

# Analiza utjecaja primjene geomreža na mehanizam loma u tlu kod plitkog temeljenja

---

**Merdan, Anesa; Bačić, Mario**

*Source / Izvornik:* **8. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2022, 125 - 137**

**Conference paper / Rad u zborniku**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2022>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:298074>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-07**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Analiza utjecaja primjene geomreža na mehanizam loma u tlu kod plitkog temeljenja

mr. sc. **Anesa Merdan**<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. **Mario Bačić**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sarajevo, BiH, [amerdan@student.grad.hr](mailto:amerdan@student.grad.hr)

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, [mario.bacic@grad.unizg.hr](mailto:mario.bacic@grad.unizg.hr)

## Sažetak

Uporaba geosintetičkih materijala za poboljšanje nosivosti tla kod plitkog temeljenja spada u novija područja proučavanja geotehničkog inženjerstva. O utjecaju ugradnje geosintetičkih materijala na nosivosti tla proveden je veliki broj studija temeljenih na eksperimentalnim i numeričkim analizama. U radu je napravljen pregled niza radova koji obrađuju temu primjene armiranja tla geomrežama i utjecaj armiranja na mehanizme sloma tla kod plitkoga temeljenja. Rad služi kao podloga za nastavak istraživanja koji će obuhvatiti analize osjetljivosti utjecaja relevantnih parametara geosintetika na mehanizme sloma.

*Ključne riječi: plitko temeljenje, slom temeljnog tla, armiranje tla, geomreže*

## Analysis of the influence of geogrids on the failure mechanisms of the shallow foundations

### Abstract

The use of geosynthetic materials to improve soil bearing capacity below shallow foundation is relatively novel area of study of geotechnical engineering. A large number of studies have been carried out analysing impact of geosynthetic materials on the bearing capacity of the soil, and these are based mostly on experimental analysis and numerical simulations. This work gives an overview of studies about the application of reinforcement of soil with geogrids and their influences on the soil failure mechanisms. The work represents a basis for future investigations analysing the sensitivity of influence of the relevant parameters of geosynthetics on failure mechanisms.

*Key words: shallow foundation, soil failure, soil reinforcement, geogrids*

## 1 Uvod

### 1.1. Plitko temeljenje

Temelji su prijelazni dijelovi konstrukcije u kojima se preraspodjeljuju unutarnje sile iz vitkih i tankih elemenata konstrukcije u masivne i široke zone tla, kojima se ona veže za tlo. Neposredni prijenos opterećenja od građevine na temeljno tlo zahtijeva ispunjenje određenih pretpostavki o karakteristikama temeljnoga tla. Tlo mora zadovoljiti zahtijevanu sigurnost od sloma, a slijeganja građevine moraju biti u dopuštenim granicama za nesmetano funkcioniranje objekta. Razlikuju se tri načina temeljenja: plitko temeljenje, plitko temeljenje na poboljšanom tlu i duboko temeljenje [1]. U radu Szavits-Nossan, A., Ivšić, T. [2], prema Eurokodu plitkim temeljima smatraju se temelji čija je širina veća od dubine temeljenja ( $D < B$ ). Ovisno o kvaliteti temeljnog tla, plitko temeljenje se može dijeliti:

- a) kod slabo stišljivog tla i malih deformacija - temelji samci, temeljne trake;
- b) kod jače stišljivih, nehomogenih tala uz pojavu veće deformacije - temeljni nosači, roštilji i ploče;
- c) sve vrste građevina i nasipa - temeljenje na poboljšanom tlu [2].

### 1.2. Mehanizmi sloma u tlu

Za analizu nosivosti tla potrebna je interpretacija uvjeta u tlu, koja se zasniva na podacima iz istražnih radova. Ako tlo nema potrebnu nosivost doći će do sloma, koji se može definirati na osnovi sljedećih kriterija:

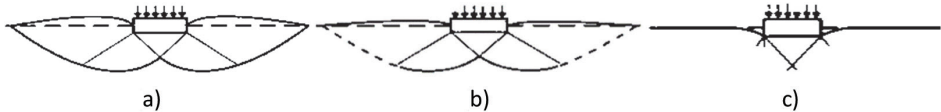
- a) Nagli porast deformacija, praćeno slomom tla ispod konstrukcije. Ovaj kriterij se odnosi na sposobnost temeljnog tla da na siguran način prihvati primijenjeno opterećenje;
- b) Prevelike deformacije, koje konstrukcija ne može podnijeti bez posljedica. Ovaj kriterij se odnosi na potencijal temeljnog tla u pogledu slijeganja pod primijenjenim opterećenjem.

