

Primljen / Received: 20.8.2025.

Ispravljen / Corrected: 9.2.2026.

Prihvaćen / Accepted: 9.3.2026.

Dostupno online / Available online: 10.4.2026.

# Mehanizam korelacije višeskalnih oštećenja mekih stijena pod djelovanjem ciklusa sušenja i vlaženja

## Autori:

Dr.sc. **Ning Liang**, dipl.ing.građ.Sveučilište znanosti i tehnologije Guangxi, Kina  
Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu  
[liangn5@126.com](mailto:liangn5@126.com)

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Jingjing Zhang**, dipl.ing.građ.Sveučilište znanosti i tehnologije Guangxi, Kina  
Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu  
[20240301014@stdmail.gxust.edu.cn](mailto:20240301014@stdmail.gxust.edu.cn)Mr.sc. **Tao Jin**, dipl.ing.građ.Sveučilište znanosti i tehnologije Guangxi, Kina  
Fakultet za građevinarstvo i arhitekturu  
[20220301009@stdmail.gxust.edu.cn](mailto:20220301009@stdmail.gxust.edu.cn)

Prethodno priopćenje

**Ning Liang, Jingjing Zhang, Tao Jin**

## Mehanizam korelacije višeskalnih oštećenja mekih stijena pod djelovanjem ciklusa sušenja i vlaženja

U ovome radu predlaže se korelacija višeskalnih oštećenja za opis ponašanja mekih stijena pri omekšavanju u ciklusima sušenja i vlaženja, temeljen na varijablama višeskalnih oštećenja. Ispitivanjem mineraloškog sastava i promjena unutarnje strukture mekih stijena nakon različitog broja ciklusa sušenja i vlaženja te na temelju mehanizma evolucije energije i konstitutivnih obilježja oštećenja, analizirani su višeskalni korelacijski učinci omekšavanja mekih stijena. Rezultati pokazuju da s porastom broja ciklusa sušenja i vlaženja mehanička svojstva mekih stijena pokazuju eksponencijalni oblik degradacije, dok mineralne čestice pokazuju nasumično ponašanje loma opisano Weibullovom raspodjelom.

### Ključne riječi:

meki stijena, ciklus sušenja i vlaženja, višeskalno oštećenje, evolucija energije

Research Paper

**Ning Liang, Jingjing Zhang, Tao Jin**

## Multi-scale damage correlation mechanism of soft rock under the action of dry-wet cycle

This study proposes a multi-scale damage correlation path to characterise the softening behaviour of soft rock under dry-wet cycles, based on multi-scale damage variables. By testing the mineral composition and internal structural changes of soft rocks under different dry-wet cycles, and based on the energy evolution mechanism and damage constitutive characteristics, the multi-scale correlation effects of soft rock softening under dry-wet cycles were analysed. The results indicate that as the number of dry-wet cycles increase, the mechanical properties of soft rock exhibit an exponential decay mode, and mineral particles exhibit Weibull-distributed random failure behaviour.

### Key words:

soft rock, dry-wet cycle, multi-scale damage, energy evolution

## 1. Uvod

Meke stijene bogate su glinovitim mineralima kao što su kaolinit i montmorilonit. U složenim prirodnim uvjetima meke stijene često su izložene ciklusima sušenja i vlaženja. Proces hidratacije dovodi do stvaranja pukotina unutar stijene, ubrzava degradaciju njezinih mehaničkih svojstava te potencijalno dovodi do pojave nestabilnosti. Proučavanje promjena u mekim stijenama tijekom ciklusa sušenja i vlaženja ima važnu ulogu u razumijevanju njihova mehanizma omekšavanja. Ta istraživanja imaju ključnu ulogu u prevenciji i kontroli geotehničkih katastrofa te u učinkovitome iskorištavanju mineralnih resursa [1-3]. Prema tome, ovo područje istraživanja i dalje zauzima istaknuto mjesto među suvremenim međunarodnim istraživanjima u području mehanike stijena.

Na temelju navedenih znanstvenih pitanja brojni su istraživači proveli detaljna ispitivanja svojstava mekih stijena pri različitim broju ciklusa sušenja i vlaženja, pri čemu je većina radova usmjerena na promjene mehaničkih svojstava i strukture mekih stijena. Što se tiče promjena mehaničkih svojstava, s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja tlačna čvrstoća mekih stijena pokazuje trend vrijednosti. Ciklusi sušenja i vlaženja povećavaju strukturna oštećenja unutar mekih stijena te uzrokuju prelazak načina loma iz krhkog u duktilni [4, 5]. Neki istraživači utvrdili su da ciklusi sušenja i vlaženja mogu uzrokovati očvršćivanje deformacijskog ponašanja mekih stijena. U takvim uvjetima meka stijena ne pokazuje izražene vršne vrijednosti naprezanja ni svojstva omekšavanja, dok voda znatno utječe na modul volumne deformacije meke stijene [6-8]. Usporedna analiza mekih stijena prije ciklusa sušenja i vlaženja i nakon njih pokazuje znatne promjene u mikropukotinama i deformacijskim svojstvima. Te su promjene kvantitativno opisane metodama fraktalne dimenzije, pri čemu su CT skeniranje i nuklearna magnetska rezonancija korištene za kvantitativnu karakterizaciju radi razjašnjenja mehanizma oštećenja pri interakciji vode i stijene [9-12]. Osim toga istraživači su proučavali svojstva evolucije energije mekih stijena tijekom ciklusa sušenja i vlaženja na temelju modela disipacije energije i konstitutivnih modela oštećenja te su uspostavili povezanost između konstitutivnog modela oštećenja i cjelokupnog procesa deformacije i loma stijene. Ti rezultati doprinose procjeni krhkosti mekih stijena na temelju brzine deformacije uzrokovane oštećenjem [13-15]. Većina tih istraživanja usredotočena je na promjene makroskopskih mehaničkih svojstava mekih stijena pod utjecajem ciklusa sušenja i vlaženja, pružajući važnu teorijsku osnovu za razumijevanje deformacije i loma mekih stijena.

