

Primljen / Received: 14.11.2023.

Ispravljen / Corrected: 27.3.2024.

Prihvaćen / Accepted: 3.5.2024.

Dostupno online / Available online: 10.5.2024.

Istraživanje opasnosti od curenja kod nasipa temeljeno na 3D električnoj tomografiji

Autori:



¹mr.sc **Yuehang Zhao**, dipl.ing.građ.
2234291813@qq.com



¹izv.prof.dr.sc. **Risheng Wang**
990853329@qq.com
Autor za korespondenciju



²**Tao Gao**, dipl.ing.građ.
18615192466@163.com



³**Tao Guo**, dipl.ing.građ.
57541378@qq.com



³**Xin Guo**, dipl.ing.građ.
379666343@qq.com

¹ Sveučilište Shandong Jiaotong, Kina
Fakultet za promet i građevinarstvo

² Shandong provincijski institut za planiranje i projektiranje prometa, Kina

³ Shandong Yellow River Shuncheng Water Conservancy and Hydropower Engineering Co., Kina

Prethodno priopćenje

Yuehang Zhao, Risheng Wang, Tao Gao, Tao Guo, Xin Guo

Istraživanje opasnosti od curenja kod nasipa temeljeno na 3D električnoj tomografiji

Curenje je čest problem u akumulacijama, ali točno otkrivanje njegove lokacije i promjera može biti izazovno zbog složenih geoloških uvjeta. 3D geoelektrična tomografija, temeljena na mjerenju električnih otpornosti tla, za razliku od tradicionalne tehnologije, nudi prednosti kao što su visoka gustoća mjerenja, učinkovitost, bogatstvo informacija, rezolucija i umjetna inteligencija. Ovaj se rad usredotočuje na primjenu 3D tomografije u dijagnostici curenja kod zemljanih i kamenih nasipa. Praćenjem stope promjene otpornosti dobivene obradom snimljenih profila otpornosti, istraživanje točno procjenjuje razvoj skrivenih oblika. Istraživanje pokazuje da 3D tomografija omogućuje brzu usporedbu deformacijskih stanja i oštećenja u različitim trenucima, omogućujući kontinuirano i objektivno praćenje zemljanih i kamenih nasipa. Ova je tehnologija sveobuhvatna i pruža uvide u stvarnom vremenu.

Ključne riječi:

3D geoelektrična tomografija, električna otpornost tla, nasip, akumulacija, curenje

Research Paper

Yuehang Zhao, Risheng Wang, Tao Gao, Tao Guo, Xin Guo

Research on leakage hazards of embankments based on 3D electrical resistivity tomography technology

Leakage is a common issue in reservoirs; however, accurately detecting its location and seepage diameter can be challenging owing to complex geological conditions. Three-dimensional (3D) resistivity tomography (RT), as opposed to traditional resistivity technology, offers advantages such as high observation density, efficiency, information richness, resolution, and intelligence. This study focuses on the application of 3D RT to diagnose leakage in earth and rock embankment dams. By monitoring the resistance change rate obtained from resistivity image processing, this study accurately assessed the development status of the hidden bodies. This research demonstrates that 3D RT enables rapid comparison of deformation and damage states at different moments, enabling continuous and objective monitoring of earth and rock embankment dams. This technology is comprehensive and provides real-time insights.

Key words:

3D resistivity tomography, electrical resistivity of the soil, embankment, accumulation, leakage

1. Uvod

Procjeđivanje je ključni sigurnosni čimbenik koji utječe na rad nasutih zemljanih brana, i koji dovodi do različitih oblika oštećenja ispod brane. Znanstvenici diljem svijeta, koji se bave očuvanjem voda, aktivno istražuju i primjenjuju metode detekcije curenja kod nasipa [1, 2]. Loke, M.H. [3] upotrijebio je kvazi-newtonovsku metodu za povećanje brzine računanja kod metode najmanjih kvadrata, a J.E. Chambers [2] primijenio je 3D tomografiju za ocjenu naslaga pijeska i šljunka u rijekama, ilustrirajući brzi napredak i široku primjenu tomografije temeljene na otpornosti tla. Zhou [5] i Song [6] proveli su ispitivanja otpornosti za otkrivanje curenja u zemljanim i kamenim branama, te su predvodnici upotrebe električne otpornosti za otkrivanje opasnosti kod nasutih brana. Zhao i dr. dalje su istraživali različite metode za dijagnosticanje curenja kod brana, uvodeći koncept zajedničke dijagnoze primjenom više metoda i provodeći primijenjena istraživanja temeljena na ovom pristupu [7-10]. Nedavni napredak u znanosti i tehnologiji doveo je do pojave raznih novih tehnika za otkrivanje curenja kod brana [11-13], s geoelektričnom tomografijom temeljenoj na mjerenju otpornosti tla koja se široko primjenjuje zbog svoje visoke učinkovitosti [14-16]. Zhou [17] je kroz pokuse usporedio 2D i 3D električnu tomografiju (engl. *electrical resistivity tomography* - ERT), pokazujući da 3D ERT snimanje daje značajno veću rezoluciju. Osim toga, istraživački tim iz Pacific Northwest Laboratory u SAD-u koristio je električnu tomografiju za praćenje dubokih pukotina ispod površine, generirajući 4D slike mjerenjem električne vodljivosti u stijeni tijekom vremena [18]. Tatsuya Kawaguchi i dr. [19] primijenili su 3D tomografiju za prostorno mjerenje temperature visokotemperaturnog rastaljenog stakla, potvrđujući njegovu učinkovitost u neprozirnim okruženjima, posebno u scenarijima koji uključuju visoko kontaminirana strujanja, dvofazna strujanja plin-tekućina s visokim udjelom praznina i vodljiva polja.

Dok su znanstvenici opsežno proučavali tehnologiju snimanja električne otpornosti [20-22], ograničena su istraživanja vezana za tehnologiju trodimenzionalne kromatografije i njezinoj praktičnoj primjeni u inženjerstvu. Ovaj se rad usredotočuje na primjenu trodimenzionalne električne tomografije u otkrivanju potencijala curenja u akumulaciji Shangxishan putem eksperimentalnog istraživanja u terenskim uvjetima. Proširivanjem praga pigmenta otpornosti prije i nakon iste potencijalne lokacije i analizom stope promjene otpora, istraživanje točno određuje stanje curenja kod nasipa, što omogućava pravodobno sprječavanje prekomjernog curenja i ojačanje nasipa. Rezultati pružaju osnovu za ojačanje nasipa i dodatno potvrđuju učinkovitost trodimenzionalne tomografije temeljene na električnoj otpornosti u sprječavanju curenja i ojačanju, pokazujući njezinu visoku učinkovitost detekciji curenja kod akumulacija.

2. Električna tomografija temeljena na otpornosti

Električna tomografija je neinvazivna tehnika geofizičkog istraživanja koja otkriva distribuciju podzemnih struktura i materijala mjerenjem distribucije električne otpornosti. Razvoj ove tehnologije može se pratiti unazad do 1960-ih, kada se uglavnom koristila u području istraživanja nafte. Kontinuiranim razvojem računalne tehnologije i algoritama za snimanje, električna tomografija se široko koristi.

