

Primljen / Received: 24.8.2023.

Ispravljen / Corrected: 13.5.2024.

Prihvaćen / Accepted: 18.5.2024.

Dostupno online / Available online: 10.7.2024.

# Koso izvlačenje trakastog sidra ugrađenog u uslojenu pješčanu podlogu

## Autori:



**Rakesh Shambharkar**, dipl.ing.građ.

Visvesvaraya Nacionalni institut za tehnologiju  
Odjel za građevinarstvo  
[dt20civ017@students.vnit.ac.in](mailto:dt20civ017@students.vnit.ac.in)

Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Srinivasan Venkatraman**, dipl.ing.građ.

Visvesvaraya Nacionalni institut za tehnologiju  
Odjel za građevinarstvo  
[srinivasanv@civ.vnit.ac.in](mailto:srinivasanv@civ.vnit.ac.in)



Doc.dr.sc. **Santhoshkumar Gunasekaran**, dipl.ing.građ.

Indijski institut za tehnologiju, Bhubaneswar  
Odjel za infrastrukturu  
[santhoshg@iitbbs.ac.in](mailto:santhoshg@iitbbs.ac.in)



**Pareese Pathak**, dipl.ing.građ.

Visvesvaraya Nacionalni institut za tehnologiju  
Odjel za građevinarstvo  
[pareespathak@gmail.com](mailto:pareespathak@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Rakesh Shambharkar, Srinivasan Venkatraman, Santhoshkumar Gunasekaran, Pareese Pathak**

## Koso izvlačenje trakastog sidra ugrađenog u uslojenu pješčanu podlogu

Ovo istraživanje analizira ponašanje vertikalnog i kosog izvlačenja trakaste sidrene ploče, horizontalno ugrađene u homogena i uslojena pjeskovita tla. Analiza je provedena metodom granične ravnoteže u kombinaciji s Kötterovom jednadžbom. Rezultati istraživanja koji se odnose na sposobnost izvlačenja sidra prikazani su pomoću bezdimenzijskog parametra poznatog kao faktor izvlačenja ( $K = P_u / \gamma_{avg} b^2$ ), gdje  $P_u$  je bruto opterećenje izvlačenja,  $\gamma_{avg}$  je ponderirana prosječna zapreminska težina dvaju slojeva tla, i  $b$  je širina sidrene ploče). Rezultati dokazuju da se vrijednost faktora izvlačenja povećava kako se kut kosog izvlačenja povećava za danu dubinu ukopanosti, a značajno smanjenje kapaciteta izvlačenja opaža se na manjim dubinama ukopanosti za određeni kut trenja. Istraživanje se također bavilo utjecajem različitih parametara, kao što su jedinična težina tla, unutarnje trenje, dubina ukopanosti i usmjerenje spojne šipke. Provedena je opsežna parametarska analiza kako bi se razumio svaki učinak. Navedeni pristup, temeljen na Kötterovoj jednadžbi, pruža pojednostavljenu metodu za predviđanje optimalnog oblika i postavljanja sidara u pjeskovitim tlima. Ovo istraživanje služi kao temeljni korak prema postizanju učinkovitog oblika sidra i strategijama za ugradnju u pjeskovitim okruženjima.

### Ključne riječi:

sidra, opterećenje do sloma, Kötterova jednadžba, granična ravnoteža, optimizacija, izvlačenje

Research Paper

**Rakesh Shambharkar, Srinivasan Venkatraman, Santhoshkumar Gunasekaran, Pareese Pathak**

## Oblique pullout of strip anchor embedded in layered sandbed

This study analyzes the vertical and oblique pullout behavior of a strip anchor plate horizontally embedded in homogeneous and two-layered sandy soil layers. The analysis was performed using the limit equilibrium method combined with Kötter's equation. The research results concerning the pullout capacity of the anchor are presented using a dimensionless parameter known as the pullout factor ( $K = P_u / \gamma_{avg} b^2$ ), where  $P_u$  is the gross pullout load,  $\gamma_{avg}$  is the weighted average unit weight of two layers of soil, and  $b$  is the width of the anchor plate). The findings indicate that the value of the pullout factor increases as the angle of oblique pullout increases for a given embedment depth, and a significant reduction in the pullout capacity is observed at lower embedment depths for a particular friction angle. The study also investigated the impact of various parameters, such as the unit weight of the soil, internal friction, embedment depth, and orientation of the tie rod. A comprehensive parametric analysis was conducted to understand these effects in detail. The outlined approach, based on Kötter's equation, provides a simplified method for anticipating the optimal design and placement of anchors in sandy soils. This study serves as a foundational step toward achieving effective anchor design and installation strategies in sand-based environments.

### Key words:

anchors, failure load, Kötter's equation, limit equilibrium, optimization, pullout

## 1. Uvod

Sidra ukopana u tlo obično se upotrebljavaju za osiguranje stabilnosti u temeljnim sustavima različitih struktura, kao što su dalekovodni stupovi, suhi dokovi, dimnjaci, ukopani cjevovodi, komunikacijski tornjevi, oceanske platforme i potporne konstrukcije. Nekoliko je istraživača proučavalo sposobnost vertikalnog izvlačenja sidara postavljenih vodoravno u homogeno nekohenretno tlo primjenom različitih metodologija, uključujući metodu granične ravnoteže [1-11], eksperimentalna i laboratorijska modelska ispitivanja [12-18], metodu konačnih elemenata [19, 20]. ] te analizu gornje i donje granice [21-26]. Među dostupnim metodologijama, metoda granične ravnoteže zajedno s Kötterovom jednačbom [27] često se upotrebljava za određivanje izvlačenja sidara u tlu zbog svoje jednostavnosti [3-6, 28-32]. Za određivanje izvlačenja mogu se primijeniti različite metode, ovisno o svojstvima tla [33, 34], položajima sidra i spojne šipke [18, 26, 32], dubini postavljanja [2, 5, 14], širini sidra [19], obliku sidra [3, 21, 23] te orijentaciji sidra [15].

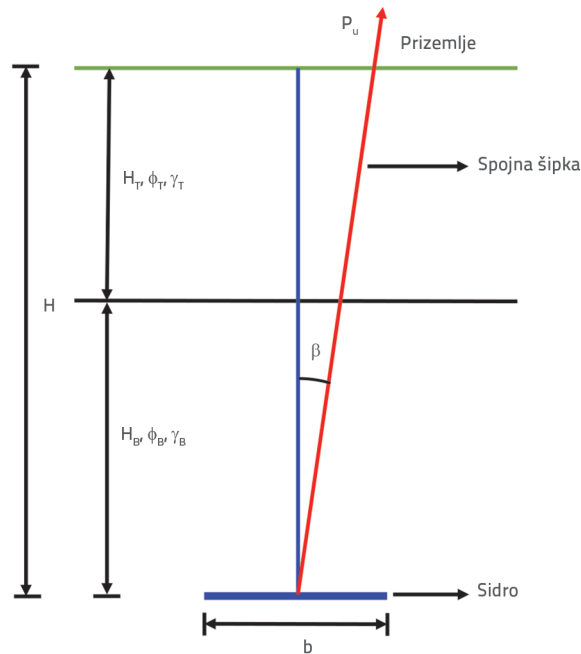
Liu i sur. [14] i Ilamparuthi i sur. [17] izveli su pokuse i uočili da je anvelopa sloma plitkog okruglog sidra u obliku krnjeg stošca s ravnom površinom sloma. Slično tome, prijašnja istraživanja, npr. ona koja su proveli Mors [7], Down i Chieurrzi [8], Matsuo [9] te Veesaert i Clemence [10] pretpostavila su, primjenom teorijskog pristupa, da je pri određivanju nosivosti na izvlačenje kružnog sidra površina sloma u obliku krnjeg stošca. Za horizontalna trakasta sidra, Murray i Geddes [13], Kumar i Kouzer [11], Deshmukh i sur. [3-6] te Rangari i sur. [28-32] primjenom metode granične analize razmotrili su ravnu površinu sloma koji polazi od ruba sidrene ploče. Prethodna istraživanja uglavnom su bila usmjerena na okomito izvlačenje i homogene uvjete tla; međutim, u stvarnosti, tlo je često heterogeno, s različitim čvrstoćama na različitim dubinama. Osim toga, različiti čimbenici, kao što su svojstva tla, uvjeti opterećenja, koeficijent ukopanosti te oblik i orijentacija sidara, mogu utjecati na sposobnost izvlačenja sidara. Ovo istraživanje ispituje ponašanje trakastih sidara ugrađenih u slojeviti sustav pijeska podvrgnutih kosim opterećenjima izvlačenja. Stoga rezultati ovog istraživanja mogu značajno doprinijeti projektiranju i ugradnji sidrenih sustava za konstrukcije podvrgnute kosom opterećenju, kao što su privezišta za uređaje iz obnovljivih izvora na moru i druge plutajuće objekte podvrgnute silama podizanja.

Izvlačenje sidra prije svega je određeno posmičnom čvrstoćom tla [13]. Prema tome, veličina najveće nosivosti na izvlačenje ( $P_u$ ) je prilagođena svojstvima tla, točnije pojedinačnoj masi tla unutar pretpostavljene zone sloma, a rezultati se izražavaju bezdimenzijskim faktorom izvlačenja ( $K$ ) za bolje razumijevanje i primjenu na terenu. Za određivanje najvećeg faktora izvlačenja ( $K$ ) sidrene ploče izračunat je krajnji otpor tla na izvlačenje sidrene ploče. Ovaj izračun uključivao je analizu stabilnosti mase tla iznad sidrene ploče i izračun faktora sigurnosti (FS) u odnosu na potencijalni slom mase tla. Faktor sigurnosti definira se kao omjer sila otpora i sila djelovanja i mora biti veći od jedinice da bi sustav bio stabilan. Nadalje, učinci različitih parametara, kao što su svojstva tla, koeficijent ukopanosti, kosi kut izvlačenja,

zapreminska težina tla i optimalna površina sloma, također mogu značajno utjecati na analizu. Stoga se mora provesti detaljna analiza koja uzima u obzir ova opažanja kako bi se riješili glavni problemi koji se odnose na sustave sidrenih temelja.