Istraživači su također eksperimentalnim metodama postigli velike rezultate u proučavanju promjena unutarnje strukture mekih stijena. Istraživanja pokazuju da se s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja čestice unutar meke stijene sve više razmiču te se pojavljuje veći broj mikropukotina. Složene promjene u tim unutarnjim strukturama mogu dovesti do postupnog pogoršanja mehaničkih svojstava mekih stijena [16-18]. Kada molekule vode prodru u unutrašnjost meke

stijene, dolazi do kemijskih promjena u mineralnome sastavu stijene i vode, a između vode i stijene događa se ionska izmjena. Povećanje broja ciklusa sušenja i vlaženja dodatno pojačava kemijske interakcije između vode i stijene te potiče formiranje poroznih kanala unutar mekih stijena [19-21]. Zato promjene mikrostrukture i mineralnog sastava unutar mekih stijena izravno utječu na način kontakta između čestica stijene, što u konačnici utječe na mehaničku čvrstoću mekih stijena. Strukturna distribucijska svojstva pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja mogu dodatno razjasniti zakonitosti deformacije i loma mekih stijena.

Ukratko, iako su provedena brojna istraživanja degradacijskog ponašanja mekih stijena tijekom ciklusa sušenja i vlaženja, nekoliko ključnih pitanja i dalje zahtijeva daljnja istraživanja. Većina postojećih istraživanja usredotočena je na mehanička svojstva, evoluciju energije ili konstitutivno modeliranje iz jedne perspektive, dok unutarnja povezanost između evolucije mikrostrukture, promjena energije i konstitutivnih parametara još nije jasno razjašnjena. Zato ovo istraživanje integrira mikroeksperimentalna istraživanja, analizu evolucije energije i konstitutivno modeliranje kako bi sustavno analizirala višeskalna svojstva oštećenja mekih stijena pod različitim ciklusima sušenja i vlaženja. Nadalje, istražuju se učinci pojačavanja oštećenja i njihovi razvojni putevi, čime se pruža sustavnija teorijska osnova za daljnja istraživanja inženjerskih katastrofa povezanih s mekim stijenama.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Eksperimentalna oprema i priprema uzoraka stijena

Radi istraživanja mehaničkih svojstava i promjena unutarnje strukture mekih stijena pri sušenju i vlaženju, kao eksperimentalni materijal odabran je silt s područja južne Kine. Glavne komponente te meke stijene jesu minerali kvarca i feldspata, a njezina prirodna gustoća iznosi  $2,211 \text{ g/cm}^3$ . Uzorkovanje je provedeno sondažnim bušenjem bušačom opremom velikog promjera. Po uzorkovanju rezanjem su pripremljeni laboratorijski ispitni uzorci: standardni cilindrični uzorci stijene promjera baze 50 mm i visine 100 mm.

Oprema korištena u ovome istraživanju uključuje mehanički ispitni stroj *Matest*, uređaj za cikluse sušenja i vlaženja, skenirajući elektronski mikroskop (SEM) i rendgenski difraktometar (XRD).

### 2.2. Eksperimentalni plan

U ispitivanju ciklusa sušenja i vlaženja svaki je uzorak bio uronjen u vodu iz vodovoda (pH = 6,8) tijekom 48 sati, nakon čega je sušen u sušioniku na  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  tijekom 24 sata. Nakon hlađenja na standardnu temperaturu uzorak je izvađen, a taj je postupak definiran kao jedan ciklus sušenja i vlaženja. Svaka skupina uzoraka stijene podvrgnuta je 0, 1, 3 i 7 ciklusa sušenja i vlaženja.

### Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće

Po završetku ciklusa sušenja i vlaženja provedeno je ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće. Tijekom ispitivanja opterećenje je primijenjeno metodom kontroliranog pomaka pri brzini od 0,03 mm/min, uz vertikalno opterećenje sve do loma uzorka, nakon čega je oštećeni uzorak fotografiran. Kako bi se smanjio utjecaj varijabilnosti uzoraka na rezultate, za svaki uvjet ispitana su tri paralelna uzorka.

### Analiza mikrostrukture

Kako bi se istražio utjecaj ciklusa sušenja i vlaženja na unutarnju mikrostrukturu stijene, uzorci su pripremljeni za SEM analizu, pri čemu su snimljene mikrostrukturne slike pri povećanju 200x nakon 0, 1, 3 i 7 ciklusa sušenja i vlaženja.

### Analiza mineralnog sastava mikroskopskim metodama

Kako bi se istražio utjecaj ciklusa sušenja i vlaženja na mineralni sastav stijene, provedena je XRD analiza uzoraka nakon 0, 1, 3 i 7 ciklusa, čime je određen njihov mikroskopski mineralni sastav. Eksperimentalna shema prikazana je na slici 1.

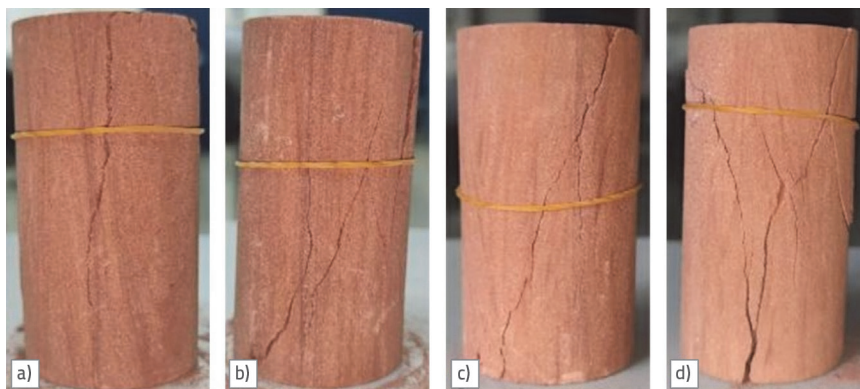


Slika 1. Eksperimentalna shema

## 3. Rezultati

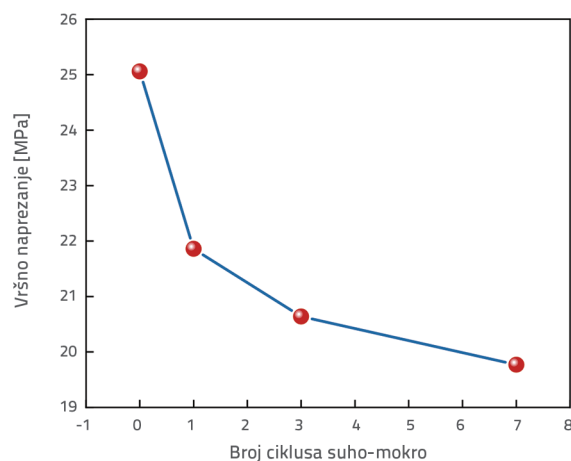
### 3.1. Mehanička svojstva mekih stijena pod djelovanjem ciklusa sušenja i vlaženja

