

Primljen / Received: 22.7.2022.

Ispravljen / Corrected: 11.10.2022.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2022.

Dostupno online / Available online: 10.3.2023.

# Potencijalna valorizacija otpadne čelične zgure kao alternativnog materijala za kolničke slojeve

## Autori:



<sup>1</sup>Mr.sc. **Lahcen Es-Samlali**  
[Lahcen.es-samlali@ced.uca.ma](mailto:Lahcen.es-samlali@ced.uca.ma)  
Autor za korespondenciju



<sup>2</sup>Doc.dr.sc. **Yassine El Haloui**  
[elhaloui.y@ucd.ac.ma](mailto:elhaloui.y@ucd.ac.ma)



<sup>3</sup>**Mustapha Amrani**, dipl.iing.građ.  
[mustapha.amrani@ced.uca.ma](mailto:mustapha.amrani@ced.uca.ma)



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Fahd Oudrhiri-Hassani**  
[f.oudrhiri-hassani@uca.ma](mailto:f.oudrhiri-hassani@uca.ma)



<sup>4</sup>Prof.dr.sc. **Abdelmounaim Tlidi**  
[atlidi@uae.ac.ma](mailto:atlidi@uae.ac.ma)



<sup>5</sup>Izv.prof.dr.sc. **Abderrahmane Bekri**  
[a.bekri@ext.uic.ac.ma](mailto:a.bekri@ext.uic.ac.ma)

<sup>1</sup> Sveučilište Cadi Ayyad u Marakešu, Maroko  
LMPEQ Labotary

<sup>2</sup> Sveučilište Chouaib Doukkali u El Jadidi, Maroko

<sup>3</sup> Sveučilište Cadi Ayyad, Maroko  
Fakultet znanosti i tehnologije

<sup>4</sup> Sveučilište Abdelmalek Essadi, Maroko

<sup>5</sup> Laboratorij za industrijske analize, Maroko

Prethodno priopćenje

**Lahcen Es-Samlali, Yassine EL Haloui, Mustapha Amrani, Fahd Oudrhiri-Hassani, Abdelmounaim Tlidi, Abdderahman Bekri**

## Potencijalna valorizacija otpadne čelične zgure kao alternativnog materijala za kolničke slojeve

Cilj ovog rada istražiti izvedivost korištenja otpadne čelične zgure kao zamjenskog materijala za slojeve kolničke konstrukcije (nosive slojeve). Ovaj se otpad skladišti i odlaže na odlagalište na lokaciji za proizvodnju čelika u JORF LASFAR-u, u gradu El Jadida, Maroko. Prikupljeni su uzorci otpada koji su podvrgnuti standardnim ispitivanjima kako bi se utvrdila njihova fizikalna, kemijska, mineraloška i geotehnička svojstva. Nadalje, otpadna čelična zgura ne može se koristiti samostalno u slojevima kolničke konstrukcije zbog niskog udjela sitnog agregata. Prirodni materijal (otpad od drobljenja kamena) upotrijebljen je s otpadnom čeličnom zgurom kako bi se postigla zahtijevana granulometrijska krivulja. Napravljeno je ukupno pet različitih mješavina čelične zgure (SS) i prirodnog agregata (ST) u sljedećim omjerima (% SS: % ST): M1 (30:70), M2 (40:60), M3 (50:50), M4 (60:40), i M5 (70:30). Provedena su geotehnička i mehanička ispitivanja svake pojedinačne mješavine, uključujući i mješavine M4 i M5, kako bi se utvrdilo ispunjavaju li te mješavine uvjete da bi se koristile u gornjim nosivim slojevima. Mješavine oznaka od M2 do M5 također su imale svojstva koja su potrebna za materijal donjih nosivih slojeva. Na kraju je provedena analiza dimenzioniranja kolničke konstrukcije kako bi se dobila debljina slojeva koji sadrže formulirane mješavine, za koje je utvrđeno da su slične debljinama konvencionalnih materijala.

### Ključne riječi:

čelična zgura, valorizacija, tehnologija izgradnje cesta, nosivi sloj, mehanička svojstva

Research Paper

**Lahcen Es-Samlali, Yassine EL Haloui, Mustapha Amrani, Fahd Oudrhiri-Hassani, Abdelmounaim Tlidi, Abdderahman Bekri**

## Potential valorisation of steel slag waste as an alternative material for pavement layers

This paper aims to investigate the feasibility of using steel slag waste as an alternative material for pavement layers (sub-base and base layers). This waste is stored and landfilled at a steel production site in JORF LASFAR, city of El Jadida, Morocco. Samples of the waste were collected and underwent standard tests to determine its physical, chemical, mineralogical, and geotechnical properties. Furthermore, the steel slag waste cannot be used alone in pavement layers because of the low fraction of fine aggregates. Additionally, a sterile raw material (rock crushing waste) was used with the steel slag waste to obtain the required particle size distribution. Five mixtures of steel slag (SS) and sterile (ST) were formulated using the following proportions (% SS: % ST): M1 (30:70), M2 (40:60), M3 (50:50), M4 (60:40), and M5 (70:30). Geotechnical and mechanical standard tests were conducted on each mixture, including the M4 and M5 mixtures, to determine whether they met the required properties for a material used in the base layer. M2 to M5 mixtures also had the necessary properties for the sub-base layer. Finally, a sizing study was performed to obtain the thickness of pavement layers containing the formulated mixtures, which were found to be close to those of conventional materials.

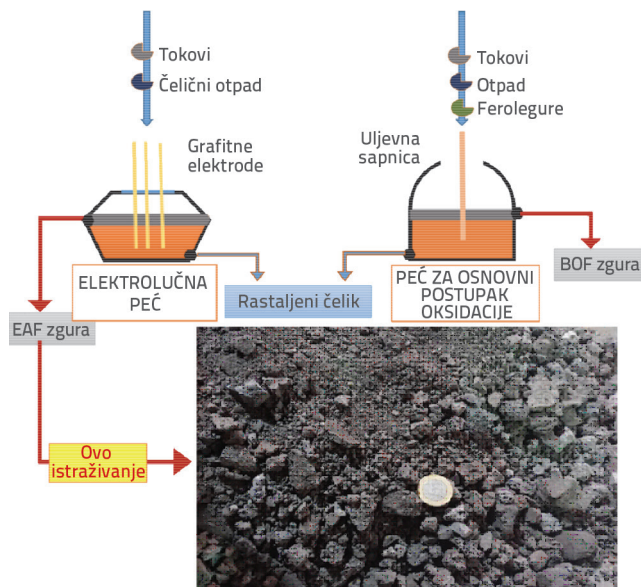
### Key words:

steel slag, valorisation, road technology, base course, mechanical performance

## 1. Uvod

### 1.1. Proizvodnja čelične zgure

Otpad od čelične zgure (engl. *steel slag* - SS) je nusproizvod dobivanja čelika koji nastaje tijekom faze odvajanja rastaljenog čelika od nečistoća u pećima za proizvodnju čelika. Zgura se javlja kao rastaljena tekućina, a radi se o složenoj otopini oksida i silikata koja se stvrdnjava nakon hlađenja [1]. Nusproizvodi se svrstavaju u dvije skupine: kisikov konvektor (engl. *Basic Oxygen Furnace* - BOF) i elektrolučne peći (engl. *Electric arc Furnace* - EAF) [2]. Kisik pod visokim tlakom ubrizgava se u peć koja tijekom BOF procesa sadrži vrući tekući metal iz visokih peći, a koji se sastoji od vapna i dolomitnog vapna. Kisik uklanja nečistoće iz naboja [1]. Te se nečistoće sastoje od ugljika u obliku plinovitog ugljičnog monoksida silicija, mangana, fosfora i željeza u obliku tekućih oksida, koji se spajaju s vapnom i dolomitnim vapnom i čine čeličnu zguru [1]. Prema Reesu [3], EAF koristi hladni otpadni čelik, sirovo željezo i željezo dobiveno izravnom redukcijom. Uvodi se električni luk kako bi se dobilo dovoljno topline za topljenje otpada. Električna struja prolazi kroz tri grafitne elektrode i formira ovaj luk. Tijekom procesa taljenja čeliku se dodaju i drugi minerali (željezne legure) kako bi postigao potreban kemijski sastav. Nadalje, kisik se također ubrizgava u svrhu pročišćavanja čelika. Na kraju se plutajuća čelična zgura odvađa od površine rastaljenog čelika (c). Osnovni koraci proizvodnje čelične zgure prikazani su na slici 1.



Slika 1. Shema peći za osnovni postupak oksidacije i elektrolučne peći

Prema Barriju [4], proizvodnja tri tone nehrđajućeg čelika stvara približno jednu tonu čelične zgure (SS). Stoga se u industriji čelika često stvaraju goleme količine otpada. Osim toga, industrije čelika diljem svijeta proizvode pedeset milijuna tona otpadne čelične zgure svake godine. Samo se u Europi godišnje proizvede približno dvanaest milijuna tona otpadne čelične

zgure [5]. Industrija čelika u Maroku godišnje proizvede približno 115.000 tona čelične zgure. Taj se otpad najčešće skladišti na odlagalištima namijenjenim u tu svrhu na njegovom mjestu proizvodnje ili u blizini. Međutim, takvo skladištenje negativno utječe na okoliš i predstavlja rizik za ljudsko zdravlje. Osim toga, obnova ovih brana i akumulacijskih zona vrlo je skupa.

