

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.11>

Slijeganje temelja na ojačanom tlu (cement, staklo)

Settlement of foundations on reinforced soil (cement, glass)

Matej Lozančić¹, Maja Prskalo¹

(1) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina, matej.lozancic@fgag.sum.ba, maja.prskalo@fgag.sum.ba

Sažetak

U radu su razmatrana trenutna i konsolidacijska slijeganja kvadratnog temelja za dvije različite geomehaničke sredine. Prvi slučaj je pjeskovito tlo ispod kojeg se nalazi sloj gline, a druga geomehanička sredina je pjeskovito tlo u mješavini sa šljunkom te ojačano cementnim prahom (30%) i staklenim vlaknima (1%) ispod kojeg se nalazi glina. Dobiveni rezultati slijeganja pokazuju dobru stabilizaciju tla i povoljne geomehaničke karakteristike ojačanog tla koji se ogledaju u manjoj vrijednosti ukupnog slijeganja temelja koja zadovoljava maksimalnu dopuštenu vrijednost definiranu Eurocode-om. U radu su prikazana slijeganja kroz vremensko razdoblje od 120 dana, prikazano je konačno, dugoročno slijeganje ispod temelja kao i diferencijalni omjer (δ/L) slijeganja temelja. Proračun trenutnog slijeganja vršen je prema teoriji elastičnosti odnosno konsolidacijsko slijeganje prema Terzaghi-ju.

Ključne riječi: slijeganje, Terzaghi, pijesak, cementni prah, staklena vlakna, glina, diferencijalno slijeganje

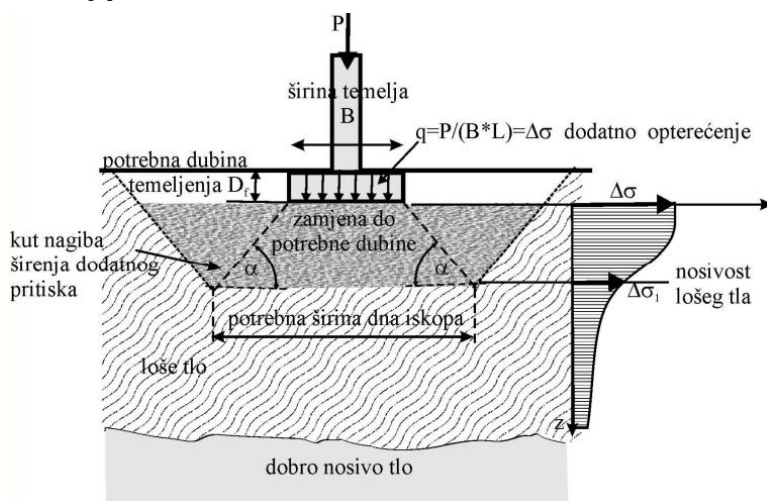
Abstract

The paper considers the instantaneous and consolidated settlements of a square foundation for two different environments. The first case is sandy soil with a layer of clay underneath, and the second environment is sandy soil mixed with gravel and reinforced with cement powder (30%) and glass fibers (1%) with clay underneath. The obtained settlement results show good soil stabilization and favorable geomechanical characteristics of the reinforced soil, which are reflected in a lower value of the total settlement of the foundation, which meets the maximum allowable value defined by Eurocode. The paper presents settlements over a time period of 120 days, shows the final, long-term settlement under the foundation, as well as the differential ratio (δ/L) of the foundation settlement. The calculation of instantaneous settlement was performed according to the theory of elasticity, i.e. consolidation settlement according to Terzaghi.

Keywords: settlement, Terzaghi, sand, cement dust/powder, glass fiber, clay, differential settlement

1. Uvod

Poboljšana, stabilizirana tla imaju sve veću primjenu u današnjem vremenu. Korištenje ojačanog, stabiliziranog odnosno armiranog tla prvi je definirao Francuz H. Vidal 1966. godine za potrebe izgradnje potpornih zidova koristeći sustav u kojem se koristi armatura čeličnim trakama. Ova metoda se uspješno koristila u različitim područjima, a najviše za potporne zidove, brane, upornjake mosta [1] [2]. Klasičan pristup poboljšanju podtemelnog tla i najstariji poznati način jeste zamjena materijala. Važno je razlikovati postupke zamjene, kada je razina podzemne vode duboko ispod temeljne plohe i postupak kada je razina podzemne vode neposredno ispod temeljne plohe, a može biti i na površini terena. Prikazana analiza obuhvaćena radom proučava slijeganje temelja na prostoru koji naliježe na pijesak i šljunak, što je karakteristika područja Mostara. Na slici 1. prikazano je slabo nosivo tlo koje je potrebno zamijeniti boljim materijalom, ali ne u cijelosti nego samo do određene dubine [2].