## 2. Definiranje problema

Trakasta sidrena ploča širine " $b$ " ukopana je u uslojeni pijesak na dubini " $H$ " ispod razine tla, kao što je prikazano na slici 1. Debljina ploče je zanemariva u odnosu na njenu širinu ( $b$ ), stoga težina sidra ne utječe značajno na analizu. Masa tla iznad ploče sastoji se od dva sloja pijeska različitih debljina  $H_T$  i  $H_B$  koji odgovaraju gornjem odnosno donjem sloju, kao što je prikazano na slici 1. Glavni je cilj odrediti veličinu najvećeg faktora izvlačenja ( $\beta$ ), može biti od  $0^\circ$  do manje od  $\phi$ . Površina sloma obično je linearna, a pretpostavlja se da tlo slijedi Mohr-Coulombov kriterij loma. Istraživanje uključuje određivanje veličine najvećeg faktora izvlačenja uzimajući u obzir različite parametre kao što su slojevi tla ( $\phi_T$  i  $\phi_B$ ), koeficijent ukopanosti ( $\lambda = H/b$ ), kosi kut izvlačenja ( $\beta$ ), zapreminska težina tla ( $\gamma$ ), i optimalna površina sloma tla ( $\alpha$ ).



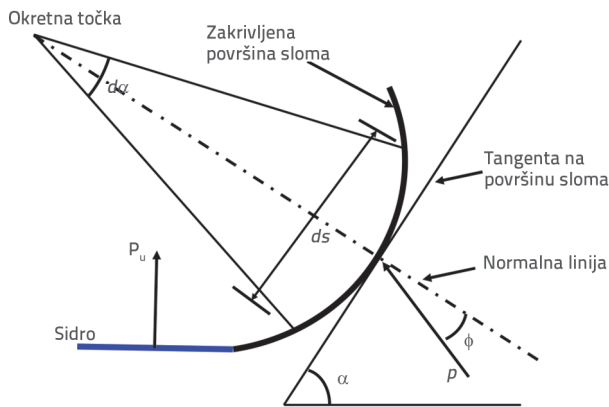
Slika 1. Pločasto sidro ukopano u dva sloja pijeska

Polazi se od sljedećih pretpostavki:

- Sidrena ploča ispunjava uvjet ravninske deformacije; stoga se tretira kao dvodimenzijski problem.
- Sidrena ploča savršeno je glatka.
- Sidrena spojna šipka ne utječe na silu pri slomu ili na oblik plohe sloma.
- Tlo u trenutku sloma slijedi Mohr-Coulombov kriterij sloma.
- Pretpostavlja se da je površina sloma ravna linija koja potječe od rubova sidra prema površini tla.
- Pretpostavlja se da masa tla ispod sidra ne pruža nikakav otpor sili izvlačenja.

### 3. Analiza i formulacija

Kako bi se provela analiza granične ravnoteže, mora se pretpostaviti moguća površina sloma. Analiza je provedena izjednačavanjem sila unutar pretpostavljene domene sloma. Valja istaknuti da se trag površine sloma prati od točke zakretanja, kao što je prikazano na slici 2., kako bi se olakšalo uvrštavanje Kötterove formulacije [27]. Stoga se sila reakcije tla na površini sloma može dobiti pomoću jednadžbi (1) i (3).



Slika 2. Idealizirani prikaz zakrivljene površine sloma za primjenu Kötterovog izraza

#### 3.1. Raspodjela reakcije tla po površini sloma

Kötterova jednadžba za pasivno stanje ravnoteže u uvjetima ravninske deformacije u pijesku upotrijebljena je za dobivanje vrijednosti distribucije reakcije tla na zakrivljenoj površini, kao što je prikazano na slici 2., i izražena je u obliku:

$$\frac{dp}{ds} + 2p \cdot \tan \phi \frac{d\alpha}{ds} = \gamma \sin(\alpha + \phi) \quad (1)$$

pri čemu  $dp$  označava diferencijalnu vrijednost tlačne reakcije na površini sloma,  $ds$  označava diferencijalnu duljina površine sloma,  $\phi$  je kut unutarnjeg trenja tla,  $d\alpha$  je inkrementalna

promjena u kutu ravnine sloma ( $\alpha$ ),  $\gamma$  je zapreminska težina tla. Budući da se pretpostavlja da je površina sloma ravna linija koja potječe od rubova trakastog sidra pod kutom ( $\alpha$ ), u odnosu na horizontalu i sjecište s površinom tla kao što je prikazano na slici 3., izraz (1) može se svesti na

$$\frac{dp}{ds} = \gamma \sin(\alpha + \phi) \quad (2)$$

Integriranjem izraza (2) dobiva se,

$$p = \gamma s \sin(\alpha + \phi) + C_1 \quad (3)$$

gdje je  $C_1$  konstanta integracije, dobivena iz dostupnih graničnih uvjeta. U ovom se istraživanju pijesak sastojao od dva sloja, uz pretpostavku da su površine sloma bile niz pravaca (tj. DE, EF, GJ i JA), kao što je prikazano na slici 3(a). Dakle, reakcijske sile  $R_{RT}$ ,  $R_{RB}$ ,  $R_{LB}$  i  $R_{LT}$  na površinama sloma s obje strane trakastog sidra mogu se dobiti pomoću jednadžbe (3) s odgovarajućim graničnim uvjetima: Važno je napomenuti da se u analizi prati nomenklatura na način da se prvi indeksi  $R_L$  i  $R_R$  odnose na desnu i lijevu stranu središnje osi sidra. Drugi indeksi  $T$  i  $B$  odnose se na gornji i donji sloj pijeska.

##### 3.1.1. Sila reakcije duž osi DE

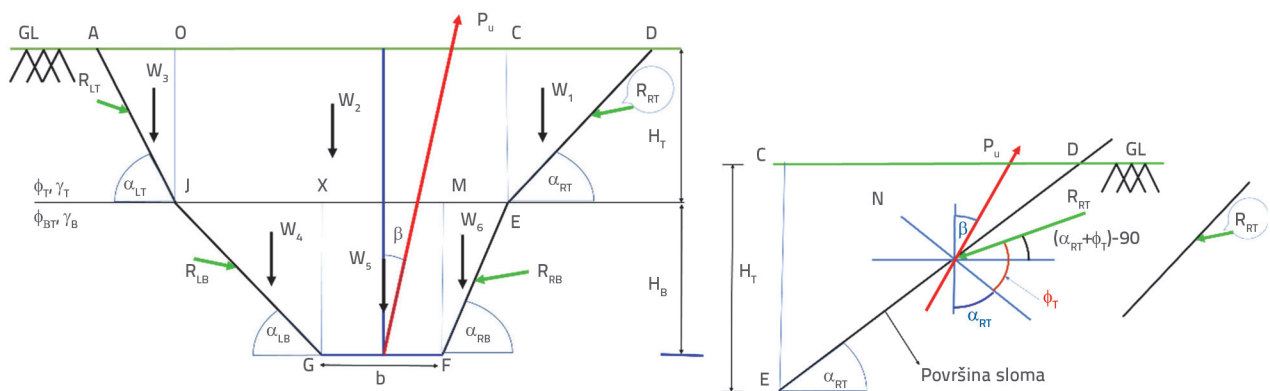
Za površinu sloma osi DE, iz izraza (3), D je početna točka mjerena površine sloma osi DE.

U točki D,  $s_D = 0 \rightarrow p_D = 0 \rightarrow C_1 = 0$

Prema tome, iz izraza (3) proizlazi

$$p_{DE} = s_{DE} \gamma_T \sin(\alpha_{RT} + \phi) \quad (4)$$

Sili izvlačenja (slika 3.a) suprotstavila se rezultirajuća sila reakcije tla  $R_{RT}$  za površinu sloma osi DE. Integriranjem jednadžbe (4) preko površine osi DE, reakcija  $R_{RT}$  na površini sloma može biti dobivena izrazom (5):



Slika 3. Prihvatljivi mehanizam sloma: a) geometrija; b) reakcije tla

$$R_{RT} = \left[ \frac{S_{DE}^2}{2} \gamma_T \sin(\alpha_{RT} + \phi_T) \right]^{DE} \quad (5)$$

$$R_{RT} = \frac{DE^2 \gamma_T \sin(\alpha_{RT} + \phi_T)}{2}$$

Slika 3.a pomoću geometrije izražava sljedeću jednadžbu, izraz (6):

$$R_{RT} = \frac{\gamma_T H_T^2 \sin(\alpha_{RT} + \phi_T)}{2 [\sin(\alpha_{RT})]^2} \quad (6)$$