### 1.2. Pregled literature

Valorizacija otpada u građevinarstvu postala je učinkovit način gospodarenja otpadom i smanjenja njegova utjecaja na okoliš i ljudsko zdravlje [6-8]. Ponovna uporaba i recikliranje otpadne čelične zgure u građevinarstvu zanimljiva je opcija za njegovo gospodarenje. Nadalje, provedena su mnoga istraživanja kako bi se pokazala potencijalna ponovna uporaba ovog otpada. Istraživanja su provedena za različite sektore građevinarstva, uključujući tlo, cement i kolničke konstrukcije.

Aziz i sur. [9] pokazali su da čelične zgure nude idealnu izdržljivost, propusnost, stabilnost i otpornost na habanje, raspucavanje i trajnu deformaciju tijekom primjena u tlu. Stoga bi čelične zgure mogle pružiti fizikalna i mehanička svojstva koja su jednaka ili bolja od prirodnih agregata. Unatoč nestabilnosti volumena i visokoj specifičnoj težini čelične zgure, ona posjeduje korisna svojstva kao što su samokarburiziranje i veliki kut unutarnjeg trenja za stabilizaciju i jačanje tla. Isaac Akinwumi [10] pokazao je da dodavanje 8 % usitnjene čelične zgure lateritnom tlu poboljšava nevezanu čvrstoću tla kako bi se osiguralo da se njegov neposredni CBR poveća za 40 %, a njegova tlačna čvrstoća iznosi 66,7 kN/m<sup>2</sup>. Nadalje, granice tečenja i plastičnosti, kao i indeks plastičnosti, smanjeni su za 6,3, 4,0 i 2,3 %. Iskorištavanjem pucolanskih reakcija i superiornih mehaničkih svojstava EAF zgure se postiže značajna čvrstoća stabiliziranog tla u svrhu smanjenja troškova smanjenjem potrebe za cementom. Shahbazi i sur. [11] pokazali su da upotreba 16 % čelične zgure i otpadnih vlakana od tepiha kao aditiva smanjuje bubrenje i poboljšava mehanička svojstva ekspanzivnog tla. Wang i sur. [12] prikazali su da se otpornost na djelovanje vode tla stabiliziranog čeličnom zgurou povećava s povećanjem stupnja zbijenosti i sadržaja čelične zgure. Abdalqadir i Salih [13] pokazali su da je dodavanje 10 % do 20 % čelične zgure i 10 % do 15 % drobljenog vapnenca poboljšalo geotehnička svojstva ekspanzivnog tla. Cikmit i sur. [14] istraživali su bubrenje čelične zgure pomiješane s mekom morskom glinom i utvrdili da je dodavanje 60 % čelične zgure omogućilo dobivanje snažnog geomaterijala, a istovremeno je bilo u skladu s dopuštenim bubrenjem.

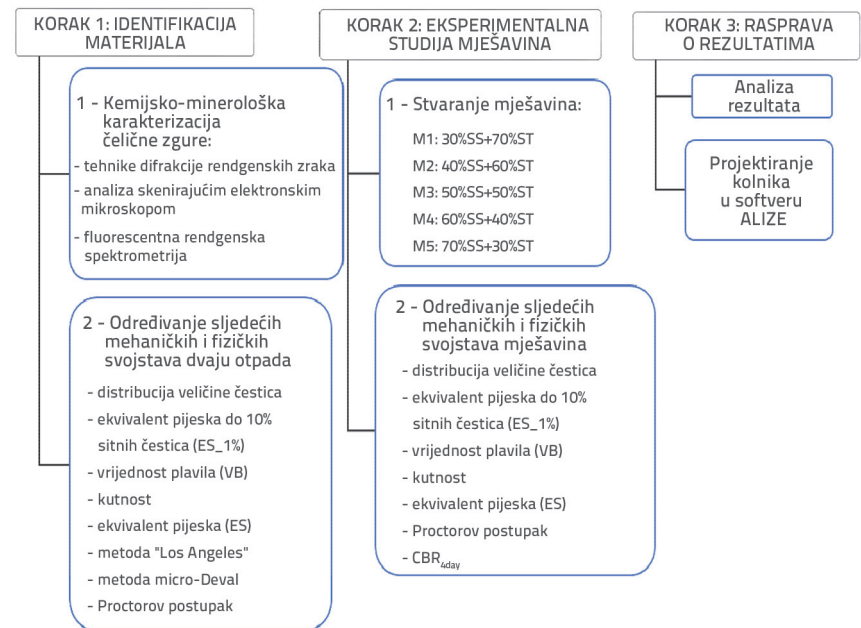
Zhang i sur. [15] pokazali su da je tlačna čvrstoća kompozitnog cementa koji sadrži 40 % čelične zgure usporediva s cementom 42,5R u primjenama cementa. Prema studiji Gaoa i sur. [16], korištenje čelične zgure za proizvodnju klinkera pokazalo je da je maksimalna količina čelične zgure koja se može dodati sirovinskom brašnu 14,30 %. Xiang i sur. [17] predstavili su metodu korištenja čelične zgure (bez mljevenja u fini prah) za pripremu bescementnog cementirajućeg materijala za postizanje tlačne čvrstoće morta od 70 MPa.

Čelične zgure korištene su kao alternativni agregat u betonskim mješavinama za građevinske primjene. Beton ultravisokih uporabnih svojstava, sastavljen od praha čelične zgure i agregata čelične zgure, pružio je zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću sa stopom zamjene cementa manjom od 10 [18]. Nadalje, korištenje preostale čelične zgure u betonu kao zamjene za konvencionalne krupne agregate pokazalo je da agregati zgure nude značajno poboljšanje tlačne čvrstoće od 18 % nakon sedam dana i 16,8 % nakon 28 dana u usporedbi s konvencionalnim betonom [19]. Prema Wangu i sur. [20], upotreba 100 % čelične zgure u betonu poboljšava njegovu tlačnu i vlačnu čvrstoću pri cijepanju, povećavajući ih za 35 % odnosno 50 %. Prema Shenu i sur. [21], porozni beton od karbonizirane čelične zgure uštedio je 75,8 % troškova materijala jer se radilo o 100 % krutom otpadu, a apsorbirao je oko 100 kg/m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, što se pokazalo kao ekološki prihvatljiv pristup.

Maghool i sur. [22] proveli su niz testova karakterizacije za procjenu tehničkih svojstava čelične zgure za njenu upotrebu kao materijala za nosivi sloj kolničke konstrukcije. Rezultati pokazuju da su tehnička svojstva čelične zgure slična ili čak bolja od svojstava tipičnih materijala iz kamenoloma. Gao i sur. [23] pokazali su veliku iskoristivost uporabe čelične zgure u asfaltnim mješavinama za mikrovalno odleđivanje, što je korisno za ublažavanje nedostatka prirodnih agregata i poboljšanje sigurnosti cestovnog prometa zimi. Kolnički sloj s čeličnom zgurom također je pokazao izvrsne performanse u pogledu hrapavosti i hvatljivosti (*eng. British Pendulum Number*) [24]. Prema Kimu i sur. [25], poboljšano je ponašanje vruće bitumenske mješavine koja sadrži agregate čelične zgure u smislu dinamičkog modula i otpornosti na kolotražnje. Dondi i sur. [26] pokazali su da je uporaba čelične zgure učinkovita za izgradnju cjelokupne kolničke konstrukcije, bilo u slojevima vezanim cementom ili u grupi asfaltnih slojeva. Primjena optimalne mješavine od 4,5 % bitumena i 30 % zgure povećava krutost mješavina.

### 1.3. Opseg istraživanja

Pregled literature pokazao je da je provedeno vrlo malo istraživanje o potencijalu izravne uporabe otpadne čelične zgure u nosivim slojevima ceste i nasipima. Osim toga, takva otpadna čelična zgura ima svoje posebne značajke i potrebno ju je okarakterizirati. Stoga se ovim istraživanjem procjenjuje



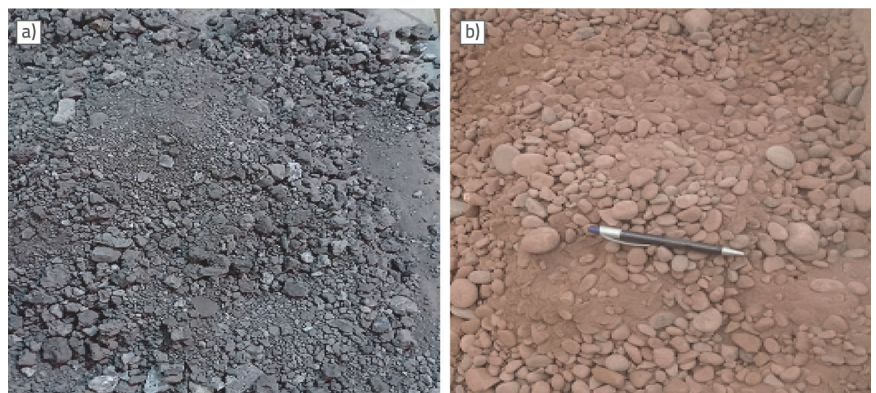
Slika 2. Osnovni koraci istraživanja

održiva uporabljivost čelične zgure kao alternativnog materijala za izgradnju cesta. Istraživali smo potencijal korištenja ovog otpada u gornjim i donjim nosivim slojevima. Prvi korak tog istraživanja provoden je izvođenjem kemijske i mineraloške karakterizacije čelične zgure. U drugom koraku razmatrana su fizikalne i mehaničke karakteristike pet mješavina koje sadrže otpadnu čeličnu zgurom pomiješanu s prirodnim agregatom (*eng. Sterile - ST*) (otpad nastao u kamenolomima prilikom proizvodnje materijala za izgradnju cesta). Treći korak predstavlja raspravu o rezultatima u vezi s održivom uporabom čelične zgure. Slika 2. sažima osnovne korake istraživanja.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Sirovine

