

Primljen / Received: 13.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 7.11.2017.

Prihvaćen / Accepted: 4.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.8.2018.

Geotehnička svojstva i nosivost zgre iz visoke peći

Autori:



Inci Develioğlu, dipl.ing.građ.
Sveučilište İzmir Katip Çelebi, Turska
Fakultet građevinarstva i arhitekture
Odjel za građevinarstvo
inci.develioğlu@ikc.edu.tr



Doc.dr.sc. **Hasan Firat Pulat**, dipl.ing.građ.
Sveučilište İzmir Katip Çelebi, Turska
Fakultet građevinarstva i arhitekture
Odjel za građevinarstvo
hfirat.pulat@ikc.edu.tr

Prethodno priopćenje

Inci Develioğlu, Hasan Firat Pulat

Geotehnička svojstva i nosivost zgre iz visoke peći

U radu su analizirana geotehnička svojstva i nosivost zgre iz visoke peći. Ispitivanja CBR vrijednosti provedena su sa sitnozrnim i krupnozrnim uzorcima zgre iz visokih peći. Uzorci za ispitivanje CBR-a pripremljeni su standardnim i modificiranim energijama zbijanja. Za ispitivanje učinka fluida u porama na nosivost, pripremljeni su uzorci s vodom iz vodovoda i s morskom vodom. Rezultati ispitivanja pokazali su da sitnozrni uzorci imaju veće CBR vrijednosti u usporedbi s krupnozrnim, a energija zbijanja je bila parametar koji je najviše utjecao na vrijednosti CBR-a. Veće CBR vrijednosti pripadale su uzorcima koji su pripremljeni i njegovani s morskom vodom.

Ključne riječi:

zgra iz visoke peći, nosivost, energija zbijanja, veličina zrna

Scientific Paper - Preliminary report

Inci Develioğlu, Hasan Firat Pulat

Geotechnical properties and bearing capacity of blast furnace slag

Geotechnical properties and bearing capacity of blast furnace slag are analysed in this study. CBR tests were performed using fine and coarse grained samples of blast furnace slag. The CBR test samples were prepared using standard and modified compaction energies. To examine the effect of pore fluid on bearing capacity, samples were prepared with tap and sea water. Test results show that fine grained samples have higher CBR values compared to coarse grained samples. Compaction energy exerted the greatest influence on CBR results and higher CBR values were obtained for samples prepared and cured with sea water.

Key words:

blast furnace slag, bearing capacity, compaction energy, grain size

Vorherige Mitteilung

Inci Develioğlu, Hasan Firat Pulat

Geotechnische Eigenschaften und Tragfähigkeit der Schlacke aus dem Hochofen

In der Abhandlung werden die geotechnischen Eigenschaften und die Tragfähigkeit der Schlacke aus dem Hochofen analysiert. Die Untersuchungen des CBR-Wertes wurden mit feinkörnigen und grobkörnigen Schlackeproben aus dem Hochofen durchgeführt. Die Proben aus der CBR-Untersuchung wurden durch standardmäßige und modifizierte Verdichtungsenergien vorbereitet. Für die Untersuchung der Wirkung von Fluid in den Poren auf die Tragfähigkeit wurden die Proben mit Wasser aus der Wasserleitung und mit Meerwasser vorbereitet. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die feinkörnigen Proben einen höheren CBR-Wert im Vergleich zu den grobkörnigen aufweisen, und die Verdichtungsenergie war der Parameter, der sich am meisten auf die CBR-Werte auswirkte. Die höheren CBR-Werte gehörten zu den Proben, die mit Meerwasser vorbereitet und gepflegt wurden.

Schlüsselwörter:

Schlacke aus dem Hochofen, Tragfähigkeit, Verdichtungsenergie, Korngröße

1. Uvod

Nepovoljni učinci građevnih materijala korištenih na terenu, kao što su staklenički plinovi, emisije CO₂, naveli su istraživače na potragu za manje štetnim alternativnim materijalima [1-5]. Zgura iz visoke peći (eng. blast furnace blast - BFS) jedan je od otpadnih materijala koji se ponovno upotrebljava u raznim građevinskim projektima kao što su izgradnja cesta, poboljšanje tla, proizvodnja miješanog transportnog betona [6-10]. Buddhdev i Varia (2014.) ispitali su kemijska i fizikalna svojstva BFS-a za upotrebu kao finog agregata u proizvodnji betona za kolnike. Navedene vrijednosti specifične gustoće BFS-a bile su između 2,46 do 3,04. Prosječna masa po jedinici volumena iznosi od 1,48 kg/cm³ i 1,66 kg/cm³ za rasute i zbijene uzorke. Istraživači su izvijestili da se BFS može koristiti kao fini agregat u proizvodnji betona za kolnike. BFS se također koristi kao materijal za poboljšanje tla posebno za ekspanzivne gline, [11]. Cokca i sur. [12] koristili su granuliranu trosku iz visokih peći (GBFS) i cement proizveden od granulirane troske iz visokih peći (GBFSC) kako bi se smanjio pretjerani potencijal bubrenja ekspanzivne gline. GBFS i GBFSC dodani su u uzorak tla u omjerima od 5 do 25 %. U ovom istraživanju utvrđeni su raspodjela veličine zrna, granice konzistencije, brzina bubrenja i postotak bubrenja za različite smjese. Analize čestica pokazale su da se dodavanjem GBFS-a i GBFSC-a smanjuju frakcije gline i povećavaju frakcije PRAHA. Dok je indeks plastičnosti i postotak bubrenja smanjen, kod svih uzoraka dodavanjem GBFS i GBFSC povećala se specifična težina. Ispitivači su izvijestili kako je, uzimajući u obzir ekološke čimbenike, najbolji izbor dodavanje 15 % BFS-a, [12]. Sivrikaya i sur. (2014.) istražili su potencijalnu upotrebu granulirane troske iz visokih peći (GBFS) za stabilizaciju Kolsuzove gline niske plastičnosti i bentonitnih gline visoke plastičnosti. Uzorci su pripremljeni u omjerima od 5 %, 10 %, 20 %, 30 % i 50 % te su određene jedinične težine, Atterbergove granice i parametri zbijanja. Granica plastičnosti stabilizirane Kolsuzove gline povećana je s 19 % na 21 %, a granica tečenja smanjena s 28 % na 21 % (PI = 0). Za bentonitnu glinu granica je plastičnosti stabiliziranog uzorka povećana s 32 % na 55 %, a granica tečenja smanjena s 212 % na 147 %. Indeks plastičnosti također je smanjen sa 180 % na 92 %. Rezultati ispitivanja zbijenosti pokazuju da je optimalni sadržaj vode stabiliziranih uzoraka u rasponu od 14,2 % do 14,9 %, a maksimalna jedinična težina u suhom stanju iznosila je od 17,6 do 18,2 kN / m³ za Kolsuzovu glinu. Optimalni udio vode stabiliziranih uzoraka bio je u rasponu od 16,8 % do 17,5 %, a najveće jedinične težine u suhom stanju iznosile su od 15,65 do 16,41 kN/m³ za bentonitnu glinu [13]. O'Kelly je istražio geotehnička svojstva dviju granuliranih BFS-a [7]. Utvrđene su specifične težine, maksimalne gustoće u suhom stanju, kutovi unutarnjeg trenja, koeficijenta propusnosti, pH-vrijednost i CBR vrijednosti (eng. *California Bearing Ratio* - CBR) BFS-a. BFS uzorci su razvrstani i označeni kao dobro graduirani šljunkoviti pijesak prema USCS klasifikaciji (sustav jedinstvene klasifikacije za inženjerske potrebe). Specifične gustoće su bile 2,41 i 2,67, pH-vrijednost je bila 12, a gustoće u suhom stanju

