

# STABILIZACIJA VISOKO PLASTIČNE GLINE PRIMENOM TEČNOG HEMIJSKOG ADITIVA POLYBOND

Mirjana Vukićević<sup>1</sup>, Veljko Pujević<sup>1</sup>, Miloš Marjanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mirav@grf.bg.ac.rs

**Rezime:** U radu su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja mogućnosti stabilizacije gline visoke plastičnosti primenom tečnog hemijskog aditiva „Polybond“, kao i stabilizacije tla kombinacijom letećeg pepela iz TE „Kostolac“ i Polybonda. U cilju utvrđivanja efekata stabilizacije sprovedena su opsežna laboratorijska ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika stabilizovanog tla (jednoaksijalna čvrstoća, parametri smičuće čvrstoće, CBR, modul stišljivosti, potencijal bubrenja, koeficijent vodopropusnosti, otpornost na dejstvo mraza). Rezultati istraživanja jasno ukazuju na pozitivne efekte stabilizacije gline Polybondom i potvrđuju stavove da se isti može uspešno primeniti kao stabilizator glinovitih vrsta tla u različitim praktičnim primenama kao što su: stabilizacija slabo nosivog tla, izgradnja nasipa i geotehničkih konstrukcija male vodopropusnosti, poboljšanje mehaničkih osobina gornjih slojeva donjeg stroja saobraćajnica itd.

**Ključne reči:** stabilizacija tla, Polybond, leteći pepeo, visokoplastična glina

## 1. UVOD

Stabilizacija tla je tehnološki postupak kojim se poboljšavaju geotehničke karakteristike tla. Osnovni načini stabilizacije su mehanička i hemijska stabilizacija. Mehanička stabilizacija podrazumeva dodavanje frakcija koje nedostaju, tako da se postigne optimalan granulometrijski sastav tla, nakon čega se vrši zbijanje pri optimalnoj vlažnosti. Primenjuje se kod nekoherentnog, jednolično građiranog tla.

Hemijska stabilizacija se sastoji u tome da se tlu dodaje vezivno sredstvo, najčešće portland cement ili kreč. Usled prisustva vode u tlu dolazi do hemijskih reakcija i formiranja cementnih jedinjenja. Poslednjih decenija sve više se primenjuje stabilizacija tla dodavanjem letećeg pepela, koji se koristi za stabilizaciju tla i kao mehanički i kao hemijski stabilizator, samostalno ili uz dodatak cementa ili kreča.

Pored navedenih tradicionalnih dodataka, za hemijsku stabilizaciju tla sve više se primenjuju i inovativni materijali. Jedan od takvih materijala je Polybond, tečni hemijski aditiv jonskog tipa.

Polybond je tamno braon tečnost koja se zasniva na sulfatnoj kiselini i površinski aktivnom agensu, koji obezbeđuju jedinstvenu osobinu stabilizatora koja se ogleda u smanjenju potrošnje neorganskog veziva kod ojačavanja tla, povećavajući njegovu čvrstoću i otpornost na vodu i mraz. Prema navodima proizvođača, efekat Polybonda je zasnovan na njegovoj sposobnosti da izvrši jonsku supstituciju vode na površini zrna tla stabilizatorskim molekulima čime zrna tla postaju manja. Karakteristika molekula stabilizatora koji su vezani na površini zrna tla jeste da odbijaju vlagu, smanjujući time česticama gline sposobnost privlačenja vode. Tretirano tlo postaje čvršće i vodootporno, što ga čini otpornim na izlaganje bilo kojim klimatskim uslovima, uz dovoljnu nosivost čak i nakon dugotrajnih padavina [1].

Primena Polybonda je posebno efikasna kod obrade tla koje sadrži glinu. Kao rezultat u procesu stabilizacije ovakvog tla Polybondom, celokupan tanak sloj vode na površini glinenih čestica postaje slobodan i lako isparava sa tla. Mogućnost bubrenja tla se značajno smanjuje. Izradom podloge anti-frost slojeva tla koji su ojačani Polybondom praktično se prekida prodiranje vlage u tlo donjeg stroja.

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja stabilizacije visoko plastične gline Polybondom. Pored toga, ispitana je mogućnost stabilizacije tla kombinacijom letećeg pepela iz TE „Kostolac“ i Polybonda. Naime, autori ovog rada su sprovedli obimnu studiju [2] u kojoj su razmatrane mogućnosti primene letećeg pepela iz termoelektrana u Srbiji za stabilizaciju tla. Dobijeni rezultati su pokazali da pepeo iz TE „Kostolac“, iako bez samovezujućih svojstava, predstavlja efikasan materijal za stabilizaciju sitnozrnih materijala.