Kao što je to prikazano na slici 2., s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja uočava se postupno smanjenje vršne čvrstoće stijenskih uzoraka. Konkretno, vršna čvrstoća početnoga suhog uzorka iznosila je 25,06 MPa, dok se nakon sedam ciklusa sušenja i vlaženja smanjila na 19,77 MPa, što je znatno smanjenje od 5,29 MPa. Taj trend bio je popraćen i izrazitom promjenom u



Slika 3. Način loma meke stijene

krivulji naprezanja i deformacija. U početnoj fazi, odnosno pri nula ciklusa sušenja i vlaženja, naprezanje nakon vršnog opterećenja naglo opada, što upućuje na izraženo krhko ponašanje stijene i sugerira visoki stupanj zbijenosti u suhome stanju. Međutim, s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja brzina pada naprezanja nakon vršne vrijednosti postupno se smanjuje, dok se deformacija nakon vršnog naprezanja povećava, što upućuje na postupni prelazak ponašanja stijene iz krhkog u plastično. Taj prelazak ponajprije je posljedica rahljenja unutarnje strukture stijenskih uzoraka uzrokovano interakcijom vode i stijene, što dovodi do slabljenja veza između mineralnih čestica te podmazivanja i omekšavanja mineralnog skeleta.



Slika 2. Vršno naprezanje uzoraka stijena pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja

Na slici 3. prikazan je konačni oblik oštećenja meke stijene nakon ciklusa sušenja i vlaženja. S povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja uzorci stijene pri jednoosnom opterećenju postupno prelaze iz vlačnog loma u osnom smjeru u posmični lom. Taj prelazak popraćen je znatnim povećanjem broja pukotina, koje se postupno međusobno povezuju, što upućuje na sve izraženiji stupanj oštećenja. Važno je istaknuti da su makroskopske pukotine nastale uslijed vlačnog loma bile usklađene sa smjerom glavnog naprezanja.

### 3.2. Mikrostrukturne promjene meke stijene pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja

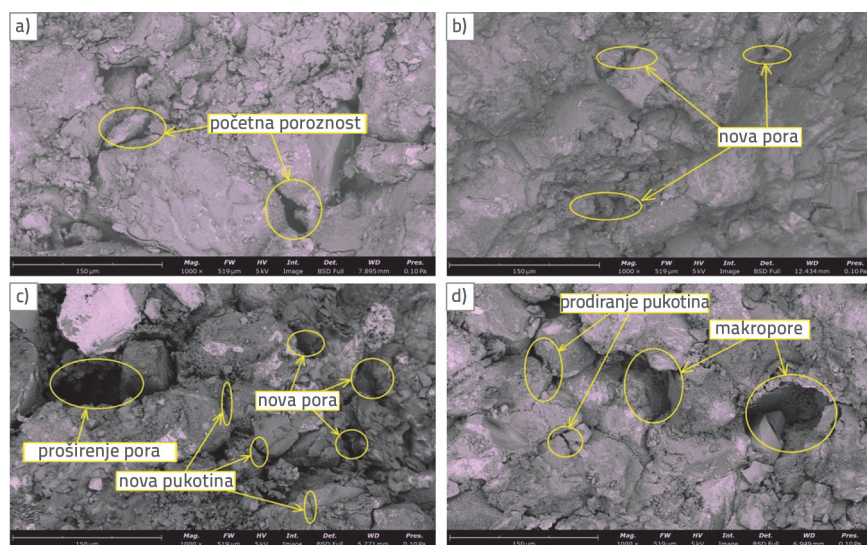
Na slici 4. prikazani su rezultati polarizacijske svjetlosne mikroskopije meke stijene nakon ciklusa sušenja i vlaženja. U prirodnome stanju (0 ciklusa sušenja i vlaženja) struktura uzorka stijene relativno je kompaktna, s malim brojem pora koje su ravnomjerno raspoređene i uglavnom međusobno nepovezane, dok je površina većinom glatka i ravna.

Nakon jednog ciklusa sušenja i vlaženja površina čestica postaje hrapava te se pojavljuju mikropukotine. Nakon tri ciklusa čestice postupno postaju zaobljenije, granice između čestica postaju manje izražene, a način kontakta između čestica također se počinje mijenjati. Kontakt tipa brid-kut postupno zamjenjuje prirodne načine kontakta ploha-brid i ploha-ploha. Mikroskopske pore i mikropukotine znatno se razvijaju, čime se stvaraju kanali za daljnju eroziju vodom. Nakon sedam ciklusa sušenja i vlaženja površina čestica postaje izrazito hrapava, uz znatno povećanje količine prijanjućeg materijala. Spojna površina između mineralnih čestica postaje vrlo nejasna, dok se veličina i dubina mikroskopskih pora i mikropukotina znatno povećavaju.

Mehanizam oštećenja mekih stijena uzrokovan vodom obuhvaća dva osnovna aspekta. Prvo, kombinirano oštećenje djelovanjem vode nastaje kada molekule vode prodiru u stijenske čestice kroz mikropukotine i formiraju polarizirani vodeni sloj koji povećava pokretljivost čestica i slabi cementaciju između njih. Drugo, oštećenje uzrokovano slobodnom vodom nastaje zbog prisutnosti brojnih mikropukotina unutar stijenskog materijala. Kada se stijena opterećuje u zasićenome stanju, porna voda ne može se brzo istisnuti, što uzrokuje nagli porast tlaka na stijenama mikropukotina. Taj porast tlaka dovodi do pojave vlačnih naprezanja na stijenama pukotina, što u konačnici uzrokuje njihovo širenje kada tlak premaši graničnu vlačnu čvrstoću. Istodobno molekule vode prodiru u kristalnu strukturu minerala, formiraju higroskopski sloj koji uzrokuje širenje stijenskih čestica i narušava njihovu strukturu. Kombinirani učinak početnog oštećenja uzrokovanog vezanom vodom i dodatnog oštećenja uzrokovanog slobodnom vodom znatno doprinosi slabljenju makroskopskih mehaničkih svojstava stijene.

