

Primljen / Received: 8.11.2021.

Ispravljen / Corrected: 17.8.2022.

Prihvaćen / Accepted: 26.8.2022.

Dostupno online / Available online: 10.11.2022.

## Komparativna analiza učinkovitosti otpada od orezivanja palmi i geotekstila na stabilizaciju posteljice

### Autori:



Mr.sc. **Necla Ceylan Bora**, diplomirani građevinar  
[neclaceylanb@gmail.com](mailto:neclaceylanb@gmail.com)



Prof.dr.sc. **Cafer Kayadelen**,  
[caferkayadelen@gmail.com](mailto:caferkayadelen@gmail.com)



Doc.dr.sc. **Gökhan Altay**  
[gokhanaltay@osmaniye.edu.tr](mailto:gokhanaltay@osmaniye.edu.tr)



Mr.sc. **Yakup Önal**  
[yakuponal@osmaniye.edu.tr](mailto:yakuponal@osmaniye.edu.tr)  
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Y. Mitat Öztürk**  
[mitatozturk@osmaniye.edu.tr](mailto:mitatozturk@osmaniye.edu.tr)

Sveučilište Osmaniye Korkut Ata, Turska  
Tehnički fakultet  
Odsjek za građevinarstvo

Izvorni znanstveni rad

**Necla Ceylan Bora, Cafer Kayadelen, Gökhan Altay, Yakup Önal, Mitat Öztürk**

### Komparativna analiza učinkovitosti otpada od orezivanja palmi i geotekstila na stabilizaciju posteljice

Ovaj rad predlaže novo i ekološki prihvatljivo rješenje za stabilizaciju posteljice koje ne samo da doprinosi recikliranju otpadnog materijala već i povećava nosivost tla posteljice. Laboratorijska ispitivanja provedena su pod statičkim opterećenjima pločom za prijenos opterećenja kako bi se procijenila potencijalna upotreba otpada od orezivanja palmi (*Palm Tree Pruning Waste - PTPW*) kao materijala za ojačanje tla umjesto komercijalno proizvedenog geotekstila, kao i za analizu utjecaja dubine ojačanja, broja ojačanih slojeva i relativne gustoće materijala posteljice. Rezultati su otkrili da se s povećanjem broja ojačanja poboljšala nosivost ojačane posteljice. Nadalje, kada se dubina ojačanja smanjila, nosivost se značajno poboljšala. Sve posteljice ojačane PTPW-om imale su bolje rezultate od posteljica ojačanih geotekstilom pod istim uvjetima. Dodatno, poboljšanje nosivosti u ojačanim posteljicama ocijenjeno je na temelju faktora poboljšanja nosivosti (*Bearing Capacity Improvement Factor - BCIF*). Najviši BCIF postignut je kada je PTPW korišten kao ojačanje s dva sloja pri pješčanoj posteljici relativne gustoće od 80 %.

#### Ključne riječi:

otpad od orezivanja palmi, geotekstil, stabilizacija posteljice, poboljšanje tla, otpadni materijal

Original scientific paper

**Necla Ceylan Bora, Cafer Kayadelen, Gökhan Altay, Yakup Önal, Mitat Öztürk**

### Comparative effectiveness research of palm tree pruning waste and geotextiles on subgrade stabilization

This paper proposes a novel and environmentally friendly solution for subgrade stabilization that not only contributes towards waste material recycling but also enhances the bearing capacity of subgrade soil. Laboratory plate load tests were conducted under static loads to evaluate the potential use of palm tree pruning waste (PTPW) as a soil reinforcement material instead of commercially manufactured geotextiles, as well as to analyse the impact of the reinforcement depth, number of reinforcement layers, and the relative density of the subgrade material. The results revealed that as the number of reinforcements increased, the load-bearing pressure behaviour of the reinforced subgrades improved. Furthermore, when the reinforcement depth decreased, the load-bearing pressure behaviour improved significantly. All PTPW-reinforced subgrades performed better than geotextile-reinforced subgrades under the same conditions. Additionally, the bearing capacity improvement in the reinforced subgrades was evaluated based on the bearing capacity improvement factor (BCIF). The highest BCIF was obtained when the PTPW was used as a reinforcement with two layers at a sand subgrade relative density of 80 %.

#### Key words:

palm tree pruning waste, geotextile, subgrade stabilization, ground improvement, waste material

## 1. Uvod

Prometna opterećenja s kolnika raspodjeljuju se kroz slojeviti sustav preko posteljice, a tako raspodijeljena opterećenja ne smiju premašiti nosivost tla posteljice kako bi se izbjeglo uobičajeno propadanje kolnika poput kolotruga i pukotina. Štoviše, opseg raspodjele prometnog opterećenja preko posteljice smanjuje se kako se povećava debljina slojeva kolničke konstrukcije. Međutim, povećane debljine slojeva kolnika rezultiraju povećanom potražnjom za prirodnim resursima i povećanjem troškova izgradnje. Nadalje, sve veća potražnja za prirodnim resursima dovodi do brzog gubitka prirodnih resursa. Porast aktivnosti vađenja i drobljenja kamena predstavlja prijetnju i ekosustavu i ljudskom zdravlju jer proizvodi goleme količine kamene prašine [1].

U posljednjih 50 godina, geosintetici su se često upotrebljavali kao materijali za ojačanje u građevinarstvu primjerice poput podupiranja zidova, stabilizacije nagiba i izgradnje cesta [2-7]. Kao što je opisano u literaturi, geosintetici (geočelija, geomreža, geotekstil, itd.) korišteni su za poboljšanje svojstava slojevitih kolničkih konstrukcija [8-12]. Kada se geotekstil primijeni kao razdjelni materijal između zrnate podloge ili tamponskog sloja i posteljice, može se izbjeći miješanje tla posteljice i podloge ili tla tamponskog sloja, što uzrokuje smanjenje nosivosti posteljice. Štoviše, opterećenja se raspodjeljuju na šire područje, što rezultira većim silama napetosti zbog geotekstila s otklonom od osi. Stoga, okomite komponente tih sila pomažu u smanjenju pritiska na postelnicu. Slika 1. prikazuje gore spomenuti mehanizam (tj. membranski učinak [13, 14]).