2.1. Teorija trodimenzionalne tomografije temeljene na otpornosti

Načelo 3D tomografije usklađeno je s tradicionalnom električnom metodom, koja uključuje prijenos varijacija u podzemnim materijalima ubrizgavanjem električne energije u podzemlje i promatranjem distribucije rezultirajućeg električnog polja. Ovaj pristup učinkovito rješava različite geološke izazove. Za usporedbu, 2D tomografija visoke gustoće još uvijek se suočava s određenim ograničenjima. Na primjer, značajke ispod površine možda neće biti točno uhvaćene ako mjerne linije nisu strateški postavljene, što dovodi do izazova u ispitivanju na terenu, posebno u otkrivanju složenih puteva curenja. Dodatno, kvazi-3D slike generirane kombinacijom višestrukih 2D presjeka nemaju točnost pravih 3D inverzija. Metoda 3D inverzije dijeli podzemlje na male pravokutnike, uspostavlja geoelektrični model [24], dodjeljuje početne vrijednosti otpora svakom pravokutniku, izračunava vrijednosti otpora kroz modeliranje, uspoređuje teorijske i izmjerene vrijednosti koristeći metodu najmanjih kvadrata i prema tome prilagođava vrijednosti otpornosti [25, 26]. Objektivna funkcija F je definirana kao osnova za ovaj proces, izraz (1):

$$F = \sum_{i=1}^N [\ln \rho_m + \ln \rho_t]^2 \quad (1)$$

gdje je ρ_m izmjerena vrijednost otpornosti; ρ_t je teorijska vrijednost otpornosti početnog modela.

Točnost izmjerenih vrijednosti otpornosti uspoređuje se s teorijskim vrijednostima kako bi se procijenili rezultati proračuna inverzije. Ako zahtjevi nisu ispunjeni, teorijske vrijednosti se ponovno izračunavaju dok razlika ne padne unutar odgovarajućeg raspona.

2.2. Potencijal razvoja električne tomografije

Prednosti tehnike tomografije uključuju neinvazivnost, visoku rezoluciju, visoku preciznost i sveobuhvatnost. Može učinkovito mapirati distribuciju podzemnih struktura i materijala, služeći kao ključni alat za istraživanje u geologiji, proučavanju okoliša

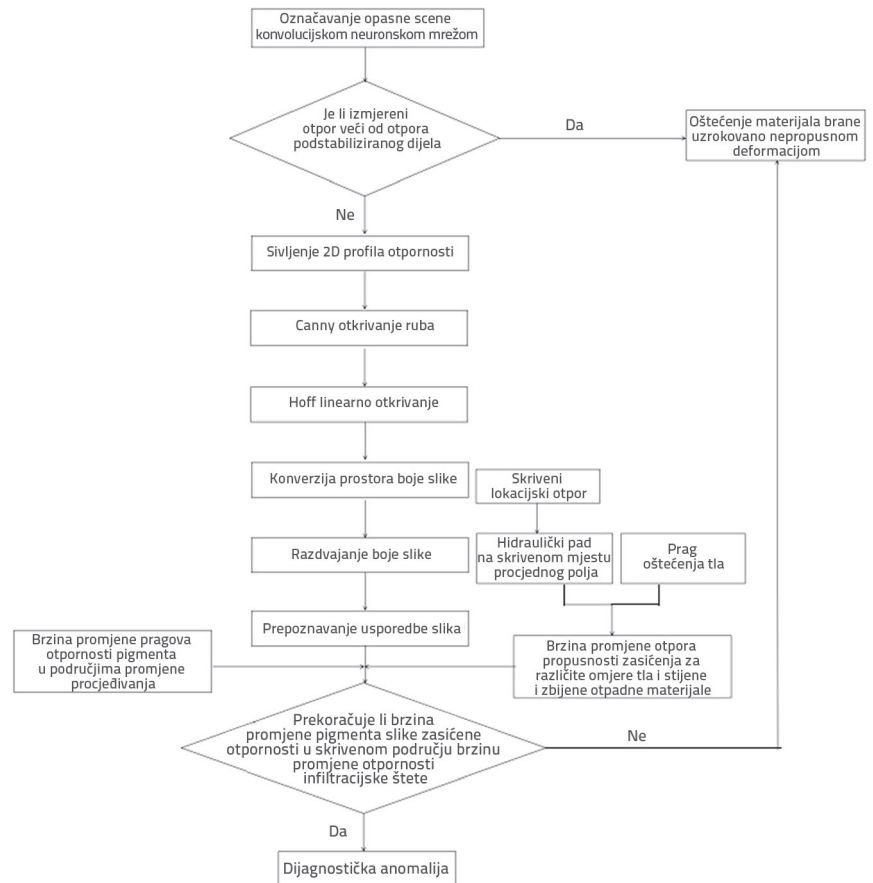
i hidrologiji. Napredak tehnologije snimanja tomografijom usko je povezan s tekućim napretkom računalne tehnologije i algoritama snimanja. Kako se računalni hardver i softver nastavljaju razvijati, brzina i točnost snimanja tomografijom značajno su se povećale. Dodatno, kontinuirani razvoj algoritama za snimanje imao je ključnu ulogu u poboljšanju tehnologije tomografije temeljene na otpornosti. Posljednjih godina pojavili su se algoritmi temeljeni na strojnom učenju, koji omogućuju obuku neuronskih mreža za poboljšanje točnosti i brzine snimanja.

U budućnosti tehnologija tomografije ima značajan potencijal za napredak. Kako se dubina i točnost istraživanja nastavlja poboljšavati, očekuje se da će tomografija imati široku primjenu u sektorima kao što su nafta, geologija, znanost o okolišu, hidrologija i drugi. Dodatno, postoji potreba za stalnim inovacijama i poboljšanjem tehnologije snimanja kromatografijom temeljenoj na otpornosti kako bi se odgovorilo na izazove koje postavljaju složene geološke postavke i praktične primjene. Očekuje se da će napredak u računalnoj tehnologiji i algoritmima za snimanje dodatno povećati brzinu i točnost snimanja tomografijom, proširujući njegovu primjenjivost na raznim područjima u budućnosti.

3. Proces dijagnoze curenja temeljen na 3D distribuciji električnog polja zemljanih i kamenih brana

Podaci se prikupljaju i prenose kontinuirano, s različitim vremenskim točkama koje daju trodimenzionalni prikaz otpornosti. Koristeći učene neuronske mreže za prepoznavanje skrivenih opasnosti, seciramo lokaciju tih opasnosti u dvije dimenzije, što omogućuje usporedbu snimljenih slika. Za analizu promjena pigmenta između slika koriste se različite tehnike kao što su obrada sivih tonova slike, Cannyjevo otkrivanje rubova, Houghovo otkrivanje ravnih linija i analiza boja slike. Usporedbom pragova pigmenta, može se odrediti maksimalna stopa promjene otpora u materijalima različitog omjera tlo-kamen tijekom razvoja polja procjeđivanja. Ova analiza pomaže u dijagnosticiranju potencijalnog infiltracijskog oštećenja tla unutar skrivenog tijela u polju procjeđivanja.