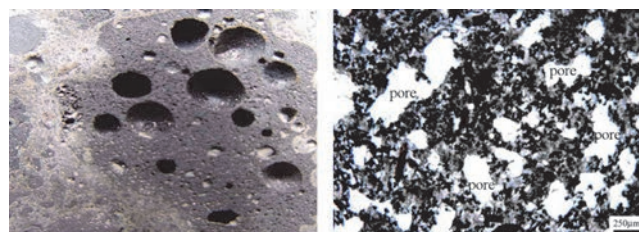
bile su 1,34 i 1,47 t / m³. Vrijednosti kutova unutarnjeg trenja bile su između 39° i 40°, a vrijednosti koeficijenta propusnosti 1,8 - 3,4 10⁻³ m/s. Izmjerene CBR-vrijednosti kretale su se od 16,0 do 31,1. Istraživač je naglasio da je BFS pogodan za izvedbu nasipa autocesta.

Prethodna istraživanja pokazala su kako se CBR povećava porastom usisa ili smanjenjem stupnja saturacije [14-19]. Slično tome mišljenju, široko je prihvaćeno da su CBR vrijednosti iznimno povezane sa stupnjem zbijanja i udjelom vode [20, 21]. Na temelju ovih podataka, nosivost BFS-a ispitivana je kako bi se dobili daljnji eksperimentalni podaci, odnosno razjasnile ovisnosti CBR-a o različitim inženjerskim materijalima.

U ovom istraživanju laboratorijskim eksperimentima analizirana su geotehnička svojstva i nosivost zgure iz visokih peći. Utvrđena su svojstva geotehničkog indeksa zgure iz visokih peći, provedene su analize rendgenske difrakcije (XRD) za određivanje kemijskog sastava uzoraka, a zatim su istraženi učinci različitih parametara na nosivost BFS-a. CBR ispitivanja provedena su na sitnozrnim i krupnozrnim uzorcima. Ispitni uzorci pripremljeni su u optimalnoj vlažnosti primjenom standardnih i modificiranih energija zbijanja, a zatim su ispitani odmah ili nakon 96 sati sušenja (stvrđnjavanja). Za ispitivanje učinaka fluida u porama na nosivost i kemijski sastav BFS-a, kao fluid u porama korištene su morska voda i voda iz slavine.

2. Materijal i metode

BFS je materijal nusproizvoda dobivenog tijekom proizvodnje čelika u visokoj peći. BFS se granulira naglim hlađenjem i zatim melje. BFS ima granuliranu strukturu nakon što se naglo ohladi vodom [7, 12]. Volumna masa BFS-a je manja od klasičnog kamena, jer ima porozniju strukturu [22]. Sastav i struktura BFS-a prikazani su na slici 1.

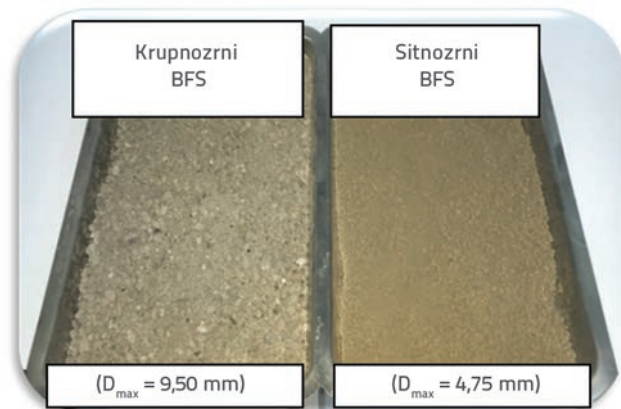


Slika 1. Sastav i struktura zgure iz visokih peći [22]

Zgura iz visokih peći se obično sastoji od vapna (CaO), magnezijeva oksida (MgO), silicijeva dioksida (SiO₂), aluminijeva oksida (Al₂O₃), sumpora (S), željeznog oksida (Fe₂O₃) i manganovog oksida (MnO) [7]. U ovom istraživanju provedene su analize rendgenske difrakcije (XRD) za čisti (prirodni) uzorak i za BFS uzorke pomiješane s morskom vodom i vodom iz slavine. BFS materijal dobiven je od Özerdem Demir Contracting Construction Marketing Industry and Trade Limited Company sa sjedištem u Aliaga, İzmir, Turska.