### 3.1.2. Sila reakcije duž osi EF

Za površinu sloma osi EF izraz (3) može se izraziti kao:

$$p_{EF} = s_{EF} \gamma_B \sin(\alpha_{RB} + \phi_B) + C_2 \quad (7)$$

U točki E,

$$s = s_{EF} = s_E = 0 \text{ i } p = p_{EF} = p_E = \frac{\gamma_T H_T \sin(\alpha_{RT} + \phi_T)}{[\sin(\alpha_{RT})]}$$

zamjenom u izraz (7),  $C_2$  rezultira sljedećim izrazom

$$C_2 = \frac{\gamma_T H_T \sin(\alpha_{RT} + \phi_T)}{[\sin(\alpha_{RT})]}$$

Slično gornjem sloju, sila reakcije za donji sloj može se izraziti zamjenom odgovarajućih graničnih uvjeta kako slijedi:

$$R_{RB} = \frac{\gamma_B (H - H_T)^2 \sin(\alpha_{RB} + \phi_B)}{2 [\sin(\alpha_{RB})]^2} + \frac{\gamma_T H_T \sin(\alpha_{RT} + \phi_T) (H - H_T)}{(\sin \alpha_{RT}) (\sin \alpha_{RB})} \quad (8)$$

Slično tome, reakcije tla  $R_{LT}$  i  $R_{LB}$  na površinama sloma na osima AJ i JG mogu se izračunati pomoću izraza (6) odnosno (8).

$$R_{LT} = \frac{\gamma_T H_T^2 \sin(\alpha_{LT} + \phi_T)}{2 [\sin(\alpha_{LT})]^2} \quad (9)$$

$$R_{LB} = \frac{\gamma_B (H - H_T)^2 \sin(\alpha_{LB} + \phi_B)}{2 [\sin(\alpha_{LB})]^2} + \frac{\gamma_T H_T \sin(\alpha_{LT} + \phi_T) (H - H_T)}{(\sin \alpha_{LT}) (\sin \alpha_{LB})} \quad (10)$$

### 3.2. Težina tla (W)

Težina tla ( $W$ ) okruženog površinom sloma osi ADEFGJ može se dobiti zbrajanjem težina pojedinačnih blokova (DCE, CEJO, AO), JXG, XMFG i EMF), kao što je prikazano na slici 3.a.

$$W = \left[ \begin{array}{l} \frac{\gamma_T H_T^2}{2 \tan \alpha_{RT}} + \frac{\gamma_T H_T (H - H_T)}{\tan \alpha_{RB}} + \gamma_T H_T b + \frac{\gamma_T H_T (H - H_T)}{\tan \alpha_{LB}} + \frac{\gamma_T H_T^2}{2 \tan \alpha_{LT}} \\ + \frac{\gamma_B (H - H_T)^2}{2 \tan \alpha_{LB}} + \gamma_B b (H - H_T) + \frac{\gamma_B (H - H_T)^2}{2 \tan \alpha_{RB}} \end{array} \right] \quad (11)$$

### 3.3. Izvlačenje sidra

Analiza je provedena u okviru granične ravnoteže; stoga su sile dobivene u prethodnom poglavlju izjednačene za održavanje ravnoteže u domeni tla osi ADEFGJ. Stoga se izvlačenje ( $P_u$ ) sidra povezanog s domenom "zarobljenog" tla može iskazati izrazom (12):

$$P_u = [W \cos \beta - R_{RT} \cos(\alpha_{RT} + \beta + \phi_T) - R_{RB} \cos(\alpha_{RB} + \beta + \phi_B) - R_{LT} \cos(\alpha_{LT} - \beta + \phi_T) - R_{LB} \cos(\alpha_{LB} - \beta + \phi_B)] \quad (12)$$

Zamjenom  $R_{RT}$ ,  $R_{RB}$ ,  $R_{LT}$ ,  $R_{LB}$  i  $W$  u izraze (6), (8), (9), (10) i (11), u izrazu (12) iskazuje se

$$P_u = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{\gamma_T H_T^2}{2 \tan \alpha_{RT}} + \frac{\gamma_T H_T (H - H_T)}{\tan \alpha_{RB}} + \gamma_T H_T b + \frac{\gamma_T H_T (H - H_T)}{\tan \alpha_{LB}} + \frac{\gamma_T H_T^2}{2 \tan \alpha_{LT}} \right] \cos \beta \\ - \left[ \frac{\gamma_T H_T^2 \sin(\alpha_{RT} + \phi_T)}{2 (\sin \alpha_{RT})^2} \right] \cos(\alpha_{RT} + \beta + \phi_T) \\ - \left[ \frac{\gamma_B (H - H_T)^2 \sin(\alpha_{RB} + \phi_B)}{2 (\sin \alpha_{RB})^2} + \frac{\gamma_T H_T \sin(\alpha_{RT} + \phi_T) (H - H_T)}{(\sin \alpha_{RT}) (\sin \alpha_{RB})} \right] \cos(\alpha_{RB} + \beta + \phi_B) \\ - \left[ \frac{\gamma_T H_T^2 \sin(\alpha_{LT} + \phi_T)}{2 (\sin \alpha_{LT})^2} \right] \cos(\alpha_{LT} - \beta + \phi_T) \\ - \left[ \frac{\gamma_B (H - H_T)^2 \sin(\alpha_{LB} + \phi_B)}{2 (\sin \alpha_{LB})^2} + \frac{\gamma_T H_T \sin(\alpha_{LT} + \phi_T) (H - H_T)}{(\sin \alpha_{LT}) (\sin \alpha_{LB})} \right] \cos(\alpha_{LB} - \beta + \phi_B) \end{array} \right\} \quad (13)$$

Rezultati se prikazuju u obliku bezdimenzijskog parametra, odnosno faktora izvlačenja ( $K$ ) sidra, kako bi se dobila suvisla parametarska analiza, što je prikazano u izrazu (14):

$$K = \frac{P_u}{\gamma_{avg} b^2} \quad (14)$$

$\gamma_{avg}$  = Ponderirani prosjek zapreminskih težina dvoslojnog pijeska koji se može izračunati iz,

$$\gamma_{avg} = \frac{\gamma_T H_T + \gamma_B H_B}{H}$$

## 4. Rezultati i rasprava

### 4.1. Validacija rezultata

#### 4.1.1. Validacija za homogeno nekoherentno tlo

Za vrednovanje rezultata korišten je faktor nosivosti ( $q_u = P_u / \gamma b H$ ), koji su u literaturi naveli Rangari i sur. [29]. Tablica 1. predstavlja usporedbu vrijednosti faktora nosivosti iz trenutnog istraživanja s onima iz drugih istraživanja [1, 5, 11, 18, 29], koja su upotrebljavala različite metode, kao što su granična ravnoteža, analiza gornje granične vrijednosti i eksperimentalno zapažanje. Uz parametre  $\gamma = 14,5 \text{ kN/m}^3$ ,  $b = 1 \text{ m}$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\phi = 35^\circ$ , rezultati koje su dokazali Deshmukh i sur. [5] i Rangari i sur. [29], te Kumar i Kouzer [11] pokazali su bolju usklađenost s eksperimentalnim rezultatima ispitivanja koje je proveo Dickin [18]. Međutim, rezultati Meyerhofa i Adamsa [1] precijenili su nosivost na izvlačenje u usporedbi s

Tablica 1. Usporedba izračunanog faktora nosivosti ( $q_u = P_u/\gamma bH$ ) prema [29] za trakasto sidro u jednoslojnom homogenom pijesku uzimajući u obzir da je  $\gamma = 14,5 \text{ kN/m}^3$ ,  $b = 1 \text{ m}$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\phi = 35^\circ$

$\lambda = H/b$	Meyerhof i Adams [1] ( $\delta = 2\phi/3$ )	Deshmukh i sur. [5] ( $\delta = \phi$ )	Rangari i sur. [29] ( $\delta = 2\phi/3$ )	Dickin [18] (Eksp. rad)	Kumar i Kouzer [11] ( $\delta = \phi$ )	Trenutno istraživanje ( $\delta = \phi$ )
1	1,89	1,63	1,69	1,52	1,70	1,70
2	2,70	2,26	2,39	1,89	2,40	2,40
3	3,54	2,89	3,08	2,29	3,10	3,10
4	4,16	3,52	3,79	3,01	3,80	3,80
5	4,83	4,15	4,48	3,20	4,50	4,50

Tablica 2. Usporedba faktora nosivosti za koso opterećenje ( $P_u/\gamma bH$ ) za trakasto sidro u homogenom pijesku pri  $\phi = 31^\circ$ , za različit koeficijent ukopanosti

$\beta$ (°)	Das i Seeley [12] (Eksperimentalni rad)			Rangari i sur. [32] ( $\delta = 2\phi/3$ )			Trenutno istraživanje ( $\delta = \phi$ )		
	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 4,5$	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 4,5$	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 4,5$
0	1,53	2,08	3,29	1,58	2,17	3,65	1,60	2,20	3,70
10	1,79	2,99	3,91	1,73	2,37	3,97	1,63	2,25	3,82
20	2,44	3,92	4,37	1,96	2,68	4,5	1,72	2,43	4,23
30	2,76	4,49	4,57	2,34	3,21	5,39	1,92	2,85	5,16
40	3,23	4,84	4,86	3,06	4,16	6,97	Nije primjenjivo*	Nije primjenjivo*	Nije primjenjivo*

Nije primjenjivo\* - Budući da ovo ispitivanje razmatra kut pod kojim djeluje opterećenje ( $\beta$ )  $\leq$  kut trenja ( $\phi$ )

eksperimentalnim rezultatima. Vrijednosti iz ovog istraživanja se podudaraju s onima Kumara i Kouzera [11], gdje je  $\beta = 0^\circ$ , što podupire vjerodostojnost predložene formule. Trenje na zidu, razmatrano u Kumaru i Kouzeru [11] i u ovom istraživanju je kruto ( $\delta = \phi$ ), dok su rezultati koje su usvojili Rangari i sur. [29], koji su upotrijebili drugi kontaktni kut trenja ( $\delta = 2\phi/3$ ), bili precijenjeni. Tablica 1 također prikazuje da su rezultati precijenjeni ako se uzme u obzir kontaktni kut trenja od ( $\delta = 2\phi/3$ ).

