

Primljen / Received: 21.8.2021.

Ispravljen / Corrected: 9.3.2022.

Prihvaćen / Accepted: 9.7.2022.

Dostupno online / Available online: 10.10.2022.

Učinak stabilizacije tla na projektiranje konvencionalnih i trajnih kolnika u Indiji

Autori:

Doc.dr.sc. **Saurabh Kulkarni**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Pune, Indija

Građevinski fakultet

sskul28@gmail.com

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Mahadeo Ranadive**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Pune, Indija

Građevinski fakultet

msr.civil@coep.ac.in

Stručni rad

Saurabh Kulkarni, Mahadeo Ranadive

Učinak stabilizacije tla na projektiranje konvencionalnih i trajnih kolnika u Indiji

Ovo istraživanje uspoređuje konvencionalni kolnik i trajni kolnik u slučaju tla – smonice stabilizirane s mljevenom granuliranom zgurom iz visoke peći. Mljevena granulirana zgura iz visoke peći (GGBS) može se koristiti pri izgradnji kolnika na tlima male nosivosti. Zgura je dodavana tlu u omjerima od 10 %, 20 %, 30 % i 40 %. Nakon utvrđivanja svojstava mješavina tla i GGBS-e, provedena su ispitivanja optimalnog udjela vlage i maksimalne suhe prostorne mase modificiranim Proctorovim pokusom te kalifornijskog indeksa nosivosti. Nakon utvrđivanja ovih vrijednosti, mehaničko-empirijskom metodologijom projektirano je šest konvencionalnih i šest trajnih kolnika s nestabiliziranom posteljicom i posteljicom stabiliziranom GGBS-om. Kolnici su projektirani pomoću IITPAVE softvera. Relevantnost trajnih kolnika opravdana je na temelju procjene troškova životnog ciklusa i emisije ugljičnog dioksida za životni vijek kolnika od 50 godina. Rezultati provedenog istraživanja pokazuju da za implementaciju trajnih kolnika u zemlji u razvoju kao što je Indija, postoji potreba za dodatnim proučavanjem u području stabilizacije tla kao i osnovnih materijala veće krutosti s obzirom na rastuće cijene bitumena.

Ključne riječi:

stabilizacija tla, trajni kolnik, trošak životnog ciklusa, emisija ugljičnog dioksida

Professional paper

Saurabh Kulkarni, Mahadeo Ranadive

Effect of soil stabilization on design of conventional and perpetual pavement in India

The present study compares conventional pavement and perpetual pavement in the case of ground-granulated blast-slag-stabilized black cotton soil. Ground-granulated blast slag (GGBS) can be used for pavement over weak subgrade. We added slag to soil in proportions of 10 %, 20 %, 30 %, and 40 %. After determining the engineering properties of the soil and GGBS, modified Proctor compaction and California bearing ratio tests were performed. After determining these values, six combinations for conventional pavements and perpetual pavements with treated and non-treated subgrades were designed using a mechanistic-empirical methodology. The pavements were designed using IITPAVE software. The relevance of perpetual pavements was justified based on life-cycle cost assessment and carbon dioxide emissions for a duration of 50 years. The present study concludes that for the implementation of perpetual pavements in a developing country such as India, there is a need for further study in the domain of soil stabilization as well as usage of high-stiffness base materials considering the rising cost of bitumen.

Key words:

soil stabilization, perpetual pavement, life cycle cost, carbon dioxide emission

1. Uvod

Kontinuirani porast broja vozila u Indiji stvara velik pritisak na postojeću cestovnu mrežu. U Indiji su kolnici na glavnim cestovnim pravcima općenito projektirani za 20-godišnji period, stoga je tim kolnicima potrebno periodično održavanje i rekonstrukcija. To rezultira zatvaranjem prometa, privremenim smanjenjem protoka prometa, povećanim troškovima kašnjenja što povećava ukupne troškove i stvara neugodnosti korisnicima. Zemlji u razvoju kao što je Indija potrebni su kolnici duljeg vijeka trajanja zbog nedostatka resursa i neadekvatnog financiranja održavanja infrastrukture. Samo povećanje debljine kolnika ne rješava problem nastanka pukotina uslijed zamora, jer ako naprezanje u slojevima kolnika premašuje granicu izdržljivosti (GI), na kolniku će se prijevremeno pojaviti oštećenja. Koncept GI označava vrijednost deformacije ispod koje, ni tijekom beskonačnog broja ciklusa ponavljanja opterećenja, ne dolazi do pojave strukturnih oštećenja kolnika. Ako su deformacije u kolničkoj konstrukciji pri ponavljanju opterećenja manje od granice izdržljivosti, uporabljivost kolnika će se produžiti. Kolnici čija je uporabljivost 40 do 50 godina nazivaju se trajni kolnici [1]. Kod takvih je kolnika oštećenje konstrukcije ograničeno na habajući sloj i može se sanirati periodičnim održavanjem [2]. To rezultira značajnim smanjenjem potrebe za materijalima zbog smanjenja aktivnosti održavanja, budući da je potrebna obnova samo površinskog sloja, a osnovna konstrukcija ostaje nepromijenjena. Trajni kolnici projektiraju se uzimajući u obzir vrijednosti deformacija pri granici izdržljivosti (GI) za različite slojeve kolnika [3]. Trajni kolnici su se pokazali učinkovitima u zemlji poput Sjedinjenih Američkih Država [4]. Međutim, u Aziji pozitivna iskustva s primjenom savitljivih trajnih kolnika ima samo Kina. U slučaju Indije, službene smjernice o trajnim kolnicima nisu bile dostupne sve dok Indian Roads Congress (IRC 37:2018) nije objavio svoje smjernice u kojima su dane osnovne informacije o trajnim kolnicima. Smonica je tlo vrlo prošireno u prirodi, a u Indiji je više od 20 % površine prekriveno smonicom [5]. Ovaj tip tla karakterizira velika promjena volumena uslijed promjene količine vlage, a posljedica toga mogu biti oštećenja savitljivih kolničkih konstrukcija. Nedovoljna nosivost temeljnog tla utječe na gornje slojeve savitljivog kolnika, pa se stoga za poboljšanje nosivosti takvog tla upotrebljavaju materijali poput letećeg pepela, vapna, prašine iz ciglane, pepela od bagase, itd. Stabilizacija tla cementom nije poželjna s obzirom na ekonomsku isplativost i ekološka pitanja povezana s njegovom proizvodnjom. Uzimajući u obzir različite dostupne materijale, značajno poboljšanje nosivosti tla može se uočiti kada se ono stabilizira mljevenom granularanom troskom iz visoke peći (eng. *ground granulated blast slag* - GGBS) [6]. U prošlosti su provedena neka istraživanja kako bi se provjerio učinak GGBS-e u različitim tlima. Utvrđeno je da je dodavanje GGBS-e korisno za poboljšanje čvrstoće kaolinitnih glina stabiliziranih vapnom [7]. U Velikoj Britaniji kombinacija crvenog gipsa i GGBS-e dala je zadovoljavajuće rezultate u poboljšanju kvalitete tla [8]. U zapadnoj regiji Maharashtra

