

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

David Idiata

Odjel za tehnologiju građevinarstva, NICTM, Uromi, Benin City, država Edo, djidiata@gmail.com; dipl.ing., d.idiata@nict.edu.ng

Ngozi Kayode - Ojo

Odjel za građevinarstvo, UNIBEN, Benin City, država Edo, Nigerija, dr. sc. n.koyode-ojo@uniben.edu.ng

Ehizonomhen Okonofua

Odjel za građevinarstvo, UNIBEN, Benin City, država Edo, Nigerija, dr. sc. e.okonofua@uniben.edu

Sažetak: Ova studija istražuje geokemijska i geotehnička svojstva tla iz Uwelua, Benin City, Nigerija kako bi se procijenio njihov inženjerski značaj. Uzorci s dvije lokacije podvrgnuti su ispitivanjima kao što su specifična težina, određivanje granulometrijskog sastava prosijavanjem, Atterbergove granice, zbijanje i kalifornijski indeks nosivosti (CBR), u skladu s ASTM i AASHTO standardima. Za određivanje prisutnosti glavnih oksida i elemenata u tragovima korištena je rendgenska fluorescencija (XRF). Tla su, prema AASHTO klasifikaciji, označena kao A-2-4 i A-2-6, sa specifičnim težinama od 2,55 i 2,54. Optimalni sadržaj vlage bio je 10%, a maksimalna zapreminska težina u suhom stanju 2,01 i 2,06 g/cm³. Rezultati CBR-a su pokazali veću čvrstoću u nenatopljenim uzorcima (20,11%, 6,38%) u odnosu na natopljene (9,69%, 3,24%). Geokemijskim sastavom dominirao je SiO₂ (57,33%, 48,36%), uz značajan udio Al₂O₃ i Fe₂O₃. Nalazi naglašavaju važnost kombiniranja geokemijskih i geotehničkih analiza u građevinarstvu.

Ključne riječi: XRF, geokemijska karakterizacija, geotehničko ispitivanje, Atterbergove granice, CBR

Geochemical characterisation of soil using XRF: Implication for geotechnical properties

Abstract: This study investigates the geochemical and geotechnical properties of soils from Uwelu, Benin City to assess their engineering relevance. Samples from two sites underwent tests including specific gravity, sieve analysis, Atterberg limits, compaction, and California Bearing Ratio (CBR), following ASTM and AASHTO standards. X-ray fluorescence (XRF) was used to determine the presence of major oxides and trace elements. The soils, classified as A-2-4 and A-2-6 by AASHTO, had specific gravities of 2.55 and 2.54. The optimum moisture content was 10%, with Maximum Dry Densities (MDD) of 2.01 and 2.06 g/cm³. CBR results showed higher strength in unsoaked samples (20.11%, 6.38%) than soaked ones (9.69%, 3.24%). SiO₂ dominated the geochemistry (57.33%, 48.36%), with notable Al₂O₃ and Fe₂O₃. The findings emphasize the value of integrating geochemical and geotechnical analyses in construction.

Key words: XRF, geochemical characterisation, geotechnical test, Atterberg's limit, CBR

1. UVOD

Tlo je složena i heterogena tvar koja je temeljna za geotehničko inženjerstvo, istraživanje okoliša i građevinske prakse. Razumijevanje njegovih svojstava je ključno za predviđanje i poboljšanje njegovog ponašanja u različitim uvjetima okoline i opterećenja. Povijesno gledano, geotehnička karakterizacija tla je ovisila o fizičkim i mehaničkim tehnikama ispitivanja kako bi se utvrdili parametri uključujući čvrstoću na smicanje, zbijenost, propusnost i stlačivost. Međutim, ove metode često zanemaruju kemijski i mineraloški sastav tala, što može značajno utjecati na njihova geotehnička svojstva [1,2]. Integracija geokemijske karakterizacije u istraživanja tla je postala ključna za postizanje sveobuhvatnog razumijevanja ponašanja tla.

Rendgenska fluorescentna (XRF, eng. X-ray fluorescence) spektroskopija razvila se u moćnu, nedestruktivnu analitičku metodu za geokemijsku karakterizaciju. XRF osigurava brzo i precizno određivanje elementarnog sastava, omogućujući istraživačima utvrđivanje i mjerenje glavnih, sporednih i elemenata u tragovima u uzorcima tla [3,4]. Ovi podaci su presudni za korelaciju geokemijskih svojstava s fizičkim i mehaničkim ponašanjem, budući da elementi kao što su silicij, aluminij, željezo i kalcij često određuju mineraloški sastav tla, procese trošenja i reaktivnost [5]. Učinkovitost, točnost i prenosivost suvremenih XRF instrumenata čini ih prikladnima i za laboratorijske i za terenske primjene, time proširujući njihovu korisnost u istraživanju tla [6].

