

Primljen / Received: 9.6.2025.

Ispravljen / Corrected: 23.10.2025.

Prihvaćen / Accepted: 30.10.2025.

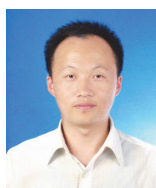
Dostupno online / Available online: 10.4.2026.

Sinergijski razvoj mikrostrukture i vezanih multifizikalnih mehaničkih odziva donjeg ustroja željezničke pruge

Autori:

doktorand **Yanfu Duan**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Shihezi, Kina

Fakultet za očuvanje voda i arhitekt. inženjerstvo
lttdyf@163.comProf.dr.sc. **Jianjun Cheng**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Shihezi, Kina

Fakultet za očuvanje voda i arhitekt. inženjerstvo
chengdesign@163.com

Autor za korespondenciju

**Honggang Kou**, dipl.ing.građ.Glavni laboratorij za sigurnost i trajnost
betonskih konstrukcija Shaanxi, Kina
13913143@qq.comdoktorand **Yaqiang Wang**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Shihezi, Kina

Fakultet za očuvanje voda i arhitekt. inženjerstvo
Wangyq086@126.com

Izvorni znanstveni rad

Yanfu Duan, Jianjun Cheng, Honggang Kou, Yaqiang Wang

Sinergijski razvoj mikrostrukture i vezanih multifizikalnih mehaničkih odziva donjeg ustroja željezničke pruge

Donji ustroj željezničke pruge u područjima isušenih slanijih jezera sklon je deformacijama uslijed bubrenja tla u složenim okolišnim uvjetima. Radi istraživanja vezanih višepoljnih odziva u sustavu voda-sol-toplina-mehanika i sinergijskog razvoja mikrostrukture, u ovome su radu provedena ispitivanja slanijih tala s područja slanog jezera Lop Nur. Uspostavljen je eksperimentalni sustav međudjelovanja multifizikalnih polja radi analize mehaničkih odziva u različitim okolišnim uvjetima povezivanja, osjetljivosti čimbenika koji utječu na mehaničke parametre, razvoja mikrostrukture te regulatorne uloge porne strukture u mehaničkoj stabilnosti. Rezultati pokazuju da je u zonama visokih temperatura ($\geq 20^\circ\text{C}$) posmična čvrstoća u negativnoj korelaciji s udjelom vode, dok u zonama niskih temperatura ($\leq 0^\circ\text{C}$) postoji pozitivna korelacija. Niže temperature također znatno smanjuju kumulativnu plastičnu deformaciju. Razvoj mikrostrukture sustava slanijih tala uzrokovan niskim temperaturama ima četiri faze: početnu nukleaciju, lančani rast, dinamičku rekonstrukciju i kritični lom. Sinergijski razvoj međudjelovanja multifizikalnih odziva i mikrostrukture ponajprije se očituje u razvoju strukture pora. Ti rezultati pružaju znanstvenu osnovu za ocjenu mehaničke stabilnosti te za projektiranje i održavanje donjeg ustroja željezničke pruge u hladnim, neplodnim područjima slanijih jezera.

Ključne riječi:

hidro-solno-toplinsko-mehaničko međudjelovanje, sinergijski razvoj mikrostrukture, donji ustroj željezničke pruge, područja isušenih slanijih jezera

Original research paper

Yanfu Duan, Jianjun Cheng, Honggang Kou, Yaqiang Wang

Synergistic evolution of microstructure and coupled multiphysics mechanical responses in railway subgrades

Railway subgrades in desiccated salt lake regions are prone to swelling hazards under complex environmental conditions. To investigate the water-salt-thermal-mechanical multi-field coupling responses and the synergistic evolution of microstructure, this study examined saline soils from the Lop Nur salt lake area. A multi-physical field coupling experimental system was established to analyse mechanical responses under different environmental coupling conditions, factor sensitivity affecting mechanical parameters, microstructural evolution, and the regulatory role of pore structure in mechanical stability. Results indicate that in high-temperature zones ($\geq 20^\circ\text{C}$), shear strength is negatively correlated with water content, whereas in low-temperature zones ($\leq 0^\circ\text{C}$) a positive correlation exists. Lower temperatures also markedly suppress cumulative plastic strain. Low-temperature-induced microstructural evolution of saline soil systems proceeds through four stages: initial nucleation, chain-like growth, dynamic reconstruction, and critical failure. The synergistic evolution of multi-field coupling responses and microstructure is primarily reflected in pore structure development. These findings provide a scientific basis for evaluating mechanical stability and guiding the design and maintenance of railway subgrades in cold, arid salt lake environments.

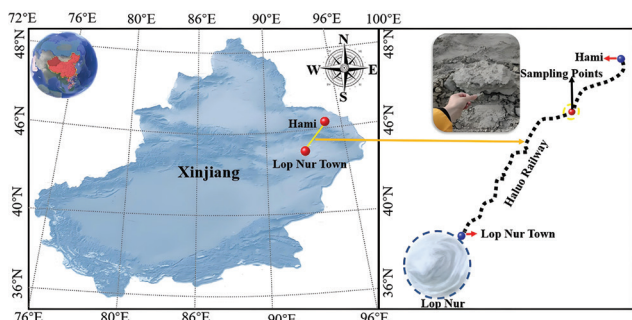
Key words:

hydro-salt-thermal-mechanical coupling, microstructural co-evolution, railway subgrade, dry salt lake areas

1. Uvod

Povijesno gledano, jezero Lop Nur bilo je drugo najveće jezero u kontinentalnoj Kini, s površinom većom od 3000 km². Međutim, pod kombiniranim utjecajem klimatskih promjena i ljudskih aktivnosti, do sedamdesetih godina prošlog stoljeća potpuno je presušilo, pri čemu se formirala nekoliko metara debela slana kora [1-3]. Na slici 1. prikazan je geografski položaj točke uzorkovanja. Primijenjena je jedna točka uzorkovanja. Područje Lop Nur, tipično isušeno slano jezero u sjeverozapadnoj Kini, velik je izazov za dugoročnu stabilnost donjeg ustroja željezničke pruge zbog svojih ekstremnih okolišnih uvjeta.

Današnje površinsko slano tlo u Lop Nuru ima udio od 30 % do 50 % soli, pri čemu je poroznost izvornoga slanog tla između 15 % i 35 %. Područje karakterizira izrazito suha klima, s prosječnom godišnjom količinom oborina od samo 20 mm, stopom isparavanja većom od 3000 mm te dnevnim temperaturnim kolebanjima do 40 °C. Kristalizacija natrijeva sulfata, natrijeva klorida i drugih soli uzrokuje znatne deformacije donjega ustroja željezničke pruge u obliku izdizanja slojeva uslijed kristalizacije soli i slijeganja [4, 5]. Uzimajući kao primjer postojeću željezničku prugu koja prolazi kroz područje Lop Nura, stopa smanjenja dinamičkog modula posmika donjega ustroja željezničke pruge ostaje visoka pod dugotrajnim dinamičkim opterećenjem vlakova i cikličkim promjenama temperature, dok se nepravilnosti na kolosijeku iz godine u godinu postupno povećavaju [6]. Taj mehanizam degradacije pripisuje se specifičnim procesima oštećenja donjega ustroja željezničke pruge u područjima isušanih slanih jezera: periodično otapanje i rekristalizacija soli rekonstruiraju mikrostrukturu pora, dok kretanje filma slane otopine kroz međuprostore između kristala dodatno slabi skelet tla, što u konačnici dovodi do pogoršanja makroskopskih mehaničkih svojstava [7-9].



Slika 1. Geografski položaj mjesta uzorkovanja

Suvremena istraživanja mehaničkog ponašanja slanih tala uglavnom su usmjerena na odzive pod djelovanjem pojedinačnih fizikalnih polja. Naprimjer, negativna korelacija između posmične čvrstoće i udjela soli u slanim tlima pri statičkim opterećenjem potvrđena je ispitivanjima izravnog smicanja [10], dok su obrasci akumulacije plastične deformacije pod dinamičkim opterećenjem prethodno utvrđeni dinamičkim troosnim ispitivanjima [11, 12]. Međutim, složeni okolišni uvjeti

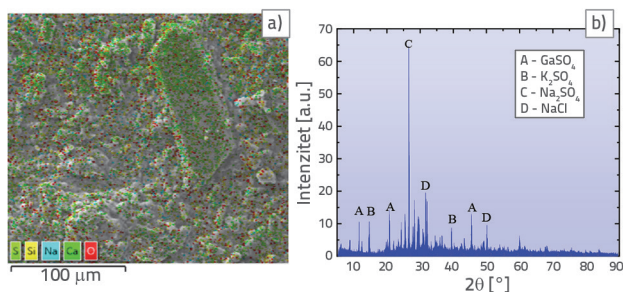
u području Lop Nura zahtijevaju integrirana istraživanja učinaka međudjelovanja multifizikalnih polja. Temperaturni gradijenti uzrokuju fazne prijelaze slanih tala, pri čemu dolazi do znatnih promjena porne strukture, naprimjer, natrijev sulfat prolazi kristalne fazne prijelaze pri 32,4 °C [13], dok procjeđivanje slane otopine u kombinaciji s dinamičkim opterećenjem može ubrzati širenje pukotina [14]. Dosadašnja istraživanja pokazuju da se kohezijska čvrstoća smanjuje za 25 - 30 % kada temperatura okoline prelazi 30 °C, no temeljni mehanizmi na mikrorazini i dalje nisu razjašnjeni [15]. Nadalje, interakcija između saliniteta slane otopine u slanoj kori i frekvencije dinamičkih opterećenja utječu na stabilnost donjeg ustroja željezničke pruge, mijenjajući svojstva prigušenja tla [16, 17]. Osjetljivosti kritičnih parametara povezanih s vodom, soli, temperaturom i mehaničkim čimbenicima i dalje su nedovoljno definirane. Većina dosadašnjih istraživanja usmjerena je na izolirane okolišne čimbenike (npr. samo sol ili temperatura), pri čemu nedostaje sustavno razumijevanje međurazmjernih razvojnih mehanizama u materijalima donjeg ustroja željezničke pruge uslijed međudjelovanja više hidro-solno-toplinsko-mehaničkih polja, što znatno ograničava projektiranje i održavanje željezničke infrastrukture u područjima slanih jezera [18-20]. Osim toga, mehanizmi međudjelovanja između razvoja mikrostrukture i makroskopskih mehaničkih odziva u slanim tlima područja Lop Nura i dalje nisu razjašnjeni. Zato postoji žurna potreba za razvojem eksperimentalnog okvira međudjelovanja multifizikalnih polja kojim bi se razjasnio sinergijski razvoj mehaničkih odziva i mikrostrukture u slanim tlima, uz kvantificirani model smanjenja dinamičkog modula posmika.