postoje mnoge tvornice čelika koje proizvode GGBS kao otpadni proizvod, a njegovo odlaganje postaje problem. Stoga je u ovom istraživanju nosivost smonice poboljšana uporabom GGBS-a. Nakon toga, provedena je usporedba šest kombinacija konvencionalnog i trajnog kolnika s posteljicom stabiliziranom i ne stabiliziranom GGBS-om i to na temelju projektirane debljine kolnika, troškova životnog ciklusa i emisije ugljičnog dioksida (CO₂). U ovom istraživanju, za projektiranje kombinacija kolnika, a u skladu s IRC 37 smjernicama, pretpostavljeno je prometno opterećenje od 150 milijuna standardnih osovina (eng. *million standard axle - msa*).

Ciljevi i djelokrug istraživanja

- Utvrđivanje inženjerskih svojstava tla i GGBS-e.
- Projektiranje šest konvencionalnih i šest trajnih kolnika primjenjujući smjernice IRC 37:2018.
- Uspoređivanje troškova životnog ciklusa između svih dvanaest kombinacija kolnika.
- Procjena i usporedba ukupnih emisija CO₂ za svih dvanaest kombinacija kolnika.
- Pronalaženje poželjne kolničke kombinacije s obzirom na troškove kao i s obzirom na ekološke aspekte.

2. Korišteni materijali

U ovom istraživanju korišteni su sljedeći materijali: smonica i mljevena granularana zgura (GGBS).

2.1. Tlo "smonica"

Glavna karakteristika tla smonice je njegov udio gline. U ovom istraživanju smonica je prikupljena iz grada Pune. Radovi na izgradnji ili održavanju kolnika u ovakvim tlima su vrlo skupi, dugotrajni i teški zbog njegove karakteristične promjene volumena s promjenom klimatskih uvjeta [5]. Tlo je prikupljeno ispod razine humusa na dubini od 50 cm. Za prosijavanje uzorka osušenog tla korišteno je indijsko standardno sito od 425 mikrona.

Tablica 1. Provedena ispitivanja

Ispitivanje	Specifikacija indijskih propisa
Hidrometerska analiza	IS: 2720 (Dio IV)-1985
Prosijavanje	IS: 2720 (Dio IV)-1985
Granulometrijski sastav	IS: 2720 (Dio IV)-1975
Atterbergove granice	IS: 2720(DIO-V)-1985
Ispitivanje bubrenja	IS: 2720 (Dio XI) Metoda stalnog tlaka
CBR ispitivanje	IS: 2720 (Dio t XVI)-1987
Proctorov pokus	IS: 2720 (Dio VII)-1980 Metoda lakog zbijanja
Ispitivanje izravnog posmika	IS: 2720 (Dio XIII)-1986

Tablica 2. Svojstva tla

Sastav [%]			Specifična težina	Granica tečenja [%]	Indeks plastičnosti	Granica plastičnosti [%]	OMC [%]	MDD [kN/m ³]
Pijesak	Mulj i glina	Šljunak						
8,1	91,4	0,5	2,65	71	28,90	43,50	21,5	15,70

Tablica 3. Svojstva GGBS-e

Specifična težina	MDD [kN/m ³]	OMC [%]	Indeks plastičnosti
2,80	16,8	21,9	Neplastičan

Tablica 4. Podaci o Atterbergovim granicama i indeksu plastičnosti

Tlo + GGBS	Granica plastičnosti [%]	Granica skupljanja [%]	Indeks plastičnosti [%]	Granica tečenja [%]
Samo tlo	43,50	10,510	28,90	71,0
90 % + 10 %	38,10	9,725	30,00	68,8
80 % + 20 %	34,50	9,435	29,85	64,4
70 % + 30 %	34,45	9,154	24,31	57,8
60 % + 40 %	34,10	8,120	19,95	54,3

