

Primljen / Received: 27.7.2025.

Ispravljen / Corrected: 19.2.2026.

Prihvaćen / Accepted: 9.3.2026.

Dostupno online / Available online: 10.4.2026.

# Fizikalna i mehanička svojstva stabiliziranoga riječnog sedimenta: studija slučaja rijeke Begej u Srbiji

## Autori:



<sup>1</sup>Mr.sc. **Panta Krstić**, dipl.ing.građ.  
[panta.krstic@uns.ac.rs](mailto:panta.krstic@uns.ac.rs)



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Miloš Šešlija**, dipl.ing.građ.  
[sele@uns.ac.rs](mailto:sele@uns.ac.rs)  
Autor za korespondenciju



<sup>2</sup>Prof.dr.sc. **Dragana Tomašević Pilipović**, dipl.ing.kem.  
[dragana.tomasevic@dh.uns.ac.rs](mailto:dragana.tomasevic@dh.uns.ac.rs)



<sup>2</sup>Prof.dr.sc. **Đurđa Kerkez**, dipl.ing.kem.  
[djurdja.kerkez@dh.uns.ac.rs](mailto:djurđa.kerkez@dh.uns.ac.rs)



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Anka Starčev-Ćurčin**, dipl.ing.građ.  
[astarcev@uns.ac.rs](mailto:astarcev@uns.ac.rs)

<sup>1</sup>Sveučilište u Novom Sadu, Srbija  
Fakultet tehničkih znanosti

<sup>2</sup>Sveučilište u Novom Sadu, Srbija  
Prirodoslovno-matematički fakultet

Prethodno priopćenje

**Panta Krstić, Miloš Šešlija, Dragana Tomašević Pilipović, Đurđa Kerkez, Anka Starčev-Ćurčin**

## Fizikalna i mehanička svojstva stabiliziranoga riječnog sedimenta: studija slučaja rijeke Begej u Srbiji

Korištenje recikliranih i otpadnih materijala umjesto prirodnih agregata u graditeljstvu doprinosi očuvanju prirodnih resursa i smanjenju troškova gradnje. Riječni sediment dobiven jaružanjem jedan je takav materijal koji je, nakon odgovarajuće stabilizacije, potencijalno prikladan za primjenu u cestogradnji. U ovome radu analizirana su fizikalna i mehanička svojstva nestabiliziranih i hidraulički stabiliziranih sedimenata iz rijeke Begej u Republici Srbiji. Na temelju rezultata istraženih svojstava i njihove usporedbe s tehničkim kriterijima za cestogradnju Republike Srbije dokazana je prikladnost primjene nestabiliziranog sedimenta za izgradnju posteljice i nasipa. Nadalje, pojedine stabilizirane mješavine zadovoljile su zahtjeve tlačne čvrstoće nakon sedam dana za izvedbu stabilizirane posteljice i stabiliziranih donjih nosivih slojeva cesta niže kategorije.

### Ključne riječi:

riječni sediment, stabilizacija, cestogradnja, gospodarenje otpadom

Research Paper

**Panta Krstić, Miloš Šešlija, Dragana Tomašević Pilipović, Đurđa Kerkez, Anka Starčev-Ćurčin**

## Physical and mechanical properties of stabilised river sediment: case study of the Begej river in Serbia

Using recycled and waste materials in construction instead of natural aggregates contributes to the conservation of natural resources and reduction of construction costs. River sediment obtained via dredging represents one such material which, following appropriate stabilisation, is likely suitable for road construction applications. This study analysed the physical and mechanical properties of both unstabilised and hydraulically stabilised sediments sourced from the Begej River in the Republic of Serbia. Based on the evaluation of the measured properties and their comparison with technical criteria for road construction of Republic of Serbia, the results indicated that unstabilised sediment is suitable for subgrade and embankment construction. Furthermore, specific stabilised mixtures met the 7-day compressive strength requirements for application as stabilised subgrades and stabilised subbase layers in lower-category roads.

### Key words:

river sediment, stabilization, road construction, waste management

## 1. Uvod

Riječni sediment nastaje akumulacijom i taloženjem čestica raspadnutih stijena ili tla na dnu vodotoka. Dodatni procesi, uključujući razgradnju i taloženje organske tvari iz flore i faune te ispuštanje industrijskih i komunalnih otpadnih voda, dodatno utječu na formiranje sedimenta u vodenim okolišima. Kao rezultat toga, istaloženi sediment može imati znatne udjele organske tvari, teških metala i drugih onečišćivača. Sediment iskopan jaružanjem obično se sastoji od mješavine čvrstih čestica, organskih i anorganskih sastojaka, teških metala, različitih kontaminanata te znatne količine međuprostorne vode [1-4]. S geotehničkog aspekta, sediment se pretežno sastoji od sitnozrnatih frakcija, najčešće kao mješavina gline, pijeska i praha. Taj se materijal također često odlikuje visokim porozitetom, velikom stišljivošću te niskom čvrstoćom i nosivošću [5-7]. Zato je izravna primjena tog materijala bez kemijske stabilizacije u građevinarstvu vrlo ograničena [8, 9]. Sedimenti su vrlo heterogeni materijali čija svojstva znatno variraju ovisno o geologiji sliva, hidrološkome režimu, načinu korištenja zemljišta i antropogenim utjecajima. Granulometrijski sastav, mineraloški sastav i udio organske tvari znatno ovise o litologiji uzvodnog područja, procesima erozije tla i dinamici riječnog toka, dok koncentracija onečišćivača (npr. teških metala, natrijenata, mikroplastike i ugljikovodika) ovisi o industrijskim aktivnostima, poljoprivredi i urbanim otpadnim vodama. Zbog toga se ponašanje sedimenta znatno razlikuje među regijama. Neki nanosi imaju pretežno pjeskovita ili praškasta svojstva, s relativno niskim udjelom kontaminanata, dok drugi imaju veći udio gline, organske tvari ili opasnih tvari koje utječu na plastičnost, stišljivost i okolišni rizik. Te razlike izravno utječu na mogućnost ponovne uporabe i na potrebnu vrstu stabilizacijskog postupka.

Gospodarenje jaružanim morskim i riječnim sedimentima globalni je izazov. Podaci iz 2023. pokazuju da godišnji opseg jaružanja u Europi iznosi približno 160 milijuna tona, što je znatan porast u posljednja dva desetljeća [10, 11]. U mnogim zapadnoeuropskim zemljama sve se češće daje prednost korisnoj ponovnoj uporabi poput nasipavanja terena, primjene u građevinarstvu i obnove staništa u sklopu kružnoga gospodarstva. Nasuprot tome, neke se zemlje i dalje uglavnom oslanjaju na odlaganje ili privremeno skladištenje, kao u slučaju sedimenta rijeke Begej, zbog regulatornih, ekonomskih ili tehničkih ograničenja. U drugim regijama primjenjuju se metode obrade poput ispiranja, termalne desorpcije ili solidifikacije-stabilizacije prije ponovne uporabe. Globalna varijabilnost svojstava sedimenta i pristupa gospodarenju naglašava potrebu za lokalno specifičnim analizama radi procjene održivosti i prikladnosti njihove primjene u graditeljstvu. U Sjedinjenim Američkim Državama godišnje se iz plovnih puteva jaružanjem iskopa oko 200 milijuna kubnih jardi ( $\approx 153$  milijuna  $m^3$ ), od čega se približno 30 – 35 % koristi na održiv način, s okolišnim i društvenim koristima [12]. U Republici Srbiji opsezi jaružanja iznose između 300,000 i 600,000  $m^3$  na godinu, uglavnom

unutar hidrosustava Dunav – Tisa – Dunav (DTD) u Autonomnoj Pokrajini Vojvodini. Materijal se većinom odlaže na privremenim odlagalištima, a procjenjuje se da bi u budućnosti količine mogle dosegnuti oko milijun kubnih metara na godinu [2, 13].

Konvencionalni postupci gospodarenja sedimentom uključuju iskop, prijevoz, eventualnu obradu i odlaganje na odlagališta, što može biti problematično zbog visokih troškova prijevoza i zauzimanja prostora [7, 14]. Štoviše, odlaganje može imati i do deset puta veći negativni utjecaj na okoliš nego u slučaju da mjere uklanjanja sedimenta uopće nisu primijenjene [15]. Zato je neophodno razvijati alternativne strategije koje daju prednost korisnoj ponovnoj uporabi. Takav pristup u skladu je s načelima kružnoga gospodarstva poput ponovne uporabe, obnove, dijeljenja i recikliranja, kojima se produljuje životni ciklus materijala [16].

Brojna istraživanja pokazuju da kemijska stabilizacija sedimenta iskopanog jaružanjem može rezultirati materijalima fizikalnih i mehaničkih svojstava odgovarajućih za primjenu u posteljici i nasipima cesta. Kemijska stabilizacija podrazumijeva miješanje dodataka (veziva) s tlom u određenim omjerima, čime se pokreću kemijske reakcije između mineralnih sastojaka tla i veziva. Te reakcije dovode do očvršćivanja materijala cementacijom i stvaranjem proizvoda hidratacije. Općenito, stabilizacija povećava čvrstoću, smanjuje poroznost i osjetljivost na vlagu, smanjuje plastičnost i povećava otpornost na smrzavanje. Kao najčešća veziva koriste se živo vapno, hidratizirano vapno, portlandski cement, leteći pepeo i njihove kombinacije [9, 17-21]. Pregled literature pokazuje dominantnu primjenu cementa ili kombinacije cementa i letećeg pepela zbog brzog razvoja čvrstoće i dobrih svojstava, posebno kod prašinstih i niskoplastičnih materijala [22].