Slika 1. Zamjena nasipom tražene zbijenosti iznad razine podzemne vode [2]

U današnje vrijeme armiranje tla se vrši geosintetikom koja povećava vlačnu čvrstoću i nosivost na smicanje, a za cilj ima i smanjenje deformacija konstrukcije. Diljem svijeta mnogi znanstvenici proučavali su tla ojačana prirodnim ili sintetičkim vlaknima kao i poboljšanja nosivosti koristeći šljunak ili cementni prah. Jedni od mnogih koji su se bavili stabilizacijom tla jesu Santoni, Tingle, Webster (2001), Tallapragada, Sharma, Meshram (2009), Attom, Al-Tamimi (2010), Chegenizadeh, Nikraz (2012), Mali, Singh (2013), Singh, Bagra (2013), Rabindra, Pradhan, Naik (2014), Kumar, Shanmuga, Kalyan Kumar (2015), [1] [3] [4]. Danas je u svijetu široko rasprostranjena tehnika ojačanja tla staklenim vlaknima [5]. Staklena vlakna imaju dugi vijek trajanja i u poređenju s prirodnim vlaknima nisu biološki razgradiva. U ovom radu prikazat će se i proučiti ponašanje pješčano-šljunčanog tla ojačanog sa 30% cementnog praha i 1% staklenih vlakana [6].

2. Korišteni materijali

Staklena vlakna (GF) i prašina iz cementne peći (CKD) korišteni su kao materijal koji se miješa s različitim vrstama tla. Staklena vlakna se koriste kao sredstvo za ojačanje zbog svoje visoke čvrstoće, krutosti, visokog omjera površine i težine te dimenzijske stabilnosti [6]. Karakteristike koje su navedene u studijama [7] [8] [9] [10] [11] o tlima ojačanim vlaknima pokazale su povećanje čvrstoće materijala. Prašina iz cementne peći jedan je od otpada koji nastaje tijekom procesa kalcinacije u peći kao sekundarni proizvod u proizvodnji portland cementa.

U usporedbi s neojačanim tlom, korištenje cementnog praha (CKD) u stabilizaciji tla s različitim postocima poboljšava zbijenost, čvrstoću i početnu krutost [12]. Provedena je eksperimentalna studija [6] kako bi se pokazao utjecaj cementnog praha i staklenih vlakana (Slika 2.) na svojstva mješavine sačinjene od pijeska i šljunka (SG) u omjeru 1:2. U smjesu su dodavani cementni praha s udjelom 30%, 40 % i 50 % te staklena vlakna s udjelom 1%, 2% i 3% od težine suhe mješavine pijeska i šljunka.



Slika 2. Staklena vlakna [1]

3. Eksperiment

Ispitivanje se vršilo na lokalnim uzorcima pijeska koji su definirani u [6], na osnovu čega je izvršena klasifikacija te popisana njegova geomehanička svojstva [6]. Takav pijesak je pomiješan sa finim drobljenim šljunkom 2,36-10 mm te staklenim vlaknima (staklo tipa E) promjera 0,013 mm izrezanim na duljine od 18 mm. Tlo je pomiješano sa cementnom prašinom dobivenom iz tvornice cementa.

Cilj istraživanja je ponuditi jasne eksperimentalne dokaze ponašanja pjeskovito-šljunčanog tla kroz primjenu testova zbijanja (Proctorov pokus) u pet slojeva, 25 udaraca za svaki sloj kako bi se dobila maksimalna specifična gustoća tla (γ) i optimalni sadržaj vlage. Također istražena je tlačna čvrstoća za mješavinu pijesak-šljunak (SG) – cementna prašina (CKD) – staklena vlakna (GF). Rezultati Proctorovog testa (tablica 1) pokazali su da je najbolje

ponašanje tla za udio staklenih vlakana (GF) 1% i udio cementne prašine (CKD) 30 % jer se tada povećala suha gustoća tvari (MDD), a smanjio se sadržaj vlage (OMC).