Slika 1. Membranski učinak geosintetika (modificirano prema Zhangu i sur. [14])

Nekoliko je istraživača pokazalo da su najprikladnije vrste geosintetika za ojačanje tla posteljice geotekstili koji pružaju visoku vlačnu čvrstoću [15, 16]. Nekoliko eksperimentalnih istraživanja usmjereno je na poboljšanje karakteristika komercijalno proizvedenih geosintetika kao materijala za ojačanje kolničkih konstrukcija provođenjem statičkih i cikličkih ispitivanja pločom za prijenos opterećenja [8-14, 17-22]. Takva su istraživanja otkrila da se učinak ojačanih slojeva značajno poboljšava zahvaljujući ugradnji geosintetika. Al-Refeai [23] je proveo niz cikličkih troosnih ispitivanja kako bi odredio potencijalno poboljšanje karakteristika netkanog geotekstila kada se postavi na granicu posteljice i nosivih slojeva kolničke konstrukcije. Eksperimentalni rezultati otkrili su da su geotekstili blago povećali modul stižljivosti (14 %), ali su značajno smanjili trajnu deformaciju (50 %). Negi i Singh [24] proveli su niz testova kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) koristeći dva različita uzorka tla posteljice (glinovito i pjeskovito tlo) i dva geotekstila

(tkani i netkani) s različitim konfiguracijama. Rezultati su otkrili da je tkani geotekstil povećao vrijednost kalifornijskog indeksa nosivosti tla posteljice. Nadalje, u usporedbi s netkanim geotekstilom, tkani geotekstil omogućio je bolje poboljšanje posteljice. Štoviše, eksperimentalni rezultati potvrđeni su visokom dosljednošću pomoću programa konačnih elemenata (ABAQUS). Kermani i sur. [25] proveli su ubrzana ispitivanja kolnika (eng. accelerated pavement testing) kako bi procijenili učinkovitost geotekstila na granici tamponskog sloja i posteljice. Naveli su da se kolotražnje kolnika smanjilo za 30 % kada se geotekstil nalazi na gornjoj površini sloja posteljice. Tafreshi i Dawson [26] proveli su laboratorijska ispitivanja modela kako bi istražili učinak poboljšanja pješčanih slojeva ojačanih geotekstilom. Rezultati su otkrili da je poboljšanje faktora nosivosti bilo 1,88; međutim, slijeganje podloge smanjilo se za 47 % uključivanjem geotekstila.

U usporedbi s komercijalno proizvedenim geosinteticima, prirodni materijali, posebice otpadni materijali, postali su sve popularniji kao materijali za ojačavanje slojeva kolničke konstrukcije; to je zato što prirodni materijali mogu poboljšati otpornost na kolotražnje i mogu se reciklirati. Subaida i sur. [27] proveli su eksperimentalnu studiju za procjenu uporabljivosti geotekstila od tkanog kokosovog vlakna u kolničkoj konstrukciji pod monotonim i ponavljajućim opterećenjem. Naglasili su da je pri upotrebi geotekstila od kokosovih vlakana primijećeno značajno poboljšanje nosivosti nosivog sloja. Nadalje, otpornost na kolotražnje nosivog sloja pod ponavljajućim opterećenjem poboljšana je zahvaljujući ugradnji geotekstila od kokosovih vlakana. Anusudha i sur. [28] istraživali su učinak ojačanja geotekstila od kokosovih vlakana na granici tamponskog sloja i posteljice putem ispitivanja pločom za prijenos opterećenja i zaključili da je geotekstil od kokosovih vlakana značajno povećao nosivost i raspodjelu naprezanja preko slabe posteljice. Nadalje, trajnost prirodnih materijala u tlu važno je pitanje. Prilikom iskorištavanja organske tvari u tlu mogu se pojaviti određena pitanja vezana uz trajnost. Posljedično, trajnost organskih materijala u tlu, na koje utječe nekoliko bioloških ili edafoklimatskih čimbenika, opsežno je proučavana [29-33]. Posljednjih godina istražuje se i trajnost različitih organskih materijala u tlu, poput drva eukaliptusa [33].

Cilj je ovog istraživanja procijeniti iskoristivost otpada od orezivanja palmi eng. *Palm Tree Pruning Waste* - PTPW) kao geotekstila dobivenog iz bioloških sirovina u kolničkim konstrukcijama, umjesto komercijalno proizvedenog geotekstila. PTPW korišten u ovom ispitivanju dobiven je orezivanjem meksičke lepezaste palme (tj. *Washingtonia robusta*). Naime, palme cvjetaju barem jednom godišnje i orezuju se kako bi se uklonilo staro lišće. Time se stvaraju velike količine otpadnog materijala koji se uglavnom odlaže na odlagališta ili spaljuje, što značajno narušava okoliš [34]. Nadalje, budući da je *Washingtonia robusta* brzorastuća vrsta palme, orezivanje stvara goleme količine otpada (tj. 35,70 kg po stablu godišnje) [35]. Stoga je za čišći i održivi okoliš potrebno iskoristiti PTPW na koristan način. Zbog toga je nekoliko istraživača uložilo velike

napore u ponovno iskorištavanje PTPW-a u brojnim područjima građevinarstva [36-46].

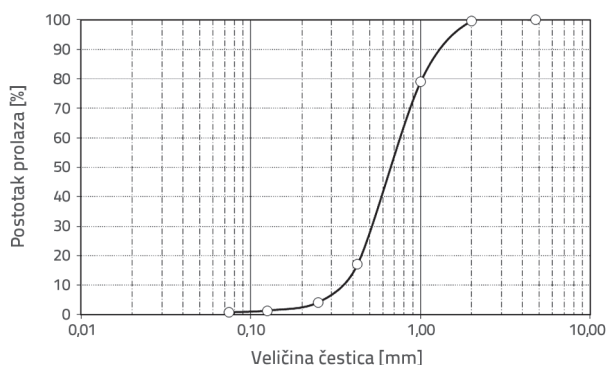
U ovom je radu provedeno komparativno eksperimentalno istraživanje za uvođenje novog ekološki prihvatljivog materijala za ojačanje (PTPW), dobivenog iz bioloških sirovina, kao alternative konvencionalnim geotekstilima. U tu smo svrhu proveli 14 statičkih ispitivanja pločom za prijenos opterećenja na neojačanim posteljicama, posteljicama ojačanim geotekstilom i PTPW-om pri različitim relativnim gustoćama ( $D_r$ ) i dubinama ojačanja. Učinci  $D_r$ , dubina ojačanja i broj ojačanja procijenjeni su na temelju faktora poboljšanja nosivosti (BCIF).

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Materijal posteljice

Prethodno su se eksperimentalna istraživanja obično provodila upotrebom jedne vrste materijala za posteljicu [20, 47-49]; ovaj materijal za posteljicu može imati nekoliko različitih relativnih gustoća. U ovom istraživanju izračunate su dvije vrste relativne gustoće (rasuta i čvrsta). Treba imati na umu da su se prethodne studije također bavile sličnim relativnim gustoćama [48-50].