### 3.3. Promjene mineraloškog sastava meke stijene pri ciklusima sušenja i vlaženja

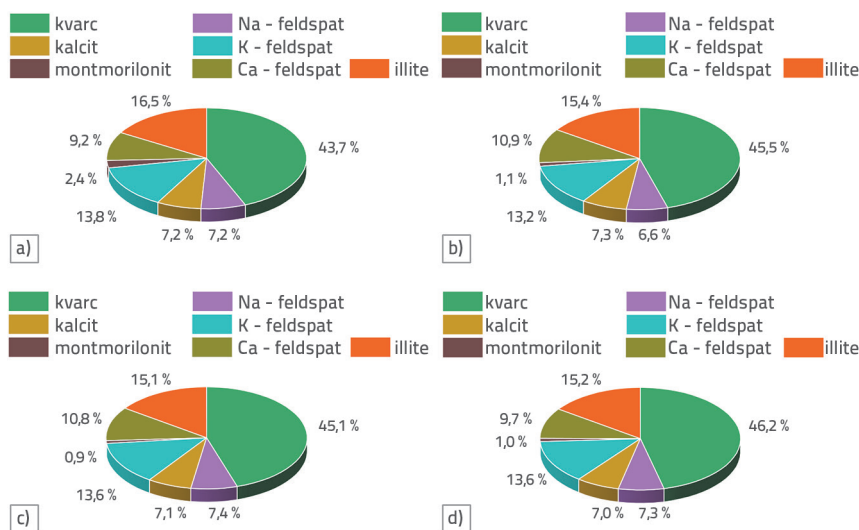
Kako bi se analizirao mineraloški sastav uzoraka pri različitim uvjetima ciklusa sušenja i vlaženja, provedeno je XRD ispitivanje. Raspon skeniranja postavljen je od 5° do 90° (2θ), s korakom od 0,02° i brzinom skeniranja od 2°/min. Udio minerala izračunan je semikvantitativnom metodom analize na temelju relativnih intenziteta vršnih vrijednosti difrakcije, čime su dobiveni približni udjeli pojedinih mineralnih faza. Prema rezultatima prikazanim u tablici 1., uzorak se uglavnom sastoji od detritičnih minerala i glinovitih minerala. Detritični minerali dominantno su zastupljeni kvarcom i feldspatom, uz manji udio kalcita, te čine približno 80 % ukupnoga mineraloškog sastava. Glinoviti minerali, ponajprije ilit i montmorilonit, čine oko 20 %.



Slika 4. Rezultati polarizacijske mikroskopije nakon ciklusa sušenja i vlaženja: a) 0 ciklusa sušenja i vlaženja; b) 1 ciklus sušenja i vlaženja; c) 3 ciklusa sušenja i vlaženja; d) 7 ciklusa sušenja i vlaženja

Tablica 1. Rezultati XRD analize meke stijene

Minerali	Postotni udio različitih suho-mokrih ciklusa [%]			
	0	1	3	7
Kvarc	43,7	45,5	45,1	46,2
Albit	7,2	6,6	7,4	7,3
Kalcit	7,2	7,3	7,1	7,0
Anortit	9,2	10,9	10,8	9,7
K-feldspat	13,8	13,2	13,6	13,6
Montmorilonit	2,4	1,1	0,9	1,0
ilit	16,5	15,4	15,1	15,2



Slika 5. XRD difrakcijski uzorci stijenskih uzoraka pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja: a) 0 ciklusa; b) 1 ciklus; c) 3 ciklusa; d) 7 ciklusa

Važno je naglasiti da ti glinoviti minerali imaju izraženu hidrofilnost te sklonost bubrenju pri apsorpciji vode i skupljanju tijekom sušenja, što postupno slabi veze između mineralnih čestica. Tijekom ponovljenih ciklusa sušenja i vlaženja proces bubrenja i skupljanja glinovitih minerala, zajedno s mogućim blagim procesima otapanja, potiče razvoj pora i mikropukotina unutar stijene, što dovodi do rahljenja strukture i degradacije mehaničkih svojstava.

Usporedna analiza slika 5.a do 5.d pokazuje smanjenje udjela glinovitih minerala nakon ciklusa sušenja i vlaženja. To smanjenje može se objasniti bubrenjem i omekšavanjem glinovitih minerala poput illita i montmorilonita pri kontaktu s vodom tijekom cikličkog procesa. Nasuprot tome, promjene u drugim mineralnim komponentama relativno su male. To se može objasniti činjenicom da ti minerali tijekom procesa sušenja i vlaženja mogu pretrpjeti manje promjene u udjelu uslijed kemijskih reakcija poput otapanja i hidrolize. Općenito, promjene u udjelu pojedinih mineralnih komponenti manje su od 3 %, što ne predstavlja znatnu promjenu u mineraloškom sastavu. Rezultati upućuju na to da je degradacija mehaničkih svojstava tijekom ciklusa sušenja i vlaženja ponajprije povezana s razvojem pora i mikropukotina te promjenama u kontaktu između čestica, a ne s velikim promjenama u mineraloškom sastavu, što je u skladu s opažanjima dobivenima SEM analizom.