Tablica 2. uspoređuje faktor nosivosti ( $q_u = P_u/\gamma bH$ ) u srednje zbijenom pijesku za podatke ispitivanja Dasa i Seeleya [12], pri čemu su  $b = 0,064 \text{ m}$  i  $\gamma = 14,71 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 31^\circ$  za različite nagibe kosog opterećenja. Za niže koeficijente ukopanosti ( $\lambda = 1$  &  $2$ ), ovo istraživanje podcjenjuje eksperimentalne rezultate s povećanjem nagnutosti. Međutim, za veće dubine ukopanosti ( $\lambda = 4,5$ ), predložena teorija blisko slijedi eksperimentalne rezultate za kose kutove izvlačenja od  $10^\circ$  i  $20^\circ$ , i prikazuje postotne pogreške od 2,30 % odnosno 3,20 %. Na manje dubine ukopanosti može više utjecati lokalna varijabilnost tla, što sugerira da pretpostavljenu površinu linearnog sloma treba promijeniti.

Za veće dubine ukopanosti, utjecaj lokalne varijabilnosti tla može se smanjiti, a linearna površina sloma dovoljna je da zabilježi ponašanje uslijed izvlačenja, što dovodi do sličnih predviđenih vrijednosti.

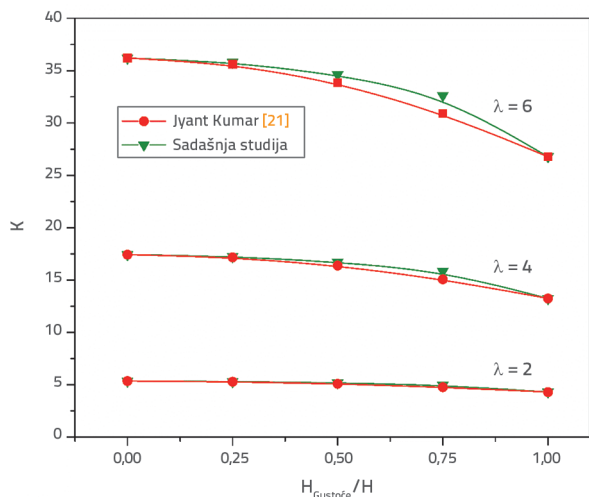
U Rangari i sur. [32] te u svrhu ovog istraživanja korištena je Kötterova jednadžbu za predviđanje nosivosti na izvlačenje. Mala razlika uočena u tablici 2. može se pripisati doprinosu pasivnog otpora unutarnjeg klina tla, pri čemu se smatra da je kontaktni kut trenja sa zidom ( $\delta = 2\phi/3$ ). Rangari i sur. [32] utvrdili su nešto veću nosivost na izvlačenje nego u ovom istraživanju.

#### 4.1.2. Validacija za dvoslojno tlo iz literature

Kako bi se potvrdila točnost predmetne analize, vrijednosti faktora izvlačenja ( $K$ ) dobivenih ovim istraživanjem uspoređene su s rezultatima gornje granice Kumara [21] na temelju pretpostavke linearnog mehanizma sloma, kao što je prikazano na slici 4. Treba napomenuti da je ova analiza provedena u okviru granične ravnoteže. Budući da nisu provedena sveobuhvatna istraživanja o nosivosti sidara uslijed uzgona u slojevitom tlu upotrebom pristupa granične ravnoteže, validacija je provedena upotrebom dostupne metode analize gornje granične vrijednosti [21].

Vrijedi naglasiti da metoda gornje granične vrijednosti zahtijeva kinematički prihvatljiv mehanizam sloma, nakon čega slijedi optimizacija kako bi se dobila najmanja gornja granica. Međutim, granična ravnoteža ne zahtijeva rigoroznu optimizaciju. Rezultati dobiveni u ovom istraživanju vrlo su bliski onima dobivenim u Kumara [21], što upućuje na to da

sadašnji pristup granične ravnoteže točno simulira uvjete dvoslojnog pijeska bez rigoroznih izračuna potrebnih za analizu gornje granice.



Slika 4. Usporedba faktora izvlačenja iz ovog istraživanja s analizom gornje granične vrijednosti Jyanta Kumara [21] za trakasto sidro, gdje je gornji sloj rahli, a donji zbijeni

### 4.2. Homogeno nekoherentno tlo

U ovom se poglavlju validira predložena formulacija. Izraz (14) može se upotrijebiti za procjenu faktora izvlačenja (K) za uslojeni pješčani profil. Međutim, formulacija se pojednostavljuje na isti analitički izraz za izračun vrijednosti K za trakasto sidro ukopano u homogeni pijesak ako su gornji i donji sloj identični, kako je prikazano u nastavku:

$$\phi_T = 0, \phi_B = \phi \text{ and } \gamma_T = 0, \gamma_B = \gamma \tag{15a}$$

$$\phi_T = \phi, \phi_B = 0 \text{ and } \gamma_T = \gamma, \gamma_B = 0 \tag{15b}$$

Kao što je prikazano u izrazu (13), sila izvlačenja (P<sub>v</sub>) ovisi o nekoliko parametara. Stoga je provedena optimizacijska analiza kutova sloma za različite raspone parametara navedenih u tablici 3. U sljedećim se poglavljima raspravlja o učincima područja

sloma, kuta trenja tla, koeficijenta ukopanosti i orijentacije sidrene šipke u odnosu na homogeno nekoherentno tlo pomoću izraza (15a) i (15b).

Tablica 3. Raspon parametara variranih u analizama

Parametri	Raspon vrijednosti
Nagib sile izvlačenja, β°	0° do <math>\phi^\circ</math>
Kut trenja tla, φ°	20°, 30°, 40°
Koeficijent ukopanosti, H/b, λ	2, 4, 6
Omjer težina, γ <sub>T</sub> / γ <sub>B</sub>	1,5; 1,25; 1; 0,75; 0,5
H <sub>dense</sub> / H	0; 0,25; 0,5; 0,75; 1

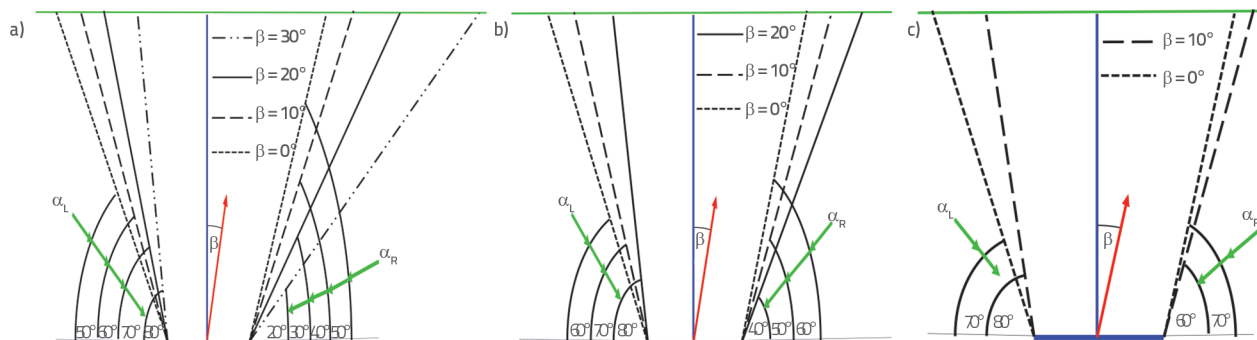
#### 4.2.1. Površine sloma

Prema istraživanju, na nagib površina sloma na desnoj i lijevoj strani sidra utječe orijentacija spojne šipke (β), što utječe na reakcije tla s obje strane sidra. Najveće vrijednosti izvlačenja postignute su nakon što je komponenta reakcije smanjena na nulu, što odgovara kutu površine sloma.

Zanimljivo je da koeficijent ukopanosti nije utjecao na nagib ravnine sloma ni uslijed kosog ni okomitog izvlačenja, kao što je prikazano u tablici 4. i na slici 5. Isto zapažanje potvrđuju predviđanja navedena u [12, 30, 32] za koso izvlačenje.

#### 4.2.2. Učinak kuta trenja tla (φ)

Kao što je prikazano na slici 6, faktor izvlačenja (K) stalno se povećava s povećanjem kuta trenja tla (φ) za različite koeficijente ukopanosti (λ). Na primjer, ako se kut trenja poveća s 20° na 40°, faktor okomitog izvlačenja pri koeficijentu okomitosti od λ = 4, povećava se za 77,4 %, kako je prikazano na slici 6.a. Slično povećanje faktora izvlačenja može se uočiti na slici 6.b, gdje postotak povećanja kosog faktora izvlačenja pri kutovima β = 10° i λ = 4 iznosi oko 81 %. Može se opravdano reći da se K također povećava s povećanjem φ i β, za dani koeficijent ukopanosti λ. Stoga se izvlačenje sidara može značajno poboljšati optimizacijom kuta nagiba zajedno s parametrima tla. Utvrđeno je da je povećanje faktora kosog izvlačenja veće za zbijeni pijesak zbog povećanja zone sloma. Osim toga, nagnuti