Proces dijagnoze curenja temeljen na trodimenzionalnoj distribuciji električnog polja zemljanih i kamenih brana uključuje niz koraka, slika 1.



Slika 1. Dijagram toka za dijagnozu curenja u zemljanim i kamenim branama

4. Primjeri primjene

4.1. Pregled projekta

Akumulacija Shangxishan u gradu Qujing, pokrajina Yunnan nalazi se pored sela Shangxishan u razvojnoj zoni, 10 km zapadno od grada Qujing, vidi sliku 2.



Slika 2. Stvarni pogled na projekt



Slika 3. Sadašnje stanje vrha, prednje i stražnje strane zemljanih i kamenih brana

Nalazi se u uzvodnom dijelu rijeke Baishi, desnog pritoka rijeke Nanpanjiang, koji je dio vodnog sustava rijeke Xijiang u slivu Biserne rijeke. Izgrađena između 1973. i 1977., akumulacija Upper Xishan prije svega služi kao izvor vodoopskrbe, a također služi za kontrolu i regulaciju poplava. Pod nadležnošću je Ureda za lokalne poslove zone gospodarskog i tehnološkog razvoja Qujing. Sa slivnom površinom od 29,63 km², akumulacija je izvorno projektirana s ukupnim kapacitetom od 5,46 milijuna m³, stvarnim kapacitetom od 5,235 milijuna m³ i kapacitetom od 225.000 m³ mrtvog prostora za potrebe prihvata nanosa. Spremnik Xishan ima ključnu i nezamjenjivu ulogu u socioekonomskom razvoju Qujinga.

Brana akumulacije Shangxishan orijentirana je približno u smjeru sjever-jug. Kruna brane prekrivena je cestovnom podlogom stabiliziranom cementom. Vodna strana ima nagib pokosa od 1:2,95, što je čini relativno ravnom, a površina je prekrivena montažnim blokovima. Uzvodna strana ima nagib pokosa od 1:2,75 do 1:2,5, te je prekrivena gustom vegetacijom. Ispod pokosa nalaze se poljoprivredna polja.

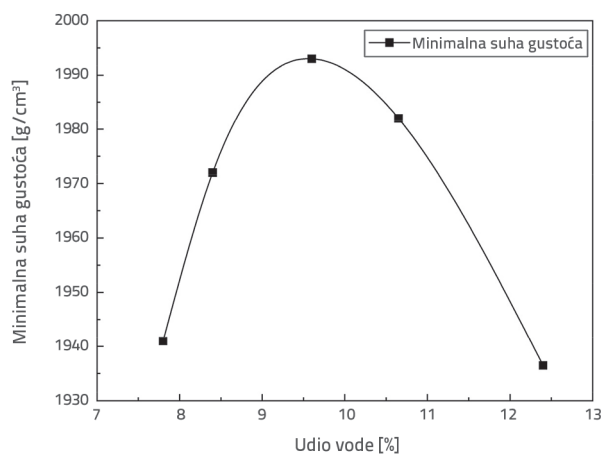
Temelj brane akumulacije Shangxishan nalazi se na kvartarnim rezidualnim naslagama padina i škriljencu i pješčenjaku koji su vrlo trošni. Zbog labavog strukturnog sastava ovih geoloških materijala, temelj brane nije stabilan. Osim toga, tijekom procesa izgradnje brane, različiti čimbenici poput tehnoloških ograničenja, ograničenja opreme i financijskih razloga utjecali su na izbor materijala za tijelo brane. Tijelo brane pretežno se sastoji od šljunčane gline neodgovarajuće zbijenosti. Kao posljedica toga, od dovršetka akumulacije 1977. godine, brana i njeni temelji često su imali problema s curenjem, što je predstavljalo prijetnju sigurnosti brane. Prema nepotpunim zapisima, bilo je desetaka slučajeva curenja tijekom gotovo četiri desetljeća rada, uključujući dva velika incidenta curenja. Iako su poduzete korektivne mjere injektiranja kao odgovor na te značajne incidente curenja, one nisu mogle eliminirati rizike zbog ograničenja povezanih s financiranjem i tehnologijom.

4.2. Terenska električna ispitivanja

4.2.1. Električno ispitivanje u terenskim uvjetima

Prije 2005. dogodila su se dva velika incidenta s curenjem u brani. Kao odgovor na to, uprava akumulacije implementirala je kombinaciju injektiranog zastora i betonskih nepropusnih zidova kako bi ojačala tijelo brane. Nakon toga je provedeno podizanje konstrukcije brane

za otprilike jedan metar. Trenutačno je tijelo brane u dotrajalom stanju, zbog čega je teško procijeniti opseg oštećenja uslijed infiltracije unutar nje. S obzirom na početno loše stanje brane i opsežnu povijest sanacije, procjena oštećenja uslijed infiltracije unutar brane u ovom je trenutku složena. Istraživanjem je utvrđeno da je vrh brane u uzdužnom smjeru pun brojnih pukotina, površina je ispunjena asfaltnim brtvljenjem, najšire pukotine su do 2 cm s visinskom razlikom između dviju strana od 2 do 3 cm. Mikropovršinske pukotine broje i do nekoliko stotina, bez ikakvih mjera sanacije. Brana je do površine vodene površine s bermama od montažnih blokova. Na lokalitetu su utvrđene četiri urušene jame: najveća urušena jama promjera je do metar, dubine 12 cm, s urušenom površinom montažnih blokova. Vodna površina brane prekrivena je gustim korovom, drvećem. Razvijenost vegetacije je dobra. Na površini vodene površine brane sjeveroistočnog kuta obližnje planine nalazi se mjesto pod korovom, nedavno curenje, kao što se vidi na slici 3.



Slika 4. Dijagram ispitivanja zbijenosti uzorka tla na terenu

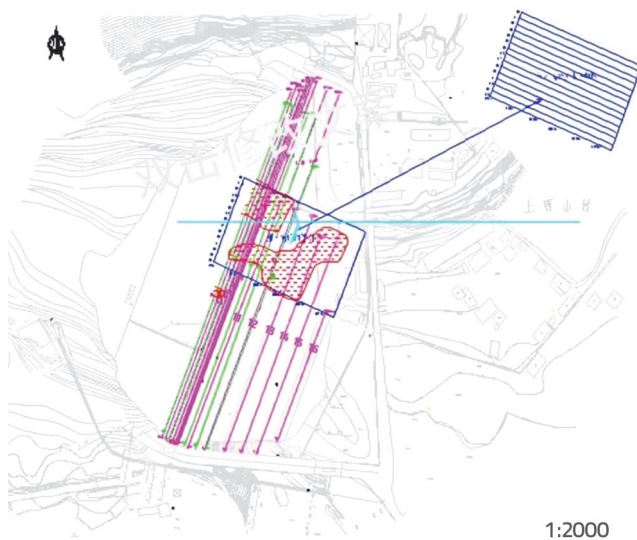
Nakon uzorkovanja na terenu, prosijavanja i ispitivanja tla zbijanjem u urušenoj jami, dobivena je maksimalna suha gustoća materijala brane od 1,994 g/cm³ (prikazano na slici 4.), s optimalnim udjelom vlage od 9,6%. Nakon prosijavanja i vaganja,

omjer mase tla i stijene bio je oko 7:3, veličina prosijanih čestica d_{10} dobivena je iz krivulja prosijavanja tla kao 0,1 mm, d_{40} kao 0,29 mm, d_{60} kao 0,72 mm, a koeficijent nehomogenosti: $\eta = d_{60}/d_{40} = 0,72/0,29 = 2,48 < 10$. Istovremeno je izravnani i očišćen otkriveni dio zemljanog tijela brane te je obavljen test zbijenosti, a rezultati ispitivanja su pokazali da je zbijenost tijela brane 97,7 %.