U ovom su radu razmatrane dvije vrste otpada. Prva vrsta prikazana je na slici 3.a. Radi se o otpadnoj industrijskoj

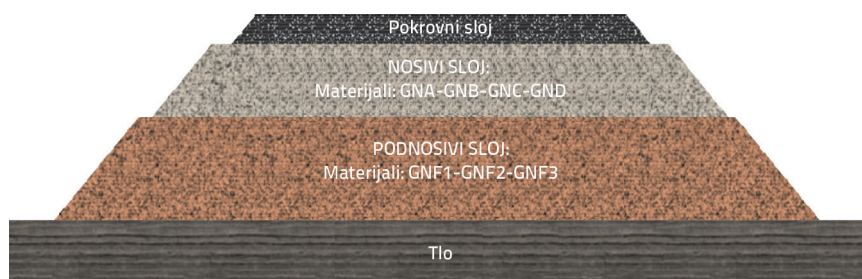


Slika 3. Sirovine: a) čelična zgura (SS); b) prirodni agregat (ST)

čeličnoj zguri prikupljenoj s odlagališta Eljorf Sfar, koje se nalazi u regiji El Jadida, Maroko. Velike količine zgure iz čeličane Eljorf Sfar zakopane su na velikom području tijekom dugog razdoblja proizvodnje čelika recikliranjem starog željeza. Druga vrsta otpada je prirodni agregat i prikazana je na slici 3.b. Proizvodi se tijekom procesa proizvodnje materijala za cestogradnju drobljenjem riječnog šljunka. Tijekom toga procesa dolazi do prosijavanja kako bi se eliminirali sitni elementi prašine i nepotrebni elementi koji proizvode otpad. Potonje vrste su otpadni kamen (ST) koje su prikupljene u kamenolomima na istom području.

## 2.2. Metode ispitivanja

Primjenjena je difrakcija rendgenskih zraka (engl. *X-ray diffraction* - XRD), analiza skenirajućim elektronskim mikroskopom (engl. *scanning electron microscope* - SEM) i fluorescentna rendgenska spektrometrija (engl. *X-ray fluorescence spectrometry* - XRF) za kemijsku i mineralošku karakterizaciju čelične zgure. Uzorci svake vrste materijala uzeti su s različitih mjesta deponiranja. Nadalje, materijal je pomiješan za svaku vrstu, homogeniziran i podijeljen na manje poduzorke prije ispitivanja u laboratoriju. Proveli smo niz testova u laboratoriju kako bismo odredili fizikalne i mehaničke karakteristike čelične zgure (SS) i prirodnog agregata (ST). Za određivanje stvarnih gustoća primijenjena je metoda s piknometrom prema normi NF EN 1097-6 [27]. Određivanje granulometrijske krivulje provedeno je na uzorcima suhim prosijavanjem za čestice promjera većeg od 80  $\mu\text{m}$  prema normi NF EN 933-1 [28]. Indeks plastičnosti (engl. *plasticity index* -PI) uzoraka određen je mjerenjem Atterbergovih granica prema normi NF EN ISO 17892-12 [29]. Ispitivanje ekvivalenta pijeska provedeno je na temelju



Slika 4. Primjer kolničke konstrukcije

specifikacije norme P18-598 za mjerenje čistoće pijeska i dobivanje općenite ideje o količini i kvaliteti sitnih elemenata [30]. Određivanje optimalnog udjela vode i maksimalne suhe gustoće provedeno je Proctorovim postupkom na frakciji 0/200 mm prema normi NF P94-093. Za mjerenje bubrenja uzoraka korišteni su mikroura i CBR kalup (nakon 15 dana potapanja u vodi). Osim toga, proveden je CBR test kako bi se odredila nosivost materijala nakon zbijanja i optimalan udio vode, prema normi NF P 94-078 [32]. Otpornost agregata na predrobljavanje određena je ispitivanjem metodom "Los Angeles" prema normi NF P 18-573 [33]. Otpornost agregata na habanje mjerena je Micro-Deval ispitivanjem prema normi NF P18-572 [34].

## 2.3. Ciljani materijali

Fleksibilna kolnička konstrukcija najčešća je vrsta kolnika u Maroku. Osim toga, ova se struktura sastoji od zastora te gornjih i donjih nosivih slojeva, kao što je prikazano na slici 4. U ovom su istraživanju ciljani materijali, za čiju se zamjenu koristi otpadna čelična zgura, nevezani šljunčani materijali. Gornji nosivi slojevi izvode se od nevezanog šljunka tipa GNA, GNB, GNC i GND. Nevezani šljunak koji se razmatra za donje nosivie slojeve je GNF1, GNF2 i GNF3. Odabir ove vrste nevezanog šljunka za slojeve temelji se na dimenzioniranju kolnika. Svaki materijal okarakteriziran je mnogim

Tablica 1. Zahtijevana svojstva neobrađenih šljunčanih materijala za kolničke slojeve

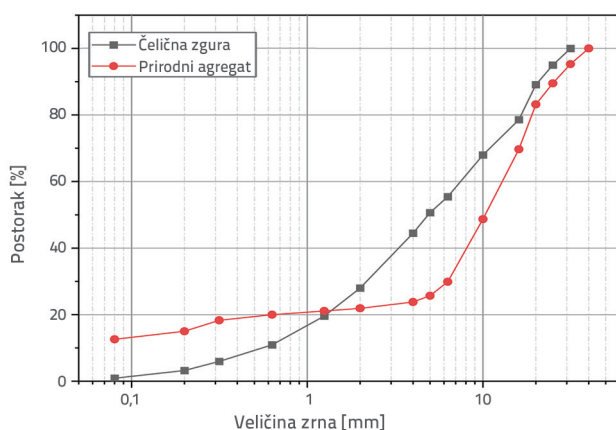
Materijal	Mehanička svojstva [%]	Uglatost zrna, $I_c$ [%]	Čistoća	Postotak prolaska [%]							
				60	40	31,5	20	10	6,3	2	0,08
GNA	LA < 30; MDE < 20	$I_c > 100$	ES(0/5) > 30 ES(0/2) > 45 VB < 1,5	-	100	85 do 100	62 do 90	35 do 62	25 do 50	14 do 34	2 do 10
GNB	LA < 30; MDE < 20	$I_c > 35$					52 do 87	35 do 70	25 do 60	13 do 38	2 do 10
GNC	LA < 35; MDE < 30	$I_c > 30$	VB < 1,5 IP < 12	100	-	-	60 do 90	40 do 70	33 do 64	20 do 48	2 do 14
GND	LA < 40; MDE < 35	Dopušteno kotrljanje					47 do 90	30 do 70	20 do 64	10 do 48	2 do 14
GNF1	LA < 30; MDE < 25	$I_c > 60$	IP < 8	100	80 do 100	-	60 do 90	40 do 70	33 do 64	20 do 48	2 do 14
GNF2	LA < 40; MDE < 35	$I_c > 30$					47 do 90	30 do 70	20 do 64	10 do 48	2 do 14
GNF3	LA < 50; MDE < 45	bezuovjetna					47 do 90	30 do 70	20 do 64	10 do 48	2 do 14

specifičnim svojstvima, uključujući granulometrijsku krivulju, oblik zrna agregata, čistoću, nosivost, mehaničku otpornost itd. Svojstva svakog razmatranog materijala navedena su u tablici 1. Nadalje, cilj je ovog istraživanja utvrditi prethodno navedena svojstva nekoliko projektiranih mješavina SS i ST otpada (sedam mješavina) te odrediti mješavine koje mogu zamijeniti nevezani šljunak (GNA-B-C-D i GNF1-2-3).

### 3. Rezultati i rasprava

#### 3.1. Karakterizacija čelične zgre i prirodnog agregata

Prvi dio karakterizacije materijala usredotočen je na određivanje geotehničkih svojstava SS-a i ST-a. Osim toga, izmjerena je specifična težina i utvrđeno je da iznosi približno 3,26 T/m<sup>3</sup>, što je približno težini neobrađenog šljunčanog materijala. Određivanje granulometrijske krivulje provedeno je za oba materijala, a rezultati su prikazani na slici 5.



Slika 5. Granulometrijske krivulje čelične zgre i prirodnog agregata

Glavna svojstva navedena su u tablici 2. Nadalje, količina sitnih čestica u otpadnoj čeličnoj troski bila je niska (prolaznost do 0,08 mm manja od 1 %). Osim toga, koeficijent jednolikosti bio je veći od dva, a koeficijent zakrivljenosti manji od jedan. Stoga je materijal SS dobro graduiran i kontinuiranoga granulometrijskog sastava. Svojstva plastičnosti čelične zgre nisu bila mjerljiva. Stoga je provedeno VB ispitivanje (eng. *Methylene blue value*) kako bi se tlo okarakteriziralo kao tlo niske plastičnosti. Izmjereni VB iznosio je 0,045 g/100 g. Štoviše, ova čistoća čelične zgre rezultira malom količinom sitnih čestica, i posljedično neosjetljivošću čelične zgre na vodu. Vrijednosti koeficijenta "Los Angeles" i MDE iznose 11 %, odnosno 8 %, što pokazuje da je čelična zgra vrlo krut materijal za mehaničku učinkovitost.