Ovim se radom uspostavljaju višerazinski analitički okvir međudjelovanja i eksperimentalni sustav međudjelovanja multifizikalnih polja za donji ustroj željezničke pruge u području Lop Nura. Najprije su provedeni ortogonalni trofaktorski četverorazinski i četverofaktorski četverorazinski planovi ispitivanja, u kojima su sustavno mijenjani udjeli vode (4 %, 6 %, 8 %, 10 %), udjeli soli (0 %, 5 %, 10 %, 15 %), temperatura (-20 °C, 0 °C, 20 °C, 40 °C) i amplitude dinamičkog naprezanja (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 300 kPa) radi ispitivanja mehaničkih odziva u uvjetima međudjelovanja multifizikalnih polja i osjetljivosti parametara. Nadalje, skenirajući elektronski mikroskop (SEM) upotrijebljen je za usporedbu morfologije kristala soli s makroskopskim parametrima čvrstoće, čime su otkriveni mehanizmi razvoja mikrostrukture. Istodobno je primijenjena rendgenska računalna tomografija (CT) za kvantifikaciju porne strukture u slanim tlima pri različitim udjelima vode i soli, pri čemu su koordinacijski brojevi korišteni za ocjenu utjecaja porne strukture na mehaničku stabilnost. Naposljetku je, na temelju rezultata ortogonalnih ispitivanja, razvijen kvantitativni model smanjenja dinamičkog modula posmika, koji pruža teorijsku osnovu za predviđanje i upravljanje mehaničkim ponašanjem slanih tala.

2. Materijali i metode

2.1. Određivanje fizikalnih svojstava i kontrola parametara materijala u slanim tlima

Kao što je to prikazano na slikama 2.a (SEM snimke) i 2.b (XRD difraktogram), na uzorcima tla prikupljenima na terenu provedene su analize skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) i rendgenskom difrakcijom (XRD). SEM snimke pokazale su da tlo na pružnoj dionici Ha - Luo km 286+600 ima alkalna svojstva, pri čemu su dominantni kationi Na^+ , K^+ , i Ca^{2+} i primarni anioni SO_4^{2-} i Cl^- . Među kationima najzastupljeniji je Na^+ , zatim Ca^{2+} , dok je SO_4^{2-} prevladavajući anion, a Cl^- je prisutan u najmanjoj koncentraciji. Rezultati XRD analize pokazali su da su glavne mineralne komponente gips (CaSO_4), kalijev sulfat (K_2SO_4), natrijev sulfat (Na_2SO_4) i natrijev klorid (NaCl). Kemijskom analizom potvrđen je ukupni udio soli od 6,67 %, čime se tlo svrstava u hiperslana tla.



Slika 2. SEM snimke poprečnog presjeka i rendgenske difrakcije (XRD): a) SEM snimka poprečnog presjeka; b) XRD uzorak

Na slici 3. prikazane su granulometrijske i odgovarajuće kumulativne krivulje uzoraka slanog tla. Analiza veličine čestica pokazala je da uzorci s veličinom čestica $> 0,075$ mm imaju nepovoljan granulometrijski sastav, kao što je to prikazano na slici 3.c. Za čestice $< 0,075$ mm najveći udio zabilježen je u

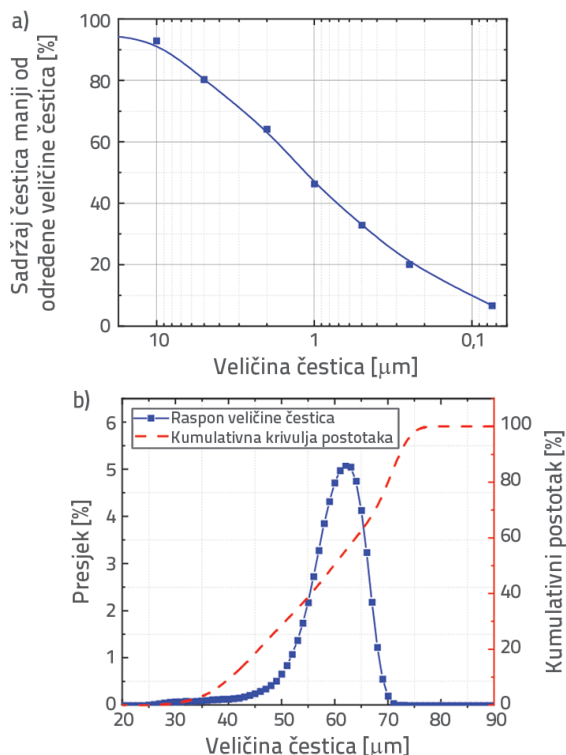
Tablica 1. Fizikalna svojstva slanog tla

Prirodni udio vlage, w [%]	Najveća suha gustoća tla [g/cm^3]	Specifična težina čestica tla [G_s]	Udio topive soli [g/kg]	Atterbergove granice [%]		
				Granica tečenja, w_L	Granica plastičnosti, w_p	Indeks plastičnosti, I_p
1~12,5	1,83	2,73	335,9	28,7	18	10,7

Tablica 2. Trofaktorski i četverofaktorski ortogonalni planovi s četirima razinama

Razine	Faktor				Razine	Faktor			
	Udio vode w [%]	Udio soli s [%]	Temperatura t [°C]	Amplituda dinamičkog napreznja, d [kPa]		Udio vode w [%]	Udio soli s [%]	Temperatura t [°C]	Amplituda dinamičkog napreznja, d [kPa]
1	w_1	s_1	$40(t_1)$	$50(d_1)$	9	$8(w_3)$	$0(s_1)$	$40(t_1)$	$50(d_1)$
2	$4(w_1)$	$5(s_2)$	$20(t_2)$	$100(d_2)$	10	$8(w_3)$	$5(s_2)$	$20(t_2)$	$100(d_2)$
3	$4(w_1)$	$10(s_3)$	$0(t_3)$	$150(d_3)$	11	$8(w_3)$	$10(s_3)$	$0(t_3)$	$150(d_3)$
4	$4(w_1)$	$15(s_4)$	$-20(t_4)$	$200(d_4)$	12	$8(w_3)$	$15(s_4)$	$-20(t_4)$	$200(d_4)$
5	$6(w_2)$	$0(s_1)$	$40(t_1)$	$50(d_1)$	13	$10(w_4)$	$0(s_1)$	$40(t_1)$	$50(d_1)$
6	$6(w_2)$	$5(s_2)$	$20(t_2)$	$100(d_2)$	14	$10(w_4)$	$5(s_2)$	$20(t_2)$	$100(d_2)$
7	$6(w_2)$	$10(s_3)$	$0(t_3)$	$150(d_3)$	15	$10(w_4)$	$10(s_3)$	$0(t_3)$	$150(d_3)$
8	$6(w_2)$	$15(s_4)$	$-20(t_4)$	$200(d_4)$	16	$10(w_4)$	$15(s_4)$	$-20(t_4)$	$200(d_4)$

rasponu 60 - 70 μm , kao što je to prikazano na slici 3.d. Osnovna fizikalna svojstva uzoraka tla prikazana su u tablici 1.



Slika 3. Granulometrijske krivulje raspodjele čestica tla: a) krivulja raspodjele čestica tla većih od 0,075 mm; b) krivulja manjih od 0,075 mm

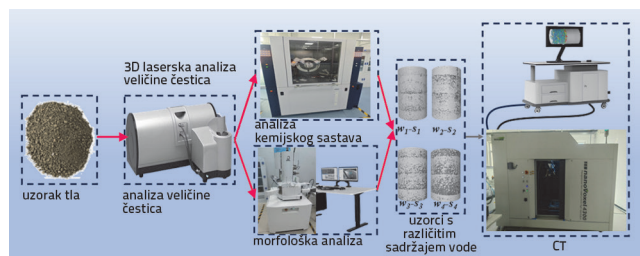
2.2. Plan i metodologija ispitivanja vezanja vode, soli, toplinskih i mehaničkih čimbenika

Kako bi se uspostavili višerazinski analitički okvir međudjelovanja i eksperimentalni sustav međudjelovanja multifizikalnih polja,

u ovom su radu osmišljena trofaktorska i četverofaktorska, četverorazinska ortogonalna ispitivanja s udjelima vode (4 %, 6 %, 8 %, 10 %), udjelima soli (0 %, 5 %, 10 %, 15 %), temperaturom ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) i amplitudom dinamičkog naprezanja (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa). Statički okolišni čimbenici obuhvaćali su udio vode, udio soli i temperaturu, dok su dinamička ispitivanja uključivala dodatni parametar amplitude dinamičkog naprezanja. Kako je prikazano u ortogonalnim planovima u tablici 2., statička ispitivanja provedena su prema planu L_{16} (4^3), dok su dinamička ispitivanja provedena prema planu L_{16} (4^4).

2.3. Postupak ispitivanja

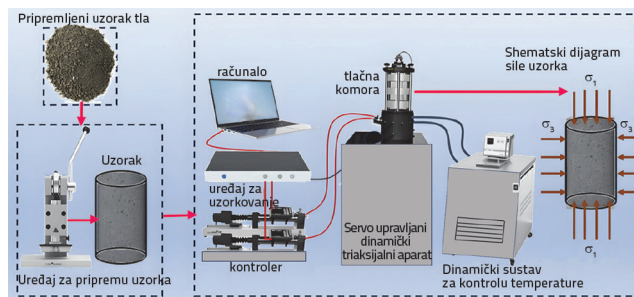
Kao što je to prikazano na slici 4., provedene su analize mikrostrukture i fizikalno-kemijskih svojstava. Uzorci tla najprije su prosijani kroz sito otvora 2 mm, nakon čega je provedena detaljna analiza mikrostrukture i fizikalno-kemijskih svojstava. Za analizu mineralnog sastava primijenjena je rendgenska difrakcija (XRD), za promatranje mikrostrukture skenirajući elektronski mikroskop (SEM), za elementarnu analizu energetske disperzivna rendgenska spektroskopija (EDS), a za određivanje granulometrijskog sastava trodimenzionalni laserski analizator veličine čestica. Preoblikovani uzorci slanog tla (W_1-S_1 , W_2-S_2 , W_3-S_3 , W_4-S_4) pripremljeni su ispiranjem radi uklanjanja soli, nakon čega su sušeni, usitnjeni i prosijani kroz sito otvora 2 mm. Natrijev sulfat (Na_2SO_4), kao najzastupljenija sol u izvornim uzorcima, odabran je kao sredstvo zaslanjivanja. CT snimanje uzoraka provedeno je s rezolucijom od $30\text{ }\mu\text{m}$, pri naponu od 220 kV i jakosti struje od $1,3\text{ mA}$, pri temperaturi okoline od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 4. Analiza mikrostrukture i fizikalno-kemijskih svojstava

Kao što je to prikazano na slici 5., ispitivanje mehaničkih svojstava započelo je pripremom uzoraka prema parametrima ortogonalnog plana navedenima u tablici 2., nakon analiza mikrostrukture i fizikalno-kemijskih svojstava. Kako bi se spriječila oštećenja uslijed bubrenja uzrokovana dugotrajnim skladištenjem, ispitivanja su provedena neposredno nakon pripreme uzoraka. Za statička i dinamička ispitivanja korišten je GDS dinamički troosni sustav ispitivanja (DYNTTS). Dinamičko opterećenje primijenjeno je u obliku polusinusnog vala. Na temelju prethodnih istraživanja razina opterećenja donjeg ustroja željezničke pruge, stvarnih opterećenja vlakova i mjerenja frekvencije vibracija [21] čelijski tlak postavljen je na 65 kPa , frekvencija vibracija na 1 Hz , a statičko devijatorsko naprezanje na $\sigma_q = 15\text{ kPa}$ [22]. Terenska mjerenja pokazuju

da se dinamička naprezanja donjeg ustroja željezničke pruge kreću u rasponu od 20 kPa do 100 kPa . Kako bi se uzeli u obzir mogući uvjeti preopterećenja, primijenjene su amplitude dinamičkog naprezanja od 50 kPa , 100 kPa , 150 kPa i 200 kPa . Ispitivanje je završeno kada je aksijalna kumulativna deformacija dosegla 5% ili kada je broj ciklusa opterećenja dosegnuo 10.000 .