Slom u temeljnom tlu može se pojaviti, u ovisnosti o zbijenosti ili stanja konzistencije tla, u tri osnovna oblika:

1. Opći smičući slom, koji je karakterističan za dobro zbijeno krupnozrno tlo i prekonsolidiranu glinu. Događa se relativno naglo, uz formiranje kontinualnih kliznih ploha koje polaze od ruba temelja i prostiru se do površine terena. Tlo ispod stope temelja tone, a u okolici se izdiže. Slijeganje se povećava skoro linearno do relativno velikog opterećenja (slika 1a);
2. Lokalni smičući slom, karakterističan za slabije zbijeno krupnozrno tlo i glinu meke konzistencije. Na krivulji "Opterećenje - Slijeganje" uočava se prijelomna točka kojoj odgovara formiranje ograničene klizne plohe. Deformacije prije slo-

ma su relativno velike, klizne plohe se formiraju samo neposredno ispod temelja i ne dopiru do površine terena, a izdizanje tla uz temelj je malo (slika 1b);

3. **Probojni smičući slom**, karakterističan za rastresiti pijesak i nekonsolidiranu meku glinu. Pri porastu opterećenja temelj kontinualno tone, uz vertikalno smicanje po rubu temelja. Tlo izvan opterećene površine ostaje relativno neporemećeno, osim utiskivanja uz rubove temelja. Do sloma dolazi bez pojave vidljivih kliznih ploha, sa izuzetkom formiranja trokutaste prizme ispod temelja (slika 1c).



Slika 1. Tri načina sloma tla kod plitkog temelja [3]

Slom tla ispod plitkih temelja jasno je definiran samo u slučaju općeg sloma tla, pa su i računska rješenja izvedena uz pretpostavku općeg sloma kruto-plastičnog materijala (tla), čija je čvrstoća definirana Mohr-Coulomb-ovim uvjetom sloma:

$$\text{za koherentna tla: } \tau_f = c + \sigma'_n \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

$$\text{za nekoherentna tla: } \tau_f = \sigma'_n \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

gdje je:  $c$  - kohezija,  $\varphi$  - kut unutaršnjeg trenja,  $\sigma'_n$  - normalno efektivno naprezanje koje djeluje na istoj ravnini kao i posmično naprezanje  $\tau_f$ . Ova ravnina se naziva ravninom sloma. Parametri tla  $c$  i  $\varphi$  su parametri posmične čvrstoće tla [3, 4].

## 2 Primjena geosintetika

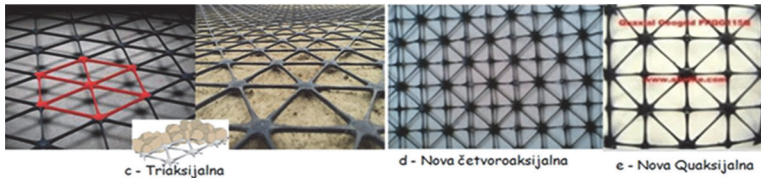
### 2.1. Općenito o geosinteticima

Geosintetici su materijali napravljeni od polimera, a dijele se prema načinu i vrsti proizvodnje na geotekstile, geomembrane, geomreže, geoćelije, geokompozite, geotepihe i geopjene.

**Geotekstil** je propusni, polimerni sintetički materijal a koristi se u funkcijama razdvajanja, armiranja tla, kao filter ili zaštitni sloj u dodiru s tlom i drugim građevinskim materijalima. Prema načinu izrade dijeli se na tkani, i lijepljeni i pleteni geotekstil.

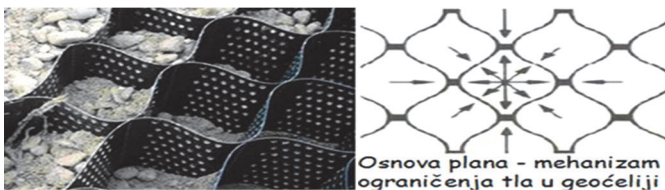
**Geomreža** je plošna, polimerna struktura, koja se sastoji od pravilne otvorene mreže integralno povezanih elastičnih elemenata, koji se mogu povezati ekstruzijom, lijepljenjem ili preplitanjem, čiji su otvori veći od čestica tla, a koriste se u građevinarstvu prvenstveno za armiranje tla. Karakterizira ih velika vlačna čvrstoća i velika krutost, pa se zbog toga najčešće koriste za armiranje tla jer mu povećavaju krutost,

ojačavaju ga i umanjuju deformacije u tlu. Za armiranje i stabilizaciju slabo nosivog tla materijal čija je veličina frakcije veća od otvora mreže, nasipa se na geomrežu i time dolazi do uklještenja materijala u otvorima geomreže čime nastaje sustav otporan na vanjske sile. Vlačna čvrstoća geomreže u interakciji s tlom djeluje na uvećanje čvrstoće i umanjene deformacija u tlu (slika 2a).