4.2.2. Oprema i raspored linija

Za provedbu mjerenja pomoću elektroda je korištena mreža veličine 5 × 5 m, tehnologija koja se koristi za optimizaciju praćenja nekog područja [23]. Elektrode za provedbu mjerenja postavljene su na obje padine brane, pokrivajući površinu od 110 × 145 m. Ove elektrode, izrađene od bakra, bile su povezane kabelima s glavnim računalom. Kako bi se osigurao pravilan kontakt između elektroda i brane, iste su pažljivo postavljene pomoću mjernih traka. Proces mjerenja uključivao je mjerenja u uzdužnom i poprečnom smjeru, s naponom napajanja od 288 V.

S obzirom na terenske uvjete, na sjevernom dijelu brane postavljena je detekcijska mreža 70 × 110 m. Ova se mreža protezala od vodene površine istočne brane do podnožja zapadne padine i od rukavca sjeverne padine do južne središnje linije. Na ovom području su crvenom bojom na vrhu valovitog zida označene istražne linije 12, 13, 14 itd. Iscrtano je pet istražnih linija, od kojih se svaka sastoji od 60 elektroda s razmakom od 1 m na nizvodnoj padini. Zbog izazova postavljanja elektroda na betonski kolnik na vrhu brane, jedna elektroda je izostavljena kako bi se prilagodila protoku prometa. Preostale elektrode su raspoređene u jedinstvenu mrežu 5 × 5 m, kako je prikazano na slici 5., koja pokriva površinu od 7700 m².



Slika 5. Raspored linija istraživanja

4.3. Obrada prikupljenih podataka

S postavljanjem mjerne linije, glatkom elektrodom i automatskim ispitivanjem otpora uzemljenja, otpor ne zadovoljava uvjete uzemljenja. Izlijevanjem zaslanjene mješavine ispunjeni su zahtjevi otpora uzemljenja, dok implementacija automatske kontrole stupova mjeri ispitivanje pod naponom. Nakon završetka testa, samoprogramirani program prikuplja izvorne podatke za trodimenzionalno snimanje otpornosti, program čita podatke pomoću naziva ekstenzije u obliku .txt za spremanje, a format orkestracije:

X_1, Y_1, Z_1, ρ_1

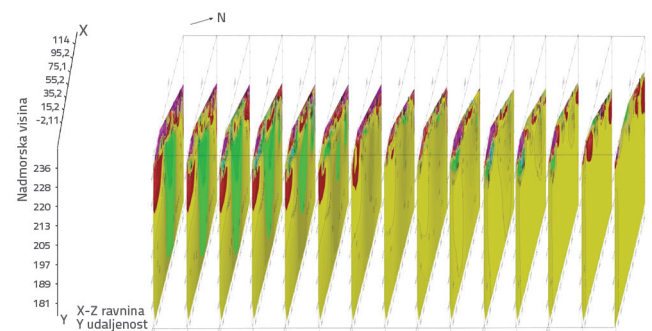
X_2, Y_2, Z_2, ρ_2

X_3, Y_3, Z_3, ρ_3

...

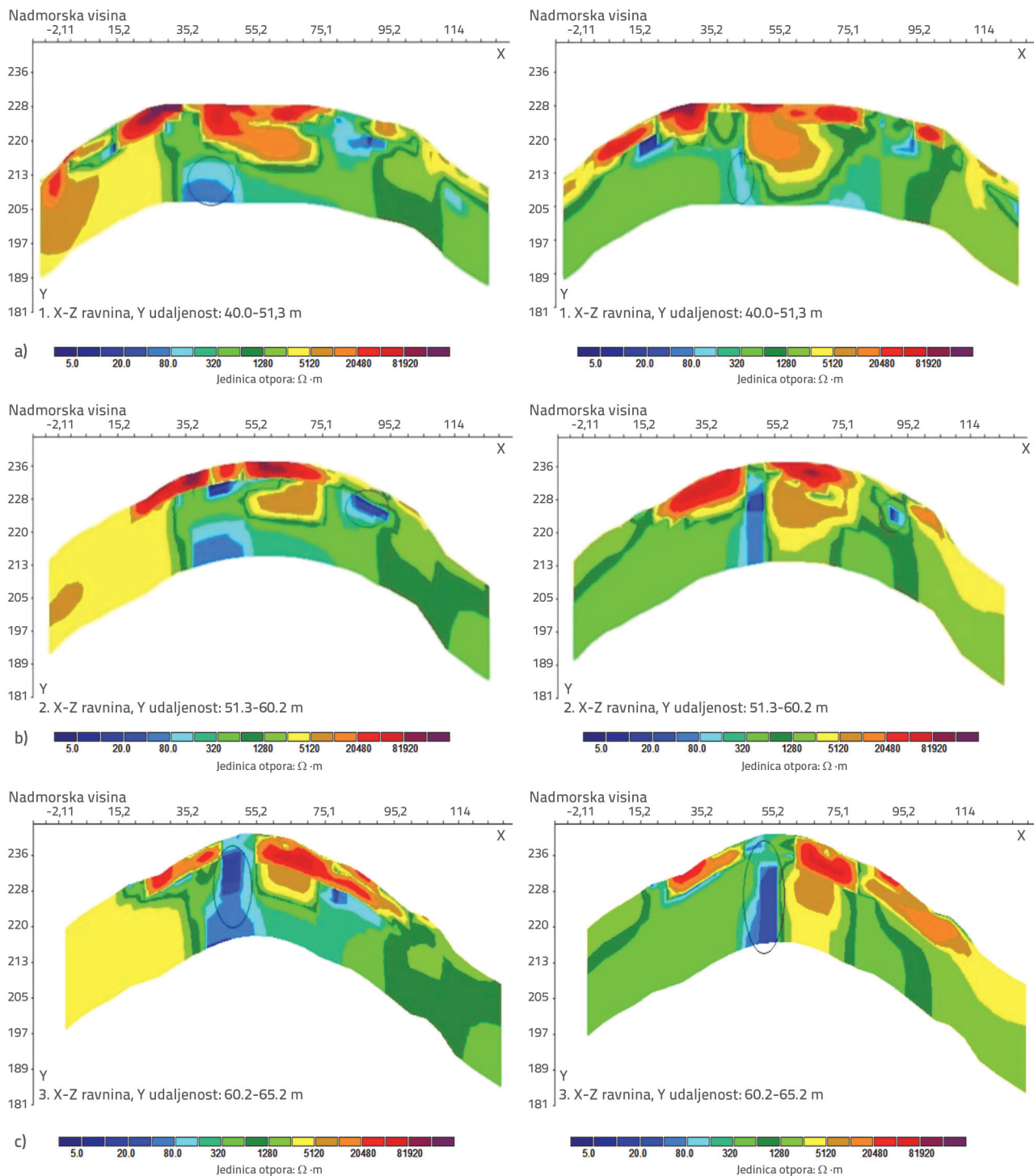
gdje su x_i horizontalne koordinate prikupljenih elektrodnih točaka, y_i su vertikalne koordinate prikupljenih elektrodnih točaka, a z_i je nadmorska visina odgovarajuće točke. Koordinatne točke su raspoređene uzlaznim redoslijedom, a zarez se koristi za odvajanje točaka jedne od drugih.