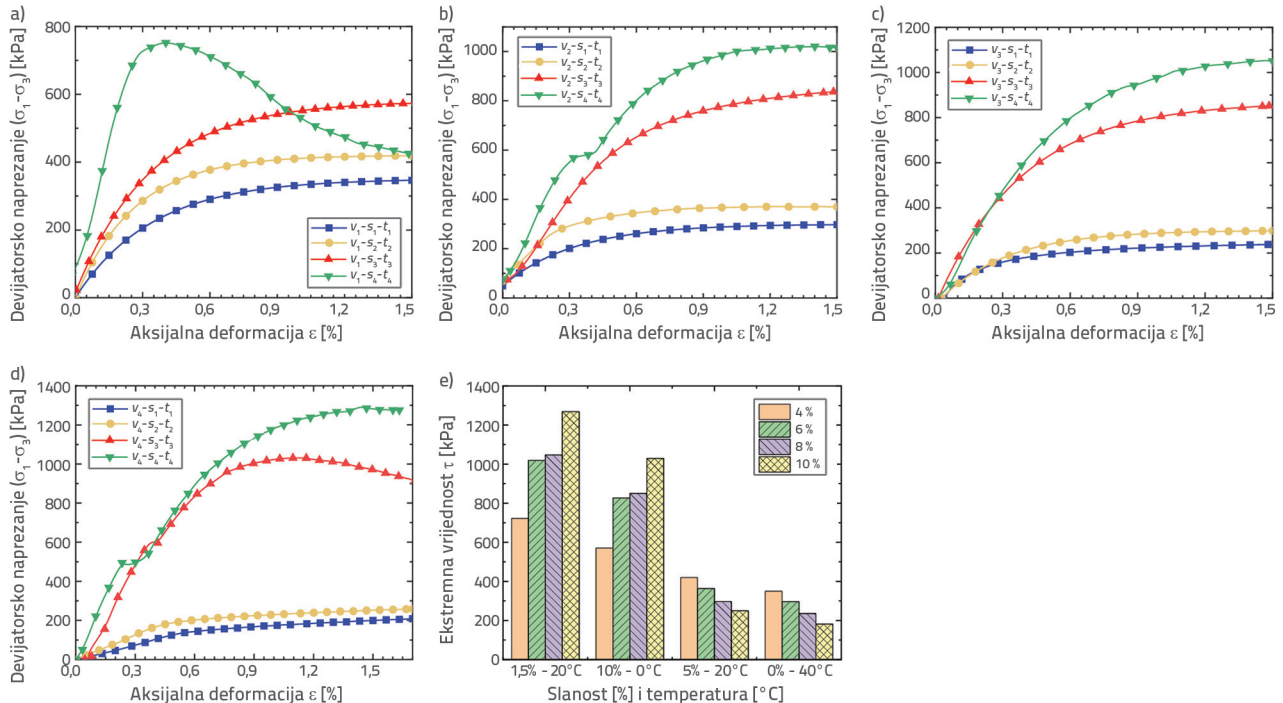
Slika 5. Postupak mehaničkog ispitivanja

3. Mehanički odziv donjeg ustroja željezničke pruge u suhim područjima slanih jezera uslijed međudjelovanja multifizikalnih hidro-toplinsko-solno-mehaničkih čimbenika

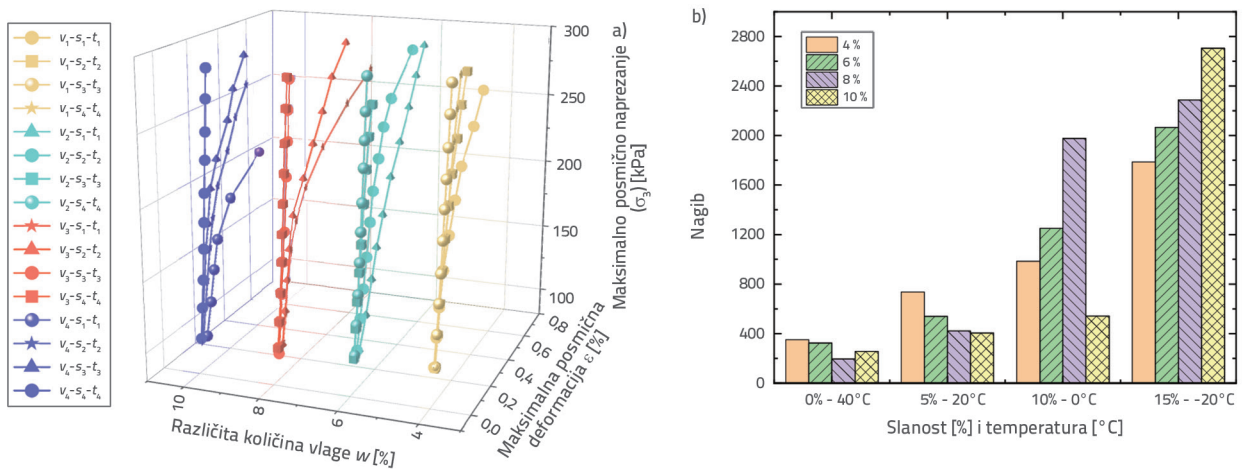
3.1. Analiza statičko-dinamičkog odziva

Kao što je to prikazano na slikama od 6.a do 6.d, dobivene su krivulje aksijalnog naprezanja - aksijalne deformacije, a vršne posmične čvrstoće određene iz tih krivulja statistički su analizirane kako bi se dobio prikaz na slici 6.e. Na slici 6.e prikazan je utjecaj međudjelovanja udjela soli, temperature i udjela vode na posmičnu čvrstoću pri čelijskome tlaku od 65 kPa . Rezultati pokazuju da je u područjima visokih temperatura ($\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) posmična čvrstoća u negativnoj korelaciji s udjelom vode, dok je u područjima niskih temperatura ($\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) posmična čvrstoća u pozitivnoj korelaciji s udjelom vode. Naprimjer, pri udjelu soli od 0% i temperaturi od $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ posmične čvrstoće uzoraka, s udjelom vode od 4% , 6% , 8% i 10% , iznosile su 350 kPa , 296 kPa , 236 kPa i 182 kPa , što predstavlja smanjenje od 48% pri povećanju udjela vode s 4% na 10% . Suprotno tome, pri udjelu soli od 15% i temperaturi od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ posmične čvrstoće uzoraka, s udjelom vode od 4% , 6% , 8% i 10% , iznosile su 722 kPa , 1019 kPa , 1047 kPa i 1269 kPa , što predstavlja povećanje od 43% s porastom udjela vode. Ta pojava upućuje na to da veći udio vode pojačava učinak očvršćivanja pri niskim temperaturama, vjerojatno zbog formiranja kristala leda na temperaturi nižoj od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, koji povećavaju koheziju između čestica cementiranjem te dodatno potiču kristalizaciju soli, pri čemu nastaje kruta struktura koja poboljšava ukupnu čvrstoću materijala. Ti rezultati ističu znatne učinke međudjelovanja udjela vode i temperature na posmičnu čvrstoću.

Pri konstantnome udjelu vode posmična čvrstoća znatno se povećava u uvjetima većeg udjela soli i niže temperature.



Slika 6. Odnos aksijalno naprezanje - aksijalna deformacija i vršna posmična čvrstoća: a) uzorak s 4 % udjela vode; b) uzorak s 6 % udjela vode; c) uzorak s 8 % udjela vode; d) uzorak s 10 % udjela vode; e) vršna posmična čvrstoća



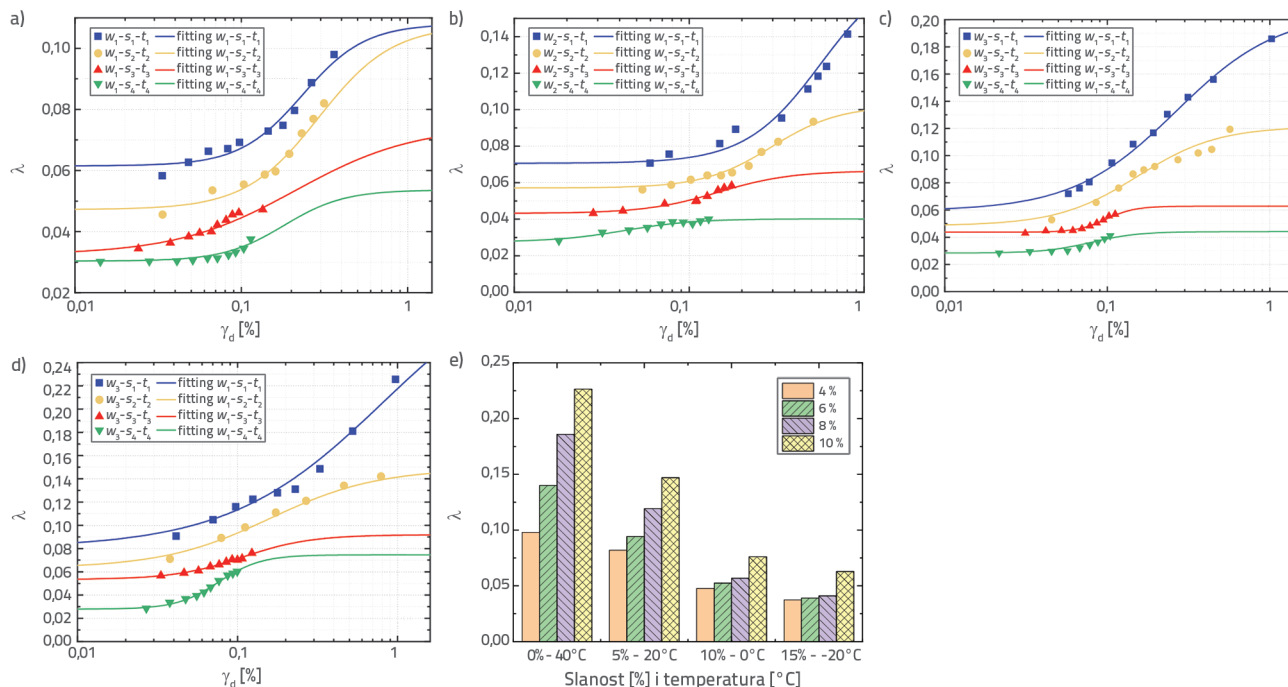
Slika 7. Krivulje nosivosti (krivulje okosnice) i vršni nagib: a) krivulja nosivosti; b) vršni nagib krivulje nosivosti

Naprimjer, pri udjelu vode od 10 % posmične čvrstoće za s_1-t_1 , s_2-t_2 , s_3-t_3 i s_4-t_4 iznosile su 182 kPa, 250 kPa, 1029 kPa i 1269 kPa. Slično tome, pri udjelu vode od 4 % odgovarajuće posmične čvrstoće iznosile su 350 kPa, 420 kPa, 571 kPa i 722 kPa. Do te pojave dolazi jer se topivost soli povećava s temperaturom, što dovodi do djelomičnog otapanja kristala soli u ione, čime slabi veza među česticama i smanjuje se čvrstoća. Suprotno tome, pri niskim temperaturama soli i kristali leda zajedno formiraju kompozitne cementne strukture, čime se povećava stabilnost strukture [23]. Ti rezultati dodatno pokazuju da povišene temperature ubrzavaju otapanje soli i migraciju vode, čime slabe veze među česticama.