Tablica 5. Podaci o bubrenju, koheziji i kutu trenja

BC tlo + GGBS	Bubrenja [kN/m ²]	Kohezija [kN/m ²]	Kut trenja [°]
Samo tlo	292	18,7433	19,60
90 % + 10 %	203	16,6818	20,75
80 % + 20 %	121	14,6905	21,85
70 % + 30 %	73	8,8268	23,37
60 % + 40 %	43	4,9105	23,94

Tablica 6. MDD i OMC vrijednosti kod različitih udjela GGBS-e u tlu

Postotak GGBS [%]	MDD [g/cm ³]	OMC [%]
0	1,600	21,5
10	1,670	19,5
20	1,730	18,6
30	1,700	17,1
40	1,680	16,9

2.2. Mljevena granulirana zgura (GGBS)

GGBS korištena u ovom ispitivanju dobivena je od JSW Steel Limited, Dolvi u okrugu Raigad u državi Maharashtra. Iako se smatra otpadom, može se upotrijebiti kao građevni materijal. U ovom istraživanju, tlo je pomiješano s različitim količinama GGBS-e, a zatim su određena inženjerska svojstva mješavine. Provedena ispitivanja prikazana su u tablici 1. Ova ispitivanja su provedena s 10 %, 20 %, 30 % i 40 % udjela GGBS-e u tlu.

2.3. Analiza rezultata ispitivanja

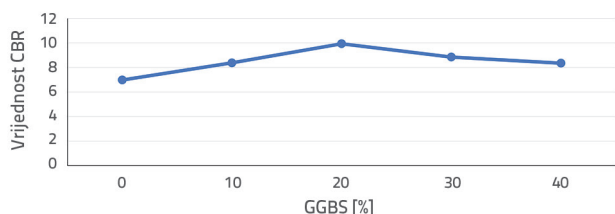
U tablicama 2. i 3. navedena su svojstva tla, odnosno GGBS-e. Atterbergove granice i indeks plastičnosti mješavina prikazani

su u tablici 4. Rezultati ispitivanja bubrenja prikazani u tablici 5. Sugeriraju da se potencijal bubrenja smanjuje s većim udjelom GGBS-e. Stabilnost u tlu će se poboljšati kako se potencijal bubrenja bude smanjivao. Povećani udio GGBS-e rezultira nakupljanjem velike količine kalcijevih iona u sloju koji okružuje površinu zrna tla i time smanjuje vlažnost, kao i bubrenje tla. Poboljšanje čvrstoće tla može se uočiti, jer pucolanski spojevi ne samo da približavaju čestice tla, već i smanjuju mogućnost bubrenja. Iz tablice 5. može se uočiti da povećan udio GGBS-e u tlu smanjuje kohezijsku vrijednost, a povećava kut trenja. To znači da zbog stabilizacije s GGBS-om tlo postaje otpornije na posmična naprezanja i manje kohezivno u naravi. Može se zaključiti da smonica s dodatkom GGBS-e pokazuje poboljšanu posmičnu čvrstoću. Rezultati ispitivanja zbijenosti u tablici 6. pokazuju da

Tablica 7. CBR pri različitim postotcima GGBS-e

Tlo + postotak GGBS	Broj uzoraka CBR-a			Srednja CBR [%]	Standardna devijacija	Dopušteno odstupanje CBR [%]	Maksimalno odstupanje CBR [%]
	1	2	3				
0	7,40	6,67	6,87	6,98	0,38	+/- 1	0,73
10	8,34	8,48	8,32	8,38	0,09	+/- 2	0,16
20	9,18	10,10	10,54	9,94	0,69	+/- 2	0,60
30	8,85	8,92	8,78	8,85	0,07	+/- 2	0,14
40	8,50	8,42	8,13	8,35	0,19	+/- 2	0,37

se optimalni udio vlage (OMC) smanjuje s povećanjem udjela GGBS-a. Slično tome, u slučaju najveće suhe gustoće (MDD), uočeno je da se MDD povećala do 20 % udjela GGBS-e, a nakon toga se smanjuje. To smanjenje vrijednosti MDD-a posljedica je grubljih čestica GGBS-e koje zbog svoje površinske teksture i veličine imaju visoku otpornost na trenje. To također rezultira smanjenjem kapaciteta zadržavanja vode pa se stoga OMC također smanjuje. Pojediniosti o MDD i OMC u stabiliziranoj mješavini prikazane su u tablici 6.



Slika 1. Odnos između udjela GGBS-e u tlu i CBR vrijednosti

Dodavanje GGBS-e do 20 % pokazuje poboljšanje CBR-a kao što je prikazano na slici 1. Vrijednost CBR-a se povećala sa 6,98 % na 9,94 % dodavanjem 20 % količine GGBS-a, a povećanjem količine GGBS-e iznad 20 %, vrijednost CBR-a se smanjila. Pojediniosti o očitanjima ispitivanja CBR prikazane su u tablici 7. Pri projektiranju kolnika s posteljicom stabiliziranom dodatkom 20 % GGBS-e usvojena je projektna vrijednost CBR od 9,94 %.