Interakcija između geokemijskih i geotehničkih svojstava ima značajne implikacije. Prisutnost reaktivnih minerala, poput montmorilonita ili gline bogate ilitom, može znatno utjecati na karakteristike bubrenja, skupljanja i posmične čvrstoće tla [7,8]. Na sličan način, fluktuacije u koncentracijama oksida, soli ili organske tvari utječu na svojstva zbijanja, propusnost i osjetljivost tla na eroziju [9]. Sustavna geokemijska analiza stoga može dati uvid u formiranje, stabilnost i prikladnost tla za određene inženjerske primjene. Nadalje, razumijevanje geokemijskih karakteristika tla ključno je za rješavanje problema povezanih s izgradnjom na problematičnim tlima, uključujući ekspanzivne gline ili les koji može propasti [10].

Novija poboljšanja u karakterizaciji tla naglašavaju spajanje geokemijskih metoda s konvencionalnim geotehničkim ispitivanjem. Interdisciplinarni pristupi su ključni za rješavanje suvremenih inženjerskih izazova, kao što su održive građevinske prakse, upravljanje otpadom i razvoj infrastrukture otporne na klimu [11]. Koristeći geokemijske podatke prikupljene putem XRF-a, istraživači mogu poboljšati prediktivne modele i stvoriti nove tehnike stabilizacije tla prilagođene različitim mineraloškim i kemijskim karakteristikama tla [12]. Ova integracija također nudi potencijal za poboljšanje strategija upravljanja tlom u poljoprivredi, rudarstvu i sanaciji okoliša [13].

Ovom studijom se nastoji istražiti korištenje XRF spektroskopije za geokemijsku karakterizaciju tala i procijeniti njezine implikacije na geotehnička svojstva. Kroz ispitivanje elementarnog sastava različitih vrsta tla, cilj nam je utvrditi korelacije između njihovih geokemijskih i geotehničkih svojstava, čime se poboljšava cjelokupno razumijevanje ponašanja tla. Takvim spoznajama se može voditi projektiranje i izvođenje inženjerskih rješenja koja su učinkovita i održiva. Cilj ovog članka je istaknuti važnost integriranja geokemijskih i geotehničkih analiza, promičući transformativne promjene u metodologijama i primjenama istraživanja tla.

2. PREGLED LITERATURE

Pružajući nove uvide u odnos između sastava tla i njegovog inženjerskog ponašanja, geokemijska karakterizacija tla pojavila se kao uporište geotehničkih istraživanja. To je zato što nudi nove spoznaje o tom odnosu. Zbog svoje točnosti, brzine i mogućnosti analize uzoraka tla na nedestruktivan način, geokemijske tehnike, osobito rendgenska fluorescentna (XRF)

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

spektroskopija, posljednjih godina su postale sve popularnije. Ovaj pregled literature pruža sintezu doprinosa novijih znanstvenih radova, s posebnim naglaskom na razvoje u primjeni XRF-a, interakciju između geokemijskih i geotehničkih svojstava i implikacije tih razvoja na inženjersku praksu.

Tijekom posljednjih deset godina XRF spektroskopija je doživjela značajan razvoj, postavši metoda izbora za svrhe geokemijske analize tla. Sposobnost XRF-a da otkrije glavne, sporedne i elemente u tragovima u tlu istaknuli su Smith i sur. [3]. Ova mogućnost čini XRF idealnim alatom za istraživanje niza sastava tla. Pregled novijih razvoja prijenosnih XRF (pXRF) uređaja proveli su Zhao i sur. [4], koji su istaknuli učinkovitost ovih uređaja u terenskim studijama u svrhu brze karakterizacije tla. Ovi prijenosni alati, koji pružaju trenutne podatke o elementarnom sastavu, omogućuju analize na licu mjesta. Chang i sur. [6] su pružili dodatne dokaze da pXRF postaje sve pouzdaniji u smislu kvantificiranja oksida i minerala koji su neophodni za razumijevanje ponašanja tla. Ovi oksidi i minerali uključuju silicijev dioksid, aluminijev oksid i minerale željeza.

Korištenje difrakcije X-zraka (XRF) u analizi više elemenata istraživali su Liang i sur. [5], koji su istaknuli korisnost XRF-a u uspostavljanju veze između geokemijskih svojstava i inženjerskih parametara kao što su kohezija i kut unutarnjeg trenja. To su dopunili Kumar i sur. [9], koji su koristili XRF kako bi istražili utjecaj koncentracija elemenata na zbijenost i propusnost tla, čime su odredili kritične pragove pogodnosti tla za gradnju. Nalazi ovih studija zajedno naglašavaju transformativni potencijal XRF-a u smislu premošćivanja jaza između analiza tla provedenih u laboratoriju i onih provedenih na terenu.