3.2. Analiza dinamičkog odziva

3.2.1. Analiza nagiba krivulje nosivosti pri dinamičkome opterećenju

Kao što je to prikazano na slikama 7.a (krivulje nosivosti ili (krivulje okosnice) i 7.b (ekstremne vrijednosti nagiba), nagibi krivulja nosivosti određeni su iz vršnih posmičnih čvrstoća prikazanih na slici 7.a. Na slici 7.b prikazano je znatno povećanje nagiba krivulja nosivosti sa smanjenjem temperature u svim ispitnim uvjetima, što upućuje na pozitivnu korelaciju između pada temperature i veličine nagiba. I udio soli i temperatura



Slika 8. Odnos posmične deformacije i stupnja prigušenja te najviši stupanj prigušenja: a) uzorak s 4 % udjela vode; b) uzorak sa 6 % udjela vode; c) uzorak s 8 % udjela vode; d) uzorak s 10 % udjela vode; e) maksimalni stupanj prigušenja

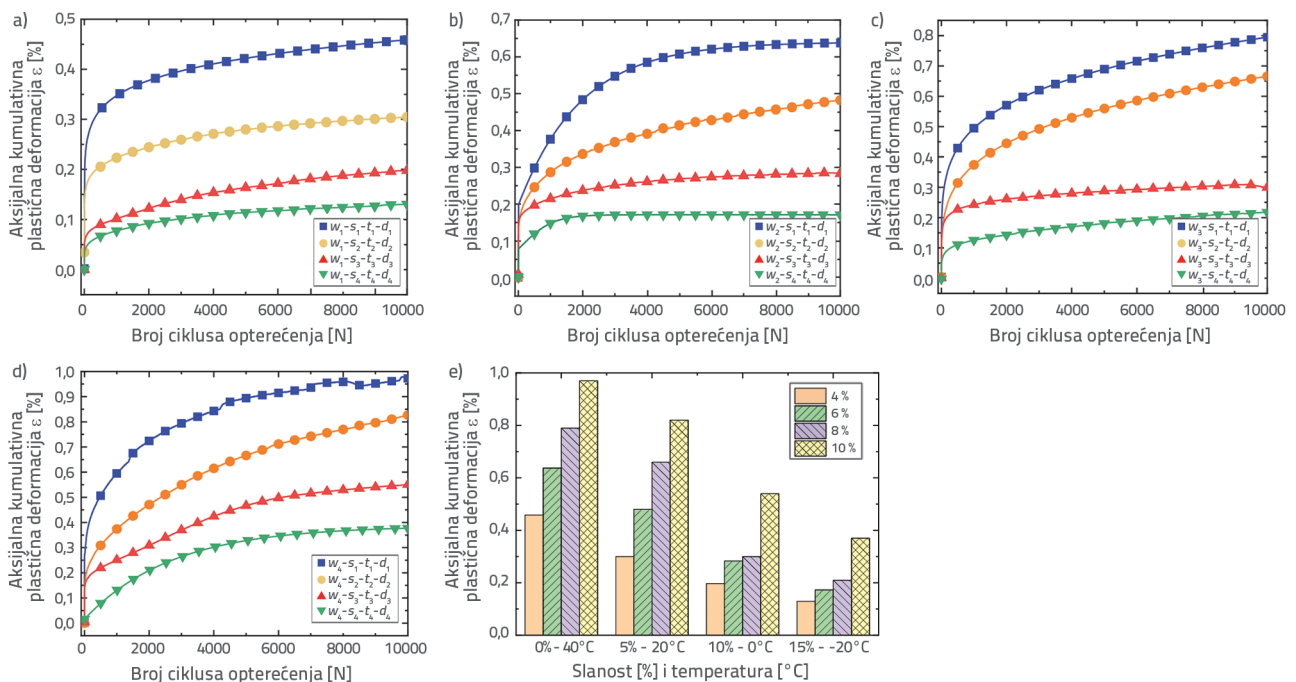
pokazali su pozitivnu korelaciju s nagibima krivulja nosivosti, dok je udio vode pokazao i pozitivne i negativne odnose. Naprimjer, pri udjelu vode od 4 % nagibi okosnih krivulja za uzorke w_1-s_1 , w_1-s_2 , w_1-s_3 i w_1-s_4 (pri temperaturama od 40 °C, 20 °C, 0 °C i -20 °C) iznosili su 351, 736, 985 i 1786, što predstavlja povećanje od 408,83 % pri promjeni temperature s 40 °C na -20 °C. Pri udjelu vode od 10 % nagibi za uzorke w_4-s_1 , w_4-s_2 , w_3-s_3 i w_4-s_4 (pri istim temperaturnim gradijentima) iznosili su 256, 405, 543 i 2705, što je povećanje od 956,64 %. Takve pojave upućuju na povećanje učinkovitosti prijenosa unutarnjih naprezanja uslijed formiranja mreže kristala leda pri niskim temperaturama, što dovodi do znatnog povećanja nagiba te potvrđuje dominantnu ulogu temperature u razvoju nagiba.

U područjima visokih temperatura (≥ 20 °C) nagibi okosnih krivulja bili su u negativnoj korelaciji s udjelom vode, dok je u područjima niskih temperatura (≤ 0 °C) uočena pozitivna korelacija. Naprimjer, pri udjelu soli od 0 % i temperaturi od 40 °C nagibi za uzorke s udjelom vode od 4 %, 6 %, 8 % i 10 % iznosili su 352, 324, 295 i 255, što je smanjenje od 27,45 % s porastom udjela vode. Suprotno tome, pri udjelu soli od 15 % i temperaturi od -20 °C nagibi za uzorke s udjelom vode od 4 %, 6 %, 8 % i 10 % iznosili su 1786, 2066, 2288 i 2705, što je povećanje od 295,3 % s porastom udjela vode. Do tog ponašanja dolazi jer vlaga pri visokim temperaturama djeluje kao mazivo, čime se slabe međumolekulske sile, dok pri niskim temperaturama fazni prijelazi dovode do formiranja krutih okvira kristala leda. Sinergijski učinci između udjela vode i temperature naglašavaju nelinearnu modulaciju temperaturnih odziva uvjetima vlažnosti.

3.2.2. Analiza stupnja prigušenja pri dinamičkome opterećenju

Na slikama od 8.a do 8.d prikazan je odnos između posmične deformacije i stupnja prigušenja. Na krivuljama γ označava stupanj prigušenja, a γ_d posmičnu deformaciju, dok su na slici 8.e prikazane maksimalne vrijednosti stupnja prigušenja za 16 ispitnih uvjeta. Na slici 8.e prikazano je kako smanjenje temperature sustavno smanjuje γ , pri čemu je intenzitet hlađenja u pozitivnoj korelaciji sa smanjenjem stupnja prigušenja. Uzimajući kao primjer uzorak s udjelom vode od 4 %, pri temperaturama od 40 °C, 20 °C, 0 °C i -20 °C stupnjevi prigušenja za uzorke w_1-s_1 , w_1-s_2 , w_1-s_3 i w_1-s_4 iznosili su 0,098, 0,082, 0,07611 i 0,0629, što odgovara smanjenju od 35,81 % pri promjeni temperature s 40 °C na -20 °C. Za uzorke s udjelom vode od 10 % uzorci w_4-s_1 , w_4-s_2 , w_4-s_3 i w_4-s_4 pokazali su stupnjeve prigušenja od 0,2265, 0,147, 0,0477 i 0,03754 pri istome temperaturnom gradijentu, što je smanjenje od 83,42 %. Ti rezultati upućuju na to kako niske temperature ograničavaju pokretljivost segmenata molekularnih lanaca materijala, smanjujući puteve raspršivanja energije i posljedično sposobnost prigušenja, čime se potvrđuje dominantan utjecaj temperature na svojstva prigušenja.

Na slici 8.e dodatno je prikazano da povećanje udjela vode pojačava temperaturno ovisne promjene stupnja prigušenja. Pri udjelu soli od 0 % uzorci w_1-t_1 , w_2-t_1 , w_3-t_1 i w_4-t_1 pokazali su stupnjeve prigušenja od 0,098, 0,14, 0,1859 i 0,2265. Suprotno tome, pri udjelu soli od 15 % uzorci w_1-t_4 , w_2-t_4 , w_3-t_4 i w_4-t_4



Slika 9. Odnos između broja ciklusa opterećenja i kumulativne plastične deformacije ε te maksimalne vrijednosti kumulativne plastične deformacije: a) uzorak s 4 % udjela vode; b) uzorak sa 6 % udjela vode; c) uzorak s 8 % udjela vode; d) uzorak s 10 % udjela vode; e) ekstremne vrijednosti kumulativne plastične deformacije ε

pokazali su stupnjeve prigušenja od 0,0629, 0,0411, 0,0411 i 0,03754. To upućuje na pozitivnu korelaciju između udjela vode i stupnja prigušenja u uvjetima visokih temperatura, za razliku od negativne korelacije u uvjetima niskih temperatura. Osnovni mehanizmi uključuju:

- formiranje gustih mreža kristala leda u materijalima s visokim udjelom vlage pri niskim temperaturama, koje ograničavaju lokalnu pokretljivost segmenata molekularnih lanaca i znatno smanjuju sposobnost raspršivanja energije
- povećanje koncentracije iona u tekućini iz pora uslijed otapanja soli pri povišenim temperaturama, čime se smanjuje viskozna otpornost.

3.2.3. Analiza kumulativne plastične deformacije pri dinamičkome opterećenju

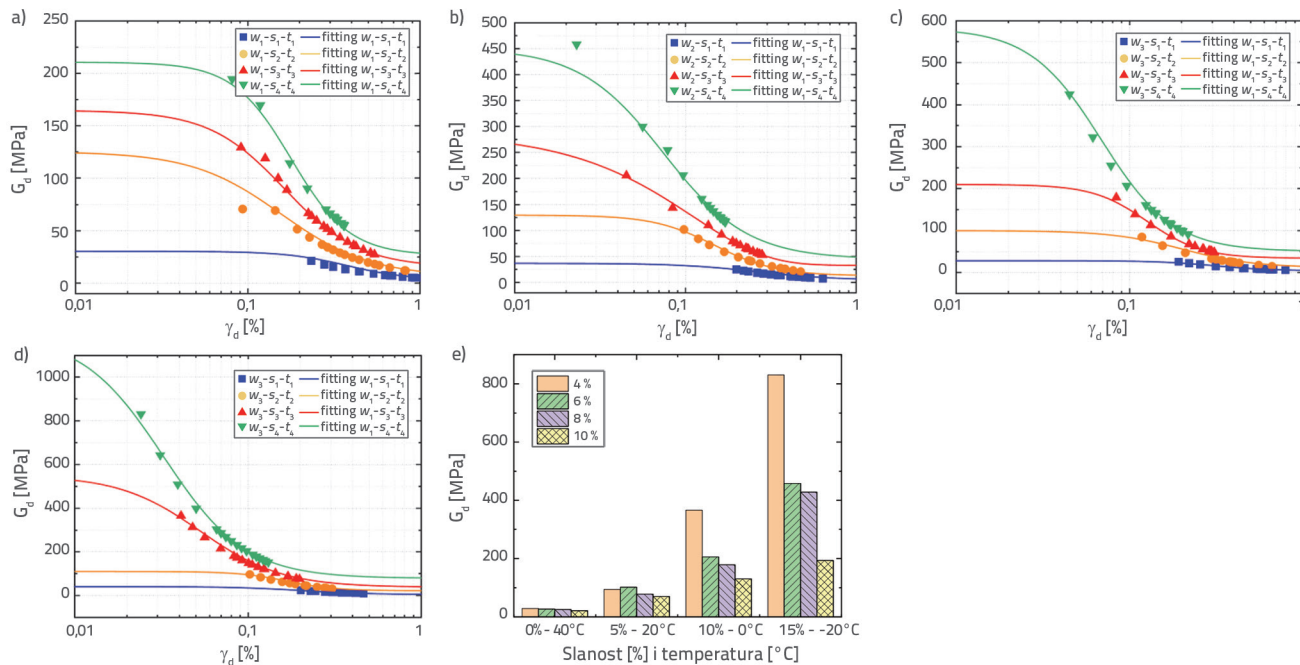
Kao što je to prikazano na slikama od 9.a do 9.d, krivulje prikazuju odnos između broja ciklusa opterećenja i kumulativne plastične deformacije (ε), dok su na slici 9.e prikazane ekstremne vrijednosti ε za 16 ispitnih uvjeta. Na slici 9.e prikazano je kako smanjenje temperature znatno smanjuje kumulativnu plastičnu deformaciju (ε), pri čemu niže temperature odgovaraju manjim vrijednostima ε . Naprimjer, uzorci w_1-s_1 , w_1-s_2 , w_1-s_3 i w_1-s_4 pokazali su ε vrijednosti od 0,458, 0,63, 0,79 i 0,97 pri 40 °C, koje su se smanjile na 0,13, 0,173, 0,21 i 0,37 pri -20 °C, što odgovara smanjenjima od 71,62 % odnosno 61,86 %. Navedeno upućuje na to kako niske temperature pojačavaju međufazne veze unutar molekularne rešetke materijala, ograničavaju gibanje dislokacija i brzine puzanja, te time znatno smanjuju

