

UNIVERZITET U BEOGRADU

HEMIJSKI FAKULTET



Nevena D. Antić

**Veza između fizičko-hemijskih svojstava i mineraloškog sastava kao pokazatelj osetljivosti i otpornosti sedimenata na procese erozije**

Doktorska disertacija

Beograd, 2026



UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF CHEMISTRY



Nevena D. Antić

**Correlation Between Physico-Chemical Properties  
and Mineralogical Composition as an Indicator of  
Sediments Susceptibility and Resistance to Erosional  
Processes**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026



**Mentori:**

---

**Dr Branimir Jovančičević**, redovni profesor  
Univerziteta u Beogradu - Hemijskog fakulteta

---

**Dr Milica Kašanin-Grubin**, naučni savetnik  
Univerziteta u Beogradu - Instituta za hemiju, tehnologiju i metalurgiju

**Članovi komisije:**

---

**Dr Jelena Trifković**, redovni profesor  
Univerziteta u Beogradu - Hemijskog fakulteta

---

**Dr Konstantin Ilijević**, docent  
Univerziteta u Beogradu - Hemijskog fakulteta

---

**Dr Violeta Gajić**, redovni profesor  
Univerziteta u Beogradu - Rudarsko-geološkog fakulteta

Datum odbrane : \_\_\_\_\_



## ZAHVALNICA

*Ova doktorska disertacija rezultat je istraživanja sprovedenog na Katedri za Primenjenu hemiju Hemijskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.*

*Veliku zahvalnost za mentorstvo i obezbeđene uslove za izradu ove doktorske disertacije, podršku, pružene mogućnosti i sve korisne savete tokom ovih šest godina upućujem mentoru dr Branimiru Jovančičeviću.*

*Zahvaljujem se članovima komisije, dr Jeleni Trifković, redovnom profesoru Hemijskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr Konstantinu Ilijeviću, docentu Hemijskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr Violeti Gajić, redovnom profesoru Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu na izdvojenom vremenu, sugestijama koje su značajno unapredile ovaj rad i na učešću u odbrani.*

*Posebnu zahvalnost dugujem kolegama sa Katedre za primenjenu hemiju na besprekornoj kolegijalnosti, a naročito članovima laboratorija 632 i 629 na nezaboravnom druženju.*

*Veliku zahvalnost dugujem i Nevenki Mijatović, Lazaru Kaluđeroviću i Violeti Gajić na stručnoj pomoći, kao i Milici Stefanović na nesebičnoj podršci i savetima. Hvala i svima onima koji su svojim brzim reakcijama omogućili da se svi krizni trenuci brzo prebrode.*

*Posebno mesto u ovoj zahvalnici, za predloženu temu, nesebičnu pomoć i dragocene savete tokom izrade i pisanja rada, pripada dr Milici Kašanin-Grubin. Ipak, najveću zahvalnost joj dugujem za sve prave reči upućene u trenucima životnih nedoumica, za svaki gromoglasni smeh na našim nezaboravnim i mnogobrojnim putovanjima, ali prvenstveno za to što je verovala u mene i onda kada ja nisam.*



# Veza između fizičko-hemijskih svojstava i mineraloškog sastava kao pokazatelj osjetljivosti i otpornosti sedimenta na procese erozije

## Sažetak

*Badlands* tereni predstavljaju geološki mlade i lako erodujuće predele koje definišu specifičan litološki sastav i intezivni klimatskim uticaji. Savremena nauka naglašava da je za potpuno razumevanje ovih sistema neophodno dovesti u vezu različite tipove *badlands* stena sa specifičnim klimatskim uslovima u kojima se nalaze. Međutim, iako se danas većina istraživanja zasniva na kvantifikaciji stope erozije i geomorfološkoj evoluciji samih terena, za potpunu naučnu sliku neophodne su detaljne analize sedimentata koje osvetljavaju dublje mehanizme ovih procesa. Razumevanje interakcije između litološkog sastava i klimatskih faktora, može predvideti kako će ovi krhki sistemi reagovati na buduće klimatske ekstreme.

Kroz seriju laboratorijskih simulacija klimatskih uslova, ova doktorska disertacija potvrdila je hipotezu da vrsta minerala i njihova fizičko-hemijska svojstva u sedimentu znatno utiču na njegovu osjetljivost i otpornost. Dobijeni rezultati ukazali su na mogućnost diferencijacije sedimentata prema mehanizmima njihove degradacije, ali i istakli da je za određivanje dinamičke evolucije *badlands* terena potrebno sagledati upravo njihova mineraloška i fizičko-hemijska svojstva.

Fizičko-hemijska karakterizacija preko 100 uzoraka *badlands* sedimentata dala je osnov za novu klasifikaciju u kojoj su se istakle stene sa metamorfnim, magmatskim i tufoznim karakterom kojima u dosadašnjim studijama nije posvećivano previše pažnje. Rezultati analize *badlands* sedimentata i njihova kombinacija sa saznanjima o disperznosti i mineraloškom sastavu sedimentata, izdvojila je granulometrijski sastav i sadržaj CaO i SiO<sub>2</sub> kao ključne parametre u novoj klasifikaciji koja se može dovesti u vezu sa odgovarajućim procesima raspadanja.

I najvažnije, kvantifikacijom odosa SiO<sub>2</sub>/CaO za ispitivane uzorke, pokazalo se da odnos SiO<sub>2</sub>/CaO < 10 pored tipičnih *badlands* sedimentata (finozrni i tufozni) mogu imati još samo Ca-kрупni i sitni klastiti. Sa druge strane, odnos SiO<sub>2</sub>/CaO > 20 pored tipičnih *badlands* sedimentata (finozrni i tufozni) imaju i Si-terigeni klastiti i piroklastiti. U opsegu vrednosti SiO<sub>2</sub>/CaO = 10-20 nalaze se tipični finozrni *badlands* tereni koji ispunjavaju postavljene kriterijume disperznosti.

**Ključne reči:** *badlands*, procesi raspadanja, fizičko-hemijska karakterizacija, klimatski eksperimenti, nova klasifikacija

**Naučna oblast:** Hemija

**Uža naučna oblast:** Primenjena hemija



# Correlation Between Physico-Chemical Properties and Mineralogical Composition as an Indicator of Sediment Susceptibility and Resistance to Erosional Processes

## Abstract

*Badlands* terrains represent geologically young and easily eroding landscapes defined by specific lithology and intense climatic influences. Modern science emphasizes that for a complete understanding of these systems it is necessary to relate the different types of *badlands* rocks to the specific climatic conditions in which they are found. However, although today most of the research is based on the quantification of the erosion rate and the geomorphological evolution of the terrains themselves, for a complete scientific picture, detailed analyzes of the sediments are necessary, which shed light on the deeper mechanisms of these processes. Understanding the interaction between lithologic composition and climate factors can predict how these fragile systems will respond to future climate extremes.

This doctoral dissertation, through a series of laboratory climate experiments on *badlands* sediments, confirmed the hypothesis that the type of minerals and their physico-chemical properties in the sediment significantly affects its sensitivity and resistance was confirmed as correct. The obtained results indicated the possibility of differentiating sediments according to the mechanisms of their degradation, but also pointed out that in order to determine the dynamic evolution of *badlands* terrain, it is necessary to look at their mineralogical and physical-chemical properties.

Physico-chemical characterization of over 100 samples of *badlands* sediments provided the basis for a new classification in which rocks with metamorphic, magmatic and tuffous character were highlighted, which were not given much attention in previous studies. The results of the analysis of *badlands* sediments and their combination with knowledge about the dispersity and mineralogical composition of the sediments, singled out the granulometric composition and content of CaO and SiO<sub>2</sub> as key parameters in the new classification that can be linked to the corresponding decomposition processes.

Most importantly, by quantifying the ratio of SiO<sub>2</sub>/CaO for the tested samples, it was shown that the ratio SiO<sub>2</sub>/CaO < 10 in addition to typical *badlands* sediments (fine-grained and tuffaceous) can also have Ca-coarse and small clastites. On the other hand, in addition to typical *badlands* sediments (fine-grained and tuffaceous), Si-terrigenous clastites and pyroclastites also have a ratio of SiO<sub>2</sub>/CaO > 20. In the value range of SiO<sub>2</sub>/CaO = 10-20, there are typical fine-grained *badlands* terrains that meet the set dispersity criteria.

**Key words:** *badlands*, weathering processes, physico-chemical characterisation, climate experiments, new classification

**Scientific field:** Chemistry

**Scientific subfield:** Applied chemistry



## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. OPŠTI DEO .....	3
2.1 STENE .....	3
2.1.1 Magmatske stene.....	3
2.1.2 Sedimentne stene.....	5
2.1.3 Metamorfne stene.....	6
2.2 MINERALI.....	8
2.2.1 Tektosilikati.....	8
2.2.2 Filosilikati.....	9
2.2.2.1 Minerali glina .....	10
2.2.3 Inosilikati.....	14
2.2.4 Nezosilikati .....	15
2.2.5 Sorosilikati i ciklosilikati .....	16
2.2.6 Oksidi i hidroksidi.....	16
2.2.7 Karbonati.....	17
2.2.8 Sulfati .....	17
2.2.9 Fosfati .....	18
2.2.10 Sulfidi .....	18
2.2.11 Elementi .....	18
2.3 POVRŠINSKO RASPADANJE STENA.....	19
2.3.1 Mehaničko površinsko raspadanje.....	19
2.3.2 Hemijsko površinsko raspadanje.....	21
2.3.3 Biogeno raspadanje.....	22
2.4 PADINSKI PROCESI .....	23
2.4.1 Deluvijalni proces .....	23
2.4.2 Proluvijalni proces.....	23
2.4.3 Koluvijalni proces .....	25
2.5 KÖPPENOVA KLASIFIKACIJA KLIME.....	27
2.6 BADLANDS TERENI.....	33
2.6.1 Eksperimenti na badlands sedimentima .....	38
2.6.2 Indeksi raspadanja .....	39
3. METODOLOGIJA .....	44
3.1. KLIMATSKI EKSPERIMENTI .....	44
3.1.1 Priprema uzoraka .....	44
3.1.2 Aparatura za simulaciju kiše.....	44
3.1.3. Simulacije različitih padavina .....	45

3.1.4. Simulacija temperaturnih promena.....	45
3.1.5 Praćenje fizičko-hemijskih parametara.....	46
3.2 Mineraloški sastav .....	46
3.3. Petrografske analize .....	47
3.4 Test potapanja.....	47
3.5 Koeficijent adsorpcije natrijuma.....	47
3.6 Statistička analiza .....	47
4. REZULTATI I DISKUSIJA .....	48
4.1 KLIMATSKI EKSPERIMENTI.....	48
4.2 KLIMATSKI EKSPERIMENT NA SEDIMENTIMA ISTOG LITOLOŠKOG SASTAVA .....	50
4.2.1 Karakteristike ispitivanog područja .....	50
4.2.2 Postavka klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava .....	52
4.2.3 Rezultati klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava.....	53
4.2.3.1 Mineraloški sastav neraspadnutih uzoraka sedimenata .....	53
4.2.3.2 Površinske fizičke promene uzoraka .....	54
4.2.3.3 Zapremina izluženog rastvora i pH vrednosti .....	60
4.2.3.5 Koncentracija jona .....	64
4.2.4 Tumačenje rezultata klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava.....	64
4.2.5 Ishod klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava .....	70
4.3 KLIMATSKI EKSPERIMENT NA SEDIMENTIMA RAZLIČITOG LITOLOŠKOG SASTAVA ..	72
4.3.1 Karakteristike ispitivanih područja .....	72
4.3.2 Postavka klimatskog eksperimenta na sedimentima različitog litološkog sastava ..	77
4.3.3 Rezultati klimatskog eksperimenta na sedimentima različitog litološkog sastava ..	77
4.3.3.1 Površinske fizičke promene .....	78
4.3.3.2 Zapremina, pH i električna provodljivost izluženih rastvora .....	91
4.3.3.3 Koncentracije jona izluženih rastvora .....	94
4.4 FIZIČKO-HEMIJSKA KARAKTERIZACIJA BADLANDS SEDIMENATA .....	99
4.5 BADLANDS TERENI FORMIRANI U VULKANOKLASTIČNIM STENAMA .....	113
4.5.1 Karakteristike ispitivanog područja .....	113
4.5.2 Rezultati ispitivanja badlands terena formiranih u vulkanoklastičnim stenama ...	116
4.5.3.1 Mineraloški sastav .....	116
4.5.3.2 Hemijski sastav .....	120
4.5.4 Tumačenje rezultata badlands terena formiranih u vulkanoklastičnim stenama...	121
4.5.5 Ishod ispitivanja badlands terena formiranih u vulkanoklastičnim stenama.....	127
5. ZAKLJUČAK .....	129
LITERATURA.....	131
BIOGRAFIJA.....	139



## 1. UVOD

*Badlands*<sup>1</sup> tereni predstavljaju geološki mlade i lako erodujuće predele koji se formiraju u slabo konsolidovanim, sitnozrnim materijalima pod uticajem specifičnih klimatskih uslova. Ove terene definišu specifičan litološki sastav i intezivni klimatski uticaji. Najčešće se javljaju u aridnim i mediteranskim predelima, a karakteriše ih oskudna vegetacija čije odsustvo dodatno ubrzava procese erozije. Važnu ulogu u njihovoj stabilnosti ima složen mineraloški sastav, prvenstveno prisustvo minerala gline koji zbog svoje velike aktivne površine bivaju podložni spoljašnjim uticajima. Pored mineralogije, otpornost ovih sedimenata na raspadanje značajno zavisi i od stepena sortiranosti čestica, pri čemu mešavina različitih veličina doprinosi većoj stabilnosti.

Savremena nauka naglašava da je za potpuno razumevanje ovih sistema neophodno dovesti u vezu različite tipove *badlands* stena sa specifičnim klimatskim uslovima u kojima se nalaze. Takav holistički pristup omogućava identifikaciju kritičnih granica padavina i topografije koje su odgovorne za evoluciju reljefa. Međutim, iako se danas većina istraživanja zasniva na kvantifikaciji stope erozije i geomorfološkoj evoluciji samih terena, za potpunu naučnu sliku neophodne su detaljne analize sedimenata koje osvetljavaju dublje mehanizme ovih procesa. Poseban akcenat treba staviti na hemijsko raspadanje, koje je u literaturi neretko zanemareno u odnosu na mehaničko.

Povezivanje specifičnih reakcija različitih tipova *badlands* sedimenata sa klimatskim uslovima, kao i razumevanje odgovora terena na globalne promene predstavlja centralni fokus ove doktorske disertacije. Na osnovu toga, hipoteza ove disertacije je da vrsta minerala i njihova fizičko-hemijska svojstva u sedimentu znatno utiču na njegovu osetljivost i otpornost, te da je za određivanje dinamičke evolucije *badlands* terena potrebno sagledati upravo njihova mineraloška i fizičko-hemijska svojstva. Razumevanje interakcije između litološkog sastava i klimatskih faktora, može predvideti kako će ovi krhki sistemi reagovati na buduće klimatske ekstreme.

Naučni cilj predložene doktorske disertacije obuhvata:

- 1) fizičko-hemijsku karakterizaciju neraspadnutih uzoraka *badlands* sedimenata;
- 2) klasifikaciju *badlands* sedimenata na osnovu njihovih fizičko-hemijskih svojstava;
- 3) definisanje osetljivosti i otpornosti sedimenata pod različitim, simuliranim klimatskim uslovima u odnosu na njihov litološki sastav.

Ovo istraživanje je kroz laboratorijske klimatske eksperimente na *badlands* sedimentima istog litološkog sastava, potvrdilo hipotezu da tereni istog sastava imaju drugačije ponašanje zavisno od uslova okruženja u kom se nalaze, dok se kroz klimatske eksperimente na sedimentima različitog litološkog sastava potvrdilo da se na terenima različitog litološkog sastava mogu odvijati različiti procesi erozije u zavisnosti od litološkog sastava. Sprovedeni eksperimenti su pored potvrde hipoteze ukazali na moguću klasifikaciju *badlands* sedimenata prema dominaciji mehanizama njihove degradacije. Kako su eksperimenti sprovedeni na relativno malom broju uzoraka i kako su površinske i podpovršinske fizičko-mehaničke promene i njihova kvantifikacija mnogo ispitivaniji, ali retko dovodeni u vezu sa prirodom samog sedimenta, u narednoj fazi istraživanja ispitivana su fizičko-hemijskih svojstava i veze između sastava samih sedimenata sa njihovim dinamičnim ponašanjem na terenu. Preko sto *badlands* sedimenata okarakterisano je fizičko-hemijski kroz analize njihovog granulometrijskog sastava, električne provodljivosti, pH vrednosti i sadržaja makroelemenata. Analiza tako okarakterisanih uzoraka, u kombinaciji sa saznanjima o disperznosti i

---

<sup>1</sup> *badlands* - termin čiji prevod na srpski jezik (rdave zemlje) tokom vremena nije zaživeo, te je u stalnoj upotrebi ostao naziv na engleskom jeziku

mineraloškom sastavu sedimenata, izdvojila je granulometrijski sastav i sadržaj CaO i SiO<sub>2</sub> kao ključne parametre u novoj klasifikaciji *badlands* sedimenata koja se može dovesti u vezu sa odgovarajućim procesima raspadanja. Novoformirana klasifikacija *badlands* sedimenata, između ostalih, izdvojila je sedimente sa metamorfnim, magmatskim i tufoznim karakterom matičnih stena kao jednu od grupa specifičnih svojstava koji odlikuju veliki broj terena, ali kojima u dosadašnjim studijama nije posvećivano previše pažnje. Rezultat toga jeste treća faza ove teze u kojoj su ispitivana dva tipa vulkanoklastičnih stena sa ciljem usporedbe svojstva vulkanoklastičnog materijala sa ključnim svojstvima *badlands* sedimenata i uspostavljanja veza između postojećih geomorfoloških procesa i procesa, u literaturi dosada ispitivanih materijala. Različita svojstva sedimenata ispitivanih vulkanoklastičnih terena pokazala su se međusobno sličnim, ali u određenoj meri i jedinstvenim, u odnosu na već dobro poznate *badlands* sedimente, sugerišući da vulkanoklastični materijal, iako specifičan za svaki lokalitet ipak dovoljno „loš“ tj. nestabilan/erodibilan da formira jedinstvene *badlands* formacije, otvarajući nova naučna pitanja i, uz pomoć budućih istraživanja, mogućnost uspostavljanja nove podgrupe u *badlands* klasifikaciji, koja bi uključivala samo vulkanoklastične stene i male terene poput ovih stavljala na istraživačku i geoturističku kartu.

# 1. OPŠTI DEO

## 1.1 STENE

Prirodni agregati, koji predstavljaju čvrsti deo Zemljine kore i koji mogu biti izgrađeni od jednog (monomineralni) ili više (polimineralni) minerala, nazivaju se stene. U zavisnosti od njihovog načina postanka, razlikuju se magmatske stene, sedimentne stene i metamorfne stene.

### 1.1.1 Magmačke stene

Prvonastale magmačke stene su posledica hlađenja magme tj. usijanog tečnog, homogenog rastopa koji je izgrađen od 90% teškoisparljivih i 10% lakoisparljivih sastojaka, u unutrašnjosti, odnosno lave na spoljašnosti Zemljine kore. Magmačke stene se mogu klasifikovati prema različitim osnovima. Jedan od njih jeste upravo njihov sklop, koji je definisan strukturom i teksturom stene i koji predstavlja uticaj uslova kristalizacije i geoloških procesa koji deluju tokom ili neposredno nakon nastanka stene.

Struktura stene je posledica brzine kristalizacije magme/lave i okarakterisana je oblikom, veličinom i međusobnim odnosom sastojaka tj. minerala. Kod magmačkih stena razlikujemo zrnastu i porfirsku strukturu. Zrnasta struktura magmačkih stena nastaje hlađenjem magme u dubljim slojevima Zemljine kore, pri čemu minerali, odnosno zrna, u jednoj fazi jasno kristališu i približno su jednake veličine. Porfirska struktura magmačkih stena okarakterisana je dvofaznom kristalizacijom, odnosno postojanjem prvoisokristalinih fenokristala tj. krupnijih kristala koji su nastali postepenim hlađenjem magme u dubljim slojevima Zemljine kore i postojanjem osnovne mase tj. mase koja nije u potpunosti iskristalinala. Pored zrnaste i porfirske strukture, prepoznata je i porfiroidna struktura kod koje su, u odnosu na zrnastu strukturu, zrna nekih minerala krupnija od ostalih, dok u poređenju sa porfirskom strukturom, kod porfiroidne razlika između fenokristala i osnovne mase nije jasno uočljiva.

Tekstura stene je okarakterisana prostornim rasporedom minerala u steni i predstavlja odraz geoloških događaja koji su se odvijali tokom ili neposredno nakon kristalizacije magmačkog rastopa. Neki od najpoznatijih tipova teksture magmačkih stena su homogena ili masivna, planparalelna, škrljjava, fluidana i mehurasta tekstura. Homogena ili masivna tekstura je najjednostavniji oblik teksture stene, u kom su svi sastojci stena ravnomerno raspoređeni. Planparalelna i škrljjava tekstura nastaju uticajem usmerenih pritisaka na magmu tokom ili neposredno nakon njenog hlađenja. Takva vrsta pritiska izaziva pločastu ili listastu orijentaciju minerala, a samim tim i stenu sa paralelno orijentisanim zrnima minerala. Razlika između planparalelne i škrljave teksture je u jačini pritiska, koji je intenzivniji kod škrljave teksture. Fluidna tekstura nastaje naglim hlađenjem lave koja teče, dok mehurasta nastaje kada u steni zaostanu mehuri gasa. Ukoliko se radi o velikom broju šupljina, takva mehurasta tekstura se naziva šljakasta, a ukoliko su te šupljine ispunjene sekundarnim mineralima, tekstura se prepoznaje kao mandolasta.

Pored strukture i teksture, magmačke stene karakterišu i minerali koji ulaze u njen sastav. Minerali koji ulaze u sastav magmačkih stena se mogu klasifikovati kao bitni, odnosno oni koji daju određeni karakter steni, i to su kvarc, feldspati, pirokseni, amfiboli i olivini i sporedni minerali koji su zastupljeni u određenim količinama, ali ne utiču na karakterizaciju stene, i to su magnetit, apatit, pirit, itd. U zavisnosti od trenutka nastanka, razlikujemo primarne i sekundarne minerale. Primarni minerali su formirani kada i sama stena, dok su sekundarni nastali daljom transformacijom primarnih. Najkorišćenija klasifikacija minerala jeste prema njihovoj boji i to na svetle (salske) i boljene ili tamne (femske). Predstavnici svetlih minerala su kvarc i feldspati, naziv salski potiče upravo od hemijskog sastava tih minerala tj. od Si i Al. Predstavnici obojenih minerala su biotit, amfiboli, pirokseni i olivin i naziv femski takođe potiče od njihovog hemijskog sastava tj. od Fe i Mg.

Prema sadržaju silicijuma ( $\text{SiO}_2$ ) tj. prema hemizmu, magmatske stene se dele na:

- kisele stene: sadržaj  $\text{SiO}_2$  preko 66%;  $\text{SiO}_2$  je u steni u vidu kvarca, stena je izgrađena od salskih i femskih minerala
- prelazne-intermedijarne stene: sadržaj  $\text{SiO}_2$  od 52% - 66% (prosečno 60%); stena je izgrađena od salskih i femskih minerala, ali nema kvarca,
- bazične stene: sadržaj  $\text{SiO}_2$  od 45% - 52%; stena je izgrađena od salskih i dominantno femskih minerala,
- ultrabazične stene: sadržaj  $\text{SiO}_2$  ispod 45%; stena je izgrađena samo od femskih minerala.

Prema nivou hlađenja, magmatske stene se dele na:

- dubinske stene koje nastaju hlađenjem magme u dubini Zemljine kore,
- žične stene koje nastaju hlađenjem magme u pukotinama kroz koje se magma kreće ka površini,
- izlivne ili vulkanske stene koje nastaju hlađenjem lave na površini Zemlje.

Kombinovanjem hemizma i mineralnog sastava, formira se nekoliko grupa magmatskih stena, pri čemu svakoj dubinskoj steni odgovara površinska vulkanska stena. Prema tome, magmatske stene se dele na:

- granite i riolite,
- granitoide,
- sijenite i trahite,
- moncionite i diorite,
- gabro i bazalt,
- peridotite.

Grupa granita i riolita je grupa kiselih magmatskih stena koje su izgrađene od kvarca, K-feldspata ili kiselog plagioklasa kao predstavnika alkalnih feldspata i primarno liskuna, najčešće biotita kao obojenog minerala. Granit je predstavnik dubinske stene, a riolit izlivne stene. Žične stene ove grupe mogu biti ašistne, ukoliko po hemizmu odgovaraju granitima, ili diašistne, ukoliko se razlikuju od granita.

Grupa granitoida je kisela grupa magmatskih stena, čiji je sadržaj  $\text{SiO}_2$  niži nego u grupi granita i riolita i koji zbog toga pored kvarca i alkalnih feldspata sadrže i intermedijarni plagioklas, a od bojnih minerala, sadrže hornblendu pored biotita. Predstavnici dubinske stene ove grupe, u zavisnosti od alkalnih feldspata i intermedijarnih plagioklasa mogu biti: monocgranit, kvarcmoncionit, granodiorit ili kvarcdiorit. Postoji samo nekoliko ašistnih stena ove grupe koje su malih dimenzija, dok kod izlivnih stena razlikujemo kvarclatit i dacit.

Grupa sijenita i trahita je grupa intermedijarnih stena koja, međutim ima neke osobine kiselih stena. Prema mineralnom sastavu, grupa sijenita i trahita podseća na grupu granita, ali za razliku od nje, nema kvarc, ili ga ima u jako malim količinama (manje od 5%). Ova grupa je izgrađena od alkalnih feldspata, i dominantno hornblende kao bojnih minerala. Predstavnik dubinske stene ove grupe je sijenit, žične sijenitporfir, a izlivne trahit i keratofir.

Grupa monconita i diorita je grupa intermedijarnih stena, koje, pored alkalnih feldspata sadrže i intermedijarni plagioklas i hornblendu ili klinopiroksen kao bojne minerale. Predstavnici dubinske stene ove grupe su moncionit i diorit, žične monconitporfir i dioritporfir, a izlivne latit, andezit i porfir.

Grupa gabra i bazalta je grupa bazičnih stena u kojima je glavni svetli sastojak bazični plagioklasom, bojni monoklinični i ređe rombični piroksen. Predstavnik dubinske stene ove grupe je gabro, žične gabropegmetit i dijabaz, a izlivne bazalt, dijabaz i spilit.

Grupa peridotita je grupa ultrabazičnih stena u kojima opada sadržaj silicijuma i aluminijuma, a raste sadržaj magnezijuma i gvožđa, te oni ne sadrže feldspate, već samo bojene minerale, i to najčešće olivine, ali i piroksene. Predstavnici dubinske stene ove grupe su duniti, harcburgiti, lertzoliti, verliti, kortlanditi i biotitski peridotiti, žične pirokseniti i hornblenditi, a izlivne pikriti i pikritporfiriti.

### 2.1.2 Sedimentne stene

Sedimentne ili taložne stene, su stene nastale nagomilavanjem usitnjenih ili rastvorenih, već postojećih stena i proces stvaranja sedimentnih stena se odvija kroz četiri faze, i to kroz:

- raspadanje,
- transport,
- sedimentaciju,
- dijagenezu.

Površinsko raspadanje je prva faza u formiranju procesu nastanka sedimentnih stena, i tokom raspadanja se obezbeđuje materijal neophodan za stvaranje nove stene. Raspadanje stene može biti mehaničko, hemijsko i biogeno, pri čemu mehaničko raspadanje podrazumeva usitnjavanje površinskih delova stene, i njen prelazak iz čvrstog u rastresito stanje, uzrokovano različitim spoljašnjim mehaničkim faktorima. Hemijsko raspadanje podrazumeva delimično ili potpuno rastvaranje površinskih slojeva, izazvano uticajem površinskih ili podzemnih voda. Biogeno rastvaranje se može svesti na mehaničko ili hemijsko raspadanje i uzrokovano je dejstvom živih organizama na površinske slojeve stena.

Transport podrazumeva prenošenje rastresitog materijala do mesta njegove sedimentacije, odnosno taloženja. Transport mehanički raspadnutog materijala može biti uzrokovan silom gravitacije, površinskim tokovima, vetrom ili glečerima, a hemijski raspadnutog materijala isključivo podzemnim ili površinskim vodama. Međutim, transport materijala kao jedna od osnovnih faza formiranja sedimentnih stena može da izostane ukoliko se uslovi za formiranje stene steknu na samom mestu površinskog raspadanja.

Dijageneza je faza litifikacije ili okamenjivanja nataložene rastresite stenske mase. Ova faza može da traje dugo, ali se uglavnom odvija sinhrono sa fazom sedimentacije. Litifikacija najčešće podrazumeva taloženje neke materije iz rastvora koji prolazi kroz stenu i koji tako istaložen vezuje rastresitu masu.

Prema mineralnom sastavu dele se na sedimentne stene alotigenih, odnosno već formiranih minerala koji dospevaju do mesta sedimentacije i autigenih minerala koji se formiraju u procesu nastanka stene, dok se prema načinu postanka dele na:

- klastične ili mehaničke,
- hemijske,
- i organogene.

Kao i magmatske, i sedimentne stene imaju svoj sklop, odnosno svoju strukturu i teksturu. Klastična sturktura je okarakterisana prisustvom alogenih fragmenata koji mogu, ali i ne moraju biti vezani tj. cementirani i oni se prema veličini zrna dele na:

- psefitske: veličina zrna >2mm,
- psamitske: veličina zrna 2-0,05mm
- alevritske: veličina zrna 0,05-0,005mm
- pelitske: veličina zrna <0,005mm.

Za razliku od klastičnih, hemijske sedimentne stene uglavno imaju kristalnu strukturu sa sraslim autigenim mineralima i hemijske sedimentne stene u zavisnosti od veličine zrna mogu

biti mikrokristalaste strukture, koja se ne može videti golim okom, makrokristalaste strukture, vidljive golim okom ili amorfne, kombinovane strukture. Organogene sedimentne stene, nose organogenu strukturu.

Kada se govori o teksturi, karakteristična za sedimentne stene je slojevitost tj. homogeni sastav, velikog horizontalnog, a malog vertikalnog rasprostiranja. Gradaciona slojevitost odnosno promene veličine fragmenata u okviru jednog sloja, ukazuju na klastični materijal, trake različitih boja tj. trakasta struktura na hemijske sedimente, a šupljikava tekstura nastala izumiranjem biljaka na organogene sedimente.

Klastične sedimentne stene se prema stepenu dijageneze dele na nevezane, poluvezane i vezane, a prema veličini fragmenata i njihovom stepenu dijageneze dele na:

- psefite i psefitolite,
- psamite i psamitolite
- alevrite i alevrolite,
- pelite i pelitoite.

Nevezani predstavnici grupe psefite i psefitolite su drobina, nastala mehaničkim raspadanjem pri čemu zrna imaju veličinu  $>2\text{mm}$  i nezaobljen oblik, usled odsustva ili usled kratkog transporta i šljunak, koji za razliku od drobine ima duži transportni put, pa shodno tome i zaobljenija zrna. Predstavnici psefitolita, vezanih sedimenta su breča, nastala cementovanjem drobine i konglomerati nastali vezivanjem šljunka. Psamiti, nevezani predstavnici grupe psamite i psamitolite, imaju veličinu zrna od  $2-0,05\text{mm}$ , zaobljena zrno usled dugog transporta i pesak kao predstavnika. Vezani, odnosno cementovani pesak se naziva pešćar. Klastični predstavnici grupe čija je veličina čestice  $0,05-0,005\text{mm}$  je alevrit i alevrolit. Grupa pelita i pelitolita čija je veličina čestice  $<0,005\text{mm}$ , za razliku od prethodnih grupa ima i nevezani oblik, mulj, poluvezani oblik, glinu i vezani oblik odnosno glinac.

Hemijske i organogene sedimentne stene su uglavnom izgrađene od karbonatnih minerala koje najvećim delom čine krečnjaci, koji u zavisnosti od načina nastanka mogu biti hemijski, klastični ili organogeni. Krečnjaci su izgrađeni od kalcita, koji sadrže primese koje ih boje, te se shodno tome razlikuju laporoviti, glinoviti, gvožđeviti, peskoviti krečnjaci, itd. Dolomiti su izgrađeni od minerala dolomita, slični su krečnjacima, ali za razliku od krečnjaka, koji reaguju sa hladnom HCl, dolomiti ne reaguju, tj. reaguju sa toplom HCl. Bigar nastaje taloženjem  $\text{CaCO}_3$  oko biljaka koje rastu u vodi bogatoj kalcijum-bikarbonatom i koje apsorbiraju  $\text{CO}_2$ . Tako obložene, biljke trule i ovakva stena postaje šupljikava i često se još naziva i karbonatni tuf. Mermerni oniks je izgrađen od kalcita ili aragonita, dok je rožnac izgrađen od minerala  $\text{SiO}_2$  (kvarc, kalcedon, opal, itd.).

Pored klastičnih, hemijskih i organogenih, još jednu podgrupu sedimentnih stena čine i vulkanoklastične stene nastale taloženjem vulkanoklastičnog materijala. Za razliku od ostale tri grupe, materijal za stvaranje vulkanoklastičnih stena nastaje direktno iz vulkana tj. ne postoji faza raspadanja, dok se taloženje i dijageneza odvijaju kao i kod ostalih sedimentnih stena. Predstavnik ove grupe stena je najčešće tuf, nastao cementovanjem vulkanskog peska, pepela i prašine. Ukoliko se takav vulkanoklastični materijal ipak taloži u vodenoj sredini, i meša sa drugim sedimentima, nastaju tufiti.

### 2.1.3 Metamorfne stene

Pod metamorfnim promenama se podrazumevaju promene izazvane pritiskom, temperaturom i dejstvom fluida, ali u unutrašnjosti Zemlje, pa se shodno tome u metamorfne stene ubrajaju stene koje su promenile svoj prvobitni sastav ili strukturu usled fizičko-hemijskih promena. Ukoliko metamorfizam ne menja hemizam stene, naziva se izohemijski, a ukoliko ga menja, naziva se alohemijski. Pored toga, razlikuju se i orto-metamorfne stene,

nastale metamorfizmom magmatskih, i para-metamorfne stene, nastale metamorfizmom sedimentnih stena. Karakteristično za mineralni sastav metamorfnih stena jeste to da su minerali najčešće nastali prilagođavanjem kristalne rešetke primarnih minerala, novonastalim uslovima. U zavisnosti od faktora koji su prisutni u metamorfizmu, razlikujemo regionalno dinamo-termalni metamorfizam, izazvan povećanjem temperature i hidrostatičkog pritiska na velikim prostranstvima i kontaktni metamorfizam, izazvan kontaktom magme i okolnih stena u koje se utiskuje.

Kao i magmatske i sedimentne stene, i metamorfne stene imaju svoj sklop. Razlikuju se sve velike grupe metamorfnih struktura, i to: kataklastične, nastale drobljenjem stena i blastične, nastale rastom minerala tokom metamorfnih procesa. Zavisno od rasporeda, orijentacije i međusobnih odnosa minerala razlikujemo: masivne ili homogene stene, planparalelne, škriljave, ubrane, trakaste i okcaste.

Regionalno-metamorfne stene su podeljene na:

- kristalaste škriljce:

argilošist, nastao na niskim temperaturama i pritiscima od glinovitih stena; filit, nastao kao i argilošist od glinovitih stena, ali na nešto višim temperaturama i pritiscima; mikašist, nastao od glinovitih stena, ali na visokim temperaturama i pritiscima, pri čemu je došlo do transformacije glina u liskune; zeleni škriljci, predstavnici ortometamorfnih stena; i gnajs, koji u zavisnosti od materijala koji podleže metamorfizmu može biti ortognajs (nastaje od granita i srodnih stena) ili paragnajs (nastaje od arkoznih peščara);

- masivne metamorfne stene

amfibolit, koji mogu biti ortoamfiboliti, ukoliko nastaju od bazičnih magmatskih stena ili paraamfiboliti, ukoliko nastaju od dolomitično-laporovitih sedimentata; mermer, nastao metamorfizmom krečnjaka ili dolomita; kvarcit, nastao od kvarcnih peščara; serpentiniti, nastali autometamornim procesima.

U kontaktno-metamorfne stene spadaju: kornit, nastao termokontinentalnim metamorfizmom u zonama neposrednog kontakta magme i glinovitih stena; bobičavi škriljac, nastao u spoljašnjim zonama kontakta magme i glinovitih stena; i skarn, nastao na kontaktu kiselih magmi i karbonatnih stena.

## 2.2 MINERALI

Minerali, tela određenog hemijskog sastava i fizičkih osobina, čine neizostavnu komponentu stena Zemljine kore. Stene mogu biti izgrađene od jedne ili više vrsta minerala, koji se shodno tome klasifikuju kao glavne ili bitne komponente za svaku stenu, i sporedne komponente, koje su prisutne, ali ne definišu sastav i svojstva stena.

Od bitnih komponenata razlikujemo petrogene minerale, koji bitno učestvuju u izgradnji stena, i rudne minerale, koji su deo rudnih ležišta, a potom i stena, ali čija uloga nije od velikog značaja za klasifikaciju stena.

Minerali se prema hemijskom sastavu najčešće dele na silikate koji su najzastupljeniji i nesilikate koji uključuju okside i hidrokside, karbonate, sulfate i sulfide, fosfate i samorodne elemente.

Silikati predstavljaju najzastupljeniju klasu petrogenih minerala, i sastavljeni su od silicijuma, kiseonika i u maloj meri, drugih elemenata koji se, u zavisnosti od prostornog vezivanja mogu podeliti na:

- tektosilikate,
- filosilikate,
- inosilikate,
- nezosilikate,
- sorosilikate,
- ciklosilikate.

### 2.2.1 Tektosilikati

U tektosilikatima su  $\text{SiO}_2$  tetraedarski raspoređeni, tako da jon kiseonika pripada dvema susednim strukturama tetraedra, a slobodne valence su ispunjene jonima alkalnih i zemnoalkalnih elemenata. U grupu tektosilikata spadaju kvarc, opal, feldspati, feldspatoidi i zeoliti.

Kvarc je sačinjen od tetraedarski orjentisanog silicijum-dioksida,  $\text{SiO}_2$ , u kom se silicijum nalazi u centru, a joni kiseonika na rogljevima tetraedra. Kvarc je krt i osetljiv na pritiske, ali otporan na hemikalije, te ga samo fluorovodonična kiselina nagriza. Prema tome, otporan je na površinsko raspadanje, pa se najčešće, nakon dugog transporta, koncentriše u udaljenim nanosima. Vlaknasta, fibrozna ili sitnozrna forma kvarca koja nosi ista fizička svojstva kao i kvarc se naziva kalcedon i za razliku od kvarca se u stenama javlja kao prelazna forma prilikom rekristalijacije amorfnog koloidnog silicijum-dioksida u kvarc. Silicijum-dioksid koji pored primesa sadrži 3-20% vode,  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{nH}_2\text{O}$ , naziva se opal. Krt je i zbog prirodnih pigmenta može biti različito obojen.

U feldspate spadaju minerali srodnog hemijskog sastava, struktura i fizičkih i optičkih karakteristika. Ovi minerali čine oko 60% magmatskih, 30% metamorfnih i 10% sedimentnih stena. Prema hemijskom sastavu feldspati su alumosilikati kalijuma, natrijuma i kalcijuma, i grade samostalne minerale koji se u prirodi retko sreću u potpuno čistom obliku:

Ortoklas – kalijski feldspat  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

Albit – natrijski feldspat  $\text{Na}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

Anorit – kalcijski feldspat  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

Feldspati se u prirodi najčešće javljaju kao izomorfne smeše, i to kao alkalni feldspati, smeša kalijskog i natrijskog feldspata u ograničenim količinama i kao plagioklas, smeša natrijskog i kalcijskog feldspata koja nema ograničenja. Prema načinu kristalizacije, razlikuju se

monoklinski, visokotemperaturni alkalni feldspati i triklinički niskotemperaturni alkalni feldspati i plagioklasi. Plagioklasi izuzetno retko, a kalijski feldspati se nešto češće javljaju kao pojedinačna zrna.

Prema hemijskom sastavu, razlikuju se kalijski feldspati (sanidin, ortoklas, mikroklin) i plagioklasi (albit, oligoklas, andezin, labrador, bitovnit, anorit).

Sanidin, predstavlja visokotemperaturnu modifikaciju kalijskog feldspata koja, posebno na visokim temperaturama, može da primi do 62% natrijskih komponenata u svoju kristalnu rešetku. Ovi kalijski feldspati se formiraju samo u mladim, vulkanskim, izlivnim stenama u vidu tabličastih kristalnih oblika.

Ortoklas, kalijski feldspat koji u sebi može da sadrži do 30% natrijskih i izuzetno malu količinu kalcijevih komponenata, i čija kristalna rešetka je samo delimično uređena. Ovaj mineral se pod uticajem toplih rastvora može preobraziti u liskunske minerale, tj. sericit, dok se njegovim raspadanjem formiraju minerali glina.

Mikroklin, koji najčešće nastaje uređivanjem kristalne rešetke ortoklasa u metamorfnim procesima i predstavlja kalijski feldspat stabilan na niske temperature i visoke pritiske.

Plagioklasi, redovni sastojci magmatskih stena, predstavljaju smeše albita i anorita, i klasifikovani su prema postupnoj prelaznosti komponenata i to na:

- albit: 0-10% anorita, kiseli plagioklas,
- oligoklas: 10-30% anorita, kiseli plagioklas,
- andezin: 30-50% anorita, prelazni plagioklas,
- labrador: 50-70% anorita, bazični plagioklas,
- bitovnit : 70-90% anorita, bazični plagioklas,
- anorit: 90-100% anorita, bazični plagioklas.

Plagioklasi kristališu triklično i kiseli plagioklasi, pri hidrotermalnim preobražajima prelaze u sericit, a pri površinskom raspadanju u kaolinit, dok bazični plagioklasi pri hidrotermalnim preobražajima prelaze u agregat minerala epidotske grupe i albita, a pri površinskom raspadanju se kalcitišu.

Feldspatoidi su prema hemijskom svojstvima slični feldspatima, međutim, od feldspata se razlikuju prema sadržaju silicijuma, jer, za razliku od feldspata, nisu imali dovoljno silicijuma za stvaranje feldspata, pa je za njih svojstveno da su siromašni u silicijumu, a bogati u alkalijama. Shodno tome, leucit ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ ) je feldspatoid koji nije imao dovoljno silicijuma da formira ortoklas ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ), a nefelin ( $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) da formira albit ( $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ). Leucit je tipičan mineral mladih izlivnih magmatskih stena i u stenama se javlja samostalno ili uz sanidin, a preobražaj mu je isti kao i kod kalijevih feldspata. Nefelin je takođe mineral magmatskih stena, koji se javlja u alkalnim sredinama i raspada se kao i albit.

Zeoliti su hidratizirani aluminosilikati natrijuma, kalcijuma, barijuma, stroncijuma i kalijuma, u čijoj je kristalnoj rešetki voda slabo vezana, pa se pri zagrevanju može osloboditi, ali isto tako i ponovo apsorbovati nazad u rešetku. Zeoliti pored vode mogu apsorbovati i gasove i ono karakteristično za zeolite jeste da se mogu rastvarati u sonoj kiselini. Neki od najpoznatijih predstavnika grupe zeolita su natrolit, bojlandit, babazit, filipsit, desmin, lamontit.

## 2.2.2 Filosilikati

Filosilikati su minerali u kojima su tetraedri siliciju-dioksida raspoređeni u jednoj ravni i u ovu grupu minerala spadaju liskuni, hloriti, ali i minerali kore raspadanja, minerali glina i dr. Liskuni su minerali koji su najrasportranjeniji minerali Zemljine kore i čine njenih oko 4%. Najčešće se mogu se naći uglavnom u kiselim magmatskim stenama, potom u metamorfnim, ali

se javljaju i u sedimentnim stenama. Kristališu monoklinočno u pločastim oblicima i prema hemijskom sastavu dele se na:

- muskovit – kalijski liskun,
- paragonit – natrijski liskun,
- flogopit – magnezijski liskun,
- biotit – magnezijско-gvoždévito liskun,
- lepidolit – litijски liskun,
- cinvalid – litijско-gvoždéviti liskun.

Muskovit  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$  javlja se u pločastoj i listastoj formi i naziv se sericitom, ukoliko je njegova veličina manja od 1mm. Nastaje u kiselim magmatskim stenama, u pegmatitsko-pneumatskom stadijumu, u formi „knjige“ ili u hidrotermalnoj fazi, obično u formi sericita. Može nastati i preobražajem minerala glina i drugih alumosilikata, ali u metamorfnom ciklusu. Često se javlja kao sastojak glinovitih i peskovitih sedimentata, jer je nerastvoran, u kori raspadanja veoma stabilan i može biti daleko transportovan.

Biotit  $(KFe_3AlSi_3O_{10})(OH)_2$  i  $(KMg_3Al_3Si_3O_{10})(OH)_2$  je izomorfna smeša kalijско-gvoždévitoг alumosilikata i kalijско-magnezijског alumosilikata koji se može sresti u kiselim do intermedijarnim magmatskim stenama, dok se u pegmatitsko-pneumatolitskom stadijumu stvaraju mineralni predstavnici bogatiji gvoždem. U metamorfnom ciklusu se mogu javiti i u regionalnim, i u kontaktnim metamorfnim stenama. U hlorit prelazi pod dejstvom hidrotermi, dok pri površinskom raspadanju gube gvožđe i alkalije.

Hloriti su hidatisani alumosilikati magnezijuma i gvožđa i rasprostranjeni najviše u metamorfnim, a potom i u magmatskim stenama. Može se desiti da im deo aluminijuma bude zamenjen trovalentnim gvoždem i hromom, a magnezijuma i ferogvožđa manganom i niklom. U površinskim uslovima se raspadaju, a najpre oni bogatiji gvoždem, što dalje dovodi do stvaranja minerala glina.

Grupu serpentina čine antigorit (listasti serpentin), hrizotil (vlaknasti serpentin) i serpofit (amorfni serpentin) koji su minerali istog hemijskog sastava, odnosno hidratirani silikati magnezijuma i gvožđa ( $6MgO \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$  sa oko 30% gvožđa koje je ugrađeno u rešetku), ali delimično različite strukture. Ovi minerali nastaju uglavnom transformacijom olivina ili drugih magnezitsko-gvoždévutih silikata bez aluminijuma, na srednjim do niskim temperaturama, a regionalnim metamorfizmom nastaju samo na određenim dubinskim nivoima.

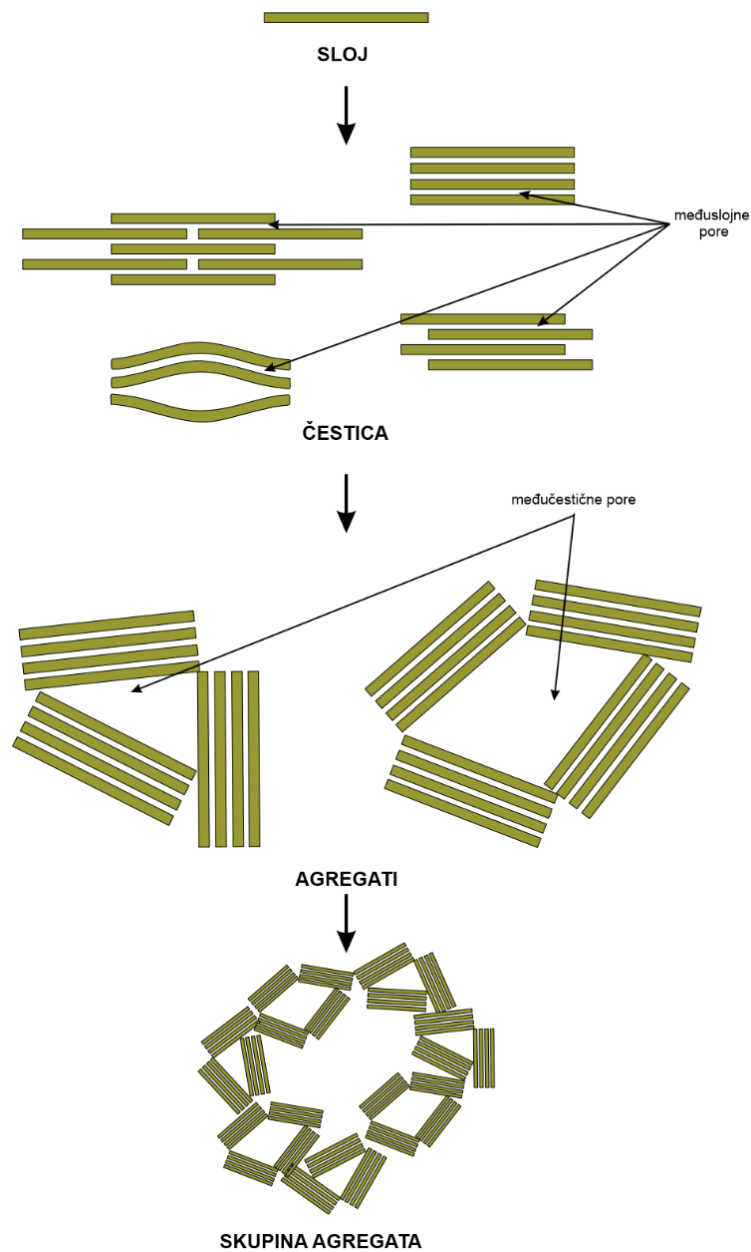
### 2.2.2.1 Minerali glina

Glina je okarakterisana kao prirodan, zavisno od sadržaja vode, plastičan materijal sastavljen prvenstveno od fino-zrnatih minerala, koji se pri sušenju ili pečenju može stvrdnuti i čija su glavna komponenta filosilikati (Bergaya i Lagaly, 2011). Sa druge strane, pod pojmom minerali gline smatraju se filosilikatni minerali i minerali koji doprinose plastičnosti gline, ali koji, za razliku od gline, mogu biti prirodni ili sintetički.

Minerali glina su najzastupljenije komponente koje učestvuju u izgradnji sedimentnih stena, u kori raspadanja i u zemljištu na kom rastu biljke. Uglavnom nastaju raspadanjem alumosilikata u površinskim uslovima, a neki i hidrotermalnom alteracijom stena na niskim temperaturama. Pored filosilikata, gline u zemljištima i sedimentima sadrže i „prateće minerale“ tj. minerale koji ne doprinose plastičnosti gline i to su najčešće minerali poput karbonata, feldspata, kvarca i oksida i hidroksida gvožđa i aluminijuma.

Kondenzovani tetraedri (T) i oktaedri (O) u odnosu 1:1 ili 2:1 čine strukturu filosilikata i formiraju anizotropne TO ili TOT slojeve, čiji se skup naziva česticom, a skup čestica agregatom (slika 1). U zavisnosti od organizacije čestica i agregata mogu razlikovati međuslojne,

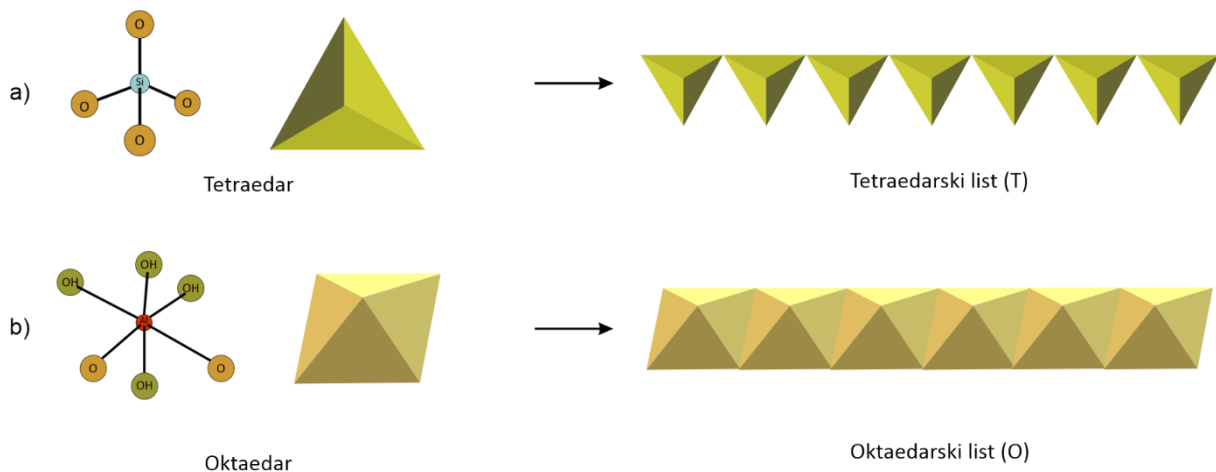
međučestične i međuagregatne pore, dovodeći do različitih morfologija filosilikata (Bergaya i Lagaly, 2011).



**Slika 1.** Nastanak agregata minerala glina.

Tetraedarski list (T) čine povezani tetraedri sačinjeni od centralnog, manjeg katjona (najčešće  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  ili  $\text{Fe}^{3+}$ ) okruženog sa četiri atoma kiseonika (slika 2). Tetraedri se među sobom povezuju deleći uglove tj. svoja tri atoma kiseonika, koji se nazivaju bazalnim, dok se kiseonik sa vrha tetraedra, koji se ne deli, naziva apikalni kiseonik (Brigatti i dr., 2011). Tako formiran list predstavlja osnov svih filosilikata.

Oktaedarski list (O) čine oktaedri u čijem centru se nalazi veći katjon (najčešće  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , i  $\text{Fe}^{2+}$ , ali i  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  i  $\text{Ti}^{4+}$ ) okružen sa šest kiseonika/hidroksilnih grupa (slika 2). Oktaedri se među sobom dele ivice koje sadrže dva kiseonika/hidroksilne grupe i formiraju ravne listove sa šestougaoanom ili pseudošestougaoanom simetrijom koji se nalaze ispod ili između tetraedarskih listova (Brigatti i dr., 2011).



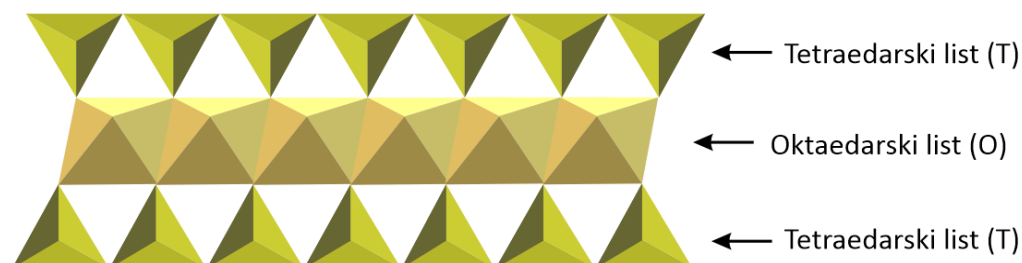
**Slika 2.** Nastanak tetraedarskog (a) i oktaedarskog (b) lista.

Tako formirani listovi mogu se spajati i graditi 1:1 sloj, sačinjen od jednog T-lista i jednog O-lista koji se ponavlja (TO-TO-TO...) ili 2:1 sloj, sačinjen od jednog T-lista, jednog O-lista, i još jednog T-lista koji se ponavljanja (TOT-TOT-TOT...) (slika 3). Prilikom spajanja listova, nastali sloj može nositi ili negativno naelektrisanje ili može biti elektroneutralan. Elektroneutralnost je svojstvena 1:1 filosilikatima, ali se javlja i u slučaju dioktaedarskih minerala, kod kojih su dva oktaedarska mesta popunjena trovalentnim katjonima, a jedno mesto je prazno ili kod trioktaedarskih minerala kod kojih su sva tri oktaedarska mesta popunjena dvovalentnim katjonima. Promenljivost naelektrisanja jedno je od najvažnijih svojstava 2:1 filosilikata, jer dovodi do izmenjivanja katjona u prostoru između slojeva, sa ciljem neutralisanja negativnog naelektrisanja nastalog prilikom zamene katjona višeg pozitivnog naelektrisanja katjonima nižeg pozitivnog naelektrisanja u listovima.

**SLOJ 1:1**



**SLOJ 2:1**



**Slika 3.** Nastanak 1:1 i 2:1 sloja minerala glina.

Filosilikati mešanog sloja predstavljaju složeniju strukturu gline, koja se sastoji od naslaganih dva ili više različitih tipova slojeva. Ovi filosilikati se još nazivaju i interstratifikovani filosilikati, pri čemu interstratifikacija označava naizmeničnog smenjivanja dva ili više strukturno ili hemijski različitih slojeva u okviru jedne kristalne čestice gline. Tako naslagani slojevi mogu imati uređenu strukturu mešanih slojeva u kojoj se slojevi smenjuju u

predvidljivom, ponavljajućem obrascu (ABABABAB... ili AABAAB... ) i takvi minerali dobijaju specifično ime koje se dovodi u direktnu vezu sa prepoznatljivom strukturom. Pored uređene, slojevi mogu imati i neuređenu strukturu u kojoj se slojevi nasumično smenjuju bez jasnog periodičnog pravila (ABAABBABA...).

Ponašanje gline (njena reaktivnost, sposobnost adsorpcije i bubrenja) nije određeno samo njenom kristalnom strukturom, već i nizom faktora poput hemijskog sastava, prirode i naelektrisanja površinskih atoma, tipa izmenjivih katjona, kao i potencijalnih nepravilnosti u kristalnoj strukturi koji utiču na njenu površinu.

Interstratifikacije se često dešavaju između bezvodnih slojeva, koji imaju visoko negativno naelektrisanje i između pozitivno naelektrisanog jona, što dovodi do fiksiranja sloja, i između hidratiranih slojeva koji nose manje negativno naelektrisanje i pozitivno naelektrisane jone koji su okruženi molekulima vode.

Prisustvo vode na mikro-nivou pospešuje adsorpciju tj. stvaranje polarne sredine kroz koju se i drugi joni ili molekuli mogu privući i vezati za negativno naelektrisanu površinu gline; izmenu katjona iz međuslojnog prostora sa katjonima iz spoljašnje sredine, i može ubrzati neke hemijske reakcije, imajući u vidu da je voda neretko reaktant ili medijum za neke katalitičke procese. Na makro-nivou interakcija gline i vode ogleda se u fizičkim osobinama, i to kroz svojstvo plastičnosti, fenomena skupljanja i bubrenja glina prilikom upijanja i gubitka vode, kao i kroz sorpciju vode, pa se neretko kaže da je upravo voda ta koja aktivira hemijska i fizička svojstva minerala gline. Sposobnost gline da bubri se često kvantifikuje preko pritiska bubrenja tj. mehaničkog naprezanja koje glina razvija kada je sprečena da se širi kada je u kontaktu sa vodom. Na pritisak bubrenja utiče: gustina gline koja je direktno srazmerna pritisku bubrenja, odnosno, što je glina gušća, i razvijeni pritisak bubrenja je veći; salinitet, ali samo pri niskim gustinama i što je salinitet veći, pritisak bubrenja opada; tip jonske izmene, te što su slabije sile hidratacije, a jako odbijanje između slojeva, pritisak bubrenja je veći i obrnuto.

Svojstva koja odlikuju minerale glina su:

- Tetraedar-oktaedar (TO) i tetraedar-oktaedar-tetraedar (TOT) nanometarska slojna struktura, obzirom da minerali gline nisu kristali sa tri jednake dimenzije, već su izgrađeni od veoma tankih, složenih slojeva, debljine oko 0,7 nm u 1:1 (TO) strukturi i, oko 1 nm u 2:1 (TOT) sloju;
- Anizotropija slojeva ili čestica – svojstva materijala ili gline duž horizonatle sloja se razlikuje od ponašanja vertikalnog sloja;
- Pločasti oblik stvara nekoliko tipova površina:
  - spoljašnje bazalne - široke, ravne gornje i donje površine na kojima se dešava većina adsorpcije i jonske izmene;
  - ivice površine - bočne, uske, reaktivne strane koje zavise od pH vrednosti mogu nositi pozitivno ili negativno naelektrisanje;
  - unutrašnje (međuslojne) površine – površine unutar kristalne rešetke, koje postoje samo kod nekih tipova gline i koje mineralu omogućavaju da bubri kada se voda nađe u tom sloju.
- Lakoća modifikacije površine adsorpcijom, jonskom izmenom ili kalemljenjem, zahvaljujući postojanju njenog naelektrisanja i njene velike specifične površine.
- Plastičnost tj. sposobnost materijala da promeni oblik pod pritiskom i da taj novi oblik zadrži kada se pritisak ukloni, a da pri tome ne pukne, kao posledica slojevite strukture i anizotropije glina.
- Stvrdnjavanje većine minerala glina i to:
  - sušenjem - kada voda napusti prostor između čestica gline, koje potom kapilarni pritisak privlači bliže jedne drugima, formirajući jače međumolekulske sile;
  - pečenjem - trajnim gubljenjem hemijski vezane vode, pri čemu se veze „premošćavaju“, čestice se spajaju i formiraju čvrst, neporozan keramični materijal.

Na osnovu strukturnih karakteristika minerali glina dele se na 1:1 slojne dioktaedarske (grupa kaolinita) i trioktaedarske (grupa serpentina), i na 2:1 slojne filosilikate. Najznačajniji minerali glina su kaolinit, smektit, ilit i hlorit.

Grupa kaolinita predstavlja filosilikate pločastog habitusa, sa, obično, slabo razvijenim kristalima koji se najčešće javljaju u zemljastim ili nepravilno oblikovanim agregatima ili kao skrame i imaju manje ili više izraženu sposobnost za adsorbovanje katjona koji se koncentrišu na površini ili između slojeva kristalne rešetke. Kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$ ) u kristalnoj rešetki ne zamenjuje jone  $\text{Al}^{3+}$  i  $\text{Si}^{4+}$ , već gradi 1:1 TO slojeve koji su vezani jakim vodoničnim vezama, koji se naizmenično smenjuju, pa usled gustog pakovanja jona u rešetki, kaolinit nema mogućnost infiltracije vode ili drugih materija, pa ne bubri i ne vrši izmenu jona (Schoonheydt i Johnston, 2011). Ovakvo ponašanje se pripisuje svim mineralima grupe kaolinita. Kaolinit je jedini mineral u ovoj grupi koji kristališe triklinično i nastaje preobražajem uglavnom kiselih magmatskih i metamorfnih stena, i to raspadanjem alumosilikata (feldspata, feldspatoida ili liskuna). Rastvori iz kojih nastaje kaolinit bi trebalo da budu oksidacioni i da koncentracija  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Fe}^{2+}$  jona ne bude velika. Shodno tome, kaolinit se, pored kore raspadanja, može javiti i u barskim i jezerskim slatkovodnim sredinama, ali ne i u marinskim sredinama, u kojima je koncentracija natrijuma i magnezijuma povećana. Klima pri nastanku kaolinita u kori raspadanja mora biti vlažna, jer bi se kaolinit u suvim uslovima razlaže dajući slobodne hidrokside.

Hlorit spada u 2:1 slojne minerale glina koji pored negativno naelektrisanog 2:1 sloja ima i dodatni pozitivno naelektrisani oktaedarski međusloj. Kako je međusloj jakim vezama vezan za negativni sloj, hlorit se smatra mineralom inertnim prema bubrenju odnosno prema interakcijama sa vodi.

Minerali ilitске grupe su jako važni sastojci u stenama kao što su glinci, laporci itd. Po svojoj strukturi su slični liskunima, ali im je hemizam sličniji glinama. Nastaju preobražajem feldspata ili degradacijom muskovita ili rekristalizacijom koloida u odgovarajućim uslovima. Za razliku od muskovita, ilit ( $\text{K}_x(\text{Al,Fe})_4\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x\text{O}_{20} \cdot x\text{nH}_2\text{O}$ ;  $x < 2$ , a umesto  $\text{Al}^{3+}$  mogu biti uključeni  $\text{Mg}^{2+}$  ili  $\text{Ca}^{2+}$ ) ima manje kalijuma koja je zamenjena hidroksilnom grupom. Iilit ima 2:1 slojnu strukturu i visoko negativno naelektrisanje zbog čega snažno vezuje velike katjone, fiksirajući slojeve i sprečavajući ulazak vode u međuslojni prostor, pa minimalno bubri.