U ovom radu kao materijal za posteljicu korišten je pijesak loše gradacije prema Jedinstvenoj klasifikaciji tla (USCS). Slika 2. prikazuje granulometrijsku krivulju materijala posteljice. U tablici 1. prikazana su tehnička svojstva materijala posteljice.



Slika 2. Granulometrijska krivulja posteljice

Tablica 2. Svojstva PTPW

Svojstva	Jedinice	Vrijednost
Sastav materijala	-	Meksička lepezasta palma
Prosječna vlačna čvrstoća	kN/mm <sup>2</sup>	2,7
Istezanje pri lomu	%	1,78
Udio vode	%	13
Debljina	mm	0,4
CBR vrijednost (PTPW pojačan na H/4) [43]	%	9,65
CBR vrijednost (PTPW pojačan na H/8) [43]	%	18,05

Tablica 1. Svojstva pješčane posteljice

Svojstva	Vrijednost
$D_{10}$ [mm]	0,38
$D_{30}$ [mm]	0,50
$D_{60}$ [mm]	0,70
Koeficijent uniformnosti, $C_u$	1,84
Koeficijent zakrivljenosti, $C_c$	0,94
Specifična težina	2,74
Maksimalna suha gustoća [kN/m <sup>3</sup> ]	16,57
Minimalna suha gustoća [kN/m <sup>3</sup> ]	15,00
Minimalni omjer šupljina, $e_{min}$	0,62
Maksimalni omjer šupljina, $e_{max}$	0,79
Relativna gustoća [%]	80
Vrijednost CBR [%] [41]	8

### 2.2. Otpad od orezivanja palmi (PTPW)

Za određivanje vlačne čvrstoće PTPW-a pripremljeni su uzorci PTPW-a u obliku kosti duljine 200 mm i širine 100 mm te su provedena vlačna ispitivanja. Slika 3. prikazuje fotografiju postave za vlačno ispitivanje; ispitivanje je provedeno pri brzini od 1 mm/min. Tablica 2. prikazuje svojstva PTPW-a.



Slika 3. Fotografija uzorka PTPW-a tijekom vlačnog ispitivanja





Slika 4. Netretirani i tretirani PTPW

Tablica 3. Svojstva geotekstila

Svojstva	Jedinice	Vrijednost
Sastav materijala	-	Polipropilen (PP), bijeli
Gustoća materijala	g/m <sup>2</sup>	250
Vlačna čvrstoća, md/cmd*	kN/mm <sup>2</sup>	0,013/0,015
Istezanje pri lomu	%	50
Statička čvrstoća na proboj klipom	N	2500
Dinamička čvrstoća na proboj klipom	mm	20
Propusnost na tekućine	m/s	0,06
Prividni otvor	mm	0,12
Otpornost na UV zračenje	%	70
CBR vrijednost (geotekstil ojačan na H/4) [43]	%	8,9
CBR vrijednost (geotekstil ojačan na H/8) [43]	%	15,45

\*Napomena: md = uzdužni smjer, cmd = poprečni smjer



Slika 5. Računalno upravljani sustav opterećenja

Pripremljeni su uzorci PTPW-a kružnog oblika promjera 600 mm. Slika 4. prikazuje netretirane (čitave) i tretirane (prilagođene) oblike PTPW-a.

### 2.3. Geotekstili

Za usporedbu su pripremljeni geotekstili istih dimenzija kao i PTPW uzorci. Tablica 3. prikazuje tehnička svojstva geotekstila korištenog u eksperimentima.

### 2.4. Eksperimentalni program

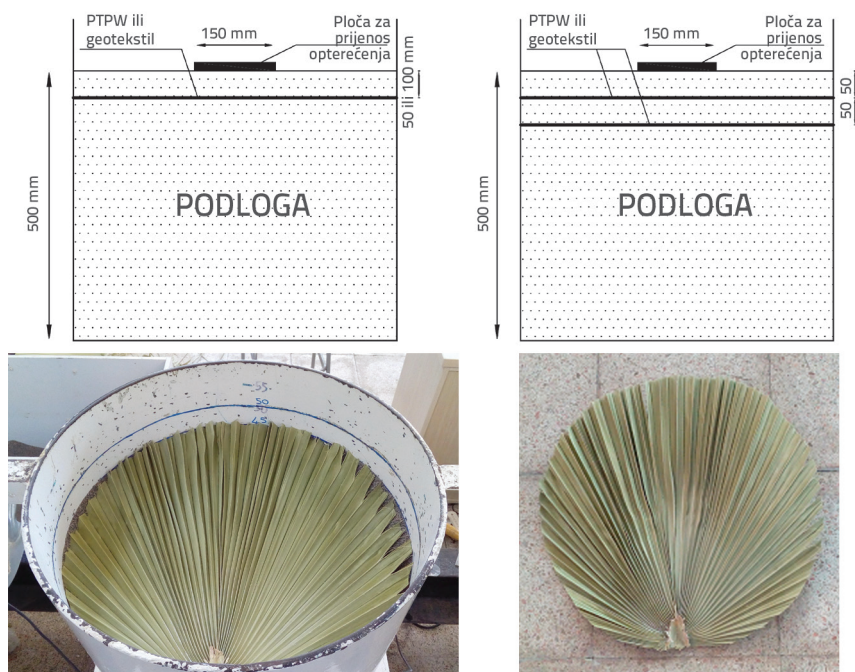
Cilindrični čelični ispitni spremnik promjera 0,6 m i visine 0,6 m korišten je u statičkom ispitivanju pločom za prijenos opterećenja. Opterećenje se prenosi preko kružne čelične ploče promjera 150 mm i debljine 15 mm. Na slici 5. prikazana je fotografija ispitnog spremnika i sustava za statičko ispitivanje opterećenja.

Kako bi se spriječili granični učinci, promjer ploče za prijenos opterećenja postavljen je na vrijednost koja je, prema literaturi [51], 0,25 veće od promjera ispitnog spremnika. Nadalje, provedeno je 14 statičkih ispitivanja tla pločom za prijenos opterećenja korištenjem PTPW-a i komercijalno proizvedenih uzoraka geotekstila kako bi se ispitala potencijalna korist nove tehnike stabilizacije tla i usporedila s konvencionalnim metodama. Tablica 4. sažima program eksperimenta.