Za procjenu prikladnosti primjene sedimenta u cestogradnji analiziraju se ključni parametri: maksimalna suha gustoća (MDD) pri optimalnome udjelu vode ( $W_{opt}$ ), jednoosna tlačna čvrstoća (UCS), indeks nosivosti CBR i neizravna vlačna čvrstoća (ITS). Ti su parametri široko istraživani na stabiliziranim sedimentima iz luke Dunkerque u Francuskoj [3, 23]. Wang i dr. [3] analizirali su te parametre za nestabilizirana tla i sedimentom stabilizirana tla korištenjem hidrauličkog veziva i letećeg pepela. Almokdad i Zentar [23] istražili su primjenu recikliranih i sirovih sedimenata stabiliziranih sa 6 % portlandskog cementa (u odnosu na suhu masu), potvrđujući prikladnost primjene za kvalitetne slojeve kolnika. Dodatne studije provedene u Tajlandu analizirale su iskopani sediment stabiliziran cementom, letećim pepelom i njihovim kombinacijama te utjecaj stabilizacije na razvoj različitih mehaničkih svojstava materijala [5, 6, 8, 24]. U pojedinim radovima [5, 8] rezultati istraživanja pokazali su maksimalni razvoj čvrstoće za mješavine cementa i letećeg pepela, dok je stabilizirani materijal zadovoljio referentne kriterije za primjenu u posteljici i, u nekim slučajevima, u nosivim slojevima kolničke konstrukcije.

U ovome radu istražena su fizikalna i mehanička svojstva sedimenta prikupljenog s lokalnog odlagališta nastalog čišćenjem korita rijeke Begeja u Zrenjaninu. Nakon određivanja

svojstava provedena je stabilizacija hidrauličkim vezivima BeoBond (BB) i BeoSol (BS), proizvodima tvrtke *Lafarge*, u skladu s relevantnim standardima. Planirana ispitivanja za procjenu mehaničkih svojstava obuhvatila su određivanje maksimalne suhe gustoće (MDD) pri optimalnoj vlažnosti ( $W_{opt}$ ) provedbom standardnoga Proctorova pokusa i indeksa nosivosti CBR za sve uzorke te tlačnu (UCS) i neizravnu vlačnu čvrstoću (ITS) za uzorke stabiliziranog sedimenta. Rezultati su uspoređeni s važećim tehničkim propisima Republike Srbije za primjenu materijala u slojevima kolničkih konstrukcija.

## 2. Materijali

Sediment je prikupljen s lokalnog odlagališta otpada u blizini rijeke Begej u Zrenjaninu. Odlagalište je nastalo 2021. tijekom čišćenja riječnoga korita u duljini od 780 m radi obnove plovnosti. Lokacija odlagališta i satelitska snimka mjesta uzorkovanja prikazani su na slici 1. Odlagalište se sastoji od materijala odloženog tijekom iskopa jaružanjem, a radi se o relativno homogenome materijalu. Materijal je vađen hidrauličkim bagerima, prevezen brodovima, a potom kamionima do lokacije odlaganja, na unaprijed pripremljene kasete smještene otprilike dva kilometra nizvodno.

Uzorkovanje materijala za studiju provedeno je u fazama tijekom 2024., paralelno s eksperimentalnim programom. Kako bi se osigurala bolja reprezentativnost, materijal je prikupljen s četiriju različitih lokacija unutar odlagališta i izmiješan radi postizanja dodatne homogenosti. Tijekom uzorkovanja materijal

je pokazivao svojstva suhog, muljevito-pjeskovita tla smeđe boje. Uzorci su pohranjeni u plastične vrećice kako bi se tijekom prijevoza očuvali njihov prirodni udio vlage i druga svojstva.

Fizikalna svojstva materijala određena su standardnim metodama, uključujući raspodjelu veličine čestica, gustoću u rasutome stanju, prirodni udio vlage, gustoću čestica tla, udio organske tvari, Atterbergove granice konzistencije te klasifikaciju tla prema Jedinstvenome sustavu klasifikacije tla (USCS) i klasifikaciji Američkog udruženja državnih službenika za autoceste i promet (AASHTO). Rezultati fizikalnih svojstava materijala, zajedno s primijenjenim normama za njihovo određivanje, prikazani su u tablici 1.

Veziva BeoBond (BB) i BeoSol (BS) korištena su za stabilizaciju u udjelima od 3, 5, 7 i 9 % u odnosu na suhu masu uzorka. Doziranje veziva odabrano je radi postizanja praktične primjenjivosti rezultata. S obzirom na komercijalnu dostupnost veziva i predviđenu primjenu stabiliziranog sedimenta u opsežnim zemljanim radovima u cestogradnji, kao maksimalni udio veziva odbran je udio od 9 % u odnosu na suhu masu materijala. Iako je u literaturi zabilježena stabilizacija s višim postocima veziva, takav pristup može ugroziti poboljšanja geotehničkih svojstava materijala te ekonomsku i ekološku održivost postupka. Zbog komercijalnih ograničenja detaljan kemijski sastav hidrauličkih veziva nije prikazan u ovome radu. Prema dostupnim informacijama, BS se proizvodi kao konvencionalno hidrauličko vezivo na bazi klinkera portlandskog cementa (oko 45 %) uz dodatak do 15 % letećeg pepela. Preostali dio BS veziva čini mješavina zgure, gipsa i vapnenca. BB vezivo sastoji se od približno 35 % cementnog klinkera, 20 % letećeg pepela i 20 % živog vapna (CaO), izraženo u odnosu na suhu masu veziva. Kao i kod BS veziva, preostali dio sastava čini mješavina zgure, gipsa i vapnenca. Oba veziva komercijalno su dostupna i aktivno se koriste za stabilizaciju odnosno poboljšanje tla metodom hladne reciklaže [25].

Granulometrijski sastav određen je prosijavanjem pomoću seta sita u skladu sa standardom SRPS EN ISO 17892-4:2017 [26]. Za određivanje veličine čestica manjih od 0,063 mm primijenjena je hidrometrijska metoda. Konačna krivulja granulometrijskog sastava dobivena je kao srednja vrijednost rezultata prosijavanja provedenih na četirima uzorcima sedimenta. Granulometrijski sastav nestabiliziranog sedimenta prikazan je na slici 2.

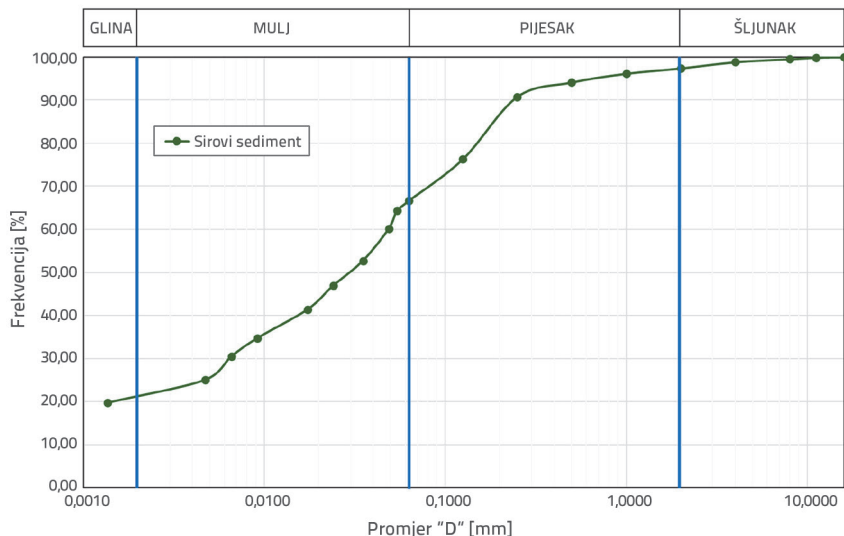
Izmjereni prirodni udio vlage i zapreminska gustoća materijala iznosili su 2,12 % i 1,42 Mg/m<sup>3</sup>. Udio organske tvari određen je metodom gubitka žarenjem pri 700 °C, pri čemu je



Slika 1. Lokacija odlagališta sedimenta na karti Srbije (lijevo) i satelitska snimka područja uzorkovanja (desno)

Tablica 1. Fizikalna svojstva nestabiliziranog materijala iskopanog jaružanjem

Fizičko svojstvo	Vrijednost	Norma
Prirodna vlažnost [%]	2,12	SRPS EN ISO 17892-1:2015 [27]
Gustoća nasipnog materijala [Mg/m <sup>3</sup> ]	1,42	SRPS EN ISO 17892-2:2015 [28]
Gustoća čestica [g/cm <sup>3</sup> ]	2,67	SRPS EN ISO 17892-3:2016 [29]
Granica tečenja [%]	26,91	SRPS EN ISO 17892-12:2018 [30]
Granica plastičnosti [%]	16,88	
Indeks plastičnosti [%]	10,03	
Udio organske tvari [%]	2,48	SRPS U.B1.024:1968 [31]
Klasifikacija tla (USCS)	CL	ASTM D2487 [32]
Klasifikacija tla (AASHTO)	A-6	AASHTO M145 [33]