plastičnu deformaciju. Ti rezultati potvrđuju ključnu ulogu temperature u upravljanju razvojem kumulativne plastične deformacije (ε).

Pri udjelu soli od 0% povećanje udjela vode s 4% na 10% povećava ε s 0,458 na 0,97 pri 40 °C. Suprotno tome, pri udjelu soli od 15% i temperaturi od -20 °C vrijednosti ε za isti raspon udjela vode smanjuju se na 0,13 - 0,37. Time se uspostavlja pozitivna korelacija između ε i udjela vode i soli. Temeljni mehanizam uključuje sposobnost ionske zaštite: ioni Na^+ i SO_4^{2-} adsorbiraju se na granicama čestica, smanjujući efektivnu kontaktnu površinu između čestica tla i povećavajući njihovu sklonost klizanju. Ta pojava upućuje na to kako udio vode različito utječe na temperaturnu osjetljivost.

3.2.4. Analiza dinamičkog modula posmika pri dinamičkome opterećenju

Kao što je to vidljivo na slikama od 10.a do 10.d, krivulje prikazuju odnos između posmičnih naprezanja i dinamičkog modula posmika (G_d), dok su na slici 10.e prikazane ekstremne vrijednosti G_d za 16 ispitnih uvjeta. Rezultati pokazuju da smanjenje temperature znatno povećava G_d , pri čemu veći udio vode odgovara nižim vrijednostima G_d , a veći udio soli višim vrijednostima G_d . Naprimjer, uzorci w_1-s_1 , w_1-s_2 , w_1-s_3 i w_1-s_4 imali su vrijednosti G_d od 29 MPa, 102 MPa, 130 MPa i 194 MPa pri 40 °C, koje su se povećale na 194 MPa pri -20 °C, što je povećanje od 668,96 %. Slično tome, uzorci w_4-s_1 , w_4-s_2 , w_4-s_3 i w_4-s_4 pokazali su porast vrijednosti G_d s 21 MPa na 831 MPa pri smanjenju temperature s 40 °C na -20 °C, što



Slika 10. Odnos posmične deformacije i dinamičkog modula posmika te vršne vrijednosti dinamičkog modula posmika: a) uzorak s 4 % udjela vode; b) uzorak sa 6 % udjela vode; c) uzorak s 8 % udjela vode; d) uzorak s 10 % udjela vode; e) vršne vrijednosti dinamičkog modula posmika

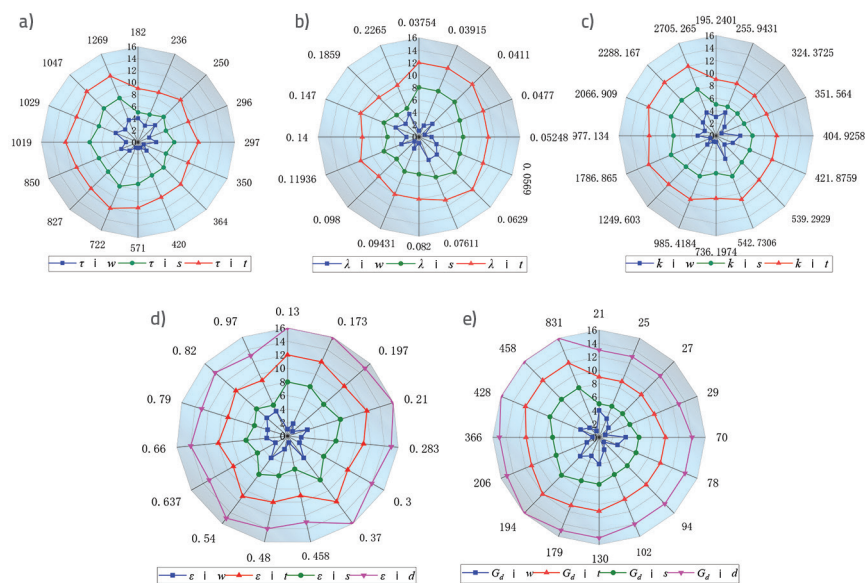
Tablica 3. Rezultati ortogonalnog ispitivanja

Čimbenici	Ishodi					Čimbenici	Ishodi				
	Posmična čvrstoća τ [kPa]	Stupanj prigušenja γ	Nagib I	Kumulativna plastična deformacija, ε [%]	Dinamički modul osmika, G_d [MPa]		Posmična čvrstoća τ [kPa]	Stupanj prigušenja γ	Nagib	Kumulativna plastična deformacija ε [%]	Dinamički modul posmika G_d [MPa]
1	350	0,098	351,564	0,458	29	9	236	0,1859	195,2401	0,79	130
2	420	0,082	736,1974	0,3	27	10	297	0,11936	421,8759	0,66	179
3	571	0,07611	985,4184	0,197	25	11	850	0,0569	1977,134	0,3	206
4	722	0,0629	1786,865	0,13	21	12	1047	0,0411	2288,167	0,21	366
5	296	0,14	324,3725	0,637	102	13	182	0,2265	255,9431	0,97	194
6	364	0,09431	539,2929	0,48	94	14	250	0,147	404,9258	0,82	428
7	827	0,0569	1249,603	0,283	78	15	1029	0,0477	542,7306	0,54	458
8	1019	0,0411	2066,909	0,173	70	16	1269	0,03754	2705,265	0,37	831

je povećanje od 3957,14 %. To se ponašanje može objasniti time što visoke temperature smanjuju koheziju među zrnima uslijed otapanja soli i podmazujućeg učinka vode, dok niske temperature potiču stvaranje mreža kristala leda i soli koje povećavaju krutost strukture. Ti rezultati potvrđuju nelinearnu regulatornu ulogu temperature u dinamičkome modulu posmika (G_d).

Pri udjelu soli od 0 % i temperaturi od 40 °C vrijednosti G_d za uzorke s udjelom vode od 4 %, 6 %, 8 % i 10 % iznosile su 29 MPa, 27 MPa, 25 MPa i 21 MPa, što je smanjenje od 27,58 % s porastom udjela vode. Suprotno tome, pri udjelu soli od 15 % i temperaturi

od -20 °C vrijednosti G_d za isti raspon udjela vode, povećale su se na 194 MPa, 428 MPa, 458 MPa i 831 MPa, što je povećanje od 428,35 %. Navedeno upućuje na obrnutu korelaciju između G_d i udjela vode u uvjetima visokih temperatura (≥ 20 °C), za razliku od pozitivne korelacije u uvjetima niskih temperatura (≤ 0 °C). Osnovni mehanizmi uključuju (1) podmazujući učinak vode na granicama zrna pri visokim temperaturama, čime se smanjuje posmična otpornost te (2) stvaranje mreža kristala soli i leda u uzorcima s visokim udjelom vlage pri niskim temperaturama, koje pri ograničenjima volumena pojačavaju učinke toplinskog očvršćivanja.



Slika 11. Usporedni radarski (mrežasti) dijagrami: a) analiza varijance posmične čvrstoće; b) analiza varijance stupnja prigušenja; c) analiza varijance nagiba krivulje nosivosti; d) analiza varijance kumulativne plastične deformacije; e) analiza varijance dinamičkog modula posmika

3.3. Analiza osjetljivosti statičkih i dinamičkih parametara

Rezultati ortogonalnih ispitivanja sažeti su u tablici 3. Na temelju ekstremnih vrijednosti posmične čvrstoće (slika 6.e), stupnja prigušenja (slika 7.e), nagiba okosne krivulje (slika 8.e), kumulativne plastične deformacije (slika 9.e) i dinamičkog modula posmika (slika 10.e) ekstremne vrijednosti rezultata mehaničkih ispitivanja prikazane su u tablici 1. Nakon toga provedena je analiza varijance kako bi se kvantificirala osjetljivost pojedinih čimbenika koji utječu na mehaničke parametre. Taj sustavni pristup omogućio je identifikaciju ključnih parametara koji upravljaju ponašanjem materijala u uvjetima multifizikalnog međudjelovanja, pružajući važne spoznaje za primjenu u geotehničkom inženjerstvu u hladnim područjima.