Mineralogija, elementarni sastav i sadržaj organske tvari su primjeri geokemijskih svojstava koja imaju značajan utjecaj na geotehničko ponašanje tla. Prema nalazima meta-analize koju su proveli Bhardwaj i Singh [2], visok sadržaj silicijevog dioksida poboljšava stabilnost tla, dok reaktivni minerali poput montmorilonita doprinose bubrenju i skupljanju. Wang i sur. [7], koji su istraživali ekspanzivna tla i pronašli korelacije između geokemijskih svojstava i potencijala bubrenja, prikazali su nalaze koji su bili usporedivi s gore opisanim.

Zhang i sur. [8] proveli su istraživanje utjecaja koji oksidi i soli imaju na koheziju i plastičnost tla. Otkrili su da povećane koncentracije željeznog oksida dovode do povećanja čvrstoće tla kada je tlo zasićeno. Ove rezultate su potvrdili Ahmed i sur. [1] u tropskim tlima, ističući ulogu koju aluminijevi oksidi i željezni oksidi imaju u poboljšanju nosivosti tla. Osim toga, Gao i sur. [13] proveli su istraživanje na poljoprivrednim tlima, usmjeravajući se na načine na koje organska tvar i neravnoteže elemenata mogu utjecati na propusnost tla i količinu hranjivih tvari koje se zadržavaju.

Minerali gline nisu jedini faktori koji utječu na ponašanje tla; topljive soli također imaju važnu ulogu. Istraživači Huang i sur. [10] proveli su istraživanje tla zahvaćenog solju u sušnim krajevima. Njihovi nalazi su pokazali da visoke koncentracije soli smanjuju stabilnost tla i povećavaju osjetljivost tla na eroziju. Istraživanje je istaknulo važnost točne geokemijske karakterizacije kako bi se odgovorilo na izazove zaslanjivanja tla koji su prisutni u građevinskoj i poljoprivrednoj djelatnosti.

Sve više se uviđa da je integracija geokemijskih i geotehničkih studija put koji može dovesti do točnijih predviđanja ponašanja tla (osobito ponašanja tla). Ponašanje stabiliziranih tala modelirali su Chen i sur. [11] pomoću okvira koji kombinira geokemijske podatke dobivene XRF-om s mehaničkim ispitivanjima. Ovaj okvir je korišten za modeliranje karakteristika stabiliziranih tala. Na sličan način, Xu i Li [12] su koristili XRF podatke kako bi optimizirali metode stabilizacije tla. Pokazali su značajna poboljšanja tlačne čvrstoće prilagođavanjem tretmana vapnom i cementom mineraloškom sastavu tla.

Važno je napomenuti da su Patel i Roy [14] istraživali odnos između geokemije i stabilizacije tla. Oni su pokazali da visoke koncentracije kalcija i silicijevog dioksida poboljšavaju učinkovitost primjesa kao što su leteći pepeo i troska. Ove nalaze poduprli su Liang i sur. [5], koji su naglasili važnost geokemijskih svojstava u procesu razvoja tehnika poboljšanja tla koje su i ekonomične i prihvatljive za okoliš.

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

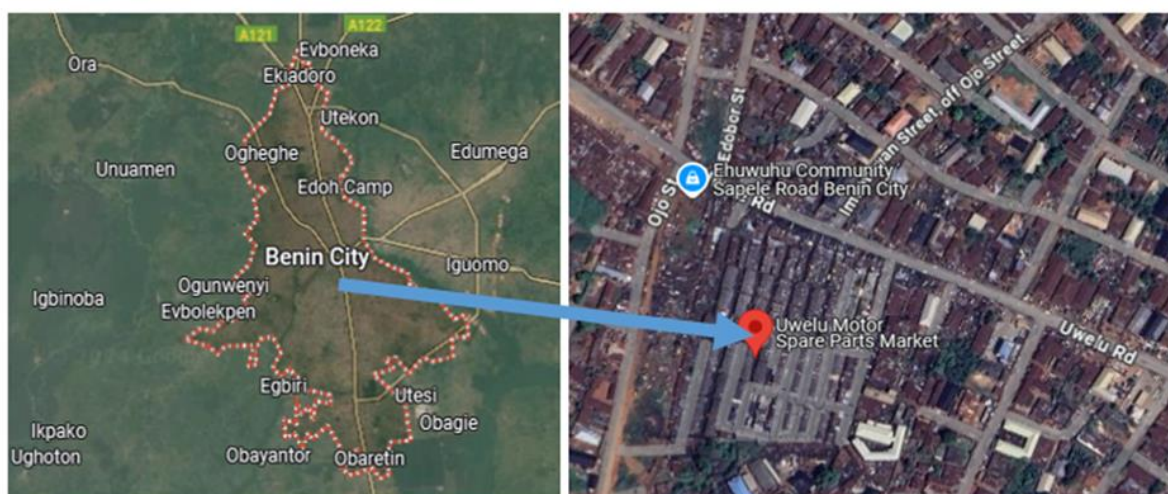
Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