Slika 2. Granulometrijski sastav nestabiliziranoga iskopanog materijala

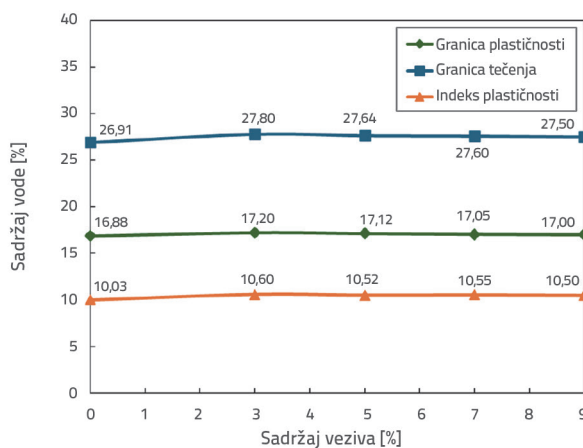
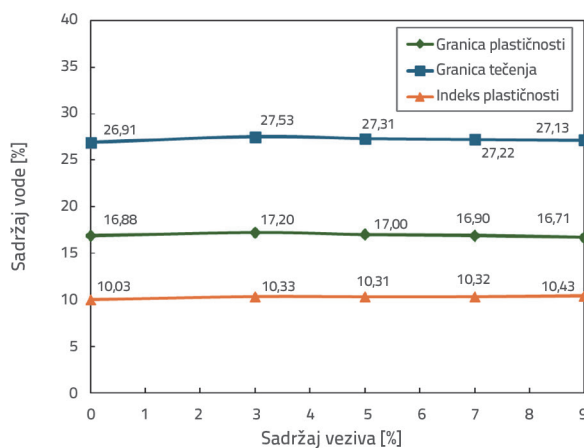
utvrđen relativno nizak udio organske tvari od 2,48 %. Gustoća čestica određena je piknometarskom metodom, s izmjerenom vrijednošću od 2,67 g/cm<sup>3</sup>, što odgovara tipičnim vrijednostima za glinovita tla [34].

Atterbergove granice konzistencije određene su u skladu sa standardom SRPS EN ISO 17892-12:2018 [30], koji propisuje Casagrandeovu metodu za određivanje granice tečenja te metodu valjanja za određivanje granice plastičnosti, pri kojoj se uzorci tla valjaju u niti promjera 3 mm do pojave vidljivih pukotina. Na temelju dobivenih granica konzistencije utvrđen je indeks plastičnosti od 10,03 %. Prema Burmisterovoj klasifikaciji tla na temelju plastičnosti (navedeno u [35]), dobiveni indeks plastičnosti upućuje na tlo na granici između vrlo niske i niske plastičnosti. Usporedba izmjerenih granica konzistencije s klasifikacijskim pragovima za koherentna tla prema Dahmsu i Fritzu (navedeno u [35]) potvrdila je da ispitani materijal odgovara glinovitome tlu s niskim stupnjem plastičnosti. Klasifikacija tla prema USCS sustavu, u skladu s ASTM D2487 [32], potvrđena je

kako je prethodno navedeno. Na temelju svojih fizikalnih svojstava, materijal je klasificiran kao slabo plastična glina (CL). Prema standardu AASHTO M145 [33], materijal pripada skupini A-6 (glinovito tlo s niskom do umjerenom plastičnošću). Promjene u granicama konzistencije, ovisno o vrsti i udjelu primijenjenog veziva, prikazane su na slici 3. Usporedba dobivenih vrijednosti pokazuje da dodatak veziva ne utječe znatno ni na plastičnost materijala ni na granice konzistencije. Ograničeno povećanje indeksa plastičnosti uočeno je pri početnome dodatku veziva u udjelu od 3 % u odnosu na suhu masu. Međutim, daljnje povećanje udjela veziva nije rezultiralo znatnim promjenama plastičnosti. Takvo ponašanje pripisuje se manjemu udjelu glinene frakcije u sedimentu te nižemu udjelu minerala montmorilonita u glini, koji je obično odgovoran za kationsku izmjenu između čestica tla i veziva [22, 36]. Slični rezultati zabilježeni su u istraživanju koje su proveli Nguyen i sur. [20], gdje je utvrđeno da obrada sedimenta portlandskim cementom ne uzrokuje znatne promjene u plastičnosti materijala.

### 3. Metodologija

Laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava provedena su na nizu nestabiliziranih uzoraka i uzoraka pojedinačno stabiliziranih vezivima BS i BB. Nestabilizirani uzorci sedimenta (mješavina S.0) pripremljeni su radi određivanja maksimalne suhe gustoće (MDD) pri optimalnome udjelu vode ( $W_{opt}$ ) i indeksa nosivosti CBR. Za stabilizirane uzorke, uz određivanje MDD i indeksa nosivosti CBR, provedena su laboratorijska ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) nakon 7 i 28 dana te neizravne vlačne čvrstoće (ITS) nakon 28 dana. Popis mješavina s primijenjenim udjelima



Slika 3. Granice konzistencije za uzorke stabilizirane hidrauličkim vezivom BS (lijevo) i BB (desno)

veziva prikazan je u tablici 2. Za ispitivanje pripravljeno je devet mješavina koje su obuhvatile ukupno 117 uzoraka. Uzorci su pripremljeni ručnim miješanjem sedimenta s vezivom prema unaprijed definiranim omjerima.

Tablica 2. Sastav mješavina za pripremu uzoraka

Simbol mješavine	BS [%]	BB [%]
S.0	-	-
BS.3	3	-
BS.5	5	-
BS.7	7	-
BS.9	9	-
BB.3	-	3
BB.5	-	5
BB.7	-	7
BB.9	-	9

Maksimalna suha gustoća MDD-a pri optimalnoj vlažnosti  $W_{opt}$  određena je korištenjem cilindričnih uzoraka promjera 100 mm i visine 120 mm u skladu s normom SRBS EN 13286-2:2012 [37]. Uzorci su pripremljeni s četirima različitim udjelima vlage, a primijenjena je energija zbijanja od 600 kN/m<sup>3</sup> (standardni Proctorov pokus). Materijal je dinamički zbijen u cilindričnome kalupu u tri sloja, s 25 udaraca po sloju pomoću standardnog nabijača. Uzorci su potom istiskivani iz kalupa, a vrijednost MDD određena je prema standardnome postupku na temelju udjela vlage, mase uzorka s kalupom i mase kalupa. Za Proctorov pokus pripravljeno je trideset i šest uzoraka.

Tlačna čvrstoća (UCS) i neizravna vlačna čvrstoća (ITS) osnovna su ispitivanja za procjenu čvrstoće stabiliziranih materijala [38]. Za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) nakon 7 i 28 dana te neizravne vlačne čvrstoće (ITS) nakon 28 dana pripravljena su ukupno 72 cilindrična uzorka promjera 100 mm i visine 120 mm, u skladu sa standardima SRPS EN ISO 17892-7:2018 [39] i SRPS EN 13286-42:2012 [40]. Tijekom pripreme uzoraka dodavana je voda u udjelu koji odgovara optimalnome udjelu vlage ( $W_{opt}$ ) kako bi se postigla maksimalna zbijenost prema standardnome Proctorovu postupku. Uzorci su zatim pohranjeni u plastične vreće radi očuvanja vlage na temperaturi od  $20 \pm 2$  °C tijekom 7 odnosno 28 dana, ovisno o planu ispitivanja.

Ispitivanje tlačne čvrstoće (UCS) provedeno je standardnom hidrauličkom prešom, pri čemu je zabilježeno maksimalno opterećenje pri lomu uzorka.

Uređaj korišten za laboratorijsko ispitivanje tlačne čvrstoće (UCS) prikazan je na slici 4. Ista hidraulička preša korištena je i za određivanje neizravne vlačne čvrstoće (ITS), pri čemu su uzorci postavljeni u horizontalni položaj, a između uzorka i ploče za prijenos opterećenja postavljena je metalna polucilindrična traka za opterećenje. Zabilježeno je maksimalno opterećenje pri lomu uzorka, a vrijednost ITS-a određena je pomoću sljedećeg izraza [40]:

$$ITS = \frac{2F}{\pi DH} \quad (1)$$

gdje je ITS neizravna vlačna čvrstoća [MPa], F sila loma [N], D promjer uzorka [mm], a H visina uzorka [mm].

Dobivene vrijednosti čvrstoća UCS i ITS prosječni su rezultati na temelju ispitivanja triju uzoraka.