3. Projektni kriteriji za trajni kolnik

Vertikalna tlačna deformacija na površini posteljice i horizontalna vlačna deformacija na dnu asfaltnih slojeva

smatraju se kritičnim deformacijama [9]. Prethodna istraživanja usvojila su maksimalnu granicu od 70 $\mu\text{m}/\text{m}$ za horizontalnu vlačnu deformaciju i 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ za vertikalnu tlačnu deformaciju [2, 3, 4, 10]. Prema IRC 37:2018, vrijednosti naprezanja od 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ i 80 $\mu\text{m}/\text{m}$ predložene su za granicu izdržljivosti prema kriteriju kolotražnja odnosno zamora, budući da je prosječna godišnja temperatura kolnika u većem dijelu Indije gotovo 35 °C. Svojstva materijala, razmatrana prema IRC 37 smjernicama, prikazana su u tablici 8.

3.1. Razmatrane kolničke konstrukcije

Za projektiranje kolnika u skladu sa smjernicama IRC37 predlažu se kombinacij kako slijedi:

- Konvencionalni kolnik
 - asfaltni sloj (BC), tj. asfaltbeton + gusti bitumenski makadam (DBM) na podlozi, tj. asfaltnim makadamom (WMM) i mehanički stabiliziranim nevezanim nosivim slojem (GSB) (kombinacija A)
 - BC s GSB-om (kombinacija B)
 - BC sa cementom stabiliziranim nosivim slojem (CTSB) i WMM (kombinacija C)
- Konvencionalni kolnik s GGBS-om
 - kombinacija A sa stabiliziranom posteljicom (kombinacija D)
 - kombinacija B sa stabiliziranom posteljicom (kombinacija E)
 - kombinacija C sa stabiliziranom posteljicom (kombinacija F)
- Trajni kolnik
 - BC s WMM i GSB (kombinacija G)
 - BC s GSB (kombinacija H)
 - BC s CTSB i WMM (kombinacija I)

Tablica 8. Svojstva materijala razmatrana prema smjernicama u IRC 37:2018

Vrsta materijala	Poissonov koeficijent	Modul elastičnosti / otpornosti [MPa]
Zrnati materijal na podlozi stabiliziranoj cementom	0,35	350
Posteljica	0,35	$17,6 \times (\text{CBR})^{0,64}$
Mehanički stabilizirani nosivi sloj	0,35	$0,2 \times M_{RS} \times (h)^{0,45}$
Cementom stabilizirani nosivi sloj	0,25	600
Asfaltni sloj s vezivom viskoznosti VG40	0,35	3000

M_{RS} - modul otpornosti tla posteljice u MPa, h - debljina znatog sloja u mm

4. Trajni kolnik s GGBS-om

- kombinacija G sa stabiliziranom posteljicom (kombinacija J)
- kombinacija H sa stabiliziranom posteljicom (kombinacija K)
- kombinacija I sa stabiliziranom posteljicom (kombinacija L)

3.2. Kriteriji zamora

Prema smjernicama IRC 37, ekvivalentan broj ponavljanja standardnog osovinskog opterećenja koje može podnijeti kolnik bez pojave oštećenja uslijed zamora s razinom pouzdanosti od 90 %, dan je jednadžbom 1. Za ovo istraživanje razmatran je volumni udio šupljina u asfaltnoj mješavini od 3,5 %, te volumni udio bitumena u asfaltnoj mješavini koja se koristi u nosivom asfaltnom sloju od 11,5 % prema IRC 37 smjernicama, izraz (1).

$$N_f = \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3,89} \times 2,52 \times 10^{-7} \quad (1)$$

gdje je ϵ_t = maksimalna horizontalna vlačna deformacija, N_f = broj ponavljanja opterećenja do pojave oštećenja uslijed zamora u asfaltnom sloju izraženo u "msa".

Prema izrazu (1), dopuštena vlačna deformacija na dnu asfaltnog sloja za konvencionalni kolnik projektiran za 150 "msa" iznosi 159,19 $\mu\text{m/m}$.

3.3. Kriteriji kolotražnja

Ekvivalentan broj standardnih ponavljanja osovinskog opterećenja koje kolnik može izdržati do pojave kolotruga dubine najmanje 20 mm, prema smjernicama IRC 37, pri 90 % razine pouzdanosti dan je izrazom (2).

$$N_R = \left(\frac{1}{\epsilon_v}\right)^{4,5337} \times 1,41 \times 10^{-8} \quad (2)$$

gdje je, ϵ_v = vertikalna tlačna deformacija na površini posteljice i N_R = broj ponavljanja opterećenja do pojave oštećenja u obliku kolotruga izraženo u "msa".

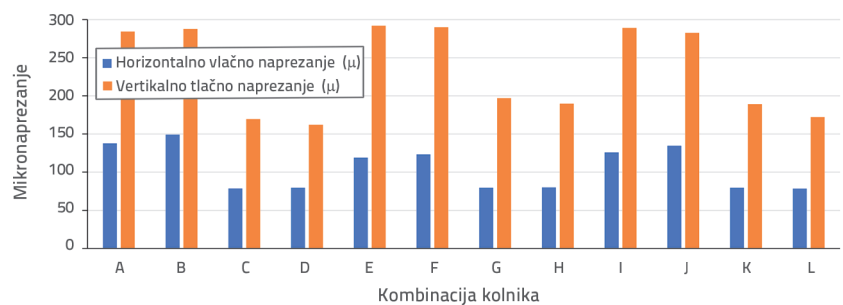
Prema izrazu (2), dopuštena vertikalna tlačna deformacija na površini posteljice, za konvencionalni kolnik projektiran za 150 "msa" je 292 $\mu\text{m/m}$.