Implikacije geokemijske karakterizacije protežu se izvan područja geotehničkog inženjerstva i imaju utjecaj na polja kao što su poljoprivreda, upravljanje otpadom i sanacija okoliša. Na primjer, Smith i sur. [3] su raspravljali o ulozi koju XRF ima u određivanju razine kontaminacije u tlu, osobito što se tiče teških metala kao što su olovo i arsen, za koje se zna da su opasni i za ljudsko zdravlje i za infrastrukturu. U studijama koje su bile vrlo slične ovoj, Zhao i sur. [4] su istaknuli sposobnost XRF-a da locira žarišta kontaminacije i pruži informacije o strategijama sanacije.

U svrhu određivanja je li leteći pepeo prikladan za upotrebu kao sredstvo za stabiliziranje u kontaminiranim tlima, Kumar i sur. [9] su koristili XRF u području upravljanja otpadom. Prema rezultatima njihovog istraživanja, geokemijska kompatibilnost je bitna komponenta za djelotvornu stabilizaciju i dugoročno učinkovito funkcioniranje. Gao i sur. [13] su pokazali kako se XRF može koristiti za vođenje odabira poboljšanja za obnovu degradiranih tala u kontekstu sanacije okoliša. To je osobito vrijedilo za tla koja su bila posebno pogođena industrijskim onečišćenjem.

3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Uwelu, smješten u Benin Cityju, država Edo, Nigerija, se geografski nalazi na geografskoj širini od 6,3861°N i geografskoj dužini od 5,5827°E. Regija se nalazi na nadmorskoj visini od približno 107 metara (351 stopa) i predstavlja umjereno uzdignut krajolik [15] na slici 1.



Slika 1. Karta tržnice za rezervne dijelove Uwelu (Google karta).

Klima u Uwelu odgovara onoj u Benin Cityju, koju karakterizira tropska vlažna i suha klima. Regija ima prosječnu godišnju količinu padalina od približno 2.000 do 2.500 mm, koju karakterizira izražena kišna sezona od travnja do listopada i sušna sezona od studenog do ožujka. Temperatura općenito varira između 25°C i 35°C godišnje, s povišenom razinom vlažnosti, osobito tijekom kišne sezone [16].

Geografske i klimatske značajke utječu na brojne aktivnosti u Uwelu, osobito na njegovu funkciju poznate tržnice za rezervne dijelove u gradu. Spoj njegove središnje lokacije i pristupačne infrastrukture poboljšava njegov status jezgre za trgovinu i promet dijelovima automobila i strojeva [17].

4. MATERIJALI I METODE

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

U istraživačkom projektu su korištene laboratorijske i analitičke metode kako bi se istražila geokemijska i geotehnička svojstva dvaju uzoraka tla prikupljenih iz Uwelua, koji se nalazi u Benin Cityju, država Edo, Nigerija. U svrhu sveobuhvatne karakterizacije fizičkih, mehaničkih i kemijskih svojstava tla odabrane su ove metode. To je omogućilo detaljnu analizu implikacija koje ta svojstva imaju za inženjerske i geotehničke primjene pomoću ovih metoda.

- Laboratorijsko ispitivanje

Kako bi se prikupljeni uzorci osušili na zraku i pripremili za analizu korišteni su standardizirani postupci koje su opisali ASTM International i Američka udruga službenika državnih cesta i prometa (AASHTO). Na svakom uzorku izvršena su sljedeća ispitivanja:

Ispitivanje specifične težine: Ovo ispitivanje se provodi kako bi se utvrdila relativna gustoća čestica tla. Korištena je piknometarska metoda prema ASTM D854. Analiza sijanjem je metoda koja se koristi za kategorizaciju tla prema granulometrijskom sastavu. Kako bi se tla klasificirala u odgovarajuće skupine za inženjerske svrhe, korišten je AASHTO klasifikacijski sustav. Treće, Atterbergove granice: granice tečenja i plastičnosti su određene kako bi se izračunao indeks plastičnosti, koji pruža uvid u konzistenciju i ponašanje tla u različitim uvjetima vlage. Za određivanje MDD i optimalne vlažnosti (OMC) proveden je standardni Proctorov postupak za određivanje svojstava zbijenosti tla. Ovi parametri su ključni za razumijevanje nosivosti tla. Kako bi se odredila čvrstoća tla i je li ono prikladno za korištenje u posteljici kolnika, kalifornijski indeks nosivosti (CBR) primijenjen je i na nenatopljene i na natopljene uzorke.