Slika 2a. Triax geomreža katalog, <http://www.tensar.com.hr> [3]

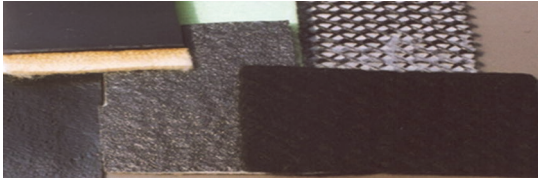
**Geočelije (geosaće)** sastoje se od povezanih polimernih traka sačastih oblika otvora u mreži, a postavljenih jedna do druge spojene trakama od ekstrudiranih sintetičkih materijala. Osnovna funkcija geosaća je da zadržava zemlju ili drugi rastresiti materijal, a koristi se za stabilizaciju površinskog tla na strmim padinama ili kao ojačanje temeljnog slabo nosivog tla. Trake su spojene u formu međusobno povezanih ćelija koje su ispunjene zemljom i ponekad betonom. Za razliku od geomreža, geočelije mogu koristiti široki raspon materijala ispune i nisu ograničene na visoko kvalitetni agregat potreban kod geomreža. U posebnim slučajevima, trake geomreža širine od 0,5 m do 1 m su povezane zajedno sa vertikalnim polimernim štapovima koji se koriste za formiranje debljih slojeva geočelija, koji se nazivaju **geotepisi** (madraci). Geočelije su 3D strukture koje koriste čvrstoću zida ćelije, pasivne tlakove u tlu i zaptivanje čestica tla kako bi stvorili čvrst sloj u vidu geotepiha (madraca). Naponi izazvani opterećenjem prenose se iz čestica ispune na ćelijski zid i suzbijaju otpore zida obruča i pasivni otpor susjednih ćelija (slika 2b).



Slika 2b. Geočelije koje se koriste za zadržavanje i stabilizaciju tla [3]

**Geopjena** - stiropor je blok čvrstog pjenastog polimernog materijala (polistirena) koji se obično koristi kao lagano punjenje u funkciji toplinske izolacije u smrznutom tlu ili za smanjenje napona kod mekih stišljivih tala zbog težine materijala ispune.

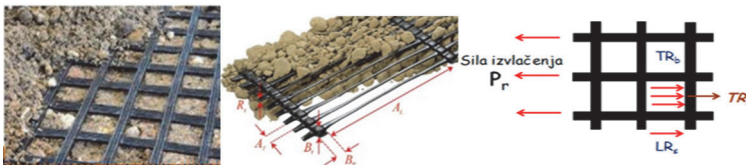
**Geokompoziti od geomreže i geotekstila** se sastoje od spoja geosintetika određениh svojstava, tako da dobivamo optimalna svojstva potrebna za rješenje višestrukih problema. Geokompoziti se mogu sastojati od jedne geomreže i jednog ili dva sloja geotekstila. Takav kompozit ima drenažna i filtracijska svojstva, a može obavljati i funkciju armiranja. Spajanje geomreža i geotekstila obavlja se tvornički termičkim ili kemijskim načinom (slika 2c) [3, 5, 8].



Slika 2c. Geokompoziti [3]

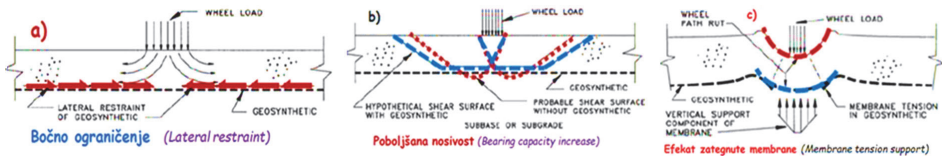
## 2.2 Funkcija armiranja tla - poboljšanje otpornosti na smicanje u tlu