Debljina kolnika veća od one definirane vrijednošću GI ne pruža nikakvu zaštitu od oštećenja konstrukcije. Zapravo, usvajanjem veće debljine od debljine

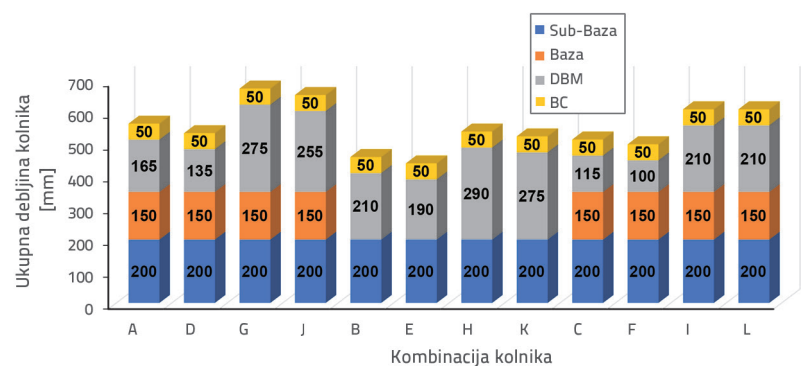
dobivene prema GI može rezultirati prekomjernim projektnim debljinama i dodatnim troškovima. Kao što je navedeno u tablici 9. i prikazano na slici 2., projektiranje trajnog kolnika provedeno je uz pomoć softvera IITPAVE. Dok se GI vrijednost deformacije ne približi vrijednosti 200 $\mu\text{m/m}$ prema kriteriju kolotražnja, odnosno 80 $\mu\text{m/m}$ prema kriteriju zamora, kriterij koji se prvi zadovolji uzima se kao mjerodavan za projektiranje. U skladu s osnovnim konceptom trajnih kolnika u svrhu osiguranja dovoljne krutosti u gornjem sloju pomoću asfaltnih slojeva, uzeta je u obzir minimalna dopuštena debljina mehanički zbijenog nosivog sloja i cementom stabiliziranog nosivog sloja prema IRC specifikacijama za sve dionice kolnika prikazane na slici 3.

Razmatrano je standardno osovinsko opterećenje od 80 kN sa sklopom jednog dvostrukog kotača i radijusom kontakta od 15,5 cm s tlakom u gumama od 0,56 MPa prema preporuci IRC 37. Može se primijetiti da je debljina asfaltnih slojeva mnogo veća na trajnim kolnicima u odnosu na konvencionalne kolnike neovisno o tome je li posteljica stabilizirana ili nije. To je zbog potrebe za debljim gornjim slojevima u trajnim kolnicima kako bi se oduprli oštećenjima konstrukcije. Ovi rezultati su u skladu s prethodnim istraživanjima o trajnim kolnicima [11].

U ovom radu, prema smjernicama u IRC 37, primjenjuje se linearno elastična teorija gdje se pretpostavlja da su svi slojevi osim posteljice beskonačne horizontalne dimenzije, ali konačne debljine, a posteljica se smatra polubeskonačnom.



Slika 2. Vrijednosti deformacija za različite kombinacije kolnika



Slika 3. Debljina kolnika prema kombinaciji

Tablica 9. Debljina slojeva razmatranih kombinacija kolnika

Vrsta kolnika	Kombinacija	Debljina sloja [mm]				Ukupna debljina [mm]	Vertikalna tlačna deformacija [μ]	Horizontalna vlačna deformacija [μ]
BC s GSB i WMM								
		GSB	WMM	DBM	BC			
Konvencionalni	A	200	150	165	50	565	284,30	137,80
Konvencionalni s GGBS	D	200	150	135	50	535	287,70	149,20
Trajni	G	200	150	275	50	675	169,50	78,62
Trajni s GGBS	J	200	150	255	50	655	162,10	79,57
BC s GSB								
		GSB		DBM	BC			
Konvencionalni	B	200		210	50	460	292,00	119,10
Konvencionalni s GGBS	E	200		190	50	440	290,00	123,40
Trajni	H	200		290	50	540	197,10	79,57
Trajni s GGBS	K	200		275	50	525	189,80	80,00
BC s CTSB i WMM								
		CTSB	WMM	DBM	BC			
Konvencionalni	C	200	150	115	50	515	289	126
Konvencionalni s GGBS	F	200	150	100	50	500	282,6	134,7
Trajni	I	200	150	210	50	610	189,20	79,57
Trajni s GGBS	L	200	150	210	50	610	172,20	78,55

4. Izračun troškova životnog ciklusa

Usporedba troškova životnog ciklusa za cestu širine 14 m i duljine 1000 m za sve navedene kombinacije kolnika provedena je primjenjujući predviđene cijene za 2021. godinu, kao što je prikazano u tablici 10., za vladu pokrajine Maharashtra, Indija [12]. U obzir su uzete i specifikacije koje je preporučilo indijsko Ministarstvo cestovnog prometa i autocesta (MoRT&H) za materijale i izvođenje radova.