## 2. PRIMENJENI MATERIJALI

Za ispitivanje je korišćena visoko plastična glina, uzorkovana na lokaciji pozajmišta Radljevo, opština Ub. Primenjeni tip tla ima i ekspanzivna svojstva.

Za varijantu stabilizacije tla sa dodatkom letećeg pepela korišćen je pepeo uzorkovan u TE „Kostolac“ (EFP-KOS). Upotrebljeni pepeo je prašinasto-peskoviti otpadni materijal tamno sive boje, uzorkovan direktno iz

elektrofiltera termoelektrane. Hemijski sastav određen je u laboratoriji Fakulteta za fizičku hemiju u Beogradu (Tabela 1).

**Tabela 1.** Hemijski sastav letećeg pepela

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$
56.38	17.57	10.39	7.46	2.13	0.57	0.38	0.52	0.95	0.025

S obzirom na to da je sadržaj  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  iznad 70% i sadržaj  $\text{SO}_3$  manji od 5%, prema standardu ASTM C 618 [3], korišćeni pepeo spada u silikatne kisele pepele klase F, sa izraženim pucolanskim svojstvima i bez samovezujućih svojstava.

Fizičko-mehanička svojstva korišćenog tla i letećeg pepela prikazana su u Tabelama 2 i 3. Njihov granulometrijski sastav prikazan je na Slikama 1 i 2. Prikazani podaci preuzeti su iz [2]. Prikazane vrednosti predstavljaju prosečne vrednosti za sva ispitana probna tela.

**Tabela 2.** Fizička svojstva primenjenih materijala

MATERIJAL LOKACIJA	OSNOVNA FIZIČKA SVOJSTVA												
	$G_s$	Organske materije %	$\text{CaCO}_3$ %	Granulometrijski sastav				Granice konzistencije i vrsta tla					
				Glina < 0.002 mm	Prašina 0.002-0.06 mm	Pesak 0.06-2.0 mm	Frakcije < 0.075 mm	$w_L$ %	$w_P$ %	$I_P$ %	USCS	AASHTO	Grupni indeks
Visoko plastična glina Radljevo	2.67	1.24	0.00	22	72	6	96	50.6	19.1	31.5	CH	A7-6	18
Leteći pepeo Kostolac	2.22			0	75	25	80						

**Tabela 3.** Mehanička svojstva primenjenih materijala

MATERIJAL LOKACIJA	MEHANIČKA SVOJSTVA											
	Zbijenost		Stišljivost					Čvrstoća				
	Proktorov opit		$M_v$ kPa			$C_c$	$C_r$	Pritisak bubrenja kPa	Opit direktnog smicanja		UCS	CBR %
	$\gamma_{d,max}$ kN/m <sup>3</sup>	$w_{opt}$ %	50-100	100-200	200-400				$\phi'$ °	$c'$ kPa		
Visoko plastična glina Radljevo	16.64	19.07	14330	10380	10800	0.010	0.010	156.0	25.5	26.2	231.4	4.6
Leteći pepeo Kostolac	9.85	37.55	27230	39430	42950	0.083	0.018		30.9	28.5	87.0	57.9