Čestice veće od 9,5 mm uklonjene su prema ograničenjima veličine čestica koje su definirane u ASTM normama. BFS

materijali su podijeljeni u dva dijela, a zatim su u geotehničkom laboratoriju (slika 2.) određene inženjerske značajke sitnozrnih ($D_{max} = 4,75$ mm) i krupnozrnih ($D_{max} = 9,50$ mm) uzoraka (slika 2.).



Slika 2. Krupnozrni i sitnozrni BFS uzorci

Raspodjela veličine čestica određena je prema ASTM-D422-07 [23]. I krupnozrni i sitnozrni BFS uzorci sušeni su u peći, a zatim ispirani kroz sito br. 200 (0,075 mm), sve dok voda nije bila čista. Materijal zadržan na situ skupljen je i osušen, te je provedena analiza suhog sijanja. Granice plastičnosti i tečenja, poznate i kao Atterbergove granice, određene su prema ASTM-D4318-10 [24]. Pokus s padajućim šiljkom služio je za određivanje granica tečenja krupnozrnih i sitnozrnih uzoraka. Krupnozrni i sitnozrni BFS uzorci klasificirani su pomoću granulometrijskog dijagrama i graničnih vrijednosti konzistencije prema ASTM-D2487-11 [25]. Specifična gustoća BFS-a određena je pomoću staklenog piknometra od 500 ml i vakuumske crpke prema ASTM D854-14 [26].

Vrijednosti pH sitnozrnih i krupnozrnih BFS uzoraka određene su metodom koju je predložio Kocasoy (1994.) [27]. Suspenzija je dobivena miješanjem 50 g BFS uzorka i 125 ml destilirane vode. Stajala je 24 sata, a zatim je digitalnim pH mjerачem izmjerena pH-vrijednost. Svako je ispitivanje provedeno dva puta kako bi se provjerila ponovljivost mjerenja.

Za određivanje optimalne vlažnosti i maksimalne gustoće u suhom stanju provedeno je standardno i modificirano Proctorovo ispitivanje (SP i MP) prema ASTM D698-07 i ASTM D1557-12e1 [28, 29].

CBR test je empirijski penetracijski pokus koji se općenito primjenjuje za agregate i građevne materijale. Ova metoda primjenjiva je na većini vrsta tla u rasponu od teške gline do šljunkovitih materijala srednje veličine. CBR pokusom izravno se dobiva nosivost, a neizravno posmična čvrstoća. Provedena ispitivanja pokazala su da rezultati ispitivanja uvelike ovise o stupnju zbijanja i vlažnosti [20, 21]. CBR pokusi provedeni su prema ASTM D1883-16 [30]. Uzorci za ispitivanje CBR-a priređeni su pri optimalnoj vlažnosti dobivenoj iz standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa. Osim toga, ispitivanje utjecaja kondenzacije vlage na nosivost imalo je dva različita

scenarija. Prvo, CBR pokus proveden je neposredno nakon pripreme uzoraka.

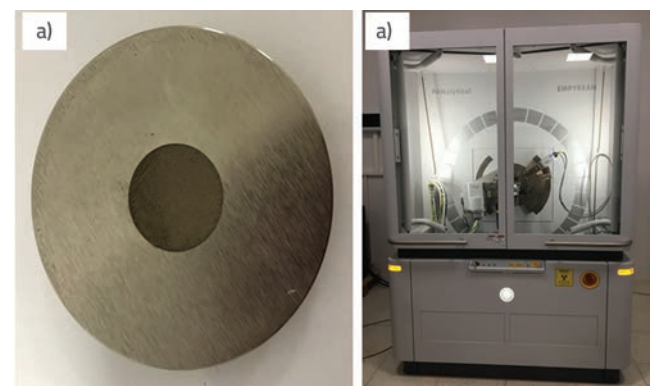
U drugom scenariju, nakon što su uzorci pripremljeni pri optimalnom udjelu vode, ostavljeni su 96 sati za sušenje pod dodatnim opterećenjem od 4,54 kg, a zatim je proveden CBR pokus (slika 3.).



Slika 3. Stvrdnuti (osušeni) uzorak za CBR pokus

Primijenjene razine napreznja dobivene su za unaprijed određene penetracijske točke sa standardnom brzinom opterećenja CBR pokusa od 1,27 mm / min prema ASTM-D1883-16 [30]. Maksimalni kapacitet laboratorijskog uređaja za ispitivanja CBR-a je 45 kN. Za određivanje CBR vrijednosti ispravljena vrijednost napreznja, koja odgovara penetraciji od 0,2 inča (5,08 mm) u krivulji napreznje-penetracija, podijeljena je sa standardnim opterećenjem od 1500 psi (10 MPa) i pomnožena sa 100. Za ispitivanje učinaka fluida pora na svojstva nosivosti, u postupcima pripreme uzoraka i sušenja korištena je morska voda i voda iz slavine.

Analiza ionske kromatografije provedena je pomoću uređaja GP50 Dionex IC te je utvrđen ionski sastav prirodne morske vode. Za određivanje kemijskog sastava BFS-a, analize rendgenske difrakcije (XRD) provedene su za čiste (prirodne) uzorke i BFS uzorke pomiješane s morskom vodom i vodom iz slavine. Prvo, uzorci su prosijani na situ br. 200 (0,075 mm). Čist (prirodni) uzorak izravno je ispitan.