Modificirani Proctorov postupak za čeličnu zgru rezultira nekohezivnim materijalom zbog nedostatka sitnih čestica. Stoga je potrebno dodati takve čestice (razlog korištenja prirodnih sirovina) u otpadnu zgru kako bi se osigurala dobro

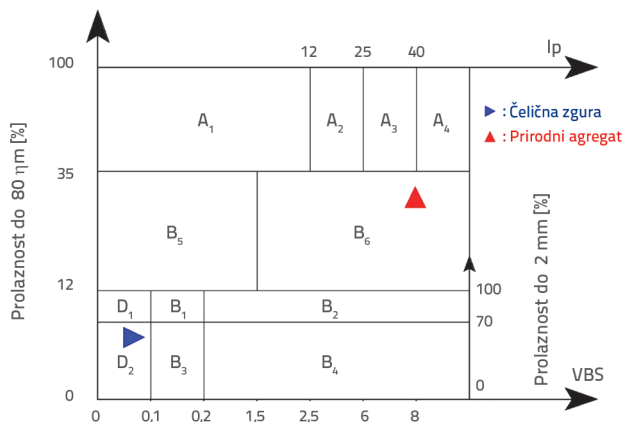
zbijanje [35]. Određivanje bubrenja izvršeno je mjerenjem CBR-a nakon jednog mjeseca i pokazalo je da nije primijećena promjena volumena, što pokazuje da je uzeti uzorak imao razdoblje odležavanja. Laboratorijski testovi izvedeni na prirodnom agregatu pokazali su da granulometrijski sastav obiluje česticama veličine do 0,08 mm; prolaznost do 0,08 mm je 12,6 %; a frakcija čestica veličine od 2 mm do 5 mm ima nizak postotak od približno 5 %, kao što je prikazano u tablici 2. Indeks VB iznosio je 3,9, što je pokazalo da prirodni agregat nije bio vrlo čist, ali je premašio lokalne zahtjeve. Prirodni agregati imaju bolju otpornost na predrobljavanje i habanje. Stoga su vrijednosti LA i MDE iznosile 18 % odnosno 13 %.

Tablica 2. Geotehnička i mehanička svojstva čelične zgre i prirodnog agregat

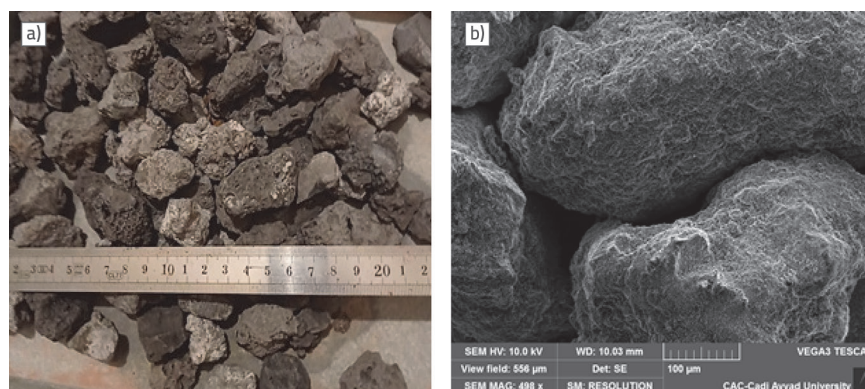
Ispitivanje	Čelična zgra	Prirodni agregat
Specifična težina	3,26	2,47
Cu (koeficijent jednolikosti)	12,7	---
Cc (koeficijent zakrivljenosti)	0,96	---
Prolazak na 0,08 mm [%]	0,9	12,6
Prolazak na 2 mm [%]	28	22
Prolazak na 5 mm [%]	54	26
Prolaznost na 31,5 mm [%]	100	97
Kutnost [%]	100	20
Ekvivalent pijeska [%]	79	22
VB [g/100g]	0,045	3,9
Optimalni udio vlage (engl. <i>Optimum moisture content - OMC</i> ) [%]	4,2	10,9
Maksimalna suha gustoća (engl. <i>Maximum dry density Immediate - MDD</i> ) [g/cm <sup>3</sup> ]	2,44	2,01
LA [%]	11	18
MDE (engl. <i>Micro Deval coefficient</i> ) [%]	8	13
Bubrenje [%]	<1	---

Prema geotehničkim svojstvima čelične zgre i prirodni agregat, temeljenima na Marokanskom vodiču za klasifikaciju tla (GMTR), čelična zgra može se klasificirati kao D2 tip tla neosjetljivog na vodu, a prirodni je agregat B6 tip glinovitog šljunka, kao što je prikazano na slici 6.

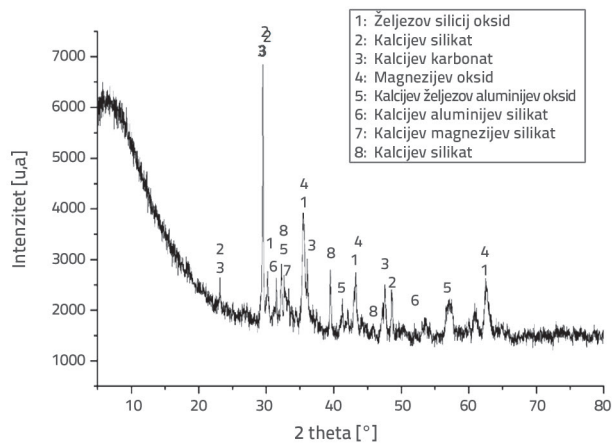
Kada se radi o morfologiji zgre, ona je imala nepravilne oblike s oštrim rubovima i niskom sferičnošću koja je varirala od poluzaobljenih do poluuglatih, kao što je prikazano na slici 7. Za ispitivanje čestica zgre veličine praha korištena je SEM tehnologija. Utvrđeno je da imaju vrlo grubu teksturu površine i poroznu strukturu.



Slika 6. Klasifikacija čelične zgre na temelju GMTR priručnika



Slika 7. a) Morfologija krupnih čestica čelične zgre; b) SEM mikrografija koja prikazuje teksturu površine čestica čelične zgre veličine praha (500X)



Slika 8. RDX difrakcijski uzorci čelične zgre

Tablica 3. Kemijski sastav čelične zgre

Oksidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	KO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
Kemijski sastav [%]	7,59	4,15	15,31	0,45	1,05	0,05	29,31	0,60	1,76	3,78	31,23	2,70

Mineraloška analiza provedena je na prahu čelične zgre primjenom XRD difrakcije. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 8. Difrakcijski uzorci pokazuju visoku kristalnu prirodu; prevladavajuće metalne faze u čeličnoj zgru su: silicijev i željezni oksid Fe<sub>2</sub>.95SiO<sub>0.05</sub>O<sub>4</sub>, kalcijev silikat: CaSiO<sub>3</sub>, kalcijev karbonat: CaCO<sub>3</sub>, magnezij-oksidi MgO, kalcijev željezni aluminijev oksid: Ca<sub>2</sub>FeAlO<sub>5</sub>, kalcijev aluminijev silikat: Ca<sub>2</sub>Al(AlSi)O<sub>7</sub>, kalcijev magnezijev silikat: Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, kalcijev silikat: Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Ovi su rezultati u skladu s onima iz ispitivanja provedenih u literaturi, kao što je rad Tsakiridisa i sur. i rad Barra i sur. [4, 27].

Analiza kemijskog sastava čelične zgre provedena je fluorescentnom rendgenskom spektrometrijom. Kemijski elementi navedeni su u tablici 3. Oksidi CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO i FeO predstavljaju većinu kemijskih sastojaka čelične zgre. Nadalje, kemijska svojstva čelične zgre uvelike ovise o količinama oksida u korištenim sirovinama (lijevano željezo, otpadni metal, itd.), kemikalijama ili spojevima koji se dodaju tijekom procesa proizvodnje [37].

Što se tiče mineraloškog sastava (tablica 4.), kalcijev karbonat (CaCO<sub>3</sub>) i silikat (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) glavne su kristalne mineralne faze sadržane u čeličnoj zgru (tež. % = 62,7 %). Nadalje, željezni silicij oksid i kalcijev aluminijev silikat predstavljaju niski udjeli mervinita, brownmillerita i periklase.

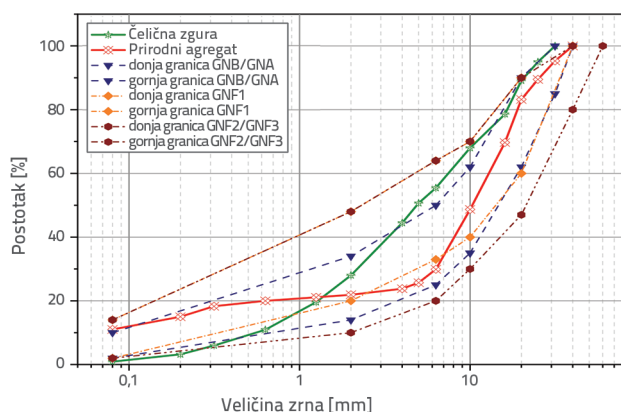
### 3.2. Definiranje mješavina

Otpadna čelična zgru sadrži malu količinu sitnih čestica (prolaznost do 0,08 mm je manja od 1 %). Stoga granulometrijska krivulja zgre nije unutar graničnih krivulja ciljanih materijala, kao što je prikazano na slici 9. Budući da ciljani materijali općenito imaju između 2 i 14 % sitnih čestica, veličina zrna čelične zgre mora se korigirati dodavanjem drugog materijala koji sadrži sitne čestice. Stoga je odabrani materijal bio prirodni otpadni agregat, a granulometrijska krivulja prikazana je na slici 9. Analizirani su mogući sastavi radi određivanja omjera dvaju otpadnih materijala kako bi se napravile mješavine koje zadovoljavaju granične granulometrijske krivulje, kao što je prikazano na slici 9. Nadalje, definirano je pet mješavina: M1 do M5. Pojediniosti o mješavinama navedene su u tablici 5. Izračunane granulometrijske krivulje mješavina prikazane su