## 4. Konstitutivni izraz oštećenja i rasprava

### 4.1. Zakon razvoja energije uzoraka stijene tijekom ciklusa sušenja i vlaženja

Tijekom jednoosne kompresije često se opaža nastanak i širenje makroskopskih pukotina unutar stijene, uključujući

njihovo međusobno povezivanje. Kako vanjsko opterećenje napreduje, tako se deformacijska energija akumulirana u stijeni postupno disipira, što rezultira znatnom promjenom odnosa između elastične deformacijske energije ( $U^e$ ) i disipirane deformacijske energije ( $U^d$ ) tijekom procesa opterećenja i oštećenja stijene. Na temelju osnovnih načela prvog zakona termodinamike može se zaključiti da se mehanički rad stroja tijekom opterećenja stijenskog uzorka pretvara u deformacijsku energiju ( $U$ ) pohranjenu u stijeni.

$$W = U = U^e + U^d \quad (1)$$

U uvjetima jednoosne kompresije bočni tlakovi iznose  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . Zato se deformacijske energije unutar meke stijene mogu izraziti na sljedeći način

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 \quad (2)$$

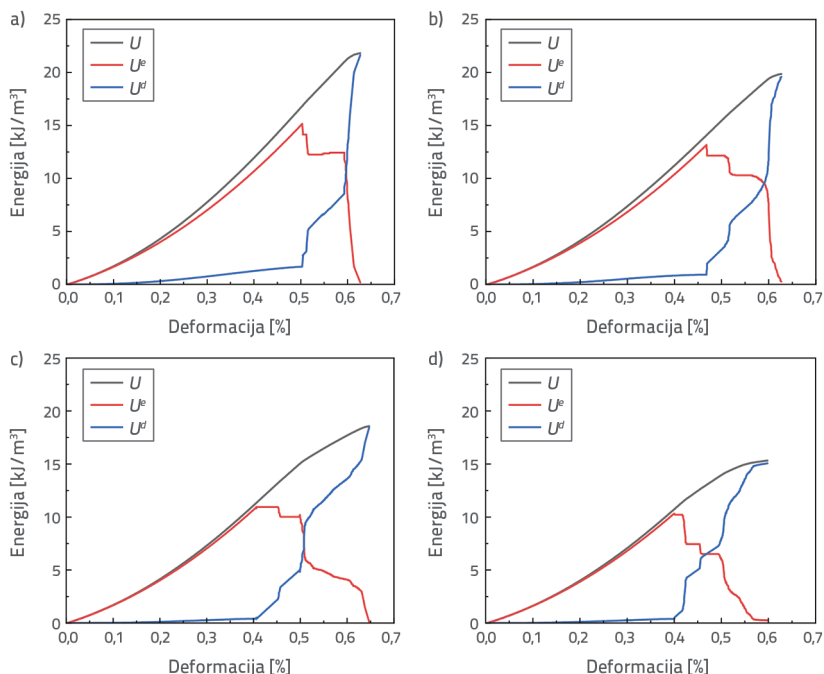
$$U^e = \frac{1}{2E_i} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_3)] = \frac{\sigma_1^2}{2E_0} \quad (3)$$

U izrazu (3)  $\mu$  jest Poissonov koeficijent, dok je  $E_i$  modul elastičnosti pri rasterećenju stijene, koji se u izračunu može zamijeniti početnim modulom elastičnosti  $E_0$ . Proces oštećenja stijene uključuje nastanak, širenje i povezivanje pukotina, što je neraskidivo povezano s procesima akumulacije, disipacije i oslobađanja energije. Na slici 6. prikazana su svojstva razvoja energije uzoraka tijekom cjelokupnog procesa jednoosne kompresije pri različitim brojevima ciklusa sušenja i vlaženja. Kao što je to prikazano na slici 6., razvoj energije u mekim stijenama podvrgnutima različitoj broju ciklusa sušenja i vlaženja može se podijeliti u četiri karakteristične faze.

**Faza I:** Mikropukotine i pore unutar stijene postupno se zatvaraju s porastom naprežanja, što označava prelazak u elastičnu fazu. Tijekom te faze pohranjena elastična energija veća je od disipirane energije.

**Faza II:** Ta faza odgovara makroskopskom razvoju energije meke stijene i započinje nakon završetka faze zbivanja te traje do početka formiranja makroskopskih pukotina. Tijekom te faze vanjska energija koja se unosi u sustav uglavnom se pretvara u pohranjenu elastičnu deformacijsku energiju. Kako se mikropukotine postupno razvijaju unutar stijene, tako se dio unesene energije troši na njihov nastanak i širenje, što dovodi do postupnog povećanja disipirane energije.

**Faza III:** Ta faza odgovara prijelazu od početka pojave pukotina do postizanja vršne čvrstoće na krivulji naprežanje-deformacija. U toj fazi disipirana energija pokazuje znatan, stupnjevit porast,



Slika 6. Krivulje razvoja energije uzoraka stijena pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja: a) 0 ciklusa sušenja i vlaženja; b) 1 ciklus sušenja i vlaženja; c) 3 ciklusa sušenja i vlaženja; d) 7 ciklusa sušenja i vlaženja

Što upućuje na postupno povećanje udjela vanjske energije koja se disipira u sustavu.

**Faza IV:** Ta faza odgovara fazi nakon dosezanja vršne čvrstoće krivulje naprezanje-deformacija. Nakon postizanja vršne čvrstoće dolazi do katastrofalnog loma uzorka, pri čemu dolazi do naglog oslobađanja velike količine pohranjene elastične deformacijske energije. Posljedica toga jest nagli pad elastične energije, dok disipirana energija naglo raste.

Međutim, s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja smanjuje se brzina opadanja disipirane energije nakon vršne čvrstoće, uz istodobno povećanje deformacije nakon vršne točke. Ta pojava upućuje na postupni prelazak stijenskog materijala iz krhkog u plastično ponašanje, što potvrđuje znatan utjecaj ciklusa sušenja i vlaženja na deformacijsko i lomno ponašanje stijene.

U tablici 2. prikazane su promjene energetskih parametara uzoraka pri vršnoj čvrstoći za različite brojeve ciklusa sušenja i vlaženja. S povećanjem broja ciklusa uočava se jasan trend smanjenja unesene deformacijske energije i elastične deformacijske energije, što upućuje na postupno smanjenje

spособnosti uzoraka za pohranu energije i smanjenje njihove krutosti. Nasuprot tome, disipirana deformacijska energija ostaje na relativno niskoj razini uz manje fluktuacije. Ti rezultati pokazuju da ponovljeni ciklusi sušenja i vlaženja smanjuju sposobnost uzoraka da akumuliraju elastičnu energiju, što odražava postupnu degradaciju njihovih mehaničkih svojstava.