Problemi gradnje na uslojenim i slabo nosivim tlima mogli bi se rješavati uporabom geosintetika koji imaju funkciju armiranja tla. Armiranje tla koristi svojstva dva potpuno različita materijala, tla i armature, koji objedinjuju sposobnosti za preuzimanje tlačnih (tlo) i vlačnih (armatura) naprezanja. Kod konstrukcija od armiranog tla, tlo predstavlja dio nosivog sustava a ne dio opterećenja. Geosintetici koji se upotrebljavaju u funkciji armiranja tla su geomreže, geočelije, geotekstili i geokompoziti. U hidrotehnici, geomreže većih otvora koriste se za izradu gabiona i temeljnih madraca, a manjih otvora za stabilizaciju slabo nosivog temeljnog tla, nasutih objekata (brane, pregrada i nasipa) te za pridržavanje humusa u izvedbi travnate zaštite pokosa. Pri uređenju slabo nosivog temeljnog tla primjenjuju se geomreže koje preuzimaju vlačne sile u dva okomita pravca. Geomreže imaju primarnu funkciju armiranja i sporednu funkciju mehaničkog odvajanja materijala. Kod funkcije armiranja, geomreže preuzimaju vlačne sile i trenjem ih prenose u tlo uz ograničenu deformaciju. Osim vlačne čvrstoće važna je i krutost geomreža (slika 3).



Slika 3. Primjer ugrađivanja geomreža - interakcija s tlom (uklještenje zrna) [3]

Ovisno o načinu opterećenja i položaju geosintetika, moguća su dva osnovna tipa armiranja, membranski tip i posmični tip (sidreni tip) (slika 4) [3].



Slika 4. Mehanizmi ojačanja geomreže bočnog ograničenja (a), poboljšana nosivost (b) i učinak zategnute membrane (c) [3]

Membransko armiranje nastaje kada se vertikalno opterećenje primijeni na geosintetiku na deformabilnom tlu. U geosintetiku imamo vlačno naprezanje što rasterećuje tlo koje ga samo ne bi moglo preuzeti. Kod izraženijih deformacija geomreža i zrnatog sloja tla dolazi do pojave zvane "učinak napete membrane", tada geosintetik preuzima opterećenja i dolazi do pojave rasterećenja tla. Učinak napete membrane izazvan je vertikalnim deformacijama, što dovodi do konkavnog oblika geosintetika [3].

Posmično armiranje se javlja zbog učinka posmika na plohamu geosintetika i tla. Kod armiranja geomrežama, dolazi do uklještenja kamenih zrna u njenim otvorima, time se sprječavaju horizontalna pomjeranja tla. Na taj se način dobiva površina s vrlo jakim trenjem što doprinosi učinkovitosti armiranja (posmično armiranje). Interakcija između zrnatih čestica tla i geosintetika omogućava prijenos opterećenja na smicanje od sloja podloge na vlačno opterećenje u geosintetici. Kod posmično sidrenog armiranja, trenje postoji s obje strane elemenata koji služe za sidrenje. Vlačna čvrstoća geosintetika ograničava bočne deformacije tla što dovodi do povećanja čvrstoće na smicanje. I trenje i međusobno povezivanje na kontaktu između tla i geosintetika doprinose ovom mehanizmu. Za geomrežu, to znači da otvori kod geomreže moraju biti pravilno dimenzionirani prema veličini čestica tla. Takav sustav može ispuniti konstruktivne zahtjeve kao što su sprječavanje bočnog rasprostiranja sloja tla, krutosti sloja tla, poboljšanje raspodjele vertikalnih napona i smanjenje napona smicanja u tlu [3].

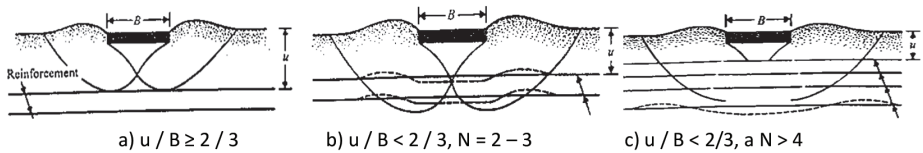
Vlačna čvrstoća spada u skupinu mehaničkih svojstava geosintetika. Parametri koji utječu na ponašanje materijala geosintetika su vrsta, temperatura, brzina istezanja i građa geosintetika. Trenje ovisi o više pojedinačnih parametara, kao što su hrapavost površine polimera, veličina i oblik zrna tla, prisutnost vode (porni tlak). Kod geomreža, na trenje najviše utječe tlo koje ulazi u otvore mreža, što posebno dolazi do izražaja kod nekoherentnog tla [3, 8].

### 3 Utjecaj geomreža na mehanizme sloma kod plitkog temeljenja

Brojna istraživanja analizirala su utjecaje armiranja tla geomrežama na mehanizme sloma kod plitkog temeljenja. U nastavku je napravljen pregled nekih od njih.