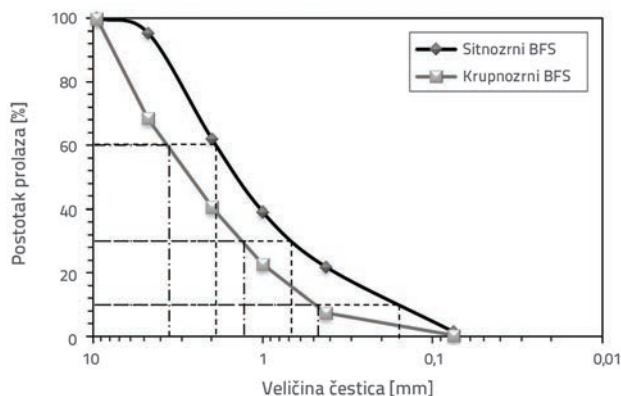


Slika 4. a) Uzorak postavljen na ploču za uzorke; b) XRD uređaj

Drugi uzorci pomiješani su s vodom iz slavine i s morskom vodom pri optimalnoj vlažnosti i zatim osušeni u peći. Analiza je obavljena na Sveučilištu Izmir Katip Çelebi u središnjem istraživačkom laboratoriju. Uzorak je postavljen na ploču za uzorke s malim izbočinama (slika 4.a). Zatim je analiza provedena pomoću uređaja PANalytical - model Empyrean XRD (slika 4.b).

3. Rezultati i rasprava

Raspodjela veličine zrna sitnozrnih i krupnozrnih BFS uzoraka prikazana je na slici 5. Slika 5. prikazuje da čestice manje od 0,075 mm predstavljaju vrlo mali dio ukupne količine za dva uzorka.



Slika 5. Raspored sitnozrne i krupnozrne BFS

Dobivena svojstva geotehničkog indeksa BFS uzoraka sažeta su u tablici 1. Klasifikacija je provedena ovisno o rezultatima granulometrijskog dijagrama i Atterbergovih granica, prema sustavu jedinstvene klasifikacije za inženjerske potrebe (USCS) [31].

Tablica 1. Svojstva geotehničkog indeksa BFS uzoraka

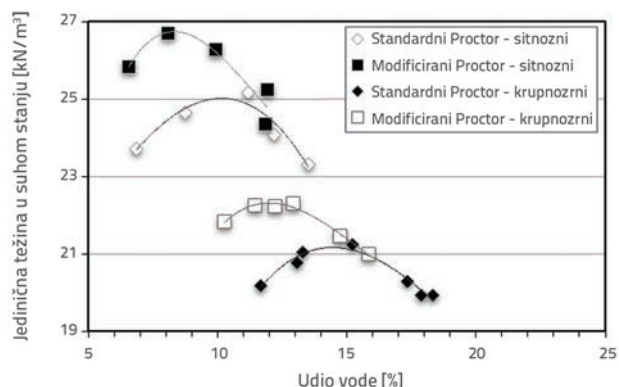
Svojstva	Sitnozrni BFS	Krupnozrni BFS
Granica tečenja, w_L [%]	34,1	34,1
Granica plastičnosti, w_p [%]	NP	NP
Udio prirodne vode, w_n [%]	7,9	7,9
USCS	SW	SW
pH	9,8	10,2
Specifična težina, G_s	3,07	3,35

Kao rezultat provedenih laboratorijskih pokusa pokazalo se da prosječna vrijednost specifične gustoće BFS-a iznosi 3,21.

Tablica 3. Rezultati analize morske vode ionskom kromatografijom izraženo u [ppm] (eng. *parts per million*) upotrebljava se za izražavanje koncentracije u relativnim proporcijama (1 ppm = 10^{-6})

	Ca (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)	Cl (ppm)	Br (ppm)	SO_4^{-2} (ppm)	Sr (ppm)
Morska voda	486,6	12301,5	487,7	1481,4	23852,0	70,3	3115,2	15,5

Ispitivanje granične vrijednosti plastičnosti pokazalo je da je BFS neplastičan (NP) materijal. Krivulje zbijenosti sitnozrnih i krupnozrnih uzoraka dobivenih iz standardnih i izmijenjenih Proctorovih pokusa prikazane su na slici 6.



Slika 6. Krivulje zbijanja sitnozrne i krupnozrne zgre iz visokih peći

Slika 6. prikazuje da je optimalna vlažnost uzoraka sitnozrne i krupnozrne zgre iz visokih peći između 8,3 i 14,8% za standardnu i modificiranu energiju zbijanja. Maksimalna jedinična težina u suhom stanju uzoraka sitnozrne i krupnozrne BFS bila je u rasponu između 21,2 i 26,3 kN/m^3 za standardnu i modificiranu energiju zbijanja. U tablici 2. prikazane su optimalne vrijednosti vlage i maksimalne vrijednosti jedinične težine u suhom stanju. Analiza ionske kromatografije provedena je pomoću uređaja GP50 Dionex IC te utvrđen ionski sastav prirodne morske vode (tablica 3.). Analize rendgenske difrakcije (XRD) provedene su za čiste (prirodne) uzorke i BFS uzorke pomiješane s morskom vodom i vodom iz slavine. Omjeri kemijskih komponenti triju uzoraka sažeti su u tablici 4.

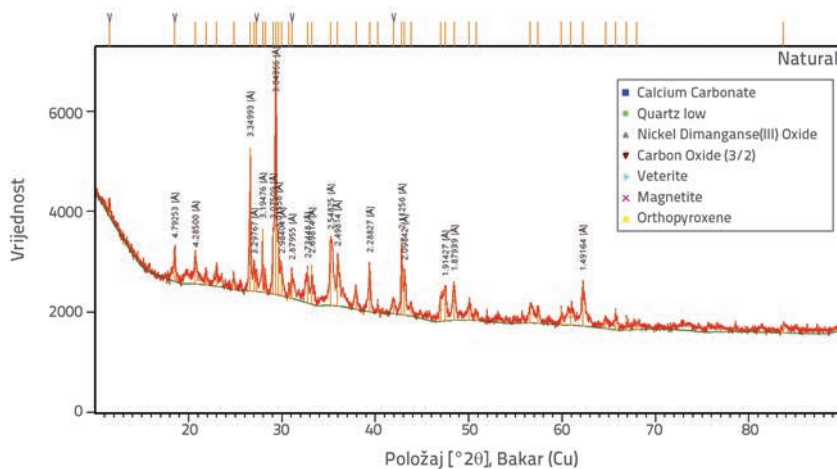
Tablica 2. Rezultati ispitivanja sitnozrnih i krupnozrnih BFS-a