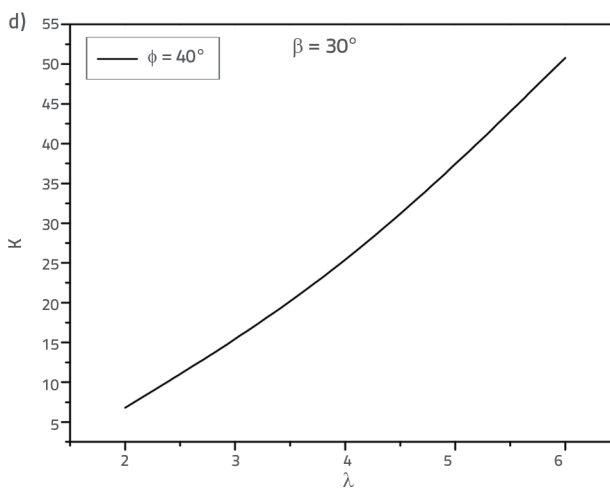
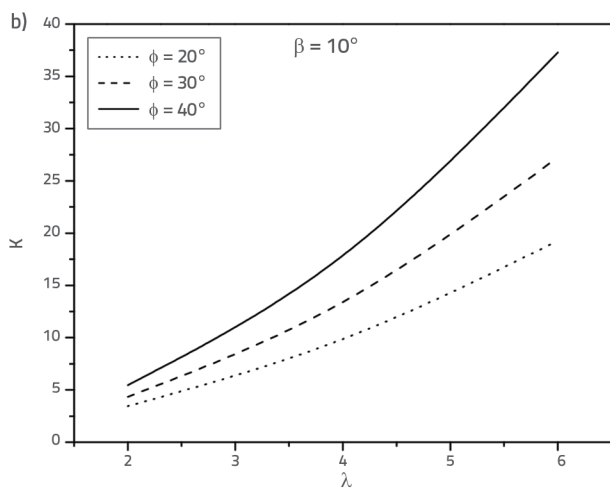
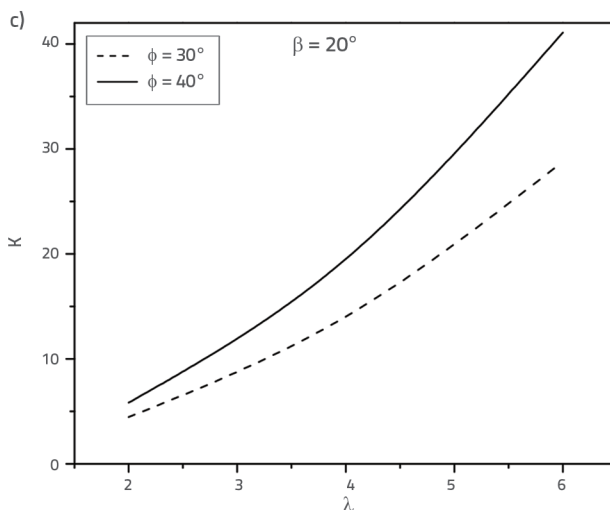
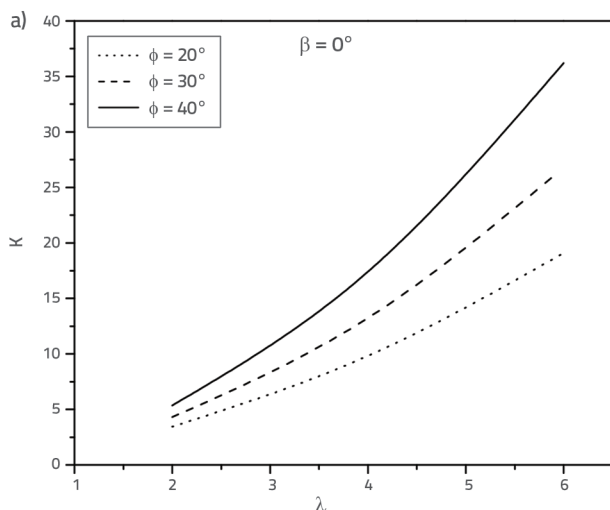


Slika 5. Geometrijski prikaz kuta loma za koeficijent ukopanosti (λ = 2, 4 i 6) za različite kutove trenja: a) φ = 40°; b) φ = 30°; c) φ = 20°

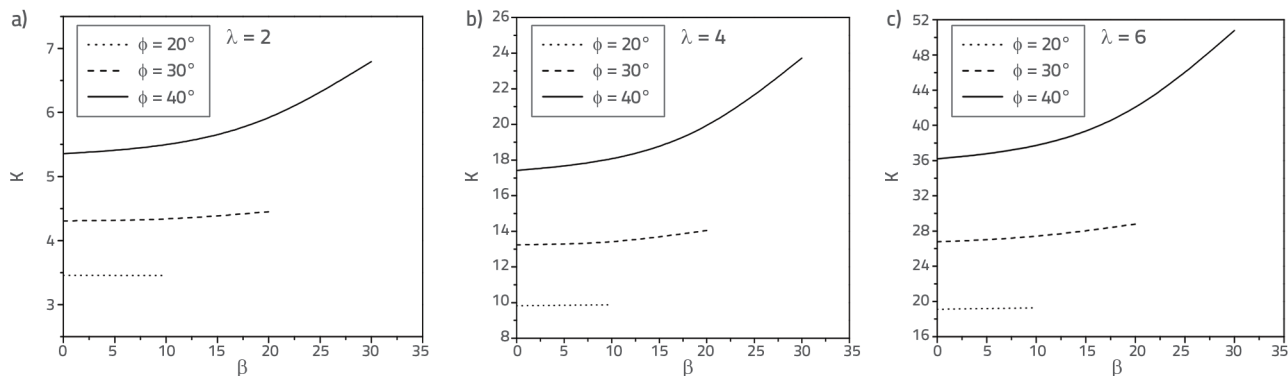


Tablica 4. Kutovi sloma i faktor izvlačenja za različite koeficijente ukopanosti

Ser. br.	$\phi$ [°]	$\lambda = 2$				$\lambda = 4$				$\lambda = 6$			
		$\beta$ [°]	$\alpha_R$ [°]	$\alpha_L$ [°]	K	$\beta$ [°]	$\alpha_R$ [°]	$\alpha_L$ [°]	K	$\beta$ [°]	$\alpha_R$ [°]	$\alpha_L$ [°]	K
1	20	0	70	70	3,455	0	70	70	9,822	0	70	70	19,101
2	20	10	60	80	3,454	10	60	80	9,877	10	60	80	19,269
3	30	0	60	60	4,308	0	60	60	13,235	0	60	60	26,78
4	30	10	50	70	4,339	10	50	70	13,417	10	50	70	27,235
5	30	20	40	80	4,45	20	40	80	14,043	20	40	80	28,778
6	40	0	50	50	5,355	0	50	50	17,422	0	50	50	36,199
7	40	10	40	60	5,454	10	40	60	17,877	10	40	60	37,269
8	40	20	30	70	5,818	20	30	70	19,515	20	30	70	41,091
9	40	30	20	80	6,796	30	20	80	23,721	30	20	80	50,773



Slika 6. Varijacija faktora izvlačenja (K) s koeficijentom ukopanosti ( $\lambda$ ) za različite vrijednosti od  $\phi$ : a)  $\beta = 0^\circ$ ; b)  $\beta = 10^\circ$ ; c)  $\beta = 20^\circ$ ; d)  $\beta = 30^\circ$



Slika 7. Varijacija faktora izvlačenja ( $K$ ) s kosim kutom izvlačenja ( $\beta^\circ$ ) za različite kutove trenja ( $\phi$ ) za **a)**  $\lambda = 2$ ; **b)**  $\lambda = 4$ ; **c)**  $\lambda = 6$

položaj spojne šipke mogao bi imati povoljan učinak i dovesti do povećanja otpornosti na izvlačenje. Međutim, ovo zapažanje vrijedi samo do određenog kuta nagiba, odnosno kritičnog kuta nagiba izvlačenja, iznad kojeg opada nosivost na izvlačenje [30]. To se može pripisati odgovarajućoj promjeni kuta nagiba površine sloma udesno i ulijevo. Međutim, ovo je istraživanje ograničeno na  $\beta \leq \varphi$ , zbog čega se kritični kut nagiba ne navodi.

#### 4.2.3. Učinak koeficijenta ukopanosti ( $\lambda$ )

Koeficijent ukopanosti ( $\lambda$ ) ima važnu ulogu u određivanju nosivosti na izvlačenje sidra. Kako se koeficijent ukopanosti povećava, zona sloma oko sidra također se širi, što rezultira većom nosivost na izvlačenje trakastog sidra. Povećanje faktora izvlačenja zbog povećanja koeficijenta ukopanosti može se uočiti i u slučaju vertikalnog i kosog izvlačenja.

Na slici 6.a, faktor izvlačenja za  $\beta = 0^\circ$  povećava se za 4,5 puta kada koeficijent ukopanosti poraste s 2 na 6, pod kutom trenja tla ( $\phi$ ) od  $30^\circ$ . Slično, na slici 6.b, faktor kosog izvlačenja povećava se za 5,27 i 5,47 puta pri  $\beta = 10^\circ$  odnosno  $20^\circ$ , s istim povećanjem koeficijenta ukopanosti. Ova opažanja potvrđuju da povećanje koeficijenta ukopanosti dovodi do većeg izvlačenja kako se povećava zona sloma.

#### 4.2.4. Učinak orijentacije spojne šipke ( $\beta$ )

Na slici 7. može se vidjeti da se s povećanjem orijentacije spojne šipke ( $\beta$ ) povećava i faktor izvlačenja. To povećanje vjerojatno je posljedica toga da se, kako se orijentacija spojne šipke povećava, zona sloma na nagnutoj strani spojne šipke također se širi, što rezultira većom nosivost na izvlačenje. Međutim, važno je napomenuti da je nagib spojne šipke ograničen kutom trenja tla, što je svojstvo tla koje predstavlja najveći kut pod kojim se tlo može oduprijeti klizanju.