Smektit je 2:1 slojni mineral gline sa niskim negativnim naelektrisanjem sloja oktaedarskog lista za koji su slabo vezani najčešće  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ili  $\text{Mg}^{2+}$  joni. Shodno tome ovi minerali imaju mogućnost interakcije sa molekulima vode i to: zadržavanjem vode u velikim, međuagregatnim porama koja se lako uklanja sušenjem na vazduhu; zadržavanje vode u mikroporama uzrokovano efektima površinskog napona; ili vezivanjem molekula vode za spoljašnje i unutrašnje površine, uvlačenjem vode u međuslojni prostor zarad hidratacije katjona, što vodi bubrenju, ili neograničenom adsorpcijom i širenjem, što uzrokuje otvaranje celog sistema, odnosno formiranje gela (Pusch, 2011).

### 2.2.3 Inosilikati

Inosilikati su minerali kod kojih su  $\text{SiO}_4$  tetraedri povezani u trake ili beskonačne nizove, a neki od najpoznatijih su amfiboli i pirokseni.

Minerali grupe amfibola su česti u magmatskim i metamorfnim stenama, a nastaju pirogeno, pegmatitsko-pneumatolitski, pa i hidrotermalno. Sistematizovani su prema strukturnim karakteristikama i to na rombične (antofilit i žderit) i monoklinične (tremolit-aktinolitska serija, bornblenda, alkalni amfiboli) amfibole.

Rombični amfiboli su retki, po sastavu su Mg-Fe silikati (žderit sadrži i  $\text{Al}^{3+}$ ) i javljaju se u regionalno i kontaktno metamorfnim stenama, a ponekad i u magmatskim stenama kao sekundarni minerali.

Monoklinični amfibol sa sastavom  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{OH})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}$  naziva se tremolit i redovan mineral metamorfnih stena, ali se javlja i kao sekundarni mineral magmatskih sten. Stabilan je pri površinskim raspadanjima, a preobražajem prelazi u talk, serpentin i dr. Monoklinički amfibolit sastava  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{OH})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}$  naziva se aktinolit, nastaje kontaktnim metamorfizmom i u zonama niskotemperaturnih metamorfizama, preobražajem piroksena uz prisustvo vode. Hornblenda je monoklinični amfibol kalcijско-magnezijsko-gvožđev silikat sa aluminijumom, složenog sastava, koji se sreće i u magmatskim i u metamorfnim stenama. Postaje na više načina, pirogeno i pegmatitsko-pneumatolitski u magmatskim ciklusima, kao i kontaktnim i regionalnim metamorfizmom. Hidrotermalno prelazi u hlorit, epidot, kalcit, a površinskim raspadanjem u kalcit, limonit, nontronit i dr. Alkalni amfiboli u svom sastavu sadrže natrijum i u stenama nastaju u metamorfnom ciklusu, prevođenjem natrijskog rastvora, pri čemu se preobražavaju fero-magnezijski minerali.

Minerali grupe piroksena takođe kristališu rombično (enstatit, bronzit, hipersten) i monoklinično (diopsidsko-hedenbergitska serija, augitska serija, alkalni pirokseni), pri čemu su pirokseni od većeg značaja.

Enstatit-hiperstenska serija rombičnih piroksena obuhvata minerale koji su izomorfne smeše enstatita ( $\text{MgSiO}_3$ ) i hiperstena ( $\text{FeSiO}_3$ ), uglavnom su magmatski minerali koji se javljaju u uultrabazičnim i bazičnim stenama i hidrotermalnim rastvorima prelaze u serpentin. Najznačajniji predstavnici ove grupe su enstatit (0-10%  $\text{FeSiO}_3$ ), bronzit (10-30%  $\text{FeSiO}_3$ ) i hipersten (>30%  $\text{FeSiO}_3$ ).

Minerali diopsid-hedenbergitske serije monokliničkih piroksena su po sastavu kalcijско-magnezijsko-gvožđeviti silikati, retki su i najčešće se javljaju u metamorfnim i ređe u magmatskim stenama, a pri površinskom raspadanju daju kalcit, hidrokisde gvožđa, opal i kalcedon. Augitska serija monokliničkih piroksena sadrži kalcijско-magnezijsko-gvožđevite silikate sa aluminijumom i oni su značajni petrogeni minerali, najčešće nastali magmatski, a potom i kontaktnim i ređe regionalnim metamorfizmom. Preobražajem prelaze u hlorite, nontronit ili amfibole, a površinskim raspadanjem prelaze u kalcit, kvarc, opal i okside gvožđa. Alkalni pirokseni su tipski pirogeni minerali ili minerali vezani za regionalno metamorfne stene koji sadrže izvesnu količinu alkalija, najčešće natrijuma.

#### 2.2.4 Nezosilikati

Nezosilikati su minerali za koje je svojstveno prisustvo slobodnih  $\text{SiO}_4$  tetraedara koji su vezani sa Mg, Fe, Al, Ca, a nekada i sa alkalijama. Neke od najvažnijih grupa nezosilikata su grupa olivina, grupa aluminijumskih silikata i grupa granata.

Grupu olivina čine minerali zajedničke formule  $\text{X}_2\text{SiO}_4$ , pri čemu je X magnezijum i gvožđe ili ređe magnezijum i kalcijum, i to je izomorfna smeša forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) i fajalita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). Olivini su sastoji bazičnih i ultrabazičnih magmatskih stena i čine njihova jako važnu komponentu. Nastaju pirogeno, a nekada i u kontaktnom metamorfizmu pri veoma visokim temperaturama. Na niskim temperaturama su nestabilni i dejstvom hidrotermalnih rastvora najčešće prelaze u serpentin, a nekada i u talk, dok pri površinskom raspadanju prelaze u limonit, opalsku masu, magnezijum karbonat (magnezit), nontronit i dr.

U grupu aluminijumskih silikata spadaju minerali istog hemijskog sastava ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ), a različite strukture i to su:

- disten – nezosilikat tj. aluminijumski silikat koji sadrži nešto feri-gvožđa i hroma i koji nastaje u metamorfnim stenama, iz glinovitih sedimenata, pri visokim pritiscima, a koji pri alteraciji prelazi u sericit, a pri površinskom raspadanju iskazuje stabilnost.
- silimanit – nezosilikat tj. aluminijumski silikat koji može sadržati do 3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i koji je mineral regionalno ili kontaktno metamorfnih stena, koji alteracijom prelazi u minerale glina.

- andaluzit – inosilikat koji je istog sastava kao i silimanit, ali uz oksid gvožđa može da sadrži i do 7% oksida mangana i, pored kontaktno metamorfisanih pelitskih stena, može se javiti i u stenama regionalnog metamorfizma. Dejstvom hidrotermalnih rastvora prelazi u sericit, a zagrevanjem u silimanit.

Grupu granata čine minerali raznovrsnog sastava, ali zajedničke formule  $X_3Y_2(SiO_4)_3$ , gde je X dvovalentni metal (Ca, Mg, Fe, Mn), a Y trovalentni metal (Fe, Al, Cr). Ovi minerali su pretežno metamorfni, ali mogu biti i magmatski, a pri hidrotermalnom preobražaju prelaze u hlorite i minerale epidotske grupe, dok su prema površinskom raspadanju stabilni. Postoji čitav niz minerala ove grupe i prema prisustvu pojedinih metala razlikujemo:

- pirop – Mg, Al granat,
- almandin – Fe, Al granat,
- spersantin – Mn, Al granat,
- uvarovit – Ca, Cr granat,
- grosular – Ca, Al granat,
- andradit – Ca, Fe granat.

Epidotska grupa obuhvata nekoliko hidratiranih kalcijско-aluminijskih silikata sa sadržajem gvožđa i mangana i neki od najpoznatijih su:

- epidot – kalcijско-aluminijsko-gvožđev silikat sa vodom koji najčešće nastaje sekundarnim preobražajem feromagnezijskih minerala sa sadržajem aluminijuma, ali se sreće i u regionalnom i kontaktnom metamorfizmu, pa i magmatski, dok je na površinsko raspadanje otporan.
- cojsit – kalcijски alumosilikat koji sadrži do 5%  $Fe_2O_3$ , nastaje automorfnim preobražajem feldspata i dejstvom hidrotermalnih rastvora.
- pumpelit – kalcijско-magnezijsko-gvožđevit aluminijski silikat karakterističan minerale metamorfizma tonjenja tj. za visoke pritiske i niske temperature.
- sfen – kalcijum-titanat koji se javlja najčešće kao sporedni mineral u steni i koji je otporan na površinsko raspadanje.

### 2.2.5 Sorosilikati i ciklosilikati

U stenama su najčešće zastupljeni kao sporedni minerali, i to su:

- beril ( $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ ) koji nastaje u pegmatitima uz prisustvo lakoisparljivih komponenata. Otporan je prema raspadanju, ali su dugim dejstvom vode zamućuje i prelazi u kaolinit posle ispiranja berilijuma.
- turmalin, boro-alumo-silikat magnezijum i gvožđa sa sadržajem kalcijuma, alkalija i hidroksila koji nastaje pneumatolitski i koji je otporan na raspadanje, a delovanjem hidrotermalnih rastvora prelazi u hlorit ili sericit.
- lavsonit, kalcijски alumosilika koji nastaje pri visokim pritiscima i niskim temperaturama.

### 2.2.6 Oksidi i hidroksidi

Oksidi i hidroksidi su značajne komponente stena i zemljišta i od posebne važnosti su oksidi silicijuma, aluminijuma, titana, magnezijuma, gvožđa i sl. Mnogi oksidi dejstvom atmosferilija prelaze u hidrokside, pa u kori raspadanja se sreću samo neki, kao što su kvarc i magnetit, dok su hidroksidi u zemljištu stabilni i zastupljeniji.

Najznačajniji oksidi i hidroksidi stena ili kore raspadanja su:

- led - oksid vodonika ( $H_2O$ );
- oksidi i hidroksidi gvožđa – magnetit ( $FeO \times Fe_2O_3$ ) koji nastaje magmatski, hidrotermalno ili hidatogeno u redukcionim uslovima, otporan je na raspadanje i u površinskim uslovima, najčešće uz prisustvo piritita prelazi u limonit i hematit; hematit ( $Fe_2O_3$ ) nastaje na sve načine, raspadanjem prelazi u limonit i jedan je od najvažnijih ruda gvožđa; limonit ( $Fe_2O_3 \times xH_2O$ ) je amorfan i nastaje raspadanjem svih minerala koji sadrže gvožđe i rasprostranjen je u stenama i u uslovima površinskog raspadanja;
- oksidi titana – dele se na proste ( $TiO_2$ ), rutil i brukit, i složene, ilmenit (okside titana i gvožđa) i perovskit (kalcijum titanat), najčešće se javljaju kao sporedni sastojci, uglavnom u bazičnim stenama, a otporni su prema površinskom raspadanju, pa se mogu sresti i u rečnim nanosima;
- oksidi i hidroksidi aluminijuma – korund ( $Al_2O_3$ ) nastaje kontaktno i regionalno metamorfno, ali i magmatski, pa čak i hidrotermalno i otporan je prema raspadanju, pa se koncentriše u nanosima; boksitni minerali su hidroksidi aluminijuma različitog sastava tj. količine vode i primesa (dijaspore, bidrargirit, džipsit) i nastaju površinskim raspadanjem stena, a nekada i hidrotermalno. Od glina se razlikuju, jer boksitni agregati ne daju plastične mase.

### 2.2.7 Karbonati

Karbonati su soli ugljene kiseline i neki od najpoznatijih karbonata su kalcit, aragonit, dolomit, magnezit i siderit. Kalcit ( $CaCO_3$ ) burno reaguje sa razblaženom hlorovodoničnom kiselinom, što ga razlikuje od drugih karbonata. Najčešće se luči iz vode iz rastvorljivog  $Ca(HCO_3)_2$ , pri snižavanju temperature ili kada biljke apsorbuju  $CO_2$ , a stvara se i kao sekundarni mineral po mnogim silikatima. Bitan je sastojak mnogih sedimentnih stena, kao što su krečnjaci i laporci, i metamorfnih stena, kao što je mermer. U površinskim uslovima rastvaranjem prelazi u  $Ca(HCO_3)_2$  koji se lako transportuje.

Aragonit je takođe kalcijum-karbonat, ali, za razliku od kalcita kristališe rombično, a nastaje uglavnom hidrotermalno i često prelazi u kalcit.

Dolomit ( $CaCO_3 \times MgCO_3$ ) se rastvara tek u zagrejanoj hlorovodoničnoj kiselini, pa ga je tako najlakše razlikovati od kalcita. Najčešće nastaje u dijagenetskim procesima dejstvom  $Mg$  rastvora na kalcijum-karbonatske stene i značajna je komponenta sedimentnih i metamorfnih stena.

Magnezit ( $MgCO_3$ ) nastaje hidrotermalno preobražajem  $Mg$  silikata, i značajniji je kao rudni, nego kao petrogeni mineral.

Siderit ( $FeCO_3$ ) nastaje delovanjem hidrotermalnih rastvora ili hladnih voda bogatih  $CO_2$  na minerale sa visom sadržajem gvožđa, a u površinskim raspadanjima se transformiše u limonit.

### 2.2.8 Sulfati

Sulfati su soli sumporne kiseline i u stenama su manje zastupljeni u poređenju sa karbonatima, dok su u kori raspadanja prisutniji. Nastaju direktno iz rastvora usled prezasićenja ili usled hlađenja hidrotermi, a neki od najpoznatijih sulfata su anhidrit ( $CaSO_4$ ) koji se najčešće javlja u sonim ležištima i primanjem vode prelazi u gips, i gips ( $CaSO_4 \times 2H_2O$ ) koji se sreća u laporcima i glincima u vidu konkrecija koje nastaju delovanjem sumporne kiseline na karbonate u tim stenama.

### **2.2.9 Fosfati**

Soli fosforne kiseline, koji su u stenama sporedni sastojci. Jedan od najpoznatijih fosfata je apatit ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl})$ ) koji postaje magmatski, ali se sreće i u pegmatitsko-pneumatolitskom stadijumu, a može postati i metamorfno i otporan je na površinsko raspadanje, pa se koncentriše u nanosima.

### **2.2.10 Sulfidi**

Retki kao petrogeni minerali, ali jako značajni među metaličnim mineralima i u stenama se najčešće javljaju kao pirit ( $\text{FeS}_2$ ). Pirit može postati na razne načine, a u površinskim uslovima se brzo razlaže i prelazi u limonit, pri čemu izbeljuje stenske mase, jer oslobađa sumpornu kiselinu.

### **2.2.11 Elementi**

Samo mali broj elemenata se u prirodi sreće u slobodnom stanju, gradeći samostalne minerale, koji pri tome imaju značajnu ulogu. Neki od najznačajnijih su ugljenik, gradeći dijamant, koji je veoma stabilan pri površinskom raspadanju, i grafit koji nastaje metamorfno ili preobražajem sedimenata sa sadržajem organske materije; i sumpor, poznatiji kao samorodni sumpor, koji nastaje oko sulfatara ili termalnih vrelna, pri čemu se velike mase mogu razviti organogeno, ali se može naći i u dubljim delovima oksidacione zone rudnih ležišta.

## 2.3 POVRŠINSKO RASPADANJE STENA

Stene na površini i neposredno ispod površine Zemlje, izložene su procesima raspadanja, koji površinsku i podpovršinsku stensku masu usitnjavaju, stvarajući regolit ili delimično ili u potpunosti rastaraju pod uticajem površinskih ili podzemnih voda. Na površinsko raspadanje u velikoj meri utiču svojstva stena, kao što su njena tvrdoća, stvaranje i rastresitost nastale površinske korice, kao i stepen njene rastvorljivosti. Procesi raspadanja stvaraju rastresiti površinski materijal koji se dalje, pod uticajem vetra, vode, leda i gravitacije eroduje i transportuje, otkrivajući izdanke neraspadnute stene. Važne uticaj na stepen raspadanja, pored sastava i strukture stena imaju i klimatski elementi poput padavina, temperatura, ciklusa mržnjenja i odmrzavanja, položaja podzemnih voda i kretanje vode, zbog stepena izloženosti sunčevim zracima, vetru i padavinam, bitan element jeste i geografska orijentacija stene, kao i stepen pokrivenosti stena vegetacijom.

Površinsko raspadanje podrazumeva skup egzogenih procesa koji zahtevaju delovanje tokom dugih vremenskih perioda i koji razlikuju tri vrste površinskog raspadanja, i to:

- mehaničko,
- hemijsko i,
- biogeno (koje može da se podvede i pod mehaničko ili hemijsko).

Na proces površinskog raspadanja odnosno, na njegov intenzitet i brzinu, pored karakteristika stene i stepena ogoljenosti terena, veliki uticaj imaju i klimatski uslovi s obzirom da količina padavina i temperatura upravo od njih zavise (slika 4). Na osnovu toga, razlikuju se:

- regioni sa nivalnom klimom,
- regioni sa humidnom klimom,
- regioni sa aridnom klimom,
- regioni sa sezonskom klimom.

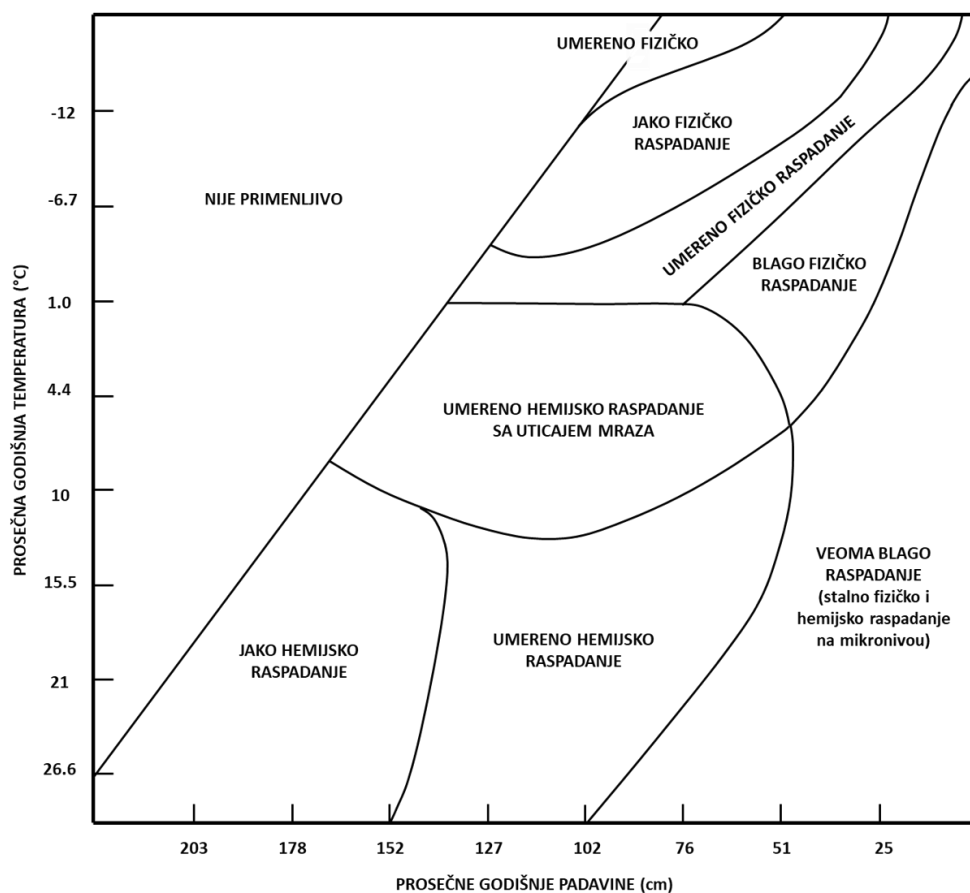
Regioni sa nivalnom klimom podrazumevaju područja planina viših od 3000m, kao i polarna područja, za koje je karakteristična temperatura niža od 0°C i sneg, te je fizičko raspadanje, odnosno "struganje" stena pri kretanju lednika najzastupljenije, dok je hemijsko raspadanje gotovo odsutno. Regioni sa humidnom klimom tj. tajge i tropske šume, okarakterisane su bujnom vegetacijom, koja je posledica debelog humusnog pokrivača i velike količine padavina, koja je veća od količine vode koja ispari. U ovim regionima je hemijsko raspadanje intenzivniju u odnosu na fizičko. Regioni sa aridnom klimom, pustinje i polupustinje, okarakterisane su visokim temperaturama, slabom vegetacijom i humusnim pokrivačem, kao i količinom vodenog taloga koja je manji od one koja može da ispari. U ovim regionima je fizičko raspadanje slabijeg intenziteta. Regioni sa sezonskom klimom je region u kom se smenjuju vidovi raspadanja, imajući u vidu, najčešće polugodišnje, smenjivanje perioda sa mnogo i sa malo padavina.

### 2.3.1 Mehaničko površinsko raspadanje

Prevođenje čvrste, kompaktne stene u rastresito stanje, bez promene njenog hemijskog sastava, stvarajući veće dodirne reakcione površine, za dalje procese raspadanja, posledica je procesa fizičkog tj. mehaničkog raspadanja. Raznovrsni faktori, kao što je promena dnevnih i sezonskih temperatura, dejstvo mraza, rast korenja biljaka, kristalizacija soli u pukotinama stena, ali i procesi uslovljeni spoljašnjim geološkim faktorima, kao što su vetar, tekuća voda, glečeri, morski talasi i slično utiču na ovu vrstu raspadanje i shodno tome se definišu četiri najčešća uzročnika fizičkog raspadanja:

- dejstvo mraza,

- kristalizacija,
- hidratacija i
- raspadanje otpuštanjem pritiska.



**Slika 4.** Zavisnost vrste površinskog raspadanja od temperature i količine padavina.

Za mehaničko raspadanje najznačajnije od navedenih je upravo raspadanje izazvano promenama temperature, odnosno raspadanje stena usled velikih temperaturnih razlika tokom kratkog perioda. Tom prilikom, mineralima stena, koje odlikuju različita fizička svojstva, slabe kohezione sile između kristala, stvaraju se pukotine koje se vremenom šire i na kraju dovode do degradacije stena. Mehaničko raspadanje stena može biti uzrokovano i visokim i niskim temperaturama. Mehaničko raspadanje izazvano visokim temperaturama je najsojstvenije za aridne oblasti, i oblasti bez vegetacije i humusnog pokrivača. Tako izazvani procesi mehaničkog raspadanja svojstveni su za površinske slojeve, ne dublje od 0,5m, jednom razoren i spran površinski sloj otkriva nove delove stena, koji potom bivaju izloženi daljim temperaturnim procesima. Na taj način procesi raspadanja prodiru u sve dublje slojeve stena, što se naziva ljuskanje stena ili deskvamacija.

Nasuprot tome, u oblastima sa sezonskom klimom i naglim smanjenjem niskih i srednjih temperatura stene se raspadaju pod uticajem smrzavanja vode u porama i pukotinama. Naime, voda u čvrstom agregatnom stanju zauzima veću zapreminu nego voda tečnog agregatnog stanja. Kada pri niskim temperaturama led počne da se stvara u porama i pukotinama, one se postepeno šire, pri čemu se stvaraju mehaničke sile koje nadvladavaju čvrstoću stena. Tada se stene, u zavisnosti od svoje strukture, lome i pucaju. Taj efekat je poznat kao dejstvo mraza ili kao dejstvo ciklusa mržnjenja i odmrzavanja. Dejstvo mraza je karakteristično za predele u vlažnoj mikrotermalnoj, subarktičkoj i polarnoj klimi, ali se pored toga javlja i regijama visokoplaninske klime.

Slična procesu mržnjenja je i kristalizacija soli u pukotinama i prslinama stena, svojstvena za aridnu klimu. Naime, pri suvom vremenu, vlaga zadržana na površini stena isparava, uzrokujući kristalizaciju minerala koji su prethodno bili rastvoreni u vodi. Tako iskristalisani minerali zauzimaju veću zapreminu nego rastvoreni minerali, vršeći pritisak na zidove pora i pukotina, koji, iako manji od pritiska smrzavanja vode, može da dovede do drobljenja stene.

Hidratacija se svrstava u mehaničko raspadanje, pri čemu dolazi do fizičkog vezivanja molekula vode za minerale stena. Tokom vremena i u kontaktu sa vodom, neki minerali apsorbiraju molekule vode, šireći svoju kristalnu rešetku i, poput leda, vršeći pritisak na zidove pora i pukotina, izazivaju njihovo raspadanje.

Otpuštanje pritiska pri formiranju slojeva stena jedan je od procesa mehaničkog raspadanja, koji stvara jedne od najvećih erozionih struktura na Zemlji. Prilikom hlađenja magme duboko u Zemlji, dolazi do formiranja velikih stenskih masa, poznatih kao plutoni. Ove stenske mase se postepeno otkrivaju usled erozije i podizanja terena. Kada se pritisak kom su izložene smanji, one počinje da se lome i ljušte dolazi do stvaranja pukotina relaksacije.

### 2.3.2 Hemijsko površinsko raspadanje

Procesi hemijskog raspadanja, raznovrsniji su od procesa mehaničkog raspadanja i često se smatraju značajnijim, jer su od velike važnosti za formiranje zemljišta, ali i za nastanak sedimentacionih ležišta. Poodmaklo mehaničko raspadanje može uticati na intenzitet i brzinu procesa hemijskog raspadanja. Kada dođu u kontakt, minerali mogu reagovati sa kiseonikom ili ugljen-dioksidom iz vazduha. Međutim, jedan od najvažnijih faktora hemijskog raspadanja je upravo voda koja, u zavisnosti od svojih svojstava (temperatura, kiselost, prisustvo rastvorenih komponenata i sl.) rastvara komponente stena na površini odgovarajućom brzinom i intenzitetom. Bitno za hemijsko raspadanje je i to da se minerali, u zavisnosti od svog sastava, rastvaraju različitom brzinom i intenzitetom. Svaki mineral reaguje barem malo na hemijsko raspadanje, pa su tako najlakše rastvorni hloridi, manje karbonati, dok je kvarc gotovo nerastvoran u vodi. U procesima hemijskog raspadanja, nastaju dva proizvoda: rastvor raspadanja tj. deo stene koji je rastvoren i koji odlazi sa rastvaračem, i mehanički detritus ili ostatak rastvaranja tj. nerastvorni deo stene koji zaostaje na mestu raspadanja i koji može biti pretaložen. Hemijsko raspadanje se ubrzava porastom temperature i količine padavine i tri najpoznatija procesa hemijskog raspadanja jesu:

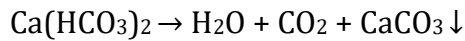
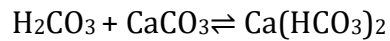
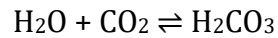
- hidroliza,
- oksidacija i,
- karbonitizacija i stvaranje rastvora.

Za razliku od hidratacije, koja je fizički proces i koja podrazumeva samo vezivanje molekula vode za minerale u steni, hidroliza podrazumeva učešće vode u hemijskim reakcijama, zajedno sa mineralima. Kao što je već napomenuto, minerali imaju različit stepen otpornosti na hemijsko raspadanje i kada procesom hidrolize bivaju zahvaćeni slabo otporni minerali, dolazi do narušavanja kristalnih rešetaka, a potom i do raspadanja stena.

Oksidacija je proces u kom kiseonik reaguje sa odgovarajućim metalima i stvara oksid. Reakcije oksidacije su i u stenama i zemljištima poznate i kao „rđanje“, pri čemu se se u reakciji gvožđa i kiseonika formira gvožđe(III)-oksid, stvarajući cvrenkasto-braon mrlje na makro nivou, dok se na mikro nivou, uklanjanjem gvožđa iz minerala stena narušava njihova kristalna struktura, čineći stenu još podložnijom daljim procesima raspadanja.

Proces karbonitizacije počinje rastvaranjem ugljen-dioksida ( $\text{CO}_2$ ) iz vazduha i okoline, u vodi, pri čemu se stvara ugljena kiselina ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) čija je moć rastvaranja znatno veća od moći rastvaranja vode. Tako stvorena kiselina reaguje sa mnogim mineralima, uglavnom onih koji sadrže kalcijum, magnezijum, kalijum i natrijum, a ponajviše sa krečnjakom tj. kalcijum-karbonatom ( $\text{CaCO}_3$ ). Kada tako formirana, blago kisela, kiša dođe u kontakt sa krečnjakom,

minerali se rastvaraju i spiraju, odnosno, dolazi do formiranja kalcijum-bikarbonata koji je nepostojano jedinjenje i koje se, tako rastvoreno dalje transportuje, pri čemu se raspada usled promene kinetičke energije, pri čemu se oslobađaju ugljen-dioksid i voda, a kalcijum-karbonat pada kao talog u obliku nerastvorljivog bigra. Krečnjačkim, odnosno kraškim predelima dominira ovakva vrsta hemijskog raspadanja:



### 2.3.3 Biogeno raspadanje

Biogeno raspadanje odvija se pod uticajem aktivnosti živih organizama i ono se neretko smatra kao katalizator drugih procesa raspadanja. Kao što je već napomenuto, biogeno raspadanje se može svrstati u mehaničko, jer rast korenja biljaka pritiska zidove pora i pukotina, i tokom dugog dejstva može izazvati razdrobljavanje stena. Pored toga, biogeno raspadanja se može svrstati i u hemijsko raspadanje, jer korenje biljaka u zemljište oslobađa ugljen-dioksid usled procesa disanja, koji dalje pokreće hemijske reakcije koji utiču na raspadanje stena, i ne samo to, biljke luče organske kiseline (npr. jabučna kiselina, oksalna kiselina, mravlja kiselina) čiji  $\text{H}^+$  joni mogu reagovati sa metalima iz minerala. Pored otpuštanja odgovarajućih komponenata (jedinjenja) tokom života, biljni materijal nakon raspada proizvodi i ugljen-dioksid i fulvo kiseline koje dalje mogu stupati u reakcije i uzrokovati hemijsko raspadanje.

## 2.4 PADINSKI PROCESI

Procesi koji se javljaju na padinama i koji deluju uzdužno, jednim imenom nazivaju se padinski procesi. Svojstveno za sve padinske procese jeste to da su prostorno i vremenski neodvojivi, te da često prelaze jedan u drugi ili da deluju udruženo; da su i prostorno i vremenski ograničeni i da se mogu obnavljati u kratkim periodima. Međutim, pored sličnosti, padinski procesi se razlikuju po mehanizmu delovanja i shodno tome se razlikuju tri geomorfološka procesa: deluvijalni, proluvijalni i koluvijalni proces.

### 2.4.1 Deluvijalni proces

Deluvijalni proces, poznat i kao proces površinskog spiranja, jedan je od tri padinska procesa, koji podrazumeva spiranje površinskog, rastresitog eluvijalnog materijala izazvano dejstvom površinskih difuzionih tokova vode. Dejstva ovih tokova se dešavaju povremeno i najčešće bivaju izazvana kratkotrajnim jakim padavinama ili otapanjem snežnog pokrivača, pri čemu jedan deo vode upija tlo dok se drugi deo proceđuje kroz površinski rastresit sloj zemljišta. Kada se tlo potpuno zasiti vodom, dolazi i do formiranja tankog vodenog pokrivača, koji se pod uticajem sile gravitacije sliva niz padinu. Deluvijalnim procesom je zahvaćen samo rastresit, eluvijalni materijal, ne i matična stena. Količina, ali i kinetička energija ovako nastalih difuzionih voda je mala, dolazi do proceđivanja i ispiranja samo sitnog, materijala milimetarske veličine. Posledica spiranja sitnih čestica je narušavanje oslonca krupnijih odlomaka padine. Ukoliko je reč o manjim odlomcima, oni se, nakon narušavanja oslonca, niz padinu kreću rotaciono, dok se krupniji, centimetarski i decimetarski odlomci niz padinu kreću translatorno i transportuju se na mala rastojanja, što onemogućava uočljiviju obradu materijala i njegovu granulometrijsku klasifikaciju. Nakon erozije i transporta, poslednja faza procesa jeste akumulacija materijala, do koje dolazi na mestima gde je nagib padine smanjen, ili u samom podnožju padine.

Iako deluvijalnim procesom biva zahvaćen samo površinski, rastresit materijal, njegovim spiranjem posledično procesom denudacije dolazi do ogoljavanja stenske mase i njenog daljeg izloženosti eluvijalnim procesima tj. fizičko-hemijskom raspadanju. Nasuprot procesima denudacije, odvija se i proces inudacije, pri kom se transportovan materijal akumulira ublaženim nagibima padine prekrivajući prethodno ogoljenu matičnu stenu i formirajući novi sloj rastresitor materijala tzv. deluvijalni prekrivač.

### 2.4.2 Proluvijalni proces

Za razliku od deluvijalnog procesa, proluvijalni proces umesto površinskog, ima linijsko dejstvo difuzionih tokova vode i primetno veću kinetičku energiju. Naime, kao i u deluvijalnim, i u proluvijalnim procesima se tok vode spušta niz padinu, pri čemu se, imajući u vidu da one nisu ravne, niz padinu stvaraju linijska udubljenja različitih veličina u kojima se sakuplja veća količina vode, veće kinetičke energije, koja je dovoljna da proširi i produbi to proširenje. Tako nastala proširenja omogućavaju formiranje povremenih linijskih tokova koji mogu biti manji, stalni ili povremeni npr. potoci koji mogu prerasti u bujice u slučaju većeg priliva vode koji se potom ulivaju u veće vodotoke. U malom broju slučajeva može se desiti da povremeni vodotoci useku svoja korita i postanu stalni.

Za proluvijalne procese vezuju se termini kao što su: bujični procesi, procesi jaruženja i procesi erozije. Bujični procesi se odnose na pojave izazvane bujicom, odnosno, silovitim vodotokom, velike količine i brzine vode. Proces jaruženja je često korišćen, imajući u vidu da su jaruge osnovni oblik proluvijalnih procesa, dok proces erozije koji podrazumeva mehaničko ili hemijsko raspadanje postojećih, ali i formiranje novih morfoloških oblika.

U okviru proluvijalnih procesa razlikuju se neposredna i posredna erozija, kao i prateće pojave izazvane proluvijalnom erozijom. Neposredna erozija uzrokovana je direktnim dejstvom pokrenute mase koja pored eluvijalnog i transportovanog deluvijalnog materijala deluje i na matičnu stensku podlogu, sa koje, zahvaljujući velikoj kinetičkoj energiji otkida i pokreće komade koji mogu doseći i metarsku veličinu. Nasuprot neposrednoj, posredna erozija biva pokrenuta dejstvom pokrenutog materijala tj. odlomaka i blokova na stensku podlogu uzrokujući vertikalnu eroziju, kada je erozija usmerena ka dnu korita i produbljuje ga, odnosno bočnu eroziju, kada je erozija usmerena na strane korita i proširuje ga. Pored posredne i neposredne erozije dešavaju se i prateće pojave, najčešće izazvane bočnom erozijom kada pod dejstvom gravitacije dolazi do odronjavanja i kliženja strana korita uled njenog potkopavanja.

Transport materijala u proluvijalnim procesima se odvija u vodenoj sredini, vučenjem po dnu korita, ukoliko se radi o krupnijem i težem materijalu ili suspenzijom sitnijeg i lakšeg materijala u vodi. U slučaju veće kinetičke energije vodenog toka, i krupniji materijal može biti transportovan u suspenziji. Transport materijala proluvijalnog procesa je kratkotrajan, doseže mala rastojanja i karakteriše se grubom obradom materijala i slabo naglašenom granulometrijskom klasifikacijom.

Proluvijalna akumulacija je najčešća u podnožju padina ili u dnu rečne doline jer se na tim mestima naglo smanjuje kinetička energija vodotoka koji dolazi sa padine, pri čemu dolazi do taloženja transportovanog materijala, njegovog mešanja, nezavisno od njegove krupnoće odnosno načina transporta. Proluvijalni proces je višestruko obnovljiv, jer se konstantno događa da slabije bujice donose sitniji materijal koji oblaže prethodno transportovane i akumulirane krupnije materijale, i obrnuto, da jače bujice donose krupniji materijal koji oblaže prethodno transportovan i akumuliran sitniji materijal, poništavajući mogućnost granulometrijske klasifikacije akumuliranog materijala.

Shodno mehanizmima procesa, razlikuju se i oblici i pojave proluvijalnih procesa i to na erozione oblike i na akumulacione oblike. Pod erozionim oblicima proluvijalnih procesa smatraju se jaruge i zemljane piramide. Jaruge su linearne, otvorene depresije različitih širina i dubina, koje se javljaju na padinama i koje se regresivno razvijaju uz padinu tj. prema višim delovima padine. Za nastanak i dalji razvoj jaruga, neophodno je postojanje depresije na padini u koju se sakuplja veća količina vode i omogućava intenzivniju eroziju. Na razvoj jaruge utiče geološki sastav padine, intenzitet padavina i nagib padine, kao i prisustvo ili odsustvo vegetacionog prekrivača, pa shodno tome, meke rastresitije stene poput peščara, oštih nagiba, koje nemaju zaštitni pokrivač visoke vegetacije, lako podležu procesima jaruženja.

Pod akumulacionim oblicima proluvijalnih procesa smatraju se plavinske lepeze i deluvijalno-proluvijalni zastori. Plavinske lepeze javljaju se u podnožju padina i na dnu rečnih dolina, odnosno na kraju povremenih linijskih tokova i bujica, ili na kraju stalnih manjih vodotokova. Pri ulasku u ravniju površinu podnožja vodotokovi gube deo kinetičke energije, usporava se transport materijala, koji se potom rasipa i oblaže podnožje koje, posmatrano odozgo, ima izgled lepeze.

Deluvijalni i proluvijalni procesi su najčešće udruženi i ne mogu se striktno razlikovati, pa je njihovo morfološki oblici dobijeni njihovim udruženim dejstvom nazivaju deluvijalno-proluvijalni zastori koji nastaju na većim padinama. Tako formirani zastori svojim nastankom ublažavaju nagib padine, ali i smanjuju njenu stabilnost imajući u vidu da je rastresit materijal koji formira zastor nevezan i da je podlozan daljem pokretanju koje najčešće biva uzrokovano obilnijim padavinama, topljenjem snega, pa čak i pri trusnim udarima.

U regijama suve, aridne klime, deluvijalni i proluvijalni procesi su jačeg intenziteta, imajući u vidu da su to klime kojima su svojstvene velike temperaturne razlike u kratkim vremenskim intervalima, što dovodi do formiranja velike količine rastresitog materijala.

### 2.4.3 Koluvijalni proces

Koluvijalni proces je vremenski i prostorno ograničeni i u kratkim vremenskim intervalima obnovljiv geomorfološki proces, koji nastaje kao posledica neposrednog delovanja sile gravitacije. Kao i svi geomorfološki procesi, i koluvijalni procesi imaju segmente erozije, transporta i akumulacije, inicirane narušavanjem prirodne ravnoteže padine ili kosine endogenim ili egzogenim poreklom. Erozijom dolazi do razaranja postojećih i stvaranja novih oblika padine, pri čemu se erodovani materijal dalje transportuje, odlaže i pokriva već postojeći ili formira nove akumulacione oblike. Erozioni i akumulacioni oblici koluvijalnih procesa nisu jasno razdvojivi, deluju na malom prostoru i zavisno od načina kretanja, kao i od količine pokrenutog materijala, kinetička energija varira u velikom opsegu i dovode do stvaranja složenih oblika. U koluvijalnim procesima se podrazumeva pokretanje stenske mase izazvano dejstvom gravitacije koje se klasifikuje kao sporo ili delapsiono kretanje i kao brzo, odnosno kolapsiono kretanje stenske mase.

Pod sporim, delapsionim gravitacionim kretanjem stenske mase svrstavaju se kretanja čija brzina varira od  $10^{-3}$  do  $10^4$  mm/danu i to su kretanja u vidu kliženja, puzanja, tečenja i osipanja. Kliženje podrazumeva smičuće, translatorno kretanje pojedinačnih čestica ili blokova po definisanoj površini kretanja. Površina kliženja je posledica nastanka sekundarnog nepropusnog sloja gline, ne zahteva velike nagibe padine i najčešće se odvija regresivno, uz padinu. Tako formiran sloj predstavlja površinu kliženja po kojoj se kreće voda procedena sa površine i potpomaže kliženje.

Za razliku od kliženja, kod puzanja površina po kojoj se čestice sporo smiču nije jasno definisana. Kako su u prirodi retke padine koje nikada nisu izložene kiši, tako se dešava da procedivanje difuznih tokova vode kroz rastresit sloj predstavlja deluvijalni proces. Prestankom padavina počinje koluvijalni proces. Tada se nastavlja transport materijala, ali ne pod dejstvom difuznih tokova vode, već pod dejstvom gravitacije. Puzanjem je zahvaćen samo nevezan, rastresit materijal čije se površinske čestice i krupniji komadi transportuju najbrže. Sa dubinom rastresitog sloja ta brzina se smanjuje, sve dok se puzanje čestica i materijala potpuno ne zaustavi. Puzanje je još poznato i kao suvo tečenje i pored toga što zavisi od dubine, zavisi i od nagiba padine.

Tečenje je takođe kretanje čestica karakteristično za rastresiti, površinski materijal i podrazumeva kretanje jako raskvašenog, kašastog i viskoznog materijala veličine alevrita i/ili peska, niz padinu. Brzina tečenja zavisi od viskoznosti natopljenog materijala i nagiba padine i, idući ka dubljim slojevima rastresitog materijala, brzina se smanjuje, onemogućavajući raspoznavanje granice između pokretnog i nepokretnog materijala.

Osipanje podrazumeva rotaciono kretanje čestica i krupnijih komada rastresitog materijala niz strmije padine pod uticajem gravitacije, čijom cementacijom potom mogu nastati padinske breče. Rotaciono kretanje može mestimično preći u translatorno, a brzina samog kretanja zavisi od nagiba padine i debljine rastresitog sloja i veća je od brzine kliženja ili puzanja materijala. Zbog veće dužine transporta materijala tokom osipanja, pri ovom kretanju erozioni i akumulacioni oblici se mogu međusobno razdvojiti.

Pod brzim, kolapsionim kretanjima se podrazumevaju nagli pokreti stenske mase niz strme padine, čija se brzina meri u metrima u sekundi. Glavni oblik ovog kretanja odronjavanje stenske mase, odnosno otkidanje i naklo stropoštvavanje stenske mase niz strme padine izazvano endogenim, npr. trusovi ili vulkanske erupcija, ili egzogenim uzročnikom, od kojih je najznačajnija ljudska delatnost. Svaki vid delapsionog ili kolapsionog materijala stvara određeni oblika, pa shodno tome klizišta nastaju usled kliženja materijala, pužišta usled puženja, sipari usled osipanja, a odroni usled odronjavanja materijala, pri čemu su klizišta i sipari najčešći oblici koji se javljaju.

Klizišta su izrazito valoviti reljefi okarakterisani pojavom manjih odseka i naglim promenama nagiba, kako niz padinu, tako i paralelno sa njom. Klizišta predstavljaju složen

geomorfološki oblik u kom se ne mogu razlikovati erozioni i akumulacioni elementi i njihova identifikacija se vrši na osnovu identifikacije postojanja valovitog reljefa, ožiljaka i promena nagiba, ali i po prisustvu visoke vegetacije, koje se u slučaju klizišta, naginje u različitim pravcima, zavisno od kretanja stenske mase.

Sipari nastaju najčešće na strmim padinama i odsecima i, kao što je već napomenuto, formiranje sipara podrazumeva rotaciono kretanje čestica i krupnijih komada rastresitog materijala pod uticajem gravitacije, imajući u vidu da rotaciono kretanje može mestimično preći u translatorno. Sipari su sačinjeni od točila tj. žleb niz koji se materijal osipa, tela sipara konusnog oblika koji se nalazi u podnožju padine u kom se transportovani materijal akumulira i od spoja tela dva sipara koji se nalaze blizu jedan drugom.

## 2.5 KÖPPENOVA KLASIFIKACIJA KLIME

Klima predstavlja prosek klimatskih uslova koji se odvijaju iznad određenog prostora tokom posmatranog perioda koji može varirati od nekoliko meseci, pa sve do nekoliko miliona godina, iako se danas za određivanje prosečne klime najčešće uzima period od 30 godina (WMO, 2024). Jedna od osnovnih ciljeva klimatologije kao nauke koja se bavi izučavanjem vremenskih uslova u vremenu i prostoru jeste da pronađe sličnosti i poveznice koje bi omogućile određivanje klimatskih regija, što je osnov klasifikacije klime. Kako je klima konceptualna statistička konstrukcija zasnovana na vremenskim elementima kao što su insolacija, temperatura, pritisak, vazdušne mase i padavine, njena klasifikacija je od davnina predstavljala izazov.

Osnovna tri tipa klasifikacije klime jesu:

- empirijska klasifikacija – bazira se na statističkim podacima o vremenskim elementima i pokušava da opiše tipove klime prema stvarnim merenjima i prosečnim vrednostima;
- generička klasifikacija – bazira se na procesima i mehanizmima koji oblikuju klimu i ona pokušava da objasni, ne samo posledice tih mehanizama i procesa, već i uzroke klime i njenih obrazaca;
- kombinovana klasifikacija – bazira se na kombinaciji empirijskog i generičkog pristupa i pokušava da pruži sveobuhvatan pogled na klimu neke oblasti.

Jedna od najpoznatijih klimatskih klasifikacija jeste Köppen-ova empirijska klasifikacija klime zasnovana na podacima o temperaturi i padavinama (Radinović, 1984). Za određivanje postepenih prelaznih zona ove klasifikacije klime (slika 5), kao podaci koriste se prosečna mesečna temperatura, prosečne mesečne padavine i ukupne godišnje padavine. Iako ova klasifikacija ne uključuje činioce poput vetra, ekstremnih temperatura, intenziteta padavina, pokrivenosti oblaka ili količine sunčeve svetlosti, ona predstavlja podelu koja se lako razume i često koristi (slika 6).



**Slika 5.** Promene klima u zavisnosti od temperature i vlažnosti (Christopherson, 2005).

Za obeležavanje klima prema geografskoj širini koristi velika latinična slova:

**A** – tropska kišna klima;

- B** – suva klima;
- C** – umereno topla kišna klima;
- D** – borealna snežno-šumska klima;
- E** – polarna snežna klima;
- H** – visokoplaninska klima;

Drugo slovo u formuli klasifikacije bolje opisuje režim padavina, u slučaju šumskih klima (A, C i D), odnosno stepen suvoće u slučaju suve (B) tj. hladnoće u slučaju snežne (E) klime.

f – nema sušnog perioda;  
 s – letnja suša;  
 w – zimska suša; } **A, C i D**

S – stepska klima;  
 W – pustinja klima; } **B**

T – klima tundre;  
 F – klima večitog leda; } **E**

Treće slovo označava temperaturni režim i pri klasifikaciji C klime koriste se a, b ili c oznake, pri klasifikaciji D klime koriste se a, b, c ili d oznake, a pri klasifikaciji suve klime (B) h ili k oznake.

- a** – prosečna temperatura najtoplijeg meseca  $>22^{\circ}\text{C}$ ;
- b** – prosečna temperatura najtoplijeg meseca  $<22^{\circ}\text{C}$ ; najmanje 4 meseca u godini imaju prosečnu temperaturu  $>10^{\circ}\text{C}$ ;
- c** – prosečna temperatura najtoplijeg meseca  $<22^{\circ}\text{C}$ ; manje od 4 meseca u godini imaju prosečnu temperaturu  $>10^{\circ}\text{C}$ ; prosečna temperatura najhladnijeg meseca  $> -38^{\circ}\text{C}$ ;
- d** – prosečna temperatura najtoplijeg meseca  $<22^{\circ}\text{C}$ ; manje od 4 meseca u godini imaju prosečnu temperaturu  $>10^{\circ}\text{C}$ ; prosečna temperatura najhladnijeg meseca  $< -38^{\circ}\text{C}$ ;

**h** - prosečna godišnja temperatura  $>18^{\circ}\text{C}$ ;

**k** - prosečna godišnja temperatura  $<18^{\circ}\text{C}$ ;

Pored pomenutih osnovnih grupa slova, pri zapisivanju formule klasifikacije, mogu se koristiti i dodatna slova, i to najčešće pri zapisivanju formula umerenih i snežnih kišnih klima.

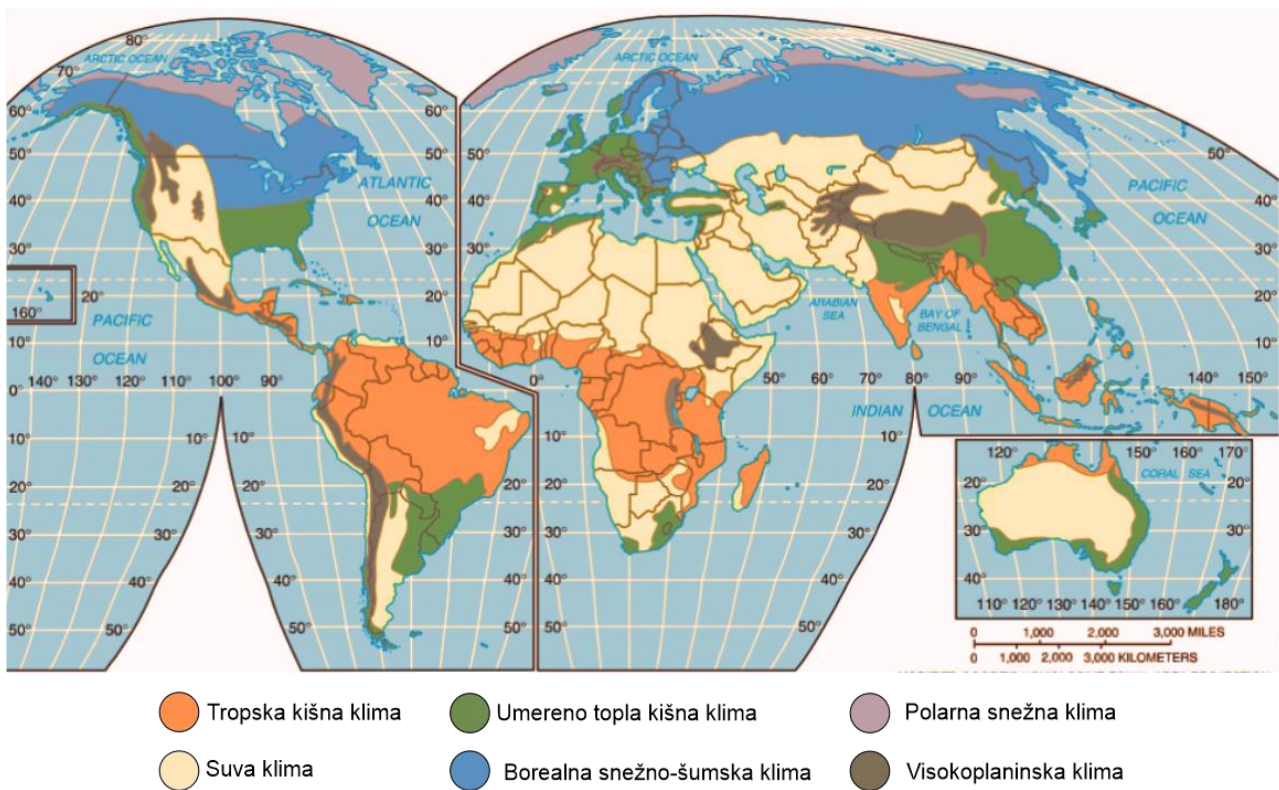
**x** – velike količine kiše na početku leta, a potom vedrije leto;

**x'** - retke, ali jake padavine tokom svih meseci

**x''** - kišovita razdoblja, jednom u rano leto i jednom u kasnu jesen;

Köppen-ova klasifikacija razlikuje 5 klimatskih grupa koje se dalje dele na klimatske tipove, a neke i na pod tipove i to su:

**A – tropska kišna klima** svojstvena za ekvatorijalni predeo proteže se od  $20^{\circ}\text{N}$  do  $20^{\circ}\text{S}$  geografske širine duž ekvatora, karakteriše oko 36% površine Zemlje sa srednjom temperaturom tokom najhladnijeg meseca višom od  $18^{\circ}\text{C}$ . Na osnovu godišnjih padavina se deli na:



**Slika 6.** Klimatske zone. (Christopherson, 2005)

**Af** – tropska vlažna ili prašumska klima

Stalno vlažna i topla klima sa padavinama većim od 6cm tokom svih meseci i padavinama izazvanim pomeranjima u međutropskoj konvergentnoj zoni koje traju tokom svih 12 meseci;

**Am** – tropska monsunaska klima

Klima okarakterisana vlažnim kišnim sezonama izazvanim sudarima vetrova u međutropskoj konvergentnoj zoni koji mogu trajati od 6-12meseci i kratkim sušnim periodima koji mogu trajati jedan ili više meseci sa padavinama manjim od 6cm;

**Aw** – tropska savanska klima

Klima u kojoj padavine izazvane pomeranjima u međutropskoj konvergentnoj zoni dominiraju najviše do 6 meseci godišnje, gde su leta vlažna, a zime suve posledično uzrokujući deficit u vodenom bilanu tokom tog perioda;

**B – suva klima** se u zavisnosti od stepena sušnosti i toplote ili hladnoće može naći na raznim geografskim širinama i ona predstavlja jedini tip klime koji je klasifikovan na osnovu padavina, a ne temperature. Površina Zemlje izložena ovoj klimi veća je od 35% i jedna je od najzastupljenijih tipova klime na kopnu.

**BWh, BWk** – aridna, pustinjska klima

Za predele pustinjske suve klime (BW) svojstveno je da je količina padavina manja od polovine njenog isparavanja. Srednja godišnja temperatura tople pustinjske klime (BWh) prelazi 18°C i u zavisnosti od predela, neki delovi ove klime mogu biti bez padavina, dok na nekim padavine

mogu dostići do 35cm godišnje. Srednja godišnja temperatura hladne pustinjske klime (BWk) manja je od 18°C sa malom količinom padavina koja ne prelazi 15cm godišnje.

#### **BSh, BSk** – semiaridna stepska klima

Za predele suve stepske klime (BS) svojstveno je da je količina padavina koja prelazi polovine njenog isparavanja. Srednja godišnja temperatura tople stepske klime (BSh) prelazi 18°C i ima srednju količinu padavina manju od 60cm godišnje. Srednja godišnja temperatura stepske pustinjske klime (BSk) manja je od 18°C, dok njene godišnje padavine variraju između 20-40cm.

**C – umereno topla kišna klima** zauzima oko 27% Zemljine površine i predstavlja područja srednje temperature u kojim živi više od polovine svetske populacije. Predeo ove klime okarakterisan je postojanjem sezonskih promena klime u kojima srednja temperatura u najtoplijem mesecu prelaze 10°C, a u najhladnijem mesecu je više od 0°C, ali ne prelaze 18°C. U poređenju sa suvom klimom (B), za umereno toplu kišnu klimu svojstveno je postojanje dovoljne količine padavina, dok je od tropske klime (A) razlikuje postojanje hladne sezone srednjom temperaturom ne većom od 18°C.

#### **Cfa, Cwa** - vlažna suptropska

Klime koje su ili vlažne tokom godine (f) ili imaju izražen sušni period (w) i za koje su svojstvena vruća leta (a) sa srednjom temperaturom višom od 22°C. Vlažna topla klima sa vrućim letom Cfa pod uticajem maritimnih tropskih i kontinentalnih polarnih vazdušnih masa bivaju izložene padavinama tokom cele godine, čiji prosek iznosi 100-200cm godišnje. Za vlažnu toplu klimu Cwa je pored vrućeg leta svojstve i period sušnim zimskim periodom tokom čijeg najsušnijeg meseca padne 10x manje padavina nego tokom najtoplijeg vlažnog letnjeg meseca.

#### **Cfb, Cfc** – morska zapadnoobalna klima

Hladne, vlažne i nestabilne morske polarne vazdušne mase dominiraju ovim tipom klime, čineći ga nepredvidivim. Za morsku zapadnoobalnu klimu svojstvene su padavine tokom cele godine (f) i blage zime i svežija leta u kojima srednja temperatura najtoplijeg meseca ne prelazi 22°C, a 4 meseca godišnje imaju temperaturu višu od 10°C (b), odnosno 1-3 meseca godišnje imaju temperaturu višu od 10°C (c).

#### **Csa, Csb** – mediteranska klima sa suvim letima

Topla leta kod kojih srednja temperatura najtoplijeg meseca ne prelazi 22°C (a), odnosno umerena leta kod kojih srednja temperatura najtoplijeg meseca ne prelazi 22°C (b) i vlažne zime tokom kojih padne 70% ukupnih godišnjih padavina svojstvena su za ove tipove klime.

**D – borealna snežno-šumska klima** karakteriše oko 21% Zemljine površine i karakteristična je za unutrašnjost prostranih kontinentalnih oblasti, dok se na južnoj hemisferi pojavljuje samo u planinskim područjima. Zime su joj duge i oštrije, sa češćim snežnim pokrivačima, nego što je to slučaj sa umerenom toplom kišnom klimom (C) i sa ponekim letnjim topelinama. Srednja temperatura najtoplijeg meseca u godini prelazi 10°C, dok je srednja temperatura najhladnijeg meseca u godini ispod 0°C.

#### **Dfa, Dwa** – vlažna kontinentalna klima sa toplim letima

Vlažna kontinentalna klima sa toplim letima srednje temperature više od 22°C (a) podležu uticaju maritimnih tropskih vazdušnih masa tokom leta. Razliku među njima čini količina

godišnjih padavina, s obzirom da one mogu biti dominantne tokom čitave godine (f) ili se zimi mogu javljati zimski suše (w).

### **Dfb, Dwb** – vlažna kontinentalna klima sa umerenim letima

Vlažna kontinentalna klima sa umerenim letima srednje temperature niže od 22°C (b) karakteriše se manjim obimom godišnjih padavina koje su zastupljene tokom čitave godine (f) nego što je to slučaj kod vlažne kontinentalne klime sa toplim letima. Pored značajnijih snežnih padavina, za ovu klimu je svojstveno i postojanje sušnog zimskog perioda (w), a periodi bez mraza mogu trajati manje od 90 dana godišnje severnom delu, pa sve do 225 dana godišnje u južnom delu pojasa ove klime.

### **Dfc, Dwc, Dwd** – subarktčka klima

Subarktčka klima hladnih leta i veoma hladnih zima obuhvata predele Aljaske, Kanade, Rusije i severne Skandinavije. Padavine u ovim oblastima su niske i obično iznose nešto više od 25cm. Tlo je generalno vlažno i ispod površine delimično zamrznuto, što se naziva permafrost. Padavine mogu biti zastupljene tokom čitave godine (f) ili se može javiti zimska suša (w). Srednja mesečna temperatu može prelaziti 10°C u periodu od 1 do 4 meseca godišnje (c), dok u najhladnijem mesecu može pasti ispod -38°C (d). Područja sa ovom klimom uglavnom su pokrivena takozvanim snežnim odnosno četinarskim šumama koje se u Rusiji nazivaju tajgama i borealnim šumama u Kanadi.

**E – polarna snežna klima** zauzima oko 19% Zemljine površine. Za razliku od klima na nižim geografskim širinama, polarna snežna klima je bez pravog leta, ima srednju mesečnu temperaturu ne veću od 10°C i površina koju ona pokriva je uvek prekrivena ledom.

### **ET** – klima tundri

Za klimu tundri svojstveno je prisustvo snežnog pokrivača 8-10 meseci godišnje i srednja mesečna temperatura najtoplijeg meseca u godini između 0-10°C. Predeli ove klime nalaze se isključivo na severnoj hemisferi, uz izuzetak planina visokih nadmorskih visina južne hemisfere i dela Antarktika.

### **EF** – klima većitog leda

Klima većitog leda pokriva područje Antarktika i Severnog pola i njena srednja temperatura čak ni tokom najtoplijeg meseca ne prelazi tačku mržnjenja, odnosno niža je od 0°C. Severni pol zapravo predstavlja more prekriveno ledom i njegova temperatura neretko bude i manja od -78°C, dok Antarktiku iako konstantno prekriven snežnim pokrivačem, tokom godine primi manje od 8cm padavina.

### **EM** – polarna morska klima

Polarna morska klima umerenija je u poređenju sa ostalim polarnim klimama tokom zimskih meseci, ali i pored toga je oštija nego klima tundri. Tokom svih meseci njena srednja temperatura je iznad -7°C, a srednja godišnja doseže do nešto manje od 17°C.

### **H** – visokoplaninska klima

Definisana kao klima gde su dominantni efekti nadmorske visine, a ne samo geografske širine. Karakteriše je pad temperature sa povećanjem nadmorske visine, velike količine padavina, jaki vetrovi i hladne zime i sveža do umerena leta.

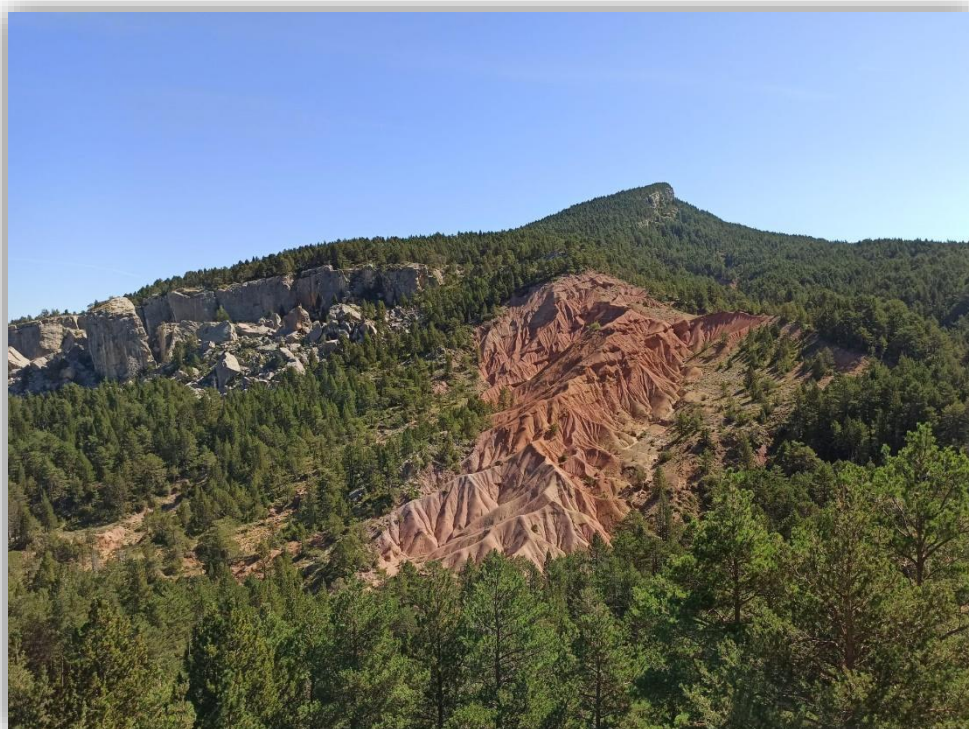
S obzorom da Köppen-ova klasifikacija klime omogućava da se na osnovu numeričkih meteoroloških podataka jednoznačno odredi tip klime; da je takva klasifikacija primenjiva na celu Zemlju; da su tako uspostavljene klase klime u korelaciji sa vegetacijom na posmatranim područjima; i da su oznake klima pogodne za međunarodne upotrebe, ona neretko služi kao osnov za mnoge modifikovane podele klime.

## 2.6 BADLANDS TERENI

Prema Yair i dr. (1980), *badlands* tereni se, prema geološkoj vremenskoj skali, smatraju mladim. Zahvaljujući brojnim faktorima poput specifičnih vremenskih uslova, litološkog sastava i intenzivnih erozionih procesa, ovi tereni brzo nastaju, ali isto tako brzo i nestaju, uz procenjeni životni vek od oko milion godina (Bryan i Yair, 1982). Karakterišu se kao robusni, ali lako erodujuć predeli formirani u sitnozrnim, slabo konsolidovanim materijalima (slika 7). Izloženi su intenzivnim klimatskim uticajima, imaju specifičnu površinsku hidrologiju i oskudan ili potpuno odsutan vegetacioni pokrivač (Zgłobicki i dr., 2018; Moreno-de las Heras i Gallart, 2018). U ovim sistemima vegetacioni pokrivač, kada postoji, neretko ima jako važnu ulogu površinske zaštite od erozije.

*Badlands* tereni su svojstveni za predele aridne i semiaridne klime, odnosno prema Köppen-ovoj klasifikaciji, za mediteranske klime sa suvim letima (Csa i Csb) (Yair i dr., 1980, McCloskey i dr., 2016). Međutim, ovi tereni mogu nastati pod različitim klimatskim uslovima, te su ih na osnovu klimatskih faktora u kojima nastaju, a zarad lakše klasifikacije, Gallart i dr. (2002) podelili u tri grupe:

- aridne *badlands* terene sa <200mm padavina na godišnjem nivou bez značajnije uloge postojeće vegetacije;
- semi-aridne *badlands* terene sa 200-700mm padavina na godišnjem nivou i sa mestimičnom vegetacijom koja u manjoj meri ima uticaj na pojedine geomorfološke procese i koja zavisi od dostupnosti vode na terenu;
- humidne *badlands* terene sa >700mm padavina na godišnjem nivou sa bogatijim vegetacionim pokrivačem čije je proširenje više uslovljeno geomorfološkim procesima, nego dostupnošću vode na terenu.



