).

$n = -5.9021\ F^3 + 40.0416\ F^2 - 105.3899\ F + 171.2504$

za n u [%] u rasponu 45 – 85%.

Ako se izmjeri otpornost primjerice morske vode (ρ_w = 0.209 [Ωm]), a potom se mjere standardnim metodama otpornost formacija ρ_0, onda se može odrediti F(=ρ_0/ρ_w) iz različitih empirijskih izraza kao i porozitet n, primjerice:

Archie (1942): $\rho_w / \rho_0 = n^2$

Winsauer (1952):$\rho_w / \rho_0 = n^{2.15} / 0.62$

Boyce (1968):$\rho_w / \rho_0 = n^{1.45} / 1.30$

Kermabon (1969):polinom P3

Najbolju aproksimaciju daje onaj izraz koji se primjenjuje upravo na formacije iz kojih je razvijen!

ARCHIEV ODNOS U ISPLAKAMA

Primjenjuje se u karotažnim mjerenjima kada je važno poznavanje otpornosti isplake i isplačnog kolača (engl. mudcake) radi istraživanja stijenskih formacija u okolini bušotine.

Isplaka se smatra vrlo poroznim medijem tj. vodom saturiranim sedimentom, dok se filtrat suspenzije smatra pornom vodom (isplaka = isplačni kolač + isplačni filtrat $\Longrightarrow$ porozni medij = čvrste čestice + porni fluid).

Ako je isplaka bentonitna, onda se mogu koristiti indeksi $_b$ za isplaku i $_{bf}$ za isplačni filtrat.

Mjerenjem se ustanovila sljedeća analogija (oznake R ≡ ρ dolaze iz karotaže):

$\rho_0 = R_b$i $\rho_w = R_{bf}$

$R_{bf} = K_b\, R_b^{1.07}$ ili

$\rho_0 = (\rho_w / K_b)^{0.93}$

K_b je parametar koji opada s porastom gustoće isplake ili smanjenjem "poroznosti" isplake.

Ako se prati odnos R_{bf}/R_b za isplake sa svježom vodom (ρ = 0.1 – 2.0 [Ωm] pri 24°C) onda se iz odnosa (Loene & Dunlap, 1986): $\log(R_{bf}/R_b) = 0.396 - 0.0475\, d_b$

može odrediti gustoća d_b bentonitne isplake (kompozita) u [Mg m^{-3}].

Porozitet isplake nb odgovara izrazu:

$n_b = (d_s - d_b) / (d_s - d_w)$

d_s: gustoća čvrste komponente isplake (barit+bentonit)

d_b: gustoća isplake

d_w: gustoća vode.

ARCHIEV ODNOS I PARCIJALNA SATURACIJA VODOM

Ako dio pornog prostora ispunjava nevodljivi fluid (zrak) rezultirajuća otpornost stijenskog kompozita ρ_k će biti veća od otpornosti ρ_0 potpuno saturiranog geomedija, a odnos $\rho_k/\rho_0 = I$ se naziva indeks saturacije.

Podrazumijeva se da strujni tok formiraju samo elektroliti.

Archie (1942) je ustanovio da indeks saturacije I ovisi o stupnju saturacije S_w u obliku analognom prvoj jednadžbi tj.

$\log F = -m \log n$ (prva Archijeva jednadžba)

$\log I = -k \log S_w$(druga Archijeva jednadžba)

k: saturacijski eksponent za većinu stijena je $k \approx 2$

pa je konačan oblik druge Archieve jednadžbe

$\rho_k = \rho_0 S_w^{-k}$

Otpornost ρ_k parcijalno zasićene stijene ovisi o otpornosti vode, inženjerskim parametrima n i S_w i empirijskim parametrima m, a i k:

$\rho_k = \rho_0 S_w^{-k} = \rho_w a n^{-m} \rho_0 S_w^{-k}$

k se određuje eksperimentalno/empirijski, a karakterizira ga distribucija vode u pornom prostoru, odnosno tekstura stijene, svojstva močivosti pornog fluida i saturacijska povijest kapilarnih efekata; priprema i način saturiranja imaju veliki utjecaj na vrijednost eksponenta k.

Archievi parametri a i m su također bili podvrgnuti različitim i brojnim vrstama istraživanja obzirom na različite uvjete u stijenama: tekstura, naprezanje, temperatura.

Naprezanje znatno relativno slabo na vrijednosti m i k, a trend je blagi porast za porast naprezanja.