### 4.3. Slojevito nekoherentno tlo

Provedena je analiza kako bi se procijenila nosivost na izvlačenje horizontalnog trakastog sidra ukopanog u dva sloja. Rezultati analize prikazani su u obliku optimalnog faktora izvlačenja

( $K$ ) i optimalnih kutova sloma tla ( $\alpha_{RT}$ ,  $\alpha_{RB}$ ,  $\alpha_{LT}$  i  $\alpha_{LB}$ ). Faktor ( $K$ ) izračunan je za različite kombinacije slojeva tla:

**Slučaj a:** rahli sloj pijeska ( $\phi_T = 30^\circ$ ) iznad zbijenog sloja pijeska ( $\phi_B = 40^\circ$ ) pri  $\gamma_T \leq \gamma_B$

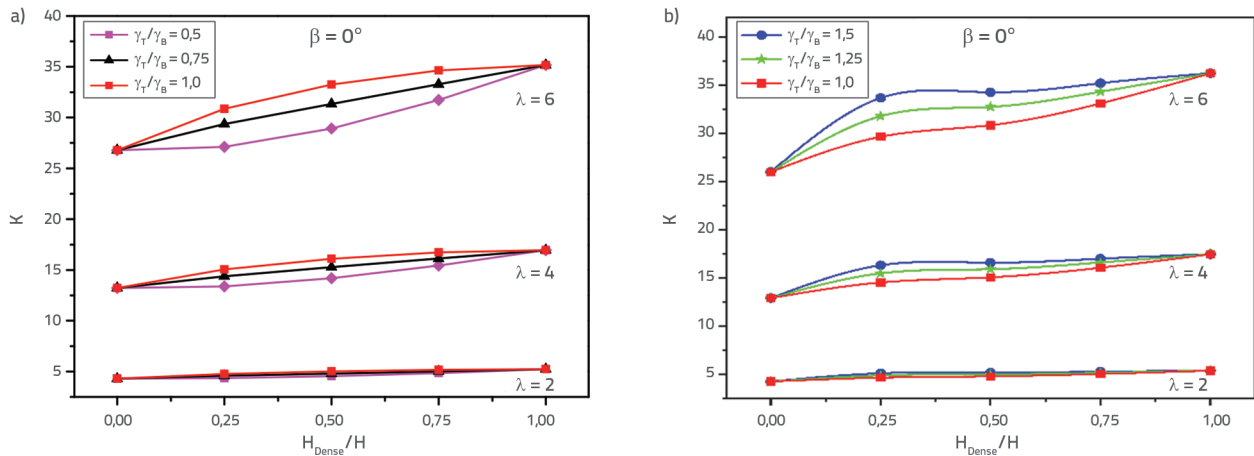
**Slučaj b:** zbijeni sloj pijeska ( $\phi_T = 40^\circ$ ) iznad rahlog sloja pijeska ( $\phi_B = 30^\circ$ ) pri  $\gamma_T \geq \gamma_B$

Smatra se da kut trenja sloja pijeska ponajprije ovisi o relativnoj zbijenosti jer gušći raspored čestica dovodi do veće relativne zbijenosti [33, 34]. Uklještenje čestica pijeska pod opterećenjem uzrokuje učinkovitije odupiranje daljnjem pomicanju, čime se povećava kut trenja.

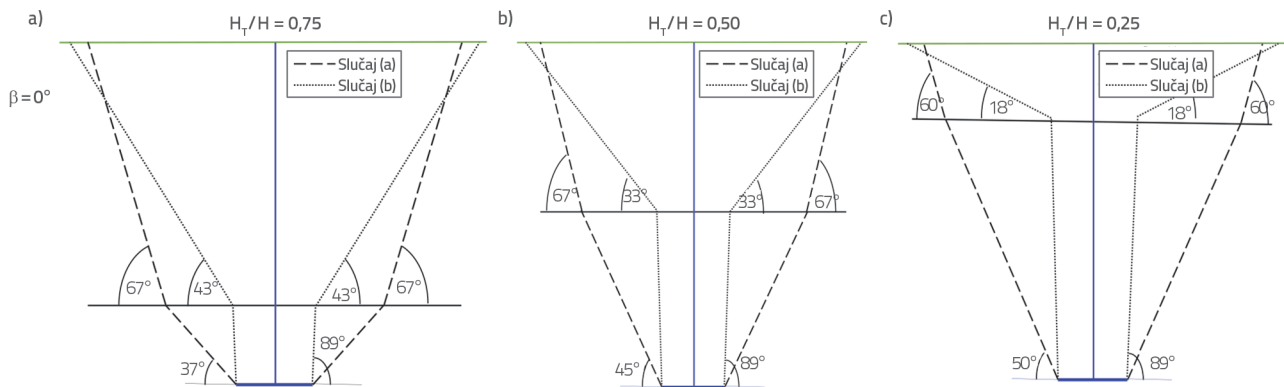
#### 4.3.1. Nosivost na izvlačenje sidra u slojevitom pijesku ( $\beta = 0^\circ$ )

Mora se napomenuti da je sila izvlačenja osjetljiva na debljinu zbijenog sloja. Dakle, debljina zbijenog sloja pijeska ( $H_{dense}/H$ ) smatra se dodatnim parametrom u ovoj analizi. Rezultati su prikazani na slikama 8(a) i 8(b) za slučajeve (a) i (b). Kao što se i očekivalo, može se primijetiti na slici 8(a) da faktor izvlačenja ( $K$ ) raste s povećanjem debljine donjeg zbijenog sloja pijeska. Za  $H_{dense}/H$  vrijednosti 0 i 1, koje predstavljaju ekstremne slučajeve bez zbijenog sloja pijeska i bez rahlog sloja pijeska, veličine faktora izvlačenja odgovaraju onima homogenog tla s kutovima trenja od  $30^\circ$  odnosno  $40^\circ$ , za slučaj (a) i obrnuto za slučaj (b). Veličina faktora izvlačenja ( $K$ ) raste s povećanjem debljine zbijenog sloja pijeska i s ukopanosti, bez obzira na slučajeve (a) i (b). Ovi rezultati pokazuju da relativni položaji dvaju slojeva značajno utječu na nosivost na izvlačenje trakastih sidara. Nakon što je sloj rahlog pijeska stavljen iznad zbijenog sloja pijeska, faktor izvlačenja ( $K$ ) značajno je porastao. Ovo povećanje može biti posljedica činjenice da zbijeni sloj pijeska pruža stabilnu osnovu za sidro, dok rahli sloj pijeska nudi veću površinu za slom, što dovodi do značajnog povećanja nosivosti na izvlačenje. Nadalje, razlika u veličini  $K$  između ova dva slučaja postala je očitija kako se povećavao omjer debljine zbijenog sloja pijeska i ukupne debljine ( $H_{dense}/H$ ), osobito kada su debljine gornjeg ( $H_T$ ) i donjeg ( $H_B$ ) sloja bili gotovo jednake. To znači da treba pažljivo razmotriti debljine i relativne položaje dvaju slojeva





Slika 8. Varijacija faktora okomitog izvlačenja ( $K$ ) pri  $H_{dense}/H$  za: a) Slučaj (a)  $\gamma_T \leq \gamma_B$ ; b) Slučaj (b)  $\gamma_T \geq \gamma_B$



Slika 9. Geometrijski prikaz kuta sloma za omjer ukopanosti ( $\lambda = 2, 4$  i  $6$ ) s  $\phi_T = 30^\circ$  i  $\phi_B = 40^\circ$  za: a)  $H_T/H = 0,75$ ; b)  $H_T/H = 0$ ; c)  $H_T/H = 0,25$

prilikom postavljanja sidrenog sustava. Ovo se može obuhvatiti istraživanjem površina sloma koje stvara sidro tijekom izvlačenja, kao što je prikazano na slici 9.

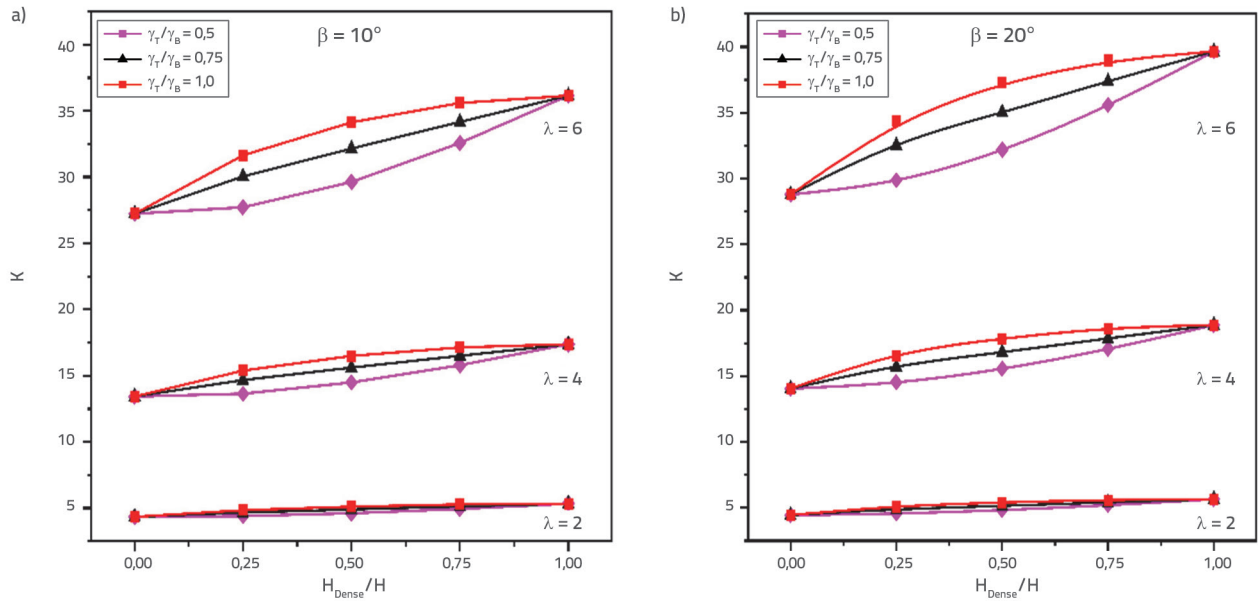
Slika 9 prikazuje usporedne površine sloma za najveći faktor izvlačenja u slučajevima (a) i (b). U slučaju (a), gdje se razmatra omjer rahlo – zbijeno tlo, vrijednost  $H_T/H$  (visina gornjeg sloja podijeljena s ukupnom dubinom ukopanosti) povećala se kako se kut sloma smanjivao za donji sloj, ali povećao za gornji sloj. Površine sloma su simetrične jer je izvlačenje okomito ( $\beta = 0^\circ$ ). Slika 9. ilustrira tipični uzorak sloma za slučaj (b), pokazujući na stvaranje ljevkastog udubljenja na površini. To pokazuje da je donji rahli sloj pijeska postao nestabilan i da je skliznuo u udubljenje, što je rezultiralo kaskadnim otkazivanjem gornjeg sloja u slučaju (b). Međutim, doprinos tla otporu sila izvlačenja bio je veći u slučaju (a), što je rezultiralo stabilnom zonom sloma.