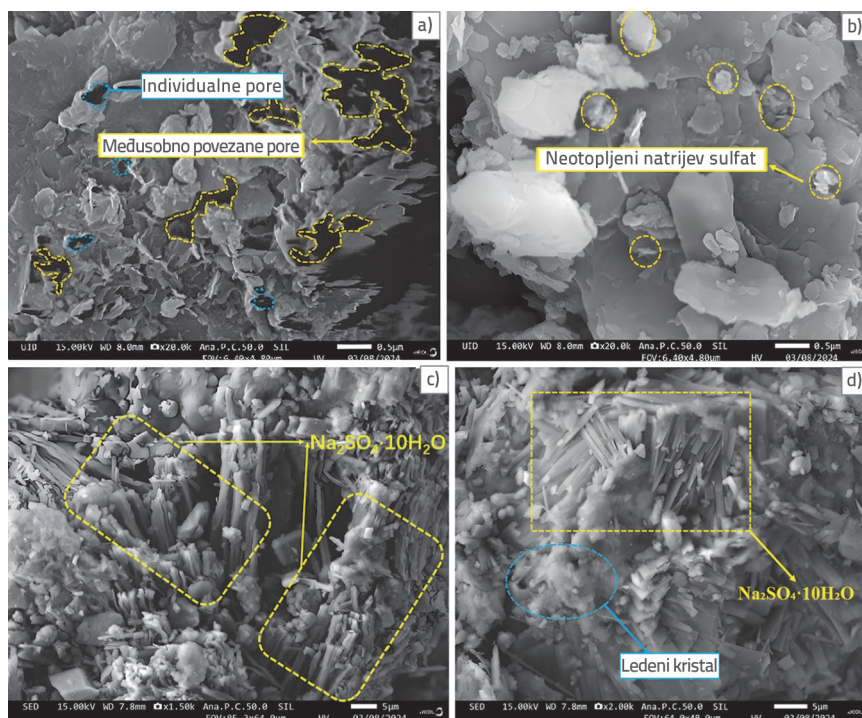
Na slikama od 11.a do 11.c prikazani su radarski dijagrami varijance za posmičnu čvrstoću, stupanj prigušenja i nagib krivulje nosivosti. Rezultati pokazuju da udio vode ima najveću varijabilnost u dvodimenzionalnim radarskim dijagramima, dok udio soli i temperatura pokazuju slične veličine varijacija, obje manje u odnosu na udio vode. Hijerarhija

osjetljivosti za ta tri čimbenika utvrđena je kao: udio vode > udio soli = temperatura. Na slikama 11.d i 11.e prikazani su radarski dijagrami varijance za kumulativnu plastičnu deformaciju i dinamički modul posmika. Analiza pokazuje maksimalnu vrijednost varijance od 45,4 za udio vode, dok udio soli, temperatura i amplituda dinamičkog naprezanja čine skupinu osjetljivosti s vrijednostima varijance u rasponu od 6,1 do 8,9. Hijerarhija osjetljivosti jest: udio vode > udio soli = temperatura = amplituda dinamičkog naprezanja, što pokazuje da udio vode ima najveći utjecaj na mehaničke odzive u uvjetima multifizikalnog međudjelovanja. Taj rezultat naglašava dominantnu ulogu udjela vode u određivanju ponašanja geotehničkih materijala u hladnim područjima.

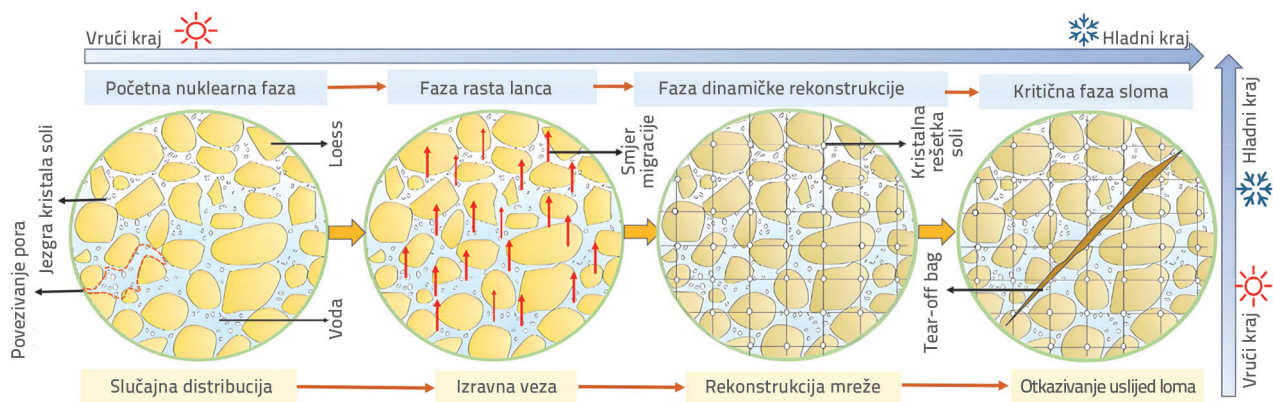
3.4. Koevolucijska analiza mikrostrukture

3.4.1. Mehanizmi regulacije razvoja porne strukture na mehaničku stabilnost

Na slikama od 12.a do 12.d prikazane su SEM snimke u uvjetima okoline $w_1-s_1-t_1$, $w_2-s_2-t_2$, $w_3-s_3-t_3$ i $w_4-s_4-t_4$. Na slikama 12.a i 12.b vidljiv je velik broj pora unutar čestica tla, dok je na slikama



Slika 12. SEM snimke u različitim uvjetima okoline: a) $w_1-s_1-t_1$; b) $w_2-s_2-t_2$; c) $w_3-s_3-t_3$; d) $w_4-s_4-t_4$



Slika 13. Shematski prikaz procesa koevolucije mikrostrukture

12.c i 12.d pokazana smanjena poroznost i pojačana kristalizacija soli. Usporedbom s vršnim vrijednostima posmične čvrstoće, na slici 6.e utvrđeno je da veći udio vode i soli povećava posmičnu čvrstoću pri niskim temperaturama, dok se pri povišenim temperaturama opaža suprotan trend.

S gledišta porne strukture, makroskopski mehanizam uključuje ispunjavanje međusobno povezanih i izoliranih pora u slanim tlima pri niskim temperaturama, čime se povećava efektivno naprezanje između čestica [24]. Pri različitim udjelima vode i soli povišene temperature pogoduju nakupljanju slobodne vode, dok niske temperature pogoduju zadržavanju vezane vode. Mikroskopski mehanizam uključuje temperaturno inducirane prijelazne faze soli i vode unutar pora: niske temperature potiču širenje fronti kristalizacije soli i leda duž međusobno povezanih i izoliranih pora, pri čemu nastaju guste kriogene kompozitne strukture soli i leda [25, 26]. Sveobuhvatna analiza pokazuje da mehanizam regulacije razvoja strukture pora na mehaničku stabilnost proizlazi iz rekonfiguracije trodimenzionalnih pornih mreža na više razina.

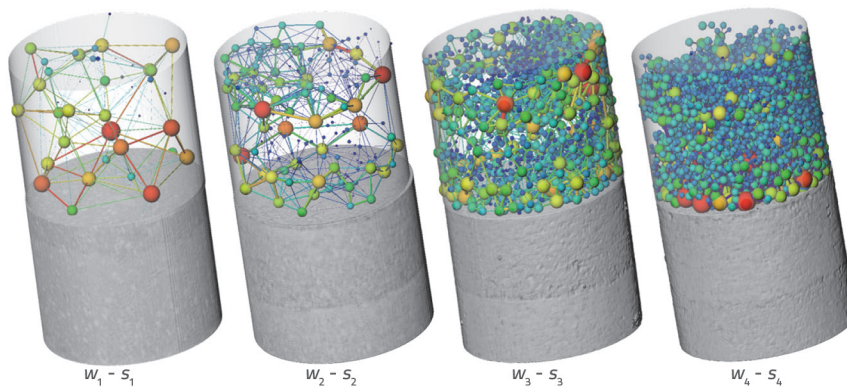
3.4.2. Proces koevolucije mehanike i mikrostrukture

Kao što je to prikazano na slici 13., shematski prikaz ilustrira koevoluciju mikrostrukture slanog tla u uvjetima niskih temperatura. Pod utjecajem mehanizama multifizikalnog međudjelovanja razvoj mikrostrukture sustava slanog tla na mikrorazini može se okarakterizirati kroz četiri različite faze. U početnoj fazi nukleacije pothlađivanje potiče heterogenu nukleaciju slanog otopina unutar mezopora matrice tla, pri čemu je gustoća nukleacije određena topološkim ograničenjima pora i lokalnom zasićenošću otopine. Ulaskom u fazu lančastog rasta toplinsko-mehaničko polje međudjelovanja uzrokuje orijentirani epitaksijalni rast kristalnih jezgri duž osi maksimalnoga glavnog naprezanja, pri čemu je rast usmjeren prema hladnijem dijelu uzorka. Ioni koji nastaju nakon otapanja soli (kao što su Na^+ i Cl^-) narušavaju mrežu vodikovih veza između molekula vode, ometaju pravilan raspored kristala leda i snižavaju temperaturu ledišta. Tim procesom uspostavlja se trodimenzionalna prostorno povezana dendritička mreža, čija prostorna povezanost dovodi

do stupnjevitog povećanja tlačne čvrstoće [27, 28]. Tijekom faze dinamičke rekonstrukcije slobodna voda prelazi u vezanu vodu međupovršinskom adsorpcijom, čime se potiču sekundarna kristalizacija soli i njihova reorganizacija u plošno centriranu kubičnu (FCC) rešetku (prostorna grupa $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$) mehanizmom Ostwaldova dozrijevanja, što označava početak stabilizacije čvrstoće [29, 30]. Završna faza kritičnog loma uključuje fraktalno širenje mikropukotina uzrokovano koncentracijom naprezanja duž ravnina maksimalnoga posmičnog naprezanja, što u konačnici dovodi do opsežnog urušavanja strukture [31-33]. Važno je da tijekom temperaturne inverzije taj razvoj slijedi put degradacije kojim dominira toplinska aktivacija, pri čemu dolazi do disocijacije rešetke i oslobađanja vezane vode te ponovne uspostave porne mreže, što rezultira eksponencijalnom ovisnošću brzine smanjenja čvrstoće o temperaturi.

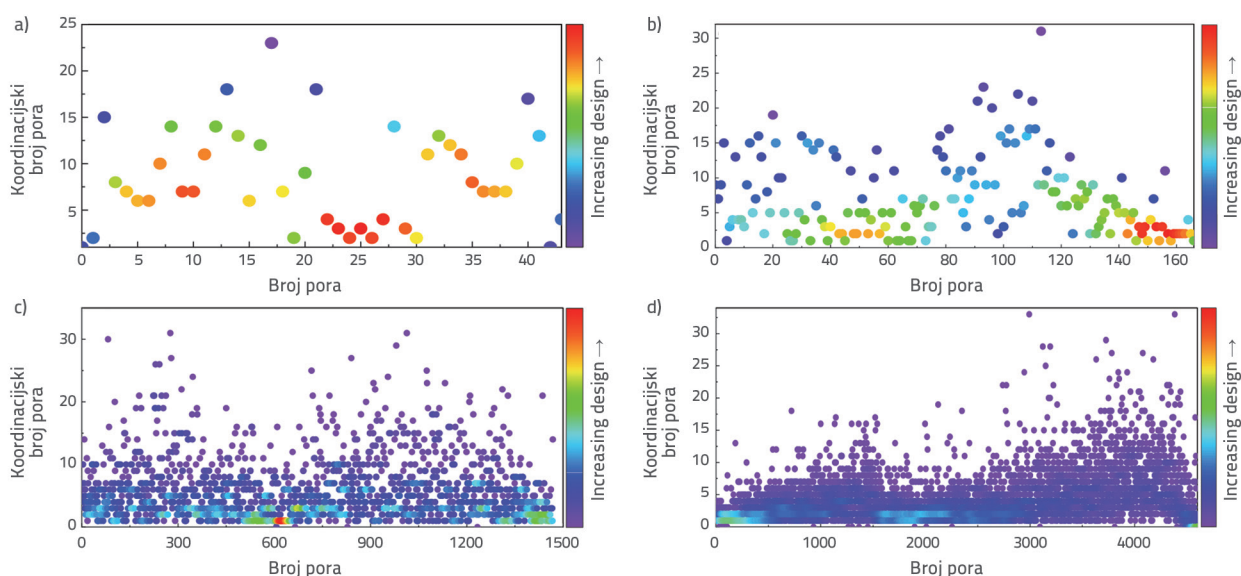
3.4.3. Odnos između koordinacijskog broja pora i mehaničke čvrstoće