Materijal	Vrsta pokusa	$\gamma_{d,max}$ [kN/m^3]	w_{opt} [%]
Sitnozrna zgura	Standardni Proctor	25,0	10,2
	Modificirani Proctor	26,3	8,3
Krupnozrna zgura	Standardni Proctor	21,2	14,8
	Modificirani Proctor	22,3	12,0

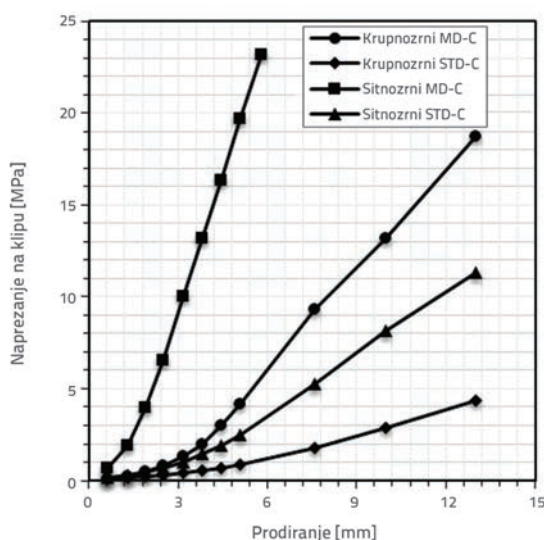
Kalcijev karbonat male čvrstoće bio je prilično visok u prirodnim uzorcima i uzorcima s vodom iz slavine; s druge strane, uzorak BFS pomiješan s morskom vodom ima visok omjer kalcita. Smatra se da je kalcijev karbonat transformiran u kalcit djelovanjem morske vode [32]. XRD spektar prirodnog uzorka BFS-a prikazan je na slici 7.

Tablica 4. Rezultati XRD ispitivanja BFS uzoraka

Sastojak	Vrsta uzorka	Prirodni uzorci [%]	Uzorci s vodom iz slavine [%]	Uzorci s morskom vodom [%]
Brucit		-	-	3,9
Kalcit		-	-	67,7
Kalcijev karbonat		29,1	35,1	-
Ugljikov dioksid lv		-	1,8	12,9
Ugljikov oksid (3/2)		12,4	-	-
Enstatit		-	25,5	-
Magneziferit		-	8,6	-
Magnetit		1,2	-	-
Nikal dimangan (III) oksid		6,2	-	-
Ortopiroksen		31,6	-	-
Alfa-kremant		8,1	-	-
Silicijev oksid alfa		-	-	15,5
Vaterit		11,4	29	-

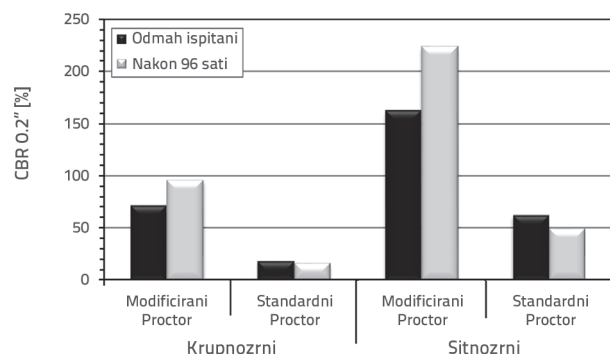


Slika 7. XRD spektar uzorka prirodnog BFS-a



Slika 8. CBR krivulje osušenih uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine

CBR krivulje koje se odnose na uzorke pripremljene pri optimalnom udjelu vlage s vodom iz slavine prikazane su na slici 8. CBR pokusi su izvedeni nakon što su uzorci sušeni tijekom 96 sati. Rezultati ispitivanja CBR-a pokazuju nosivost materijala, koja ovisi o rasporedu (raspodjeli) tla (gustoća) i silama među česticama (čvrstoća čestica, vodni potencijal (usis) i dilatacija) [20, 21]. CBR vrijednosti uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine odgovaraju penetraciji od 0,2" (5,08 mm) za sve uvjete, a prikazane su na slici 9.



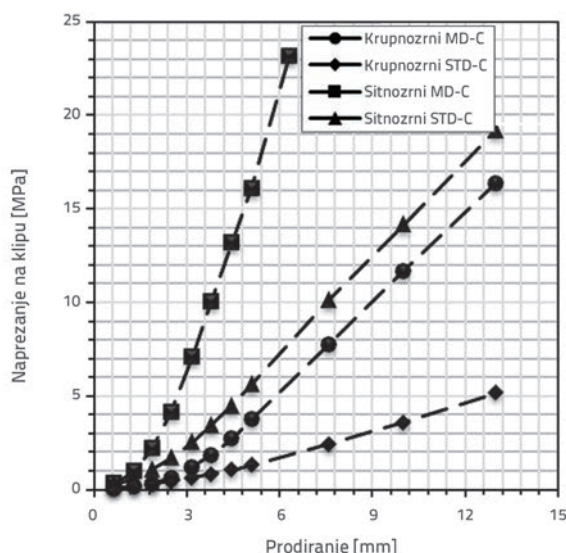
Slika 9. CBR vrijednosti uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine

Slika 9. pokazuje da su sitnozrni uzorci imali više CBR vrijednosti od krupnozrnih uzoraka s obje standardne i modificirane energije zbijanja. Sitnozrni uzorci imali su niže koeficijente pora i čvršće (stisnutije) su strukturirani od krupnozrnih uzoraka. Veća energija zbijanja osigurala je čvršću strukturu za BFS uzorke, pa su više CBR vrijednosti zabilježene za uzorke zbijane

modificiranom energijom zbijanja. Razlog ovoj situaciji je taj što modificirani Proctorov (MP) pokus ima 4,5 puta veću energiju zbijanja od standardnog Proctora (SP). Uzorci koji su neposredno ispitivani imali su veće CBR vrijednosti nego osušeni uzorci za standardno Proctorovo zbijanje.