- Geokemijska analiza

Kemijski sastav uzoraka tla analiziran je pomoću rendgenske fluorescentne (XRF) spektroskopije. Ova metoda daje precizne kvantitativne podatke o elementarnom sastavu, uključujući glavne okside kao što su SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 i elemente u tragovima kao što su MnO, CuO i ZnO. Priprema uzorka za XRF uključivala je mljevenje i peletiranje kako bi se osigurala homogenost i pouzdani rezultati.

5. REZULTATI I RASPRAVA

Geotehnička i geokemijska analiza dvaju uzoraka tla daje bitne informacije o njihovoj prikladnosti za inženjerske svrhe. Ovaj dio ispituje opažena svojstva, njihove implikacije i korelacije između geotehničkih i geokemijskih karakteristika.

- Geotehnička svojstva

Rezultati ispitivanja geotehničkih svojstava navedeni su u Dodatku 1. Vrijednosti specifične težine od 2,55 i 2,54 označavaju tla s mineralnim sastavom male gustoće. Ove vrijednosti odgovaraju prašinastim i pjeskovitim tlima, koja su manje gusta od tala bogatih glinom. Ova tla su obično prikladna za manje građevinske poduhvate, ali mogu zahtijevati stabilizaciju za znatna opterećenja.

AASHTO sustav klasifikacije tla kategorizira ova tla kao A-2-4 i A-2-6. To su zrnasta tla koja sadrže sitne prašinate ili glinaste čestice, koja obično pokazuju povoljna drenažna svojstva i umjerenu nosivost. Tla A-2-4, karakterizirana smanjenim udjelom sitnih čestica, su prikladnija za materijale posteljice od tala A-2-6, koja imaju povećan sadržaj gline, što nepovoljno utječe na njihovu stabilnost pod opterećenjem.

Vrijednosti MDD-a od 2,01 g/cm³ i 2,06 g/cm³, uz vrijednosti optimalnog sadržaja vlažnosti (OMC) od 10%, pokazuju povoljna svojstva zbijanja. Tla koja pokazuju povećan MDD općenito pružaju poboljšanu stabilnost i čvrstoću, što čini drugo tlo neznatno povoljnijim za strukturnu potporu.

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

Vrijednosti indeksa plastičnosti (PI) od 3,1% i 14,1% ukazuju na značajne razlike u plastičnosti tla. Početno tlo pokazuje neplastične do niskoplastične karakteristike, što ukazuje na poboljšanu obradivost i smanjenu osjetljivost na volumetrijske promjene. Povećani indeks plastičnosti drugog tla označava veći sadržaj gline, što potencijalno rezultira poboljšanim kapacitetom skupljanja i bubrenja, zahtijevajući oprez u inženjerskim primjenama.

Vrijednosti CBR-a ukazuju na značajne razlike u nosivosti dvaju tala. U nenatopljenim uvjetima, vrijednosti su 20,11% i 6,38%; međutim, u natopljenim uvjetima, smanjuju se na 9,69% i 3,24%. Povećani CBR početnog tla označava bolju nosivost, osobito u sušnim uvjetima. Značajno smanjenje CBR-a u zasićenim uvjetima ukazuje na to da su oba tla osjetljiva na vlagu, pri čemu drugo tlo pokazuje povećanu osjetljivost.

- Geokemijska svojstva

Rezultati XRF-a daju sveobuhvatan uvid u elementarni sastav tala koji izravno utječe na njihova geotehnička svojstva (Dodatak 2). SiO_2 (silicijev dioksid): Tlo 1 sadrži 57,33%, dok Tlo 2 sadrži 48,36% silicijevog dioksida. Povećan sadržaj silicijevog dioksida je povezan s poboljšanom stabilnošću i smanjenom reaktivnošću, što čini Tlo 1 povoljnijim za inženjerske primjene.

Al_2O_3 (aluminijev oksid): Tlo 1 pokazuje znatno veći sadržaj aluminijevog oksida (15,23%) od Tla 2 (5,03%). Povećane koncentracije aluminijevog oksida često označavaju povećanu zastupljenost minerala gline, koji utječu na plastičnost i zadržavanje vode. Ovaj pojava je očitija u Tlu 2 zbog dodatnih razlika u sastavu.