### 3. PRIPREMA UZORAKA, PROGRAM I METODE ISPITIVANJA

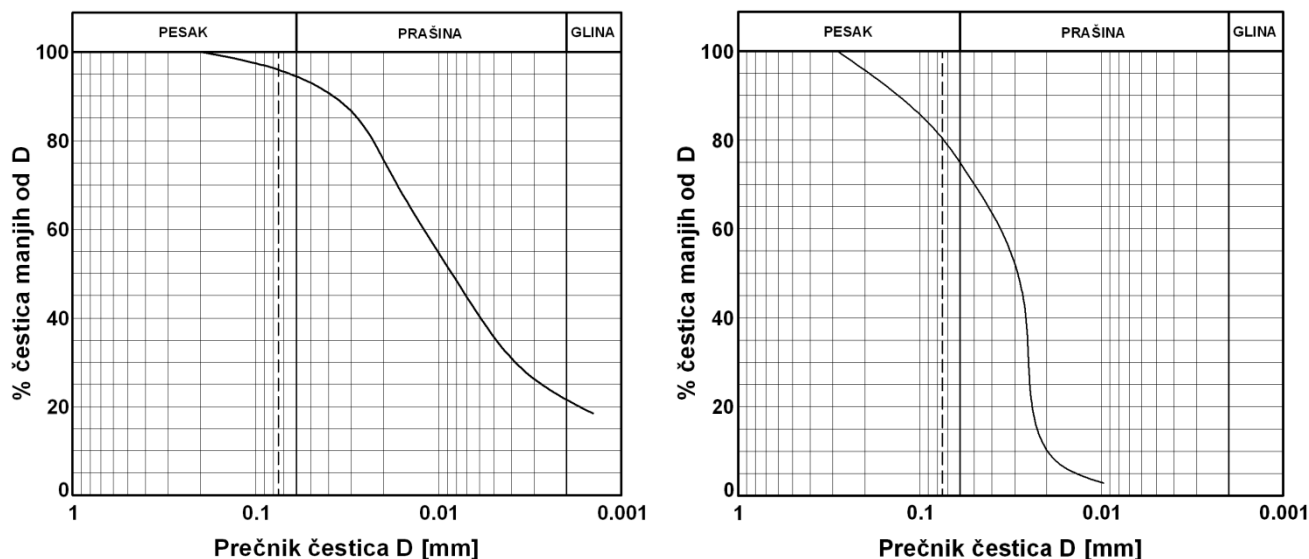
#### 3.1. Priprema uzoraka

Probna tela za izvođenje laboratorijskih ispitivanja pripremljena su sa minimalnim preporučenim sadržajem Polybonda prema standardu STO 69646750-001-2011 [4], u iznosu od 0.175 l/m<sup>3</sup> ugrađenog (zbijenog) materijala. Prvo je formiran vodeni rastvor Polybonda (0.08% u odnosu na masu vode), a zatim je odgovarajuća količina vodenog rastvora dodata suvoj masi tla (Grupa 1), odnosno tla i letećeg pepela (Grupa 2).

Prilikom spravljanja mešavina Grupe 2 korišćen je ranije određen optimalni procenat pepela za ispitanu kombinaciju visoko plastične gline (Radljevo) i pepela iz TE "Kostolac" (EFP-KOS), u iznosu od 20% u

odnosu na suhu masu tla. Osnovni parametar pri izboru optimalnog procenta pepela u slučaju primenjene vrste tla bilo je maksimalno povećanje CBR vrednosti pri starosti uzoraka od 1 dana [2].

Probna tela su pripremljena pri istim početnim uslovima. Najpre su pažljivim mešanjem napravljene suve homogene mešavine usitnjenog tla i odgovarajuće količine pepela (u odnosu na suhu masu tla), a zatim je dodata odgovarajuća količina vodenog rastvora Polybonda i izvršeno zbijanje bez odlaganja, pri optimalnoj vlažnosti ( $w_{opt}$ ) prema standardnom Proktorovom opitu. Tom prilikom zanemaren je uticaj Polybonda na promenu optimalne vlažnosti mešavina. Primenjene optimalne vlažnosti za mešavine Grupe 1 i 2 prikazane su u Tabeli 4. Uzorci su pre ispitivanja čuvani u eksikatorima na temperaturi od 25°C.



Slika 1. Granulometrijski sastav visoko plastične gline(levo) i letećeg pepela KOS-FA(desno)

Tabela 4. Optimalne vlažnosti mešavina

Grupa	Opis	$w_{opt}$ %
1	Tlo + Polybond	19.07
2	Tlo + Polybond + leteći pepeo	21.59

Za utvrđivanje vremenske zavisnosti efekata stabilizacije tla Polybondom praćena je promena osnovnih mehaničkih svojstava stabilizovanog tla izvođenjem opita na probnim telima različite starosti - 1, 3, 7 i 28 dana. Dobijeni rezultati ispitivanja uzoraka iz Grupe 1 upoređeni su sa karakteristikama netretiranog tla – etalona (Tabele 2, 3). Rezultati ispitivanja uzoraka iz Grupe 2 upoređeni su sa rezultatima ispitivanja uzoraka tla stabilizovanih letećim pepelom (bez Polybonda) [2].

### 3.2. Metode ispitivanja

Za utvrđivanje fizičko-mehaničkih karakteristika stabilizovanog tla izvršena su odgovarajuća laboratorijska geomehanička ispitivanja. Sva ispitivanja izvršena su prema domaćim SRPS standardima. Sprovedeni su opiti jednoaksijalne čvrstoće, Kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), direktnog smicanja, stišljivosti, vodopropusnosti i otpornosti na mraz.