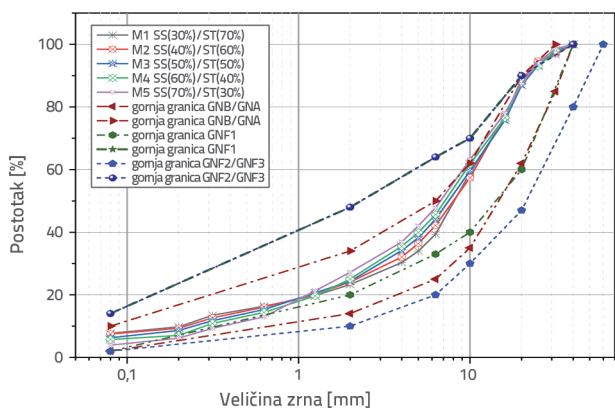
Tablica 4. Mineraloški sastav čelične zgure

Mineraloški element	Kemijska formula	Težinski udio [%]
Kalcijev karbonat	$\text{CaCO}_3$	41,2
Kalcijev silikat (larnit)	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	21,5
Željezov silicij oksid	$\text{Fe}_{2,95}\text{Si}_{0,05}\text{O}_4$	10,8
Kalcijev aluminijev silikat (gehlenit)	$\text{Ca}_2(\text{Al}(\text{Al Si})\text{O}_7)$	9,4
Kalcijev silikat (volastonit)	$\text{Ca Si O}_3$	6,2
Kalcijev magnezijev silikat (mervinit)	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	4,5
Kalcijev željezov aluminijev oksid (brownillerit)	$\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$	4,5
Magnezijev oksid (periklas)	$\text{MgO}$	2

na slici 10. Granulometrijske krivulje svih mješavina su između graničnih krivulja za ciljane materijale. Nadalje, provedena su eksperimentalna ispitivanja svih mješavina kako bi se potvrdili rezultati proračuna krivulja.



Slika 9. Granulometrijska krivulja čelične zgure (SS), prirodnog agregata (ST) i granične granulometrije ciljanih materijala



Slika 10. Granulometrijske krivulje mješavina

Tablica 5. Omjeri svakog otpada u mješavini

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5
Postotak otpadne čelične zgure	30	40	50	60	70
Postotak prirodnog agregata	70	60	50	40	30

### 3.3. Mehanička svojstva napravljenih mješavina

Definirane mješavine (M1 do M5) podvrgnute su nizu ispitivanja kako bi se ocijenila njihova mehanička i geotehnička svojstva, kao što su granulometrijska krivulja, ekvivalent pijeska, vrijednost metilenskog plavila, Proctorovi elementi i CBR ispitivanja. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 6. Nadalje, zamjena čelične zgure prirodnim agregatom utjecala je na sva tehnička svojstva. Dodavanjem prirodnog agregata u mješavine dolazi do povećanja udjela sitnih čestica (agregati manji od 0,08 mm), što rezultira granulometrijom u skladu s normama. Vrijednost metilenskog plavila mješavina smanjena je s 2,7 za mješavinu M1 na 0,7 za mješavinu M5, a time je vrijednost ekvivalenta pijeska u mješavinama povećana s 24,3 % za mješavinu M1 na 63,9 % za mješavinu M5. Stoga povećanje udjela čelične zgure pozitivno utječe na čistoću mješavina. Što se tiče Proctorovog postupka, suha prostorna masa ovisi o udjelu zgure i varira od 2,28 za M1 do 2,41 za M5. Ova varijacija maksimalne suhe prostorne mase može se objasniti velikom specifičnom težinom čelične zgure u usporedbi s težinom prirodnog agregata. Osim toga, optimalna vlažnost smanjena je sa 6,3 % na 4,3 % zbog popunjavanja pora na površini zgure. CBR vrijednost za četiri dana potapanja dodana je zajedno s udjelom zgure kako bi se osiguralo da vrijednosti variraju od 58 % do 156 %. Nadalje, nosivost mješavina poboljšana je zbog vrlo uglatih zrna i cementirajućeg efekta čelične zgure. Dodavanjem prirodnog agregata u mješavinu sa čeličnom zgurom u omjerima od 30 do 70 % poboljšale su se granulometrijske krivulje čelične zgure radi dobivanja prikladnog materijala za upotrebu u gornjim i donjim nosivim slojevima kolničke konstrukcije. Varijacije u mehaničkim svojstvima (VB, OMC, MDD i CBR) mješavina prikazane su na slici 11. Provedena je regresijska analiza kako bi se dobila jednadžba regresije za svako svojstvo.

Tablica 6. Tehnička svojstva mješavina M1, M2, M3, M4 i M5

Svojstvo	M1	M2	M3	M4	M5
Prolazak na 0,08 mm [%]	7,7	7,5	6,3	5,7	3,9
Prolazak na 2 mm [%]	23,3	24,1	24,3	25,1	27,2
Prolazak na 5 mm [%]	34,0	36,4	38,2	39,9	42,0
Prolazak na 20 mm [%]	89,1	88,6	87,0	88,8	87,4
Uglatost I <sub>c</sub> [%]	45,4	51,2	57,5	66,8	75,1
Ekvivalent pijeska [%]	24,3	32,8	41,3	54,1	63,9
VB (g/100g) [%]	2,6	1,82	1,45	1,09	0,7
OMC [%]	6,3	5,9	5,2	4,6	4,3
MDD [g/cm <sup>3</sup> ]	2,28	2,32	2,34	2,37	2,41
IPI [%]	29	38	49	57	79
CBR, nakon 4 dana [%]	58	77	93	110	156

### 3.4. Ocjena primjenjivosti projektiranih mješavina u kolničkim konstrukcijama

U ovom su dijelu procijenjena tehnička svojstva napravljenih mješavina M1 do M5 kako bi se ispitala i njihova primjenjivost u nosivim slojevima kolnika. Potencijalna uporaba ovih otpada u kolničkim slojevima zahtijeva provjeru mnogih uvjeta koji se tiču zahtijevanih karakteristika materijala koji su prikazani u tablici 1. Osim toga, mora se uzeti u obzir ključni uvjet koji se tiče CBR vrijednosti kako bi se donijela informirana odluka o uporabi tog otpada pri izgradnji cesta. CBR indeks mora biti veći od 100 % za materijale gornjeg nosivog sloja i 60 % za materijal donjeg nosivog sloja [38]. Nadalje, francuske smjernice zahtijevaju ispunjenje sljedećih uvjeta neposredne nosivosti: IBI > 50 za gornji nosivi sloj, a IBI > 35 za donji nosivi sloj [39]. Na temelju rezultata CBR i IBI (tablica 6.), mješavina M1 ne može se koristiti kao alternativni materijal niti za gornji niti donji nosivi sloj jer je njezin CBR manji od 60 % (58 % za M1). Utvrđene CBR vrijednosti veće su od 60 % (77 % i 93 % za M2 i M3) i mogu se koristiti za donje nosive slojeve. Međutim, ne preporučuje se njihovo korištenje za gornji nosivi sloj (CBR vrijednosti su manje od 100 %). Mješavine M4 i M5 mogu se koristiti kao alternativni materijali za oba nosiva sloja. Ukratko, mješavine M2, M3, M4 i M5 preporučuju se kao alternativni materijali za donji nosivi sloj. Štoviše, mješavine M4 i M5 preporučuju se kao alternativni materijali za gornji nosivi sloj. Mješavine koje potvrđuju CBR uvjet također moraju zadovoljiti tražene karakteristike (mehanička otpornost, čistoća, uglatost i veličina čestica) prikazane u tablici 1. GNA, GNB, GNC i GND te GNF1, GNF2 i GNF3 konvencionalni su materijali koji se koriste u Maroku za nosive slojeve. Stoga su rezultati iz tablice 6. za svako tehničko svojstvo svake mješavine uspoređeni s potrebnom karakterističnom vrijednošću kako bi se izradile tablice 7. i 8.

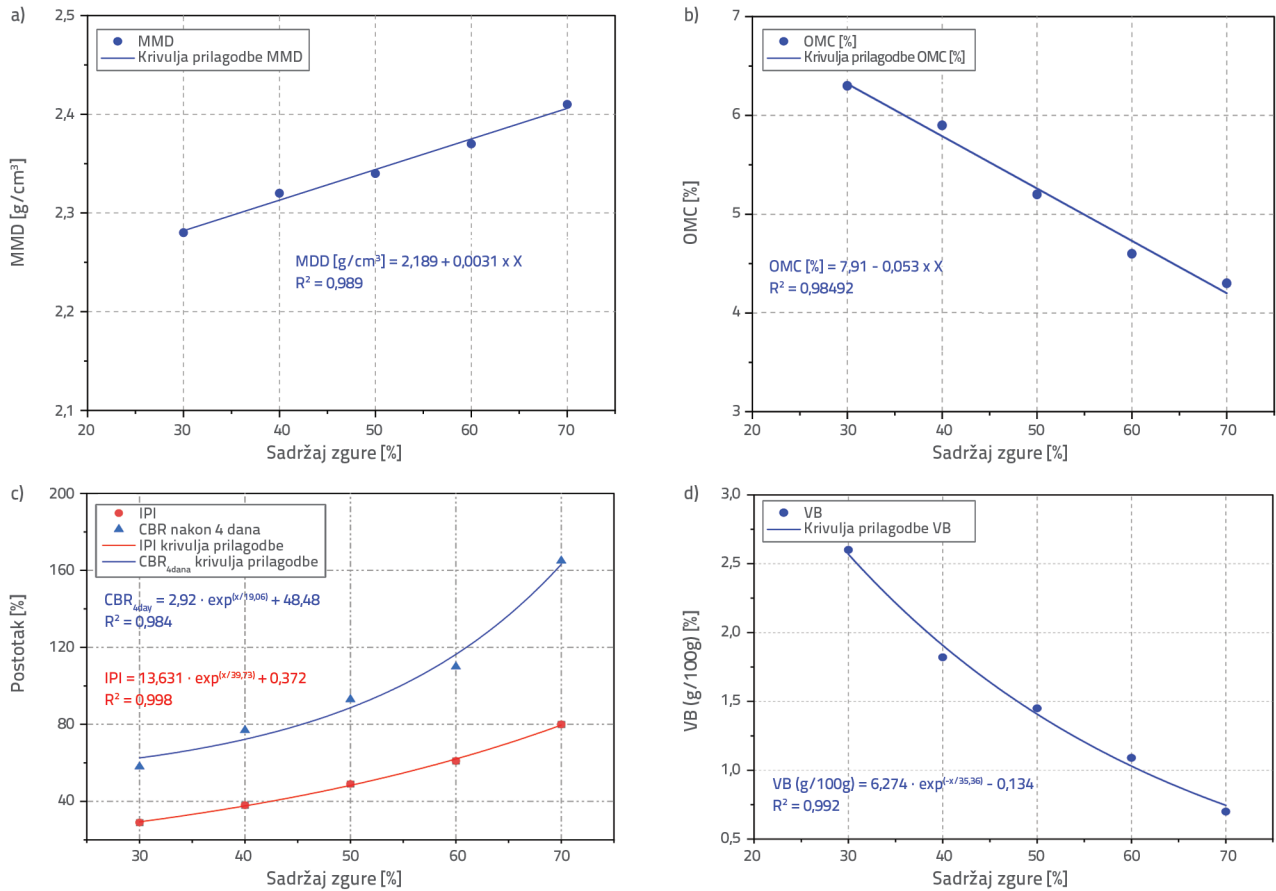
Tablica 7. Potencijalna upotreba mješavina M4 i M5 kao alternativnog materijala za gornji nosivi sloj