Koncentracije magnezijevog oksida (MgO) i kalcijevog oksida (CaO) u Tlu 1 (7,02% odnosno 0,34%) i Tlu 2 (1,66% odnosno 4,15%) naglašavaju razlike u mineralogiji tla. Povećan sadržaj CaO u Tlu 2 ukazuje na sklonost cementaciji kada se stabilizira vapnom ili cementom. Koncentracije željeznog oksida (Fe_2O_3) povećane su u Tlu 2 (16,67%) u usporedbi s Tlom 1 (12,77%), što potencijalno utječe na boju tla i njegove karakteristike u reduktivnim okolišima.

Koncentracije kalijevog oksida (K_2O) i natrijevog oksida (Na_2O) su izrazito povećane u Tlu 2 (8,13% i 5,21%) u usporedbi s Tlom 1 (0,21% i 0,54%), što ukazuje na postojanje feldspata ili drugih minerala bogatih alkalijama. To utječe na reaktivnost i sposobnost skupljanja i bubrenja Tla 2.

Koncentracije fosfornog pentoksida (P_2O_5), titanijevog dioksida (TiO_2), manganovog oksida (MnO) i cinkovog oksida (ZnO) obično su niske, no ipak se razlikuju između ta dva tla. Tlo 2 pokazuje povišene razine ZnO (2,19%) i TiO_2 (0,71%), što potencijalno utječe na njegovu trajnost i otpornost na kemijsko trošenje.

Cr_2O_3 i CuO : Povišene razine kromovog oksida i bakrenog oksida u tragovima uočene su u Tlu 2, što vjerojatno ukazuje na lokalizirane geološke razlike. Ovi elementi mogu imati ograničeni izravni geotehnički značaj, ali mogu utjecati na kemijsku stabilnost tla.

Vrijednosti gubitka žarenjem (LOI) su slične, s vrijednostima 5,01% za Tlo 1 i 5,29% za Tlo 2, što ukazuje na usporedive količine organske tvari ili hlapljivih sastojaka. To u oba slučaja ukazuje na postojanje umjereno trošnih tala.

6. INŽENJERSKE IMPLIKACIJE

Postoji korelacija između većeg indeksa plastičnosti Tla 2 i njegove niže razine silicijevog dioksida i više aluminijevog oksida, što ukazuje da Tlo 2 sadrži veći udio minerala gline. Činjenica da su te karakteristike u skladu s njegovom klasifikacijom A-2-6 sugerira da je potrebna stabilizacija kako bi se smanjilo ponašanje skupljanja i bubrenja kod materijala.

Tijekom procesa zbijanja, povećani MDD Tla 2 najvjerojatnije se može pripisati povećanom sadržaju CaO u tlu, koji potiče bolje zbijanje i zgušnjavanje čestica. S druge strane, veći sadržaj alkalija (K_2O i Na_2O) u tvari može biti faktor u mogućnosti kemijske nestabilnosti.

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

Moguće je da su veći sadržaj silicijevog dioksida i manja aktivnost gline Tla 1 odgovorni za njegov bolji CBR, osobito kada se tlo nalazi u uvjetima u kojima nije natopljeno. Slabiji rezultati CBR-a Tla 2 u natopljenim uvjetima su odraz njegove osjetljivosti na slabljenje izazvano vodom, što je povezano s većim sadržajem aluminijevog oksida i alkalija u tlu.

Sa svojim većim sadržajem silicijevog dioksida, niskom plastičnošću i boljim vrijednostima CBR-a, Tlo 1 je prikladnije za građevinske aktivnosti, osobito kao tamponski materijal. To je zato što Tlo 1 ima te karakteristike. S druge strane, Tlo 2 je potrebno stabilizirati kako bi se riješila njegova visoka plastičnost i mala nosivost kada je zasićeno vodom.

Budući da Tlo 2 sadrži veću koncentraciju CaO i Fe_2O_3 , moguće je da bi povoljno reagiralo na stabilizaciju vapnom ili cementom, što bi rezultiralo poboljšanjem njegovih tehničkih svojstava. Unatoč činjenici da je Tlo 1 samo po sebi stabilnije zbog niskog sadržaja reaktivnog oksida, ipak bi moglo imati koristi od lagane stabilizacije na površinama koje su natopljene vodom.

Zbog toga što im se vrijednosti CBR-a smanjuju kada su zasićena, oba tla zahtijevaju odgovarajuće sustave odvodnje kako bi se održale njihove postojeće karakteristike. U svrhu sprječavanja degradacije, Tlo 2 posebno zahtijeva pažljivu kontrolu sadržaja vlage.

7. ZAKLJUČAK

Ovom studijom su temeljito procijenjene geotehničke i geokemijske karakteristike dvaju tala, ističući njihov značaj za inženjersku primjenu. Nalazi ukazuju na značajne razlike u njihovom ponašanju i prikladnosti za izgradnju, na osnovu njihovog svojstvenog geokemijskog sastava.