Na slici 14. prikazani su koordinacijski brojevi uzoraka s različitim udjelom vode i soli (w_1-s_1 , w_2-s_2 , w_3-s_3 , w_4-s_4), pri čemu koordinacijski broj pora predstavlja broj grla povezanih s pornim kanalima. Prikazano je da s povećanjem udjela soli i vode prostorni raspored karakterizira povećana zastupljenost pora. Diskretizirane sferne jedinice predstavljaju pore, dok cjevasti spojevi opisuju strukturu grla pora. Modeliranje porne mreže jest temeljna metoda u višerazinskim istraživanjima poroznih medija, djelujući kao povezni okvir između mikroskopske porne topologije i makroskopskih mehaničkih odziva [34-36]. Povezivošću čvorova i koordinacijskim brojevima taj pristup kvantitativno prikazuje mehanizme regulacije kojima povezanost pornih prostora utječe na mehanička svojstva te na višerazinske korelacije između razvoja porne strukture i makroskopskih mehaničkih odziva [37, 38]. Koordinacijski broj mikroskopski je parametar koji opisuje povezanost pora. Njegova numerička promjena izravno regulira mehanizme prijenosa tvari i mehaničkog odziva u sustavu pora. Kada je koordinacijski broj jednak nuli, pore se nalaze u izoliranome i zatvorenome stanju. Iako mogu zadržavati vodu i soli te stvarati



Slika 14. Ekvivalentni model porne mreže

lokalizirane zone obogaćenja, njihov doprinos migraciji vode i soli minimalan je [39, 40]. Veći koordinacijski broj upućuje na bolju povezanost pora, veći broj puteva za migraciju vode i soli, smanjenu vijugavost između pora i grla te povećanu pokretljivost vode i soli [41]. Na slikama od 14.a do 14.d prikazani su dijagrami gustoće koordinacijskog broja pora. Iz tih prikaza vidljivo je da se s povećanjem udjela soli i vode povećava gustoća koordinacijskog broja u rasponu 0 - 25, što upućuje na to da veći udjeli vode i soli poboljšavaju povezanost porne strukture u uzorcima. Izolirane pore, budući da nisu povezane s vanjskom mrežom pora, razvijaju visoka unutarnja naprezanja uslijed volumnog širenja leda. Takva naprezanja mogu uzrokovati lom stijenci pora ili širenje postojećih mikropukotina, čime se mijenjaju oblik i veličina pora [42-45]. Pod vanjskim opterećenjima veći koordinacijski broj odgovara većemu broju kontaktnih točaka između čestica, što omogućuje raspodjelu vanjskih sila kroz više putova i smanjuje lokalne koncentracije naprezanja. Osim toga, guste mreže kontakata između čestica pružaju otpor posmičnoj deformaciji, sprječavajući klizanje ili rotaciju čestica [46].

Slika 15. Mapa raspodjele gustoće koordinacijskog broja pora: a) w_1-s_1 ; b) w_2-s_2 ; c) w_3-s_3 ; d) w_4-s_4

4. Izrada višerazinskog modela čvrstoće u uvjetima međudjelovanja

4.1. Kvantitativni model smanjenja dinamičkog modula posmika

Dinamički modul posmika ključni je mehanički pokazatelj za donji ustroj željezničke pruge. Zato je uspostavljen kvantitativni model degradacije dinamičkog modula posmika [47, 48].

Na temelju teorije dinamike tla i učinaka višefaktorskog međudjelovanja izveden je izraz za dinamički modul posmika, kao što je prikazano u izrazu (1).

$$G_d = G_0 \cdot f(w) \cdot g(s) \cdot h(t) \cdot k(d) \quad (1)$$

gdje G_0 predstavlja referentni dinamički modul posmika, $f(w)$ funkciju smanjenja ovisnu o udjelu vlage, $g(s)$ koeficijent povećanja ovisan o udjelu soli, $h(t)$ funkciju odziva na temperaturni gradijent, a $k(d)$ funkciju očvršćivanja ovisnu o dinamičkom naprezanju.

Funkcionalni oblici i parametri kalibrirani su na temelju eksperimentalnih podataka. Konkretno, funkcija smanjenja ovisna o udjelu vode izvedena je radi analize utjecaja udjela vode (w) na dinamički modul posmika (G_d) [49, 50]. Za zadani skup eksperimentalnih uvjeta (udio soli $s = 0\%$, temperatura = 40°C , amplituda dinamičkog naprezanja = 50 kPa) vrijednosti dinamičkog modula posmika određene su na sljedeći način: $G_d = 29\text{ MPa}$ pri $w = 4\%$, $G_d = 27\text{ MPa}$ pri $w = 6\%$, $G_d = 25\text{ MPa}$ pri $w = 8\%$, i $G_d = 21\text{ MPa}$ pri $w = 10\%$.

Za prilagodbu krivulje primijenjen je eksponencijalni model slabljenja (izraz 2). Podaci su linearizirani logaritamskom transformacijom (izraz 3), pri čemu je $w_0 = 4\%$ definiran kao referentni udio vode. Kalibracijom parametara metodom najmanjih kvadrata dobivena je vrijednost $\beta = 0,042\%^{-1}$, što upućuje na stopu smanjenja modula od približno 4,2 % pri svakome povećanju udjela vode za 1 %.

$$f(w) = e - b(w - w_0) \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{G_d}{G_0}\right) = -\beta(w - 0,04) \quad (3)$$

Funkcija povećanja ovisna o udjelu soli $g(s)$ uspostavljena je radi analize utjecaja udjela soli (s) na dinamički modul posmika. Pri zadanim ispitnim uvjetima (udio vode $w = 4\%$, temperatura $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$, amplituda dinamičkog naprezanja = 200 kPa) dinamički modul posmika za $s = 0\%$ normiran je kao referentna vrijednost [51]. Normalizacija označava postupak prilagodbe podataka različitih dimenzija ili mjerila na jedinstveni interval primjenom matematičke transformacije. Na temelju izraza (4) izveden je linearni model povećanja (izraz 5). Uvrštavanjem eksperimentalnih podataka u izraz (5) slijedi $831 = 29 \cdot (1 + \alpha \cdot 0,15)$, iz čega slijedi $\alpha = 0,1135^{-1}$. To znači da se modul povećava za približno 11,3 % pri svakome povećanju udjela soli za 1 %.

$$G_d = 831 \cdot \frac{29}{831} = 29 \text{ (normalizacija)} \quad (4)$$

$$g(s) = 1 + \alpha s \quad (5)$$

Funkcija odziva temperaturnog gradijenta $h(t)$ određena je pri zadanim parametrima: udio vode $w = 4\%$, udio soli $s = 15\%$ i amplituda dinamičkog naprezanja od 200 kPa. Neka je temperatura $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ početna temperatura, a temperaturna razlika Δt . Dinamički modul posmika normaliziran je prema izrazu (6), pri čemu je dobiven linearni, temperaturno osjetljivi model dan izrazom (7). Kombiniranjem s dinamičkim članom 4^n i istodobnim rješavanjem sustava izraza dobivena je vrijednost $\gamma = 0,018\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. To znači da se za svaki pad temperature od $1\text{ }^\circ\text{C}$ modul povećava za približno 1,8 %.

$$G_d = 29 \cdot 4^n \text{ (normalizacija)} \quad (6)$$

$$h(t) = 1 + \gamma \Delta \cdot t \quad (7)$$

Funkcija očvršćivanja, s obzirom na dinamičko naprezanje $K(D)$, određena je pri zadanim parametrima: udio vode $w = 4\%$, udio soli $s = 15\%$ i temperatura $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$. Pri amplitudi dinamičkog naprezanja od 50 kPa dinamički modul posmika izražen je izrazom (8). Primjenom potencijalnog modela prikazanog u izrazu (8) iz izraza (6) slijedi $831 = 29 \times 4^n$. Rješavanjem izraza dobivena je vrijednost $n = 1,51$. Posljedično, svako udvostručenje amplitude dinamičkog naprezanja povećava modul za približno 2,85 puta.

$$K(D) = \left(\frac{d}{D_0}\right)^n \quad (8)$$

Cjeloviti izraz modela (izraz (9)) razvijen je i validiran na temelju eksperimentalnih podataka. Odabrana je razina 7 sa sljedećim parametrima: udio vode $w = 6\%$, udio soli $s = 10\%$ i temperatura $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$. Uvrštavanjem tih vrijednosti u izraz (9) dobiven je izraz (10). Dobiveni rezultati podudaraju se s eksperimentalnim podacima, čime je potvrđena valjanost modela.

$$G_d = 29 \cdot e^{-0,042(w-4)} \cdot (1+0,113s) \cdot (1+0,018\Delta t) \cdot (d/50)^{1,51} \quad (9)$$

$$G_d = 29 \cdot e^{-0,042(6-4)} \cdot (1+0,113 \cdot 10) \cdot (1+0,018 \cdot 60) \cdot (200/50)^{1,51} \approx 206 \text{ MPa} \quad (10)$$

U izrazu w označava udio vode (%), s referentnom vrijednosti $w_0 = 4\%$, s - udio soli, a Δt temperaturni gradijent definiran kao $\Delta t = 40 - t$, d označava amplitudu dinamičkog naprezanja.

5. Zaključak

U ovom su radu laboratorijskim ispitivanjima i višerazinskim modeliranjem sustavno istraženi učinci međudjelovanja vezanja vode, soli, temperature i mehaničkog opterećenja na čvrstoću i razvoj mikrostrukture slanih tala. Na temelju eksperimentalnih rezultata i teorijske analize doneseni su sljedeći zaključci:

- U uvjetima međudjelovanja vode, soli, temperature i mehaničkog opterećenja povećanje udjela vode i soli uz istodobno smanjenje temperature dovodi do povećanja mehaničkih pokazatelja, uključujući posmičnu čvrstoću, nagib okosne krivulje i dinamički modul posmika. U odnosu na njih, kumulativna plastična deformacija i stupanj prigušenja postupno su se smanjivali. Rangiranje osjetljivosti utjecajnih čimbenika pokazalo je sljedeće: udio vode > udio soli = temperatura za posmičnu čvrstoću, nagib krivulje nosivosti i dinamički modul posmika te udio vode > udio soli = temperatura = amplituda dinamičkog naprezanja za kumulativnu plastičnu deformaciju i stupanj prigušenja.
- Razvoj mikrostrukture sustava slanah tala induciran niskim temperaturama opisan je kao kaskadni četverorazinski fazni prijelaz: početna faza nukleacije, faza lančanog rasta, faza dinamičke rekonstrukcije i faza kritičnog loma. S povećanjem udjela vode i temperature udio vezane vode postupno se smanjuje, dok se udio slobodne vode povećava, pri čemu su promjene u kapilarnoj vodi minimalne.
- Sinergijska evolucija mehaničkih odziva vodno-solno-toplinsko-mehaničkoga višepoljnog međudjelovanja i mikrostrukture ponajprije se očituje u razvoju porne strukture i faznim prijelazima vode i soli. Slana tla s različitim udjelima vode i soli pokazuju različite koordinacijske brojeve pora. Pri niskim temperaturama pore s niskim koordinacijskim brojevima generiraju veća unutarnja naprezanja, dok pore s visokim koordinacijskim brojevima raspodjeljuju i prenose naprezanja kroz više putova, čime se smanjuju lokalne koncentracije naprezanja. Posljedično, regulatorni mehanizam razvoja porne strukture na mehaničku

stabilnost proizlazi iz trodimenzionalne rekonstrukcije strukture pora u višerazinskim okolišnim uvjetima.