Binquet i Lee [6] su proučavali nosivost plitkih temelja na armiranom tlu. U radu su

autori definirali mehanizme sloma tla armiranog geomrežama kod plitkog temeljenja u ovisnosti o dubini armature i broja slojeva armiranja (slika 5a, b i c). Ovisnost dubine polaganja gornjeg sloja armature  $u$  i  $B$  širine temelja, izražen je kao bezdimenzionalni omjer  $u/B$ . Priroda sloma u masi tla slika 5a javlja se kada je prvi sloj armature položen na dubinu  $u > 0,67 B$ . Armatura djeluje kao kruta podloga i nalazi se na definiranoj dubini. Tip sloma sa slike 5b javlja se kada je omjer  $u/B < 0,67$ , a broj slojeva armature  $N < 2$  ili 3. Kod ove vrste sloma dolazi do izvlačenja armature. Najveći učinak kod armiranja tla se dobiva kada je omjer  $u/B < 0,67$ , a broj slojeva armature  $N > 4$ , ali ne veći 6 ili 7 (slika 5c) [6, 7].



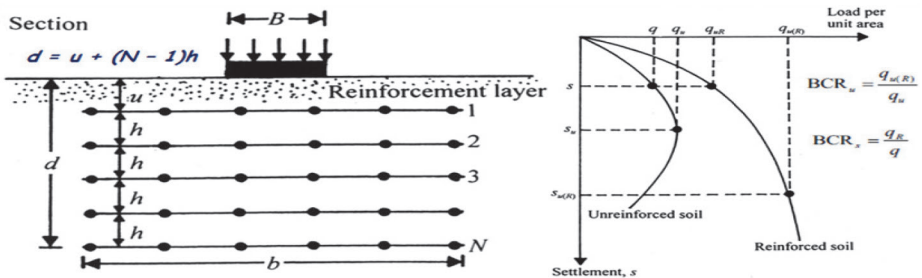
Slika 5. Tri načina loma tla ispod trakastih temelja na armiranom tlu [6]

Stanković [3] je u svom radu naveo pojašnjenje za povećanje nosivosti uslijed armiranja tla koja se izražava preko bezdimenzionalnog parametra koji se naziva faktor nosivosti, BCR. Faktor nosivosti može se izraziti ili u obliku granične nosivosti ili dozvoljene nosivosti od opterećenja temelja (slika 6). Na osnovi ovog koncepta, omjer nosivosti može se definirati kao:

$$BCR_u = q_{u(R)} / q_u \quad (3)$$

$$BCR_s = q_R / q \quad (4)$$

Potrebne vrijednosti granične i dozvoljene nosivosti za izračun faktora nosivosti (BCR) su  $q_{u(R)}$  granična nosivost temelja u armiranom tlu i  $q_u$  granična nosivost temelja u nearmiranom tlu, a  $q_R$  dozvoljena nosivost temelja u armiranom tlu i  $q$  dozvoljena nosivost temelja u nearmiranom tlu.



Slika 6. Geometrijski parametri za armirano tlo i tipične krivulje opterećenja za nearmirano i armirano tlo [3]



BCRu i BCRs bit će uvjetovani stupnjem zbijenosti tla, relativnom krutosti geomreže i geometrijskim omjerima dimenzija parametara kod armiranog tla, kao što su položaj gornjeg sloja armature **u**, ukupna dubina polaganja armature **d**, broj slojeva armature **N**, vertikalni razmak između dva sloja armature **h**, širina položenog sloja armature **b**, duljina položenog sloja armature **l**, kao i bezdimenzionalni omjeri  $u/B$ ,  $b/B$ ,  $l/B$ ,  $h/B$  i  $d/B$  (slika 6) [3].

Guido i dr. [9] su u radu pokusima dokazali koji parametri utječe na nosivost tla armiranog geomrežama, kod pravokutne stope temelja na pjeskovitom tlu. To su dubina polaganja prvog sloja armature, vertikalni razmak između slojeva armature, broj slojeva armature, veličina otvora geomreža, širina zone armiranja, položaj geomreže u odnosu na položaj temelja i vlačna čvrstoća geomreža.

Malpani, S. i Patil, G. K. [10] su u radu tabelarno prikazali rezultate niza istraživanja vezanih za uporabu geosintetika i njihov utjecaj na nosivost temeljnog tla.