**Slika 7.** Plata de la Vila, Saldes – Katalonski Pirineji, Španija.  
(Izvor: Nevena D. Antić)

Pored klimatskih uslova, Moreno-de Las Heras i Gallart (2018) ističu složen mineraloški i fizičko-hemijski sastav, ali i sortiranost čestica kao jedne od ključnih faktora formiranja ovih

terena. Dodatno, Kašanin-Grubin (2013) i Kašanin-Grubin i dr. (2018) naglašavaju da ponašanje materijala direktno zavisi od njihovog litološkog sastava. I ne samo to, ističu da svojstva poput bubrenja, skupljanja, propustljivosti, pucanja itd. zavise upravo od vrste i količine minerala gline posmatranog sedimenta.

*Badlands* sedimenti su uglavnom glinovito-alevritski i alevritsko-glinoviti (Shepard 1954; Martínez-Murillo i Nadal-Romero, 2018) sa dominacijom kalcita, dolomita i gipsa u svom sastavu. Minerali gline (smektit, ilit, hlorit i kaolinit) čine 10–15% sastava ovih sedimenata i zbog veličine svojih čestica (<0,005 mm) i velike aktivne površine izuzetno su podložni spoljašnjim uticajima (Kašanin-Grubin, 2008). Stepenn njihove sortiranosti direktno utiče na njihovu otpornost na raspadanje. Dobro sortirane fine čestice čine materijal manje otpornim, dok mešavina čestica različitih veličina povećava stabilnost (Terzaghi i Peck, 1967; Kašanin-Grubin, 2013).

Razvoj specifičnih oblika reljefa *badlands* terena (slika 8) direktna je posledica složene interakcije između nekonsolidovanog materijala iz kog su sačinjeni i niza geomorfoloških procesa koji simultano deluju u različitim vremenskim i prostornim okvirima. Dominantnu ulogu u transformaciji ovih erozivnih sistema imaju procesi poput raspadanja matične stene, fluvijalne površinske erozije, podzemnog ispiranja tj. cevaste erozije i padinskih procesa.



**Slika 8.** Val d'Orcia badland – Toskana, Italija.  
(Izvor: Nevena D. Antić)

Raspadanje matične stene je osnovni mehanizam koji se odvija na površinskom sloju regolita ili kori i koji uspostavlja dinamičku kontrolu nad morfologijom i koji je neretko zapostavljen u naučnoj literaturi (Moreno-de las Heras i Gallart, 2018; Kašanin-Grubin i Bryan,

2007). Površinski procesi poput oticanja su najčešće pominjani u literaturi i zavise od litološkog sastava, intenziteta padavina i stanja regolita. Odvajanje čestica i transport niz padinu kao posledica udara kišnih kapi izazivaju visoke stepene oticanja sedimenata, ali i formiranje dovesti do pojave mikro zemljanih piramida na površinama terena (Regüés i Gallart, 2004; Desir i Marin, 2003).

Fluvijalni procesi koji za posledicu imaju slojevito spiranje i formiranje brazdi i jaruga prepoznati su kao glavni procesi koji utiču na nastanak i dalju evoluciju reljefa *badlands* terena (slika 9). Formiranje vodenih tokova u brazdama predstavlja kompleksan fenomen, prvenstveno zbog doprinosa podpovršinskih tokova. Naime, voda dospeva u brazde kroz sistem pukotina i mikrotunela, koji su izrazito nestabilni i koji podležu ciklusima nastanka i nestanka. Pukotine i mikrotuneli se mogu otvarati ili zatvarati tokom samo jednog kišnog događaja, ali i u okviru jedne sezone, što je naročito izraženo: tokom hladnih perioda, tokom koji mrazno trošenje može potpuno izbrisati postojeće brazde; ili tokom nastanka blatnih tokova, pri čemu blatni tokovi menjaju mikromorfologiju površine, brišući stare i postavljajući nove mreže drenažnih kanala. Dok su brazde promenljive, linearno širenje primarne drenažne mreže, najčešće se manifestuje kroz jaružnu eroziju. Takav proces se smatra fundamentalnim za evoluciju *badlands* terena i stvaranjem dubokih i oštih rezova u podlozi direktno uzrokuje visoku raščlanjenost terena, čime se formira ekstremno velika gustina drenaže koja definiše karakteristične oblike reljefa (Harvey, 1992; Wainwright i Brazier, 2011).

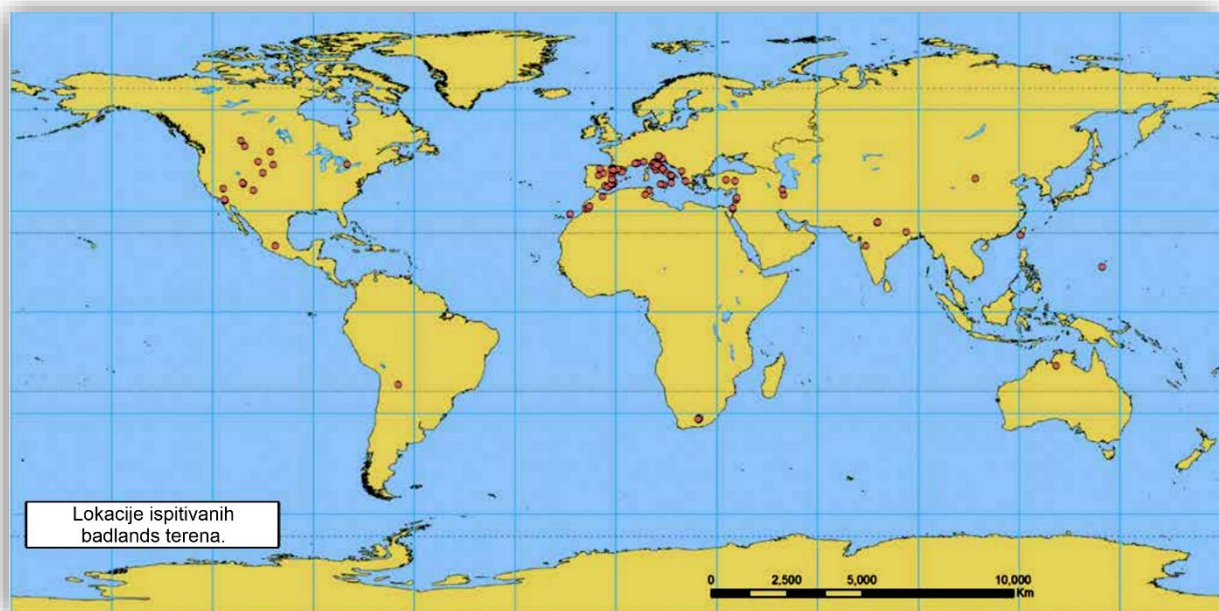
Pored brazdanja i jaruženja, razvoj mikrotunela i tunelsku ili cevaste erozije kao posledice podpovršinske erozije je česta pojava kod disperzivnih materijala marinskog porekla i postoje indikacije da su mnogi *badlands* tereni zapravo inicirani kolapsom ovih podzemnih mreža (García-Ruiz, 2011; Faulkner, 2013). Dok sa druge strane zbog strmih nagiba i slabe stabilnosti materijala, a usled masovnih kretanja i gravitacionih procesi dolazi do akumulacija materijala u podnožju padina, puzanje regolita i nastanka klizišta.



**Slika 9.** Montalbano Jonico - Basilikata, Italija.  
(Izvor: Nevena D. Antić)

Izloženost ovih prostora širokom spektru geomorfoloških procesa, uz odsustvo nedvosmislenih uzročnika njihovog nastanka i evolucije, čini ih pogodnim za brojna naučna istraživanja (slika 10). U skladu sa tim, Martínez-Murillo i Nadal-Romero (2018) su istakli pet ključnih aspekata na koja bi buduća istraživanja trebalo da se fokusiraju:

- **Holistički pristup:** Tretiranje *badlands* terena kao složenih sistema koji zahtevaju sveobuhvatnu analizu;
- **Identifikacija pragova:** Utvrđivanje kritičnih granica padavina, topografije i drugih činilaca odgovornih za razvoj ovih terena u uslovima različitih klima;
- **Korelacija sastava stena i klime:** Povezivanje različitih tipova stena sa specifičnim klimatskim faktorima i uslovima;
- **Metodološka inovacija:** Sticanje dugoročnih kvantitativnih saznanja uz usvajanje i primenu novih modela i metoda za identifikaciju izvorišnih područja vode i sedimenta;
- **Globalne promene:** Razumevanje odgovora ovih terena na savremene promene u životnoj sredini.



**Slika 10.** Lokacije ispitivanih *badlands* terena u dosadašnjim naučnim radovima (Martínez-Murillo i Nadal-Romero 2018).

Iako se danas većina istraživanja zasniva na kvantifikaciji stope erozije i geomorfološkoj evoluciji samih terena (slika 11), za potpunu naučnu sliku neophodne su detaljne analize sedimenata koje osvetljavaju dublje mehanizme ovih procesa. Poseban akcenat treba staviti na hemijsko raspadanje, koje je u literaturi neretko zanemareno u odnosu na mehaničko. Povezivanje specifičnih reakcija različitih tipova *badlands* sedimenata i njihovih svojstava sa klimatskim uslovima, kao i razumevanje odgovora terena na globalne promene, predstavlja složen izazov koji zahteva kombinaciju terenskih osmatranja i laboratorijskih analiza. Upravo ovakvi, iako nekada metodološki zahtevniji i dugotrajniji, eksperimentalni pristupi omogućavaju preciznije predviđanje odgovora erodibilnih terena na sve intenzivnije promene životne sredine.

Klimatski eksperimenti su, sa ciljem proučavanja i razumevanja odgovora terena na globalne promene, pronašli veliku primenu u istraživanjima *badlands* terena. Međutim, među naučnicima postoje konstantne sumnje da laboratorijske simulacije, zbog najčešće simulacije

samo određenog broja činilaca, ne mogu na pravi način da prikažu autentične složene prirodne uslove.

Pod kontrolisanim, laboratorijskim uslovima jednostavnije je: izolovati i posmatrati pojedinačne faktore ili kombinovati one koji su se pokazali kao ključni za promene; precizno pratiti fizičke i hemijske promene tokom vremena, poput dinamike pukotina ili ispiranja jona; ponavljati simulacije pod konstantnim i identičnim uslovima u velikom broju replika; simulirati ekstremnije klimatske scenarije koji se predviđaju za budućnosti. Sa druge strane, u laboratoriji je jako teško ili gotovo nemoguće replikovati: stvarne terenske razmere (zbog ograničene veličine uzoraka); uticaj vegetacije; autentičnu strukturu i teksturu profila i hidrologiju koja se narušava prilikom uzorkovanja; kao i tačan spektar sunčevog zračenja i temperaturni gradijent čije vrednosti su različite za površinu terena i za okolni vazduh koji se najčešće uzima kao referentni. U poređenju sa laboratorijskim, glavna mana terenskih simulacija leži u njihovoj logističkoj složenosti. Iako su uslovi terena pri terenskim simulacijama realni, transport simulatora i prateće infrastrukture na strme terene može predstavljati ozbiljan tehnički izazov. Pored toga rad na terenu je izložen nepredvidivim vremenskim prilikama koje mogu ometati izvođenje eksperimenta.



**Slika 11.** Vallcebre *badlands* – Španija  
(Izvor: Nevena D. Antić)

Iako se najčešće koriste kao zasebni alati, laboratorijski i terenski eksperimenti bi trebalo da predstavljaju deo hibridnog pristupa istraživanju terena. Razlog tome je spoznaja da prednosti laboratorijskih eksperimenata predstavljaju mane terenskih, i obrnuto, da su prednosti terenskih eksperimenata zapravo mane laboratorijskih. Ovakav pristup istraživanju povezuje direktna zapažanja sa terena sa laboratorijskim podacima, čime se osvetljavaju procesi koji bi bez primene laboratorijskih metoda mogli ostati neprimećeni. U tom kontekstu laboratorijske simulacije se najčešće koriste u testiranju i dokazivanju hipoteze ili razumevanju nekog mehanizma delovanja, dok terenske simulacije imaju ulogu u potvrđivanju funkcionalnosti tih mehanizama u realnim uslovima.

### 2.6.1 Eksperimenti na *badlands* sedimentima

U poslednjih 40 godina, veliki broj laboratorijskih i terenskih eksperimenata izveden je na *badlands* terenima sa ciljem boljeg razumevanja njihove dinamičke evolucije, osetljivosti i otpornosti, kako sa aspekta litoloških svojstava, tako i sa aspekta klimatskih promena.

Canton i dr. (2001) su integracijom laboratorijskih i terenskih ispitivanja demonstrirali i pojasnili složene mehanizme raspadanja karbonatnih sedimenata jugoistočne Španije. Njihov pristup obuhvatio je laboratorijsko izlaganje neporemećenih blokova ciklusima vlaženja do kapilarne zasićenosti i sušenja na 40°C, uz paralelni trogodišnji monitoring prirodnih morfoloških promena na terenskim parcelama. Ovakva hibridna metodologija otkrila je da povećana poroznost direktno proističe iz cikličnih promena vlažnosti, pri čemu glavnu ulogu u unutrašnjem rastvaranju minerala igra rastvorljivost gipsa i mobilnost jona poput sulfata, hlorida i karbonata. Terenska merenja su potvrdila da je stopa raspadanja površine, koja iznosi od 0.7 do 8mm godišnje, direktno proporcionalna broju kišnih događaja, čime je učestalost ciklusa vlaženja i sušenja definisana kao primarni pokretač degradacije terena u uslovima semi-aridne klime.

Mineralošku komponentu i ulogu strukture dodatno je precizirala Kašanin-Grubin (2006) kroz analizu disperznih sedimenata iz Kanade i Italije. Njen eksperiment je pokazao da uzorci bez smektita zadržavaju konstantnu zapreminu i nisku električnu provodljivost, dok kod onih sa smektitom provodljivost raste u početnim ciklusima, prateći procese otvaranja i ispunjavanja površinskih pukotina. Posebno je značajno otkriće da trajanje padavina direktno određuje tip površinske strukture, gde kraći tretmani formiraju „popcorn“ korice, a duži dovode do stvaranja tvrde i stabilnije površine.

Na ove nalaze se nadovezuje studija Avcioglu i dr. (2024) koja je kroz ubrzanu laboratorijsku simulaciju uslova različitih godišnjih doba analizirala stabilnost jedanaest litološki različitih uzoraka iz Turske. Rezultati su pokazali da aridni uslovi kod laporovitih sedimenata izazivaju izrazitu geohemijsku nestabilnost kroz porast koncentracije natrijuma i pad pH vrednosti, što rezultira formiranjem krte korice sa mrežom pukotina. Nasuprot tome, mediteranski režim tokom zimskih meseci stimuliše flokulaciju čestica usled veće koncentracije kalcijuma, što privremeno povećava stabilnost, iako se formiraju duboke pukotine koje omogućavaju prodor atmosferskih uticaja u dublje slojeve. Najveći stepen integriteta zadržali su uzorci iz humidnih i kapadokijskih predela, što sugeriše da dinamika jona u površinskom sloju direktno diktira brzinu fizičkih promena terena.

Yan i dr. (2022) su kvantifikovali proces dezintegracije na blokovima humidnog Nanxiong sedimenta iz Kine, prateći promenu broja fragmenata od 1 preko 158, 574 pa sve do 706 kroz četiri faze intenzivnih padavina. Njihovi rezultati su ukazali na to da veća količina kiše kroz vreme uzrokuje srazmerno manji broj novih fragmenata, ali dovodi do njihove morfološke evolucije od zaobljenih, preko izduženih, pa sve do ovalnih oblika, što služi kao dodatni dokaz odgovora reljefa na savremene klimatske promene.

Na samom kraju, sveobuhvatan uvid u dinamiku *badlands* terena Vallcebre u Španiji pružila su istraživanja Stefanović i dr. (2026) i Torra i dr. (2025), koja, iako sprovedena sa različitih

aspekata, zajedno čine potpunu sliku erozionih procesa. Stefanović i dr. (2026) su u laboratorijskim uslovima ispitali uticaj mineraloškog sastava izlažući tri grupe uzoraka — one sa smektitom i gipsom, samo sa smektitom, i uzorke bez oba minerala — tretmanima kiše, snega i niskih temperatura od  $-3^{\circ}\text{C}$ . Zaključeno je da sneg ima znatno destruktivnije dejstvo od kiše, pri čemu minerali gline (smektit) pospešuju fizičko raspadanje, dok gips doprinosi hemijskoj degradaciji. Interesantno je da je stepen fizičkog raspadanja bio srazmerno manji u uzorcima u kojima su prisutna oba minerala istovremeno u poređenju sa uzorcima koji sadrže isključivo smektit, dok je statistička analiza potvrdila značajne razlike u vrednostima merenih parametara upravo kod mešovitog sastava (smektit i gips).

Paralelno s tim, Torra i dr. (2025) su tokom trogodišnjeg perioda (2020–2023) pratili morfološke promene i produkciju sedimenta na dve padine različite ekspozicije (severna od  $8\text{m}^2$  i južna od  $12,5\text{m}^2$ ) koristeći kombinaciju sedimentnih zamki i terestričkog laserskog skeniranja. Podaci prikupljeni kroz 23 uzorkovanja sedimenta i 18 laserskih skeniranja ukazali su na apsolutnu dominaciju degradacije tokom jeseni i zime. U ovom periodu, ciklusi mržnjenja i odmrzavanja, praćeni bubrenjem i skupljanjem glina, dovode do stvaranja površinske korice i fizičkog raspadanja materijala. Tako pripremljen i degradovan materijal biva erodovan prolećnim i letnjim kišama, koje su identifikovane kao ključ dinamike transporta sedimenta. Ova dva istraživanja ilustruju prednosti hibridnog pristupa, gde terenski monitoring pruža uvid u neposredno vidljive fenomene, dok laboratorijske simulacije — svojevrsne „vremenske mašine“ — otkrivaju njihove skrivene uzročnike, omogućavajući preciznije predviđanje budućih promena terena bez višedecenijskog čekanja na prirodne ishode.

Realizacija navedenih istraživanja zasnovana je na primeni niza preciznih analitičkih metoda koje su omogućile detaljnu karakterizaciju uzoraka. Canton i dr. (2001) su pre eksperimenta odredili mineraloški sastav sedimenata, sadržaj ukupnog gipsa,  $\text{CaCO}_3$  kalcimetrijom, granulometrijski sastav pipet metodom, odredili Aterbergove granice i Emersonov test koherentnosti, uz merenje pH vrednosti, električne provodljivosti u zasićenoj pasti i ukupnu poroznost živinom intruzionom porozimetrijom. Njihova post-eksperimentalna analiza obuhvatila je polarizacionu mikroskopiju tankih preseka, analizu promene mineraloškog sastava po dubinama bloka i na eflorescencijama, sadržaj makroelemenata, kao i analizu rastvorljivih soli.

Kod ostalih autora primenjeni su specifični dijagnostički postupci: Kašanin-Grubin (2006) fokusirala se na praćenje zapremine, električne provodljivosti, i sadržaja makroelemenata spranih sedimenata nakon eksperimenta. Avcioglu i dr. (2024) odredili su mineraloški sastav i sadržaj makroelemenata, merenje zapremine, električne provodljivosti, pH vrednosti i koncentracije jona. Yan i dr. (2022) je kvantifikaciju procesa bazirao na klimatskim podacima i softverskoj obradi fotografija, dok su Stefanović i dr. (2026) sprovedi širok spektar analiza, uključujući mineraloški sastav i sadržaj makroelemenata, merenje zapremine, električne provodljivosti, pH, koncentracije jona, Brunauer–Emmett–Teller poroznost, ukupan organski ugljenik i mikrostrukturu. Na kraju, Torra i dr. (2025) su svoju metodologiju zasnovali na terenskoj kombinaciji sedimentnih zamki i visokopreciznog terestričkog laserskog skeniranja. Svima zajedničko jeste sistematskog fotografisanja uzoraka, što je omogućilo kontinuirano praćenje i dokumentovanje fizičkih promena na površini tokom vremena.

## 2.6.2 Indeksi raspadanja

Raznolikost geomorfoloških procesa, oskudna vegetacija, različiti klimatski uslovi i dinamičko ponašanje svojstveni su za *badlands* terene, a sve zahvaljujući uticajima predvođenim litološkim sastavom, raspadanjem stena i erozionim procesima. Kao što je već naglašeno različite stope erozije i opšti procesi mogu biti zastupljeni na terenima različitog litološkog sastava. Međutim, i tereni istog litološkog sastava se mogu ponašati različito, zavisno od uslova okruženja u kom su formirani.

Iz ovih razloga mineraloške i fizičko-hemijske karakterizacije privukle su pažnju istraživača sa ciljem povezivanja svojstava materijala, procesa raspadanja i erozije. Stene tokom raspadanja kontinuirano menjaju svoje mineraloška, petrografska i geohemijska svojstva (Duzgoren-Aydin i dr., 2002). U tom kontekstu, mnogobrojni indeksi raspadanja pronašli su svoju primenu u karakterizaciji raspadanja stena i u predviđanju promena svojstava stena izazvanih procesima raspadanja.

Indeksi raspadanja se često kategorišu kao hemijski, mineraloško-petrografski i inženjerski indeksi (Ceryan, 2012; Gupta i Rao, 2000), a zasnivaju se na odnosu relativno stabilnih (poput Al, Ti i Zr) i mobilnih komponenti koji se lako izlužuju (Na, K, Ca, Mg i Si). Obično se prikazuju kroz promenu vrednosti nekog specifičnog indeksa duž profila raspadanja (Price i Velbel, 2003). Očekuje se da, usled izlužavanja, odnos mobilnih i relativno stabilnih elemenata opada tokom vremena, dok koncentracija relativno stabilnih elemenata raste, pod uslovom da je površinska erozija zanemarljiva (Pulice i dr., 2013).

Pored teorijskog značaja za razumevanje mobilnosti elemenata u procesima raspadanja, ovi indeksi imaju široku primenu i u prikazivanju uticaja klime na raspadanje matičnih stena, proceni razvoja i plodnosti terena, kvantifikovanju inženjerskih svojstava regolita, ali i u interpretaciji istorije raspadanja recentnih i starijih sedimenata.

U savremenim geološkim istraživanjima, procena intenziteta hemijskog raspadanja stena i sedimenata oslanja se na primenu različitih geohemijskih indeksa, gde je svaki prilagođen specifičnom tipu matične stene ili klimatskom okruženju. Price i Velbel (2003) pružaju sveobuhvatan pregled ovih metoda, ali uz značajnu metodološku napomenu: iz svog pregleda su svesno izostavili indekse koji u proračun uključuju gvožđe.

Autori ističu da takvi indeksi nisu pogodni za izučavanje regolita, naročito onih razvijenih na metamorfnim stenama (Harnois, 1988; Vogel, 1975), iz razloga: promenljiva mobilnosti gvožđa koja direktno zavisi od njegovog oksidacionog stanja, koje se menja tokom metamorfizma i procesa raspadanja; čestog nerazlikovanja fero (FeO) i feri (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oblika gvožđa što dovodi do prividnog povećanja njegove koncentracije zbog razlika u težinskim procentima oksida, čak i kada ukupna količina gvožđa ostaje nepromenjena; redoks uslova koji su često promenljivi duž posmatranog profila i od kojih u velikoj meri zavisi zastupljenost oksida gvožđa.

Uprkos ovim ograničenjima za gvožđe, drugi indeksi pružaju precizne uvide u specifične procese. Dok Ruxtonov odnos (1968) daje pouzdane podatke kod ujednačenih profila na kiselim podlogama prateći gubitak silicijuma, Parkerov indeks (WIP) se fokusira na mobilnost alkalnih i zemnoalkalnih elemenata. Ipak, neophodan je oprez pri upotrebi WIP indeksa kod ekstremno raspadnutih materijala, poput boksita, gde njegova preciznost opada.

Kada je reč o analizi glinovitih naslaga, Vogtov rezidualni indeks se pokazao kao ključan alat za razlikovanje morenskih od morskih sedimenata, ukazujući na to kako sredina taloženja utiče na alteraciju. Za potrebe paleoklimatskih rekonstrukcija najčešće se koristi Hemijski indeks alteracije (CIA), koji meri transformaciju feldspata u minerale glina. Njegove varijacije, kao što su CIW (isključuje kalijum) i PIA (fokusiran na plagioklase), omogućavaju istraživačima da izoluju specifične mineraloške promene tokom vremena.

Na samom kraju, primena ovih metoda ima i praktičnu, inženjersku vrednost. Indeks silicijum-titan (STI) direktno povezuje stepen hemijske degradacije metamorfnih stena u tropskim predelima sa njihovom mehaničkom čvrstoćom. Studije na Šri Lanki su potvrdile da STI odlično korelira sa Ruxtonovim modelom, čime se uspešno zatvara krug između teorijske geohemije i praktične primene u građevinarstvu i geotehnici.

Iako su Price i Velbel (2003) u svom sveobuhvatnom pregledu upozorili na nepogodnost indeksa koji uključuju gvožđe, drugi istraživači ih, zavisno od cilja istraživanja, i dalje primenjuju (tabela 1). Primera radi, Pulice i dr. (2013) su u studijama calanchi *badlands* terena u Italiji koristili širok spektar parametara kako bi objasnili uticaja topografije i količine padavina na fizička, hemijska i mineraloška svojstva nakon vlažne i suve zime. Njihov pristup

obuhvata klasične odnose poput Ruxtonovog (RR), koji kroz gubitak silicijuma u odnosu na aluminijum kvantifikuje primarno ispiranje na kiselim podlogama, ali i Hemijski indeks raspadanja (CIW). Ovaj indeks meri stepen konverzije feldspata u gline, uz eliminaciju kalijuma iz jednačine kako bi se izbegle greške usled naknadnog obogaćivanja ovim elementom. Odnos raspadanja (WR), koji definiše Chittleborough (1991), ima specifičniju ulogu u pedogenezi; ovaj parametar koristi titan kao referentnu tačku, upoređujući zbir bazičnih oksida (CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O) sa stabilnim TiO<sub>2</sub>. Sličan princip primenjuju i Darmody i dr. (2005) kroz dva specifična indeksa: WI-1, koji prati mobilnost silicijuma i kalcijuma u odnosu na gvožđe i titan, i WI-2, koji u imenilac uključuje i aluminijum radi dobijanja sveobuhvatnije slike o akumulaciji seskvioksida. Dodatni doprinos sistematizaciji ovih metoda dao je Birkeland (1999), definišući niz odnosa koji pomažu u razumevanju hemijske evolucije profila. Njegov odnos silicijum/gvožđe (Si/Fe) i širi parametar silicijum/seskvioksidi (Si/Ses) direktno ukazuju na intenzitet desilicifikacije. Kada se u analizu uključi i titan, dobija se odnos silicijum/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Si/R), koji predstavlja precizan indikator preostalog reziduuma. Pored toga, Birkeland uvodi i parametre zasnovane na bazama, kao što su baze/alumina (B/A) i baze/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (B/R). Ovi indeksi su od presudnog značaja za procenu gubitka alkalnih i zemnoalkalnih metala u odnosu na stabilnije okside, čime se direktno kvantifikuje dubina i intenzitet procesa trošenja u različitim geološkim sredinama.

Međutim, pri daljoj interpretaciji istraživanja Pulice i dr. (2013), korišćeni su isključivo indeksi bazirani na odnosu SiO<sub>2</sub>, kao mobilne komponente, i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i TiO<sub>2</sub> kao imobilnih elemenata. Razlog za to je što ostali indeksi obuhvataju koncentraciju Na<sup>+</sup>, koja je u ovoj studiji izostavljena zbog neposredne blizine mora kao eksternog izvora natrijuma.

Indeksi bi trebalo da omoguće lakše poređenje rezultata istraživanja sprovedenih na različitim matičnim supstratima i profilima različite starosti i generalno na različitim lokalitetima. Prema Price-u i Velbelu (2003), da bi indeks bio široko primenljiv, on treba da ispunjava sledeće kriterijume:

- da bude jednostavan za upotrebu, ali ne i previše uprošćen u svojoj strukturi;
- da uključuje parametre koji su uobičajeni u standardnim analizama;
- da obuhvata komponente različitog stepena mobilnosti u procesima raspadanja;
- da pokazuje trendove koji se jasno menjaju sa intenzitetom raspadanja;
- da ukazuje na nedvosmislenu razliku između raspadnutih i neraspadnutih stena;
- da bude primenljiv na širok spektar stena.

I pored velike generalne primene u interpretaciji raspadanja materijala, geohemijski indeksi raspadanja nisu pronašli značajnije mesto u *badlands* istraživanjima. Svojstveno za *badlands* terene jesu takozvani „potpisi lokaliteta“ (*“site signatures”*). Faulkner i dr. (2000) su, vođeni hipotezom da glavnu ulogu u geomorfološkom razvoju i u potencijalnoj stabilizaciji disperznih materijala imaju geohemijska svojstva terena, analizirali površinske i neraspadnute uzorke tri *badlands* terena u Španiji. Sa ciljem identifikovanja dijagnostičkih odnosa fizičko-hemijskih parametara, analizirani su električna provodljivost (EC), pH vrednost, raspodela veličine čestica i koeficijent adsorpcije natrijuma (SAR) – *Sodium Adsorption Ratio*). Tri „potpisa lokaliteta“ zasnovana na vrednostima SAR korišćena za utvrđivanje statistički značajnih razlika između površinskih i neraspadnutih uzora i to:

- 1) odnos električne provodljivosti i koeficijenta adsorpcije natrijuma (EC/SAR);
- 2) odnos raspodele veličine čestica i koeficijenta adsorpcije natrijuma;
- 3) odnos pH vrednosti i koeficijenta adsorpcije natrijuma (pH/SAR).

**Tabela 1.** Prikaz izdvojenih indeksa raspadanja i njihovih formula

Naziv indeksa	Skraćenica	Formula	Referenca
Ruxtonov odnos	RR	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Ruxton (1968)
Hemijski indeks alteracije	CIA	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]\times 100$	Nesbitt i Young (1982)
Hemijski indeks raspadanja	CIW	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})]\times 100$	Harnois (1988)
Parkerov indeks	WIP	$(2\text{Na}_2\text{O}/0.35+\text{MgO}/0.9+2\text{K}_2\text{O}/0.25+\text{CaO}/0.7)\times 100$	Parker (1970)
Indeks alteracije plagioklasa	PIA	$[(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})]\times 100$	Fedo i dr. (1995)
Odnos raspadanja	WR	$(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O})/\text{TiO}_2$	Chittleborough (1991)
Indeks raspadanja 1	WI-1	$(\text{SiO}_2+\text{CaO})/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$	Darmody i dr. (2005)
Indeks raspadanja 2	WI-2	$(\text{SiO}_2+\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$	
Silicijum/Gvožđe	Si/Fe	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$	Birkeland (1999)
Silicijum/Seskvioksidi	Si/Ses	$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	
Silicijum/R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si/R	$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$	
Baze/Aluminijum	B/A	$(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$	
Baze/R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B/R	$(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$	
Silicijum-Titan	STI	$[(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)/((\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)+(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)+(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2))]\times 100$	de Jayawardena i Izawa (1994)
Vogtov rezidualni indeks	V	$(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O})/(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$	Vogt (1927)

Rengasamy i dr. (1984) koristili su EC/SAR odnos kao pokazatelj stepena disperznosti, dok su Faulkner i dr. (2000) ovaj odnos prikazivali na dijagramima sa logaritamskim skalama. Kroz odnos raspodele veličine čestica i SAR vrednosti pokušano je uočavanje uticaja minerala glina (prevashodno smektita i ilita) i raspodele veličine čestica na fizičko ponašanje materijala (Faulkner i dr., 2000; Gerits i dr., 1897; Imeson i dr., 1982). Sa druge strane, pH/SAR odnos istraživan je zbog potencijalno važne puferske uloge kalcijuma koja sprečava nagle promene kiselosti zemljišta, održavajući ih u stabilnom, blago baznom ili neutralnom opsegu.

Međutim, rezultati Faulknera i dr. (2000) pokazali su da praktičnu primenu u karakterizaciji terena imaju samo: EC/SAR - pri karakterizaciji terena prema tipu cevaste erozije; i pH/SAR - pri tumačenju procesa autostabilizacije terena. Odnos veličine čestica i SAR u ovom istraživanju se nije pokazao kao nedvosmislen „potpis lokaliteta“.

Razumevanje interakcije između litološkog sastava i klimatskih faktora, može predvideti kako će ovi krhki sistemi reagovati na buduće klimatske ekstreme. Imajući u vidu da su *badlands* tereni često pod uticajem značajnijih erozionih procesa, te da se hemijsko i mehaničko raspadanje prožimaju, naučni pristup zahteva kombinaciju indeksa raspadanja sa studijama erozije.

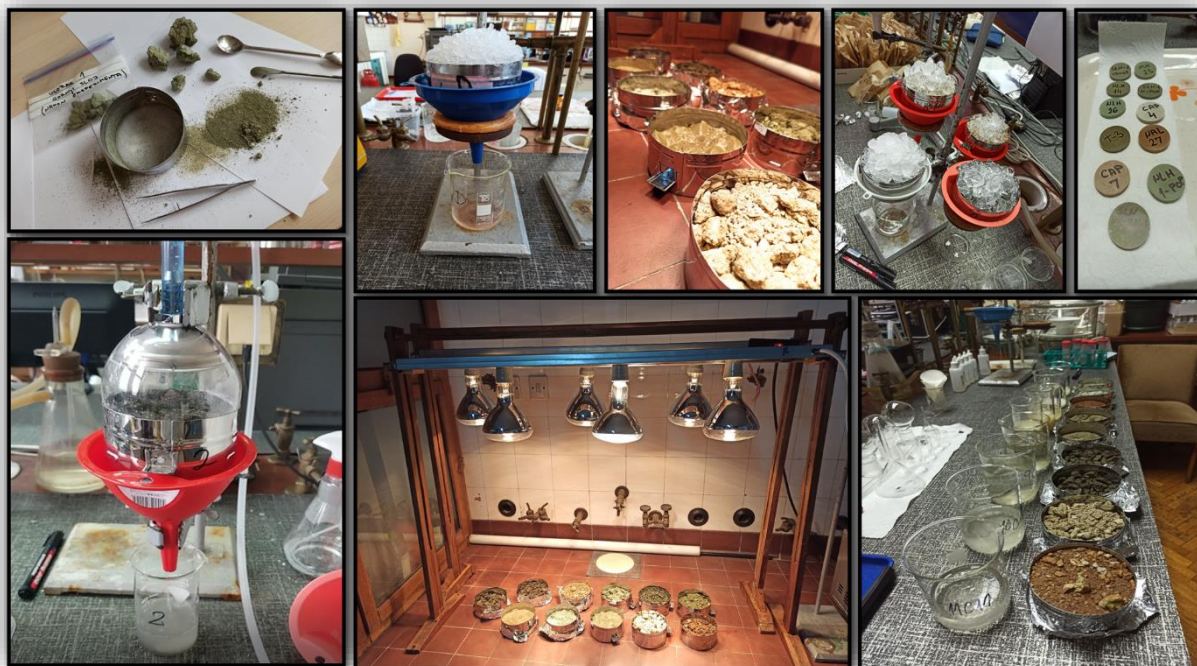
Prema tome, hipoteza ove disertacije je da vrsta minerala i njihova fizičko-hemijska svojstva u sedimentu znatno utiče na njegovu osjetljivost i otpornost, te da je za određivanje dinamičke evolucije *badlands* terena potrebno sagledati upravo njihova mineraloška i fizičko-hemijska svojstva. Povezivanje specifičnih reakcija različitih tipova *badlands* sedimenata sa klimatskim uslovima, kao i razumevanje odgovora terena na globalne promene predstavlja centralni fokus ove doktorske disertacije čiji naučni cilj obuhvata:

- fizičko-hemijsku karakterizaciju neraspadnutih uzoraka *badlands* sedimenata;
- klasifikaciju *badlands* sedimenata na osnovu njihovih fizičko-hemijskih svojstava;
- definisanje osjetljivosti i otpornosti sedimenata pod različitim, simuliranim klimatskim uslovima u odnosu na njihov litološki sastav.

## 2. METODOLOGIJA

### 3.1. KLIMATSKI EKSPERIMENTI

U laboratorijskim uslovima su za potrebe simulacija različitih klimatskih scenarija na sedimentima simulirane različite vrste padavina koje uključuju simulaciju kiše, kisele kiše, snega i kiselog snega, kao i simulaciju suše i mraza. Pored simulacija su tokom eksperimenata, za potrebe ispitivanja fizičko-hemijskih svojstava prikupljeni izluženi rastvori simuliranih padavina (slika 12), dok su za potrebe praćenja površinskog fizičkog raspadanja uzorci fotografisani tokom različitih faza eksperimenta.



Slika 12. Prikaz postavke i toka klimatskih eksperimenata.

#### 3.1.1 Priprema uzoraka

Neraspadnuti uzorci *badlands* sedimenti usitnjeni su ručno tako da se svaki uzorak pripremljen za dalji eksperiment sastojao iz odgovarajuće količine sedimenata određene veličini, i to: 45-50% čine komadići veličine 1,5-2cm, 30-35% veličine 1-1,5cm i 15-20% veličine <1cm. Tako pripremljen uzorak, srazmerno veličini poroznih sita u kojima je dalje izvođen eksperiment, težio je ~ 300g.

#### 3.1.2 Aparatura za simulaciju kiše

Aparatura za simulaciju kiše u laboratorijskim uslovima (slika 13) koja je korišćena prilikom izvođenja eksperimenata je sačinjena od pumpe sa regulatorom intenziteta kiše, odnosno sa regulatorom frekvence raspršivanja vode u jedinici vremena, rezervoara vode, plastični štiti koji sprečava raspršivanje vode van površine uzorka, sita prečnika 10cm i poroznog dna u kom je smešten uzorak, levka i čaše u kojoj se tokom trajanja jednog ciklusa prikuplja kišnica koja se potom dalje analizira.



**Slika 13.** Aparatura za simulaciju kiše: 1) rezervoar vode, 2) pumpa sa regulatorom intenziteta, 3) plastični štiti, 4) sito, 5) levak, 6) čaša.

### 3.1.3. Simulacije različitih padavina

Eksperimenti su postavljeni tako da su se u različitim fazama u laboratorijskim uslovima simulirale kiša, kisela kiša, sneg i kiseli sneg. Kako bi se izbegao uticaj jona i minerala prisutnih u vodi iz vodovoda, za potrebe simulacija različitih padavina korišćena je destilovana voda. Za simulaciju kiše i kisele kiše korišćena je aparatura za simulaciju kiše. Kao zamena za kišu korišćena je destilovana voda, dok je za potrebe kisele kiše u laboratoriji napravljen kiseli vodeni rastvor. Vodeći se literaturnim podacima o svojstvima kiselih kiša na ispitivanom području, u laboratoriji je napravljen rastvor kisele kiše čija je vrednost pH ~ 4,4, a odnos kiselina  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3 = 3:1$ . Za potrebe simulacije snega korišćena je zamrznuta destilovana voda, a za potrebe simulacije kiselog snega zamrznuti kiseli rastvor pripremljen na isti način kao i kisela kiša. Zapremina upotrebljivanog snega je, zarad lakšeg poređenja sa tretmanima kišom, određivana na osnovu zapremine kiše koja se simulira i koja je preračunata na osnovu njenog protoka (mL/min) i vremena njenog trajanja (min). U pripremnoj fazi eksperimenta je količina primenjivanog snega je otopljena, a potom je njena zapremina izmerena, na osnovu čega je odlučeno o količini snega koji će se dalje primenjivati kroz cikluse.

### 3.1.4. Simulacija temperaturnih promena

Tokom eksperimenta su simulirane i visoke i niske temperature, koje se svakodnevno dešavaju u prirodi. U laboratorijskim uslovima je za potrebe visokih temperatura tj. sušnih perioda korišćena sušnica (40°C), dok je za potrebe simulacije niskih temperatura tj. mraza korišćen zamrzivač (-4°C).

### 3.1.5 Praćenje fizičko-hemijskih parametara

Izluženi rastvor tj. količina simulirane kišnice illi otopljenog snega, koji sediment nije apsorbirao i koji je protekao kroz uzorak, prikupljen je u toku svakog ciklusa. Iz tako prikupljenih izluženih rastvora merena je zapremina, pH vrednost, električna provodljivost i koncentracija jona. Električna provodljivost i pH vrednost su mereni na sobnoj temperaturi, pri čemu je električna provodljivost merena na XS Cond 50 VioLab stonom konduktometru, a pH vrednosti na XS pH 50 VioLab stonom pH metru. Zapremina izluženog rastvora merena je pomoću menzure.

Za potrebe određivanja sadržaja anjona upotrebljen je Dionex ICS 3000 (Single Pump (SP), Conductivity Detector (CDS), Eluent Generator (EG), Chromeleon® Chromatography Workstation with Chromeleon 6.7 Chromatography Management Software); kolona: IonPac AS15 Analytical, 4x250mm (P/N 053940), IonPac AG15 Guard, 4x50mm (P/N 053942), eluent: 42mmol/dm<sup>3</sup> kalijum-hidroksid (KOH) (P/N 058900), brzina protoka: 1.0mL/min, Continuously Regenerating Anion Trap Column (CR-ATC) (P/N 060477), temperatura: 30°C, injekciona zapremina: 10µL, detekcija: Suppressed conductivity, ASRS ULTRA II (4mm) (P/N 061561), recycle mode.

Pomoću induktivno kuplovane plazme spregnute sa optičkim emisionim spektrometrom (ICP-OES - *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy*) (Thermo Scientific iCAP 6000 serija ICP-spektrometar, SAD) sa autosamplerom CETAC ASKS-spektrometar, SAD prema standardnom rastvoru poznatih koncentracija kvantifikovani su makroelementi ispitivanih uzoraka.

Raspodela veličine čestica stena određena je Pipet metodom prema SRPS EN ISO 17892-4:2017 standardu.

Fizičke promene koje su se odvijale tokom trajanja eksperimenta, hronološki su praćene poređenjem fotografija analiziranih uzoraka napravljenih Canon 100D 18MP DSLR aparatom nakon svakog tretmana u okviru jednog ciklusa. Uzorci su fotografisani na istom mestu i pod istim uslovima nakon svakog tretmana. Poređenjem fotografija, pratile su se kako fizičke promene istih uzoraka tretiranih različitim uslovima, tako i poređenjem različitih uzoraka tretiranih istim uslovima.

### 3.2 Mineraloški sastav

Mineralni sastav sedimenata je na sobnoj temperaturi određen rendgensko-difrakcionom analizom praha (XRPD - *X-Ray Powder Diffraction*) na Ultima IV Rigaku difraktometru, opremljenom CuK $\alpha_{1,2}$  zračenjem, primenom napona generatora (40,0 kV) i struje generatora (40,0 mA). Opseg od 5–60°2 $\theta$  je korišćen za sve prahove u kontinuiranom režimu skeniranja sa veličinom koraka skeniranja od 0,02° i brzinom skeniranja od 10°/min, korišćenjem D/TeX Ultra detektora velike brzine. Za pripremu uzorka korišćen je nosač uzorka od monokristalnog Si. Softver PDXL2 (verzija 2.8.4.0) je korišćen za procenu faznog sastava i identifikaciju. Svi dobijeni prahovi su identifikovani korišćenjem ICDD baze podataka. Korišćene PDF kartica za identifikaciju faza su: Heulandit (broj ICDD kartice je 00–053-1176), Kvarc (broj ICDD kartice je 01–089-8936), Albit (broj ICDD kartice je 01–083-1605), Montmorilonit (broj ICDD kartice je 00–058-2011), Kaolinit (broj ICDD kartice je 01–072-5860), Biotit (broj ICDD kartice je 01–088-1899).

Za potrebe rendgensko-fluorescentne spektroskopije uzorci su sušeni na 105°C, pomešani sa voskom (vosak Hoechst C mikro prah proizveo Merck) u odnosu 80:20 i presovani pod pritiskom od 25t u hidrauličnoj presi Retsch PP25 tokom 5 minuta. Na tako pripremljenim peletaima, sprovedena je polukvantitativna i kvalitativna analiza korišćenjem energetski disperzivne rendgenske fluorescentne spektroskopije (EDXRF - *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence*).

### 3.3. Petrografske analize

Ispitivanja su izvršena na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, na Departmanu za mineralogiju, kristalografiju, petrologiju i geochemiju. Optička ispitivanja i izrada mikrofotografija izvršeni su na petrografskom mikroskopu za propuštenu svetlost tipa Zeiss Microscopy na kome se nalazi digitalna kamera Zeiss Axiocam 208 color. Zen Core 3.5 – Software Manual.

### 3.4 Test potapanja

Modifikacija Emerson (1967) testa potapanja, primenjena je na nekim ispitivanim uzorcima, u cilju praćenja i upoređivanja ponašanja ispitivanih uzoraka u kontaktu sa vodom. Test potapanja uključivao je potapanje približno iste veličine (5-7g) ispitivanih sedimenata u 50cm<sup>3</sup> destilovane vode. Tako potopljenim uzorcima izmerena je pH i električna provodljivost nakon 30min i nakon 24h od potapanja, nakon čega su uzorci ostavljeni na sobnoj temperaturi naredne dve nedelje, što je bilo dovoljno vremena da destilovana voda ispari i da se fragmenti osuše. Tokom svih faza ovog testa, uzorci su za potrebe praćenja površinskih fizičkih promena fotografisani, sa posebnim osvrtom na promene sa početka i kraja testa.

### 3.5 Koeficijent adsorpcije natrijuma

Koeficijent adsorpcije natrijuma (SAR) je od velike važnosti za prognozu sklonosti površinske i podzemne disperzije zemljišta i sedimenata i predstavlja indeks disperznosti koji je razvijen za natrijumska zemljišta (Rengasamy, 1984). Kvantifikacijom rastvorljivih katjona (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) ekstrahovanih iz zemljišta, regolita ili stene u zasićenom rastvoru sa vodom (Moreno-de las Heras i Gallart, 2018) izračunava se SAR, pri čemu se prethodno izmere koncentracije katjona preračunavaju u miliekvivalente po litru (meq/L) i uvrštavaju u formulu:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

### 3.6 Statistička analiza

U cilju interpretacije i boljeg razumevanja prikupljenih podataka, primenjena je Analiza glavnih komponentata (PCA – *Principal Component Analysis*) upotrebom softverskog paketa Minitab. Matematički algoritam ove multiparametarske metode omogućava smanjenje dimenzionalnosti podataka u cilju boljeg sagledavanja rezultata i utvrđivanja postojanja odgovarajućeg obrasca ponašanja među ispitivanim uzorcima. Analiza glavnih komponentata omogućava transformaciju velikog broja promenljivih u manji broj novih, međusobno normalnih varijabli usmerenih na pravac najvećeg varijabiliteta među podacima. Tako nastale, takozvane glavne komponente, obuhvataju i objašnjavaju najveći deo varijabiliteta unutar posmatranog sistema.

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

Izloženost *badlands* terena širokom spektru geomorfoloških procesa, uz odsustvo nedvosmislenih uzročnika njihovog nastanka i evolucije, čini ih pogodnim za brojna naučna istraživanja. Povezivanje specifičnih reakcija različitih tipova *badlands* sedimenata i njihovih svojstava sa klimatskim uslovima, kao i razumevanje odgovora terena na klimatske uslove je složen izazov koji zahteva kombinaciju terenskih osmatranja i laboratorijskih analiza. Upravo ovakvi, eksperimentalni pristupi omogućavaju preciznije predviđanje odgovora erodibilnih terena na sve intenzivnije promene životne sredine.

Hipoteza ove disertacije je da vrsta minerala i njihova fizičko-hemijska svojstva u sedimentu znatno utiče na njegovu osetljivost i otpornost, te da je za određivanje dinamičke evolucije *badlands* terena potrebno sagledati upravo njihova mineraloška i fizičko-hemijska svojstva. Prvi korak tome jesu laboratorijski klimatski eksperimenti postavljeni tako da:

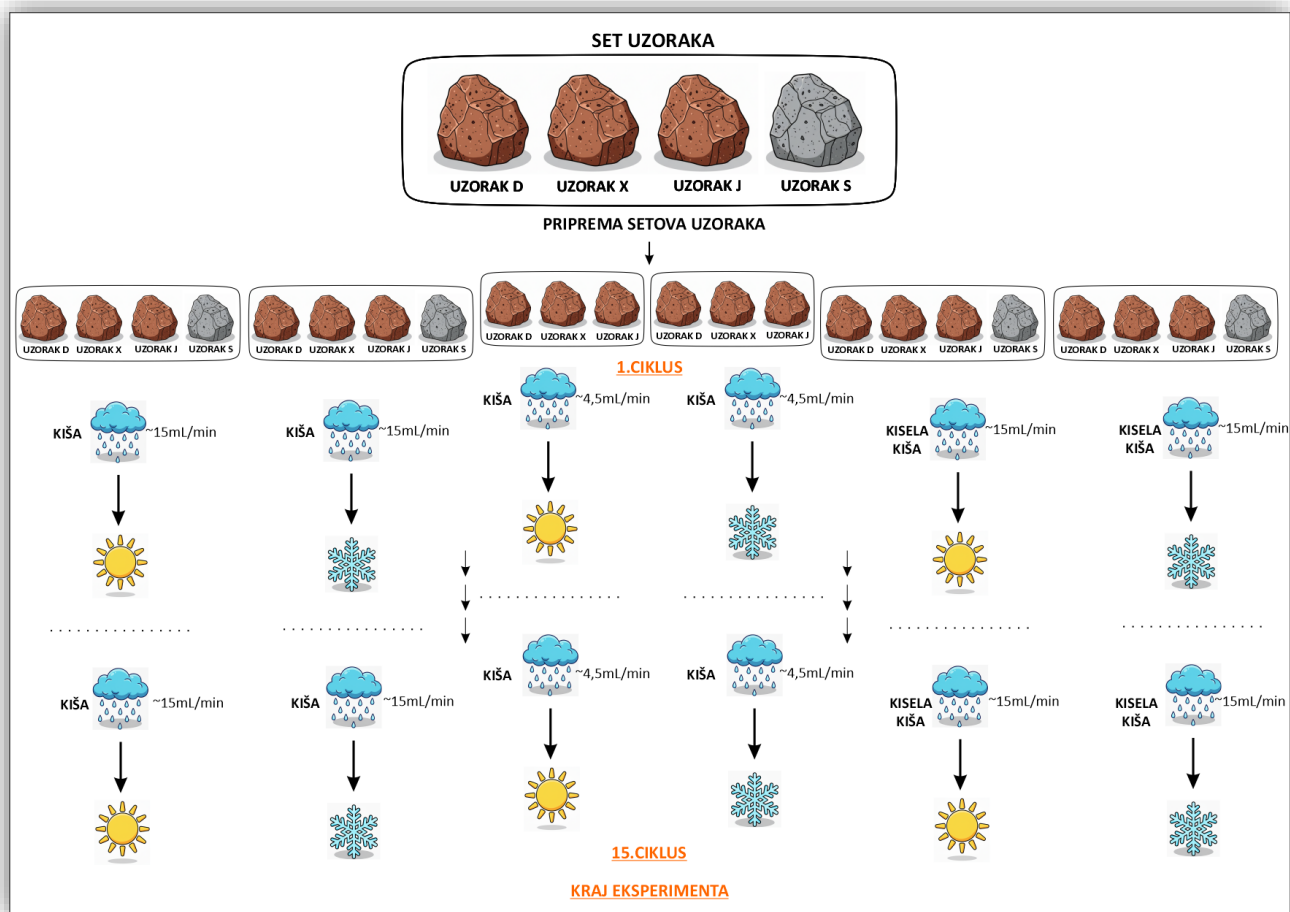
- objasne promene koje se dešavaju kroz vremena,
- da objasne uticaj različitih vrsta padavina, ali i
- da objasne uticaj trajanja izloženosti sedimenta tim padavinama na procese raspadanja i na ponašanje jona u izluženom rastvoru.

Shodno tome postavljena su dva klimatska eksperimenta na:

- sedimentima istog litološkog sastava - ispitivanja hipoteze da tereni istog litološkog sastava imaju drugačije ponašanje zavisno od uslova okruženja u kom se nalaze;
- sedimentima različitog litološkog sastava - ispitivanja hipoteze da se na terenima različitog litološkog sastava mogu odvijati različiti procesi erozije u zavisnosti od litološkog sastava.

### 4.1 KLIMATSKI EKSPERIMENTI

Istraživanje sprovedeno u okviru ove doktorske disertacije zasnovano je na zaključcima dobijenim u okviru završnog rada pod nazivnom „Uticaj ekstremnih klimatskih uslova i kiselih kiša na geohemijska svojstva *badlands* sedimenata“ (Antić, 2020), čiji su rezultati potom i publikovan u radu Xie i dr. (2022). Pomenuto istraživanje je obuhvatilo četiri uzorka sedimenata sličnog mineraloškog sastava sa humidnih *badlands* terena, i to tri iz Kine (uzorak D, X i J) i jednog uzorka iz Španije (uzorak S). Uzorci su organizovani u tri serije od po dva seta uzoraka, čineći ukupno šest setova (slika 14) koji su potom podvrgavani simulacijama različitih vremenskih uslova. Tokom jednog dnevnog ciklusa prva serija seta uzoraka tretirana je kišom intenziteta 15mL/min, a potom, kako bi se pratio uticaj različite temperature na raspadanje sedimenata, jedan set je stavljan na visoku temperaturu, a drugi na nisku temperaturu. Naredna serija seta uzoraka je takođe tretirana visokom i niskom temperaturom, kojoj je u ovom slučaju prethodila kiša intenziteta 4,5mL/min. Međusobna usporedba pomenutih serija setova je omogućila praćenje uticaja različitog intenziteta kiše na raspadanje sedimenata. Treća serija seta uzoraka tretirana je kiselom kišom intenziteta 15mL/min, a potom i visokom i niskom temperaturom, što je nakon usporedbe sa prvom serijom omogućilo izolovanje i praćenje uticaja kisele kiše na raspadanje sedimenata.



**Slika 14.** Grafički prikaz postavke eksperimenta.

Rezultati opisanog eksperimenta ukazuju da je u slučaju ispitivanih sedimenata:

- mehaničko raspadanje sedimenata u ciklusima kiše mnogo važnije od hemijskog raspadanja;
- u tretmanima kiselom kišom raspadanje uglavnom uzrokovano hemijskim promenama;
- visoka temperatura destruktivniji agens tj. da su sušni periodi bitni u procesima raspadanja;
- iako sličnog mineraloškog sastava i klimatskih uslova, uzorci D, X i J su međusobno slični, a istovremeno različiti u poređenju sa uzorkom S.

Teorijski parametar za postavku naredne faze eksperimenta bio je saznanje da mnogobrojni faktori predvođeni litološkim sastavom, procesima raspadanja i erozionim procesima imaju ključnu ulogu u nastanku *badlands* terena; da prema Kašanin-Grubin i dr. (2018) tereni različitog litološkog sastava imaju različite stope erozije i opšte procese; i da, nasuprot tome, područja istog litološkog sastava imaju drugačije ponašanje zavisno od uslova okruženja u kom se nalaze (Kašanin-Grubin i dr., 2018).

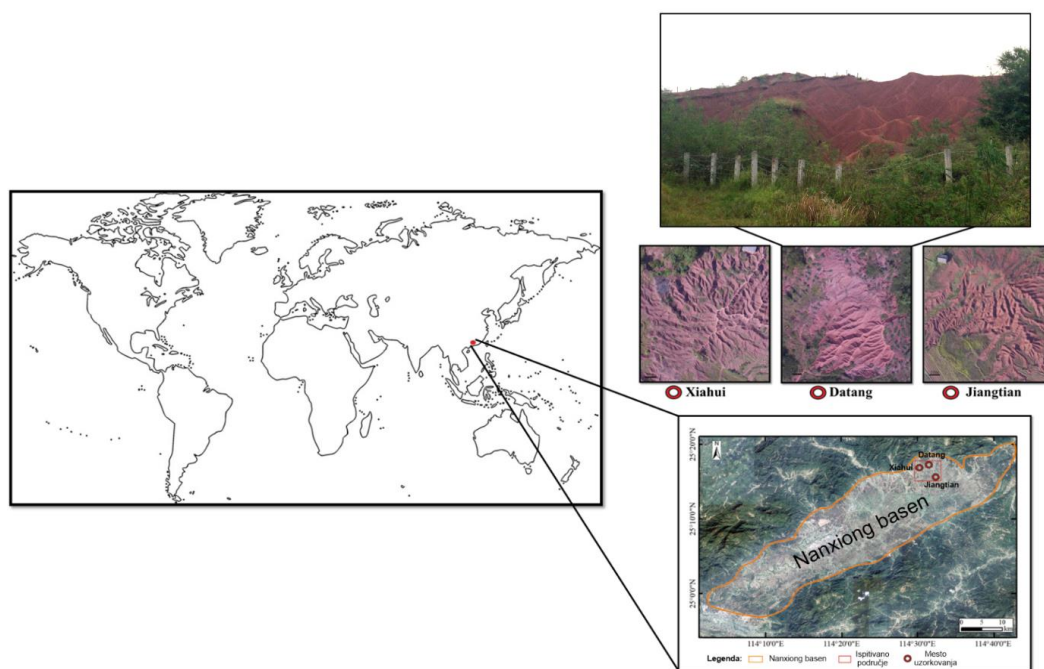
Eksperimentalni parametri za postavku naredne faze eksperimenta bili su izabrani na osnovu rezultata gore opisanog eksperimenta (Antić, 2020, Xie i dr., 2022), kao i rezultata dobijenih u eksperimentu koji su sproveli Stefanović i dr. (2026) koji ukazuju na važnost mraza u raspadanju *badlands* sedimenata.

## 4.2 KLIMATSKI EKSPERIMENT NA SEDIMENTIMA ISTOG LITOLOŠKOG SASTAVA

U narednoj fazi istraživanja, shodno ishodima prethodnih eksperimenata, ispitivani su D, X i J uzorci. Ova tri uzorka su izabrana kao predstavnici sedimenata istog litološkog sastava sa ciljem ispitivanja hipoteze da tereni istog litološkog sastava imaju drugačije ponašanje zavisno od uslova okruženja u kom se nalaze. Ovoga puta, u laboratorijskom klimatskom eksperimentu kroz dnevne cikluse simulirane su različite vrste padavina u kombinaciji sa niskom temperaturom. Na taj način, ispitivan je uticaj niskih temperatura na raspadanje ovih sedimenata, jer je destruktivnost visoke temperature već dokazana.

### 4.2.1 Karakteristike ispitivanog područja

Tri *badlands* oblasti odabrane za ovu fazu istraživanja nalaze se u gradu Nanxiong, provincija Guangdong, Kina (slika 15) na međusobnoj udaljenosti od oko 4km. Basen Nanxiong zauzima površinu od 4500km<sup>2</sup> u kojoj se nadmorska visina proteže između 72 i 621m iznad nadmorske visine i koja je na jugozapadu okružena niskim, a na severoistoku višim planinama. Površinu od oko 1800km<sup>2</sup> ovog basena (Luo i dr., 2021) čine sedimenti okarakterisani kao crvenkasti glinoviti alevriti i alevritski glinci (slika 16)(Yan i dr., 2019). Tri uzorka *badlands* sedimenata prikupljena su sa: Datang *badlands* terena (25°17'6"N, 114°30'59"E), označen kao uzorak D; Jiangtian *badlands* terena (25°15'38"N, 114°32'17"E), označen kao uzorak J; i sa Xiahui *badlands* terena (25°16'19"N, 114°30'2"E), označen kao uzorak X.



**Slika 15.** Lokacije Datang, Xiahui i Jiangtian *badlands* terena.

Sva tri lokaliteta nalaze se u blizini istoimenih sela i razvijena su u sedimentima iz kredno-eocenskog perioda (Xie i dr., 2022) kao posledica lošeg upravljanja zemljištem u kombinaciji sa klimatskim fluktuacijama (Peng i dr., 2015). Ovi *badlands* tereni (slika 17) razvijeni su u subtropskoj monsunskoj vlažnoj klimi i svojstvene za njih su duga i vruća leta, kao i kratke zime sa dominantnim mrazevima i prosekom od 9,3 mrazna dana godišnje (Yan i dr., 2019). Shodno tome, na sva tri lokaliteta je dominantan snažan sezonski kontrast, kako u temperaturi tako i u

raspodeli padavina. Prosek periodičnih padavina na godišnjem nivou približno iznosi 1500mm sa periodom najvećih padavina u mesecima od aprila do juna. Pored toga, na ovim terenima je prosečna učestalost kiselih kiša, čija je prosečna pH vrednost 4,42 za Šaoguan, prema Centru za praćenje životne sredine Šaoguan (2005–2014), iznosila je 61,8% (Huang i Xie, 2015). Prosečna temperatura tokom leta iznosi 20°C, međutim, može dostići i do 34°C, dok se u zimskim periodima temperatura može spustiti do 6°C. Chen i dr. (2021) navode da su razlike u temperaturi glavni uzrok raspadanja materijala. Površinsko spiranje i formiranje jaruga koji se javlja tokom vlažnih meseci predstavljaju dominantan uzročnik raspadanja sedimenata, ali pored njih važan oblik erozije takođe predstavljaju i mali odroni fragmenata sedimenata tokom suvih perioda (Chen i dr., 2021).



**Slika 16.** Datang *badlands*, Kina.  
(Izvor: Milica Kašanin-Grubin, uz dopuštenje autora)



**Slika 17.** Jiangtian badlands, Kina.  
(Izvor: Milica Kašanin-Grubin, uz dopuštenje autora)

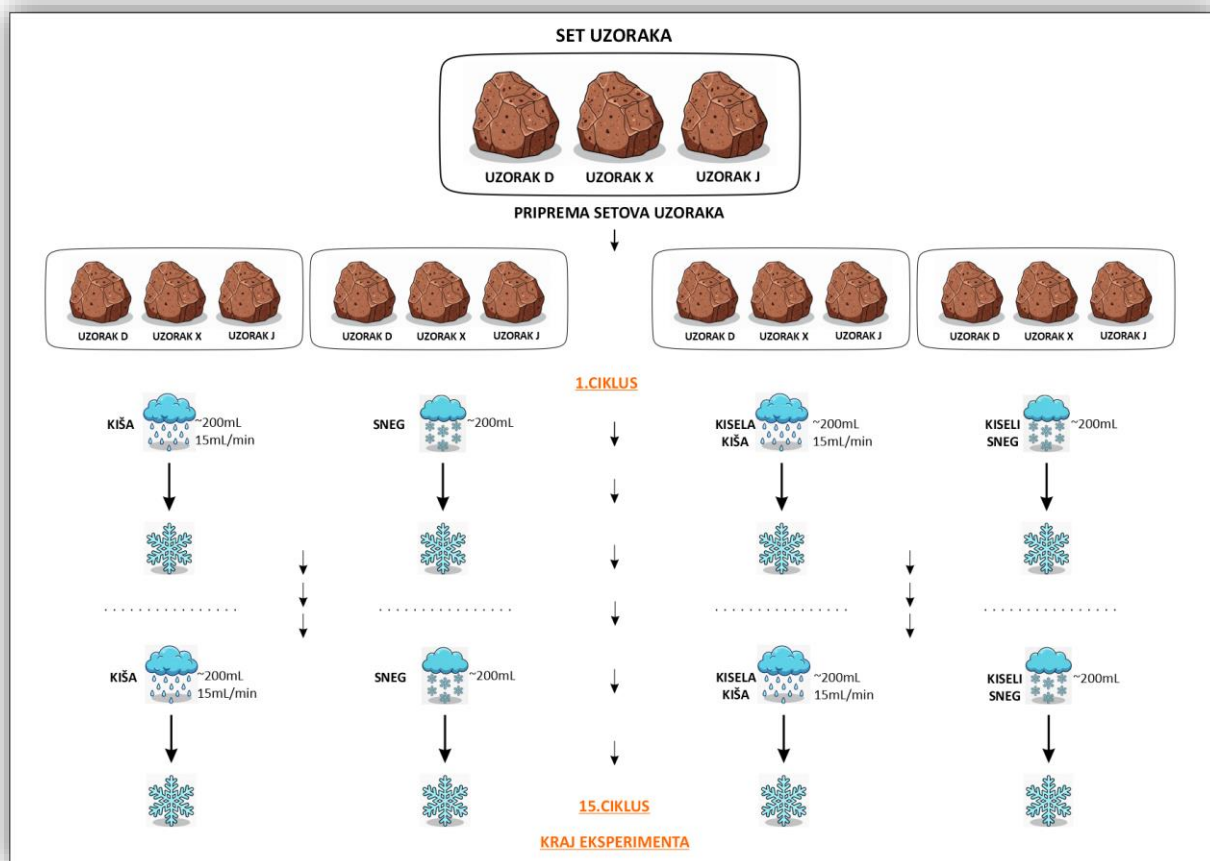
Prosečna godišnja stopa erozije na ovim terenima iznosi oko 140Mg/ha/god. Najveće stope erozije javljaju se tokom jeseni i u proseku iznose 440Mg/ha/god, dok su najniže stope zabeležene tokom zime, i u proseku iznose 4,0Mg/ha/god, (Chen i dr, 2021). *Badlands* tereni Nanxiong basena su u periodu od 1969. do 2017. godine zabeležili smanjenje od 53,18% u broju lokacija i 92,48% u površini. Prema Luo i dr. (2021) u pomenutom periodu se broj lokacija smanjio sa 707 na 331 lokaciju, dok se površina smanjila sa 1693,97ha na samo 127,4ha.