U vodom zasićenim stijenama promjena temperature utječe na promjenu vodljivosti vode u porama (porast T smanjuje otpornost).

Za temperature ispod 0°C se voda u porama smrzava, pa se otpornost općenito povećava; adsorbirani ioni gline međutim snižavaju temperaturu smrzavanja geomedija na približno -5°C.

Za stijene samo s jednom vodljivom komponentom (porna voda) postoji čitav spektar teorija i modela da bi se izrazila ovisnost vodljivosti stijene o vodljivosti pornog medija/ispune, odnosno o saturaciji, porozitetu i stijenskoj strukturi; ipak, Archieva empirijska pravila/izrazi se često koriste kao polazni i/ili referentni kriterij.

Vrlo često se električna vodljivost stijenske matrice ili pornog fluida u analizama zamjenjuje s njihovom termalnom vodljivošću.

Postoje i najčešće se koriste:

- modeli lamela i njihove modifikacije (1,2,3 lamele u različitim međusobnim orto-položajima)
- modeli pornih kanalića
- modeli sfera ili inkluzija (Maxwellovi modeli)
- modeli varijabilne unutrašnje strukture)

3.6.4. STIJENE S ELEKTROLITIČKOM I KONTAKTNOM VODLJIVOŠĆU

"Čiste" stijenske formacije se definiraju na dvo-komponentnom modelu:

- komponenta 1: voda kao vodljiva komponenta
- komponenta 2: stijenska matrica+ispuna kao ne-vodljiva komponenta.

Pri tome nema uzajamnog utjecaja tih komponenti, odnosno njihova su svojstva međusobno "zatvorena" pa su svojstva kompozita u konačnom obliku "zbroj" svojstava komponenata.

Kada u čvrstoj stijenskoj matrici postoje vodljive komponente, a uvjeti na kontaktu mineralnih zrna odnosno na pornoj površini osiguravaju dodatnu vodljivost, onda se radi o drugoj (dodatnoj) vodljivoj komponenti pa se Archievi temeljni koncepti trebaju modificirati (Patnode & Wyllie, 1950).

U analizi vodljivosti šejlovitih pijesaka i glinovitih suspenzija (engl. slurry) ustanovljeno je da se strujni tok ne formira samo kroz saturacijski fluid, već dodatnu trasu vodljivosti stvaraju "vodljiva tla" (engl. conductive soils) kao glinene čestice ili uski slojevi šejlova.

Glina ili kontaktni slojevi šejla kreiraju kontaktnu vodljivost (engl. interface conductivity or double-layer) koja se opisuje modelima (npr. Gouy-Chapman ili Stern) u kojem su komponente prikazane s dva paralelno spojena vodiča kroz koje teče struja pa vrijedi:

$\sigma_{shaly\ rock} = \sigma_{electrolitic} + \sigma_{clay} = \sigma_{water} / F + \sigma_{clay}$

(dvostruki kontakt: npr. nevodljiva matrica-glina i glina-porni fluid).

Elektrolitičku komponentu opisuju Archieve jednadžbe, dok kontaktna komponenta gotovo ne ovisi o vodljivosti porne vode; vodljivost stijene dominantno ovisi o elektrolitičkoj vodljivosti porne vode, ali se promjenama saliniteta može iz niza mjerenja jasno utvrditi separacija tih dvaju komponenti.

Kontaktni sloj (slojevi) je tanak film fino zrnate vodljive supstance kojom je obložena površina pornog prostora.

Unatoč velikom broju različitih varijacija modela i teorija fundamentalni koncept od 2 paralelna vodiča se koristi gotovo redovito; istraživanja su orijentirana obzirom na dva osnovna cilja:

- razmatranje različitih vrsta i distribucije glinene supstance
- razumijevanje fizikalno-kemijskih pojava na kontaktu.

MODEL LAMINARNOG ŠEJLA

Dva različita vodiča kao dvije komponente koriste se šejl i pijesak; oni se u sustavu ponašaju kao paralelni vodiči pa je vodljivost komponenata (lamela) $\lambda_{k.}$

$\sigma_k = (1 - V_{sh})\ \sigma_{sd} + V_{sh}\sigma_{sh}$

V_{sh}: frakcijski volumen šejla

σ_{ds}: vodljivost pijeska

σ_{sh}: vodljivost šejla.

Archieva jednadžba se primjenjuje samo na pijesak pa onda vrijedi:

$\sigma_{sd} = \sigma_w / F_{sd}$

$n_{sd} = n / (1 - V_{sd})$

F_{sd}: formacijski faktor pijeska

n_{sd}: porozitet pijeska

n: porozitet kompozita.