Tablica 10. Plan cijena za 2021. godinu u pokrajini Maharashtra

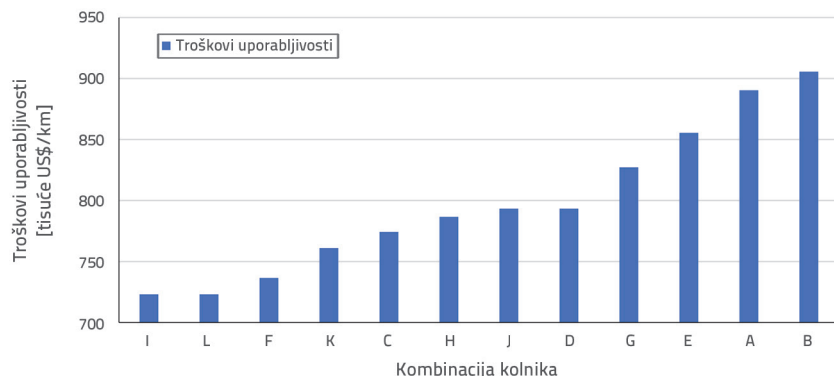
Materijal	Cijena [US \$/m ³]	Broj stavke u specifikaciji MoRT&H-a
CTSB	25,70	404
WMM	24,03	406
GSB	23,83	401
BC	98,78	509
DBM	92,55	507

U ovom se istraživanju primjenjuje metoda neto sadašnje vrijednosti (eng. *Net Present Value* - NPV) za dugoročni izračun troškova s diskontnom stopom od 5 % i stopom inflacije od 10 % [13]. Smjernice MoRT&H-a preporučuju izvedbu nadsloja BC-a

od 25 mm svakih pet godina kao dio redovnog održavanja [14]. U ovom istraživanju uzeti su u obzir parametri poput početnog troška izgradnje, troška periodičnog održavanja u obliku izvedbe BC-a nadsloja (nadsloj od asfalbetona) i troška životnog ciklusa s obzirom na pet desetljeća korištenja. Uzevši u obzir ove parametre, trošak periodičnog održavanja prikazan je u tablici 11.

Tablica 11. Troškovi održavanja (tisuće US \$) za nadsloj od asfalbetona (BC) debljine 25 mm

Godina	Cijena po m ³	Trošak inflacije	NPV
5.	34,36	43,85	27,23
10.	34,36	55,97	21,58
15.	34,36	71,43	17,10
20.	34,36	91,16	13,55
25.	34,36	116,35	10,74
30.	34,36	148,49	8,51
35.	34,36	189,52	6,74
40.	34,36	241,88	5,34
45.	34,36	308,71	4,24
50.	Rekonstrukcija		
		Ukupno:	115,03



Slika 4. Analiza troškova životnog ciklusa za razmatrane kombinacije kolničkih konstrukcija

Prilikom izračuna budućih troškova izgradnje kolnika, pretpostavljena je inflacija cijena za polovicu trajanja projektnog razdoblja. Ovo se razmatranje temeljilo na informacijama dobivenim od akademika i inženjera vezanih uz industriju izgradnje cesta, kao i iz literature. Trošak rekonstrukcije nakon svakih 20 godina također se uzima u obzir u izračunu NPV troškova životnog ciklusa konvencionalnog kolnika s posteljicom i bez posteljice stabilizirane GGBS-om. Izračun ukupnog troška životnog ciklusa prikazan je u tablici 12. Trošak životnog ciklusa za svaku kombinaciju kolnika u rastućem redoslijedu prikazan je na slici 4.

U slučaju BC s WMM i GSB, korištenje GGBS smanjuje ukupnu debljinu kolnika u slučaju konvencionalnog i trajnog kolnika za 30 mm, odnosno 20 mm. Tijekom analize troška životnog ciklusa (LCCA) uočena je ušteda troškova od 8,44 % ako se GGBS koristi u projektu konvencionalnog kolnika. Slično tome, uštede od 7,06 % i 12,22 % uočene su u trajnom kolniku sa stabiliziranom i nestabiliziranom posteljicom. U slučaju

BC-a s GSB-om, korištenje GGBS-a smanjuje ukupnu debljinu kolnika u slučaju konvencionalnog i trajnog kolnika za 20 mm odnosno 15 mm. LCCA je u ovom slučaju pokazala da se uočava ušteda od 5,86 % ako se GGBS koristi u projektu konvencionalnog kolnika. Slično tome, uštede od 15,11 % i 18,97 % uočene su za trajni kolnik sa stabiliziranom i nestabiliziranom posteljicom.

No, u slučaju BC, CTSB i WMM uporaba GGBS-e smanjuje ukupnu debljinu kolnika u slučaju konvencionalnog kolnika za 15 mm. U slučaju trajnog kolnika ne uočava se promjena debljine bez obzira na uporabi stabilizirane posteljice. U izradi LCCA uočeno je da se postiže ušteda od 5,11 % ako se GGBS koristi u konvencionalnom kolniku. Slično tome, ušteda od 7,06 % i 12,22 % uočena je u trajnom kolniku sa stabiliziranom i nestabiliziranom posteljicom.

5. Emisija ugljičnog dioksida

Koncept utjelovljenog CO₂ bilo kojeg materijala označava ukupni ugljični dioksid koji se oslobađa pri proizvodnji tog materijala. Za određivanje utjelovljenog CO₂ uzima se u obzir energija uporabljivosti vijeka. Tablica 13. prikazuje utjelovljeni CO₂ za različite materijale na temelju istraživanja Auroville Earth Institute i iz registra ugljika i energije [15, 16].