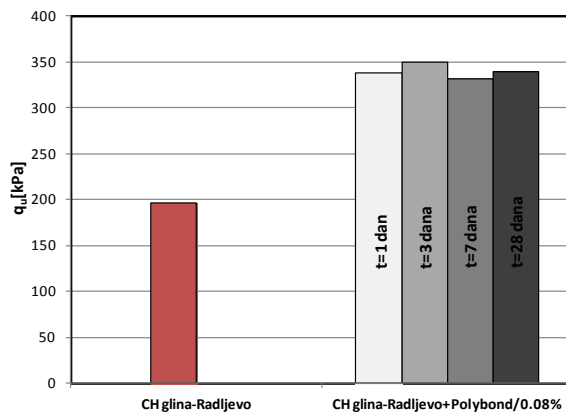
## 4. REZULTATI ISPITIVANJA

### 4.1. Stabilizacija visoko plastične gline Polybondom

#### 4.1.1. Jednoaksijalna čvrstoća - UCS

Rezultati opita jednoaksijalne čvrstoće tla sa dodatkom Polybonda su prikazani na Slici 2. Dodatkom Polybonda u minimalnom preporučenom iznosu zabeležen je značajan porast kratkoročne čvrstoće u iznosu od 72%. Rezultati opita nakon 3, 7 i 28 dana ukazuju na neosetljivost pomenutog parametra na proteklo

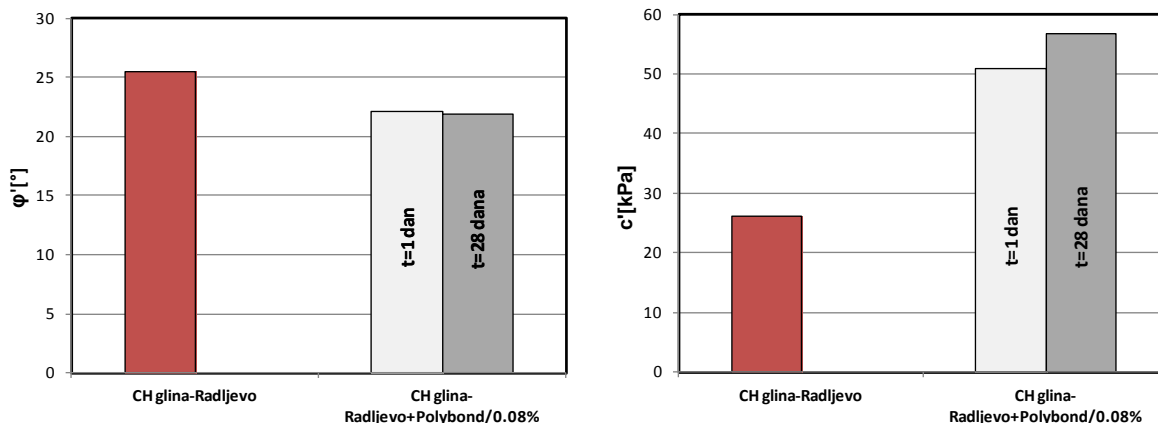
vreme. Uočeni trend je u neku ruku i očekivan s obzirom da se mehanizam stabilizacije Polybandom bazira prevashodno na redukciji vezane vode.



Slika 2. Jednoaksijalna čvrstoća

#### 4.1.2. Efektivni parametri smičuće čvrstoće

Efektivni parametri smičuće čvrstoće prikazani su na Slici 3. Dobijeni rezultati pokazuju da se primenom Polybonda ugao smičuće čvrstoće  $\varphi'$  neznatno smanjio u odnosu na etalon (oko 15%). Rezultati dobijeni pri starosti uzoraka od 28 dana ukazuju na nezavisnost gore pomenutog parametra od proteklog vremena. S druge strane, efekti tretiranja ove vrste tla Polybandom su posebno izraženi u pogledu kohezije. Zabeleženo je značajno trenutno povećanje kohezije (oko 95%). Rezultati opita direktnog smicanja nakon 28 dana ukazuju na blagi priraštaj kohezije kroz vreme.



Slika 3. Parametri smičuće čvrstoće

#### 4.1.3. Kalifornijski indeks nosivosti - CBR

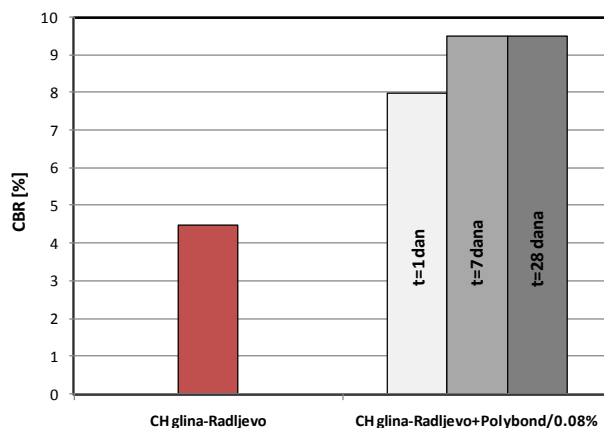
Poznato je da gline generalno imaju nisku CBR vrednost, što ih čini nepodobnim materijalom za podloge puteva. Rezultati ispitivanja Kalifornijskog indeksa nosivosti tla sa dodatkom Polybonda prikazani su na Slici 4. U poređenju sa CBR vrednošću nestabilizovanog tla, dodatkom Polybonda postignut je porast od 110%. Ovo je vrlo značajno poboljšanje, s obzirom da stabilizovano tlo postaje upotrebljivo u putogradnji.