**Tablica 1. Prikaz značajnijih istraživanja nosivosti tla armiranog geosinteticima [10]**

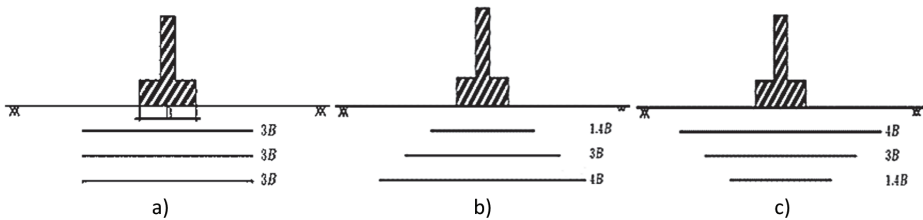
No.	Autori	Vrsta geosintetika	Zaključak
1.	S. K. Dash i dr (2001) i (2004)	armiranje geocelijama	Povećava nosivost i stabilnost u odnosu na rotaciju, slom nije uočen pri slijeganju = 45 % širine temelja i opterećenjem 8 x većem od krajnje nosivosti nearmiranog tla
2.	Guido i dr (1980)	armiranje geomrežama	Uvećanje BCR (engl. bearing capacity ratio)odnos nosivosti
3.	Zhao i dr (1997)	više slojeva geomreža	Stabilizira slabo nosivo tlo i donosi značajne uštede u materijalu i troškovima iskopavanja
4.	A. Marto i dr. (2017)	armiranje geomrežom,	Dopuštena nosivost povećava se s povećanim brojem slojeva armature i smanjuje se slijeganje kod plitkog temeljenja
5.	M. Latha, A. Somawanshi (2009)	mreže nosive u dva i jednom pravcu	Optimalna širina područja armiranja je 4 x širina temelja
6.	P. K. Kolay i dr. (2013)	armiranje geomrežama	Nosivost tla povećava se od 16,67 % kod uporabe jednog sloja geomreža na spoju slojeva različitog materijala tla, a nosivost se povećava na 33,33 % se armiranjem gornjeg sloja tla. Geomreže su postavljene na različitim dubinama kod dvoslojnoga tla (pjeskovito-glinovita tla i sloj pijeska)

U radu autori zaključuju da su odabir vrste geosintetika, širina i dubina armiranja, kao i raspored slojeva armature uvjetovani i svojstvima tla koje se armira. Autori također zaključuju da je faktor nosivosti BCR omjer granične nosivosti armiranog tla i granične nosivosti nearmiranog tla. Granična nosivost se povećava uporabom

geosintetičkog armaturnog sloja. U svim studijama se faktor nosivosti BCR mijenja u odnosu na položaj armaturnih slojeva ispod temelja [10].

Kolay i dr. [17] su u svom radu istražili učinak broja slojeva i dubine postavljanja geomreža na poboljšanje nosivosti na dvoslojnom tlu od pjeskovitih glina sa površinskim slojem pijeska. Provedena su ispitivanja modela za pravokutnu temeljnu stopu. Rezultati su pokazali da se nosivost tla povećala s povećanjem broja slojeva armature. Nosivost tla se povećala i kod uporabe jednog sloja geomreža na spoju slojeva različitog tla uz armiranje i gornjega površinskog pjeskovitog sloja [17].

Rowshanzamir i Karimian [18] su u radu istraživali učinke geometrije polaganja slojeva geomreža kod armiranja tla. Proveli su pokuse s postavljanjem armaturnih slojeva geomreže u različitim formama kod armiranja pjeskovitog tla. Ispitivan je i učinak gustoće tla na nosivost armiranog sloja tla (slika 7a, b i c).

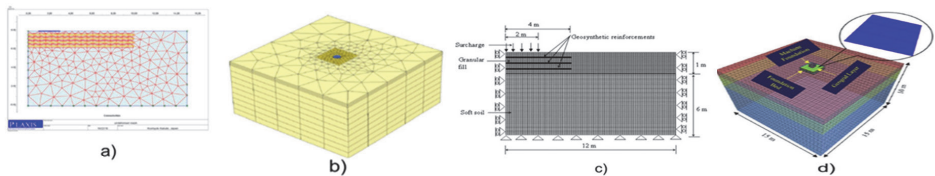


Slika 7. Jednolika forma armiranja, trapezoidni i inverzni trapezoidni raspored armature u 3 sloja [18]

Prva skupina pokusa provedena je u formi jednolikog rasporeda slojeva armature s tri geomrežna sloja istih dimenzija. U drugoj pokusnoj skupini je ista količina geomreža postavljena u trapezoidnoj formi geometrijskog rasporeda tako da su gornji slojevi postavljene geomreže najmanje površine, a dimenzije ostalih slojeva geomreža se povećavaju s povećanjem dubine ugradnje. Treća pokusna skupina je napravljena s istom količinom geomreža postavljenih u geometrijsku formu inverznog trapezoidnog rasporeda pa su površine slojeva smanjivane s povećanjem dubine ugradnje. Rezultati pokusa su pokazali da je kod različitih gustoća tla najveća nosivost armiranoga tla dobivena u formi inverznog trapezoidnog rasporeda armature, a najmanja nosivost tla kod trapezoidne forme armiranja [18].