Svojstvo	Mehanička otpornost		Čistoća	
	Potvrđeno (V) ili ne (NV)			
Materijal	M4	M5	M4	M5
GNA	V	V	V	V
GNB	V	V	V	V
GNC	V	V	V	V
GND	V	V	V	V
Svojstvo	Kutnost		Veličina čestica	
	Potvrđeno (V) ili ne (NV)			
Materijal	M4	M5	M4	M5
GNA	NV	NV	V	V
GNB	V	V	V	V
GNC	V	V	V	V
GND	V	V	V	V

Potencijalna upotreba mješavina kao materijala za gornji nosivi sloj (za zamjenu GNA, GNB, GNC i GND) otkrila je da M4 i M5 zadovoljavaju sve tražene karakteristike osim oblika zrna GNA materijala. Nadalje, dodavanje prirodnog agregata (niske uglatosti zrna) čeličnoj zguri (visoke uglatosti zrna) smanjuje sveukupnu uglatost mješavine. M4 ili M5 ne mogu se koristiti kao GNA jer materijal mora imati visoku uglatost (I<sub>c</sub> > 100 %). Stoga se M4 i M5 preporučuju kao alternativni GNB, GNC i GND materijali.

Njihova upotreba kao materijala za donji nosivi sloj nije moguća jer M2 mješavina ne zadovoljava svojstva čistoće GNF1 i GNF2, kao ni kutnost GNF1. Osim toga, M3 ne ispunjava razred





Slika 11. Uklapanje tehničkih svojstava svih mješavina: a) za MMD; b) za OMC; c) za CBR i IPI; d) za VB

Tablica 8. Potencijalna upotreba mješavina kao alternativnog materijala za donji nosivi sloj

Svojstvo	Mehanička otpornost				Čistoća			
	Potvrđeno (V) ili ne (NV)							
Materijal	M2	M3	M4	M5	M2	M3	M4	M5
GNF1	V	V	V	V	NV	V	V	V
GNF2	V	V	V	V	NV	V	V	V
GNF3	V	V	V	V	V	V	V	V
Svojstvo	Kutnost				Veličina čestica			
	Potvrđeno (V) ili ne (NV)							
Materijal	M2	M3	M4	M5	M2	M3	M4	M5
GNF1	NV	NV	V	V	V	V	V	V
GNF2	V	V	V	V	V	V	V	V
GNF3	V	V	V	V	V	V	V	V

uglatosti zrna GNF1. Stoga se preporučuje korištenje mješavine M2 kao GNF3, mješavine M3 kao GNF2 i GNF3. Mješavine M4 i M5 mogu se koristiti u svim donjim nosivim slojevima (GNF1-2-3).

### 3.5. Projektiranje kolnika s utvrđenim mješavinama

U ovom se odjeljku prikazuje pokušaj projektiranja kolničke konstrukcije upotrebom definiranih mješavina otpada kao

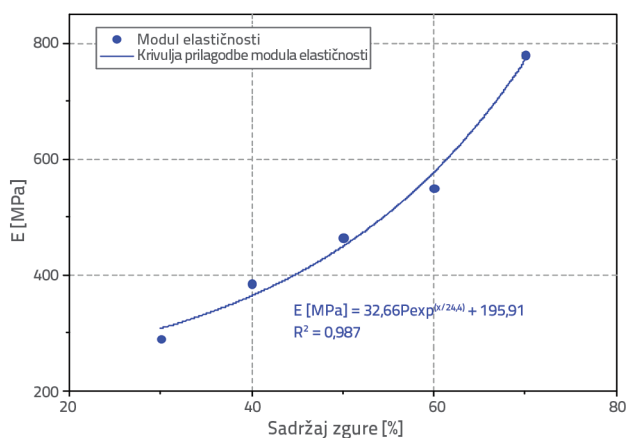
Tablica 9. Izrazi iz literature primjenjeni za procjenu modula elastičnosti

Ime	Područja upotrebe	Izraz	Literatura
<b>Green i Hall (1975.)</b> (Inženjerski korpus američke vojske)	Materijali za gornji i donji nosivi sloj, posteljicu	$E = 37 \cdot (\text{CBR})^{0,711}$	[41]
<b>Ministarstvo prometa države Georgia</b>	Granulirani materijali (stabilizirani vapnenac)	$E = 31,16 \cdot (\text{CBR})^{0,49}$	[42]
<b>Powell i sur. (1984.)</b>	Tlo i granulirani materijal	$E = 17,6 \cdot (\text{CBR})^{0,64}$	[43]
<b>Pappula (2008.)</b>	Posteljica i nevezani granulirani materijal	$E = 9,79 \cdot \text{CBR}$	[44]
<b>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) (1995.)</b>	Materijal za gornji i donji nosivi sloj	$E = 5 \cdot \text{CBR}$	[40]

materijala za nosive slojeve. Glavni cilj je odrediti minimalnu debljinu tih slojeva koji sadrže jednu od projektiranih mješavina. Kolnička konstrukcija projektirana je prema francuskoj metodi dimenzioniranja [39]. To zahtijeva poznavanje modula elastičnosti korištenih materijala. U ovom je radu modul elastičnosti E mješavina procijenjen na temelju empirijskog odnosa između E i CBR-a. Tablica 9. prikazuje sažetak postojećih empirijskih jednadžbi u literaturi. Nadalje, procjena modula elastičnosti učinjena je pomoću empirijske jednadžbe francuskog laboratorija za istraživanja (LCPC) [40]. Procijenjene vrijednosti E navedene su u tablici 10., a krivulja regresije ovih rezultata prikazana je na slici 12.

Tablica 10. Procjena modula elastičnosti mješavina

Mješavine	M1	M2	M3	M4	M5
E [MPa]	290	385	465	550	780



Slika 12. Prilagodba modula elastičnosti svih mješavina

Za projektiranje kolničke konstrukcije primjenjen je program ALIZE-LCPC. ALIZE-LCPC je računalni program za izračun kolničke konstrukcije koji je izradio LCPC [39]. Taj se računalni program koristi za generiranje vrijednosti deformacije (ili naprezanja) na dnu sloja kolničke konstrukcije pod određenim prometnim opterećenjem na temelju Burmisterovog teorijskog modela [45]. Nadalje, većina kolničkih konstrukcija koje se koriste u Maroku

sastoji se od asfaltbetona (AC) u habajućem sloju i nevezanih granuliranih materijala (eng. *Untreated aggregate* - GNT) u nosivim slojevima. Vrijednosti dobivene iz programa ALIZE-LCPC za ovu vrstu konstrukcije uspoređuju se s dopuštenim vrijednostima kako bi se provjerila učinkovitost kolničkih konstrukcija koje sadrže utvrđene mješavine. Dimenzioniranje kolnika temelji se na određivanju prometa koji predstavlja broj prolazaka vozila kolnikom u određenom razdoblju. Ekvivalentni kumulativni promet (NE) odgovara kumulativnom broju ekvivalentnih osovina od 13 tona tijekom razmatranog životnog vijeka. Izračun je dobiven prema izrazu (1):

$$NE = N_{PL} \times CAM \quad (1)$$

pri čemu je  $N_{PL}$  kumulativni broj teških vozila, koju daje izraz (2), a CAM je prosječni faktor ekvivalencije (engl. *Average aggressiveness coefficient*).

$$N_{PL} = 365 \times TMJA \times C \quad (2)$$

pri čemu je TMJA prosječni godišnji dnevni promet, a C kumulativni faktor prometa za određeno vrijeme dano izrazom (3):

$$C = ((1 + \tau)^n - 1) / \tau \quad (3)$$

pri čemu je  $\tau$  geometrijska stopa rasta prometa teških vozila u postocima, a n kumulativno razdoblje u godinama.