#### 4.2.2 Postavka klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava

Kako je uočeno da se područja istog litološkog sastava mogu ponašati različito u zavisnosti od uslova okruženja, u okviru ovog eksperimenta korišćeni su neraspadnuti uzorci sedimenta humidnih *badlands* terena istog litološkog sastava iz Kine. Sedimenti su uzorkovani sa 50cm dubine, obeleženi kao D, X i J uzorak, a potom i pripremljeni za varijacije vremenskih i temperaturnih uslova kroz dnevne cikluse u laboratorijskim uslovima.

Tako pripremljeni uzorci organizovani su u četiri seta (slika 18) koji prolaze kroz cikluse u kojima se manipuliše vrstom padavina u kombinaciji sa niskom temperaturom i to kroz tretmane:

- kiše i niske temperature,
- snega i niske temperature,
- kisele kiše i niske temperature,
- kiselog snega i niske temperature.



**Slika 18.** Grafički prikaz postavke eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava.

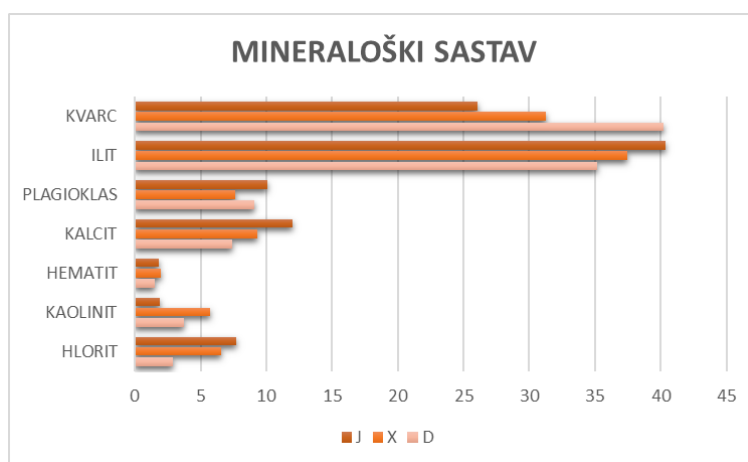
Imajući u vidu da je u prethodnom eksperimentu već dokazano da je visoka temperatura najdestruktivniji agens (Antić, 2020, Xie i dr, 2022), ovaj klimatski eksperiment je postavljen tako da omogući izolovanje i praćenje uticaja različite vrste padavina (kiša, kisela kiša, sneg i kiseli sneg) na raspadanje i na fizičko-hemijska svojstva sedimentata u kombinaciji sa niskim temperaturama tj. u uslovima mraza koji je pored suše takođe zastupljen u prirodnim uslovima u kojima se nalaze ovi tereni. U postavku eksperimenta su tretmani kiselom kišom i kiselim snegom namenski uključeni, imajući u vidu da su na ispitivanim terenima kisele kiše česta pojava i s obzirom da, prema EPA-i (*Environmental Protection Agency*) kisele kiše predstavljaju oblik atmosferskih padavina obogaćenih kiselim jedinjenjima. One nastaju kada sumpordioksid (SO<sub>2</sub>) i oksidi azota (NO<sub>x</sub>) iz atmosfere, bivaju apsorbirani, formirajući sumpornu i azotnu kiselinu (Likens i Butler, 2018). Dok se uobičajena kiša smatra blago kiselom (sa pH vrednošću oko 5,6), kisele kiše su znatno kiselije, obično krećući se u rasponu pH 4,2 do 4,4. Glavni uzrok ove pojave su antropogene aktivnosti, prvenstveno emisije gasova iz industrijskih postrojenja i saobraćaja (Liang i dr., 2013).

U tretmanima kišom i kiselom kišom, simulirane su kišne padavine protoka 15mL/min, dok je za simulaciju snega i kiselog snega korišćen led čija zapremina nije prelazila 200cm<sup>3</sup>. U okviru jednog dnevnog ciklusa, nakon tretmana različitim vrstama padavinama, uzorci su ostavljani u zamrzivač na -4°C preko noći, a potom na sobnu temperaturu (22–24°C) da se otope neposredno pre početka sledećeg ciklusa. Izvedeni klimatski eksperiment je realizovan u 15 dnevnih ciklusa. Tokom svakog ciklusa je sakupljan izlužen rastvor iz koga je merena zapremina, pH, električna provodljivost, dok je koncentracija jona analizirana u 1-5, 7, 10. i 15. ciklusu. Površinske fizičke promene koje su se dešavale posmatrane su na osnovu fotografija snimljenih na kraju svakog ciklusa.

#### 4.2.3 Rezultati klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava

##### 4.2.3.1 Mineraloški sastav neraspadnutih uzoraka sedimentata

Mineraloški sastav (slika 19) ispitivanih sedimentata ukazuje da sva tri sedimenta neznatno međusobno razlikuju, i da u njihov sastav ulaze kvarc, kalcit, feldspat i ilit, kao najzastupljeniji mineral gline. Prethodna istraživanja rađena na ovim sedimentima ih klasifikuju kao crvenkasti glinoviti alevrit i mulj (Yan i dr, 2019) sadržaja alevrita između 46,74-59,35% i gline između 40,65 do 53,26% (Xie i dr. 2022).

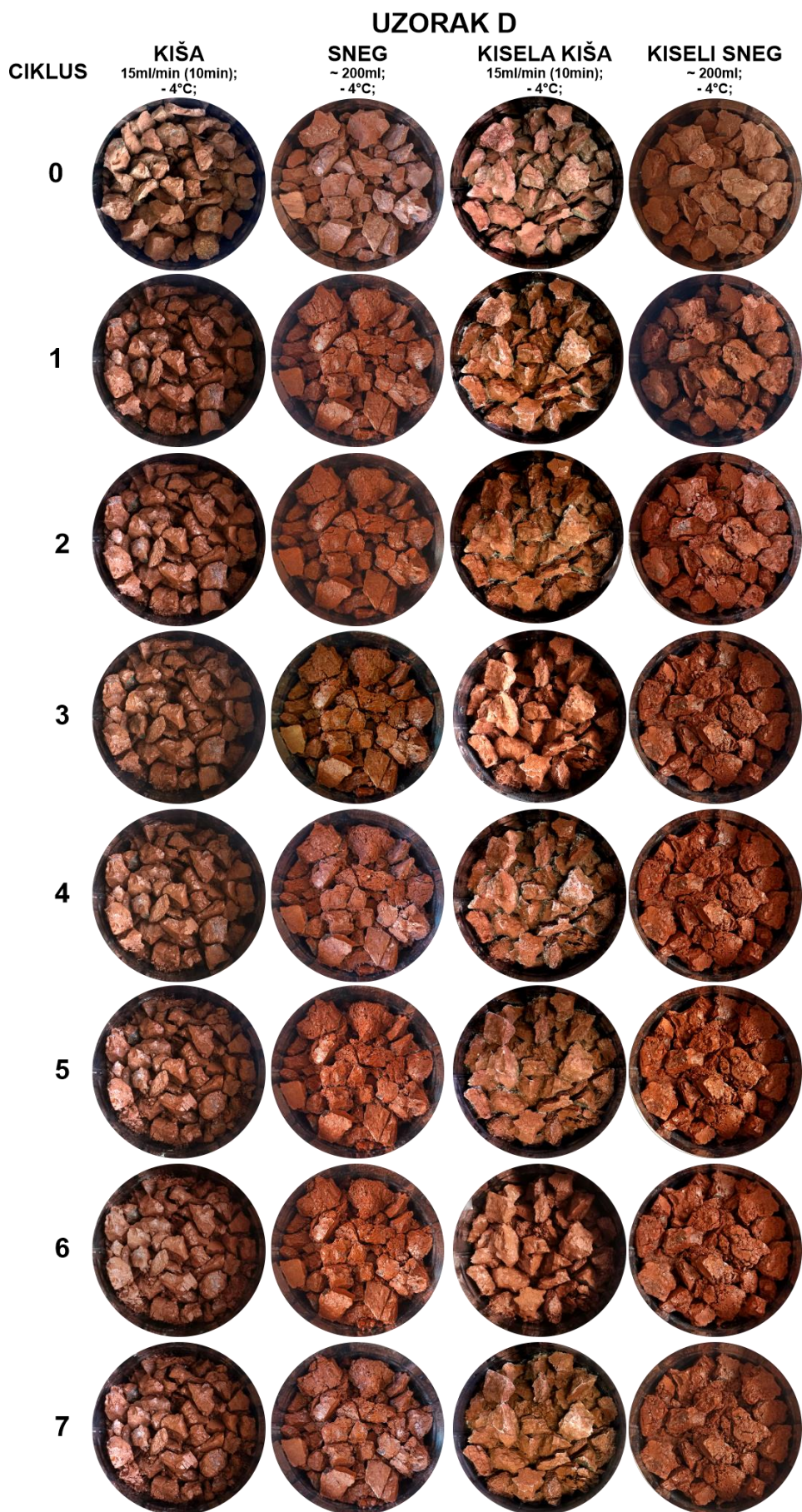


**Slika 19.** Mineraloški sastav (%) uzoraka D, X i J.

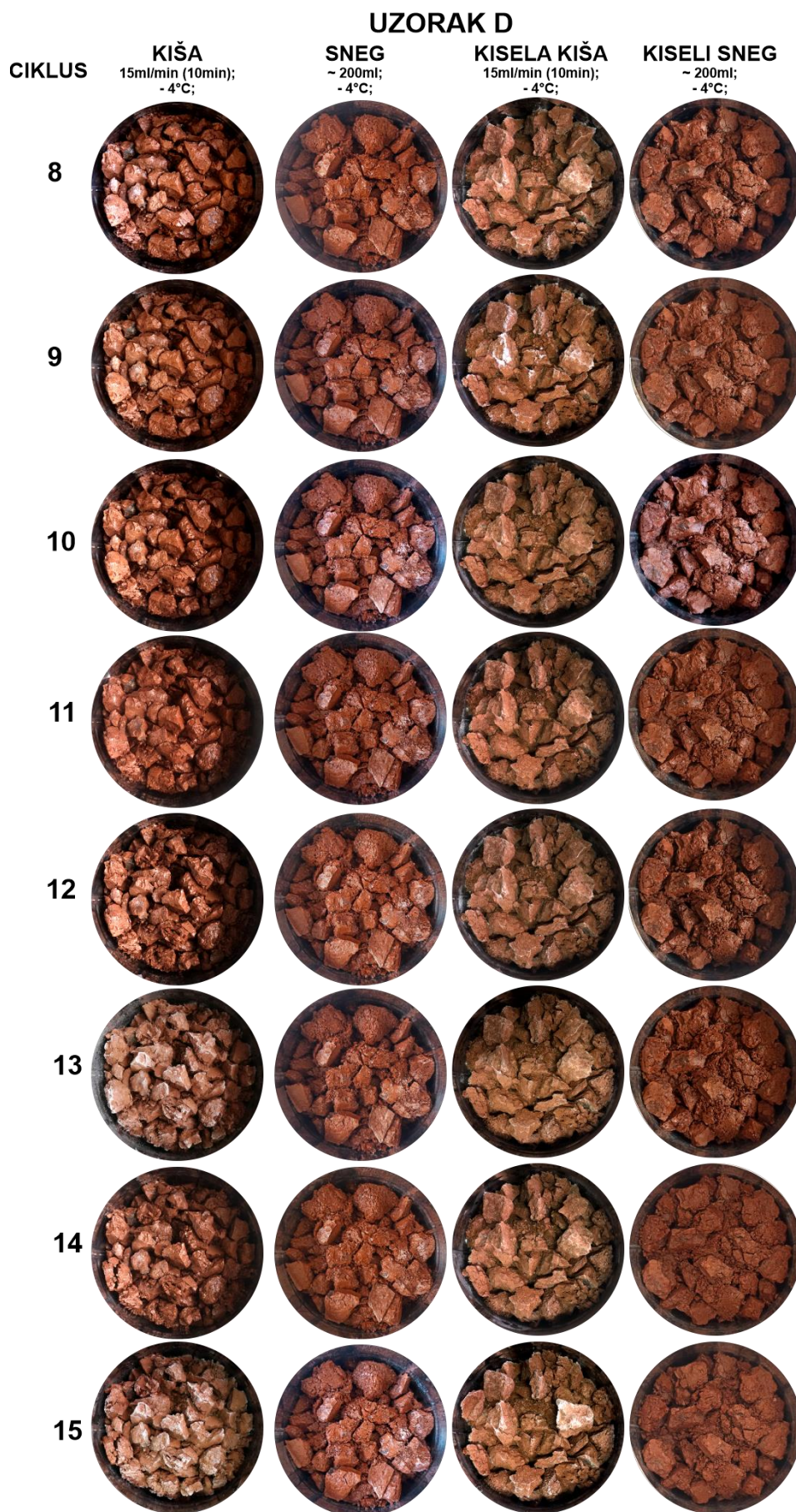
#### 4.2.3.2 Površinske fizičke promene uzoraka

Površinske fizičke promene sedimenata nastale tokom petnaest ciklusa klimatskog eksperimenta prikazane su na slikama 20-25. Na osnovu površinskih promena inicijalnog i poslednje tretiranog uzorka, može se zaključiti da razlika u raspadanju površine postoji, zavisno od tretmana, ali da i pored toga postoji sličnosti između uzoraka. Fotografije površina ukazuju na značajnije raspadanje u tretmanima snegom, nezavisno od kiselosti snega, nego u tretmanima kišom. Vidljivije promene u tretmanima snegom, uočavaju se nakon petog ciklusa, dok su, u slučaju tretmanima kišom te promene vidljivije tek nakon desetog ciklusa. I pored određenog stepena raspadanja, u tretmanima kišom početni fragmenti sedimenata i nakon petnaestog ciklusa zadržavaju obrise svojih oblika, dok u slučaju snega gotovo polovina fragmenata gubi svoj inicijalni oblik, dok su na preostalim fragmentima uočljive fine pukotine. Svi uzorci zadržali su svoju boju tokom trajanja eksperimenta i uočljivije promene u boji nisu zapažene.

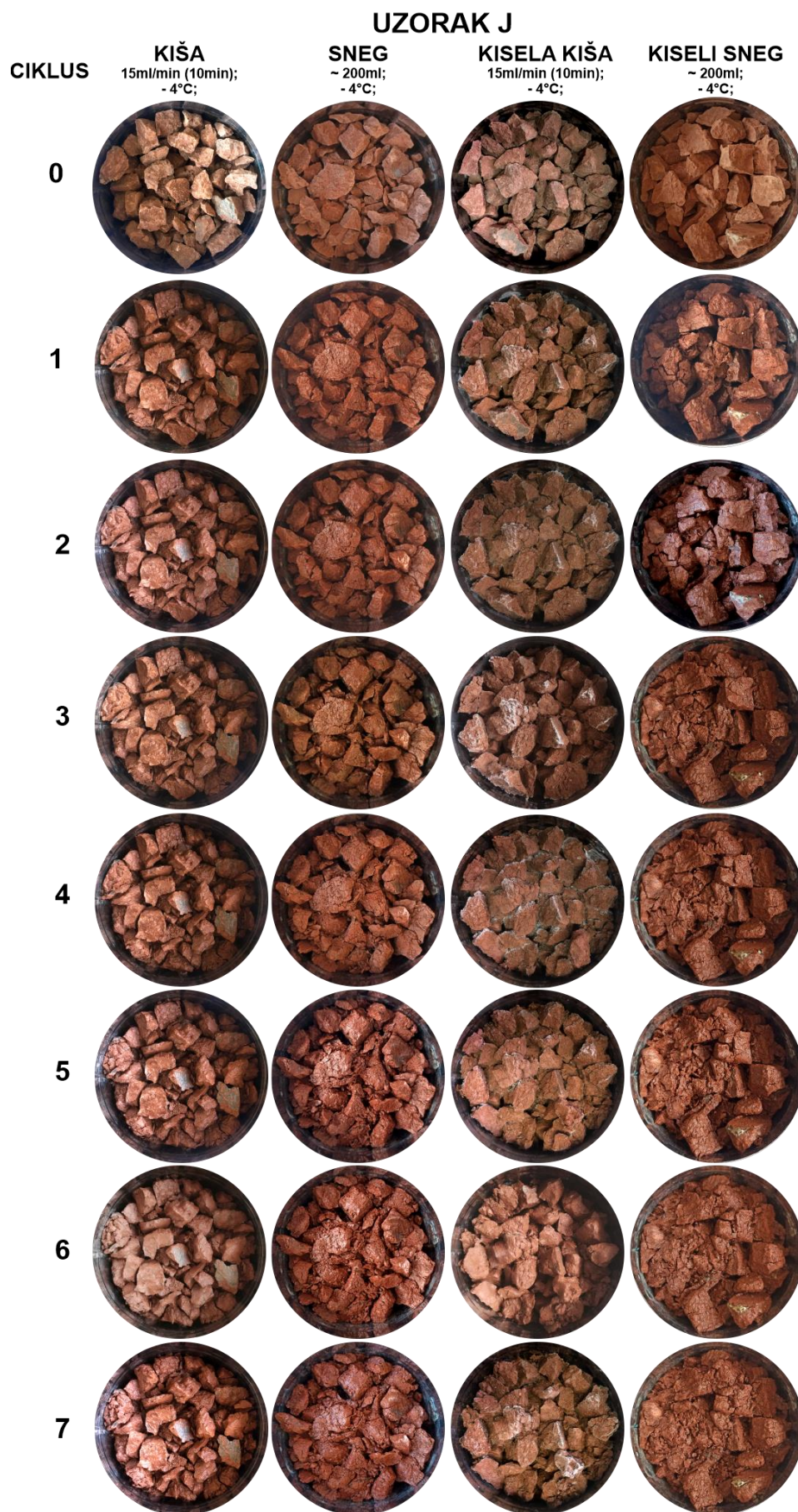
Poredeći površine tretirane različitim vrstama kiše tj. kišom i kiselom kišom, njihov manji stepen raspadanja u odnosu na uzorke tretirane snegom, može se dovesti u vezu sa trajanjem izloženosti sedimenata padavinama. Naime, sedimenti tokom jednog ciklusa simulacija kiše bivaju u kontaktu sa kišom 10min. Sa druge strane, sedimenti tokom jednog ciklusa simulacije snega bivaju u kontaktu sa snegom nekoliko sati tj. sve dok se simulirana količina snega ne otopi. Takva distribucija izloženosti sedimenata kiši i snegu omogućava sedimentima u tretmanima snegom da se natope u mnogo većoj meri, nego što je to slučaju u tretmanima kišom koja u velikoj meri prolazi između fragmenata sedimenata i verovatno ih vlaži samo površinski. Takva interakcija sedimenta i padavina se direktno odražava i na led koji se formira, raste i dovodi do raspadanja sedimenata na nižim temperaturama. Naime, kada se uzorci nakon simulacije kiše i snega stave u zamrzivač, rast leda doprinosi povećanju poroznosti i raspadanju agregata usled promena u distribuciji čestica i posledično u strukturi (Regües i dr, 1993). Po završetku eksperimenta bi se, makroskopski gledano, moglo reći da su sedimenti tretirani snegom nešto osetljiviji i da se raspadaju brže i u nešto većoj meri nego sedimenti tretirani kišom.



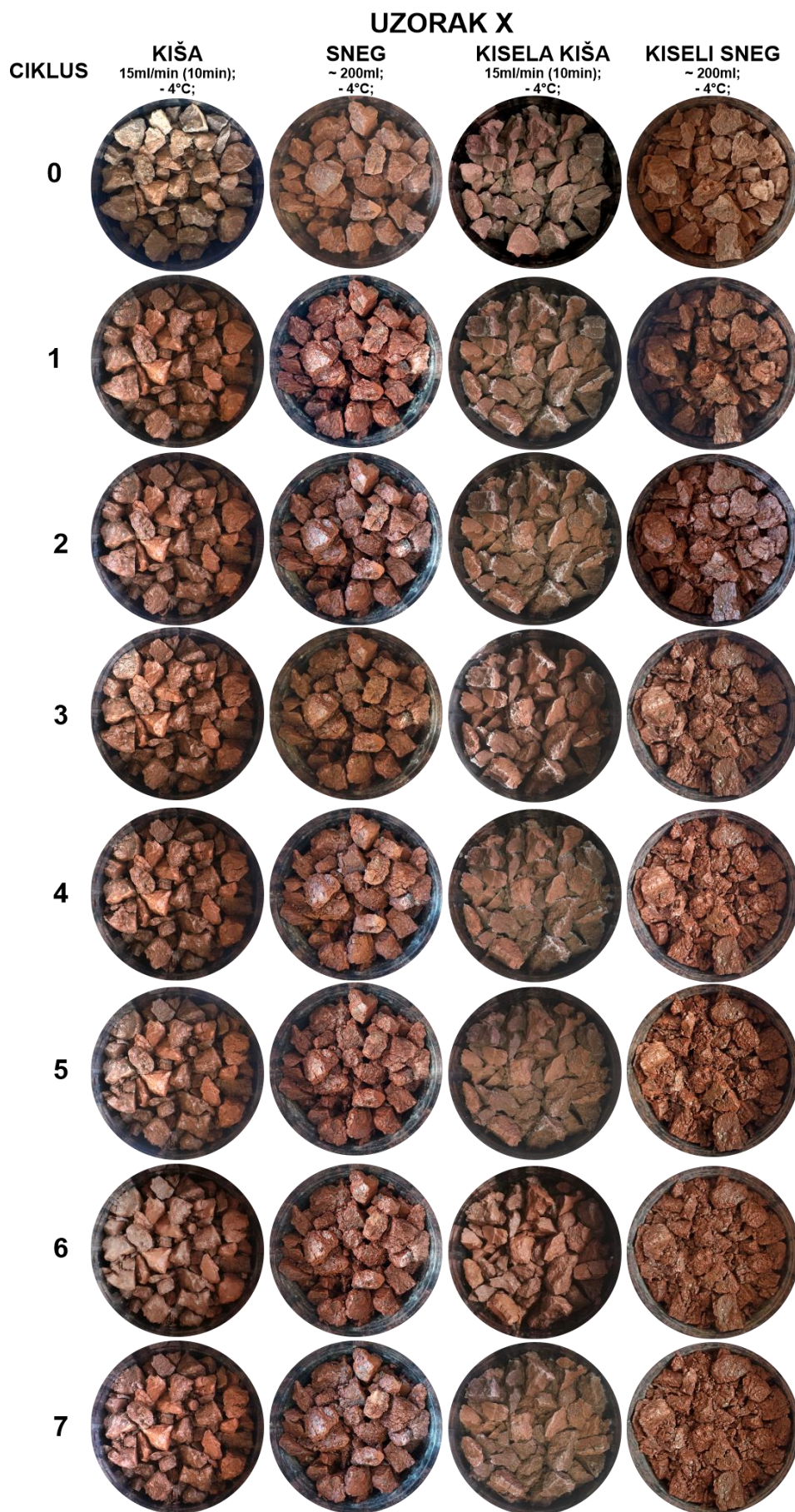
**Slika 20.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka D od 0-7. ciklusa (prečnik uzorka 10cm).



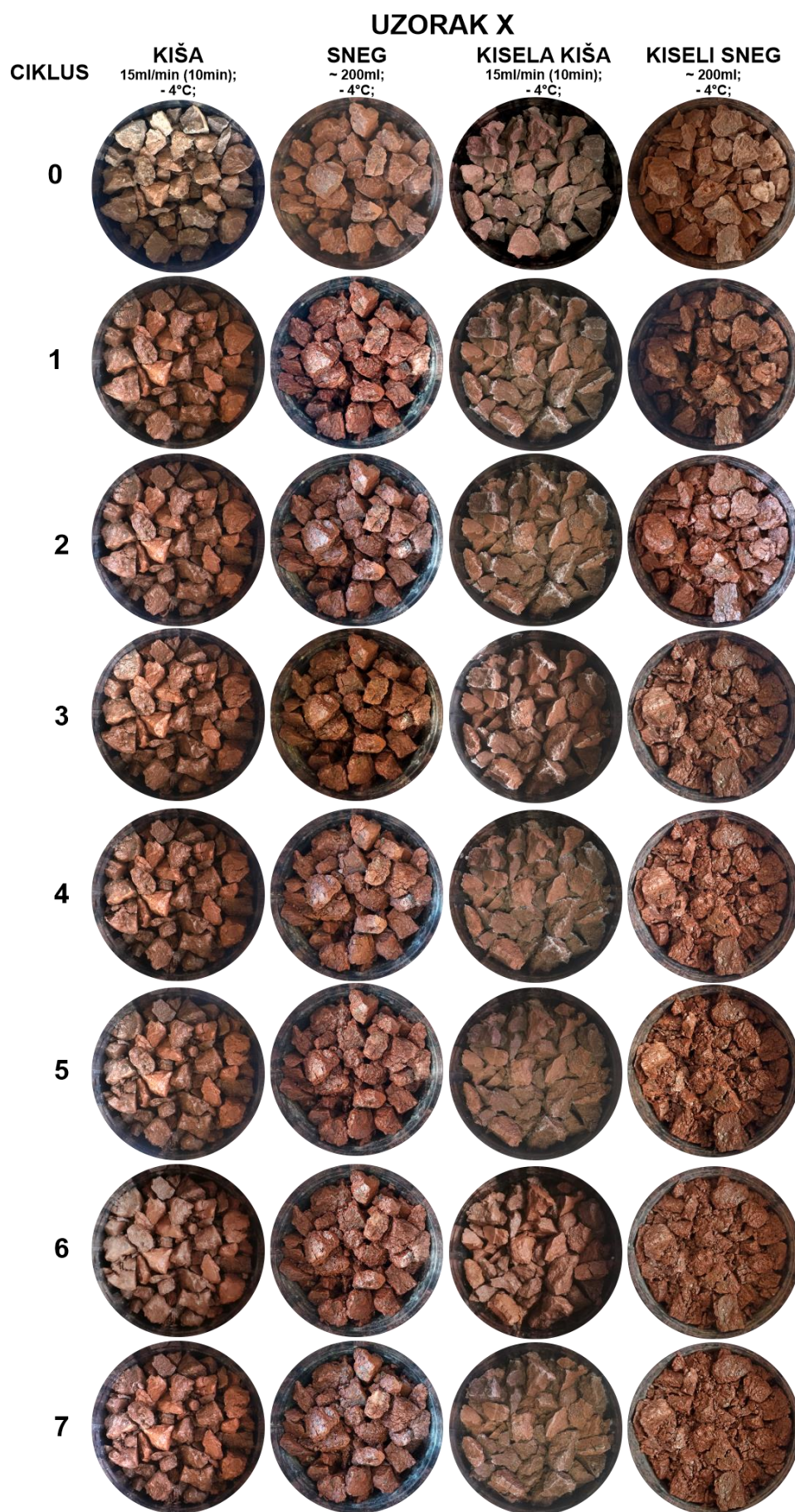
**Slika 21.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka D od 8-15. ciklusa (prečnik uzorka 10cm).



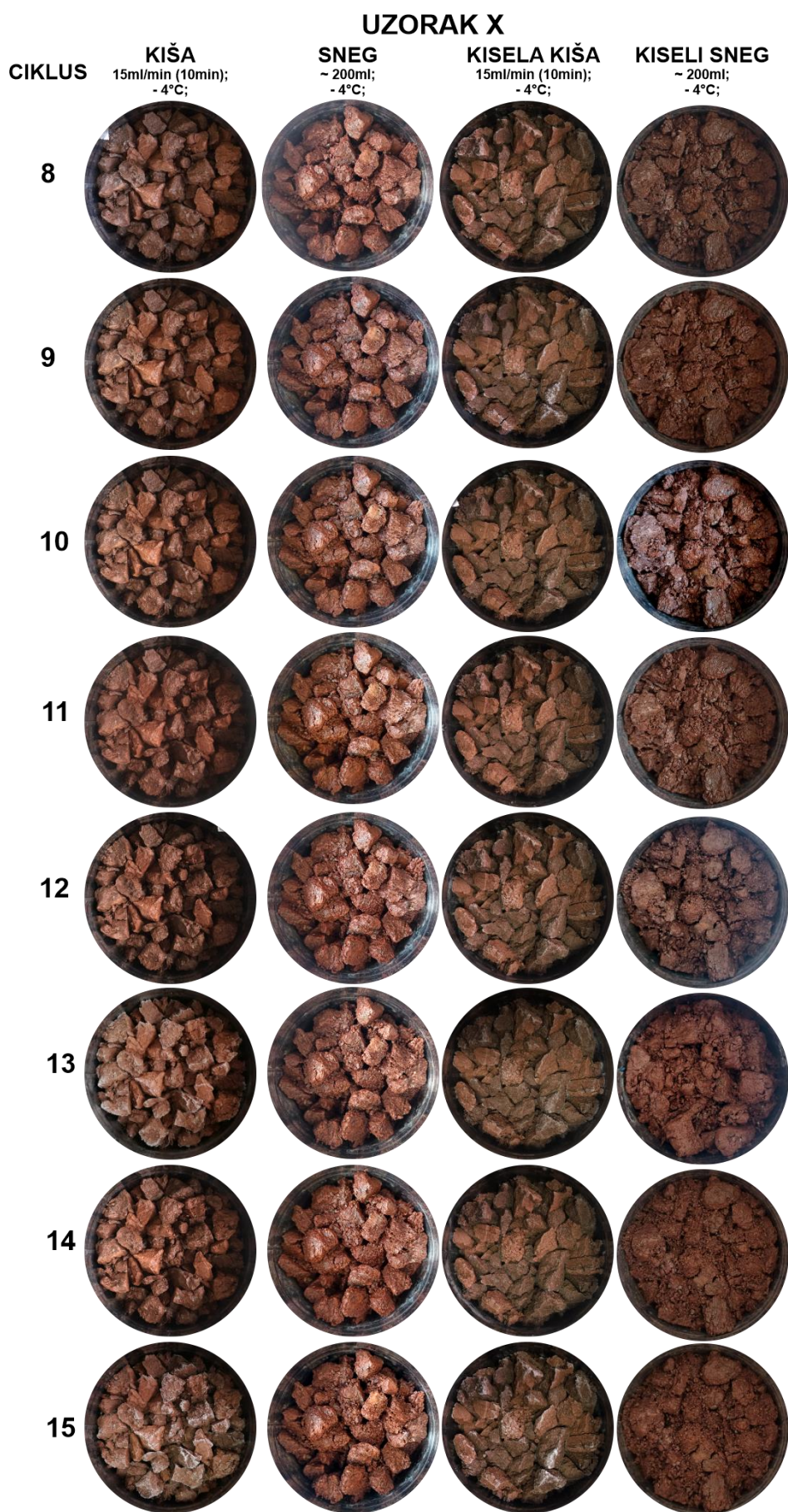
**Slika 22.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka J od 0-7. ciklusa (prečnik uzorka 10cm).



**Slika 23.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka J od 8-15. ciklusa (prečnik uzorka 10cm).



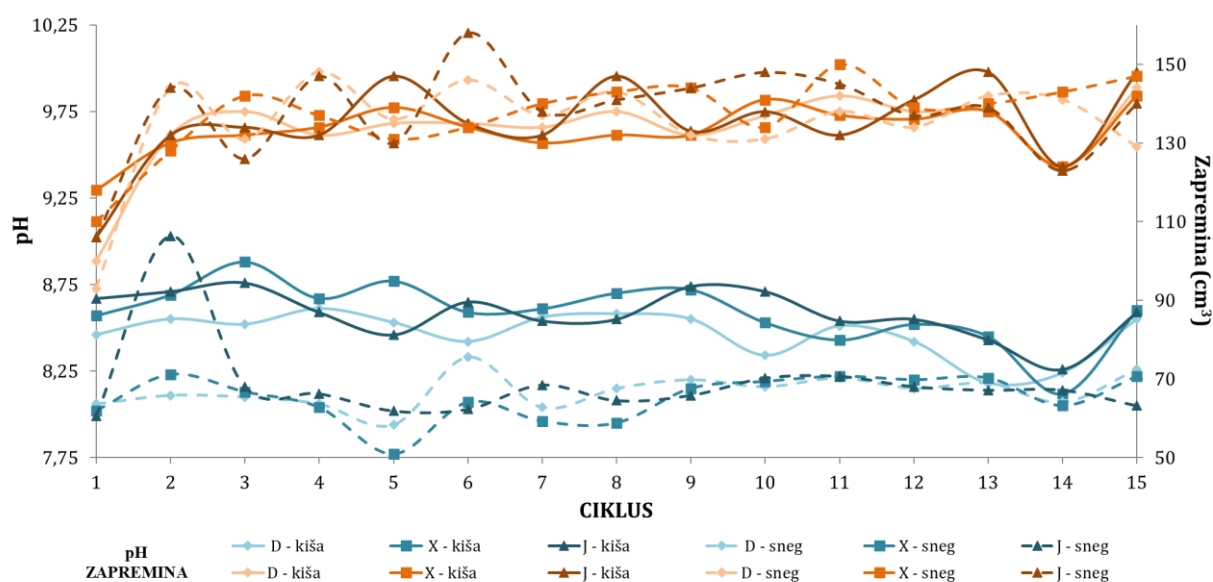
**Slika 24.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka X od 0-7. ciklusa (prečnik uzorka 10cm).



**Slika 25.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka X od 8-15. ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

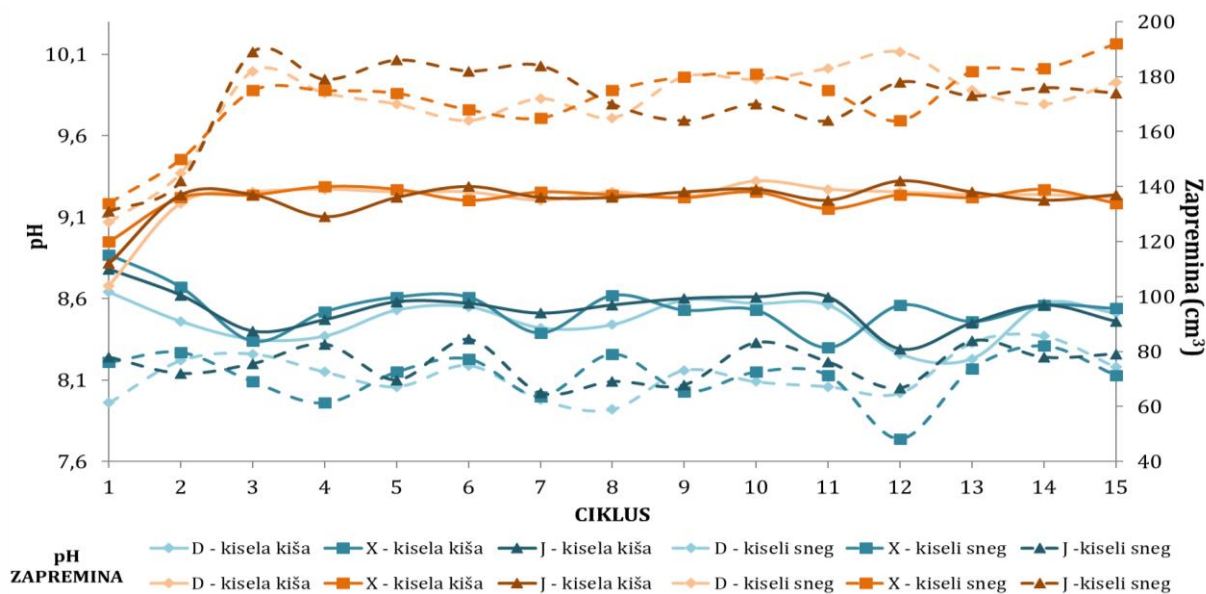
### 4.2.3.3 Zapremina izluženog rastvora i pH vrednosti

Vrednosti zapremine izluženog rastvora i pH vrednosti izmerene nakon svakog ciklusa eksperimenta, prikazane su grafički (slike 26 i 27) sa ciljem boljeg uočavanja oscilacija koje se tokom vremena dešavaju, kako u okviru jednog tretmana, tako i poređenjem različitih tretmana. Zapremine izluženih rastvora se tokom ciklusa ne razlikuju drastično, međusobno poredeći uzorke bilo kog tretmana. U slučaju tretmana kišom i snegom, te vrednosti variraju od 93-158cm<sup>3</sup>, pri čemu je i najniža i najviša vrednost izmerena u tretmanu snegom, dok su u tretmanu kišom najmanja i najviša vrednost zapravo 100 i 148cm<sup>3</sup>. Povećanje zapremine u inicijalnom ciklusi i oscilacije kroz cikluse ističu da ni između uzoraka, ni između tretmana nema drastičnih razlika. pH vrednosti merene za iste tretmane, u slučaju tretmana snegom pokrivaju opseg od 7,77–9,03, a u slučaju tretmana kišom od 8,12–8,88. Poredeći pH vrednosti tokom vremena tj. tokom ciklusa, uočavaju se značajnije oscilacije u vrednostima i blago opadajući trend u tretmanu kišom. U tretmanu snegom pH vrednosti u mnogome ne osciluju niti između uzoraka, niti u poređenju sa tretmanom kišom.



**Slika 26.** Promene pH vrednosti i zapremine izluženog rastvora kroz cikluse tretmana kišom i snegom.

Vrednosti zapremine izmerene u tretmanima kiselom kišom i kiselim snegom pokrivaju opseg od 104-192cm<sup>3</sup>, pri čemu je najniža vrednost opsega izmerena u tretmanu kiselom kišom, a najviša u tretmanu kiselim snegom. Zapremine u tretmanu kiselom kišom su u opsegu od 104-142cm<sup>3</sup>, a u tretmanu kiselim snegom od 127-192cm<sup>3</sup>. Izmerene vrednosti zapremina kroz cikluse ne ukazuju na приметne razlike u uzorcima, ali ukazuju na postojanje određenih razlika između tretmana. Kao i u slučaju kiše i snega, i u slučaju tretmana kiselom kišom i kiselim snegom vrednosti zapremine rastu nakon inicijalnog ciklusa. U slučaju tretmana kiselom kišom one manje osciluju u narednim ciklusima, dok u slučaju tretmana kiselim snegom blage oscilacije tokom ciklusa postoje. Međutim, najuočljivija, i glavna razlika između ova dva tretmana je u vrednostima zapremine izluženog rastvora, koja je u tretmanu kiselim snegom ~1,35x veća nego u tretmanu kiselom kišom. pH vrednosti posmatranih uzoraka ne ukazuju na приметne razlike između uzoraka. Posmatrajući tretmane, pH vrednosti su nešto više u slučaju tretmana kiselom kišom, i izmerene su u opsegu 8,23-8,87, dok su oscilacije kroz cikluse uočljivije u slučaju tretmana kiselim snegom koji zauzima opseg od 7,74-8,31.



**Slika 27.** Promene pH vrednosti i zapremine izluženog rastvora kroz cikluse tretmana kiselim kišom i kiselim snegom.

Povećanje vrednosti zapremina u sva četiri tretmana na početku eksperimenta može se dovesti u vezu za početnim, neraspadnutim uzorcima sedimenata koji su, pre nego što su izloženi simulaciji padavina, držani na sobnoj temperaturi, što ukazuje da pore, naprslina i pukotine na ispitivanim fragmentima sedimenata nisu u potpunosti bile ispunjene vodom. Započinjanjem eksperimenta, odnosno prvi kontakt simuliranih padavina bilo koje vrste i sedimenta doveo je zadržavanja određene količine vode u sedimentima, dok je preostala količina prošla između fragmenata i predstavlja izluženi rastvor. Sedimenti korišćeni za eksperiment su nakon svakog tretmana padavinama ostavljani u zamrzivaču tj. na niskoj temperaturi preko noći. Nakon zamrzivača i pre naredne simulacije padavina, uzorci bi bili ostavljani na sobnoj temperaturi, sve dok se led formiran tokom noći u zamrzivaču ne bi otopio. Usled takva postavke eksperimenta voda zadržana u fragmentima nije isparila, već ih je učinila fragmente potencijalno samo površinski suvim. Kao posledica toga, zapremina vode koja je prošla između fragmenata je veća nego zapremina vode zadržane od strane fragmenata što se oslikava kroz veće vrednosti izmerene zapremine iz ciklusa u ciklus.

Oscilacije u zapremini kroz cikluse mogu se povezati sa procesima vlaženja tokom ciklusa, smrzavanja i otapanja kroz koje sedimenti prolaze u okviru jednog tretmana. Stalne promene uslova fragmente sedimenata čine podložnijim površinskim promenama, jer kada voda koja se nalazi u naprslinama i pukotinama počne da se smrzava i da formira led koji se u tom procesu širi, dolazi do formiranja novih i/ili povećavanja postojećih naprslina i pukotina (Regües i dr., 1993), povećavajući poroznost sedimenta. Uporedo sa povećanjem i formiranjem novih, proces otapanja dovodi i do začepjenja već postojećih naprslina i pukotina, uzrokovano raspadanjem agregata (Farres, 1978). Naime, voda koja se sliva usled otapanja, sa sobom povlači manje čestice i/ili fragmente sedimenata, koji mogu dovesti do delimičnog ili potpunog začepjenja vodenih puteva kroz koje prolaze. Chamberlain (1989) kaže da mehanička otpornost gusto zbijenih glinovitih materijala opada pre njihovog smrzavanja. Gore opisani procesi povećavanja i zatvaranja već postojećih, kao i formiranja novih puteva kojim se kreće voda se odvija na sličan način i u procesima vlaženja sedimenata kišom. Nešto veće oscilacije primećene u vrednostima zapremine izluženog rastvora u tretmanima snegom i kiselim snegom su u skladu sa površinskim fizičkim raspadanjem uočenim na fotografijama snimljenim tokom eksperimenta (slike 20-25).

Svi uzorci, nezavisno od tretmana ukazuju na blagu alkalnost izluženog rastvora. Više vrednosti izmerene u tretmanima kišom, bilo običnom ili kiselom, potvrđuju istraživanje Pulice i dr. (2013) koja zaključuje da su pH vrednosti u uzorcima sakupljenim nakon suve zime veće nego pH vrednosti izmerene u uzorcima sakupljenim nakon vlažne zime. U procesu smrzavanja i otapanja, najvažniji mehanizmi koji se javljaju su katjonska izmena i procesi taloženja i rastvaranja, prilikom kojih dolazi do prezasićenja izluženog rastvora rastvorljivim supstancama (Miller, 1980), što može uzrokovati porast pH vrednosti tokom smrzavanja, odnosno pad tokom otapanja (Fedorov i Basisty, 1974). Takvo objašnjenje se može dovesti u vezu sa spiranjem visoko mobilnih elemenata sa reaktivne površine sedimenta usled sporijeg taloženja u tretmanima snegom (Piccarreta i dr., 2006; Pulice i dr., 2013).

Zanimljivo zapažanje uočeno je prilikom poređenja pH vrednosti običnih i kiselih tretmana. Kako su padavine u slučaju kiselih tretmana imale  $pH \sim 4,4$ , očekivalo bi se da i pH izloženog rastvora ima niske vrednosti, što nije bio slučaj. Tu pojavu potencijalno može objasniti mogućnost da su, sa aspekta promene pH vrednosti izluženog rastvora, vreme izloženosti sedimenta padavinama, kao i zapremina simuliranih padavina važnije od same pH vrednosti rastvora, međutim to zahteva dalja istraživanja.

#### 4.2.3.4 Električna provodljivost izluženog rastvora

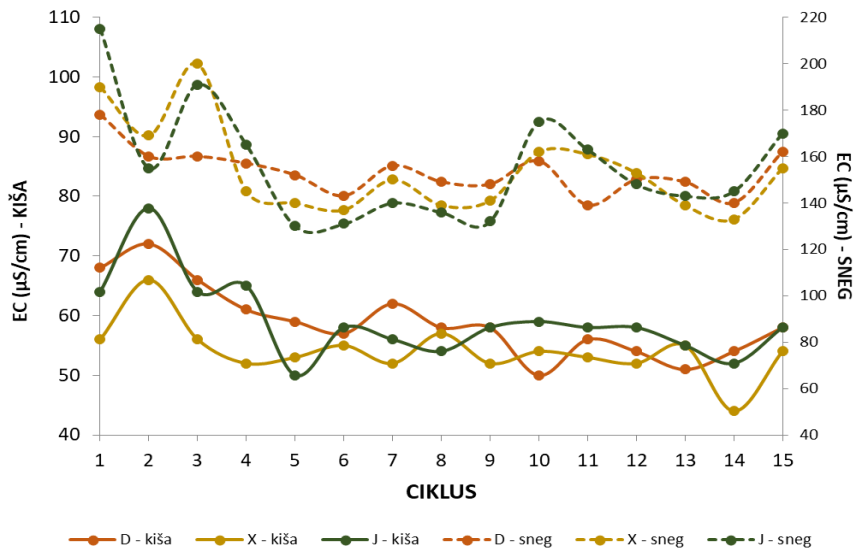
Promene električne provodljivosti kroz cikluse svih tretmana (slike 28 i 29) ukazuju da vidljiva razlika poredeći uzorke međusobno, ne postoji, ali da je, poredeći tretmane kišom i snegom, nezavisno od vrste, razlika u vrednostima električne provodljivosti primetna. Izmerene vrednosti električne provodljivosti u tretmanima snegom/kiselim snegom su  $\sim 2,5$  puta veće nego u tretmanima kišom/kiselom kišom, što zapravo čini glavnu razliku između ovih tretmana. Merene vrednosti u tretmanima kišom su u rasponu  $44-78 \mu S/cm$  i  $52-80 \mu S/cm$  u tretmanima kisele kiše, dok su rasponi u tretmanima snegom i kiselim snegom  $130-215 \mu S/cm$  i  $111-196 \mu S/cm$ . Blago opadajući trend je uočen kod sva četiri tretmana, sa najviše oscilacija tokom vremena u tretmanu kiselom kišom, a kišom i snegom, dok je u tretmanu kiselim snegom opadajući trend gotovo linearan.

Vrednosti električne provodljivosti izmerene u inicijalnim ciklusima ukazuju na opadajući trend u tretmanima snegom i kiselim snegom, i na rastući trend u tretmanima kišom i kiselom kišom. Vrednosti svih uzoraka u tretmanu kiselom kišom imaju blage promene, dok u tretmanu kišom osciluju od početka do kraja eksperimenta.

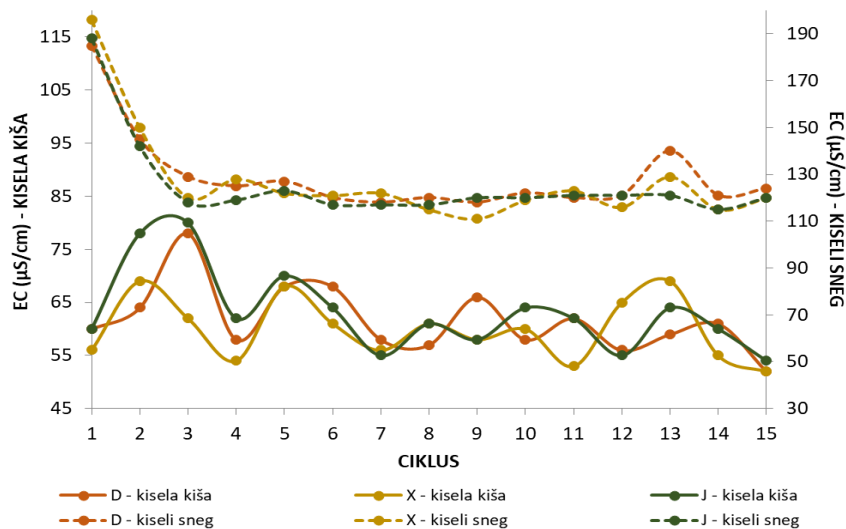
Ovakve promene u električnoj provodljivosti između tretmana se mogu dovesti u vezu sa procesima sorpcije koji se, kada sediment dođe u kontakt sa padavinama, odvijaju na površini sedimenta. I pored slične zapremine simuliranih padavina, vreme tokom kog je sediment izložen padavinama predstavlja glavnu razliku. Naime, u okviru jednog ciklusa, sediment biva izložen simulaciji  $150 cm^3$  kiše koja traje 10min, dok u tretmanu snegom, vreme koje je neophodno da se slična količina snega otopi zapravo  $\sim 210$  minuta. Ta razlika u vremenu, na površini sedimenta dovodi do različitih sorpcionih procesa (i adsorpcije i apsorpcije). Adsorpcioni procesi su površinska pojava, dok su apsorpcioni procesi zapreminska pojava i odvijaju se ravnomerno, postepeno povećavajući i na kraju dostižući ravnotežu (Strawn, 2021).

Prema tome, za veće vrednosti električne provodljivosti u tretmanima snegom bi se moglo reći da su povezane sa vremenom neophodnim da se simulirani sneg otopi, koje jonima daje dovoljno vremena da postignu ravnotežu između površine sedimenta i snega. U slučaju tretmana kišom, vreme koje kiša provede u kontaktu sa površinom sedimenta je  $\sim 20$  puta kraće nego u tretmanima snegom, što je nedovoljno za zapreminsku sorpciju i za uspostavljanje ravnoteže, koje bi posledično dovelo do povećanja vrednosti električne provodljivosti. To ukazuje na činjenicu da je električna provodljivost promenljiv parametar povezan sa koncentracijom rastvorenih soli i može se povezati i sa zaključcima Pulice i dr. (2013) da je električna provodljivost viša kod uzoraka prikupljenih nakon vlažne zime, nego kod onih

prikupljenih nakon suve zime, što je u Higuchi i dr. (2013) nagovestio govoreći o vrednostima električne provodljivosti koje fluktuiraju ka unutrašnjim delovima, idući od površine.



**Slika 28.** Promene električne provodljivosti (EC) izluženog rastvora uzoraka kroz cikluse tretmana kišom i snegom.



**Slika 29.** Promene električne provodljivosti (EC) izluženog rastvora uzoraka kroz cikluse tretmana kiselim kišom i kiselim snegom.

Kao što je prodiskutovano i u slučaju pH vrednosti, tako bi se i u slučaju električne provodljivosti mogle očekivati povišene vrednosti u tretmanima kiselim kišom i kiselim snegom, imajući u vidu da je za pripremanje kiselih rastvora korišćenje HNO<sub>3</sub> i H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Međutim, ta razlika nije uočena, što može ukazati na to da pH vrednost korišćene kisele kiše ne utiče na električnu provodljivost izluženog rastvora ili da razmena jona nije dovoljna za značajnije promene u provodljivosti.

#### 4.2.3.5 Koncentracija jona

Minimalne, maksimalne i srednje vrednosti koncentracije jona izmerene u izluženim rastvorima prikupljenim tokom eksperimenta prikazane su u tabelama 2a-c. Izmerene koncentracije katjona pokazuju da je  $\text{Ca}^{2+}$ , u poređenju sa  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  i  $\text{K}^+$  najzastupljeniji u svim uzorcima, što odgovara mineraloškom sastavu uzoraka. Poredeći tretmane snega i kiselog snega sa tretmanima kišom i kiselom kišom, vrednost izmerenog  $\text{Ca}^{2+}$  je gotovo dva puta veća u tretmanima snegom nego kišom.

Koncentracije anjona ukazuju na приметnije razlike u vrednostima izmerenim u tretmanima snegom i tretmanima kišom. Reaktivne površine sistema kiša-sediment i sneg-sediment bi mogle biti razlog takvoj razlici u izmerenim vrednostima. Sistem kiša-sediment bi se mogao posmatrati kao tečno-čvrsti sistem, dok bi se sistem sneg-sediment mogao posmatrati kao čvrsto-čvrsti sistem. Imajući u vidu da je kontaktna površina sistema sneg-sediment veća, razmena jona tog sistema je u većoj meri moguća nego što je to slučaj u sistemu kiša-sediment.

Anjoni sa najvišim izmerenim koncentracijama su  $\text{CO}_3^{2-}$  i  $\text{Cl}^-$ . U tretmanu kiselom kišom, najzastupljeniji je  $\text{CO}_3^{2-}$ , u tretmanima snegom i kiselim snegom najzastupljeniji  $\text{Cl}^-$  i  $\text{PO}_4^{3-}$ , dok su  $\text{SO}_4^{2-}$  generalno blago zastupljeni. Dva retencionna mehanizma: ekskluzioni, koji se zasniva na veličini veličini jona i hromatografija jonske izmene koja se zasniva na jonskim silama bi mogle da objasne takvu raspodelu anjona. Kao mobilna faza velike brzine se može posmatrati kiša i visoka koncentracija  $\text{CO}_3^{2-}$  u izluženom rastvoru ukazuje na to da su oni brzo isprani i da je u tom slučaju ekskluzioni mehanizam dominantniji. U slučaju tretmana snegom, proceđivanje se odvija malom brzinom, što ostavlja prostora odvijanju jonske izmene i upravo taj mehanizam bi mogao objasniti više koncentracije  $\text{Cl}^-$  i  $\text{PO}_4^{3-}$  u izluženim rastvorima tretmana snegom.

#### 4.2.4 Tumačenje rezultata klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava

Kako vrednosti parametara praćenih tokom eksperimenta nisu u potpunosti ukazale na razlike koje bi bolje objasnile razliku između tretmana običnom kišom i snegom i kiselom kišom i snegom, izmerene vrednosti parametara podvrgnute su analizi glavnih komponenata. Statistička obrada podataka sprovedena je sa ciljem pronalaženja veze između fizičko-hemijskih svojstava izluženog rastvora i procesa raspadanja stena, ali i sa ciljem boljeg razumevanja samih procesa raspadanja stena u različitim uslovima klime. Udruženi uticaj višestrukih parametara uočen je kao rezultat ovih analiza.

Eksperiment izveden na istim sedimentima iz Kine i koji je opisan u Antić (2020) i Xie i dr. (2022) ukazao je na isti trend koncentracije ukupnih jona i koncentracije anjona. Shodno tome je za potrebe faktorske analize umesto pojedinačnih koncentracija anjona, korišćena suma koncentracija anjona.

**Tabela 2-a.** Koncentracije jona (mg/L) D uzoraka u različitim tretmanima

KONCENTRACIJA JONA	D				
	KIŠA	KISELA KIŠA	SNEG	KISELI SNEG	
$Ca^{2+}$	minimum	6,1	7,5	14,3	8,7
	maksimum	11,4	13,1	22,8	13,5
	srednja vrednost	9,2	9,7	17,1	11,2
	standardna devijacija	1,7	1,7	2,8	1,6
	medijana	9,7	9,4	16,2	11
$Mg^{2+}$	minimum	0,47	0,47	1,0	0,37
	maksimum	0,97	1,21	2,2	0,97
	srednja vrednost	0,74	0,78	1,6	0,74
	standardna devijacija	0,18	0,28	0,4	0,18
	medijana	0,77	0,69	1,7	0,74
$Na^+$	minimum	0,8	1	1,6	0,82
	maksimum	2,0	13	3,3	1,50
	srednja vrednost	1,3	3	2,2	1,18
	standardna devijacija	0,4	4	0,5	0,26
	medijana	1,2	2	2,1	1,21
$K^+$	minimum	0,5	0,5	0,44	0,21
	maksimum	1,5	2,5	1,22	1,03
	srednja vrednost	0,7	1,3	0,81	0,63
	standardna devijacija	0,4	0,9	0,24	0,23
	medijana	0,5	0,9	0,89	0,65
$CO_3^{2-}$	minimum	18	71	27	26
	maksimum	49	224	71	41
	srednja vrednost	35	111	41	35
	standardna devijacija	10	50	13	5
	medijana	37	89	38	36
$SO_4^{2-}$	minimum	0,5	1,7	1,2	2,7
	maksimum	1,4	7,1	3,4	7,0
	srednja vrednost	0,9	2,7	2,2	4,1
	standardna devijacija	0,3	1,9	0,6	1,5
	medijana	0,9	1,9	2,1	3,7
$PO_4^{3-}$	minimum	0,0006	0,004	0,6	0,6
	maksimum	0,0028	0,059	6,7	3,7
	srednja vrednost	0,0015	0,025	2,5	1,8
	standardna devijacija	0,0009	0,021	2,5	1,0
	medijana	0,0009	0,019	1,4	1,6
$Cl^-$	minimum	0,25	1	7	15
	maksimum	0,73	18	38	56
	srednja vrednost	0,51	3	21	34
	standardna devijacija	0,16	6	10	17
	medijana	0,47	1	20	33

**Tabela 2-b.** Koncentracije jona (mg/L) X uzoraka u različitim tretmanima

KONCENTRACIJA JONA	X				
	KIŠA	KISELA KIŠA	SNEG	KISELI SNEG	
$Ca^{2+}$	minimum	8,5	8,3	11	8,4
	maksimum	10,4	13,2	21	14,0
	srednja vrednost	9,5	10,8	16	10,6
	standardna devijacija	0,6	1,8	3	2,3
	medijana	9,5	10,7	15	10
$Mg^{2+}$	minimum	0,45	0,56	1,01	0,24
	maksimum	0,64	1,31	1,81	0,83
	srednja vrednost	0,57	0,87	1,37	0,60
	standardna devijacija	0,07	0,28	0,27	0,19
	medijana	0,58	0,8	1,32	0,6
$Na^+$	minimum	1,16	1	1,2	0,5
	maksimum	1,82	15	3,6	2,7
	srednja vrednost	1,42	5	2,4	1,3
	standardna devijacija	0,23	5	0,7	0,7
	medijana	1,35	2,12	2,375	1,187
$K^+$	minimum	0,5	0,5	0,67	0,20
	maksimum	1,3	2,2	1,18	0,97
	srednja vrednost	0,7	1,0	0,91	0,64
	standardna devijacija	0,3	0,6	0,20	0,27
	medijana	0,5	0,8	0,9	0,68
$CO_3^{2-}$	minimum	19	67	33,4	33
	maksimum	41	101	41,9	43
	srednja vrednost	32	81	37,2	38
	standardna devijacija	7	12	2,9	3
	medijana	31	81	36,8	38
$SO_4^{2-}$	minimum	0,9	1,3	0,8	2,2
	maksimum	1,9	3,7	4,1	4,6
	srednja vrednost	1,3	2,5	2,8	3,0
	standardna devijacija	0,4	0,8	1,3	0,9
	medijana	1,2	2,5	3,4	2,8
$PO_4^{3-}$	minimum	0,0008	0,01	0,6	1,8
	maksimum	0,0034	0,33	1,6	5,6
	srednja vrednost	0,0017	0,06	1,2	2,7
	standardna devijacija	0,0009	0,11	0,3	1,3
	medijana	0,0016	0,03	1,3	2,1
$Cl^-$	minimum	0,5	0,4	2	17
	maksimum	1,4	7,6	39	37
	srednja vrednost	0,8	2,5	16	25
	standardna devijacija	0,3	3,0	17	8
	medijana	0,8	1,1	6	21

**Tabela 2-c.** Koncentracije jona (mg/L) J uzoraka u različitim tretmanima

KONCENTRACIJA JONA	J				
	KIŠA	KISELA KIŠA	SNEG	KISELI SNEG	
<i>Ca</i> <sup>2+</sup>	minimum	8,0	1,8	11	6
	maksimum	9,8	8,4	25	17
	srednja vrednost	8,8	5,9	16	10
	standardna devijacija	0,7	2,0	5	3
	medijana	8,7	6,1	16	9,19
<i>Mg</i> <sup>2+</sup>	minimum	0,48	0,2	1,0	0,38
	maksimum	0,59	3,1	2,0	1,15
	srednja vrednost	0,53	2,2	1,6	0,68
	standardna devijacija	0,04	0,9	0,3	0,23
	medijana	0,53	2,5	1,6	0,65
<i>Na</i> <sup>+</sup>	minimum	1,28	1	1,4	0,34
	maksimum	1,97	16	4,6	1,76
	srednja vrednost	1,59	5	2,6	1,02
	standardna devijacija	0,23	7	1,2	0,50
	medijana	1,615	1,81	2,438	1,13
<i>K</i> <sup>+</sup>	minimum	0,5	1,3	0,67	0,46
	maksimum	1,3	2,2	1,34	1,13
	srednja vrednost	0,7	1,6	0,99	0,77
	standardna devijacija	0,4	0,4	0,22	0,22
	medijana	0,5	1,4	1,04	0,72
<i>CO</i> <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	minimum	21	61	13	0,3
	maksimum	51	109	63	40,7
	srednja vrednost	33	85	43	22,9
	standardna devijacija	9	15	15	18,6
	medijana	33	85	41	33,8
<i>SO</i> <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	minimum	0,9	2,0	2	0,38
	maksimum	2,0	3,8	77	12,89
	srednja vrednost	1,3	2,7	14	3,59
	standardna devijacija	0,4	0,7	25	4,27
	medijana	1,1	2,7	6	2,09
<i>PO</i> <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	minimum	0,0003	0,008	1,0	0,01
	maksimum	0,0034	0,032	1,9	1,33
	srednja vrednost	0,0014	0,019	1,4	0,26
	standardna devijacija	0,0011	0,009	0,3	0,44
	medijana	0,0010	0,02	1,5	0,13
<i>Cl</i> <sup>-</sup>	minimum	0,32	0,6	14	0,20
	maksimum	1,16	6,7	51	38,33
	srednja vrednost	0,61	2,3	34	12,13
	standardna devijacija	0,26	2,3	11	14,01
	medijana	0,57	1,1	34	8,43

Pored ukupne koncentracije jona, za faktorsku analizu su korišćene i izmerene pH vrednosti, vrednosti električne provodljivosti, zapremina izluženog rastvora i koncentracije katjona. Električna provodljivost,  $\text{Ca}^{2+}$  i pH su u faktorskoj analizi opisani prvom komponentom, pri čemu pH negativno koreliše sa električnom provodljivošću i  $\text{Ca}^{2+}$  (tabela 3). Ostali katjoni i suma anjona su opisani drugom komponentom i korelišu pozitivno, a zapremina izluženog rastvora je opisana trećom komponentom i nije u korelaciji ni sa jednim drugim parametrom.

**Tabela 3.** Faktorska analiza posmatranih parametara.

Parametar	Komponenta		
	1	2	3
Zapremina			0,952
pH	-0,818		
Električna provodljivost	0,924		
$\text{Na}^+$		0,849	
$\text{K}^+$		0,852	
$\text{Ca}^{2+}$	0,869		
$\text{Mg}^{2+}$		0,737	
$\Sigma$ anjona		0,518	

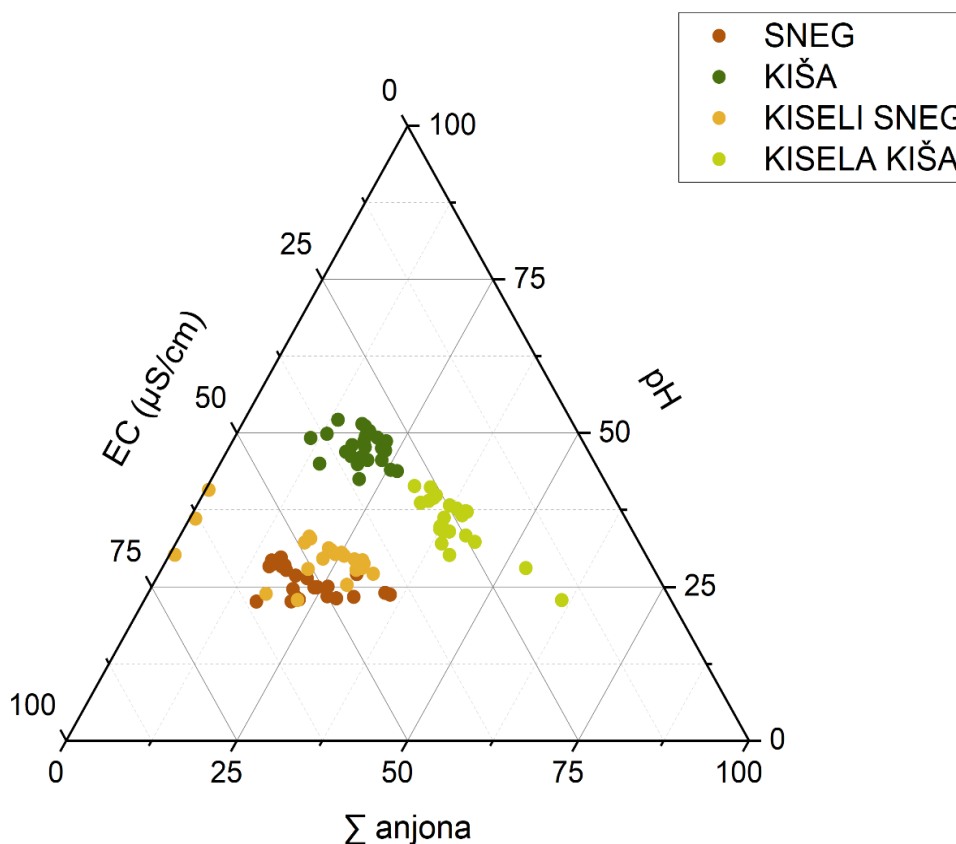
Uzimajući u obzir rezultate faktorske analize i rezultate prethodnog eksperimenta koji ukazuju na veću važnost anjona, nego katjona u razumevanju ovih konkretnih *badlands* sedimentima (Antić, 2020; Chunxia i dr. 2022), kao parametri za konstruisanje trokomponentnog dijagrama (slika 30) korišćene su vrednosti sume anjona, vrednosti pH i električne provodljivosti. Na trokomponentnom dijagramu su, radi bolje transparentnosti podataka, pH vrednosti pomnožene sa 10.