Polovica planiranih ispitivanja obavljena je pri relativnoj gustoći od 30 %, a ostatak pri relativnoj gustoći od 80 %. Za dobivanje željene relativne gustoće upotrijebljena je vibracijska kružna ploča za nabijanje promjera 150 mm. Visina posteljice održavana je konstantnom (500 mm) za sva ispitivanja, a proces zbijanja je obavljen svakih 100 mm. Ojačanja su postavljena na tri različite udaljenosti (50 mm, 100 mm i 50 mm i 100 mm od pješčanog sloja), kao što je prikazano na slici 6. Najveća dubina ojačanja u ovom istraživanju bila je 100 mm od pješčanog sloja koji se nalazi u zoni utjecaja (približno 1,5 puta veća od promjera ploče).

Tablica 4. Program eksperimenata

Eksp. br.	Vrsta ojačanja	Relativna gustoća (D <sub>r</sub> ) [%]	Dubina ojačanja (u) [mm]
1	neojačan (UR)	30	N/P
2	Ojačan PTPW-om (PTPWR-5)	30	50
3	Ojačan geotekstilom (GR-5)	30	50
4	Ojačan PTPW-om (PTPWR-10)	30	100
5	Ojačan geotekstilom (GR-10)	30	100
6	Ojačan PTPW-om (PTPWR-5-10)	30	50 i 100
7	Ojačan geotekstilom (GR-5-10)	30	50 i 100
8	UR	80	N/P
9	PTPWR-5	80	50
10	GR-5	80	50
11	PTPWR-10	80	100
12	GR-10	80	100
13	PTPWR-5-10	80	50 i 100
14	GR-5-10	80	50 i 100



Slika 6. Shema eksperimenata i fotografija PTPW uzorka prije i poslije eksperimenata

Nakon što je pješčani sloj bio spreman za sve eksperimente, ploča za prijenos opterećenja postavljena je u središte površine pješčanog sloja kako bi se izbjegla ekscentrična opterećenja. Dva linearna varijabilna diferencijalna transformatora postavljena su na obje strane ploče za prijenos opterećenja u svrhu mjerenja vertikalnih deformacija. Prosječna deformacija ploče smatrana je rezultantnom deformacijom. Opterećenje na ploči izmjereno je pomoću mjerne ćelije od 50 kN. Nadalje, korišten je sustav prikupljanja podataka za sinkrono dobivanje vertikalne deformacije i opterećenja.

sлом otkriven je na različitim točkama (različiti tlakovi i deformacije) za svaku vrstu ojačanja i dubinu. Bez obzira na to, neojačani dio pri relativnoj gustoći od 80 % nadmašio je sve ojačane dijelove pri relativnim gustoćama od 30 %, a u isto vrijeme je postigao vertikalni pritisak od 172 kPa pri deformaciji od 30 mm. PTPWR-5-10 pokazao je najbolja svojstva među svim ojačanim posteljicama pri relativnoj gustoći od 30 %, prikazujući pritom vertikalni pritisak od 143 kPa pri deformaciji od 30 mm. Ovo pokazuje da je relativna gustoća posteljice vrlo značajna za ispitivanje učinkovitosti geosintetike.

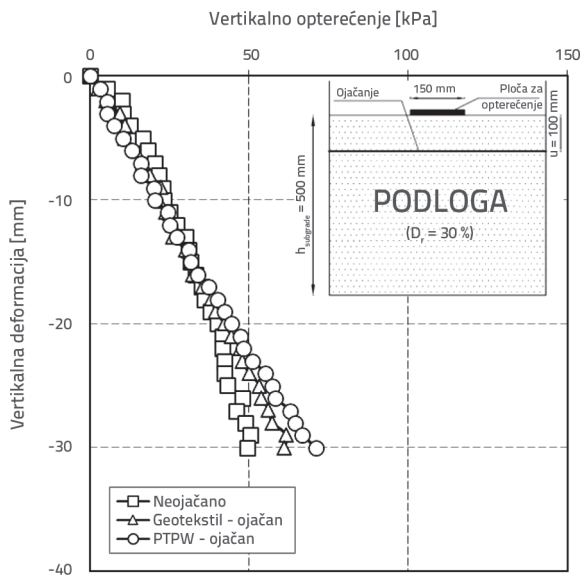
### 3. Rezultati i rasprava

#### 3.1. Učinak broja i položaja ojačanja

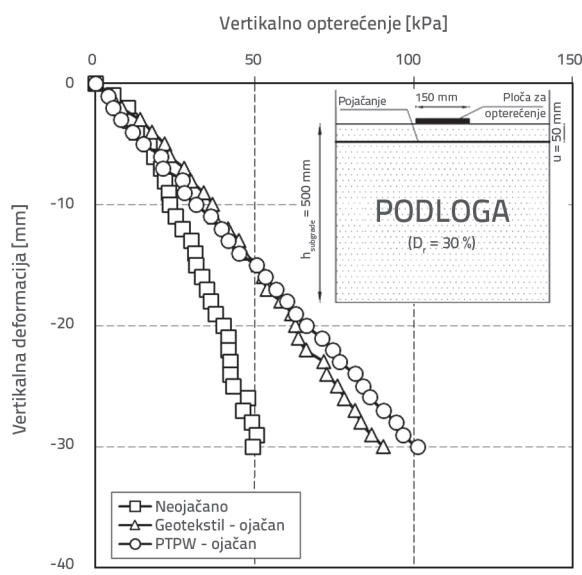
Slike 7. do 12. prikazuju krivulje vertikalnog pritiska i deformacije za ispitivanja pri relativnim gustoćama od 30 % i 80 % i pri različitim dubinama ojačanja. Kada su eksperimentalni rezultati analizirani, najprije je uočeno da su sve ojačane ispitne dionice pokazale bolju izvedbu u usporedbi s neojačanim ispitnim dionicama. Štoviše, nije primijećen nikakav nedostatak za dionice posteljice s relativnom gustoćom od 30 %, zbog zgušnjavanja pješčane posteljice koja je u tijeku. Međutim, iako su dionice posteljice bile u fazi zgušnjavanja, ojačanje je znatno poboljšalo performanse posteljice. U slučaju dionica posteljice s relativnom gustoćom od 80 %, prividni

Bez obzira na relativnu gustoću, posteljice ojačane PTPW-om i geotekstilom povećale su pritisak izdržan pod opterećenjem neojačanih dionica. Nadalje, dionice ojačane PTPW-om ponašale su se bolje u usporedbi s dionicama ojačanim geotekstilom u svim konfiguracijama ojačanja. Posljedično, najbolje su