#### 4.3.2. Koso izvlačenje sidra u slojevitom pijesku ( $\beta \neq 0^\circ$ )

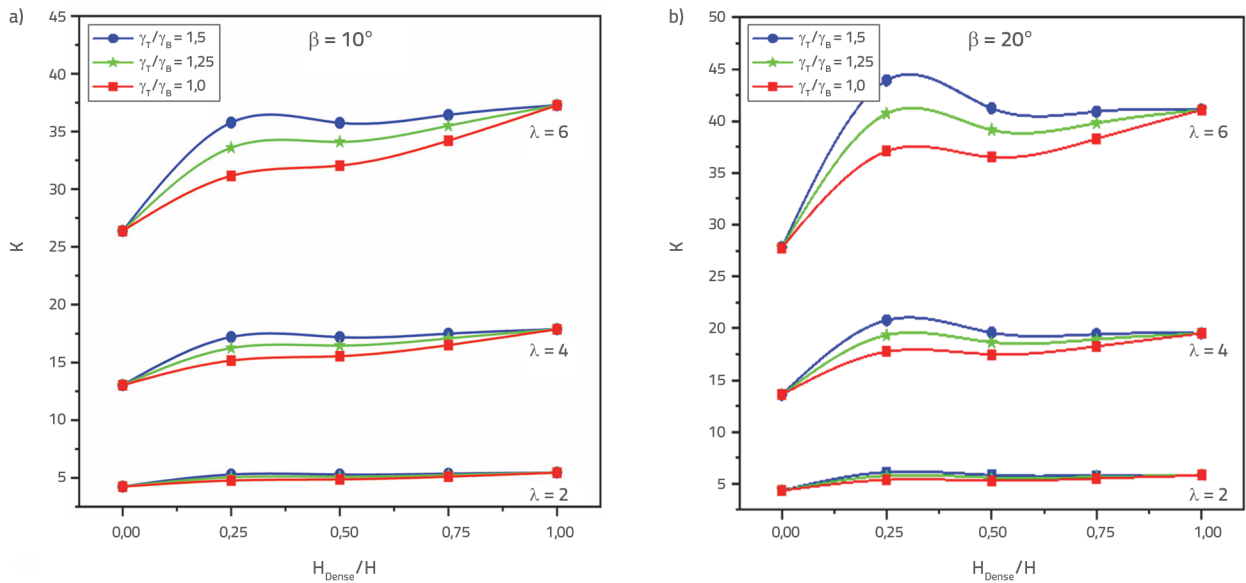
Slika 10. prikazuje krivulje za faktor izvlačenja ( $K$ ) i koeficijent ukopanosti u dvoslojni pijesak za slučaj (a) dobiven analizom granične ravnoteže. Prikazuje odnos između maksimalnog izvlačenja i omjera debljine donjeg zbijenog sloja i ukupne dubine

ugradnje ( $H_{dense}/H$ ), uzimajući u obzir kose kutove izvlačenja od  $10^\circ$  i  $20^\circ$ . Kao i u slučaju ponašanja uslijed okomitog izvlačenja, vrijednost  $K$  raste s povećanjem omjera  $H_{dense}/H$  (debljina zbijenog sloja prema ukupnoj dubini ukopanosti), što upućuje na sve veći faktor izvlačenja s povećanjem dubine zbijenog sloja. Slika 11. prikazuje krivulje koje prikazuju faktor izvlačenja u odnosu na omjer debljine zbijenog sloja i ukupne ukopanost ( $H_{dense}/H$ ) za slučaj (b). Faktor izvlačenja raste s vrijednostima  $H_{dense}/H$ . Dodatno, faktor izvlačenja raste s povećanjem nagiba, tj. orijentacije spojne šipke. Stoga koso izvlačenje ima pozitivan učinak na sidro, što dovodi do povećanja njegove nosivosti na izvlačenje.

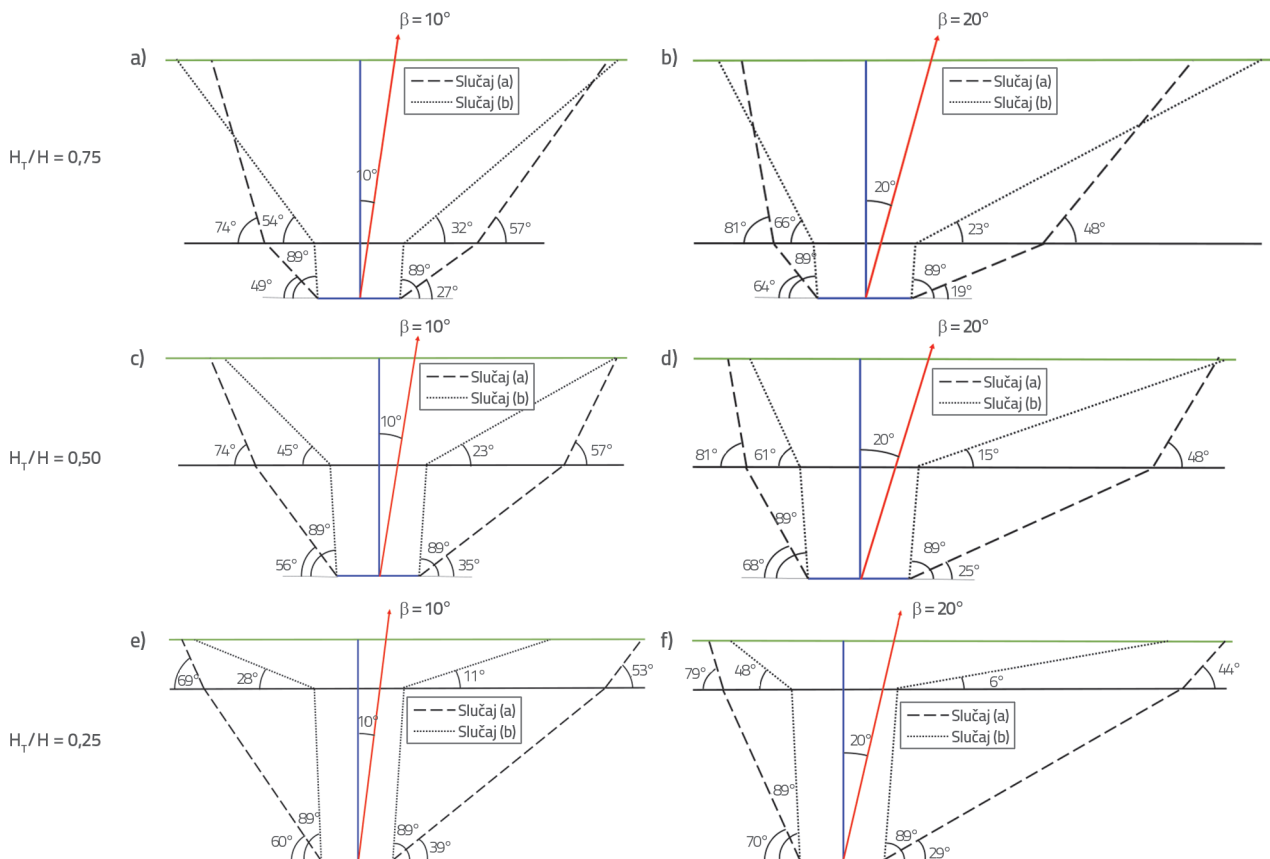
Slika 12. ilustrira geometrijske kutove sloma za različite koeficijente ukopanosti, uzimajući u obzir slučajeve (a) i (b). Za razliku od prethodnih pretpostavki drugih istraživača, kut sloma u ovom istraživanju određen je pri odgovarajućem najvećem faktoru izvlačenja. Slično slici 8, usporedba je bila usmjerena na kut sloma gornjeg sloja u odnosu na ukupnu dubinu ukopanosti ( $H_T/H$ ). Može se uočiti da se s povećanjem kuta sloma približava kutu nagiba. Slučaj (b) također je pokazao uzorak sloma ljevkastog oblika tijekom kosog izvlačenja. Međutim, slom tla nastao je u obliku klina u slučaju (a), kao što je razmatrano tijekom analize.