Tablica 1. Parametri zbijanja za mješavinu SG – CKD - GF [6]

SG (%)	CKD (%)	GF (%)	OMC (%)	MDD (kN/m ³)
70	30	1	8. 18	21. 6
		3	9. 48	21. 1

Ispitivanje tlačne čvrstoće (q_u) vršilo se na kockama dimenzija 7x7x7 cm korištenjem univerzalnog hidrauličnog ispitnog stroja [6]. Rezultati (tablica 2) pokazuju da je maksimalna tlačna čvrstoća za SG – 30 % CKD bila na 56 dana. Dodavanje staklenih vlakana (GF) povećava se tlačna čvrstoća, a maksimalna vrijednost dostiže se nakon 90 dana.

Tablica 2. Tlačna čvrstoća (q_u) [6]

SG (%)	CKD (%)	GF (%)	q_u (kN/m ²)					$q_{u \max}$
			7 dana	14 dana	28 dana	56 dana	90 dana	
70	30	0	4073	4976	5858	9409	8774	15321
		1	4770	6373	9984	11280	15321	

Pored svih dobivenih vrijednosti za naš rad najvažniji su Young-ov modul elastičnosti, specifična težina [6].

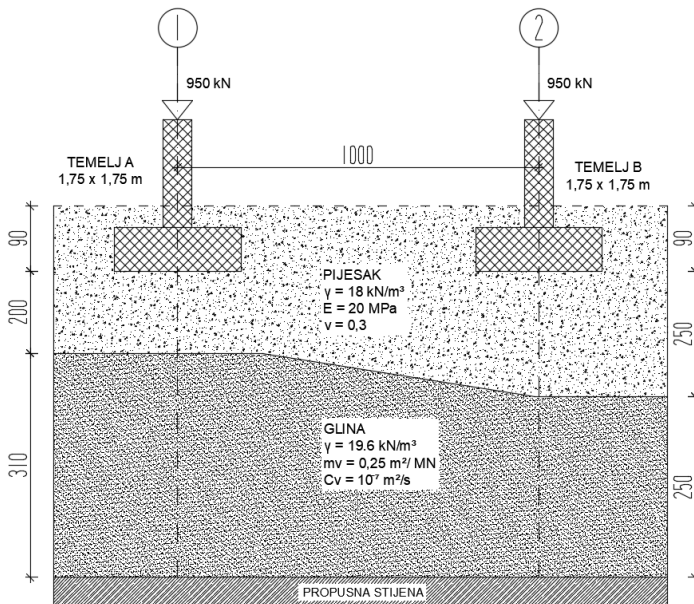
Tablica 3. Mehaničke karakteristike smjese [6]

SMJESA	SPEC. TEŽINA γ (kN/m ³)	TLAČNA ČVRSTOĆA q_u (kN/m ²)	YOUNG-ov MODUL E (kN/m ²)	KOHEZIJA $C=0,5 \cdot q_u$ (kN/m ²)
SG + 30% CKD	21.6	9409	$1,36 \cdot 10^7$	4705
SG+30% CKD+1%GF	21.6	15321	$1,73 \cdot 10^7$	7661

Za analizu problema slijeganja ojačanog tla uzet će se mehaničke karakteristike smjese pijesak i šljunak pomiješane s 30% cementnog praha i 1% staklenih vlakana.

4. Analitičko rješavanje problema

Promatrana su dva temelja samca (slika 3. temelj A i temelj B) koja se nalaze na udaljenosti od 10 m. Dubina temeljenja iznosi 0,90 m, temelji su kvadratni, dimenzija 1,75 x 1,75 m. Opterećeni su koncentriranom tlačnom silom u iznosu od 950 kN. Geomehaničke karakteristike gornjeg sloja pijeska, i donjeg sloja gline (tipična meka, srednje stišljiva glina [12] [13]) prikazane su na slici 3. Odredit će se trenutno slijevanje, konsolidacijsko slijevanje, konsolidacijsko slijevanje nakon 120 dana te dugoročno ukupno slijevanje temelja. Dakle, promatrat će se gornji sloj pijeska koji će se ojačati, a donji sloj gline ostaje nepromijenjen u oba slučaja. Kotirane dimenzije na slici 3. dane su u centimetrima.