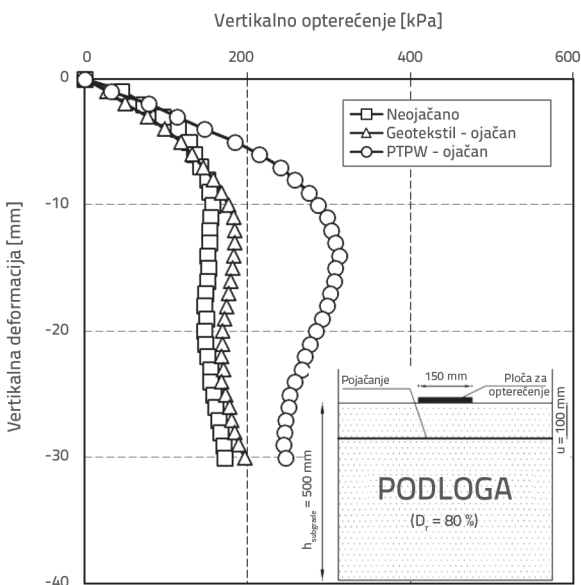
performanse postignute kada su ojačanja postavljena 50 mm i 100 mm od donje površine ploče za prijenos opterećenja (tj. kao dva sloja), a zatim one postavljene na udaljenosti od 50 mm i 100 mm. Zaključno, broj slojeva ojačanja ima presudan utjecaj na stabilizaciju posteljice.



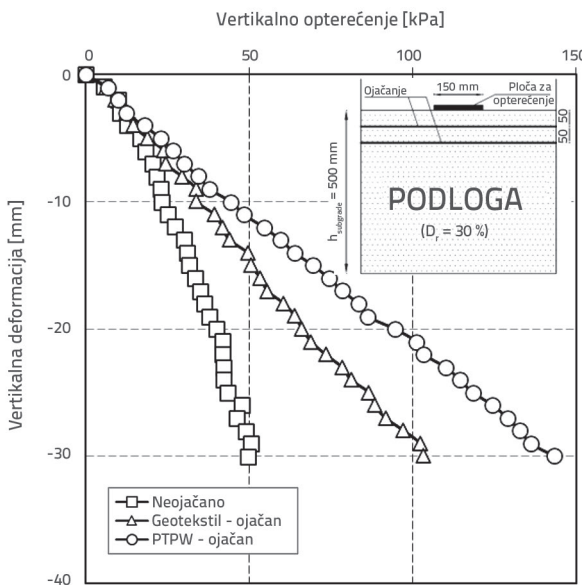
Slika 7. Krivulje vertikalnog opterećenja i deformacije posteljice pri  $u = 100 \text{ mm}$  i  $D_r = 30 \%$



Slika 8. Krivulje vertikalnog opterećenja i deformacije posteljice pri  $u = 50 \text{ mm}$  i  $D_r = 30 \%$

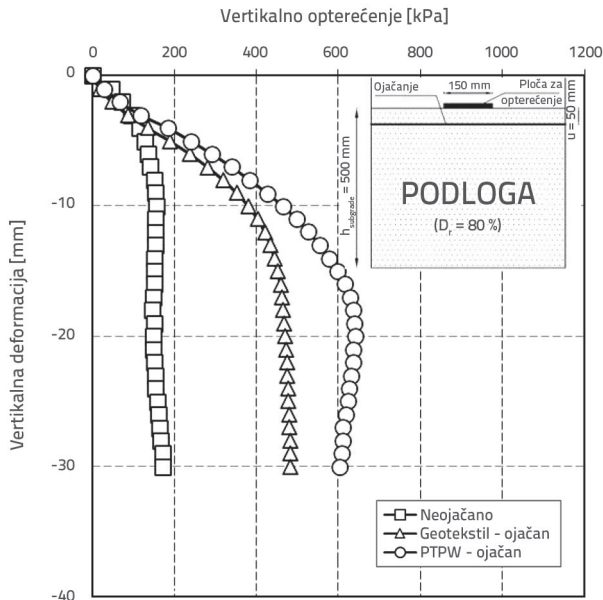


Slika 9. Krivulje vertikalnog opterećenja i deformacije posteljice pri  $u = 50 \text{ mm}$  i  $100 \text{ mm}$  i  $D_r = 30 \%$

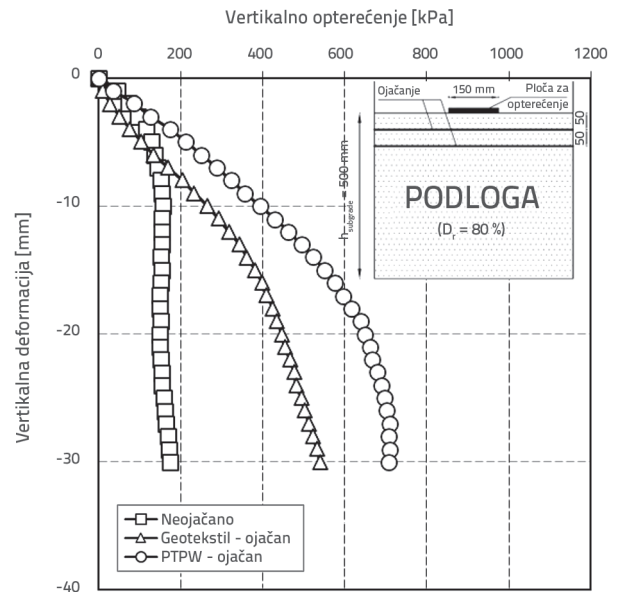


Slika 10. Krivulje vertikalnog opterećenja i deformacije posteljice pri  $u = 100 \text{ mm}$  i  $D_r = 80 \%$





Slika 11. Krivulje vertikalnog opterećenja i deformacije posteljice pri u = 50 mm i D<sub>r</sub> = 80 %



Slika 12. Krivulje vertikalnog opterećenja i deformacije posteljice pri u = 50 mm i 100 mm i D<sub>r</sub> = 80 %