Slika 10. Varijacija faktora kosog izvlačenja ( $K$ ) sa  $H_{Dense}/H$  za Slučaj (a)  $\gamma_T \geq \gamma_B$ ; a)  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $\beta = 20^\circ$



Slika 11. Varijacija faktora kosog izvlačenja ( $K$ ) sa  $H_{Dense}/H$  za Slučaj (b)  $\gamma_T \geq \gamma_B$ ; a)  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $\beta = 20^\circ$



Slika 12. Geometrijski prikaz kuta sloma za koeficijent ( $\lambda = 2, 4, 6$ ): a)  $H_r/H = 0,75$  i  $\beta = 10^\circ$ ; b)  $H_r/H = 0,5$  i  $\beta = 10^\circ$ ; c)  $H_r/H = 0,25$  i  $\beta = 10^\circ$ ; d)  $H_r/H = 0,75$  i  $\beta = 20^\circ$ ; e)  $H_r/H = 0,5$  i  $\beta = 20^\circ$ ; f)  $H_r/H = 0,25$  i  $\beta = 20^\circ$

## 5. Zaključak

U ovom istraživanju je korištena metoda granične ravnoteže u kombinaciji s Kötterovom jednačbom za određivanje faktora izvlačenja i praćenje površine sloma koso opterećenih horizontalnih trakastih sidara u homogenim i uslojenim pijescima. Istraživanje je pokazalo da faktor izvlačenja raste s

nagibom izvlačenja i kod homogenog i kod dvoslojnog pijeska srednje zbijenosti. Predviđene vrijednosti također odgovaraju kutu sloma ravne površine, koji je promjenjiv s obzirom na nagib izvlačenja. Provedena je usporedba i validacija kako bi se pokazala točnost i pouzdanost predloženog pristupa za predviđanje nosivosti na izvlačenje koso opterećenih horizontalnih trakastih sidara.

## LITERATURA

- [1] Meyerhof, G.G., Adams, J.I.: The Ultimate Uplift Capacity of Foundations, Canadian Geotechnical Journal, 5 (1968) 4, pp. 225–244.
- [2] Rao, K.S.S., Kumar, J.: Vertical Uplift Capacity of Horizontal Anchors, Journal of Geotechnical Engineering, 120(1994) 7, pp. 1134–1147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:7\(1134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:7(1134))
- [3] Deshmukh, V.B., Dewaikar, D.M., Choudhury, D.: Analysis of Rectangular and Square Anchors in Cohesionless soil, International Journal of Geotechnical Engineering, 4 (2010) 1, pp. 79–87. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.01.79-87>
- [4] Deshmukh, V.B., Dewaikar, D.M., Choudhury, D.: Computations of Uplift Capacity of Pile Anchors in Cohesionless Soil, Acta Geotechnica, 5 (2010) 2, pp. 87–94. <https://doi.org/10.1007/s11440-010-0111-6>
- [5] Deshmukh, V.B., Dewaikar, D.M., Choudhury, D.: Uplift Capacity of Horizontal Strip Anchors in Cohesionless Soil, Geotechnical and Geological Engineering, 29 (2011) 6, pp. 977–988. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9430-0>
- [6] Dewaikar, D.M., Deshmukh, V.B.: Estimation of Uplift Capacity of Horizontal Plate Anchor in Sand, Global Journal of Researches in Engineering, 19 (2019) 4, pp. 19–37. <https://doi.org/10.34257/gjreevol19is4pg19>

- [7] Mors, H.: The behavior of mast foundations subjected to tensile forces, *Bautechnik*, 36 (1959) 10, 367–378.
- [8] Downs, D.I., Chieurzzi, R.: Transmission tower foundations. *J. Power, Div. ASCE*, 88 (2) 1966, pp. 91–114.
- [9] Matsuo, M.: Study on the uplift resistance of footing (I), *Japanese Soc. Soil Mechanics & Foundation Engineering, Soils and Foundations*, 7 (1967) 4, pp. 1–37.
- [10] Veesaert, C.J., Clemence, S.P.: Dynamic pullout resistance of anchors, *Proc. Int. Symp. Soil-Structure Interaction, Rourkee, India*, 1 (1977), pp. 389–397.
- [11] Kumar, J., Kouzer, K.M.: Vertical Uplift Capacity of Horizontal Anchors using Upper Bound Limit Analysis and Finite Elements, *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (2008) 5, pp. 698–704, <https://doi.org/10.1139/T08-005>
- [12] Das, B.M., Seeley, G.R.: Inclined load resistance of anchors in sand, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 2 (1975) (GT9), 995–1003.
- [13] Murray, E.J., Geddes, J.D.: Uplift of Anchor Plates in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113 (1987) 3, pp. 202–215.
- [14] Liu, J., Liu, M., Zhu, Z.: Sand Deformation Around an Uplift Plate Anchor, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (2012) 6, pp. 728–737, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000633](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000633)
- [15] Chow, S.H., Le, J., Forsyth, M., O'Loughlin, C.: Capacity of Vertical and Horizontal Plate Anchors in Sand Under Normal and Shear Loading, *Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference of Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG2018)*, pp. 559–564, 2018 <https://doi.org/10.1201/9780429438660-82>
- [16] Zhuang, P., Yue, H., Song, X., Sun, R., Wu, J., Guan, Y.: Ultimate Pullout Capacity of Single Vertical Plate Anchors in Sand, *Marine Georesources and Geotechnology*, (2021), pp. 1–19, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1950247>.
- [17] Ilamparuthi, K., Dickin, E.A., Muthukrisnaiah, K.: Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (2002) 3, 648–664, <https://doi.org/10.1139/t02-005>.
- [18] Dickin, B.E.A.: Uplift Behaviour of Horizontal Anchor, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (1988) 11, pp. 1300–1317
- [19] Khatri, V.N., Kumar, J.: Effect of Anchor Width on Pullout Capacity of Strip Anchors in Sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (2011) 3, pp. 511–517, <https://doi.org/10.1139/T10-082>
- [20] Bhattacharya, P., Kumar, J.: Uplift Capacity of Anchors in Layered Sand Using Finite-Element Limit Analysis: Formulation and Results, *International Journal of Geomechanics*, 16 (2016) 3, pp. 04015078-1-15, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000560](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000560)
- [21] Kumar, J.: Uplift Resistance of Strip and Circular Anchors in a Two Layered Sand, *Soils and Foundations*, 43 (2003) 1, pp. 101–107, <https://doi.org/10.3208/sandf.43.101>
- [22] Ghosh, P.: Seismic Vertical Uplift Capacity of Horizontal Strip Anchors using Pseudo-Dynamic Approach, *Computers and Geotechnics*, 36 (2009) 1–2, pp. 342–351, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.01.002>
- [23] Sahoo, J.P., Kumar, J.: Vertical Uplift Resistance of Two Horizontal Strip Anchors with Common Vertical Axis, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6 (2012) 4, pp. 485–495, <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.04.485-495>.
- [24] Bhattacharya, P., Kumar, J.: Vertical Pullout Capacity of Horizontal Anchor Plates in the Presence of Seismic and Seepage Forces, *Geomechanics and Geoengineering*, 9 (2014) 4, pp. 294–302, <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.902116>
- [25] Sahoo, J.P., Ganesh, R.: Vertical Uplift Resistance of Rectangular Plate Anchors in Two Layered Sand, *Ocean Engineering*, 150 (2018), pp. 167–175, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.056>
- [26] Kumar, J., Rahaman, O.: Vertical Uplift Resistance of Horizontal Plate Anchors for Eccentric and Inclined Loads, *Canadian Geotechnical Journal*, 56 (2019) 2, pp. 290–299, <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0515>.
- [27] Kötter, F.: Die Bestimmung des Drucks an gekrümmten Gleitflächen, eine Aufgabe aus der Lehre vom Erddruck, *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Berlin*, pp. 229–233, 1903, urn:nbn:de:hebis:30-1124329
- [28] Rangari, S.M., Choudhury, D., Dewaikar, D.M.: Pseudo-Static Uplift Capacity of Horizontal Strip Anchors, *Geo-Frontiers*, (2011), pp. 1821–1831, [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)186](https://doi.org/10.1061/41165(397)186)
- [29] Rangari, S.M., Choudhury, D., Dewaikar, D.M.: Pseudo-Static Uplift Capacity of Obliquely Loaded Horizontal Strip Anchor in Cohesionless Soil, *GeoCongress © ASCE 2012*, pp. 185–194, <https://doi.org/10.1061/9780784412121.02>
- [30] Rangari, S.M., Choudhury, D., Dewaikar, D.M.: Computations of Seismic Passive Resistance and Uplift Capacity of Horizontal Strip Anchors in Sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31 (2013) 2, pp. 569–580, <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9609-z>
- [31] Rangari, S.M., Choudhury, D., Dewaikar, D.M.: Estimation of Seismic Uplift Capacity of Horizontal Strip Anchors using Pseudo-Dynamic Approach, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17 (2013) 5, pp. 989–1000, <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0046-1>
- [32] Rangari, S.M., Choudhury, D., Dewaikar, D.M.: Seismic uplift capacity of shallow horizontal strip anchor under oblique load using pseudo-dynamic approach, *Soils and Foundations*, 53 (2013) 5, pp. 692–707, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.007>
- [33] Ching, J., Guan-Hong Lin, Jie-ru Chen, and Kok-Kwang Phoon: Transformation models for effective friction angle and relative density calibrated based on generic database of coarse-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 54 (2017) 4, pp. 481–501, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0318>
- [34] Mujtaba, H., Farooq, K., Sivakugan, N., Das, B.M.: Evaluation of Relative Density and Friction Angle Based on SPT-N Values, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (2018) 2, pp. 572–581, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1899-5>