Slika 3. Prikaz temelja – neojačano tlo

U nastavku će se prikazati proračun slijevanja za temelj A na neojačanom tlu, zatim će proračun za temelj B kao i proračuni na ojačanom tlu za temelj A i temelj B biti prikazani tablično.

Temelj A – trenutno slijevanje na pjeskovitom tlu odredit će se prema teoriji elastičnosti [14]:

$$S_i = q \cdot B \cdot \left[\frac{1 - \nu^2}{E} \right] \cdot I_f \quad (1)$$

gdje je [15]:

q – intenzitet opterećenja temelja

$$q = \frac{F}{A} = \frac{950}{1,75 \cdot 1,75} = 310,20 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

B – širina temelja, B = 1, 75 m

ν – Poissonov koeficijent, $\nu = 0, 30$

E – Modul elastičnosti tla, E = 20 MPa = 20 000 kN/m²

I_r – faktor oblika temelja, B/L=1,0 → $I_r = 1,12$ [14]

Uvrštavanjem u jednadžbu (1) dobit će se trenutno slijeganje $S_i = 0, 0276 \text{ m} = 27, 60 \text{ mm}$

Prosječno ukupno slijeganje (konsolidacijsko) krutog temelja zbog sloja gline dano je izrazom:

$$S_c = m_v \cdot H \cdot \Delta\sigma \quad (3)$$

gdje je:

m_v = koeficijent promjene volumena (za srednje stišljivu glinu → $0, 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$)

H – debljina sloja tla, H = 3, 10 m

$\Delta\sigma$ – povećanje vertikalnog naprezanja u sredini sloja gline

$$\Delta\sigma = \frac{F}{(B + 2 \cdot n \cdot z)^2} = \frac{950}{(1,75 + 2 \cdot 0,5 \cdot 3,55)^2} = 33,82 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

Pretpostavljena raspodjela naprezanja 2:1 pa je $n = \frac{1}{2} = 0,5$

Udaljenost od dna temelja do središta sloja gline, $z = 2 + (3,1/2) = 3, 55 \text{ m}$

Uvrštavanjem u jednadžbu (3) dobit će se ukupno konsolidacijsko slijeganje $S_c = 26, 21 \text{ mm}$

Konsolidacijsko slijeganje nakon 120 dana određuje se preko vremenskog faktora:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{D^2} \quad (5)$$

gdje je:

C_v – koeficijent konsolidacije (za meke gline, tipično $C_v = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)

D – put drenaže (za jednosmjernu odvodnju dubina sloja, H=3, 10 m)

t – vrijeme u sekundama, $t = 120 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 10\,368\,000 \text{ s}$

Uvrštavanjem u jednadžbu (5) dobije se vremenski faktor $T_v = 0, 1079$

Preko vremenskog faktor određujemo stupanj konsolidacije U za koji vrijedi:

$$T_v = \frac{\pi}{4} \cdot U^2 \quad (6)$$

Za izračunati vremenski faktor preko (6) dobije se stupanj konsolidacije $U = 37, 06 \%$ za koji konsolidacijsko slijeganje nakon 120 dana iznosi:

$$S_{c,120} = 0,3706 \cdot 26,21 = 9,71 \text{ mm} \quad (7)$$

Ukupno slijeganje temelja A nakon 120 dana:

$$S_{tA,120} = S_i + S_{c,120} = 27,60 + 9,71 = 37,31 \text{ mm} \quad (8)$$

Ukupno slijeganje temelja A dugoročno nakon gradnje:

$$S_{tA} = S_i + S_c = 27,60 + 26,21 = 53,81 \text{ mm} > s_{max} = 50 \text{ mm} \quad (9)$$

Eurocode-om 7 [16] definirano je najveće prihvatljivo slijeganje **$s_{max} = 50 \text{ mm}$** [17], koje se odnosi na obične konstrukcije temeljene na temeljima samcima ili trakama. Stoga, može se zaključiti da slijeganje ne zadovoljava granično stanje uporabljivosti i može se izvršiti

ojačanje tla pomoću cementa i stakla i provesti proračun. Prije toga u tablici 4. prikazat će se rezultati za temelj B u neojačanom tlu.