Trodimenzionalni podaci električnog istraživanja visoke gustoće za cijelo područje istraživanja spojeni su zajedno kako bi se stvorila trodimenzionalna slika raspodjele otpora cijelog područja istraživanja. Presjeci otpornosti brane na razmaku od 5 m prikazani su na slici 6., s horizontalnom udaljenosti (m) u horizontalnim koordinatama i visinom (m) u vertikalnim koordinatama.



Slika 6. Trodimenzionalni presjek otpornosti mjernog područja

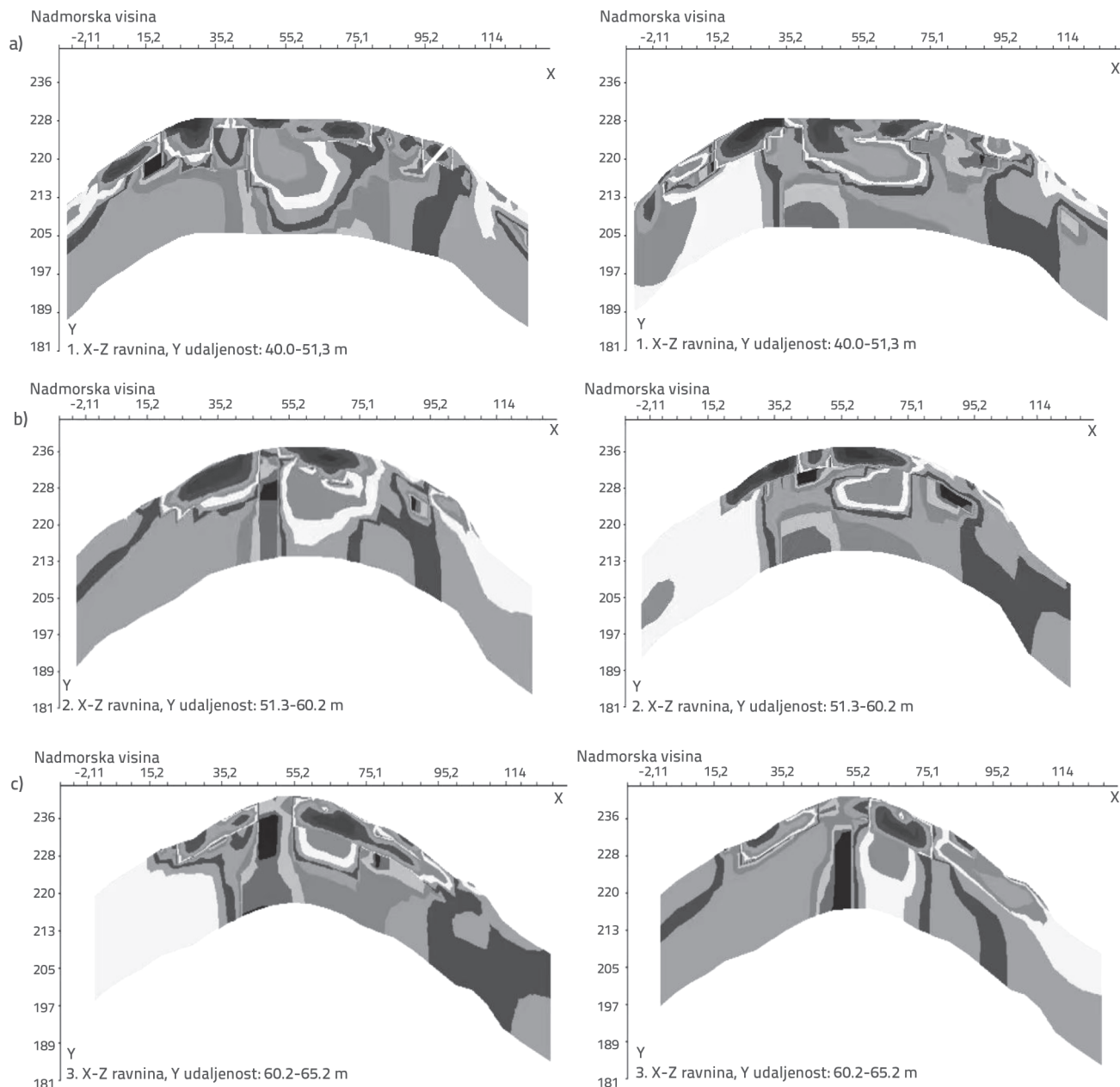
Konvolucijska neuronska mreža korištena je za označavanje slike pri praćenju u stvarnom vremenu, identificirajući slike s potencijalnim opasnostima. Većina tih slika bila je koncentrirana u tri odjeljka s visinama od 205, 220 i 228, što je u korelaciji s procijenjenim lokacijama mogućih opasnosti iz ispitivanja na terenu. Nakon ručnog pregleda označenih



Slika 7. Dijagrami presjeka odjeljaka: a) Dijagram presjeka odjeljka 205; b) Dijagram presjeka odjeljka 220; c) Dijagram presjeka odjeljka 228

slika, nakon učenja neuronske mreže, nisu identificirane pogreške pri probiru. Kako bi se jasno prikazao razvojni proces skrivenih problema triju odjeljaka od 205, 220 i 228, ovaj će rad predstavljati sliku podataka za tri tipična presjeka, prikazanih na slici 7. To je usporedba isječaka iz različita

razdoblja snimanja na istoj lokaciji, gdje je razlog tako velike razlike u vrijednostima otpora između dva razdoblja na slici zbog razlike u količini vode, a ta razlika ne utječe na daljnju analizu u ovom radu, s pogreškama inverznog modeliranja od 0,1 % .