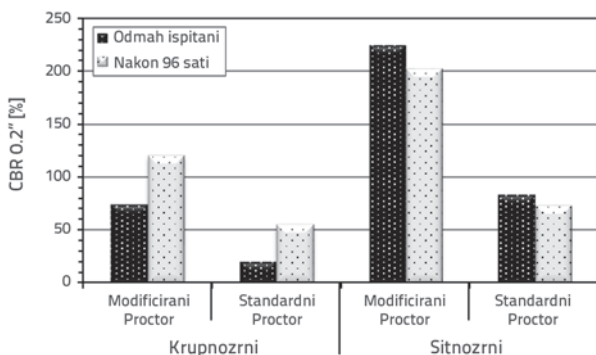
Zbog lubrikacije čestica tla vodom, voda u porama smanjuje trenje između čestica i smanjuje nosivost. Kad je procjenjivanje CBR vrijednosti za uzorke pripremljeno s modificiranom energijom zbijanja, vidljivo je da su veće vrijednosti pripadale osušanim uzorcima. Kad se smanjio koeficijent pora i koeficijent propusnosti, voda u porama je "zarobljena" između pora, a zatim je stvorena dodatna otpornost fluida u porama za uzorke zbijene modificiranom energijom.

CBR krivulje, koje se odnose na uzorke pripremljene s morskom vodom pri optimalnoj vlažnosti, prikazane su na slici 10. CBR pokusi provedeni su odmah nakon pripreme uzoraka.



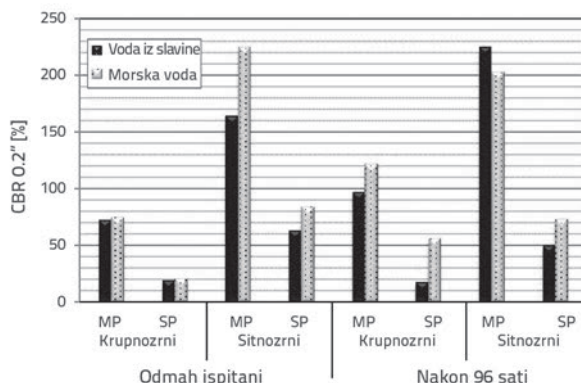
Slika 10. CBR krivulje uzoraka pripremljenih s morskom vodom pri optimalnom udjelu vlage

CBR vrijednosti uzoraka pripremljenih s morskom vodom koji odgovaraju penetraciji od 0,2" (5,08 mm) za razne uvjete prikazane su na slici 11.



Slika 11. CBR vrijednosti uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine različitih inženjerskih svojstava

Slika 11. pokazuje da su sitnozrni uzorci koji su odmah ispitani imali veće CBR vrijednosti od osušanih uzoraka, i za standardnu i modificiranu Proctorovu energiju. Suprotno tome, krupnozrni stvrdnuti uzorci imali su veće CBR vrijednosti od uzoraka koji su odmah ispitani za standardnu i modificiranu Proctorovu energiju. Rezultati ispitivanja pokazali su da je uzorak zbijen modificiranom Proctorovom energijom imao znatno veću CBR vrijednost od uzorka zbijenog standardnom energijom zbijanja. Kako bismo istražili djelovanje fluida u porama na nosivost BFS-a, uspoređene su CBR vrijednosti uzoraka pripremljenih s morskom i vodom iz slavine (slika 12.).



Slika 12. CBR vrijednosti sitnozrni i krupnozrni uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine i s morskom vodom

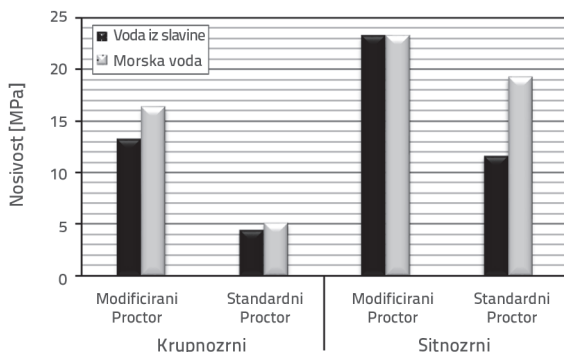
U usporedbi s vodom iz slavine, vidljivo je da morska voda povoljnije utječe na svojstva nosivosti kao fluid u porama za sitnozrni uzorke. Slika 12. pokazuje da su uzorci pripremljeni morskom vodom imali veće CBR vrijednosti od uzoraka pripremljenih vodom iz slavine za standardnu i modificiranu Proctorovu energiju zbijanja. U usporedbi s krupnozrni uzorcima, pozitivni učinci morske vode na svojstva nosivosti bili su bolje uočeni kod sitnozrni uzoraka. Sitnozrni uzorak, koji je imao mnogo veću površinu zrna od krupnozrni uzorka, zajedno s morskom vodom tvori dobar kemijski odnos. Slika 12. pokazuje da su krupnozrni uzorci pripremljeni s morskom vodom imali veće CBR vrijednosti od uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine i za standardnu i modificiranu Proctorovu energiju. Sitnozrni uzorci pripremljeni s morskom vodom imali su veće CBR vrijednosti nego uzorci pripremljeni s vodom slavine za standardnu Proctorovu energiju zbijanja. Suprotno tome, viša vrijednost je zabilježena za uzorak zbijen modificiranom energijom.

Zapravo, najviša CBR vrijednost pripada dvama sitnozrni uzorcima zbijenim modificiranom energijom. Ta dva sitnozrni uzorka pripremljena su pri optimalnoj vlažnosti i zbijeni su modificiranom energijom zbijanja. Jedna od dvije najviše CBR vrijednosti pripremljena je s vodom iz slavine, ispitana je nakon razdoblja sušenja, a druga pripremljena s morskom vodom odmah je ispitana.