Kao što je već napomenuto, praćeni parametri nisu u potpunosti ukazali na razlike koje bi bolje objasnile razliku između tretmana, međutim, trokomponentni dijagram jasno ukazuje na razlike između tretmana kišom i snegom. Posmatrajući tretmane običnom i kiselom kišom, uočava se da imaju sličnu raspodelu promenljivih, ali da se ne grupišu oko istih opsega parametara i da se razlikuju. Njihovu glavnu razliku čini opseg sume anjona. Dve promenljive koje se javljaju u tretmanu kiselom kišom potiču od sume anjona koji je u sedmom i desetom ciklusu uzorka D pomenen ka višim vrednostima. U tretmanu običnom kišom nema takvih primetnih odstupanja. Blaga odstupanja u tom tretmanu imaju četiri promenljive koje potiču od zbira anjona prvih ciklusa sva tri uzorka i drugog ciklusa uzorka J i imaju niže vrednosti.

Tretmani snegom se razlikuju, kako u poređenju sa tretmanima kišom, tako i među sobom u određenoj meri. Tretmani snegom i kiselim snegom grupišu se oko istih opsega promenljivih, ali imaju blago različitu raspodelu. Blago odstupanje u raspodeli kod ovih tretmana uočava se samo u tretmanu kiselim snegom i promenljive koje ga uzrokuju su vrednosti sume anjona i električne provodljivosti izmerene u prvom i drugom ciklusu sva tri uzorka, i one imaju nižu vrednost u slučaju zbira anjona, odnosno nižu u slučaju električne provodljivosti.

Odstupanja koja potiču od vrednosti parametara merenih u inicijalnim, početnim ciklusima i kiše i kiselog snega ukazuju da se u tim ciklusima nisu odvijale velike hemijske promene. U daljem toku eksperimenta, kako je dolazilo do raspadanja sedimenta, dolazilo je i do formiranja novih fisura i pukotina, a samim tim i do novih i većih površina dostupna za

hemijske i fizičke promene na sedimentu. To objašnjava porast od ~ 50% izmerenih vrednosti sume anjona koji se dogodio od prvog do trećeg ciklusa tretmana običnom kišom i kiselim snegom.



**Slika 30.** Distribucija zbira anjona,  $10 \times \text{pH}$  i električne provodljivosti tretiranih uzoraka.

Generalno poredeći sva četiri tretmana na osnovu opsega vrednosti merenih parametara, tretman kišom je sličniji tretmanu snegom i kiselim snegom. Tretman kiselim kišom grupisan je u različitim opsezima vrednosti merenih parametara. Takav način grupisanja tretmana potvrđuje glavnu razliku između tretmana uzrokovanu različitim procesima sorpcije, koja se oslikava kroz vrednosti električne provodljivosti i zbira anjona. Pored toga, sa procesima sorpcije bi se moglo povezati i grupisanje oko različitih opsega parametara koje se uočava u tretmanima kišom i kiselim kišom. Procese adsorpcije koji se odvijaju kada kiša dođe u kontakt sa vodom mogu biti ometeni jonima koji su dodati destilovanoj vodi za potrebe pripremanja rastvora koji ima pH vrednost kisele kiše ispitivanog područja. Međutim, imajući u vidu da: razlika u tim tretmanima potiče od nešto više oscilacije merenih vrednosti električne provodljivosti i tretmanu kiselim kišom (slika 29); da kiseline dodate za pripremanje kisele kiše ne uzrokuju promene u pH vrednostima (slika 27) i opsezima vrednosti električne provodljivosti običnih i kiselih tretmana; i pošto se i u tretmanu običnom i tretmanu kiselim kišom sedimenti slično raspadaju (slike 20-25), moglo bi se zaključiti da pomenuto ometanje jonima nije velikog intenziteta. Razlika između tretmana snegom i kišom, bilo običnim ili kiselim i sličan obrazac ponašanja sedimenta u tretmanima snegom i kiselim snegom uočljiv je i na fotografijama koje prate raspadanje sedimenta. Fotografije ukazuju na vidljivije raspadanje sedimenta u tretmanima snegom.

#### 4.2.5 Ishod klimatskog eksperimenta na sedimentima istog litološkog sastava

U ovom istraživanju je stavljen akcenat na promene u svojstvima izluženog rastvora sedimenata čije raspadanje je podstaknuto simulacijom različitih klimatskih uslova. Ono predstavlja nastavak eksperimenta rađenog na istom tipu sedimenata i opisanog u Antić (2020) i Xie i dr. (2022). Na osnovu njihovog eksperimenta zaključeno je da je u laboratorijskim uslovima visoka temperatura, odnosno proces sušenja nakon padavina značajniji od procesa mržnjenja tj. niske temperature, kiselosti i intenziteta padavina. Pored toga je zaključeno da je hemijsko ispiranje na ispitivanim uzorcima pospešeno povišenim spiranjem koje se na sedimentima dešava u tretmanima u kojima se kao faktori kombinuju padavine visokog intenziteta, niža temperatura i kiseli rastvor.

Na osnovu tih rezultata, naredni eksperiment rađen na *badlands* sedimentima iste vrste postavljen je sa ciljem da objasni promene koje se dešavaju kroz vremena; da objasni uticaj različitih vrsta padavina; ali i da objasni uticaj trajanja izloženosti sedimenata tim padavinama na procese raspadanja i na ponašanje jona u izluženom rastvoru. Rezultati ovog eksperimenta su istakli da:

1) Vrednosti parametara koji su tokom vremena mereni ne ukazuju na primetne razlike tokom trajanja eksperimenta. Poredeći njihove vrednosti izmerene za svaki uzorak, oscilacije iz ciklusa u ciklus postoje, ali nisu drastične i glavne razlike se uočavaju tek kada se uporede tretmani kišom i snegom.

Vrednosti izmerenih parametara ukazuju na različit uticaj kiše i snega na sedimente, bez obzira da li se radi o običnom ili kiselom snegu ili kiši. U oba tretmana snegom, izmerene su više vrednosti električne provodljivosti, dok je zapremina izluženog rastvora u tretmanima kiselom kišom viša nego u tretmanima običnom kišom. Izmerene pH vrednosti su, nasuprot tome, više u tretmanima kišom i kiselom kišom. Katjon koji je najzastupljeniji u izluženim rastvorima svih uzoraka je  $\text{Ca}^{2+}$  i njegova koncentracija je, u poređenju sa tretmanima kišom, u oba tretmana snegom gotovo dvostruko viša od koncentracija ostalih katjona. Najviše koncentracije anjona izmerene su za  $\text{CO}_3^{2-}$  i  $\text{Cl}^-$ , pri čemu je u tretmanu kiselim snegom najzastupljeniji  $\text{CO}_3^{2-}$ , a u tretmanima snegom i kiselim snegom  $\text{Cl}^-$  i  $\text{PO}_4^{3-}$ . Glavnu razliku između tretmana zapravo čine električna provodljivost i sume anjona.

2) Ključno za procese raspadanja ispitivanih glinovitih alevrita i alevritskih glina je zapravo vreme izloženosti sedimenata padavinama.

Procesi sorpcije i vreme neophodno da se simulirani sneg otopi doprinose razlici između tretmana kišom i snegom. Vreme koje sediment provede u kontaktu sa kišom je ~ 20 puta kraće nego što je to slučaj u tretmanu snegom. To ne ostavlja dovoljno vremena kiši za zapreminsku sorpciju, niti za uspostavljanje ravnoteže. Takve interakcije snega i sedimenata dovode do viših vrednosti električne provodljivosti i ukazuje na važnu ulogu ukupnog sadržaja anjona u procesima raspadanja.

3) različito ponašanje jona i jonska izmena su dominantni hemijski procesi koji uzrokuju ovakve rezultate.

Kao mobilna faza velike brzine se može posmatrati kiša što ukazuje na to da su u tim tretmanima ekskluzivni mehanizmi dominantniji. Nasuprot tome, brzina perkolacije je u tretmanima snegom niska, što ostavlja dovoljno vremena jonskim izmenama da utiču na svojstva izluženog rastvora.

4) površinske fizičke promene sedimenata se u ovom eksperimentu dešavaju tokom vremena, samo u određenoj meri, na šta su ukazale i fotografije kojima je praćeno raspadanje sedimenata kroz vreme.

Na osnovu fotografija promena površine sedimenata uočen je značajniji stepen raspadanja kod sedimenata tretiranih snegom i kiselim snegom. Sedimenti tretirani kišom i kiselom kišom se usitnjavaju, i fragmenti sedimenata i nakon petnaest ciklusa simulacija zadržavaju obrise svojih inicijanih oblika. Za razliku od tretmana kišom, u tretmanima snegom obrise svojih početnih oblika izgubilo je oko 50% uzoraka, usled mehaničkog raspadanja sedimenata na manje komade. Preostali fragmenti sedimenata tretmana snegom su i pored nastajanja vidljivih finih pukotina, zadržali obrise svojih oblika sa početka eksperimenta.

### 4.3 KLIMATSKI EKSPERIMENT NA SEDIMENTIMA RAZLIČITOG LITOLOŠKOG SASTAVA

Shodno ishodima prethodnih eksperimenata u kojima je ispitivana hipoteza da tereni istog litološkog sastava imaju drugačije ponašanje zavisno od uslova okruženja u kom se nalaze, u narednoj fazi istraživanja ispitivani su *badlands* sedimenti različitog litološkog sastava. Pet uzoraka sedimenta *badlands* terena formiranih na različitim lokacijama, u različitim klimatskim uslovima i različitog litološkog sastava, izabrani su sa ciljem ispitivanja hipoteze da se na terenima različitog litološkog sastava mogu odvijati različiti procesi erozije u zavisnosti od litološkog sastava. Kako su prethodni eksperimenti ukazali na destruktivnost kiše u kombinaciji sa visokom temperaturom, i snega u kombinaciji sa niskom temperaturom, na *badlands* sedimentima su u ovoj fazi simulirani upravo ti uslovi sa ciljem praćenja njihovog uticaja na njihovo raspadanje. Eksperiment je obuhvatio jedan uzorak blago metamorfisanog peskovitog alevrita aridnog *badlands* terena u Španiji, jedan uzorak glinovitog alevrita aridnog *badlands* terena u Italiji i tri uzorka sa različitih *badlands* terena u Turskoj: tufozne gline sa aridnog, alevritskog peščara sa mediteranskog i peskovitog *badlands* sedimenta sa humidnog terena.

#### 4.3.1 Karakteristike ispitivanih područja

Ribes Blaves (slika 31), blago metamorfisan peskovito alevritski aridni *badlands* teren u Španiji, zauzima površinu svega oko 4ha i predstavlja deo geološke istorije Katalonije koji je povezan sa dva tektonska događaja. O ovom *badlands* terenu se ne zna mnogo i dosadašnja istraživanja su se njime više bavila sa aspekta tektonike. Ribes Blaves je teren plavičasto-sive boje, ispunjen brazdama koje formiraju pojas širine oko stotinak metara (slika 32). Razvijen je na rasednim stenama tj. u zoni rasedne gline kambrijumsko-ordovicijumskih škriljaca. Protolit, kao polazna, izvorna stena dao je karakterističnu plavičastu boju ovim stenama. Teren karakteriše tipična mediteranska klima sa, zbog svoje pozicije u unutrašnjosti, blagim uticajem kontinentalne klime. Uzorak blago metamorfisanog peskovitog alevrita aridnog *badlands* terena u Španiji (41°33'28,4"N 1°55'30,7"E) u daljem tekstu označen je kao uzorak Rb.



**Slika 31.** Ribes Blaves - Olesa de Montserrat, Barselona, Španija (Izvor: Jordi Lluís Pi - Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), uz dopuštenje autora)



**Slika 32.** Blago metamorfisani peskoviti alevriti plavičasto-sive boje - Ribes Blaves (Izvor: Jordi Lluís Pi - Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), uz dopuštenje autora)

Aliano *badlands*, glinovito alevritski aridni *badlands* teren, nalazi se između Lukanskih Apenina i centralnog dela Bradanskog rova u regiji Bazilikata u Italiji (slika 33). Neraspadnuti uzorci ovog terena koji zauzima površinu od oko 10000m<sup>2</sup> uzorkovani su nedaleko od grada Aliano.



**Slika 33.** Aliano *badlands*, Italija. (Izvor: Nevena D. Antić)



**Slika 34.** Površinski sloj Aliano *badlands* terena u Italiji. (Izvor: Nevena D. Antić)

Sivo-plavi laporci guste drenažne mreže uzrokovane cevastom erozijom, za koje je svojstvena i pojava površinskih tokova, kao i formiranje površinske korice opisuju ovaj teren i svrstavaju ga u „biancane“ tip *badlands* terena (slika 34). Za Aliano *badlands* je svojstvena mediteranska klima sa toplim i suvim letima i umerenim, vlažnim zimama. Prosečna maksimalna temperatura leti iznosi oko 25°C, dok prosečna minimalna temperatura zimi iznosi oko 9°C. U periodu od 1955-2000. godine zabeleženo je povećanje intenziteta padavina, što je za posledicu imalo povećanje broja uzastopnih sušnih dana, odnosno smanjenje broja uzastopnih vlažnih dana. Shodno tome, obilne kiše karakteristične su za period od oktobra do januara, a prosečna godišnja količina padavina iznosi oko 750mm. Uzorak glinovitog alevrita aridnog *badlands* terena u Italiji (40°18'22,5''N, 16°17'46,4''E) u daljem tekstu označen je kao uzorak AL.

Mediteranski *badlands* tereni svojstveni su za deo Turske koji se, paralelno sa Sredozemnim morem pruža kroz zapadnu Anadoliju i južnu Tursku. Reljefi alevritskih peščara ovih terena slabo razvijene vegetacije i gusto formiranih brazdi, zbog svojih oštih ivica podsećaju na *badlands* terene tipa „calanchi“, mada se u ovoj oblasti mogu pronaći i tereni zaobljenih padina (slika 35). Ovi tereni predstavljaju nekonsolidovane miocenske peščare kao proizvod rečnih i jezerskih sekvenci sedimenata formacije Ahmetler (Ercan i dr., 1978; Şen i dr., 2014). Na padinama ovih terena dominiraju žućkaste i sive nijanse, a veličine njihovih čestica se kreću od veličine čestica gline, pa sve do alevrita. Njihov oblik ponajviše je posledica površinskih oticanja, brazdanja, jaruženja, kao i formiranja cevaste erozije. Neraspadnuti uzorci mediteranskih *badlands* terena uzorkovani su u blizini Salihli, Manisa u Turskoj (slika 36). Sa klimatološke tačke gledišta, ovaj region generalno odgovara pravom semi-aridnom mediteranskom režimu padavina sa dugim toplim i suvim letima i kišovitim i umerenim zimama, uz visoku klimatsku sezonalnost u celini. Mediteranska vazдушna masa glavna je pokretačka sila klimatskih uslova, a ponajviše režima padavina (Sariş i dr., 2010). Prosečna godišnja količina padavina u ovom regionu iznosi 492 mm, sa kišom kao dominantnom vrstom padavina, najviše u periodu od novembra do maja. Tokom perioda vlažne zime, temperatura iznosi oko ~ 5 °C, dok prosečna godišnja temperatura iznosi oko 16,4 °C. Uzorak alevritskog peščara mediteranskog *badlands* terena u Turskoj (38°41'10,18''N, 28°47'24,23''E) u daljem tekstu označen je kao uzorak SLN.



**Slika 35.** Mediteranski *badlands* teren u Turskoj  
(Izvor: Aydogan Avcioğlu, uz dopuštenje autora)



**Slika 36.** Površinski sloj mediteranskog *badlands* terena u Turskoj  
(Izvor: Aydogan Avcioğlu, uz dopuštenje autora)

Aridni *badlands* tereni alevritskih glina tufoznog karaktera svojstveni su za unutrašnjost Turske tj. za oblast poznati kao Orogeni plato Centralne Anadolije. Neraspadnuti uzorci aridnih *badlands* terena uzorkovani su u opštini Nalahan u blizini Ankare. Na ovim terenima neogenih jezerskih sedimenata se na kratkim rastojanjima radijusa od oko 1km mogu pronaći reljefi zaobljenih, ali i oštih ivica (slika 37). Žućkasta, sivkasta i beličasta boja se prožima na ovim terenima koji su dominantno sačinjeni od glinovitih laporaca čija se veličina zrna kreće u rasponu alevrit – pesak – glina (slika 38). Jaruženje, brazdanje, cevasta erozija, ali i plitka klizišta oblikuju ove terene za koje su karakteristična topla i suva leta i hladne zime. Prosečna količina godišnjih padavina iznosi 298mm, i većina ih padne u periodu između septembra i februara, mada se često javljaju i prolećni pljuskovi koji za posledicu imaju visok fluks

sedimenta. Srednja temperatura iznosi 2°C u zimskim, a u letnjim mesecima 23°C uz česte deficite vode tokom sušnih letnjih perioda. Uzorak alevritske gline tufoznog karaktera aridnog *badlands* terena u Turskoj (40°08'46,36"N, 31°35'02,32"E) u daljem tekstu označen je kao uzorak NLH.



**Slika 37.** Aridni *badlands* teren u Turskoj.  
(Izvor: Aydoğan Avcıoğlu, uz dopuštenje autora)



**Slika 38.** Žućkasti, sivkasti i beličasti slojevi aridnog *badlands* terena u Turskoj.  
(Izvor: Aydoğan Avcıoğlu, uz dopuštenje autora)

Humidni peskovito alevritski *badlands* tereni svojstveni su za istočnu visoravan Anadolije, a neraspadnuti *badlands* sedimenti dobro sortiranih, finih do srednjih zrna cementiranih karbonatima (Herece i Acar, 2016) uzorkovani su u okolina grada Tunceli koji se nalazi na ~ 1000 m nadmorske visine. Duboko usečene jaruge kanali dominiraju ovim terenima peščara koje odlikuje turbiditna sukcesija konglomerata, peščara, alevrita i krečnjaka (Herece i Acar, 2016; Agostini i dr., 2019) Kırkgeçit formacije. Jedno je od glavnih dominantnih klimatskih

obeležja ovih terena jesu snažne temperaturne sezonalnosti sa temperaturama od  $-1,9^{\circ}\text{C}$  do  $27,1^{\circ}\text{C}$  i prosečnom godišnjom količinom padavina oko 872,8mm. Leta su suva, a velika količina padavina padne u jesen i zimu. Sneg koji je svojstven za zimske periode podstiče procese raspadanja izazvane mrazom. Uzorak peskoviti alevrita humidnog *badlands* terena u Turskoj ( $39^{\circ}04'50,56''\text{N}$ ,  $39^{\circ}33'08,62''\text{E}$ ) u daljem tekstu označen je kao uzorak T.

#### **4.3.2 Postavka klimatskog eksperimenta na sedimentima različitog litološkog sastava**

Na osnovu ishoda prethodnih eksperimenata i na osnovu rezultata prve faze eksperimenta, naredna faza je postavljena tako da uključuje simulaciju kiše i visoke temperature sušenja u okviru jednog, i snega i niske temperature mržnjenja u okviru drugog tretmana. Kako je pojava kiselih kiša svojstvenija za područje Kine, u ovoj fazi eksperimenta simulacije kiselih padavina nisu razmatrane, imajući u vidu da nisu svojstvene za područja ispitivana u ovom klimatskom eksperimentu.

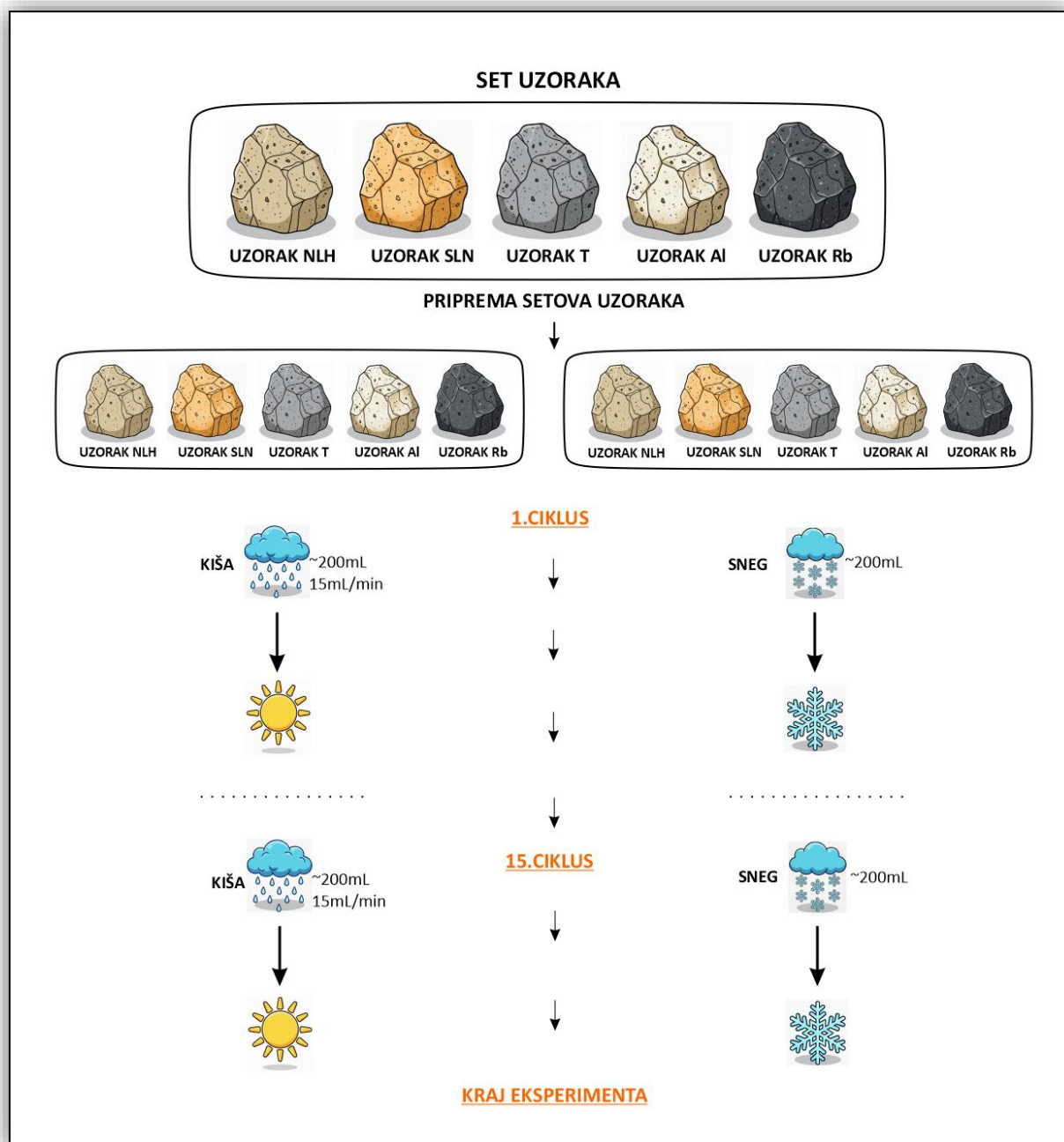
Prethodno pripremljeni uzorci sa pet *badlands* terena različitog litološkog sastava, organizovani su u dva seta (slika 39) koji prolaze kroz cikluse u kojima se manipuliše vrstom padavina i temperaturom i to kroz tretmane koji podrazumevaju simulacije:

- kiše i visoke temperature sušenja,
- snega i niske temperature mržnjenja.

U tretmanu kišom simulirane su kišne padavine intenziteta 15ml/min, dok je količina korišćenog snega u tretmanu snegom iznosila  $\sim 200\text{cm}^3$ . Po završetku simulacije padavina, set uzoraka tretiran kišom ostavljan je u sušnicu na  $\sim 40^{\circ}\text{C}$  u trajanju od 6h, a potom narednih 18h tj. do početka narednog ciklusa na sobnoj temperaturi od  $23-25^{\circ}\text{C}$ . Sa druge strane, set uzoraka tretiran snegom je tokom noći ostavljan u zamrzivaču na temperaturi od  $-4^{\circ}\text{C}$ , a potom na sobnoj temperaturi u kratkom periodu neophodnom da se fotografišu površinske fizičke promene neposredno pre početka sledećeg ciklusa. Izvedeni klimatski eksperiment je realizovan u 15 dnevnih ciklusa radi lakšeg upoređivanja sa rezultatima ranijih eksperimenata. Tokom svakog ciklusa je sakupljan izlužen rastvor iz koga je merena zapremina, pH vrednost, električna provodljivost i koncentracija jona. Fizičke promene koje su se dešavale na površini uzorka posmatrane su na osnovu fotografija koje su u ovoj fazi eksperimenta snimljene u svakom koraku ciklusa. U okviru jednog ciklusa fotografije su napravljene neposredno nakon simulacije kiše i snega, a potom i neposredno nakon što su uzorci izvađeni iz sušnice i zamrzivača tj. neposredno pre početka narednog ciklusa.

#### **4.3.3 Rezultati klimatskog eksperimenta na sedimentima različitog litološkog sastava**

Analize zapremine izluženog rastvora, pH vrednosti i električne provodljivosti i koncentracije jona izluženog rastvora sprovedene su sa ciljem definisanja inicijalnog geohemijskog statusa i praćenja dinamike ispiranja jona tokom simuliranog raspadanja sedimenata u različitim uslovima. Fizičke površinske promene praćene su fotografisanjem uzoraka nakon svakog tretmana i nakon svakog ciklusa.



**Slika 39.** Grafički prikaz postavke eksperimenta na sedimentima različitog litološkog sastava.

#### 4.3.3.1 Površinske fizičke promene

Površinske fizičke promene uzorka tokom primenjenih simulacija prikazane su na slikama 40-49. Vizuelno su dokumentovane faze nakon svakog koraka: kod tretmana kišom, promene su praćene nakon simulacije padavina i nakon izlaganja visokim temperaturama, dok su kod tretmana snegom promene beležene nakon topljenja snega i nakon simulacije mraza. Vidljive promene kroz cikluse zabeležene su ne samo između različitih tipova uzoraka, već i kod istih uzoraka izloženih različitim vrstama tretmana.

Posmatrajući površinske fizičke promene uzorka NLH može se uočiti da fragmenti gube svoj inicijalni oblik već nakon prvog ciklusa, nezavisno od toga da li se radi o tretmanu kišom ili o

tretmanu snegom. Taj inicijalni oblik se u tretmanu kišom u potpunosti gubi već u drugom ciklusu, dok se u tretmanu snegom obrisi fragmenata uočavaju po rubovima uzorka sve do petog ciklusa, nakon kog se i oni gube. U okviru tretmana kišom, uočava se primetna razlika između površina nakon simulacije kiše i nakon simulacije visoke temperature tokom ciklusa. Tokom simulacije kiše dominantno dolazi do bubrenja glina, što sprečava dalji prolazak padavina kroz uzorak i njihovo prikupljanje. Međutim, bez obzira na zadržavanje vode i bubrenje glina, površinski sloj se nakon simulacije visoke temperature, suši. Posledica toga jeste stvaranje pukotina. Tako stvorene pukotine kroz cikluse iznova nestaju i nastaju proširivajući već postojeće i stvarajući nove mreže pukotina (slike 40 i 41). Iako mreža i veličina tako nastalih pukotina osciluje kroz cikluse, praćenje promena u vrednostima merenih parametara svih ciklusa nije moguće zbog neizluživanja rastvora.

Površinske fizičke promene nastale u tretmanu snegom se znatno razlikuju od promena u tretmanu kišom. Kod NLH uzorka topljenjem simuliranog snega ne dolazi do bubrenja, zatvaranja površinskog sloja i posledično zadržavanja otopljenog snega na površini. Obrisi inicijalnih fragmenata se uočavaju sve do petog ciklusa, nakon kog fragmenti gube formu i zauzimaju punu površinu posude u kojoj se nalazi, zadržavajući jednu pukotinu koja se kroz cikluse povećava i smanjuje. Nakon simulacije niske temperature, vidljive pukotine se uočavaju samo u prvih dva ciklusa, nakon kojih se kroz cikluse, na površini ovog uzorka stvaraju mrazne pukotine, odnosno pukotine i šare nastale skupljanjem i širenjem usled smrzavanja i topljenja vode. Tako nastale mrazne šare menjaju svoju zastupljenost, dubinu, izgled i orijentaciju kroz cikluse, ali i pored toga ne ukazuju na izraženije promene vrednosti merenih parametara (slike 40 i 41).

Uzorak AL obrise svojih inicijalnih fragmenata sedimenata zadržava od početka, pa sve do kraja tretmana kišom, dok se u tretmanu snegom ti obrisi zadržavaju do petog ciklusa, nakon kog se u potpunosti gube (slike 42 i 43). Površinske fizičke promene izazvane simulacijom kiše ukazuju na stvaranje fisura i manjih pukotina na fragmentima sedimenata. Pukotine koje nastaju u okviru jednog ciklusa dominantno su uzrokovane simulacijom visoke temperature. Ono što se kroz cikluse uočava jeste da tako nastale, pliće pukotine, nestaju prilikom simulacije kiše, odnosno, bivaju zatrpane česticama manjih veličina. Dublje pukotine pri simulaciji kiše opstaju i u narednim simulacijama visoke temperature se povećavaju. Razlika u površinskim fizičkim promenama nastalim prilikom topljenja snega i prilikom mraza ukazuju na formiranje mraznih pukotina počevši od trećeg ciklusa, pa sve do kraja tretmana. Pored mraznih pukotina, počevši od šestog ciklusa, kada su fragmenti izgubili obrise svojih oblika, pa sve do kraja tretmana došlo je do sporog oticanja simuliranog snega i stvaranja „barica“. U trinaestom ciklusu je, usled nemogućnosti oticanja došlo do formiranja „jezerceta“, što je dovelo i do nemogućnosti merenja praćenih parametara u ovom ciklusu.

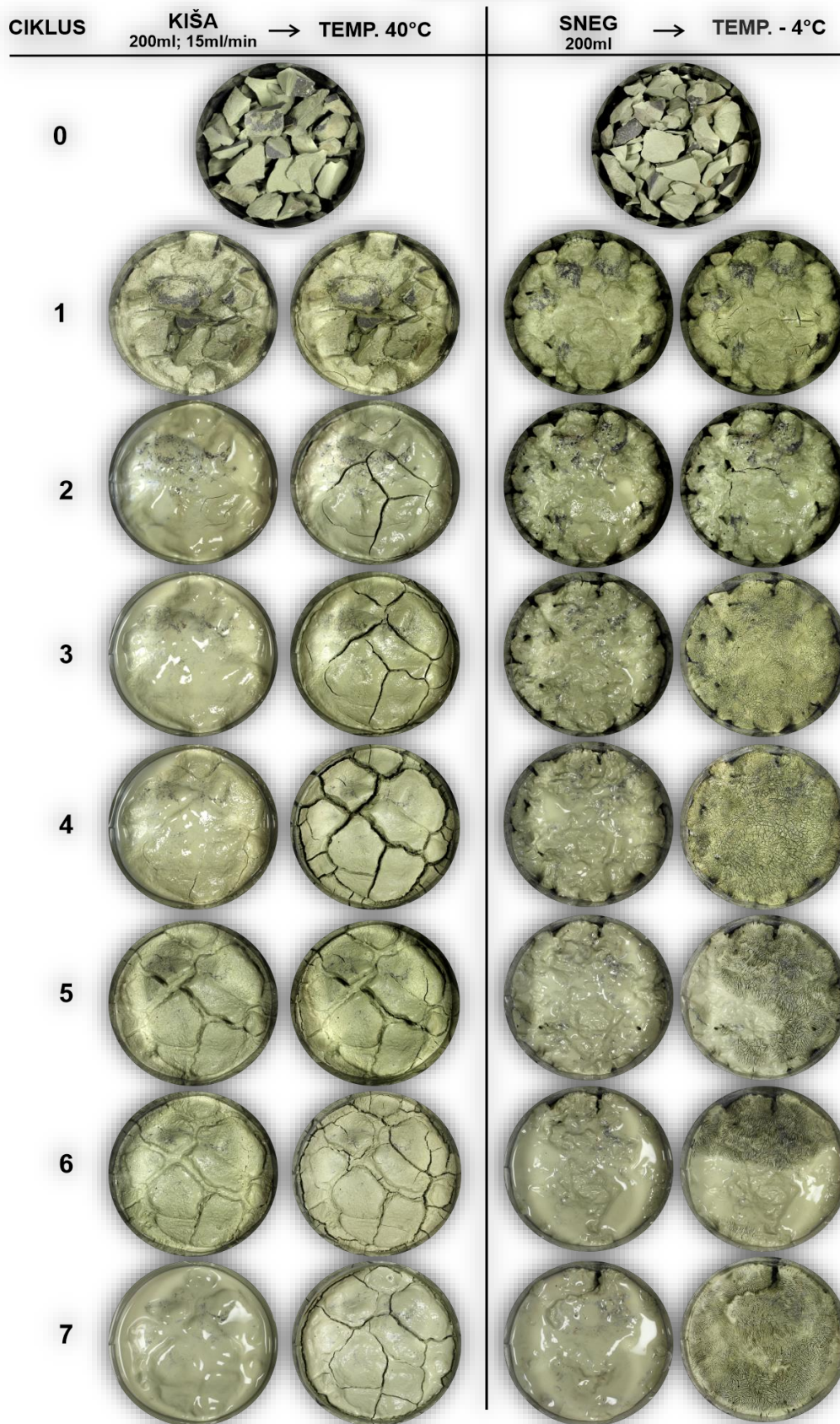
Površinske fizičke promene uzorka SLN se kroz cikluse razlikuju u zavisnosti od tretmana (slike 44 i 45). Fragmenti ovog uzorka u oba tretmana velikim delom gube svoje inicijalne oblike već nakon prvog ciklusa. U slučaju tretmana kišom obrisi tih oblika i reljefna struktura su u potpunosti izgubljeni već u drugom ciklusu, a u slučaju tretmana snegom u petom ciklusu. Nakon simulacije visoke temperature dolazi do formiranja pukotina već u drugom ciklusu koje potom nestaju prilikom simulacije kiše i ponovo nastaju i proširuju se na visokoj temperaturi. Takvo nastajanje i nestajanje se uočava se do petog ciklusa, kada dolazi do formiranja veće pukotine koja zadržava svoj oblik, i proširuje se sve do devetog ciklusa. U devetom ciklusu dolazi do zatvaranja formiranih pukotina koje posledično dovode do stvaranja slabopropusnog sloja i izostanka izluženih rastvora gotovo sve do kraja eksperimenta. Nasuprot tretmana kišom, u tretmanu snegom ne dolazi do izraženijih promena. Prilikom simulacije snega, odnosno topljenja snega, u četvrtom i trinaestom ciklusu je izluživanje rastvora izostalo usled stvaranja „jezerceta“ na površini uzorka. Niske temperature na površini SLN uzorka dovode do stvaranja mraznih pukotina koje su linearne, neretko paralelne i kroz cikluse menjaju svoj smer i dužinu.

Površinske fizičke promene nastale u tretmanima uzorka Rb ukazuju na različit odgovor ovih sedimenata na različite tretmane. Oblici inicijalnih fragmenata Rb uzorka u tretmanu kišom zadržavaju obrise gotovo do polovine tretmana (slike 46 i 47). Od polovine nadalje su obrisi fragmenata na rubovima uočljiviji od onih koji zauzimaju središnji deo uzorka. U slučaju tretmana snegom se ti obrisi već nakon prvog ciklusa postepeno gube, da bi se već nakon četvrtog u potpunosti izgubili. U okviru tretmana kišom, izrazita razlika između površinskih fizičkih promena izazvanih simulacijom kiše, i onih izazvanih visokom temperaturom se ne uočava. Sedimenti ovih uzoraka na simulacije visokih temperatura ne reaguju stvarajući pukotine, kao što je to bio slučaj u prethodnim uzorcima. Za razliku od njih, uzorak Rb ukazuje na to da se njegovi fragmenti kroz cikluse tretmana kišom više razvodnjavaju nego što pucaju. Izrazite promene izazvane topljenjem snega i niskom temperaturom se ne uočavaju ni u tretmanu snegom. U tretmanu snegom, sedimenti uzorka Rb već u drugom ciklusu postižu razvodnjen izgled u kom se u prvih sedam ciklusa, nakon simulacije mraza, jasno uočavaju mrazne pukotine. Od osmog ciklusa, pa sve do kraja tretmana, mrazne pukotine se pojavljuju, ali nisu izražene i brojne kao što je to bio slučaj u prvoj polovini tretmana.

Površinske promene uzorka AL generalno liče promenama na površini uzorka SLN i Rb (slike 42-47). Međutim, razliku između AL uzorka sa jedne i SLN i Rb uzorka sa druge strane čini trenutak njihovog nastanka tj. vreme neophodno da do njih dođe. U tretmanu kišom, AL uzorak zadržava svoje inicijalne obrise do samog kraja, dok se oni kod SLN uzorka raspadaju već nakon prvog ciklusa, a kod Rb uzorka od sredine, pa do kraja tretmana. U tretmanu snegom ti obrisi AL uzorka se gube od šestog ciklusa, dok se kod SLN i Rb uzorka gube već nakon drugog ciklusa.

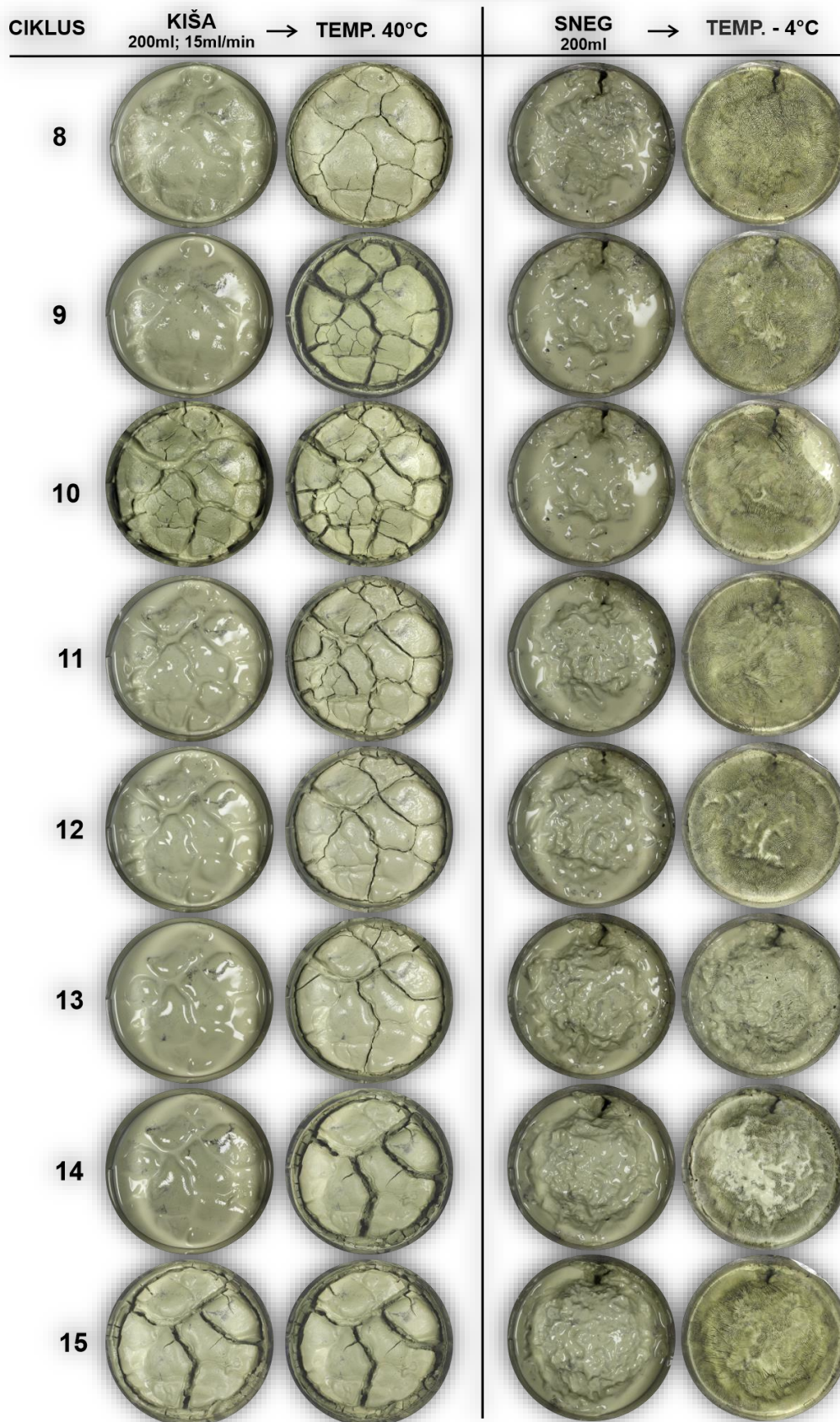
Uzorak T se niti kroz cikluse, niti kroz različite tretmane i različite korake u okviru tretmana ne menja. Fragmenti ovog uzorka pokazuju svoju inertnost zadržavajući svoj početni oblik od prvog, pa sve do poslednjeg ciklusa (slike 48 i 49). Jedina promena koja se može uočiti jeste blaga promena u boji nakon tretmana visokom temperaturom u kojima su fragmenti sedimenta, kao posledica sušenja, nešto svetliji.

## UZORAK NLH



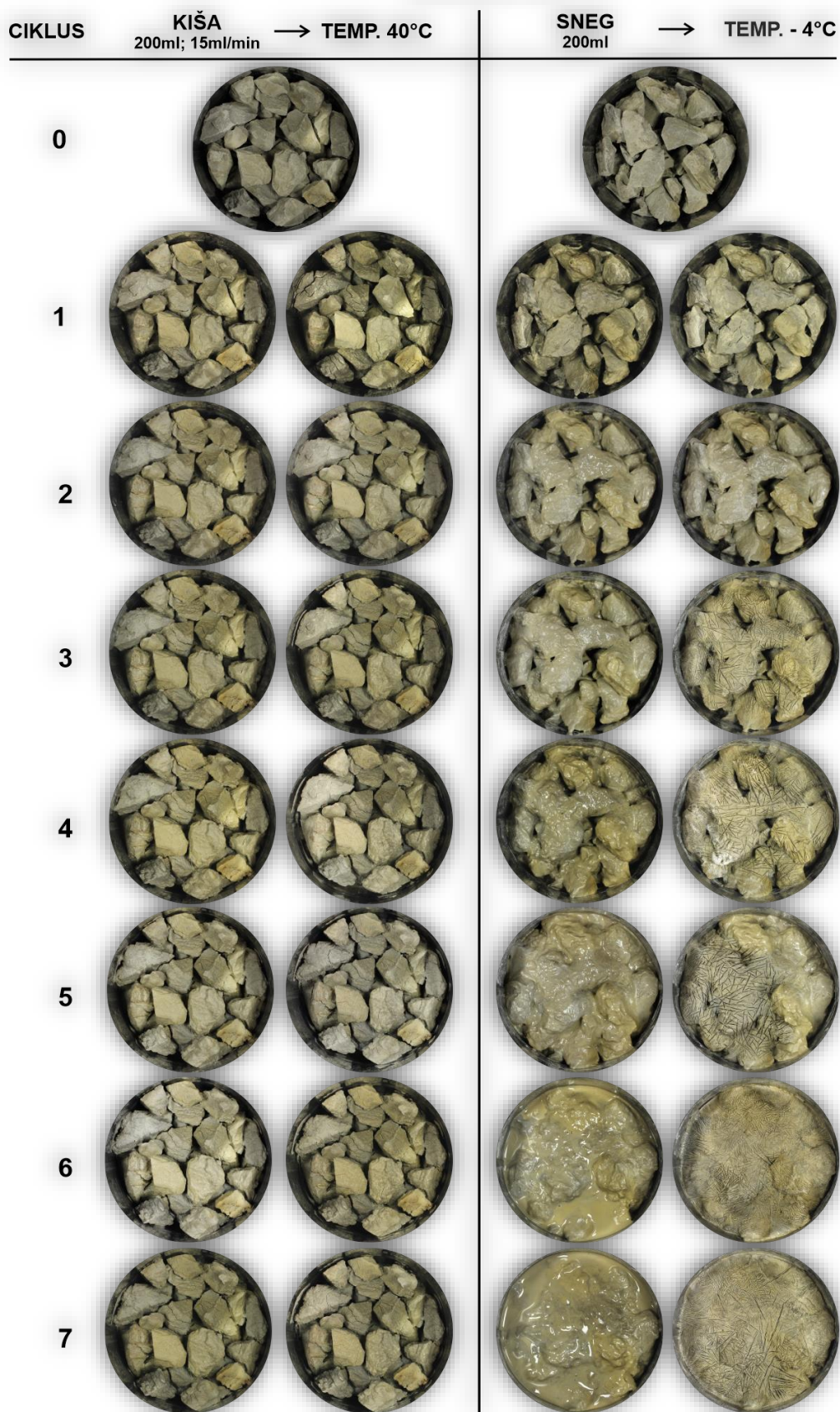
**Slika 40.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka NLH od 0-7.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

## UZORAK NLH



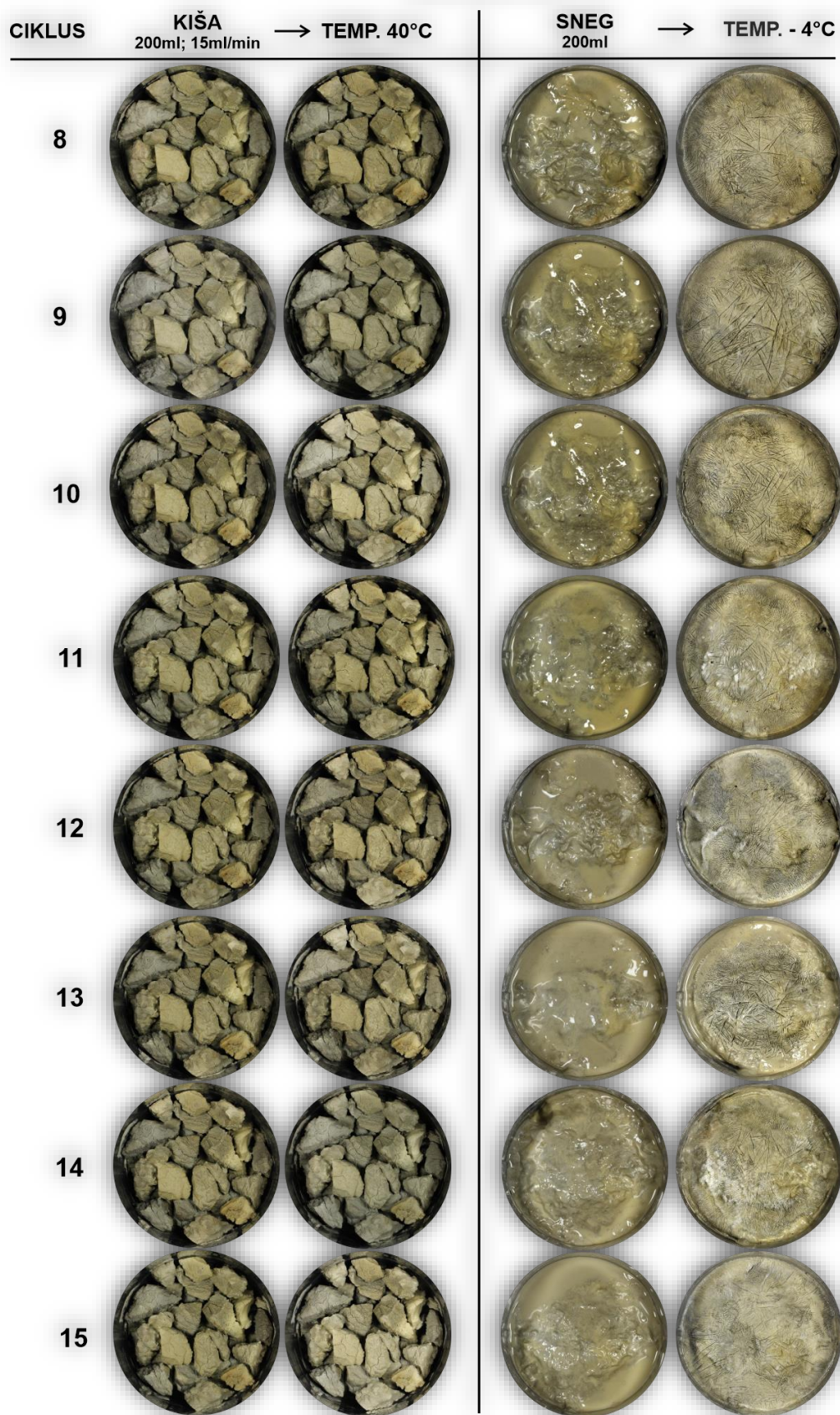
**Slika 41.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka NLH od 8-15.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

## UZORAK AL



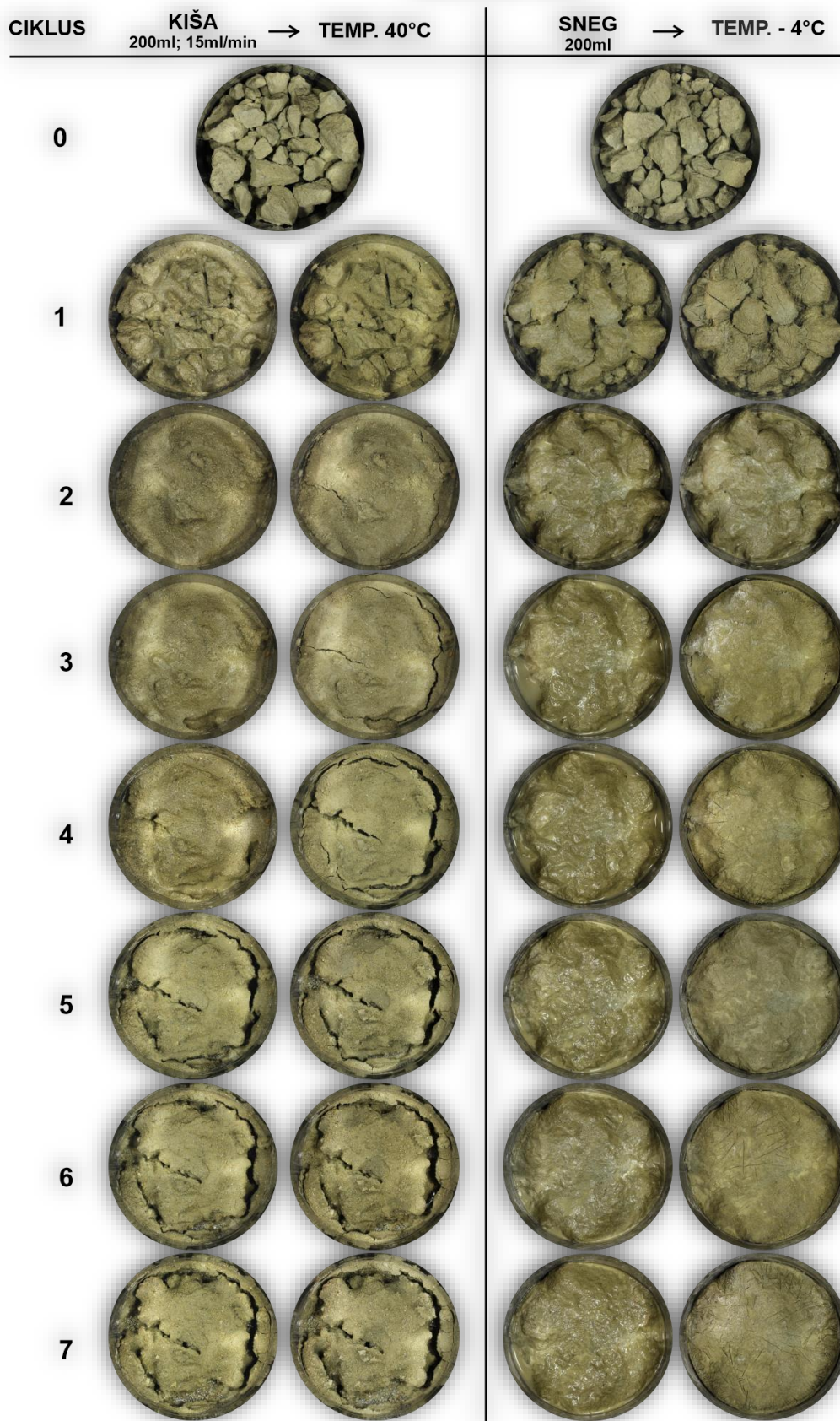
**Slika 42.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka AL od 0-7.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

### UZORAK AL



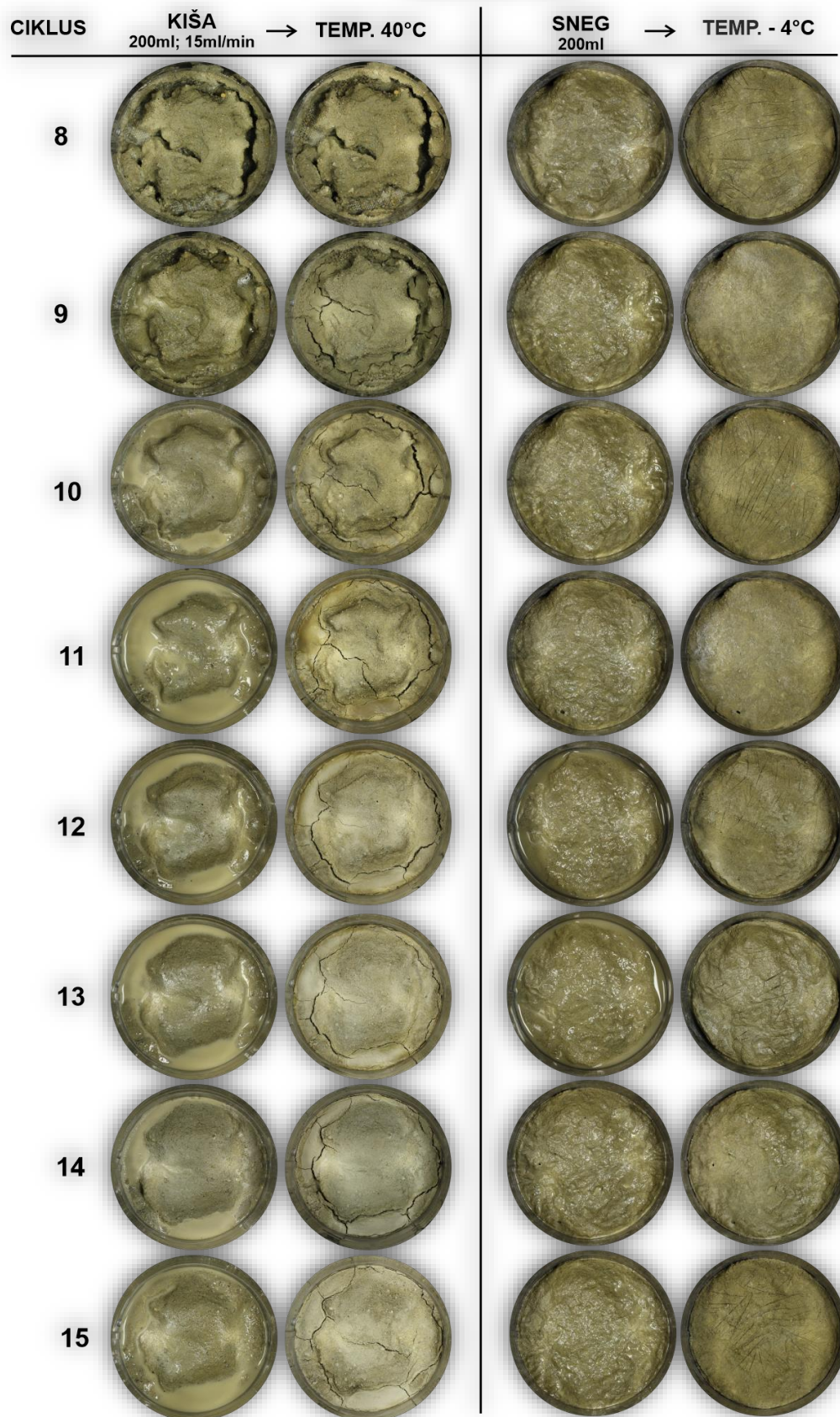
**Slika 43.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka AL od 8-15.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

## UZORAK SLN



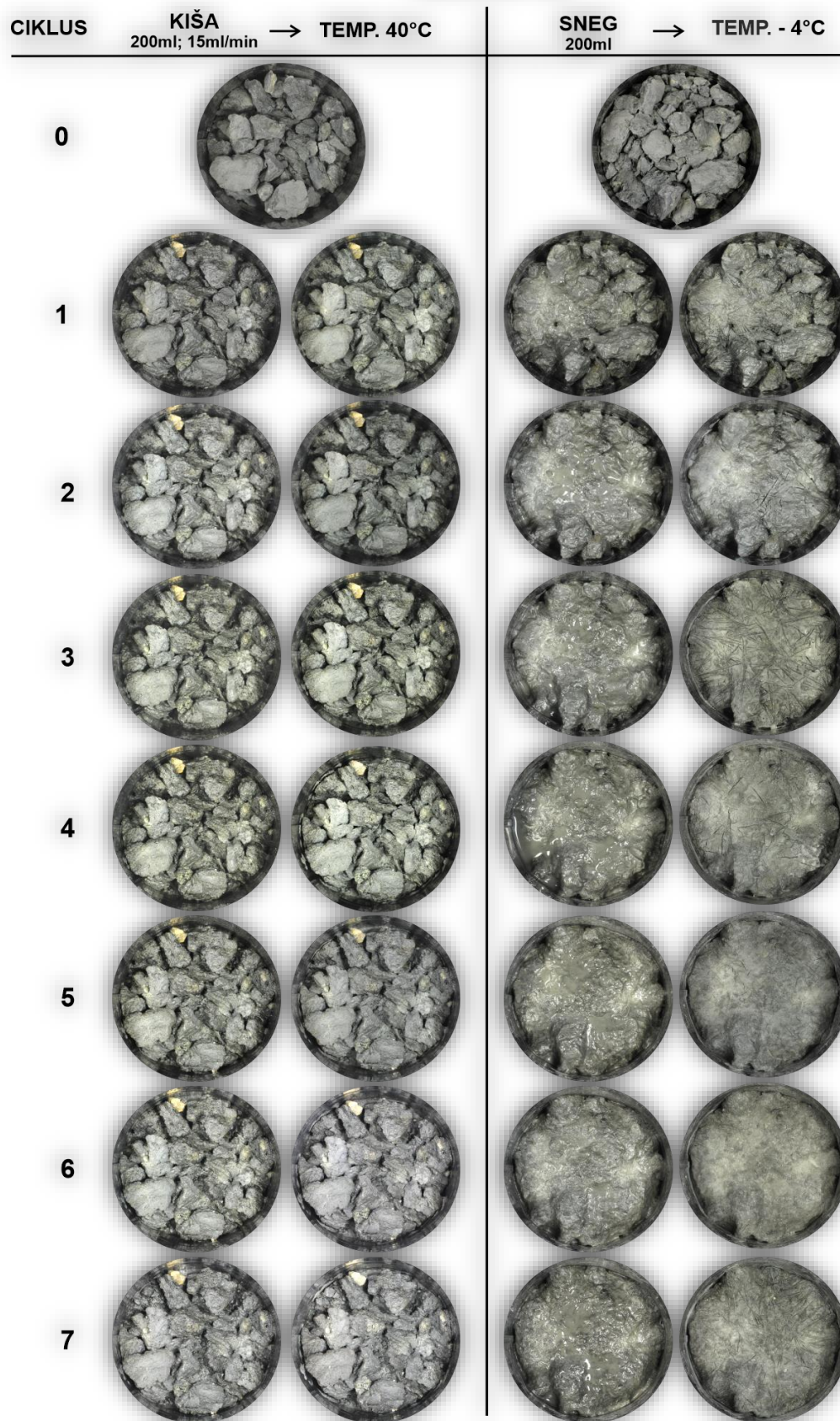
Slika 44. Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka SLN od 0-7.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

## UZORAK SLN



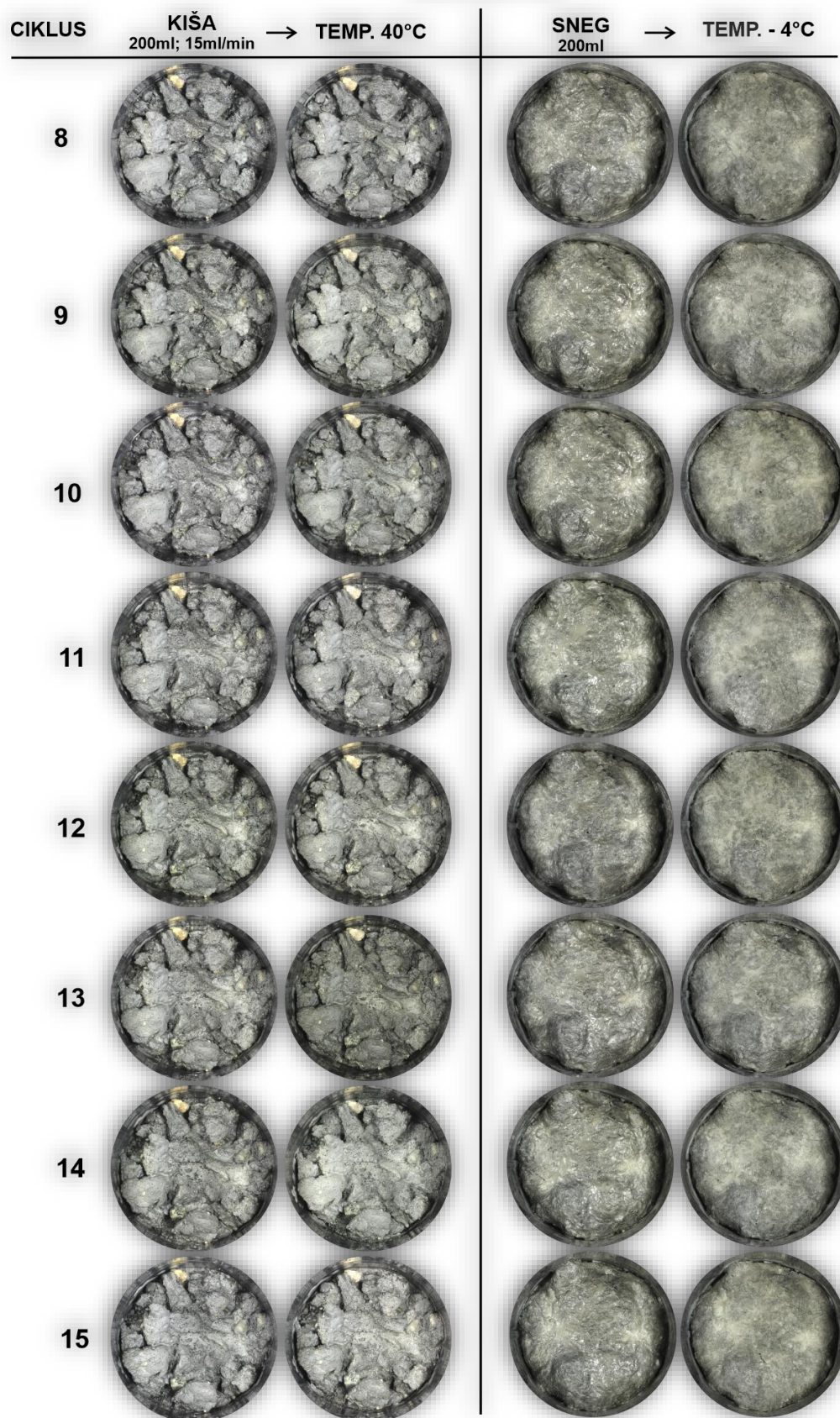
**Slika 45.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka SLN od 8-15.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

### UZORAK Rb



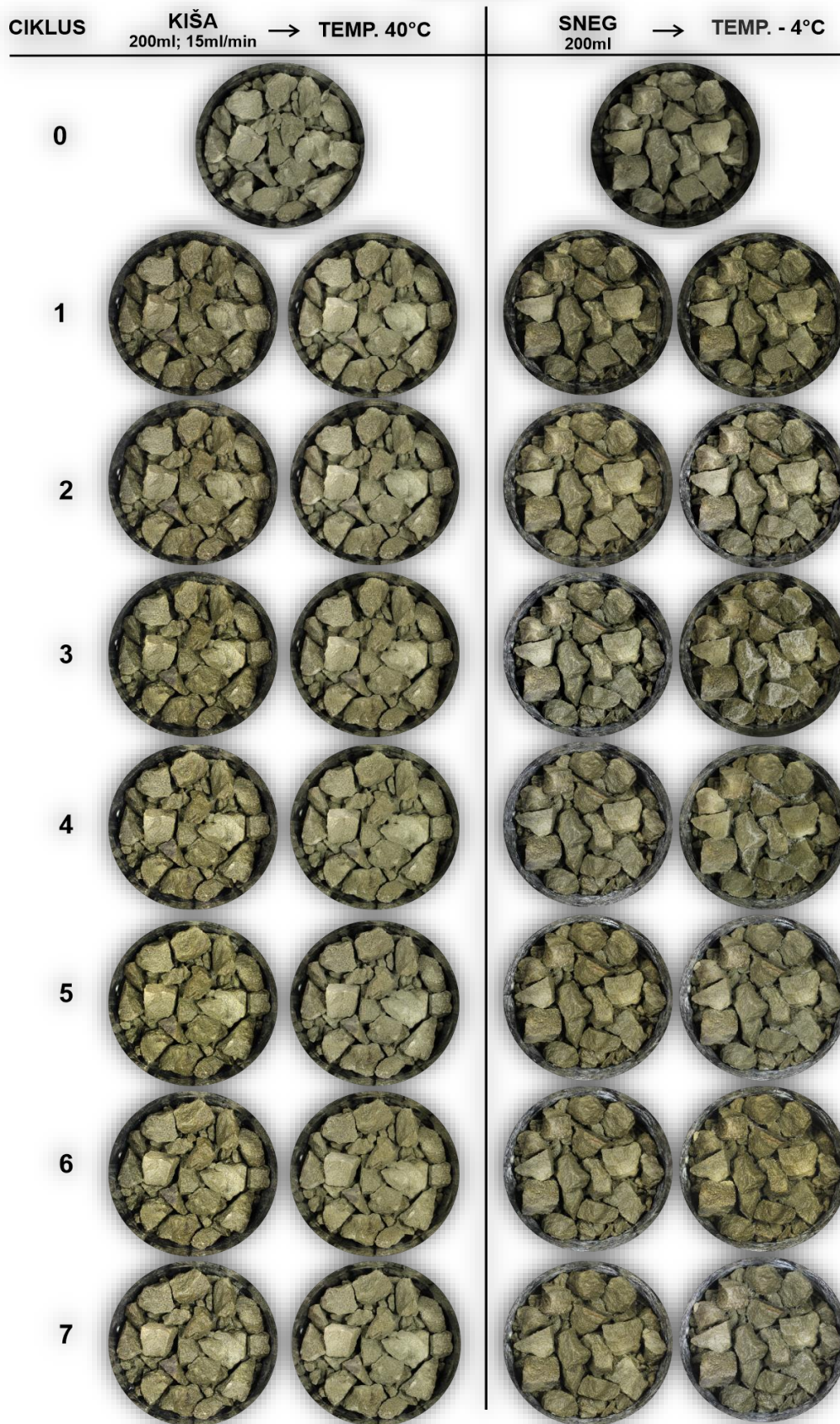
**Slika 46.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka Rb od 0-7.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

### UZORAK Rb



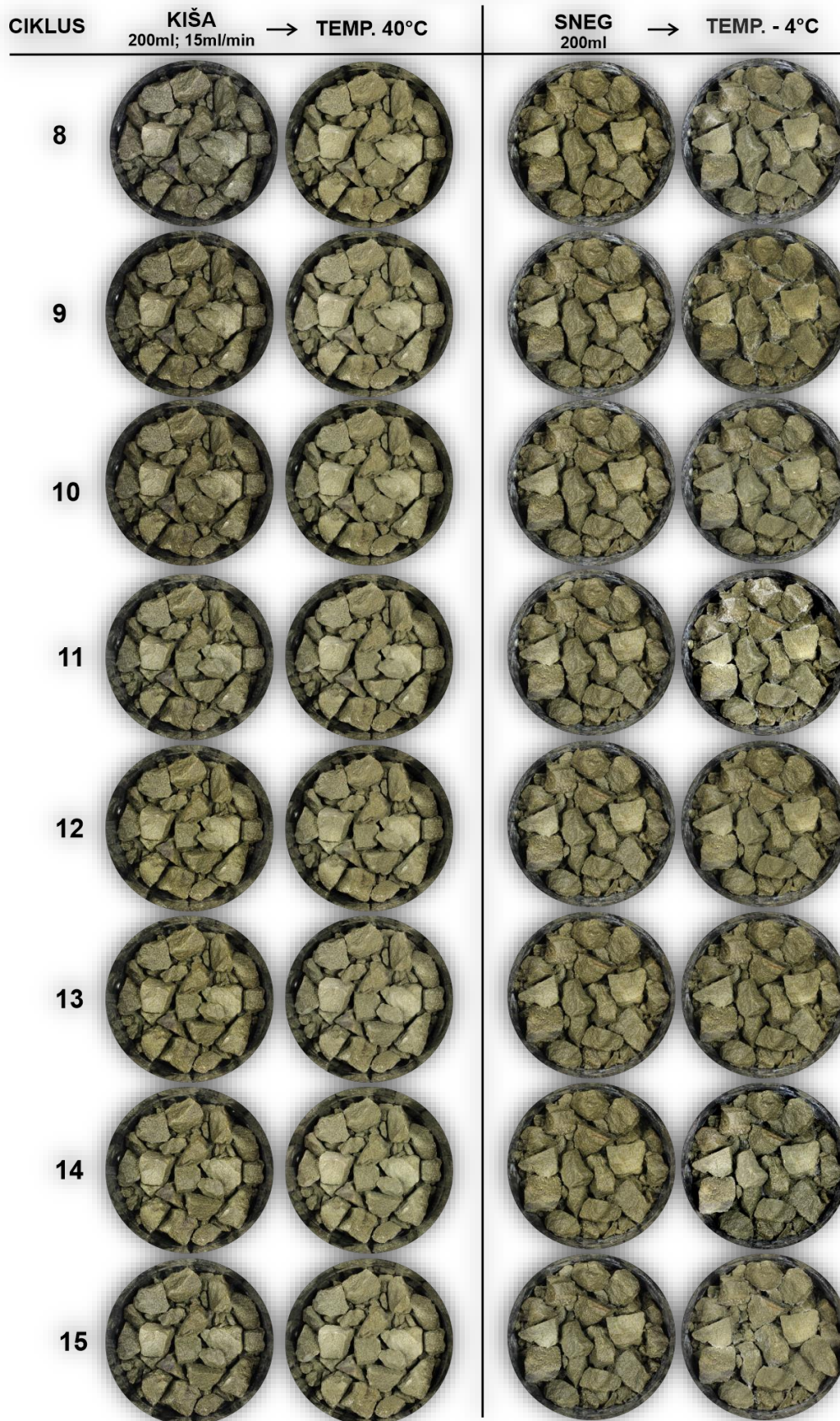
**Slika 47.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka Rb od 8-15.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

## UZORAK T



**Slika 48.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka T od 0-7.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

## UZORAK T



**Slika 49.** Fotografije površinskih fizičkih promena uzorka T od 8-15.ciklusa (prečnik uzorka 10cm).

#### 4.3.3.2 Zapremina, pH i električna provodljivost izluženih rastvora

Na slici 50 prikazane su izmerene zapremine izluženog rastvora tokom svih ciklusa. Primećuje se da tretman kišom i visokom temperaturom rezultuje nešto manjim vrednostima zapremina u poređenju sa tretmanom snegom i niskom temperaturom. Takođe, potpuno odsustvo izluženog rastvora je češće zabeleženo u tretmanima kišom.