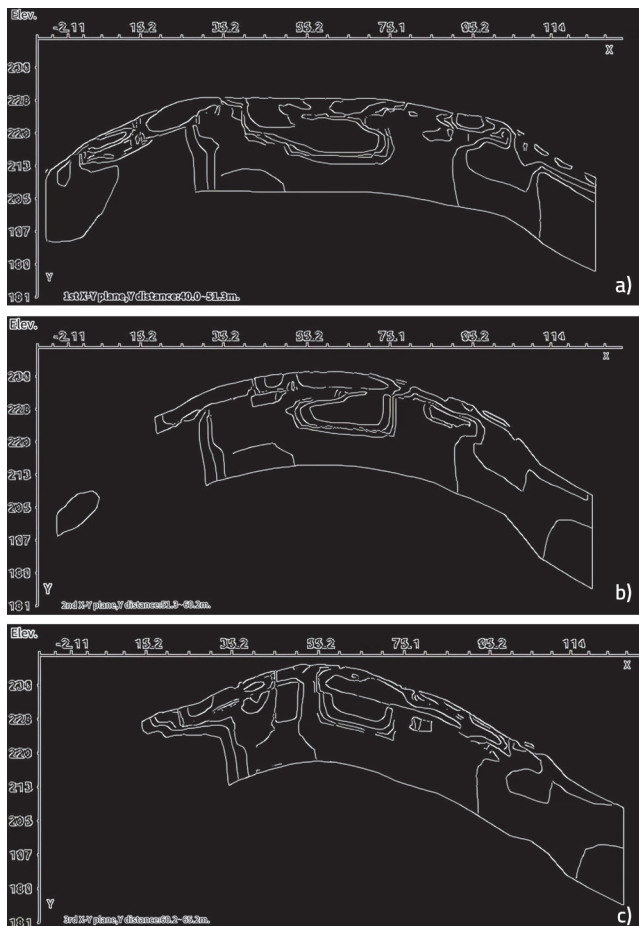
Slika 8. Obrada sivih tonova odjeljaka: a) Odjeljak 205, mapa sivih tonova; b) Odjeljak 220, mapa sivih tonova; c) Odjeljak 228, mapa sivih tonova

4.4. Prepoznavanje slike otpornosti

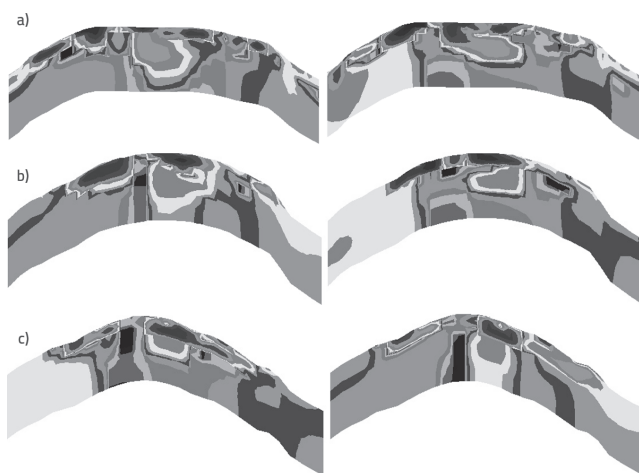
Kako bi se dalje odredio status razvoja skrivenog tijela u presjeku i shvatilo stanje oštećenja u kojem se nalazi materijal brane, prema zahtjevima za realizaciju dijagnostičke tehnologije, metoda prepoznavanja slike oštećenja od curenja zemljane i kamene brane koristi se za obradu slike skrivenog tijela. Prvo, profili koji prikazuju slike koje sadrže skrivene probleme su sivi kao što je prikazano na slici 8. Drugo, Cannyjev algoritam za otkrivanje rubova slike [27], što rezultira kartom granica slike u boji, zbog

usporedbe iste lokacije, tako da ovdje svaki odjeljak treba raditi samo s kartom, obradom rezultata prikazanih na slici 9.

Zatim se karta obrade sivih tonova podvrgava Houghovoj pravocrtnoj detekciji [28], a slika se izrezuje na odgovarajuću poziciju regije kako bi se odredilo područje izračuna slike. Rezultat procesa izrezivanja prikazan je na slici 10. Prostorna pretvorba boja izvodi se na izrezanoj slici kako bi se slika pretvorila iz RGB prostora boja u HSV prostor boja, a rezultat pretvorbe prikazan je na slici 11. Slika pretvorena u prostor boja podvrgnuta je prostornom odvajanju boja.

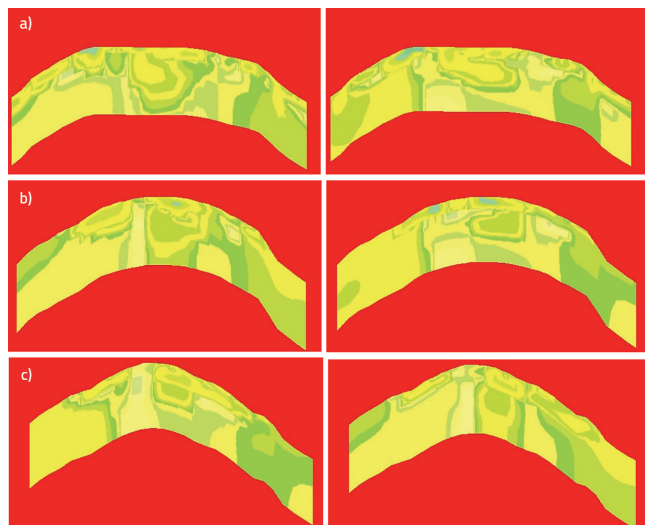


Slika 9. Karte otkrivanja Cannjevskih rubova za odjeljke: a) Odjeljak 205 - dijagram detekcije ruba; b) Odjeljak 220 - dijagram detekcije ruba; c) Odjeljak 228 - dijagram detekcije ruba

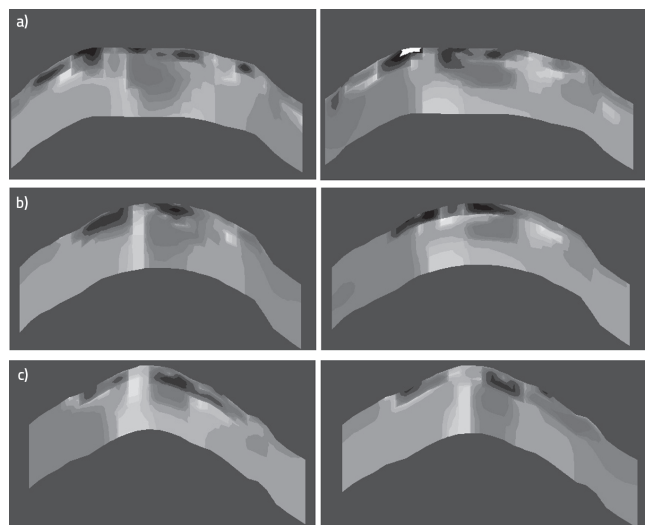


Slika 10. Houghove ravne linije izreza za odjeljke: a) Odjeljak 205 - Houghove ravne linije izreza; b) Odjeljak 220 - Houghove ravne linije izreza; c) Odjeljak 228 - Houghove ravne linije izreza

Pri izračunavanju praga pigmenta svake odvojene slike, prag izvorne slike u skrivenom području proširenja bio je 103,077, 102,937 i 104,111, a rezultati prostornog odvajanja boja prikazani su na slici 12.