#### 4.1.4. Parametri deformabilnosti

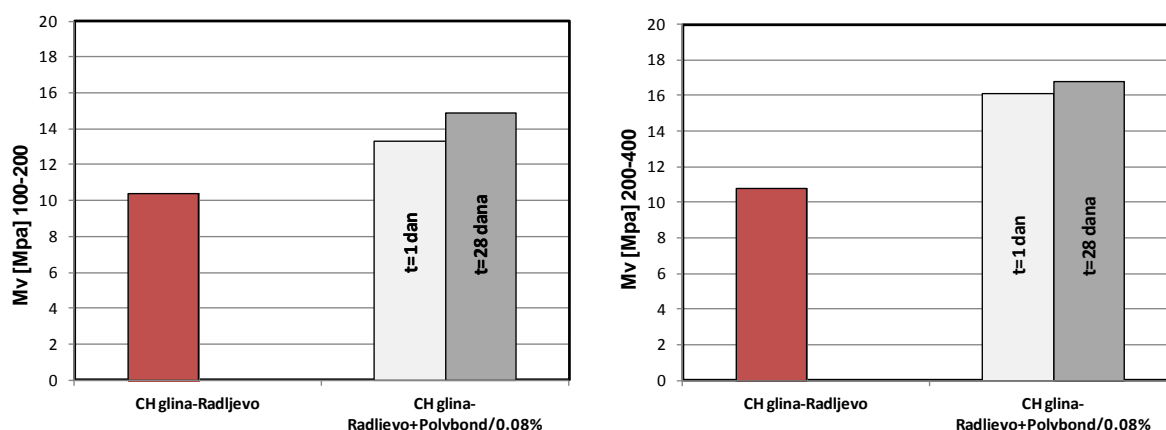
Na Slici 5 prikazani su moduli stišljivosti  $M_v$  za intervale vertikalnih napona 100-200 kPa i 200-400 kPa. Dobijeni rezultati ukazuju na umereno smanjenje deformabilnosti tretiranog tla. Dodatkom Polybonda u minimalnom preporučenom iznosu konačni moduli su se povećali 43%, odnosno 56% u odnosu na etalon.

#### 4.1.5. Bubrenje

Ispitivano tlo pre dodavanja Polybonda pokazivalo je sklonost ka bubrenju – pritisak bubrenja određen u edometarskom opitu je  $P_b=156$  kPa, a deformacija bubrenja je  $\epsilon=2.16\%$ . Ova osobina je povezana sa prisustvom minerala montmorijonita. Dodavanjem Polybonda ekspanzivnost tla je značajno umanjena. Pritisak i deformacija bubrenja kao osnovni pokazatelji ekspanzivnosti materijala redukovani su na  $P_b=48$  kPa odnosno  $\epsilon=0,92\%$ .



Slika 4. CBR vrednosti



Slika 5. Moduli stišljivosti

#### 4.1.6. Koeficijent vodopropusnosti

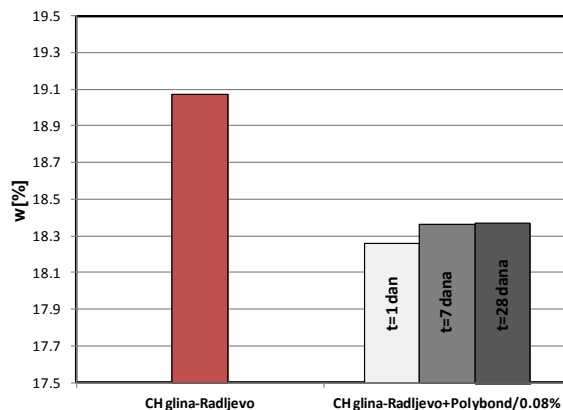
Opšte je poznato da visokoplastične gline imaju malu vodopropusnost. Rezultati sprovedenih ispitivanja pokazuju da se tretiranjem ovakvih materijala Polybondom koeficijent filtracije dodatno smanjuje. Prema klasifikaciji koju su predložili Terzaghi i Peck [5] mešavine stabilizovane Polybondom se mogu smatrati praktično vodonepropusnim ( $k=1,97e-10 < e-9$  m/s).