Prema poglavlju 3.3, mješavine M4 i M5 mogu koristiti samo materijale iz kolničkih konstrukcija koje sadrže GNB-C-D u nosivom sloju. Nadalje, prema marokanskom priručniku, takve se kolničke konstrukcije primjenjuju za sljedeće prometne klase: TPL1 ( $0 < TMJA \leq 5$ ), TPL2 ( $5 < TMJA \leq 50$ ), TPL3 ( $50 < TMJA \leq 125$ ). U ovom je istraživanju upotrijebljena gornja granica TMJA kako bi se pronašao kumulativni broj teških vozila (NPL) svake klase za dugotrajnu uporabljivost (20 godina) i za stopu rasta od 4 %, tj. TPL1 odgovara  $NPL1 = 5,037 \cdot 10^4$  teška vozila, a TPL2 odgovara  $NPL2 = 5,037 \cdot 10^5$  teških vozila, TPL3 odgovara  $NPL3 = 1,26 \cdot 10^6$  teških vozila. Vrijednosti TPL1, TPL2 i TPL3 ekvivalentne su vrijednostima TC1, TC2 i TC3 francuskog priručnika iz 1998. [46]. Vrijednosti dobivene iz programa ALIZE-LCPC za tipove

Tablica 11. Parametri za određivanje dopuštene deformacije asfaltbetona

Parametri	$\varepsilon_6 (10^\circ\text{C}, 25\text{ Hz})$	$E (10^\circ\text{C}) [\text{MPa}]$	$E (20^\circ\text{C}) [\text{MPa}]$	-1/b	Sh [m]	SN	KC	Kr	KS	CAM
Bitumenski materijali	$100 \cdot 10^{-6}$	7200	3600	5	0,01	0,25	1,1	0,81	1/1,2	0,5

Tablica 12. Dopuštena deformacija prema prometnoj klasi

Prometna klasa	TPL1	TPL2	TPL3
Rizik [%]	30	18	18
Dopuštena tangencijalna deformacija ( $\varepsilon_{t,adm}$ ) [ $\mu\text{def}$ ]	307,0	184,5	153,9
Dopuštena vertikalna deformacija ( $\varepsilon_{z,adm}$ ) [ $\mu\text{def}$ ]	1446,2	650,5	530,8

Tablica 13. Izračunane debljine i deformacije za svaku nosivost posteljica prema TPL3

Materijal	Pf1			Pf2			Pf3			Pf4		
	Debljina [cm]	$\varepsilon_t$ [ $\mu\text{def}$ ]	$\varepsilon_z$ [ $\mu\text{def}$ ]	Debljina [cm]	$\varepsilon_t$ [ $\mu\text{def}$ ]	$\varepsilon_z$ [ $\mu\text{def}$ ]	Debljina [cm]	$\varepsilon_t$ [ $\mu\text{def}$ ]	$\varepsilon_z$ [ $\mu\text{def}$ ]	Debljina [cm]	$\varepsilon_t$ [ $\mu\text{def}$ ]	$\varepsilon_z$ [ $\mu\text{def}$ ]
AC	7	100,7	95,9	7	108,3	91,2	7	123,1	87,7	7	129,2	74,9
M5 kao GNT	20	148,6	503,6	20	160,8	510,9	15	189,8	520,5	20	240,5	527,8
M3 kao GNT	36	201,7	286,6	24	217,6	288,1	16	233,9	371,7	0	0	0
Pfi	--	201,7	528,2	--	217,6	526,2	--	233,9	521,9	--	240,5	527,7

konstrukcija koje su opterećene cestovnim prometom uspoređuju se s dopuštenim vrijednostima kako bi se potvrdile performanse kolničke konstrukcije koja sadrži projektirane mješavine. Dopuštena horizontalna vlačna deformacija ( $\varepsilon_{t,adm}$ ) mora uzeti u obzir izraz (4) za bitumenske materijale:

$$\varepsilon_t < \varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6 \cdot [E(10^\circ\text{C})/E(25^\circ\text{C})]^{1/2} \cdot (NE/10^6)^b \cdot K_c \cdot K_r \cdot K_s \quad (4)$$

gdje je:

- $\varepsilon_t$  - horizontalna deformacija bitumenskih materijala
- $\varepsilon_6$  - deformacija uslijed milijuna opterećenja
- $E$  - modul elastičnosti
- $b$  - nagib linije zamora
- Sh - standardna devijacija debljine sloja
- $K_r$  - koeficijent rizika
- $K_c$  - kalibracijski koeficijent
- $K_s$  - koeficijent ovisan o heterogenosti nosivosti podloge.

U tablici 11. prikazani su parametri za određivanje tangencijalne deformacije asfaltbetona. Za granulirane materijale dopuštena se vertikalna tlačna deformacija ( $\varepsilon_{z,adm}$ ) izračunava prema izrazu (5):

$$\varepsilon_z < \varepsilon_{z,adm} = A \times (NE)^{-0,222} \quad (5)$$

pri čemu je A faktor jednak 0,016 za  $NE < 2,5 \cdot 10^5$  i 0,012. CAM iznosi jedan za granulirane materijale i 0,5 za bitumenske mješavine za korištene prometne klase. Tablica 12. prikazuje dopuštene vrijednosti deformacija prema prometnoj klasi.

Provedena je studija analize pomoću softvera ALIZE za kolnike koji sadrže kombinaciju mješavina M3, M4 i M5 (mješavine koje bi se mogle koristiti u slojevima kolničke konstrukcije). Nadalje, mješavine M4 i M5 koristit će se za gornji nosivi sloj, a mješavine M3 i M4 za donji nosivi sloj. Razmatrane su i različite postojeće nosivosti posteljice. U marokanskom priručniku navode se četiri vrste tla, točnije: Pf1, Pf2, Pf3 i Pf4 s modulima elastičnosti od 20, 50, 120, odnosno 200 MPa. Pretpostavlja se da su dodirne površine slojeva vezane.

Tablica 13. predstavlja analizu primjera kolničke konstrukcije koja sadrži mješavine M3 i M5 u donjem i gornjem nosivom sloju koji su podvrgnuti TPL3 prometu. Izračuni su provedeni za svaku nosivost posteljice (Pf1, Pf2, Pf3 i Pf4). Nadalje, uzete su u obzir dopuštene deformacije navedene u tablici 12. Minimalne debljine navedene su u tablici 13. Debljine su se smanjivale kako se povećavala nosivost tla. Osim toga, marokanske smjernice preporučaju debljine slojeva u rasponu od 4 do 7 cm za zastor, 10 do 20 cm za gornji nosivi sloj i 15 do 35 cm za donji nosivi sloj, ovisno o grupi prometnog opterećenja i nosivosti tla. Debljine (projektiranih mješavina) vrlo su slične onima (konvencionalnih materijala) navedenima u marokanskim smjernicama.

U tablici 14. prikazane su minimalne debljine oba nosiva sloja svake moguće kolničke konstrukcije s različitim kombinacijama projektiranih mješavina M3, M4 i M5. Kolničke konstrukcije 1 i 2 (konstrukcija 2 razvijena je u tablici 13.) pružaju razumne debljine koje su slične onima koje preporučuju marokanske smjernice. Osim toga, konstrukcija 3 provjerena je samo za TPL1 i ne preporučuje se za debljine TPL2 i TPL3.

Tablica 14. Debljine slojeva ceste koje sadrže M3, M4 i M5 i zadovoljavaju dopuštene deformacije

Kolnička konstrukcija	Materijal	Debljina [cm]											
		TPL1				TPL2				TPL3			
		Pf1	Pf2	Pf3	Pf4	Pf1	Pf2	Pf3	Pf4	Pf1	Pf2	Pf3	Pf4
Konstrukcija 1	AC	4	4	4	4	5	5	5	5	7	7	7	7
	GNT (M5)	12	10	12	10	20	18	10	14	20	20	15	20
	GNT (M4)	16	10	0	0	29	21	10	0	34	22	15	0
Konstrukcija 2	AC	4	4	4	4	5	5	5	5	7	7	7	7
	GNT (M5)	14	10	12	10	20	20	15	10	20	20	15	20
	GNT (M3)	15	11	0	0	32	20	15	10	36	24	16	0
Konstrukcija 3	AC	4	4	4	4	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNT (M4)	15	10	14	11	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNT (M3)	16	13	0	0	--	--	--	--	--	--	--	--

#### 4. Zaključak

Provedeno je eksperimentalno istraživanje kako bi se ispitala potencijalna upotreba otpadne čelične zgre kao alternativnog materijala za gornje i doljne nosive slojeve kolnika. Provedena je temeljita karakterizacija sirovine, čelične zgre, kako bi se utvrdila njezina kemijska, mineraloška, geotehnička i mehanička svojstva. Uzorci mješavina zgre i otpadnog drobljenog kamena podvrgnuti su laboratorijskim ispitivanjima radi utvrđivanja njihovih fizikalnih i geotehničkih svojstava. Rezultati su naposljetku potvrđeni zahtjevima nacionalnih normi. Osim toga, analizirano je dimenzioniranje kolničke konstrukcije za određivanje debljine slojeva kolnika koji sadrže otpadne mješavine. Doneseni su sljedeći zaključci:

- Mineraloška struktura čelične zgre je složena i bogata, a sadrži sljedeće mineralne faze:  $\text{Fe}_2.95\text{Si}_0.05\text{O}_4$ ,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$ ,  $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ . Kemijska analiza zgre pokazuje da ona sadrži visoku razinu željeznoga oksida,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , točnije 31,23 % i vapna, točnije 29,31 %, što rezultira većom gustoćom u usporedbi s prirodnim agregatima.
- Čelična zgra ima veću gustoću i izvrsnu otpornost na predobljavanje u usporedbi s prirodnim agregatima. Veličina zrna čelične zgre ima utjecaj na njegovu sposobnost zbijanja i ne sadrži nikakvo punilo.