Tablica 14. prikazuje opći omjer različitih materijala korištenih u različitim slojevima savitljivog kolnika na temelju IRC SP:89, MoRT&H specifikacijama i IRC SP:53 [14, 17, 18]. Utjelovljeni CO₂

Tablica 12. LCCA (tisuće US \$) po kilometru

Vrsta kolnika	Kombinacija	Početni	Troškovi održavanja	NPV	Ukupni trošak poslije 50 godina	Ušteda na troškovima [%]
BC s GSB i WMM						
Konvencionalni	A	400,13	115,03	375,24	890,40	-
Konvencionalni s GGBS	D	361,24	115,03	338,76	815,03	8,46
Trajni	G	542,66	115,03	169,58	827,27	7,09
Trajni s GGBS	J	516,82	115,03	161,51	793,36	10,89
BC s GSB						
Konvencionalni	B	408,08	115,03	382,50	905,61	-
Konvencionalni s GGBS	E	382,10	115,03	358,28	855,41	5,54
Trajni	H	511,71	115,03	159,89	786,63	13,13
Trajni s GGBS	K	492,19	115,03	153,84	761,06	15,96
BC s CTSB i WMM						
Konvencionalni	C	340,24	115,03	318,98	774,25	-
Konvencionalni s GGBS	F	320,73	115,03	300,81	736,57	4,86
Trajni	I	463,26	115,03	144,82	723,11	6,64
Trajni s GGBS	L	463,26	115,03	144,82	723,11	6,64

za različite slojeve savitljivog kolnika također je prikazan u tablici 14., a početna emisija CO₂ prikazana je u tablici 15.

Tablica 13. Utjelovljeni CO₂ (kg/kg materijala)

Materijal	Utjelovljeni CO ₂
GGBS	0,07
Krupni agregat	0,0216
Cement	0,83
Fini agregat	0,002
Bitumen	0,48

Tablica 14. Opća svojstva pojedinih slojeva kolničke konstrukcije

Svojstva	Sloj kolničke konstrukcije				
	CTSB	DBM	GSB	BC	WMM
Cement (% maseni)	2	-	-	-	-
Bitumen (% maseni)	-	4,5	-	5,5	-
Agregati (% maseni)	98	95,5	100	94,5	100
Gustoća [kg/m ³]	2300	2300	2300	2400	2300
Krupni agregat [%]	80	60	80	55	70
Sitni agregat [%]	20	40	20	45	30
Utjelovljeni CO ₂ za 1/m ³	78,03	79,90	40,66	92,34	36,15

Primjer za izračun utjelovljenog CO₂ za sloj prikazan je u nastavku.

Utjelovljeni CO₂ za 1 m³ sloja kolnika (kg) = 1 m³ × gustoća × [(maseni % sitnog agregata × utjelovljeni CO₂ sitnog agregata) + (maseni % krupnog agregata × utjelovljeni CO₂ krupnog agregata) + (maseni % bitumena × utjelovljeni CO₂ bitumena)]

Tablica 15. CO₂ emisija za razmatrane kombinacije kolnika (u tonama)

Vrsta kolnika	Kombinacija	Početna emisija CO ₂	Ukupna emisija CO ₂ (u 50 godina)	Smanjenje emisije CO ₂ [%]
BC s GSB i WMM				
Konvencionalni	A	438,97	1575,46	
Konvencionalni s GGBS	D	405,41	1474,79	6,82
Trajni	G	562,01	852,89	84,72
Trajni s GGBS	J	539,64	830,52	89,69
BC s GSB				
Konvencionalni	B	413,39	1085,34	-
Konvencionalni GGBS	E	391,02	1040,59	4,30
Trajni	H	502,88	793,75	36,73
Trajni s GGBS	K	486,10	776,97	39,68
BC s CTSB i WMM				
Konvencionalni	C	487,67	1233,90	-
Konvencionalni GGBS	F	470,89	1200,34	2,79
Trajni	I	593,94	884,81	39,45
Trajni s GGBS	L	593,94	884,81	39,45

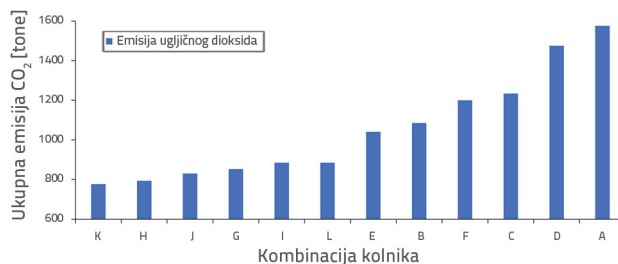
Primjer izračuna za utjelovljeni CO₂ za 1 m³ sloja BC-a je sljedeći:

$$1 \times 2400 \times [(0,945 \times 0,45 \times 0,002) + (0,945 \times 0,55 \times 0,0216) + (0,055 \times 0,48)] = 92,34 \text{ kg}$$

Izračun uzorka za početnu emisiju CO₂ za kombinaciju A je sljedeći:

$$[(92,34 \times 0,050) + (79,90 \times 0,1650) + (36,15 \times 0,150) + (40,66 \times 0,200)] \times 14 \times 1000 = 438,97 \text{ tona}$$

Ukupna emisija CO₂ zbog rekonstrukcije kao i zbog aktivnosti održavanja također je uzeta u obzir u izračunima koji su napravljeni za raspon od 50 godina kao što je prikazano u tablici 15. Ukupna emisija CO₂ uzlaznim redoslijedom za sve kombinacije kolnika prikazana je na slici 5. Utjelovljeni CO₂ GGBS-e po kubičnom metru volumena je oko 120 kg prema registru ugljika i energije. Stoga korištenje GGBS-e u stabilizaciji tla nadoknađuje dio ugljičnog otiska uzrokovanog proizvodnjom zgre.