Rezultati ispitivanja pokazali su da BFS uzorci pomiješani s morskom vodom imaju veće CBR vrijednosti. Ovo stanje

može se potkrijepiti XRD rezultatima. Utvrđeno je da uzorci pripremljeni i njegovani s morskom vodom imaju visok udio kalcita koji povećava nosivost. Slične rezultate također su zapazili i istraživači i o njemu izvijestili u [33].

Na slici 13. prikazane su vrijednosti nosivosti BSF neposredno ispitanih uzoraka pripremljenih s vodom iz slavine i s morskom vodom.



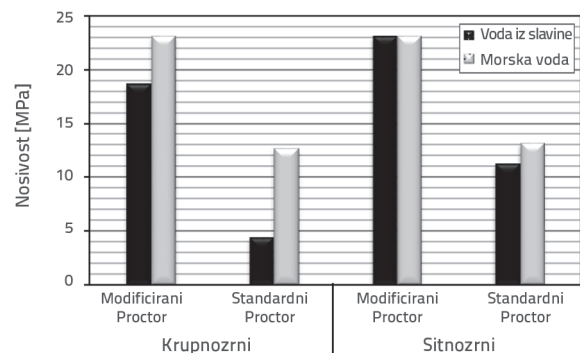
Slika 13. Nosivosti neposredno ispitanih uzoraka pripremljenih s morskom vodom i vodom iz slavine

Slika 13. pokazuje da su uzorci pripremljeni s morskom vodom imali veću nosivost od uzoraka koji su pripremljeni vodom iz slavine za standardnu i modificiranu Proctorovu energiju zbijanja. Samo su sitnozrni uzorci pripremljeni s morskom vodom imali jednaku nosivost pripremljeni s vodom iz slavine. To je zato što je laboratorijski CBR uređaj dosegao maksimalni kapacitet (45 kN) i ispitivanja su prekinuta. Jasno je da su uzorci pripremljeni i njegovani s morskom vodom imali veću nosivost. Na slici 14. prikazane su vrijednosti nosivosti BSF-a uzoraka pripremljenih i njegovanih s vodom iz slavine i s morskom vodom.

Slika 14. pokazuje da su uzorci pripremljeni morskom vodom imali veću nosivost od uzoraka pripremljenih vodom iz slavine za standardnu i modificiranu Proctorovu energiju zbijanja. Budući da je uređaj dostigao maksimalni kapacitet (45 kN), sitnozrni uzorci pripremljeni s vodom iz slavine i s morskom vodom imaju jednaku nosivost.

Inženjerski materijali razvrstani su prema CBR vrijednosti za različite primjene. Tablica 5. prikazuje odnose između CBR vrijednosti, svojstava tla i područja primjene. Prema jedinstvenom sustavu klasifikacije tla (USCS), sitnozrni i

krupnozrni BFS materijal razvrstani su i stupnjevani kao dobro građuirani pijesak (SW). Ova dva materijala, s različitim granulometrijom, osiguravaju uvjete da ih se upotrebljava za posteljicu i slojeve za ispunu temelja.



Slika 14. Nosivosti uzoraka pripremljenih i stvrdnutih s morskom vodom i vodom iz slavine

4. Zaključak

U ovom su ispitivanju analizirani geotehnički čimbenici koji utječu na nosivost BFS-a. Istraživana su geotehnička inženjerska svojstva BFS-a, a zatim su provedeni CBR pokusi na sitnozrnim i krupnozrnim BFS uzorcima. Uzorci za CBR pokus pripremljeni su s vodom iz slavine i morskom vodom, a zbijeni su standardnim i modificiranim energijama zbijanja. Uzorci su ispitani u dva dijela: prvi, CBR uzorak je priređen pri optimalnoj vlažnosti, a zatim odmah ispitani; drugi, CBR uzorak je također pripremljen pri optimalnoj vlažnosti i ispitani nakon 96 – satnog sušenja.

- Rezultati ispitivanja pokazali su da energija zbijanja ima najveći utjecaj na rezultate CBR-a. Rezultati su pokazali da uzorci zbijeni modificiranom energijom zbijanja imaju barem 2,2 puta veću CBR vrijednost od uzoraka zbijenih standardnom energijom zbijanja.
- Raspodjela veličine zrna je drugi parametar s najvećim utjecajem na CBR vrijednosti. Sitnozrni uzorci BFS-a imaju barem 1,3 puta veće CBR vrijednosti od krupnozrnih uzoraka. BFS uzorci pomiješani s morskom vodom imaju veće CBR vrijednosti. Ovo stanje može se potkrijepiti rezultatima XRD . Utvrđeno je da uzorci pripremljeni i njegovani s morskom vodom imaju visok udio kalcita koji povećava nosivost.

Tablica 5. Inženjerska funkcija materijala prema CBR vrijednosti

Svojstva tla i područja uporabe			Sustav klasifikacije (razredbe)	
CBR br.	Opća ocjena	Funkcija	USCS	AASHTO
0-3	Vrlo loše	Podloga	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Loše	Podloga	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Srednje	Posteljica	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Dobro	Temelj ili posteljica	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A-3, A2-6
>50	Vrlo dobro	Temelj	GW, GM	A1a, A2-4, A3

- Kad su prosječne CBR vrijednosti međusobno uspoređene, vidjeli smo da uzorci koji su pripremljeni i njegovani s morskom vodom imaju više vrijednosti od ostalih ($CBR_{\text{morska voda}} = 107,1 > CBR_{\text{voda iz slavine}} = 88,2$).
- Nije bilo jasnog odnosa između trajanja sušenja i CBR vrijednosti uzoraka BFS-a. Sušeni uzorci zbijeni modificiranom energijom općenito imaju veće CBR vrijednosti, a s druge strane, uzorci ispitani odmah nakon zbijanja standardnom energijom obično imaju veće CBR vrijednosti.
- Bilo je jasno vidljivo da BFS ima djelotvorna mehanička svojstva i može se koristiti za brojne inženjerske primjene kao materijal za ispunu.

Preporučuje se da se BFS materijal također mora ispitati u vezi s utjecajem na okoliš kako bi se izbjegli štetni učinci.