Indeks nosivosti CBR osnovni je pokazatelj nosivosti za donje nosive slojeve kolničke konstrukcije i posteljicu. Određuje se penetracijskim ispitivanjem, tijekom kojeg se bilježi sila pri prodiranju klipa u uzorak tla na dubinama od 2,54 mm i 5,08 mm, u skladu sa standardom SRPS EN 13286-47:2022 [41]. Dobivene vrijednosti naprezanja dijele se s referentnim vrijednostima propisanim standardom. U pravilu se, kao mjerodavna vrijednost, uzima veća CBR vrijednost, najčešće pri penetraciji od 2,54 mm. Međutim, nakon ponovljenog ispitivanja u ovom je slučaju veća vrijednost dobivena pri penetraciji od 5,08 mm te je ona usvojena kao referentna.

Za CBR ispitivanje pripravljeno je osam uzoraka stabiliziranog sedimenta s različitim udjelima veziva i jedan uzorak



Slika 4. Uzorci stabilizirani sa 7 % BB veziva prije (lijevo), tijekom (sredina) i nakon (desno) ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 7 dana njege



Slika 5. Laboratorijsko ispitivanje ITS (lijevo) i CBR indeksa s određivanjem linearnog bubrenja (sredina i desno)

nestabiliziranog sedimenta. Uzorci su izrađeni u cilindričnim kalupima promjera 200 mm i visine 212 mm. Količina dodane vode odgovarala je optimalnome udjelu vlage ( $W_{opt}$ ), prethodno određenog Proctorovim pokusom za stabilizirane i nestabilizirane uzorke. Kalupi s uzorcima i opterećenjem bili su potopljeni u vodi 96 sati, pri čemu je praćeno linearno bubrenje uzoraka kako bi se procijenilo ponašanje materijala u uvjetima zasićenja vodom. Zabilježene vrijednosti linearnog bubrenja za sve uzorke kretale su se od 0,03 do 0,12 %, što upućuje na vrlo nisku osjetljivost materijala na bubrenje (manju od 1,5 %) i njegovu prikladnost za primjenu u kolničkim konstrukcijama, prema Seed i sur. [42]. Na slici 5. prikazana su laboratorijska ispitivanja provedena za određivanje neizravne vlačne čvrstoće (ITS) i indeksa nosivosti CBR.

## 4. Rezultati i rasprava

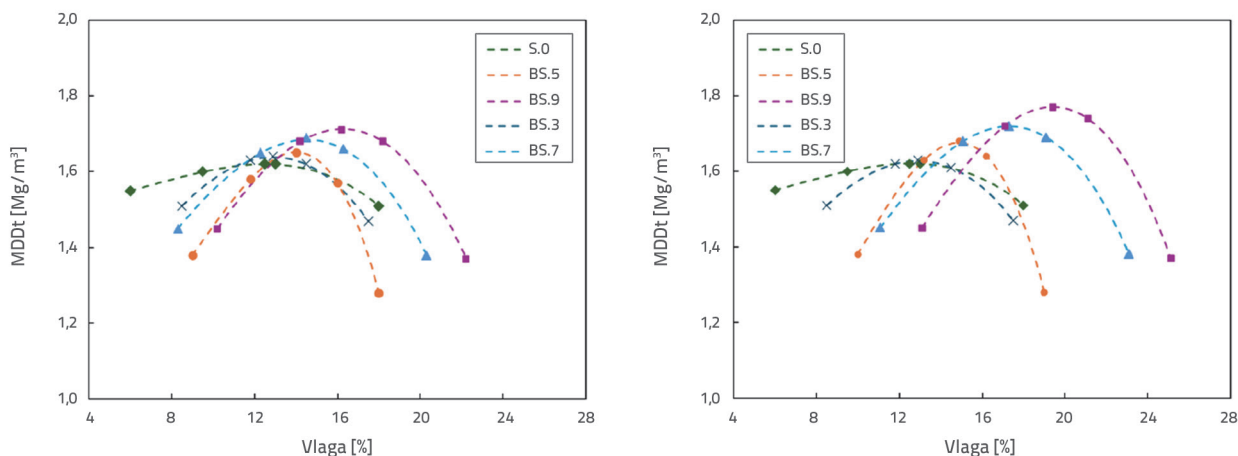
### 4.1. Svojstva zbijanja

Vrijednosti maksimalne suhe gustoće (MDD) i optimalnog udjela vlage ( $W_{opt}$ ), određene iz Proctorovih krivulja zbijanja za nestabilizirane i stabilizirane mješavine (slika 6.), sažete su u tablici 3. Općenito, vrijednost maksimalne suhe gustoće (MDD)

za sve mješavine kretala se u rasponu od 1,62 do 1,77  $Mg/m^3$ , dok je optimalna vlažnost  $W_{opt}$  varirala od 12,50 do 19,40 %. Za nestabilizirani sediment zabilježena je vrijednost MDD od 1,62  $Mg/m^3$  i  $W_{opt}$  od 12,50 %.

Dodatak veziva BS u udjelima od 3, 5, 7 i 9 % (u odnosu na suhu masu uzorka) rezultirao je povećanjem i maksimalne suhe gustoće MDD i optimalne vlažnosti  $W_{opt}$ . Najviša zabilježena vrijednost MDD iznosila je 1,71  $Mg/m^3$  pri  $W_{opt}$  od 16,20 % za sediment stabiliziran s 9 % BS veziva. Proctorove krivulje prikazane na slici 6. pokazuju pomak krivulje zbijanja udesno, što upućuje na povećanu potrebu za vodom kako bi se postigla maksimalna zbijenost. Ta pojava vjerojatno je posljedica kontinuiranog procesa hidratacije cementa, koji zahtijeva veći omjer vode i cementa pri većemu udjelu cementa. Slične trendove zabilježili su Wang i sur. [9], Nguyen i sur. [20] te Chompoorat i sur. [43]. Povećanje maksimalne suhe gustoće MDD pri dodatku cementa u skladu je s rezultatima istraživanja Nguyena i sur., koji su tu pojavu objasnili većom specifičnom gustoćom cementa u usporedbi s čistim sedimentom [20].

Slično ponašanje materijala zabilježeno je i za mješavine stabilizirane vezivom BB. Veće povećanje suhe gustoće MDD i optimalne vlažnosti  $W_{opt}$  uočeno je pri većim udjelima veziva (5, 7 i 9 %) u odnosu na mješavine stabilizirane BS vezivom. Dodatno



Slika 6. Krivulje zbijanja za sedimente stabilizirane BS vezivom (lijevo) i BB vezivom (desno)

Tablica 3. Vrijednosti MDD i  $W_{opt}$  dobivene iz ispitivanja zbijanja

Simbol mješavine	BS [%]	BB [%]	$W_{opt}$ [%]	MDD [ $Mg/m^3$ ]
S.0	-	-	12,50	1,62
BS.3	3	-	12,90	1,64
BS.5	5	-	14,00	1,65
BS.7	7	-	14,50	1,69
BS.9	9	-	16,20	1,71
BB.3	-	3	12,90	1,63
BB.5	-	5	14,90	1,68
BB.7	-	7	17,30	1,72
BB.9	-	9	19,40	1,77

povećanje vrijednosti  $W_{opt}$  pripisuje se kemijskome sastavu BB veziva, odnosno potrebi za dodatnom količinom vode tijekom hidratacije CaO [20, 43]. Rai i sur. zabilježili su povećanje suhe gustoće MDD uz djelomično smanjenje  $W_{opt}$  pri povećanju udjela letećeg pepela i cementa kao veziva u stabilizaciji prašinstog tla [44]. Promatrajući sve mješavine, najveća vrijednost suhe gustoće MDD od 1,77 Mg/m<sup>3</sup> zabilježena je kod uzoraka stabiliziranih s 9 % BB veziva u odnosu na suhu masu uzorka.

## 4.2. Tlačna čvrstoća

Nakon dodavanja hidrauličkog veziva radi stabilizacije i postizanja optimalnog udjela vlage sedimentnog materijala čvrstoća se razvija primarno dvjema osnovnim kemijskim reakcijama: hidratacijom cementa (2) i pucolanskom reakcijom (3) [6, 8]. Prije tih procesa dolazi do hidratacije CaO tijekom miješanja materijala, veziva i vode. Ta reakcija rezultira stvaranjem kalcijeva hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>), koji reagira sa silicijskim i aluminijskim mineralima u sedimentu, pridonoseći trenutnome smanjenju plastičnosti materijala zbog dislokacije Ca<sup>+</sup> i OH<sup>-</sup> iona te naknadne pucolanske reakcije [22].



Povećanje čvrstoće tijekom stabilizacije sedimenta očekuje se zbog formiranja gušće strukture sedimenta i međučestičnog vezivanja prouzročenog dodatkom veziva.