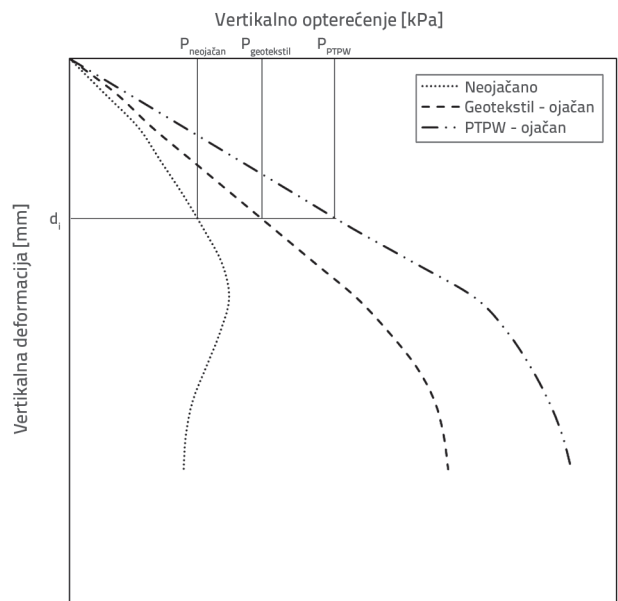
### 3.2. Faktor poboljšanja nosivosti (BCIF)

Kako bi se bolje razumjelo povećanje nosivosti ojačanih posteljica u odnosu na neojačane te kako bi se dao matematički izraz, BCIF je korišten kao pokazatelj učinkovitosti. Poboljšanje nosivosti predstavljeno je bezdimenzijskim parametrom pod imenom BCIF, koji označava omjer izdržanog vertikalnog opterećenja u ispitivanju ojačanog tla u odnosu na izdržano vertikalno opterećenje u ispitivanju tla bez ojačanja pri bilo kojoj danoj deformaciji, označenoj sa d<sub>i</sub> u izrazu (1).

$$BCIF = \left( \frac{P_{\text{ojačano}}}{P_{\text{neojačano}}} \right)_{d=d_i} \quad (1)$$

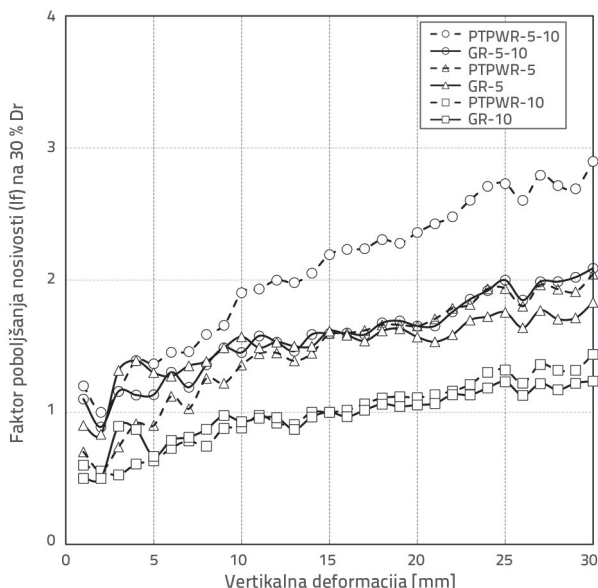
gdje P označava izdržano opterećenje pri bilo kojoj danoj deformaciji, a d označava deformaciju ploče za prijenos opterećenja. Slika 13. prikazuje parametre potrebne za izračun BCIF-a.

S obzirom na to da je ovo istraživanje provedeno pri različitim relativnim gustoćama pješčane posteljice (tj. 30 % i 80 %), procjene su provedene pojedinačno, kao što je prikazano na slikama 14. i 15. Kao što se može primijetiti na slici 14., BCIF vrijednosti posteljica ojačanih PTPW-om i geotekstilom za istu konfiguraciju ojačanja pokazuju slične pravce razvoja. Međutim, čini se da su posteljice ojačane PTPW-om poboljšana verzija posteljica ojačanih geotekstilom, što također vrijedi za ispitivanja provedena pri relativnoj gustoći od 80 %. Štoviše, posteljica PTPWR-5-10 prikazuje maksimalnu BCIF vrijednost, kao što je prikazano na slici 14.

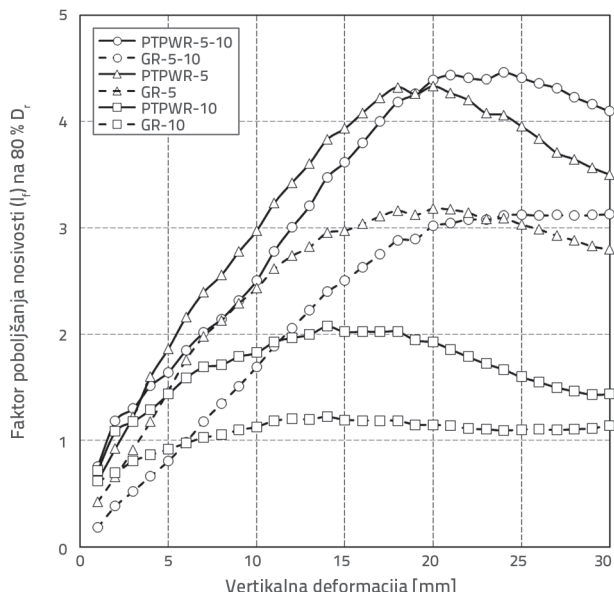


Slika 13. Povezani parametri za izračun faktora poboljšanja nosivosti (modificirano prema Tafreshi i Dowson [26])

Pri vertikalnoj deformaciji od 30 mm, BCIF vrijednost se približava 2,90, što pokazuje da je PTPW koji se koristi u dva sloja najkorisniji, dok komercijalno proizveden geotekstil daje BCIF od 2,09. Slično tome, kada se razmatraju ojačane posteljice pri relativnoj gustoći od 80 %, kao što je prikazano na slici 15., PTPWR-5-10 s BCIF od 4,10 pri deformaciji od 30 mm nadmašuje druge ojačane posteljice; sljedeće najbolje karakteristike pokazao je PTPWR-5 s BCIF od 3,50 i deformacijom od 30 mm.

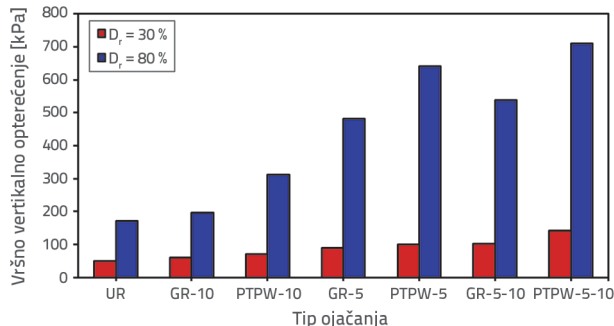


Slika 14. BCIF svih ojačanih posteljica na 30 %  $D_r$



Slika 15. BCIF svih ojačanih posteljica na 80 %  $D_r$

Kao što je prikazano na slici 16., vršno vertikalno opterećenje povećava se zahvaljujući ojačanju za obje relativne gustoće od 30 % i 80 %. Uzorak ojačan PTPW-om nadmašuje uzorak ojačan geotekstilom u pogledu vršnog vertikalnog opterećenja, bez obzira na mjesto ojačanja.