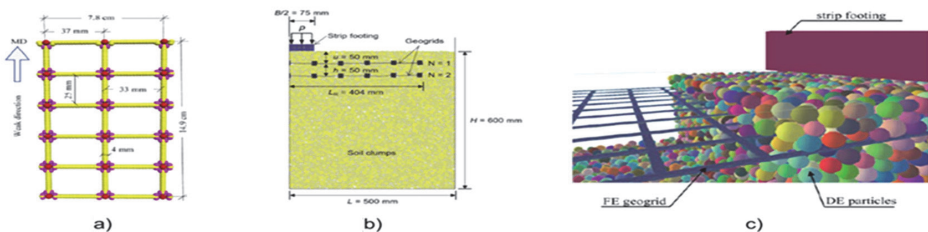
Gou i dr. [19] su u radu iznijeli zaključke iz pokusnih istraživanja, kao i zaključke numeričkog i analitičkog modeliranja za mehanizme kod ravninskog armiranja tla za plitko temeljenje. Dobiveni rezultati daju podatke o tomu da se potrebna dubina ugradnje ( $u$ ) gornjeg sloja armature kreće od  $0,3B$  do  $0,4B$ , gdje je  $B$  širina ili promjer temelja. Razmak između slojeva armature ( $h$ ) se kreće od  $0,2B$  do  $0,4B$ . Duljina sloja armature ( $L$ ) varira od  $4B$  do  $5B$ . Numeričkim simulacijama kombiniraju se rezultati dobiveni iz ispitivanja na laboratorijskim modelima s onim dobivenim simulacijama računalnim programima kao što su omjeri opterećenja - slijeganja, porast i raspodjela naprezanja i utjecaj parametara armature, kao što su raspodjela polja pomaka tla, deformacije i raspodjela naprezanja u armaturi te interakcija tla i armature [19].

Numeričke metode modeliranja obuhvaćaju metodu konačnih elemenata i metodu diskretnih elemenata. U jednom od načina izračuna, armirana zona se (uključujući i tlo i armaturu) smatra homogenim tлом i pri proračunima se uzimaju u obzir parametri homogenog tla kod Gou i dr. [19]. Drugi način je promatranje armiranog tla kao nehomogeno, pa se parametri tla, armature i njihove interakcije uzimaju zasebno u proračunu u numeričkim modelima. U ovim numeričkim modelima armatura se smatra kontinuiranim linearno-elastičnim ili elastično-plastičnim materijalom, te je teško simulirati stvarnu geometriju geomreže u praksi, kao što su otvor rešetke geomreže, interakcija između rebra rešetke geomreže i okolnih čestica tla. U literaturi su navedeni neki od softvera za izračun metodom konačnih elemenata PLAXIS 2D i 3D i FLAC 2D i 3D (slika 8a, b, c i d) [19].



Slika 8. Numerički model pomoću različitih softvera: a) PLAXIS 2D; b) PLAXIS 3D; c) FLAC 2D; d) FLAC 3D[19]

Metoda diskretnih elemenata numeričke simulacije prikazuje interakciju između zrnatih tala i armature, analizirajući mikromehaničke karakteristike čestica tla (slika 9) [19].



Slika 9. Numerički modeli: a) geomreža koja koristi PFC ; b) armatura i temelj primjenom PFC-a; c) armiranje na temelju metode konačnih diskretnih elemenata [19]

U dvodimenzionalnom numeričkom modelu sferne čestice su povezane kako bi simulirale horizontalno postavljene slojeve armature, dok se u trodimenzionalnom numeričkom modelu veliki broj sfernih čestica koristi za modeliranje geometrije geomreže, kao i za simulaciju različitih vrsta tla. U ovom modelu se konačni elementi koriste za simulaciju materijala armature, a čestice diskretnih elemenata se koriste za modeliranje čestica tla. Fizikalna i mehanička svojstva tla simuliraju se definira-

njem mikroparametara čestica, koeficijenta trenja i koeficijenta krutosti (slika 9) [19].