- Otpadna čelična zgra ne može se izravno upotrebljavati kao zamjena za nosive slojeve jer sadrži nizak udio punila. Preporučuje se miješati otpadnu čeličnu zgru s drugim materijalom koji sadrži potreban udio punila. U ovom je istraživanju prirodni otpadni materijal korišten za proizvodnju zamjene konvencionalnim materijalima iz otpada.
- CBR i IBI vrijednosti mješavina povećavaju se s udjelom zgre zbog morfologije zrna i otpornosti zgre na predobljavanje, što nas dovodi do zaključka da dodatak čelične zgre granuliranim mješavinama povećava njihovu učinkovitost, kao što je prikazano na slici 11.c.
- Geotehnička i mehanička svojstva mješavina M4 (60 % SS-a) i M5 (70 % SS-a) zadovoljila su potrebna svojstva konvencionalnih materijala korištenih u gornjem nosivom sloju kolnika. Stoga se preporučuje koristiti najmanje 60 % otpadne zgre za proizvodnju takvog alternativnog materijala.
- Za donji nosivi sloj se preporučuju mješavine M2 (30 % SS-a) do M5.
- Projektirane debljine mješavina koje se koriste u kolničkim slojevima prihvatljive su i slične debljinama konvencionalnih materijala.

#### Zahvala

Ovo istraživanje nije dobilo nikakvu posebnu potporu od agencija za financiranje u javnom, komercijalnom ili neprofitnom sektoru.

## LITERATURA

- [1] Shi, C.: Steel Slag-Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties, *J. Mater. Civ. Eng.*, 16 (2004) 3, pp. 230-236, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)).
- [2] Motz, G.J.H.: Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Encycl. volcanoes*, (2020), pp. 662
- [3] Rees, F.: *Mobilité des métaux dans les systèmes sol-plante-biochar*, Agronomie Université de Lorraine, Français, 2014., NNT: 2014LORR0293f
- [4] Barra, M., Ramonich, E.V., Munoz, M.A.: Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads, *Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications*, (2001), pp. 423-432
- [5] Motz, H., Geiseler, J.: Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Manag.*, 21 (2001) 3, pp. 285-293, [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00102-1).
- [6] Amrani, M., et al.: Feasibility of using phosphate wastes for enhancing high-temperature rheological characteristics of asphalt binder, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 22 (2020) 5, pp. 1407-1417, <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01026-1>.
- [7] Benahsina, A., El Haloui, Y., Taha, Y., Elomari, M., Bennouna, M.A.: Natural sand substitution by copper mine waste rocks for concrete manufacturing, *J. Build. Eng.*, 47 (2022), pp. 103817, Apr. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103817>.
- [8] Amrani, M., Taha, Y., El Haloui, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R.: Sustainable reuse of coal mine waste: Experimental and economic assessments for embankments and pavement layer applications in morocco, *Minerals*, 10 (2020) 10, pp. 1-17, <https://doi.org/10.3390/min10100851>.
- [9] Aziz, M.M.A. Hainin, M.R., Yaacob, H., Ali, Z., Chang, F.L. Adnan, A.M.: Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and highways, *Mater. Res. Innov.*, 18 (2014) 12, pp. S6-255-S6-259, <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000967>
- [10] Akinwumi, I.: Soil modification by the application of steel slag, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 58 (2014) 4, pp. 371-377, <https://doi.org/10.3311/PPci.7239>.
- [11] Shahbazi, M., Rowshanzamir, M., Abtahi, S.M., Hejazi, S.M.: Optimization of carpet waste fibers and steel slag particles to reinforce expansive soil using response surface methodology, *Appl. Clay Sci.*, 142 (2017), pp. 185-192, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.11.027>.
- [12] Wang, S., Li, X., Ren, K., Liu, C.: Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering, *Geotech. Geol. Eng.*, 38 (2020) 5, pp. 4603-4615, <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01313-6>.
- [13] Abdalqadir, Z., Salih, N.: An Experimental Study on Stabilization of Expansive Soil Using Steel Slag and Crushed Limestone, *Sulaimani J. Eng. Sci.*, 7 (2020) 1, pp. 35-46, <https://doi.org/10.17656/sjes.10120>.
- [14] Cikmit, A.A., Tsuchida, T., Hashimoto, R., Honda, H., Kang, G., Sogawa, K.: Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay, *Constr. Build. Mater.*, 227 (2019), pp. 116799, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116799>.
- [15] Zhang, T.S., Liu, F.T., Liu, S.Q., Zhou, Z.H., Cheng, X.: Factors influencing the properties of a steel slag composite cement, *Adv. Cem. Res.*, 20 (2008) 4, pp. 145-150, <https://doi.org/10.1680/adcr.2007.00024>.
- [16] Gao, T., Dai, T., Shen, L., Jiang, L.: Benefits of using steel slag in cement clinker production for environmental conservation and economic revenue generation, *J. Clean. Prod.*, 282 (2021), pp. 124538, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124538>.
- [17] Xiang, X.D., Xi, J.C., Li, C.H., Jiang, X.W.: Preparation and application of the cement-free steel slag cementitious material, *Constr. Build. Mater.*, 114 (2016), pp. 874-879, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.186>.
- [18] Liu, J., Guo, R.: Applications of Steel Slag Powder and Steel Slag Aggregate in Ultra-High Performance Concrete, *Adv. Civ. Eng.*, (2018), <https://doi.org/10.1155/2018/1426037>.
- [19] Roychand, R., Kumar Pramanik, B., Zhang, G., Setunge, S.: Recycling steel slag from municipal wastewater treatment plants into concrete applications - A step towards circular economy, *Resour. Conserv. Recycl.*, 152 (2020) 10, pp. 104533, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104533>.
- [20] Wang, G., Chen, X., Dong, Q., Yuan, J., Hong, Q.: Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation, *J. Clean. Prod.*, 262 (2020), pp. 121208, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121208>.
- [21] Shen, W., et al.: Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city, *J. Clean. Prod.*, 256 (2020), pp. 120244, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120244>.
- [22] Maghool, F., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Du, Y.J.: Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications, *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(2017)2, pp. 04016197, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001724](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001724).
- [23] Gao, J., Sha, A., Wang, Z., Tong, Z., Liu, Z.: Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing, *J. Clean. Prod.*, 152 (2017), pp. 429-442, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.113>.
- [24] Wu, J., Liu, Q., Deng, Y., Yu, X., Feng, Q., Yan, C.: Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways, *Soils Found.*, 59 (2019) 4, pp. 955-965, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.009>.
- [25] Kim, K., Haeng Jo, S., Kim, N., Kim, H.: Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage, *Constr. Build. Mater.*, 188 (2018), pp. 1128-1136, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.172>.
- [26] Dondi, G., Mazzotta, F., Lantieri, C., Cuppi, F., Vignali, V., Sangiovanni, C.: Use of steel slag as an alternative to aggregate and filler in road pavements, *Materials*, 14 (2021) 2, pp. 1-13, <https://doi.org/10.3390/ma14020345>.
- [27] AFNOR: NF EN 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, 2013.
- [28] AFNOR: NF EN 933-1: Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, 2012.
- [29] AFNOR: NF EN ISO 17892-12: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of liquid and plastic limits, 2020.
- [30] AFNOR: P18-598 Aggregates, Sand equivalent, 1991.
- [31] AFNOR: NF-P18-598: P18-598 Octobre 1991 Granulats - Équivalent de sable - Granulate, 1991.

- [32] AFNOR: NF-P94-078: Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR, 1997.
- [33] AFNOR: NF P 18-573: Aggregates - Los angeles test, 1990.
- [34] AFNOR: NF P18-572 Aggregates - Micro-deval attribution test, 1990.
- [35] Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y.J., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A.: Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials, *Clean Technol. Environ. Policy*, 19 (2017) 4, pp. 949-958, <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>.
- [36] Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C.: Utilization of steel slag for Portland cement clinker production, *J. Hazard. Mater.*, 152 (2008) 2, pp. 805-811, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.
- [37] Yildirim, I.Z., Prezzi, M.: Geotechnical Properties of Fresh and Aged Basic Oxygen Furnace Steel Slag, *J. Mater. Civ. Eng.*, 27 (2015) 12, pp. 04015046, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001310](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001310).
- [38] Mukabi, J.N.: Review of DCP Based CBR - UCS and Resilient Modulus Models for Applications in Highway and Airport Pavement Design, *Acad. E-Publication Pre-Print*, (2016) 7, pp. 1-19
- [39] SETRA, LCPC: Conception et dimensionnement des structures de chaussée - guide technique, 1994.
- [40] Dione, A.: Estimation du Module réversible de Graves Non traitées et modélisation par éléments finis de chaussées souples en vue d'un dimensionnement mécanistique-empirique, (2015) 8, pp. 150, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4847.8961>.
- [41] Green, J.L., Hall, J.W.: Nondestructive vibratory testing of airport pavements, Volume I., Experimental test results and development of evaluation methodology and procedure, 1975.
- [42] George, K.P.: Prediction of Resilient Modulus From Soil Index Properties, Report No. FHWA/MS-DOT-RD-04-172, (2004) 11, pp. 72
- [43] Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H.C., Nunn, M.E.: The structural design of bituminous roads, TRRL Lab. Rep. No 1115, 1984.
- [44] Puppala, J.: Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design, Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board (TRB), Washington DC, USA, 2008.
- [45] Burmister, D.M.: The theory of the stress and displacements in layered systems and applications of design of airport runway, *Proceeding Highw. Res. Board*, 1943., pp. 126-148
- [46] SETRA, LCPC: Catalogue des structures types de chaussées neuves, 1998.