Zahvala

Autori zahvaljuju Özerdem Demir Contracting Construction Marketing Industry and Trade Limited Company za isporučeni materijal.

LITERATURA

- [1] Ekincioglu, O., Gurgun, A.P., Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracibas, S.: Approaches for sustainable cement production-A case study from Turkey, *Energy and Buildings*, 66 (2013), pp. 136-142, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.006>.
- [2] Ramani, P.V., Chinnaraj, P.K.: Geopolymer concrete with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 8, pp. 741-748, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1208.2015>.
- [3] Luga, E., Atis, C.D., Karahan, O., Ilkentapar, S., Bahsude Gorur, E.: Strength properties of slag/fly ash blends activated with sodium metasilicate, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 3, pp. 199-205, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1468.2015>.
- [4] Martin, P.E., Bobillon, G., Eisenlohr, L.: Reuse of solid waste from the clearing of road basins and ditches in civil engineering: from characterization to ways of treatment. *Houille Blanche-Revue Internationale De L'Eau*, 17 (2008), pp. 130-136, DOI : 10.1007/978-90-481-3043-6-21.
- [5] Zhang, L.: Production of bricks from waste materials-A review. *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 643-655, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043.
- [6] Kodikara, J., Yeo, R.: Performance Evaluation of Road Pavements Stabilised In Situ. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 3 (2005), doi: 10.1016/S1571-9960(05)80018-7.
- [7] O'Kelly, B.C.: Geo-engineering properties of granulated blast furnace slag. Proceedings, Innovative Geotechnical Engineering, International Conference on Geotechnical Engineering, Tunis, Tunisia, 24-26 March, 2008, pp. 249-257.
- [8] Poh, H., Ghataora, G., Ghazireh, N.: Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines. *J. Mater. Civ. Eng.*, 18 (2006) 2, pp. 229-240, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(229\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(229)).
- [9] Yao, A.L., Sun, Z.J.: The Research on Slag Road Cement (SRC) Using Less Clinker and More Granulated Blast Furnace Slag. Proceedings of the 5th China-Japan Workshop on Pavement Technologies, 2009, pp. 100-107.
- [10] Yazıcı, V.: Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS), GBFS-lime combinations and GBFS cement. Post Graduate thesis. Middle East Technical University, (2004).
- [11] Buddhdev, B.G., Varia, H.R.: Feasibility Study on Application of Blast Furnace Slag in Pavement Concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (2014) 3, pp. 10795-10802, ISSN: 2319-8753.
- [12] Cokca, E., Yazıcı, V., Ozaydin, V.: Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement. *Geotech. Geol. Eng.*, 27 (2009), pp. 489-499, DOI: 10.1007/s10706-008-9250-z.
- [13] Sivrikaya, O., Yavascan, S., Cecen, E.: Effects of ground granulated blast-furnace slag on the index and compaction parameters of clayey soils, *Acta Geotechnica Slovenica*, (2014), pp. 19-27, 2014/1.
- [14] Sivakumar, V., Tan, W., Graham, J.: CBR, undrained strength and yielding characteristics of compacted tills. 3rd international conference on unsaturated soils, CRC Press, 2 (2002), pp. 663-668.
- [15] Vogrig, M., Macdonald, A., Vanapalli, S., Siekmeier, J., Roberson, R., Garven, E.: A laboratory technique for estimating the resilient modulus of unsaturated soil specimens from CBR and unconfined compression tests. 56th Canadian geotechnical conference, (2003), pp. 99-106, Winnipeg.
- [16] Ampadu, S.: A laboratory investigation into the effect of water content on the CBR of a subgrade soil. In T. Schanz (Ed.), *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, 112 (2007), pp. 137-144, DOI: 10.1007/3-540-69873-6-12.
- [17] Purwana, Y., Nikraz, H., Jitsangiam, P.: Experimental study of suction-monitored CBR test on sand-kaolin clay mixture. *International Journal of Geomaterials*, 3 (2012) 2, pp. 419-422, DOI: 10.21660/2012.6.39.
- [18] Singh, S., Sharan, A.: Strength characteristics of compacted pond ash. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 9 (2014) 1, pp. 9-17, DOI:10.1080/17486025.2013.772661.
- [19] Mirzaii, A., Negahban, M.: California bearing ratio of an unsaturated deformable pavement material along drying and wetting paths. *Road Materials and Pavement Design*, 17 (2016) 1, 261-269, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1067247>.
- [20] Head, K.H.: Manual of soil laboratory testing (Vol. 2): permeability, shear strength and compressibility tests. 2nd ed. London: Pentech Press, 1994.
- [21] Arulrajah, A., Disfani, M.M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Prongmanee, N.: Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58 (2014), pp. 245-257, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025>.

- [22] Jiao, T., Hu, L., Zhou, J., Fu, J.: Test on cement stabilized blast furnace slag material. *Advanced Materials Research*, 671-674 (2013), pp. 1297-1300, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.671-674.1297>
- [23] ASTM D422-63e2. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, (2007), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [24] ASTM D4318-10e1. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, (2010), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [25] ASTM D2487-11. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, (2011), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [26] ASTM D854-14. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, (2014), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [27] Kocasoy, G.: Atıksu arıtma çamuru ve katı atık ve compost örneklerinin analiz yöntemleri. (1994), ISBN-13: 978-975-518-083-0, ISBN: 975-518-083-4.
- [28] ASTM D698-12e2. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, (2012), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [29] ASTM D1557-12e1. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)), ASTM International, (2012), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [30] ASTM D1883-16. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International, (2016), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [31] ASTM D6913-04e1. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International, (2009), West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [32] Keir, R.S.: The dissolution kinetics of biogenic calcium carbonates in seawater *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44 (1980), pp. 241-252, doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90135-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90135-0).
- [33] Sharma, A., Ramkrishnan R.: Study on effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on strength of fine grained soils. *Perspectives in Science*, 8 (2016), pp. 198-202, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.03.017>