#### 4 Zaključak i preporuke za daljnja istraživanja

Prema podacima objavljenim u pregledanoj literaturi, može se zaključiti da broj i način izračuna parametara koji utječu na učinak armiranja tla kod plitkog temeljenja ovisi o vrsti armature i njenim parametrima, pa će buduća ispitivanja analizirati primjenu kombinacija geosintetika (geomreže, geoćelije, geotepisi, geopjene). Kod kombinacija različite vrste geosintetika pažnju treba posvetiti i geometrijskim pravcima postavljanja geosintetika. Posebice treba proučiti i različita djelovanja koja su povezana s pozicioniranjem armature ispod temelja, a prema veličini površine ravnine koja se armira polaganjem armaturnih slojeva, kao i postavke položaja prvog i zadnjeg sloja armature. U nastavku istraživanja vezanih za izradu doktorskoga rada korisno bi bilo ispitati djelovanja armiranja kod više uslojenih tala, kao i interakciju geomreža u kombinacijama slojeva različitog tla, kao što su lomljeni kamen, šljunak različitih granulacija, rahlo tlo, proslojene gline i slično, te utjecaje takvih kombinacija armiranog tla na mehanizam sloma tla kod plitkog temeljenja.

#### Literatura

- [1] Ivšić, T.: Plitki temelji, Diplomski sveučilišni studij, Geotehnika, Geotehničko inženjerstvo, Plitki temelji - Građevinski fakultet, <https://www.grad.unizg.hr> › Predavanja\_2 › Ivsic, 2012.
- [2] Szavits-Nossan, A., Ivšić, T.: Novi Eurokod 7: geotehničko projektiranje, 4. Savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva (4th Conf. of Croatian Geotechnical Society), Ojačanje tla i stijena, Opatija, R Hrvatska (Croatia), 5.-7. listopada, Volume: pp. 455-470, 2006.
- [3] Stanković, M.: Geosintetici u infrastrukturnim projektima - Treća revolucija u građevinarstvu, Primena plastičnih materijala (geosintetika u izgradnji i održavanju saobraćajnica i dr. objekata, Beograd, 2019.
- [4] Trbljanić, M.: Dokazi graničnog stanja nosivosti plitkih temelja prema Eurokodu 7, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Repozitorij Geotehničkog fakulteta Varaždin, urn:nbn:hr:130:042333, 2016.
- [5] Merdan, A.: The use of geosynthetics for stabilization of slope in the area of Canton Sarajevo, Thesis, MSc in Geotechnical Engineering Design and Management, The Nottingham Trent University, UK, 2004.
- [6] Binquet, J., Lee, K.L.: Bearing capacity tests on reinforced earth mass; Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1241-55, [Google Scholar] 1975.

- [7] Mohanty, M., Behavior of strip footing on multilayered geogrid reinforced sand bed, report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology in Civil Engineering Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela, <https://core.ac.uk> brought to you by CORE provided by <https://ethesis@nitr>, 2007.
- [8] Babić, Geosintetici 07 - Geosintetici u geotehnici, Post on 23-Feb-2018, <https://www.worlddocuments.com>
- [9] Guido, V. A., Biesiadecki, G. L., Sullivan, M. J.: Bearing capacity of a geotextile-reinforced foundation, International Society For Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, <https://www.issmge.org/publications/online-library>, 1985.
- [10] Malpani, S., Patil, G. K.: A Review on Parametric Study of Geosynthetic Material below Strip Footing, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Journal Vol. 7, Issue 6, [www.ijirset.com](http://www.ijirset.com), 2018.
- [11] Dash, S. K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R.: Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations, Geosynthetics International, <https://www.researchgate.net> , 2004.
- [12] Dash, S.K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R.: Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement, Geotextiles and Geomembranes 19 529–538, <https://www.researchgate.net> 2001.
- [13] Guido, V.A. Knueppel, J.K., Sweeny, M. A.: Plate load tests on geogrid reinforced earth, Bureau of Indian Standards, New Delhi IS: 2720-Part, 1980
- [14] Zhao, A., Williams, G.S., Waxse, J.A.: Field performance of weak subgrade stabilization with multilayer geogrids, Geotextiles and Geomembranes Volume 15, Issues 4–6, Pages 183-195, 1997.
- [15] A. Marto, M. O. Mohsen, N. Z. M. Yunus: Effect of placement depth of geocell reinforcement in sand deposit, Malaysian Journal of Civil Engineering 27 Special Issue (1):224-234, 2015.
- [16] Latha, G. M., Somawanshi, A.: Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand, Geotext. Geomembr. 27, 281–294, 2009.
- [17] Kolay, P. K., Kumar, S., Tiwari D. : Improvement of Bearing Capacity of Shallow Foundation on Geogrid Reinforced Silty Clay and Sand, Research, Volume <https://www.researchgate.net/publication/258391862>, Article ID 293809, 10 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/293809>, 2013.
- [18] Rowshanzamir, M.A., Karimian, M.: Bearing capacity of square footings on sand reinforced with dissimilar geogrid layers, Scientia Iranica (2016),
- [19] Guo, X., Zhang, H., Liu L.: Planar geosynthetic-reinforced soil foundations: a review, SN Applied Sciences <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03930-5>, 2020.