Tablica 4. Temelj B, prikaz rezultata proračuna

Temelj B (neojačano tlo)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
27, 60 mm	310, 20 kN/m ²	19, 62 mm	31, 40 kN/m ²	0,166	45, 97 %	9, 02 mm	36, 68 mm	47, 28 mm

Oznake (1),(2)...(9) u tablici predstavljaju matematičke izraze po kojima je račun vršen. Ukupno slijeganje temelja B dugoročno nakon gradnje iznosi $47, 28 \text{ mm} < s_{\max} = 50 \text{ mm}$.

U nastavku je dan proračun temelja A i temelja B za ojačano tlo. Prvi sloj je ojačan, a čini ga mješavina pijesak i šljunak uz dodatak 30 % cementnog praha i 1 % staklenih vlakana, drugi sloj je glina i njezine geomehaničke karakteristike se nisu mijenjale (tipična meka, srednje stišljiva glina). Karakteristike prvog sloja (ojačanog) dobivene su eksperimentalno [6] i iznose $E = 17\,300 \text{ MPa}$, $\gamma_{\text{tla}} = 21,6 \text{ kN/m}^3$, $\nu = 0, 29$.

Tablica 5. Temelj A, prikaz rezultata proračuna

Temelj A (ojačano tlo)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0, 032 mm	310, 20 kN/m ²	26, 21 mm	33, 82 kN/m ²	0,1079	37, 06 %	9, 71 mm	9, 742 mm	26, 24 mm

Tablica 6. Temelj B, prikaz rezultata proračuna

Temelj B (ojačano tlo)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0, 032 mm	310, 20 kN/m ²	19, 62 mm	31, 40 kN/m ²	0,166	45, 97 %	9, 02 mm	9, 052 mm	19, 65 mm

U tablici 5. za temelj A i tablici 6. za temelj B vidi se izrazito malo slijeganje (1) u prvom (ojačanom) sloju i prisutno konsolidacijsko slijeganje (3) u glini. U konačnici stabilizacijom prvog sloja smanjili smo konačno dugoročno slijeganje koje je za temelj A dano u tablici 5. i iznosi 26, 24 mm (9), a što je manje od najvećeg prihvatljivog slijeganja $s_{\max} = 50 \text{ mm}$ [18].

Za prikazane temelje u ojačanom tlu diferencijalno slijeganje za 120 dana iznosi:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{S_{tA,120} - S_{tB,120}}{L} = \frac{9,742 - 9,052}{10\,000} = \frac{0,69 \text{ mm}}{10\,000 \text{ mm}} = \frac{1}{14492,75} \quad (10)$$

Za prikazane temelje u ojačanom tlu dugoročno diferencijalno slijeganje iznosi:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{S_{tA} - S_{tB}}{L} = \frac{26,24 - 19,65}{10\,000} = \frac{6,59\text{ mm}}{10\,000\text{ mm}} = \frac{1}{1517,45} \quad (11)$$

5. Zaključak

Na osnovu svega može se reći da je ojačanje tla prirodnim ili sintetičkim vlaknima sve prisutnija pojava u svijetu. Mnoga ispitivanja dala su odgovor o optimalnom postotku udjela različitih vrsta vlakana u smjesama i geomehničkim karakteristikama koje ta tla razvijaju [19] [20] [21] [22]. Razmatrani problem prekomjernog slijeganja riješen je ojačanjem tla pomoću cementnog praha i staklenih vlakana, što je rezultiralo povećanjem modula elastičnosti i direktno utjecalo na smanjenje trenutnog slijeganja u pjeskovitom tlu. Ukupno dugoročno slijeganje temelja A je 53,81 mm za neojačano tlo, kada smo tlo ojačali ukupno dugoročno slijeganje smanjilo se na 26,24 mm. Smanjenje slijeganja je 51,23 %. Jasno je da važnu ulogu ima cementni prah sa svojim udjelom 30 % od težine mješavine pijeska i šljunka. Na kraju su izvršene provjere za dugoročno diferencijalno slijeganje ojačanog tla (11) gdje se može uočiti razlika slijeganja između dva temelja od 6,59 mm kao i rotacija u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.