Kad se primjenjuje vezivo na bazi cementa, dolazi do kemijske reakcije hidratacije između kalcijevih silikata (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S) i kalcijevih aluminata (C<sub>3</sub>A) u klinkeru, što dovodi do stvaranja cementne paste, odnosno kalcijevo-silikatnih hidrata (C-S-H) i kalcijevo-aluminatnih hidrata (C-A-H). C-S-H gel upravlja brzim razvojem čvrstoće i daje materijalu cementna svojstva. Određena količina slobodnog Ca(OH)<sub>2</sub> nastaje kao sekundarni proizvod te reakcije te sudjeluje u dugoročnim pucolanskim reakcijama sa SiO<sub>2</sub> iz

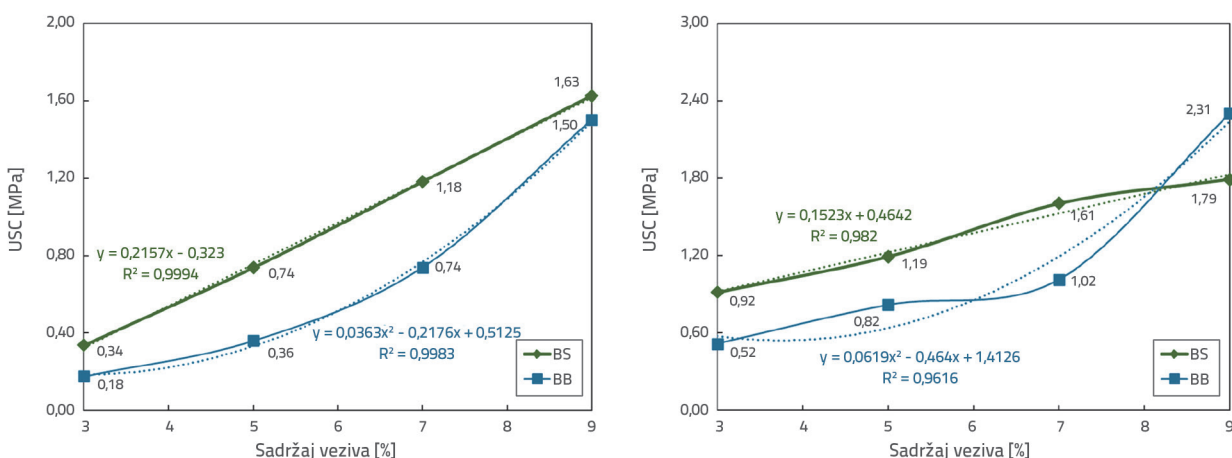
sedimenta ili dodataka (npr. leteći pepeo), što rezultira dodatnim povećanjem čvrstoće zbog daljnjeg stvaranja C-S-H gela. C-S-H gel nastao hidratacijom doprinosi kratkoročnome razvoju čvrstoće (7, 14 i 28 dana), dok C-S-H gel nastao pucolanskim reakcijama doprinosi dugoročnome razvoju čvrstoće (60 i 120 dana) [5, 6, 8, 22].

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za stabilizirane uzorke, provedeni nakon 7 i 28 dana njege, prikazani su na slici 7. Ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) nisu provedena na nestabiliziranim uzorcima zbog njihova raspadanja pod opterećenjem, što upućuje na nedostatak koherentne strukture prikladne za ispitivanje.

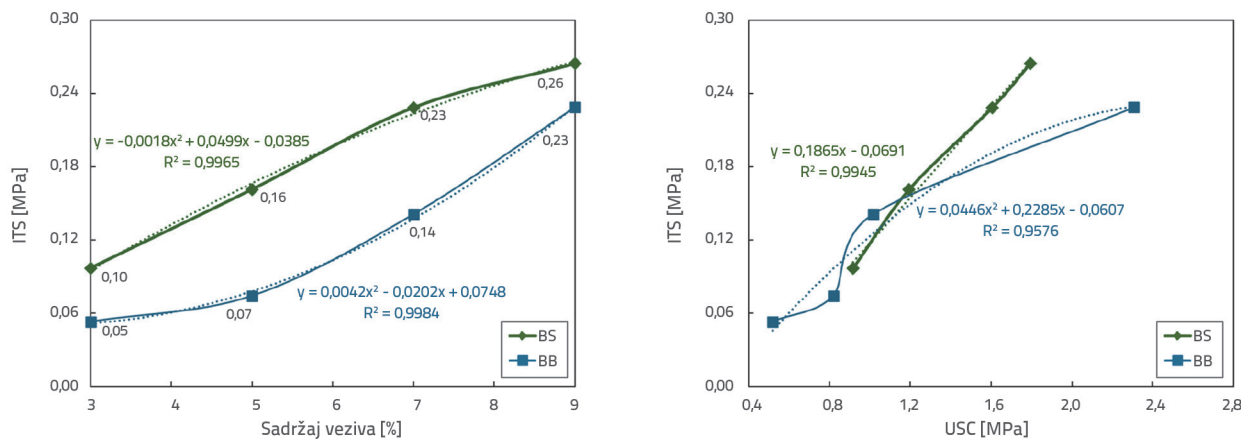
Dobivene vrijednosti upućuju na porast jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) tijekom vremena. Nakon 7 dana njege najveća čvrstoća zabilježena je kod uzoraka stabiliziranih s 9 % BS veziva (1,63 MPa), zatim kod uzoraka stabiliziranih s 9 % BB veziva (1,50 MPa). Najniže vrijednosti čvrstoće nakon 7 dana zabilježene su kod uzoraka stabiliziranih s 3 % BB i BS veziva, i to 0,18 odnosno 0,34 MPa. Očekivano, s povećanjem udjela veziva dolazi do povećanja tlačne čvrstoće UCS.

Izrazit porast čvrstoće uočen je pri povećanju udjela BB veziva s 5 % na 9 % (u odnosu na suhu masu). Konkretno, tlačna čvrstoća UCS nakon 7 dana povećala se za približno 105 % s povećanjem udjela BB veziva s 5 % na 7 % te za dodatnih približno 103 % pri povećanju sa 7 % na 9 %. Razvoj čvrstoće s porastom udjela BB veziva opisan je kvadratnom funkcijom, kao što je to prikazano na slici 7. Za razliku od BB veziva, BS vezivo pokazalo je gotovo linearan porast čvrstoće s povećanjem udjela veziva.

Nakon 28 dana njege najveća vrijednost tlačne čvrstoće zabilježena je kod uzoraka stabiliziranih s 9 % BB veziva, a zatim kod onih stabiliziranih s 9 % BS veziva. Slični trendovi rasta čvrstoće uočeni su i s povećanjem udjela veziva. Najveći porast zabilježen je pri usporedbi uzoraka stabiliziranih sa 7 % i 9 % BB veziva, gdje se čvrstoća povećala za približno 127 %. Usporedbom rezultata nakon 7 i 28 dana njege uočen je porast čvrstoće, osobito kod primjene BB veziva. Kod primjene 9 % BB veziva (u odnosu na suhu masu), zabilježen je porast čvrstoće od 54 % zbog duljeg vremena njege (28 dana u odnosu na 7 dana).



Slika 7. Tlačna čvrstoća (UCS) stabiliziranih uzoraka nakon 7 dana njege (lijevo) i 28 dana njege (desno)



Slika 8. Neizravna vlačna čvrstoća (ITS) stabiliziranih sedimenata nakon 28 dana njege (lijevo) i korelacija čvrstoća ITS-UCS nakon 28 dana (desno)

Ta pojava pripisuje se sastavu veziva; BB vezivo, uz cementni klinker, ima veće udjele letećeg pepela i CaO, koji potiču razvoj čvrstoće pucolanskom reakcijom [6, 45]. Brojna istraživanja potvrdila su pretpostavku da se veće čvrstoće mogu postići kombinacijom cementa i letećeg pepela pri optimalnim dozama [5, 6, 8, 24, 46]. U slučaju BS veziva, porast čvrstoće tijekom duljeg vremena njege bio je znatno manji, a razlike između čvrstoća nakon 7 i 28 dana smanjivale su se s povećanjem udjela veziva.

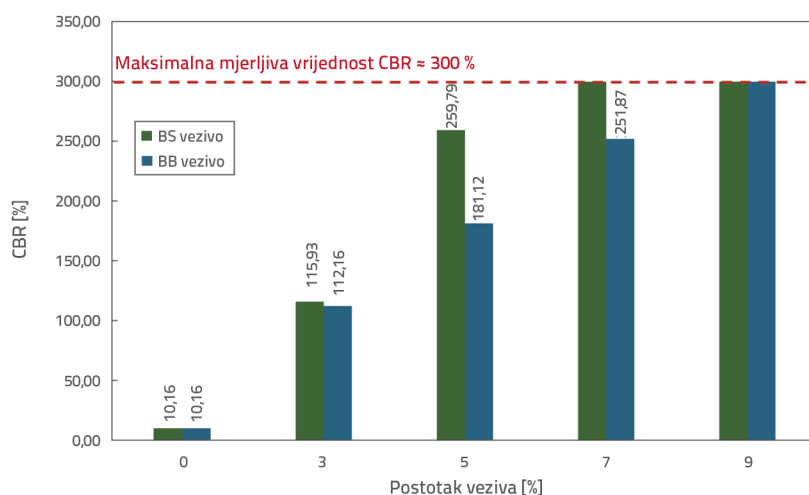
### 4.3. Neizravna vlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće (ITS) za stabilizirane uzorke nakon 28 dana prikazani su na slici 8. Rezultati upućuju na znatno povećanje neizravne vlačne čvrstoće ITS s porastom udjela veziva. Nekoliko studija također je zabilježilo znatno povećanje ITS-a pri stabilizaciji sedimenata [6, 8, 23]. Veće čvrstoće postignute su primjenom veziva BS, pri čemu su vrijednosti vlačne čvrstoće bile u rasponu od 0,1 do 0,26 MPa za primijenjene udjele veziva od 3, 5, 7 i 9 % (u odnosu na suhu masu). U slučaju mješavina stabiliziranih vezivom BB, vlačne čvrstoće kretale su se između 0,05 i 0,23 MPa za iste udjele veziva. Porast neizravne vlačne čvrstoće (ITS) s povećanjem udjela BS veziva bio je izraženiji pri povećanju udjela veziva s 3 na 7 %, dok je bio znatno umjereniji pri povećanju udjela sa 7 na 9 % (u odnosu na suhu masu). Kod mješavina stabiliziranih vezivom BB uočen je umjeren porast vrijednosti neizravne vlačne čvrstoće (ITS) pri povećanju udjela veziva s 3 na 5 %, dok je porast vrijednosti ITS-a bio izraženiji pri povećanju udjela veziva s 5 na 9 %. Razlika u vrijednosti ITS-u između mješavina stabiliziranih s 9 % BS i 9 % BB veziva bila je zanemariva te je iznosila približno 13 %.