Maksimalna zapremina filtrata od  $214\text{cm}^3$  izmerena je u drugom ciklusu tretmana snegom kod uzorka Rb, dok je minimalna vrednost od  $68\text{cm}^3$  zabeležena kod uzorka SLN u okviru istog tretmana. Nedostatak podataka za zapreminu, a samim tim i za pH vrednost, električnu provodljivost i koncentraciju jona u pojedinim ciklusima (slike 50-52), direktna je posledica ili potpunog izostanka izluženog rastvora ili njegove nedovoljne količine za sprovođenje predviđenih analiza.

Odsustvo ili niske zapremine izluženog rastvora mogu se pripisati zadržavanju simuliranih padavina na površini uzorka - formiranje „jezerca“ ili njihovoj apsorpciji unutar samog sedimenta. Nedovoljne količine rastvora najčešće su zabeležene u inicijalnim ciklusima, kada suvi, prethodno netretirani sedimenti pokazuju visok apsorpcioni kapacitet. Pored početnih faza, pojačana apsorpcija se javlja i u ciklusima sa visokim temperaturama koji dovode do isušivanja materijala, čime se dodatno povećava njegov afinitet prema vodi.

Potpuni izostanak filtrata u kasnijim fazama, nezavisno od temperaturnog režima, najčešće je posledica bubrenja gline, kao i zapunjavanja pukotina sitnijim česticama na površini sedimenta. Ovi procesi dovode do smanjenja puteva kojim padavine mogu da prođu kroz sediment.

Na slici 51 prikazane su pH vrednosti izluženih rastvora za svih pet uzoraka tokom sprovedenih tretmana. Izmerene vrednosti ukazuju na to da primenjeni tretmani nisu doveli do značajnijih varijacija u kiselosti, budući da su trendovi pH slični i međusobno se prepliću. Ekstremne vrednosti zabeležene su u okviru tretmana kišom i visokom temperaturom. Minimalna pH 7,18 izmerena je kod uzorka SLN, a maksimalna pH 10,12 kod uzorka NLH. Svi mereni parametri potvrđuju alkalni karakter izluženog rastvora, sa rasponom koji obuhvata vrednosti od neutralne i blago alkalne, pa sve do veoma jako alkalne sredine.

Uzorci NLH i AL se, pored blago rastućeg trenda vrednosti, ističu i višom alkalnošću. Viša alkalnost može ukazati na višu disperznost sedimenta i njihovu sklonost ka bržem raspadanju, što se može pripisati intenzivnom rastvaranju karbonatne komponente ili prisustvu specifičnih silikata. Sa druge strane, uzorci SLN, Rb i T pokazuju umereniju alkalnost. Vrednosti uzorka T su nešto stabilnije, dok uzorci SLN i Rb pokazuju veće oscilacije pH vrednosti. Takve oscilacije mogu sugerisati na geohemijsku heterogenost. Nasuprot njima, uzorak T pokazuje najmanje oscilacije, što može ukazivati na najveću hemijsku stabilnost sa najužim opsegom pH vrednosti, sugerišući na uniforman mineraloški sastav otporan na nagle promene tokom ispiranja.

Nešto niže pH vrednosti u tretmanima snegom, nego u tretmanima kišom mogu sugerisati da niže temperature i sporija dinamika otapanja snega favorizuju postizanje hemijske ravnoteže, čime se ublažavaju ekstremi u promenama izluženog rastvora.

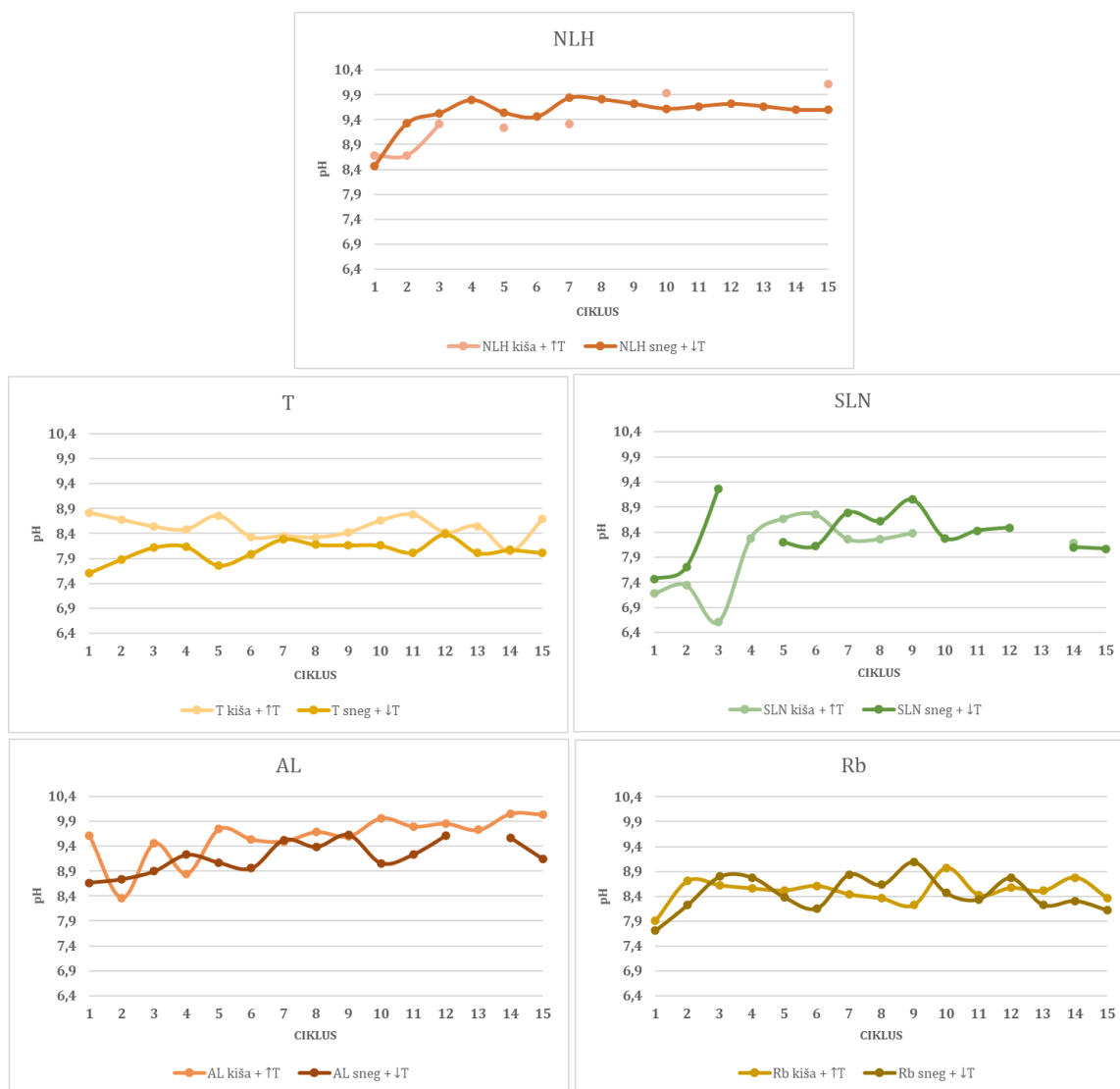
Za razliku od zapremina izluženog rastvora i pH vrednosti koje pokazuju relativno ujednačene trendove kroz različite tretmane, električna provodljivost (EC) ispoljava značajniju zavisnost od primenjenih uslova (slika 52). Izuzimajući uzorak NLH, kod kojeg nedostatak podataka u tretmanu kišom onemogućava preciznu korelaciju, kod ostala četiri uzorka uočava se da su vrednosti EC dosledno više u tretmanu snegom i niskom temperaturom u odnosu na tretman kišom i visokom temperaturom.



**Slika 50.** Izmerene vrednosti zapremine izluženih rastvora kroz cikluse.

Iako je ova razlika kod većine uzoraka minimalna, uzorak AL pokazuje specifičnu dinamiku u kojoj se vrednosti u tretmanu snegom tek na polovini eksperimenta izjednačavaju sa onima iz tretmana kišom. S druge strane, kod uzorka T razlika između dva tretmana ostaje izražena tokom celog istraživanja, bez konvergencije vrednosti. Posmatrano po uzorcima, varijabilitet opsega EC ukazuje na specifičan odgovor svakog sedimenta, što je verovatno uslovljeno razlikama u količini lako rastvorljivih soli i kinetici njihove desorpcije.

Uzorak NLH se jasno izdvaja kao ekstrem. Najviše vrednosti zabeležene su kod uzorka NLH, sa maksimalnim vrednostima od  $33200\mu\text{S}/\text{cm}$  u tretmanu snegom i  $14250\mu\text{S}/\text{cm}$  u tretmanu kišom. U oba režima uočava se nagli pad vrednosti već nakon prvog ciklusa, što ukazuje na brzo ispiranje lako rastvorljivih soli, dok su minimalne vrednosti od  $319\mu\text{S}/\text{cm}$  i  $475\mu\text{S}/\text{cm}$  u tretmanima snegom i kišom izmerene u završnoj fazi eksperimenta. Ovako visok nivo salinizacije može sugerisati na kritičnu koncentraciju rastvorljivih soli, što direktno utiče na disperzivni potencijal materijala. U kontaktu sa vodom, ovi sedimenti su podložni brzom hemijskoj destabilizaciji, kada rastvaranje soli vodi ka narušavanju kohezivnih veza između čestica. Rezultat je ekstremna erodibilnost, pri čemu se struktura sedimenta narušava praktično već pri prvim ciklusima vlaženja.



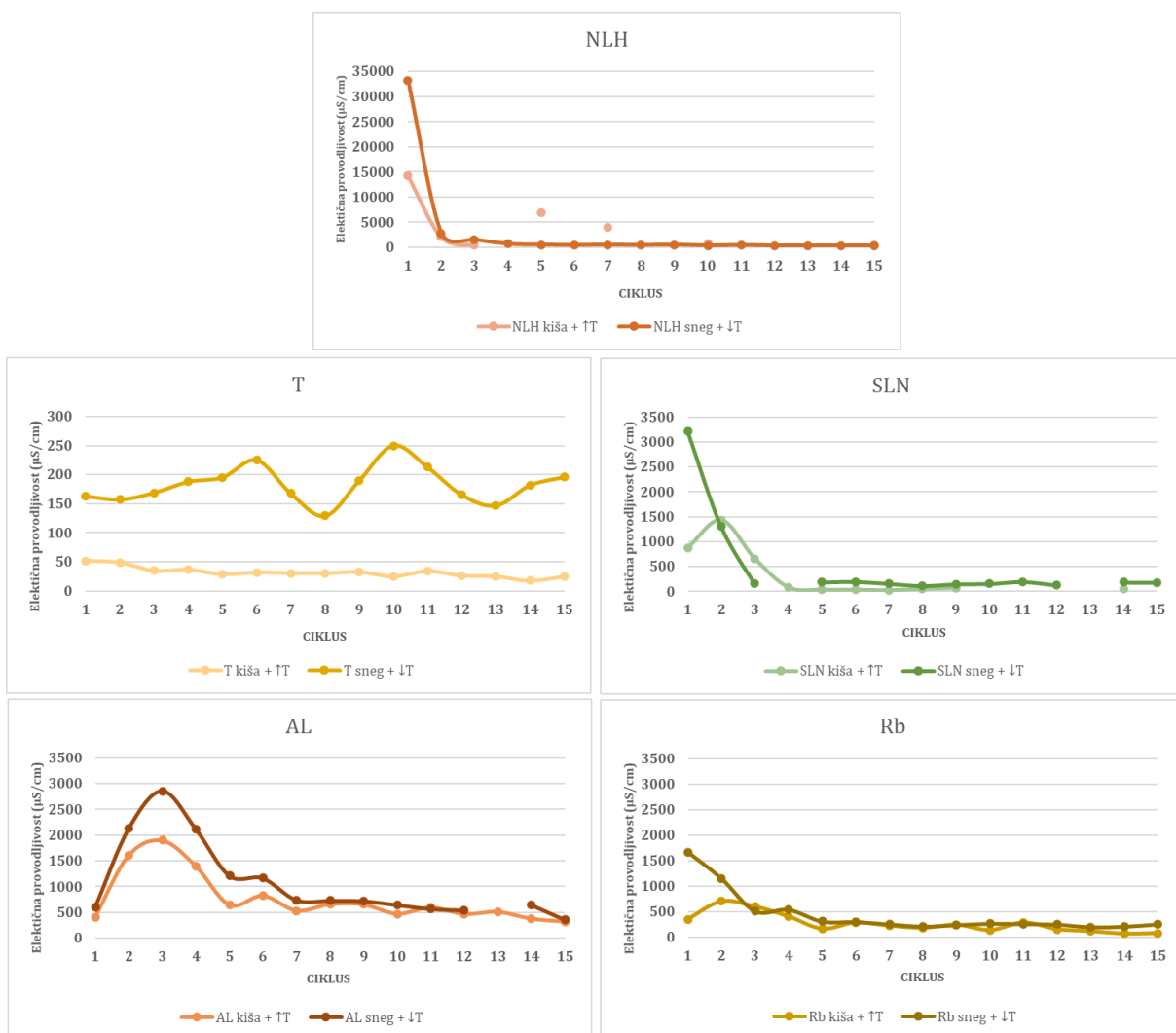
**Slika 51.** Izmerene vrednosti pH izluženih rastvora kroz cikluse.

Uzorak AL pokazuje specifičnu dinamiku sa maksimalnim vrednostima od  $2860\mu\text{S}/\text{cm}$  i  $1901\mu\text{S}/\text{cm}$  u trećem ciklusu tretmana snegom i kišom, nakon čega sledi postepeni pad. Najniže vrednosti zabeležene su u poslednjem ciklusu, pri čemu je razlika u EC vrednostima između dva tretmana bila minimalna i to  $358\mu\text{S}/\text{cm}$  naspram  $319\mu\text{S}/\text{cm}$ . Specifična dinamika EC vrednosti u početnim ciklusima može sugerisati da joni nisu odmah dostupni na površini sedimenta, već da se oslobađaju postepeno kroz prodiranje vode u mikropore koje su u početku bile suve. To ga može činiti nepredvidivim na terenu, jer se procesi destabilizacije intenziviraju tek nakon određenog vremena zasićenja vodom.

Uzorci SLN i Rb prate sličan trend opadanja. Iako Rb generalno zadržava nešto više vrednosti kroz cikluse, oba uzorka nakon inicijalne faze stabilizuju EC ispod  $500\mu\text{S}/\text{cm}$ . Interesantno je da su u početnim ciklusima vrednosti kod uzorka SLN bile približno dvostruko više u odnosu na Rb. Kod tretmana snegom, maksimumi su dostignuti u prvom ciklusu i to  $3210\mu\text{S}/\text{cm}$  za SLN i  $1665\mu\text{S}/\text{cm}$  za Rb uzorak, dok su kod simulacije kiše najviše vrednosti zabeležene tek u drugom ciklusu. U odnosu na ekstremni NLH, ovi uzorci ne pokazuje primarnu ugroženost salinizacijom, s obzirom na to da su vrednosti EC značajno niže i stabilnije. Odsustvo slobodnih soli sugerise da procesi njegove degradacije nisu primarno vođeni hemijskim rastvaranjem. Erozijska kod ovog tipa sedimenta verovatnije je posledica mehaničkog raspadanja i fizičkog delovanja atmosferskih procesa (npr. smrzavanje i otapanje), što ga čini

strukturno stabilnijim u poređenju sa visoko salinizovanim uzorcima, ali i dalje podložnim fizičkoj abraziji. Međutim, stvaranje „jezerceta“ usled bubrenja gline i zatvaranje pukotina kod SLN uzorka i „barica“ kod uzorka Rb ipak može ukazati na hemijsko-fizički hibrid raspadanja.

Najniži opseg vrednosti, ali istovremeno i najizraženija razlika između dva primenjena tretmana, zabeležen je kod uzorka T. Električna provodljivost u tretmanu kišom kretala se u veoma niskom opsegu od  $17,67\mu\text{S}/\text{cm}$  do  $51,8\mu\text{S}/\text{cm}$  uz gotovo linearan trend opadanja bez značajnijih oscilacija. Nasuprot tome, tretman snegom rezultovao je znatno višim vrednostima od 129,2 do  $250\mu\text{S}/\text{cm}$  koje su pokazivale linearan trend uz nelinearnu dinamiku, odnosno primetne oscilacije kroz cikluse sa maksimumom u desetom, a minimumom u osmom ciklusu. Ovako izražena razlika ukazuje na to da su kod uzorka T procesi mobilizacije jona primarno stimulisana specifičnim uslovima otapanja snega, dok je uticaj simulirane kiše na ispiranje mineralnih materija bio minimalan. Geohemijska inertnost ovog uzorka može sugerisati da ovakvi sedimenti verovatno formiraju stabilnije oblike reljefa jer voda ne može hemijski da ih "nagrizi" iznutra i da su procesi njihovog raspadanja gotovo isključivo mehanički.

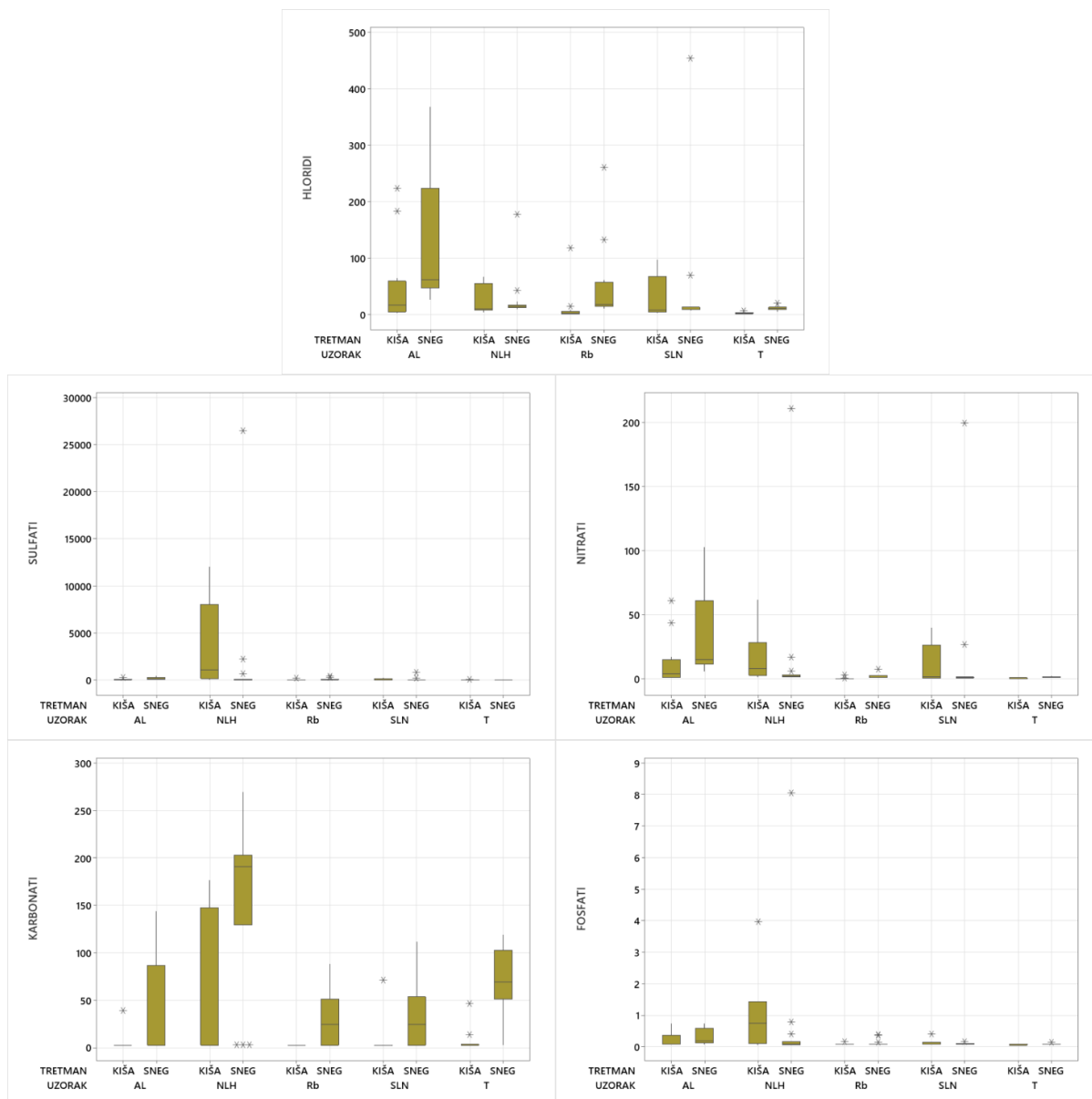


**Slika 52.** Izmerene vrednosti električne provodljivosti izluženih rastvora kroz cikluse.

### 4.3.3.3 Koncentracije jona izluženih rastvora

Koncentracije jona kroz tretmane prikazane su na slikama 53 i 54. Na gotovo svim graficima, vrednosti za sneg su više ili imaju veću varijabilnost, dok kiša daje uniformnije, niže vrednosti. Takva preraspodela može ukazati na mobilizaciju jona u tretmanima snegom, do

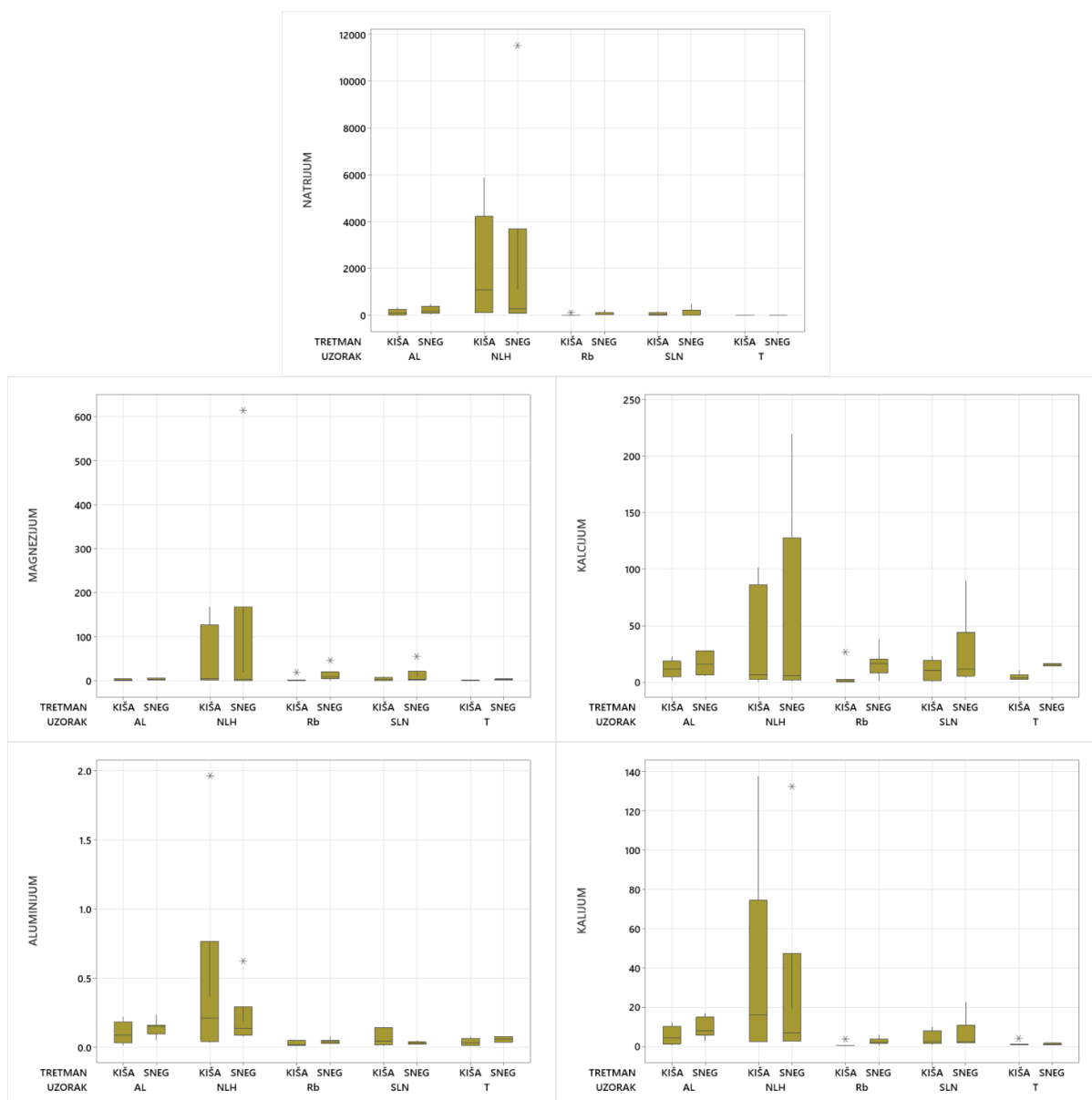
kojih kiša, odnosno na brzo, površinsko ispiranje u tretmanima kišom ne mogu da dopru. Vrednosti izmerenih koncentracija jona pokazuju varijacije u vrednostima, ali su koncentracije dominantno najviše za sulfatne jone i jone natrijuma, a potom i kalcijuma.



**Slika 53.** Koncentracije anjona (mg/L) u tretmanima kišom i snegom.

Uzorkom NLH preovlađuju sulfatni joni koji zbog svoje rastvorljivosti i kristalizacije imaju razorni uticaj na strukturu terena, dok joni natrijuma ukazuju na visoku zasoljenost, čineći da ovaj uzorak predstavlja tipičan primer hemijski uslovljene erozije. U odnosu na ostale uzorke, kod ovog uzorka uočene su i više vrednosti karbonatnog i hloridnog jona i merenih katjona.

Kod uzorka AL primarni katjoni su natrijum i kalcijum, a anjoni hloridni i nitratni. AL uzorak ukazuju na specifičan, hloridni tip saliniteta koji se razlikuje od ekstremnog sulfatnog kod uzorka NLH. Porast njegove električne provodljivosti u kasnijim ciklusima može ukazati kasnije na oslobađanje hlorida zarobljenih u dubljim porama ili unutar rešetki minerala.



**Slika 54.** Koncentracije katjona (mg/L) u tretmanima kišom i snegom.

Uzorci SLN i Rb pokazuju slične profile i generalno niže koncentracije jona u odnosu na uzorke NLH i AL. Njihova međusobna sličnost može sugerisati na sličan sastav njihovih lako rastvorljivih minerala i sličan intenzitet njihovog ispiranja, dok razlika u odnosu na NLH i AL može ukazati na njihovu umereniju hemijsku aktivnost. Uzorak SLN pokazuje pik hlorida i kalcijuma u tretmanu snegom. To može ukazati na ispiranje upravo tih jona pre nego što dođe do bubrenja gline i zatvaranje pora. Uzorak Rb ima sličan profil, ali sa generalno nižim koncentracijama jona.

Uzorak T, pored malih količina karbonatnog jona i jona kalcijuma i aluminijuma, pokazuje najmanju varijabilnost i najniže vrednosti koncentracije skoro svih jona. Takvo ponašanje ga čini gotovo inertnim i generalno dobrim "kontrolnim" uzorkom za poređenje sa ekstremno erodibilnim materijalima.

Kao dopuna prethodno prikazanim rezultatima, izvršena je analiza sadržaja glavnih elemenata (tabela 4) u netretiranim i tretiranim uzorcima. Usporedna analiza hemijskog sastava pre i nakon tretmana sprovedena je sa ciljem izračunavanja relevantnih indeksa raspadanja -

**Tabela 4.** Sadržaj makroelemenata (%) i izmerene vrednosti indeksa raspadanja tretiranih uzoraka

UZORAK	Sadržaj makroelemenata (%)												Indeksi raspadanja		
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	CIA	CIW	PIA
<b>NLH 0</b>	35,14	8,74	4,27	0,24	0,06	2,93	7,45	3,42	2,20	0,80	0,03	0,01	50,52	57,88	50,69
<b>NLH kiša</b>	48,01	12,02	5,18	0,29	0,08	3,01	10,18	4,60	2,70	0,07	0,05	0,00	53,82	61,22	55,04
<b>NLH sneg</b>	48,37	12,10	4,89	0,27	0,09	3,20	10,18	4,56	2,57	0,06	0,05	0,00	53,95	60,93	55,12
<b>AL 0</b>	45,57	15,28	6,11	0,40	0,12	8,83	3,55	1,00	2,68	0,49	0,12	0,14	55,00	60,86	56,20
<b>AL kiša</b>	47,66	15,43	5,98	0,43	0,10	9,50	3,80	1,37	2,63	0,35	0,13	0,09	53,32	58,65	54,06
<b>AL sneg</b>	48,38	15,13	5,69	0,41	0,10	9,54	3,76	1,13	2,48	0,11	0,13	0,00	53,50	58,64	54,24
<b>SLN 0</b>	39,11	14,33	5,42	0,37	0,03	0,63	3,40	0,70	2,78	0,06	0,07	0,02	77,70	91,49	89,65
<b>SLN kiša</b>	57,76	18,71	5,80	0,43	0,03	0,82	4,30	1,42	3,17	0,02	0,07	0,01	77,55	89,29	87,38
<b>SLN sneg</b>	56,04	18,69	6,59	0,42	0,04	0,83	4,73	1,03	3,36	0,01	0,07	0,01	78,14	90,91	89,14
<b>Rb 0</b>	48,54	25,48	9,73	0,65	0,13	1,34	3,32	1,06	4,06	0,18	0,62	0,03	79,77	91,40	89,93
<b>Rb kiša</b>	44,12	28,68	9,53	0,76	0,10	0,24	3,23	1,16	5,13	0,13	0,10	0,01	81,48	95,36	94,41
<b>Rb sneg</b>	47,11	26,39	10,58	0,70	0,14	0,70	3,40	1,05	4,34	0,04	0,31	0,00	81,25	93,77	92,64
<b>T 0</b>	23,08	7,35	5,66	0,34	0,09	14,92	5,24	0,75	0,74	0,02	0,05	0,00	30,94	31,93	29,68
<b>T sneg</b>	30,04	9,88	7,76	0,48	0,15	23,88	7,67	1,12	0,84	0,04	0,07	0,00	27,65	28,32	26,55
<b>T kiša</b>	31,87	10,34	7,61	0,42	0,12	22,02	7,47	1,49	0,85	0,03	0,06	0,00	29,79	30,54	28,76

CIA, CIW, PIA Ovi indikatori raspadanja često su korišćeni za praćenje varijacija u hemijskoj degradaciji fino-zrnih stena, čime se dobija dragocen uvid u evoluciju klimatskih uslova kroz geološko vreme. (Cao i dr., 2018)

Indeksi svih uzoraka, izuzev uzorka T se nalaze u opsegu od 50 do 95 na skali indeksa. U literaturi se vrednost 50 karakteriše sveže, neizmenjene stene, dok 100 predstavlja potpuno raspadanje. Za ispitivane uzorke se može reći da su u fazi inicijalnog do umerenog hemijskog raspadanja, što je tipično za sedimente *badlands* sedimente gde se mehanička erozija često odvija brže od dubokog hemijskog raspadanja. Primena izračunatih indeksa raspadanja dodatno je usložila interpretaciju stepena izmenjenosti materijala. Prema ovim parametrima, uzorci NLH i AL okarakterisani su kao srednje izmenjeni (u inicijalnim fazama raspadanja), dok su SLN i Rb definisani kao visoko izmenjeni sedimenti podložni intenzivnom hemijskom raspadanju. Uzorak T predstavlja specifičan izuzetak sa ekstremno niskim vrednostima indeksa. To može ukazivati na visok sadržaj karbonata koji „veštački“ snižavaju vrednosti, s obzirom na to da su indeksi primarno formirani za silikatne materijale, ili pak sugerisati da je reč o primarnom, potpuno neizmenjenom klastičnom materijalu.

S obzirom na to da su eksperimentalni rezultati usklađeni sa indeksima raspadanja samo u slučaju uzorka T koji se prema njima smatra kao izuzetak, primenjeni parametri se u ovom kontekstu smatraju neodgovarajućim za *badlands* terene. Navedeni zaključak otvara prostor za dalja istraživanja u smeru formulisanja novog indeksa, prilagođenog specifičnostima *badlands* terena.

#### **4.3.3.4 Ishodi klimatskog eksperimenta na sedimentima različitog litološkog sastava**

Sveobuhvatni rezultati fizičko-hemijskog odgovora sedimenata različitog litološkog sastava na simulirane uslove omogućili su diferencijaciju *badlands* sedimenata prema mehanizmima njihove degradacije:

- Uzorak NLH se izdvojio kao najosetljiviji, sa dominacijom procesa hemijskog raspadanja;
- Uzorak T se pokazao kao najinertniji, pokazujući otpornost koja ga čini podložnim isključivo intenzivnim i dugotrajnim mehaničkim procesima.
- Uzorci AL, SLN i Rb predstavljaju prelazne oblike između ekstrema (NLH i T), gde se prepliću mehanizmi fizičkog i hemijskog raspadanja.
  - Degradacija uzoraka SLN i Rb klasifikovana je kao kompleksni hemijsko-fizički hibrid.
  - Uzorak AL je okarakterisan kao specifičan hibrid sa odloženim hemijskim raspadanjem, s obzirom na to da su procesi degradacije primarno uslovljeni postepenom hidrolizom i mobilizacijom jona.

Ovako dobijeni rezultati su potvrdili hipotezu o ključnom uticaju litološkog sastava na stepen erozije, ukazujući na to da varijacije u uslovima sredine izazivaju specifične fizičko-hemijske promene u zavisnosti od tipa sedimenta.

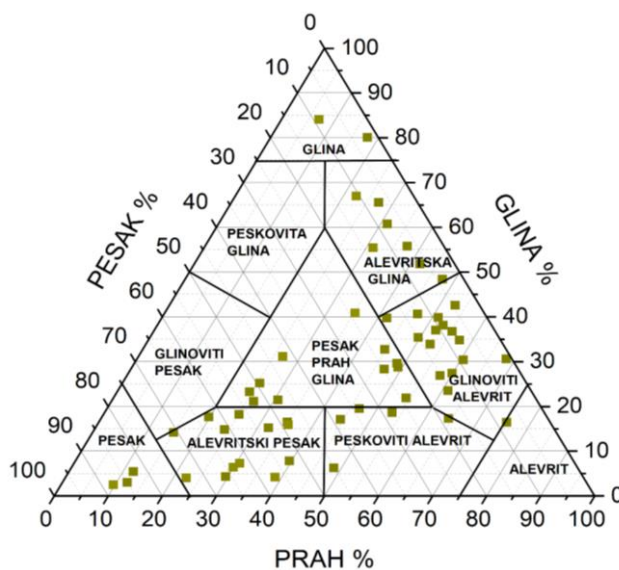
#### 4.4 FIZIČKO-HEMIJSKA KARAKTERIZACIJA *BADLANDS* SEDIMENATA

Dosadašnji naučni pristup u proučavanju *badlands* terena uglavnom se zadržao u polju geomorfologije i najčešće je usmeren na analizu erozionih procesa. Takav pristup je do sada dao značajne rezultate koji se odnose na površinske i podpovršinske fizičko-mehaničke promene, kao i na njihovu kvantifikaciju. Međutim, istraživanja fizičko-hemijskih svojstava i veze između sastava samih sedimenata sa njihovim dinamičnim ponašanjem na terenu su znatno manje zastupljena. Upravo bi takve analize omogućile dublje razumevanje uzročno-posledičnih veza između strukture i teksture stena i procesa erozije. Potvrda tome jesu i ishodi prethodnih laboratorijskih klimatskih eksperimenata. Njihovi rezultati su na ispitivanim uzorcima sedimenata potvrdili i dublje obrazložili hipotezu da se tereni istog litološkog sastava drugačije ponašaju zavisno od uslova okruženja u kom se nalaze. Istovremeno je potvrđeno i da različit litološki sastav diktira različite procese i stepen erozije.

Najzastupljeniju klasifikaciju *badlands* sedimenata definisali su Faulkner i dr. (2000), deleći materijale na disperzne i potencijalno disperzne. Ova podela se zasniva na parametru koji je poznat i kao jedan od ključnih „potpisa lokaliteta“ i koji predstavlja odnos vrednosti SAR i električne provodljivosti. Iako se ovaj odnos primarno koristi za procenu podložnosti terena specifičnim oblicima erozije, poput cevaste erozije, rezultati pređašnjih klimatskih eksperimenata ukazuju na određena ograničenja tog modela.

Fizičko-hemijskom karakterizacijom obuhvaćeno je preko 100 uzoraka *badlands* sedimenata sa različitih lokaliteta i klimatskih regija, uključujući lokalitete u Italiji, Španiji, Kanadi, Kini, Turskoj, Rumuniji, Izraelu, Mađarskoj i Srbiji. U okviru karakterizacije prvenstveno su definisane: pH vrednost, električna provodljivost, SAR i granulometrijski sastav (tabele 5a-c).

Vrednosti pH većine ispitivanih sedimenata variraju u malom opsegu, preko umereno do jako alkalnih i pokrivaju opseg od 7,40-10,43. Izuzetak ovim sedimentima predstavljaju određeni kiseli do slabo kiseli sedimenti iz Španije i Srbije čije vrednosti se kreću u rasponu od 4,16-5,70 i najčešće su indikator specifičnog mineraloškog sastava. Tako izmerene vrednosti odgovaraju literaturnim vrednostima dosada ispitivanih *badlands* terena. Električna provodljivost pokriva izuzetno širok opseg od gotovo zanemarljivih  $6,2\mu\text{S}/\text{cm}$ , pa sve do  $3480\mu\text{S}/\text{cm}$ . Vrednosti SAR-a se kreću od 0,02-31,38. *Badlands* tereni, iako dominantno okarakterisani kao alevritsko-glinoviti do glinovito-alevritski, prema izmerenom granulometrijskom sastavu mogu pokriti mnogo širi opseg raspodele čestica (slika 55).



Slika 55. Granulometrijski sastav ispitivanih *badlands* sedimenata.

**Tabela 5a.** Fizičko-hemijski parametri ispitivanih *badlands* sedimenata

Država	Klima	Uzorak	Granulometrijski sastav	EC (μS/cm)	pH	SAR
Italija	mediteranska	F1	glinoviti alevrit	173,7	8,46	0,69
Italija	mediteranska	MB1	glinoviti alevrit	147,4	9,78	1,39
Italija	mediteranska	B2	alevritska glina	562,0	9,20	5,03
Italija	mediteranska	LBB1	glinoviti alevrit	660,0	9,11	6,35
Italija	mediteranska	BG2	glinoviti alevrit	744,0	9,24	8,14
Italija	mediteranska	AL5	glinoviti alevrit	1313,0	9,83	0,87
Italija	mediteranska	AL6	glinoviti alevrit	867,0	9,96	0,97
Italija	mediteranska	IT-1 top	glinoviti alevrit	105,2	8,35	1,47
Italija	mediteranska	IT-1-unw	glinoviti alevrit	133,2	9,48	1,76
Italija	mediteranska	IT-4-top	glinoviti alevrit	214,0	9,82	4,10
Italija	mediteranska	IT-4-unw	glinoviti alevrit	266,0	9,59	2,71
Italija	mediteranska	BD1	alevritska glina	489,0	9,08	3,34
Italija	mediteranska	IT-2-top	alevritska glina	179,0	9,72	1,99
Italija	mediteranska	IT-2-unw	alevritska glina	204,0	9,43	2,75
Italija	mediteranska	IT-3-top	alevritska glina	102,8	8,67	8,55
Italija	mediteranska	IT-3-unw	alevritska glina	105,5	9,09	3,09
Italija	mediteranska	BG1c	pesak,prah,glina	1027,0	8,88	4,32
Italija	mediteranska	BG1	pesak,prah,glina	1433,0	9,10	11,32
Italija	mediteranska	BG3c	pesak,prah,glina	85,0	9,16	0,13
Italija	mediteranska	BG3	pesak,prah,glina	671,0	8,64	0,43
Italija	mediteranska	MJ2	pesak,prah,glina	1291,0	9,73	1,30
Italija	mediteranska	MJ3	pesak,prah,glina	3360,0	9,60	1,95
Italija	mediteranska	MJ1	pesak,prah,glina	2400,0	9,69	1,68
Italija	mediteranska	TUR6 Y	glinoviti alevrit	2730,0	9,32	14,88
Italija	mediteranska	TUR6 G	glinoviti alevrit	1792,0	9,32	1,97
Italija	mediteranska	TUR7	glinoviti alevrit	2440,0	9,66	1,65
Izrael	aridna	Nurit	pesak,prah,glina	52,2	7,64	0,03
Izrael	aridna	Zin 1	glina	3480,0	8,10	6,06
Kanada	semi-aridna	HRS-2	alevritski pesak	469,0	8,63	3,73
Kanada	humidna	CAN-R-2	glinoviti alevrit	57,2	9,10	0,03
Kanada	humidna	CAN-G-1	alevritska glina	51,1	9,27	0,04
Kanada	humidna	CAN-G-2	alevritska glina	55,8	9,26	0,03
Kanada	semi-aridna	FN01-02	alevritska glina	510,0	8,82	7,06
Kina	aridna	KS-1	pesak	355,0	8,94	0,12
Kina	aridna	STZ 2-1	alevritski pesak	233,0	10,36	2,57
Kina	aridna	STZ 2-2	peskoviti alevrit	330,0	10,42	2,95
Kina	humidna	J	alevritska glina	132,2	8,85	0,17
Kina	humidna	X	alevritska glina	65,0	8,97	0,09
Kina	humidna	D	alevritska glina	66,5	8,93	0,12
Kina	humidna	TW1	glinoviti alevrit	659,0	9,28	10,42
Kina	humidna	TW2	glinoviti alevrit	320,0	8,80	2,48
Kina	aridna	YD-3	pesak,prah,glina	683,0	9,38	14,31
Kina	aridna	LHG 1-1	glinoviti alevrit	1403,0	9,55	3,70
Kina	aridna	LHG 1-2	glinoviti alevrit	277,0	9,38	4,11
Mađarska	semi-humidna	H3	pesak	11,4	8,54	1,03
Mađarska	semi-humidna	H2	alevritski pesak	56,0	9,08	4,46

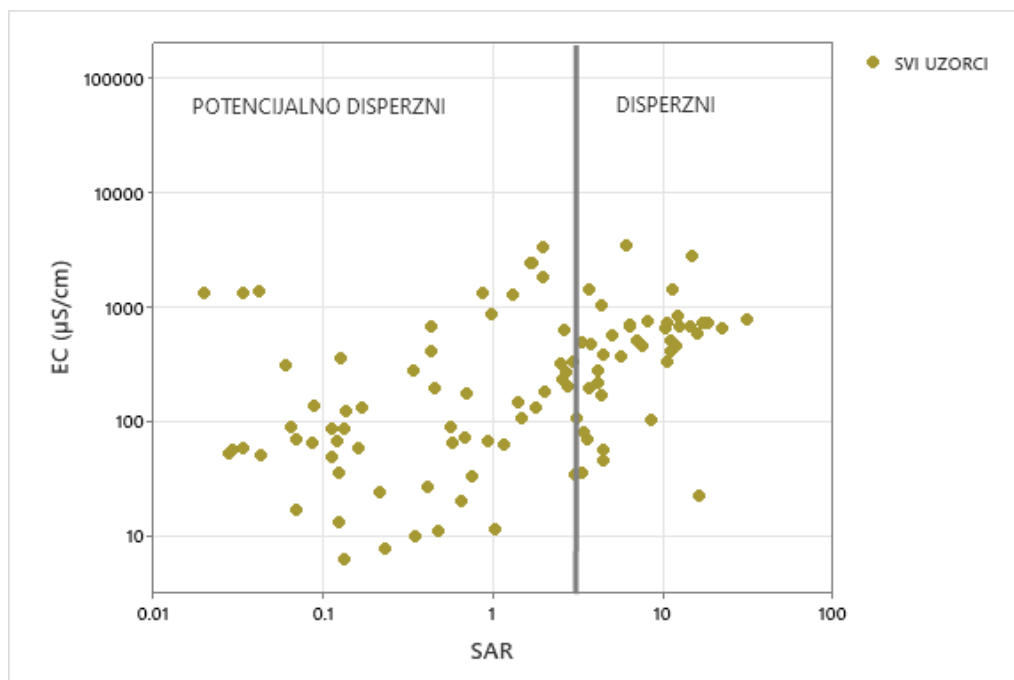
**Tabela 5b.** Fizičko-hemijski parametri ispitivanih *badlands* sedimenata

Država	Klima	Uzorak	Granulometrijski sastav	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	SAR
Kina	aridna	LHG 1-2	glinoviti alevrit	277,0	9,38	4,11
Mađarska	semi-humidna	H3	pesak	11,4	8,54	1,03
Mađarska	semi-humidna	H2	alevritski pesak	56,0	9,08	4,46
Mađarska	semi-humidna	H4	alevritski pesak	80,7	9,47	3,43
Mađarska	semi-humidna	H1	pesak,prah,glina	34,1	9,59	3,02
Rumunija	semi-humidna	RR2	pesak,prah,glina	191,9	10,20	3,63
Španija	semi-humidna	3 UW	alevritski pesak	1351,0	8,11	0,04
Španija	semi-humidna	2 UW	peskoviti alevrit	1310,0	8,08	0,02
Španija	semi-humidna	4 UW	glinoviti alevrit	136,5	8,50	0,09
Španija	semi-humidna	4 W	glinoviti alevrit	85,7	8,64	0,11
Španija	semi-humidna	5 UW	glinoviti alevrit	87,5	9,06	0,06
Španija	semi-humidna	5 W	glinoviti alevrit	69,6	9,16	0,07
Španija	mediteranska	Arag	glinoviti alevrit	120,3	9,12	0,14
Španija	aridna	A-WE	glinoviti alevrit	403,0	4,84	0,43
Španija	aridna	A-UN	glinoviti alevrit	306,0	5,70	0,06
Španija	aridna	N-WE	glinoviti alevrit	16,9	4,70	0,07
Španija	aridna	N-UN	glinoviti alevrit	20,2	4,75	0,65
Španija	aridna	RqB1	alevritski pesak	89,6	7,77	0,56
Španija	aridna	RbB2	peskoviti alevrit	273,0	7,95	0,34
Španija	aridna	RbB1	peskoviti alevrit	386,0	7,40	4,39
Španija	semi-humidna	1 UW	pesak,prah, glina	1334,0	8,05	0,03
Srbija	semi-humidna	S1	alevritski pesak	59,0	4,18	0,16
Srbija	semi-humidna	S4	alevritski pesak	67,2	5,12	0,93
Srbija	semi-humidna	S3	peskoviti alevrit	61,4	5,46	1,15
Srbija	semi-humidna	S2	pesak,prah, glina	44,8	4,16	4,46
Turska	humidna	T-2	alevritski pesak	35,7	9,81	0,12
Turska	humidna	T-3	pesak	48,7	9,41	0,11
Turska	humidna	T-4	pesak	64,9	9,72	0,58
Turska	mediteranska	SLN-1-c	alevritski pesak	33,0	7,76	0,75
Turska	mediteranska	SLN-1-w	alevritski pesak	195,1	9,14	0,46
Turska	mediteranska	SLN-1-bd	alevritski pesak	69,8	8,18	3,58
Turska	mediteranska	SLN-1-ç	alevritski pesak	6,2	8,04	0,13
Turska	mediteranska	SLN-1pop	alevritski pesak	9,9	9,00	0,34
Turska	mediteranska	SLN-2-c	alevritski pesak	10,8	8,62	0,48
Turska	mediteranska	SLN-2bd	pesak, prah, glina	70,9	10,04	0,69
Turska	mediteranska	SLN-3 c	alevritski pesak	21,9	9,05	16,30
Turska	mediteranska	SLN-3 bd	alevritski pesak	634,0	8,68	2,61
Turska	mediteranska	SLN-3-ç	alevritski pesak	7,6	9,73	0,23
Turska	aridna	NLH-1pop	alevritska glina	327,0	10,28	10,45
Turska	aridna	NLH-1-w	alevritska glina	676,0	10,21	12,47
Turska	aridna	NLH-1-bd	alevritska glina	702,0	10,13	6,30
Turska	aridna	NLH-1pop	alevritska glina	327,0	10,28	10,45
Turska	aridna	NLH-1-w	alevritska glina	676,0	10,21	12,47
Turska	aridna	NLH-1- bd	alevritska glina	702,0	10,13	6,30
Turska	aridna	NLH-4	alevritska glina	454,0	10,26	11,76
Turska	aridna	NLH-5	alevritska glina	580,0	10,18	15,89

**Tabela 5c.** Fizičko-hemijski parametri ispitivanih *badlands* sedimenata

Država	Klima	Uzorak	Granulometrijski sastav	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	SAR
Turska	aridna	NLH-7	alevritska glina	461,0	10,29	7,62
Turska	aridna	NLH-12	alevritska glina	363,0	10,18	5,60
Turska	aridna	NLH-13	alevritska glina	718,0	10,14	17,23
Turska	aridna	NLH-14	alevritska glina	831,0	10,18	12,33
Turska	aridna	NLH-16	alevritska glina	724,0	10,23	18,38
Turska	aridna	NLH-19	alevritska glina	719,0	10,23	10,50
Turska	aridna	NLH-21	alevritska glina	167,5	9,76	4,31
Turska	aridna	NLH-22	alevritska glina	641,0	9,82	22,02
Turska	aridna	NLH-23	glina	780,0	9,95	31,38
Turska	aridna	NLH-26	alevritska glina	404,0	10,42	11,18
Turska	aridna	NAL-27	pesak, prah, glina	506,0	10,43	11,18
Turska	mediteranska	CAP-1	alevritski pesak	26,8	8,68	0,41
Turska	mediteranska	CAP-4	alevritski pesak	24,3	8,76	0,21
Turska	mediteranska	CAP-7	alevritski pesak	13,0	9,65	0,12
Turska	mediteranska	CAP-10	alevritski pesak	35,8	9,48	3,33

Odnos SAR/EC ni kada se primeni na ovakav set podataka, ne omogućava jednoznačnu podelu niti indikaciju podele ispitivanih sedimenata (slika 56). Varijabilnost ovog odnosa nije pokazala jasnu korelaciju sa geografskim položajem, klimatskim tipom, niti sa granulometrijskim sastavom sedimenata, što dodatno potvrđuje kompleksnost faktora koji diktiraju ponašanje *badlands* materijala. Pored toga, materijali se klasifikuju i samo na osnovu SAR vrednosti, pri čemu se za materijale koji imaju SAR>3 smatra da se mogu spontano dispergovati, a za one koji imaju SAR<3 smatra da im je potreban duži kontakt sa vodom da bi se dispergovali (Rengasamy i dr. 1984). Kako bi se istraživanje proširilo, baza je dopunjena detaljnim sadržajem makroelemenata u ispitivanim sedimentima (tabelama 6a-d), a ispitivani sedimenti su posmatrani kroz prizmu dve grupe: potencijalno disperzne i disperzne kako bi se uočilo koji fizički ili hemijski faktor ima značajnu ulogu u njihovom ponašanju.



**Slika 56.** Odnos SAR i EC analiziranih *badlands* sedimenata, u domenima disperzije koju su utvrdili Rengasami i dr. (1984).

Kao disperzni materijali, dominantno su okarakterisani fino-zrni sedimenti koji, u kombinaciji sa glinovito-alevritskim i alevritsko-glinovitim granulometrijskim sastavom imaju SAR znatno viši od 3, što je u skladu sa osnovnom definicijom *badlands* terena. Takvi sedimenti se smatraju tipičnim *badlands* klastitima i u dosadašnjim istraživanjima su više ispitani. Pored tih sedimenata, iako blizu granice, kao disperzni su klasifikovani i sedimenti čije SAR vrednosti nisu znatno veće od 3, ali koje sa aspekta fizičkih svojstava karakteriše loša sortiranost, odnosno granulometrijski sastav koji obuhvata alevritsko-peskovitu frakciju i frakciju peska, praha i gline. Do sada se pokazalo da je, da bi se sediment klasifikovao kao disperzan, neophodno da zadovolji tri kriterijuma: lošu sortiranost, prisustvo smektita i visoke SAR vrednosti. Svi tipični *badlands* klastiti ispunjavaju sva tri kriterijuma i smatraju se disperznim. Ukoliko sediment ne zadovoljava neki od navedenih kriterijuma, klasifikuje se kao potencijalno disperzni.