MODEL DISPERZIRANOG ŠEJLA

U disperziranom šejlu električna struja teče kroz vodenu suspenziju glinenih čestica (engl. slurry) koje se nalaze u pornom.

Model opisuju sljedeći parametri:

n_{im}: porozitet među-matričnog prostora tj. prostor koji zahvaća suspenzija

S_{im}: dio među-matričnog poroziteta koji zahvaća suspenzija

q: dio među-matričnog poroziteta koji zahvaćaju čestice gline

onda je formacijski faktor među-matričnog prostora $F = a\, n_{im}^{-m}$, a otpornost suspenzije ρ_{sus} u paralelnom modelu (ponderirane aritmetičke sredine)

$$\rho_{sus} = S_{im}\,((S_{im} - q)/\rho_w + q/\rho_{sh})^{-1}$$

$$S_{im}/\,\rho_{sus} = (S_{im} - q)/\rho_w + q/\rho_{sh}).$$

Vodljivost suspenzije (kao kompozita) tj. modela disperziranog šejla je:

$$\sigma_k = \rho_k^{-1} = (\rho_{sus}\, F_{im})^{-1} = (n_{im}^{-m}\, a\, \rho_{sus})^{-1}$$

Saturacija pornog prostora vodom S_w je frakcija prave efektivne poroznosti:

$$S_w = (S_{im} - q) / (1 - q).$$

U modelu šejlovitih pijesaka (Waxman & Smits, 1967) strujni tok kroz glinene čestice slijedi istu krivudavu putanju (engl. tortous path) kao i tok iona u pornoj vodi pa postoji jedinstveni faktor formacije F.

$$\sigma_0 = F^{-1}\,(\sigma_w + B\, Q_v)$$

B: empirijski parametar koji pokazuje mobilnost naboja suprotnog predznaka od naboja u vodljivoj supstanci (engl.counterion mobility)

$B = 3.83 (1 - 0.83 \exp(-0.5/\rho_w))$

$Q_v = (1 - n)/n\ d_s/100\ CEC$

Q_v: parametar šejlovitosti vezan uz kapacitet kationske izmjene CEC (engl. cation exchange capacity)

d_s: gustoća čvrste supstance [Mg m^{-3}]

n: porozitet kompozita.

CEC [mili-ekvivalenti na 100g supstance]

CEC je tipično svojstvo glina vezano uz njenu mineralnu strukturu; pločaste strukture su posljedica geometrijske prirode a postoje dva osnovna tipa:

- oktaedarske jedinice s O_2 i OH oko centralnog atoma Al
- tetraedarske jedinice s O_2 oko atoma Si.

Partikularna fizikalna svojstva glina su vezana uz dvije pojave:

- prisutnost H2O zarobljene između "ploča" utječe na vodljivost i poroznost, ali ne kao dio efektivne poroznosti
- prisutnost stranog negativnog površinskog naboja koji ima sposobnost apsorpcije iona (npr. radioaktivnih) i formiranja dvostrukih slojeva ako porni fluid djeluje kao elektrolit (osnova za CEC).

Osim u šejlovitim pijescima i glinama i u drugim poroznim geomedijima primijećena je dodatna vodljiva komponenta primjerice u fino zrnim pijescima posebno kada faktor F ovisi o salinitetu porne vode tj. o vodljivosti porne vode.

U konsolidiranim i nekonsolidiranim sedimentima dodatna vodljiva komponenta ovisi o specifičnoj unutrašnjoj površini, morfologiji pornih zidova i gustoći naboja na tim površinama.

Za vodom saturirane pijeske se može odrediti vodljivost prema izrazu (Rink & Schopper, 1974):

$\sigma_0 = \sigma_w /F + \sigma_q$

$\sigma_q = \alpha\ \beta\lambda^{-2}\ F^{-1}\ S_{por}$

α: gustoća naboja na površini [C/m^2]

β: mobilnost naboja u dvostrukom sloju [$V^{-1}\ s^{-1}\ m^2$]

λ^2: krivudavost površine zrna

Λ^2: krivudavost pora

S_{por}: specifična unutrašnja površina obzirom na porni volumen [m ili mm]

Prva aproksimacija za α i β (Pape & Whortington, 1983)

α = 0.51 [C/m^2], $\beta = 2.69\ 10^{-8}$ [$V^{-1}\ s^{-1}\ m^2$].