- Razvijen je višerazinski model mehaničkog ponašanja slanog tla na temelju sustavne obrade eksperimentalnih podataka i integracije međurazinskih teorija, uz uspostavu kvantitativnog modela degradacije. Laboratorijskim ortogonalnim ispitivanjima utvrđene su karakteristike mehaničkog odziva u uvjetima četveropoljnog vezanja (voda, sol, toplina i naprezanje), čime su definirani granični uvjeti ključnih parametara za konstruiranje izraza međudjelovanja. Uspostavljeni model prigušenja

omogućuje predviđanje mehaničkih odziva donjeg ustroja željezničke pruge u uvjetima međudjelovanja četiriju polja, pružajući teorijsku osnovu za prevenciju rizika povezanih sa slanim tlima u području željezničkog inženjerstva.

Zahvala

Projekt je financijski podržao Zajednički fond za temeljna istraživanja željeznica Nacionalne zaklade za prirodne znanosti Kine (U2568210).

LITERATURA

- [1] Li, C.J., Liu, R., et al.: Growth and sustainability of suaeda salsa in the Lop Nur, China, *Journal of Arid Land*, 10 (2018) 3, pp. 429-440, <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0002-5>
- [2] Zhang, S.S., Zhang, J.S., et al.: Deformation properties of coarse-grained sulfa the saline soil under the freeze thaw-precipitation cycle, *Cold Regions Science and Technology*, 177 (2020), pp. 103-121, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103121>
- [3] Liao, X., Fan, M.J., et al.: Cumulative deformation characteristics of saline-alkali soil in Lop Nur under freeze-thaw cycling, *Geology Journal of Engineering*, 32 (2024) 3, pp. 800-810, <https://dx.doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0255>
- [4] Zhang, J., Lai, Y.M., et al.: Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146 (2020), pp. 1188-68, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118868>
- [5] Chen, H., Gao, X., Wang, Q.: Research progress and prospect of frozen soil engineering disasters, *Cold Regions Science and Technology*, 212 (2023), pp. 103901, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103901>
- [6] Xu, J., Lan, W., Ren, C., et al.: Modeling of coupled transfer of water, heat and solute in saline loess considering sodium sulfate crystallization, *Cold Regions Science and Technology*, 189 (2021), pp. 1033-35, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103335>
- [7] Zhang, X.D., Zhai, E.C., et al.: Theoretical and numerical analyses on hydro-thermal-salt-mechanical interaction of unsaturated salinized soil subjected to typical unidirectional freezing process, *International Journal of Geomechanics*, 21 (2021) 7, pp. 20-36, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002036](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002036)
- [8] Vranešić, K., Haladin, I., Burnač, K.: Influence of climate changes on railway superstructure. *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 1, pp. 43-67, <https://doi.org/10.14256/JCE.4123.2024>
- [9] Jovanović, S., Guler, H., Čoko, B.: Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 3, pp. 247-258, <https://doi.org/10.14256/JCE.1194.2014>
- [10] Chen, Y.Y., Lai, Y.M., et al.: Finite element analysis of heat and mass transfer in unsaturated freezing soils: formulation and verification, *Computers and Geotechnics*, 149 (2022), pp. 1048-48, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104848>
- [11] Chen, M., Liu, R.S., Dong, Z.: Effect of different chloride salts on the transport of water, heat, and solutes in sandy soil under freezing conditions, *Journal of Cold Regions Engineering*, 37 (2023) 3, pp. 040230-13, <https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-650>
- [12] Zhang, T., Yang, Y.L.: A shear model for solidified soils considering conservation of energy, *Computers and Geotechnics*, 120 (2020) :103439, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103439>
- [13] Zhou, F.X., Gao, G.Y.: Steady-state analysis of the heat-moisture-salt coupling for unsaturated soil. *Rock and Soil Mechanics*, 40 (2019) 6, pp. 2050-2058. (in Chinese).
- [14] Luo, C.L., Yu, Y.Y., et al.: Thermal-water-salt coupling process of unsaturated saline soil under unidirectional freezing, *Journal of Mountain Science*, 20 (2023) 2, pp. 557-569, <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7652-7>
- [15] Li, S., Chen, H., Chen, Z.: Water and salt migration characterization in NaHCO₃ saline soils during unidirectional freezing conditions, *Cold Regions Science and Technology*, 213 (2023), pp. 103940, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103940>
- [16] Zhang, J., Lai, Y.M., et al.: Numerical study on the hydro-thermal-chemical-mechanical coupling mechanism in sulfate saline soil under freeze-thaw cycles, *Computers and Geotechnics*, 176 (2024), pp. 106803, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106803>
- [17] Zhang, Q.S., Dong, J.L., et al.: Dynamic stress response in a novel prestressed subgrade under heavy-haul train loading: A numerical analysis, *Construction and Building Materials*, 412 (2024), pp. 134749, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134749>
- [18] Zhang, T., Liu, S., Zhan, H., et al. 2020. Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials, *Journal of Cleaner Production*, 248 (2020), pp. 119293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119293>
- [19] Setia, R., Rengasamy, P., Marschner, P.: Effect of exchangeable cation concentration on sorption and desorption of dissolved organic carbon in saline soil, *Science of The Total Environment*, 465 (2013), pp. 226-232, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.010>
- [20] Han, Y., Wang, Q., et al.: Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of saline soil, *Cold Regions Science and Technology*, 154 (2018), pp. 42-53, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.06.002>
- [21] Chen, Q., Peng, Y.L., et al.: Experimental study on dynamic characteristics of expansive soil from Yanzhou-Shijiusuo railway roadbed under eyelid loading, *Journal of Engineering Geology*, 27 (2019) 4, pp. 737-744(in Chinese).
- [22] Liu, W.Z., Wan, J.L., et al.: Accumulative deformation characteristics of lateritic clay under combined action of cyclic wetting and dynamic loading, *China Journal of Highway and Transport*, 35 (2022) 8, pp. 129-139, <https://doi.org/10.13544/j.cnki.xq2019030>
- [23] Shen, J.J., Wang, Q., et al.: Experimental investigation into the salinity effect on the physicommechanical properties of carbonate saline soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16 (2024) 5, pp. 1883-1895, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.024>

- [24] Liu, W.Z., Xu, Y., et al.: Experimental study on dynamic response and accumulated deformation of improved expansive soil under wetting action in heavy-oaded railway, *Journal of Railway Engineering Society*, 45 (2013) 2, pp. 127-138, (in Chinese).
- [25] You, Z.M., Wen, W., et al.: Model tests of the barrier measures on moisture and salt migration in soils subjected to freeze-thaw cycle, *Cold Regions Science and Technology*, 201 (2022), pp. 103607, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103607>
- [26] Shen, J., Wang, Q., Chen, Y., et al.: Evolution process of the microstructure of saline soil with different compaction degrees during freeze-thaw cycles, *Engineering Geology*, 304 (2022), pp. 106699, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106699>
- [27] Xiao, Z.A., Li, K.L., et al.: Study on the multi-field-coupling model of saline frozen soil considering ice and salt crystallization, *Computers and Geotechnics*, 169 (2024), pp. 106209, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106209>
- [28] Han, M.X., Peng, W., et al.: Micro-composition evolution of the undisturbed saline soil undergoing different freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 210 (2023), pp.103825, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103825>
- [29] Wang, C., Lai, Y.M., et al.: Estimating the freezing-thawing hysteresis of chloride saline soils based on the phase transition theory B *Applied Thermal Engineering*, 135 (2018), pp. 22-33, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.039>
- [30] Xiong, Q.X., Tong, L.Y., et al.: Salt crystallization in porous materials: A quasi-local transport model for evaluating pore filling process, *Construction and Building Material*, 462 (2025), pp. 139904, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139904>
- [31] Michael, S., Sönke, A.: Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and the generation of stress, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (2008) 17, pp. 4291-4306, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.05.053>
- [32] Elzbieta, P., Albert, V.: Studying ice with environmental scanning electron microscopy, *Molecules*, 27 (2022), pp. 10258, <https://doi.org/10.3390/molecules27010258>
- [33] Tong, F.G., Jing, L.R., et al.: A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for simulating multiphase flow, deformation and heat transfer in buffer material and rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (2010) 2, pp. 205-217, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.11.002>
- [34] Munkholm, L., Heck, R., Deen, B.: Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability, *Geoderma*, 181 (2012), pp. 22-29, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.024>
- [35] Peitgen, H.O., Jürgens, H., Saupe, D.: *Chaos and fractals: New frontiers of science* (1992) New York: Springer.
- [36] Mali, P.: Multifractal characterization of global temperature anomalies, *Theoretical and Applied Climatology*, 121 (2015) 3, pp. 641-648, <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1268-y>
- [37] Sun, X.Q., She, D.L., et al.: Three-dimensional fractal characteristics of soil pore structure and their relationships with hydraulic parameters in biochar-amended saline soil, *Soil and Tillage Research*, 205 (2020), pp. e104809, <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104809>
- [38] Soto-Gomez, D., Perez-Rodriguez, P., et al.: 3D multifractal characterization of computed tomography images of soils under different tillage management: Linking multifractal parameters to physical properties, *Geoderma*, 363 (2020), pp. e114129, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114129>
- [39] Masanobu, O.: Coordination number and its relation to shear strength of granular material, *Soils and Foundations*, 17 (1997) 2, pp. 29-42, https://doi.org/10.3208/sandf1972.17.2_29
- [40] Korvin, G.: Coordination Number of Grains. In: *Statistical Rock Physics*, Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46700-4_6
- [41] McDowell, G., Lim, W.: The importance of coordination number in using agglomerates to simulate crushable particles in the discrete element method, *Géotechnique*, 57 (2007) 8, pp.701-705, <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.8.701>
- [42] Salami, Y., Dano, C., Hicher, P.Y.: An experimental study on the influence of the coordination number on grain crushing, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23 (2017) 3, pp. 432-448, <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1285251>
- [43] Wan, X.S., Zhou, H., et al.: Mesoscopic shear evolution characteristics of frozen soil-concrete interface, *Cold Regions Science and Technology*, 229 (2025), pp. 104342, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104342>
- [44] Zi, J.J., Liu, T., Zhang, W., et al.: Quantitatively characterizing sandy soil structure altered by MICP using multi-level thresholding segmentation algorithm, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16 (2023) 10, pp. 4285-4299, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.025>
- [45] Wright, V., Ferrick, A., Manga, M., et al.: Coordination numbers in natural beach sand, *EPJ Web of Conferences*, 249 (2021), pp. 11008, <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124911008>
- [46] Wang, G., Wei, J.T.: Microstructure evolution of granular soils in cyclic mobility and post-liquefaction process, *Granular Matter*, 18 (2016) 51, pp. 621-625, <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0621-5>
- [47] Wichtmann, T., Niemunis, A., et al.: Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (2005) 12, pp. 967-979, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.022>
- [48] Yaser, J., Hamed J., Abdolhosein, H.: Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions, *Soils and Foundations*, 58 (2018), pp. 172-184, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.010>
- [49] Ran, H., Liu, H.H., et al.: A constitutive model for unsaturated soils with consideration of inter-particle bonding, *Computers and Geotechnics*, 59 (2014), pp. 127-144. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.03.007>
- [50] Wang, X., Xia, T., et al.: Effect of soil microstructure on the small-strain shear modulus of saline soil, *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (2021) 1, pp. 06304, <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06304-8>
- [51] Yu, Y.Y., Luo, C.L., Cui, W.H., et al.: Study on creep characteristics and component model of saline soil in hexi corridor, *Scientific Reports*, 13 (2023), pp. 18067, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42548-6>