Odnos između jednoosne tlačne čvrstoće (UCS, nakon 28 dana) i neizravne vlačne čvrstoće (ITS) za mješavine stabilizirane vezivima BS i BB prikazan je na slici 8. Neizravna vlačna čvrstoća ITS linearno se povećavala s porastom tlačne čvrstoće UCS pri primjeni BS veziva, dok se pri primjeni BB veziva vrijednost ITS povećavala kao kvadratna funkcija porasta tlačne čvrstoće UCS.

### 4.4. Kalifornijski indeks nosivosti (CBR)

Rezultati ispitivanja indeksa nosivosti CBR na stabiliziranim i nestabiliziranim mješavinama prikazani su na slici 9. Izmjerena vrijednost indeksa nosivosti CBR od 10,16 % za netretirani sediment odgovara materijalima posteljice srednje do dobre kvalitete [47], što upućuje na visok potencijal primjene netretiranog sedimenta u nasipima cesta ili u posteljici. Nakon stabilizacije materijala uočen je znatan porast indeksa nosivosti CBR, pri čemu se CBR vrijednost povećavala s porastom udjela veziva. Stabilizacijom sedimenta BS vezivom u udjelima od 3 i 5 % (u odnosu na suhu masu), CBR vrijednost povećala se približno 11 odnosno 26 puta u odnosu na netretirani sediment. Povećanje CBR vrijednosti kod uzoraka stabiliziranih BB vezivom



Slika 9. Indeks nosivosti CBR nestabiliziranih i stabiliziranih uzoraka sedimenta

Tablica 4. Tražena svojstva za primjenu nestabiliziranih/stabiliziranih materijala u različitim slojevima kolnika prema srpskim standardima [48-51]

Svojstva materijala	Zahtijevane vrijednosti				Rezultati istraživanja
	Nasip	Posteljica	Donji nosivi sloj (ceste III. i IV. razreda)	Nosivi sloj i donji nosivi sloj (ceste I. i II. razreda)	
MDD tla [Mg/m <sup>3</sup> ]	≥ 1,50 (do 3 m visine) ≥ 1,55 (iznad 3 m)	≥ 1,60	-	-	1,62 (US) 1,63 – 1,77 (SS)
W <sub>opt</sub> [%]	< 25	-	-	-	12,50 (US) 12,90 – 19,40 (SS)
Granica tečenja [%]	< 65	< 50	-	-	26,91 (US) 27,13 – 27,80 (SS)
Indeks plastičnosti [%]	< 30	< 20	-	-	10,03 (US) 10,31 – 10,60 (SS)
Udio organske tvari [%]	< 6	< 6	-	-	2,48 (US) -
CBR [%]	-	> 3	-	-	10,16 (US) 112,16 – 300* (SS)
UCS nakon 7 dana [MPa]	-	0,5	1,5 - 4,5	2 – 5,5	- 0,18 – 1,63 (SS)
UCS nakon 28 dana [MPa]	-	-	2,5 – 6,0	3 – 6,5	- 0,52 – 2,31 (SS)

\* Maksimalna mjerljiva vrijednost na preši  
US = nestabilizirani (sirovi) sediment; SS = stabilizirani sediment

bilo je nešto blaže, pri čemu se CBR indeks za iste udjele veziva povećao približno 11 odnosno 18 puta.

Općenito, uzorci stabilizirani BB vezivom pokazali su niže parametre nosivosti u odnosu na uzorke stabilizirane BS vezivom za iste udjele veziva. Ta pojava vjerojatno je posljedica nedovoljno dugog očvršćivanja potrebnog za razvoj čvrstoće uzoraka (plan ispitivanja od 7 dana prema standardnoj proceduri), osobito kod stabilizacije mješavinom cementa, letećeg pepela i CaO. Zato bi se u daljnjim istraživanjima CBR ispitivanje trebalo provoditi nakon 28 dana ili dulje, kako bi se omogućila bolja usporedba vrijednosti uzoraka stabiliziranih BS i BB vezivima.

Za uzorke stabilizirane sa 7 i 9 % BS veziva te 9 % BB veziva (u odnosu na suhu masu) mjerenje indeksa nosivosti CBR nije bilo izvedivo zbog iznimno visoke čvrstoće tih uzoraka i ograničenja opterećenja penetracijskog klipa od 50 kN na CBR uređaju. To ograničenje upućuje na iznimnu nosivost uzoraka stabiliziranih pri navedenim udjelima.

#### 4.5. Potencijal primjene sedimenta kao materijala za gradnju cesta

U tablici 4. prikazani su tehnički zahtjevi za primjenu nestabiliziranih/stabiliziranih materijala u izgradnji nasipa i posteljice kolničke konstrukcije u Srbiji, u skladu sa standardima SRPS U.E1.010 [48], SRPS U.E8.010 [49] i Tehničkim uvjetima za izvođenje zemljanih radova koje je izdalo JP "Putevi Srbije" (2012.) [50]. Navedeni tehnički uvjeti [50] prepoznaju jednoosnu tlačnu čvrstoću nakon 7 dana (UCS) kao jedini relevantni kriterij

za ocjenu prikladnosti stabiliziranog tla i njegove primjene u kolničkim konstrukcijama, propisujući minimalnu vrijednost od 0,5 MPa za primjenu u posteljici najviših kategorija cesta (ponajprije državnih cesta). Raniji standard SRPS U.E9.024 [51] detaljnije definira kriterije, navodeći različite minimalne vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana, ovisno o kategoriji ceste i položaju sloja unutar kolničke konstrukcije (gornji ili donji nosivi sloj).

Kako bi se procijenila što šira primjenjivost stabiliziranog sedimenta, uključujući njegovu potencijalnu uporabu u prometnicama manjega prometnog opterećenja poput lokalnih ulica i biciklističkih staza, oba su standarda razmatrana paralelno. Stabilizirani sediment pokazuje veći potencijal primjene na prometnicama manjeg opterećenja, gdje su zahtjevi za čvrstoću i nosivost materijala nešto niži.

Usporedba zahtijevanih i eksperimentalno dobivenih vrijednosti u ovome istraživanju pokazuje da se nestabilizirani sediment može koristiti pri izgradnji slojeva nasipa i posteljice, jer dobivene vrijednosti zadovoljavaju minimalne zahtjeve iz tablice 4. u pogledu CBR vrijednosti, maksimalne suhe gustoće (MDD) i drugih fizikalnih svojstava materijala. Za stabilizirane uzorke dodatni uvjet za primjenu u posteljici jest postizanje vrijednosti tlačne čvrstoće od 0,5 MPa nakon 7 dana njege, u skladu sa standardom [50]. Taj je uvjet zadovoljen stabilizacijom sedimenta s 5, 7 i 9 % BS veziva te sa 7 i 9 % BB veziva (u odnosu na suhu masu uzorka). Zato se te mješavine mogu smatrati prikladnima za primjenu u stabilizaciji posteljice. Veće vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 7 dana pri stabilizaciji BS vezivom u odnosu na BB mogu se pripisati bržemu mehanizmu očvršćivanja

tla u slučaju cementnog veziva. Ipak, unatoč nedovoljnim vrijednostima tlačne čvrstoće pojedinih mješavina nakon 7 dana njege, dobivene CBR vrijednosti za sve stabilizirane mješavine upućuju na više nego zadovoljavajuću nosivost materijala za primjenu u posteljici.

Standard SRPS U.E9.024 [51] zahtijeva minimalnu UCS vrijednost od 1,5 odnosno 2 MPa nakon 7 dana za ugradnju stabiliziranog materijala u donji i gornji nosivi sloj kolničke konstrukcije, ovisno o kategoriji ceste. Stabilizacijom sedimenta BS i BB vezivima u udjelu od 9 % (u odnosu na suhu masu) postignute su čvrstoće od 1,63 odnosno 1,5 MPa nakon 7 dana. Na temelju tog svojstva te dvije mješavine jedine zadovoljavaju uvjete za ugradnju u donji nosivi sloj cesta kategorija III. i IV. Istodobno, nijedna mješavina nije zadovoljila uvjete za ugradnju ni u gornji nosivi sloj ni u donji nosivi sloj kolničke konstrukcije cesta viših kategorija.