**Tabela 6a.** Sadržaj makroelemenata (%) ispitivanih *badlands* sedimenata.

Uzorak	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>F1</b>	43,08	14,43	6,17	0,74	0,16	11,69	3,25	0,58	2,29	0,21	0,16
<b>MB1</b>	46,36	15,54	6,30	0,73	0,15	11,79	3,42	0,69	2,07	0,45	0,16
<b>B2</b>	48,13	15,54	6,19	0,76	0,13	8,19	4,99	1,01	2,37	0,90	0,15
<b>LBB1</b>	48,96	16,45	4,38	0,52	0,08	7,33	3,88	0,84	1,62	0,60	0,19
<b>BG2</b>	43,41	13,88	4,84	0,65	0,15	13,06	4,62	1,13	0,00	1,26	0,15
<b>AL5</b>	45,57	15,28	6,11	0,40	0,12	8,83	3,55	1,00	2,68	0,49	0,12
<b>AL6</b>	46,12	15,56	6,45	0,41	0,12	9,39	3,83	0,90	2,72	0,29	0,11
<b>IT-1 top</b>	40,23	10,36	5,69	0,50	0,56	15,25	3,59	0,43	1,39	0,06	0,07
<b>IT-1-unw</b>	45,94	13,44	6,57	0,63	0,39	10,13	3,91	0,61	1,99	0,06	0,08
<b>IT-4-top</b>	51,28	15,21	7,53	0,69	0,31	5,65	4,28	0,87	2,37	0,05	0,07
<b>IT-4-unw</b>	48,25	15,22	8,53	0,67	0,39	5,73	4,26	0,96	2,31	0,15	0,08
<b>BD1</b>	51,25	17,95	5,83	0,53	0,08	2,99	4,18	0,70	2,57	0,17	0,09
<b>IT-2-top</b>	45,40	13,04	7,80	0,60	0,34	10,22	3,52	0,57	2,19	0,06	0,05
<b>IT-2-unw</b>	54,70	16,11	9,81	0,67	0,04	1,65	3,99	0,89	3,01	0,12	0,04
<b>IT-3-top</b>	53,48	15,51	8,32	0,68	0,99	1,87	3,61	1,08	2,78	0,05	0,14
<b>IT-3-unw</b>	54,19	15,79	8,59	0,71	1,15	1,34	3,52	1,12	2,97	0,03	0,13
<b>BG1c</b>	45,79	12,71	3,64	0,41	0,09	13,05	5,57	1,29	1,85	0,80	0,15
<b>BG1</b>	43,48	12,12	3,42	0,39	0,09	12,81	5,10	1,50	1,82	0,76	0,20
<b>BG3c</b>	44,98	12,62	3,64	0,42	0,09	12,71	4,84	0,85	1,82	0,16	0,14
<b>BG3</b>	41,95	11,37	4,16	0,52	0,12	15,71	4,45	0,92	1,95	0,69	0,16
<b>MJ2</b>	41,65	12,31	5,25	0,34	0,10	13,73	3,61	0,66	1,93	0,29	0,13
<b>MJ3</b>	31,32	9,13	6,01	0,39	0,10	15,81	2,13	2,24	1,99	0,35	0,08
<b>MJ1</b>	38,82	11,40	5,19	0,38	0,11	14,58	3,49	1,67	2,00	0,83	0,09
<b>TUR6 Y</b>	43,27	13,31	6,32	0,41	0,10	11,63	3,45	0,28	2,27	0,37	0,14
<b>TUR6 G</b>	42,92	13,49	5,83	0,40	0,10	12,05	3,50	0,38	2,41	0,44	0,13
<b>TUR7</b>	42,09	13,17	5,97	0,39	0,08	10,78	3,36	0,38	2,19	0,67	0,14

**Tabela 6b.** Sadržaj makroelemenata (%) ispitivanih *badlands* sedimenata

Uzorak	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>Nurit</b>	12,68	4,92	2,37	0,22	0,02	37,92	1,13	0,07	0,29	9,84	0,70
<b>Zin 1</b>	20,18	7,39	1,80	0,13	0,05	31,75	2,42	0,39	0,42	0,19	0,74
<b>HRS-2</b>	56,06	15,48	5,59	0,56	0,18	5,26	2,56	1,36	1,92	0,36	0,17
<b>CAN-R-2</b>	49,32	15,33	6,27	0,82	0,15	7,60	4,65	0,17	4,25	0,03	0,14
<b>CAN-G-1</b>	47,72	13,88	2,85	0,51	0,11	9,96	4,46	0,11	2,92	0,04	0,15
<b>CAN-G-2</b>	46,41	13,51	4,60	0,73	0,18	13,43	4,58	0,13	3,80	0,05	0,15
<b>FN01-02</b>	58,50	15,57	6,52	0,50	0,05	1,18	3,92	2,28	1,05	0,31	0,10
<b>KS-1</b>	52,23	9,56	2,10	0,29	0,20	10,90	9,44	1,33	3,43	0,53	0,10
<b>STZ 2-1</b>	48,92	11,67	3,71	0,42	0,14	12,33	5,35	3,05	2,63	0,03	0,16
<b>STZ 2-2</b>	49,07	12,25	4,43	0,50	0,12	9,36	6,57	3,27	2,59	0,04	0,13
<b>J</b>	51,96	15,68	5,66	0,41	0,09	9,40	4,45	0,55	3,47	0,06	0,17
<b>X</b>	52,11	15,64	5,34	0,42	0,09	5,85	3,84	0,57	3,10	0,04	0,14
<b>D</b>	46,29	15,89	6,14	0,30	0,19	9,30	3,72	0,40	3,39	0,03	0,10
<b>TW1</b>	56,37	17,43	6,81	0,91	0,09	1,70	3,19	1,20	3,29	0,15	0,17
<b>TW2</b>	61,76	16,15	5,52	0,78	0,10	2,71	2,78	1,29	2,78	0,69	0,13
<b>YD-3</b>	52,87	14,47	8,33	0,65	0,14	2,76	4,43	1,60	2,56	0,02	0,15
<b>LHG 1-1</b>	50,60	14,35	5,74	0,42	0,13	5,26	4,76	4,20	2,46	0,17	0,12
<b>LHG 1-2</b>	49,86	13,66	5,61	0,50	0,14	7,19	4,19	3,86	2,39	0,08	0,14
<b>H3</b>	69,80	12,09	2,67	0,47	0,03	1,42	1,09	1,39	4,93	0,01	0,01
<b>H2</b>	65,99	13,26	2,43	0,27	0,02	1,20	0,57	1,85	2,77	0,01	0,02
<b>H4</b>	67,55	12,94	3,65	0,40	0,04	1,46	0,99	1,58	4,11	0,12	0,05
<b>H1</b>	66,30	12,65	3,51	0,34	0,03	1,25	0,93	2,49	4,08	0,01	0,02
<b>RR1</b>	63,52	14,56	3,90	0,40	0,02	0,95	3,64	2,28	1,75	0,53	0,08
<b>RR2</b>	59,30	16,22	6,38	0,45	0,05	0,66	4,23	1,96	2,02	0,15	0,09
<b>3 UW</b>	21,78	7,38	3,16	0,39	0,03	20,55	2,88	0,22	0,36	24,65	0,01
<b>2 UW</b>	56,45	16,69	8,33	0,50	0,06	0,70	4,24	0,79	2,98	0,10	0,05
<b>4 UW</b>	33,41	11,65	4,37	0,55	0,11	19,31	5,35	0,11	1,20	0,11	0,03
<b>4 W</b>	33,33	11,50	3,91	0,56	0,11	31,42	4,18	0,10	1,06	0,09	0,03

**Tabela 6c.** Sadržaj makroelemenata (%) ispitivanih *badlands* sedimenata

Uzorak	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>5 UW</b>	24,59	7,72	2,88	0,36	0,06	30,68	2,91	0,25	1,59	0,29	0,04
<b>5 W</b>	27,78	9,21	3,45	0,43	0,08	27,20	3,13	0,43	1,86	0,24	0,06
<b>Arag</b>	38,20	12,77	4,51	0,35	0,04	17,28	3,93	0,48	2,33	0,43	0,10
<b>A-WE</b>	32,09	14,23	4,22	0,57	0,09	18,58	3,07	0,90	2,45	0,70	0,10
<b>A-UN</b>	31,98	14,51	4,03	0,57	0,08	18,59	2,99	0,92	2,46	0,33	0,14
<b>N-WE</b>	74,79	10,43	3,23	0,36	0,04	0,13	3,30	0,31	1,56	0,03	0,08
<b>N-UN</b>	74,25	10,75	4,16	0,50	0,05	0,17	3,33	0,28	1,86	0,03	0,08
<b>RqB1</b>	54,56	24,45	6,66	0,62	0,04	0,51	2,69	0,68	4,39	0,59	0,11
<b>RbB2</b>	47,84	26,45	8,17	0,64	0,13	2,13	3,08	1,21	4,38	0,19	0,96
<b>RbB1</b>	49,23	24,52	11,30	0,65	0,13	0,55	3,57	0,91	3,75	0,17	0,28
<b>1 UW</b>	29,13	10,34	3,42	0,41	0,10	19,92	3,29	0,19	1,25	10,89	0,04
<b>S1</b>	61,82	25,37	1,32	0,74	0,00	0,09	0,77	0,48	2,62	0,23	0,03
<b>S4</b>	58,62	24,21	8,49	0,18	0,20	0,09	0,08	0,08	0,08	0,33	0,18
<b>S3</b>	59,15	22,92	7,25	0,26	0,20	0,20	0,08	0,12	0,10	0,67	0,38
<b>S2</b>	59,07	25,19	3,37	0,68	0,01	0,08	1,13	0,49	3,28	0,58	0,12
<b>T-2</b>	37,11	10,78	6,67	0,52	0,10	15,29	7,63	0,85	1,17	0,05	0,08
<b>T-3</b>	32,58	10,51	8,09	0,82	0,17	21,34	7,49	1,07	1,06	0,03	0,07
<b>T-4</b>	23,88	5,65	4,12	0,39	0,19	29,85	6,80	0,49	0,85	0,22	0,06
<b>SLN-1-c</b>	57,35	20,52	6,37	0,86	0,05	1,01	4,40	1,14	3,67	0,06	0,07
<b>SLN-1-w</b>	55,87	20,44	6,62	0,84	0,04	1,29	4,50	1,07	3,68	0,63	0,10
<b>SLN-1- bd</b>	55,39	20,15	7,60	0,88	0,05	0,89	4,83	0,99	3,95	0,07	0,09
<b>SLN-1-ç</b>	69,10	16,26	2,86	0,60	0,06	1,32	2,51	2,06	3,29	0,02	0,07
<b>SLN-1 pop</b>	56,71	19,32	6,89	0,88	0,05	1,16	4,34	1,03	3,71	0,03	0,12
<b>SLN-2-c</b>	51,17	20,76	9,01	0,85	0,09	0,85	4,51	0,68	4,10	0,01	0,15
<b>SLN-2-bd</b>	53,19	20,72	8,06	0,90	0,09	1,11	4,63	0,81	4,28	0,03	0,25
<b>SLN-3-c</b>	54,05	22,36	6,67	0,81	0,04	0,53	3,56	0,63	3,58	0,02	0,11
<b>SLN-3-bd</b>	53,45	21,81	6,21	0,82	0,02	0,89	3,99	0,25	3,59	0,06	0,09

**Tabela 6d.** Sadržaj makroelemenata (%) ispitivanih *badlands* sedimenata

Uzorak	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>SLN-3-ç</b>	60,46	21,60	5,58	0,83	0,04	0,65	3,33	0,83	3,73	0,01	0,14
<b>NLH-1pop</b>	49,22	12,58	5,55	0,54	0,10	3,39	9,41	4,81	3,01	0,10	0,05
<b>NLH-1-w</b>	48,92	12,31	5,83	0,55	0,09	2,50	9,77	4,87	2,99	0,25	0,03
<b>NLH-1 -bd</b>	48,82	12,19	5,63	0,54	0,08	2,78	9,60	4,76	2,97	0,27	0,03
<b>NLH-4</b>	48,33	13,04	5,12	0,55	0,10	4,47	7,92	5,05	3,11	0,25	0,06
<b>NLH-5</b>	47,86	13,20	5,45	0,59	0,10	4,70	6,90	5,01	3,58	0,27	0,04
<b>NLH-7</b>	44,88	11,52	5,03	0,53	0,10	7,44	8,32	3,95	3,72	0,17	0,04
<b>NLH-12</b>	46,01	10,34	4,57	0,48	0,10	8,54	9,31	3,43	3,44	0,08	0,04
<b>NLH-13</b>	45,86	10,45	4,31	0,46	0,10	7,76	9,13	3,65	3,53	0,62	0,05
<b>NLH-14</b>	44,77	10,39	4,01	0,46	0,10	9,79	7,31	2,92	4,25	0,31	0,05
<b>NLH-16</b>	46,43	10,86	4,82	0,49	0,10	6,66	9,50	4,27	3,24	0,45	0,04
<b>NLH-19</b>	44,84	10,91	4,43	0,48	0,11	9,32	8,08	3,38	4,05	0,33	0,05
<b>NLH-21</b>	46,77	11,96	5,17	0,55	0,10	6,24	9,18	3,55	3,01	0,12	0,05
<b>NLH-22</b>	46,04	11,72	5,44	0,51	0,11	5,31	9,44	4,37	3,00	0,98	0,05
<b>NLH-23</b>	47,09	11,71	5,72	0,52	0,11	3,93	9,97	4,58	2,95	1,07	0,04
<b>NLH-26</b>	38,20	7,20	3,15	0,29	0,08	12,38	14,81	3,29	2,25	0,13	0,08
<b>NAL-27</b>	45,03	11,46	6,01	0,52	0,14	6,05	8,77	4,69	3,43	0,16	0,04
<b>CAP-1</b>	69,83	12,85	2,82	0,12	0,05	2,36	0,97	1,61	3,79	0,02	0,03
<b>CAP-4</b>	72,19	12,29	1,87	0,19	0,09	1,68	1,23	1,24	4,29	0,02	0,02
<b>CAP-7</b>	68,72	12,80	2,93	0,28	0,08	1,54	1,59	1,24	3,62	0,01	0,03
<b>CAP-10</b>	70,52	10,57	1,86	0,10	0,04	1,43	0,59	0,83	3,80	0,04	0,02

Boljem razumevanju ispitivanih sedimenata doprineo je i mineraloški sastava (tabela 7) predstavnika odgovarajućih grupa sedimenata. Kao što je već napomenut, loša sortiranost, visok SAR i prisustvo smektita - minerala gline zaslužnog za samu disperznost, za procese bubrenja i skupljanja materijala, stvaranje ispucale površinske korice poznatije kao „popcorn“, nastanka cevaste erozije i pojave blatnih tokova itd. karakterišu *badlands* sedimente. Međutim, u pojedinim sedimentima uočeno je i prisustvo analcima – minerala koji ukazuje na tufozni karakter materijala tj. vulkanoklastično poreklo materijala, kojima do sada u istraživanjima nije značajno posvećivana pažnja. Kako su gore okarakterisani tipični disperzni *badlands* sedimenti više istraživani, veći akcenat će se staviti na disperzne sedimente tufoznog karaktera o kojima se ne zna mnogo.

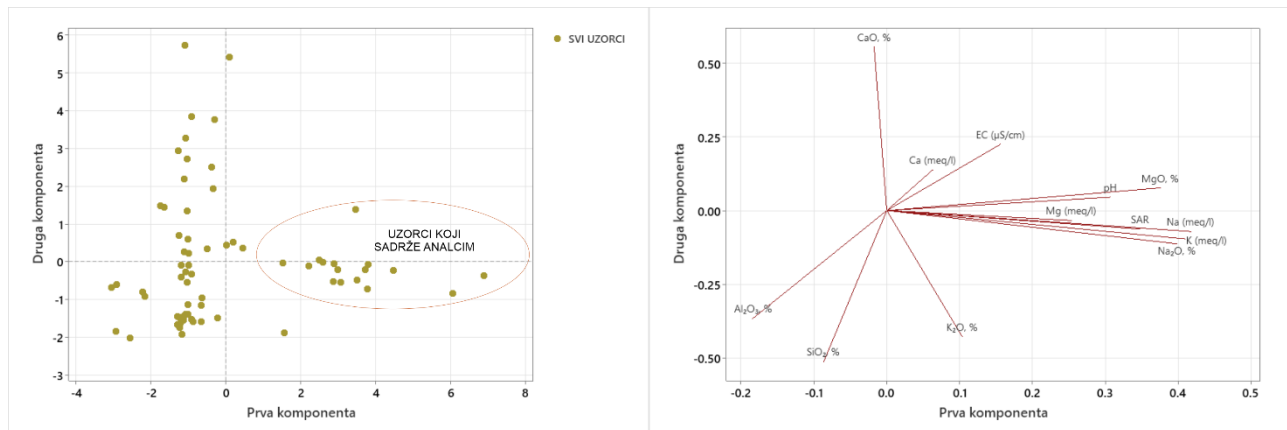
**Tabela 7.** Mineraloški sastav određenih predstavnika *badlands* sedimenata.

Uzorak	kvarc	kalcit	ilit	plagiokla	hlorit	kaolinit	hematit	smektit	analcim	albit	feldspat	dolomit
D	+	+	+	+	+	+	+					
X	+	+	+	+	+	+	+					
J	+	+	+	+	+	+	+					
NLH	+	+	+					+	+	+		
SLN	+		+			+		+		+		
T	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
Rb	+		+		+	+		+			+	
AL	+	+	+		+	+		+				
IT	+	+	+		+	+		+				
MJ	+	+	+		+	+		+			+	+
RR	+		+		+	+		+			+	
TUR	+	+	+		+	+		+			+	+

U naučnim krugovima se koncept potencijalne disperznosti često nedovoljno povezuje sa *badlands* terenima, prvenstveno zbog mešanja pojmova erodibilnosti i disperznosti. Iako se ovi procesi u prirodi preklapaju, oni nisu uzročno-posledični niti se međusobno uslovljavaju. *Badlands* tereni su, po svojoj definiciji jako erodibilni; stoga, klasifikacija materijala kao potencijalno disperznog ne sugerise odsustvo erozije. Naprotiv, sa fizičkog aspekta, ona ukazuje na postojanje različitih stepena i mehanizama erodibilnosti, gde hemijska stabilnost ili nestabilnost samo modifikuje intenzitet i način na koji se površina terena transformiše. Potvrda tome jesu i promene uočene na površini sedimenata podvrgnutih klimatskim eksperimentima (slike 40-49). Shodno tome će dalja pažnja biti usmerenija na bolje razumevanje grupe potencijalno disperznih sedimenata, ali i specifičnu grupu disperznih sedimenata koji sadrže analcim.

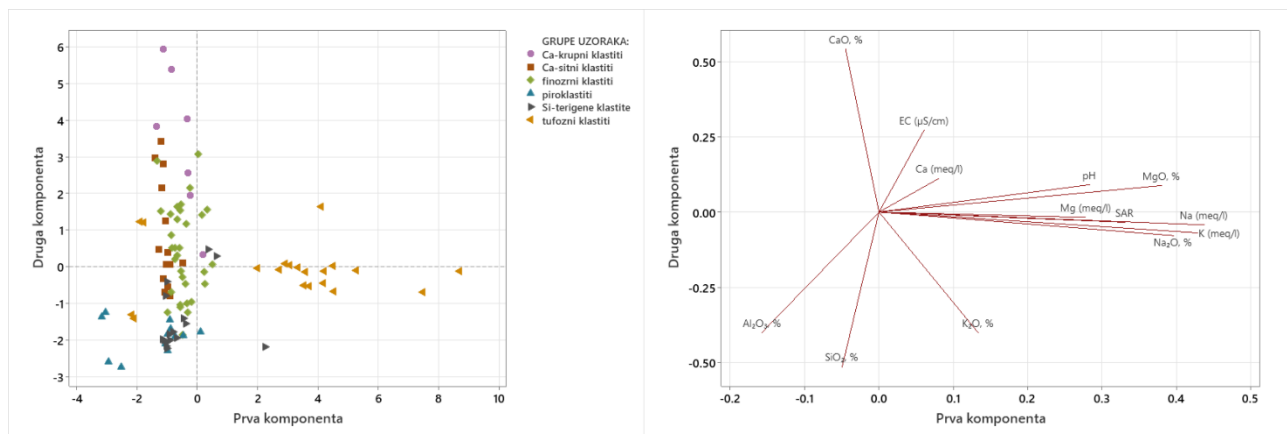
Analiza glavnih komponenata primenjena na podatke pH i SAR vrednosti, električne provodljivosti, sadržaja dostupnih katjona jona i sadržaja makroelemenata rezultirala je trokomponentnim modelom pomoću kojim je objašnjeno 92% ukupnog varijabiliteta među podacima (prva komponenta uključuje 47%, druga 30% i treća 15% varijabiliteta). Na grafiku skorova latentnih varijabli uočava se grupisanje sedimenata u dva klastera, od kojih jedan uključuje sedimente sa analcimom. Najveći uticaj na odvajanje ovih sedimenata imaju katjoni i SAR. Prisustvo analcima i drugih manje ili više očekivanih minerala, njihova zastupljenost i odnos sa drugim fizičko-hemijskim komponentama ostavlja otvoreno pitanje za dalja

istraživanja u čijem fokusu će na prvom mestu biti mineraloški sastav sedimenata. Varijable koje imaju najveći uticaj na izdvajanje ostalih sedimenata su sadržaj CaO i SiO<sub>2</sub> (Slika 57).



**Slika 57.** Analiza glavnih komponenata potencijalno disperznih *badlands* sedimenata i sedimenata sa analcimom.

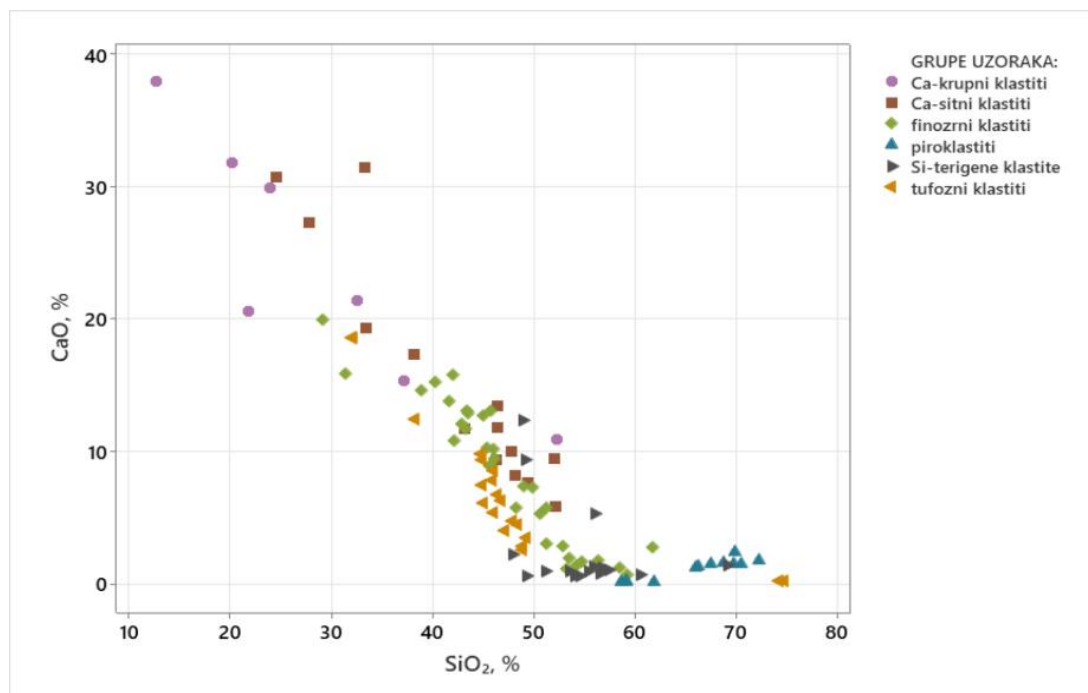
Dosadašnji rezultati su pokazali da je različit stepen i mehanizam erodibilnosti posledica kombinacije prisustva terigenih minerala, kao što su kvarc i feldspati, zatim karbonata, ali i granulometrijskog sastava. Uzimajući sve to u obzir, sedimenti su grupisani na šest grupa i to na: Si-terigene klastite – peskoviti alevriti i alevritski peščari izgrađeni od terigenih minerala; piroklastiti - tufovi; Ca-krupne klastite – peskovito-alevritski do peskovito-alevritsko-glinoviti klastiti karbonatnog veziva; Ca-sitne klastite – glinoviti alevriti do alevritske gline karbonatnog veziva; tufozni klastiti – alevritske gline tufoznog karaktera (npr. prisustvo analcima); i na finozrne klastite – alevritsko-glinoviti do glinovito-alevritski klastiti različitog sastava i sadržaja okarakterisani kao tipični *badlands* materijali.



**Slika 58.** Analiza glavnih komponenata novih grupa *badlands* sedimenata.

Kako je analiza glavnih komponenata primenjena na sedimentima klasifikovanim u šest grupa (Slika 58), ukazala da su Si-terigeni klastiti i piroklastiti najbolje opisani sadržajem SiO<sub>2</sub>, a Ca-krupni i Ca-sitni klastiti sadržajem CaO, a u cilju boljeg razumevanja prirode posmatranih sedimenata, prikazan je grafik zavisnosti sadržaja CaO i SiO<sub>2</sub> (Slika 59).

Na grafiku se sa smanjenjem sadržaja CaO i povećanjem sadržaja SiO<sub>2</sub> (slika 59) uočava postepen prelazak Ca-krupnih klastita u Ca-sitne klastite koji potom prelaze i mešaju sa finoizrni i tufoznim klastitima koji predstavljaju tipične *badlands* sedimente. Posmatrajući grafik iz drugog smera, odnosno sa smanjenjem sadržaja SiO<sub>2</sub> i povećanjem sadržaja CaO dolazi do postepenog prelaska piroklastita u Si-terigene klastite koji se potom na sredini prelaze i mešaju se sa tipičnim *badlands* sedimentima. Takva raspodela odgovara i granulometrijskom sastavu koji se smanjenjem sadržaja CaO i smanjenjem sadržaja SiO<sub>2</sub> sa druge strane smenjuje od krupnozrni, preko sitnozrnih, pa sve do tipičnih finoizrni čestica.

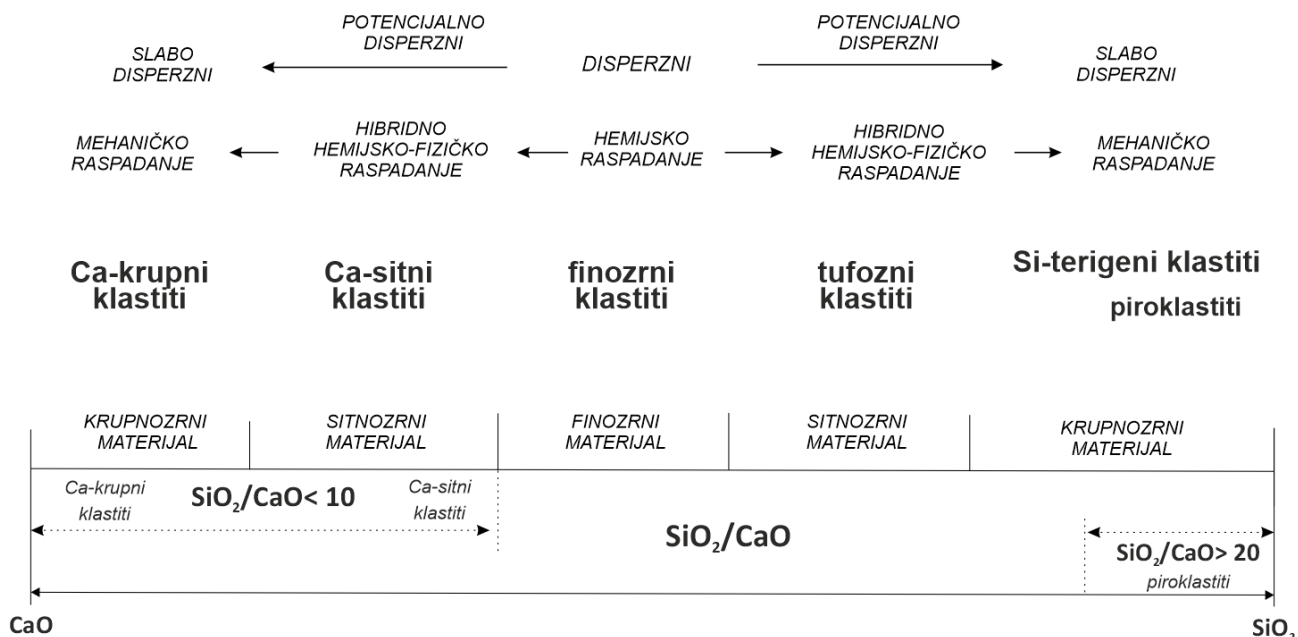


**Slika 59.** Podela *badlands* sedimentata u zavisnosti od odnosa sadržaja SiO<sub>2</sub> i CaO.

Kvantifikacijom odnosa SiO<sub>2</sub>/CaO za ispitivane sedimente, pokazalo se da odnos SiO<sub>2</sub>/CaO < 10 pored tipičnih *badlands* sedimentata (finoizrni i tufozni) mogu imati još samo Ca-krupni i sitni klastiti. Sa druge strane, odnos SiO<sub>2</sub>/CaO > 20 pored tipičnih *badlands* sedimentata (finoizrni i tufozni) imaju i Si-terigeni klastiti i piroklastiti (Slika 60). U opsegu vrednosti SiO<sub>2</sub>/CaO = 10-20 nalaze se tipični finoizrni *badlands* tereni koji ispunjavaju sva tri u kriterijuma disperznosti.

Poređenjem podataka dobijenih iz klimatskih simulacija sa zabeleženim fizičkim promenama na površini uzoraka (slike 20-25 i 40-49), uočava se da sam odnos SAR/EC (slika 61) ne može jednoznačno predvideti ponašanje sedimentata. Ovi nalazi sugerišu da se dinamika transformacije materijala ne može svesti isključivo na interakciju ova dva parametra, već zahteva širi analitički pristup. Kroz opisane klimatske simulacije primarno su praćene fizičko-hemijske promene izazvane samim eksperimentalnim uslovima. Ipak, kako bi se dublje razumeli litološki uzročnici tih promena i povezala struktura sedimentata sa njihovim dinamičnim ponašanjem, fizičko-hemijskoj karakterizaciji podvrgnuti su kako sedimenti tretirani u laboratorijskim eksperimentima, tako i drugi, literaturno manje ili više poznate *badlands* stene. Ovakav pristup omogućava da se ponašanje *badlands* terena sagleda ne samo kao reakcija na spoljašnje uticaje, već i kao direktna posledica njihovih unutrašnjih svojstava.

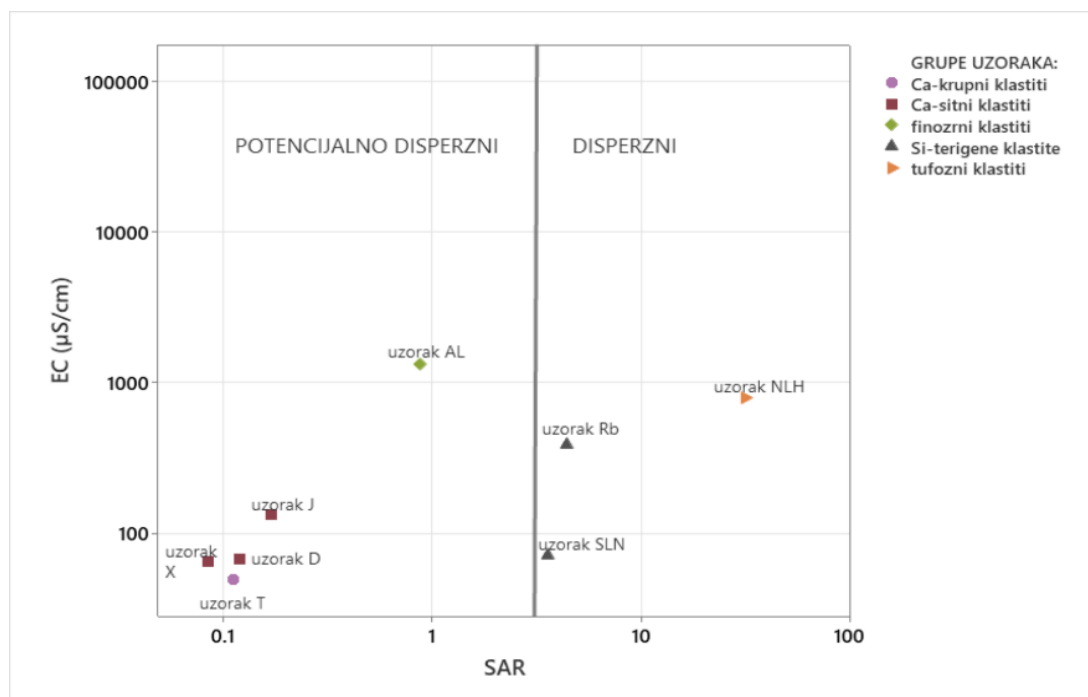
Iako sličnog granulometrijskog sastava, sedimenti sa dominacijom CaO i SiO<sub>2</sub> u svom sastavu imaju različit odgovor na procese raspadanja što je pokazano i kroz gore opisane



CaO klimatske eksperimente. Predstavnik Ca-krupne klastite – peskovito-alevritski do peskovito-alevritsko-

**Slika 60.** Nova klasifikacija *badlands* sedimenata.

glinoviti klastiti karbonatnog veziva (uzorak T); Ca-sitne klastite – glinoviti alevriti do alevritske gline karbonatnog veziva (uzorci D, X i J); Si-terigene klastite – peskoviti alevriti i alevritski peščari izgrađeni od terigenih minerala (uzorak Rb i SLN); piroklastiti - tufovi (uzorak tufa poreklom iz Kapadokije podvrgnut klimatskom eksperimentu od strane Avcioglu i dr. (2024)) ; tufozni klastiti – alevritske gline tufoznog karaktera (uzorak NLH); finozrne klastite – alevritsko-glinoviti do glinovito-alevritski klastiti okarakterisani kao tipični *badlands* sedimenti (uzorak AL).



**Slika 61.** Odnos SAR i EC sedimenata podvrgnutih klimatskim eksperimentima, u domenima disperzije koju su utvrdili Rengasami i dr. (1984).

Krupnozrni piroklastiti i Ca-krupni klastiti pokazuju određen stepen stabilnosti i tokom klimatskih uslova ostaju nepromenjeni, ne pokazujući uočljive znakove raspadanja. Sitnozrni Si-terigeni i Ca-sitni klastite u odnosu na krupnozrne pokazuju znakove raspadanja tokom eksperimenata. Međutim, iako su obe klase granulometrijski slične, imaju različit mehanizam raspadanja. Ca-sitni klastiti pucaju na sitnije komade, ali u određenoj meri zadržavaju obrise svoje inicijalne forme, dok Si-terigeni sedimenti u potpunosti gube svoju inicijalnu formu, disperguju se i kroz cikluse dovode do nastajanja i nestajanja pukotina. Slično ponašanje imaju i tufozni i finoizrni klastiti na čijoj se površini pored pukotina može uočiti i bubrenje i skupljanje izazvano prisustvom minerala glina. Takve površinske promene mogu ukazati na procese raspadanja koji se sa smanjenjem veličine čestica kreću od mehaničkih ka hemijskim procesima.

Tako dobijeni rezultati ukazuju na važnu ulogu hemijskog odnosa  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ , odnosno fizičkog odnosa frakcija gline i peska u predikciji ponašanja potencijalno disperznih *badlands* sedimenata, odnosno sedimenata koji ne ispunjavaju tri standardna uslova disperznosti - prisustvo minerala gline, loša sortiranost i visok SAR. Ovaj parametar, koji zapravo predstavlja odnos između klasta i veziva, služi kao precizniji indikator stabilnosti i načina raspadanja materijala u slučajevima gde standardni SAR/EC model ne daje jednoznačne rezultate. Iako se kvantifikacija ovog odnosa dobro pokazala na primeru ispitivanih sedimenata, za njegovu punu validaciju i univerzalnu primenu neophodno je dodatno proširiti bazu podataka i obuhvatiti još veći broj različitih lokaliteta.

Prisustvo analcima i drugih specifičnih mineralnih faza, njihova zastupljenost i korelacija sa ostalim fizičko-hemijskim komponentama, ostavljaju otvoreno pitanje za dalja istraživanja u čijem fokusu mora biti detaljan mineraloški sastav sedimenata. Uspešna klasifikacija tufoznih klastita u grupu disperznih materijala potvrđuje da su ovi sedimenti po svojoj unutrašnjoj dinamici srodni literaturno najbolje opisanim tipičnim *badlands* terenima. Međutim, iako metamorfni, magmatski i tufozni karakter matičnih stena odlikuje veliki broj *badlands* terena, on je u dosadašnjim studijama često bio zanemaran.

#### 4.5 BADLANDS TERENI FORMIRANI U VULKANOKLASTIČNIM STENAMA

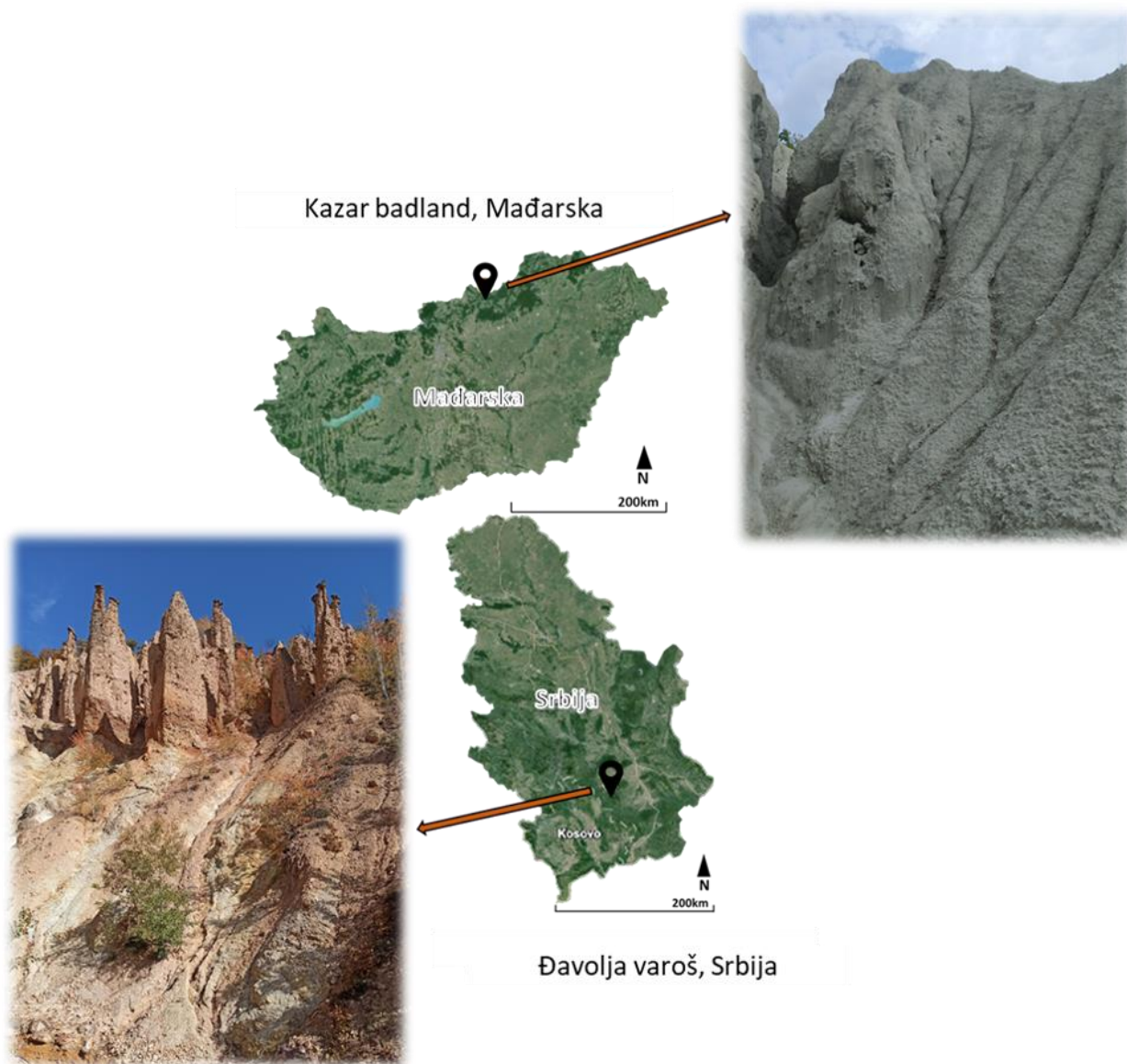
Karakterizacija *badlands* sedimenata na osnovu njihovih fizičko-hemijskih svojstava, kao posebnu grupu izdvojila je sedimente sa metamorfnim, magmatskim i tufoznim karakterom matičnih stena kao jednu od grupa specifičnih svojstava. Takva priroda sedimenata odlikuje veliki broj terena, ali kojima u dosadašnjim studijama nije posvećivano previše pažnje, a koji zahtevaju dodatna istraživanja.

Jedan od najpoznatijih primera *badlands* terena nastalih u piroklastičnim sedimentima jeste Kapadokija u Turskoj. Međutim, iako globalno najistaknutija, ona nije jedinstven slučaj ovakvog pejzaža formiranog u vulkanoklastičnim naslagama. Sa naučnog aspekta, ali i u pogledu turističkog potencijala, izuzetno značajni i manje afirmisani lokaliteti vulkanskog porekla jesu Kazar *badlands* u Mađarskoj, kao i Đavolja varoš u Srbiji.

Sedimenti sa pomenutih lokaliteta analizirani su u okviru ovog istraživanja sa ciljem: ispitivanja sklonosti vulkanoklastičnih stena ka formiranju *badlands* terena; usporedbe fizičko-hemijskih svojstava vulkanoklastičnog materijala sa ključnim fizičko-hemijskim svojstvima *badlands* sedimenata koji su dosada opisani u literaturi; i sa ciljem uspostavljanja veza između postojećih geomorfoloških procesa i procesa koji se odvijaju na ispitivanim materijalima. I ne samo to, na samom kraju, ova studija ima za cilj postavljanje novih naučnih pitanja i preispitivanje da li vulkanoklastični materijal, iako specifičan za lokalitet, može stvoriti jedinstvene *badlands* terene i time otvoriti mogućnost za novu liniju u klasifikaciji *badlands* terena koja će uključivati isključivo vulkanoklastite.

##### 4.5.1 Karakteristike ispitivanog područja

Kazar *badlands* je, prema stenama u kojima je nastao, jedinstven predeo star oko 250 godina koji se nalazi oko 3 km istočno od sela Kazar u severoistočnom delu Mađarske (Karátson 2006, Bertalan i dr. 2016) (slika 62). Ovaj po površini mali teren u predelu umereno vlažne klime, zauzima površinu oko 1ha (Bertalan i dr. 2016) i deo je Novohrad-Nograd Geoparku koji se prostire na granici između Slovačke i Mađarske, u Karpatskom basenu (Horváth i Csüllög, 2013). Kazar *badlands* je razvijena je u slabo konsolidovanim i jako poroznim riolitskim tufovima i jedini je teren ovog tipa u Mađarskoj (Horváth i Karancsi, 2011). Ovaj teren sa razvijenim brazdama i jarugama i nagibom od 300-274m (Pintér i dr. 2009) ima padine beličasto sive boje (slika 63) koje su osetljive na procese izazvane različitim vremenskim uslovima i to najčešće površinskim oticanjem izazvanim oblinim kišama, a potom i klizištima. Prema Pintér i dr. (2015), brazde i jaruge, kao i cevasta erozija, erozioni su procesi koji su najzastupljeniji.



**Slika 62.** Lokacije Đavolje varoši i Kazar *badlands*.

Đavolja varoš se nalazi u selu Đake na planini Radan u jugoistočnom delu Srbije i od 1959. godine je kao geološki spomenik prirode pod zaštitom prve kategorije (slika 64). Ovaj teren razvijen je u dacito-andezitskim slabo konsolidovanim, slabo sortiranim tufovima. Njegova površina je oko 0,7km<sup>2</sup> i prema Životiću i Vuković Vimić (2022), teren je razvijen u predelu suve subhumidne klime. Đavolju varoš karakterišu zemljane piramide inicijalno oblikovane od strane paleogenskog vulkanizma pod dejstvom dva vrlo kisela i visoko mineralizovana izvora vode (Oro i dr. 2023; Dimitrijević i Drakulić, 1958). Crvenkaste zemljane piramide od erodibilnog materijala, zaštićene ostacima otpornijeg povlatnog sloja, su geomorfološki oblici koji su rezultat najmanje 200 000 godina erozivnih procesa (Vukoičić i dr. 2021). Đavolja varoš broji 202 zemljane piramide, čije visine dosežu od 2-17m, zavisno od njihove starosti, i to na 670-700m nadmorske visine. Visoki intenziteti padavina, vetar i duži sušni periodi su najčešći uzročnici procesa raspadanja (Valjarević i dr. 2015), međutim gubitak ravnoteže i pad zaštitne stene koja se nalazi na vrhu zemljanih piramida značajno ubrzava eroziju ovih figura Đavolje varoši.



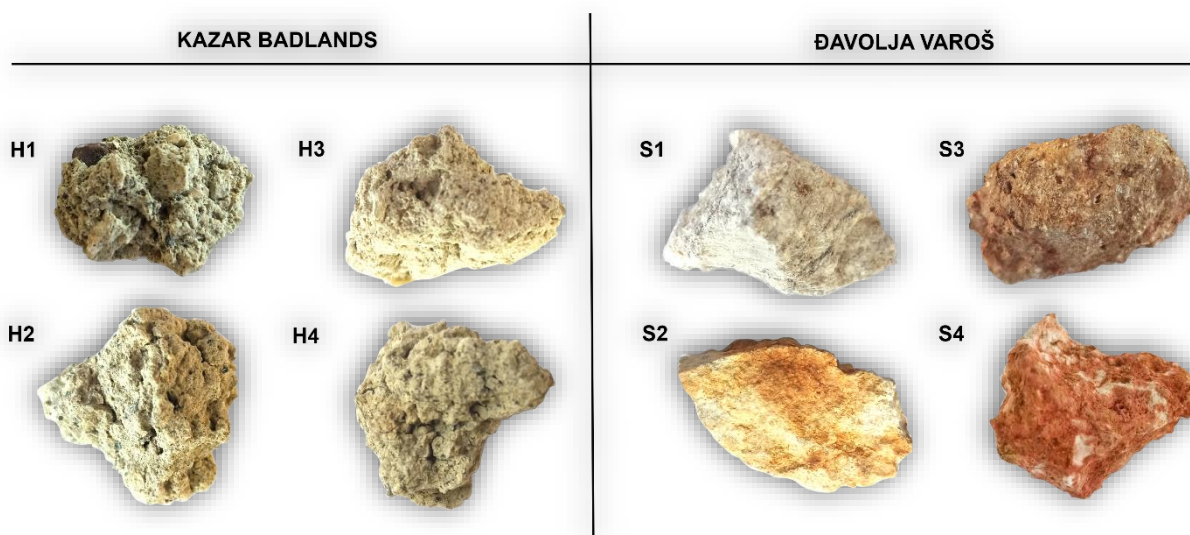
**Slika 63.** Kazar *badlands*, Mađarska.  
(Izvor: László Bertlan, uz dopuštenje autora)



**Slika 64.** Đavolja varoš, Srbija.  
(Izvor: Nevena D. Antić)

#### 4.5.2 Rezultati ispitivanja *badlands* terena formiranih u vulkanoklastičnim stenama

Osam neraspadnutih uzoraka sedimenata sa oba lokaliteta iz Mađarske i Srbije (slika 65) analizirano je sa ciljem ispitivanja i upoređivanja njihovog mineraloškog sastava, petrografskih karakteristika i hemijskih svojstava kao što su pH, električna provodljivost i koncentracije jona.

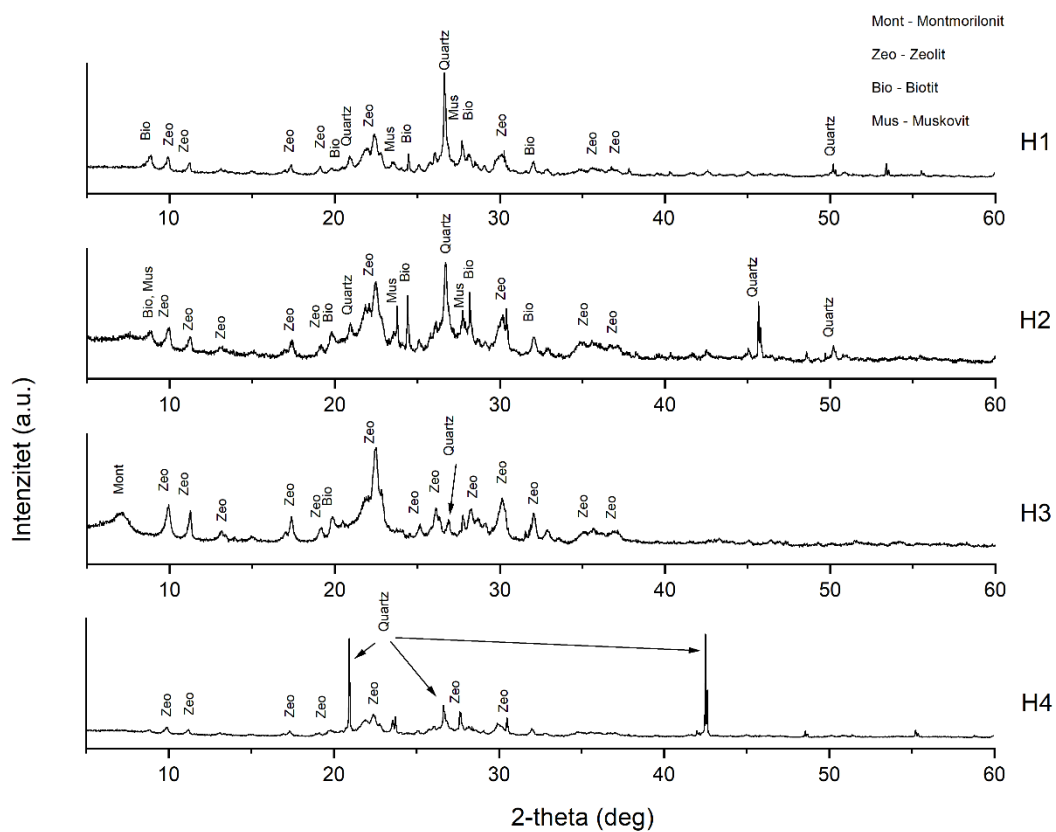


Slika 65. Uzorci sedimenata Kazar *badlands* terena i Đavolja varoši.

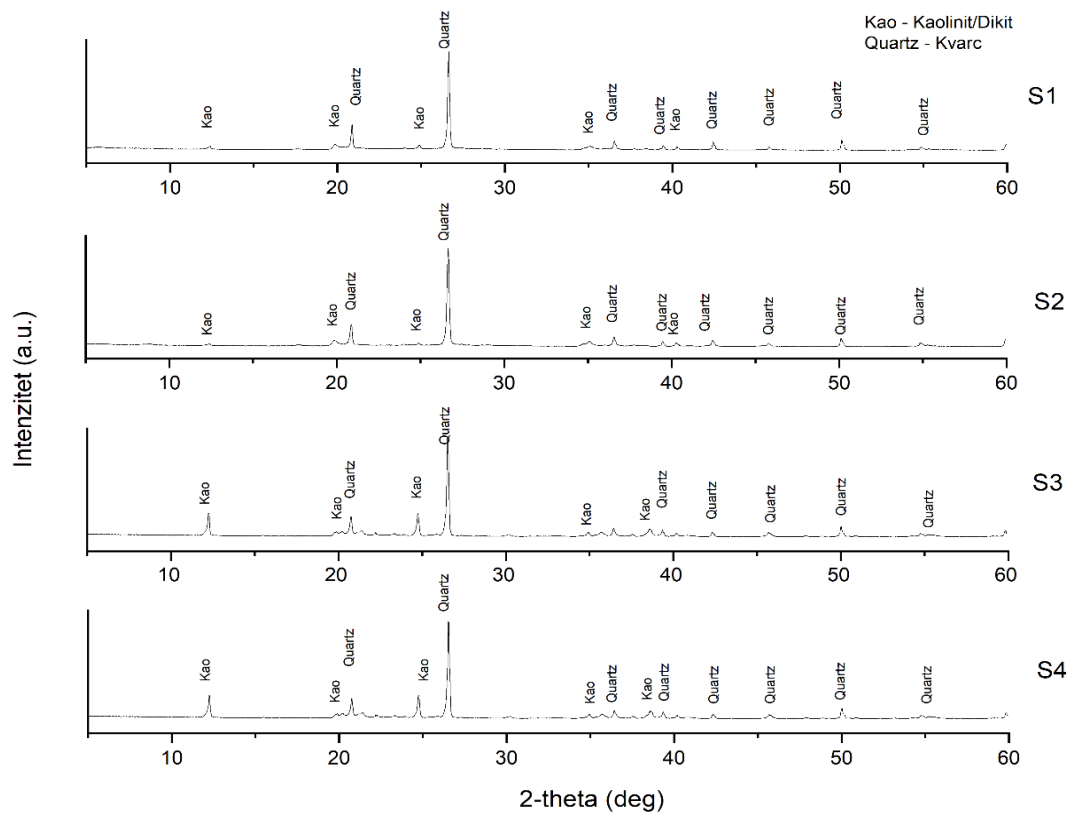
##### 4.5.3.1 Mineraloški sastav

Posmatrajući sva četiri H uzorka, može se uočiti njihov sličan mineraloški sastav, u kom su dominantni minerali zeoliti (slika 66). Prema Kianfar (2020) se zeoliti opisuju kao porozni i hidratizirani alumosilikati koji imaju jedinstvena svojstva koja zavise od njihovog tipa. Zeoliti se, zbog svoje velike reaktivne površine i mikroporozne strukture u kojoj se mogu zadržavati molekuli vode i metalni katjoni, najčešće koriste kao sorbenti i katalizatori, upravo zbog svoje sklonosti ka reverzibilnoj hidrataciji i jonskoj izmeni (Tan Dang i dr. 2021). U analiziranim uzorcima je pored heulandita (Ca, Na - alumosilikat) i klinoptilolita (Na, K, Ca - alumosilikat), kao predstavnika zeolita, uočeno i prisustvo kvarca, feldspata i mice (biotit i muskovit). Za razliku od ostalih H uzoraka, za uzorak H3 se može reći da je gotovo monomineralan i da je u tom uzorku zeolit dominantan mineral uz prisustvo male količine kvarca i montmorilonita.

Za razliku od H uzoraka, S uzorci su gotovo u potpunosti izgrađeni od kvarca, dobro su kristalizovan materijal i sadrže malo sekundarnih filosilikata, uglavnom kaolinita (slika 67). Pri posmatranju XRPD dijagrama S3 i S4 uzoraka, neophodno je napomenuti da je pik koji bi mogao da potiče od hematita premali da bi se uzeo u obzir.



Slika 66. XRPD dijagrami Kazar *badlands* (H1-H4) uzoraka.

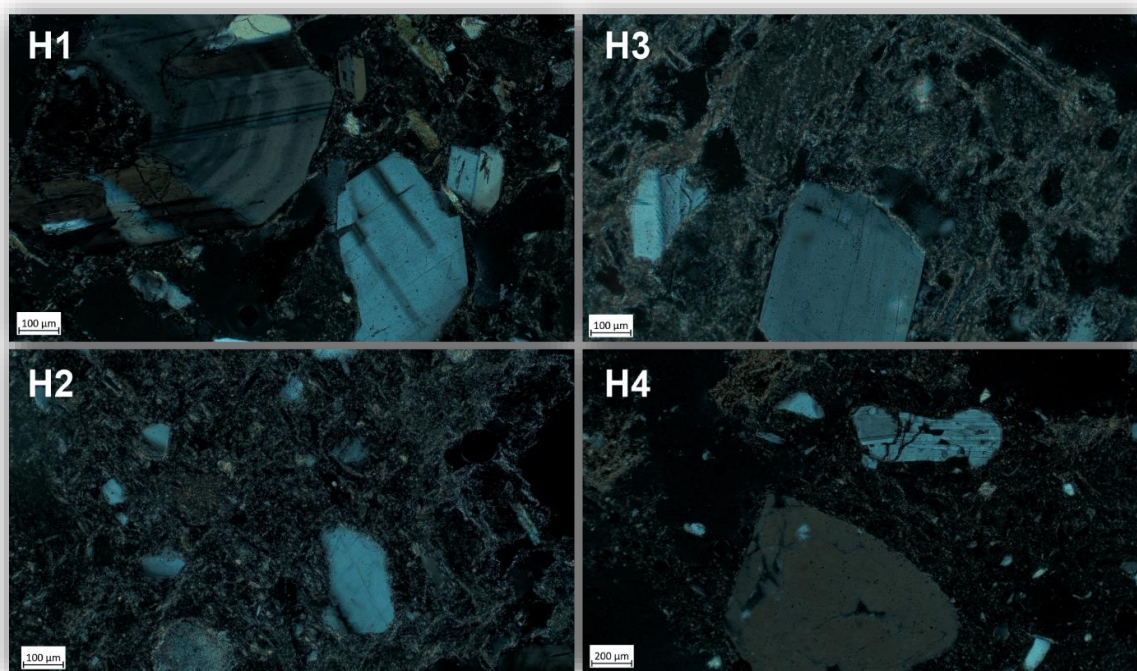


Slika 67. XRPD dijagram uzoraka Đavolje varoši (S1-S4).

Na osnovu petrografske analize H uzorci se mogu opisati kao veoma porozne, mineralizovane i silifikovane stene koje imaju pefitsku tj. grubozrnu klastičnu strukturu koja je sačinjena od uglastih zrna čije veličine ne prelaze 2mm. Zrna analiziranih H1, H2 i H4 stena su uglavnom bele boje, što odgovara plagioklasima, ali su vidljivi i bojeni minerali. Stene označena kao H3 je svetlosive boje sa zelenim nijansama.

Na osnovu petrografske analize S uzorci se mogu opisati kao jako silifikovane piroklastične stene beličaste boje sa crvenkastim tonovima. Ispitivane stene su tokom raspadanja i dijageneze intenzivno izmenjene, pa je prepoznavanje primarnih minerala otežano. Tekstura svojstvena za S1 i S2 uzorke je alevritsko-peskovita do mikrobrečasta za S3 i S4 uzorke. Njihov praškas opip i beličasta boja sa crvenkasto-smeđim tonovima ukazuju na kvarc, minerale glina, limonit i hematit kao produkte izmena. Smeđe nijanse u steni potiču od limonita. Trošnji, limonitski deo stene najverovatnije predstavlja relikte primarnih bojenih minerala. Rudni/metalični minerali malih dimenzija, rasuti su u masi stene, dok se žilice kvarca debljine do 1mm mogu videti makroskopski.

Klastična, psamitsko-alevritska tekstura karakteriše H uzorke (slika 68), i to H1 i H4 kao krupnije, a H2 i H3 kao sitnije zrnaste, ukazujući na bimodalnu raspodelu veličine zrna. Analizirani vulkanoklastiti bogati su kristaloklastim plagioglasima, biotitom, hloritom i kvarcom u nešto manjoj meri, a hornblenda je podređena. Vulkansko staklo i čestice alevritske veličine čine matriks, a finozrnim materijalom, koji često vodi poreklo od devitrifikovanog stakla, su vezani fragmenti, a deo staklastih fragmenata je prešao u zeolit i minerale glina. Plagioklasi se nalaze u idiomorfim zrnima manjih dimenzija, maksimalno dužine 1mm, a krupnija zrna su polomljena. Biotit se nalazi u očuvanim liskama dužine do 0,5mm, koje pokazuju jasan polihroizam u nijansama smeđe i zelene boje.

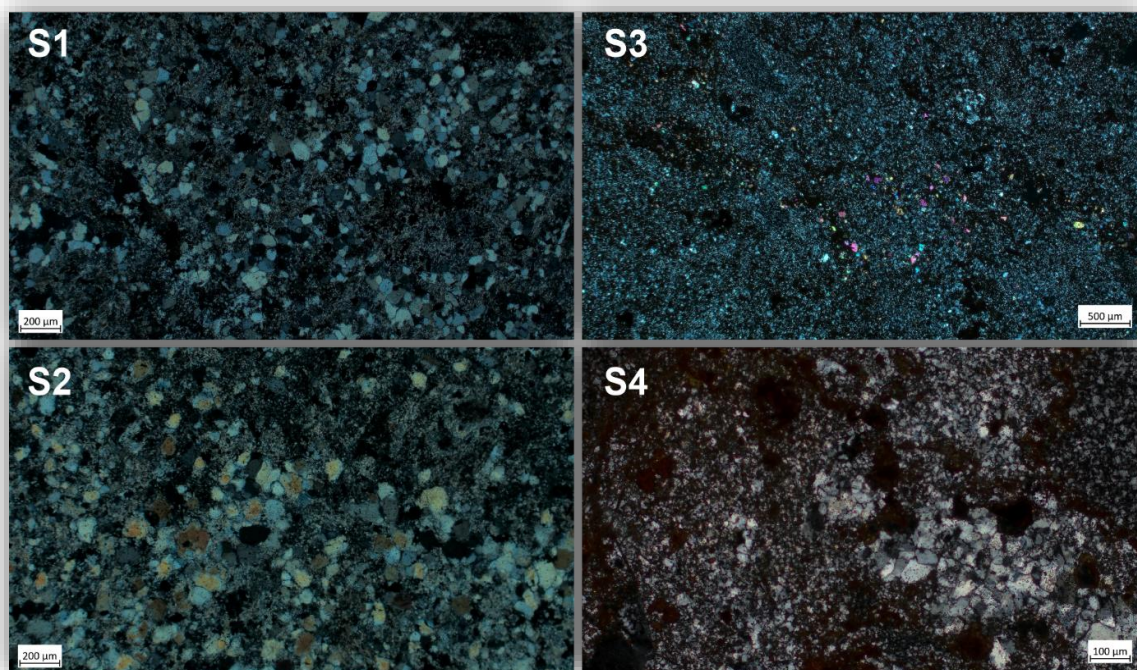


**Slika 68.** Mikrosnimci uzoraka Kazar *badlands* terena.

Za razliku od biotita, zrna hornblende su potpuno impregnisana i zamenjena zemljastim epidotom i mineralima gvožđa. Hlorit je polihroičan u nijansama zelene boje i interferira u sivosmeđoj boji, a prisutani su i retki alotriomorfni oblici kvarca, dimenzija do 0,6mm. Iako

postoje i primarnog, veći deo zrna kvarca je sekundarnog porekla. Metalni minerali su prisutni kao sitna zrna magnetita veličine manje od 0,1mm.

Ispitivani S uzorci imaju intenzivno hidrotermalno izmenjenu i mineralizovanu bimodalnu alevritsko-peskovitu teksturu (slika 69). Procesi izmene koji su obuhvatili osnovnu masu, kao i kristaloklaste, su silifikacija i argilitizacija (kaolinitizacija). U steni je kvarc najzastupljeniji mineral. Autigeni kvarc formiran je procesom silifikacije, a piroklastični kvarc se prepoznaje po ugaonim kristalima ili slomljenim fragmentima veličine do 0,5 mm u S1 i S2 uzorcima, tj. do 0,1 mm u S3 i S4 uzorcima. Kvarc gradi polikristalne agregate u kojima se nalaze i metalni minerali i sekundarni silicijski minerali koji su praktično zamenili masu stene oko primarnih fenokristala. Osim polikristalnih agregata, mogu se naći i kao mlazevi, žilice i žice debljine do 1mm koje su različite orijentacije, ali među kojima dominiraju međusobno skoro paralelne žice. U osnovnoj masi S1 i S2 uzoraka, u međuprostorima između relikata/alterisanih plagioklasa i bojanih minerala preovlađuje kalcedon, lokalno prekrystalisao u alotriomorfna zrna kvarca. To ukazuje da je postojalo najmanje dve faze silifikacije, a da je silifikacija prethodila hloritizaciji. Osnovna masa (matriks) S3 i S4 uzotka, u kojoj se nalaze relikti kristaloklasta, sastoji se od kaolinita u kome su mestimično rasuti sitni kristalići dijaspora i tamno mrkog hematita. Tokom procesa izmene je u kaolinit oslobođen silicijum koji se izlučuje i kao kalcedon, i koji je lokalno prekrystalisao u alotriomorfna zrna kvarca.

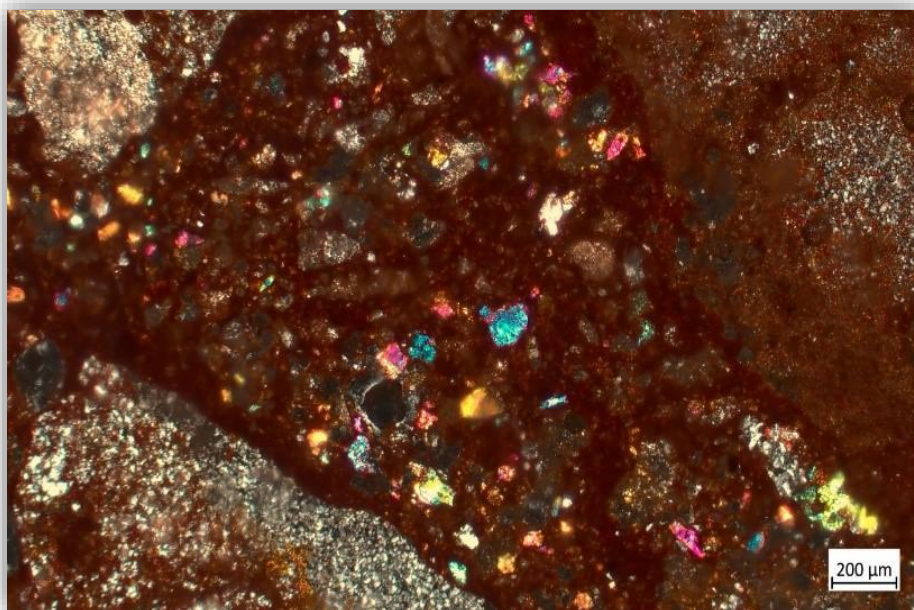


**Slika 69.** Mikrosnimci uzoraka Đavolje varoši.

U S1 i S2 uzorcima, se sericit, pored kaolinita, takođe formira u uznapredovanom stadijumu argilitizacije. Primarni fenokristali feldspata su idioformni, i njihove dimenzije su do 2x1mm u S3 i S4, odnosno i preko 3x2mm u S1 i S2 uzorcima. Površine su im potpuno zamučene pa se mogu uočiti i odrediti samo na osnovu kristalografskih kontura. U ispitivanim S uzorcima su zamenjeni kaolinitom i sericitom. Krupnija zrna su ispucala, a u mikropukotinama je deponovana silicijska materija (kalcedon + kvarc). Primarni bojani minerali, verovatno biotit, su potpuno isprani, bez polihroizma, zamenjeni mineralima gline i hloritom i dodatno prekriveni limonitom. U liskama se mogu videti gnezda radijalno i lepezasto raslog hlorita, kao i uklopljena zrna metalnih minerala. Metalni minerali su sitni, alotriomorfni i dimenzija ne

većih od 0,3 mm. U masi stene su rasuta individualna zrna, ali se mogu pronaći i kao mlazevi i grupe zajedno sa kaolinitom, sericitom ili hloritom. Procentulno učešće metaličnih minerala je oko 5%, a retki fragmenti stakla uočeni su u S3 uzorku.