#### 4.1.7. Otpornost na mraz

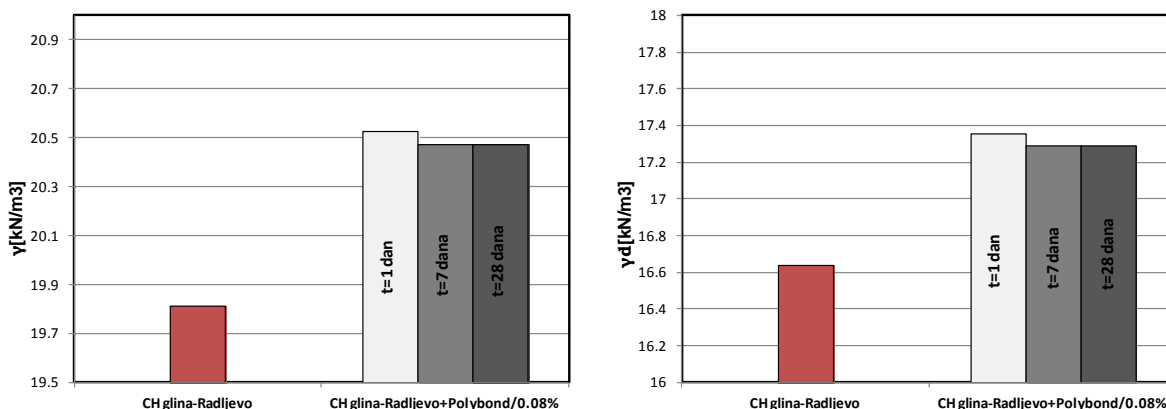
Rezultati sprovedene studije ukazuju da je pritisna čvrstoća uzoraka tretiranih Polybondom nakon 14 ciklusa smrzavanja i kravljenja neznatno smanjena u odnosu na čvrstoću uzoraka koji su istovremeno bili potopljeni u vodu. Dobijena vrednost indeksa otpornosti prema mrazu iznosi  $R=91\%$ , što ispunjava zahteve standarda SRPS U.B1.050 ( $R>80\%$ ) [6]. Smatra se da je stabilizovano tlo otporno na dejstvo mraza.

#### 4.1.8. Zapreminska težina i vlažnost

Za formiranje potpunije slike o mehanizmu stabilizacije Polybondom i boljeg razumevanja postignutih efekata, analizirane su promene vlažnosti i zapreminske težine kroz vreme. Dobijeni rezultati prikazani su na Slikama 6 i 7.



Slika 6. Vlažnost

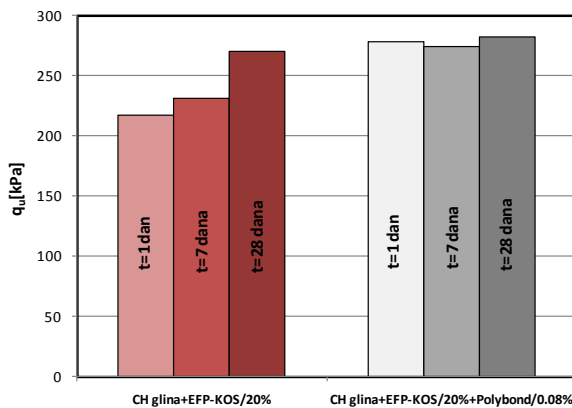


Slika 7. Zapreminska težina

Praćenjem vlažnosti zabeležen je trenutni pad, neposredno nakon dodavanja rastvora vode i Polybonda suvom tlu, što je posledica aktivacije hemijskih reakcija sa mineralima gline. Povećanje zapreminske težine u suvom stanju uzoraka tretiranih Polybondom u odnosu na etalon ukazuje da se za istu početnu (optimalnu) vlažnost pripremljenog materijala i istu primenjenu energiju zbijanja, dodatkom Polybonda u minimalnom iznosu nedvosmisleno povećava zbijenost. U opštem slučaju porast zbijenosti direktno utiče na poboljšanje mehaničkih svojstava tla - povećanje čvrstoće i smanjenje deformabilnosti, što je u skladu sa dobijenim rezultatima.