#### 4.2. Konstitutivni izraz degradacije i oštećenja mekih stijena pri ciklusima sušenja i vlaženja

Hipoteza ekvivalencije deformacija prema Lemaitreu pretpostavlja da su stijenski materijali deformacijski ekvivalentni prije pojave oštećenja i nakon nje. Na temelju toga može se uspostaviti osnovni odnos oštećenja stijene.

$$\sigma^* = E\varepsilon (1 - D) \tag{4}$$

U izrazu (4)  $\sigma^*$  je efektivno naprezanje,  $E$  modul elastičnosti,  $\varepsilon$  deformacija, a  $D$  varijabla oštećenja. Pretpostavljajući daje stijena izotropni materijal te da parametar čvrstoće mikroelemenata  $F$  slijedi Weibullovu raspodjelu, funkcija gustoće vjerojatnosti čvrstoće mikroelemenata stijenskog materijala može se izraziti kao:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \tag{5}$$

U izrazu (4) parametri  $m$  i  $F_0$  jesu Weibullov parametar oblika i parametar skale. Kao kriterij oštećenja mikrometamorfni tijela odabran je Drucker-Pragerov kriterij oštećenja.

$$F = \frac{\sqrt{3}E\varepsilon_1}{3(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \left[ \frac{\sin\phi(\sigma_1 + 2\mu\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2\phi}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right] \tag{6}$$

Tablica 2. Energetski parametri uzoraka pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja

Broj ciklusa suho-mokro	Energija naprezanja [kJ/m³]	Energija elastičnog naprezanja [kJ/m³]	Disipativna energija naprezanja [kJ/m³]
0	16,83	15,15	1,67
1	14,07	13,16	0,92
3	11,33	10,95	0,38
7	10,73	10,33	0,40

Tablica 3. Parametri i rezultati izračuna

Parametri	Broj ciklusa suho-mokro			
	0	1	3	7
$m_1$ [GPa]	4,36	3,86	3,5	3,42
$M_2$ [GPa]	19,10	15,63	7,78	7,55
$R^2$	0,9	0,9	0,9	0,9

U izrazu (6)  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$  predstavljaju prvo i treće glavno naprezanje,  $\varepsilon_1$  prvu glavnu deformaciju, a  $\phi$  kut unutarnjeg trenja. Uvrštavanjem izraza (6) u izraz (5) može se dobiti izraz varijable oštećenja stijene  $D$ .

$$D = \exp \left\{ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right\} \quad (7)$$

Uvrštavanjem izraza (7) u izraz (4), za uvjete jednoosne kompresije, konstitutivni izraz oštećenja stijene može se zapisati u obliku:

$$\sigma = E\varepsilon (1 - D) \quad (8)$$

Pretpostavlja se da su unutarnje pore u mekoj stijeni pri različitim ciklusima sušenja i vlaženja nasumično raspoređene, pa je promjena krivulje naprezanje-deformacija usko povezana s parametrima  $m$ ,  $F_0$  i  $F$ . Uzimajući u obzir utjecaj faze oštećenja na konstitutivni model, izraz (8) može se preoblikovati na sljedeći način:

$$\sigma = E\varepsilon \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] \right\} \quad (9)$$

Primjenom logaritma na obje strane izraza (9) dobiva se:

$$\ln [\ln E\varepsilon - \ln(E\varepsilon - \sigma)] = m \cdot \ln F - m \cdot \ln F_0 \quad (10)$$

Izraz (10) pokazuje da konstitutivni izraz i dalje ima velik broj nepoznatih parametara. Kako bi se dobilo teorijsko rješenje izraza karakteristika oštećenja, primjenjuje se metoda rješavanja prikazana u referentnoj literaturi.

Neka je  $y = \ln [\ln E\varepsilon - \ln(E\varepsilon - \sigma)]$ ;  $x = \ln F - \ln F_0$ . Uvrštavanjem pretpostavljenih funkcija  $x$  i  $y$  u izraz (10) dobiva se:

$$y = m \cdot x \quad (11)$$

Izraz (11) pokazuje da je  $y$  linearna funkcija varijable, a  $x$  vrijednost parametra  $m$  varijabla povezana s različitim brojevima ciklusa sušenja i vlaženja. Plastična faza deformacije smatra se elastičnom fazom, a pretpostavlja se da je granično naprezanje između elastične faze i faze razaranja na krivulji naprezanje-deformacija označeno s  $\sigma_d$ . Tada izrazi za faze  $\sigma < \sigma_d$  i  $\sigma > \sigma_d$  mogu biti zapisani kao:

$$\begin{cases} y_1 = m_1 x_1 (\sigma < \sigma_d) \\ y_2 = m_2 x_2 (\sigma \geq \sigma_d) \end{cases} \quad (12)$$

Vrijednosti parametra  $m_i$  za različite intenzitete ciklusa sušenja i vlaženja mogu se dobiti numeričkim prilagođavanjem krivulja naprezanje-deformacija primjenom izraza (12). Parametri  $m_1$  i  $m_2$  jesu varijable za fazu zbijanja i elastičnu fazu.

Na temelju prethodne analize segmentno prilagođavanje krivulja naprezanje-deformacija pomoću izraza (12) omogućuje određivanje vrijednosti parametra  $m$ . Rezultati su prikazani u tablici 3.

Prema podacima iz tablica 2. i 3., s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja Weibullovi parametri  $m_1$  i  $m_2$  pokazuju izražen trend smanjenja:  $m_1$  se smanjuje s 4,36 na 3,42, a  $m_2$  s 19,10 na 7,55.

Istodobno se unesena deformacijska energija smanjuje s 16,83 kJ/m<sup>3</sup> na 10,73 kJ/m<sup>3</sup>, dok se elastična deformacijska energija smanjuje s 15,15 kJ/m<sup>3</sup> na 10,33 kJ/m<sup>3</sup>, što upućuje na neprekidno slabljenje sposobnosti pohrane energije i krutosti uzoraka s povećanjem broja ciklusa.