Uzimajući u obzir vrijednosti UCS svih mješavina nakon 28 dana, nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije minimalne tlačne čvrstoće od 2,5 odnosno 3 MPa za primjenu u donjem nosivom ili gornjem nosivom sloju kolničke konstrukcije. Iako se u suvremenoj inženjerskoj praksi ponajprije koristi tlačna čvrstoća (UCS) nakon 7 dana kao mjerodavan parametar stabiliziranog materijala, ovi rezultati upućuju na moguća ograničenja u dugoročnome razvoju čvrstoće materijala. Ta pojava vjerojatno je posljedica ograničene pucolanske aktivnosti materijala stabiliziranih većim udjelima veziva, pri čemu brzi porast čvrstoće i krutosti nakon 7 dana prati usporavanje daljnjeg razvoja čvrstoće.

Buduća istraživanja čvrstoće (nakon 56 ili 90 dana) mogla bi omogućiti bolju procjenu dugoročnog razvoja čvrstoće materijala i optimizaciju procesa stabilizacije sedimenta. Dodatno, za primjenu sedimenta u nosivim slojevima kolničke konstrukcije potrebno je razmotriti veće udjele veziva, ovisno o ekonomičnosti postupka.

## 5. Zaključak

Građevinska industrija predstavlja gospodarski sektor koji intenzivno koristi resurse i znatno ovisi o prirodnim resursima. Neprekidna eksploatacija prirodnih resursa dovela je do njihova postupnog iscrpljivanja, uz dodatne negativne utjecaje na okoliš. Taj se problem može ublažiti zamjenom tradicionalnih materijala otpadnim i okolišno održivim alternativama. Sediment iskopan jaružanjem dobiven je uklanjanjem nanosa s dna rijeka, jezera i morskih bazena, a predstavlja potencijalni materijal za takvu primjenu.

U ovom su radu procijenjena fizikalna i mehanička svojstva sedimenta iz rijeke Begeje u Republici Srbiji. Također su provedena fizikalno-mehanička ispitivanja na uzorcima sedimenta stabiliziranim hidrauličkim vezivima BS i BB u udjelima od 3, 5, 7 i 9 % (u odnosu na suhu masu uzorka). Fizikalna karakterizacija sirovog materijala pokazala je da se radi o glinovitoj materijalu niske plastičnosti i niskog udjela organske tvari. Dodavanje veziva sedimentu nije znatno promijenilo granice plastičnosti

i konzistencije. Ispitivanje mehaničkih svojstava uključivalo je određivanje maksimalne suhe gustoće (MDD) pri optimalnome udjelu vode ( $W_{opt}$ ) i indeks nosivosti CBR za sve mješavine te određivanje jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) nakon 7 i 28 dana te neizravne vlačne čvrstoće (ITS) nakon 28 dana za stabilizirane uzorke. Na temelju provedenih ispitivanja doneseni su sljedeći zaključci:

Stabilizacija sedimenta hidrauličkim vezivima BS i BB povećava i suhu gustoću (MDD) i optimalnu vlažnost  $W_{opt}$  za sve mješavine. Povećanje udjela veziva uzrokuje djelomičan porast MDD-a i znatan porast  $W_{opt}$ , što rezultira pomakom Proctorove krivulje zbijanja udesno zbog procesa hidratacije tijekom stabilizacije. Za udjele veziva od 3 do 9 % (u odnosu na suhu masu uzorka) početna MDD vrijednost netretiranog sedimenta povećala se za 1,23 do 5,56 % primjenom BS veziva te za 0,62 do 9,26 % primjenom BB veziva. U istim uvjetima  $W_{opt}$  se povećao za 3,2 do 29,6 % pri stabilizaciji BS vezivom te za 3,2 do 55,2 % pri stabilizaciji BB vezivom.

Indeks nosivosti CBR nestabiliziranog materijala (10,16 %) upućuje na zadovoljavajuću nosivost netretiranog sedimenta i mogućnost njegove primjene bez stabilizacije u izgradnji slojeva nasipa i posteljice. Stabilizacija uzoraka sedimenta dovodi do dodatnog povećanja nosivosti, pri čemu CBR indeks višestruko raste s povećanjem udjela veziva. Primjenom BS i BB veziva u udjelima od 3 do 5 % (u odnosu na suhu masu uzorka) CBR vrijednost povećala se približno 11 do 26 puta u odnosu na početnu vrijednost. Za uzorke stabilizirane sa 7 do 9 % BS veziva i 9 % BB veziva (u odnosu na suhu masu uzorka) gornja mjerljiva granica CBR vrijednosti iznosila je 300 %.

Primjena hidrauličkog veziva u stabilizaciji dovodi do očvršćivanja materijala i poboljšanja mehaničkih svojstava. S porastom udjela veziva povećava se i vrijednost UCS uzoraka. Taj je porast izrazito linearan u slučaju BS veziva, dok je u slučaju BB veziva opisan kvadratnom funkcijom. Zabilježene vrijednosti čvrstoće nakon 7 dana upućuju na brže očvršćivanje i veće čvrstoće uzoraka stabiliziranih BS vezivom u odnosu na one stabilizirane BB vezivom pri istim udjelima. Međutim, pri ispitivanju tlačne čvrstoće (UCS) nakon 28 dana njege za uzorke stabilizirane s 9 % BB veziva zabilježena je najveća čvrstoća od 2,31 MPa. Ta pojava upućuje na dodatni razvoj čvrstoće i pucolansku reakciju zbog prisutnosti CaO i letećeg pepela u BB vezivu.

Rezultati ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće (ITS) nakon 28 dana njege pokazuju slične trendove kao i rezultati tlačne čvrstoće (UCS). Mehanička čvrstoća raste s povećanjem udjela veziva. ITS vrijednosti dobivene za uzorke stabilizirane BS vezivom veće su nego za one stabilizirane BB vezivom pri istim udjelima. Za veće udjele veziva (7 do 9 %) mješavine stabilizirane BB vezivom pokazuju izraženiji porast neizravne vlačne čvrstoće u odnosu na mješavine stabilizirane BS vezivom. Uočena je linearna ovisnost između čvrstoća UCS-a (28 dana) i ITS-a za mješavine stabilizirane BS vezivom, dok je za mješavine stabilizirane BB vezivom ovisnost između čvrstoća UCS-a (28 dana) i ITS-a opisana kvadratnom funkcijom.

Usporedba dobivenih rezultata s relevantnim tehničkim kriterijima za primjenu materijala u kolničkim konstrukcijama (Republika Srbija) pokazuje da nestabilizirani sediment zadovoljava sve propisane uvjete za primjenu u posteljici ili nasipu. Stabilizacija sedimenta dovodi do dodatnog povećanja čvrstoće i nosivosti. Postignute vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 7 dana za uzorke stabilizirane s 5, 7 i 9 % BS veziva te sa 7 i 9 % BB veziva (u odnosu na suhu masu) upućuju na mogućnost primjene tog materijala u stabilizaciji posteljice za ceste svih kategorija. Pri razmatranju primjene stabiliziranog sedimenta u nosivim slojevima kolnika dvije mješavine (BS.9 i BB.9) zadovoljile su kriterij čvrstoće nakon 7 dana, ali ne i nakon 28 dana za primjenu u donjemu nosivom sloju cesta nižih kategorija. Ti rezultati upućuju na potrebu za daljnjim istraživanjima mješavina s potencijalno većim udjelima veziva te na procjenu dugoročnog razvoja čvrstoće i trajnosti materijala. Unatoč obećavajućim mehaničkim svojstvima netretiranih i stabiliziranih sedimenata, materijali iskopani jaružanjem često imaju visoke udjele onečišćivača poput teških metala, ugljikovodika, nutrijenata i drugih organskih kontaminanata.

Te tvari mogu predstavljati rizik za okoliš, osobito ispiranjem (eluacije) tijekom izgradnje ili dugotrajnog izlaganja oborinama i interakciji s podzemnim vodama. Zato širu primjenu iskopanog sedimenta u cestogradnji uvijek treba pratiti prethodna detaljna kemijska karakterizacija i ispitivanja ispiranja u skladu s okolišnim propisima.

U slučajevima kada koncentracije onečišćivača prelaze dopuštene granične vrijednosti, najčešće su potrebne dodatne mjere stabilizacije/solidifikacije, tehnike enkapsulacije ili ograničenja primjene (npr. samo u slabo propusnim nasipima ili ispod nepropusnih slojeva). Ti okolišni aspekti važno su ograničenje za univerzalnu ponovnu uporabu sedimenta iskopanog jaružanjem te ističu potrebu za integriranom mehaničko-okolišnom procjenom prije njegove praktične primjene.

## Zahvala

Ovo istraživanje podržao je Fond za znanost Republike Srbije (#7753609, BEuSED).