Literatura

- [1] Chib, S., V., Pathak, R.: Evaluation of Stiffness Modulus of Soil Reinforced with Glass Fiber, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 8 Issue 09, 2019., 29 str.-34. str.
- [2] Roje-Bonacci, T.: Potporne građevine i građevne jame, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2005.
- [3] E. Jalal, F., Zahid, A., Iqbal, M., Nassem, A., Nabil, M.: Sustainable use of soda lime glass powder (SLGP) in expansive soil stabilization, Case Studies in Construction Materials 17, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01559>
- [4] Pourabbas Bilondi, M., Mohsen Toufigh, M., Toufigh, V.: Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, Construction and Building Materials, 2018., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>
- [5] Bilgen, G.: Utilization of Powdered Glass as an Additive in Clayey Soils, Geotech Geol Eng, 2020., <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>
- [6] Mohamed, Mowafy, Y., Rushdy, Towfeek, A., Kamal, Mohamed, A.: Effect of glass fiber on sand – Gravel soil mixture stabilized by cement dust, International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering, 2017.
- [7] J.A. Baldovino, J., L.S. Izzo, R., L. Rose, J., D.I. Domingos, M.: Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization, Construction and Building Materials 271, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121874>

- [8] Nategh, M., Ekinci, A., Iravanian, A., Fahrioglu, M.: Enhancing Clay Soil's Geotechnical Properties Utilizing Sintered Gypsum and Glass Powder, Applied Sciences, MDPI, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14124961>
- [9] Rose, Benny, J., Jolly K, J., Mareena, Sebastian, J., Thomas, M.: Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 6 Issue 05, 2017., 228. str.-231. str.
- [10] Arrieta, Baldovino, J., J., Santos, Izzo, R., Lundgren, Rose, J., Angelica, Avanci, M.: Geopolymers Based on Recycled Glass Powder for Soil Stabilization, Geotechnical and Geological Engineering, 2020., <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01274-w>
- [11] Kumar, Rai, A., Singh, G., Kumar, Tiwari, A.: Comparative study of soil stabilization with glass powder, plastic and e-waste: A review, Materials Today: Proceedings, 2020., <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.570>
- [12] Siyab, Khan, M., Tufail, M., Mateeullah: Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils, Civil Engineering Journal, Vol. 4, No. 9, 2018., <http://dx.doi.org/10.28991/cej-03091137>
- [13] Sokolić, I.: Primijenjena mehanika tla, Predavanja, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [14] Winterkorn, F., Fang, H.-Y.: Foundation Engineering Handbook, 2nd Ed. Wan Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [15] Roje-Bonacci, T.: Mehanika tla, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2017.
- [16] EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General Rules
- [17] Szavits-Nossan, A.: Temeljenje - Plitki temelji, Predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 10.-11., 2012.
- [18] Akmadžić, V., Lozančić, M., Primorac, M.: 'Hercule Poirot and supports settlement', e-Zbornik, elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, vol. 15 br. 29, 2025., str. 30-42., <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2025.29.15.30>
- [19] AbdulZahra, Mahdi, Z., S., Al-Hassnawi, N.: Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Volume 9, Issue 10., 2018.
- [20] Olufowobi, J., Ogundoku, A., Michael, B., Aderinlewo, O.: Clay soil stabilisation using powdered glass, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 9, No. 5, 541 - 558 str., 2014.
- [21] A. Blayi, R., Far, H. Sherwani, A., Hashim, Ibrahim, H., H. Faraj, R., Daraei, A.: Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder, Case Studies in Construction Materials, 2020., <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>
- [22] Mariakova, D., Vlach, T., Pavlu, T.: Glass waste powder utilization in high performance concrete, Acta Polytechnica CTU Proceedings 21:24–27, 2019., <https://doi.org/10.14311/APP.2019.21.0024>