Slika 16. Vršno vertikalno opterećenje za sve eksperimente

#### 4. Zaključak

U ovom je istraživanju provedeno 14 statičkih testova pločama za prijenos opterećenja kako bi se procijenila potencijalna upotreba PTPW-a kao materijala za ojačanje tla. Nadalje, uspoređen je konvencionalni geotekstil s PTPW-om, biootpadom. Istraženi

su i učinak broja ojačanja, dubine ojačanja i relativne gustoće ( $D_r$ ) posteljice. Na temelju rezultata ovih istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Sve ojačane posteljice pokazale su veću nosivost u usporedbi s neojačanim posteljicama pri istoj relativnoj gustoći.
- S povećanjem broja ojačanja, značajno se povećala nosivost.
- Što je materijal za ojačanje bliži površini posteljice, bolje je ponašanje posteljice pri opterećenju i deformaciji.
- Prema rezultatima laboratorijskih ispitivanja, posteljice ojačane PTPW-om pokazale su bolje karakteristike u usporedbi s posteljicama ojačanim geotekstilom pod istim konfiguracijama ojačanja.
- U ovom radu, ponašanje PTPW-a pod statičkim opterećenjem ispitano je na laboratorijskoj razini. Iako su rezultati laboratorijskih eksperimenata dobar pokazatelj, oni nisu dovoljni za praktičnu primjenu PTPW-a u ovom području. Stoga, kako bismo bolje podržali predstavljene rezultate, preporučuju se studije trajnosti, ugradnje i terenska ispitivanja PTPW-a.

#### Zahvala

Zahvaljujemo tvrtki GEOPLAS na podršci u nabavi geotekstila primjenjenog u eksperimentima.



## LITERATURA

- [1] Mandal, I., Pal, S.: COVID-19 pandemic persuaded lockdown effects on environment over stone quarrying and crushing areas, *Science of The Total Environment*, 732 (2020), 139281, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139281>.
- [2] Kayadelen, C., Önal, T.Ö., Altay, G.: Experimental study on pull-out response of geogrid embedded in sand. *Measurement*, 117 (2018), pp. 390-396, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.024>
- [3] Altay, G., Kayadelen, C., Taşkıran, T., Kaya, Y.Z.: A laboratory study on pull-out resistance of geogrid in clay soil. *Measurement*, 139 (2019), pp. 301-307, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.065>
- [4] Altay, G., Kayadelen, C., Canakci, H., Bagriacik, B., Ok, B., Oguzhanoglu, M. A.: Experimental investigation of deformation behavior of geocell retaining walls. *Geomechanics and Engineering*, 27 (2021) 5, pp. 419-431. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.27.5.419>.
- [5] Altay, G.: Experimental and numerical investigation of geocell retaining wall, (2019), Thesis (PhD). Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye, Turkey.
- [6] Altay, G., Kayadelen, C., Taskiran, T., Bagriacik, B., Toprak, O.: Frictional properties between geocells filled with granular material. *Revista de la construcción*, 20 (2021) 2, pp. 332-345. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.2.332>.
- [7] Giroud, J.P., Han, J.: Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I: Development of design method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (2004) 8, pp. 775-786, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:8\(775\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775)).
- [8] George, A.M., Banerjee, A., Puppala, A.J., Saladhi, M.: Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 22 (2021) 2, pp. 181-191, <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1587437>
- [9] Mamatha, K.H., Dinesh, S.V.: Performance evaluation of geocell-reinforced pavements. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13 (2019) 3, pp. 277-286, <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1343988>
- [10] Nair, A.M., Latha, G.M.: Repeated load tests on geosynthetic reinforced unpaved road sections, *Geomechanics and Geoengineering*, 11 (2016) 2, pp. 95-103, <https://doi.org/10.1080/17486025.2015.1029012>
- [11] Önal, Y.: Investigation of behavior of geosynthetic reinforced highway base layer under repeated loads, (2021), Thesis (MSc), Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye, Turkey.
- [12] Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L.: Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11 (2018) 2, pp. 114-127, <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.007>
- [13] Hausmann, M.R.: Geotextiles for unpaved roads-A review of design procedures, *Geotextiles and Geomembranes*, 5 (1987) 3, pp. 201-233, [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(87\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0266-1144(87)90017-3).
- [14] Zhang, L., Zhao, M., Shi, C., Zhao, H.: Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010) 5, pp. 475-482, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.12.011>.
- [15] Christopher, B.R., Holtz, R.D.: *Geotextile Engineering manual*, FHWA-TS-86/203, (1987), Washington, DC: US Federal Highway Administration.
- [16] Robnett, Q.L., Lai, J.S.: *Fabric-reinforced aggregate roads overview*, Transportation Research Records, (1980) 875, pp. 42-50.
- [17] Cuelho, E.V., Perkins, S.W.: Geosynthetic subgrade stabilization – Field testing and design method calibration, *Transportation Geotechnics*, 10 (2017), pp. 22-34, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.002>
- [18] Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I.: Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010) 6, pp. 570-578, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.06.002>
- [19] Rashidian, V., Naeini, S.A., Mirzakhani, M.: Laboratory testing and numerical modelling on bearing capacity of geotextile-reinforced granular soils, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12 (2018) 3, pp. 241-251, <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1269042>
- [20] Stride, S., Rayabharapu, V.K., Vedpathak, S.: Evaluation of Rutting Behaviour of Geocell Reinforced Sand Subgrades Under Repeated Loading, *Indian Geotechnical Journal*, 45 (2015) 4, pp. 378-388, <https://doi.org/10.1007/s40098-014-0120-8>
- [21] Singh, M., Trivedi, A., Shukla, S.K.: Strength enhancement of the subgrade soil of unpaved road with geosynthetic reinforcement layers, *Transportation Geotechnics*, 19 (2019), pp. 54-60, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.01.007>
- [22] Suku, L., Prabhu, S.S., Ramesh, P., Babu, G.L.S.: Behavior of geocell-reinforced granular base under repeated loading, *Transportation Geotechnics*, 9 (2016), pp. 17-30, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.06.002>
- [23] Al-Refeai, T.O.: Behavior of Geotextile Reinforced Sand on Weak Subgrade, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 12 (2000) 2, pp. 219-232, [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30715-3](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30715-3)
- [24] Negi, M.S., Singh, S.K.: Experimental and numerical studies on geotextile reinforced subgrade soil, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (2021) 9, pp. 1106-1117, <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1684654>
- [25] Kermani, B., Xiao, M., Stoffels, S.M., Qiu, T.: Reduction of subgrade fines migration into subbase of flexible pavement using geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 46 (2018) 4, 377-383, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.006>
- [26] Tafreshi, S.M., Dawson, A.R.: Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010) 1, pp. 72-84, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.003>
- [27] Subaida, E.A., Chandrakaran, S., Sankar, N.: Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles, *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009) 3, pp. 204-210, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.009>
- [28] Anusudha, V., Sunitha, V., Mathew, S.: Performance of coir geotextile reinforced subgrade for low volume roads, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14 (2021) 2, pp. 213-221, <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0325-4>
- [29] Brischke, C., Meyer, L., Olberding, S.: Durability of wood exposed in ground-Comparative field trials with different soil substrates. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 86 (2014), pp. 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.06.022>