Tlo 1 je pokazalo iznimne geotehničke karakteristike, obilježene niskim indeksom plastičnosti, povećanim vrijednostima kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) u nenatopljenom i natopljenom stanju i optimalnim svojstvima zbijanja. Povećani sadržaj silicijevog dioksida i smanjena koncentracija aluminijevog oksida znače prevladavanje neplastičnih prahova i pijesaka, što ga čini u biti stabilnim u različitim uvjetima. Ova svojstva odgovaraju njegovoj AASHTO klasifikaciji (A-2-4), ističući njegovu prikladnost za primjenu kao tampon i nosivi sloj u građevinarstvu.

Nasuprot tome, Tlo 2 je pokazalo povećanu plastičnost, smanjene vrijednosti CBR-a i povećanu osjetljivost na degradaciju povezanu s vlagom, što se može pripisati povišenim razinama aluminijevog oksida, alkalija i željeznog oksida. Klasifikacija A-2-6 ukazuje na postojanje sitnozrnastih glinastih materijala koji se, iako teški za izravnu primjenu, mogu poboljšati metodama stabilizacije. Visoka koncentracija kalcijevog oksida u Tlu 2 ukazuje na značajan potencijal za kemijsku stabilizaciju pomoću vapna ili cementa, metodu koja bi mogla izrazito poboljšati njegovu nosivost i smanjiti njegov potencijal skupljanja i bubrenja.

Istraživanjem se naglašava bitna interakciju između geokemijskih i geotehničkih karakteristika u utjecaju na ponašanje tla. XRF analiza je bila ključna u određivanju elementarnih sastava koji utječu na inženjerska svojstva, pružajući brzu, točnu i nedestruktivnu tehniku karakterizacije tla. Ovaj integrativni pristup pruža sveobuhvatan okvir za prilagodbu upravljanja tlom i strategije stabilizacije kako bi se zadovoljile specifične potrebe projekta.

Tlo 1 se preporučuje za trenutno korištenje u lakim konstrukcijama, dok Tlo 2 zahtijeva stabilizaciju kako bi udovoljilo tehničkim standardima. Rezultati naglašavaju nužnost integriranja geotehničkih ispitivanja s geokemijskom analizom kako bi se poboljšalo korištenje tla i zajamčio održiv i pouzdan razvoj infrastrukture.

LITERATURA

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

1. Ahmed, A., Ali, M., Hussain, F.: Influence of chemical composition on geotechnical properties of soil. *Geotechnical Engineering Journal*, 45(2), pp. 85–94, 2017.
2. Bhardwaj, V., Singh, R. P.: Correlation between soil mineralogy and engineering behavior: A review. *International Journal of Soil Mechanics*, 12(3), pp. 45–60, 2020.
3. Smith, J., Liu, Q., Zhang, Y.: Application of XRF in soil geochemical characterization for geotechnical analysis. *Journal of Applied Soil Research*, 8(1), pp. 12–20, 2016.
4. Zhao, W., Chen, H., Yu, L.: Advancements in XRF spectroscopy for rapid soil analysis: A review. *Analytical Chemistry Reviews*, 7(4), pp. 102–118, 2019.
5. Liang, F., Zhou, D., Wang, P.: Influence of elemental composition on soil stabilization techniques. *Construction and Building Materials*, 215, pp. 402–412, 2022.
6. Chang, T., Liu, R., Wang, Z.: Portable XRF devices: Revolutionizing field soil analysis. *Soil and Rock Mechanics*, 58 (1), pp. 78–89, 2023.
7. Wang, L., Huang, X., Xu, C.: Effect of clay minerals on geotechnical properties: A case study of expansive soils. *Geotechnical Frontiers*, 13 (4), pp. 321–332, 2018.
8. Zhang, Q., Li, J., Chen, T.: Linking geochemistry to soil mechanics: Implications for infrastructure resilience. *Journal of Civil Engineering Research*, 9(2), pp. 150–168, 2021.
9. Kumar, A., Patel, D., Roy, S.: Geochemical analysis of soil for predicting permeability and compaction behavior. *Environmental Geotechnics*, 6(3), pp. 200–213, 2020.
10. Huang, Y., Zhang, P., Gao, M.: Challenges in geotechnical engineering on problematic soils: A geochemical perspective. *Advances in Geotechnical Engineering*, 19 (2), pp. 59–75, 2023.
11. Chen, Y., Liu, S., Fang, W.: Integrating geochemical and geotechnical studies for sustainable construction. *Green Civil Engineering Journal*, 15 (6), pp. 305–318, 2022.
12. Xu, X., Li, Z.: Application of XRF-derived geochemical data in soil stabilization. *Journal of Advanced Soil Studies*, 10(1), pp. 50–62, 2024.
13. Gao, R., Wu, Q., Deng, J.: Geochemical characterization of agricultural soils: Implications for sustainable soil management. *Agricultural Geosciences*, 4 (2), pp. 120–135, 2021.
14. Patel, D., Roy, S.: Enhancing soil stabilization using geochemically tailored additives. *Journal of Soil Engineering Advances*, 5 (2), pp. 130–145, 2019.
15. Latitude.to: Koordinate i nadmorska visina Benin Cityja. Preuzeto s <https://latitude.to>, 2024.
16. Climate-Data.org: Klima Benin Cityja, Nigerija. Preuzeto s <https://en.climate-data.org>, 2024.
17. World Weather Online: Godišnja količina padalina i temperatura Benin Cityja. Preuzeto s <https://www.worldweatheronline.com>