Konačno, istraživanja odnosa F-n i σ_q-D (promjer zrna) su pokazala da:

- volumna tj. elektrolitička ili Archieva vodljivost ovisi o volumenu pora (efekt volumena)
- kontaktna vodljivost ovisi o površini pora ili zrna (efekt površine).

Postoje korelacije σ_q-D_{sr} (srednji promjer zrna), jer D_{sr} pokazuje utjecaj specifične površine zrna tj. ako D_{sr} raste onda se specifična površina smanjuje pa je onda i kontaktna vodljivost manja.

U nekonsolidiranim sedimentima su ustanovljeni odnosi:

$F = n^{-1.4}$

$\sigma_q = 9\ 10^{-4}\ (D_{sr})^{-0.4}$ [S/m] za D_{sr} u [mm]

pa je ukupna vodljivost kompozita σ_0

$\sigma_0 = \sigma_w\ n^{-1.4} + 9\ 10^{-4}\ (D_{sr})^{-0.4}$ [S/m]

4. **ZAKLJUČAK**

Poznavanje fizikalnih svojstava je neophodno za razumijevanje promjena u geomediju, u konačnici u okolišu. Definiranje njihovih parametara, posebno kontrolnih, te oblikovanje odnosa (relacija) među njima danas je moguće zbog značajnog napretka istraživačkih tehnika mjerenja. Svojstva se ne koriste samo za klasifikacije i kategorizacije tla i stijena, već su neophodna za projektiranje i opažanje inženjerskih konstrukcija, odnosno važna su za analizu stanja i praćenje promjena u okolišu. Fizikalna svojstva koja se mjere i prate su: mehanička, radioaktivna, magnetska, termalna i električna svojstva.

Važna mehanička svojstva su poroznost, gustoća i elastičnost. U razlomljenim stijenama propusnost se smanjuje zbog procesa zatvaranja pukotina pri povećanju naprezanja. Gustoća ovisi o mineralnom sastavu i porozitetu. S porastom dubine relativna promjena gustoće opada kao rezultat pada kompresibilnosti. Elastičnost se može odrediti iz brzine seizmičkih valova kroz geomedij. S porastom naprezanja raste brzina kompresijskih valova, jer se zatvaraju mikropukotine, a guste stijene pokazuju zanemarivu ovisnost naprezanja i brzine valova.

Radioaktivnost magmatskih stijena raste od kiselih prema bazičnima. U sedimentnim stijenama se povećava s porastom zaglinjenosti, a u metamorfnim stijenama se radioaktivnosti smanjuje s porastom stupnja metamorfizma.

Magnetska svojstva opisuju ponašanje geomedija od utjecajem magnetskog polja, a ovise o doprinosu mineralnih komponenti, posebno titanovih i željezovih oksida.

Termalna svojstva su elektronska vodljivost i vodljivost rešetke te specifični toplinski kapacitet koji označava količinu topline koju tijelo može pohraniti, a proučavaju se zbog razumijevanja termalne strukture geomedija.

Električna vodljivost je najvažnije električno svojstvo. Porozne sredine i vodonosnici imaju veću električnu vodljivost od gustih stijena, jer ju povećava elektrolitička vodljivost vode.

Općenito se može zaključiti da poroznost geomedija značajno utječe na većinu fizikalnih svojstava, posebno na mehanička svojstva. Poroznost se i u inženjerstvu okoliša promatra kao posebno fizičko i inženjersko svojstvo, vrlo važno za procese i promjene koji se odvijaju u geomediju.

5. **LITERATURA**

(1.) Schön, J. H., 2004., Physical Properties of Rocks Fundamentales and Principles of Petrophysics, Institute of Applied Geophysics, Leoben, Austria, Elsevier.

(2.) Bell, F. G., 1992., Engineering Properties of Soils and Rocks 3rd Edition, Elsevier

(3.) https://www.britannica.com/science/rock-geology/Physical-properties#ref80185 <10. 10. 2019.>

(4.) https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/physical-property-of-rocks <10. 10. 2019.>

(5.) Forchheimer, P., 1901., Wasserbewegung durch boden. Z. Ver. Deutsch. Ing., 45:1782–1788.

(6.) Jakosky, J. J., 1960., Geofizička istraživanja, Exploration Geophysics 6th edition, Beograd: Naučna knjiga.

(7.) Raynolds, J. M. 2007. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley & Sons.

(8.) Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press.

(9.) http://gravmag.ou.edu/mag_rock/mag_rock.html <11. 11. 2019.>

(10.) http://www.gmtmetrology.com/faq <11. 11. 2019.>