- [30] Colín-Urieta, S., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J.G., López-Albarran, P., Gabriel-Parra, R., Corral-Rivas, J.J.: Assessing the natural durability of different tropical timbers in soil-bed tests. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21 (2019) 2, pp. 231-238, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000210>
- [31] Van Acker, J., Stevens, M., Carey, J., Sierra-Alvarez, R., Militz, H., Le Bayon, I., Peek, R.D.: Biological durability of wood in relation to end-use, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61 (2003) 1, pp. 35-45, <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0351-8>
- [32] Beldean, E.: Laboratory test concerning the durability of wood in contact with soil. (2010). Pro Ligno.
- [33] Medeiros Neto, P.N.D., Paes, J.B., Oliveira, J.T.D.S., da Silva, J.G.M., Coelho, J.C.F., Ribeiro, L.D.S.: Durability of Eucalypts wood in soil bed and field decay tests. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22 (2020) 4, pp. 447-456, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000403>
- [34] Ferrández-García, C.E., Ferrández-García, A., Ferrández-Villena, M., Hidalgo-Cordero, J., García-Ortuño, T., Ferrández-García, M.T.: Physical and Mechanical Properties of Particleboard Made from Palm Tree Prunings, *Forests*, 9 (2018) 12, pp. 755, <https://doi.org/10.3390/f9120755>
- [35] García-Ortuno, T., Ferrandez Garcia, M.T., Andreu Rodriguez, J., Ferrandez Garcia, C.E., Ferrandez-Villena, M.: Evaluating the properties of palm particle boards (*Washingtonia robusta* H. Wendl), in: In Proceedings of the 6<sup>th</sup> Iberian Congress of Agroengineering, (2011), pp. 126–130.
- [36] Abdeldjouad, L., Asadi, A., Ball, R.J., Nahazanan, H., Huat, B.B.K.: Application of alkali-activated palm oil fuel ash reinforced with glass fibers in soil stabilization, *Soils and Foundations*, 59 (2019) 5, pp. 1552–1561, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.008>
- [37] Arifin, Y.F., Rahman, G.: Stabilization of Soft Soil with Cement and Palm Kernel Shell Ash Admixture. *MATEC Web Conf.*, 280 (2019), pp. 04011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928004011>
- [38] Gil-Lopez, T., Medina-Molina, M., Verdu-Vazquez, A., Martel-Rodriguez, B.: Acoustic and economic analysis of the use of palm tree pruning waste in noise barriers to mitigate the environmental impact of motorways, *Science of the Total Environment*, 584–585 (2017), pp. 1066–1076, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.162>
- [39] Marandi, S.M., Bagheripour, M.H., Rahgozar, R., Zare, H.: Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils, *American Journal of Applied Sciences*, 5 (2008) 3, pp. 209–220, <https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.209.220>
- [40] Mujah, D., Rahman, M.E., Zain, N.H.M.: Performance evaluation of the soft soil reinforced ground palm oil fuel ash layer composite, *Journal of Cleaner Production*, 95 (2015), pp. 89–100, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.058>
- [41] Nnochiri, E.S., Ogundipe, O.M., Oluwatuyi, O.E.: Effects of Palm Kernel Shell Ash on Lime-Stabilized Lateritic Soil. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 25 (2017) 3, pp. 1–7, <https://doi.org/10.1515/sjce-2017-0012>
- [42] Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B.B.K., Fasihnikoutalab, M.H.: 2015. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement, *Transportation Geotechnics*, 3 (2015), pp. 24–35, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.01.002>
- [43] Qu, J., Xiong, K.: Influences of Curing Environment on Strength Performances of Shanghai Clayey Soil Reinforced with Palm Fiber, *Advances in Civil Engineering*, 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/9670806>
- [44] Qu, J., Zhao, D.: Stabilising the cohesive soil with palm fibre sheath strip, *Road Materials and Pavement Design*, 17 (2016) 1, pp. 87–103, <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1064010>
- [45] Qu, J., Zhu, H.: Function of palm fiber in stabilization of alluvial clayey soil in Yangtze River Estuary, *Journal of Renewable Materials*, 9 (2021) 4, pp. 767–787, <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.013816>
- [46] Önal, Y., Öztürk, M., Altay, G., Kayadelen, C.: Comparison of the Effect of Geotextile and Palm Tree Pruning Waste on CBR Value of Sand Soil. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (2022) 2, pp. 570-579, <https://doi.org/10.47495/okufbed.998633>
- [47] Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I.: Behavior of geocell-reinforced granular bases under static and repeated loads. In *Contemporary topics in ground modification, problem soils, and geo-support*, 2009, pp. 409-416, [https://doi.org/10.1061/41023\(337\)52](https://doi.org/10.1061/41023(337)52)
- [48] Tafreshi, S.M., Dawson, A.R.: Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading—Comparing use of 3D and planar geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010) 5, pp. 434–447, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.12.007>
- [49] Kaplan, E., Kayadelen, C., Öztürk, M., Önal, Y., Altay, G.: Experimental evaluation of the usability of palm tree pruning waste (PTPW) as an alternative to geotextile. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 21 (2022) 1, pp. 69-82, <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.21.1.69>
- [50] Rayabharapu, V.K., Saride, S.: Geocell reinforced dense sand bases overlying weak sand sub-grades under repeated loading. In *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, 2019, pp. 285-294, Springer, Singapore.
- [51] Ok, B.: Investigation of the behaviour under static and cyclic loading of construction and demolition waste embankment reinforced with geosynthetics, 2018, Thesis (PhD). Çukurova University, Adana, Turkey.