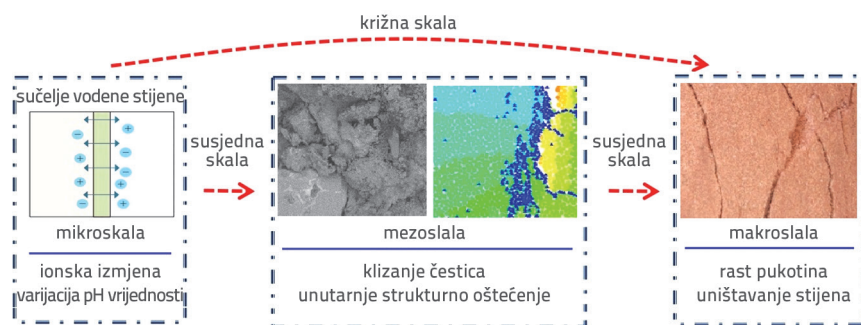
Smanjenje parametra  $m$ , dobro odgovara trendu smanjenja elastične deformacijske energije te odražava degradaciju krutosti i nosivosti u predvršnoj fazi. S druge strane, smanjenje parametra  $m_2$  povezano je s promjenama u ponašanju evolucije oštećenja u postvršnoj fazi.

Općenito, evolucija tih parametara pokazuje dobru podudarnost s promjenama energetske karakteristika te u određenoj mjeri može opisati ukupne značajke degradacije modula elastičnosti i razvoja oštećenja uzoraka tijekom ciklusa sušenja i vlaženja.

#### 4.3. Višeskalna korelacijska svojstva oštećenja i loma mekih stijena

Kao što je to prikazano na slici 7., meke stijene pod djelovanjem ciklusa sušenja i vlaženja pokazuju višeskalna korelacijska svojstva oštećenja. Kada molekule vode prodiru u čestice meke stijene kroz mikropukotine, tada dolazi do hidratacije između vode i stijene, što slabi veze između čestica.

Kada se meka stijena opterećuje u stanju zasićenosti vodom, tada se pora voda ne može pravodobno istisnuti, što uzrokuje nagli porast tlaka na stijenama mikropukotina. Povećani tlak izaziva vlačna naprezanja na stijenama pukotina, što dovodi do njihova širenja kada tlak premaši graničnu vlačnu čvrstoću.



Slika 7. Višeskalna unutarnja korelacijska svojstva oštećenja mekih stijena

Istodobno molekule vode prodiru u kristalnu strukturu minerala, stvarajući higroskopske slojeve koji uzrokuju bubrenje čestica i narušavaju njihovu strukturu. Kombinirani učinak početnog oštećenja uzrokovanog vezanom vodom i kumulativnog oštećenja uzrokovanog slobodnom vodom znatno slabi makroskopska mehanička svojstva mekih stijena.

#### 4.4. Rasprava

U kvantitativnome smislu stupanj smanjenja vršne čvrstoće i modula elastičnosti s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja u ovome istraživanju općenito je u skladu s trendovima zabilježenima u prethodnoj literaturi. Naprimjer, Yu i sur. [22] izvijestili su o sličnome eksponencijalnom trendu opadanja, dok su Gratchev i sur. [12] zabilježili nešto veće smanjenje čvrstoće, što može biti povezano s razlikama u vrsti otopine, metodama ispitivanja i litološkim svojstvima. Wen i sur. [23] te Yin i sur. [24] modelirali su proces degradacije na temelju Weibullove teorije ili teorije energetskog oštećenja, a evolucijska svojstva njihovih parametara modela pokazuju dobro podudaranje s promjenama parametara dobivenima u ovome istraživanju. Treba naglasiti da su navedene studije uglavnom analizirale problem iz jedne perspektive, naprimjer, mehaničkih svojstava, evolucije energije ili konstitutivnog modeliranja. Nasuprot tome, ovo istraživanje integrirano razmatra odnose između evolucije mikrostrukture, promjena u raspodjeli energije i promjena

konstitutivnih parametara unutar jedinstvenoga eksperimentalnog okvira, čime sustavnije objašnjava mehanizam oštećenja mekih stijena tijekom ciklusa sušenja i vlaženja.

## 5. Zaključak

Na makroskopskoj razini, s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja čvrstoća, modul elastičnosti i elastična deformacijska energija mekih stijena pokazuju eksponencijalni trend opadanja.

Uzorcima stijena postupno prelaze iz krhkog u plastično ponašanje, pri čemu dolazi do prelaska iz vlačnog loma u osnome smjeru na posmični lom, uz povećanje stupnja oštećenja.

Na mezoskopskoj razini, s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja površine čestica postaju znatno hrapavije, a količina prijanjućeg materijala povećava se. Granice između mineralnih čestica postaju nejasne, dok se veličina i dubina mezopora i mikropukotina znatno povećavaju. Uočava se širenje pukotina uz lokalno odvajanje materijala i neravnomjernu raspodjelu oštećenja, zbog čega struktura uzorka postupno prelazi u rahlu i poroznu.

Izračunom parametara konstitutivnog modela oštećenja  $m_1$  i  $m_2$  utvrđeno je da promjena parametra  $m_1$  dobro odražava promjene čvrstoće i modula elastičnosti: što je vrijednost  $m_1$  manja, to su čvrstoća i modul elastičnosti niži. Istodobno, promjena parametra  $m_2$  učinkovito odražava način loma stijene, pri čemu manja apsolutna vrijednost  $m_2$  upućuje na izraženije plastično ponašanje materijala.

Rezultati ovog istraživanja pružaju važnu referentnu osnovu za razumijevanje učinka ciklusa sušenja i vlaženja na oštećenje mekih stijena.

## Zahvala

Ovaj rad financijski su podržali projekti Guangxi Natural Science Foundation (br. 2025GXNSFH069151) i Guangxi Science and Technology Base Talent Project (br. AD21220126).

## LITERATURA

- [1] Hamilton McMillan, R., Eberhardt, E., Ryan Campbell, R., Primadiansyah, A.: Monitoring stress-induced brittle rock mass damage for preventative support maintenance, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 183 (2024), 105927, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105927>
- [2] Kovačević, M.S., Bačić, M., Arapov, I.: Prospects of underground engineering in the use of shallow geothermal energy, *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 12, pp. 1019-1028, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.663.2012>
- [3] Stubbs, A.R., Power, L.M., Paulo, C., Wang, B.L., Zeyen, N., Wilson, S., Mervine, E., Gunning, C.: Impact of wet-dry cycles on enhanced rock weathering of brucite, wollastonite, serpentine and kimberlite: Implications for carbon verification, *Chemical Geology*, 637 (2023), 121674, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121674>
- [4] Liu, J., Qiu, X.Y., Yu, X.W., Zeng, L., Fu, H.Y.: Wetting Deformation and Constitutive Modeling of Predisintegrated Carbonaceous Mudstone Subjected to Drying-Wetting Cycles, *International Journal of Geomechanics*, 25 (2024) 2, 9745, <https://doi.org/10.1061/IJGNAL.GMENG-9745>