## LITERATURA

- [1] Solanki, P., Hu Jain, X., Sancheti, G.: A review of beneficial use and management of dredged material, *Waste*, 1 (2023) 3, pp. 815-840, <https://doi.org/10.3390/waste1030048>
- [2] Rađenović, D., Kerkez, Đ., Tomašević Pilipović, D., Dubovina, M., Šešlija, M., Tenodi, S., Peško, I.: The beneficial reuse of contaminated sediment: Long-term assessment of fly ash and lime-based mixtures, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02711>.
- [3] Wang, D., Abriak, N.E., Zentar, R.: Dredged marine sediments used as novel supply of filling materials for road construction, *Marine Georesources and Geotechnology*, 35 (2017) 4, pp. 472-480, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2016.1198945>
- [4] Carreira, C., Bollwerk, M., Lønberg, C.: A review on beneficial use of dredged marine sediment, *Anthropocene Coasts*, 8 (2025) 12, <https://doi.org/10.1007/s44218-025-00076-y>
- [5] Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Simarat, P., Jongpradist, P., Likitlersuang, S.: Sustainable reuse of dredged sediments as pavement materials by cement and fly ash stabilization, *Journal of Soils and Sediments*, 20 (2020) 10, pp. 3807-3823, <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02635-x>
- [6] Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Poorahong, P., Jongpradist, P., Likitlersuang, S.: Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash, *Engineering Geology*, 267 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105491>
- [7] Balkaya, M.: Beneficial use of dredged material in geotechnical engineering, recycling and reuse approaches for better sustainability, *Environmental Science and Engineering*, 2019, pp. 21-38, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95888-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95888-0_3)
- [8] Jamsawang, P., Charoensil, S., Namjan, T., Jongpradist, P., Likitlersuang, S.: Mechanical and microstructural properties of dredged sediments treated with cement and fly ash for use as road materials, *Road Materials and Pavement Design*, 22 (2021) 11, pp. 2498-2522, <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1772349>
- [9] Wang, D.X., Abriak, N.E., Zentar, R., Xu, W.: Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction, *Environmental Technology*, 33 (2012) 1, pp. 95-101, <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.551840>
- [11] SURICATES: Sediment Uses as Resources In Circular And Territorial Economies, <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/suricates-sediment-uses-as-resources-in-circular-and-territorial-economies/>, 15.01.2025.
- [12] Wijdeveld, A., Lemièrre, B., Coftier, A., Laperche, V., Bataillard, P., Masson, E., Lord, R., Torrance, K., Harrington, J., Batel, B., Wensveen, M., Hamilton, A., Debuigne, T.: Beneficial use of sediments, tools, pilot sites and measuring techniques developed and used within seven European Union INTERREG projects, *Journal of Soils and Sediments*, 24 (2024), pp. 3841-3853, <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03811-z>
- [13] US Army Corps of Engineers: Beneficial use of Dredged Material, <https://www.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Beneficial-Use-Program/>, 15.01.2025.
- [14] Sediment – neiskorišćeni resurs koji se krije na dnu naših reka, <https://klima101.rs/reke-sediment-izmuljavanje-srbija/>, 20.01.2025.
- [15] Dubois, V., Abriak, N.E., Zentar, R., Ballivy, G.: The use of marine sediments as a pavement base material, *Waste Management*, 29 (2009) 2, pp. 774-782, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.004>
- [16] Fořt, J., Afolayan, A., Kočič, V., Scheinherrová, L., Jan, J., Borovec, J., Černý, R.: Potential of water sediments in construction materials: Current approaches and critical consideration of future challenges, *Heliyon*, 11 (2024) 1, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41121>
- [17] Nodehi, M., Taghvaei, V.M.: Applying circular economy to construction industry through use of waste materials: A review of supplementary cementitious materials, plastics, and ceramics, *Circular Economy and Sustainability*, 2 (2022), pp. 987-1020, <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00149-x>

- [18] Athira, S., Subaida, A., Vinod, P.: A framework for geotechnical characterization of dredged reservoir sediments and its sustainable reuse after stabilization, *Environmental Earth Sciences*, 83 (2024) 6, <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11448-x>
- [19] Maherzi, W., Benzerzour, M., Mamindy-Pajany, Y., Van Veen, E., Boutouil, M., Abriak, N.E.: Beneficial reuse of Brest-Harbor (France)-dredged sediment as alternative material in road building: laboratory investigations, *Environmental Technology*, 39 (2018) 5, pp. 566-580, <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1308440>
- [20] Wang, D., Zentar, R., Abriak, N.E.: Durability and swelling of solidified/stabilized dredged marine soils with class-F fly ash, cement, and lime, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 3, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002187](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002187)
- [21] Nguyen, T.T.M., Rabbanifar, S., Brake, N.A., Qian, Q., Kibodeaux, K., Crochet, H.E., Oruji, S., Whitt, R., Farrow, J., Belaire, B., Bernazzani, P., Jao, M.: Stabilization of silty clayey dredged material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 9, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002391](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002391)
- [22] Loudini, A., Ibnoussina, M., Witam, O., Limam, A., Turchanina, O.: Valorisation of dredged marine sediments for use as road material, *Case Studies in Construction Materials*, 13 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00455>
- [23] Barman, D., Dash, S.K.: Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14 (2022) 4, pp. 1319-1342, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>
- [24] Almokdad, M., Zentar, R.: Characterization of recycled dredged Sediments: Toward circular economy in road construction, *Construction and Building Materials*, 402 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132974>
- [25] Chompoorat, T., Thepumong, S., Taesinlapachai, S., Likitlersuang, S.: Repurposing of stabilised dredged lakebed sediment in road base construction, *Journal of Soils and Sediments*, 21 (2021) 7, pp. 2719-2730, <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02974-3>
- [26] Nova generacija lafarge veziva: rešenje za materijale lošeg kvaliteta i niske nosivosti, <https://www.lafarge.rs/nova-generacija-lafarge-veziva-resenje-za-materijale-loseg-kvaliteta-i-niske-nosivosti>, 12.05.2025.
- [27] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN ISO 17892-4:2017 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution, 2017.
- [28] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN ISO 17892-1:2015 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content, 2015.
- [29] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN ISO 17892-2:2015 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 2: Determination of bulk density, 2015.
- [30] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN ISO 17892-3:2016 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density, 2016.
- [31] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN ISO 17892-12:2018 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of liquid and plastic limits, 2018.
- [32] Institute for Standardization of Serbia: SRPS U.B1.024:1968 Testing of soils - Determination of the combustible and organic matter content of a soil, 1968.
- [33] ASTM International: D2487 - 17 Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2017.
- [34] AASHTO: M 145-91 Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, 2012.
- [35] Holtz, R.D., Kovacs, W.D.: An introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, inc., 1981.
- [36] Wagner, J.F.: Mechanical properties of clays and clay minerals, *Developments in Clay Science*, 5 (2013), pp. 347-381, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0>
- [37] Asgari, M.R., Baghebanzadeh Dezfuli, A., Bayat, M.: Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime, *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (2015) 3, pp. 1439-1452, <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1>
- [38] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 13286-2:2012 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction, 2012.
- [39] US Department of Transportation - Federal Highway Administration: Soil and Base Stabilization and Associate Drainage Considerations, Volume II, Mixture Design Considerations, Washington DC, 1992.
- [40] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN ISO 17892-7:2018 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 7: Unconfined compression test, 2018.
- [41] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 13286-42:2012 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures, 2012.
- [42] Institute for Standardization of Serbia: SRPS EN 13286-47:2022 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling, 2022.
- [43] Seed, H., Woodward, R., Lundgren, R.: Prediction of swelling potential for compacted clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88 (1962), pp. 53-58, <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0008724>
- [44] Chompoorat, T., Thanawong, K., Likitlersuang, S.: Swell-shrink behaviour of cement with fly ash-stabilised lakebed sediment, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80 (2021), pp. 2617-2628, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02069-2>
- [45] Rai, P., Qiu, W., Pei, H., Chen, J., Ai, X., Liu, Y., Ahmad, M.: Effect of fly ash and cement on the engineering characteristic of stabilized subgrade soil: An experimental study, *Geofluids*, 2021 (2021), <https://doi.org/10.1155/2021/1368194>
- [46] Kired, F., Šešlija, M., Milović, T., Starčev-Ćurčin, A., Bulatović, V., Radović, N.: Stabilization of different soil types using a hydraulic binder, *Buildings*, 13 (2023) 8, <https://doi.org/10.3390/buildings13082040>
- [47] Chompoorat, T., Likitlersuang, S., Thepumong, T., Tanapalungkorn, W., Jamsawang, P., Jongpradist, P.: Solidification of sediments deposited in reservoirs with cement and fly ash for road construction, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7 (2021) 85, <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00328-0>
- [48] Schaefer, V.R., White, D.J., Ceylan, H., Stevens, L.J.: Design Guide for Improved Quality of Roadway Subgrades and Subbases, *InTrans Project Reports*. 46., 2008.
- [49] Institute for Standardization of Serbia: SRPS U.E1.010:1981 Earthworks on road construction, 1981.
- [50] Institute for Standardization of Serbia: SRPS U.E8.010:1981 Bearing and surface plainness of formation, 1981.
- [51] PE Roads of Serbia: Technical Requirements for Road Construction in the Republic of Serbia; 2 Special Technical Requirements; 2.2 Earthworks, 2012.
- [52] Institute for Standardization of Serbia: SRPS U.E9.024:1980 Highway design and construction - Construction of pavement base courses stabilized by means of portland cement and similar chemicals - Technical requirements, 1980.