Kao što je već i napomenuto, S uzorci sadrže dijaspor ( $\alpha$ -AlO(OH)) (slika 70), kao i njegov dimorf – bemit ( $\gamma$ -AlO(OH)). Ta dva minerala su važni minerali u boksitnim ležištima i lateritima. Dijaspore nastaje u uznapredovalom stadijumu argilitne alteracije i njegove optičke karakteristike se potpuno razlikuju od optičkih karakteristika dijaspora u boksitima. Njegov visok stepen cepljivosti se ne može primetiti zbog dimenzija kristala, a njegove interferentne boje su slične monokliničnom piroksenu. Dijaspore je mineral svojstven za uznapredovalu argilitnu alteraciju koja je posledica delovanja kiselih fluida ( $>300^{\circ}\text{C}$ ), koji intenzivno ispiraju katjone i to u najvećoj meri  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  i  $\text{Ca}^{2+}$ , dovodeći do potpunog raspadanja mafičnih minerala i feldspata.



**Slika 70.** Dijaspore u uzorku Đavolja varoš.

#### 4.5.3.2 Hemijski sastav

Na osnovu sadržaja makroelemenata ispitivanih uzoraka (tabela 8), uočava se dominantnost  $\text{SiO}_2$  u njihovom sastavu. Pored  $\text{SiO}_2$  zastupljen je i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dok su u manjoj meri i u opadajućem nizu u svim uzorcima zastupljeni  $\text{K}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{MnO}$ . Na sličan, intermedijarni do kiseli tip magme ukazuje sličan sadržaj  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  i  $\text{TiO}_2$  analiziranih uzoraka oba lokaliteta. U S uzorcima izmerena je duplo viša vrednost sadržaja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , u poređenju sa vrednostima izmerenim za H uzorke, u kojima je, sa druge strane, sadržaj  $\text{CaO}$  i  $\text{Na}_2\text{O}$  nešto viši nego u S uzorcima. Sadržaj  $\text{MnO}$  u H uzorcima ima niske vrednosti, dok je u S uzorcima njegova vrednost ispod granica detekcije. Vrednosti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  koje su u uzorcima S3 i S4 više nego u preostalim S uzorcima se mogu dovesti u vezu sa mineraloškim sastavom ovih uzoraka koji je i mikroskopski potvrđen, odnosno  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sa prisustvom hematita/limonita, a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sa prisustvom dijaspora.

**Tabela 8.** Sadržaj makroelemenata (%) ispitivanih uzoraka

UZORAK	H1	H2	H3	H4	S1	S2	S3	S4
SiO <sub>2</sub>	66,30	65,99	69,80	67,55	61,82	59,07	59,15	58,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,65	13,26	12,09	12,94	25,37	25,19	22,92	24,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,51	2,43	2,67	3,65	1,32	3,37	7,25	8,49
TiO <sub>2</sub>	0,34	0,27	0,47	0,40	0,74	0,68	0,26	0,18
MnO	0,03	0,02	0,03	0,04	0,004	0,005	0,2	0,2
Na <sub>2</sub> O	2,49	1,85	1,39	1,58	0,48	0,49	0,12	0,08
K <sub>2</sub> O	4,08	2,77	4,93	4,11	2,62	3,28	0,1	0,08
CaO	1,25	1,20	1,42	1,46	0,09	0,08	0,2	0,09
MgO	0,93	0,57	1,09	0,99	0,77	1,13	0,08	0,08

Izmerene pH vrednosti ispitivanih uzoraka ukazuju na alkalnost H uzoraka, odnosno na kiselost S uzoraka (tabela 9). Vrednosti pH izmerene za H uzorake kreću se od 8,54, vrednost izmerena u H3 uzorku, pa sve do 9,59, što je vrednost izmerena u H1 uzorku. U slučaju S uzoraka, vrednosti pH se kreću od 4,16, vrednost izmerena u S2 uzorku, pa sve do 5,46, što je vrednost izmerena u S3 uzorku.

**Tabela 9.** Izmerene vrednosti pH, električne provodljivosti (EC) i koeficijenta adsorpcije natrijuma (SAR) ispitivanih uzoraka

UZORAK	H1	H2	H3	H4	S1	S2	S3	S4
pH	9,59	9,08	8,54	9,47	4,18	4,16	5,46	5,12
EC ( $\mu$ S/cm)	34,1	56,0	42,0	80,7	59,4	44,8	61,4	67,2
SAR	1,03	3,02	4,46	3,43	0,16	0,75	1,15	0,93

Za razliku od pH, izmerene vrednosti električne provodljivosti uzoraka sa oba lokaliteta imaju slične vrednosti, ali uz nešto više oscilacije u vrednostima izmerenim za H uzorke. Opseg vrednosti električne provodljivosti H uzoraka je 34,1–80,7 $\mu$ S/cm, pri čemu je najniža vrednost opsega izmerena u H1, a najviša u H4 uzorku. Vrednosti električne provodljivosti S uzoraka variraju od 44,8 – 67,2 $\mu$ S/cm, i najniža vrednost opsega izmerena u S2, a najviša u S4 uzorku.

Na osnovu SAR vrednosti ispitivanih uzoraka (tabela 9) uočava se razlika u vrednostima H i S uzoraka. Izmerene SAR vrednosti H uzoraka kreću se u rasponu od 1,03 do 4,46, pri čemu je najniža vrednost izmerena u H1, a najviša u H3 uzorku, dok se za S uzorke te vrednosti kreću u rasponu od 0,16, vrednost izmerena u S1, do 1,15, što je vrednost izmerena u S3 uzorku.

#### 4.5.4 Tumačenje rezultata *badlands* terena formiranih u vulkanoklastičnim stenama

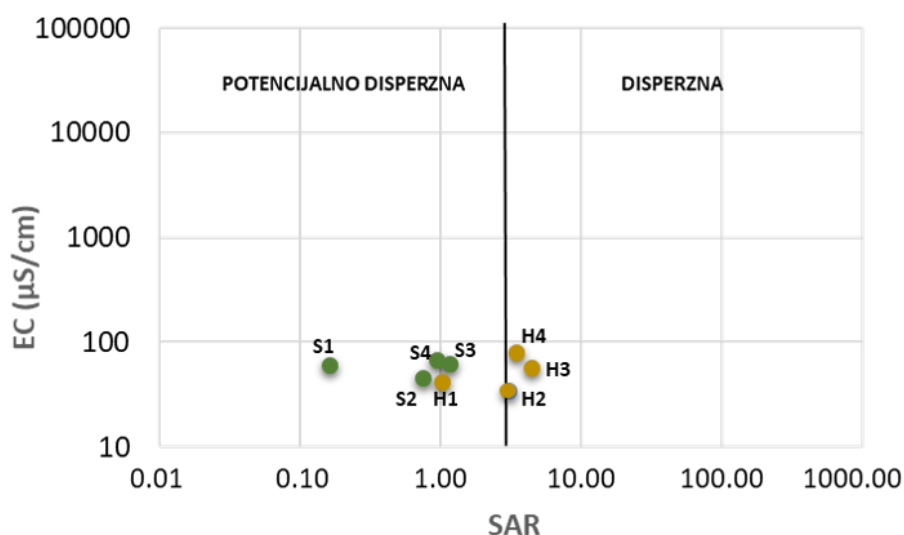
Mineraloški sastav analiziranih uzoraka ukazuje na sadržaj od ili viši od 66% sadržaja SiO<sub>2</sub> u sedimentima sa oba lokaliteta (tabela 9), što ih svrstava u intermedijarno-kisele do kisele vulkanoklastične sedimente (Yanagi i dr, 1992; Yokoyama, 2009). Klasifikacija zasnovana na sadržaju SiO<sub>2</sub>, H uzorke svrstava u kisele, a S uzorke u intermedijarno-kisele vulkanoklastične sedimente. Koncentracija Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> koja je u S3 i S4 uzorku viša nego u ostalim uzorcima rezultat su prisustva hematita/limonita, što je potvrđeno i petrografskom analizom i što je razlog crvenkaste boje ova dva uzorka. Nasuprot tome, mikroskopski potvrđeno prisustvo dijaspora se dovodi u vezu sa izmerenim visokim vrednostima Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Feldspat, kvarc i biotit čine glavne komponente sastava Kazar *badlands* uzoraka, dok su uzorci Đavolje varoši dominantno sačinjeni od kvarca. Svi S uzorci su okarakterisani kao hidrotermalno izmenjeni kristalo-vitroklastični tufovi, a svi H uzorci kao kristalo-vitroklastični tufovi dacito-andezitskog sastava. Pored toga, svi uzorci svrstani su u slične grupacije teksture; Kazar *badlands* u peskovito-alevritske sedimente, uzorak H1 i H4 u nešto krupnijih i H2 i H3 nešto sitnijih čestica, dok S1 i S2 uzorci imaju alevritsko-peskovitu do, u S3 i S4 uzorcima, mikrobrečastu teksturu. Na raspadanje ovih sedimenata direktno utiče sortiranost koja je posledica raspodela veličine čestica. Petrografska analiza ukazuje i na različitu poroznost sedimenata sa ova dva terena i opisuje Kazar *badlands* kao tipičan porozni tuf koji je manje kompaktan nego što je to slučaj kod sedimenata Đavolje varoši. Nasuprot tome, sedimenti Đavolje varoši su kompaktniji, fino-zrni, hidrotermalno izmenjeni silikatni tufovi, bogati kvarcom. Pored toga, karakteriše ih intenzivna sekundarna silifikacija, pri čemu sekundarni kvarc alevritske veličine ispunjava pore i žice piroklastičnog materijala koji je prvobitno nataložen.

Raspodela veličine čestica sedimenata sa oba lokaliteta slična je raspodeli veličine čestica *badlands* terena koji su dobro poznati u literaturi i koji su dominantno alevriti. Kao što je već napomenuto, raspadanje sedimenata i sortiranost, su povezani sa raspodelom veličine čestica, i literatura navodi da je otpornost na raspadanje manja u slučaju dobro sortitanih finih čestica, te da je ta otpornost veća u slučaju sedimenti različite veličine čestica (Terzaghi and Peck, 1967; Kašanin-Grubin, 2013). Takvi literaturni zaključci ukazuju na određeni stepen stabilnost koji je, sa aspekta raspadanja, prisutan kod sedimenata Đavolje Varoši, u poređenju sa sedimentima Kazar *badlands* terena.

Izmerene pH vrednosti ukazuju na alkalnost Kazar *badlands* sedimenata, i na kiselost sedimenata Đavolje varoši. *Badlands* tereni koji su u literaturi dobro ispitivani i poznati imaju pH vrednosti od 8-10 (Faulkner i dr. 2003; Vergari i dr. 2013; Cocco i dr. 2015), dok prema Avcioglu i dr. (2024), pH vrednost uzoraka iz Kapadokije, mogu varirati od alkalnih do kiselih. Svih osam ispitivanih uzoraka ulazi u relativno mali opseg vrednosti električne provodljivosti. Za razliku od analiziranih, električna provodljivost izmerena na tufovima iz Kapadokije ima nešto niže vrednosti električne provodljivosti, koji se kreću od 13 do 24,3 $\mu$ S/cm, dok drugi *badlands* tereni iz Turske pokrivaju širok opseg EC vrednosti koji ide do 780 $\mu$ S/cm (Avcioglu i dr., 2024).

Na osnovu SAR/EC odnosa koji predstavlja indeks disperznosti materijala (slika 71), svi H uzorci, izuzev H1 uzorka spadaju u kategoriju disperznih materijala, a sva četiri S uzorka, zajedno sa H1 uzorkom, spadaju u kategoriju potencijalno disperznih materijala. Vrednosti SAR-a analiziranih uzoraka dale su indicaciju za navedenu interpretaciju SAR/EC odnosa. Naime, materijali se takođe mogu klasifikovati i samo na osnovu SAR vrednosti, pri čemu SAR vrednost 3 predstavlja granicu, pa se za materijale koji imaju SAR>3 smatra da se mogu spontano dispergovati, a za ona koja imaju SAR<3 smatra da im je potreban duži kontakt sa vodom da bi se dispergovali (Rengasamy i dr. 1984). Na osnovu klasifikacija baziranih na SAR/EC odnosu i na osnovu izračunatih SAR vrednosti, očekivalo bi se da se H uzorci, čiji je SAR primetno viši nego u S uzorcima, sa izuzetkom H1 uzorka, disperguju spontano i lakše nego S uzorci.

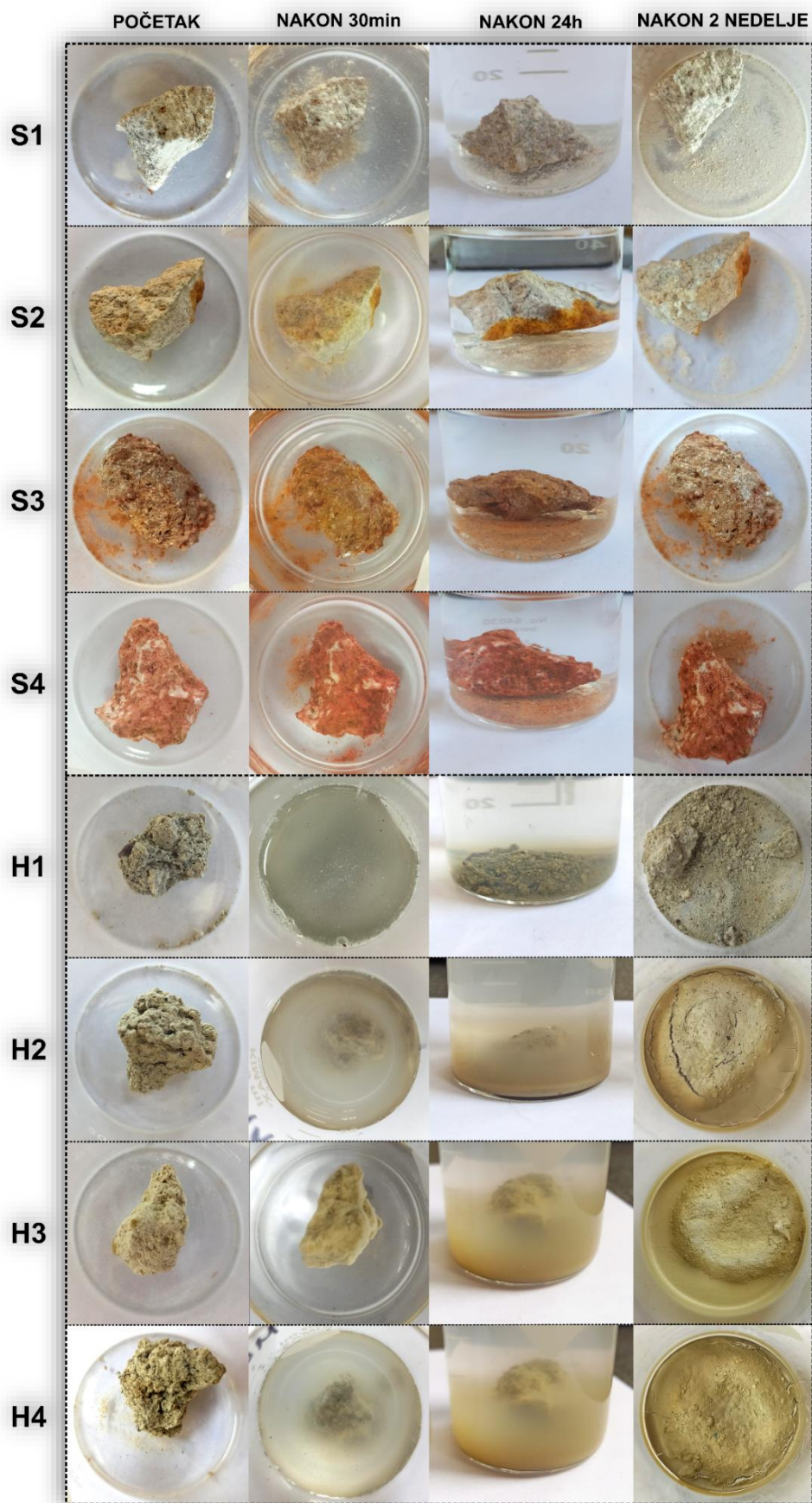


**Slika 71.** Odnos SAR i EC ispitivanih uzoraka, u domenima disperzije koju su utvrdili Rengasami i dr. (1984).

Kako su tufozni sedimenti sa oba lokaliteta klasifikovani kao potencijalno disperzni do disperzni materijal, i kako su na merenim parametrima uočene određene sličnosti, ali i razlike, na svih osam uzoraka je sproveden kratak test potapanja. Test potapanja predstavlja modifikaciju Emerson (1967) testa i detaljno je opisan u metodologiji.

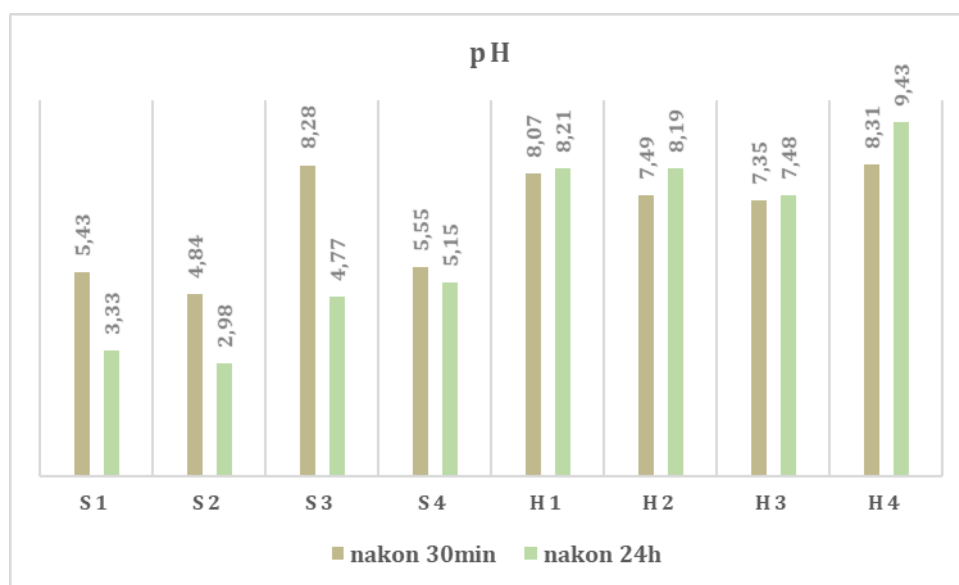
Na slici 72 prikazane su zabeležene promene nastale na uzorcima u svakoj od faza testa. Na potopljenim uzorcima Đavolje varoši, primetne površinske fizičke promene se nisu desile ni u jednoj fazi, ni nakon 30min, ni nakon 24h, niti nakon 2 nedelje. Kroz sve faze testa su prvobitni fragmenti sedimenta ostali gotovo netaknuti. Samo se zanemarljivo mala količina finoizrnog materijala dispergovala sa površine fragmenata.

Za razliku od Đavolje varoši, u uzorcima Kazar *badlands* terena uočene su vidljivije promene. Voda u kojoj su potopljeni uzorci je nakon 30min postala najmutnija kod H1 uzorka, dok je u slučaju uzorka H3, voda bila najbistrija. Nakon što su se fine čestice delimično ili u potpunosti slegle nakon 24h, uočeno je da se najviše raspao uzorak H1, dok su preostali H uzorci zadržali svoj početni oblik. Međutim, iako se nisu raspali, na površini tih uzoraka je uočeno formiranje „sapunjavog“ površinskog sloja. Kašanin-Grubin (2013) je formiranje sličnog „sapunjavog“ gela nakon potapanja uočila na površini peščara iz Dinosaur parka u Kanadi. Zbog niske propustljivosti na samom početku, voda koja se inicijalno infiltrira, doseže samo površinu sedimenta i dovodi do disperzije gline i do stvaranja gela koji dalje sprečava prodiranje vlage u sediment (Bryan i dr., 1984). Bez obzira na to, dva dana po uranjanju, voda je dospela do dubljih delova uzoraka sedimenta, što je za posledicu imalo potpunu disperziju i nastanak ljuspicašastih fragmenta nakon sušenja. Doprinos formiranju „sapunjavog“ gela H uzoraka, što nije bio slučaj sa peščarima iz Dinosaur park-a, daju zeoliti koju su dominantno prisutni u H uzorcima. Početno stvaranje „sapunjavog“ sloja na površini može se dovesti u vezu sa poroznošću, velikom reaktivnom površinom i visokim kapacitetom zadržavanja vode koju zeoliti imaju (Kianfar, 2020). Međutim, i pored toga voda vremenom prodire u dublje delove sedimenta, narušava njegovu strukturu i dovodeći do njegove disperzije. Dve nedelje nakon isparavanja vode i sušenja uzoraka, uočilo se da su se svi H uzorci, izuzev H1 potpuno dispergovali do sitnih čestica koje su se potom ponovo slegile. Sa druge strane, stepen raspadanja H1 uzorka je ostao gotovo isti kakav je bio i nakon 24h od uranjanja.



Slika 72. Fotografije sedimenata Đavolje varoši (S) i Kazar *badlands* (H) terena kroz tri faze testa potapanja.

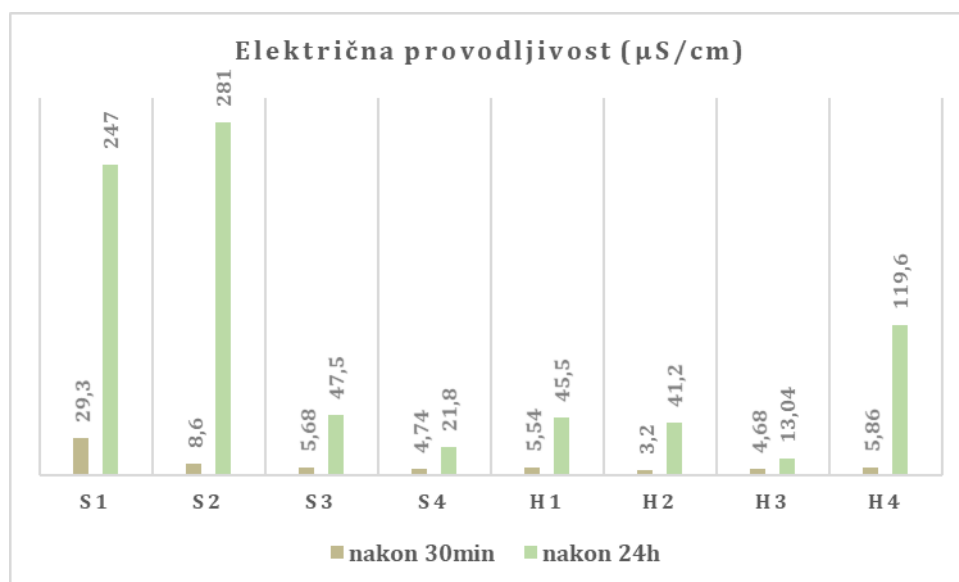
Na slici 73 prikazane su promene pH vrednosti izmerene 30min od potapanja i 24h nakon potapanja. Vrednosti pH izmerene 30min nakon potapanja uzoraka Đavolje varoši su u rasponu od 2,98–5,13, dok su vrednosti izmerene 30min nakon potapanja Kazar *badlands* sedimentata u rasponu od 7,35–8,31. Nakon 24h uočena je razlika u trendovima pH vrednosti kod H i S uzoraka. Vrednosti pH su u slučaju S uzoraka opale, a u slučaju H uzoraka porasle. Takav trend se može dovesti u vezu sa visokim sadržajem silicijuma, i sa rastvorljivošću SiO<sub>2</sub> koja je različita pri različitim pH vrednostima. Weixia i dr. 2015 navodi da je pri pH 2-4, a potom i pri pH 8-10,5 koloidni silicijum najstabilniji, dok je njegova stabilnost pri pH 6 najmanja. Na pH<5 zbog neutralnosti nastale nestankom hidroksidnih jona, dolazi do odbijanja čestica silicijuma. Čestice silicijuma teže da se vežu siloksanskim (Si-O-Si) vezama pri pH 5-8, pri čemu se siloksanska veza stvara između dva molekula silicijuma, a negativno naelektrisanu površinu jedne čestice silicijuma se sa drugom česticom vezuje preko hidronijum jona. Čestice silicijuma se pri pH 8-10,5 stabilizuju amonijumovim ili natrijumovim katjonom, ili se odbijaju kao posledica negativnog naelektrisanja (Gallagher i dr. 2007). Gore objašnjenim mehanizmima i tendencijom silicijuma da dostigne stabilnost se objašnjava porast pH vrednost u H uzorcima, odnosno njegovo smanjenje u S uzorcima.



**Slika 73.** Izmerene vrednosti pH ispitivanih uzoraka nakon 30min i nakon 24h od potapanja.

Na slici 74 prikazane su vrednosti električne provodljivosti izmerene 30min i 24h nakon potapanja. Električna provodljivost svih osam uzoraka je porasla nakon 24h, međutim, poredeći EC opsege i nakon 30min, a i opsege vrednost nakon 24h, uočava se da su oba viša kod uzoraka iz Đavolje varoši. Izmerene vrednosti električne provodljivosti uzoraka S su se povećale, i to sa opsega vrednosti 4,74–29,3μS/cm na opseg vrednosti 21,8–281μS/cm. Vrednost od 4,74μS/cm izmerena je u S4, a vrednost od 29,3μS/cm u S1 uzorku. Međutim, nakon 24h najveći skok, u poređenju sa početnom vrednošću, izmeren je u S2 uzorku.

Električna provodljivost izmerena u S uzorcima se takođe povećala nakon 24h i najniža vrednost električne provodljivosti od 3,2μS/cm je izmerena u H2 uzorku, a najviša vrednost izmerena je u H4 uzorku i iznosi 5,86μS/cm. Nakon 24h sata od potapanja, najniža vrednost električne provodljivosti bila je 13,04μS/cm i izmerena je u uzorku H3, a najviša od 119,6μS/cm u H4 uzorku.



**Slika 74.** Izmerene vrednosti električne provodljivost ispitivanih uzoraka nakon 30min i nakon 24h od potapanja.

Prema eksperimentu izvedenom na sedimentima istog litološkog sastava, opisane promene električne provodljivosti posledica su potencijalnih sorpcionih procesa između vode i površine uzorka koji su povezani sa različitim vremenom izloženosti sedimenta padavinama. Inicijalni period od 30min koji je sediment u ovom testu potapanja proveo u kontaktu sa vodom zapravo nije bio dovoljan da se dostigne 3-33x veća električna provodljivost koja je izmerena nakon 24h od potapanja. U navedenom inicijalnom periodu testa je najverovatnije, mehanizmom površinske adsorpcije, došlo samo do ispiranja jona sa površine sedimenta. Tek nakon 24h, kada je voda provela više vremena u kontaktu sa sedimentom i dosegla i do podpovršinskih delova uzorka, u određenoj meri dovela i do njihovog raspadanja povećavajući im reakcionu površinu, došlo je do povećanja koncentracije jona u rastvoru, a posledično i do povećanja električne provodljivosti.

Promene na uzorcima koje su se desile i koje su opisane su u skladu sa rezultatima SAR/EC odnosa (slika 71) prema kojim se H1 i svi S uzorci klasifikuju kao potencijalno disperzni, a uzorci H2-H4 kao disperzni materijali. Međutim to nije u skladu sa gore navedenom povezanošću sortiranosti čestica i stepena dezintegracije koja je poznata kod već ispitivanih *badlands* terena, što može ukazati na dve mogućnosti. Prva mogućnost je ta da oba ispitivana materijala imaju bimodalnu raspodelu čestica. Druga mogućnost je da ovi materijali predstavljaju odstupanje od pravila koje je poznato za već ispitivane *badlands* sedimente i da se zbog svog sastava ovi materijali ne ponašaju kao drugi klastični sedimenti.

Iako je bimodalna distribucija veličine čestica svojstvena za sedimente sa oba lokaliteta, u uzorcima sa Kazar *badlands* terena je izraženija razlika između veličine čestica. Bez obzira na to, u slučaju ovih materijala, sortiranost nije diskriminacioni faktor i oba materijala su disperzna. Kod sedimenata sa Kazar *badlands* terena dominantno je mehaničko raspadanje, dok kompaktnost uzorka Đavolje varoši koja je posledica procesa silifikacije, ove sedimente čini otpornijim, jer se finije čestice primarno hemijski rastvaraju.

Odsustvo poroznosti dokazano na petrografskim analizama Đavolje varoši takođe može biti objašnjeno nepotpunim procesima silifikacije kvarca veličine prašine koji ispunjavaju pore između primarnih minerala koji su veličine peska.

Rezultati dobijeni potapanjem uzoraka ukazuju na to da procesi raspadanja i uzoraka Kazar *badlands* terena i Đavolje varoši ne dopiru do dubljih delova sedimenata, odnosno da u

prirodnom okruženju procesi raspadanja nisu duboki. Šta više, za sedimente Đavolje varoši se može reći da na površinskom sloju strana zemljanih piramida ne dolazi do formiranja korice raspadanja, već da se one, usled dominacije hemijskih procesa, kao što je rastvaranje silicijuma, zapravo rastvaraju i „ljušte“, čineći zemljane piramide jako strmim, sa nagibom od 80-90°. Takvo ponašanje najverovatnije objašnjava manju disperznost S uzoraka u testu potapanja. Na sedimentima Kazar *badlands* terena, terena manje strmog nego što je slučaj sa zemljanim piramidama Đavolje varoši, procesi koji dominiraju su slični procesima peščara u Dinosaur park-u tokom kojih dolazi do formiranja površinske korice pod uticajem vremenskih uslova. Prema Kašanin-Grubin (2013) tako formirana korica, ispod koje se nalazi neraspadnuti sediment, čini zrna rastresitijom i podložnijim procesima erozije. Tako neraspadnut sediment, inicijalno zaštićen formiranom koricom, ciklično nakon svakog površinskog oticanja i spiranja te iste korice biva ponovo izložen vremenskim uslovima, a zatim i ponovnom procesu formiranja novog sloja korice. Iako su sedimenti Kazar *badlands* terena bogati zeolitima, a sedimenti Dinosaur park-a kaolinitom i smektitom, na oba terena se dominantno odvijaju slični procesi. Zeoliti i pored toga što su sitnozrni minerali, po sastavu i ponašanju se ne svrstavaju u minerale gline koji su svojstveni već poznatim *badlands* terenima. Međutim za oba terena je svojstveno prisustvo korice raspadanja na površinama nagiba, koji površinu čine rastresitijom i podložnijom eroziji, a ispod koje se nalazi neraspadnuti sediment. Shodno svemu navedenom, i mehanizam koji uključuje koricu raspadanja, kao i mehanizam koji uključuje procese silifikacije se ne trebaju posmatrati kao izuzeci, već kao karakteristike *badlands* materijala, koje su sada i dokazane.

#### 4.5.5 Ishod ispitivanja *badlands* terena formiranih u vulkanoklastičnim stenama

Uzorci vulkanoklastičnih stena Kazar *badlands* terena u Mađarskoj i Đavolje varoši u Srbiji ispitivani su sa ciljem proširenja već postojećih saznanja o materijalima u kojima se *badlands* tereni mogu formirati. Dobijeni rezultati tog ispitivanja navode na zaključke da:

1) Erodibilnost Kazar *badlands* terena i Đavolje varoši je odraz njihove slične bimodalne raspodele veličine čestica, što ih čini generalno sličnim već poznatim i ispitivanim *badlands* terenima koji su klasifikovani kao alevritsko-glinoviti i glinovito-alevritski materijali.

U uzorcima sa Kazar *badlands* terena je izraženija razlika između veličina čestica. Bez obzira na to, kod ispitivanih materijala sortiranost nije diskriminacioni faktor i oba materijala su disperzna. U slučaju Kazar *badlands* terena dominantno je mehaničko raspadanje, dok kompaktnost uzoraka Đavolje varoši koja je posledica procesa silifikacije, ove sedimente čini otpornijim, jer se finije čestice primarno hemijski rastvaraju.

2) Razlika između ispitivanih sedimenata i sedimenata već dobro poznatih *badlands* terena se javlja pri poređenju njihovog mineraloškog sastava.

Za već dobro poznate *badlands* terene svojstveni su minerali poput kalcita, dolomita, gipsa i minerala glina, koji u uzorcima ispitivanih vulkanoklastičnih sedimenata nisu prisutni. Kvarc je dominantan u sedimentima Đavolje varoši, dok su zeoliti, feldspati, kvarc i biotit dominantni u sastavu sedimenata Kazar *badlands* terena.

3) Razlika između ispitivanih sedimenata i sedimenata već dobro poznatih *badlands* terena javlja se i pri poređenju njihovih procesa raspadanja.

Mehaničko raspadanje je dominantno na Kazar *badlands* terenu, dok se u slučaju sedimenata Đavolje varoši radi o hemijskom raspadanju. Proces rastvaranja silicijuma dovode do rastvaranja površina strana zemljanih piramida Đavolje varoši, i do njihovog „ljuštenja“.

Proces konstantnog formiranja i spiranja korice raspadanja, i posledično izlaganje neraspadnutih sedimenata Kazar *badlands* terena daljim geomorfološkim procesima dominira na ovo terenu.

Na osnovu svih rezultata se može reći da su različita svojstva sedimenata Đavolje varoši i Kazar *badlands* terena jedinstvena za svaku od tih lokaliteta, ali da su ta dva terena ipak međusobno više slična, nego što su slična drugim, već dobro poznatim *badlands* sedimentima.

Shodno tome, ovo istraživanje je sugerišući da je vulkanoklastični materijal, iako specifičan za svaki lokalitet ipak dovoljno „loš“ tj. nestabilan/erodibilan da formira jedinstvene *badlands* formacije, otvarajući nova naučna pitanja i, uz pomoć budućih istraživanja, mogućnost uspostavljanja nove podgrupe u *badlands* klasifikaciji, koja bi uključivala samo vulkanoklastične stene i male terene poput ovih stavljala na istraživačku i geoturističku kartu.

## 5. ZAKLJUČAK

Povezivanje specifičnih reakcija različitih tipova *badlands* sedimenata sa klimatskim uslovima, kao i razumevanje odgovora terena na globalne promene predstavlja centralni fokus ove teze. Postavljena hipoteza ove doktorske disertacije da vrsta minerala i njihova fizičko-hemijska svojstva u sedimentu znatno utiče na njegovu osetljivost i otpornost je potvrđena kao tačna. Dobijeni rezultati su dokazali da je za određivanje dinamičke evolucije *badlands* terena potrebno sagledati upravo njihova mineraloška i fizičko-hemijska svojstva. Time su ispunjeni naučni ciljevi predložene doktorske disertacije koji obuhvataju:

- 1) razumevanje osetljivosti i otpornosti sedimenata pod različitim, simuliranim klimatskim uslovima u odnosu na njihov litološki sastav;

Klimatski eksperiment na sedimentima istog litološkog sastava pored vrste padavina istakao je i dužinu trajanja padavina odnosno dužinu izloženosti sedimenata padavinama kao značajan za procese raspadanja. Klimatski eksperiment na sedimentima različitog litološkog sastava naglasio je značaj različitog sastava sedimenata na procese raspadanja i ukazao na mogućnost diferencijacije sedimenata prema mehanizmima njihove degradacije i to na sedimente:

- sa dominantnim procesima hemijskog raspadanja;
- sa isključivo hibridnim hemijsko-fizičkim raspadanjem i hibridnim fizičko-hemijskim sa odloženim hemijskim raspadanjem;
- podložne isključivo intenzivnim i dugotrajnim mehaničkim procesima – inertnije od ostalih grupa.

Ovako dobijeni rezultati su potvrdili hipotezu o ključnom uticaju litološkog sastava na nivo erozije.

- 2) fizičko-hemijska karakterizacija neraspadnutih uzoraka sedimenata;

Fizičko-hemijskom karakterizacijom obuhvaćeno je preko 100 uzoraka *badlands* sedimenata sa različitih lokaliteta i klimatskih regija, uključujući lokalitete u Italiji, Španiji, Kanadi, Kini, Turskoj, Rumuniji, Izraelu, Mađarskoj i Srbiji. U okviru karakterizacije su definisane: pH vrednost, električna provodljivost, SAR, granulometrijski sastav i sadržaj makroelemenata. Iako su do sada *badlands* sedimenti specifično okarakterisani, rezultati formirane baze fizičko-hemijskih podataka ukazuju na širok opseg vrednosti svih merenih parametara. Tako široki opsezi vrednosti su dali osnov za novu klasifikaciju, time ispunjavajući naredni postavljen cilj disertacije. Karakterizacijom sedimenata, kao specifične, istakle su se stene sa metamorfnim, magmatskim i tufoznim karakterom kojima u dosadašnjim studijama nije posvećivano previše pažnje.

- 3) klasifikacija uzoraka na osnovu njihovih fizičko-hemijskih svojstava;

Analiza okarakterisanih *badlands* sedimenata, u kombinaciji sa saznanjima o disperznosti i mineraloškom sastavu sedimenata, izdvojila je granulometrijski sastav i sadržaj CaO i SiO<sub>2</sub> kao ključne parametre u novoj klasifikaciji koja se može dovesti u vezu sa odgovarajućim procesima raspadanja (slika 60). *Badlands* sedimenti formiraju šest grupa:

- Si-terigeni klastiti – peskoviti alevriti i alevritski peščari izgrađeni od terigenih minerala;

- piroklastiti - tufovi;
- Ca-krupni klastiti – peskovito-alevritski do peskovito-alevritsko-glinoviti klastiti karbonatnog veziva;
- Ca-sitni klastiti – glinoviti alevriti do alevritske gline karbonatnog veziva;
- tufozni klastiti – alevritske gline tufoznog karaktera (npr. prisustvo analcima);
- finoizrni klastiti – alevritsko-glinoviti do glinovito-alevritski klastiti okarakterisani kao tipični *badlands* materijali.

Kvantifikacijom odnosa  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  za ispitivane uzorke, pokazalo se da odnos  $\text{SiO}_2/\text{CaO} < 10$  pored tipičnih *badlands* sedimenata (finoizrni i tufozni) mogu imati još samo Ca-krupni i sitni klastiti. Sa druge strane, odnos  $\text{SiO}_2/\text{CaO} > 20$  pored tipičnih *badlands* sedimenata (finoizrni i tufozni) imaju i Si-terigeni klastiti i piroklastiti. U opsegu vrednosti  $\text{SiO}_2/\text{CaO} = 10-20$  nalaze se tipični finoizrni *badlands* tereni koji ispunjavaju sva tri u kriterijuma disperznosti.

## LITERATURA

- Agostini, S., Savaşçin, M.Y., Di Giuseppe, P., Di Stefano, F., Karaoğlu, Ö., Lustrino, M., Manetti, P., Ersoy, Y., Kürüm, S., Önal, A.O., 2019. Neogene volcanism in Elazığ-Tunceli area (eastern Anatolia): Geochronological and petrological constraints. *Italian Journal of Geosciences*, 138(3), 435–455. <https://doi.org/10.3301/IJG.2019.18>
- Antić, N., Kašanin-Grubin, M., Štrbac, S., Xie, C., Mijatović, N., Tosti, T., Jovančićević, B., 2023. Type of precipitation and durations of sediment exposure as important weathering factors. *Catena*, 228, 107192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107192>
- Avcioglu, A., Kašanin-Grubin, M., Antić, N., Moreno de las Heras, M., Mohammedi, A., Schwanghart, W., Yetemen, O., Tosti, T., Dojčinović, B., Gorüm, T., 2024. How does climate seasonality influence weathering processes in badland landscapes? *Catena*, 243, 108136. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108136>
- Bergaya, F., Lagaly, G., 2011. General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. in: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*, first ed. Elsevier Science. pp. 1–19. eBook ISBN: 9780080457635
- Bertalan, L., Túri, Z., Szabó, G., 2016. UAS photogrammetry and object-based image analysis (GEOBIA): erosion monitoring at the Kazár badland, Hungary. *Landscape & Environment*, 10, 169–178. <https://doi.org/10.21120/LE/10/3-4/10>
- Birkeland, P.W., 1999. *Soils and Geomorphology*, 3rd ed. Oxford University Press, New York.
- Brigatti, M.F., Galan, E., Theng, B.K.G., 2011. Structures and Mineralogy of Clay Minerals. in: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*, first ed. Elsevier Science. pp. 21–81. eBook ISBN: 9780080457635
- Bryan, R.B., Imeson, A.C., Campbell, I.A., 1984. Solute release and sediment entrainment on microcatchments in the Dinosaur park badlands, Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 71, 79–106. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90072-6)
- Bryan, R.B., Yair, A., 1982. *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books, Norwich, England.
- Canton, Y., Sole-Benet, A., Queralt, I., Pini, R., 2001. Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches. *Catena*, 44, 111–132. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00153-3)
- Cao, Y., Song, H., Chu, D., Yong, D., Tian, L., Wang, Y., Tong, J., 2018. Intensified chemical weathering during the Permian-Triassic transition recorded in terrestrial and marine successions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 519, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.012>
- Ceryan, S., 2012. Weathering Indices for Assessment of Weathering Effect and Classification of Weathered Rocks: A Case Study from NE Turkey. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/25740>
- Chamberlain, E.J., 1989. Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures. In: Rathmayer, H., (Ed.), *Proceedings of the International Conference*

on Frost in Geotechnical Engineering, Saariselka, Finland. Technical Research Centre of Finland, Espoo, pp. 863–893.

Chen, Z., Yan, L., Peng, H., Shi, H., 2021. Temperature Controls on the Erosion of Badland Slopes in the Nanxiong Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 9, 712134. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.712134>

Chittleborough, D.J., 1991. Indices of weathering for soils and paleosols formed on silicate rocks. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38, 115–120. <https://doi.org/10.1080/08120099108727959>

Christopherson, R.W., 2005. *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*, fifth ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. ISBN-13: 9780131441965

Cocco, S., Brecciaroli, G., Agnelli, A., Weindorf, D., Corti, G., 2015. Soil genesis and evolution on calanchi (badland-like landform) of central Italy. *Geomorphology*, 248, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.031>

Darmody, R.G., Thorn, C.E., Allen, C.E., 2005. Chemical weathering and boulder mantles, Kärkevagge, Swedish Lapland. *Geomorphology*, 67, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.07.011>

de Jayawardena, U.S., Izawa, E., 1994. A new Chemical Index of Weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. *Engineering Geology*, 36, 303–310. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90011-6)

Desir, G., Marin, C., 2003. Estudio de la erosión en zonas de interrill, Depresión del Ebro. *Edafologia*, 10, 207–214.

Dimitrijević, M., Drakulić, N., 1958. Kristalasti škriljci Jablanice. *Zbornik Rudarsko-geološkog fakulteta*, 6, 1–32.

Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A., Malpas, J., 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63, 99–119. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00073-4)

Emerson, W.W., 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 5, 47–57. <https://doi.org/10.1071/SR9670047>

Ercan, T., Dinçel, A., Metin, S., Türkecan, A., Güney, E., 1978. Uşak yöresindeki Neojen havzalarının jeolojisi. *Geological Society of Turkey Bulletin*, 21, 97–106 (in Turkish with an English abstract).

Farres, P., 1978. The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes*, 3, 243–254. <https://doi.org/10.1002/esp.3290030304>

Faulkner, H., 2013. Badlands in marl lithologies: a field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*, 106, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.005>

- Faulkner, H., Alexander, R., Wilson, B., 2003. Changes to the dispersive characteristics of soils along an evolutionary slope sequence in the Vera badlands, southeast Spain: Implications for site stabilisation. *Catena*, 50, 243–254. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00137-6)
- Faulkner, H., Spivey, D., Alexander, R., 2000. The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almería, Southern Spain. *Geomorphology*, 35, 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00024-6)
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2)
- Fedorov, A.A., Basisty, V.P., 1974. Winter freezing and chemical properties of meadow brown soils. *Sibirskii Vestnik Selskokhozyaistvennoi Nauki*, 4, 8–12.
- Gallagher, P., Conlee, C., Rollins, K., 2007. Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 186–196. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(186\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(186))
- Gallart, F., Solé-Benet, A., Puigdefábregas, J., Lázaro, R., 2002. Badland systems in the Mediterranean. *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels*, 299–326.
- García-Ruiz, J.M., 2011. A review of piping processes in Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37(1), 7–44. <https://doi.org/10.18172/cig.1243>
- Gerits, J., Imeson, A.C., Verstraten, J.M., Bryan, R.B., 1987. Rill development and badland regolith properties. *Catena Supplement*, 8, 141–160.
- Gupta, A.S., Rao, K.S., 2000. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56, 257–274. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00090-3)
- Harnois, L., 1988. The CIW index: a new Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, 55, 319–322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- Harvey, A., 1992. Process interactions, temporal scales and the development of hillslope gully systems: Howgill Fells, northwest England. *Geomorphology*, 5, 323–344. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(92\)90012-D](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90012-D)
- Herece, E.I., Acar, Ş., 2016. Upper Cretaceous-Tertiary geology/stratigraphy of Pertek and its vicinity (Tunceli, Turkey). *Bulletin of Mineral Research and Exploration*, 153, 1–44. <https://doi.org/10.19111/bmre.38353>
- Higuchi, K., Chigira, M., Lee, D.H., 2013. High rates of erosion and rapid weathering in a Plio-Pleistocene mudstone badland, Taiwan. *Catena*, 106, 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.005>

Horváth, G., Csüllög, G., 2013. A New Slovakian-Hungarian Cross-Border Geopark in Central Europe – Possibility for Promoting Better Connections Between the Two Countries. *European Countryside*, 5, 146–162. <https://doi.org/10.2478/euco-2013-0010>

Horváth, G., Karancsi, Z., 2011. Intensity of the anthropogenic effects on a small landscape unit in North Hungary. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 55, 37–50. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2011/0055S1-0036>

Huang, J., Xie, P., 2015. Analysis of Acid Rain in Shaoguan City Present Situation and Prevention Measures. *Guangdong Chemical Industry*, 42, 184–185.

Imeson, A., Kwaad, F.J.P.M., Verstraten, J.M., 1982. The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco. In: Bryan, R., Yair, A. (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books, Norwich, pp. 47–69.

Imeson, A.C., 1983. Studies of erosion thresholds in semi-arid areas: field measurements of soil loss and infiltration in northern Morocco. *Catena Supplement*, 4, 79–89.

Karátsson, D., 2006. Aspects of Quaternary relief evolution of Miocene volcanic areas in Hungary: A review. *Acta Geologica Hungarica*, 49(4), 285–309. <https://doi.org/10.1556/AGeol.49.2006.4.1>

Kaşanin-Grubin, M., 2006. Influence of clay mineralogy on rill system development on badland hillslopes. Unpublished PhD thesis, Department of Physical Geography, University of Toronto, Canada.

Kaşanin-Grubin, M., 2008. Badlands and environmental change. *Geographica Helvetica*, 63(1), 15–25. <https://doi.org/10.5194/gh-63-15-2008>

Kaşanin-Grubin, M., 2013. Clay mineralogy as a crucial factor in badland hillslope processes. *Catena*, 106, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.008>

Kaşanin-Grubin, M., Bryan, R., 2007. Lithological Properties and Weathering Response on Badland Hillslopes. *Catena*, 70(1), 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.001>

Kaşanin-Grubin, M., Vergari, F., Troiani, F., Della Seta, M., 2018. The Role of Lithology: Parent Material Controls on Badland Development. In: Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F., Kuhn, N.J., (Eds.), *Badlands Dynamics in a Context of Global Change*. Elsevier, pp. 61–111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00003-4>

Kianfar, E., 2020. Zeolites: Properties, Applications, Modification and Selectivity. In: Mahler, A. (Ed.), *Zeolites: Advances in Research and Applications*. Nova Science Publishers Inc, NY, USA.

Liang, G., Liu, X., Chen, X., Qiu, Q., Zhang, D., Chu, G., Liu, J., Liu, S., Zhou, G., 2013. Response of Soil Respiration to Acid Rain in Forests of Different Maturity in Southern China. *PLoS One*, 8(4), e62267. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062207>

Likens, G.E., Butler, T.J., 2018. Acid Rain: Causes, Consequences, and Recovery in Terrestrial, Aquatic, and Human Systems. In: *Encyclopedia of the Anthropocene*. Elsevier, pp. 23–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09977-8>

- Luo, G., Peng, H., Zhang, S., Yan, L., Dong, Y., 2021. Exploring the variations of redbed badlands and their driving forces in the nanxiong basin, southern china: A geographically weighted regression with gridded data. *Journal of Sensors*, 2021, 6694407. <https://doi.org/10.1155/2021/6694407>
- Martínez-Murillo, J.F., Nadal-Romero, E., 2018. Perspectives on Badland Studies in the Context of Global Change. In: Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F., Kuhn, N.J., (Eds.), *Badlands Dynamics in a Context of Global Change*. Elsevier, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00001-0>
- McCloskey, G.L., Wasson, R.J., Boggs, G.S., Douglas, M., 2016. Timing and causes of gully erosion in the riparian zone of the semi-arid tropical Victoria River, Australia: management implications. *Geomorphology*, 266, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.009>
- Miller, R.D., 1980. Freezing phenomena in soils. In: *Applications of Soil Physics*. Academic Press, San Diego, pp. 254–299.
- Moreno-de las Heras, M., Gallart, F., 2018. The Origin of Badlands. In: Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F., Kuhn, N.J., (Eds.), *Badlands Dynamics in a Context of Global Change*. Elsevier, pp. 27–59. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00002-2>
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Oro, V., Pisinov, B., Trkulja, N., Stanisavljević, R., Belošević, S., Tabaković, M., Sekulić, Z.Z., 2023. Nematofauna of the Natural Park “Devil’s Town”. *Forests*, 14, 2241. <https://doi.org/10.3390/f14112241>
- Parker, A., 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107, 501–504. <https://doi.org/10.1017/S0016756800058581>
- Peng, H., Yan, L., Chen, Z., Simonson, S., Luo, G., 2015. A preliminary study of desertification in red beds in the humid region of Southern China. *Acta Geographica Sinica*, 70(11), 1699–1707. (In Chinese). <https://doi.org/10.11821/dlxb201511001>
- Piccarreta, M., Faulkner, H., Bentivenga, M., Capolongo, D., 2006. The influence of physico-chemical material properties on erosion processes in the badlands of Basilicata, Southern Italy. *Geomorphology*, 81, 235–251. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.010>
- Pintér, Z., Horváth, G., Jakab, G., Karancsi, Z., 2015. Rhyolite Badland at Kazár. In: Lóczy, D. (Ed.), *Landscapes and Landforms of Hungary*. Springer International Publishing, World Geomorphological Landscapes, pp. 149–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-08997-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08997-3_18)
- Pintér, Z., Prakfalvi, P., Karancsi, Z., Horváth, G., 2009. Medves-vidéki riolituffák eróziós formakincse (Erosional forms of rhyolite tuffs in the Medves region). *Földrajzi Közlemények*, 133(3), 219–238.
- Price, J.R., Velbel, M.A., 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202, 397–416. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.11.001>

Pulice, I., Di Leo, P., Robustelli, G., Scarciglia, F., Cavalcante, F., Belviso, C., 2013. Control of climate and local topography on dynamic evolution of badland from southern Italy (Calabria). *Catena*, 109, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.001>

Pusch, R., 2011. Mechanical Properties of Clays and Clay Minerals. in: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*, first ed. Elsevier Science. pp. 247–260. eBook ISBN: 9780080457635.

Radinović, Đ., 1984. *Klimatologija - Opšta i Regionalna*. Grafički centar izdavača, Beograd.

Regüés, D., Llorens, P., Pardini, G., Pini, R., Gallart, F., 1993. Physical weathering and regolith behaviour in a high erosion rate badland area at the Pyrenees: research design and first results. *Pirineos*, 141-142, 63–84. <https://doi.org/10.3989/pirineos.1993.v141-142.164>

Regüés, D., Pardini, G., Gallart, F., 1995. Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrock as dependent on seasonal weather conditions in a badland area at Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Catena*, 25(1–4), 199–212. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00010-P](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00010-P)

Rengasamy, P., Greene, R.S.B., Ford, G.W., Mehanni, A.H., 1984. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. *Australian Journal of Soil Research*, 22, 413–431. <https://doi.org/10.1071/SR9840413>

Ruxton, B.P., 1968. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journal of Geology*, 76, 518–527. <https://doi.org/10.1086/627357>

Sariş, F., Hannah, D.M., Eastwood, W.J., 2010. Spatial variability of precipitation regimes over Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 55(2), 234–249. <https://doi.org/10.1080/02626660903546142>

Schoonheydt, R.A., Johnston, C., 2011. Surface and Interface Chemistry of Clay Minerals. in: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*, first ed. Elsevier Science. pp. 83–121. eBook ISBN: 9780080457635.

Şen, E., Aydar, E., Bayhan, H., Gourgaud, A., 2014. Alkali bazalt ve piroklastik çökellerin volkanolojik özellikleri, Kula volkanları, Batı Anadolu. *Yerbilimleri*, 35(3), 141–168. <https://doi.org/10.17824/huyuamd.20663>

Shepard, F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24(3), 151–158. <https://doi.org/10.1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D>

SRPS EN ISO 17892-4, 2017. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 4: Određivanje granulometrijskog sastava*. Institut za standardizaciju Srbije (ISS), Beograd.

Stefanović, M., Jovančićević, B., Tosti, T., Dojčinović, B., Moreno-de-las-Heras, M., Gallart, F., Kašanin-Grubin, M., 2026. Humid badlands weathering patterns governed by gypsum and smectite presence. *Catena*, 268, 110015. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2026.110015>

- Strawn, D.G., 2021. Sorption Mechanisms of Chemicals in Soils. *Soil Systems*, 5, 13. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010013>
- Tan Dang, H., Xuan Hoan, N., Chou, C., Chen, B., 2021. Preparation of cancrinite-type zeolite from diatomaceous earth as transesterification catalysts for biodiesel production. *Renewable Energy*, 174, 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.068>
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Torra, O., Puig-Polo, C., Hürlimann, M., Latron, J., 2025. Analysis of erosive processes and erosion rate by in-situ measurements and multi-temporal TLS surveys in a mountainous badland area, Vallcebre (Spain). *Catena*, 249, 108622. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108622>
- United States Environmental Protection Agency, 2021. *Climate Change Science: Basics of Climate Change*. Dostupno na: <https://www.epa.gov/climatechange-science/basics-climate-change> (pristupljeno 17. marta 2026).
- Valjarević, A., Srećković-Batočanin, D., Živković, D., Perić, M., 2015. GIS analysis of dissipation time of landscape in the Devil's city (Serbia). *Acta Montanistica Slovaca*, 20(2), 148–155. <https://doi.org/10.3390/ams20020148>
- Vergari, F., Della Seta, M., Monte, M., Barbieri, M., 2013. Badlands denudation “hot spots”: The role of parent material properties on geomorphic processes in 20-years monitored sites of Southern Tuscany (Italy). *Catena*, 102, 158–171. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.02.007>
- Vogel, D.E., 1975. Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, South – Central Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12, 2080–2085. <https://doi.org/10.1139/e75-183>
- Vogt, T., 1927. Sulitjelmefeltets geologi og petrografi. *Norges Geologiske Undersokelse*, 121, 1–560 (in Norwegian, with English abstract).
- Vukoičić, D., Srećković-Batočanin, D., Valjarević, A., Ristić, D., Nikolić, M., Valjarević, D., 2021. Assessment of the Geotouristic Values of Devil's Town, Serbia. *Geologia Croatica*, 74(2), 163–176. <https://doi.org/10.4154/gc.2021.11>
- Wainwright, J., Brazier, R.E., 2011. Slope systems. In: Thomas, D.S.G. (Ed.), *Arid Zone Geomorphology: Processes, Form and Change in Drylands*, 3rd ed. Wiley & Sons, Ltd., Chichester, pp. 209–233.
- Weixia, Y., Zhang, Z., Guo, X., Liu, W., Song, Z., 2015. The Effect of pH on Sapphire Chemical Mechanical Polishing. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 4(5), P108–P111. <https://doi.org/10.1149/2.0241503jss>
- World Meteorological Organization, 2024. *Climate*. <https://wmo.int/topics/climate> (pristupljeno 8. marta 2026)

Xie, C., Antić, N., Nadal-Romero, E., Yan, L., Tosti, T., Djogo Mračević, S., Tu, X., Kašanin-Grubin, M., 2022. The Influences of Climatic and Lithological Factors on Weathering of Sediments in Humid Badland Areas. *Frontiers in Earth Science*, 10, 900314. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.900314>

Yair, A., Lavee, H., Bryan, R.B., Adar, E., 1980. Runoff and erosion processes and rates in the Zin valley badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5, 205–225. <https://doi.org/10.1002/esp.3760050301>

Yan, L., Liu, P., Peng, H., Kašanin-Grubin, M., Lin, K., 2019. Laboratory Study of the Effect of Temperature Difference on the Disintegration of Redbed Softrock. *Physical Geography*, 40, 149–163. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559418>

Yan, L., Petrovic, S., Huang, C., Chunxia, X., Zong, H., Kašanin-Grubin, M., 2022. Effect of temperature on mudstone disintegration process revealed with image analysis. *Journal of Mountain Science*, 19, 2126–2135. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7268-3>

Yanagi, T., Akada, S.N., Aeda, S.M., 1992. Temporal variation in chemical composition of the lava extruded from the Jigokuato crater, Unzen volcano. In: Yanagi, T., Okada, H., Ohta, K. (Eds.), *Unzen Volcano the 1990–1992 Eruption*. The Nishinippon & Kyushu University Press, pp. 56–66.

Yokoyama, I., 2009. Growth rates of lava domes with respect to viscosity of magmas. *Annals of Geophysics*, 48, 1–10. <https://doi.org/10.4401/ag-3246>

Zgłobicki, W., Poesen, J., Daniels, M., Del Monte, M., Guerra, A., Joshi, V., Paterson, G., Shellberg, J., Solé-Benet, A., Su, Z., 2018. Geotouristic Value of Badlands. In: Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F., Kuhn, N.J., (Eds.), *Badlands Dynamics in a Context of Global Change*. Elsevier, pp. 227–313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00009-5>

Životić, Lj., Vuković Vimić, A., 2022. *Soil Degradation and Climate Change in Serbia*. UNDP. ISBN 978-86-7728-356-8.

## BIOGRAFIJA

Nevena Antić je rođena 02.08.1996. godine u Šapcu, gde je završila osnovnu i srednju školu. Osnovne akademske studije na studijskom programu Hemija na Hemijskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisala je 2015. godine i završila sa prosečnom ocenom 8,54 i ocenom 10,00 na završnom radu. Master akademske studije na Hemijskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisala je 2019. godine na katedri za primenjenu hemiju i završila prosečnom ocenom 10,00 i ocenom 10,00 na diplomskom radu.

Doktorske akademske studije na studijskom programu Hemija upisala je školske 2020/21. godine pri Katedri za primenjenu hemiju Hemijskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Od 1. oktobra 2020. godine zaposlena je na Institutu od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju Univerziteta u Beogradu.

Tokom 2018. godine obavila je jednomesečnu stručnu praksu u Rafineriji nafte u Pančevu (NIS), dok je 2019. godine učestvovala na tronedeljnoj CEEPUS letnjoj školi „*Training and research in environmental chemistry and toxicology*” na Fakultetu zdravstvenih nauka Univerziteta u Ljubljani. Tokom master studija, u okviru COST projekta, provela je dva meseca na Nacionalnom institutu za istraživanje i razvoj u šumarstvu „Marin Drăcea” u Bukureštu, Rumunija. Usavršavanje je nastavila i tokom doktorskih studija, provodeći po mesec dana na Univerzitetu u Ljubljani, Slovenija (CEEPUS razmena) i na Fakultetu za geografiju i istoriju Univerziteta u Salamanci, Španija (Erasmus+ razmena). Pored toga, ostvarila je i nekoliko kratkotrajnih studijskih boravaka u okviru bilateralnih projekata u Nemačkoj, Portugalu, Sloveniji i Francuskoj.

Nevena Antić je dosada kao učesnik je bila angažovana na tri Bilateralna projekta sa Portugalom, Nemačkom i Slovenijom, a trenutno rukovodi Bilateralnim projektom sa Francuskom „Razotkrivanje erozije: uvid u uticaj litologije i klimatskih promena vođen veštačkom inteligencijom“, Pored toga, u okviru tekućih angažmana, rukovodi radnim paketom Projekta Fonda za nauku poziva PRIZMA "*Urban Forest Soil Indicators as a tool for Climate-Smart Forest*" i učestvuje u realizaciji *NextGenerationEU* projektu pod nazivom „Višerezolucijsko modeliranje postpožarne erozije tla u krškom planinskom području (*FIRE-SCAPE*)”.

## BIBLIOGRAFIJA

U dosadašnjem naučno-istraživačkog rada Nevena Antić je publikovala četrnaest radova u međunarodnim časopisima: četiri u vodećim međunarodnim časopisima kategorije M21a+, sedam u vodećim međunarodnim časopisima kategorije M21 i tri u međunarodnim časopisima kategorije M22, kao i dva saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33) i preko četrdeset saopštenja sa skupova od međunarodnog značaja štampanih u izvodu (M34).

Radovi koji proizilaze iz ove doktorske disertacije publikovani su u vodećem međunarodnom časopisu i devet saopštenja sa skupova od međunarodnog značaja.

### Vodeći međunarodni časopis kategorije M21a+:

Antić, N., Kašanin-Grubin, M., Bertalan, L., Gajić, V., Kaluđerović, L., Mijatović, N., Jovančićević, B., 2024. Are volcanoclastics bad enough to make badlands? *Catena*, 246, 108448. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108448>

Antić, N., Kašanin-Grubin, M., Štrbac, S., Xie, C., Mijatović, N., Tosti, T., Jovančićević, B., 2023. Type of precipitation and durations of sediment exposure as important weathering factors. *Catena*, 228, 107192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107192>

### M34 - saopštenja sa skupova od međunarodnog značaja štampanih u izvodu:

Antić, N., Bertalan, L., Gajić, V., Kaluđerović, L., Mijatović, N., Kašanin-Grubin, M. 2025. Exploring volcanoclastic badlands: insights from Kazar and Djavolja Varos, Serbia. *IAG Regional Conference on Geomorphology*, 16–18 September 2025, Timișoara, Romania.

Antić, N., Kašanin-Grubin, M., Jovančićević, B. 2024. Can a laboratory predict the field? *24th European Meeting on Environmental Chemistry (EMEC24)*, 26–29 November 2024, Alicante, Spain.

Antić, N., Kašanin-Grubin, M. 2024. A laboratory approach to understanding events in the field. *XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 21–27 October 2024, João Pessoa, Brazil.

Antić, N., Kašanin-Grubin, M. 2024. Badlands classification from the perspective of mineralogical composition and physico-chemical properties of sediment. *IAG-DENUCHANGE Working Group Workshop*, 23–26 September 2024, Rome, Italy.

Antić, N., Kašanin-Grubin, M., Bertalan, L., Gajić, V., Kaluđerović, L., Mijatović, N., Jovančićević, B. 2023. How bad volcano-clastic badlands actually are? *23rd European Meeting on Environmental Chemistry (EMEC23)*, 3–6 December 2023, Budva, Montenegro.

Antić, N., Bertalan, L., Stefanović, M., Kašanin-Grubin, M. 2023. Badlands in volcano-clastic rocks: examples from Serbia and Hungary. *9th EUGEO Congress (EUGEO 2023)*, 4–7 September 2023, Barcelona, Spain.

Antić, N., Kašanin-Grubin, M., Jovančićević, B. 2023. Dispersion of the sediment caused by the land use. *IAG-DENUCHANGE Working Group Workshop*, 13–16 March 2023, Haifa, Israel.

Antić, N., Stefanović, M., Štrbac, S., Stojadinović, S., Tosti, T., Kašanin-Grubin, M., Jovančićević, B. 2022. Role of mineralogical composition and physico-chemical properties of sediment on

badlands classification. *22nd European Meeting on Environmental Chemistry (EMEC22)*, 5–8 December 2022, Ljubljana, Slovenia, Book of Abstracts, p. 34.

Antić, N., Stefanović, M., Mijatović, N., Tosti, T., Xie, C., Kašanin-Grubin, M. 2022. Is snow more destructive agent than rain from the perspective of land degradation? *EGU General Assembly 2022 (EGU22)*, 23–27 May 2022, Vienna, Austria & Online. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-577>

## ***Izjava o autorstvu***

Ime i prezime autora: Nevena D. Antić

Broj indeksa: DH01/2020

### **Izjavljujem**

da je doktorska disertacija po naslovom

**Veza između fizičko-hemijskih svojstava i mineraloškog sastava kao pokazatelj osjetljivosti i otpornosti sedimenta na procese erozije**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## ***Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada***

Ime i prezime autora: Nevena D. Antić

Broj indeksa: DH01/2020

Studijski program: Hemija

Naslov rada: **Veza između fizičko-hemijskih svojstava i mineraloškog sastava kao pokazatelj osetljivosti i otpornosti sedimenta na procese erozije**

Mentori: dr Branimir Jovančičević, dr Milica Kašanin-Grubin

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## ***Izjava o korišćenju***

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

### **Veza između fizičko-hemijskih svojstava i mineraloškog sastava kao pokazatelj osetljivosti i otpornosti sedimenta na procese erozije**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.  
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