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva**DODATAK 1**

**MINISTARSTVO CESTA I MOSTOVA
LABORATORIJ ZA GRAĐEVINARSTVO
REZULTATI ISPITIVANJA UZORKA**

Zadatak: Istraživanje				DATUM: 17.05.2024.	
TEST: SPECIFIČNA TEŽINA					
Br.	STAVKA		SPECIFIČNA TEŽINA		
1	1A		2,55		
2	1E		2,54		
TEST: ANALIZA SIJANJEM					
Br.	STAVKA	Postotak prolaska veličine sita			AASHTO KLASIFIKACIJA
		1,18mm	0,425mm	0,075mm	
1	1A	91,65	50,3	17,1	A-2-4
2	1E	90,65	48,25	22,5	A-2-6
TEST: ZBIJANJE					
Br.	STAVKA	MDD(g/cm3)		OMC(%)	
1	1A	2,01		10	
2	1E	2,06		10	
TEST: ATTERBERGOVE GRANICE					
Br.	STAVKA	ISPITIVANJA ATTERBERGOVIH GRANICA			
		GT(%)	GP(%)	IP(%)	
1	1A	18,8	15,7	3,1	
2	1E	26	11,9	14,1	
TEST: KALIFORNIJSKI INDEKS NOSIVOSTI					
Br.	STAVKA	TLAK	SLOJ	NENATOPLJEN (US)	NATOPLJEN(S) CBR%

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva

			2,5mm	5,0mm	2,5mm	5,0mm	
1	1A	Dno	20,42	26,93	10,98	14,80	US-20,11
		Vrh	15,40	17,69	4,37	8,61	S-9,69
2	1E	Dno	6,02	8,57	3,60	5,95	US-6,38
		Vrh	4,13	6,81	1,24	2,15	S-3.24

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva**DODATAK 2****RESULTS OF ANALYSIS****Sample 01: 1A**

S/N	Basic Oxides	Formulae	% Composition
1	Silicon Oxide	SiO ₂	57.33
2	Aluminum Oxide	Al ₂ O ₃	15.23
3	Magnesium Oxide	MgO	7.02
4	Calcium Oxide	CaO	0.34
5	Iron Oxide	Fe ₂ O ₃	12.77
6	Potassium Oxide	K ₂ O	0.21
7	Sodium Oxide	Na ₂ O	0.54
8	Phosphorus Oxide	P ₂ O ₅	0.12
9	Titanium Oxide	TiO ₂	0.04
10	Manganese Oxide	MnO	1.27
11	Zinc Oxide	ZnO	0.06
12	Copper Oxide	CuO	0.04
13	Sulphide	SO ₃	0.01
14	Chromium Oxide	Cr ₂ O ₃	0.01
15	Loss of Ignition	LOI	5.01

Idiata, D., Kayode – Ojo, N., Okonofua, E.

Geokemijska karakterizacija tla pomoću XRF-a: Implikacije za geotehnička svojstva**Sample 02: 1E**

S/N	Basic Oxides	Formulae	% Composition
1	Silicon Oxide	SiO ₂	48.36
2	Aluminum Oxide	Al ₂ O ₃	5.03
3	Magnesium Oxide	MgO	1.66
4	Calcium Oxide	CaO	4.15
5	Iron Oxide	Fe ₂ O ₃	16.67
6	Potassium Oxide	K ₂ O	8.13
7	Sodium Oxide	Na ₂ O	5.21
8	Phosphorus Oxide	P ₂ O ₅	0.93
9	Titanium Oxide	TiO ₂	0.71
10	Manganese Oxide	MnO	1.05
11	Zinc Oxide	ZnO	2.19
12	Copper Oxide	CuO	0.36
13	Sulphide	SO ₃	0.19
14	Chromium Oxide	Cr ₂ O ₃	0.07
15	Loss of Ignition	LOI	5.29