## 4.2. Stabilizacija visoko plastične gline Polybondom i letećim pepelom iz TE "Kostolac" (EFP-KOS)

### 4.2.1. Jednoaksijalna čvrstoća - UCS



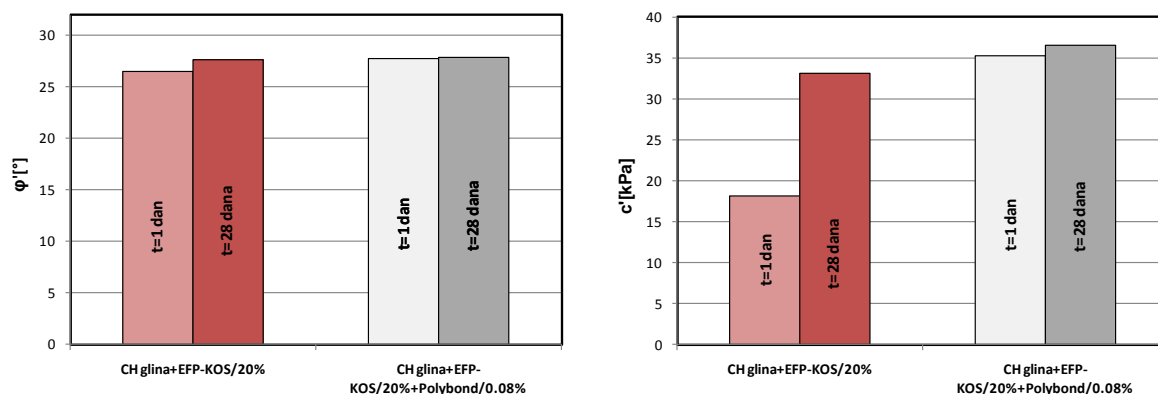
Slika 8. Jednoaksijalna čvrstoća

Rezultati ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće tla sa dodatkom Polybonda i EFP-KOS prikazani su na Slici 8. Mešavina sa dodatkom oba aktivatora pokazuje umeren porast kratkoročne jednoaksijalne čvrstoće u iznosu od 28%.

Kostolački pepeo, iako nema naročito izražena vezivna svojstva, evidentno utiče na prirast čvrstoće kroz vreme razmatrane visokoplastične gline. S druge strane, takav trend nije zabeležen za mešavine pripremljene sa oba dodatka. Razlog za uočeno ponašanje može da leži u nekompatibilnosti dva dodatka u usvojenim uslovima negovanja.

#### 4.2.2. Efektivni parametri smičuće čvrstoće

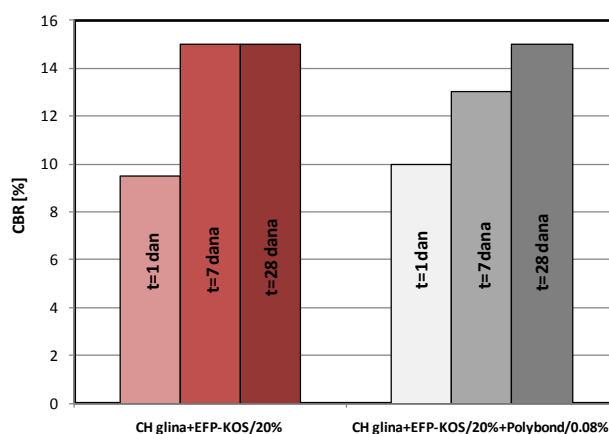
Dobijeni rezultati (Slika 9) pokazuju da se ugao smičuće čvrstoće  $\phi'$  nakon jednog dana neznatno povećao za mešavinu sa oba dodatka. Rezultati dobijeni nakon 28 dana ukazuju na neosetljivost ovog parametra na proteklo vreme. Tretiranjem ove vrste tla primenom oba aditiva zabeleženo je značajno povećanje kohezije nakon jednog dana (oko 93%), koja slično jednoaksijalnoj čvrstoći pokazuje trend stagnacije.