- [5] Wang, G.L., Zhang, T.Y., Zhang, L.: The law of strength damage and deterioration of jointed sandstone after dry-wet cycles, *Journal of Mountain Science*, 20 (2023) 4, pp. 1170-1182, <https://doi.org/10.1007/S11629-022-7605-1>
- [6] Knez, D., Khalilidermani, M., Zamani, M.A.M.: Water Influence on the Determination of the Rock Matrix Bulk Modulus in Reservoir Engineering and Rock-Fluid Coupling Projects, *Energies*, 16 (2023) 4, 1769, <https://doi.org/10.3390/EN16041769>
- [7] Liu, X.C., Huang, F., Zheng, A., Hu, X.T.: Micro-dissolution mechanism and macro-mechanical behavior of red-bed soft rock under dry-wet cycle, *Materials Letters*, 362 (2024), 136220, <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2024.136220>
- [8] Tomanović, Z.: The stress and time dependent behaviour of soft rocks, *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 12, pp. 993-1007, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.815.2012>
- [9] Qi, S.X., Zhang, H.L., Bian, H.B., Wang, J.J., Xu, S.X., Wu, B.: Damage Characteristics and Degradation Mechanism of Silty Mudstone Under Wet-Dry Cycling, *Geotechnical and Geological Engineering*, 42 (2024) 7, pp. 6095-6112, <https://doi.org/10.1007/S10706-024-02877-3>
- [10] Yu, F., Tong, K.W., Fu, Z.H., Feng, G.S., Zhou, Z., Chen, S.X., Dai, Z.J.: Multi-scale deformation characteristics and mechanism of red-bed mudstone in dry-wet environment, *Frontiers in Earth Science*, 10 (2022), 974707, <https://doi.org/10.3389/FEART.2022.974707>
- [11] Zhao, Y.F., Ren, S., Jiang, D.Y., Liu, R., Wu, J.X., Jiang X.: Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain, *Construction and Building Materials*, 191 (2018), 923-931, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.069>
- [12] Gratchev, I., Pathiranagei, S.V., Kim, D.H.: Strength properties of fresh and weathered rocks subjected to wetting-drying cycles, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 5 (2019) 3, pp. 211-221, <https://doi.org/10.1007/s40948-019-00104-5>
- [13] Wen, T., Wang, Y.K., Tang, H.M., Zhang, J.R., Hu, M.Y.: Damage Evolution and Failure Mechanism of Red-Bed Rock under Drying-Wetting Cycles, *Water*, 15 (2023) 15, 2684, <https://doi.org/10.3390/W15152684>
- [14] Huang, Z., Zhang, W., Zhang, H., Zhang, J.B., Hu Z.J.: Damage characteristics and new constitutive model of sandstone under wet-dry cycles, *Journal of Mountain Science*, 19 (2022) 7, pp. 2111-2125, <https://doi.org/10.1007/S11629-021-7239-8>
- [1] Deng, J.H., Chen, C., Wu, X.N.: The influence of loading rate on the mechanical behavior and energy evolution characteristics of hard and soft rock under triaxial compression, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 60 (2022) 3, pp. 495-508, <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/151819>
- [16] Ma, T.F., Liu, H.H., Zou, Q.L., Kong, F.J., Ran, Q.C., Wang, P.T.: Damage evolution characteristics and deterioration mechanism of mechanical properties of sandstone subjected to drying-wetting cycles, *Journal of Materials Research and Technology*, 23 (2023), pp. 4591-4605, <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.02.068>
- [17] Ying, P., Zhu, Z.M., Ren, L., Deng, S., Niu, C.Y., Wan, D.Y., Wang F.: Deterioration of dynamic fracture characteristics, tensile strength and elastic modulus of tight sandstone under dry-wet cycles, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109 (2020), 102698, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102698>
- [18] Liu, X.C., Huang, F., Zheng, A.C., Hu, X.T.: Microscopic simulation of mechanical tests on red-bed soft rock based on the evolutionary law of mineral composition under dry-wet cycles, *Materials Today Communications*, 40 (2024), 110000, <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2024.110000>
- [19] Mohamed, A., Asmoay, A., Alshehri, F., Abdelrady, A., Othman A.: Hydro-Geochemical Applications and Multivariate Analysis to Assess the Water-Rock Interaction in Arid Environments, *Applied Sciences*, 12 (2022) 13, 6340, <https://doi.org/10.3390/APP12136340>
- [20] Zhang, L., Wang, G.L., Wang, R.Q., Liu, B.L., Wang, K.: The Mesoscopic Damage Mechanism of Jointed Sandstone Subjected to the Action of Dry-Wet Alternating Cycles, *Applied Sciences*, 14 (2024) 22, 10346, <https://doi.org/10.3390/APP142210346>
- [21] Li, S.N., Huang, Z.H., Liang, Q., Liu, J., Luo, S.L., Zhou, W.Q.: Evolution Mechanism of Mesocrack and Macrocack Propagation in Carbonaceous Mudstone under the Action of Dry-Wet Cycles, *Geofluids*, 2022 (2022), 6768370, <https://doi.org/10.1155/2022/6768370>
- [22] Yu, X.W., Fu, H.Y., Zeng, L., Zhang, G.J., Zhang, H.G., Liu, N.: Cracking of silty mudstone subjected to wetting-drying cycles, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2025) 17:4195-4210. doi: 10.1016/j.jrmge.2024.10.009
- [23] Wen, T., Wang, Y.K., Tang, H.M., Zhang, J.L.: Damage Evolution and Failure Mechanism of Red-Bed Rock under Drying-Wetting Cycles, *Water*, (2023) 15:2684. <https://doi.org/10.3390/w15152684>
- [24] Yin, X.M., Wang, L.N., Liu, W.L.: The damage and deterioration effects of dry-wet cycles on impurity-bearing gypsum rock and a fractal damage constitutive model, *Fatigue Fract Eng Mat Struct*, (2025) 48:2599-2617. <https://doi.org/10.1111/ffe.14628>