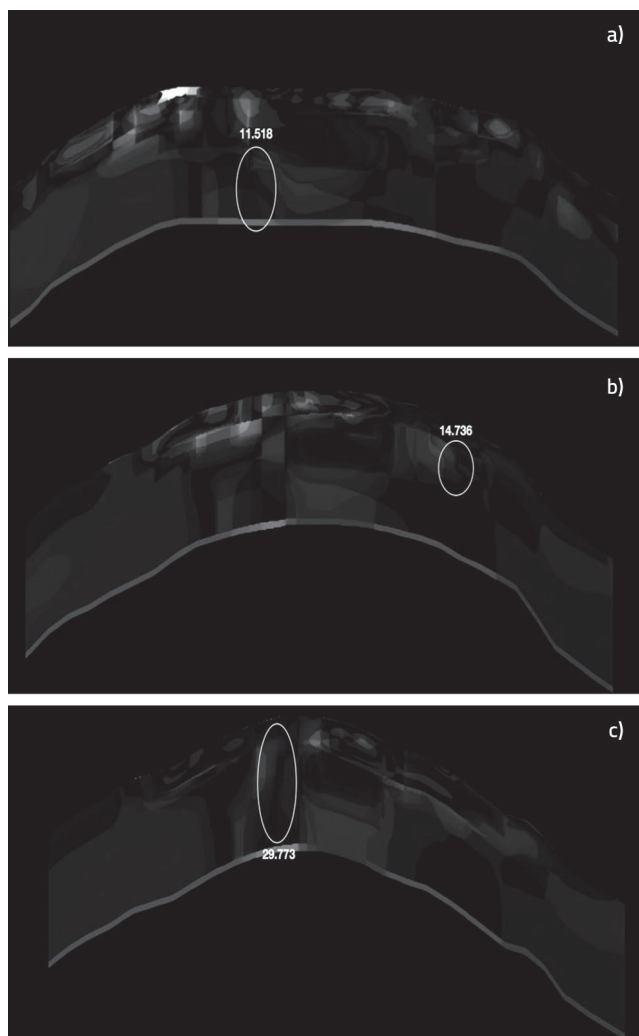


Slika 11. Dijagram prostorne pretvorbe boja za odjeljke: a) Odjeljak 205 - dijagram prostorne pretvorbe boja; b) Odjeljak 220 - dijagram prostorne pretvorbe boja; c) Odjeljak 228 - dijagram prostorne pretvorbe boja



Slika 12. Dijagram prostornog odvajanja boja za odjeljke: a) Odjeljak 205 - dijagram prostornog odvajanja boja; b) Odjeljak 220 - dijagram prostornog odvajanja boja; c) Odjeljak 228 - dijagram prostornog odvajanja boja

Konačno, pragovi piksela odgovarajućih položaja u različitim trenucima nakon prostornog odvajanja boja oduzimaju se kako bi se dobila količina promjene u pragu pigmenta skrivenog područja ekstenzije. Vrijednosti njegovih 205, 220 i 228 odjeljaka su 11,518, 14,736, odnosno 29,773, a ovdje se može dobiti brzina promjene pigmentnog praga skrivenih dijelova slike. Rezultati slike prikazani su na slici 13.



Slika 13. Grafički prikaz rezultata fazne redukcije slika presjek:
 a) Rezultat oduzimanja slike odjeljka 205; b) Rezultat oduzimanja slike odjeljka 220; c) Rezultat oduzimanja slike odjeljka 228

5. Dijagnoza curenja i rezultati

Analiza slika otpornosti snimljenih prije i nakon dvije sesije praćenja na istoj lokaciji otkriva da su, korištenjem algoritma za prepoznavanje usporedbe slika, početni pragovi pigmenta otpornosti od 103,077, 102,937 i 104,111 identificirani za skriveno opasno područje. Izračunavanjem razlike u pragovima otpornosti između različitih vremenskih točaka, prosječna promjena praga otpornosti pigmenta na istoj skrivenoj opasnoj lokaciji utvrđena je na 11,518, 14,736, odnosno 29,773. Vrijednosti od 14,736 i 29,773 zatim su uspoređene s pragom piksela na odgovarajućoj poziciji prije širenja skrivenog tijela kako bi se dobio omjer. Utvrđeno je da je stopa promjene otpora prije i nakon dvije sesije praćenja bila 11,1 %, 14,3 %, odnosno 28,6 %. Nijedna od ovih vrijednosti nije dostigla omjer tlo/stijena od 7:3. Stupanj zbijenosti materijala tijela brane iznosio je 98 %, a stopa promjene otpora za uvjete dijagnostike infiltracijskih

oštećenja bila je 32,5 %. Na temelju podataka vidljivo je da zemljana kamena brana još nije doživjela slom procjednom deformacijom. Međutim, stopa promjene električnog otpora u blizini sjeveroistočnog kuta sekcije približava se kritičnoj vrijednosti. Analiza pokazuje da je to povezano s uočenim povećanjem volumena procjedne vode tijekom početnih faza. Preporučuje se pojačati nadzor na ovoj specifičnoj lokaciji i provesti odgovarajuće korektivne mjere.

Tradicionalna električna metoda za otkrivanje procjeđivanja u zemljanim i kamenim nasipima može samo subjektivno procijeniti lokaciju skrivenog tijela u polju procjeđivanja i približni opseg oštećenja prema slici otpornosti koju čine pojedinačni podaci o prikupljanju i ne može točno prosuditi razvojni status skrivenog tijela. Također je utvrđeno da ne postoji neizbježna veza između područja niskog otpora na slici otpornosti zemlje i kamenog nasipa i toga da li materijal brane doseže oštećenje infiltracijske deformacije. Metoda je vrlo važna za pouzdanost ulaznih podataka, pa je važno osigurati točnost prikupljanja i obrade podataka. Stoga, u usporedbi s tradicionalnom električnom detekcijom, temeljenom na trodimenzionalnoj tomografiji otpornosti, ne samo da možemo znati stanje deformacije i oštećenosti materijala brane od zemlje i kamenog nasipa u polju procjeđivanja u različitim trenucima kroz brzu usporedbu slika, nego se također može postići objektivna i kontinuirana svrhu praćenja, a dijagnostička tehnologija je sveobuhvatnija i stvarnija.

6. Zaključak

U ovom radu, temeljeno na tehnologiji snimanja trodimenzionalne tomografije, provedeno je primijenjeno istraživanje dijagnostike curenja zemljanih i kamenih nasipa na stvarnim projektima.

Rezultati terenske primjene pokazuju izvedivost prikazanog pristupa koji služi za usporednu identifikaciju slika koje sadrže skrivene opasnosti. Nalazi pokazuju da su početni pragovi pigmenta otpornosti za opasna područja tijela brane dobiveni pomoću algoritma za prepoznavanje usporedbe slika. Oduzimanjem pragova otpornosti u različitim vremenskim točkama, izračunana je prosječna promjena praga pigmenta otpornosti prije i nakon usporedbe iste lokacije potencijalne opasnosti. Ta je vrijednost zatim uspoređena s pragom piksela odgovarajuće lokacije prije širenja tijela potencijalne opasnosti. Dodatno, analizirana je stopa promjene praćenog otpora prije i nakon dviju vremenskih točaka kako bi se utvrdila prisutnost potencijalne opasnosti od curenja na određenom mjestu.