Slika 10. Promena efektivnih parametara smičuće čvrstoće

#### 4.2.3. Kalifornijski indeks nosivosti - CBR

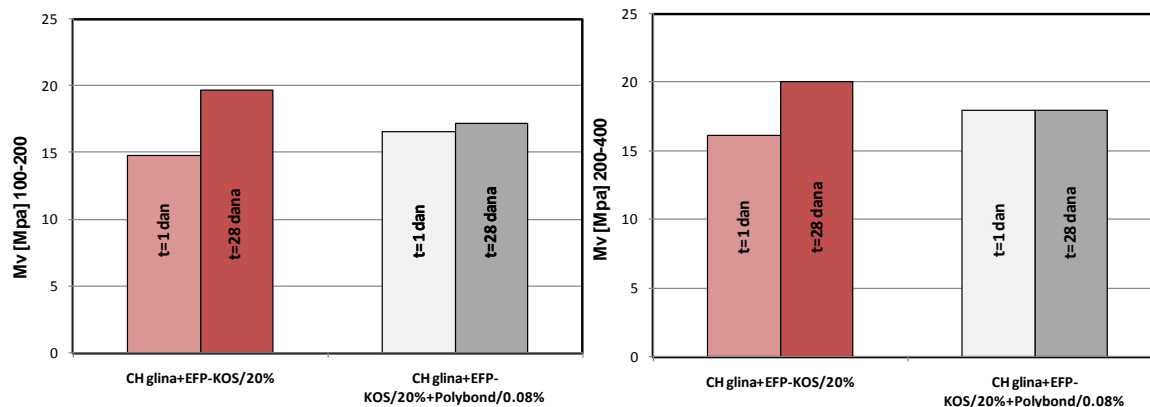
Rezultati ispitivanja Kalifornijskog indeksa nosivosti prikazani su na Slici 10. Sa priloženih dijagrama može se uočiti da su CBR vrednosti nakon 28 dana za mešavine sa i bez Polybonda praktično jednake. Dobijeni trendovi povećanja CBR vrednosti, kao i neosetljivost pomenutog parametra na dodatak Polybonda su očekivani, uzimajući u obzir izrazito visoke CBR vrednosti etalona pepela (58%).



Slika 10. CBR vrednosti

#### 4.2.4. Parametri deformabilnosti

Na Slici 11 prikazani su moduli stišljivosti  $M_v$  za intervale vertikalnih napona 100-200 kPa i 200-400 kPa. Dobijeni rezultati ukazuju na neosetljivost parametara deformabilnosti na dodatak Polybonda. Slično kao i u slučaju CBR vrednosti, i ovde pepeo igra dominantnu ulogu, koja je naročito izražena sa povećanjem starosti uzoraka.



Slika 11. Moduli stišljivosti

#### 4.2.5. Bubrenje

Rezultati ranije sprovedene Studije pokazali su da se tretiranjem visoko plastične gline (Radljevo) pepelom EFP-KOS njena sklonost ka bubrenju potpuno eliminiše. Kombinovano dejstvo pepela i Polybonda potvrdilo je prethodno uočen trend sa stanovišta bubrenja.

#### 4.2.6. Koeficijent vodopropusnosti

Za razliku od Polybonda, kostolački pepeo zbog krupnije granulometrijske kompozicije deluje nepovoljno sa stanovišta vodopropusnosti. Dodatak pepela povećava vodopropusnost razmatrane visokoplastične gline i na taj način čini je manje podesnom za primenu u izradi nasipa i hidrotehničkih objekata. Tretiranjem mešavine tla i pepela Polybondom, koeficijent vodopropusnosti je značajno smanjen, pa dobijeni rezultati ( $k=2,87e-9$  m/s) ukazuju da pomenuta mešavina prema klasifikaciji Terzaghi-Peck [5] predstavlja materijal veoma male vodopropusnosti.

### 5. ZAKLJUČAK

Rezultati sprovedenih ispitivanja jasno ukazuju na pozitivne efekte stabilizacije gline Polybondom i potvrđuju stavove da se može uspešno primeniti kao stabilizator glinovitih vrsta tla u različitim praktičnim primenama kao što su: stabilizacija slabo nosivog tla, izgradnja nasipa i geotehničkih konstrukcija male vodopropusnosti, poboljšanje mehaničkih osobina gornjih slojeva donjeg stroja saobraćajnica itd. Rezultati sprovedenih ispitivanja su pokazali da se kombinovanim dejstvom letećeg pepela i Polybonda značajno smanjuje koeficijent vodopropusnosti. Kombinacijom pepela i Polybonda kao stabilizatora postižu se i poboljšanja mehaničkih karakteristika i smanjenja vodopropusnosti, čime se ova kombinaciju preporučuje za stabilizaciju pri izgradnji hidrotehničkih nasipa.

#### Literatura

- [1] SuperRoads - Inovativna tehnologija u izgradnji puteva - <http://superroads.rs/technology.html>
- [2] Studija „Upotreba letećeg pepela termoelektrana za stabilizaciju tla, samozbijajući i valjani (RCC) beton sa osvrtom na trajnost cementnih maltera i sitnozrnih betona“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [3] ASTM C618-15: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, 2015.
- [4] STO 69646750-001-2011: Soil and asphalt-granules-concrete mixtures reinforced with soil stabilizer Polybond for use during automobile road, railroad and airfield constructions, SuperRoadRus, 2011.
- [5] Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley. USA, 1967.
- [6] SRPS U.B1.050:1970: Geomehanička ispitivanja - Ispitivanje otpornosti cementom stabilizovanog tla prema mrazu, Institut za standardizaciju Srbije, 1970.