Slika 5. Ukupna emisija CO₂ za razmatrane kombinacije kolnika

6. Zaključak

- Kad je riječ o kolniku s posteljom stabiliziranom GGBS-om, dolazi do značajnog smanjenja debljine aafaltnih slojeva. Iako debljine kolnika predložene u ovom istraživanju nisu apsolutne, daju sliku o usporedbi konvencionalnog i trajnog kolnika. Koncept trajnog kolnika predlaže deblje asfaltne slojeve kako bi se razine deformacije zadržale ispod granice izdržljivosti, ali istraživanje pokazuje da su postojanje stabilne podloge, upotreba stabilizirane postelje i upotreba osnovnih materijala visoke krutosti važni s obzirom na goleme troškove potrebne za izgradnju kolnika u zemlji uvoznici nafte poput Indije. To se može povezati s rastućim cijenama sirove nafte u svijetu
- Usporedba troškova pokazuje da je BC s CTSB i WMM najisplativija opcija kolnika, dok bi opcija BC s GSB i BC s GSB i WMM kombinacijom bile druga i treća opcija s obzirom na ukupne troškove.
- Može se zaključiti da je obračun troškova izveden sa sadašnjom cijenom materijala. U slučaju BC s GSB i WMM, konvencionalni kolnik s GGBS-om pokazao se ekonomičnim u usporedbi s konvencionalnim trajnim i kolnikom s nestabiliziranom posteljom. Stoga analiza troškova prema trenutnim cijenama i ispravno predviđanje inflacije postaju najvažniji.
- Ukupna analiza emisije CO₂ pokazuje značajno smanjenje ukupnog ugljičnog otiska davanjem prednosti primjene trajnog kolnika u odnosu na konvencionalni, uzimajući u obzir uporabljivost od 50 godina. Analiza također pokazuje da bi, ako se uzme u obzir pitanje ugljičnog otiska, redoslijed prednosti u odabiru kolnika među ovdje razmatranim kombinacijama bio BC s GSB, zatim BC s GSB i WMM, te na kraju BC s CTSB i WMM.
- Iako je početni trošak izgradnje trajnog kolnika veći od troškova konvencionalnog kolnika, dugoročne koristi su primjetne. Smanjenje radova na održavanju rezultiralo bi smanjenjem potrošnje prirodnih resursa, uštedom energije kao i smanjenjem onečišćenja. Prednosti projektiranja trajnog kolnika pokazuju da trajni kolnici mogu biti dio održivog razvoja zemalja u razvoju.

LITERATURA

- [1] IRC 37, Guidelines for Design of Flexible Pavement, Fourth Revision, Indian Road Congress, New Delhi, 2018.
- [2] Walubita, L., Scullion, T.: Texas Trajni i Pavements – New Design Guidelines, Report No: 0-4822-P6, Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration, 2010.
- [3] Timm, D.H., Newcomb, D.E.: Trajni i pavement design for flexible pavements in the US, International Journal of Pavement Engineering, 7 (2006) 2, pp.111-119, <https://doi.org/10.1080/10298430600619182>.
- [4] Robbins, M.H., Tran, N.H., Timm, D., Richard Willis, J.: Adaptation and validation of stochastic limiting strain distribution and fatigue ratio concepts for Trajni i pavement design, Road Materials and Pavement Design, 16 (2015) 2, pp. 100-124.
- [5] Noolu, V., Mudavath, H., Pillai, R.J., Yantrapalli, S K.: Permanent deformation behaviour of black cotton soil treated with calcium carbide residue, Construction and Building Materials, 223 (2019), pp. 441-449.
- [6] Yadu, L., Tripathi, R.K.: Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the engineering behavior of stabilized soft soil, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference, Procedia Engineering, 51 (2013), pp.125-131.
- [7] Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D.: Effects of partial substitution of lime with Ground Granulated Blastfurnace Slag (GGBS) on the strength properties of lime stabilised sulphate bearing clay soils, Engineering Geology, 51 (1998), pp. 37-53.
- [8] Hughes, P.N., Glendinning, S., Manning, D.A., White, M.L.: Use of red gypsum in soil mixing engineering applications, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 164 (2011) 3, pp.223-23.
- [9] Kulkarni, S., Ranadive, M.S.: The parametric comparison of Trajni i pavements with respect to Life-cycle cost and greenhouse gas emissions, Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.018>
- [10] Carpenter, S.H.: Fatigue Performances of IDOT Mixtures, Research Report FHWA-ICT-07-007, Illinois Center for Transportation, 2006.
- [11] Lee, S.I., Carrasco, G., Mahmoud, E., Walubita, L.: Alternative Structure and Material Designs for Cost-Effective Trajni i Pavements in Texas. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 146 (2020) 4, <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000226>
- [12] Government of Maharashtra, PWD State Schedule of Rates 2020-21.
- [13] Cement Manufacturers' Association, Grameen Sampark, Cement Concrete Roads v/s Bituminous Roads- A Cost Analysis, Vol II, National Rural Road Development Agency, New Delhi, 2006.
- [14] Ministry of Road Transport and Highways Government of India, Specification for Road and Bridge Works, 5th revision, Indian Road Congress, New Delhi, 2013.
- [15] Hammond, G., Jones, C.: Inventory of carbon & energy: ICE. Bath: Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2008.
- [16] Maini, S., Thautam, V.: Embodied Energy of Various Materials and Technologies, Auroville Earth Institute, Tamil Nadu, India, 2009.
- [17] IRC SP:53: Guidelines on Use of Modified Bitumen in Road Construction, Second Revision, Indian Road Congress, New Delhi, 2010.
- [18] IRC SP:89: Guidelines for Soil and Granular Material Stabilization Using Cement Lime and Fly Ash, Indian Road Congress, New Delhi, 2010.