Primjena tehnologije trodimenzionalnog snimanja u dijagnostici curenja zemljanih i kamenih brana pokazala je obećavajuće rezultate. Primjenom tehnologije obrade slike renderiranja tijela, velika područja mogu se lakše identificirati, što omogućuje točno određivanje evolucije polja curenja unutar zemljanih i kamenih nasipa u različitim fazama razaranja tijela tla. Osim toga, ova tehnologija može učinkovito prikazati promjene u pragovima otpornosti, naglašavajući širenje skrivenih opasnosti

u regiji. Smanjenjem subjektivne prirode ljudske prosudbe, ova metoda se pokazala izvedivom i daje vjerodostojne rezultate u dijagnostificiranju curenja u zemljanim i kamenim nasipima. Analiza štete od curenja u zemljanim i kamenim nasipima otkriva različite skrivene opasnosti koje se ne mogu u potpunosti riješiti samo korištenjem Cannjevog ruba detekcije za usporedbu slika. Preporučuju se daljnja istraživanja kako bi se istražili drugi algoritmi za usporedbu slika prilagođeni specifičnim vrstama skrivenih opasnosti, kao što je algoritam pomicanja središta mase slike za klizanje tijela brane i algoritam reda mjehurića

za nasumično pojavljivanje homogenih nasipa. Razvojem ciljanijih algoritama za usporedbu slika može se unaprijediti kvantitativno istraživanje dijagnostificiranja curenja u zemljanim i kamenim nasipima.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori Projekta plana znanosti i tehnologije Odjela za promet pokrajine Shandong (broj potpore: 2023B90).

LITERATURA

- [1] Alijani-Ardeshir, M., Navayi Neyfa, B., Ahmadi, M.: Comparative study of various smeared crack models for concrete dams, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 4, pp. 305-318, <https://doi.org/10.14256/JCE.1540.2015>
- [2] Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., Penn, S., Meldrum, P.I., Kuras, O., Loke, M.H., et al.: River Terrace Sand and Gravel Deposit Reserve Estimation Using Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography for Bedrock Surface Detection, *Journal of Applied Geophysics*, 93 (2013), pp. 25-32.
- [3] Loke, M.H., Barker, R.D.: Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections Using a Quasi-Newton Method, *Geophysical Prospecting*, 44 (1996), pp. 131-152.
- [4] Feng, R., Li, X.Q., Tao, X.L., Sun, C.C., Liu, X.Q., Hao, J.Q.: Electrical Resistivity Tomography for Hydrogeological Exploration, *Acta Seismologica Sinica*, 19 (1997), pp. 655-663
- [5] Zhou, J., Wang, F.: Application of High-Density Electrical Resistivity Method in Hidden Hazard Detection of Hongwei Reservoir Earth-Rockfill Dam, *Journal of Logistics Engineering University*, 24 (2008) 2, pp. 1-5.
- [6] Song, W.H.: Discussion on Leakage Detection of Earth-Rockfill Dams Based on High-Density Electrical Method, *Dams and Safety*, 33 (2013) 1, pp. 38-41.
- [7] Zhao, X., et al.: Application of Electrical Resistivity Imaging Technology in Leakage Diagnosis of Earth-Rockfill Dams, *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 28 (2009) 6, pp. 1097-1101.
- [8] Zhao, Z., et al.: Experimental Study on Leakage Diagnosis of Earth-Rockfill Dams Based on Temperature Field and Electrical Resistivity Imaging, *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 8 (2010) 6, pp. 1-4+27.
- [9] Zhao, Y.Z., et al.: Joint Imaging Diagnosis of Leakage in Earth-Rockfill Dams Based on Velocity and Electrical Resistivity (National Natural Science Foundation Project No. 50779081), Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [10] Zhao, W.Y.: Research on Wave-Electric Coupled Imaging Diagnosis Technology for Leakage of Earth-Rock Dams (National Natural Science Foundation Project No.50779081), Research Report of Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [11] Šunjić, G., Prskalo, M., Milašinović, Z., Harapin, A.: Simulation of concrete ageing on dams as illustrated by numerical analysis of Jablanica HPP, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 9, pp. 749-767, <https://doi.org/10.14256/JCE.2385.2018>
- [12] Altunisik, A.C., Sesli, H.: Effect of near-fault ground motion with pulse signal on dynamic response of dam-reservoir-foundation systems, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 12, pp. 1059-1083, <https://doi.org/10.14256/JCE.1573.2016>
- [13] Lévy, L., Maurya, P.K., Byrdina, S., et al.: Electrical resistivity tomography and time-domain induced polarization field investigations of geothermal areas at Krafla, Iceland: Comparison to borehole and laboratory frequency-domain electrical observations, *Geophysical Journal International*, 3 (2024)3
- [14] Li, Z.Z.: Application of High-Density Electrical Method in River Crossing Detection in Granite Areas. *People's Yellow River*, 39 (2017) 5, pp. 109-111.
- [15] Liu, P.Y., et al.: Simulation and Application of High-Density Electrical Method in Leakage Monitoring of Dams, *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 41 (2021) 5, pp. 71-75.
- [16] Zhou: Preliminary Study on 3D Resistivity Tomography Application. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 6 (2009), pp. 549-555.
- [17] Johnson, T.C., Burghardt, J., Strickland, C., et al.: 4D proxy imaging of fracture dilation and stress shadowing using electrical resistivity tomography during high pressure injections into a dense rock formation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126 (2021) 11, e2021JB022298.
- [18] Kawaguchi, T., Saito, T.: Temperature measurement of molten glass under batch feeding process by means of electrical resistance tomography, *IOP Publishing Ltd* [2024-03-04].
- [19] Beff, L., Günther, T., Vandoorne, B., et al.: Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (2013) 7, pp. 595-609, doi:10.5194/hess-17-595-2013.
- [20] Phueakim, K., Amatyakul, P., Vachirathienchai, C.: An attempt to use convolutional neural network to recover layered-earth structure from electrical resistivity tomography survey, *IOP Publishing Ltd* [2024-03-04].
- [21] Rao, G.T., Rao, V.V.S.G., Padalu, G.: Application of electrical resistivity tomography methods for delineation of groundwater contamination and potential zones, *Arabian Journal of Geosciences*, 7 (2014) 4, pp. 1373-1384.
- [22] Zhang, X., Zhao, M., Wang, K., Liu, P., Liu, H.: Application of 3D Electrical Resistivity Tomography for Diagnosing Leakage in Earth Rock-Fill Dam, *Engineering*, 8 (2016), pp. 269-275.

- [23] Li, J.M.: Electric Field and Electric Prospecting. Geological Publishing House, Beijing, 2005.
- [24] Yang, J.F., Deng, J.Z., Chen, H.K.H.Y.: 3D Direct Resistivity Forward Modeling by the Precondition Conjugate Gradient Method, Geophysical Geochemical Exploration, 34 (2012), pp. 303-309.
- [25] Liu, B., Nie, L.C., Li, S.C. Xu, L., Liu, Z.Y., Song, J., et al.: 3D electrical Resistivity Inversion Tomography with Spatial Constraint, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31 (2012), pp. 2258-2268.
- [26] Song, Y., Li, C., et al.: A parallel Canny edge detection algorithm based on OpenCL acceleration, Plos one, 19 (2024) 1, pp. e0292345.
- [27] Uluskan, S.: Automatic detection of regulatory traffic signs via circle detection by post edge detection applied to straight line Hough transform, International Journal of Automotive Science And Technology, 4 (2020) 2, pp. 49-58.